

사격장 납 오염토양 복원을 위한 토양세척시 HCl과 EDTA의 영향 연구

김호식 · 최상일*

광운대학교 환경공학과

Effects of HCl and EDTA on Soil Washing to Remediate Lead-contaminated Soil in a Firing Range

Hyo-Sik Kim · Sang-Il Choi*

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

Laboratory soil washing experiments with HCl or EDTA were conducted to remediate lead-contaminated soil in a firing range. After lead bullets were removed by standard sieve #18 (1.0 mM), Pb concentrations were measured by EPA Method 3050B (9,443 mg/kg) and Korea Standard Test (4,803.5 mg/kg). The results of the batch test showed that the removal efficiency curve was logarithmic and approximately 90% of lead in soil was removed, when HCl was used. In case of EDTA, the removal efficiency increased proportionally to the concentration of EDTA, up to 98% lead removal with 0.1 M EDTA. High mixing strength resulted in increase of removal efficiency and kinetics showed that the most lead was extracted in 10 min.

Key words : Firing range, Soil washing, Lead, HCl, EDTA, Sequential extraction

요 약 문

본 연구에서는 실제 납 탄알로 오염된 사격장 토양에 대해 토양세척기법을 적용하기위한 lab-scale 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 토양오염공정시험법과 EPA Method 3050B 분석결과 각각 4,803.5 mg/kg, 9,443 mg/kg으로 나타났다. 회분식 토양세척 실험에서 HCl을 세척제로 사용한 경우 농도증가에 따른 제거율은 로그적인(logarithmic) 경향을 나타내었고 0.1 M에서 약 90% 정도 제거되었으며, EDTA는 농도에 비례하여 제거율도 증가하여 0.1 M에서 약 98%의 제거율을 보였다. 교반강도에 따른 시간별 세척효율을 분석한 결과, HCl과 EDTA를 사용한 경우 모두 교반강도의 증가와 비례하여 토양내 제거율이 증가하였으나 200 rpm과 300 rpm에서의 제거율은 유사한 것으로 나타났으며, 반응 초기 10분 이내에 대부분의 용출이 이뤄지고 60분 경과 후에는 제거율 증가가 둔화되었다.

주제어 : 사격장, 토양세척, 납, EDTA, HCl, 연속추출

1. 서 론

2003년도 국방부 ‘사격장 토양오염조사 및 오염확산 방지대책 연구’에 따르면 표본 조사한 9개 사격장에서 카드뮴, 납, 구리 중 한 가지 이상의 중금속이 토양오염우려기준을 초과한 것으로 나타났다. 최근에는 주한미군기지 이

전이 본격화 되면서 시행된 토양오염도조사결과 사용 후 방치되거나 현재 사용 중인 개인화기사격장 및 포사격장 내 납, 구리, 카드뮴 등 중금속에 의한 토양오염이 보고되고 있으며, 특히 불발탄 및 탄피 등에 의한 납 오염이 심각한 것으로 나타났다. 또한 일반 실탄사격장 주변 토양에서도 제거조치 없이 방치된 납 탄알로 인한 오염이 상당히 진행된 것으로 알려져 대책마련이 시급한 실정이다.

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2007. 11. 14 게재승인일 : 2007. 12. 12

질의 및 토의 : 2008. 4. 30 까지

토양에서 납의 이동은 흡착, 이온교환, 침전, 유기물과의 착화반응 등에 영향을 받게 된다. 납 이온은 토양표면에 결합되어 있는 다른 금속과 치환하여 흡착되며, 용해도 이상의 납 이온은 토양과 토양용액의 성분에 따라 침전물로 존재한다(Campanella et al., 1989). 이는 유기물함량이 높고 pH가 6~8의 조건에서 납은 비용해성 유기 납착화합물을 형성하고 유기물함량이 적은 토양의 경우 같은 pH 조건하에서 수산화납, 탄산납, 인산납 등의 침전물을 형성하기 때문이다(정승우, 2003). 토양에 유입된 중금속은 자연적으로 분해되지 않고 오랜 기간 동안 잔류하게 되며, 식물이나 지하수로 이동하여 생태계 먹이사슬을 통해 인간에게 독성으로 작용할 수 있기 때문에 적절한 처리방법을 적용하여 오염부지를 복원할 필요가 있다.

중금속 오염토양에 적용 가능한 정화기술로는 화학적 처리(Chemical treatment), 용매추출(Solvent extraction), 토양세척 및 세정(Soil washing / flushing), 동전기법(Electrokinetic method), 식물정화법(Phytoremediation) 등이 있다(Mulligan et al., 2001). 이들 대부분은 pH 변화와 산성강우 등의 환경조건이 변함에 따라 오염물질이 용출될 가능성을 가지고 있기 때문에 토양오염을 저감할 수 있는 가장 확실한 방법은 토양으로부터 직접적으로 오염물질을 분리·제거하는 것이다. 이러한 관점에서 처리대상 오염물질에 따라 물, 계면활성제, 유기산, 무기산, 염기, 착화제 등의 적절한 세척제를 선별하여 토양입자와 결합되어 있는 유해 오염물질을 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 분리하는 토양세척기법은 중금속 오염토양 정화를 위한 적절한 기술로 인정받고 있다.

본 연구에서는 기존에 이루어졌던 중금속 용출 특성 및 토양세척기법에 관한 연구를 바탕으로 실제 사격장내 납 오염토양을 대상으로 하여 오염특성을 분석하고, HCl과 EDTA를 세척제로 사용하여 용출특성 및 토양세척기법의 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 대상시료 및 기초특성 분석

본 연구를 위하여 1시에 위치한 사격장 주변토양을 대상시료로 선정하였다. 시료는 사격장내 오염개연성이 높은 5개 지점의 표토(0~20 cm)를 채취하였고 납 탄알 및 협잡물을 제거하기 위해 표준 체 #18(1.0 mm)을 통과한 토양을 균일하게 혼합하였다. 세척실험을 수행하기 전 시료의 물리·화학적 기초특성과 초기오염농도를 분석하였

다. pH는 토양오염공정시험법(환경부, 2002)에 따라 토양과 증류수의 비율이 1:5(w/w)가 되도록 혼합하여 1시간 동안 진탕시킨 후 상등액의 pH를 측정하였으며, 유기물함량은 직접회화법(direct ashing method)을 이용하였고 CEC는 1 N 초산 침출법으로 측정하였다. 대상시료내 납의 농도는 토양오염공정시험법을 따라 100 mL 삼각플라스크에 토양 10 g과 0.1 N HCl 50 mL를 넣어 항온수평진탕기에서 1시간 동안 진탕하고 5B 여과지로 여과한 후 여과액을 ICP-OES(Perkin Elmer Optima 2000 DV, USA)를 이용하여 분석하였고, 토양내 중금속 전함량은 EPA Method 3050B로 전처리하여 분석하였다.

2.2. 연속추출법에 의한 납의 존재특성 분석

대상시료내 납의 존재특성 및 결합형태 등을 분석하기 위해 Tessier et al.(1979)의 방법을 수정한 연속추출법을 사용하였고(Ruiqiang Liu et al., 2007), Table 1에 연속추출의 단계별 용출방법을 나타내었다. 연속추출을 위하여 15 mL Teflon centrifuge tube에 건조 토양 0.5 g과 Table 1의 각 단계별 추출액을 혼합하였다. 단계별 반응조건으로 반응시킨 후 혼합물을 3,000 rpm에서 10분간 원심분리한 뒤 0.45 µm membrane filter로 여과하여 납의 농도를 분석하였다.

2.3. 회분식 토양세척 실험

중금속 오염토양에 토양세척기법을 적용하기 위해서는 토양 및 오염물질의 물리·화학적 특성 파악과 함께 용매의 종류와 농도, 용매와 토양의 혼합비, 반응시간 등 적정 처리 조건이 결정되어야 한다. 세척제로는 강산이나 킬레이트 시약(chelating agent)과 같은 추출용매를 사용하게 되는데, 중금속 추출에 가장 많이 사용되고 있는 HCl과 citric acid, tartaric acid 등 다른 유기산에 비해 납 제거효율이 높은 EDTA를 세척용액으로 선정하여 회분식 토양세척 실험을 수행하였으며 세척 토양의 잔류 납 농도는 EPA Method 3050B로 전처리하여 분석하였다.

2.3.1 세척제별 주입농도에 따른 영향

세척제 농도변화에 따른 세척효율을 알아보기 위해 세척제의 농도를 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 M HCl과 0.01, 0.05, 0.1, 0.2 M EDTA로 각각 설정하였다. 진탕비는 토양세척의 효율 및 경제성을 고려하여 1:3 [soil(g): solution(mL)]으로 고정하였고, 300 rpm으로 1시간 동안 진탕시켰다.

Table 1. Scheme of sequential extraction procedure for extractable lead fractions

Step	Method	Designated Pb species
1	Soil 0.5 g+ 12.5 mL, 1 M NH ₄ NO ₃ , pH 7.0, 0.5 h shaking	Exchangable (EX)
2	12.5 mL, 1 M Na-acetate, pH 5.0, 6 h shaking	Carbonate-bound (CB)
3	12.5 mL, 0.04 M hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid, , 6 h at 95°C water bath	Fe/Mn Oxides-bound (OX)
4	1.5 mL of 0.01 M HNO ₃ and 2.5 mL of 30% H ₂ O ₂ 5 h at 85°C in water bath, followed by an additional 1 mL of H ₂ O ₂ , 1h at 85°C in water bath, then 7.5 mL of 1 M NH ₄ NO ₃ , 10 min shaking at room temperature	Organic matter-bound (OM)
5	12.5 mL, 4 M HNO ₃ , 16 h at 80°C in water bath	Residual (RS)

2.3.2 교반강도와 세척시간에 따른 영향

교반강도와 세척시간별 납의 용출 특성을 알아보기 위해 2.3.1의 실험을 통해 도출된 세척용액의 최적 주입농도를 적용하여 100, 200, 300 rpm의 교반조건으로 1, 3, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180분에서의 납 용출량을 분석하였고, 세척시간 60분에서의 토양에 대하여 연속추출을 실시하여 세척 후 토양내 납의 존재형태변화를 분석하였다. 또한 0.1 M EDTA 세척용액으로 300 rpm 조건에서 세척한 토양에 대하여 토양오염공정시험법과 EPA Method 3050B를 통한 용출특성을 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 토양의 물리·화학적 특성 및 납의 존재특성 분석

대상시료의 물리·화학적 특성과 초기오염농도 분석결과를 Table 2, 3에 나타내었다. 입도분석 결과(Table 2), 세척이 어려운 silt, clay와 같은 #200 이하(0.075 mm 이하)의 fine fraction 비율이 17.5%로 비교적 적어 토양세척공정을 이용한 용출특성 평가가 용이할 것으로 판단되었다. 토양의 물리·화학적 특성 실험결과(Table 3), pH는 약 5.5로 약산성을 띠었고, 수분함량은 14.3%로 일반적인 토양수분함량 범위(10~18%)의 분포를 보였다. 유기물함량은 7.1%로 일반토양의 유기물함량범위(0.5~5%)보다 다소 높았고, 양이온 교환용량은 6.6 meq/100 g으로 나타났다. 일반적으로 토양의 유기물 함량이 높을수록 중금속 이온의 흡착능이 증대되는데(Tapan and Singh, 2003), 이는 유기물 자체의 양이온 교환능력이 토양 무기성분들의 양이온 교환능력보다 커 많은 양의 중금속 이온을 흡착하기 때문이다. 또한 유기물질 중에 carboxyl기나 phenol기와 같은 음전하를 띤 유기물질들이 양전하를 띤 중금속 이온과 전기적으로 결합하여 안정한 유기금속착화물(organic matter-metal complex)을 형성하여 중금속 흡착에 영향을 미치게 된다(Sparks, 1995).

토양오염공정시험법을 이용한 초기농도(Table 3)는 토양

Table 2. Particle size distribution of lead contaminated soils

No.	Sieves	Mass fractions [%]
	Opening size [mm]	
18~20	0.85~1.0	3.73
20~40	0.425~0.85	21.2
40~60	0.25~0.425	19.7
60~100	0.15~0.25	20.9
100~140	0.106~0.15	7.8
140~200	0.075~0.106	9.2
200~	0.075~	17.5

환경보전법상의 토양오염우려기준 '가'지역을 약 48배 초과한 4803.5 mg/kg으로 높게 나타났다. 이는 사격장내 산재한 납 탄알이 강우와 물리·화학적 풍화작용 등으로 인해 용해되어 토양으로 유입된 후 토양입자 및 유기물에 흡착된 상태로 존재하거나 부식된 납 탄알이 미립자 상(phase)으로 존재하기 때문으로 판단된다. 연속추출을 이용한 초기 대상시료내 납의 존재형태 분포는 Carbonate-bound fraction(CB), 56% > Fe/Mn Oxides-bound fraction (OX), 26% > Organic matter-bound fraction(OM), 10% > Residual fraction(RS), 5% > Exchangable fraction(EX), 1%의 순으로 나타났다. CB fraction의 비율이 절반이상을 차지하는 것으로 보아 약산성의 조건에서 납의 이동성이 증대될 것으로 판단되며, 자연상태에서의 이동성(Mobility)과 식물이용가능성(Phytoavailability)이 낮은 OM, RS fraction 비율이 낮은 것은 납이 토양입자의 광물학적 부분에 존재하는 것이 아닌 외부에서 유입된 것임을 보여주는 결과이다.

3.2. 세척제별 주입농도에 따른 영향

HCl과 EDTA 주입농도에 따른 세척효율을 분석한 결과(Fig. 1), 세척제로 HCl을 사용한 경우 Moutsatsou et al.(2006)의 연구 결과와 유사하게 농도가 증가함에 따라 납의 제거효율은 로그적(logarithmic)으로 나타났으며, 0.1 M 이상에서 거의 일정하게 약 90% 이상의 제거율을

Table 3. Physicochemical properties and concentration of lead contaminated soils

pH	Water Content [%]	Organic Content [%]	Bulk Density [g/cm ³]	CEC ^a [meq/100 g]	KST ^b [mg/kg]	Total Con. ^c [mg/kg]
5.49	14.3	7.1	1.7	6.6	4803.5	9443.5

^a Cation Exchange Capacity, ^b Korea Standard Test, ^c EPA Method 3050B

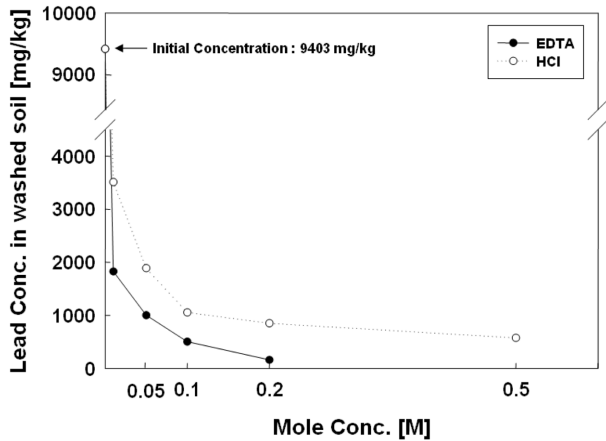


Fig. 1. Total lead concentration in washed soils as function of washing agent concentration.

나타냈다. 이는 오염토양에 무기산을 주입하게 되면 H⁺ 농도가 증가함에 따라 토양입자의 계면에서 에너지 준위 차가 감소하게 되어 흡착된 중금속은 쉽게 탈착하게 되는 데(이종열 외, 2004), 이 때 Cl⁻이 과잉으로 존재하게 되면 토양 입자 주변에 보호막을 형성하여 더 이상의 용해를 억제하고, Pb²⁺가 Cl⁻와 반응하여 용해도가 낮은 PbCl₂ 침전물을 형성하기 때문이다(Moutsatsou et al., 2006; Wei et al., 2005).

EDTA에 의해 중금속이 제거되는 현상은 EDTA와 중금속이 착화합물(coordination compound)을 형성하는 것으

로 토양에 흡착되어 있던 중금속이 EDTA와 반응하여 EDTA내의 H⁺가 빠져나오고 나머지 기는 오염물질과 결합하는 형태이다. 이는 coordination number가 6으로 알려진 납이 6개의 리간드(ligand)를 제공하는 EDTA와 결합하는 화학양론적 반응으로 매우 안정된 착화합물을 형성하기 때문인데(김철성, 1999; Kim, 2003), 본 실험결과에서도 세척용액의 농도가 증가할수록 제거율의 증가가 HCl에 비해 뚜렷하게 나타났으며 특히 HCl보다 낮은 주입농도에서도 우수한 효과를 보였다.

3.3. 세척제별 주입농도에 따른 영향

위 실험결과를 바탕으로 세척제별 효율이 가장 좋은 조건인 0.1 M HCl과 0.1 M EDTA를 적용하여 교반강도에 따른 시간별 용출특성을 알아보기 위한 실험결과를 Elovich model에 의해 나타내었다(Fig. 2). 금속들의 불균질한 확산성을 측정하는 Elovich model은 kinetic 모델 중 가장 높은 결정계수(Coefficient of determination)와 낮은 표준오차를 가지고 있으며(Min jang., et al), Elovich equation은 다음과 같이 1차 선형으로 표현된다.

$$q = A + B \ln(t) \tag{Eq. 1}$$

이 식에서 q는 특정시간 t에서의 농도(mg/kg), t는 반응시간, A와 B는 상수로 각각 절편과 기울기를 나타낸다. 세척제로 HCl과 EDTA를 사용한 경우 모두 교반강도의 증

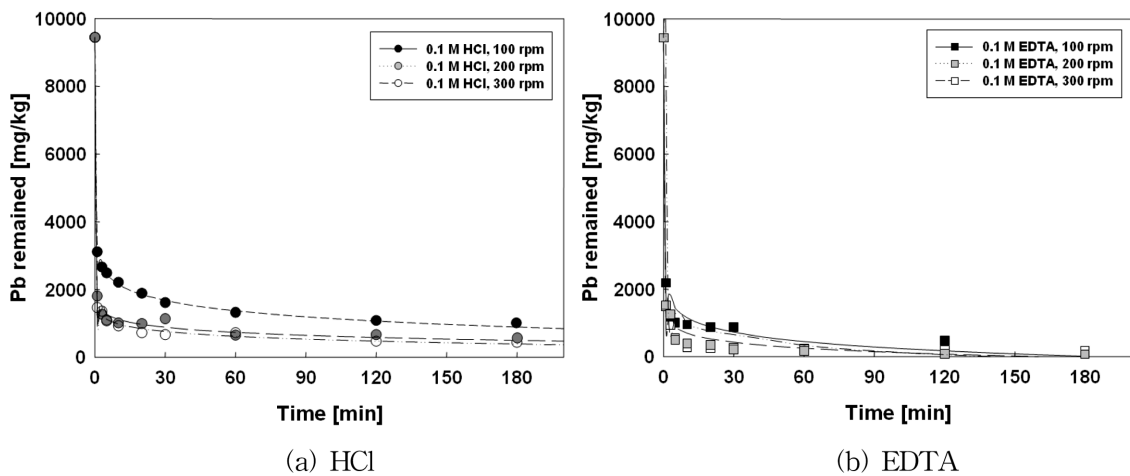


Fig. 2. Kinetics of lead extraction for HCl and EDTA with the different mixing strength along with curves obtained from Elovich model.

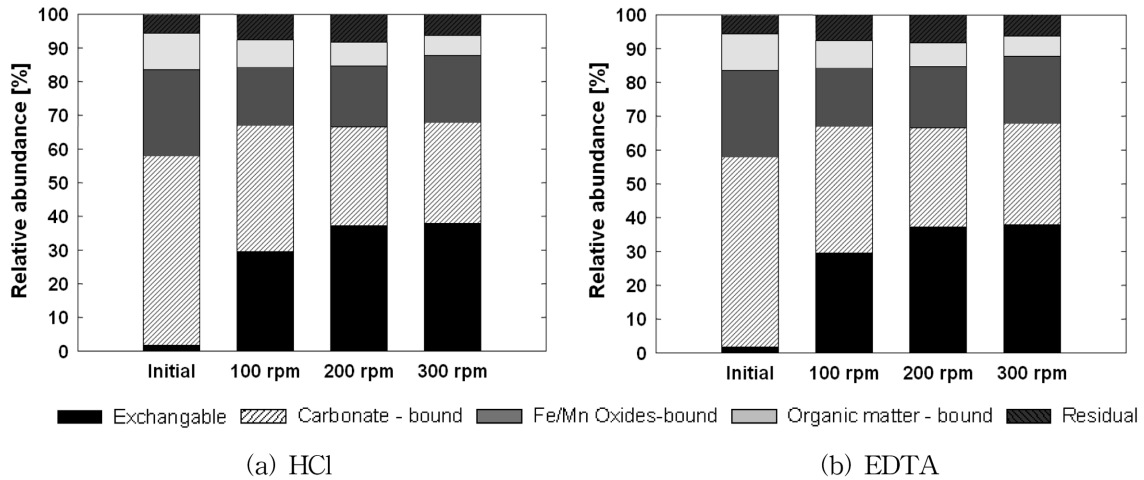


Fig. 3. Fractionation-specific percentages of lead in soils as a function of mixing strength after washing for 60 min.

Table 4. Lead distributions of washed soils as function of mixing strength

Reagent	Mixing strength [rpm]	EX [mg/kg]	CB [mg/kg]	OX [mg/kg]	OM [mg/kg]	RS [mg/kg]	Total conc. [mg/kg]
0.1 M HCl	Initial	72.5	2404.1	1102.3	460.6	240.6	4280.1
	100	311.2	391.1	182.8	85.2	79.4	1050
	200	194.7	152.1	94	36.3	43.5	520.7
	300	232.9	182.8	122.8	36.1	38.7	613.1
0.1 M EDTA	100	21.6	199.1	103.8	38.9	36.2	399.7
	200	33.9	34.9	70.5	46.1	33.9	219.5
	300	32.5	27.6	77.6	27.0	26.1	190.9

가와 비례하여 토양내 제거율이 증가하였으나 200 rpm과 300 rpm에서의 제거율은 유사한 것으로 나타났으며, 반응 초기 10분 이내에 대부분의 용출이 이뤄지고 60분 경과 후에는 제거율 증가가 둔화되었다. HCl의 경우 100 rpm 조건에서 초기 10분 동안 75%가 제거되었으며 200 rpm 과 300 rpm에서 각각 89, 90%의 납이 제거되어 최종 180분에서는 90~95%의 제거율을 보였다. EDTA는 100 rpm 조건에서 10분 동안 90%가 제거되었으며 200 rpm과 300 rpm에서 각각 95, 97%의 납이 제거되어 최종 180분에서는 98~99%가 제거되었다(Fig. 2).

제거율 향상이 둔화가 시작되는 토양세척 후 60분이 경과한 토양에 대하여 중금속의 분포형태 변화를 관찰하기 위하여 연속추출을 수행하였다. 연속추출실험 결과(Fig. 3, Table 4), HCl과 EDTA를 이용한 실험 모두 2, 3, 4 단계인 CB, OX, OM fraction이 감소하여 CB는 약 83~93%, OX는 약 83~91%, OM은 약 81~94%가 제거되었고, 특히 CB fraction의 양이 큰 폭으로 감소한 것을 알 수 있다. 이와 함께 HCl의 경우 EX fraction의 양과

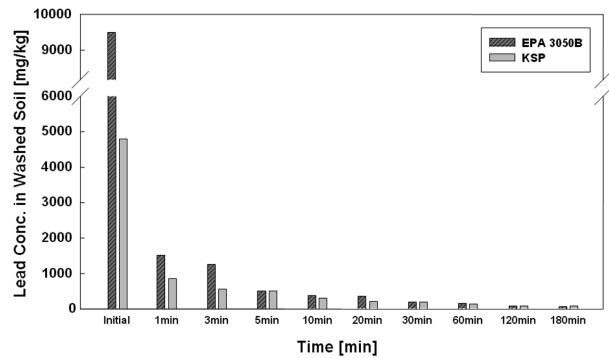


Fig. 4. Comparisons of lead concentration in washed soils by KST and EPA Method 3050B.

비율이 증가한 것을 확인할 수 있는데, 이는 CB, OX, OM fraction이 토양세척에 의해 용출되기 쉬운 형태로 이동하여 토양에 잔류하기 때문이다(김정대, 2002). 반면 EDTA의 경우 EX fraction이 증가하지 않은 것은 용출된 납이 EDTA와 complexation을 일으키며 침전되어 용출되기 쉬운 형태로 이동하지 않았기 때문으로 판단된다.

또한 가장 제거효율이 가장 좋았던 0.1 M EDTA, 300 rpm 조건에서 시간에 따른 토양내 잔류 납 농도를 토양 오염공정시험법과 EPA Method 3050B로 분석한 결과 (Fig. 4), 세척실험을 수행하기 전 대상시료의 EPA Method 3050B 결과값이 토양오염공정시험법의 결과값 보다 약 2 배 정도 높았으나 시간이 지날수록 전체적인 농도 감소와 함께 두 용출방법의 농도차도 감소하여 30분 이후부터는 거의 비슷한 값을 나타내었다.

4. 결 론

인공오염토양은 금속의 존재 형태가 단순하며 이온교환에 의한 중금속의 선택적 흡착으로 토양에서 액상으로 오염물질의 추출과 이동을 촉진시킨다. 하지만 실제 오염토양의 경우 오염물질과의 결합강도가 크고 다양한 종류의 금속과 종(speciation)을 포함하고 있어 용매와의 복잡한 상호작용이 이뤄지게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제 납 탄알로 오염된 사격장 토양에 대해 토양세척기법을 적용하기위한 lab-scale 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 납탄알을 제거하였음에도 초기농도가 4803.5 mg/kg (토양오염공정시험법)으로 높은 것은 강우 및 물리·화학적 풍화작용 등으로 인해 토양입자 및 유기물에 흡착된 상태로 존재하거나 부식된 납 탄알이 미립자 상(phase)으로 존재하기 때문으로 판단된다. CB(56%) > OX(26%) > OM(10%) > RS(5%) > EX(1%)의 순으로 나타난 연속추출 결과는 약산성 조건에서 납의 이동성이 증대될 것으로 예상되며 외부유입에 의해 오염된 것임을 보여주는 결과이다.

(2) HCl과 EDTA 주입농도에 따른 세척효율은 HCl의 주입농도가 증가함에 따라 제거율은 로그적(logarithmic)으로 나타났으며, 0.1 M 이상에서 거의 일정하게 약 90% 정도의 제거율을 나타냈다. EDTA는 제거율이 주입농도와 비례하여 증가하였고, 제거율의 차이가 HCl에 비해 뚜렷하게 나타났으며 HCl보다 적은 양의 주입으로도 높은 제거율을 보였다.

(3) 교반강도에 따른 시간별 세척효율을 분석한 결과, HCl과 EDTA를 사용한 경우 모두 교반강도의 증가와 비례하여 토양내 제거율이 증가하였으나 200 rpm과 300 rpm에서의 제거율은 유사한 것으로 나타났으며, 반응 초기 10분 이내에 대부분의 용출이 이뤄지고 60분 경과 후에는 제거율 증가가 둔화되어 세척시간 180분에서 HCl의 경우 90~95%, EDTA는 98~99%가 제거되었다.

(4) 연속추출실험 결과, HCl과 EDTA 적용시 CB,

OX, OM fraction이 감소하여 CB는 약 83~93%, OX는 약 83~91%, OM은 약 81~94%가 제거되었다. 이와 반대로 HCl의 경우 EX fraction의 양과 비율이 증가하였고, EDTA는 납과 complexation을 일으켜 침전되어 상대적 비율은 증가하였으나 농도는 감소하였다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술교육 혁신지원사업단” 및 “2007년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원”에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김강홍 최상일, 2005, 비소오염토양의 정화를 위한 field 규모 연속 토양세척공정의 효율성 평가, 대한상하수도학회 한국물환경학회 2005공동 추계학술발표회 논문집, p. 160.

김정대, 2002, Soil washing을 이용한 폐광산에서 발생하는 광미 및 주변오염토양처리, 한양대학교 박사학위논문.

김철성, 1999, EDTA를 사용한 납 오염 토양에서의 효율적인 납 추출, 한국토양환경학회지, 4(1) 3-11.

이종열, 김용수, 권영호, 공성호, 박신영, 이창환, 성혜련, 2004, EDTA와 붕산 혼합용출제를 이용한 중금속으로 오염된 토양의 처리에 관한 연구(I): 납, 한국지하수토양환경학회지, 9(4), 1-7.

이중환, 임경호, 박지혜, 박홍석, 2007, 산업폐기물로부터 중금속의 단순 용출과 연속추출, 한국폐기물학회지, 24(2), 116-124.

이한국, 이동훈, 2004, 도시고형폐기물 소각 바닥재 용출액의 납, 구리, 카드뮴 및 크롬 화합물 평가, 한국폐기물학회지, 21(8), 791-801.

정승우, 2003, 토양오염물질의 물리·화학적 특성과 이동성에 따른 환경영향평가 방안, 한국정책평가연구원.

정의덕, 원미숙, 강신원, 신학기, 백우현, 2000, 유기산을 이용한 납 오염토양의 복원에 관한 연구, 한국환경과학회지, 9(3), 437-441.

한상재, 김병일, 김수삼, 2004, 세척제 종류와 농도에 따른 자연 토(사격장토)의 동전기 정화 특성, 대한환경공학회지, 26(4), 467-474.

황선숙, 이노섭, 남궁완, 2005, 토양세척기법을 이용한 중금속 오염토양 처리에서 중금속 추출특성, 대한환경공학회지, 27(8), 1072-1080.

황선숙, 박성수, 남궁완, 2004, 토양세척기법을 이용한 중금속 오염토양 처리의 동역학적 해석, 대한환경공학회지, 26(11), 1181-1190.

황정성, 2005, 비소오염토양에 대한 알칼리 세척기법의 적용성 연구, 광운대학교 석사학위논문.

환경부, 2002, 토양오염공정시험법.

Moutsatsou, A., Gregou, M., Matsas, D., and Protonotarios, V., 2006, Washing as a remediation technology applicable in soils heavily polluted by mining-metallurgical activities, *Chemosphere*, **63**, 1632-1640.

Campanella, L., Ferri, T., and Petronio, B.M., 1989, Effect of speciation in sludge on the adsorption of leached metals from soils, *The Science of the Total Environment*, **79**(3), 223-231.

Campanella, L., D'Orazio, D., Petronio, B.M., and Pietrantonio, E., 1995, Proposal for a metal speciation study in sediments, *Analytica Chimica Acta* 309, p. 387-393.

Liu, R. and Zhao, R., 2007, Reducing leachability and bioaccessibility of lead in soils using a new class of stabilized iron phosphate nanoparticles, *Water Research*, **41**, 2491-2502.

Jang, M., Hwang, J.S., and Choi, S.I., 2007, Sequential soil washing techniques using hydrochloric acid and sodium hydrox-

ide for remediating arsenic-contaminated soils in abandoned iron-ore mines, *Chemosphere*, **66**, 8-17.

Jang, M., Hwang, J.S., and Choi, S.I., 2005, Remediation of arsenic-contaminated soils and washing effluents, *Chemosphere*, **60**, 344-354.

Mulligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F., 2001, Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation, *Eng. Geol.*, **69**, 193-207.

Sparks, D.L., 1995, Environmental Soil Chemistry, Academic Press Inc., p. 95-99.

Tapan, A. and Singh, M.V., 2003, Sorption of Characteristics of Lead and Cadmium in Some Soils in India, *Geoderma*, **114**, 81-92.

The the Work Group of the Conference of the (Laender) Ministers for the Environment, 1998. Soil contamination at shooting ranges.