

## (구)장항제련소 주변 부지 매입구역 비소 오염토양에 대한 중성 인산염 토양세척법의 적용가능성 평가

임진우<sup>1</sup> · 김영진<sup>2</sup> · 양 경<sup>1</sup> · 남경필<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 건설환경공학부

<sup>2</sup>삼성물산주식회사 Civil엔지니어링본부 물/환경팀

## Applicability of Soil Washing with Neutral Phosphate for Remediation of Arsenic-contaminated Soil at the Former Janghang Smelter Site

Jinwoo Im<sup>1</sup> · Young-Jin Kim<sup>2</sup> · Kyung Yang<sup>1</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Water/Environment Team, Civil Engineering Division, Samsung C&T Corporation

### ABSTRACT

In accordance with the view on remediated soil as a resource, this study assessed the applicability of soil washing with the neutral phosphate for remediation of arsenic (As)-contaminated soil. Three soil samples of different land uses (i.e., rice paddy, upland field and forest land) were collected from the study site, and the *aqua regia*-extractable As concentrations were 59.2, 30.8 and 53.1 mg/kg, respectively. Among the neutral phosphate reagents, ammonium phosphate showed the highest As washing efficiency. The optimized washing condition was 2-hr washing with 0.5 M ammonium phosphate solution (pH 6) and soil to liquid ratio of 1 : 5. The extraction efficiencies of As did not guarantee the residual soil As concentrations to satisfy the Korea soil regulatory level (i.e., Worrisome level) in the three soil samples. To enhance washing efficiency, the As-contaminated soil was submerged in washing solution (1 : 1, w/v) for 24 hr and 1-hr washing with 0.5 M ammonium phosphate solution was tested. As extraction efficiencies of 36.1 (rice paddy), 21.4 (upland field) and 26.4% (forest land) were attained, which satisfied the Worrisome level for Region 1 (25 mg/kg of As) in rice paddy, but not in upland field and forest land.

**Key words :** Arsenic, Ammonium phosphate, *Aqua regia* digestion, Soil washing, Soil quality

### 1. 서 론

비소는 독성이 강한 물질로 국제 암 연구소(International Agency for Research on Cancer)에서 지정한 1급 발암 물질이다. 비소의 토양오염은 일반적으로 폐광산, 지정폐기물 매립지, 제련소 부근에서 문제시 되어왔으며 비소는 토양을 통한 직접 노출뿐만 아니라 지하수로의 유출 혹은 농작물로의 전이를 통해 인체와 생태계에 위해를 끼칠 수 있다(Jeon et al., 2008; KMOE, 2013b).

비소 오염토양에 대한 정화는 미국의 경우 대부분이 고형화안정화공법과 폐기물 처리를 함께 적용하고 있으며

일부 토양세척법, 동전기공법, 식물상정화공법 등이 사용되었다(USEPA, 2002). 한국의 경우 현행 토양오염공정시험기준에서 토양 내 중금속 분석 시 왕수 추출법을 사용하므로 고형화안정화공법 사용이 불가하고, 폐기물 처리의 경우는 원위치 처리를 우선시 하는 토양환경보전법의 근본 취지와 토양을 자원으로 인식하는 관점에서 적절하지 못하다. 현재 국내에서 비소 오염토양 처리를 위해 토양세척법, 동전기공법, 열탈착공법, 식물상정화공법 등이 연구되고 있으나 실제 현장적용 사례는 거의 없는 실정이다(Jeong et al., 2011; Kim et al., 2011b; Moon et al., 2011; Park et al., 2013).

\*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

Received : 2014. 4. 14 Reviewed : 2014. 6. 10 Accepted : 2014. 6. 10

Discussion until : 2014. 8. 31

토양세척법은 비교적 높은 정화효율로 많은 양의 오염 토양을 신속하게 처리 가능하다는 점에서 우리나라 중금속 오염토양 정화에 흔히 사용되어왔다. 납, 카드뮴과 같은 양이온 중금속으로 오염된 토양의 세척은 일반적으로 염산, 질산과 같은 강산을 세척액으로 사용하여 중금속을 추출한다(Baek et al., 2007; Seo et al., 2008). 반면에 비소 오염토양 세척의 경우에는 비소가 일반적인 양이온 중금속과 달리 산소와 결합하여 음이온으로 존재( $AsO_3^{3-}$ ,  $AsO_4^{3-}$ )하기 때문에 음이온 경쟁이 가능한 황산, 인산 등이 비소추출에 효과적인 것으로 알려져 있다. 하지만 오염토양을 산으로 세척했을 경우 토양이 산성화 되어 추가적인 안정화 과정이 요구된다(Alam et al., 2001; Tokunaga and Hakuta, 2002). 최근 토양 정화기술의 연구는 토양의 자원으로서 가치를 인식하여 오염토양 정화 시 토양의 물리화학적 특성을 보존해 적극적인 정화토의 재사용을 가능케 하는 것을 고려하고 있다(Yi et al., 2012; Yi et al., 2013). 토양세척법 역시 토양의 오염을 저감시키는 동시에 토양의 물리화학적 특성을 보존할 수 있는 세척제가 요구되고, 강산 혹은 강염기가 아닌 킬레이트 세척제가 이러한 가능성이 될 수 있으나 경제성이 떨어져 현장 적용에는 한계를 갖는다(Dermont et al., 2008).

정화효율과 토양의 물성 보존, 현장적용을 모두 고려해 보았을 때, 중성 인산염을 비소 오염토양의 세척제로 검토해 볼 수 있다. 인산( $PO_4^{3-}$ )은 비소( $AsO_3^{3-}$ ,  $AsO_4^{3-}$ )와 유사한 전자배열을 하고 있는 관계로 경쟁이온교환을 통해 주로 토양입자 혹은 비결정형 철산화물과 결합하고 있는 비소의 일부까지를 제거할 수 있다고 알려져 있다(Hongshao and Stanforth, 2001). 현장조사 결과, (구)장항제련소 매입구역 토양 내 비소는 주로 비결정형, 결정형 철산화물과 결합된 형태를 존재하고 있는 것으로 밝혀졌으며, 이는 인산을 사용한 토양 내 비소의 세척이 가능할 수 있음을 의미한다(Kim, 2011a; Yang et al., 2013b). 경제적으로 허용 가능한 중성 인산염 농도에서 법적기준(토양오염 우려기준 1, 2, 3 지역 각각 25, 50, 200 mg/kg)

을 만족시키는 정도로 토양 정화가 가능하다면, 중성 인산염은 (구)장항제련소 매입구역 토양의 세척제로서 가능성을 가진다고 할 수 있다.

중성 인산염을 이용하여 토양세척을 하였을 경우 기존 산 세척과 달리 정화효율 확보와 동시에 토양의 물리화학적 특성을 보존할 수 있어 정화토의 적극적인 재사용이 가능할 것이며 인산이 비료성분이기도 하여 토양의 보비력 향상도 기대해 볼 수 있다(Alam et al., 2007). 한편, 세척수 처리의 경우 중성 영역 pH에서 응집제 첨가를 통한 침전으로 유해원소 제거가 용이하므로 세척수 처리에 있어서도 장점을 가질 것으로 예상할 수 있다(Yang et al., 2013a). 본 연구는 (구)장항제련소 주변부지 매입구역 토양을 대상으로 중성 인산염 토양세척법의 가능성을 확인하고, 현장에 적용 가능한 방안을 도출해보고자 수행되었다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 토양시료

본 연구는 (구)장항제련소 주변 부지 매입구역 토양을 대상으로 진행하였다. (구)장항제련소 주변 부지는 주로 원광석과 동 제련 활동의 부산물인 아비산( $As_2O_3$ )의 비산, 제련소 발생 폐기물의 매립으로 오염된 것으로 추정되며 대부분 논, 밭으로 사용되고 해안가 일부 임야가 포함되어 있다. 제련소를 중심으로 반경 1.5 km 안으로는 환경부 매입구역이며, 토양 시료는 매입구역의 비소농도와 토지이용 용도를 고려하여 논, 밭, 임야 토양 각 1개씩, 총 3개의 토양시료로 진행하였다. 채취한 토양 시료는 자연 건조 후 2 mm 체로 거른 후 사용하였으며, 토양의 기본적인 물성은 Klute(1986)와 Sparks(1996)의 방법에 따라 분석하였다(Table 1). 토양 물성은 토지이용 용도에 따른 특성이 나타나 논 토양은 미사질양토(silt loam)였고, 밭 토양은 사양토(sandy loam)이고 다른 토양에 비해 철·알루미늄 산화물의 함량이 높았다. 한편, 임야 토양은 사질토(sand)로 미세토 함량이 10% 미만이었다.

**Table 1.** Physicochemical properties of soil samples used for this study

Land use	Soil texture <sup>1</sup>	pH <sup>2</sup> (1 : 5)	OC <sup>2</sup> (%)	CEC <sup>2</sup> (cmol/kg)	Fe-Al-oxides <sup>2</sup> (mg/kg)
Rice paddy	Silt loam	6.1	1.2	17.5	8,679.1
Upland field	Sandy loam	6.9	3.3	17.5	11,565.2
Forest land	Sand	7.2	3.5	4.2	2,123.1

<sup>1</sup>Klute, 1986, <sup>2</sup>Sparks, 1996

**Table 2.** Procedures for Wenzel's sequential extraction and USEPA 3052 method

Fraction	Chemical form	Extractant	Extraction condition
1	Non-specifically bound <sup>1</sup>	0.05 M (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1:25 <sup>2</sup> 4-hr shaking, 20°C
2	Specifically bound <sup>1</sup>	0.05 M (NH <sub>4</sub> )H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1:25 <sup>2</sup> 16-hr shaking, 20°C
3	Amorphous hydrous oxides of Fe and Al bound <sup>1</sup>	0.2 M NH <sub>4</sub> -oxalate buffer; pH 3.25	1:25 <sup>2</sup> 4-hr shaking in the dark, 20°C
4	Crystalline hydrous oxides of Fe and Al bound <sup>1</sup>	0.2 M NH <sub>4</sub> -oxalate buffer + 0.1 M ascorbic acid; pH 3.25	1:25 <sup>2</sup> 30-min in a water basin at 96 ± 3°C in the light
5	Residual <sup>3</sup>	18 ml HNO <sub>3</sub> + 8 ml HF + 2 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 2 ml H <sub>2</sub> O	Microwave digestion according to USEPA 3052 method

<sup>1</sup>Wenzel et al., 2001, <sup>2</sup>Soil to liquid ratio, <sup>3</sup>USEPA, 1996

## 2.2. 토양 비소오염 분석

토양 내 비소농도는 우리나라 토양환경정보전법 토양오염 공정시험기준에 따라 왕수 추출법(*aqua regia* digestion)으로 추출하여 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, iCAP 7400 DUO, Thermo Scientific, USA)로 분석하였다(KMOE, 2013a). 토양 내 비소의 존재형태 분석을 위해서는 결합 매질의 종류와 강도에 따라 5단계로 구분한 Wenzel et al.(2001)의 연속 추출법과 USEPA 3052 방법을 사용하였다. Wenzel 추출법 중 1-4단계는 적정 추출액과 토양시료를 혼합한 후 단계별 조건에 맞추어 240 rpm으로 교반 하였고, 16,000 g로 10분 동안 원심분리하여 상등액을 0.45 µm GHP syringe filter로 거른 후 ICP-OES로 분석하였다. 5단계에 해당되는 잔류 비소(residual As)는 USEPA 3052방법에 따라 추출하였다(USEPA, 1996). Wenzel 연속 추출법과 USEPA 3052방법을 정리하면 Table 2와 같다.

## 2.3. 세척제 선정 및 농도 도출

세척실험은 50 ml conical tube를 사용한 회분식 탈착 실험을 기본으로 하였다. 각 실험은 조건에 맞추어 240 rpm으로 교반 후 16,000 g로 10분 동안 원심분리하였고, 상등액은 0.45 µm GHP syringe filter로 거른 후 ICP-OES로 분석하였다.

인산염 세척제별 비소 추출효율을 확인하기 위해 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>를 사용하여 0.5 M, pH 5 세척액을 제조하였다. 실험 조건은 토양 4 g에 세척액 20 ml를 혼합하여 20°C에서 16시간 교반하였다.

인산염모늄의 농도에 따른 토양 내 비소 추출효율을 확인하기 위해 총 8개 농도의 세척액(i.e., 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 0.8, 1 M NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)을 사용하였고, 토양 1 g에 세척액 25 ml를 각 농도별로 혼합한 후 20°C에서 16시간 교반하였다.

## 2.4. 세척조건 도출

토양과 세척액의 비율인 고액비(i.e., 1:25, 1:5, 1:3, 1:1, w/v)에 따른 비소 추출효율을 확인하였다. 토양과 0.5 M NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 세척액을 각 고액비로 20°C에서 16시간 교반하였다.

세척시간에 따른 비소 추출효율을 확인하기 위해 토양 4 g에 0.5 M NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 세척액 20 ml를 혼합하여 20°C에서 30분, 1, 2, 4, 8, 16시간 동안 교반하였다.

세척액의 pH에 따른 비소 추출효율은 pH 4, 5, 6, 6.5, 7에서 확인하였으며, 세척액의 pH는 인산염 용액이 완충작용을 한다는 것을 고려하여 0.5 M NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>와 0.5 M (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 혼합하여 조절하였다. 세척실험은 토양 4 g에 세척액 20 ml로, 20°C에서 각각 2시간, 24시간 교반으로 두 번 수행하였다.

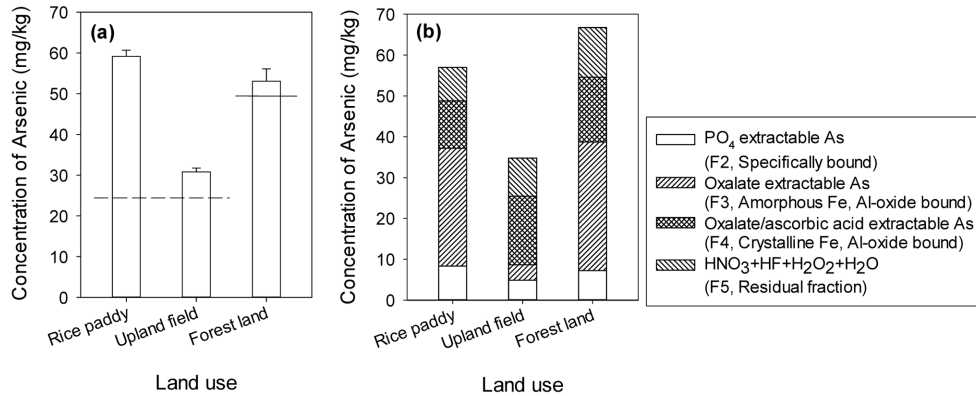
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양 비소오염 분석

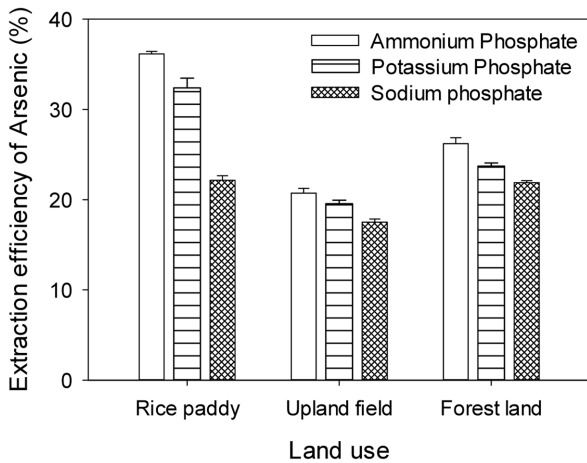
왕수 추출결과 토양 내 비소농도는 논, 밭, 임야 각각 59.2, 30.8, 53.1 mg/kg으로 각 지역의 우려기준(i.e., 논, 밭 토양 1지역 25 mg/kg, 임야 토양 2지역 50 mg/kg)을 모두 초과하였다(Fig. 1a). Wenzel 연속 추출법과 USEPA 3052방법으로 비소존재형태를 분석해 본 결과, 평균 약 66.9% 비소가 철·알루미늄 산화물에 결합된 형태로 존재하였다(Fig. 1b). 철·알루미늄 산화물과 결합한 비소 중 논과 임야 토양에서는 상대적으로 약한 결합에 속하는 비결정질 철·알루미늄 산화물에 결합된 비소가 많았고(i.e., oxalate extractable, F3), 밭 토양은 상대적으로 강한 결합에 속하는 결정질 철·알루미늄 산화물에 결합된 비소(i.e., oxalate/ascorbic acid extractable, F4)가 많았다.

### 3.2. 세척제 선정 및 농도 도출

중성 인산염 세척제 중 가장 높은 비소 추출효율을 나



**Fig. 1.** Concentrations and chemical forms of As (a) As concentrations extracted by *aqua regia* digestion, (b) Chemical forms of As determined by Wenzel's sequential extraction and USEPA 3052 method. Dashed line; Worrisome level for Region 1 (25 mg/kg). Solid line; Worrisome level for Region 2 (50 mg/kg). Concentrations of SO<sub>4</sub> extractable As (F1, Non-specifically bound) were negligible (i.e., < 1 mg/kg; not shown in graph).



**Fig. 2.** Extraction efficiencies of As depending on various phosphate-based washing reagents in the soils collected from different land uses.

타내는 세척제를 찾기 위해 1가 양이온과 결합한 인산염 세척제를 대상으로 확인해 보았다. 그 결과 인산암모늄 (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)이 가장 높은 효율을 보이는 것으로 확인되었다(Fig. 2). 양이온에 따라 효율을 높은 순서대로 나열하면 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup>였다. 이러한 경향은 토양으로부터 양이온의 상대적인 제거 용이성을 나타낸 lyotropic series의 역순과 일치한다(Bohn et al., 2001). 이 실험결과를 바탕으로 인산암모늄을 세척제로 선정하여 세척실험을 진행하였다.

다음으로 인산암모늄의 농도에 따른 토양에서의 비소 추출효율을 확인하였다. 이는 중성 인산염 토양세척법을 현장 토양에 적용하였을 때, 경제적으로 허용 가능한 농도 범위 안에서 법적기준을 만족시키는 효율달성이 가능한지 확인해 보기 위함이었다. 실험결과 대상 농도 범위

내에서는 인산암모늄 농도 증가에 따라 비소 추출효율도 지속적으로 증가하였다(Fig. 3a). 평균 효율은 최대 48.1% 까지 상승하였으며 이는 비소의 존재형태와 비교해 보았을 때, 철·알루미늄 산화물에 결합된 비소의 일부(i.e., 44.8% of hydrous oxides of Fe·Al bound As)까지 제거 되는 것으로 유추할 수 있다. 토양별 추출효율은 밭과 임야 토양이 논 토양보다 상대적으로 낮았는데, 이는 밭 토양의 경우 상대적으로 결합력이 강한 결정질 철·알루미늄 산화물에 결합된 비소의 비율이 높고 임야 토양의 경우 사질 토양으로 토양 비표면적이 상대적으로 작기 때문으로 생각된다.

실험 결과를 바탕으로 세척제의 농도를 도출하기 위해서 (구)장항제련소 매입구역 사전 오염도 조사자료를 참고하였다(Yang et al., 2013b). 자료를 통해 (구)장항제련소 매입구역에 중성 인산염 토양세척법을 적용하여 정화했을 경우 정화토의 예상 농도를 도출하였다(Fig. 3b). 예상 농도는 정화토의 평균 비소농도로, 매입구역 사전조사 자료인 전체 토양 시료 96개의 비소농도에 실험을 통해 얻은 비소 추출효율을 곱하여 도출하였다. 그 결과 인산암모늄 0.5 M일 때, 논 토양에서 38.8% 세척효율, 정화 후 예상 농도 20.3 mg/kg으로 현행 1지역 토양우려기준 25 mg/kg을 만족시켰다. 반면 밭 토양과 임야 토양은 각각 30.9, 32.5%의 세척효율, 정화 후 예상농도 26.0, 58.0 mg/kg으로 현행 토양우려기준(i.e., 각 25, 50 mg/kg)을 약간 초과하였다. 본 실험을 바탕으로 중성 인산염의 농도는 정화 대상부지 면적의 상당부분을 차지하고 있는 논 토양의 법적기준을 만족시키고, 밭과 임야 토양의 법적 기준은 중금속 분석 오차범위 내에서 만족시키는 0.5 M로 선정하였다.

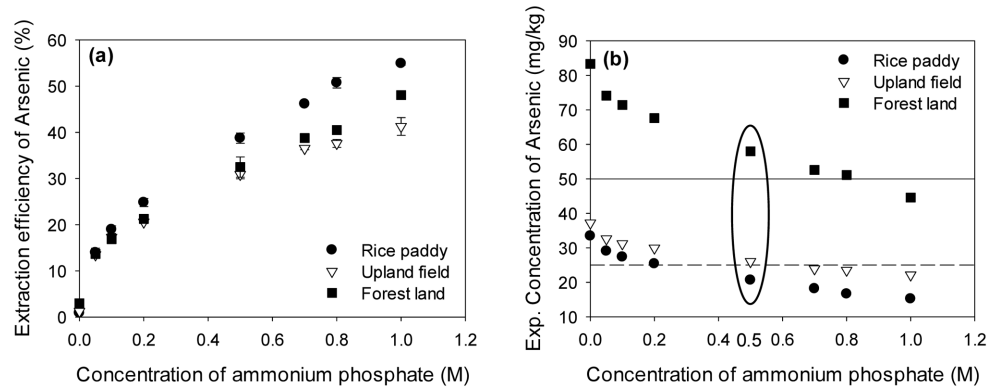


Fig. 3. Effect of ammonium phosphate on As extraction as a function of concentration (a) Extraction efficiencies of As, (b) Expected average concentrations of As in remediated soils. Dashed line; Worrisome level for Region 1 (25 mg/kg). Solid line; Worrisome level for Region 2 (50 mg/kg). Dots in circle represent the expected As concentrations after 0.5 M ammonium phosphate washing.

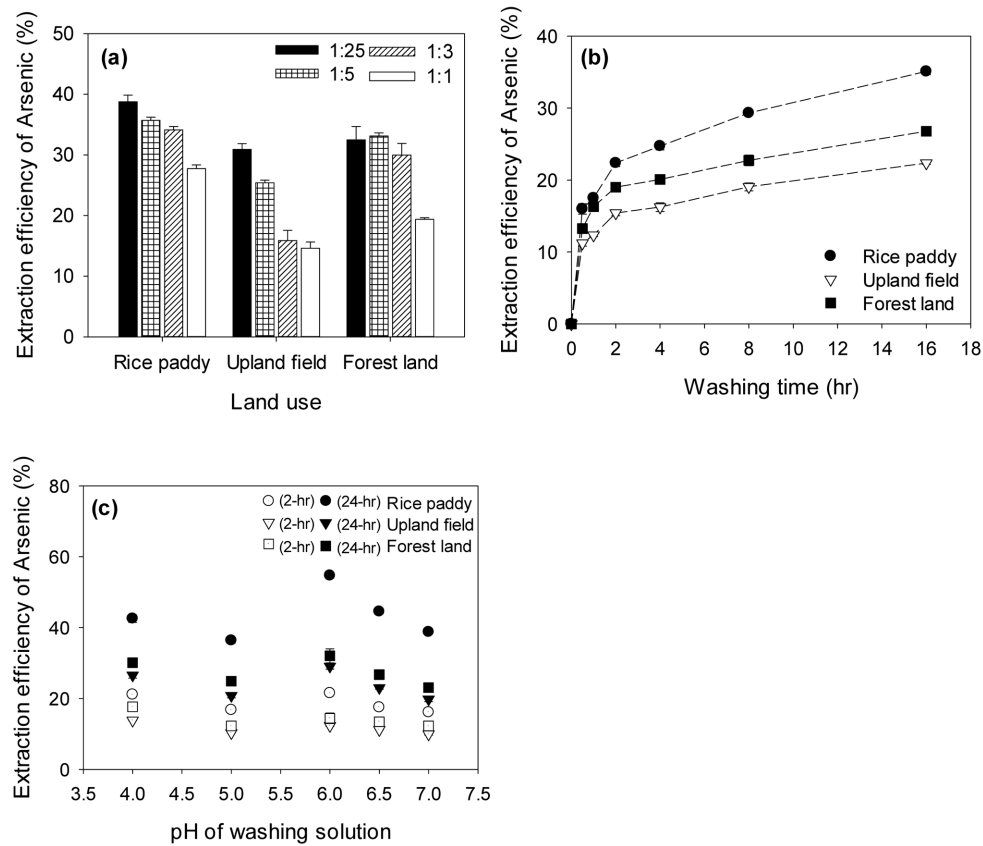


Fig. 4. Extraction efficiencies of As depending on washing conditions (a) Soil to liquid ratios, (b) Washing time, (c) pH of washing solutions.

### 3.3. 세척조건 도출

토양세척법 적용 시 현장에 적용이 가능한 고액비를 도출하기 위해 고액비에 따른 비소 추출효율을 확인해본 결과 고액비가 낮아짐에 따라 비소 추출효율이 떨어졌다 (Fig. 4a). 특히 밭 토양의 경우 고액비 1:5 이후에 급격한 효율 감소를 나타내어, 모든 토양에서 효율을 확보를

목적으로 고액비를 1:5로 결정하였다.

시간에 따른 토양 내 비소 추출효율은 초기 2시간까지는 급격한 형태로, 이후에는 완만한 형태로 지속적으로 증가하였다(Fig. 4b). 토양세척법의 실제 현장 적용을 고려하여 효율이 급격히 증가한 2시간으로 세척시간을 선정하였다.

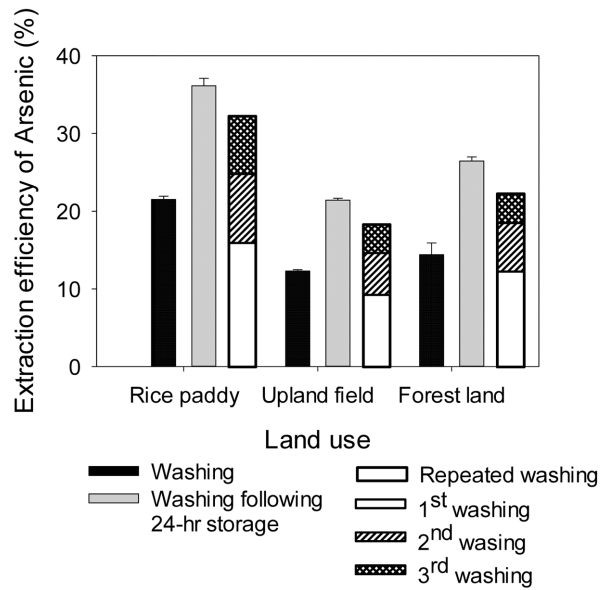
비소 추출효율이 최대로 나타나는 세척액의 pH를 도출하였다. 세척액 pH에 따른 토양 내 비소 추출결과 2시간 교반으로는 크게 차이를 보이지 않았으나 24시간 교반결과 모든 토양에서 pH 6이 최고효율을 나타내었다(Fig. 4c). 토양 내 인의 이용성(labile form)은 pH 6-7에서 가장 크게 나타나는데 비소 역시 인과 비슷한 화학적 특성을 가져 pH 6에서 최대 효율을 보이는 것으로 생각된다(Sharpley, 2006). 이 결과를 바탕으로 세척액의 pH는 6으로 선정하였다.

**3.4. 중성 인산염 토양세척법 한계와 보완**

중성 인산염 토양세척법의 가능성을 확인 후, 현장 적용을 고려하여 도출한 세척조건은 인산암모늄 0.5 M, pH 6 세척액에 고액비 1 : 5, 상온에서 2시간 교반이고, 이 조건에서 논, 밭, 임야 토양 내에서의 비소 추출효율은 각각 21.5, 12.3, 14.4%였다. 사전 자료에 근거한 연구대상지역의 토양 비소농도와 중성 인산염 세척효율에 비추어봤을 때, 세척 후 정화도의 예상 비소농도는 논, 밭, 임야 토양에서 각각 26.0, 33.0, 73.5 mg/kg으로 예측되며, 이는 각 지역의 우려기준을 초과하는 결과이다. 이러한 한계점을 보완하고자 (즉, 충분한 접촉 및 교반시간을 확보하고자) 설계적인 측면에서 비소 오염토양과 세척액을 혼합하여 하루 동안 수침 적치 후 세척하는 방법과 반복세척하는 방법을 테스트해보았다.

수침 적치의 경우, 인산암모늄 세척액과 토양을 1 : 1 (v/w) 비율로 혼합하여 24시간 수침한 후 위에서 도출한 세척조건(i.e., 0.5 M NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, pH 6, 고액비 1 : 5)으로 상온에서 1시간 세척하였다. 그 결과 논 토양에서 36.1%의 제거효율을 보였고, 정화도 예상 농도 21.1 mg/kg으로 1지역 우려기준(i.e., 25 mg/kg)을 만족시킬 수 있었다(Fig. 5). 그러나, 밭과 임야 토양에서는 각각 21.4, 26.4%의 효율을 보여, 정화도 예상 농도 29.6, 63.2 mg/kg으로 각각 1지역, 2지역 우려기준(i.e., 25, 50 mg/kg)을 초과하였다. 또 다른 대안인 반복세척은 수침 적치의 경우보다 낮은 세척효율을 보였다. 반복세척을 위하여 위 세척조건으로 상온에서 1시간씩 3번 세척한 결과, 논, 밭, 임야 토양에서 각각 32.2, 18.3, 22.2%의 비소 제거효율을 보였는데, 수침 적치의 경우와 마찬가지로 논토양에 대해서만 법적기준을 달성하였다.

중성 인산염 토양세척을 도출해본 결과 수침 적치, 반복세척과 같은 설계적인 측면에서 보완을 통해 논 토양의 법적 기준을 만족시킬 수 있었다. 본 연구를 통해 중성 인산염 토양세척의 정화효율 측면에서의 적용가능성은 확



**Fig. 5.** Extraction efficiencies of As by washing following 24-hr storage (i.e., submerged in washing solution and soil for 24-hr at the ratio of 1 : 1 (v/w)) or repeated washing.

인하였으나, 토양질의 측면에서 중성 인산염 세척 시 토양의 인 성분 증가가 토양 내 양이온들의 식물이용성에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

**4. 결 론**

정화도의 재사용을 고려하여 중성 인산염 토양세척법을 검토해본 결과, 중성 인산염은 토양 내 비소의 주요 흡착 매질인 철·알루미늄 산화물에 결합되어 있는 비소의 일부까지 제거시켜 세척제로서의 가능성을 보였다. 여러 가지 중성 인산염 중 특히 인산암모늄이 가장 우수한 세척효율을 보였고, (구)장항제련소 주변 부지 매입구역 토양의 넓은 면적을 차지하는 논 토양에서 현행 토양환경보전법 상의 1지역 우려기준(i.e., 25 mg/kg)을 중금속 분석 오차범위 내에서 만족시키는 결과를 얻었다. 인산암모늄 세척액과 토양을 1 : 1(v/w) 비율로 혼합하여 24시간 동안 수침적치 후 1시간 세척하거나(세척조건: 0.5 M NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, pH 6, 고액비 1 : 5), 같은 세척조건으로 3번 반복세척을 하는 방법도 유용한 것으로 판단된다.

**사 사**

본 연구는 환경부의 토양, 지하수 오염방지기술개발사업인 GAIA (Geo-Advanced Innovative Action) Project

와 폐자원에너지화 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 서울대학교 건설환경종합연구소의 기술적 지원에도 감사 드립니다.

## References

- Alam, M.G.M., Tokunaga, S., and Maekawa, T., 2001, Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate, *Chemosphere*, **43**(8), 1035-1041.
- Alam, M.G.M., Tokunaga, S., and Stagnitti, F., 2007, Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants, *J. Environ. Sci. Health, Part A: Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, **42**(4), 447-451.
- Baek, K., Kim, D.H., Seo, C.I., Yang, J.S., and Lee, J.Y., 2007, Remediation of Pb-contaminated soil by soil washing using hydrochloric acid, *J. Soil Groundw. Environ.*, **12**(3), 17-22.
- Bohn, H.L., Meneal, B.L., and O'connor, G.A., 2001, Soil Chemistry, John Wiley & Sons, INC., USA, 213 p.
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., and Richer-Lafleche, M., 2008, Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications, *J. Hazard. Mater.*, **152**(1), 1-31.
- Hongshao, Z. and Stanforth, R., 2001, Competitive adsorption of phosphate and arsenate on goethite, *Environ. Sci. Technol.*, **35**(24), 4753-4757.
- Jeon, B., Kim, S., Lee, S., and Jung, W., 2008, Technology trends of remediation of arsenic-contaminated soil and groundwater, *Min. Hazards Prev. Reclam.*, **2**(1), 3-13.
- Jeong, S., An, J., Kim, Y.J., Kim, G., Choi, S.I., and Nam, K., 2011, Study on heavy metal contamination characteristics and plant bioavailability for soils in the Janghang smelter area, *J. Soil Groundw. Environ.*, **16**(1), 42-50.
- Kim, J.Y., 2011a, Characteristics of thermal desorption (TD) and subcritical water extraction (SWE) for As-contaminated soil, Hanyang University, Seoul, 94-98.
- Kim, J.Y., Kim, H.Y., and Kim, S.M., 2011b, Method for Remediating Soil Contaminated by Arsenic using Thermal Desorption and Chemical Washing, KR 10-2011-0049185.
- Klute, E.A., 1986, Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods American Society of Agronomy-Soil Science Society of America.
- KMOE (Korea Ministry of Environment), 2013a, Official Test Methods of Soil Quality, 2013-113/2000000025462.
- KMOE, 2013b, Survey Results on Contamination of Soil in Monitoring Network, 11-1480000-000669-10.
- Moon, S.Y., Oh, M.A., Jung, J.K., Choi, S.I., and Lee, J.Y., 2011, Assessment of soil washing efficiency for arsenic contaminated site adjacent to Jang hang refinery, *J. Soil Groundw. Environ.*, **16**(1), 71-81.
- Park, G.Y., Kim, W.S., Kim, D.H., Yang, J.S., and Baek, K., 2013, Evaluation of electrolyte and electrode spacing for application of electrokinetic remediation, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(1), 6-15.
- Seo, S.K., Lee, S.H., Son, J.H., and Chang, Y.Y., 2008, Application of a full scale soil washing process for the remediation of contaminated soil around an abandoned mine, *J. Soil Groundw. Environ.*, **13**(2), 70-75.
- Sharpley, A., 2006, Agricultural Phosphorus Management: Protecting Production and Water Quality, MidWest Plan Service, USA, 10 p.
- Sparks, D.L., 1996, Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods American Society of Agronomy-Soil Science Society of America.
- Tokunaga, S. and Hakuta, T., 2002, Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil, *Chemosphere*, **46**(1), 31-38.
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 1996, Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices, EPA/3052/SW-846.
- USEPA, 2002, Arsenic Treatment Technologies for Soil Waste and Water, EPA/542/R/02/004.
- Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaskab, T., Stinger, G., Lombic, E., and Adriano, D.C., 2001, Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure, *Anal. Chim. Acta*, **436**, 309-323.
- Yang, J.S., Hwang, J.M., Baek, K., and Kwon, M.J., 2013a, Soil washing and effluent treatment for contaminated soil with toxic metals, *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(6), 745-754.
- Yang, K., Jeong, S., Im, J., and Nam, K., 2013b, Incorporation of arsenic form and bioaccessibility into risk assessment and remedial decision in the As-contaminated formersmelting activity impacted soil, *Proceedings of 2013 International Symposium and Asian Network on Soil and Groundwater Environment*, Korean Soc. Soil Groundw. Environ., Jeju, p. 16-17.
- Yi, Y.M., Oh, C.T., Kim, G.J., Lee, C.H., and Sung, K.J., 2012, Changes in the physicochemical properties of soil according to soil remediation methods, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(4), 36-43.
- Yi, Y.M., Kim, G.J., and Sung, K.J., 2013, Effects of soil remediation methods on the biological properties of soils, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(3), 73-81.