

Research Article

Open Access

폐금속광산 하류 농토양의 중금속에 대한 인체흡수도 평가

김민경, 홍성창, 김명현, 최순군, 이종식, 소규호, 정구복*

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Assessment of Human Bioavailability Quotient for the Heavy Metal in Paddy Soils Below Part of the Closed Metalliferous Mine

Min-Kyeong Kim, Sung-Chang Hong, Myung-Hyun Kim, Soon-Kun Choi, Jong-Sik Lee, Kyu-Ho So and Goo-Bok Jung* (Climate Change & Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Science, Wanju 55365, Korea)

Received: 20 January 2015 / Revised: 24 June 2015 / Accepted: 12 August 2015

Copyright © 2015 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: For the heavy metal contamination sites, it is very important to estimate the human bioavailability quotients for heavy metals in paddy soils released from mine tailings, which is a major source of contamination in Korea, and to assess the human health risks of heavy metals.

METHODS AND RESULTS: This experiment was carried out to investigate the human bioavailability quotient of the heavy metals in paddy soils below part of the closed metalliferous mine. For estimating the human bioavailability quotients for heavy metals, 30 paddy soils below part of the closed mine were collected, and analyzed for Cd, Cu, Pb, Zn, and As using simple bioavailability extraction test(SBET). The quantities of Cd, Cu, Pb, Zn and As extracted from paddy soils below part of the mine by using the SBET analysis were 28.1, 17.3, 34.1, 14.6 and 2.3% respectively. Specially, the maximum values of Cd, Pb and Zn were 73.3, 81.5 and 58.1% of human bioavailability quotient, respectively, and varied considerably among the sampling sites. The human bioavailability quotient of Cd, Cu, Pb and Zn in soils near the closed mine showed significant positive correlation among soil pH value, O.M.

and Ex. Ca. contents, while it correlated negatively between soil Ex. K and Ex. Mg contents in paddy soils. Also, its of Cd, Cu, Pb and Zn in paddy soils showed significant positive correlation with 0.1M HCl extractable and total contents, while in soils, it correlated negatively with As content in soil near the closed mine.

CONCLUSION: The results of the simple bioavailability extraction test (SBET) indicate that regular ingestion of soils by the local population could be closed a potential health threat due to long-term heavy metals exposure in these mine areas.

Key words: Bioavailability, Closed metalliferous mine, Heavy metal, Paddy soil, SBET

서론

우리나라의 금속광산은 1980년대 이후 품위저하와 채산성 악화로 인하여 대부분 폐광된 상태로 1,000여개 이상이 전국에 산재되어 있는 것으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2008). 금속광산은 지하에 있는 광석을 채굴하여 선광·제련과정 후 남은 광산폐기물 및 품질이 낮은 광석을 광산 주변에 야적함으로써 2차 환경오염의 원인이 된다. 환경부의 토양환경보전법이 1995년에 제정되면서 폐금속광산 주변에 대한 토양, 수질 환경조사와 더불어 실질적인 복원

*Corresponding author: Goo-Bok Jung
Phone: +82-63-238-2500; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: gbjung@korea.kr

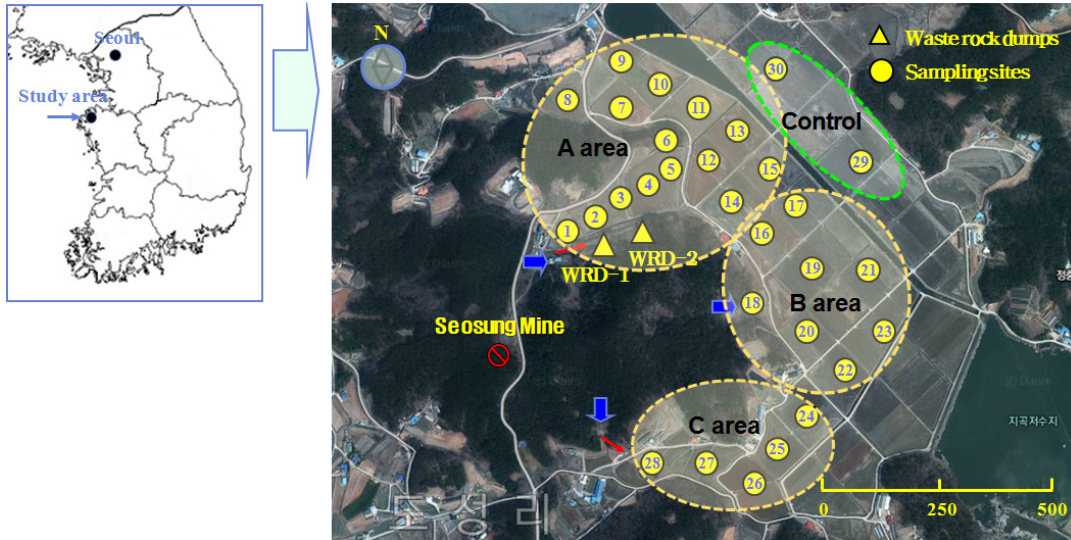


Fig. 1. Study area and sampling locations of the closed metalliferous mine.

대책이 실시되었다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고, 폐광 후 적절한 광해방지 시설이 없는 지역에서는 광산폐기물 침출수 및 갭내수가 발생하여 하류 수계와 토양 오염의 원인이 된다(Lee and Chon, 2004; Jung et al., 2004; Lee et al., 2005). 또한 폐광산 주변 토양의 중금속 오염정도와 환경위해성은 광산 유형, 선광방법에 의해 좌우되는 광미의 오염 특성, 주변의 지형-지질-수리학적 특성, 그리고 토양의 이화학적 특성과 관련성이 높은 것으로 알려져 있다(Jung et al., 2004; Jung et al., 2008; Jung et al., 2012).

최근에는 토양 중금속의 오염지수, 부화계수 및 지화학적 농축계수를 활용한 상대적인 오염상태 해석과 더불어 토양 내 독성 중금속들의 인체위해성 연구도 활발하게 진행되고 있다.(Ruby et al., 1996; Lee et al., 2006; Ettler et al., 2012; Jung et al., 2012). 이러한 상대적인 지수 값들은 중금속 오염의 동식물의 영향, 독성 및 오염등급을 간접적으로 설명하는데 유용한 자료가 될 수 있다.

본 연구에서는 중금속 오염토양의 인체위해성을 살펴보기 위해서 충남 서산에 위치한 Pb-Zn 폐광산 하류의 논토양 30 지점을 대상으로 SBET(Simple Bioavailability Extraction Test)분석을 실시하여 지역 주민들의 위에서 흡수되는 중금속의 인체흡수도(Bioavailability)를 평가하였다. 또한 토양 중금속의 인체흡수도에 영향을 주는 요인을 밝히기 위하여 토양의 화학성 및 중금속 함량과의 관련성을 분석·검토하였다.

재료 및 방법

연구지역

연구대상은 일체시대부터 개발된 광산지역으로 충남 서산시 지곡면에 위치하며, 폐광된 시기는 알려지지 않고 있다. 주요 광종은 납, 아연, 금, 은으로 광산 일대의 지질은 선캄브리아기의 백운모편암과 이에 협재하는 결정질 석회암으로 구

성된다(Hwang et al., 2000). 광상은 석회암내의 판상으로 저온 내지 중온성 열수교대와 맥상 광상으로 채광량은 납 4,199톤, 아연 2,209톤으로 알려져 있다. 과거에는 주변의 광산폐기물이 10,000m³ 정도 있었으나 현재는 복원사업이 완료된 상태이다. 토양의 대표적인 광물 조성은 철백운석, 능철석, 석영, 운모, 카오린 군의 점토광물 및 미량의 녹니석과 각섬석 등이 나타났다. 폐석의 연마편을 관찰한 결과, 함연·아연광물인 방연석과 섬아연석이 주로 괴상으로 산출되는 것으로 알려져 있다(Hwang et al., 2000)

시료채취 및 분석방법

연구대상 지역 주변의 광산폐기물은 2개소[WRD(Waste rock dumps)-1, WRD-2]에 적치되어 있으며, 토양시료 채취는 2006년 3월에 Fig. 1과 같이 3개 지역으로 구분하여 채취하였다. 채취지역은 광산으로부터 직접 영향을 받고 광산폐기물이 위치한 A지역, 그리고 침출수에 의한 영향으로 볼 수 있는 중간 B지역과 광미장 반대편에 위치한 C지역으로 구분하였다. 시료채취 점수는 총 30지점으로 A지역에서 15지점(시료 1~15), B지역에서 8지점(시료 16~23), C지역에서 6지점(시료 24~28)을 채취하고, 대조토양으로 2개 지점(시료 29~30)을 채취하였다. 토양 시료채취는 분석에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 유기물을 거른 후 표토(0~20 cm) 5개 지점을 핸드 오거드릴을 이용하여 채취한 후 혼합하여 분석용 시료로 사용하였다. 토양시료는 자연건조 후 전기오븐(105°C)에서 하루 이상 건조시킨 다음 2 mm 입도로 체질하여 1차로 통과시켜 화학성분 분석용 시료로 사용하였다, 또한 중금속 분석용 시료는 다시 마노 유발을 이용하여 150 mesh 이하로 분쇄하여 사용하였다(Ministry of Environment, 2010).

토양의 화학성분 함량은 농촌진흥청 토양화학분석법(Rural Development Administration-National Academy of Agricultural Science, 2010)에 준하여 토양 pH는 토양

Table 1. Chemical properties in paddy soils below part of the closed metalliferous mine.

Parameters	pH	Organic Matter	Av.P ₂ O ₅	Ex.Cations (Cmol ⁺ /kg)		
	(1:5)	(g/kg)	(mg/kg)	K	Ca	Mg
Mean	6.40	18.3	43.3	1.23	6.55	3.95
Min.	5.20	2.2	8.5	0.50	3.50	1.64
Max.	7.69	35.8	481.6	2.04	10.42	6.67
Optimum ¹⁾	6.0~6.5	25~30	80~120	0.25~0.30	5.0~6.0	1.5~2.0
Soils ²⁾	5.90	26.0	131.0	0.30	5.10	1.30

¹⁾The optimum level of soil chemical properties in paddy soils(Rural Development Administration-National Academy of Agricultural Science, 2011).

²⁾The chemical properties of paddy soils in Korea(Rural Development Administration-National Academy of Agricultural Science, 2011).

Table 2. Average contents of 0.1M HCl extractable and total heavy metal in soils below part of the closed metalliferous mine.

Analytical methods	Contents of heavy metal in soil(mg/kg)				
	Cd	Cu	Pb	Zn	As ¹⁾
0.1M HCl extractable	3.65 (0.08~19.07)	12.7 (2.4~49.5)	330 (7~2,848)	157 (5~160)	2.08 (0.50~13.58)
Total content	8.88 (2.97~32.48)	56.7 (14.3~123.2)	809 (33~4,453)	754 (67~3,208)	37.9 (6.6~123.1)

¹⁾0.1M HCl extractable

과 증류수의 비를 1:5로 하여 30분간 진탕한 후 pH-meter (ORION R, EA-940, USA)로 측정하였다. 또한 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1N-NH₄OAc (pH 7.0) 침출법으로 분석하였다. 토양의 중금속 가용성 함량은 환경부의 구 토양오염공정시험법에 준하여 토양시료 10g을 취하여 0.1M-HCl 용액 50 ml (As의 경우 1M-HCl)를 가한 다음 30°C에서 1시간 진탕한 후 여과하여 분석용 시료로 사용하였다. 또한 토양내 중금속 전함량 분석은 마이크로웨이브 전처리 장비(Mars-X, CEM Corporation, USA)를 이용하여 시료 0.5 g을 마이크로웨이브 vessel에 취하여 분해액인 황수(HNO₃:HCl=1:3) 12 mL를 각각 가한 다음 분해하여 분석용 시료로 사용하였다(Ministry of Environment, 2010; US-EPA, 1997). 본 연구에서 전처리된 토양의 화학성분 및 중금속 분석은 ICP-OES (Inductively coupled plasma optical emission spectrometry, GBC Integra-XMP, Australia) 및 ICP-MS(Inductively coupled plasma mass spectrometry, Hewlett Packard, Agilent 7500cs, USA)를 이용하여 정량하였다.

Table 1과 Table 2는 토양 중금속별 인체흡수도에 영향을 주는 요인을 평가하기 위하여 분석한 화학성분 및 중금속 함량을 나타낸 것이다. 토양의 화학성분(Table 1)은 우리나라 논토양의 평균치인 pH 5.9, OM 26.0 g/kg, Av.P₂O₅ 131 mg/kg, Ex.K 0.3, Ex.Ca 5.1, Ex.Mg 1.3 Cmol⁺/kg (RDA-NAAS, 2011)과 비교하여 pH 값 및 양이온 함량이 높았으며, 유기물과 유효인산 함량은 낮은 경향을 보였다. 또

한, 화학성분 중 pH 값 및 치환성 칼슘함량 최고치가 각각 7.69, 10.42 Cmol⁺/kg로 매우 높게 나타났다. 토양 중의 0.1M HCl 침출성 Cd, Cu, Pb, Zn 및 As 함량(Table 2)은 각각 3.65, 12.7, 330, 157, 2.08 mg/kg이었으며, 시료채취 지점간 농도 편차가 큰 것을 알 수 있었다. 또한, 토양 내 Cd, Pb, Zn 및 As 전함량 평균치는 토양환경보전법(Ministry of Environment, 2013)의 토양오염 우려기준(Cd 4, Cu 150, Pb 200, Zn 300, As 25 mg/kg)을 초과하였다.

토양 중금속의 인체흡수도 평가

폐금속광산 지역에 거주하는 주민들의 위(stomach)에서 흡수되는 독성 중금속들의 인체흡수도를 정량적으로 평가하기 위하여 SBET (Simple Bioavailability Extraction Test) 분석을 실시하였다. 이 분석방법은 Ruby *et al.* (1993, 1996, 1999)에 의해 제시되고 발달된 PBET (Physiologically Based Extraction Test) 분석방법을 영국지질조사소에서 단순화하여 개발한 것으로 본 연구에서 이용한 구체적인 분석절차는 다음과 같다. ① 인공위산(synthetic stomach solution)을 제작하기 위하여 글리신(glycine) 60.06 g에 증류수를 넣어 2 L의 추출용액을 만든다. ② 제작된 인공위산은 인체의 위의 pH와 맞추기 위해 37°C로 유지되고 있는 수조 안에서 염산(HCl)를 사용하여 pH를 1.5에 맞춘다. ③ HDPE (High density polyethylene) 시료용기에 80 mesh로 체질한 토양 시료 1.0 g과 pH 1.5로 맞춘 인공위산, 즉 추출용액 100 ml을 넣는다. ④ HDPE 시료용기의 뚜껑은 새지 않게 꼭 닫은

Table 3. Human bioavailability quotient of heavy metals by SBET(simple bioavailability extraction test) analysis in paddy soils below part of the closed metalliferous mine.

Basic statistics	Cd	Cu	Pb	Zn	As
----- Extracted concentration by the SBET ²⁾ analysis (mg/kg) -----					
Mean	3.87	11.6	385	233	0.58
Min.	0.06	1.6	5	3	0.02
Max.	19.68	36.8	2,328	1,857	2.23
S.D. ¹⁾	5.74	11.1	608	483	0.50
----- Bioavailability ³⁾ of heavy metals in soils (%) -----					
Mean	28.1	17.3	34.1	14.6	2.3
Min.	2.0	6.9	10.2	2.7	0.1
Max.	73.3	38.3	81.5	58.1	9.0
S.D.	24.6	8.1	19.9	15.4	1.7

¹⁾Standard deviation, ²⁾SBET; simple bioavailability extraction test. ³⁾Percentage ratio of SBET extractable against total content of heavy metals

후(폐쇄계 상태 유지), 수조내 회전반응기에 고정시켜서 인체의 온도와 같은 37°C가 유지되는 수조 안에 완전히 잠기도록 한다. ⑤ 수조내 회전반응기는 1시간 동안 30 rpm으로 회전시켜 반응이 일어나도록 한다. ⑥ 1시간 후에 시료용기를 수조에서 꺼내어 다시 pH를 측정하고, 반응이 완료된 시료용기로부터 분석하기 위한 용액을 주사기로 채취하고 필터를 사용하여 분석용 시험관으로 옮긴다. ⑦ ICP-OES (Inductively coupled plasma optical emission spectrometry) 기기를 이용하여 추출된 용액으로부터 Cd, Cu, Pb, Zn 및 As 성분을 정량하였다.

결과 및 고찰

토양 중금속의 인체흡수도 평가

토양 내 중금속의 인체위해성을 평가하기 위한 방법으로 중금속이 다량 함유된 토양을 무의식적으로 섭취하였을 때 인체의 위(stomach)와 같은 조건하에서 토양으로부터 용출되는 농도를 측정, 평가하는 실험이 개발되어 연구되고 있다. 본 실험에서는 Ruby *et al.* (1996)에 의해 제시된 PBET 방법을 단순화한 SBET 분석법을 적용하여 광산 지역에 거주하는 주민들이 무의식적으로 토양을 섭취하였을 때 독성 중금속들이 인체에 미칠 수 있는 위해성을 간접적으로 평가하고자 하였다. 강산성 환경 조건인 인체의 위(stomach)에서는 토양 내 독성 중금속들은 빠르게 용출되면서 인체로 흡수축적되어 건강상의 문제점을 야기시킬수 있다. 토양 중금속의 인체흡수도(Human bioavailability quotient)는 토양 내 중금속 총합량에 대한 인공위산 용액(SBET)으로 추출된 중금속 함량의 비를 백분율(%)로 환산하여 산출하였다.

서성 폐광광산 하류 농토양에 대한 중금속의 SBET 분석결과 및 인체흡수는 Table 3과 같다. SBET 인공위산에서 1시간 반응하여 추출된 중금속 평균 함량은 Table 2의

0.1M HCl 가용성 함량과 비교하면 Pb, Zn 성분이 높았으나 Cd 및 Cu 성분은 유사한 경향이였다. 토양 중금속의 인체흡수도 평균 값은 Pb>Cd>Cu>Zn>As 순으로 각각 34.1, 28.1, 17.3, 14.6 및 2.3%로 나타났다. 또한 인체흡수도 최고치도 Pb 81.5%, Cd 73.3%, Zn 58.1%로 매우 높아 인체에 흡수 가능성이 매우 크다고 할수 있다. 이와 관련하여 토양 내 중금속 인체흡수도는 폐광산 주변 농토양이 Cu>As>Pb>Zn>Cd, 밭토양 Cu>Pb>Zn>Cd>As(Lee and Chon, 2004), 도시공원 토양이 Cd>Cu>Pb>Zn>Ni(Luo *et al.*, 2012a), 도시 도로변 토양이 Pb>Ni>Cu>As(Wang *et al.*, 2002) 순위로 보고하여 오염원 및 중금속 종류에 따라 큰 편차를 보이는 것을 알수 있었다(Ettler *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2002). 또한 Lee *et al.* (2000)은 폐금속광산 주변 Cd, Cu, Pb, Zn 및 As의 인체흡수도가 농토양 15.9~65.4%로 나타나 밭토양 12.4~31.2%와 비교하여 상대적으로 높았다고 하였다.

Fig. 2은 서성광산 하류에 위치한 농토양의 채취지점별 중금속 인체흡수도 변화를 나타낸 것이다. 채취지점별 중금속의 인체흡수도 평균 값은 대체적으로 A>C>B>대조 지역 순으로 나타나 오염지역에 따라 큰 차이를 보였다. 또한 동일한 지역에서도 오염정도가 심한 Cd, Pb, Zn 성분은 채취지점별로 편차가 큰 것을 알수 있었다. 특히 Cd의 인체흡수도 값이 A지역 41.8%, C지역 26.7%와 비교하여 B지역이 9.6%로 상대적으로 매우 낮았는데, 이는 B지역에서 Cd 오염도가 낮아 기인한다고 볼 수 있다. 이와 관련하여 여러 보고(Lee and Chon, 2004; Kim *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006)에서 폐광산 종류와 광미, 논, 밭 등 오염대상에 따라 토양 중금속의 인체흡수도는 큰 차이를 보였다고 하였다. 또한 Wang *et al.* (2007)은 토양 중금속별 인체흡수도는 폐광산, 제련소, 도로변 등 오염원별, 그리고 채취지역과 지점에 따라 편차가 크다고 하였다(Ettler *et al.*, 2011). 이러한 중금속 오염의 편차

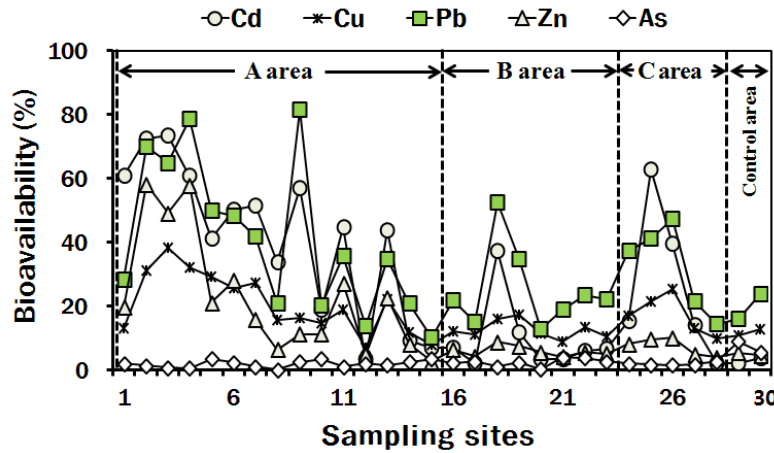


Fig. 2. Variations of human bioavailability quotient for heavy metals determined by the SBET(simple bioavailability extraction test) method at sampling site in paddy soils near the closed mine.

Table 4. The relationship between the chemical properties and human bioavailability quotient of heavy metal in paddy soils below part of the closed mine (n=30).

Chemical characteristics	Bioavailability of heavy metal in soil				
	Cd	Cu	Pb	Zn	As
pH (1:5)	0.526**	0.488**	0.375*	0.677***	NS
Organic Matter (g/kg)	0.584***	0.542**	0.535**	0.510**	-0.435*
Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	NS	NS	NS	NS	NS
Ex.K (Cmol ⁺ /kg)	-0.515**	-0.591***	-0.453**	-0.359*	0.501**
Ex.Ca (Cmol ⁺ /kg)	0.663***	0.578***	0.531**	0.703***	NS
Ex.Mg (Cmol ⁺ /kg)	-0.529**	-0.598***	-0.460**	-0.370*	0.514**

*, **, ***Significant at P=0.05, 0.01, 0.001 respectively, NS : Not significant.

는 광산 및 제련소별 광물종류 등이 다르고, 오염원에서 거리 별로 오염정도가 크게 차이를 보이는데 기인한다(Jung *et al.*, 2004).

중금속 인체흡수도와 관련 영향인자 분석

Table 4는 서성 폐금속광산 하류 논토양의 화학성분과 SBET 분석에 의한 중금속별 인체흡수도와와의 관계를 나타낸 것이다. 토양 중 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 인체흡수도는 pH 값, 유기물, 치환성 칼슘 함량과 정의 상관, 치환성 칼륨 및 마그네슘과는 부의 상관, 치환성 칼륨 및 마그네슘과는 정의 상관, 치환성 칼륨 및 마그네슘과는 정의 상관을 보였다. 이와 관련하여 Poggio *et al.* (2009)은 토양 중 Cu, Pb 및 Zn의 인체흡수도는 유기물 함량과 고도의 정의 상관을($r=0.69\sim 0.99$), 점토함량과는 고도의 부의 상관($r=-0.73\sim -0.96$)을 보였다고 하였다. 또한 기존의 연구(Lee *et al.*, 2005; Luo *et al.*, 2012a,b)에서 토양 중금속별 인체흡수도는 토성(입경분포)뿐만 아니라 토양 pH, EC 및 유기물 함량과의 관련성이 크다고 하였다. 이러한 경향치는 일반적으로 토양 내 이화학성이 중금속의 유효태 함량비율과 더불어

식물흡수도에 크게 영향을 주는 것과 같은 결과로 볼수 있다.

Table 5는 토양의 중금속 함량(0.1M HCl 침출성, 전함량)과 중금속별 인체흡수도와와의 관계를 나타낸 것이다. 토양 내 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 인체흡수도는 0.1M HCl 침출성, 그리고 총함량과 정의상관을, As성분은 부의 상관을 보였다. 특히 Zn의 인체흡수도는 상관계수가 0.1M HCl 침출성 함량($r=0.967$) 및 전함량($r=0.917$)에서 다른 성분보다 높게 나타났다. 이와 관련하여 Ettlter *et al.* (2012)은 광산 및 제련소 지역의 토양 내 Cu, Pb, Zn, As 인체흡수도는 중금속별 총함량과 고도의 정의 상관을 보였고, 오염원이 상이한 여러 보고(Wang *et al.*, 2007; Poggio *et al.*, 2009; Prathumratana *et al.*, 2010; Luo *et al.*, 2012b)에서도 토양 내 중금속별 인체흡수도는 총함량, 즉 각 중금속의 오염정도에 영향을 받는다고 하였다.

본 연구 결과에서 토양 중 Cd, Pb, Cu, Zn 및 As의 인체흡수도는 각각 28.1, 34.1, 17.3, 14.6, 2.3%였고, 특히 Cd, Pb 및 Zn의 인체흡수도 최고 값은 각각 73.3, 81.5, 58.1%로 매우 높게 나타났다. 따라서 폐광산 하류 논토양의 SBET 분석에 의한 중금속 인체흡수도를 볼 때 광산지역에 거주하는

Table 5. The relationship between the heavy metal contents and human bioavailability quotient of heavy metal in paddy soils below part at closed mine (n=30).

Heavy metal contents		Bioavailability of heavy metal in soil				
		Cd _{bio}	Cu _{bio}	Pb _{bio}	Zn _{bio}	As _{bio}
0.1M HCl extractable	Cd	0.817 ^{***}	0.776 ^{***}	0.703 ^{***}	0.905 ^{***}	-0.437 [*]
	Cu	0.678 ^{***}	0.613 ^{***}	0.613 ^{***}	0.552 ^{**}	-0.499 ^{**}
	Pb	0.469 ^{**}	NS	0.415 [*]	NS	-0.392 [*]
	Zn	0.753 ^{***}	0.742 ^{***}	0.698 ^{***}	0.967 ^{***}	-0.393 [*]
	As	0.701 ^{***}	0.581 ^{***}	0.559 ^{***}	0.789 ^{***}	-0.328
Total content	Cd	0.758 ^{***}	0.770 ^{***}	0.708 ^{***}	0.937 ^{***}	-0.430 [*]
	Cu	0.784 ^{***}	0.696 ^{***}	0.697 ^{***}	0.698 ^{***}	-0.539 ^{**}
	Pb	0.661 ^{***}	0.508 [*]	0.535 ^{**}	0.526 ^{**}	-0.488 ^{**}
	Zn	0.819 ^{***}	0.774 ^{***}	0.705 ^{***}	0.917 ^{***}	-0.455 ^{**}
	As	0.797 ^{***}	0.757 ^{***}	0.679 ^{***}	0.874 ^{***}	-0.477 ^{**}

^{*}, ^{**}, ^{***}Significant at P = 0.05, 0.01, 0.001 respectively, NS : Not significant.

주민들이 장기간 노출된다면 잠재적으로 건강상의 위해성이 있을 것으로 판단된다.

National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

요 약

폐금속광산 하류 토양의 중금속 인체위해성을 평가하기 위하여 Pb·Zn 폐광산 하류 농토양 30점을 대상으로 SBET (Simple Bioavailability Extraction Test) 분석하여 중금속의 인체흡수도(Human bioavailability quotient)를 평가한 결과는 다음과 같다.

토양 중 Cd, Cu, Pb, Zn 및 As의 인체흡수도는 각각 28.1, 17.3, 34.1, 14.6 및 2.3%로 나타났다. 특히 토양 중 Cd, Pb 및 Zn의 인체흡수도 최고치는 73.3, 81.5 및 58.1%로 매우 높았고, 채취지역 및 지점 간의 편차가 크게 나타났다. 토양 중 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 인체흡수도는 pH 값, 유기물, 치환성 칼슘 함량과 정의 상관을, 치환성 칼륨 및 마그네슘과는 부의 상관을 보였다. 또한 토양 내 As의 인체흡수도는 유기물과 부의 상관, 치환성 칼륨 및 마그네슘과는 정의 상관을 보였다. 토양 내 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 인체흡수도는 0.1M HCl 침출성, 그리고 총함량과 정의상관을, As성분과는 부의 상관을 보였다. 특히 Zn의 인체흡수도는 상관계수가 0.1M HCl 침출성함량($r=0.967$) 및 전함량($r=0.917$)에서 다른 성분보다 높게 나타났다. 이상의 결과에서 폐광산 하류 토양의 중금속 인체흡수도를 볼 때 광산지역에서 거주하는 주민들에게 장기간 노출된다면 건강상의 잠재적인 위해성이 있을 것으로 판단되었다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ010063)",

References

- Ettler, V., K íbek, B., Majer, V., Knésl, I., & Mihaljevi, M. (2012). Differences in the bioaccessibility of metals/metalloids in soils from mining and smelting areas (Copperbelt, Zambia). *Journal of Geochemical Exploration*, 113, 68-75.
- Hwang, E. H., Wee, S. M., Lee, P. K., & Choi, S. H. (2000). A study on the heavy metal contamination of paddy soil in the vicinity of the Seosung Pb-Zn mine. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 5(2), 67-85.
- Kim, J. Y., Kim, K. W., Lee, J. U., Lee, J. S., & Cook, J. (2002). Assessment of As and heavy metal contamination in the vicinity of Duckum Au-Ag mine, Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, 24(3), 213-225.
- Jung, G. B., Kwon, S. I., Hong, S. C., Kim, M. K., Chae, M. J., Kim, W. I., Lee, J. S., & Kang, K. K. (2012). Contamination assessment of water quality and stream sediments affected by mine drainage in the Sambo mine creek. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 31(2), 122-128.
- Jung, G. B., Lee, J. S., Kim, W. I., Ryu, J. S., & Yun, S. G. (2008). Monitoring of seasonal water quality variations and environmental contamination in the sambo mine creek, Korea. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 27(4), 328-336.
- Jung, M. C., Jung, M. Y., & Choi, Y. W. (2004).

- Environmental assessment of heavy metals around abandoned metalliferous mine in Korea. *Economic and Environmental Geology*, 37(1), 21-33.
- Lee, J. S., & Chon, H. T. (2004). Human risk assessment of toxic heavy metals around abandoned metal mine sites. *Economic and Environmental Geology*, 37(1), 73-86.
- Lee, J. S., Ben, A. K., & Yvette, M., Chon, H. T. (2000). Environmental Contamination and Bioavailability of Toxic Element around the Daduk Mine Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 33(4), 273-282.
- Lee, S. E., Lee, J. S., & Chon, H. T. (2005). Environmental contamination and bioavailability assessment of heavy metals in the vicinity of the Dogok Au-Ag-Cu mine. *Economic and Environmental Geology*, 38(2), 135-142.
- Lee, S. W., Lee, B. T., Kim, J. Y., Kim, K. W., & Lee, J. S. (2006). Human risk assessment for heavy metals and as contamination in the abandoned metal mine areas, Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119(1-3), 233-244.
- Luo, X. S., Ding, J., Xu, B., Wang, Y. J., Li, H. B., & Yu, S. (2012a). Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils. *Science of the Total Environment*, 424, 88-96.
- Luo, X. S., Yu, S., Li, X. D. (2012b). The mobility, bioavailability, and human bioaccessibility of trace metals in urban soils of Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 27(5), 995-1004.
- Poggio, L., Borut Vrš ajb, B., Schulina, R., Hepperlea, E., Marsanc, F. A. (2009). Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils in Grugliasco(Italy). *Environmental Pollution*, 157(2), 680-689.
- Prathumratana, L., Kim, K. W., Kim, J. W. (2010). Lead(Pb) Contamination of a historical mining and smelting site in europe: fractionation and human bioavailability. *Geosystem Engineering*, 13(1), 21-24.
- Ruby, M. V., Davis, A., Link, T. E., Schoof, R., Chaney, R. L., Freeman, G. B., Bergstrom, P. (1993). Development of an in vitro screening test to evaluate the in vitro bioaccessibility of ingested mine-waste lead. *Environmental. Science & Technology*, 27(13), 2870-2877.
- Ruby, M. V., Davis, A., Schoof, R., Eberle, S., Sellstone, C. M. (1996). Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. *Environmental. Science & Technology*, 30(2), 422-430.
- Ruby, M. V., Schoof, R., Brattin, W., Goldade, M., Post, G., Harnois, M., Mosby, D. E., Casteel, S. W., Berti, W., Carpenter, M., Edwards, D., Cragin, D. (1999). Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganic in soils for use in human health risk assessment. *Environmental. Science & Technology*, 33(21), 3697-3705.
- Wang, X. S., Qin, Y., Chen, Y. K. (2007). Leaching characteristics of arsenic and heavy metals in urban roadside soils using a simple bioavailability extraction test. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1-3), 221-226.