

## 저분자 유기산에 의한 중금속 오염토양의 복원

정 의 덕\* · 원 미 숙 · 윤 장 희 · 이 병 호 · 백 우 현\* · Joseph A. Gardella, Jr\*\*  
한국기초과학지원연구원, \*경상대학교 화학과,  
\*\*Department of Chemistry, State University of New York at Buffalo  
(2000년 8월 8일 접수)

## Remediation of Contaminated Soil with Heavy Metal Using Low Molecular Weight Organic Acids

Euh-Duck Jeong\*, Mi-Sook Won, Jang-Hee Yoon, Byung-Ho Lee, U-Hyon Paek\*  
and Joseph A. Gardella, Jr.\*\*

Pusan Branch, Korea Basic Science Institute, Pusan, 609-735, Korea

\*Department of Chemistry, Geongsang National University, Jinju, 660-701, Korea

\*\*Department of Chemistry, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 14260-3000, USA

(Manuscript received 8 August, 2000)

For the remediation of the contaminated soil with heavy metals, Cd, Cr, Cu, and Pb, the reaction parameters were optimized. Tartaric acid (TA) and oxalic acid(OA) as a washing agent were evaluated as a function of concentration, reaction time, mixing ratio of washing agent and recovery of metals. The optimum washing conditions of TA and OA were in the ratio of 1 : 20 between soil and acid solution during 2 hr reaction under unbuffered pH solutions. At the optimized reaction conditions, the removal efficiencies were compared with that of 0.1 M HCl and ethylenediamine tetraacetic acid(EDTA). TA showed higher efficiency on the removal of Pb than that of EDTA, which established for the remediation of contaminated soil with Pb and Cd metals.

The recovery of metal ions from washing solution was achieved by adding calcium hydroxide and sodium sulfide by forming the precipitation of metal hydroxide and metal sulfide. Optimum amounts of sodium sulfide and calcium hydroxide were Cd = 25g/ℓ, Cu = 5~10g/ℓ and Pb = 5~10g/ℓ for the washing solution of OA and 2~5g/ℓ for the washing solution of TA, respectively. The amounts of Na<sub>2</sub>S and Ca(OH)<sub>2</sub> for the tartaric acid was less than that of oxalic acid.

Key word : Contaminated soil, remediation, washing solution, tartaric acid, oxalic acid

### 1. 서 론

토양 세척 기술에 의한 중금속 오염 토양의 복원은 보통 두 가지 방법으로 접근한다. 첫 번째 접근 방법은 토양 내 고정화 방법을 통한 중금속의 이동을 최소화시키는 것이다. 이것은 착물 형성 시약(complexing agent)인 석회(lime)와 시멘트 등을 사용한다.<sup>1,2)</sup> 이러한 기술은 토양의 산성화 혹은 생물학적 활성(biological activity)에 의하여 서서히 유출되거나 중금속 오염토양 주위의 모든 필수적인 성분들도 함께 고정화되는 단점이 있다. 두 번째 접근 방법은 탈착(desorption)과 용해화에 의하여 중금속을 액체상으로 토양으로부터 이동시키는 방법이다. 일반적으로 세척용액으로는 염산, 황산, 질산 등 강산을 사용한다. 그러나 이러한 용액들은 토양의 화학적, 물리적 및 생물학적 특성이 크게 변경된다. 이들 산

의 pH는 토양으로부터 중금속의 제거 효과에 큰 영향을 미치며, 강산의 농도는 오염의 정도에 크게 의존하며 0.1 ~ 2M HCl은 0.5 시간 안에 납 오염 토양의 62%에서 88%정도를 제거할 수 있다.<sup>3)</sup> 염산은 용해성 금속착물(metal-chloride)을 형성하므로 질산보다 중금속 제거가 더욱 우수하다고 알려져 있다.<sup>3)</sup> 이 외에도 합성 킬레이트제로는 ethylenediamine tetraacetic acid(EDTA)가 우수한 것으로 알려져 있으며<sup>3-10)</sup> N-(acetamido) imino-diacetic acid(ADA)<sup>11,12)</sup>와 pyridine-2, 6-dicarboxylic acid(PDA)<sup>11,13)</sup> 등은 토양의 물리화학적 특성을 변화시키지 않고 중금속 제거 복성도 우수하다고 보고되어 있다. 그러나 EDTA는 토양 내 Ca, Mg, 및 Fe 같은 알칼리 토금속들에 대해서는 선택성이 떨어진다.

최근에는 중금속오염 토양 처리에 중금속 추출력이

우수하고 약산인 citric acid 같은 유기산을 이용한 연구가 많이 진행되고 있다. 이들 산은 EDTA와 비교할 때 가격이 싸고, 생분해성과 독성이 적고, 토양 구조를 파괴하지 않으면서, 토양 특성을 개선시키는 등의 장점을 가지고 있다.<sup>14-18)</sup> 본 연구실에서도 이미 citric acid와 유사한 특성을 가진 산을 이용하여 철 폐광산 오염토양 및 납을 오염시킨 토양을 이용하여 복원을 위한 연구를 보고한 바 있다.<sup>19,20)</sup>

본 연구에서는 중금속들로 오염된 토양의 복원 가능성을 검토하고자 인위적으로 중금속들을 오염시킨 토양의 복원을 위하여 착물형성 시약으로 TA(Tartalic acid) 및 OA(Oxalic acid)를 사용하여 Cd, Cr, Cu 및 Pb등의 중금속 오염토양의 복원을 위한 기초 연구를 행하였으며, 반응 시 용액의 pH 및 반응 시간의 변화, 세척제의 농도 및 토양과의 혼합비 등, 중금속 회수를 위한 최적 조건을 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

인공적인 오염 토양은 아래와 같이 제조하였다. 부산광역시 금정구 소재 금정산에서 30~100cm 깊이의 토양을 채취하여 3일간 풍건시킨 후, 2mm의 표준망체를 통과시킨 일정한 크기의 입자를 중금속 오염용 토양 시료로 사용하였다. 토양 200g을 0.1 N HCl과 0.1 N KOH를 사용하여 pH를 4.5로 조정된 용액 1ℓ에 넣고 중금속 용액을 첨가하여 10mM의 Cd, Cr과 100 mM의 Cu, Pb가 되도록 제조한 후 24시간동안 교반시킨 후, 흡착, 여과한 후 증류수로 수회 세정하고 105℃에서 24시간 동안 충분히 건조하여 플라스틱 시약병에 보관하였다. 건조된 토양을 증류수로 세척 실험을 한 결과 중금속이 검출되지 않았다. 세척제로 사용된 TA 및 OA (98%, Aldrich Chem. Co.)는 2차 증류수에 녹여 적절한 농도(30, 50, 70 mM)로 제조하여 사용하였다.

### 2.2. 실험

세척제의 pH에 따른 납 추출 특성을 실험하였고, 추출 실험 시 납 오염 토양 (g)과 세척제(mL)의 혼합비는 1.0 : 2.5, 1.0 : 5.0, 1.0 : 10, 1.0 : 15 및 1.0 : 20으로, 세척 시간은 1시간, 2시간 및 5시간으로 하여 세척하고 거름종이를 사용하여 거른 후 측정하였다. 오염 토양의 추출 실험에서 세척제로 사용한 TA 및 OA는 30, 50, 70 mM 농도로 제조하여 사용하였다. 또한 최적 추출조건에서 TA 및 OA의 오염 토양에서의 중금속들의 추출 특성을 비교하였다.

세척제에 의하여 용출된 중금속들의 회수와 세척제의 재사용을 위해 Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용한 실험을 하였다. pH 4.5의 세척액 10mℓ에 Na<sub>2</sub>S와 Ca(OH)<sub>2</sub>를 0.01~0.09g씩 넣고 2시간 동안 진탕한 다음 원심분리 후 상등액을 ICP-AES(Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, Thermo Jarrell Ash, IRIS)로 분석하였다.

납 오염 토양의 오염도는 토양공정 시험법<sup>21)</sup>에 따라

0.1 N-HCl 용액 50mℓ에 토양 10g을 취하여 황은 수평 진탕기에서 1시간 진탕한 다음 여과하여 여액의 농도를 ICP-AES로 측정하였으며, 세척제 처리 후 제거된 구리 이온의 함량 역시 ICP-AES를 사용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양의 중금속 분석 및 반응 시간에 따른 특성

오염된 토양 중의 각 중금속 오염도를 측정하기 위해 토양공정 시험법에 따라 0.1 N-HCl 용액 50mℓ에 토양 10g을 취하여 황은 수평 진탕기에서 1시간 진탕한 다음 용출된 중금속의 농도를 측정하였고,<sup>21)</sup> 오염 토양 5g에 50mM OA, TA 및 EDTA 용액 25mℓ를 각각 첨가하여 진탕기에 1시간 반응시켜 여액 중의 각 중금속의 농도를 측정된 결과를 Table 1에 각각 나타내었다. 공정시험법에 의한 Cd, Cr, Cu 및 Pb의 농도는 각각 27.0, 12.3, 30.9 및 176.8ppm이었다. OA의 경우는 Cu와 Cr에 대해 추출 특성이 우수하였고, TA의 경우는 Cr을 제외하고는 상당히 추출 특성이 우수하였으며, Pb는 세척 효과의 비교를 위해 사용한 EDTA 보다도 훨씬 우수한 특성을 나타내었다. 실제 상용 가능한 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 지금까지 많이 연구되어진 EDTA<sup>3-10)</sup>의 경우는 Pb를 제외하고는 전반적으로 우수한 특성을 나타내었다.

Table 1. Concentration of heavy metal ions in solution after extraction from contaminated soil by HCl, oxalic acid, tartaric acid and ethylenediamine tetraacetic acid.

Metals	Extractant			
	0.1N HCl	50mM OA	50mM TA	50mM EDTA
Cd	27.0	8.7	15.5	15.9
Cr	12.3	9.9	4.8	20.6
Cu	30.9	29.0	22.6	29.1
Pb	176.8	8.7	106.1	30.7

OA와 TA에 대한 반응 시간에 따른 세척 후 여액 속의 중금속 농도를 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. 오염 토양 5g에 50mM OA 용액과 TA 용액 25mℓ를 각각 첨가하여 진탕기에서 반응 시간을 1시간, 2시간, 5시간으로 변화시키면서 각각 실험하였다. 2시간 추출했을 때, OA와 TA의 추출율은 거의 평형 상태에 도달하였으며, OA의 경우 추출된 Cd, Cr, Cu 및 Pb는 각각 10.3, 12.5, 34.1 및 13.7ppm이었으며, TA의 경우 Cd, Cr, Cu 및 Pb는 각각 15.5, 5.4, 23.8 및 107.5ppm을 나타내었다. OA는 Cu와 Cr에 우수한 특성을 나타내었고, TA는 Cu와 Pb에 우수한 세척 효과를 나타내었다. 본 실험에서는 이후 추출 시간을 2시간으로 고정하여 실험하였다.

Table 2. Effect of extraction time of oxalic acid and tartaric acid solutions on metals extraction

Time(hr)		1	2	5
OA	Cd(ppm)	8.7	10.3	11.5
	Cr(ppm)	9.9	12.5	12.8
	Cu(ppm)	29.0	34.1	36.4
	Pb(ppm)	8.7	13.7	13.8
TA	Cd(ppm)	15.5	15.5	15.4
	Cr(ppm)	4.8	5.4	9.3
	Cu(ppm)	22.6	23.8	26.3
	Pb(ppm)	106.1	107.5	120.6

3.2. 세척제 농도와 혼합비

토양세척 효율을 높이기 위해서는 세척제 농도 및 토양과 세척액의 혼합비가 매우 중요하다. 따라서 본 실험에서는 30, 50 및 70mM 농도의 OA 용액과 TA 용액을 사용하여 오염 토양 5g에 세척제의 농도 및 혼합비를 달리하면서 혼합 중금속 세척 효율을 조사하였으며, 그 결과는 Table 3과 Table 4에 각각 나타내었다. OA의 경우 혼합비에 무관하게, 세척제의 농도가 증가함에 따라 세척 효율은 크게 증가하는 특성을 나타내었으며, 동일 농도에서도 혼합비가 증가함에 따라 다소 증가하는 현상을 나타내었다. 또한 TA의 경우도 세척제의 농도가 증가함에 따라 세척 효율은 증가하는 특성을 나타내었다. 동일 농도에서도 혼합비가 증가함에 따라 다소 증가하는 현상을 나타내었다. 이는 유기 리간드의 농도가 증가하면 토양 내 유기 리간드의 이동성과 결합 효율이 증가하기 때문이다. 실험 결과 최적 혼합비는 1 : 20로 나타났다.

Table 3. Concentration of heavy metals in solution after extraction from contaminated soil at various concentration and volume ratios of oxalic acid

Oxalic acid		Concentration of metals (ppm)			
Concentration	Volume ratio	Cd	Cr	Cu	Pb
30 mM	1.0:2.5	4.3	7.1	18.8	7.5
	1.0:5.0	5.8	9.4	21.3	8.7
	1.0:10.0	8.1	9.5	30.2	16.1
	1.0:15.0	10.2	9.9	30.4	19.8
	1.0:20.0	11.8	10.8	33.2	19.3
50 mM	1.0:2.5	6.5	9.3	26.5	12.5
	1.0:5.0	10.3	12.5	34.1	13.7
	1.0:10.0	11.9	12.6	35.0	17.8
	1.0:15.0	13.9	12.4	35.9	18.2
	1.0:20.0	14.8	13.2	36.3	20.6
70 mM	1.0:2.5	7.1	14.0	30.0	14.4
	1.0:5.0	11.0	14.1	35.1	20.0
	1.0:10.0	13.1	14.0	36.4	22.6
	1.0:15.0	14.4	15.3	38.8	28.6
	1.0:20.0	15.5	15.9	39.0	28.1

Table 4. Concentration of heavy metals in solution after extraction from contaminated soil at various concentration and volume ratios of tartaric acid

Tartaric acid		Metals concentration (ppm)			
Concentration	Volume ratio	Cd	Cr	Cu	Pb
30 mM	1.0:2.5	11.5	3.2	19.1	70.0
	1.0:5.0	12.8	4.0	21.2	93.6
	1.0:10.0	12.9	4.6	22.0	101.1
	1.0:15.0	13.1	5.6	23.2	115.9
	1.0:20.0	14.1	8.3	24.4	146.6
50 mM	1.0:2.5	14.5	4.3	22.5	91.7
	1.0:5.0	15.5	5.4	23.8	107.5
	1.0:10.0	15.8	7.6	24.5	137.6
	1.0:15.0	16.4	7.7	25.4	141.0
	1.0:20.0	17.0	10.7	26.4	154.8
70 mM	1.0:2.5	13.9	6.6	23.1	120.0
	1.0:5.0	15.1	7.6	25.9	133.4
	1.0:10.0	16.5	12.3	30.8	177.4
	1.0:15.0	17.3	14.5	33.0	193.8
	1.0:20.0	18.4	16.9	34.5	222.2

3.3. 세척제의 pH 변화에 따른 특성

세척용액의 pH에 따른 세척 효과를 파악하고자 오염 토양 5g에 세척제 농도 50mM인 TA와 OA 용액을 각각 25mL를 넣고 용액의 pH를 각각 3.0, 4.5, 6.0으로 조절하여 2시간 동안 세척한 후 측정된 용액의 농도를 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. OA의 경우 pH를 조절하지 않은 원액 (pH 1.28)에서 추출력이 가장 높은 것으로 나타났다. pH 3.0, 4.5 그리고 6.0에서는 착물형성 즉 세척 효과가 약간 떨어지는 현상이 나타났다. 강산성에서 금속 이온의 추출이 더 쉽게 됨을 알 수 있다. TA(pH 1.88)의 경우도 비슷한 특성을 나타내었다.

Table 5. Effect of pH of oxalic acid and tartaric acid solutions on the extraction of contaminated soil

pH		Nonadjusted*	3	4.5	6
OA	Cd(ppm)	10.3	9.6	7.8	8.2
	Cr(ppm)	12.5	10.0	14.5	10.7
	Cu(ppm)	34.1	32.8	30.4	31.0
	Pb(ppm)	13.7	9.0	13.1	14.2
TA	Cd(ppm)	15.5	10.4	10.2	8.5
	Cr(ppm)	5.4	4.2	6.9	8.7
	Cu(ppm)	23.8	21.7	15.3	11.7
	Pb(ppm)	107.5	77.7	74.0	70.6

3.4. 세척제 추출 조건에 따른 특성

오염토양 5g에 대해 세척제와의 혼합비를 1 : 5로 하여 50mM TA, OA, EDTA 용액 및 공정 시험법을 이용하여 동일 토양에 대해 3회 연속 추출한 결과를 Table 6에 각각 나타내었다. 공정 시험 방법에 의해 3회 세척했을 때의 용액 중 각 금속의 농도는 Cd, Cr, Cu 및 Pb의 농도는 각각 28.7, 23.0, 39.1, 207.1ppm이었다.

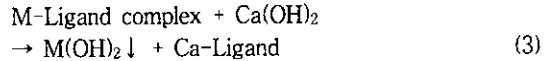
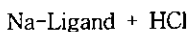
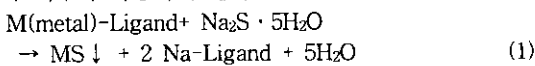
본 실험 결과에서, OA의 경우 Cu와 Cr은 공정 시험법에 의해 추출된 양과 거의 비슷한 결과를 나타내었고, Cr은 세척 효과가 다소 떨어지며 Pb의 세척 효과는 좋지 않은 결과를 나타내었다. TA의 경우는 Pb에 대해 선택적으로 높은 효율을 나타내었고, Cu, Cd에 대한 세척 효과도 상당히 우수한 특성을 나타내었다. 따라서 실제 중금속 오염 토양 복원 시에는 오염된 중금속의 종류에 따라 세척제의 선택을 달리 하는 것이 효율을 높일 수 있고, 특히 Pb으로 오염된 토양의 세척에는 현재까지 많이 연구된 EDTA는<sup>3-10)</sup> 효율이 TA 보다 낮은 특성을 나타내었으므로 TA를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 또한 추출 횟수에 따른 중금속의 농도를 비교하여 보면 대부분의 중금속이 각각의 세척제에 대해 1회 추출 시 가장 높은 탈착 효율을 보였으나, TA 용액으로 Cr을 추출하였을 때는 2회 추출 시의 농도가 전체 추출액의 37.9%로 가장 높은 비율을 나타내었고 매 회 추출 시 Cr의 농도가 비슷한 비율로 추출되어 예외적인 현상을 보였다.

Table 6. Removal of metals over three successive extractions using oxalic acid, tartaric acid, ethylenediamine tetraacetic acid and HCl

Extraction No.	Metals concentration (ppm)			
	Cd	Cr	Cu	Pb
50 mM OA				
1	10.3	12.5	34.1	13.7
2	2.8	8.0	6.3	3.1
3	2.3	6.2	0.7	3.6
Total	15.4	26.7	41.1	20.4
50 mM TA				
1	15.5	5.4	23.8	107.5
2	6.1	6.4	3.8	44.9
3	0.9	5.1	1.2	26.1
Total	22.5	16.9	28.8	178.5
50 mM EDTA				
1	17.9	33.6	32.6	38.9
2	4.8	17.8	6.2	19.1
3	1.4	5.5	0.7	15.1
Total	24.1	56.9	39.5	73.1
0.1 N HCl				
1	27.0	12.3	30.9	176.8
2	1.6	7.3	7.4	23.4
3	0.1	3.4	0.8	6.9
Total	28.7	23	39.1	207.1

3.5. 중금속 회수

금속-리간드 간의 결합으로 토양으로부터 용출된 용액에서 금속 회수 및 리간드 즉 세척제의 재사용을 위해 Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용한 실험을 하였다. Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>에 의한 반응 기구는 아래와 같이 진행되어 중금속 회수가 가능하게 된다.<sup>22)</sup>



저분자 유기산인 TA 및 OA를 이용한 중금속 용액에 Ca(OH)<sub>2</sub>가 첨가되면 pH는 상승하게되고 금속착물이 불용성 금속 수산화물 (예; Pb(OH)<sub>2</sub>)로 바뀌어 침전하게되고 유출액은 Ca 또는 Na-Ligand로 바뀌어 용액 상태로 남게된다. 침전물을 분리하고 HCl을 첨가하면 다시 TA 및 IDA로 바뀌고 재사용이 가능하게 된다. Na<sub>2</sub>S · 5H<sub>2</sub>O를 첨가하면 M-Ligand가 금속황화물 (예 ; PbS)의 형태로 되면서 침전하게 된다.

Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용한 실험 결과를 Fig. 1과 2에 나타내었다. OA를 사용한 여액에서 금속의 분리 회수에 소요되는 Na<sub>2</sub>S와 Ca(OH)<sub>2</sub>는 각각 Cd = 25 g/l, Cu = 5~10 g/l, Pb = 5~10 g/l로 비슷한 결과를 나타내었고, Cr 회수의 경우는 Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용할 경우 약 50%, Na<sub>2</sub>S를 사용할 경우 회수가 거의 되지 않는 것으로 나타났다. TA를 사용한 용액에서는 Ca(OH)<sub>2</sub>와 Na<sub>2</sub>S에서 2~5 g/l로 TA의 경우가 금속 회수 특성이 우수하였다. TA와 OA 모두에서 Cr을 제외한 금속들의 회수는 대체로 용이하였으며, TA를 사용한 용액에서 중금속의 회수가 OA를 사용한 용액보다 적은 양의 Na<sub>2</sub>S와 Ca(OH)<sub>2</sub>가 소요된다는 결과를 얻어 TA를 사용하는 것이 경제적이란 결론을 얻었다.

본 연구에서 사용한 세척제의 재사용 가능성은 오염 시킨 토양으로부터 납을 추출한 논문<sup>20)</sup> 결과에 의하면 TA 세척액에서 Na<sub>2</sub>S를 사용한 금속 회수시 3회 추출시의 효율이 78.8%로 줄었지만, Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용했을때는 95.1%로 첫 번째 세척시와 거의 비슷한 결과를 얻었다. 따라서 세척제의 재사용이 가능함을 확인하였고, 실제 오염 토양 정화시 세척제에 의한 2차적 오염을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

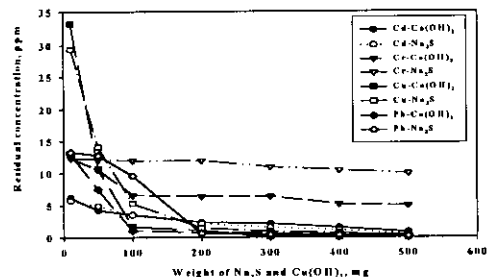


Fig. 1. Residual concentration of metals with the added weight of Na<sub>2</sub>S and Ca(OH)<sub>2</sub> for oxalic acid-extracted metal solution (Initial conc. of Cd=10.3ppm, Cr=12.5ppm, Cu= 34.1 ppm and Pb=13.7ppm, OA 50 mM, Shaking time=2hr)

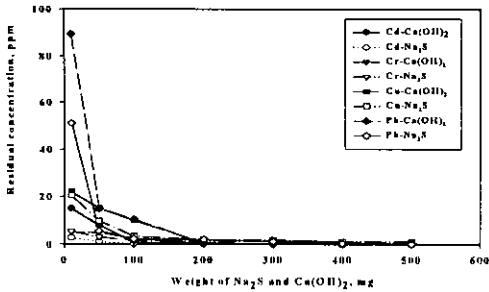


Fig. 2. Residual concentration of metals with the added weight of  $\text{Na}_2\text{S}$  and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  added for tartaric acid-extracted metal solution (Initial conc. of  $\text{Cd}=15.5$  ppm,  $\text{Cr}=5.4$  ppm,  $\text{Cu}=23.8$  ppm and  $\text{Pb}=107.5$  ppm,  $\text{OA}=50$  mM, Shaking time=2 hr)

#### 4. 결 론

실험에 사용된 인공 토양의 금속 오염도는  $\text{Cd}=27.0$  ppm,  $\text{Cr}=12.3$  ppm,  $\text{Cu}=30.9$  ppm,  $\text{Pb}=176.8$  ppm이었다. 50 mM OA와 TA 25ml를 오염 토양 5g에 1시간 반응시켰을 경우 OA는  $\text{Cd}=8.7$  ppm,  $\text{Cr}=9.9$  ppm,  $\text{Cu}=29.0$  ppm,  $\text{Pb}=18.7$  ppm이었으며, TA는  $\text{Cd}=15.5$  ppm,  $\text{Cr}=4.8$  ppm,  $\text{Cu}=22.6$  ppm,  $\text{Pb}=106.1$  ppm이었다. OA는 Cr과 Cu에 세척 효과가 우수하였고, TA는 Cr 외에는 세척 효과가 상당히 우수하였다. OA와 TA 모두에서 혼합비에 무관하게 세척제의 농도가 증가함에 따라 세척 효율은 증가하였다.

금속 회수를 위한 실험 결과 OA를 사용한 여액에서 금속의 분리 회수에 소요되는  $\text{Na}_2\text{S}$ 와  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 각각  $\text{Cd}=25\text{g/l}$ ,  $\text{Cu}=5\sim 10\text{g/l}$ ,  $\text{Pb}=5\sim 10\text{g/l}$ 로 비슷한 결과를 나타내었고, Cr 회수의 경우는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 사용할 경우 약 50%이며  $\text{Na}_2\text{S}$ 는 거의 효과가 없는 것으로 나타났다. TA를 사용한 여액에서는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와  $\text{Na}_2\text{S}$ 에서 2~5g/l로 TA의 경우가 금속 회수 특성이 우수하였다. TA와 OA 모두에서 Cr을 제외한 금속들의 회수는 대체로 용이하였으며, TA를 사용한 용액에서 중금속의 회수가 OA를 사용한 여액에서보다 적은 양의  $\text{Na}_2\text{S}$ 와  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소요된다는 결과를 얻어 TA를 사용하는 것이 경제적이란 결론을 얻었다. 본 연구에서 사용한 세척제의 재사용이 가능함을 확인하였고, 실제 오염 토양 정화 시 세척액에 의한 2차 오염을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Anderson, W. C. and P. E. Dee, 1994, Site remediation technology: Stabilization / Solidification. American Academy of Environmental Engineers, Annapolice, MD 21401, USA.
- 2) Griffiths, R. A., 1995, Soil washing technology and practice, J. Haz. Mat., 40, 175-189.
- 3) Tuin, B. J. and M. Tels, 1990, Removing heavymetals from contaminated clay soils by extraction with

- hydrochloric acid, EDTA or hydrochlorite solutions, Environ. Technol. Letters, 11, 1039-1052.
- 4) Tuin, B. J. W., and M. Tels, 1990, Extraction kinetics of six heavy metals from contaminated clay soils., Environ. Technol. Letters, 11, 541-554.
- 5) Pichtel, J. and T. M. Pichtel, 1997, comparison of solvents for ex situ removal of chromium and lead from contaminated soil, Envir. Engineer. Science, 14, 97-104.
- 6) Heil, D. M., Z. Samani, A. T. Hanson and B. Rudd, 1999, Remediation of lead contaminated soil by EDTA. I. Batch and column studies, Water, air and soil pollution, 113, 77-96.
- 7) Doong, R., Y. Wu and W. Lei, 1998, Surfactant enhanced remediation of cadmium contaminated soil, Water Sci. Technol, 37, 65-71.
- 8) Kedziorek, M. A., A. Dupuy, A. C. Bourg and F. Compere, 1998, Leaching of Cd and Pb from a polluted soil during the percolation of EDTA: Laboratory column experiments modeled with a non-equilibrium solubilization step, Environ. Sci. Technol, 32, 1609-1614.
- 9) Peters, R. W. and L. Shem, 1992, Adsorption / desorption characteristics of lead on various types of soil., Envir. Progress, 11, 234-240.
- 10) Small, M., A. B. Nunn, B. Forslund and D. Dally, 1995, Source attribution of elevated residential soil lead near a battery recycling site, Environ. Sci. Technol., 29, 883-895.
- 11) Steele, M. C. and J. Pichtel, 1998, Ex-situ remediation of a metal contaminated superfund soil using selective extractants, J. Envir. Engrg, July, 639-645.
- 12) Chen T. C., E. Macauley, and A. Hong, 1995, Chelating extraction of lead and copper from an authentic contaminated soil using N-(2-acetamido) iminodiacetic acid and S-carboxymethyl-L-cysteine, J. Haz. Mat., 41, 147-160.
- 13) A. Hong and T. C. Chen, 1996, Chelating extraction and recovery of cadmium from soil using pyridine-2,6-dicarboxylic acid, Water, air, and soil pollution, 86, 335-346.
- 14) Wasay, S. A., Barrington, S. F. and S. Tokunga, 1998, Organic acids to remediate a clay loam polluted by heavy metals, Canad. Agricult. Engineer., 40, 9-15.
- 15) Singh, J. P. M. Huang, U. T. Hammer and W. K. Liaw, 1996, Influence of citric acid and glycine on the adsorption of mercury(II) by kaolinite under various pH conditions, Clays clay Mineral., 44, 41-48.
- 16) 이동호, 최형섭, 김관, 김영희, 허종수, 이근선, 전상

- 수, 1998, Citric acid 세척법에 의한 중금속 오염 토양의 정화, 대한환경공학회 '98 추계학술대회논문초록집, pp. 679-680.
- 17) 이용호, 강순기, 공성호, 1998, In-situ flushing을 위한 오염토양내 중금속의 제거에 관한 연구, 대한환경공학회 '98 추계학술대회논문초록집, pp. 687-688.
- 18) 한국토양환경학회, 오염 토양복원 기술 국제 세미나, 세종문화회관 대회의장, 1997, 10. 20, pp. 5-17.
- 19) Jeong E. D., W. K. Shin and U-H. Paek, 2000, Ex-situ Remediation of a Contaminated Soil of Fe Abandoned Mine using Organic Acid Extractants, J. Korean Environ. Sci. Soc., 9, p.43-47.
- 20) Jeong E. D., S. W Kang, D. S. Park, H. G. Shin and U-H. Paek, The Pb-contaminated Soil Remediation by Organic Acid Washing, J. Korean Environ. Sci. Soc., in press.
- 21) 환경처, 1994, 토양측정망운영지침, p.134.
- 22) 환경부, 1997, 오염토양/지하수 정화기술 개발, 제 1 단계 2차년도 연차보고서.