

## 염산을 사용한 납 오염 토양의 토양 세척에 의한 정화

백기태<sup>1\*</sup> · 김도형<sup>1</sup> · 서창일<sup>1,2</sup> · 양중석<sup>3</sup> · 이재영<sup>4</sup>

<sup>1</sup>금오공과대학교 환경공학과, <sup>2</sup>환경관리공단 토양지하수사업처,  
<sup>3</sup>한국과학기술연구원 강릉분원, <sup>4</sup>철도기술연구원 환경화재연구팀

## Remediation of Pb-Contaminated Soil by Soil Washing using Hydrochloric Acid

Kitae Baek<sup>1\*</sup> · Do-Hyung Kim<sup>1</sup> · Chang-II Seo<sup>1,2</sup> · Jung-Seok Yang<sup>3</sup> · Jae-Young Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>2</sup> Division of Soil and Groundwater Business, Environmental Management Cooperation, <sup>3</sup> KIST Gangneung Institute

<sup>4</sup> Environment & Fire Control Team, Korea Railroad Research Institute

### ABSTRACT

The feasibility of soil washing was investigated to remediate Pb-contaminated field soil. Hydrochloric acid was used as a washing agent. As mixing time increased from 5 min to 120 min, removal efficiency of Pb from contaminated soil increased from 69.3% to 81.9%. Two times washing with 0.2 M HCl showed 96% removal efficiency even at mixing time of 10 min. The Pb content in soil increased sharply as particle size of soil decreased, and removal efficiency was highly dependent on mixing time and temperature. Based on this result, acid washing technologies can be applied to remediate the Pb-contaminated soil used in this study.

**Key words :** Pb-contaminated soil, soil washing, acid washing, heavy metal

### 요 약 문

납으로 오염된 실제 토양을 처리하기 위해 토양세척기술의 적용성을 평가하였다. 세척제로는 염산을 사용하였으며, 0.2 M 염산을 사용하여 고액비 1:3으로 하여 10분간 접촉하여 2회 세척하여준 결과 96%의 제거율을 보였다. 세척액과 토양의 접촉시간을 5분에서 120분까지 증가하였을 때, 제거효율은 69.3%에서 81.9%로 증가하였다. 입경별 토양세척 효율은 온도와 교반시간에 영향을 받았으며, 20분 이상 교반하여 준다면, 0.075 mm 이하, 0.075 mm-2.0 mm, 2.0-4.0 mm 의 입경별 토양에서는 모두 99%의 제거효율을 보였다. 이상의 결과는 본 연구에 사용된 납 오염 토양은 토양세척기술을 적용하여 효과적으로 처리할 수 있는 것을 의미한다.

**주제어 :** 납오염 토양, 토양세척, 산세척, 중금속

### 1. 서 론

폐광산 지역의 농경지 및 산업단지 중금속 오염이 사회적인 문제가 되면서 중금속 오염 토양의 정화에 대한 관심이 고조되고 있다. 국내에서 중금속 오염 토양은 토양세척(고일원 외, 2004; 김철성, 1999; 백정선 외, 2000; 정동철 외, 1997; 황선숙 외, 2004, 2005), 고정화/안정화,

동전기 기술(이현호 외, 2003)을 적용하여 처리하는 연구가 진행되어 왔다. 이들 기술 중 토양세척기술은 이미 세척장비가 국내에서 제작되어 중금속 오염지역 정화를 위해 현장 적용된 기술로 그 활용성이 높다.

중금속을 세척기술로 처리하기 위해서는 물, 킬레이트제, 유기산 또는 무기산 등과 같은 다양한 형태의 중금속 추출 용매가 사용된다. 이들 추출 용매는 중금속을 용해

\*Corresponding author : kbaek@kumoh.ac.kr

원고접수일 : 2007. 3. 16 게재승인일 : 2007. 6. 7

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

시키거나, 중금속과 복합체를 형성하거나, 또는 양이온 교환과 같은 화학적 작용을 통해 중금속을 토양으로부터 추출한다. 지금까지 토양세척에 사용된 대표적인 추출제로는 염산이나 인산과 같은 강산(고일원 외, 2004), ethylenediaminetetraacetic acid(EDTA) (김철성, 1999; 백정선 외, 2000; 황선숙 외, 2004,2005), 초산(acetic acid), 구연산(citric acid) (정동철 외, 1997) 등이 있다. 대부분의 토양세척에서 강산과 EDTA를 추출용매를 사용하는 것은 중금속 추출 효율이 높기 때문인 것으로 알려져 있다(정동철 외, 1997; 백정선 외, 2000; 황선숙 외, 2004, 2005; Abumaizar and Smith, 1999). 그러나 EDTA를 사용할 경우 추출액의 처리가 쉽지 않고, EDTA 자체가 가지는 생물독성과 상대적으로 높은 EDTA 비용이 해결해야 할 한계로 인식되고 있다(Isoyama and Wada, 2007).

강산을 추출용매로 사용하면 추출효율은 높으나 토양 입자의 구조가 변형되고 처리 후 중화를 하더라도 부분적인 토양산성화가 문제가 될 수 있다. 그러나 추출액의 처리가 상대적으로 용이하고 강산의 비용도 EDTA나 유기산에 비해 저렴하기 때문에 가장 많이 사용되고 있는 추출용매이다. 강산 중에 HCl은 중금속 추출 효율이 높아 범용적으로 사용되는 강산이다 (백정선 외, 2000; 황선숙 외, 2004, 2005; 고일원 외, 2004).

본 연구에서는 납으로 오염된 사격장 부지를 토양세척 기술을 이용하여 처리하고자 한다. 실제 오염 토양을 대상으로 토양세척기술을 적용하기 위한 운전인자를 도출하고 최적 처리 조건을 제시하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험대상 토양

본 연구에 사용한 토양은 A시에 위치한 곳으로 사격장

부지로 활용되어서 과거 20년간 납탄이 토양 중에 축적되었다. 사격장 부지는 납탄의 부식에 의해 오염이 되며, 오염 깊이가 깊지 않은 것이 특징이다. 오염면적은 17,000 m<sup>2</sup>이며 평균오염 깊이는 0.3 m이다. 이 지역의 5곳에서 각각 채취한 오염토양을 혼합하여 실험에 사용하였다.

### 2.2. 토양의 물리화학적 특성

오염지역 5지점을 택하고 각각의 지역에서 토양시료를 채취하여 오염토양의 입자 크기를 분석하였다. 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 오염토양의 입자 크기 분포를 보면 습윤 토양에서는 0.075 mm 이하의 미세 토양이 평균 0.6%로 굉장히 적으나, 풍건 토양에서는 미세 토양의 비율이 7.2%로 증가하였다. 이는 건조를 통해 입자의 분쇄가 용이해 지기 때문으로 사료된다. 토양의 pH는 3.77-4.72의 분포를 보였으며, 평균 pH는 4.21로 나타났다. 또한 함수율도 5.5%-15.9%의 분포를 보였으며 평균 11.3%이었다. 따라서 본 연구에 사용된 토양은 함수율이 높지 않은 산성토양으로 사료된다. 납의 오염 농도는 >4.0 mm의 토양에서는 164.9 mg/kg, 2.0 mm-4.0 mm 토양은 860 mg/kg, 0.075 mm-2.0 mm의 토양에서는 2866.2 mg/kg, <0.075 mm의 토양에서는 4443.2 mg/kg으로 오염되어 있는 것으로 나타났다. 납의 평균 오염 농도는 4,210 mg/kg 으로 토양환경보전법 상의 대책기준을 초과한 것으로 나타났다. 토양의 물리 화학적 특성을 Table 2에 정리하였다.

### 2.3. 토양세척실험

특별한 언급이 없는 한 모든 토양세척 실험에는 입경이 4.0 mm 이하인 풍건토양을 사용하였다. 토양세척실험은 고액비 1 : 3 (10 g 토양, 세척액 30 ml)으로 하여 삼각플라스크에서 수행하였다. 염산의 농도 및 접촉시간에 따른 추출효율을 각각 비교하였다. 일반적으로 입경이 작을

Table 1. Size distribution of contaminated soil (raw soil, unit : %)

토양크기 (mm)	IS1		IS2		IS3		IS4		IS5		Average	
	습윤	풍건	습윤	풍건	습윤	풍건	습윤	풍건	습윤	풍건	습윤	풍건
> 4.0	5.4	5.4	11.4	10.7	13.4	11.4	6.3	4.9	7.9	8.8	8.9	8.3
1.9-4.0	15.8	10.3	20.6	19.6	25.7	25.7	24.0	19.1	24.9	19.4	22.2	18.8
0.98-1.9	12.3	9.8	14.5	14.3	12.0	12.6	15.7	14.6	14.1	12.1	13.7	12.7
0.447-0.98	22.7	22.4	23.2	22.6	20.7	21.2	22.0	22.2	22.7	21.9	22.3	22.1
0.185-0.447	21.8	21.1	16.7	15.9	16.1	14.6	18.1	16.3	19.5	17.2	18.5	17.0
0.140-0.185	8.2	7.5	6.1	4.8	4.8	4.2	9.2	5.8	7.8	6.1	7.2	5.7
0.107-0.140	7.7	7.2	5.0	4.4	3.9	3.6	3.0	5.5	2.0	5.4	4.3	5.2
0.107-0.074	4.8	4.4	2.0	2.5	2.6	2.0	0.9	3.2	0.5	2.7	2.1	2.9
< 0.074	1.2	11.9	0.5	5.1	0.5	4.6	0.4	8.2	0.4	6.3	0.6	7.2

**Table 2.** Physico-Chemical properties of contaminated soil

Soil Particle size (mm)	Pb Conc. (mg/kg)	Soil pH	Water Content (%)
> 4.0	164.9	4.21	11.3
2.0-4.0	860.0		
0.075-2.0	2866.2		
< 0.075	4443.2		

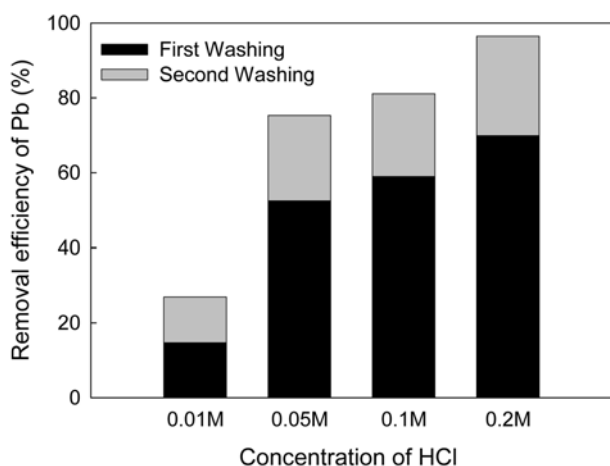
수록 추출효율이 낮아지기 때문에 입경에 따른 산세척 효과를 비교하였다. 특별한 언급이 없는 한 모든 실험은 현장조건을 고려하여 10°C에서 3회 반복하여 진행되었다.

세척 후 토양은 3000 rpm에서 5분간 원심분리하여 토양과 세척액을 분리하였으며 세척액의 농도를 분석하여 세척 효율을 비교하였다. 토양 중 납의 농도는 토양오염 공정시험방법을 따랐으며 세척액에서의 납 농도는 원자흡광광도계(Atomic Absorption Spectroscopy, AAS, F6701, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 토양 중의 총 납 함량은 원수 추출법을 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 산세척에서 산성 세척액의 농도의 영향

세척에 필요한 산 용액의 농도를 결정하기 위해 염산의 농도를 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 0.2 M로 증가시키며 토양세척 실험을 진행하였다. 염산의 농도가 증가함에 따라 용출되는 중금속의 농도도 증가하였다(Fig. 1). 교반시간을 10분으로 고정하여 실험을 진행한 결과 0.05 M 까지는 추출 효율의 증가가 극명하나 0.05 M 이상에서는

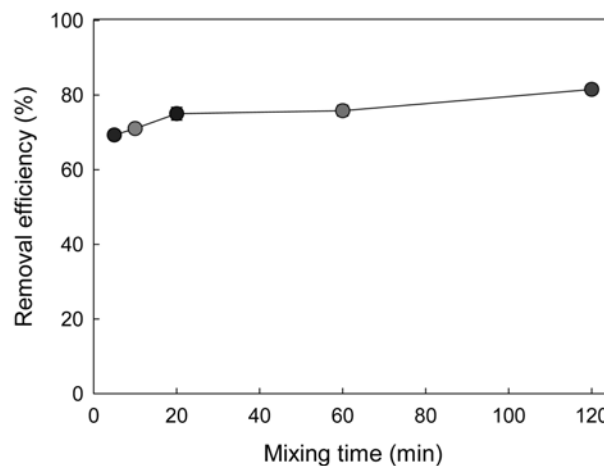


**Fig. 1.** Effect of acid concentration on acid soil washing. Experiments were carried out the following conditions : size of soil : <4.0 mm; temperature : 10°C; solid liquid ratio : 10 g/30 ml; mixing time : 10 min at 100 rpm.

추출효율 증가율이 둔화되었다. 1차 추출에서 각각의 염산농도에서 납의 제거율은 14.8%, 52.6%, 59.1%, 70.0%였다. 1차 추출이 완료된 토양시료를 다시 동일한 조건에서 2차 추출에 이용한 결과 1차 추출과 비슷한 경향을 보였으나 추출 효율은 급격히 감소하였다. 2차 추출 효율은 각각의 염산 농도에서 21.1%, 22.7%, 22.0%, 26.5%였다. 2차 추출까지 시행한 결과 각각의 염산 농도에서 납 제거율은 26.9%, 75.3%, 81.1%, 96.5%였다. 본 연구에 사용된 토양은 사격장의 납탄에 의해 오염되어 있어, 납과 토양의 결합이 강하지 않아 1차 세척에서 효율이 높은 것으로 사료된다. 2차 세척을 하였을 때, 납 농도가 우려기준인 400 mg/kg 이하가 될 수 있는 농도는 0.2 M 뿐이었기 때문에 접촉 시간에 대한 실험은 0.2 M HCl로 진행하였다.

#### 3.2. 세척액과 오염토양의 접촉 시간

오염토양의 토양세척에서 교반시간을 결정하기 위해 교반시간을 변화시키면서 세척 효과를 조사하였다. 교반시간을 5, 10, 20, 60, 120 분까지 증가시키면서 세척 효과를 비교한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 교반시간이 5분



**Fig. 2.** Effect of mixing time on acid soil washing. Experiments were carried out the following conditions : size of soil : 0.075-4.0 mm; temperature : 10°C; solid liquid ratio : 10 g/ 30 ml; washing agent : 0.2 M HCl at 100 rpm.

에서는 69.3%의 제거율을 보였으며, 10분에서는 71.0%, 20분에서는 75.0 %, 60분에서는 75.8%, 120분에서는 81.5%의 제거율을 보였다. 교반시간이 5분에서 120분으로 증가하여도 제거율은 69.3%에서 81.5%로 단지 12.2%만 증가하였다. 이 실험 결과에 따라 교반시간을 10분-20분으로 하는 것이 세척 효율을 고려할 때 적절할 것으로 사료된다.

토양에서 중금속의 탈착거동 특성을 설명하기 위해 first order two site model(Two reaction model) 과 two constant kinetic model이 일반적으로 사용된다(황선숙 등, 2004). Two-reaction model은 다음과 같은 식으로 표현되며 시간  $t$ 와 그때의 추출량과 초기 중금속 농도의 세 가지 실험값으로부터 상수  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $a$ 를 추정할 수 있다.

$$C = C_0a(1 - e^{-k_1t}) + C_0a(1-a)(1 - e^{-k_2t})$$

여기에서  $C$ 는 시간  $t$ 까지 추출되어 나온 납의 농도,  $C_0$ 는 토양에 흡착되어 있는 납의 초기 농도,  $a$ 는 초기의 빠른 반응단계에서 추출된 중금속의 비율,  $k_1$ ,  $k_2$ 는 각 반응단계에서의 반응상수로  $k_1$ 은 초기의 빠른 추출단계의 반응상수이며,  $k_2$ 는 이어지는 느린 추출단계의 반응상수이다(황선숙 등, 2004).

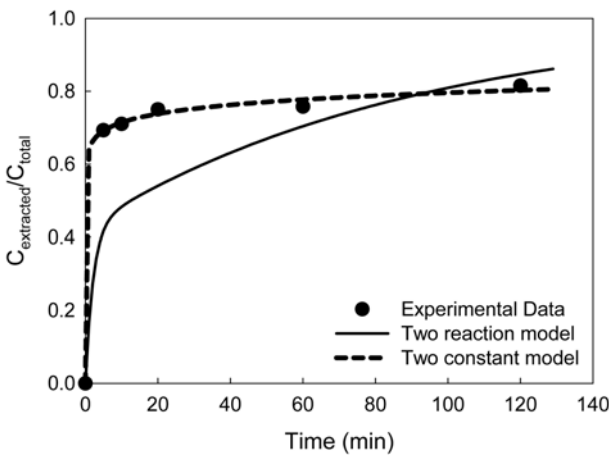


Fig. 3. The results of fitting the two-reaction model and two-constant model to the extraction data of Pb from contaminated soil.

Table 3. Kinetic model parameters for extraction of lead from soil

two-reaction model	a	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	1-a	$k_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$r^2$
	0.427	0.471	0.573	0.011	0.641
two constant model		A		B	$r^2$
	0.641		0.047		0.981

Two-constant model은  $C = At^B$ 의 식으로 나타낼 수 있으며 양변에  $\log$ 를 취하면 아래의 식과 같이 선형변환이 가능하고, 선형회귀 모형에 의해 A와 B를 추정할 수 있다.

$$\log C = \log A + B \log t$$

여기에서  $C$ 는 시간  $t$ 까지 추출된 납의 농도이며, A와 B는 상수이다. A는 초기 납 탈착반응상수( $\text{mg Pb kg}^{-1} \text{min}^{-1}$ )를 의미하며, B는 탈착반응계수( $\text{mg Pb kg}^{-1}$ )로 정의하였다 (황선숙 외, 2004).

각각의 모델식을 실험값에 적용시킨 결과가 아래 Table 3에 정리하였다. 본 연구에 사용된 납 오염토양에서 납의 추출은 two constant kinetic model과 식으로 그 추출특성을 잘 설명할 수 있다. 이 결과는 황 등의 납제련소의 오염토양에 대한 HCl 추출을 모델식에 적용한 결과에 의하면 Pb는 two-reaction model로 잘 예측되었으며, Pb를 제외한 Cd, Cu, Zn는 모두 two constant model과 더 일치하는 경향을 보였다(황선숙 외, 2004). 그러나 본 연구에서 two-constant kinetic model 식이 납의 탈착 특성을 잘 설명하는 것은 본 연구에 사용된 오염토양은 납탄에 의한 오염으로 납탄의 부식으로 인해 토양에 강하게 흡착하기 보다는 납탄이 잘게 부서져 가는 입자상으로 토양에 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

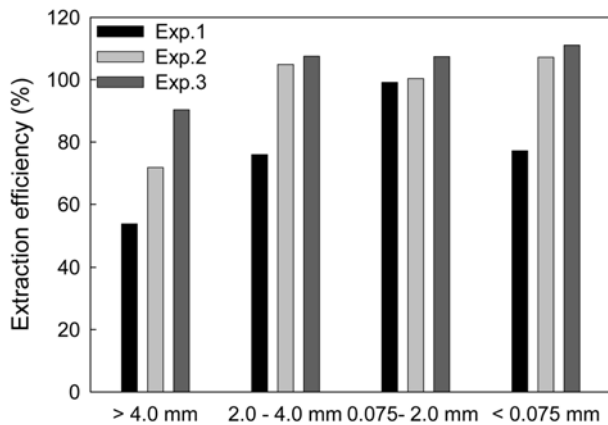
### 3.3. 토양 입자 크기에 따른 세척 효율

토양 입자 크기가 작아질수록 토양과 중금속이 강하게 결합하여 세척이 어렵다고 알려져 있다. 본 연구에서는 토양을 입경별로 분리하여 각 입경별로 세척 효율을 비교하였다. 이전 연구결과에 따라 세척액의 농도는 0.2 M, 교반온도를 10°C에서 교반시간은 10분, 20분 그리고 20에서 교반시간 20분으로 하여 세척실험을 진행하였다.

Fig. 4에 입경에 따른 세척효율을 나타내었다. 입경은 4.0 mm 이상, 2.0 mm-4.0 mm, 0.075 mm-2.0 mm, 0.075 mm 이하 4 종류의 입경에 대한 세척 효율을 비교하였다. 일반적으로 알려진 것과는 다르게 입경분포 10에서는 0.075 mm-2.0 mm 사이의 토양에서 세척 효율이 가장 높게 나왔으며, 이 보다 작거나 큰 토양에서는 오히려

세척효율이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 20또는 교반시간이 20분으로 증가한 경우 에서는 2.0-4.0 mm, 0.075-2.0 mm, 0.075 mm 이하의 입경에서 모두 비슷한 수준의 제거율을 보였다. 입경이 큰 토양의 경우, 세척제가 토양입자 안쪽으로 충분히 전달되지 않아 토양에서 납의 탈착이 많이 이루어 지지 않았기 때문으로 사료된다. 입경이 작은 토양의 경우 토양과 납이 강하게 결합하고 있어 세척 효율이 또한 낮아지는 것으로 생각된다. 이 두 가지 효과가 동시에 나타나기 때문에 최적 효율을 보이는 토양입자크기가 존재하는 것으로 판단할 수 있다.

온도는 10°C로 고정하고 교반시간을 20분으로 증가시켜 전체적인 납의 세척효과 변화를 조사하였다(Fig. 4). 교반시간을 0.075-0.2 mm 크기를 제외하고는 대부분 20-



**Fig. 4.** Effect of soil particle size on soil washing.  
 Exp. 1 : the washing experiment was carried out at 10°C and 100 rpm during 10 min with 0.2 M HCl.  
 Exp. 2 : the washing experiment was carried out at 10°C and 100 rpm during 20 min with 0.2 M HCl..  
 Exp. 3 : the washing experiment was carried out at 20°C and 100 rpm during 20 min with 0.2 M HCl.

30% 정도의 추출효율이 증가하였다. 추출효율이 100% 이상인 것으로 나타난 것은 추출효율 계산에서 초기 농도를 토양오염공정시험방법에 의해 분석할 때, 0.1 N HCl로 추출하나, 본 연구에서는 0.2 M HCl을 토양세척액으로 사용하였기 때문에 공정시험방법에서 보다 많은 양의 납이 추출되기 때문으로 사료된다.

교반온도를 20°C로 하여 동일한 조건에서 토양세척을 수행한 결과 모든 세척결과가 90% 이상으로 나타났다. 이 결과는 온도가 증가할수록 중금속의 탈착이 증가하는 것을 의미한다. 이는 온도가 증가할수록 납의 추출액으로의 확산이 증가하여 탈착반응속도가 증가하기 때문이다.

이상의 결과를 종합해 보면, 납 오염 토양의 세척에는 온도가 낮은 겨울철 보다는 온도가 높은 여름철에 세척을 수행하는 것이 보다 높은 제거율을 얻을 수 있으며, 본 연구에 사용된 토양의 경우 추출시간 20분 이내에서 1회 세척만으로도 평균 90% 이상의 제거율을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 겨울철에 토양세척공정이 운전된다면 전체적인 세척효율의 감소가 약 20%정도 있으므로 실제 토양세척시에는 이를 고려해야 할 것으로 판단된다.

**3.4. 토양 세척 후 잔류하는 납 농도**

본 연구에서 최적의 세척액 농도는 0.2 M HCl로 나타났다. 그러나 이 농도는 토양오염공정시험방법에서 토양 중 납을 추출하기 위한 0.1 N HCl보다 강산조건이기 때문에 토양 내에 납의 존재형태의 변화를 야기할 수 있다. 세척 과정에서 납의 존재형태가 변하게 되면 일반적인 세척효율의 실험실적 평가에서 사용하는 세척액의 농도를 활용한 토양 내 농도 추정에 오류가 발생할 가능성이 높다. 따라서 세척액을 분석하여 전체적인 제거율을 측정하는 것보다는 세척 후 토양에 잔류하는 납 농도를 토양오염공정시험방법에 의해 분석하는 것이 토양세척 공정의

**Table 4.** Mass Balance of lead during sequential soil washing

	Exp.1	Exp.2	Exp.3
Initial Conc.(KST*, mg/kg)		4,210.3	
Initial Conc. (Aqua Regia, mg/kg)		6,368.5	
1 <sup>st</sup> Washing Solution(%)	62.4 ± 0.2	66.3 ± 0.4	66.0 ± 0.7
2 <sup>nd</sup> Washing Solution(%)	29.1 ± 0.4	30.2 ± 1.7	29.7 ± 2.8
Residual in Soil(%)	8.0 ± 2.4	5.8 ± 1.9	8.8 ± 3.0
Recovery(%)	99.5	102.3	104.5
Residual Conc. in soil (mg/kg)	334.7 ± 127.8	244.2 ± 68.6	371.8 ± 123.5

Exp. 1 : the washing experiment was carried out at 10°C and 100 rpm during 10 min with 0.2 M HCl.  
 Exp. 2 : the washing experiment was carried out at 10°C and 100 rpm during 20 min with 0.2 M HCl..  
 Exp. 3 : the washing experiment was carried out at 20°C and 100 rpm during 20 min with 0.2 M HCl.  
 \*KST: Korean Standard Test Method for Soil

운전인자 도출에 더 적합하다.

토양 내에 포함되어 있는 납을 왕수추출에 의하여 분석한 결과 6368.5 mg/kg으로 나타났다. 이는 공정시험방법으로 분석한 납 농도의 1.5배에 해당한다. 2회 반복하여 추출한 후 토양에 잔류하는 납 농도를 분석한 결과를 Table 4에 정리하였다. 2회 연속 추출을 진행된다면, 실험에 사용된 3가지 조건 모두 400 mg/kg 이하로 나타났다. 이는 앞서 추출액을 분석하여 계산된 제거율보다는 낮은 수치이다. 따라서 강산으로 토양을 세척하는 경우 단순한 추출액 분석이 아닌 잔류 중금속 농도를 측정하여야 정확한 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 납탄으로 오염된 토양에서 토양의 입경이 작을수록 납 함량은 급격히 증가하였으며, 대부분의 납은 0.075 mm 이상의 미세토양에 흡착되어 있었다.
2. 세척액으로 염산이 사용할 경우, 최소 0.2 M 이상의 농도가 사용되어야만 90% 이상의 세척효율을 얻을 수 있다.
3. 본 연구에서 사용된 납탄에 의해 오염된 토양은 초기 5분 이내에 대부분의 납이 세척되며, 이러한 납의 탈착 특성은 two-constant kinetic model에 의하여 잘 설명된다.
4. 겨울철에 본 납 오염 토양을 세척법으로 처리한다면 0.2M 이상의 HCl로 최소 20분의 접촉시간으로 2회 이상 추출하여야 90% 이상의 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 예측된다.
5. 강산을 세척액으로 사용하는 경우 토양에 존재하는 중금속의 형태가 변하기 때문에 세척액이 아닌 잔류 농도를 분석하여 토양환경보전법 상의 규제 기준에 적합한가를 비교분석하여야 한다.

#### 사 사

본 연구는 금오공과대학교 2006년 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 고일원, 이철효, 이광표, 김경웅, 2004, 토양세척에 의한 비소 및 중금속 오염토양의 복원, 한국지하수토양환경학회지, 9(4), 52-61.
- 김철성, 1999, EDTA를 사용한 납 오염 토양에서의 효율적인 납 추출, 한국토양환경학회지, 4(1), 3-11.
- 백정선, 현재혁, 조미영, 김수정, 2000, 세척을 통한 중금속 (Cd, Zn)으로 오염된 토양의 정화, 한국토양환경학회지, 5(1), 45-54.
- 이현호, 백기태, 양지원, 2003, 새로운 순환방식을 적용한 동전기 정화기술에 의한 오염토양내의 납 제거, 지하수토양환경, 8(1), 9-16.
- 정동철, 이지희, 최상일, 1997, 중금속에 의해 오염된 토양에 대한 토양세척기법의 적용성 연구, 한국토양환경학회지, 2(2), 53-60.
- 황선숙, 박성수, 남궁완, 2004, 토양세척기법을 이용한 중금속 오염토양처리의 동역학적 해석, 대한환경공학회지, 26(11), 1181-1190.
- 황선숙, 이노섭, 남궁완, 2005, 토양세척기법을 이용한 중금속 오염토양 처리에서 중금속 추출특성, 대한환경공학회지, 27(10), 1072-1080.
- Abumaizar, R.J. and Smith, E., 1999, Heavy metal contaminants removal by soil washing, *J. Hazard. Mater.*, B70, 71-86.
- Isoyama, M. and Wada, S.-I., 2007, Remediation of Pb-contaminated soils by washing with hydrochloric acid and subsequent immobilization with calcite and allophanic soil, *J. Hazard. Mater.* 143(3), 636-642.