

광산인근 농토양의 중금속 분획화 및 유효도

정구복* · 김원일* · 유인수¹⁾

*농업과학기술원 환경생태과 · ¹⁾단국대학교 농과대학

Fractionation and Availability of Heavy Metals in Paddy Soils near Abandoned Mining Areas

Goo-Bok Jung*, Won-Il Kim*, and In-Soo Ryu¹⁾ (*National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, ¹⁾ College of Agriculture, Dankook University, Cheonan 300-714, Korea, E-mail: gbjung@rda.go.kr)

ABSTRACT : This study was conducted to compare fractionations and availability of heavy metal in paddy soils near five abandoned mining areas. The sequential extraction procedure was used to fractionate the heavy metals in soils into the designated from water soluble(H₂O), exchangeable(0.5M KNO₃), organically bound(0.5M NaOH), oxide/carbonate(0.05M Na₂-EDTA), and sulfide/residual(4M HNO₃). EDTA and HNO₃ extractable of Cd, Pb, and Zn, and NaOH and HNO₃ extractable of Cu were predominant chemical forms. The ratio of H₂O+KNO₃ extractable of Cd, Zn, Cu, and Pb were 25.1, 8.7, 4.0, and 0.4%, respectively. The ratio of H₂O+KNO₃ extractable heavy metal were negatively correlated with soil pH, while EDTA+HNO₃ extractable heavy metal were positively correlated. The most consistent distribution patterns were found when the soil samples were grouped according to their total contents. Specially, the ratio of H₂O+KNO₃ extractable heavy metal were higher as total contents of heavy metal were increased. The ratio of H₂O+KNO₃ extractable heavy metal(Cd 1.06, Cu 0.15, Pb 0.01, and Zn 0.05%) were lower at the high soil pH than those(Cd 31.31, Cu 4.06, Pb 1.75, and Zn 10.16%) at the low level. Compared to other chemical forms, the degree of contribution for KNO₃ extractable form to the Cd uptake to brown rice was high, whereas that for EDTA and HNO₃ extractable forms were high to the Zn.

Key words : Paddy soils, Heavy metals, Sequential extraction, Availability

서론

전국에 산재된 휴·폐광산은 폐석 및 광미사를 주변 산이나 계곡에 투기, 매립하는 형식으로 방치해 두고 있다. 중금속을 다량 함유한 폐석 및 광미는 산성폐수 유출, 폐석 및 광미의 유실로 인하여 하류 농경지의 토양오염을 일으키게 된다^{1,2)}. 중금속에 의한 토양오염의 결과는 토양내 중금속이 어느 일정수준에 이르면 농작물이 생육장애 또는 고사하는 경우로 구리, 비소, 납 등이 이에 속하며, 작물생육에는 비교적 피해가 적지만 농작물의 가식부가 유해한 수준까지 오염되어 섭취할 경우 인체에 피해를 주는 경우로 카드뮴, 수은 등이 이에 속한다^{3,4)}. 토양에 존재하는 중금속의 용해도 및 식물체로의 흡수 이행성에 미치는 요인으로는 중금속 자체의 특성, 식물의 종류 및 토양 pH, CEC, 유기물 및 점토함량 등 이화학적 성질에 영향을 받는 것으로 알려져 있다^{5~8)}. 우리나라에서 토양의 중금속은 0.1N-HCl 단일침출법을 공정시험법으로 사용하고 있으나 토양내 이동성에 관련

에 중금속의 결합 및 존재형태와 유효도를 평가하는데 어려움이 있다^{2,5)}. 이러한 측면에서 토양의 중금속별 오염특성 및 이화학적 요인특성에 따른 토양내 행동구명과 농작물로의 흡수 이행성을 밝히기 위해서 최근에는 여러 침출액을 단계별로 침출하는 연속침출(sequential extraction)법을 주로 이용하고 있다^{9~13)}. 토양의 중금속 연속침출은 분석목적에 따라 여러 가지 침출방법을 이용하여 형태별로 분류하는데, 토양내 중금속 형태중 수용태 및 치환태 등은 토양내 이동성이 크고 식물체로의 흡수이행이 용이한 반면 탄산염태 및 황화잔류태 등은 이동성이 적고 흡수이행이 어려운 형태라는 보고도 있으나 아직 명확한 해석은 없는 실정이다^{2,5,7,12)}.

본 연구는 광산인근 5개 지역에서 30지점의 농토양과 현미를 채취하여 지역특성, 토양 pH 및 총 중금속함량에 따른 토양의 형태별 함량 분포와 현미중 함량과의 관계를 분석하여 검토한 결과를 보고하는 바이다.

재료 및 방법

광산 인근 논토양의 형태별 중금속함량과 현미에 흡수 이행된 중금속의 관계를 검토하기 위하여 휴·폐 금속광산 인근 5개 지역의 30개 지점 논토양 및 현미를 대상으로 수행하였다. 채취지역은 충북 옥천 2, 괴산 1, 단양 1지역 및 강원 고성 1지역을 대상으로 수행하였다. 채취지점선정은 지역의 오염특성 및 농도에 따라 채취지역당 지점수를 A지역 5, B지역 7, C지역 8, D지역 5, E지역 5개 지점을 선정하였다. 토양시료 채취 및 조제는 토양오염공정시험방법¹⁴⁾에 준하였고, 현미시료는 토양채취 지점에서 정조시료를 채취하여 제현한후 건식분해 방법을 이용하여 분석하였다. 토양의 형태별 중금속 분석을 위한 연속침출법은 유 등^{12,5)} 및 Sims 등⁹⁾이 사용한 방법으로 풍건토양 5g을 100ml polyethylene 원심분리관에 넣고 증류수 25ml를 가하여 25°C에서 30분간 진탕 원심분리하여 상정액을 분리하였다(수용태). 연속하여 0.5M KNO₃(치환태) 16시간, 2차 증류수(3회 반복) 세척, 0.5M NaOH(유기복합태) 16시간, 0.05M EDTA(탄산염태) 6시간, 4M HNO₃(황화물/잔류태) 16시간으로 연속침출하였고, 4M HNO₃침출의 경우에는 80°C에서 침출하였다. 전처리된 토양의 형태별 중금속 및 양이온, 현미중의 중금속은 전처리한 여액을 적당히 희석하여 유도결합플라스마발광광도법(GBC, Integra XMP)을 이용하여 정량하였다^{3,14,15)}. 조사지역의 논토양 평균 화학성분은 A, B, C 및 E지역이 토양 pH가 4.75~5.22, 유기물 15.4~29.0 g·kg⁻¹, 유효인산 82~121 mg·kg⁻¹, 유효규산 23~26 mg·kg⁻¹으로 우리나라 논토양 평균함량과 유사하거나 낮은 지역이었다. 그러나 D지역은 중금속 오염에 대비하여 석회를 다량 사용하여 토양 pH가 7.59, Ex. Ca 14.75 cmol⁺·kg⁻¹ 및 Av.SiO₂ 176 mg·kg⁻¹으로 다른 조사 지역보다 매우 높은 지역이었다.

결과 및 고찰

광산인근 논토양의 형태별 중금속 함량분포와 유효도를 평가하기 위한 토양의 형태별 평균함량과 분포비율은 표 1과 같다. 토양의 형태별 중금속함량 및 분포비율은 Cd 및 Zn이 HNO₃>EDTA>KNO₃>NaOH 침출태, Cu는 NaOH>HNO₃>EDTA>KNO₃ 침출태, Pb는 EDTA>HNO₃>NaOH>KNO₃ 침출태 순으로 나타났다. H₂O 침출태 Cd, Cu, Pb 및 Zn함량은 각각 0.050, 0.24, 0.032, 0.98 mg·kg⁻¹로 나타나 분포비율은 0.02~1.55%로 나타났다. 특히, 토양내 이동성 및 식물에 흡수 이행성이 용이한 것으로 알려진 H₂O+KNO₃침출태 함량비율은 Cd 25.1%, Zn 8.7%, Cu 4.0%, Pb 0.4% 순이었다. NaOH침출태 함량비율은 Cu가 47.3%로 가장 높았으며, 다른 중금속은 0.4~4.6%였고, EDTA침출태는 Pb이 68.8%, HNO₃침출태는 Zn이 80.8%로 다른 중금속보다 높은 함량비율을 보였다.

Table 1. Fractionation of heavy metal in paddy soils at abandoned mining area

Fractions	(unit : mg·kg ⁻¹)			
	Cd	Cu	Pb	Zn
H ₂ O ¹⁾	0.05 (1.6) ²⁾	0.2 (0.3)	0.0 (0.0)	1.0 (0.5)
KNO ₃ ⁴⁾	0.76 (23.5)	2.5 (3.7)	0.9 (0.4)	17.2 (8.2)
NaOH ⁵⁾	0.15 (4.6)	32.7 (47.3)	1.4 (0.7)	0.8 (0.4)
EDTA ⁶⁾	1.07 (32.9)	12.2 (17.7)	144.5 (68.8)	21.2 (10.1)
HNO ₃ ⁷⁾	1.21 (37.4)	21.4 (31.0)	63.2 (30.1)	169.7 (80.8)
Sum ⁸⁾	3.24	69.0	210.0	209.8

¹⁾Water soluble, ²⁾Exchangeable, ³⁾Organically bound, ⁴⁾Oxide & Carbonate, ⁵⁾Sulfide & residue, ⁶⁾Sum of each extraction, ⁷⁾Ratio of each extract to sum of each extraction

정 등⁴⁾은 42년간 동일비료 장기연용 토양에서 Cu, Zn의 주된 형태는 각각 NaOH, HNO₃침출태로 보고하여 본 결과와 일치하였다. 본 조사지역과 유사한 아연광산 인근 광미 및 논토양을 조사한 결과 유 등²⁵⁾은 광미 및 논토양의 주된 중금속형태가 HNO₃침출태로 보고하였으나 여러 보고^{12,5,7)}들을 종합해 볼 때 조사지역의 특성, 광상, 오염도 및 토양특성에 따라 토양의 형태별 중금속 분포는 큰 차이를 보일 것으로 판단되었다. 또한 유 등¹⁾은 식물에 흡수이행이 용이한 형태로 알려진 KNO₃침출태 중금속이 Cd 24.9, Cu 2.2, Pb 4.4, Zn 8.2%로 나타나 원소별로 약간의 차이는 있으나 치환태 Cd 및 Zn의 비율은 거의 일치하였다. Ramas 등¹¹⁾도 토양 Cd중 식물에 흡수이행될 수 있는 유효태가 50%이상으로 다른 중금속보다 높았으며, Cu의 주된 형태는 유기태, Pb 및 Zn는 산화태로 토양내의 이동성은 Cd>Zn>Pb>Cu 순으로 보고하여 본 결과와 유사하였다. 그러나 제련소 인근 논토양의 형태별 함량을 치환성, 묽은산 침출, 유기결합, Fe-Mn 산화물 결합 및 규산염의 5단계로 연속추출한 결과 이동성인 형태인 치환태, 묽은산 및 유기결합태의 총 분포비율이 Cd 68.4, Pb 55.8, Cu 23.4, Zn 20.3% 순으로 본 결과와 차이를 보였는데 이는 토양오염 특성 및 침출방법의 차이에서 기인한다고 생각되었다^{10,12)}.

토양내 중금속 이동성 및 유효도와 관련이 깊은 토양 pH와 형태별 중금속 함량비율의 관계는 표 2와 같다. 토양 pH는 식물에 흡수가 용이한 형태로 알려진 H₂O+KNO₃침출태 중금속 함량비율과 고도의 부의 상관, 식물에 흡수이행이 어려운 형태로 알려진 모든 EDTA+HNO₃침출태 중금속 함량비율과는 고도의 정의 상관을 보였다. 또한 토양 pH는 NaOH 침출태 Cd와는 정의 상관, NaOH침출태 Cu 및 Pb와는 부의 상관을 보였다. 유 등¹⁾은 아연광산 인근 논토양에서 토양 pH는 치환태 Cd, Pb 및 Zn와 부의 상관, 유기태 및 탄산염태 Cd, 황화태 Cd, Zn 및 Pb와 정의 상관을 보였다고 하였고 Chlopecka 등⁸⁾은 중금속 오염지인 Pb-Zn제련소 지역의 치환성 중금속함량은 토양 pH가 5.6이하 지역이 5.6

Table 2. Correlation coefficients between fractionation of heavy metal and pH in paddy soils

Fraction rate ¹⁾	Cd	Cu	Pb	Zn
H ₂ O+KNO ₃	-0.629**	-0.471**	-0.573**	-0.570**
NaOH	0.648**	-0.604**	-0.450*	NS
EDTA+HNO ₃	0.538**	0.791**	0.683**	0.558**

¹⁾ Ratio of each extract to sum of each extraction.

*, ** : Significant at P = 5% and 1%, respectively.

NS : Not significant

이상지역보다 상대적으로 높게 나타났으나 토성, OM, CEC와는 관련성이 없었다고 하였다. 또한 현 등⁷⁾은 pH가 높은 토양에서 치환태 Cd, Pb 및 Zn의 분포비율은 낮았고, 탄산염태 및 황화물의 분포비율은 높은 것으로 보고하여 본 결과와 일치하였다. 그러나 Pierzynski 등¹³⁾은 중금속 오염지 토양에 석회석을 사용한 결과, NaOH 침출성 Zn 및 Pb함량은 증가되고, NaOH 침출 Cd는 감소한다고 하여 본 결과와는 상이하였다.

토양의 총 중금속 함량을 2수준으로 분류하여 나타낸 토양의 형태별 함량비율은 표 3과 같다. 전함량의 분류는 토양산도가 높은 D지역을 제외하고 수준별 10개 지점의 평균으로 분류하였다. 토양의 형태별 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 분포비율은 총 중금속이 높은 함량수준에서 식물의 흡수가 용이한 형태로 알려진 H₂O+KNO₃침출태 분포비율이 높게 나타났다. 반면 토양내 식물에 흡수행이 어려운 중금속 형태로 알려진 EDTA침출성 Cd, Pb 및 Zn 함량비율은 총 중금속이 높은 수준에서 높았고, HNO₃ 침출태 Cd, Pb 및 Zn함량비율은 낮게 나타났다. 중금속 오염지인 Pb-Zn 제련소 인근 토양을 조사한 결과 Chlopecka 등¹⁴⁾은 토양의 총 Cd, Pb 및 Zn함량이 높은 지역에서 치환성 함량분포가 높고, 잔류형 비율은 낮아 총 중금속의 함량수준에 따라 토양내 중금속의 형태

Table 3. Percentage of various forms of heavy metal in paddy soils with different total metal content

	Means (mg·kg ⁻¹)	pH (1:5)	Fractions			
			H ₂ O+KNO ₃	NaOH	EDTA	HNO ₃
Cd	2.0	4.80	14.87	3.29	15.36	66.48
	5.0	4.94	32.95	3.26	32.68	31.11
Cu	29.6	4.92	1.66	55.35	15.96	27.03
	139.2	4.79	4.53	47.90	16.56	31.01
Pb	76.5	4.77	0.71	2.01	53.71	43.57
	165.1	4.80	1.05	0.64	70.18	28.13
Zn	104.1	4.77	4.41	0.15	7.01	88.43
	428.9	4.90	11.47	0.33	9.47	78.73

별 분포패턴이 있다고 보고하였다. 또한 Levy 등¹⁰⁾은 광미유출지에서 형태별 중금속 함량 및 분포비율은 토양의 pH, 중금속의 종류 및 농도에 따라 차이가 크고, 식물체로의 이행관계는 중금속 종류 및 작물에 따라 다른 것으로 보고하였다.

중금속 오염도와 광상이 상이한 조사지역별 토양의 형태별 중금속 분포는 그림 1과 같다. 토양중 Cd분포는 지역에 따라 큰 차이를 보였으며, 특히 토양개량제인 석회 및 규산 등을 다량 사용하여 토양 pH가 매우 높은 D지역에서 H₂O+KNO₃침출태 Cd이 1.06%로 다른지역 평균 30.31%와 비교하여 매우 낮은 함량분포를 보였다. 또한 D지역에서 상대적으로 Cd 함량비율이 증가된 형태는 NaOH 및 EDTA 침출태였다. Cu의 함량 분포비율은 KNO₃ 및 NaOH침출태가 D지역에서 각각 0.15, 34.70%로 나타나 다른 지역의 평균 4.06, 48.65%보다 낮았으며, 상대적으로 EDTA 및 HNO₃침출태는 높게 나타났다. Pb의 형태별 함량분포는 H₂O, KNO₃ 및 NaOH침출태의 합이 D지역이 0.44%로 다른 지역 1.75%보다 낮았으나 다른 중금속보다 지역간 분포차이는 크지 않았다. 토양내 Zn의 H₂O+KNO₃침출태 함량비율은 D지역에서 0.05%로 나타나 다른 지역 10.16%보다 매우 낮았고, 상대적으로 HNO₃침출태는 높게 나타났다.

유 등²⁾은 아연광산 인근 논토양에서 석회를 사용할 경우 토양 pH가 상승하고 토양결정에 강하게 결합된 탄산염태 및 황화잔류태의 비율이 대부분을 차지하고, 수용태 및 치환태와 수용태나 치환태로 변화될 가능성이 있는 유기결합태의 분포비율이 적다고 하여 본 결과와 일치하였다¹⁵⁾. 또한 본 조사와 토양오염원이 상이한 하수오니 퇴비를 사용한 토양에서 석회처리를 한 결과 Sims 등¹⁶⁾은 NaOH 침출성 Cu 및 H₂O+KNO₃침출태 Zn은 감소하고, EDTA 및 HNO₃침출태는 증가한다고 하여 본 결과와 일치하였다. 그러나 정 등⁴⁾이 보고한 42년간 동일비료 및 개량제를 장기연용 토양의 KNO₃침출태 Zn비율이 화학비료 및 퇴비구보다 석회, 규산 등 개량제 처리구에서 함량비율이 낮게 나타났으나 모든 형태별 Cu함량은 차이가 없었다고 하여 본 조사 결과와 차이를 보였다.

토양의 형태별 중금속함량과 현미중 흡수행된 중금속과의 관계는 표 4와 같다. 토양의 모든 형태별 Cd함량은 현미중 Cd함량과 정의 상관관계를 보여 토양의 Cd함량이 증가할수록 현미중 Cd함량도 증가하였고, Cu는 모든 형태에서 유의성이 없었다. Pb는 KNO₃, EDTA, HNO₃침출태 및 전함량과 현미중 Pb함량과 정의 상관관계를 보였고, Zn는 H₂O, KNO₃, EDTA, HNO₃침출태 및 전함량과 현미중 Zn 함량과 정의 상관관계를 보였다. 아연광산 인근 토양의 형태별 중금속함량과 현미중 함량과의 관계를 조사한 결과 유 등¹⁾은 Cd는 유기태, 탄산염태 및 황화물, Zn는 수용태 및 치환태와 높은 정의 상관관계를 보였으나 Pb는 어떠한 형태와도 상관성이 없었다고 하였다. 또한 김 등¹²⁾은 제련소 인근 논토양의 형태별 중금속함량과 비 식물체 함량과의 관계는 식물부위 및 중금속 종류별로 큰 차이를 보였고, 현미와의 관계도 본 결과와 차이를 보였는

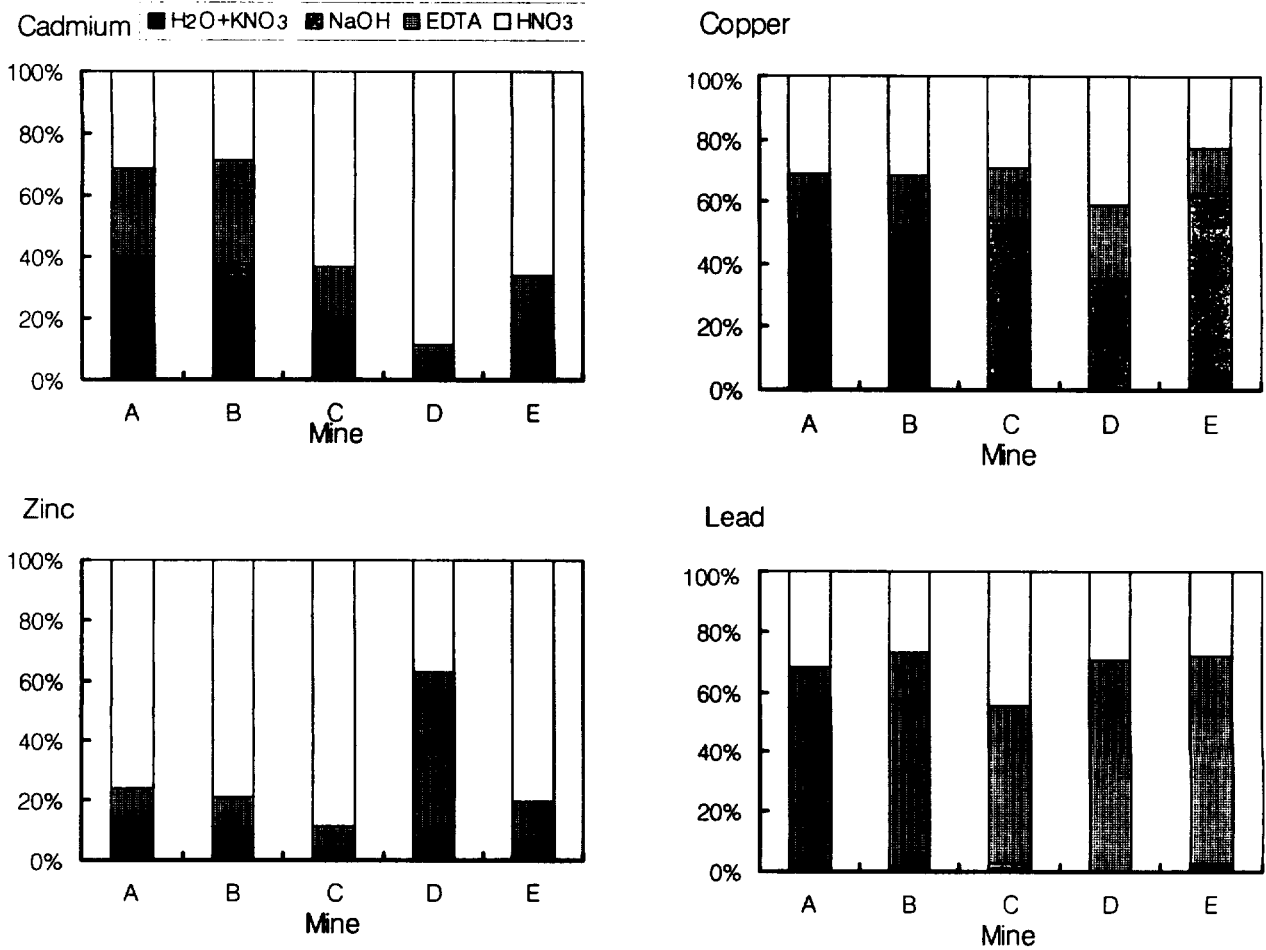


Fig. 1. The distribution of heavy metal forms extracted by sequential extraction procedure in paddy soils with different mine area. The values of y axis are percent distribution of chemical forms of heavy metals. H₂O+KNO₃ is water soluble plus exchangeable, NaOH is organically bound, EDTA is oxide and carbonate, and HNO₃ is sulfide bound plus residual form of heavy metals in soils.

데 이는 조사토양의 오염특성, 화학성 및 침출방법 등의 차이에 기인한다고 생각되었다⁶⁾.

표 5는 광산인근 논토양에서 채배된 현미중 Cd 및 Zn의 흡

Table 4. Correlation coefficients between heavy metal contents in brown rice and soil fractions in paddy soils

Brown rice	Soil fraction					Sum
	H ₂ O	KNO ₃	NaOH	EDTA	HNO ₃	
Cd	0.643**	0.778**	0.404*	0.639**	0.702**	0.802**
Cu	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Pb	NS	0.396*	NS	0.602**	0.552**	0.596**
Zn	0.393*	0.602**	NS	0.395*	0.625**	0.604**

*, **: Significant at P = 5% and 1%, respectively.

NS : Not significant

수이행성에 영향을 주는 토양중 형태별함량의 기여도를 밝히고자 표준화된 편회계수를 구하고 다중회귀분석을 한 결과이다. 형태별 함량의 기여도는 현미중 Cd, Zn 및 독립변수인 각 형태별 Cd, Zn함량들을 표준화(X-X/SD)시킨 다음 다중회귀분석으로 얻은 표준편회계수의 크기에 따라 결정하였다. 현미의 중금속함량에 대한 기여도는 Cd이 KNO₃침출태가 다른 형태보다 높았고, Zn은 EDTA 및 HNO₃침출태가 높게 나타났다.

위의 결과를 종합하여 볼 때 광산인근 논토양의 형태별 함량분포와 유효도는 조사지역, 중금속 오염원, 오염도 및 토양특성과 깊은 관련이 있는 것으로 판단되었다. 이러한 측면에서 토양의 중금속오염도가 높은 토양개량을 위해서는 지역별 오염특성에 따른 평가방법 모색 및 대책연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

Table 5. Standardized partial regression coefficient($X-\bar{X}/SD$) in multiple linear regression between cadmium and zinc concentrations in soils extracted by sequential extraction procedure and brown rice in paddy soils

Brown rice	Soil fraction				
	H ₂ O	KNO ₃	NaOH	EDTA	HNO ₃
Cd	0.054	0.526	0.118	0.219	0.301
Zn	0.084	0.465	1.072	1.154	0.253

요약

광산인근 논토양의 형태별 중금속 함량[수용태(H₂O), 치환태(0.5M KNO₃), 유기복합태(0.5M NaOH), 탄산염태(0.05M Na₂-EDTA), 황화잔류태(4M HNO₃)] 과 현미에 흡수 이행된 중금속과의 관계를 구명하기 위하여 5개 광산지역에서 30개 지점 논토양 및 현미를 대상으로 분석 검토한 결과는 다음과 같다. 광산인근 논토양의 Cd, Pb 및 Zn의 주된 형태는 EDTA 및 HNO₃ 침출태, Cu는 NaOH 및 HNO₃ 침출태였고, 식물에 흡수이행이 용이한 것으로 알려진 H₂O + KNO₃ 침출태의 함량비율은 Cd 25.1, Zn 8.7, Cu 4.0, Pb 0.4% 순으로 나타났다. 토양 pH와 H₂O+KNO₃ 침출태 중금속 함량비율은 고도의 부의 상관, EDTA + HNO₃ 침출태 중금속과는 고도의 정의 상관을 보였다. 토양의 총 중금속함량 수준에 따라 형태별 중금속함량의 분포비율은 다르게 나타났고, 특히 높은 함량수준에서 H₂O+KNO₃ 침출태 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 분포비율이 높게 나타났다. 토양의 H₂O+KNO₃ 침출태 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량비율은 토양 pH가 높은 지역(D site)에서 각각 1.06, 0.15, 0.008, 0.05%로 나타나 pH가 낮은 지역의 평균치 30.31, 4.06, 1.75, 10.16%보다 매우 낮게 나타났다. 현미중 Cd 및 Zn 흡수이행과 관련이 큰 토양의 존재형태는 각각 KNO₃ 침출태, EDTA 및 HNO₃ 침출태로 나타났다.

참고 문헌

- Ryu, S. H., K. H. Kim, and H. M. Hyun (1985) Sequential extraction of Cadmium, Zinc, Copper, and Lead in soils near zinc-mining sites. *Kor. J. Environ. Agric.* 3(2):71~77
- Ryu, S. H., K. J. Ro, S. M. Lee, M. E. Park, and K. H. Kim (1996) Characterization of heavy metals in the stream sediment around an old zinc mine. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 29(4):432~438.
- Kim, B. Y., and M. H. Lee (1995) Comparison of the analytical methods for Cd in brown rice. *Kor. J. Environ. Agric.* 14(3):338~344.
- Jung, G. B., J. S. Lee, W. I. Kim, B. Y. Yeon, and I. S. Ryu (1998) Fractionation and Availability of Cu and Zn in Paddy Soils following a Long-Term Applications of Soil Amendments. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 31(2):107-113.
- Ryu, S. H., J. R. Lee, and K. H. Kim (1995) Sequential extraction of Cd, Zn, Cu, and Pb from the polluted paddy soils and their behavior. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28(3):207~217.
- Jung, G. B., J. S. Lee, W. I. Kim, and B. Y. Kim (1999) The effect of irrigation control and the application of soil ameliorators on cadmium uptake in paddy rice. *Kor. J. Environ. Agric.* 18(4):355~360.
- Hyun, H. N., and S. H. Yoo (1991) Effects of soil chemical properties on the distribution and forms of heavy metals in paddy soils near zinc mines. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 24(3):183~191.
- Chlopecka, A., J. R. Bacon, M. J. Wilson, and J. Key (1996) Form of cadmium, lead, and zinc in contaminated soils from Southwest Poland. *J. Environ. Qual.* 25:69~79.
- Sims, J.T. and J.S. Kline (1991) Chemical Fractionation and Plant Uptake of Heavy Metals in Soils Amended with Co-Composted Sewage Sludge. *J. Environ. Qual.* 20:387-395
- Levy, D. B., K. A. Barbarick, E. G. Siemer, and L. E. Sommers (1992) Distribution and partitioning of trace metals in contaminated soils near Leadville, Colorado. *J. Environ. Qual.* 21:185~195.
- Ramos, L., L. M. Hernandez, and M. J. Gonzalez (1994) Sequential fractionation of copper, lead, cadmium, and zinc in soils from or near Donana National Park. *J. Environ. Qual.* 23:50~57.
- Kim, S. J., S. H. Back, and K. H. Moon (1996) Fractionation of heavy metals and correlation with their contents in rice grown in paddy near smelter area. *Kor. J. Environ. Agric.* 15(1):1~10.
- Pierzynski, G.M. and A.P. Schwab (1993) Bioavailability of Zinc, Cadmium, and Lead in a Metal-Contaminated Alluvial Soil. *J. Environ. Qual.* 22:247-254
- Ministry of Environment (1996) Standard Test Method for soil pollution.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (1988) Methods of Soil Chemical Analysis.