

## 유기산 추출에 의한 철 폐광산 오염토양의 복원

정의덕·강신원·백우현\*  
기초과학지원연구소 부산분소·경상대학교 화학과  
(1999년 6월 24일 접수)

## Ex-situ Remediation of a Contaminated Soil of Fe Abandoned Mine using Organic Acid Extractants

Euh-Duck Jeong, Shin-won Kang, and U-Hyon Paek\*  
Pusan Branch, Korea Basic Science Institute, Pusan 609-735, Korea  
'Dept. of Chemistry, Gyeongsang National Univ., Jinju, 660-701, Korea  
(Manuscript received 24 June, 1999)

A study on the remediation of heavily Fe ion contaminated soils from abandoned iron mine was carried out, using ex-situ extraction process. Also, oxalic acid as a complex agent was evaluated as a function of concentration, reaction time and mixing ratio of washing agent in order to evaluate Fe removability of the soil contaminated from the abandoned iron mine.

Oxalic acid showed a better extraction performance than 0.1N-HCl, i.e., the concentrations of Fe ion extracted from the abandoned mine for the former at uncontrolled pH and the latter were 1,750 ppm and 1,079 ppm, respectively. The optimum washing condition of oxalic acid was in the ratio of 1:5 and 1:10 between soil and acid solution during 1 hr reaction. The total concentrations of Fe ion by oxalic acid and EDTA at three repeated extraction, were 4,554 ppm and 864 ppm, respectively.

The recovery of Fe ions from washing solution was achieved, forming hydroxide precipitation and metal sulfide under excess of calcium hydroxide and sodium sulfide. In addition, the amount of sodium sulfide and calcium hydroxide for the optimal recovery of Fe were 15g/l and 5g/l from the oxalic acid complexes, respectively.

Key words : soil remediation, oxalic acid extraction abandoned mine

### 1. 서 론

산업화에 따른 각종 유해물질의 무단 투기와 유출로 인해서 토양과 지하수가 오염되어져 오고 있다. 공장내부 및 지역, 도시 폐기물 처리 지역 및 휴·폐광산 지역의 중금속 농도는 일반적으로 자연 상태의 농도보다 몇십배 높은 것으로 보고되고 있다. 미국의 경우 폐기물 처리지역에서 발생하는 오염원별 오염 물질의 배출기준 농도를 제한하고 있는 폐기물법(Solid Waste Disposal Act), RCRA(Resource Conservation and Recovery Act; 자원보전개발법)이 있으며, '86년 SARA(Superfund Amendments and Reauthorization Act)가 시행된 뒤 Superfund법이 제정되어 과거 부적절하게 처리된 유해 폐기물 매립지와 유기 용체류 누출사고로 인한 토양 및 지하수 처리에 막대한 노력을 하고 있다.<sup>1)</sup> 오염 토양의 정화 기술 개발 분야로는 토양휘발추출(soil vapor extraction), 토양세척처리(soil washing treatment), 증기추출(steam extraction), 초임계추출(supercritical phase extraction),

화학적 산화법, 초임계산화법(supercritical waste oxidation), 열탈착처리법(thermal desorption treatment), 소각법(incineration treatment) 미생물 분해법(bioremediation) 및 고형화 등의 방법이 있다.<sup>2-8)</sup> 각 기술마다 장단점이 있어 복합적인 방법을 사용해야 효과를 높일 수 있다.

선진국의 경우 상당한 연구 성과가 있으며 일부는 상용화 단계에 있다. 그의 전기적 토양 정화법(electrorekinetic soil remediation)도 지금 상당히 활발히 연구되고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>9-11)</sup>

국내의 경우 산업체 생산활동에서 발생되는 유해 폐기물을 처리하기 위해서 정부에서 1978년부터 수질환경 보전법으로 농경지 오염 방지에 관한 조사가 있었다. 1985년부터 특정 폐기물의 공공처리 시설을 추진하였으나 처리 능력의 한계 및 포화로 많은 문제점들이 나타나고 있다. 그리고 '95년부터 토양환경보전법을 제정하여 '96년부터 시행하고 있으나 아직 국내 토양 오염 처리 대책 및 정화 기술의 확보가 미흡하여 이에 대한 체계적

인 연구가 필요하다. 국내에서의 토양 오염에 대한 체계적인 조사는 없지만 여러 연구 자료에서 산업체 주변 유해 폐기물 매립지, 금속 제련, 도료, 도장, 염색, 피혁공장, 브라운관 형광도포 공장 및 화학 공장지대, 광산지역, 철도, 도로 주변 지역, 유류 및 용제 저장고 및 차원 재활용 공장지 주변 등의 토양이 오염되어 있는 것으로 보고되고 있다.

우리 나라 광산의 경우 가행 광산은 석탄광 11개, 금속광 29개, 비금속광 357개로 총 397개소이며, 광석을 채굴하다 중단되거나 폐광되어 방치되는 휴·폐광산이 전국적으로 1,150 여개에 이르며 이 중 금속 광산의 경우 814 개 정도인 것으로 파악되고 있다.<sup>12)</sup> 이러한 휴·폐광산은 주변에 적치된 광미 및 폐석이 비산 및 호우시 유출 등으로 주변 환경을 오염시키고 있다. 중금속으로 오염된 주변 지역에서 재배된 농작물의 경우 중금속 함량은 자연 상태 식물의 함량에 비해 최고 10배 이상 높은 곳으로 나타나고 있다.

토양 내에 존재하는 중금속과 같은 오염 물질은 그 자체로 끌나는 것이 아니고 지하수나 지표수를 오염시키는 등의 2차 오염을 발생시키기 때문에 심각한 문제를 야기하게 된다. 폐기물 처리, 폐수 처리, 정수 처리 과정에서 발생되는 중금속으로 오염된 토양 및 폐기물에서 중금속을 제거하는 것은 무엇보다 중요하고 정책적 차원에서 적절한 대책이 필요하다. 이와 같이 중금속으로 오염된 토양 중금속을 제거 복원하는 연구가 매우 시급하다.

본 연구에서 연구하고자 하는 토양세척법은 *in-situ*와 *ex-situ*로 나눌 수 있다. *In-situ* 방법은 약품의 토양 속으로의 투수성 문제가 있고, 세척된 물질의 2차 오염 유발이 생길 수 있다. *Ex-situ* 방법은 굽착하여 친수성 오염 물질은 물을 사용하고, 소수성 물질은 계면활성제, 산, 염기 및 치물형성시약(chelating agent)을 사용한다. 선진국에서는 중금속 오염 토양의 정화를 목적으로 여러 연구자들이 논문을 발표하고 있다.<sup>13,14)</sup> 토양 세척법의 경우 다염기 유기산인 EDTA(ethylenediamine tetraacetic acid), citric acid, HEDPA(1-hydroxy ethylidene-1,1-diphosphonic acid), ADA(N-2(acetamido) iminodiacetic acid), PDA(pyridine-2,6-dicarboxylic acid) 등을 사용한 바 있다. 이들 유기산을 이용하여 인공 오염 토양, 전지재생 공장 등의 토양을 이용하여 여러 가지 중금속의 제거 연구를 해 오고 있다.<sup>8,15)</sup> 국내의 경우 휴·폐광산의 환경오염 복구 및 활용방안에 관한 심포지움<sup>12)</sup> 및 세미나가 개최되었다.<sup>16)</sup> 본격적인 연구는 citric acid 및 계면활성제를 이용하여 Cu, Pb, Zn 오염 토양의 연구에 관한 연구를 수행하고 있는 것으로 파악되고 있다.<sup>17~20)</sup>

본 연구에서는 중금속으로 오염된 토양의 정화를 위해 생분해도가 좋고 토양 및 자연계에 잔류가 적은 치물형성시약인 옥살산(oxalic acid) 사용하여 철을 채광하다 폐광된 인근 토양에서의 철 성분을 제거시켜 오염토양의 복원을 위한 가능성을 검토하고자 세척제의 pH 및 반응시간의 변화, 세척제의 농도 및 혼합비, 추출 조건의 변화 및 중금속 회수와 세척제의 재사용을 위한 여러 조건을 파악하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료

시료는 기장시 인근에 위치한 철 폐광에서 채취한 토양을 3일간 풍건, 표준망체(2mm)를 사용해서 시료 입자를 고른 후 중류수로 세척하여 유기물을 제거하고 건조로에서 105°C에서 약 5시간동안 건조한 시료를 사용하였다. 시료의 화학적 특성은 X-선 형광분석기(Philips PW 2400 ; XRF) 및 pH meter(Fisher Scientific pH meter 50)를 사용하였다. 세척제로 옥살산(oxalic acid), tartaric acid, succinic acid 및 malic acid를 사용하여 예비 실험한 결과 철 치물형성 능력 즉 세척력이 옥살산이 가장 우수하여 세척제로 선택하였다. 세척제로 사용된 옥살산(98%, Aldrich Co.)은 2차 중류수에 녹여 적절한 농도로 만들어 사용하였다.

### 2.2. 오염토양 추출 실험

오염 토양의 추출 실험에서 세척제로 사용한 옥살산은 2차 중류수에 녹여 30mM, 50mM, 70mM 농도로 만들어 사용하였다. 세척제의 pH에 따른 중금속 추출 특성을 실험하였다. 추출 실험시 토양(g)과 세척제(m l)의 혼합비는 1:2.5, 1:5, 1:10, 1:15, 1:20으로, 세척 시간은 30분, 1시간, 2시간 및 5시간으로 하여 세척 후 거름종이를 사용하여 거른 후 측정하였다. 또한 최적 추출조건에서 옥살산과 EDTA와의 오염 토양의 추출 특성 비교, 세척제의 3회 연속 추출에 대한 특성 실험 및 옥살산으로 추출 한 후 0.1N-HCl을 사용하여 오염토양 공정 시험법에 의한 연속 처리에 따른 금속 제거율에 대한 실험을 실시하였다.

### 2.3. 중금속 분석

토양에서의 철 오염도는 토양 공정 시험법을 사용하여 0.1N-HCl 용액 50m l에 토양 10g을 취하여 항온 수평 진탕기에서 1시간 진탕한 다음 유도 결합 플라즈마 방출분광계(Thermo Jarrell Ash, IRIS ; ICP)를 사용하여 농도를 측정하였으며, 또한 microwave digestion(Milestone mega 200) 장치를 이용하여 전처리 시킨 후, ICP로 측정하여 비교 분석하였다. 세척제 처리 후 제거된 철 이온의 함량 역시 ICP를 사용하여 분석하였다.

### 2.4. 금속 및 세척제 회수

금속-리간드간의 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. Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용하여 침전시킨 후 원심 분리시켜 회수하거나, Na<sub>2</sub>S를 사용하여 금속 황화물로서 회수하였다. Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 여액 20m l에 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5g씩 넣고 2시간 동안 친탕한 다음 원심분리 후 상등액을 ICP로 분석하고 pH 변화를 살펴보았다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양의 물리적 특성 및 성분 분석

철 폐광산 토양 시료의 용액 pH는<sup>21)</sup> 1% 용액으로 만

## 유기산 추출에 의한 철 폐광산 오염토양의 복원

들어 측정한 결과 pH 3.49를 나타내었다 Table 1에 XRF를 이용하여 분석한 토양에 대한 화학적 성분을 나타내었다. 일반 토양의 철 성분이 약 3~8% 인데 비하여  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 25.62%(Fe=17.92%)로 매우 높게 나타나 철의 오염이 심하다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Chemical composition of Fe abandoned soil sample

Chemical composition(%)					
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{CaO}$
52.37	13.44	25.62	1.57	1.06	1.30
$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	LOI <sup>1)</sup>	
0.80	2.70	0.41	0.33	7.78	

1) L.O.I. : Loss of Ignition

토양에서의 철 오염도는 토양 공정 시험법에 따른 0.1N-HCl 용액 50m l에 토양 10g을 취하여 항온 수평 진탕기에서 1시간 진탕한 다음 용출된 결과를 측정한 결과 1,079 ppm이었다. 또한 microwave digestion를 이용하여 0.25g 토양에 3.65% HCl 3m l와 40% HF 3m l를 처리하여 분해시킨 후 100m l로 묽힌 후, 함량을 측정하고 환산한 결과 3,242 ppm으로 추출에 의한 방법보다 3배 이상 높은 측정치를 나타내었다.

### 3.2. pH 변화 및 반응시간에 따른 특성

세척제 용액의 pH에 따른 세척 효과를 알아보기자 오염 토양 5g에 옥살산 용액 50mM을 사용하여 1시간 동안 세척 후 용액의 농도를 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. 옥살산 원액의 pH는 1.27이었고 나머지는 NaOH 용액으로 pH를 조절하였다. pH를 조절하지 않은 옥살산 원액에서 1,750 ppm으로 추출력이 가장 높은 것으로 나타났다. 이유는 강산성에서 금속 이온의 추출이 더 쉽게 됨을 알 수 있다. 이것은 토양공정시험법의 0.1N-HCl보다도 많은 값으로 세척력이 상당히 우수함을 알 수 있다. pH 4.5와 6에서는 차물 형성 즉 세척 효과가 현저히 떨어지는 현상이 나타나, 이후 실험에는 원액 자체의 용액을 사용하여 측정하였다.

Table 2. Effect of pH of oxalic acid on Fe extraction

pH	1.27	3	4.5	6
ppm	1,750	838	299	324

위와 동일한 조건으로 세척제와 오염 토양의 반응 시간을 1시간, 2시간, 5시간으로 변화시키면서 실험하였다. 용액 속의 농도는 1,750 ppm, 1,959 ppm, 2,085 ppm이었다. 반응시간은 금속 이온의 세척에 큰 영향이 없는 결과를 나타내어 1시간으로 고정하여 이후 실험을 진행하였다. 반응 후의 용액의 pH는 1.27에서 1.88, 2.01 및 2.08로 다소 높아지는 현상을 나타내었다.

### 3.3. 옥살산의 농도와 혼합비에 따른 특성

토양세척시 혼합비는 사용하는 세척제 및 물의 사용 양을 결정하게 되므로 최적의 농도와 혼합비의 결정은 중요한 사항이다. 옥살산의 농도를 30mM(pH 1.51), 50mM (pH 1.27), 70mM(pH 1.13)로 변화시키고, 토양(g)과 세척제(m l)과의 혼합비를 달리하면서 1시간 동안 진탕 후 상동액의 농도를 측정한 결과를 Table 3에 나타내었다. 옥살산의 혼합비에 무관하게 세척제의 농도가 증가함에 따라 세척 효율은 크게 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 유기 리간드의 농도가 증가하면 토양 속의 이동성과 리간드와의 결합 효율이 증가하기 때문이다. 혼합비가 1:2.5에서 1:5로 증가함에 따라 세척 효과가 증가하였지만 1:15 및 1:20으로 갈수록 추출 효과가 감소하는 것으로 나타나는데 이에 대한 이유는 토양에 대한 세척제의 양이 많아짐에 따라 농도가 둑어져 생기는 현상이며, 1:5와 1:10의 혼합비에서 가장 좋은 세척 효과를 나타내었다. 한편 EDTA를 50mM 농도를 1:5의 혼합 비율로 동일한 실험을 한 결과 607 ppm으로 oxalic acid의 1,750 ppm에 비해 적은 세척 효과를 나타내었다. 본 실험에서 세척제의 혼합비가 커질수록 pH가 더욱 산성으로 변하고 1:20 일 때 초기 옥살산 pH와 거의 비슷하였다.

Table 3. Fe concentration in solution after extraction with the concentration and the volume ratio of oxalic acid for Fe contaminated soil

Concentration	Oxalic acid Volume ratio (soil:oxalic acid)	Fe concentration in solution(ppm)
		30mM
50mM	1:2.5	847.5(3.23)
	1:5	908.8(2.12)
	1:10	933.9(1.94)
	1:15	890.8(1.85)
	1:20	819.8(1.70)
70mM	1:2.5	1464.0(2.35)
	1:5	1750.0(1.88)
	1:10	1364.0(1.58)
	1:15	1150.1(1.41)
	1:20	1076.0(1.33)
	1:2.5	1645.0(2.21)
	1:5	2110.0(1.65)
	1:10	1872.0(1.32)
	1:15	1596.0(1.18)
	1:20	1196.0(1.11)

NOTE : Numbers in parentheses are pH in solution

### 3.4. 연속 추출에 따른 특성

오염토양 5g에 대해 1:5의 혼합비로 하여 50mM 옥살산 및 EDTA 용액을 사용하여 3회 연속 사용하여 추출했을 경우의 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서처럼 옥살산의 경우 1, 2, 3회 세척시에도 많은 철 이온이 추출되었으며 세척 효과가 매우 큰 특성을 나타내었다. 3번 연속 추출시 2회 및 3회 추출시에도 철 이온이

많이 추출된 이유는 오염 토양 자체의 철 이온의 농도가 microwave digestion 측정 결과에서 3,242 ppm으로 나온 것처럼 고농도로 존재하기 때문이다. 이러한 현상은 M. C. Steel 그룹의 남 축전지 공장 주변 토양의 복원 논문의 결과에서도 볼 수 있다.<sup>15)</sup> 그러나 EDTA는 1회 추출 시에는 607 ppm이었으나 2회 및 3회 추출시에는 141 ppm과 116 ppm을 나타내어 oxalic acid에 비해서는 세척 효과가 크게 떨어지는 특성을 나타내었다.

Table 4. Fe removal over three successive extractions using 50mM oxalic acid and 50mM EDTA

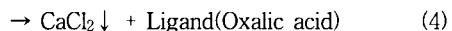
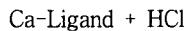
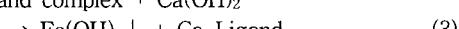
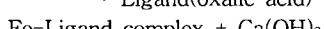
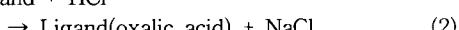
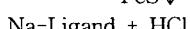
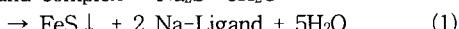
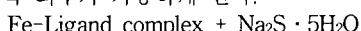
Oxalic acid Extraction No.	Fe concentration in solution (ppm)
1	1,750
2	1,486
3	1,318
Total	4,554
EDTA Extraction No.	Fe concentration in solution (ppm)
1	607
2	141
3	116
Total	864

NOTE : Numbers in parentheses are pH in solution

연속 추출에 따른 결과를 바탕으로 옥살산으로 1회 추출 한 토양을 건조 후 토양공정시험법을 사용했을 경우에 어느 정도 철 이온이 추출되는지를 확인하기 위하여 0.1N-HCl을 사용하여 추출 실험을 하였다. ICP로 용액 속의 철 이온을 분석한 결과 옥살산으로 첫 번째 추출했을 때 1,750 ppm 나타내었고 이 시료를 0.1N-HCl로 한번 더 추출했을 때는 855 ppm을 나타내어 옥살산으로 2번째 추출했을 때의 1,486 ppm보다는 훨씬 적은 양이 추출되었다. 이와 같은 결과에서 첫 번째 추출에서도 옥살산의 착물 형성 반응으로 인한 세척 효과가 0.1N-HCl을 사용한 추출보다도 세척 효과가 우수하였다. 따라서 본 세척제는 세척제로의 사용 가능성이 있다는 사실을 확인할 수 있다.

### 3.5. 금속 및 세척제의 회수

금속-리간드간의 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 종금속 회수가 가능하게 된다.<sup>17)</sup>



저분자 유기산인 옥살산을 이용한 중금속 여액에 Ca(OH)<sub>2</sub>가 첨가되면 pH는 상승하게되고 Fe-oxalate 착물이 Fe(OH)<sub>2</sub>와 같은 불용성 수산화물로 바뀌어 침전하게되고 유출액은 Ca-oxalate 용액으로 바뀌게 된다. 침전물을 분리하고 HCl을 첨가하면 다시 옥살산으로 바뀌고 재 이용이 가능하게 된다. Na<sub>2</sub>S · 5H<sub>2</sub>O를 첨가하면 Fe-oxalate가 FeS 등과 같은 황화물의 형태로 되면서 침전하게 된다.

Na<sub>2</sub>S와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 최적 주입양 및 pH 변화 현상을 파악하기 위한 실험으로 오염토양 5g에 대해 1:5의 혼합비로 하여 50mM 옥살산 용액을 사용하여 추출한 후, Na<sub>2</sub>S와 Ca(OH)<sub>2</sub>를 여액에 첨가하여 중금속 회수 실험을 하였다. 그 결과 Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 첨가하여 중금속을 회수하는 실험의 결과를 Fig. 1에 나타내었고, pH의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1의 residual fraction이란 Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 주입하기 전의 여액에 존재하는 중금속 양에 대한 Na<sub>2</sub>S 및 Ca(OH)<sub>2</sub>의 주입한 후의 잔존하는 중금속양의 비를 나타낸다. 철의 경우 최대한 불용화시켜 분리 회수에 소요되는 Na<sub>2</sub>S는 15g/l 정도였으며, pH는 9.8 부근이었다. 옥살산으로 처리한 세척액의 옥살산으로 추출 후의 pH는 1.88이었으나 Fig. 2에서처럼 첨가량이 증가함에 따라 pH가 7 및 10으로 서서히 증가하여 pH 12까지 변화됨을 볼 수 있다.

Ca(OH)<sub>2</sub>에 대한 동일한 실험 결과 분리 회수에 소요되는 Ca(OH)<sub>2</sub>는 5g/l 정도였으며, pH는 7.63 부근이었다. Ca(OH)<sub>2</sub>를 첨가함에 따라 농도가 5g/l 일 때 pH가 7.63에서 그후 pH 12.5까지 급격히 변화되는 현상을 나타내었다. 실험한 두 가지 중 pH가 낮고, 적은 양이 소요되는 Ca(OH)<sub>2</sub>가 더욱 효과적임을 확인 할 수 있었다.

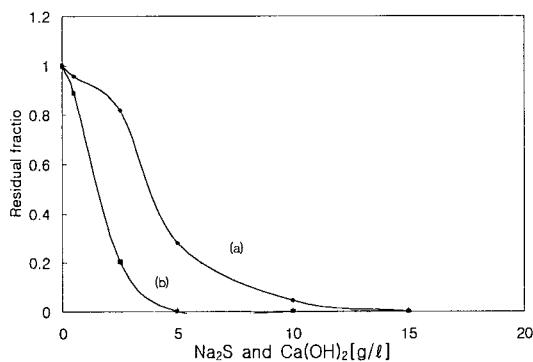


Fig. 1. Residual fraction vs. Na<sub>2</sub>S(a) and Ca(OH)<sub>2</sub>(b) concentration(Initial conc. of Fe = 1,670mg/l, oxalic acid 50mM, Shaking time = 2 hr).

### 4. 결론

옥살산 용액에 pH를 조절하지 않은 용액에서 1,750 ppm 추출되어 0.1N-HCl 용액보다도 세척력이 우수한 특성을 나타내었고 반응시간은 1시간 정도가 적절하였다. 세척제의 농도 및 토양(g)과 세척제(m l)과의 혼합비를 달리

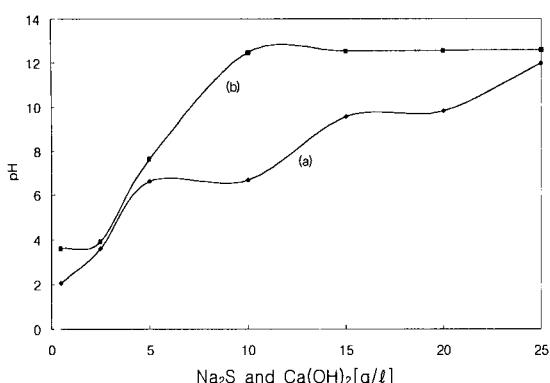


Fig. 2. pH vs.  $\text{Na}_2\text{S}$ (a) and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (b) concentration  
(Initial conc. of Fe = 1,670mg/ℓ, oxalic acid 50mM, Shaking time = 2 hr).

하면서 상등액 농도를 측정한 결과 50mM 옥살산에 1:5 와 1:10의 혼합비에서 가장 좋은 세척 효과를 나타내었다. 세척제의 혼합비에 무관하게 세척제의 농도가 증가함에 따라 세척 효율은 크게 증가하는 특성을 나타내었다. 옥살산 및 EDTA를 3회 연속 사용하여 추출했을 경우 옥살산의 세척 효과가 EDTA보다 더욱 우수함을 볼 수 있었다.  $\text{Na}_2\text{S}$  및  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 사용하여 중금속 회수 실험을 한 결과 최적의 회수 효율은  $\text{Na}_2\text{S}$ 는 15g/ℓ 를  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 5g/ℓ 가 되도록 넣었을 때가 적절하였다.

### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC - IETI)의 지원(과제번호 : 99-10-02-99-B-1)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- Griffiths, R. A., 1995, Soil washing technology and practice, *J. Haz. Mat.*, 40, 175~189.
- Fann, D., D. Pal, E. Lory, L. Karr, A. P. Mathews, and P. A. Price, 1998, Hot air vapor extraction for remediation of petroleum contaminated sites, Proceeding of the eighth(1998) International Offshore and Polar Engineering Conference Montreal, Canada, May 24~29, 313~321.
- Montero, G. A., K. B. Schnells, and T. D. Giorgio, 1997, Supercritical fluid extraction of contaminated soil, *J. Environ. Sci. Health, A* 32(2), 481~495.
- Barnett, M. O., L. A. Harris, R. R. Turner, R. J. Stevenson, T. J. HEEnson, R. C. Melton, and D. P. Hoffman, 1997, Formation of mercuric sulfide in soil, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 3037~3043.
- Banerjee, D. K. and M. R. Gray, 1997, Analysis of hydrocarbon contaminated soil by thermal extraction gas chromatography, *Environ. Sci. Technol.*, 31 646~650.
- Bolton, H., D. C. Girvin, A. E. Plymale, S. D. Harvey, and D. J. Workman, 1996, Degradation of metal-nitrilotriacetate complexes by chelatobacter-heintzii, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 931~938.
- Mackay, A. A., Y. P. Chin, J. K. Macfarlane and P. P. Gschwend, 1996, Laboratory assessment of BTEX soil flushing, *Environ. Sci. Technol.*, 30 3223~3231.
- 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.
- Li, Z., J. W. Yu, and I. Nereitnieks, 1997, Removal of Cu(II) and Cr(III) from naturally contaminated loam by electromigration, *J. Environ. Sci. Health, A*, 32 (5), 1293~1308.
- Li, Z., J. W. Yu and I. Nereitnieks, 1998, Electro-remediation: removal of heavy metals from soils by using cation selective membrane, *Environ. Sci. Technol.*, 29, 883~895.
- Popov, K. I., N. A. Shabanova, A. A. Artem'eva, E. M. Urinovich and Y. V. Tulaeva, 1997, Influence of chelating agents on the electrokinetic potential of the clay fraction of soddy podzolic soils, *Colloid Journal*, 59, 233~235.
- 국제환경노동문화원, 휴·폐광산의 환경오염 복구 및 활용방안에 관한 심포지움, 국회의원회관 소회의실, 1997, 2, 27, 1~105pp.
- Pagilla, K. R. and L. W. Canter, 1998, Laboratory studies on remediation of chromium contaminated soils, *J. Envir. Engrg*, March, 243~248.
- Spears D. R. and J. B. Vincent, 1997, Copper binding and release by immobilized transferrin: a new approach to heavy metal removal and recovery, *Biotechnol. Bioeng.*, 53, 1~9.
- 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.
- 한국토양환경학회, 오염 토양복원 기술 국제 세미나, 세종문화회관 대회의장, 1997, 10. 20, 5~17pp.
- 환경부, 1997, 오염토양/지하수 정화기술 개발, 제 1 단계 2차년도 연차보고서.
- 이동호, 최형섭, 김근, 김영희, 허종수, 이근선, 전상수, 1998, Citric acid 세척법에 의한 중금속 오염 토양의 정화, 대한환경공학회 '98 추계학술대회논문초록집, 679~680pp.
- 서승원, 이용호, 강순기, 공성호, 1998, Citric acid를 이용한 오염토양내 중금속의 제거에 관한 연구, 대한환경공학회 '98 추계학술대회논문초록집, 685~686.
- 이용호, 강순기, 공성호, 1998, In-situ flushing을 위한 오염토양내 중금속의 제거에 관한 연구, 대한환경공학회 '98 추계학술대회논문초록집, 687~688pp.
- 환경처, 1994, 토양측정방법지침, p.134.