

연속 안정화 공법을 이용한 중금속 오염 농경지 토양 안정화 처리를 위한 Column 실험 연구

박동혁¹ · 조윤철² · 최상일^{1*}

¹광운대학교 환경공학과, ²광운대학교 녹색환경에너지대학원

The Laboratory Column Examination of Stabilization for Agricultural Land Contaminated by Heavy Metals using Sequential Stabilization

Dong-Hyeok Park¹ · Yunchul Cho² · Sang-II Choi^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

²Graduate School of Green Environment and Energy

ABSTRACT

In order to treat paddy soils contaminated by Pb, Cd, and As near the abandoned mine, H₂PO₄ was used for stabilization of Pb (PO₄/Pb mole ratio of 2/1). In addition, CaCO₃ and FeSO₄ were used as stabilizers for treating Cd and As (2% w/w), respectively. Leaching tests were conducted with artificial rain in the column to assess the heavy metal stabilization efficiency. The mass of heavy metals in the effluents passed through the columns were analyzed. The remaining heavy metals in the soils were also analyzed as Korean soil standard method, phytoavailability test and sequential extraction test. Lead in the effluent was not detected when H₂PO₄ was used as a stabilizer. This result suggests that H₂PO₄ is efficient for Pb stabilization. In addition results of sequential extraction scheme suggest that heavy metals are present as residual forms which is not easily extracted.

Key words : Mobility, Heavy metal, Phytoavailability, Stabilization

1. 서 론

우리나라의 광업은 80년대 후반부터 급속히 쇠퇴해 왔으며, 많은 수의 광산이 휴·폐광산으로 방치되었다. 이러한 휴·폐광산의 처리되지 않은 광산찌꺼기나 광재, 퇴적물, 침출수, 유출수 등의 광산활동에 의한 폐기물에 함유된 유해 중금속의 농도는 우리나라의 토양환경보전법이나 수질환경보전법의 기준보다 높은 것으로 보고되며 있으며, 광산폐기물에 의한 농경지 오염 가능성은 우려할만한 수준으로 알려져 왔으며, 광산활동에 의해 발생된 유해 중금속과 같은 오염물질과 휴·폐광산이 된 후 광산찌꺼기 폐재장, 폐갱도, 폐석 등에서 발생하는 침출수와 용출되는 유해 중금속 등은 토양 및 수계로 이동하여 하천, 토양 및 농경지를 오염시키고 있다(김휘중 외 2003).

국내 총 광산 개수는 2,006개로 이중 1,276개는 폐광되었다. 전체 금속광산과 석탄 광산 중 90% 이상이 경제성 및 채산성 문제로 개발이 어려워 휴·폐광된 적절한 환경복원 시설이 설치되지 않은 상태로 자연 방치된 채 지속적인 환경오염을 유발하고 있다(권현호 외, 2007).

광산 활동에 의한 중금속의 토양오염에 대한 연구는 다양한 방법이 연구되어 왔으며 주로 광산주변 광미, 하상 퇴적물, 토양에서의 중금속 오염과 분산 특성, 광산 주변 토양에서 재배되는 농작물의 중금속 흡수와 생태계에 미치는 영향 등이 이뤄져왔으나 경제성, 효율성, 현장 적용성 등을 고려한 효과적인 기술개발을 위한 연구는 부족한 실정이다. 토양세척법(soil washing)이 중금속 오염토양을 정화하는데 있어 효과적이나 경제성이 낮고 토양입자가

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2010. 5. 13 심사일 : 2010. 5. 26 게재승인일 : 2010. 7. 6
질의 및 토의 : 2010. 10. 31 까지

미세한 농경지 같은 토양의 경우 적용하기가 어려울 뿐만 아니라, 광범위한 오염부지의 오염토양을 굴착처리(excavation)한다는 것은 현실적으로 불가능하다.

또한 토양세정법(soil flushing)의 경우 다단계 공정이 필요하며 침출액에 의한 2차 오염이 우려된다. 최근 연구가 진행되고 있는 동전기법(electrokinetics) 및 식물정화법(phytoremediation)은 현장적용과 관련한 기술발전이 요원하여 처리하는 비용이 비교적 많이 들어 현재 오염농경지는 오염되지 않은 토양을 혼합하여 토양 중 오염물의 농도를 희석하는 객토작업을 실시하거나 석회비료 등을 살포하고 있으며, 오염정도가 심각한 경우에는 휴경조치를 취하고 있다.

원위치 안정화기법은 오염물질이 토양으로부터 직접적으로 제거되지는 않지만, 오염물질을 화학적으로 유동성, 용해성, 독성이 가장 낮은 형태로 변환시켜 잠재적 위해성을 감소시키는 기법으로 안정화 반응물질과 토양 내 오염물질 상호간의 산화-환원, 중화, 침전, 복합체(complex) 및 이온교환 등의 반응으로 오염물질의 용해도를 감소시킴으로써 광범위한 저 농도의 중금속 오염토양을 처리하는데 여타 오염토양 정화기술에 비하여 비용-효율적인 측면에서 매우 효과적이며 전략적인 기술로 인정받고 있다(환경부, 2007).

본 연구에서는 기존 회분식 실험의 연구결과(이은기 · 최상일, 2007)를 바탕으로 H_3PO_4 (phosphoric acid)을 이용하여 납을 안정화 한 후, 카드뮴과 비소로 오염된 토양을 추가적인 안정화물질인 $CaCO_3$ 와 $FeSO_4$ 를 이용하여 복합 중금속 오염토양에 대한 경제적이고 안정한 원위치 안정화처리 기술을 개발하는 것을 목표로 하였으며, 이에 대한 column 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1. 대상시료 및 특성

2.1.1. 대상 시료

연구에 사용된 시료는 충청북도에 위치한 문백 폐광산 주변 농토양을 대상시료로 선정하였다. 시료는 농토양 5개 지점에 대해 표토(0~20 cm)를 채취한 뒤 풍건시켜

2.00 mm체를 통과한 토양을 균일하게 혼합하였다. 오염물질의 초기농도는 토양오염공정시험법을 따라 100 mL 삼각플라스틱에 토양 10 g과 납, 카드뮴의 경우 0.1 N HCl, 비소의 경우 1 N HCl 50 mL를 넣어 항온수평진탕기에서 1시간 동안 진탕하고 여과지(5B, Toyo Roshi Kaisha)로 여과한 후 여과액을 ICP-OES(Perkin Elmer Optima 2000 DV, USA)를 이용하여 분석하였다. 대상지역 토양의 중금속 오염농도는 토양오염 우려기준을 초과하였다(Table 1).

2.1.2. 안정화 처리

대상 시료에서 가장 높은 농도를 차지하는 납을 저감하기 위하여, 높은 안정화 효율을 나타낸 H_3PO_4 로 1차적으로 안정화 처리를 하였다. 회분식 연구결과에서 PO_4/Pb 몰비를 2로 하여 H_3PO_4 를 적용하는 것이 최적 조건인 것으로 판단되었으므로(이은기 · 최상일, 2007) 대상시료를 PO_4/Pb 몰비를 2로 하여 증류수 70 mL에 H_3PO_4 를 용해시켜 대상시료 100 g과 혼합한 뒤 실온에서 24시간 동안 반응시켜 시료 내 Pb를 안정화 하였다.

H_3PO_4 를 이용하여 1차적으로 안정화된 토양은 다시 각각의 조건에 따라 추가적으로 안정화를 진행하였다. 일반적으로 H_3PO_4 로 안정화된 토양은 납은 확실히 저감되나, pH가 낮아져 결과적으로 토양의 산성화가 진행되어 다른 중금속이 용출되게 된다. 따라서 대상 토양의 산성도를 중화시키고, 중금속의 흡착을 증진시키기 위하여 추가적인 안정화 물질을 주입하였다(Kumpiene et al., 2007). 이전 연구를 통하여 산성화된 토양으로 인해 용출된 카드뮴의 안정화와 pH의 중화를 위하여 $CaCO_3$ 를 선정하였으며, 비소의 안정화를 위하여 $FeSO_4$ 를 선정하였으며, 각각의 최적 효율은 2%(w/w)로 알려졌다(이은기 · 최상일, 2007). 따라서 동일한 조건으로 안정화제를 적용하였으며, 각 column별 안정화제 주입 현황은 다음 Table 2와 같다.

2.2. Column 실험 방법

실험을 위해 준비된 column은 높이 20 cm, 직경 5 cm의 원통형으로 제작하였다. 각 column 입구에는 GF/B(whatman, pore size : 1 μ m) 필터를 두었으며 2 cm 정도 두께로 위아래에 세척한 굵은 모래를 넣어 시료 토양의

Table 1. Concentrations of metals in the contaminated site [mg/kg]

Result	Element	Cd	Pb	As
Concentration		2.14	144.18	11.52
Soil Contamination Warning Standard		1.5	100	6

Table 2. Operating conditions of column studies

	Stabilizer			Control
	H ₃ PO ₄ (PO ₄ /Pb=2)	FeSO ₄ (w/w, 2%)	CaCO ₃ (w/w, 2%)	
Column 1	-	-	-	Control
Column 2	○	-	-	
Column 3	○	○	-	
Column 4	○	-	○	
Column 5	○	○	○	

Note : "○" applied, "-" not applied

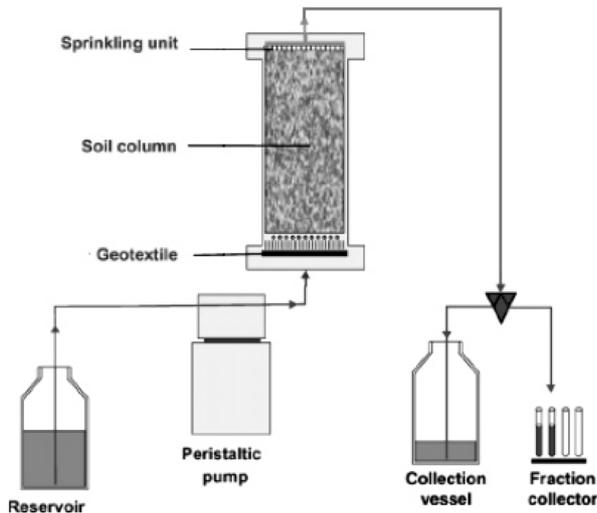


Fig. 1. Construction of a column test.

유실을 막고 tube(Tygon®)의 막힘을 방지하였다. 연동 펌프를 이용하여 상향류로 평균 1.1 ml/min의 유량으로 pH 4.8 증류수를 주입하였다. pH는 HCl과 NaOH의 희석수를 사용해서 조절하였다. pH 4.8은 우리나라 평균 경우의 평균 pH이다(환경부, 2006). Column 장치의 순서는 유입수 저장통(reservoir), 연동 펌프(peristaltic pump), column, collection vessel 로 구성되었다(Fig. 1). 30일 동안 매일 지속적으로 각각의 column으로부터 유출된 용액을 부피와 pH를 적고 일정량을 채수하여 분석하였다.

2.3. 안정화 효율 평가 방법

2.3.1. Phytoavailability Test

30여 일간의 column 실험이 끝난 후 각각의 column내 토양의 중금속의 식물이용가능성(phytoavailability)을 평가하기 위한 용출실험으로 납과 카드뮴의 경우 0.02M EDTA와 1N CH₃COONH₄ 로 구성된 pH 7.0의 용출액을 사용하여 토양 5g과 용출액 50 ml를 100 ml 삼각플라스크에 넣고 100 rpm 조건에서 1시간 동안 진탕하였다.

비소의 경우에는 NaHCO₃ 용출법을 이용하여 평가하였다. 토양 2.5 g에 0.5M NaHCO₃ 용액을 1N NaOH로 pH를 8.5로 조정 한 용출액 50 ml를 100 ml 삼각플라스크에 넣고 100 rpm 조건에서 1시간 동안 진탕하였다(Thomas, 1982). 진탕액은 여과지(5B, Toyo Roshi Kaisha)로 여과한 후 여과액을 ICP-OES로 분석하였고, 식 (1)을 사용하여 평가하였다. 식 (1)에서 (M)은 안정화 후 용출이 가능한 중금속의 농도이며(M_c)는 안정화 처리를 하지 않은 토양의 용출가능한 중금속 농도를 나타낸다.

$$\text{Phytoavailability} = \frac{\text{Extractable fraction in treated soil (M)}}{\text{Extractable fraction in the control (M}_c\text{)}} \quad (1)$$

2.3.2. 토양연속추출

토양 내 중금속의 이동성은 토양 내 존재형태와 분포특성에 크게 영향을 받는다(Tessier et al., 1979). Column Test가 끝난 각각의 토양의 중금속의 존재형태와 분포특성을 알아보기 위해 각 column별로 토양을 자연건조시킨 후 연속추출을 실행하였다. 토양 내 중금속은 존재하는 형태 결합력의 세기에 따라 다음의 5가지 형태로 분류할 수 있다.

- ① Exchangable(acidic phase): 치환성 중금속으로 쉽게 용해될 수 있는 형태이며 자연계에서 주변의 식생 및 지하수에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 중금속의 형태
- ② Carbonate-bound(acidic phase): Carbonate 결합형태의 중금속으로 토양 내 이온의 변화나 산성의 pH 조건에서 쉽게 추출 가능한 중금속의 형태
- ③ Fe/Mn oxides-bound(reducible phase): 철 산화물이나 망간 산화물에 결합된 형태의 중금속으로 토양 입자 사이에 작은 덩어리나 점착된 형태 또는 단순히 토양입자에 둘러 싸여진 형태로 자연계에서 환원조건에 의해 열역학적으로 불안정한 형태의 중금속
- ④ Organic matter-bound(oxidizable phase): 다양한 형태의 유기물과 결합된 형태의 산화조건에서 유기물의

Table 3. Experimental conditions for sequential extraction of Pb, Cd from soils

Step	Extraction procedure	Fraction
1	1M NH_4NO_3 , pH 7.0 (0.5 h)	Exchangeable (EX)
2	1M Na-acetate, pH 5.0 (6 h)	Carbonate-bound (CB)
3	0.04M hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid 6h at 95°C in water bath 0.01M HNO_3 , 30% H_2O_2 , at 85°C in water bath (5 h)	Fe/Mn oxides-bound (OX)
4	30% H_2O_2 at 85°C in water bath (1 h) 1M NH_4NO_3 shaking at room temperature (10 min)	Organic matter-bound (OM)
5	4M HNO_3 at 80°C in water bath (16 h)	Residual (RS)

분해에 의해 용해도가 증가되는 중금속의 형태(Hartley et al., 2004).

⑤ Residual(residual phase): 토양입자의 결정구조 내에 존재하는 형태의 중금속으로 자연계에서는 추출이 불가능한 형태의 중금속.

다양한 형태의 중금속 중 수용성 중금속과 치환성 및 carbonate 결합태 중금속은 토양 내에서 결합력이 약하고 이동성이 높아 식물에 흡수되기 쉬운 형태의 중금속(bioavailable fraction)들이다. 나머지 Fe, Mn oxide 결합태(reducible phase), 유기물 결합태(oxidizable phase), 광물 내 결합태 중금속(residual phase)들은 토양 내 단단하게 결합된 형태로 이동성이 낮아 식물에 흡수되기 어려운 형태의 중금속(non-bioavailable fraction)으로 분류된다(Ma et al., 1993).

본 연구에서는 대상시료 내 중금속의 존재 특성 및 토양과의 결합형태를 파악하고, 안정화 처리 전·후에 중금속 종(speciation)의 변화를 관찰하기 위하여 Tessier et al.(1979)에 의하여 개발된 연속추출법을 보완한 5단계 토양연속추출법을 적용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. Column 통과 유출수의 중금속 함량

매일 각각의 column을 통과한 유출수의 일정량을 취한 후 질산(HNO_3)을 가하여 pH 1 이하로 하여 15 ml 팔콘 튜브에 채수한 뒤, ICP-OES(Perkin-Elmer Optima 2000 DV, USA) 로 분석하였다. 각 조건별 중금속의 용출 정도를 아래 Fig. 2, 3 및 4에 나타내었다. 납의 경우에는 미처리 토양에서 지속적으로 납이 용출되는데 반하여, 인산으로 처리한 대다수의 토양에서 용출이 되지 않거나 미량으로 용출되었다. 이는 선행 연구 결과에서 입증된 것으로 인산과 납의 불용성화합물이 생성되어 산성강우 조건에서도 용출이 되지 않음을 나타낸다(이은기 · 최상일, 2007). 카드뮴의 경우 납과 비슷한 성향을 보였으나 인산

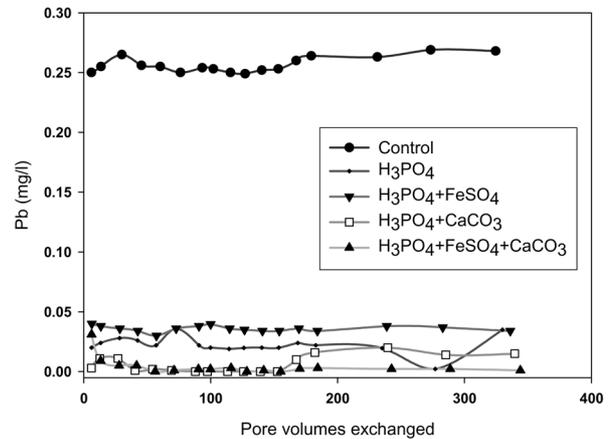


Fig. 2. Lead concentration in the effluents of the control and treated soil columns.

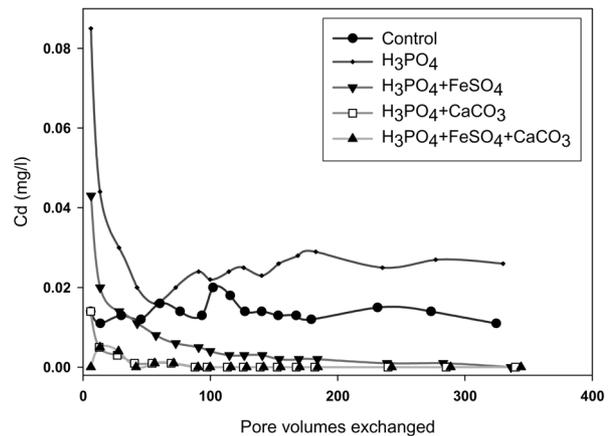


Fig. 3. Cadmium concentration in the effluent of the control and treated soil columns.

으로만 처리한 경우에는 미처리 토양보다 오히려 카드뮴이 용출되는 것으로 나타났다. 이는 인산이 주입되면서 pH가 낮아져 토양 내 잔존하였던 카드뮴이 용출이 쉽게 된 것으로 보인다. 이에 반하여 추가적 안정화물질을 넣은 세 가지 조건(column 3, 4, 5)에서는 카드뮴의 용출이 적거나 없어 효과적으로 카드뮴이 용출이 되지 않음을 알

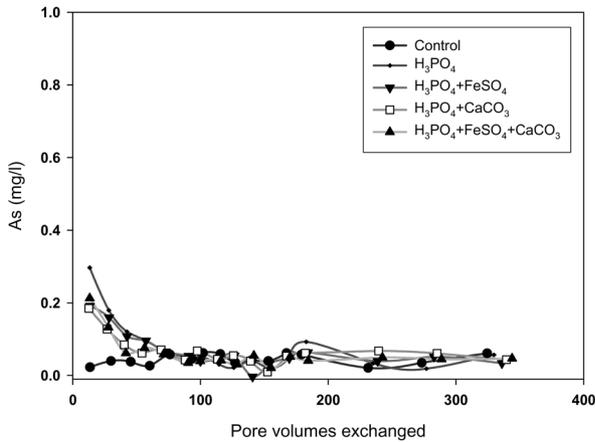


Fig. 4. Arsenic concentration in the effluent of the control and treated soil columns.

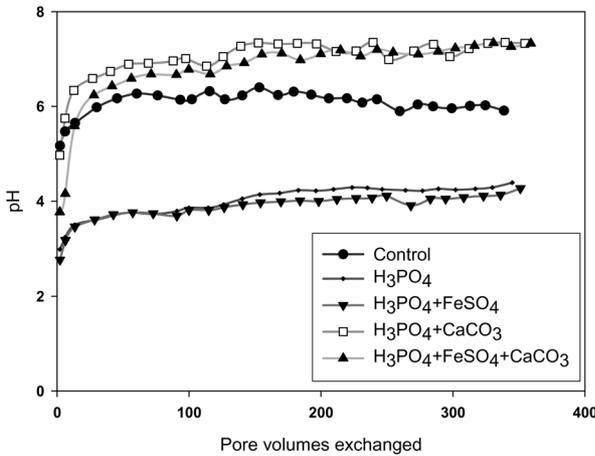


Fig. 5. pH-values in the effluent of the control and treated soil columns.

수 있다. 비소의 용출정도를 나타낸 Fig. 4를 보면, 대다수의 경우 초기에 용출이 한꺼번에 되었다가 얼마 지나지 않아 거의 용출이 되지 않거나 용출되지 않음을 알 수 있다.

3.2. 유출수의 pH 변화

컬럼을 통과한 유출수에 관한 pH 변화를 Fig. 5로 나타내었다. 안정화제로 처리하지 않은 토양의 경우 유출수의 pH는 6에서 거의 변화가 없었으나, 인산으로만 처리한 토양과 인산처리 후 FeSO₄로만 처리한 토양의 pH의 경우 약 pH 4로 낮은 pH를 보였다. 인산처리 후 CaCO₃로 처리한 토양과 인산처리 후 FeSO₄와 CaCO₃로 연속적으로 복합 처리한 토양의 경우 산성강우 조건임에도 중성인 pH 7로 다가가임을 확인 할 수 있었다. 이는 안정화

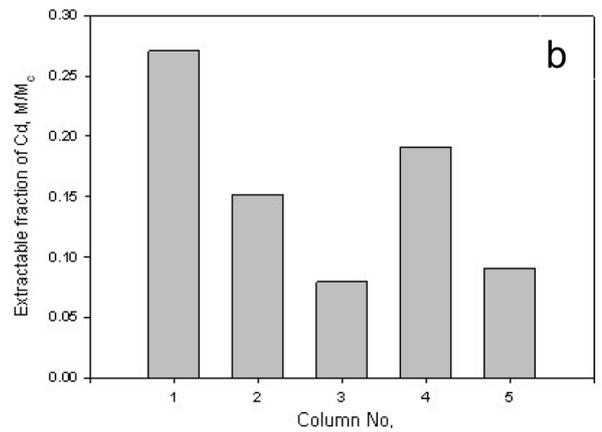
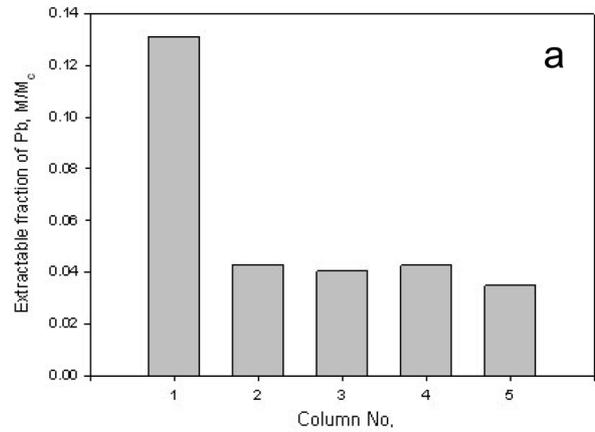


Fig. 6. Phytoavailability of (a)Pb and (b)Cd in the effluent of the control and treated soil columns (Column 1 - Control, Column 2 - H₃PO₄, Column 3 - H₃PO₄ + FeSO₄, Column 4 - H₃PO₄ + CaCO₃, Column 5 - H₃PO₄ + FeSO₄ + CaCO₃).

제인 CaCO₃가 토양 내 pH의 안정에도 효과적임을 나타낸다.

3.3. Phytoavailability Test

장기간동안 용출한 후 남은 column 내 토양을 이용하여 phytoavailability test를 수행하였으며 이에 대한 결과를 Fig. 6으로 나타내었다. 납의 경우 안정화제를 주입한 4가지 모든 경우가 phytoavailability가 10% 이하로 감소하였음을 보였으며, 카드뮴의 경우에는 FeSO₄를 주입한 안정화 조건에서 phytoavailability가 10% 이하로 감소함을 보였다. 두 가지 중금속 모두 안정화제로 처리하지 않은 토양의 phytoavailability에 비해 안정화제를 주입한 토양의 phytoavailability가 현저히 낮게 감소한 것을 알 수 있다(Spiller et al., 2007).

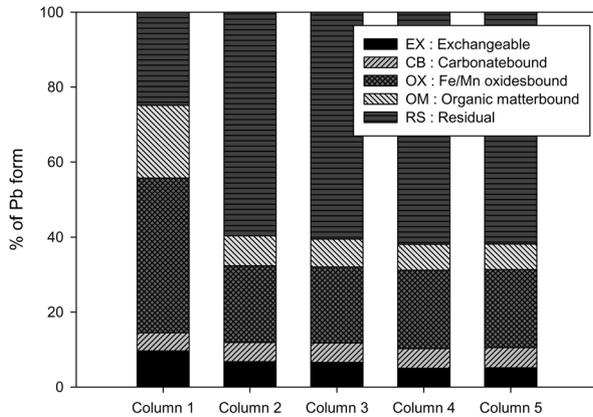


Fig. 7. Forms of Pb in the soil samples. (Column 1 - Control, Column 2 - H_3PO_4 , Column 3 - $H_3PO_4 + FeSO_4$, Column 4 - $H_3PO_4 + CaCO_3$, Column 5 - $H_3PO_4 + FeSO_4 + CaCO_3$).

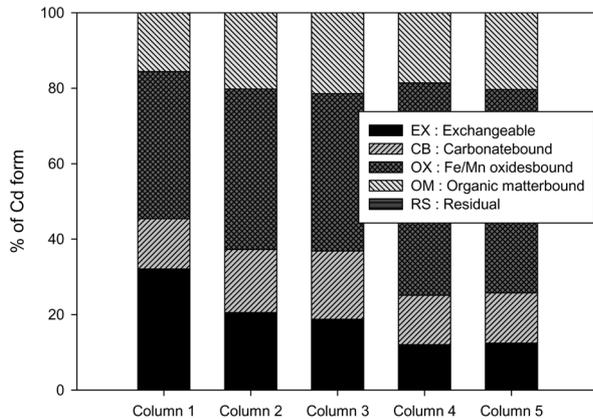


Fig. 8. Forms of Cd in the soil samples. (Column 1 - Control, Column 2 - H_3PO_4 , Column 3 - $H_3PO_4 + FeSO_4$, Column 4 - $H_3PO_4 + CaCO_3$, Column 5 - $H_3PO_4 + FeSO_4 + CaCO_3$).

3.4. 토양연속추출 시험

장시간의 걸친 column 토양의 중금속의 존재 특성 및 토양과의 결합형태를 파악하고자 다양한 추출용매를 이용하는 5단계 연속추출법(sequential extraction procedure)을 30일 기간 동안 column테스트를 진행한 후 column 내 토양을 이용하여 분석하였다.

연속추출법은 오염토양 내 중금속의 안정화 효율을 평가하는데 효과적인 분석방법으로써, 연속추출의 1~4단계(exchangeable, carbonate, Fe/Mn oxides, organic fraction)가 5단계(residual) 보다 생물학적 이용도가 높다고 가정하면, 중금속 오염토양의 *in-situ* 안정화처리는 1~4단계(nonresidual)에서 5단계(residual)로 중금속의 존재형태가 전환될수록 더욱 효과적인 방법으로 평가될 수 있다(Liu et al., 2007). 안정화제로 처리하지 않은 토양에서의 납의

분포는 $OX(41.24\%) > RS(24.89\%) > OM(19.40\%) > EX(9.64\%) > CB(4.81\%)$ 순으로 존재하였으며 Column 5 조건에서의 납의 분포는 $RS(61.85\%) > OX(20.82\%) > OM(6.82\%) > CB(5.37\%) > EX(5.14\%)$ 순으로 존재하였다(Fig. 7).

카드뮴의 경우에는 안정화제를 처리한 토양이 안정화제 미처리 토양보다 쉽게 이용 가능한 1단계(EX)의 비율이 비교적 덜 이용 가능한 3, 4단계(OX) 물질로 변하여 카드뮴 또한 좀 더 용출이 힘든 형태로 변경되었음을 알 수 있다(Ma et al., 1993) (Fig. 8).

4. 결 론

복합 중금속 오염 토양에 대한 안정화물질 적용 토양의 안정화 효율을 평가하기 위하여 column 테스트를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) column을 통과한 유출수의 중금속 용출시험 결과, control은 지속적으로 일정량의 납이 용출되었으나, H_3PO_4 를 PO_4/Pb 몰비 2로 적용한 나머지 4개 column의 토양에서의 납의 용출은 0~0.05 mg/l로 거의 나타나지 않아 높은 안정화률을 보였으며 이중 column 5가 가장 좋은 안정화 효율을 보였다. 카드뮴의 경우 납과 비슷하였으나, H_3PO_4 를 PO_4/Pb 몰비 2로만 적용한 column 2의 경우, 토양의 산성도가 높아져 카드뮴이 용출되는 현상을 보였다. 그러나 추가적 안정화 물질을 넣어준 column 4, 5, 6의 경우 control에 비해 유출수 내 용출양이 현저히 감소하였다. 유출수 내 비소의 경우에는 모든 column 조건에서 초반에 일정량 용출 되었다가 용출되지 않는 현상을 보였다.

(2) 유출수의 pH 변화는, control의 유출 pH의 경우 6에 가깝게 기는데 반하여 $CaCO_3$ 를 넣지 않은 column 2, 3은 산성인 pH 4에 가깝게 다가갔으며, $CaCO_3$ 를 주입한 column 4, 5의 경우에는 중성인 pH 7에 다가갔다. 따라서 추가적인 안정화 물질의 주입이 필요할 것으로 판단된다.

(3) phytoavailability test의 분석 결과, H_3PO_4 의 안정화 작용으로 인하여 납의 경우 phytoavailability가 10% 이하로 감소하였음을 보였으며, 카드뮴의 경우 $FeSO_4$ 를 H_3PO_4 와 함께 주입한 안정화 조건에서 phytoavailability가 10% 이하로 감소함을 보였다.

(4) 장기간 용출 뒤 남은 column 내 토양을 이용해 분석한 토양연속추출 시험의 분석 결과, 납의 경우 control에서 Fe/Mn Oxide에서 Residual로 많이 바뀌었는데, 이

는 생물학적으로 이용도가 높은 Fe/Mn Oxide서 안정화 과정을 거쳐 재용출이 힘든 Residual로 변경된 것을 나타낸다. 카드뮴의 경우에도 생물학적으로 이용이 쉬운 1단계 형태에서 비교적 이용이 힘든 Fe/Mn oxides, organic fraction 형태로 많이 변형된 것을 알 수 있다. 특히 안정화제를 복합적으로 적용한 column 4, 5의 카드뮴의 변형율이 CaCO₃를 넣지 않은 column 2, 3에 비해 상대적으로 더 높은 것을 감안해 볼 때 안정화제를 복합 적용한 조건인 column 5의 조건이 적절하다고 판단된다.

(5) 현장토양의 불균일성 및 현장조건에 따라 안정화 공법의 효율은 상이할 수 있기 때문에 본 연구에서 도출된 최적의 안정화제 주입량을 근거로 현장오염토양을 처리시 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술교육 혁신지원사업단”과 “유해중금속오염부지정화기술개발연구단”의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

권현호, 심연식, 이진수, 김태혁, 김정아, 윤석호, 남광수, 2007, 광해의 원인과 방지대책, 광해방지기술, 1(1), 5-25.
김휘중, 양재의, 이재영, 최상일, 전상호, 2003, 폐광산지역 경작지 토양의 중금속 존재형태와 토양오염평가, 8(4), 53-63.

이은기, 최상일, 2007, 인산염을 이용한 휴·폐광산 주변 중금속 오염토양의 안정화처리에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회지, 12(6), 100-106.

환경부, 2002, 토양오염공정시험법.

환경부, 2006, 대기 환경연보 부록 08 (산성우).

환경부, 2007, 오염토양 정화기법 가이드라인.

Hartley, W., Edwards, R., and Lepp, N.W., 2004, Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated sils as evaluated by short- and long-term leaching tests, *Environmental Pollution*, 131, 495-504.

Kumpiene, J., Lagerkvist, A., and Maurice, C., 2007, Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments- A review, *Waste Management*, 28(1), 215-225.

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

Ma, Q.Y., Traina, S.J., Logan, T.J., and Ryan, J.A., 1993, In Situ Lead Immobilization by Apatite *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1803-1810.

Spuller, C., Weigand, H., and Marb, C., 2007, Trace metal stabilisation in a shooting range soil: Mobility and phytotoxicity, *Journal of Hazardous Materials*, 141, 378-387.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. *Anal. Chem.*, 51, 844-851.

Thomas, G.W., 1982, Exchangeable cations. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part II: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI, p. 159-165.