

폐금속광산 주변 농토양 중 중금속의 수직분포 특성

정구복* · 김원일 · 박광래 · 윤순강

농업과학기술원 환경생태과

(2001년 8월 20일 접수, 2001년 12월 15일 수리)

Vertical Distribution of Heavy Metals in Paddy Soil Near Abandoned Metal Mines

Goo-Bok Jung*, Won-Il Kim, Kwang-Lai Park, and Sun-Gang Yun (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea)

Abstract : To compare the relationship between the vertical distribution of heavy metals in paddy soil and soil pH near four abandoned metal mines, 40 paddy surface soils (0~15 cm) and 12 soils with soil depths (0~20, 20~40, 40~60, 60~80, and 80~100 cm) were collected. Both total and extractable heavy metal contents in soils were analyzed after acid digestion ($\text{HNO}_3\text{:HClO}_4\text{:H}_2\text{SO}_4$) and 0.1 N-HCl extraction, respectively. The 0.1 N-HCl fraction ratio over total contents of Cd, Cu, Pb, and Zn were 57, 30, 23, and 19%, respectively. Vertical distribution of heavy metals varied considerably among the different mines. In Choil mine, there was no difference in concentrations of all the metals with soil layers. However, Cu and Pb contents in Gahak mine were high at 0~20 cm depth, and Zn was high at 0~40 cm depth. In Sinyemi mine, Cd and Cu contents were high at 0~40 cm depth. Cd, Cu, and Pb contents in Okcheon mine were high through all soil profiles up to 100 cm soil depth. The 0.1 N-HCl fraction ratio over total contents of heavy metals with soil layers were very high at 0~20 cm depth. As soil depth increased, fraction ratio of heavy metals decreased at the high soil pH (Gahak, Sinyemi, and Choil mines). However, the ratios of Cd, Cu, and Pb in Okcheon mine, having a relatively lower soil pH than other sites, were relatively similar through all the soil profiles up to 100 cm soil depth. Therefore, it was estimated that the mobility and availability of heavy metals in soils were affected by soil pH.

Key words : metal mines, paddy soil, heavy metals, vertical distribution

서 론

국내에 산재된 금속광산은 채산성 및 경영악화로 인하여 유해성분이 다량 함유된 폐재 및 광미사를 주변 산이나 계곡에 투기, 매립하는 등 광해방지 사업이 미흡한 실정이다. 이러한 환경보전적 조치가 미흡한 지역은 광미 등의 유실 및 비산, 지반침하, 산성광산폐수 유출로 인하여 주변 하천, 지하수 및 농경지에 심각한 환경오염을 유발시키고 있다¹⁻³⁾. 특히 농작물의 생육기반인 토양에 다량으로 축적된 중금속은 농작물의 생육피해와 작물에 흡수 축적되어 이를 인간이 섭취할 경우 심각한 건강장애를 일으킬 수 있다⁴⁻⁶⁾.

이러한 심각성 때문에 환경지질분야에서는 주로 광산주변 선광광미장, 토양, 하상퇴적물, 지하수 및 하천수를 대상으로 중금속의 지화학적 분산, 이동 및 부화 연구 등이 주로 보고되었고⁷⁻⁹⁾, 농업환경분야에서는 광산주변 농경지를 대상으로 재배작물의 중

금속 흡수이행과 연관이 깊은 토양내 중금속농도, 존재형태 및 토양 이화학적 등 여러 요인을 평가하는 연구가 활발하게 진행되고 있다^{2,4,10)}.

토양내 중금속의 이동성과 관련된 농경지 토양의 수직분포는 중금속 종류, 농도 및 존재형태에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다^{7,11)}. 특히 토층내의 이동성은 카드뮴, 아연, 구리, 납의 순서로 알려져 있고 작토층인 표토에 대부분이 분포하는 것으로 보고 되었으나 중금속중 이동성이 큰 성분인 카드뮴과 아연은 지하 2 m까지 오염되는 것으로 보고 되었다^{3,10,12)}. 이러한 이동성에 관여하는 인자로는 토양 pH와 Eh, 점토함량, 산화망간 및 산화철의 존재, 그리고 유기물 및 양이온치환용량과도 관련성이 큰 것으로 보고되고 있다^{9,10,13,14)}.

토양내 중금속의 존재형태중에서 수용태 및 치환태 등은 토양 내에서 이동성이 크고 식물체에 흡수이행이 용이한 반면, 탄산염태 및 황화 잔류태 등은 이동성이 적고 흡수이행도 어려운 형태로 보고되고 있다^{2,9,10)}. 또한 토양 pH는 중금속 존재 형태 중에서 유효태인 수용태 및 치환태의 분포비율과 부의 상관, 산화태 및 황화태 등과는 정의 상관을 보여 토양 pH가 토양내 중금속의 이동형태 분포와 관련이 큰 것으로 알려져 있다^{10,15)}. 다른 한편으로

*연락처:
Tel : +82-31-290-0210 Fax : +82-31-290-0277
E-mail : gbjung@rda.go.kr

는 토양의 중금속 유효도에 있어 총합량에 대한 가용성 함량의 비율은 오염원 특성 및 토양의 이화학성에 따라 큰 차이를 보일 수 있고, 토양의 유효태 형태 및 그 비율은 식물체내 흡수이행 뿐만 아니라 토층내 중금속 이동성과도 관련성이 있는 것으로 알려져 있다^{16,17)}.

따라서 본 연구는 토양내 중금속의 이동특성에 대한 기초자료를 제공하기 위하여 금속광산 인근 4지역의 40개 지점 논토양과 토양 깊이별로 시료를 채취하여 토양 화학성, 중금속 수직분포 및 총 중금속함량에 대한 가용성 함량의 비율을 비교 검토하여 그 결과를 보고하는 바이다.

재료 및 방법

광산지역 인근 논토양의 중금속 오염과 수직적 분포특성을 조사하기 위하여 4개 지역 폐금속광산에서 5 km 주변내에 분포한 논토양 시료를 채취하였다. 시료채취는 거리별로 기존의 광산활동 영향정도를 고려하여 표토 0~15 cm 깊이를 대상지역별로 10 지점씩 비 이양전에 채취하였다. 또한 토양내 중금속의 수직분포를 검토하기 위하여 광구로부터 5 km 주변내에서 거리별 광산활동 영향권을 상류, 중류 및 하류로 대표될 수 있는 3개 대표지점을 선정하여 토양깊이 (0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100 cm)별로 5개 층위를 채취하였다. 조사 대상으로 한 광산지역은 납, 구리 및 아연을 주 생산 광종으로 하는 가학 (경기 광명), 신예미 (강원 정선), 조일 (충북 단양) 및 옥천 (충북 옥천)광산으로 각 지역별 광산 특성은 Table 1과 같다.

토양시료 조제와 분석은 농촌진흥청의 토양화학분석법¹⁸⁾과 환경부의 토양오염공정시험법¹⁹⁾에 준하여 실시하였다. 토양시료 조제는 그늘에서 풍건하여 분쇄한 후에 20 mesh체를 통과시켜 화학성분 분석용 시료로 사용하였고, 중금속 분석용은 일반 화학분석용 시료를 다시 유발에 미세하게 분쇄하여 사용하였다.

토양의 화학성분 분석은 pH (1:5)는 pH-meter (ORION R, EA-940), 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1 N-Ammonium acetate (pH 7.0) 침출법으로 분석하였다.

토양의 가용성 중금속함량은 토양시료 10 g을 100 mL 삼각프라스크에 취하여 0.1 N-HCl 50 mL를 가한 다음 30°C에서 1시간

진탕하고 No. 5B로 여과하여 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 측정하였다. 토양의 중금속 총합량은 분해액인 ternary solution (HNO₃:HClO₄:H₂SO₄ = 10:4:1)을 이용하여 열분해장치 (Kjeldatherm, Gerhardt)에서 초기 1시간은 250°C, 그 이후에는 375°C로 2시간 동안 가열 분해후 여과하여 분석용 시료로 사용하였다^{1,16)}. 본 연구에서 전처리된 모든 토양의 중금속 함량과 양이온 분석은 유도 결합플라즈마 발광광도계 (ICP, GBC, Integra XMP)를 이용하였다.

결과 및 고찰

금속광산 인근 4개 지역별 각 10지점씩 40개 지점의 논토양을 대상으로 토양중 화학성분을 조사한 결과는 Table 2와 같다. 광산 지역별 토양의 화학성분은 평균치로 옥천광산 지역의 경우 토양 pH가 산성토양으로 유기물, 유효인산 및 양이온 함량이 전국 논토양 평균치²⁰⁾와 유사하거나 낮았다. 그러나 가학, 신예미 및 조일광산 지역은 평균치가 토양 pH 6.37~6.92, 치환성 Ca 7.34~19.47 cmol⁺/kg으로 높게 나타났는데, 이는 중금속 오염에 대한 개량대책²⁴⁾으로 석회 및 규산 등을 다량 사용하여 옥천광산 지역 보다 높게 나타난 것으로 판단되었다.

토양중 중금속의 유효도를 평가하기 위한 목적으로 4개 광산 인근 지역에서 각각 10개 지점씩을 선정하여 표토의 중금속 총합량과 가용성함량을 분석하여 그 비율로 유효도를 나타낸 결과는 Table 3과 같다.

총합량에 대한 가용성함량의 백분율을 보면 총 평균치에서 Cd 57%, Cu 30%, Pb 23%, Zn 19%로 나타나 토양내 유효도는 Cd가 가장 높고, Cu와 Pb는 중간이며, Zn가 낮은 것으로 나타났다. 광산별로 보면 토양 pH가 6.58인 가학광산은 전체적으로 중금속함량이 높은 곳으로서 토양의 유효도가 비교적 높게 나타났으나 pH 6.92인 조일광산과 pH 6.37인 신예미 광산은 다른 광산에 비해 상대적으로 유효도가 낮은 값을 보였다.

Table 2. Chemical properties of paddy soils near four abandoned mines

Mines	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. cation (cmol ⁺ /kg)		
					K	Ca	Mg
Maximum	7.96	3.35	52.0	1461	1.03	31.9	3.84
Minimum	4.36	0.17	9.3	28	0.14	1.7	0.29
Gahak	6.58	0.48	18.1	116	0.26	7.3	0.86
Sinyemi	6.37	0.74	33.0	479	0.47	7.7	0.77
Choil	6.92	0.87	17.8	53	0.28	19.5	1.49
Okcheon	5.42	0.33	20.7	168	0.35	3.4	0.84
Mean	6.32	0.60	22.4	204	0.34	9.5	0.99

Table 1. Descriptions of four abandoned mines where the paddy soils were collected

Mines	Ore type	Locations	Contaminated element
Gahak	Cu, Pb, Zn	Kwangmyeong, Kyeonggi	Cd, Cu, Pb
Sinyemi	Cu, Pb, Zn	Jungsun, Kangwon	Cd
Choil	Pb, Zn, Ag	Danyang, Chungbuk	Cd, Pb
Okcheon	Pb, Zn	Okcheon, Chungbuk	Cd, Cu, Pb

Table 3. Comparison of heavy metal concentration extracted by 0.1 N-HCl extractant and total content of heavy metal digested by ternary solution in paddy soils (0~15 cm) near four abandoned mines

Mines	Cd			Cu			Pb			Zn		
	HCl	Total	Ratio ^{b)}	HCl	Total	Ratio	HCl	Total	Ratio	HCl	Total	Ratio
		(mg/kg)			(mg/kg)			(mg/kg)			(mg/kg)	
Gahak(10) ^{a)}	4.77	7.40	0.64	41.0	119.7	0.34	156.0	352.8	0.44	146.5	754.5	0.19
Sinyemi(10)	1.48	2.92	0.51	12.7	50.5	0.25	13.0	103.5	0.13	172.4	628.5	0.27
Choil(10)	0.84	2.77	0.30	4.7	27.0	0.17	9.9	139.6	0.07	51.9	333.3	0.16
Okcheon(10)	1.68	2.01	0.84	57.4	129.7	0.44	28.9	103.7	0.28	29.4	255.3	0.12
Mean	2.19	3.78	0.57	28.9	81.7	0.30	52.0	182.4	0.23	100.0	492.9	0.19

a) Number of sampling site.

b) Ratio of 0.1 N-HCl extractability ratio against total content of heavy metals.

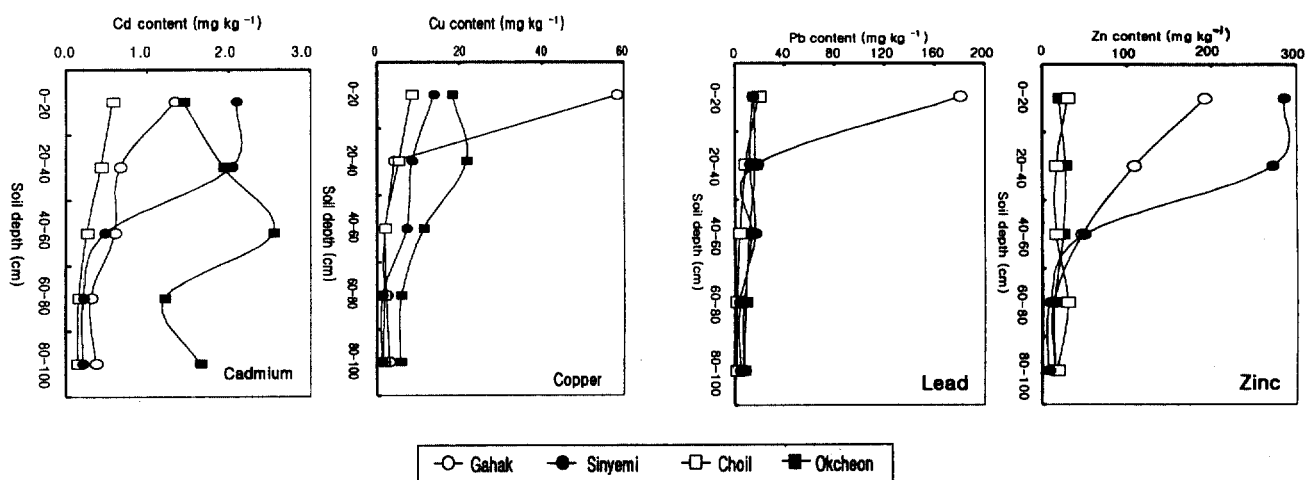


Fig. 1. Vertical distributions of 0.1 N-HCl extractable heavy metal content in paddy soil near four abandoned mines.

한편 토양 pH가 5.42인 옥천광산은 중금속의 유효도가 높은 값을 보이므로서 토양중 중금속의 유효도는 토양 pH에 의해서 지배되나 가학광산과 같이 중금속함량이 어느 수준 이상으로 높을 경우에는 토양 화학적 외에 중금속 오염도 및 총 함량의 영향을 받는다고 볼 수 있었다.

Chlopecka 등¹⁷⁾은 중금속 오염지인 Pb-Zn 제련소 인근 토양을 조사한 결과, 토양중 Cd, Pb 및 Zn의 총함량이 높은 지역에서 치환성 함량분포가 높고, 잔류형 비율은 낮아 총 중금속의 함량 수준에 따라 토양내 중금속의 형태별 분포양상이 영향을 받는다고 보고하였다. 또한 Ullrich 등¹⁸⁾은 Pb, Zn 광산 및 제련소의 인근 오염토양에서 식물내 중금속의 흡수 이행성과 관련된 잠재적인 유효도를 평가한 결과, 중금속의 이동성은 토양 pH의 영향이 가장 컸으며 토양 pH값이 낮은 지역은 Cd의 유효도가 높을 뿐 아니라 Pb와 Zn의 유효도도 증가되어 특별한 관리대책이 필요하

다고 하여 본 결과와 일치하였다. 따라서 중금속의 오염도를 평가하는 데에는 우리나라에서 적용하고 있는 가용성함량만으로는 부족하고 총함량과 pH 등 여러 요인을 고려한 유효도 평가가 적절하다고 생각되었다.

Fig. 1은 중금속의 수직적 함량분포를 통한 토층의 오염도를 파악하기 위하여 4개 광산 인근 논토양의 대표지점에서 토심별로 가용성함량을 조사하여 나타낸 것이다. 중금속의 수직분포가 광산 지역별로 매우 상이함을 볼 수 있는데 조일광산 지역은 모든 중금속의 함량이 토층별로 차이가 없었다.

가학광산은 Cu와 Pb 함량이 0~20 cm층에 높게 분포되어 있고 Zn의 함량은 40 cm 층위까지 높게 나타났으며, 신예미 광산 지역에서는 Cd와 Zn 함량이 모두 40 cm층까지 높은 함량으로 분포되어 있었다. 옥천광산 지역은 Cd와 Cu 함량이 1 m 깊이까지 전 토층에 걸쳐 높은 함량이 분포되어 있었고, 특히 Cd는 40

Table 4. Total contents of heavy metals and ratio of 0.1 N-HCl extractable content against total content through a the soil profile in paddy soils near four abandoned mines

Mines	Soil depth (cm)	pH (1:5)	Cd		Cu		Pb		Zn	
			Total (mg/kg)	Ratio ^{a)}	Total (mg/kg)	Ratio	Total (mg/kg)	Ratio	Total (mg/kg)	Ratio
Gahak	0~20	7.08	6.60	0.66	123.3	0.47	270.8	0.67	733	0.26
	20~40	7.60	7.00	0.09	148.2	0.03	354.5	0.05	942	0.11
	40~60	7.69	6.93	0.09	168.3	0.01	380.1	0.03	1018	0.05
	60~80	7.74	4.69	0.05	89.3	0.03	236.3	0.03	609	0.02
	80~100	7.32	5.05	0.07	126.0	0.02	326.7	0.02	843	0.02
Sinyemi	0~20	6.71	5.30	0.40	59.8	0.23	62.9	0.22	990	0.29
	20~40	6.91	5.46	0.37	42.4	0.20	62.3	0.19	904	0.30
	40~60	6.32	2.74	0.17	28.4	0.25	64.4	0.25	223	0.22
	60~80	6.06	2.38	0.09	20.6	0.06	46.0	0.08	104	0.08
	80~100	5.26	2.64	0.04	14.5	0.09	46.4	0.07	106	0.10
Choil	0~20	6.43	2.63	0.22	25.5	0.32	67.8	0.28	181	0.16
	20~40	6.71	2.59	0.17	23.5	0.22	48.7	0.17	139	0.12
	40~60	6.66	2.27	0.11	19.5	0.10	55.0	0.06	130	0.13
	60~80	6.14	1.89	0.08	20.7	0.08	36.1	0.03	105	0.29
	80~100	5.71	2.25	0.06	11.1	0.13	38.3	0.04	104	0.17
Okcheon	0~20	5.68	3.20	0.45	36.2	0.51	46.1	0.32	217	0.09
	20~40	5.90	3.58	0.54	46.0	0.47	49.4	0.32	268	0.10
	40~60	6.05	4.43	0.57	40.0	0.28	50.1	0.22	221	0.11
	60~80	6.46	3.13	0.39	24.5	0.24	45.5	0.19	154	0.09
	80~100	6.53	3.30	0.50	19.2	0.29	38.9	0.18	130	0.11

^{a)} Ratio of heavy metal extracted by 0.1 N-HCl extraction solution to total content digested by ternary solution.

~60 cm층위에서 함량분포가 가장 높아 광산에 따라 수직적 분포양상이 달랐다.

이온상태로 운반되는 중금속은 토양내 이동에 있어 매질인 물의 특성에 영향을 받으며, 농경지인 경우 작토층인 표토에 대부분이 분포하는 것으로 보고되었으나 일반적인 토층내의 이동성은 카드뮴, 아연, 구리, 납의 순서로 알려져 있다^{3,10,15}. 토양내 중금속 중 이동성이 낮은 납의 경우 주로 점토광물, Mn 산화물, Fe-Al 수산화물 및 유기물질과 친화력이 높고 환원환경에서 유동성이 매우 낮은 특징이 있다. 또한 구리는 토양내에서 1, 2차 광물의 결정격자에 강하게 결합된 상태로 있으며 Cu-Mn 산화물, phyllosilicates 및 유기물로 된 콜로이드 상태의 퇴적물과 친화성이 높아 유기화합물의 형태로 존재한다¹⁵. 또한 토양 pH가 낮을수록 중금속의 존재형태 분포비율 중 교환가능성 비율은 커지며, 탄산염 형태의 비율은 낮아져 이동성이 증가되고 부하된 총 농도가 높을수록 이동성이 높은 형태의 분포비율이 높아지는 것으로 보고되었다^{29,10}.

Andreu & Gimeno-Garcia¹¹⁾는 논토양의 중금속 수직분포에 관하여 토심별 중금속 총합량 및 가용성 함량이 Cd, Cu 및 Pb는 표토에서, Co 및 Ni은 심토에서 높았다고 하였고, 이 등³⁾과 Ster-

ckeman 등¹²⁾은 Pb, Zn 광산 및 제련소 인근 토양의 토심별 가용성 중금속이 심토보다 표토인 0~30 cm깊이에서 분포비율이 매우 높았고, 이동성이 큰 것으로 알려진 Cd 및 Zn은 지하 2 m까지 오염되는 것으로 보고하였다. 이와 같이 중금속 오염이 깊은 토층까지 나타날 때 지하수 오염 및 수도의 생육억제와 수도체의 함량도 높아질 것이라 예상할 수 있었다. 따라서 토양 중금속의 수직적 분포 차이는 토층의 토성, pH, 유기물 및 탄산염의 함량 등 많은 요인들과 관련이 있을 것으로 생각되며 이에 대한 앞으로의 추가 연구가 필요할 것으로 생각되었다.

Table 4는 금속광산 인근 4개 지역의 논토양으로부터 토양깊이 (0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100 cm)별로 5개 층위를 채취하여 중금속 총합량 (ternary 용액)과 총합량 대비 가용성 중금속의 함량비율을 나타낸 것이다.

4개 광산지역의 토양 층위별 pH 변화는 표토의 pH가 낮은 옥천광산은 토심이 깊어질수록 높아지는 경향을 보였으나 상대적으로 표토의 pH가 높은 가학, 신예미 및 조일광산 지역은 표토로부터 40~60 cm까지 높아졌다가 낮아지는 경향을 보였다. 토양 층위별 중금속의 총합량 수직분포는 대체로 토심이 깊을수록 낮아지는 경향이거나 Fig. 1에서 보는 바와 같이 가용성합량의 수직분

포와 비교하여 상대적으로 큰 함량차이를 보이지 않았다. 광산지역별로 총합량에 대한 침출성함량의 비율을 중금속의 유효도로 평가해 본 결과 중금속 종류별로 약간의 차이는 있으나 가학, 신예미 및 조일광산 지역은 토양 층위가 깊어질수록 함량비율이 낮아지는 경향이였다. 그러나 토양 pH가 다른 지역과 비교하여 상대적으로 낮은 옥천광산 지역에서는 Cd, Cu 및 Pb의 침출성 비율이 전 층위에서 높게 나타났다.

대부분의 금속원소들은 산화환경에서 이동성이 크고, 알칼리성이나 환원상태에서 이동성이 제한되어 광물상태로 침전되거나 음이온과 착물을 형성하여 침전된다. 또한 토양 pH가 증가할수록 점토광물이나 유기물에 흡착이 잘되며 식물 흡수비율이 줄어든다. 산성일 때는 이동성이 증가하여 식물체로의 흡수 이행성이 커진다. 류 등²⁾과 정 등¹⁰⁾은 금속광산 인근에 석회를 사용할 경우, 토양 pH가 상승하고 토양결정에 강하게 결합된 탄산염태 및 황화잔류태의 비율이 높아져 대부분을 차지하게 되며, 수용태 및 치환태와 유효태로 변화될 가능성이 있는 유기복합태의 분포비율이 낮아진다고 보고하였다. 따라서 표토의 pH 및 치환성 Ca함량이 높은 지역에서 총합량에 대한 침출성 함량의 비율이 낮은 것은 중금속이 난용성의 형태로 존재하여 토양중에서 이동성이 크게 제한을 받기 때문으로 볼 수 있었다^{5,14)}.

Andreu & Gimeno-Garcia¹¹⁾와 Sterckeman 등¹²⁾은 토양층위에 따른 중금속함량은 토양 pH와 부의 상관을 보였고, 층위별 중금속 분포와 토층내의 이동성은 표토의 중금속 농도, 토양 pH, 유기물 및 점토함량에 영향을 받는다고 하였다. 또한 de Matos 등¹³⁾은 토양내 중금속의 이동성에 대하여 Cd와 Zn 함량은 토양내 Ca 함량과, Cu와 Pb 함량은 CEC 및 유기물 함량과 관계가 컸다고 하였으며, Martinez & Motto¹⁴⁾는 중금속 처리토양에서 토양 pH값이 낮아짐에 따라 토양내 Cu, Pb 및 Zn의 가용화가 증가되어 중금속의 이동성과 식물의 유효도 및 독성을 증가시킨다고 하였다.

결론적으로 금속광산 인근에서 장기적으로 오염된 농경지 토양의 중금속 수직분포 특성은 조사지역, 중금속 오염원, 오염도 및 토양특성과 깊은 관련이 있는 것으로 판단되었다. 이러한 측면에서 토양의 중금속 오염도가 높은 지역에 대한 토양개량을 위해서는 지역별 오염특성을 고려한 평가방법 모색 및 대책연구가 뒤따라야 할 것으로 생각되었다.

요 약

토양내 중금속의 수직적 분포특성을 구명하기 위하여 금속광산 인근 4개 지역에서 농토양 40지점 (0~15 cm)과 토양층위 (0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100 cm)별 12지점을 대상으로 토양의 중금속 총합량과 가용성함량을 분석하여 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

농토양 (0~15 cm)의 중금속 총합량 (Ternary 용액)에 대한 가용성함량 (0.1 N-HCl 용액)의 백분율은 Cd 57%, Cu 30%, Pb

23%, Zn 19%로 나타나 토양내 유효도는 Cd가 가장 높은 것으로 나타났다. 토양내 가용성 중금속의 수직분포는 광산 지역별로 상이하였으며, 토양 pH가 높은 가학, 조일 및 신예미 광산 지역은 0~40 cm 층에 주로 분포하였고, 토양 pH가 상대적으로 낮은 옥천광산 지역에서는 Cd와 Cu함량이 전 토층에 걸쳐 높게 나타나 다른 지역과 수직적 분포양상이 달랐다. 토양 층위별 총합량에 대한 0.1 N-HCl 침출성의 비율로 본 중금속의 유효도는 표토 (0~20 cm)에서 매우 높았고 토심이 깊어질수록 낮아지는 경향이였다. 그러나 토양 pH가 다른 지역보다 상대적으로 낮은 옥천광산 지역에서는 Cd, Cu 및 Pb의 침출성 비율이 토심 1 m까지 전층위에서 높게 나타났다. 이상의 결과에서 토양내 중금속의 수직분포와 이동특성에 있어 토양 pH가 중요한 요인으로 판단되며, pH가 낮은 중금속 오염지의 경우 용탈로 인한 지하이동 및 지하수 오염문제에 대하여 앞으로의 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Oh, J. K. (1997) Evaluation of contamination at closed mine and application methods of tailing wastes. Symposium on the remediation and application methods of environmental pollution around abandoned mine, 97-1. ILE. Forum of Environmental Policy. 15-51.
- Ryu, S. H., Lee, J. R. and Kim, K. H. (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.
- Lee, M. H., Rhu, H. I. and Suh, Y. S. (1994) Vertical distribution of heavy metal in paddy soil adjacent to lead and zinc mining site and their relation to soil characteristics, *J. of Kor. Soc. Groundwater Environ.* 1(2), 80-84.
- Jung, G. B., Kim, W. I., Moon, K. H. and Ryu, I. S. (2000) Extraction methods and availability for heavy metal in paddy soils near abandoned mining areas. *Kor. J. Environ. Agric.* 19(4), 314-318.
- Krebs, R., Gupta, S. K., Furrer, G. and Schulin, R. (1998) Solubility and uptake of metals with and without liming of sludge amended soils. *J. Environ. Qual.* 27, 18-23.
- Mench, M., Baize, D. and Mocquot, B. (1997) Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne District, Burgundy, France. *Environmental Pollution* 95(1), 93-103.
- Park, Y. S. and Kim, J. (2001) A study on the horizontal and vertical distribution of heavy metal elements in slime dump from Dukum mines, Korea. *Econ. Environ. Geol.* 33(2), 91-100.
- Lee, C. H., Lee, H. K. and Yin, J. M. (2001) Geochemistry,

- secondary contamination and heavy metal behavior of soils and sediments in the Tohyun mine creek, Korea. *Econ. Environ. Geol.* 34(1), 39-53.
9. Kim, J. U., Moon H. S., Song, Y. G. and Yoo, J. H. (1999) Chemical forms of heavy metals elements in mine wastes, stream sediments and surrounding soils from the Gubong mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.* 32(3), 261-271.
 10. Jung, G. B., Kim, W. I., Moon, K. H. and Ryu, I. S. (2000) Fractionation and availability of heavy metals in paddy soils near abandoned mining areas. *Kor. J. Environ. Agric.* 19(4), 319-323.
 11. Andreu, V. and Gimeno-Garcia, E. (1999) Evolution of heavy metals in marsh areas under rice farming. *Environmental Pollution* 104, 271-282.
 12. Sterckeman, T., Douay, F., Proix, N. and Fourrier, H. (2000) Vertical distribution of Cd, Pb, and Zn in soils near smelters in the north of France. *Environmental Pollution* 107, 377-389.
 13. de Matos, A. T., Fontes, M. P. F., da Costa, L. M. and Martinez, M. A. (2000) Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution* 111, 429-435.
 14. Martinez, C. E. and Motto, H. L. (2000) Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. *Environmental Pollution* 107, 153-158.
 15. Lee, Y. U., Chung, J. I. and Kwon, Y. H. (2001) The characteristic of heavy metal contamination in tailings and soils in the vicinity of the Palbong mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.* 34(3), 271-281.
 16. Ullrich, S. M., Ramsey, M. H. and Helios-Rybicka, E. (2000) Total and exchangeable of heavy metals in soils near Bytom, an area of Pb/Zn mining and smelting in upper Silesia, Poland. *Applied Geochemistry* 14, 187-196.
 17. Chlopecka, A., Bacon, J. R., Wilson, M. J. and Key, J. (1996) Form of cadmium, lead, and zinc in contaminated soils from southwest Poland. *J. Environ. Qual.* 25, 69-79.
 18. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology) (1988) *Methods of Soil Chemical Analysis*.
 19. Ministry of Environment (1999) *Standard Test Method for Soil Pollution*.
 20. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology) (1999) *Monitoring of the soil fertility in major agricultural land. A counter measuring studies to the changes of agricultural environment*.