한국환경분석학회지 제19권 (제1호) 54~62, 2016
J. of the Korean Society for Environmental Analysis

제련소 주변 토양의 입경별 비소 및 중금속 분포 특성

김은정[1] · 유종찬[2] · 박상민[2] · 박응렬[2,3] · 백기태[2,†]
[1]국립목포대학교 환경공학과, [2]전북대학교 환경공학과, [3]한국환경공단

Distribution of Arsenic and Heavy Metals in Soil Particle Sizes in the Areas Affected by the Former Smelter

Eun Jung Kim[1], Jong-Chan Yoo[2], Sang-Min Park[2], Eung-Ryel Park[2,3], and Kitae Baek[2,†]
[1]Department of Environmental Engineering, Mokpo National University
[2]Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University
[3]Korea Environment Cooperation

Received February 16, 2016/Revised February 24, 2016/Accepted March 22, 2016

Distribution of heavy metals in different particle size fraction of soil could affect the risk of human metal intake and the soil removal efficiencies. In this study, metal contaminations in soils and metal distributions in various soil particle sizes were investigated in the areas affected by the former Janghang smelter. Soil samples were collected from two rural areas (A, B) located over 3 km away from the former smelter and one area (C) located within 100 m from the smelter. Soils were partitioned into four particle size fractions (>2 mm, 2-0.075 mm, 0.075-0.038 mm, and <0.038 mm) and metal distributions in particle size fractions were characterized. Soils in site C was highly contaminated with arsenic and heavy metals due to the influence of the smelter, while metal concentrations in sites A and B were quite low compared to those in site C. The metal concentrations in site A were close to the background metal concentrations indicating that this site was not affected by the smelter. On the other hand, soils in site B showed high arsenic concentrations, which might be affected by the smelter and soil mineral characteristics in this site. Lead and copper were accumulated in the fine particles (<0.038 mm) mainly by sorption, while arsenic was enriched in sand fraction (0.075-2 mm) associated with soil minerals.

Key words: Heavy metals, Arsenic, Soil particle size

1. 서 론

(구) 장항 제련소 부근 토양 중 비소 및 중금속의 오염이 심각하여 현재 정화사업이 이루어지고 있다. 제련소 부근 토양의 중금속 오염은 원광석에 포함된 비소, 납, 구리 등의 중금속이 제련과정에서 굴뚝을 통하여 비산되거나 원광석의 운반과정 중 분진의 비산으로 인하여 발생된다[1,2]. 2007년에 시행한 토양 정밀 조사 결과에 따르면 제련소 반경 500 m 이내 토양 중 비소 및 구리, 아연, 납, 카드뮴, 니켈의 농도가 오염기준치를 초과하였으며 반경 800-1300 m 지점 에서는 비소만이 우려기준을 초과한 것으로 보고되었다[3]. 일반적으로 제련소로부터 멀어질수록 오염도는 감소하며 주로 제련소 반경 2 km 이내 영향 지역에 대한 토양 중 오염 및 위해도에 관한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다[2-4]. 하지만 제련소로부터 원거리 지역 역시 제련과정에서 비산된 입자들의 원거리 이동에 의해 토양오염이 이루어질 수 있다.

토양 중 중금속의 오염은 주변 지표수 및 지하수, 그리고 농작물을 오염시켜 궁극적으로는 인체에 심각한 위해를 끼칠 수 있다. 또한 중금속으로 오염된 토양이 손과 같은 피부에 접촉하거나 토양입자의 섭취로 인하

†To whom correspondence should be addressed.
Tel: 82-63-270-2437, Fax: 82-63-270-2449, E-mail: kbaek@jbnu.ac.kr

여 인체가 중금속에 노출될 수 있으며 특히 어린아이들의 경우 토양 섭취에 의한 체내 중금속 노출이 심각한 것으로 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다[5-7]. 토양을 통한 중금속의 인체노출은 토양 입자의 크기에 크게 영향을 받게 된다. 토양은 입경에 따라 자갈 (>2 mm), 모래 (0.05-2 mm), 실트 (0.002-0.05 mm), 점토 (<0.002 mm)로 나누어 이들의 구성 비율에 따라 토성(soil texture)을 구분하게 된다. 일반적으로 토양 입자의 입경이 작을수록 표면적이 증가하고 점토 광물과 유기물의 함량 높을 뿐 아니라 철-망간산화물 형태가 존재할 수 있기 때문에 오염물질의 농도가 높게 된다[6]. 따라서 입자의 크기는 토양을 통한 인체에 노출되는 중금속의 양 뿐 아니라 중금속의 생체접근성(bioaccessibility)에 영향을 준다[5-7]. 또한 토양 입자의 크기는 토양 정화 시 정화효율에 영향을 줄 수 있으며 토양입경 분리를 통해 정화대상 토양의 양을 크게 줄일 수 있다. 따라서 토양 입경 별 중금속 오염 특성을 정확히 평가하는 것은 토양에 의한 위해성 평가 뿐 아니라 효과적으로 오염토양을 정화하기 위하여 필요하다.

본 연구에서는 (구)장항제련소 반경 3 km 이상 지역 중 중금속 오염도를 분석하여 제련소 반경 100 m 이내의 매입구역과 비교함으로써 제련소로부터 거리에 따른 토양오염 특성을 평가해보고 토양 입경 별 비소와 납, 구리의 오염특성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 토양시료 및 분석

본 연구에서는 구 장항제련소(충청남도 장항)에서 북쪽과 북동쪽으로 3-4 km 거리에 있는 비매입 구역 두 지점 A(옥남리)와 B(성주리)를 선정하여 각각 9개(A1-A9)와 19개(B1-B19) 지점에서 토양을 채취 하였으며 제련소에 의한 영향 비교를 위하여 제련소 100 m 이내 매입구역(C) 중 2 지점(C1-C2)에서 토양을 채취하였다(Fig. 1). 시료 채취 지역 근처의 제련소 외 인위적 오염원으로는 제련소로부터 동쪽으로 1.5-2 km 거리에 제지 및 유리 공장이 위치한 산업단지(지도표시)와 5 km 거리에 방직, 금속산업 등이 위치한 농공단지가 존재하였다. 시료 채취지점의 토지는 A1과 A7은 논이고 다른 A, B 지점은 밭이었으며 C 지점은 대지로 이용되고 있었다.

토양 시료는 각 지점에서 표토층(0-30 cm)을 채취하였으며 입도 분석시험은 KS F 2302에 준하여 10, 200, 400 mesh 체를 이용하여 습식선별 방법을 사용 입경을 2 mm 이상, 2-0.075 mm, 0.075-0.038 mm, 0.038 mm 미만으로 분리하여 입도분석을 수행하였다. 토양 중 총 중금속 농도는 대상 토양을 건조기를 이용하여 70°C에서 수일간 건조 후 100 mesh (0.15 mm 입경) 체를 이용하여 그 미만의 토양을 분석하였다. 입도분리에 의해 분리된 입경별 (>2 mm, 2-0.075 mm,

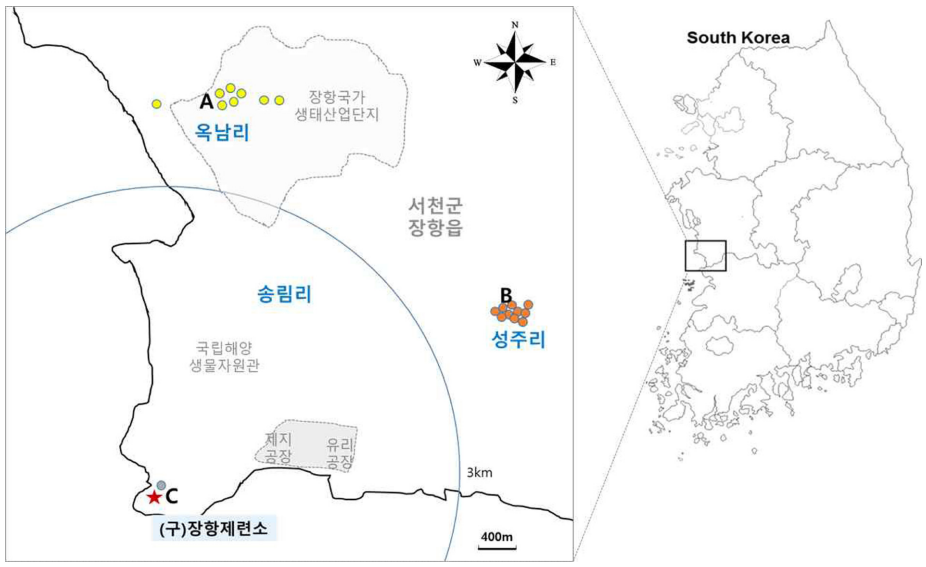

Fig. 1. Sampling locations of soil samples near former Janghang smelter.

Table 1. SM&T sequential extraction conditions

Fraction	Extractable phase	Reagents
F1	Soluble, exchangeable, and carbonate bound	40 mL 0.11 M CH_3COOH
F2	Fe and Mn oxide bound	40 mL 0.5 M $NH_2OH{\cdot}HCl$ at pH1.5
F3	Organic matter and sulfide bound	10 mL 8.8 M H_2O_2
		50 mL 1 M CH_3COONH_4
F4	Residual	10 mL 3:1 HCl: HNO_3 (aqua regia)

0.075-0.038 mm, <0.038 mm) 중금속 농도는 입도 선별 후 건조기를 이용하여 70°C에서 건조한 후 막자와 막자 사발을 분쇄하고 100 mesh 체를 이용하여 체를 친 후 토양에 대하여 중금속 오염도를 분석하였다. 토양 중 중금 분석은 토양오염공정시험기준(환경부)에 따라 왕수추출법으로 추출한 후 유도결합플라즈마발광광도기(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) (Agilent Tech, USA)를 이용하여 분석하였다. 모든 시료는 동일한 시료를 대상으로 2회 반복 추출하여 분석한 후 평균값을 사용하였다.

연속추출법에 의한 비소를 포함한 중금속의 존재형태 분석은 SM&T(Standards, Measurements, and Testing program of the European Commission) 방법[8]에 의해 (F1) 이온교환 형태, (F2) 산화물에 결합된 형태, (F3) 황화물 및 유기물에 결합된 형태와 (F4) 잔류상으로 구분하여 순차적으로 추출하였으며 Table 1에 추출 조건을 나타내었다. 각 단계별 추출 후 추출된 중금속 농도는 6,000 rpm에서 15분간 원심분리 후 여과하여 ICP-OES로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 입자의 입도 분포 특성

Fig. 2는 토양 시료를 >2 mm, 2-0.075 mm, 0.075-0.038 mm, < 0.038 mm 네 가지 입경별 퍼센트 함량을 나타낸다. 토양의 입도분포는 토양시료에 따라 차이를 나타내며 시료 채취 지역 별로 다른 양상을 보여주고 있다. 제련소 인근 토양인 C지역의 경우 0.038 mm 미만의 미세토가 70% 이상 존재하며 0.038-0.075 mm 입경의 토양이 16%로 두 번째로 많은 양을 차지하여 90% 가량이 대부분 실트와 점토와 같은 미세토로 구성되어 있었다. A지역의 경우 0.038 mm 이하의 미세토가 평균 63%로 가장 많은 양을 차지하며 0.075-2 mm 입경의 모래 입자가 평균 25%로 두 번째로 많은 양으로 존재하였다. 반면 B지역의 경우 입경 2 mm보다 큰 자갈이 평균 32%로 존재하며 일부토양에서는 50% 가량

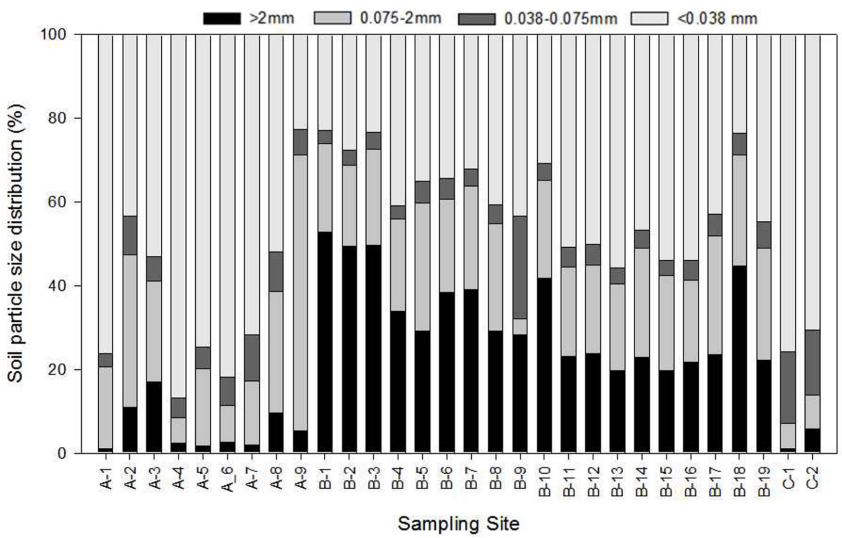

Fig. 2. Particle size distributions (%) of soil samples at sites A, B, and C, Rice paddy field sites: A1 and, A7, dry field sites: A2-6, A8-9, B1-19, C1-2.

이 2 mm 이상의 입자로 되어 있어 다른 지역에 비하여 조립 입자를 많이 포함하고 있었다. B지역의 경우 0.038 mm 미만의 미세토가 평균 40%, > 2 mm 32%, 0.075-0.038 mm 23%로 대부분 미세토로 구성되어 있는 다른 지역의 토양과 달리 토양 입자가 입경별로 고루 분포하였다.

3.2. 토양시료 중 중금속 오염 특성

본 연구에서 조사된 A, B, C 세 지점 토양 중 비소 및 중금속 농도의 중간농도와 최소/최대 농도를 Table 2에 나타내었다. 제련소 바로 인근 C지역의 두 지점 토양 중 비소의 농도는 각각 93.8과 158 mg/kg으로 토양오염우려기준치인 25 mg/kg을 각각 3배와 6배 이상 초과하여 제련활동으로 제련소 인근 토양 중 비소의 오염이 심각한 것으로 나타났다. 또한 토양 중 납의 농도가 각각 257, 373 mg/kg으로 토양오염우려기준치 200 mg/kg을 초과하였으며 두 지점 중 한 지점의 토양 중 구리의 농도가 159 mg/kg으로 기준치 150 mg/kg을 초과하였다. 반면 토양 중 카드뮴, 니켈, 아연 농도의 경우 기준치 이하로 검출되었다. 따라서 제련활동에 의해 토양 중 비소, 납, 구리가 오염된 것으로 생각된다.

반면 제련소 반경 3 km 이상 지점인 A와 B의 경우 카드뮴을 제외한 토양 중 모든 비소 및 중금속의 중간농도가 C 지점에 비해 현저히 감소하여 토양오염우려기준치 이하의 농도로 검출되었다. 따라서 거리가 멀어지면서 제련소로부터 중금속의 영향이 크게 감소한 것을 알 수 있었다. A지점의 경우 모든 토양 중 중금속 농도가 토양오염우려기준치 이하였고, 이전에 보고된 토양 중 배경농도[4,9] 수준을 나타내어 A지점 토양이 제련소의 영향을 거의 받지 않은 것으로 여겨진다. 반면 B지점의 경우 제련소로부터 비슷한 거리에 있는 A지점과 달리 모든 지점에서 비소의 농도가 기준치를 초과하여 평균 59.4 mg/kg 농도를 나타내었다. 제련소 주변 토양 중 중금속의 오염은 제련과정에서 원광석에 포함된 중금속이 굴뚝을 통한 비산의 영향으로 오염물질이 제련소를 중심으로 반경 2 km까지 분포하고 있는 것으로 보고되고 있다[1,2]. 국립해양조사원의 2004년부터 2013년까지 10년간 장항지역 풍향빈도 자료를 살펴보면 가을/겨울철에는 동풍과 북동풍이 봄/여름철에는 서풍과 북서풍이 주로 장항지역에 발생하였다[10]. 이것으로 보아 제련소 북쪽에 위치한 A지점의 경우 제련소로부터의 영향이 매우 적을 것으로 보이며 반면 제련소로부터 북동방향에 있는 B지점의 경우 봄/여름철에 서풍이 불 때에 일부 영향을 받았을 것으로 여겨진다. 따라서 지속적인 바람에 의한 제련소로부터의 영향이 B지점에서 토양 중 비소의 축적에 일부 기여를 한 것으로 생각된다.

토양 중 비소의 농도가 기준치를 초과한 B지점과 C지점의 토양 중 비소 및 중금속의 존재형태를 살펴보기 위하여 4단계 연속추출을 수행하여 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 추출용매를 달리하여 (F1) 이온교환 형태, (F2) 산화물에 결합된 형태, (F3) 황화물 및 유기물에 결합된 형태와 (F4) 잔류상으로 구분하여 순차적으로 추출하였으며 일반적으로 연속 추출 시 뒤 단계에서 추출될수록 광물과 강하게 결합되어 있는 것으로 볼 수 있다. 토양 중 납과 구리, 아연의 경우 두 지점에서 모두 주로 (F2) 산화물에 결합된 형태로 존재하였으나 니켈의 경우 두 지점에서 주로 (F3) 황화물 및 유기물에 결합된 형태와 (F4) 잔류상으로 존재하였다. 반면 비소, 카드뮴의 경우 B 지점에서는 대부분의 카드뮴이 (F3) 황화물과 (F4) 잔류상으로 존재하였지만 C 지점에서는 주로 (F2) 산화물에 결합된 형태로 존재하였다. 토양 중 중금속은 중금속의 종류와 지역에 따라 다른 형태로 존재하는 것을 알 수 있었다. 특히 비소의 경우 B지점 토양 중 비소는 전체 비소 중 90% 가량이 4단계 (F4) 잔류상에서 추출되어 토양과 매우 강하게 결합하여 존재하

Table 2. Median concentrations of metals observed in soil samples obtained at sites A, B, and C

Site	Median concentrations (Min-Max) (mg/kg)					
	As	Pb	Cu	Cd	Ni	Zn
A (n=9)	6.2 (3.6-13.7)	24.2 (18.5-31)	20.3 (8.8-29.3)	2 (1.6-2.3)	11.2 (6.1-14.4)	53.5 (29-69.5)
B (n=19)	59.3 (25.5-569)	50.8 (27.8-258)	44.9 (30.9-76.7)	1.7 (0.6-2.3)	9 (3.5-17.1)	40.1 (19.7-197.5)
C (n=2)	126 (93.8-158)	315 (257-373)	140 (120-159)	2 (1.9-2.1)	55 (11.7-98.3)	135 (68-202)
Korea Concerning Level	25	200	150	4	100	300
Background concentration[4,9]	6.83	18.4	15.3	0.3	17.7	54.3

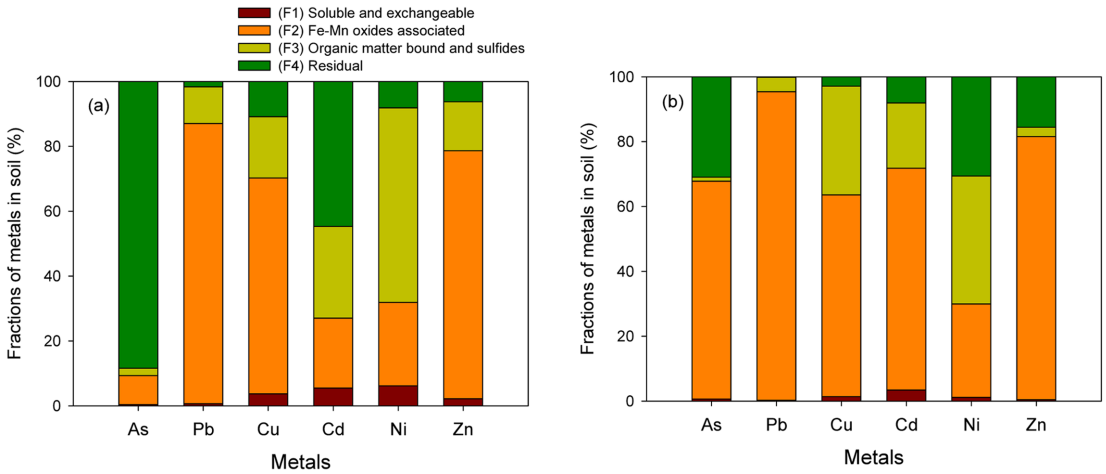

Fig. 3. Sequentially extracted metal fractions from (a) site B and (b) site C soils

는 것으로 나타난 반면 C지점 토양 중 비소는 주로 (F2) 산화물에 결합된 형태(67%)로 존재하였다. 이와 같이 B지점의 토양 중 비소가 제련소 인근 C 토양과 다른 형태로 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 토양 중 중금속은 오염원과 토양 광물의 성상에 따라 다양한 형태로 존재하게 된다[11]. 선행 연구에서 수행한 B와 C 지역의 광물학적 조사 결과에 따르면 두 지역의 주된 광물은 석영(quartz), 백운모(muscovite), 고령석(kaolinite)으로 검출되었으나 추가로 B지점의 경우 결정질 철산화물인 침철석(goethite)과 스코로다이트(scorodite, $FeAsO_4 2H_2O$)가 검출되었다[12]. 스코로다이트는 광산지역이나 비소로 오염된 토양에서 자주 검출되는 광물로 FeAsS나 As_2S_3, AsS와 같은 비소황화물이 산화되어 생성되는 이차광물이다[13]. 또한 비소는 철산화물과 강한 친화력으로 침철석과 같은 결정질 철산화물에 의해 강하게 결합하여 존재할 수 있다[13]. 따라서 B지점의 토양 중 비소의 오염은 제련소로 부터의 영향 뿐 아니라 B지점 토양의 광물학적 특성에 의해 크게 영향을 받았을 것으로 여겨진다.

3.3. 토양 입경 별 비소와 중금속 분포 특성

본 연구에서는 제련소 반경 3 km 이상 거리에 있음에도 모든 토양에서 기준치 이상 농도의 비소와 일부 토양에서 높은 납 농도를 나타낸 B지역 토양에 대하여 토양 입자의 입경 > 2 mm, 2-0.075 mm, 0.075-0.038 mm, < 0.038 mm 네 가지의 입경별 비소와 납, 구리의 분포 특성을 살펴보았다(Table 3). 비소, 납, 구리 모두 <0.038 mm 미만의 미세토에서 가장 높은 농도 중간 값을 나타내었다. 이는 0.038 mm 미만의 실트와 점토 입자의 경우 표면적과 반응성이 크기 때문에 입자표면의 흡착 등과 같은 반응을 통하여 오염물질을 많이 포함할 수 있기 때문인 것으로 보인다. 하지만 이와는 다르게 비소의 경우 입경 2 mm 이상의 조립토에서 미세토와 유사한 농도가 검출되었으며 일부 토양의 경우 1555 mg/kg 까지 고농도가 검출되어 미세토에 결합된 비소와는 다른 형태의 비소가 존재하는 것을 추정해 볼 수 있다.

토양 입경 별 비소와 중금속 분포 특성을 자세히 알아보기 위하여 토양 중 총 중금속 농도와 입경 별 중금속 농도와의 상관관계를 비소, 납, 구리에 대하여 >2

Table 3. Metal concentrations in different particle size fractions of soil samples collected in site B (n=19)

	Median concentrations in different particle size fractions, (min-max) (mg/kg)				
	bulk soil (<0.15 mm)	> 2 mm	0.075-2 mm	0.038-0.075 mm	<0.038 mm
As	59.3 (25.5-59.3)	63.0 (20.4-1555)	46.7 (13.6-741)	29.9 (7.4-403)	69.6 (16.3-210)
Pb	50.8 (27.8-258)	24.5 (14.3-334)	43.2 (22.3-600)	33.3 (16.8-354)	76.8 (16.6-266)
Cu	44.9 (30.9-76.7)	33.3 (10.9-82.5)	39.7 (26.7-106)	27 (15.7-59.8)	58.4 (15.7-159)

mm, 2-0.075 mm, 0.075-0.038 mm, <0.038 mm 입경 별로 나누어 살펴보았다(Fig. 4~6). 비소의 경우 2-0.075 mm와 <0.038 mm 입경에서 입경 별 비소의 농도가 토양 중 비소의 총 농도와 양의 상관관계를 보여주었다. 특히 0.075-2 mm 입경 중 비소의 농도가 총 비소 농도와 비교하여 2.5배가량 높은 것으로 나타나 ($y=2.54x-86.33$, $r^2=0.64$) 비소가 토양 중 모래입자 크기의 입자에 고농도로 축적된 것을 알 수 있었다(Fig. 4b). 납의 경우는 >2 mm, 2-0.075 mm, 0.075-0.038 mm 입경의 토양 중 납의 농도와 전체 토양 중 납의 농도는 어떠한 상관관계를 보이지 않았지만 가장 미세토인 <0.038 mm 입경의 납의 농도는 토양 중 총 납의 농도와 3.6배의 비율로 강한 상관관계를 나타내었다 ($r^2=0.71$). 이는 토양 중 납의 오염이 주로 실트나 점토와 같은 미세 입자와의 흡착 등에 의한 결합에 의한 것임을 나타내 준다. 구리의 경우 >2 mm의 토양에서는 입경 별 구리 농도가 토양 중 총 구리 농도와 상관관계를 보이지 않았지만 입경이 감소하면서 보다 강한 양의 상관관계를 보였으며 <0.038 mm 입경의 토양 중 구리 농도는 전체 토양 중 구리 농도와 2.5배의 비율로 상관관계를 나타내었다($r^2=0.43$) (Fig. 5).

토양의 비균질(heterogeneous)한 특성 때문에 토양 입경 별 비소와 납, 구리 농도와 토양 중 이들의 총 농도와의 상관관계에는 많은 편차를 보여주고 있다. 따라서 토양 중 비소 및 중금속의 경향을 일반화하기는 어렵다. 하지만 비소는 납과 구리와는 다른 토양 입경 별 농도와 토양 중 총 농도와의 상관관계를 보여주고 있다. 즉, 납과 구리는 0.038 mm 이하의 입경의 실트

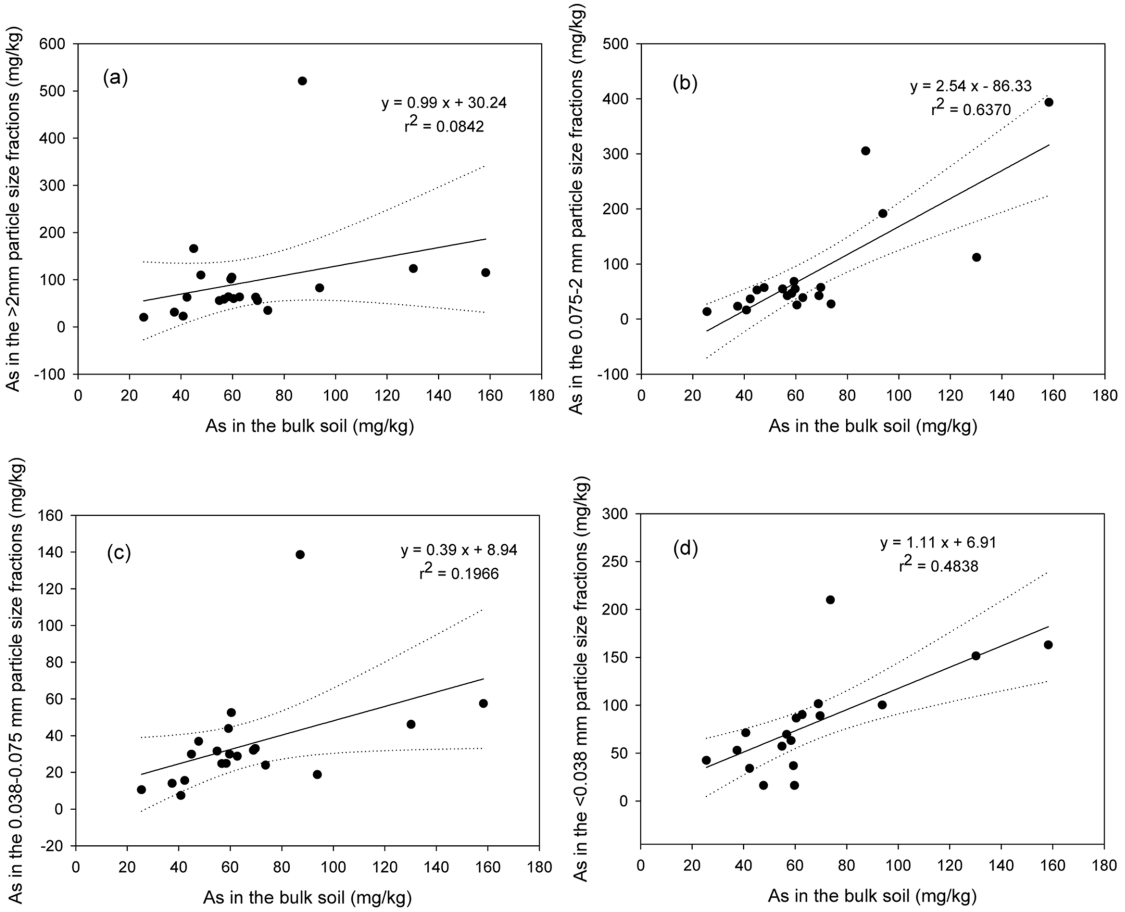

Fig. 4. Arsenic concentrations in the particle size fractions of (a) > 2 mm, (b) 0.075 - 2 mm, (c) 0.038 - 0.075 mm, and (d) < 0.038 mm compared to the arsenic concentrations in the bulk soil. Dotted lines indicate the 95% confident interval of the regression.

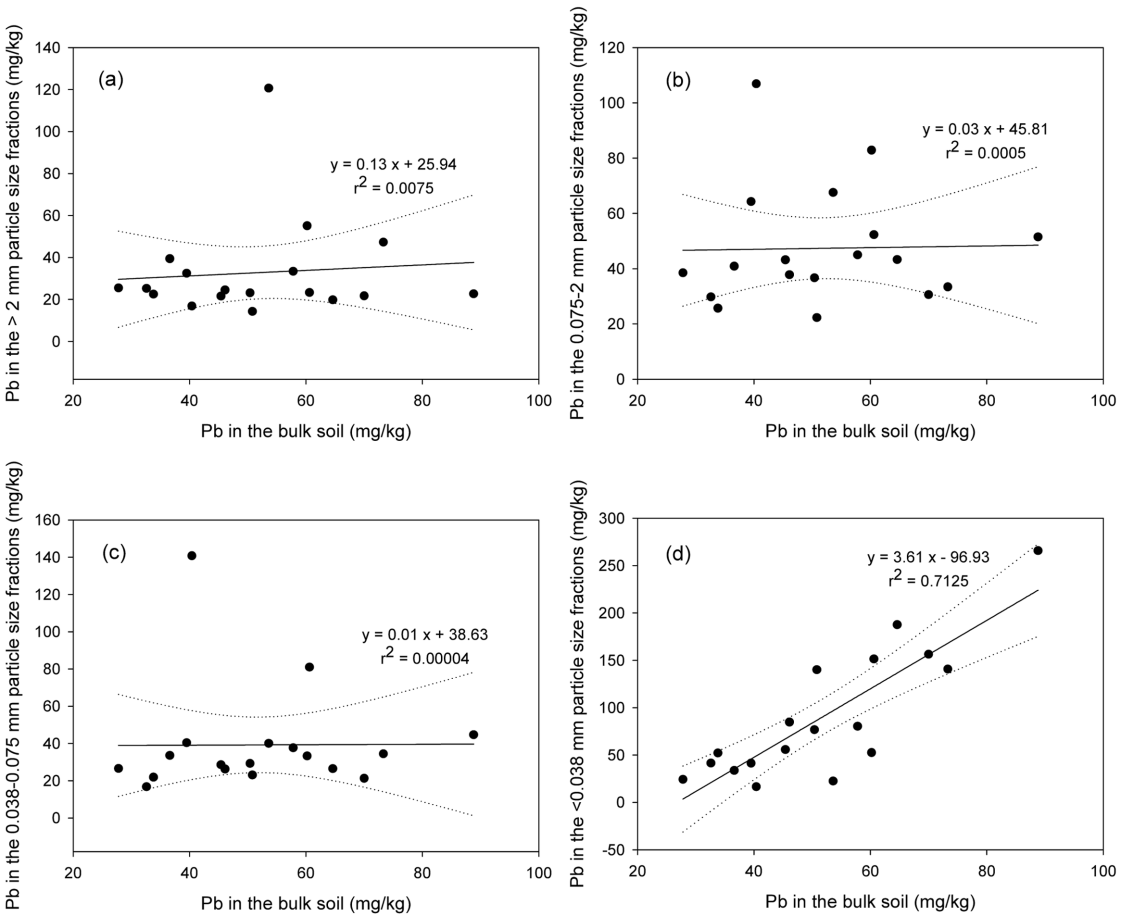

Fig. 5. Lead concentrations in the particle size fractions of (a) > 2 mm, (b) 0.075 - 2 mm, (c) 0.038 - 0.075 mm, and (d) < 0.038 mm compared to the lead concentrations in the bulk soil. Dotted lines indicate the 95% confident interval of the regression.

와 점토질 토양에 축적되는 경향을 보여주는 반면 비소는 0.075-2 mm 입경의 토양에 축적되는 경향을 보여주었다. 토양 입자의 비소와 중금속 축적은 토양 입자의 흡착 site와 광물학적 특성에 의해 영향을 받게 된다[6]. 입자가 작은 점토의 경우 표면적이 넓고 반응성이 큰 점토광물과 철산화물이 존재하기 때문에 흡착에 의해 중금속의 축적이 이루어질 수 있다. 입자 크기가 증가하면 모래입자가 증가하면서 이러한 흡착사이트가 감소하면서 흡착에 의한 중금속의 축적이 감소하게 된다. 따라서 본 연구에서 0.038 mm 이하 작은 입경의 토양에 높은 농도로 존재하는 납과 구리는 주로 토양 중 점토광물이나 산화물에 흡착에 의해 축적되는 것을 나타내며 이는 이전 연구결과들과 일치하고 있다[6,7]. 반면 비소의 경우와 같이 토양 중 모래입자 크기(0.05-2 mm) 입자에 축적이 증가하는 것은 비소가 토양의 광물의 구조에 결합하여 존재하는 것을 나타낸다[6]. 이 결과는 앞 절에서 살펴본 토양 중 비소와 납, 구리의 존재형태 분석에서 납과 구리가 대부분 산화물에 결합된 형태로 존재한 반면 비소의 경우 잔류상으로 존재하는 결과와도 일치한다. 광물구조에 결합된 비소는 산화물에 흡착된 형태에 비하여 토양광물에 강하게 결합되어 있기 때문에 이동성(mobility)이 매우 낮으며 연속추출에서 잔류상에서 추출된 것으로 여겨진다. 따라서 토양 입경별 비소의 분포 특성을 살펴보았을 때에 B지역 토양 중 비소의 오염은 토양 중 비소를 포함한 광물에 의해 크게 영향을 받았을 것으로 추정된다.

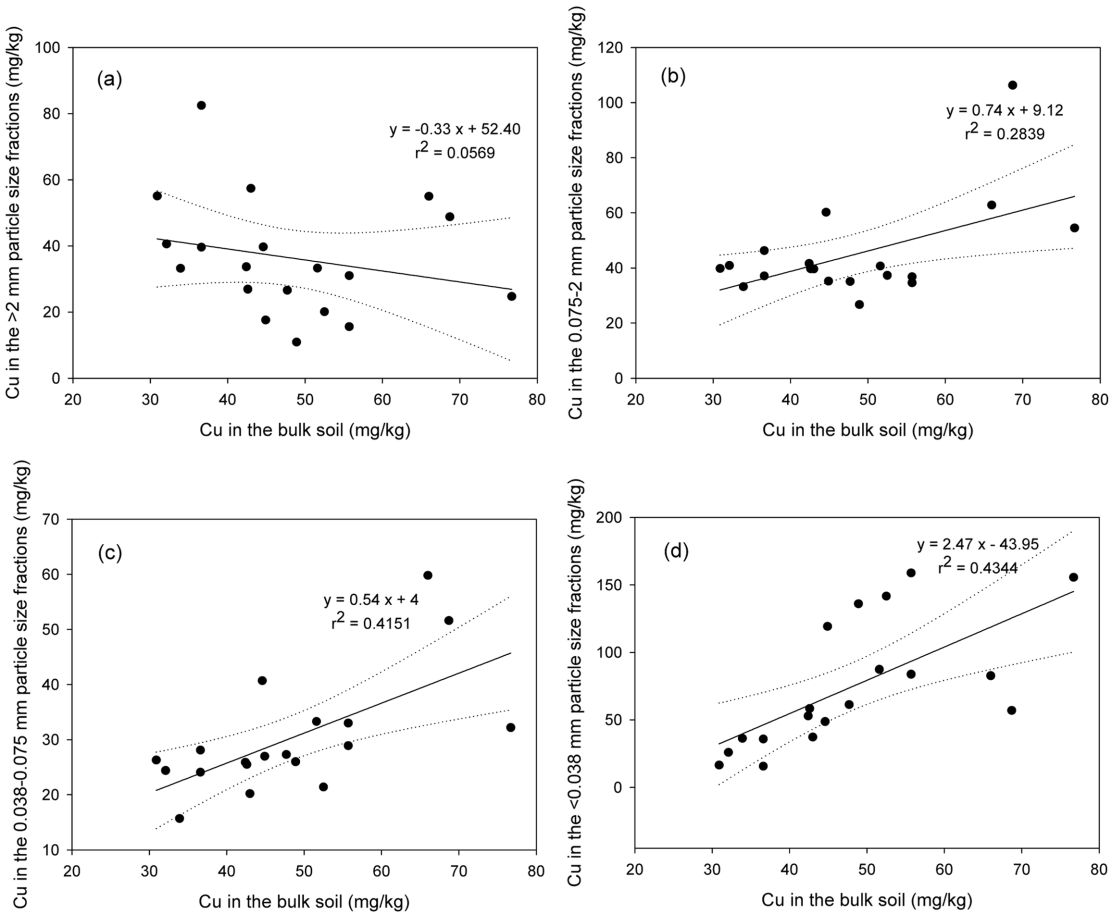

Fig. 6. Copper concentrations in the particle size fractions of (a) > 2 mm, (b) 0.075 – 2 mm, (c) 0.038 – 0.075 mm, and (d) < 0.038 mm compared to the copper concentrations in the bulk soil. Dotted lines indicate the 95% confident interval of the regression

4. 결 론

본 연구에서는 (구)장항제련소에서 3 km 이상 반경의 두 지점 토양 중 비소와 중금속의 농도와 존재형태를 알아보고 토양 입경 별 비소와 납, 구리의 분포를 살펴보았다. 제련소 바로 인근 C지역 토양 중 비소 및 구리, 납의 농도가 토양오염우려기준치를 초과하여 제련활동으로 제련소 인근 토양 중 비소 및 중금속의 오염이 심각하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 반면 제련소에서 거리가 3 km 이상 떨어진 A와 B 지역의 경우 토양 중 비소 및 중금속의 농도가 현격히 감소하여 A지점의 경우 토양 중 비소 및 중금속 농도가 국내 토양 중 중금속의 배경농도 수준을 나타내어 제련소의 영향을 거의 받지 않은 것으로 여겨진 반면 B지점의 경우 비소의 농도가 기준치를 초과하였다. B지점의 토양 입경 별 비소와 중금속 분포 특성을 알아보았을 때에 납과 구리는 주로 토양 중 미세토의 점토광물이나 산화물에 흡착에 의해 축적된 반면 비소는 미세토에 흡착될 뿐만 아니라 조립질 토양광물의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 토양 입경 별 중금속의 존재는 토양의 위해성 뿐 아니라 오염 정화공정에 큰 영향을 주게 된다. 토양 중 미세 입자에 주로 축적되는 구리와 납과 같이 중금속은 미세입자를 분리하여 처리함으로써 처리 토양의 양을 현저하게 줄일 수 있다. 반면 조립토에 존재하는 비소의 경우는 중금속의 정화와 다른 접근 방법이 필요하게 된다.

감사의 글

본 연구는 환경산업기술원의 GAIA 연구개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. D.C. Adriano, Trace Elements in the Terrestrial Environment, 2nd ed, 2001, Springer-Verlag, New York, NY, USA.
2. 문소영, 오민아, 정준교, 최상일, 이재영, "장항제련소 주변 비소오염토양의 특성분석에 따른 토양세척 처리효율 평가", *지하수토양환경*, **2011**, 16(1), 71-81.
3. 충북대학교, (구)제련소 주변지역 주민건강영향조사, 최종보고서 **2008.**
4. 양경, 김영진, 임진우, 남경필, "(구)장항제련소 매입구역의 비소 오염도와 생물학적접근성을 반영한 위해성평가 및 정화수준 결정에 관한 연구", *지하수토양환경*, **2014**, 19(4), 52-61.
5. C. Bergstrom, J. Shirai, and J. Kissel, "Particle size distribution, size concentration relationships, and adherence to hands of selected geologic media derived from mining, smelting, and quarrying activities", *Science of the Total Environment*, **2011**, 409, 4247-4256.
6. J. Qian, X-Q Shan, Z-J Wang, and Q. Tu, "Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil", *Science of the Total Environment*, **1996**, 187, 131-141.
7. A.L. Juhasz, J. Weber, and E. Smith, "Impact of soil particle size and bioaccessibility on children and adult lead exposure in peri-urban contaminated soils", *Journal of Hazardous Materials*, **2011**, 186, 1870-1879.
8. G. Rauret, J.F. Lopez-Sanchez, A. Sahuquillo, R. Rubio, C. Davidson, A. Ure, and P. Quevauviller, "Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials", *Journal of Environmental Monitoring*, **1999**, 1, 57-61.
9. KMOE, Soil Contaminant Risk Assessment Guidance, **2011**, 2011-139.
10. 국립해양조사원, http://www.khoa.go.kr, February **2016**.
11. E. J. Kim and B. Batchelor, "Macroscopic and X-ray photoelectron spectroscopic investigation of interactions of arsenic with synthesized pyrite", *Environmental Science and Technology,* **2009**, 43, 2899-2904.
12. E. J. Kim, J. C. Yoo, and K. Baek, "Arsenic speciation and bioaccessibility in arsenic-contaminated soils: Sequential extraction and mineralogical investigation", *Environmental Pollution*, **2014**, 186, 29-35.
13. P. L. Smedley and D. G. Kinniburgh, "A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, **2002**, 17, 517-568.