

폐광산 주변 오염토양 정화를 위한 실규모 토양세척공정 적용

서상기¹ · 이상화^{1*} · 손정호² · 장윤영²

¹한국농촌공사 환경지질처, ²광운대학교 환경공학과

Application of A Full Scale Soil Washing Process for the Remediation of Contaminated Soil around an Abandoned Mine

Sang-Kee Seo¹ · Sang-Hwa Lee^{1*} · Jeong-Ho Son² · Yoon-Young Chang²

¹Office of Environmental Geology, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

²Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the applicability of the full scale soil washing processes for reducing heavy metal contamination level of soil around an abandoned mine. In the results of soil washing of the target soil with H₂SO₄ and NaOH, the As concentrations of treated soil continuously increased compared with contaminated raw soil. Also, removal efficiencies of Zn and Ni were low. This problems might be caused by chemical partitioning of As in soil and its geologic origination, soil particle size, and scale up of washing plant.

Key words : Heavy metal, Abandoned mine, Full scale soil washing process, H₂SO₄, NaOH

요 약 문

중금속으로 오염된 폐광산지역 토양을 정화하기 위해 실규모 토양세척공정을 적용하였다. H₂SO₄을 이용한 토양세척 시 Cd의 경우 정화목표를 달성할 수 있었지만 낮은 세척효율을 나타내었으며, Zn은 낮은 세척효율로 인해 세척 후 토양의 농도가 토양오염우려기준 미만으로 저감되지 않았다. Cd 및 Zn은 토양세척 후 농도가 저감되는데 반해 As의 경우 세척 전에 비해 세척 후 토양의 As 농도가 지속적으로 증가되는 경향을 보였다. NaOH를 사용하여 세척효율을 평가한 결과, Cd와 Zn의 농도는 저감되었으나, 세척 전에 비해 세척 후 As의 농도가 더 높게 나타나 황산으로 세척한 경우와 유사한 경향을 보였다. 이러한 세척효율을 저하시키는 원인은 처리대상 토양의 입도분포 및 실규모 토양세척으로 확대 적용함에 따라 발생하는 여러 가지 문제점으로 요약할 수 있으며, 세척 후 As의 농도가 증가하는 현상은 토양 내 As의 존재형태에 기인하는 것으로 판단되었다.

주제어 : 중금속, 폐광산, 토양세척, H₂SO₄, NaOH

1. 서 론

산업혁명 이후 기계문명이 발달하고 급격한 산업화의 부산물로 다양한 종류의 중금속이 다량으로 배출되고 있어 토양, 지하수 및 지표수에 악영향을 미치고 있다. 이러한 중금속들은 독성이 크고 분해가 되지 않아 잔존된 중

금속은 지하수의 이동 등 다양한 경로를 통해 인간에게 유해한 오염물질로 작용하고 있으므로 이에 대한 정화대책이 시급한 실정이다(한경욱, 2005).

중금속으로 오염된 토양의 위해성 저감 대안으로 고려할 수 있는 방법은 중금속의 오염이동 가능성을 최소화시키는 불용화방법(고형화안정화법)과 중금속을 추출/분리

*Corresponding author : lsh0509@empal.com

원고접수일 : 2008. 0. 00 게재승인일 : 2008. 0. 00

질의 및 토의 : 2008. 0. 00 까지

하는 방법(토양세척/세정법)으로 크게 대별된다(Yarlagadda et al., 1995). 또한, 유리화법, 식물정화법, 동전기법 등을 통해 중금속으로 오염된 토양을 정화할 수 있으나, 토양 환경보전법에서 규정하는 우려기준 미만으로 농도를 저감하기 위해서는 적극적으로 오염물질을 제거할 수 있는 방안의 적용이 필요하다. 식물정화법은 정화기간이 많이 소요되고, 고심도 및 고농도의 중금속 정화에는 부적합하며, 유리화법 및 동전기 방법은 높은 에너지 비용이 요구된다. 고형화·안정화법은 처리토양의 부피가 커지는 단점이 있으며, 국내 토양오염공정시험법에 의한 분석시 정화토양의 분석결과가 기준치를 상회할 가능성이 상존한다. 반면, 토양세척법은 적절한 세척제를 사용하여 유기오염물질과 중금속을 동시에 제거할 수 있으며, 오염된 토양의 부피도 크게 감소시킬 수 있어 오염물질의 양을 단시간에 줄일 수 있을 뿐만 아니라 경제성 및 효율성이 탁월하여 중금속으로 오염된 토양의 오염물질 농도저감을 위한 가장 적절한 정화공법으로 고려될 수 있다.

토양세척공정은 1970년대 말 유류 유출로 인해 오염된 해안가 모래를 정화하기 위하여 미국환경보호청에 의해 처음으로 개발되었다(Grasso, 1993). 고전적인 채광공정과 폐수처리공정의 기본 토대에 바탕을 둔 토양세척기술은 오염토양을 굴착하여 지상에서 처리하는 Ex-situ 기술이며, 1980년대 초부터 유럽 등에서 본격적으로 연구 개발되어 현재 미국, 캐나다 등 북미지역에서도 범용적으로 이용되고 있는 기술로서, 이미 경제성과 처리 성능이 입증된 정화기술이다. 이 기술은 폐광 중금속 오염토양 뿐만 아니라 강이나 호수 등 하상퇴적물의 세척정화에도 효과적으로 적용되고 있어 다양한 적용범위를 가지고 있다(한국과학기술원, 1997; Freeman and Harris, 1995; USEPA, 1995). 토양세척기술은 국토가 협소한 유럽에서 많은 연구가 수행되어왔으며, 미국에서는 현재 토양세척 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고 최근에 점차 현장에 적용하는 사례도 많아졌다(한국과학기술원, 1997; Evanko and Dzombak, 1997; Freeman and Harris, 1995; USEPA, 1997). 하지만, 국내의 토양세척공법을 이용한 중금속 오염토양 처리 연구는 아직까지 초기단계라 할 수 있으며, 대규모의 현장적용 사례도 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 울산광역시에 위치한 중금속으로 오염된 폐광산 주변 오염토양을 정화하기 위하여 실규모(Full scale) 토양세척장비 운영을 통해 정화목표 달성 여부를 평가하였으며, 처리효율 저하에 따른 원인을 규명하고자 하였다.

Table 1. The composition of full scale soil washing process

Facilities	Composition
Screen	· Trommel screen
1st washing system	· Input hopper · 1st washing tank
2nd washing system	· 2nd washing tank · 1st vibrating sieve
3rd washing system	· 3rd washing tank · 2nd vibrating sieve
Wastewater treatment system	· pH control tank · Precipitation tank · Filter press

2. 실규모 토양세척공정

2.1. 토양세척공정의 구성

부지 내 설치된 토양세척장비는 크게 5개의 장치로 구분할 수 있으며, 자세한 내역은 Table 1에 나타내었다. 오염토양 처리용량은 200 m³/day이었으며, 토양입자의 크기에 따라 1차, 2차, 3차에 걸친 세척공정을 통해 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있도록 제작되었다.

회전식 건식선별기를 통해 입径이 30 mm 이상인 자갈 등을 오염토양과 분리하였으며, 균일한 입자크기의 토양 투입을 통해 이후 토양세척공정상 문제점 발생요인을 최소화하였다. 투입호퍼를 통해 토양이 유입된 후 원통형 회전식 1차세척조에서 내부에 부착된 격막판에 의해 토양이 이송되면서 고압분사 방식으로 물을 이용한 세척을 실시한 후 2.5 mm 이상의 오염토양을 분리하였다. 1차세척 후 2.5 mm 미만의 토양입자들은 2차세척조로 이송되어 오염토양과 세척수가 회전식 스크류를 이용한 교반을 통해 오염물질의 농도를 저감하고자 하였으며, 세척 후 1차 진동분리기를 이용하여 0.5 mm 이상의 토양을 선별하였다. 0.5 mm 미만의 미세한 토양입자들은 원통형 3차세척조에서 Paddle type의 교반기를 통해 추가로 세척을 실시하였으며, 2차진동분리기를 통해 분리된 0.15 mm 이상의 입자들은 처리토로 이송하였다. 미세한 입자들이 포함된 세척폐수는 수처리시스템을 통해 처리한 후 전량 재활용하였으며, 수처리시 발생하는 슬러지는 현장에서 건조 후 폐기물로 처리하였다. 수처리시스템은 범용적으로 사용되는 응집, 침전방식을 사용하였으며, 반응조, 응집조, 침전조 및 pH조정조 등으로 구성되었다.

2.2. 토양세척공정 운전

폐광산 주변 오염토양 정화를 위하여 실규모 토양세척

장비를 현장에 설치하여 중금속 제거효율을 평가하였다. 본 부지의 주된 오염물질인 광미는 대부분 Silt 및 Clay 성분의 미립자로 구성되어 있어 세척에 적합하지 않아 토양세척 대상에서 제외하였으며, 세척대상토는 당초 광미를 제외한 오염토양 중 Sand 또는 Sandy loam으로 토양세척에 적합한 토성을 나타내는 구역의 토양을 대상으로 토양세척을 수행하였다.

오염토양은 현장에서 굴착하여 토양세척 야적장으로 이송한 후 선별기를 통해 30 mm 이상의 자갈 등을 토양세척 대상에서 제외하였으며, 투입호퍼 및 컨베이어벨트를 통해 이송된 토양은 1차세척조에서 2.5 mm 이상의 토양을 대상으로 물세척을 실시하였다. 2차세척조 및 3차세척조에서는 세척액을 사용하여 토양에 흡착된 중금속을 용출하였으며, 각각 0.5 mm, 0.15 mm 이상의 토양을 처리 대상으로 하였다.

토양세척 전 선별된 토양과 세척 후 최종 처리토양을 채취하여 세척효율을 평가하였으며, 분석은 토양관련전문기관인 동의과학대학 동의분석센터에 의뢰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상지역 토양의 이화학적 특성

Table 2에 나타낸 바와 같이 광미의 경우 입자크기가 큰 Tailings(L)의 토성은 Sandy loam, 입자가 작은 Tailings(M) 및 Tailings(S)은 Silty loam으로 나타났다. 광미를 제외한 폐광산지역내 분포하는 오염토양의 토성은 Sandy loam으로 분석되었다. 유기물함량의 경우 오염토양의 유기물함량은 2.19%로 우리나라 논토양 평균값인 2.6%에 근접하는 높은 수치를 보이는 반면, 광산활동의 부산물로 발생된 광미와 현장 내 넓은 면적에 분포되어 있는 Clay는 0.13~1.10%의 상대적으로 유기물함량이 낮게 나타났다. 대상지역 토양의 CEC는 6.6~26.7 cmol/kg의 수치를 보여 배경 토양(7.6~17.3 cmol/kg)에 비해 높게 나타났으며, 토양의 pH는 7.4~8.0으로 약알칼리성으로 나타났다.

3.2. 실규모 토양세척공정 처리효율 평가

3.2.1. H₂SO₄을 이용한 토양세척

H₂SO₄을 사용하여 실규모 토양세척시 실제 처리용량보

Table 2. Physicochemical characteristics of the target soil

Sample ^{a)}	Clay	Tailings (M)	Tailings (S)	Tailings (L)	Contaminated soil	
Soil particle	Sand(%)	31.0	24.0	5.0	70.0	58.0
	Silt(%)	39.0	68.0	74.0	26.0	34.0
	Clay(%)	30.0	8.0	21.0	4.0	8.0
	Soli texture ^{b)}	CL	SiL	SiL	SL	SL
pH	7.7	7.4	7.7	7.6	8.0	
Water content(%)	28.8	27.1	32.6	14.3	28.5	
Organic content(%)	0.13	0.76	1.13	1.10	2.19	
CEC(cmol/kg)	15.7	6.6	10.7	8.5	26.7	

Table 3. The concentration of heavy metals by soil washing using H₂SO₄

(Unit : mg/kg)

Operation No.	As		Zn		Cd	
	Before	After	Before	After	Before	After
1	6.1	4.7	933	622	0.59	0.30
2	4.5	8.5	1,683	991	1.34	0.64
3	4.5	6.8	1,683	1,406	1.34	0.77
4	5.7	7.6	3,595	2,351	1.81	1.08
5	17.6	7.6	3,240	1,580	1.30	0.65
6	6.0	13.0	4,921	3,416	2.25	1.68
7	4.6	13.8	4,736	2,822	1.90	0.98
8	5.4	10.2	3,593	2,047	2.37	1.04
9	5.0	10.5	3,863	3,371	2.23	0.96
10	12.6	7.0	3,071	2,721	1.19	1.06
11	8.5	12.1	2,738	1,752	1.52	0.81
Average	7.3	9.3	3,096	2,098	1.62	0.91

다 적은 80 m³/hr 로 토양을 투입하였다. 1차세척조에서는 황산을 주입하지 않은 순수한 물을 사용하여 세척하였으며, 2차 및 3차 세척조에서는 황산을 사용하여 pH를 각각 2.5~3.0, 2.0~2.5로 조절하였다.

Table 3에 폐광산 주변 오염토양을 정화하기 위해 H₂SO₄을 세척제로 사용하여 실규모 토양세척공정을 통해 처리 전, 후의 중금속 농도를 나타내었다.

Cd의 경우 세척 전의 오염토양의 평균 농도는 토양오염우려기준(가지역)을 약간 상회하는 1.62 mg/kg으로 나타났으며, 세척효율은 평균 44.1%의 낮은 효율을 보였으나 세척 후 토양은 평균 0.91 mg/kg으로 정화목표를 달성할 수 있었다. Zn의 경우 토양세척효율은 평균 32.2%로 낮은 수준이었으며, 세척 전 오염토양의 농도가 평균 3,095.8 mg/kg으로 토양오염우려기준을 10배 이상 초과하는 높은 농도를 나타냄에 따라 세척 후의 토양의 농도는 정화목표인 우려기준 미만으로 저감되지 않았다. Cd 및 Zn은 토양세척 후 농도가 저감되는 데 반해 As의 경우 대상지역내 일부 토양에 한해 세척효율이 최대 58%로 나타난 부분도 있었으나, 대부분의 경우 세척전 토양에 비해 세척 후 토양의 As농도가 지속적으로 증가되는 경향을 보였다. 이는 As가 토양내 단순 흡착된 것이 아니라 지질기원 비소함유광물에서 지속적으로 용출되어 나온 것으로 세척액으로 H₂SO₄을 사용할 경우에는 As의 농도를 저감하기 힘들 것으로 판단되었다.

3.2.2. NaOH를 이용한 토양세척

토양의 투입량은 H₂SO₄을 사용했을 경우와 동일하게 조절하였으며, 2차 및 3차 세척조 내의 pH를 NaOH를 이용하여 11.5~12.5로 유지시켰다.

Cd의 경우 세척 전 토양의 평균농도가 토양오염우려기준 미만인 0.57 mg/kg으로 나타났으며, 세척 후의 토양의 평균농도는 0.43 mg/kg으로 세척효율은 높지 않았으나 농도는 저감되는 것을 확인할 수 있었다. Zn의 경우도 Cd



Fig. 1. full scale soil washing plant.

와 유사하게 농도가 저감되는 것을 알 수 있었으며, 이는 NaOH에 의한 세척과정에서의 오염물질이 용출되는 효과 보다는 토양세척공정을 통한 입도분급 효과에 의해 미세토가 상당부분 제거되면서 처리 전에 비해 세척 후 농도가 저감된 것으로 판단되었다. 하지만, 오염토양 투입량을 감소시켰음에도 불구하고 세척 후 As의 농도는 토양환경보전법상 정화기준인 토양오염우려기준 미만으로 처리되지 않아 세척제로는 적합하지 않는 것으로 판단되었으며, 일부 조건에서 처리 후의 As농도가 더 높게 나타나 H₂SO₄으로 세척한 경우와 유사한 경향을 보였다.

3.3. 세척효율 저하에 따른 원인규명

실규모 토양세척공정을 이용하여 오염토양을 처리할 경우 미세토가 슬러지로 제거되는 입도분급 효과 및 세척효과로 인해 As 농도가 저감되어야 하지만, 오히려 세척 전에 비해 농도가 증가하는 현상이 발생하였다. 세척 후 세척폐수에 함유된 As 농도를 분석한 결과 9.3 mg/l로 처리 전에 비해 농도가 증가하는 것으로 보아 세척효과가 있는 것으로 확인되었으나, 처리토양의 As농도는 토양오염우려기준 미만으로 저감되지 않았다. 또한, Cd 및 Zn은 세척

Table 4. The concentration of heavy metals by soil washing using NaOH

(Unit : mg/kg)

Operation No.	As		Zn		Cd	
	Before	After	Before	After	Before	After
1	4.7	7.2	2,283	1,270	0.82	0.56
2	5.8	8.4	2,434	1,223	0.68	0.56
3	10.7	8.3	1,719	992	0.69	0.37
4	13.7	9.1	1,253	746	0.54	0.39
5	13.6	10.0	1,136	844	0.39	0.39
6	8.0	10.3	1,281	881	0.32	0.33
Average	9.4	8.9	1,684	993	0.57	0.43

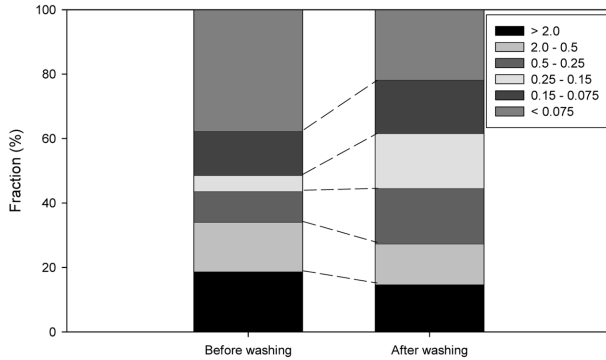


Fig. 2. Weight fraction with respect to soil particle size by full scale soil washing.

후 농도가 저감되었으나, 매우 낮은 세척효율을 나타내었다. 대상 지역의 오염토양에 대한 토양세척 적용시 세척효율을 저하시키는 원인은 처리대상 토양의 입도분포 및 실규모 토양세척으로 확대 적용함에 따라 발생하는 여러 가지 문제점으로 요약할 수 있으며, 세척 후 As의 농도가 증가하는 현상은 토양 내 As의 존재형태에 기인하는 것으로 판단되었다.

3.3.1. 토양의 입도분포

일반적으로 Silt 나 Clay의 함유율이 약 25 wt% 이상 일 경우에는 직접적인 토양세척기법의 적용이 부적절하며 세척시간이 다소 증가하는 것으로 알려져 있으며(William and Dee, 1993), 실규모 토양세척시 미세토 분리가 원활하게 이루어지지 않아 처리토의 As 농도가 높게 나타났다.

실규모 토양세척시 미세토에 대한 영향을 보다 정확히 판단하기 위해 세척전, 후의 토양에 대해 토양입도별 분포현황을 살펴보았다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 세척 전 토양은 0.075 mm 이하의 미세토 함유율이 37.8%로 높게 나타났으며, 세척 후에도 미세토가 다량 함유되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 해당 중금속의 세척효율이 저하되는 원인으로 세척대상토의 미세토 함유율이 높으며, 실규모 토양세척장비 운영과정에서 미세토 분리가 원활히 이루어지지 않아 전체 세척효율에 악영향을 미친 것으로 판단되었다.

3.3.2. 실규모 토양세척 적용시 문제점

실제 실규모 토양세척장비 운영시 여러 가지 문제점이 도출되었다. 오염토양이 연속적으로 투입되면서 각 세척조의 pH는 토양의 pH 완충능력으로 인해 설계조건에 적합하게 운전하는데 애로사항이 발생하였으며, 미세토가 다량 함유된 오염토가 유입되면서 토양과 세척액의 분리장

Table 5. The concentration of heavy metals by soil washing with water (Unit : mg/kg)

Type of soil	As	Zn	Cd
Contaminated soil	29.5	5,649	4.06
Washed soil	28.6	4,579	3.59
Washed soil(R, S) ^{a)}	20.7	2,916	2.20

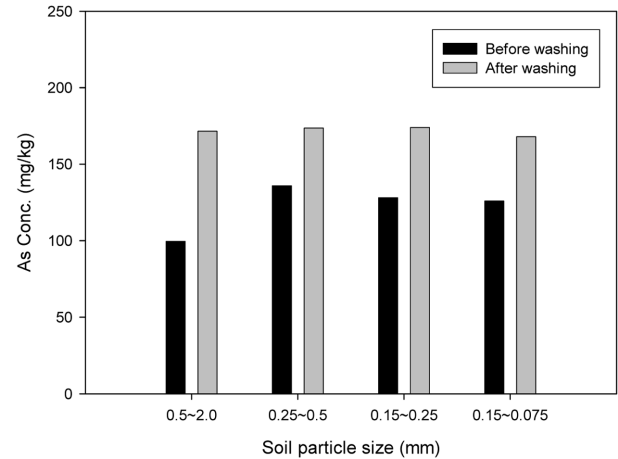


Fig. 3. The concentration distribution of As with respect to soil particle size by full scale soil washing.

치인 진동체의 막힘현상이 빈번하게 발생함으로써 처리토의 미세토 함유율이 높게 나타났다. 체류시간은 적절한 수준인 것으로 판단되었으나, 토양 대 세척액 비를 산출한 결과 1 : 2.4로 세척액의 양이 부족한 것으로 나타났다. 이러한 이유로는 실제 실규모 토양세척장비를 현장에서 운영할 시 세척액량을 증가시키면 투입 약품비용 및 폐수처리 비용이 과다하게 소요되며, 세척조, 수처리시스템, 탈수기 등 전체 세척장비의 규모가 증가되고, 세척장비의 설치공간 또한 넓은 면적이 필요하므로 전체적인 오염토양 정화비용 상승 및 현장여건상 일정 수준이상으로는 적용하기 힘든 부분이 있다. 따라서, 토양 대 세척액 비가 충분히 적용되지 못한 부분도 해당 중금속의 토양세척효율을 저하시키는 요인으로 판단되었다.

따라서, 실내시험 및 파일럿규모 현장적용성 시험을 통해 토양세척효율이 충분히 확보되었더라도 실규모 토양세척장비 운영시 여러 가지 문제점이 도출될 수 있으며, 정화방법 선정 및 토양세척장비 설계시 이러한 사항을 충분히 감안되어야 할 것으로 판단되었다.

3.3.3. As의 존재형태

산 또는 알칼리용액을 세척액으로 사용했을 때 세척 후

As의 농도가 증가하는 현상이 발생함에 따라 정확한 원 인규명을 위하여 물을 세척액으로 사용하여 실규모 토양 세척장비를 운영하였다. 그 결과, Table 5에 나타난 바와 같이 세척 후 As를 포함한 오염물질의 농도증가 현상은 발생하지 않아 대상지역내 분포하는 오염토양을 산 또는 알카리 용액을 사용하여 세척하는 것은 바람직하지 않다고 판단되었다. 또한, 전술한 바와 같이 세정 및 체기름을 통해 세척된 토양 내 미세토를 제거했을 경우 입도분급 효과에 의해 As의 농도가 현저히 낮아지는 것으로 파악되었으나, 해당 중금속 모두 토양오염우려기준을 만족시키지는 못하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 H₂SO₄를 사용하여 실규모 토양세척장비를 운영하여 세척 전, 후 토양입도별 As의 농도분포를 살펴본 결과, 모든 입자크기에서 세척 전 대비 세척 후 토양의 As 농도가 일관되게 증가하고 있으며, 증가폭이 일정한 것으로 보아 오염토양 내 포함되어 있는 비소함유광물(FeAsS)에서 지속적으로 용출되는 현상으로 판단되었다.

따라서, 산 또는 알카리 용액을 사용하여 대상지역 내 오염토양을 세척할 경우 다른 중금속의 농도는 저감될 수 있으나, As의 경우 오히려 세척 전에 비해 높은 농도를 나타낼 수 있으며, 이는 대상지역 내 존재하는 오염토양이 비소함유광물에서 기인된 것으로 판단되었다.

4. 결 론

1) 대상 부지의 중금속으로 오염된 토양의 유기물함량은 0.13~1.10%로 낮게 나타났다. 대상부지의 토양의 CEC는 6.6~26.7 cmol/kg로 배경토양에 비해 높게 나타났으며, 토양의 pH는 7.4~8.0으로 약알카리성으로 나타났다.

2) H₂SO₄을 이용한 토양세척시 Cd의 경우 정화목표를 달성할 수 있었지만 낮은 세척효율을 나타내었으며, Zn은 낮은 세척효율로 인해 세척 후 토양의 농도가 토양오염우려기준 미만으로 저감되지 않았다. Cd 및 Zn은 토양세척 후 농도가 저감되는데 반해 As의 경우 세척전 토양에 비해 세척 후 토양의 As 농도가 지속적으로 증가되는 경향을 보였다.

3) NaOH를 사용하여 실규모 토양세척장비의 세척효율을 평가한 결과, 입도분급 효과에 의해 Cd와 Zn의 농도

는 저감되었으나, 세척 전에 비해 세척 후 As의 농도가 더 높게 나타나 H₂SO₄으로 세척한 경우와 유사한 경향을 보였다.

4) 토양세척공정 적용시 세척효율을 저하시키는 원인은 처리대상 토양의 입도분포 및 실규모 토양세척으로 확대 적용함에 따라 발생하는 여러 가지 문제점으로 요약할 수 있으며, 특히, 세척 후 As의 농도가 증가하는 현상은 토양 내 As의 존재형태에 기인하는 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술혁신 지원단”의 지원을 받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 한국과학기술원, 1997, 폐광산 복원기술, 환경복원기술자료집 I.
- 한경옥, 2005, 유해 중금속으로 오염된 달천광산 주변 토양에 대한 토양세척 적용, 경성대학교 석사학위논문.
- Evanko, C.R. and Dzombak, D.A., 1997, Technology Evaluation Report : Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater, *Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*, Pittsburgh, PA.
- Freeman, H.M. and Harris, E.F., 1995, In situ Soil Flushing, Hazardous Waste Remediation : Innovative Treatment Technologies, *Technomic Publishing Company, Inc.*, p. 131-138.
- Grasso, D., 1993, Hazardous Waste Site Remediation, Lewis Publishers, USA.
- U.S.EPA., 1995, Innovative Treatment Technologies: Annual Status Report, 7th ed., EPA/542/R-95/008.
- U.S.EPA., 1997, Report : Recent Developments for In Situ Treatment of Metal Contaminated Soils, U.S. EPA., Office of Solid Waste and Emergency Response, *Technology Innovation Office*, Washington, D.C. 20460, 68-W5-0055.
- William C.A. and Dee, P.E., 1993, Innovative Site Remediation Technology: Soil Washing/Soil Flushing, 3, *American Academy of Environmental Engineers*, p. 75.
- Yarlagadda, P.S., Mastumoto, M.R., Vanbenschoten, J.E., and Kathuria, A., 1995, Characteristics of Heavy Metals in Contaminated Soils, *Journal of Environmental Engineering*, **121**(4), 276-286.