

제련소 주변토양 중금속 존재형태

우상덕¹ · 김건하^{1*} · 김영진² · 남경필²

¹한남대학교 건설시스템공학과, ²서울대학교 건설환경공학부

Existing Forms of Heavy Metals in the Vicinity of a Smelter

Sangduck Woo¹ · Geonha Kim^{1*} · Young-jin Kim² · KyoungPhile Nam²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

²Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

Abstract

Heavy metals in soils exist in various forms dependent upon surrounding conditions. As the Janghang smelter area is of concern for its high elevated heavy metal concentrations, Korean government decided to remediate the area. Main objectives of this research were; to analyze heavy metal concentrations and their existing forms in the vicinity of the smelter; and to understand differences made by analysis techniques of heavy metals. Top soils of rice field, crop field, bare field, and forestry in the area were sampled and analyzed for their physicochemical characteristics. Concentrations of Cu, Cd, Pb, and As were analyzed with two pretreatment techniques adopted using 0.1 N HCl and aqua regia. To analyze existing forms of heavy metals, Tessier's schemes for sequential extraction technique were adopted. Exchangeable fraction and carbonate bound fraction of heavy metals may pose potential threat to environment and were in the order of Pb > As > Cu > Cd. If assessing mobile fraction of heavy metals by land uses, the order was forestry > bare land > crop field > rice field. When analyzed using Tessier's scheme, high ratio of residual fractions to total arsenic concentration should be considered for remediation design of the area.

Key Words : Arsenic, Heavy metals, Land use, Sequential extraction, Smelter, Soil

1. 서 론

충남 서천군 장항읍에 위치한 장항제련소는 1936년 조선제련 주식회사로 설립되어 1989년까지 주로 동, 납, 주석을 제련 하였으나, 현재는 조업을 완전히 중단한 상태이다. 2008년도 환경부에서 실시한 장항제련소 주변지역 주민건강 영향조사 결과, 조사군의 혈중과 뇨중 카드뮴 농도, 혈중 납 농도, 혈청중 구리 및 니켈 농도, 뇨중 비소 농도가 대조군에 비하여 유의하게 높았다(환경부, 2008). 주변토양 오염경로는 제련소 굴뚝에서 배출되는 분진과 광석의 운반과정 중 발생하는 분진에 의한 것으로 보고되고 있다(환경부, 2009a). 따라서 정부는 2009년 7월 장항제련소 주변 토양오염을 개선하기 위하여 관계부처와 합동으로 장항제련소 주변지역을 토양오염 개선 종합대책을 확정 발표하였다(환경부, 2009b).

중금속에 의한 토양오염의 심각성을 인식하여 2010년부터 중금속 전 항목 전처리 방법이 용출법에서 토양에 존재하는 중금속 전함량을 측정하는 왕수추출법으로 변경되었다. 또한 오염물질별로 배경농도, 인체 및 생태위해성 평가 및 각국의 토양오염기준 등을 고려하고 토지이용도별 토양오염기준을 세분화하도록 변경되었다(환경부, 2009b). HF/HClO₄/HNO₃ 혼합액을 사용하여 토양을 100% 액화시킨 후 측정된 중금속 농도를 100%로 하면 왕수추출법은 약 70~90%이 추출된다고 보고되고 있다(국립환경과학원, 2005). 0.1 N HCl을 사용한 용출법을 사용하여 환경적으로 위대한 존재형태를 검출할 수 있다는 의견이 있으나, EDTA 또는 DTPA와 같은 유기용제로 추출하는 방법이 더 효율적이라는 의견이 있다(국립환경과학원, 2005).

중금속이 유출가능한 형태로 존재하면 주변환경에 미치는 위해성은 증가되며 유출되는 중금속은 주변 수계 및

*Corresponding author : kimgh@hnu.kr

원고접수일 : 2010. 7. 16 심사일 : 2010. 7. 20 게재승인일 : 2010. 9. 16
질의 및 토의 : 2010. 12. 31 까지

하부 농경지에 까지 영향을 미쳐 심각한 중금속 오염을 유발시킬 수 있다. 따라서 토양내 함유된 중금속의 전함량뿐만 아니라 토양의 광물학적 특성 및 중금속의 존재형태규명이 중요하다(서지원, 2007).

공정시험법에 명시되어 있지 않지만 존재형태를 분석하는 방법으로 연속추출법(Sequential Extraction Technique)이 많이 사용되는데 중금속의 존재형태는 토양/지하수 내 거동 및 생물이용도와 밀접한 관계가 있으므로 환경에 대한 영향을 예측할 수 있다. 존재형태 분석방법 중 BCR(Community of Bureau of Reference)법(Sahuquillo et al., 1999)과 함께 많이 사용되는 Tessier 연속추출법(Tessier et al., 1979)을 이용하여 분석할 수 있는 중금속 존재형태는 다음과 같다: 1) Exchangeable fraction(교환 가능한 양): 점토질, hydrate oxide, humic acid에 흡착, 탈착 되어 있는 양이며 pH의 영향이 크다; 2) 탄산염과 결합되어 있는 양(carbonate bound fraction): 토양 중 존재하는 탄산염과 결합되어 있는 양이며 pH에 민감하다; 3)

철 또는 망간과 결합된 양(iron and manganese oxide bound fraction): 환원조건에서 유출된다; 4) 유기물질과 결합된 양(organic bound fraction): 착화합물(complexation)을 생성, 산화조건에서 금속류가 유출된다; 5) 모두 유출된 후 남은 잔유물(residuals fraction): 결정 중 포함된 양이므로 자연적으로 유출되지 않는다.

따라서 본 연구에서는 장항제련소 주변토양에 대하여 중금속 존재형태를 분석하고 동시에 용출법과 왕수법 전처리를 거친 중금속 농도를 분석하여 규제 및 정화에 이용되는 농도값의 타당성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료채취

Fig. 1은 충남 서천군 장항읍 소재 장항제련소 주변 시료채취 지점을 보이고 있다. 굴뚝 반경 2 km 내 지역에서 표토(0~30 cm) 8 지점을 선정하였으며 토지이용에 따라

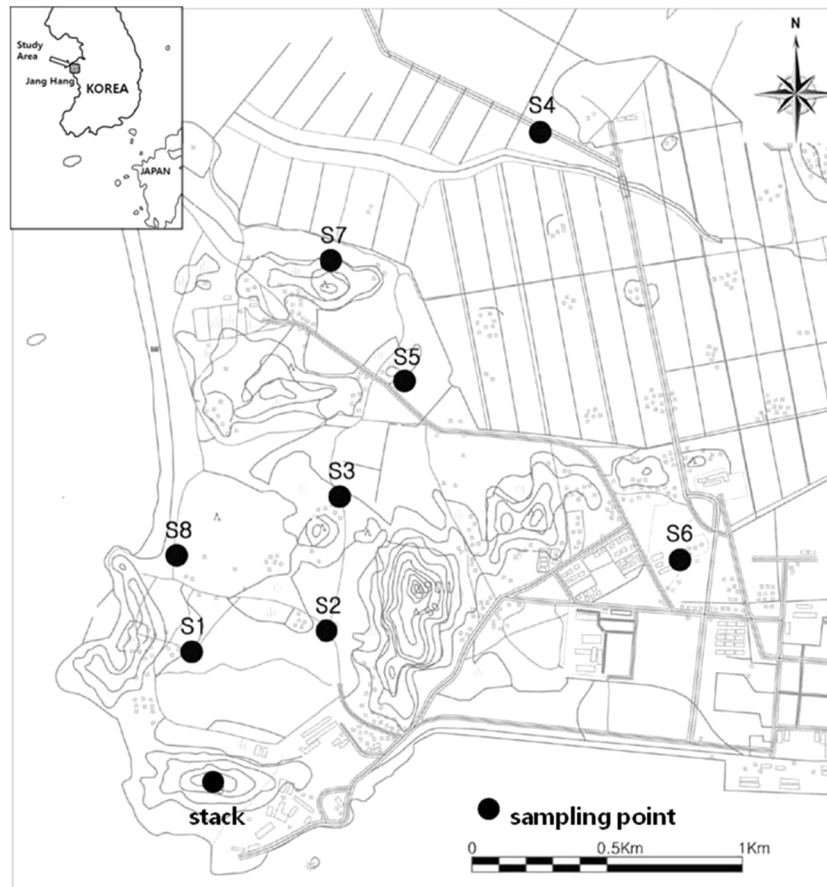


Fig. 1. Schematic Representation of Soil Sampling Locations in the vicinity of Janghang smelter (S1 & S2: crop field; S3 & S4: rice field; S5 & S6: bare field; S7 & S8: forestry).

밭(code: S1, S2), 논(code: S3, S4), 대지(code: S5, S6), 임야(code: S7, S8) 각 2지점씩이다. 핸드오거와 삽을 사용하여 표토시료를 채취하여 폴리프로필렌 밀폐 용기에 담고, 실험실로 옮긴 후 축분법으로 대표시료를 만든 후 건조로(50°C)에서 건조시켰다.

2.2. 시료의 물리화학적 성상

토양시료의 pH는 Thomas(1996)에 준하여 토양과 증류수의 무게비를 1:5인 현탁액에 전극을 담가 측정하였다. 양이온교환능력(cation exchange capacity, CEC)는 Summer and Miller(1996)가 제안한 1 N NH₄Ac(pH7) 침출법을 따랐다. 비표면적(surface area)은 Eltantaway and Arnold(1973)의 비중계 분석을 따랐고 유기물 함량(organic content)은 Swift(1996)가 제안한 Walkley-Black 법을 사용하였다. 탄산염 함량(carbonate content)은 Loeppert and Surez(1996)가 제시한 ignition loss 방법을 사용하였다.

2.3. 시료전처리 및 분석

중금속 분석항목은 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 비소(As)이고 중금속 농도 분석은 유도결합 플라즈마 발광광도법(ICP-AES, Shimadzu ICPS-7510)을 사용하였다. 시료전처리를 위하여 공정시험법에 명시된 0.1 N HCl 용출법과 왕수추출법을 사용하였다. 용출법의 개략은 다음과 같다: 1) 토양시료를 눈금간격 2 mm 표준체로 체가름하여 시료로 삼는다; 2) 시료 10 g을 정밀히 취하여 100 mL 삼각플라스크에 넣는다; 3) 0.1 N(As의 경우 1 N) HCl 50 mL를 첨가하여 항온수평진탕기를 이용하여 30분간 진탕시킨다; 4) 5B 여지로 여과하여 분석여액으로 한다.

왕수추출법은 다음과 같은 방법을 사용하였다: 1) 눈금간격이 0.15 mm인 표준체를 이용하여 체가름하여 시료로 삼는다; 2) 시료 3 g을 취한다음 250 mL 반응용기에 넣는다; 3) 1 mL의 물로 시료를 적힌 후 염산 21 mL을 넣고 잘 섞은 다음 질산 7 mL을 가하여 잘 저어준다; 4) 2시간 동안 정치시킨 후 2시간 동안 가열하고 냉각시켰다; 5) 100 mL 용량플라스크에 여과하고 물로 표선까지 채워 분석여액으로 한다.

2.4. 연속추출법

중금속 존재형태 분석은 Tessier등(1979)이 제시한 연속추출법을 적용하였다. 연속추출법의 분석방법은 다음과 같다: 1) 눈금간격 180 μm 표준체로 체가름하여 분석시료로 삼는다; 2) 시료 1 g에 8 mL의 0.5 M MgCl₂를 첨가하여 1시간 진탕시킨 후 침출된 양을 교환가능한 양(exchangeable

fraction)으로 삼는다; 3) 전 단계에서 침출되고 남은 시료에 1 M NaOAc 8 mL을 첨가한 후 진탕시켜 침출된 양을 탄산염과 결합된 양(bound to carbonate)으로 삼는다; 4) 전단계 침출된 시료에 0.04 M NH₂OH HCl + HOAc 20 mL을 첨가하여 진탕시킨 후 침출시켜 철/산화망간과 결합된 양(bound to Fe-Mn oxide fraction)으로 삼는다; 5) 전 단계에서 침출되고 남은 시료에 0.02 M HNO₃ 3 mL + 30% H₂O₂ 5 mL을 넣어 진탕시킨 후 침출된 양을 유기물질 또는 황화물과 결합된 양(bound to organic and sulphides fraction)으로 삼는다; 6) 전 단계 추출에서 남은 양을 HF/HClO₄/HNO₃을 이용하여 침출시켜 잔류량(residual fraction)으로 삼는다.

각 단계에서 침출된 용액은 ICP-AES(SHIMADZU ICPS-7510)로 분석하였다.

2.5. 정도 관리

화학분석 정도관리를 위하여 외부 표준물질(Standard Reference Material)의 분석하였으며 외부 공인분석기관과 분석값을 교차검증하였다. 토양 연속추출법을 사용하는 경우 각 단계에서 증류수로 시료를 세척하여 단계별 추출값이 상호 영향을 받지 않도록 하였다. 연속추출법에서 추출한 값의 합과 왕수추출법으로 측정된 값을 상호 비교하여 분석 정확도를 확보하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 시료의 성상

Table 1은 토양시료의 물리화학적 성상을 보이고 있다. 입도분석 결과, 밭, 대지, 임야는 사질토이며, 논은 실트로 분류되었다. 함수율은 10~25%로 나타났으며 평균 비중은 2.6이었다. pH는 6.4~7.3 범위이며, 전기전도도는 136~1,144 μm/cm의 범위로 토지이용도별로 상당히 다른 값을 나타내었다. 유기물질량은 강열감량으로 측정된 경우 3.4~3.9%로 큰 차이를 보이지 않았으나 Walkley-Black법으로 측정하는 경우 1.6~3.2%의 값을 보여 지점간 상당한 값 차이를 보였고, 평균 2.3%으로 우리나라의 경작지 평균 유기물함량 2.6%보다 낮은 것으로 나타났다. 탄산염 농도는 0.16~1.31%이었으며 CEC는 4.37~6.93 cmol/kg의 값을 보였다.

3.2. 전처리법에 따른 분석결과

Table 2은 토양시료를 용출법과 왕수추출법 등 두가지 방법으로 전처리하여 분석한 Cu, Cd, Pb, As 항목 농도

Table 1. Physicochemical characteristics of soil samples

code	Land use	pH	EC ^{*1} ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	OM ^{*2} (%)	OM ^{*3} (%)	Carbonate content (%)	CEC ^{*4} (mg/kg)	Water content	Specific gravity	classification
S1	crop field	6.8	650	3.5	2.2	0.94	2778	22.84	2.58	Sand
S2	crop field	6.5	805	3.4	2.7	0.64	1765	19.02	2.61	Sand
S3	Rice field	7.2	568	3.6	2.9	0.77	728	25.40	2.44	Silt loam
S4	Rice field	7.1	641	3.3	3.2	1.31	661	25.32	2.32	Silt loam
S5	Bare land	6.9	146	3.7	2.2	0.31	845	14.84	2.62	Sand
S6	Bare land	7.3	1144	3.7	1.6	0.18	989	10.31	2.63	Sand
S7	Forestry	6.5	136	3.9	2.1	1.03	966	22.12	2.82	Sand
S8	Forestry	6.4	149	3.5	1.8	0.16	1027	5.97	2.65	Sand

*1 Electrical conductivity

*2 Organic matters(Ignition Loss)

*3 Organic matters(Walkley-Black Method)

*4 Cation exchange capacity

Table 2. Heavy metal concentrations analyzed by two extraction methods

Code	Extracted using 0.1 N HCl (mg/kg)				Extracted using aqua regia (mg/kg)			
	Cu	Cd	Pb	As ^{*1}	Cu	Cd	Pb	As
S1	19.3	0.2	22.7	7.9	54.0	2.4	66.4	62.4
S2	21.2	0.1	32.0	8.8	59.4	2.3	102.8	64.5
S3	12.7	0.3	8.8	16.2	48.0	1.0	57.4	53.7
S4	12.2	0.0	14.7	14.3	23.0	0.7	38.7	44.5
S5	4.4	0.1	4.6	8.7	21.9	1.9	35.6	55.1
S6	1.8	nd ^{*2}	1.4	2.3	29.6	1.8	42.6	47.1
S7	31.4	nd	178.6	20.3	95.9	2.1	258.2	192.4
S8	13.2	nd	59.2	9.7	93.3	1.1	268.3	91.4

*1 extracted using 1 N HCl

*2 not detected

를 보이고 있다. 2009년 개정된 토양환경보전법에 명시되어 있는 우려기준은 전, 답, 대지, 임야 구분없이 용출법으로 전처리하며, Cu 50 mg/kg, Cd 1 mg/kg, Pb 100 mg/kg, As 6 mg/kg이다. 용출법으로 전처리한 Cu, Cd 항목 분석값은 우려기준을 초과하는 지점이 없었고, Pb는 임야 1지점(S7)에서 178.6 mg/kg으로 우려기준보다 약 1.8배 높은 값을 보이고 있다. As 항목은 모든 토지이용에서 우려기준보다 높았으며 특히 논(S3, S4)과 임야(S7, S8)에서 높은 값을 보였다. 2008년 전국 토양오염실태 조사결과 밭, 논, 대지, 임야에 대한 As 농도값은 0.133~ 0.317 mg/L 범위였는데(환경부, 2009c), 이와 비교하여 본 연구에서 측정된 농도는 전국평균에 비하여 상당히 높은 값을 보이고 있다. 2009년 토양환경보전법 개정후 전처리법이 왕수추출법으로 변경되었으며, 전, 답, 대지는 1지역으로 구분되어 토양오염 우려기준은 Cu 150 mg/kg, Cd 4 mg/kg, Pb 200 mg/kg, As 25 mg/kg이고 임야는 2지역으로 구분되어 Cu 500 mg/kg, Cd 10 mg/kg, Pb 400 mg/kg, As 50 mg/kg

이다. 개정된 기준으로 오염도를 판단했을 때 왕수를 이용하여 전처리한 Cu, Cd, Pb 항목은 토양오염 우려기준을 초과하는 지점은 없었고, As는 모든 지점에서 우려기준을 초과하였는데, 특히 임야지역에서의 오염농도가 높은 것으로 나타났다.

장항제련소 주변토양에서 As 항목 분석치는 용출법과 왕수추출법 전처리를 사용하는 경우 거의 모든 지점에서 우려기준을 초과하여 당해 지역에서 비소 오염이 심각함을 확인 할 수 있었다. As 농도는 용출법을 사용하는 경우 임야 > 밭 > 논 > 대지 순서로 오염농도가 높은 것으로 나타났는데 이는 전, 답, 대지 등은 필요에 따라 외부토양이 반입되어 복토 또는 혼합된 경우가 있으나, 임야의 경우 오염이 축적되어 있기 때문으로 사료된다. 왕수추출법을 사용하는 경우 대부분 용출법을 이용한 측정치보다 높았으며, 임야를 제외한 논, 밭, 대지의 왕수추출법 농도가 같은 수준을 보였다. 밭, 논, 대지의 용출법을 이용한 As 농도가 서로 다른 것을 고려하면 토지이용에 따라 용출될

수 있는 As 양은 차이가 있음을 알 수 있다.

Cu 항목의 왕수추출법과 용출법 전처리를 이용한 분석 결과를 비교하여 보면 용출법을 이용한 경우 측정값은 왕수추출법 측정값의 약 28%이며 Cd 항목의 경우 16%, Pb 항목의 경우 평균 28%이었다. 토양 중 As 항목의 왕수추출법과 용출법간 분석결과를 비교하여 보면 용출법이 평균 12%로 나타나 다른 중금속 항목에 비하여 비교적 낮은 용출특성을 나타내고 있다. 이는 배경농도 조사에서 얻어진 왕수법 및 용출법 시험방법 간 비율에 의한 환산은 그 값이 토지이용도별로 비율이 다양하다는 전차연구 결과와 일치한다(국립환경과학원, 2005).

3.3. 연속추출법 분석 결과

Table 3은 연속추출법으로 분석한 중금속 존재형태 분석결과를 보이고 있다. 연속추출법은 Tessier(1979)의 방법을 따랐으며, 따라서 교환가능량, 탄산염 결합량, 철/산화망간 결합량, 유기물결합량, 잔류물로 나누어 농도를 보이고 있다.

존재형태에 따라 환경으로 유출될 수 있는 기작과 경로가 다르다. 환경에 가장 위대한 부분은 중성 또는 약산에 의해 쉽게 용출될 수 있는 부분이다. 이는 수용성이며, Tessier가 제안한 존재태 중 교환가능량과 탄산염 결합량의 합으로 추정할 수 있다. 철 또는 산화망간과 결합되어 있는 부분은 환원상태에서 유출될 수 있으나 이 존재태는

Table 3. Heavy Metal Concentrations of Each Fractions by Tessier's Scheme (unit: mg/kg)

		Exchangeable	Carbonate bound	Fe & MnO bound	Organic bound	Residuals	Sum
Cu	S1	0.3	7.4	9.6	13.3	24.3	55.0
	S2	1.6	5.2	12.1	9.3	14.1	42.2
	S3	0.3	3.6	6.3	21.2	7.1	38.5
	S4	0.2	4.5	2.2	4.7	1.3	12.9
	S5	0.3	1.9	2.1	8.4	9.4	22.1
	S6	0.3	4.6	4.9	4.1	5.9	19.7
	S7	7.4	28.0	20.3	24.5	17.8	98.0
	S8	5.4	35.7	12.3	31.5	12.4	97.3
Cd	S1	0.3	0.6	0.5	0.0	3.0	4.4
	S2	0.4	0.4	0.1	0.0	1.6	2.5
	S3	0.3	0.4	0.3	0.1	0.8	1.9
	S4	0.3	0.3	0.2	0.0	0.6	1.5
	S5	0.3	0.5	0.3	0.0	1.6	2.6
	S6	0.3	0.4	0.2	0.0	1.2	2.1
	S7	0.3	0.3	0.3	0.1	1.6	2.5
	S8	0.3	0.4	0.1	0.0	2.3	3.1
Pb	S1	3.9	24.3	40.6	5.9	26.0	100.7
	S2	6.5	15.2	40.0	4.5	24.4	90.6
	S3	3.9	9.5	10.7	9.6	18.6	52.3
	S4	4.4	18.6	8.6	3.3	14.1	48.9
	S5	4.2	11.5	12.1	2.0	13.0	42.7
	S6	4.2	11.6	10.7	1.2	14.8	42.4
	S7	100.2	141.5	71.1	19.6	16.4	348.7
	S8	97.8	205.6	52.6	11.5	20.8	388.2
As	S1	2.8	6.0	3.0	1.6	169.4	182.8
	S2	2.9	8.3	5.2	0.6	76.4	93.5
	S3	2.9	3.7	5.0	3.9	112.1	127.7
	S4	2.8	4.2	4.2	1.7	117.9	130.8
	S5	3.0	4.9	1.9	0.9	65.0	75.7
	S6	3.1	5.6	2.1	0.1	91.4	102.2
	S7	3.4	7.5	14.0	6.2	127.9	158.9
	S8	7.0	8.9	13.9	3.3	91.2	124.1

전 단계 추출에서 탄산염이 완전히 용출되지 않았을 경우 높게 검출되며, 전 용출단계에서 철과 망간성분이 용출되었다면 이 부분이 낮게 검출된다(Anju & Banerjee, 2010). 유기물과 결합된 부분은 산화상태에서 유출된다. 중금속의 존재형태가 불안정한 형태로 존재하는 중금속 비율이 클수록 오염원으로서 위험성은 증가하며 잔류형태의 존재 비율이 크면 안정한 형태로 존재하는 것을 알 수 있다.

Table 3에서 밭(S1, S2)의 Cu 농도가 논(S3, S4)보다 크게 나타나고 있는데, 이는 Fig. 2에 보인 토지이용별 중금속 존재태 평균값을 보면 좀 더 명확하게 설명된다. 밭의 경우 산화상태를 유지하므로 중금속이 유동성이 크고, 따라서 잔류형태 비율이 상대적으로 높다. 이와 비교하여 논은 환원상태를 유지하고 있으며, 유기물질이 상대적으로 많으므로 유기물질과 결합된 존재태 구성비율이 높다. 임야의 경우 용출될 수 있는 존재태가 높고, 또한

총 농도 또한 높다.

Cd은 밭, 논, 대지, 임야에서 유기물과 결합된 농도가 매우 낮은 양상을 보이고 있으며, 잔류물질이 높은 양상을 보이고 있다. Pb는 밭이 논보다 농도가 높으며 임야지역의 농도가 매우 높게 나타났다. 특히 Fe와 산화망간과 결합된 양이 높았으며, 임야의 경우 유출될 수 있는 양이 높게 나타났다. 임야의 잔류물질 구성비는 다른 지역과 동일한 양을 나타내고 있다.

As의 농도는 임야농도가 높다. 임야의 경우 잔류물질 구성비가 상대적으로 낮았다. As의 경우 연속추출법에서 비교적 쉽게 용출될 수 있는 교환가능량, 탄산염 결합량, 철/산화망간결합량과 용출법을 비교하면 용출법의 크기가 작다.

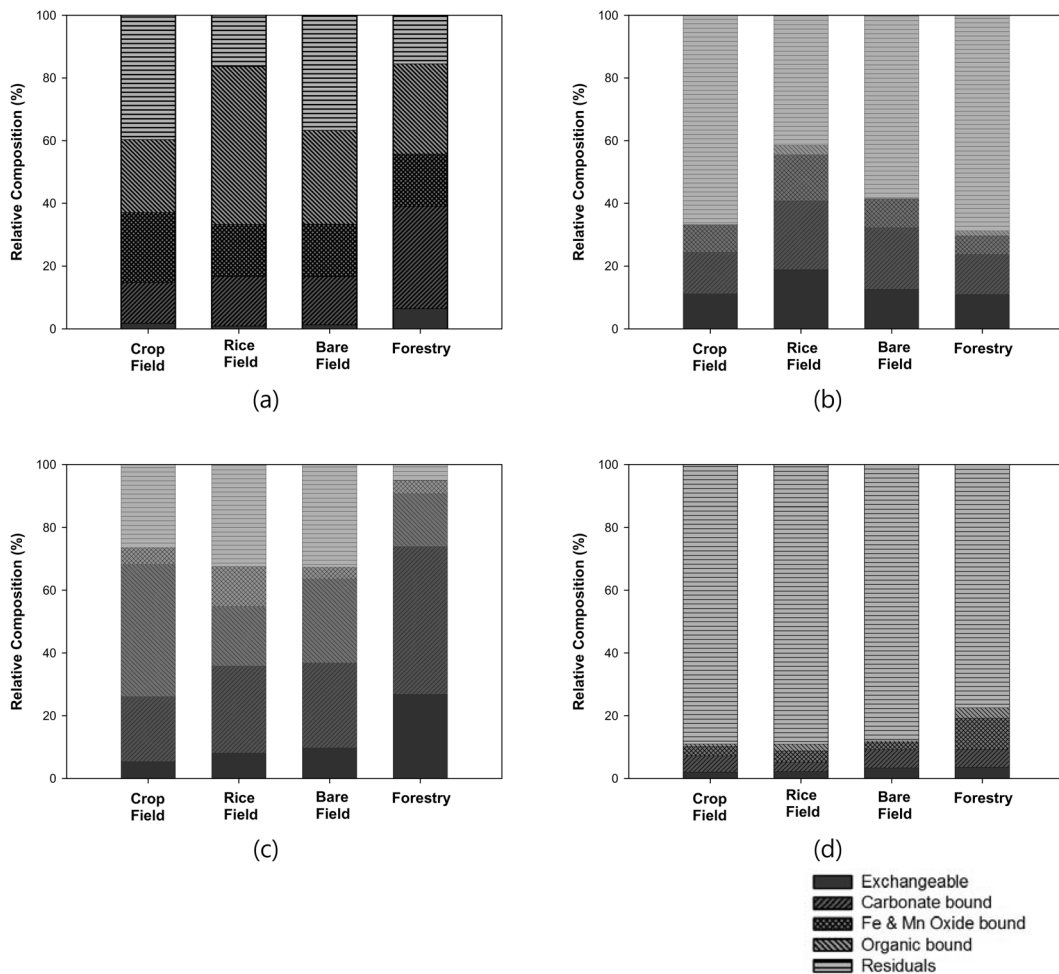


Fig. 2. Relative proportion of the existing forms of heavy metals extracted by Tessier's scheme; (a) Copper (Cu); (b) Cadmium (Cd); (c) Lead (Pb); (d) Arsenic (As).

4. 결 론

본 연구에서는 장항제련소 2 km 반경 내 표토를 논, 밭, 대지, 임야별로 채취하여 용출법과 왕수추출법으로 각각 전처리하여 Cu, Cd, Pb, As 농도를 측정하였으며 또한 Tessier가 제안한 연속추출법을 적용하여 중금속 존재태를 분석하였다.

토지이용에 따른 존재태 분석결과 밭에서는 산화상태를 유지하므로 중금속의 이동성이 크고, 따라서 잔류형태 비율이 상대적으로 높으며 논은 환원상태를 유지하고 있고 유기물질이 상대적으로 많으므로 유기물질과 결합된 존재태 구성비율이 높다.

As 농도는 전처리 방법과 관계없이 거의 모든 지점에서 우려기준을 초과하였으며 용출법으로 전처리 한 경우 농도 값은 임야 > 밭 > 논 > 대지 순서이었다. 이는 진, 답, 대지 등은 필요에 따라 외부토양이 반입되어 복토된 경우가 있었으나, 임야의 경우 오염이 축적되어 있기 때문이며 따라서 임야에 대한 정화가 필요하다.

임야의 경우 용출될 수 있는 존재태가 높고, 또한 총 농도 또한 높다. Cd은 밭, 논, 대지, 임야에서 유기물질과 결합된 농도가 매우 낮은 양상을 보이고 있으며, 잔류물질이 높은 양상을 보이고 있다. Pb은 밭이 논보다 농도가 높으며 임야지역의 농도가 매우 높게 나타났다

연속추출법 분석에서 환경에 위해도가 높은 존재형태는 교환가능량, 탄산염 결합량의 합으로 나타낼 수 있는데, Pb > As > Cu > Cd 순으로 나타났고, 지목별로는 임야 > 대지 > 진 > 답 순으로 이동도가 높은 것으로 나타났다. 제련활동을 중지한지 10여년이 넘었지만 50년 전부터의 제련활동으로 인해 토양환경에 미친 영향이 상당함을 알 수 있다. 또한 As는 잔류물질 형태의 농도가 높으므로 이를 추출 또는 제거할 수 있는 정화공법을 선정하여야 한다.

감사의 글

이 연구는 환경부 GAIA사업 토양연구단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원, 2005, 토양오염기준 평가 및 확립에 관한 연구 (II), 2005-08-753
- 서지원, 2007, 울산 달천광산 토양내 중금속의 존재형태 및 오염도 연구, 석사학위논문, 대전대학교.
- 환경부, 2008, (구)장항제련소 주변지역 주민건강영향조사 결과 환경부보도자료
- 환경부, 2009a, 토양보전법 기본계획, 발간등록번호11-1480000-001048-01, p. 70-73.
- 환경부, 2009b, 토양환경보전법 시행규칙 일부개정령, 환경부령 제 333호.
- 환경부, 2009c, 2008년도 토양측정망 및 토양오염 실태조사결과, 발간등록번호 11-1480000-000669-10.
- Anju, M. and Banerjee, D.K., 2010, Comparison of two sequential extraction procedures for heavy metal partitioning in mine tailings, *Chemosphere*, **78**(11), 1393-1402.
- Eltantaway, I.N. and Arnold, P.W., 1973, Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimation of clays, *Soil Science*, **24**, 232-238.
- Loeppert, R.H. and Suarez, D.L., 1996, Carbonate and Gypsum, Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis., *Soil Science Society of America*, 437-474.
- Sahuquillo, A. and López-Sánchez, J. F., 1999, Use of a certified reference material for extractable trace metals to assess sources of uncertainty in the BCR three-stage sequential extraction procedure, *Analytica Chimica Acta*, **382**(3), 317-327.
- Summer, M.E. and Miller, W.P., 1996, Cation exchange capacity and exchange coefficients, Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis, *Soil Science Society of America*, 1201-1229.
- Swift, R.S., 1996, Organic matter characterization."Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis., *Soil Science Society of America*, 1011-1069.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**(7), 844-850.
- Thomas, G.W., 1996, Soil pH and soil acidity, Method of Soil Analysis:3. Chemical Analysis, *Soil Science Society of America*, 475-490.