한국지하수토양환경학회지 Vol. 10, No. 6, pp. 68~74, 2005 ≪原著≫

Field 규모 연속 토양세척공정을 이용한 비소 오염토양 정화 효율 평가

최상일* · 김강홍 · 한상근
광운대학교

Performance Evaluation of the Field Scale Sequential Washing Process for the Remediation of Arsenic-Contaminated Soils

Sang Il Choi* · Kang Hong Kim · Sang-Keun Han
Department of Environmental Engineering Kwangwoon University

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the feasibility of field-scale sequential soil washing process for remediation on Kyongsangnamdo D mine soils which was heavily contaminated by arsenic. Arsenic concentration of untreated soils was 321±32 mg/kg. By applying the basic operating condition which was proposed from several pilot-scale experiments, arsenic concentration of treated soils was reduced 2.04 mg/kg (99% removal efficiency). We optimized the basic operating condition (mainly on washing solution concentration, cut-off size, and mixing ratio) to improve efficiently and economically the field-scale sequential soil washing process. The resulting optimized conditions were that solution concentration is 0.2 M HCl, 1.0 M HCl, 1.0 M NaOH, that the cut-off size is 0.15 mm (seive #100), and that the mixing ratio is 1 : 3. Also, the optimized pH value for soil washing effluent treatment was 6 (33 ppb), in which the precipitation disruption caused by supersaturation of the floc did not occur. Results of TCLP tests showed that arsenic concentration from the washed gravels was 1.043 mg/L, that from soils ND (not detected), and that from filter cakes 0.066 mg/L. Also, the water content as a percentage of dewatered sludges was low (48%) and so the dewatered sludges can be disposed by landfilling. Through these results, we can conclude that the field-scale sequential soil washing process developed in this study is adopted for remediation of arsenic-contaminated soils.

Key words : Arsenic, Field scale sequential soil washing process, Economical operation condition, pH, TCLP

요 약 문

고농도 비소 오염토양에 대한 field 규모 연속 토양세척공정의 적용 가능성을 평가하기위해 경상남도 D광산 광미 혼합토양에 대하여 적용하였다. 초기 비소오염 농도는 321±32 mg/kg dry soil 이었으며 pilot 규모 실험에서 도출된 기본 운전조건을 적용한 결과, 세척된 토양의 잔류 비소농도는 2.03 mg/kg dry soil로서 99%의 높은 제거효율을 나타내었다. 경제성 및 효율성을 개선하기 위하여 세척제의 농도, cut-off size, 진탕비를 조절하며 운전한 결과, 토양세척 공정 운전시 원활한 운전관리와 처리단가 등을 고려한 최적의 운전조건은 1) 각 단계의 세척제 농도 0.2 M HCl-1.0 M HCl-1.0 M NaOH, 2) cut-off size 0.15 mm(sieve #100), 3) 진탕비 1 : 3으로 처리한 결과 세척된 토양의 잔류 비소농도는 2.03 mg/kg 이었으며 세척유출수 처리에서는 형성된 floc의 과포화로 인한 침전방해가 발생하지 않는 pH 6이 (33 ppb) 최적의 처리조건으로 판단되었다. 최종 배출된 청정자갈 및 토양, filter cake에 대하여 TCLP 법을 적용한 용출실험 결과, 각각 1.04, ND, 0.07 mg/L로 모두 용출비소 농도기준(5 mg/L)을 만족하며, 탈수슬러지의 함수율(48%)도 폐기물관리법의 슬러지 수분함량 기준(85%)을 만족하여 매립처리가 가능함을 알 수 있었다. 따라

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr
원고접수일 : 2005. 11. 1 게재승인일 : 2005. 11. 12
질의 및 토의 : 2006. 2. 28 까지

서 본 연구의 field 규모 연속 토양세척공정은 고농도 비소 오염부지의 정화를 위한 기술로 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

주제어 : 비소, Field 규모 연속 토양세척공정, 경제적 운전조건, pH, TCLP

1. 서 론

경제규모의 성장과 다양한 산업 활동의 증가로 인하여 날로 환경이 오염되고 있으며, 환경보존의 문제가 큰 관심사로 부각되고 있다. 특히 우리나라는 1970년대를 기점으로 급속한 경제 성장을 하였고, 90년대에 선진국의 대열에 접어들었으나 산업활동에 의한 오염물질의 처리와 회수가 미흡하여 오염물질들이 토양내에 방치되거나 투기되어 토양 및 지하수의 오염문제가 심각하게 대두되고 있다.

광산개발 과정에서 발생한 폐석 혹은 채굴된 지하 자원 중에서 유효광물을 분리한 후 폐기한 광미(tailing)는 중금속 함량이 토양환경보전법의 기준치를 크게 웃도는 경우가 많고 강수 등에 의해 지하수를 오염시키거나 오염물질이 다른 지역까지 이동하여 넓은 범위의 지역을 오염시킨다. 특히, 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가 크롬과 같은 중금속은 다른 오염물과는 달리 토양에 유입되면 자연적으로 분해되는 시간이 길기 때문에 토양 내에 반영구적으로 잔존하게 되고, 동식물의 먹이연쇄나 지하수의 이동 등 다양한 경로를 통해 인간에게 유해한 오염물질로 작용한다. U.S. EPA에서 인체발암물질(Group A)로 분류하고 있는 비소는 유독물질로서 경구노출에 의해 피부암 유병율이 통계학적으로 유의하게 높은 것으로 알려지고 있어, 비소로 오염된 토양 및 지하수의 정화가 절실히 요구되고 있다(이효민 외, 1998).

토양세척기법은 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해 유기오염물질의 표면장력을 약화시키거나, 중금속을 용해시켜 오염물질을 입자로부터 분리하여 처리하는 기법이다. 특히, 토양입자에 결합되어 있는 중금속과 같은 난분해성 물질은 제거가 어려워 여타 다른 기술로는 정화의 목표를 달성하기가 어렵고, 경제성면에서도 많은 단점을 가지고 있다. 그러나 토양세척기법은 물리적인 교반력과 여러 가지 화학적 반응에 의하여 오염물의 원천적인 제거가 가능하고, 오염토양의 부피 감소로 처리비용을 절감시켜 현장 적용성이 크고 경제성 및 효율성이 뛰어난 정화기법의 하나로 인식되고 있다(West and Harwell, 1992). 실제로 미국에서는 대표적 Superfund site인 King of Prussia의 중금속(Cr, Pb 등) 오염토양(초기 오염농도 8,000 ppm)에 대하여 토양세척기법을 적용하여 처리한 결과 94%의 높은 처리효율을 보였으며, 이외에도 휘발성 유기오염물질, PCBs, PAHs 등의 물질로 오염된 토양에 대하여 광범위하게 적용되고 있다(US EPA, 1997a).

본 연구에서는 고농도의 비소로 오염된 D 광산 부지에서 field 규모의 연속 토양세척공정을 적용하여 효율적이며 경제적인 정화를 위한 운전조건을 도출하고자 하였다. 또한, 세척공정 후 배출된 청정자갈 및 토양과 유출수 처리공정에서 배출된 슬러지에 대하여 용출실험을 통한 매립처리의 가능성을 평가하므로, field 규모 연속 세척공정을 적용한 실제 정화사업의 가능성을 평가하고자 하였다.

2. Field 규모 연속 토양세척공정의 설계

고농도의 비소로 오염된 폐 철광산 주변 토양을 효율적으로 세척 정화하기 위하여 lab · pilot 규모의 실험(황정성 외, 2004; 황정성 외, 2005)을 통한 기본운전조건을 바탕으로 field 규모 연속 토양세척공정을 설계 · 제작하였다(Fig. 1, 2). 본 공정은 (1) 비소 및 그 외의 중금속으로 오염된 토양을 효율적으로 세척 · 정화하기 위한 연속 토양세척장치, (2) 세척 대상토양과 미세토사 및 floc 함유 유출수를 분리하기 위한 hydrocyclone 및 underflow되는 토양을 입경분리하기 위하여 내부에 100 mesh 규격(0.150 mm)의 망을 설치한 미세토사살수장치, (3) 세척유출수의 오염물질 및 미세토양 제거를 위한 응집 · 침전장치, (4) 침전된 슬러지 탈수를 위한 filter press 탈수

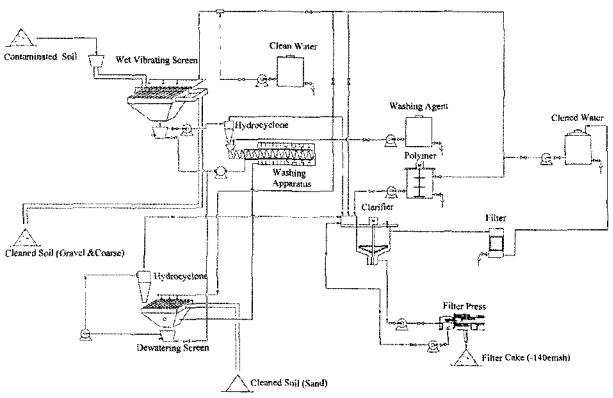

Fig. 1. Field-scale sequential soil washing process flow diagram.

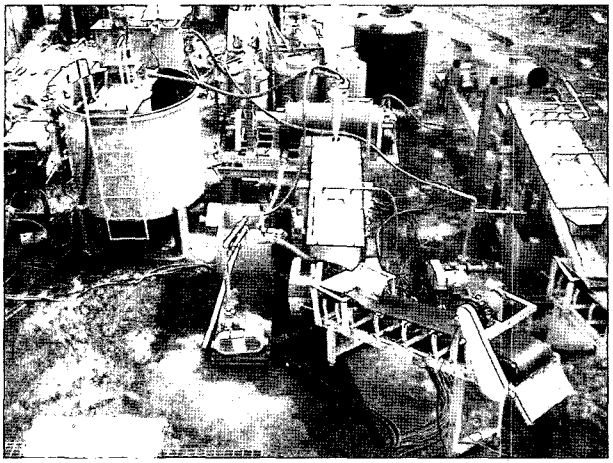

Fig. 2. Field-scale soil washing system.

장치로 구성되었다. 각 단위 공정별 설계 제원은 Table 1과 같다.

3. Field 규모 연속 토양세척공정

3.1. 공정 운전

본 field 규모 연속 토양세척공정은 총 3단계의 세척공정으로 구성되었다.

3.1.1. 1단계 세척

투입호퍼에서 wet vibrating screen으로 이송된 50 mm 이하의 비소 오염토양에 대하여 0.2 M HCl의 세척수를 고압 분사하여 파쇄 및 세척과정을 거친 후 gravel 및 coarse sand(2 mm 이상)의 크기를 갖는 토양은 진동 탈수시켜 청정토사로 배출하였고, 혼합교반조를 거쳐 형성된 floc과 2 mm 이하의 토양은 hydrocyclone으로 이송시켰다. Hydrocyclone으로 이송된 오염토양과 세척수의 혼합물 중, 0.075 mm(200 mesh 체거름)이하의 크기를 갖는 미세토양과 floc은 over-flow되어 침전조로 이송시켰으며, 나머지 토양은 1차 세척부와 2차 세척부로 구성된 토양세척장치로 이송시켰다.

3.1.2. 2 · 3단계 세척

토양세척장치로 이송된 토양은 1차 세척부에서 1.0 M HCl 세척수와 혼합되어 비소가 탈착되고, 2차 세척부에서는 비소가 용출되지 않은 오염토사에 대하여 재세척을 수행하게 하였으며, 세척토사 및 세척수는 탈수스크린 하단의 호퍼로 이송하였다. 0.150 mm(100 mesh 체거름)이하의 토사와 일정량의 세척유출수 및 재형성된 floc은 hydrocyclone에 의하여 over-flow되어 침전조로 이송되고, 나머지 토양은 탈수스크린으로 이송되어 1.0 M NaOH로 마지막 3단계 세척한 후, 진동탈수시켜 청정토사로 배출하였다.

3.1.3. 세척유출수 및 슬러지 처리

Hydrocyclone에서 이송된 미세토사와 floc은 일정 체류

Table 1. Design factors of each unit process

Device		Spec.	Remarks
Wet vibrating feeder	Capacity	10 m^3/day	
	Oversize reduction	50 mm	
HCl/NaOH agitator	Capacity	0.7 m^3	High-pressure jet air nozzle (3 ea)
	Air flow rate	195 l/min	
	Sand pump	3.75 kw, 380 V	
Washing apparatus	Capacity	10 m^3/day	
	Primary washing unit	1.5 kw, 380 V	
	Secondary washing unit	2.25 kw, 380 V	
	Compressor	15 kw, 380 V	
Dewatering screen	Capacity	12.5 ton/hr	
Hydrocyclone		30 m^3/day	
Clarifier		5 ton	
Filter press		2,000 L, 1.5 kw, 380 V	
Agents tank		0.5 ton	
Water tank		3 ton	

시간을 유지하여 침전시킨 후, 하부호퍼에 집적된 슬러지를 인발하여 filter press 탈수장치로 이송시킨 다음 0.150 mm 이하의 입자크기를 갖는 filter cake으로 배출한다. 또한 침전지에서 상등 분리된 세척유출수는 여과기를 통과시켜 공정수로 재활용하였다.

3.2. 대상토양 및 분석방법

본 연구에서는 D 광산 토양에 대하여 field 규모 연속 토양세척공정을 적용하였다. 대상토양의 물리·화학적 특성, 입경 분포 및 입경별 비소오염 부하량, 연속추출법(Kim et al., 2003)을 통한 비소 결합형태 파악 등은 lab·pilot 규모의 실험(황정성 외, 2004; 황정성 외, 2005)을 참고하였다. 세척 전후 토양 및 floc 내에 존재하는 비소의 농도 분석은 토양오염공정시험법(환경부, 2002a)에 따라 전처리한 후, ICP-OES(PerkinElmer, Model: Optima 2000DV, USA)와 AAS(SHIMADZU, Model: AA-6401F, Japan)를 이용하였으며, 세척유출수내에 미량으로 존재하는 비소는 AAS-HVG(SHIMADZU, Model: HVG 1, Japan)를 이용하여 분석하였다. 공정을 거쳐 배출된 청정자갈 및 토양, filter cake의 매립처리 가능성을 평가를 위한 방법으로 pH가 낮은 산성광산배수의 유출을 고려하여 국내 폐기물용출시험법(환경부, 2002b)의 추출용매(pH 5.8~6.3)보다 낮은 pH의 추출용매(pH 2.88~4.93)를 사용하는 EPA Method 1311(US EPA, 1997b)의 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)법을 적용하였다.

3.3. 연속 토양세척실험

기존의 lab · pilot 규모 실험을 통하여 도출된 기본 운전조건과 오염토양 복원시 효율성과 경제성을 높이기 위한 운전조건을 적용하여 세척실험을 수행하였다. 기본 운전조건으로는 0.2 M HCl을 사용하여 floc을 발생시킨 후, 2·3단계 세척공정에서 각각 1.0 M의 HCl과 NaOH를 적용하였다. 진탕비(토양 [g] : 세척용액 [mL])는 1 : 5, 연속 토양세척장치의 1·2차 세척부의 회전속도를 각각 6, 2.5 rpm으로 운전하였고, 대상토양의 cut-off size는 2.000 mm(sieve #10)~0.150 mm(sieve #100)로 선정하여 세척을 수행하였다. 또한, 경제성 제고 운전조건을 도출하기 위하여 세척제의 농도, cut-off size, 진탕비 등 3가지의 운전인자를 각각 조절하여 실험하였다(Table 2).

3.4. 유출수 및 슬러지 처리

pH 조정에 따른 유출수내 비소의 제거 효율을 파악하기 위하여 응집·침전조로 이송되어 혼합된 각 단계별 세척유출수(pH 8.6)에 HNO_3 원액과 1.0 M NaOH를 주입하여 pH 5, 6, 7, 8, 9, 10으로 조절한 후, 침전시켜 상등액내 비소, 알루미늄, 철의 농도를 분석하였다. 또한, 세척공정을 마친 청정자갈 및 토양과 탈수과정을 거쳐 배출된 filter cake에 대하여 매립 처리 가능성 평가를 위한 TCLP법을 적용하여 용출된 비소의 농도를 분석하였다.

Table 2. The operation conditions for testing the washing efficiency

Sol. conc. [M] (HCl-HCl-NaOH)	Cut-off size (Sieve No.)	Mixing ratio (soil [g] : sol. [mL])
0.2-1.0-1.0	#10~#100 (0.150 mm~2.000 mm)	1 : 2
		1 : 3
	#10~#140 (0.105 mm~2.000 mm)	1 : 3
		1 : 5
0.2-0.75-0.75	#10~#100 (0.150 mm~2.000 mm)	1 : 3
		1 : 5
	#10~#140 (0.105 mm~2.000 mm)	1 : 3
		1 : 5
0.2-0.5-0.5	#10~#100 (0.150 mm~2.000 mm)	1 : 5

4. 결과 및 고찰

4.1. 대상토양의 특성

대상토양의 초기 비소오염 농도는 토양환경보전법(환경부, 2002c) "가"지역 및 "나"지역 우려기준치(각각 6, 20 mg/kg dry soil)를 초과하는 약 321±32 mg/kg dry soil 이었으며, EPA Method 3050B(US EPA, 1997b)에 의한 비소의 전함량은 1,706±250 mg/kg dry soil이었다. 연속추출법에 의한 7단계까지의 비소 총량은 1,411.5±123.6 mg/kg dry soil이었고, 이 중에서 7단계인 crystalline minerals에 1,236±108 mg/kg dry soil(비소 총량 대비 88%)로 대부분의 비소가 분포하는 특성을 보였다.

4.2. 연속 토양세척실험

Table 3은 기본 및 경제성 제고를 위한 운전조건을 적용하여 세척한 토양의 잔류 비소농도를 나타낸 것이다. 기본 운전조건인 세척제 농도 0.2 M HCl, 1.0 M HCl, 1.0 M NaOH, cut-off size 0.150 mm, 진탕비 1 : 5 (Exp. 3)을 적용한 결과, 잔류 비소농도는 2.03 mg/kg dry soi로 토양환경보전법 가 지역 우려기준에 적합하게

Table 3. Arsenic concentrations by KST[a] method for squentially washed soil samples

Exp.	Sol. conc. [M] (HCl-HCl-NaOH)	Cut-off size (Sieve No.)	Mixing ratio (soil [g] : sol. [mL])	As conc.[b,c]
1	0.2-1.0-1.0	#10~#100 (0.150 mm~2.000 mm)	1 : 2	4.72±0.12
2			1 : 3	2.30±0.10
3			1 : 5	2.03±0.10
4		#10~#140 (0.105 mm~2.000 mm)	1 : 3	11.23±1.02
5			1 : 5	2.49±0.16
6	0.2-0.75-0.75	#10~#100 (0.150 mm~2.000 mm)	1 : 3	7.50±0.45
7			1 : 5	2.34±0.15
8		#10~#140 (0.105 mm~2.000 mm)	1 : 3	9.25±0.64
9			1 : 5	9.11±0.57
10	0.2-0.5-0.5	#10~#100 (0.150 mm~2.000 mm)	1 : 5	7.45±0.43

[a] Korea Standard Test
[b] Average±standard deviation for triplicate analyses
[c] mg/kg dry soil

됨을 알 수 있었다. 따라서, pilot 규모 실험에서 도출된 최적 운전조건을 field 규모 연속 토양세척장치의 운전에도 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

실제적인 오염토양을 위한 경제성 및 효율성 향상 운전조건 도출 실험에서 기본 운전조건에서 진탕비만을 1 : 2로 조절하여(Exp. 1) 운전한 결과, 4.72 mg/kg dry soil로 가 지역 우려기준에 적합한 농도를 나타내었으나, 이는 hydrocyclone 운전에서 입자의 분리 효율을 저하시키고, 유출수처리시 고액분리의 문제점 등이 지적되었다. 따라서 토양세척공정 운전시 원활한 운전관리를 위하여 최소 1 : 3 이상의 진탕비가 적절할 것으로 판단되었다. 기본 운전조건에서 cut-off size를 0.105 mm(sieve #140)로 하고, 진탕비를 1 : 3으로 하여 세척한(Exp. 4) 토양의 잔류 비소농도는 11.23 mg/kg dry soil로 가 지역 우려기준치를 초과하였으나, Exp. 4 조건에서 진탕비만 1 : 5로 높여 세척하였을 때(Exp. 5), 2.49 mg/kg dry soil의 높은 세척효율을 나타내었다. 또한, 기본 운전조건에서 세척용액의 농도를 0.2 M HCl, 0.75 M HCl, 0.75 M NaOH 로 조절하여 적용한 실험(Exp. 7)에서도 잔류 비소농도가 2.34 mg/kg dry soil로 기준치를 만족하는 결과를 나타내었다. 그러나 Exp. 7조건에서 cut-off size를 0.105 mm로 조절하고 진탕비를 각각 1 : 3(Exp. 8), 1 : 5 (Exp. 9)로 하여 세척 실험한 결과, 모두 기준치를 초과하여 적절하지 못한 운전조건인 것으로 나타났다. 따라서 잔류 비소농도가 기준치를 만족한 조건들인 Exp. 2, 3, 5, 7중에서 정화소요비용 측면에서의 용액의 농도, cut-off

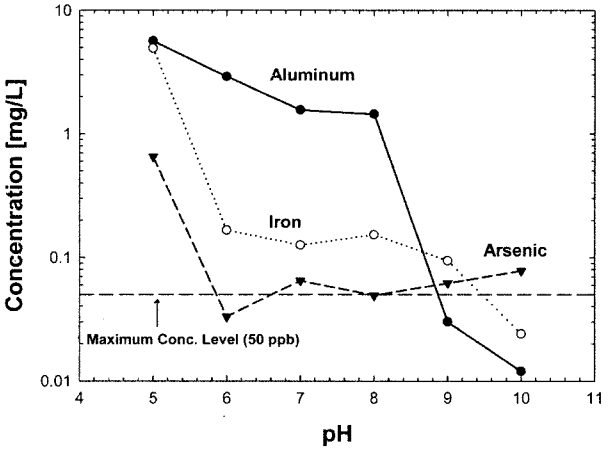

Fig. 3. Arsenic and other heavy metal concentrations in washing effluent.

size, 진탕비 각각의 비중을 고려한 결과, 최소 진탕비인 Exp. 2조건(세척제 농도 0.2 M HCl, 1.0 M HCl, 1.0 M NaOH, cut-off size 0.150 mm, 진탕비 1 : 3)이 최적의 운전조건으로 판단되었다. 그러나 이러한 조건은 부지의 특성에 따라 유기적으로 조절하여 사용할 수 있을 것이다.

4.3. 유출수 및 슬러지 처리

Fig. 3은 혼합된 각 단계별 세척유출수의 pH 조절에 따른 비소의 농도 변화를 분석한 결과이다. pH 6과 8에서 음용수 기준농도인 50 ppb에 적합한 33, 49 ppb의

Table 4. TCLP[a] results of washed soils and dewatered sludge

Samples	As conc.[b,c]
Washed gravels	1.043±0.230
Washed soils	ND[d]
Filter cakes	0.066±0.090

[a] Arsenic extraction standard : 5 mg/L
[b] Average±standard deviation for triplicate analyses
[c] mg/L
[d] not detected

농도를 나타내었으며, 이것은 중성부근인 pH 6에서는 유출수내에 용해되어 있던 철이온이 불용성의 철수산화물을 형성하고 이 불용성의 floc이 침전되면서 표면 흡착이나 공침(coprecipitation)에 의하여 비소를 효율적으로 제거하기 때문이다(Ford, 2002). 또한, pH 8부근에서는 불용성의 알루미늄 수산화물이 형성되어 철수산화물의 경우와 같은 기작으로 비소를 제거하기 때문인 것으로 판단된다(Gregor, 2001). 그러나 pH 7이상에서는 혼합된 유출수내 형성된 floc의 양이 과포화되어 30~40분 경과 후에도 침전이 되지 않는 현상을 관찰할 수 있었고, 이것은 처리효율 저하의 문제를 발생시켰다. 따라서 효율적인 공정의 운전을 위한 조건은 pH 6이 적절할 것으로 판단되었다.

세척공정을 마친 청정자갈 및 토양과 filter cake에 대하여 TCLP법을 적용하여 용출된 비소의 농도를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 1단계 세척 후 배출된 청정토양과 3단계의 세척을 모두 거친 최종 세척토 그리고 탈수과정을 거친 슬러지의 농도 모두 기준치 이하로 검출되어, 매립처리가 가능할 것으로 판단되었다. 또한 탈수된 슬러지의 함수율도 평균 48%로 폐기물관리법(환경부, 2002d)의 슬러지 수분함량 기준(85% 이하)에 적합함을 알 수 있었다.

5. 결 론

1. 대상토양에 대한 field 규모 연속 토양세척공정 적용시 경제성 및 효율성 제고를 위하여 적용된 운전조건 중 세척제 농도 0.2 M HCl, 1.0 M HCl, 1.0 M NaOH, cut-off size 0.150 mm, 진탕비 1 : 3이 가장 적합할 것으로 판단되었다.

2. 세척유출수 처리시 pH 6과 8에서 음용수 기준농도인 50 ppb에 적합한 33, 49 ppb의 농도를 나타내었으나, pH 7이상에서는 혼합된 유출수내 형성된 floc의 양이 과포화되어 30~40분 경과 후에도 침전이 되지 않는 현상이 발생하여 처리효율을 저감시키므로 pH 6이 최적의 처리조건으로 판단되었다.

3. 본 연구에서 적용한 field 규모 연속 토양세척공정은 최종 배출된 청정자갈 및 토양과 filter cake이 TCLP법에 의한 용출비소 농도기준을 만족하며, 탈수슬러지의 함수율도 폐기물관리법의 슬러지 수분함량 기준을 만족하여 매립처리가 가능하므로 효율적인 복원공정으로 여겨진다.

4. Field 규모 연속 토양세척공정은 대상토양과 같은 고농도 비소 오염토양에 적용가능 할 뿐만 아니라, 다른 특성을 가지는 오염토양에도 본 연구에서 제시한 운전조건을 적절히 조절하여 적용하면 효율적으로 복원이 가능할 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 2004년도 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업과 2005년도 환경부 ET교육혁신지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

이효민, 윤은경, 최시내, 박송자, 황경엽, 조성용, 김선태, 1998, 폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원목표 설정 : 미래 토지용도를 고려한 접근방법, 한국토양환경학회지, **3**(2), 13-29.

환경부, 2002a, 토양오염공정시험법.

환경부, 2002c, 토양환경보전법.

환경부, 2002b, 폐기물공정시험법.

환경부, 2002d, 폐기물관리법.

황정성, 최상일, 장민, 2004, 비소로 오염된 토양에 대한 토양세척기법의 적용성 연구, 한국지하수토양환경학회지, **9**(1), 104-111.

황정성, 최상일, 한상근, 2005, 폐 철광산 주변 비소로 오염된 토양에 대한 연속 세척기법의 적용, 한국지하수토양환경학회지, **10**(1), 58-64.

Ford, R.G., 2002, Rates of Hydrous Ferric Oxide Crystallization and the Influence on Coprecipitation Arsenate, *Environ. Sci. Technol.*, **36**(11), 2459-2463.

Gregor, J., 2001, Arsenic Removal during Conventional Aluminium-Based Drinking-Water Treatment, *Wat. Res.*, **35**(7), 1659-1664.

Kim, J.Y., Davis, A.P., and Kim, K.W., 2003, Stabilization of Available Arsenic in Highly Contaminated Mine Tailings Using Iron, *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 189-195.

USEPA, 1997a, Innovative Treatment Technologies: Annual Status Report 7th ed., EPA 542-R-95-008

USEPA, 1997b, Test Methods for Evaluating Solid wastes,

Physical/Chemical Methods (SW846), 3rd ed. U.S. Government Printing Office: Washington, DC.

West, C.C. and Harwell, J.F., 1992, Surfactant and Subsurface Remediation, *Environ. Sci. Technol.*, **26**(12), 2324-2330.