

토양내 중금속 및 유류 오염농도 저감을 위한 생화학적 기작의 효율성 평가

김만일¹ · 정교철^{2*} · 김을영³

¹한국수자원공사 댐·유역관리처, ²안동대학교 지구환경과학과, ³한국농어촌공사 환경지질처

Assessment of Biochemical Efficiency for the Reduction of Heavy Metal and Oil Contaminants in Contaminated Soils

Man-Il Kim¹, Gyo-Cheol Jeong^{2*}, and Eul-Young Kim³

¹Dam and Watershed Department, Korea Water Resources Corporation

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

³Office of Environmental Geology, Korea Rural Community & Agricultural Corporation

중금속 및 유류 오염토양 정화를 위해 효율적인 토양세척법과 공정 선정을 목적으로 최적의 오염정화 설계인자를 제시하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험 분석항목은 구리, 납, 아연을 포함하는 중금속 항목과 총석유계탄화수소 (TPH)인 유류 항목에 대해 흡광광도법(absorptiometric analysis), 기체크로마토그래피(gas chromatography)법을 이용하여 단계별로 분석하였다. 실험방법은 최적 세척용매(washing solution) 결정시험, 최적 세척시간(washing time) 도출시험, 최적 진탕비(dilution ratio) 결정시험 등을 통해 얻어진 결과를 토대로 계면활성제(surfactant) 첨가량별 중금속 용출영향 분석시험, 미생물 및 과산화수소 주입시험 순으로 실시하였다. 실험결과에서 세척용매인 염산 0.1 mole, 체류시간 1시간, 진탕비 1:3 조건에서 오염물질의 저감효과가 우수하게 나타났으며, 이들 조건을 적용하였을 때 1%의 계면활성제를 세척용매에 첨가하였을 경우 추가적인 오염물질의 농도저감 효과를 보이는 것으로 확인되었다. 또한 미생물과 과산화수소 주입에 따른 추가적인 TPH 농도 저감이 있는 것으로 파악되었다.

주요어 : 오염토양, 농도저감, 세척용매, 진탕비, 체류시간

With the aim of remediating soils contaminated by heavy metals and oil, experimental research was conducted to evaluate the optimal design factors for remediation in terms of efficient soil washing methods and processes. The experiments employed absorptiometric analysis and gas chromatography methods to reduce the concentration of heavy metals such as cooper (Cu), lead (Pb), and zinc (Zn), and total petroleum hydrocarbons (TPH) in contaminated soils. The experimental processes consisted of deciding on the washing solution, washing time, and dilution ratio for contaminated soils. A dissolution analysis of heavy metals was then performed by the addition of surfactant, based on the results of the decision experiments, and the injection processes of microbes and hydrogen peroxide were selected. The experimental results revealed that reduction effects in contaminated soils under the experimental conditions were most efficient with hydrochloric acid 0.1 mole, washing time 1 hour, and dilution ratio 1:3, individually. Additional reduction effects for heavy metals and TPH were found with the addition of a washing solution of 1% of surfactant. The addition of microbes and hydrogen peroxide caused a reduction in TPH concentration.

Key words : contaminated soil, concentration reduction, washing solution, washing time, dilution ratio

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

서 론

토양오염 방지를 위한 목적으로 OECD 국가들은 자국에 적합한 법률과 규정을 제정하여 시행하면서 토양오염지역에 대한 현장조사의 기준과 복원방법을 제시하고 있다. 국내의 경우도 1996년 1월 “토양환경보전법”을 제정하여 이를 근거로 토양오염 유발시설, 오염물질과 오염지역의 복원 등을 지속적으로 관리하고 있으며, 관리대상지역도 점차적으로 넓혀가고 있는 실정이다(Ministry of Environment, 2002).

토양을 오염시키는 중금속 및 독성원소들은 토양 내에서 자연적인 생분해가 이루어지는 것이 아니라 생태계에 장기적이고 지속적으로 잔류하는 특성을 가지고 있기 때문에 토양오염을 발생시키는 환경적인 문제를 야기시키고 있다(Moutsatsou et al., 2006; Yang and Lee, 2007).

토양오염은 크게 중금속에 의한 오염과 석유계 오염으로 구분된다. 중금속 오염은 차량정비에 사용하는 각종 약품과 금속연마 내지 제련과정에서 폐금속 성분 등이 토양으로 유입될 경우 발생되며, 석유계 오염은 디젤유를 연료로 사용하는 경우 디젤유의 보관 및 운송시 누유 내지 차량 정비 등에 사용하는 윤활유 등에 의해 토양오염이 발생되는 것으로 알려져 있다. 이로 인해 토양오염 뿐 아니라 장기적으로 지하수 오염을 발생시켜 오염된 지반을 정화하는데 막대한 경제적 비용과 노력이 필요한 것이 현실이다.

오염토양 복원기술은 기존의 환경오염 처리기술에 기반을 두고 적용되고 있기 때문에 오염부지의 지형 및 지질적 특성, 오염토양의 특성, 오염원의 종류에 따라 적용 형태가 매우 다양하다. 따라서 오염토양의 정화를 위해서는 오염물질의 종류, 오염범위, 오염정도, 오염부지의 특성을 충분히 파악하여야만 효과적인 오염토양의 정화가 가능하다(Kim and Nam, 2005; Kang et al., 2006; Kang et al., 2008; Lee et al., 2008; Ju et al., 2009).

이러한 여러 가지의 인위적 활동으로 인해 오염된 토양과 지하수를 정화할 수 있는 정화공법의 정화효율 검증 등을 위해 다양한 정화공법에 대한 실증실험의 필요성이 커지고 있다. 대표적인 정화공법 중에서 생물학적 정화기술은 생물자극법(bio-stimulation)과 생물증진법(bio-augmentation)으로 구분할 수 있다. 전자의 경우 토착 미생물 활성 촉진을 위해 영양염, 과산화수소, 온도, pH 조절을 통해 이루어지며, 후자의 경우 분해능이 우수한

미생물 내지 유전공학적으로 변형된 미생물을 첨가하는 방법이다(Huesemann, 1994; Jorgensen et al., 2000; Kang et al., 2006; Kim et al., 2008).

이 연구는 중금속 및 유류오염 토양의 정화를 위해 효율적인 토양세척법과 공정 선정을 목적으로 오염정화 설계인자를 제시하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 최적 세척용매(washing solution) 결정시험, 최적 세척시간(washing time) 도출시험, 최적 진탕비(dilution ratio) 결정시험 등을 통해 얻어진 결과를 토대로 계면활성제(surfactant) 첨가량별 중금속 용출영향 분석시험 등으로 실험이 이루어졌다. 또한 생물학적 정화기술을 토대로 토양오염 현황을 고려하여 토양오염 현장에 적용할 수 있도록 미생물 혼합과 과산화수소 주입을 통한 이들의 생화학 기작에 따른 오염농도 저감효율 특성도 함께 평가하였다.

연구방법

토양시료

토양시료는 토양오염 분석을 통해 정화기준을 초과하는 지점의 현장 토양을 선별하여 채취하였으며, 실험에 적합하도록 “토양오염공정시험법(Ministry of Environment, 2007)”에 근거하여 실시하였다. 미생물 주입을 통한 토양경작 실험에 사용된 토양시료의 무게는 3 kg 이상이 되도록 하였으며, 미생물 배합과 과산화수소 주입을 위한 추가적인 공정이 가능하도록 오염된 토양을 분류하여 실험에 사용하였다.

실험방법

계면활성제를 이용한 오염농도 저감

오염된 토양의 세척을 통해 현장 적용성 유무를 판단하고, 토양세척을 위한 최적 설계인자를 도출하기 위하여 실험실 조건하에서 실험의 목적에 부합되도록 “토양오염공정시험법”에 근거하여 실험방법을 선정하였다. 이 실험에서 도출하고자 하는 설계인자는 최적 세척용매(washing solution), 최적 세척시간(washing time), 최적 진탕비(dilution time), 최적 계면활성제 투입량, 미생물 및 과산화수소 주입에 관한 것이다. 오염토양을 대상으로 하는 설계인자는 Fig. 1에서 나타난 순서와 같다.

분석대상 항목은 현장 정밀조사시에 높은 농도로 검출된 구리(cooper, Cu), 납(lead, Pb), 아연(zinc, Zn) 등의 중금속 항목과 유류오염 항목 중 석유계탄화수소(total petroleum hydrocarbons, TPH)를 선정하였다.

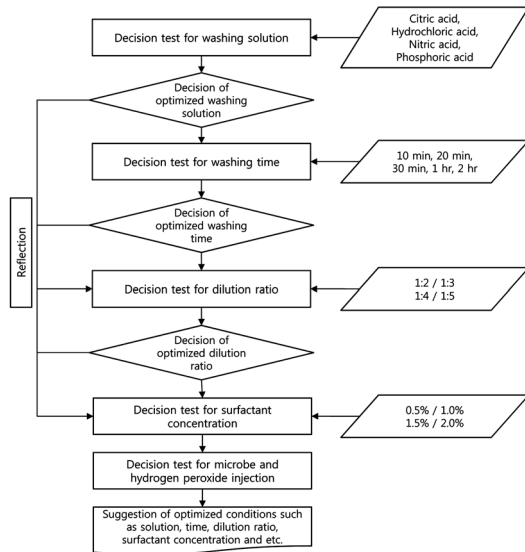


Fig. 1. Proof test flowchart of the soil washing method.

여기서, 중금속은 흡광광도법(absorptiometric analysis)을 통해 분석하였으며, TPH는 기체크로마토그래피(gas chromatography)를 이용하여 분석하였다.

이와 같은 실험조건을 반영하여 실험은 Step I에서 Step IV의 조건에 적합하도록 세척을 실시한 후 중금속과 TPH를 각각 분석할 수 있도록 설정하였다. 세척은 각 Step별 조건에 따라 진탕기를 이용하여 실시하였으며, 진탕이 끝난 후 거름종이로 토양만을 걸러내어 분석하였다.

이 실험을 위해 선별적인 실험 시료군은 미생물을 주입하지 않은 대조군, 미생물을 설계량만큼 주입한 실험군, 소량의 미생물을 주입한 실험군으로 각각 설정하였다. 미생물은 *Acinebacter Junii* 등으로 균수는 1.0E+9 CFU/g인 재래토종 유류분해 미생물을 이용하였다. 영향

물질은 glucose (10 g/l), ester extractor (3 g/l), K₂HPO₄ (1.5 g/l), NaH₂PO₄ (0.2 g/l), MgSO₄ (0.25 g/l), CaCl₂ (0.05 g/l), NaCl (0.5 g/l), NH₄NO₃ (1 g/l), MnSO₄ (0.05 g/l)를 사용하였다. 이들 시료분석은 암모니아성 질소, 유효인산, 유류분해 미생물 개체수, 함수율 및 TPH 농도를 각각 분석하였다.

실험기간은 30일로 한정하여 총 2단계로 구성하였으며, 1단계에서는 토양의 미생물과 영양분을 주입하고, 매일 경운(tilling)을 해주는 방식으로 토양경작을 실시하였다. 2단계는 1단계의 실험결과를 토대로 오염토양의 TPH 농도가 일정 수준이상 저감되지 않는 시점을 기준으로 과산화수소를 주입함으로써 오염토양에 대한 TPH 농도의 추가적인 저감효과를 분석하였다. 여기서 2단계 실험의 목적은 생물학적 처리공법과 화학적 산화공법의 연계적용에 대한 효율성을 함께 파악하기 위함이다.

미생물 주입을 통한 오염농도 저감

토양경작 실험에 사용된 토양시료에 대해 미생물 주입을 통한 오염농도 저감효과를 분석하였다. 3 kg 이상의 토양시료에 대해 미생물 배합과 과산화수소 주입을 위한 추가적인 공정이 가능하도록 오염토양을 재분류하였으며, 실험방법은 계면활성제를 이용하여 오염농도 저감에 적용된 것과 동일한 조건에서 실험이 진행되었다.

연구결과

계면활성제 적용 결과

Step I - 최적 세척용매 결정시험

실험에 사용된 세척용매는 Table 1과 같이 구연산(citric acid), 염산(hydrochloric acid), 질산(nitric acid), 인산(phosphoric acid)의 4가지로 선정하였으며, 25°C의 일정한 실내온도를 유지하여 온도변화에 따른 실험오차

Table 1. Type of washing solution at Step I.

Washing solution	Solution concentration (mole)				
	0.001	0.005	0.01	0.02	0.05
Citric acid	x1 mole	x2 mole	x3 mole	x4 mole	x5 mole
Hydrochloric acid	0.1 x1 mole	0.2 x2 mole	0.4 x3 mole	0.6 x4 mole	1.0 x5 mole
Nitric acid	0.1 x1 mole	0.2 x2 mole	0.3 x3 mole	0.4 x4 mole	0.5 x5 mole
Phosphoric acid	0.1 x1 mole	0.2 x2 mole	0.3 x3 mole	0.4 x4 mole	0.5 x5 mole

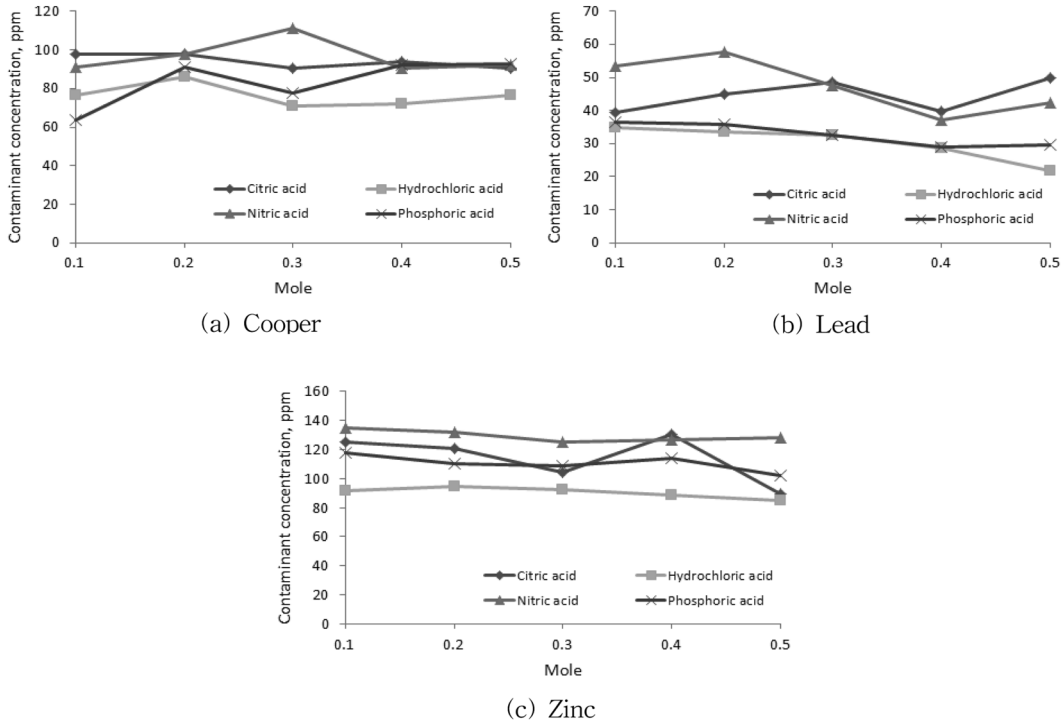


Fig. 2. Reduction in heavy metal concentration for each washing solution.

를 최대한 배제할 수 있도록 하였다. 세척시간은 12시간으로 설정하여 충분한 세척을 통해 세척시간에 의한 오염도양에 대한 세척효율의 변화를 배제함으로써 세척용매별 특성을 보다 정량적으로 분석하기 위함이다.

여기서 오염도양을 50 g으로 설정한 이유는 3가지 항목의 중금속 분석에 필요한 최소 시료량 30 g과 TPH 분석에 필요한 10 g에 대한 여유치 10 g을 함께 고려하여 원활한 분석이 이루어질 수 있도록 고려한 것이다. 실험은 250 ml의 둥근 플라스크를 사용하여 25°C에서 100 rpm의 조건으로 12시간 동안 세척이 이루어질 수 있도록 하였다.

Step I 실험결과에서 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn)은 공통적으로 염산에서 가장 좋은 세척효율을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 2). 다른 용매에서는 질산을 제외하고는 구연산과 인산에서 세척효율의 차이는 크게 나타나지 않았다. 토양의 초기 중금속 농도는 구리 434 ppm, 납 464 ppm, 아연 487 ppm 임을 고려할 때 아연이 가장 적게 저감되는 것으로 나타나 이들의 농도별 저감정도 차이는 그다지 큰 영향이 없는 것으로 볼 수 있다. 이러한 원인으로 12시간이라는 저감시간을 고려해보면

농도차이가 세척정도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Step II - 최적 세척시간 도출시험

Step I에서 양호한 결과를 나타낸 구연산과 염산으로 Step II에서 25°C에 100 rpm의 조건(Step I과 동일)으로 세척을 실시하였다. 세척시간은 10분, 20분, 30분, 60분 및 360분으로 하였으며, Table 2와 같다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 염산 0.1 mole, 인산 0.2 mole, 구연산 0.01 mole을 이용하여 중금속의 최적 세척시간을 파악하기 위한 실험 결과에서 구리, 납, 아연은 모두 1시간 이후부터 중금속의 세척이 대부분 이루어지는 것으로 분석되었다. 1시간과 6시간의 세척시간 차이는 다소 확인되었으나, 5시간 정도의 시간적 차이를 고려할 때 중금속 세척효율은 매우 작아 세척시간을 1시간으로 설정하는 것이 바람직한 것으로 볼 수 있다.

또한 세척용매별 세척성능을 검토해본 결과, Step I에서와 마찬가지로 염산이 가장 좋은 세척성능을 가지는 것으로 파악되었다. 납의 경우는 인산이 염산보다 더 좋은 효과를 갖는 것으로 나타났다.

Table 2. Experimental conditions compared for two types of washing solution under the washing time at Step II.

Washing solution	Washing time				
	10 min	20 min	30 min	60 min	360 min
Citric acid	y1 min	y2 min	y3 min	y4 min	y5 min
Hydrochloric acid	y1 min	y2 min	y3 min	y4 min	y5 min

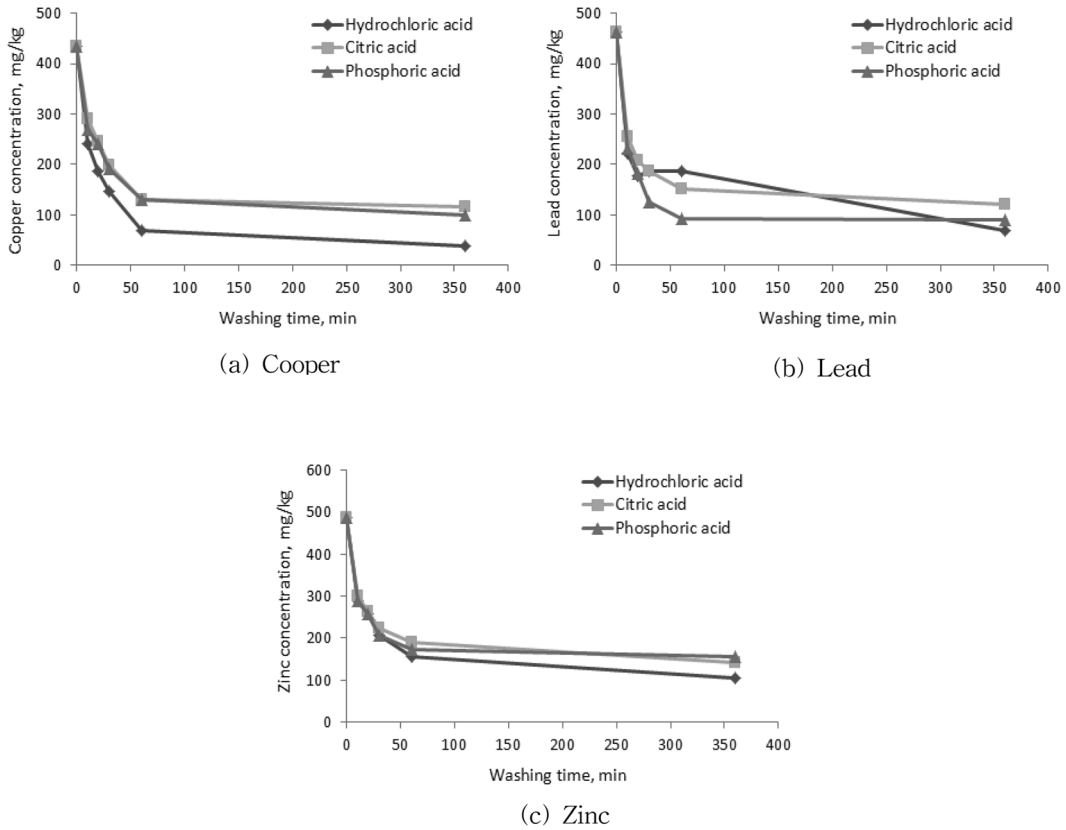


Fig. 3. Relationship between washing time and concentration reduction of heavy metals under a given washing time.

Table 3. Experimental conditions compared for solution concentration and washing time for two types of washing solution.

Washing solution	Solution concentration	Washingtime	Dilution ratio			
			1:2	1:3	1:4	1:5
Citric acid	x2 mole	y2 min	z1 ratio	z2 ratio	z3 ratio	z4 ratio
Hydrochloric acid	x3 mole	y3 min	z5 ratio	z6 ratio	z7 ratio	z8 ratio

Step III - 진탕비 결정시험

Step III에서는 구연산을 실험군에서 제외하고, 염산 0.1 mole과 인산 0.2 mole을 사용하여 중금속 세척효과를 파악하였다. 세척용매와 최적 세척시간에서 선정된 결과를 진탕비 결정시험에 반영하였다. 비교대상 조건은

진탕비를 기준으로 1:2부터 1:5까지 달리하여 세척용매인 구연산과 염산에 대해 기존 실험조건과 동일하게 실험조건을 설정하여 Table 3과 같이 실시하였다.

여기서는 실험군의 진탕비를 1:2부터 1:5까지 달리하여 중금속 세척을 위한 최적 진탕비를 파악한 결과, 진

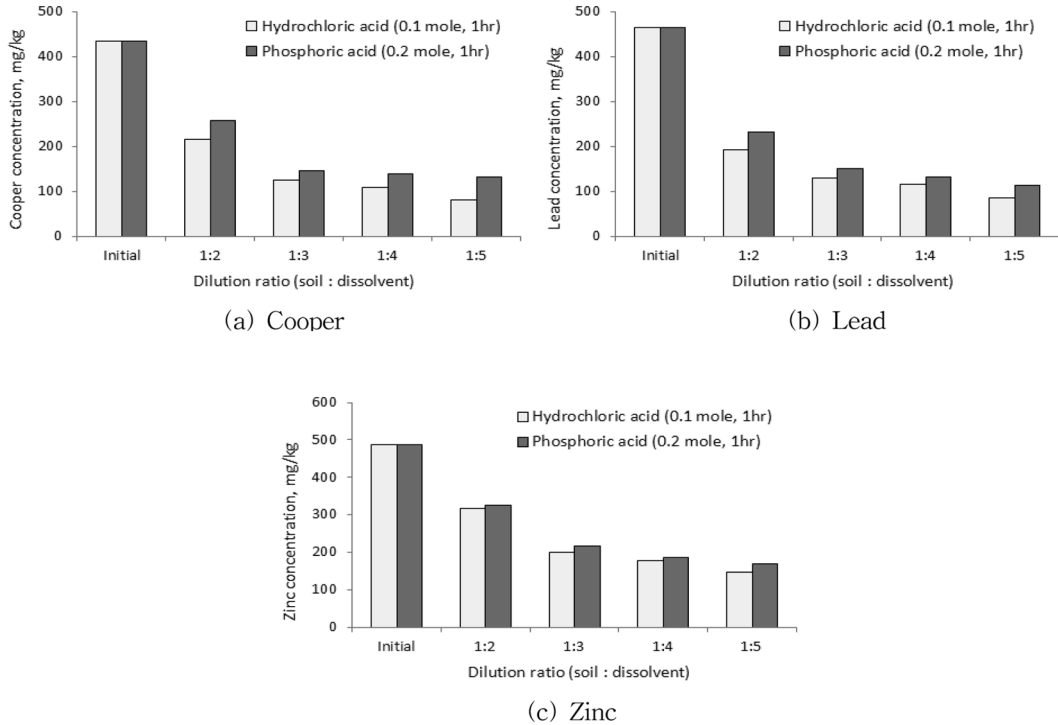


Fig. 4. Relationship between dilution ratio and concentration reduction of heavy metals.

Table 4. Experimental conditions compared for solution concentration, washing time, and dilution ratio of two types of washing solution under a given surfactant concentration at Step IV.

Washing solution	Solution concentration	Washing time	Dilution ratio	Surfactant concentration			
				0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
Citric acid	x2 mole	y2 min	z2 ratio	x1 %	x2 %	x3 %	x4 %
Hydrochloric acid	x3 mole	y3 min	z5 ratio	x5 %	x6 %	x7 %	x8 %

탕비 1:3 조건하에서 초기 농도와 비교하였을 때 약 60~70% 정도의 세척효과가 있는 것으로 나타난 반면 진탕비 1:2, 1:4, 1:5의 세척효과는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다(Fig. 4). 따라서 최적 진탕비 조건을 1:3으로 선정하였다.

Step IV - 계면활성제 첨가에 따른 중금속 용출영향 분석

이상과 같이 Step I~III까지의 실험결과를 토대로 계면활성제 첨가에 따른 중금속 용출영향을 파악하기 위하여 계면활성제를 0.5%에서 2%까지 농도를 달리하여 Table 4의 조건에 따라 중금속 용출영향을 분석하였다. 이를 통해 토양세척에서 계면활성제의 세척효율 여부와

계면활성제의 최적 첨가량을 정량적으로 파악이 가능하도록 실험조건을 설정하였다.

실험결과에서 Fig. 5와 같이 계면활성제의 농도가 증가할수록 중금속 농도는 저감되는 것으로 분석되었는데 계면활성제 농도가 1% 이상에서는 추가적인 중금속 농도의 저감효과가 크지 않아 최적 계면활성제의 농도를 1%로 선정하였다. 일반적으로 양이온 계면활성제가 음이온 계면활성제나 비이온 계면활성제에 비하여 중금속 저감효과가 크다고 알려져 있다(Kimball, 1992; West and Harwell, 1992; Sabatini et al., 1995).

미생물 및 과산화수소 주입에 따른 TPH 저감효율 미생물 주입은 1.0E+0.8 CFU/ml를 배양한 후 토양에

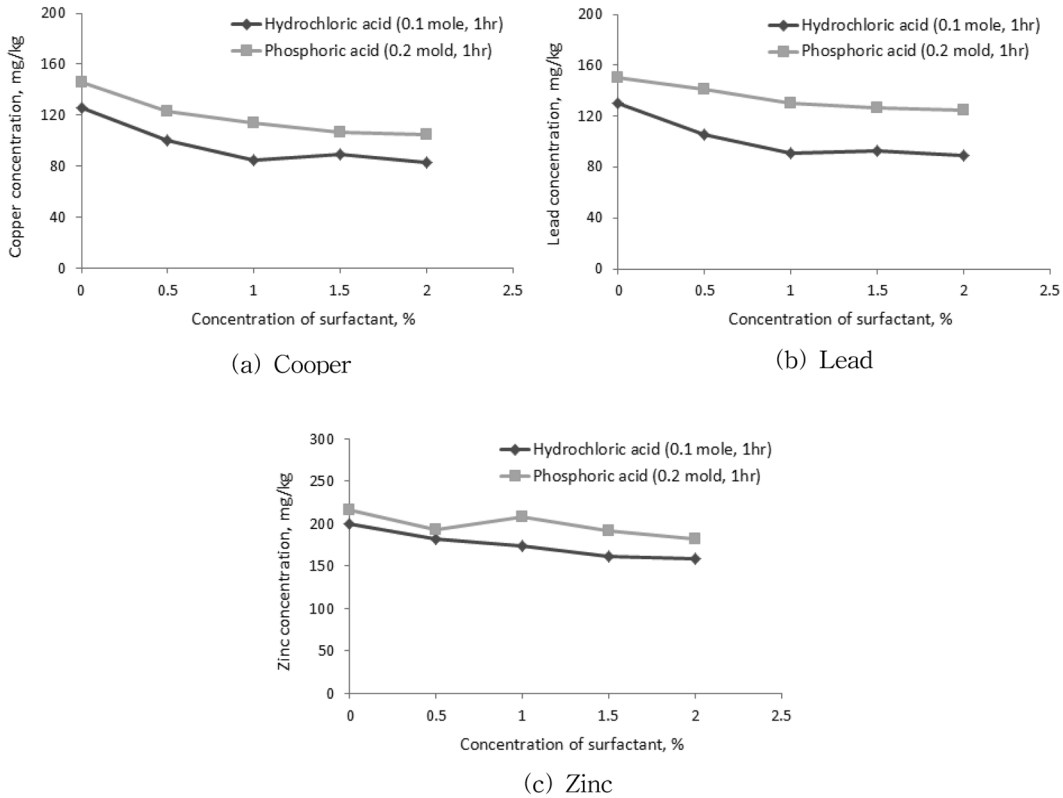


Fig. 5. Relationship between surfactant concentration and concentration reduction of heavy metals.

살포하는 방식으로 목표 미생물 농도가 1.0E+0.6 CFU/g이 되도록 토양 3 kg에 0.033 ml를 주입하였다. 이 때 미생물 주입량이 매우 미량이기 때문에 물(purified water)에 미생물을 희석시켜 살포함으로써 대상 오염토양에 일정하게 혼합이 이루어질 수 있도록 하였다. 이때 오염토양의 수분함량은 12~15%가 되도록 유지하였다.

분석된 오염토양의 TPH 농도에서 토양내 탄소함량에 대해 필요한 영양분을 도포하였다. 이화학 특성에 대해 분석한 결과에서 질소원인 황산암모늄은 약 5~8 g 정도가 소요되는 것으로 나타났다. 인산제2수소칼륨(K₂HPO₄)은 이화학적 분석결과에서 인의 함량이 풍부하여 주입할 필요가 없었으며, 유효인산 분석을 통해 미생물 섭취에 따른 소모량도 함께 산정하였다.

실험초기 오염토양의 암모니아성 질소와 유효인산의 농도를 분석한 결과, 암모니아성 질소의 농도가 10 ppm으로 다소 낮게 측정됨에 따라 실험 2일차에 황산암모늄을 주입하여 질소원을 공급하였다. 실험 결과에서는 암모니아성 질소의 농도가 급격히 증가하였으며, 이 농

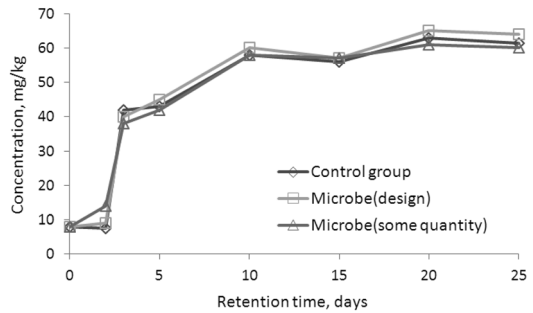


Fig. 6. Variation in the concentration of ammonia nitrogen for each experiment.

도는 실험이 종료될 때까지 일정 농도수준을 유지하는 것으로 분석되었다(Fig. 6과 Fig. 7).

또한 미생물을 설계량 조건에 적합하도록 주입한 실험군이 소량 주입한 실험군보다 큰 농도저감을 갖는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로 볼 때, 유류오염 토양 정화에 토양경작법을 적용할 경우에 추가적인 유류분해

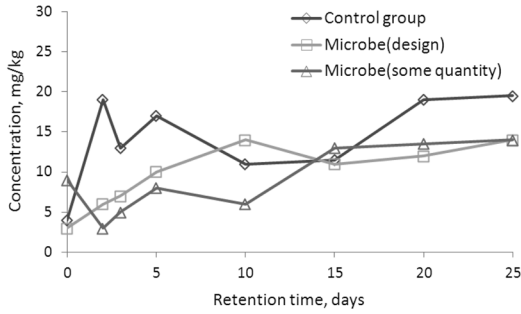


Fig. 7. Variation in the concentration of available phosphate acid in each experiment.

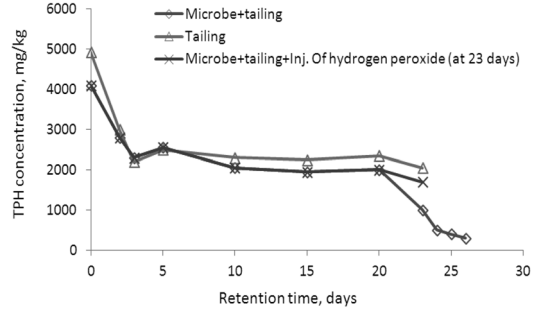
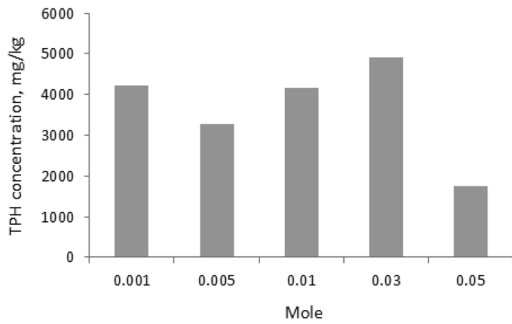
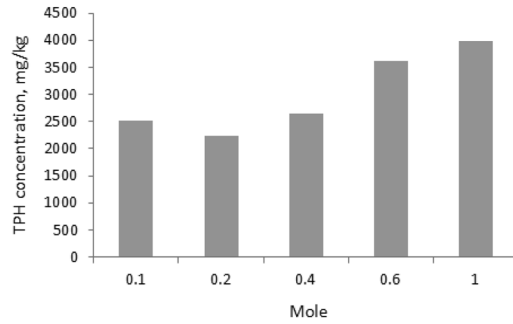


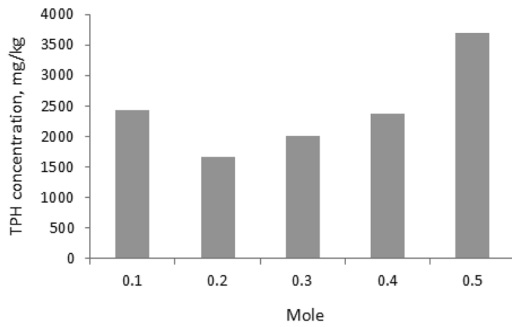
Fig. 8. Variation in TPH concentration reduction following the injection of hydrogen peroxide at 20 days.



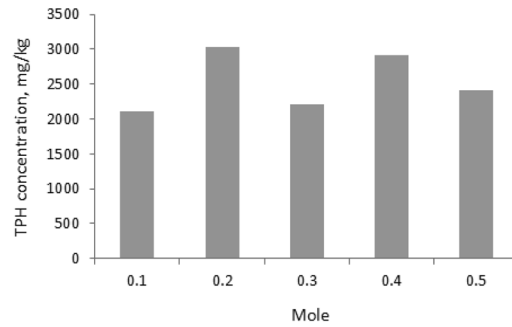
(a) Citric acid



(b) Hydrochloric acid



(c) Nitric acid



(d) Phosphoric acid

Fig. 9. Variation in TPH after soil washing using washing solution.

미생물의 공급이 필요할 것으로 판단된다. 추가적인 TPH 저감효과를 파악하기 위하여 토양시료에 대해 순수 경작만 수행된 경우, 미생물을 혼합하여 경작이 이루어진 경우, 미생물을 혼합한 경작이 이루어진 오염토양 시료에 대해 과산화수소를 주입한 경우 등으로 구분하여 세 가지 조건에 대한 TPH 농도의 변화를 분석하였다.

Fig. 8은 이들 세 가지 조건에 대한 TPH 농도변화의 결과를 나타낸 것이다. 실험 개시 10일부터 20일까지 TPH 농도는 2,000 mg/kg 정도에서 tailing 현상이 발생하였다. 미생물을 혼합한 경작 오염토양에 실험경과 23 일째에 과산화수소를 주입함으로써 점진적으로 TPH 농도가 약 300.93 mg/kg 이하로 저감되는 것으로 나타났다. 이에 반하여 과산화수소를 주입하지 않은 두 가지의

오염토양 시료에서는 20일을 기준으로 약 5% 정도의 TPH 농도 저감만이 발생한 것으로 분석되었다.

이 분석결과에서 토양경작방법 적용에 있어 토양의 TPH 농도변화가 거의 없는 tailing 현상이 발생할 경우에는 과산화수소 주입 등과 같은 화학적 산화법을 함께 적용시켜 목표 농도까지 저감시키는 방안을 실제 정화 시공에 적용시킬 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 생물학적 정화 진행 후 고농도의 과산화수소 주입만으로 오염토양의 TPH 농도를 저감할 수 있다는 연구결과와 유사한 결과를 도출하였다(Kim et al., 2008)

토 의

오염토양 세척의 물리·생화학적 결정인자 도출을 목적으로 Step I에서 Step III까지 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn) 중금속에 대한 최적 세척효율을 평가하기 위하여 세척용매, 세척시간, 진탕비 등을 각기 달리하여 물리적 결정인자를 도출하였다.

최적 세척용매 결정시험(Step I)에서는 염산이 가장 세척효율이 좋은 것으로 나타났으며, 인산과 구연산의 경우는 저감효과가 비슷하게 세척효율이 있는 것으로 파악되었다. 이에 최적 세척시간 도출시험(Step II)에서는 용매농도를 염산 0.1 mole, 인산 0.2 mole, 구연산 0.01 mole로 설정한 결과, 세척을 통한 TPH 농도의 변화는 큰 경향성을 보이지는 않았다(Fig. 9). 이러한 원인은 세척용매의 종류가 중금속의 저감에만 영향을 줄뿐 유류 오염 물질의 저감에는 크게 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

중금속 세척에 있어 세척용매의 경우 염산이 구연산이나 인산보다 세척효율이 우수하였으며, 세척시간의 지속성 보다는 중금속인 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn)을 세척하는데는 염산, 구연산, 인산이 유류오염 세척보다는 상대적으로 우수한 결과를 도출하였다. 특히 진탕비(Step III)의 경우 중금속 오염물질과 세척용매의 배합이 1:3의 조건일 때 가장 우수한 세척효과를 갖는 것으로 나타났다.

TPH 유류오염 농도저감에 있어 생화학적 방법 중 과산화수소의 주입은 tailing 현상이 나타난 THP 오염토양의 오염농도를 추가적으로 저감할 수 있는 것으로 확인되었다. 과산화수소를 주입하여 토양 내 토착미생물의 활성을 촉진시켜주는 생물학적 정화기술로써 일반적으로 생물자극법(Bio-stimulation)에 속하는 방법 중의 하

나이다(Huesemann, 1994). 이와 같이 과산화수소를 이용하는 고도산화 공법의 경우에는 과산화수소의 농도가 고농도일 경우에 박테리아를 살균하는 부작용이 발생할 수 있어 과산화수소의 주입량을 주의 깊게 조절할 필요가 있다.

결 론

이 연구에서는 중금속 및 유류오염 토양정화에 있어 효율적인 토양세척 공정의 선정을 위하여 최적의 오염정화 설계인자를 다음과 같이 선정하였다.

실험결과에서 세척용매인 염산 0.1 mole, 체류시간 1 시간, 진탕비 1:3 조건하에서 오염물질의 저감효과가 월등히 우수하였다. 또한 이들 조건을 적용하였을 때 계면활성제 1%를 첨가하였을 경우, 추가적인 유류오염물질의 농도 저감효과가 있는 것으로 확인되었다. TPH 유류오염 토양의 오염농도 저감에 있어서는 미생물과 과산화수소의 배합 및 주입을 통해 추가적인 오염농도 저감효율을 파악하였으며, 미생물을 소량 주입한 실험군 보다는 미생물을 설계량대로 주입한 실험군에서 TPH 저감효율이 더 우수한 것을 알 수 있었다.

이는 오염토양의 생물학적 처리를 위해 유류분해 미생물의 추가적인 공급만으로 오염농도를 효율적으로 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다. 또한 실험개시 20일 이후부터 과산화수소 주입을 통해 추가적인 TPH 농도 저감이 가능한 것으로 나타났다.

References

Huesemann, M.H., 1994, Guidelines for land-treating petroleum hydrocarbon contaminated soil, *Journal of Soil Contamination*, 3, 299-318.

Jorgensen, K.S., Paustinein, J. and Suortti, A.M., 2000, Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by composting in biopile, *Environmental Pollution*, 107, 245-254.

Ju, W.-H., Choi, S.-I., Kim, J.-M., Kim, B.-K., Kim, S.-G. and Park, S.-H., 2009, Evaluation of the large scale petroleum-contaminated site for the remediation of landfarming, *Journal of KoSSGE*, 14(4), 15-22.

Kang, H.K., Chung, S.Y. and Go, D.H., 2006, The contamination characteristics of BTEX and TPH components in silty soils with the oil leakage event from point source, *The Journal of Engineering Geology*, 16(4), 393-402.

Kang, M., Park, J.-M. and Kim, K.-T., 2008, Diffusion characteristics of heavy metal pollution depend on distance from abandoned mines, *The Journal of Engineering Geology*, 18(3), 257-262.

- Kim, G.-J., Oh, S.-T., Lee, C.-H., Seo, S.-K., Kang, C.-H. and Chang, Y.-Y., 2008, Enhancement of biodegradation rate of petroleum hydrocarbons-contaminated soil with addition of organic composite nutrients and a chemical oxidation, *Journal of KoSSGE*, 13(3), 59-66.
- Kim, J.-D. and Nam, G.-W., 2005, Evaluation on extractability of heavy metals in mine tailings of disused metal mines with concentrations and kinds of soil washing solutions, *Environmental Engineering Research*, 27(8), 787-798.
- Kimball, S.L., 1992, Surfactant-enhanced soil flusing: an overveiw of an in situ remedial technology for soils contaminated with hydrophobic hydrocarbons. In: Kosteci, P. T., Calabrese, E. J., Bonazountas, M. (Eds.), *Hydrocarbon Contaminated Soils*, Vol. II. Dewis Publishers, Boca Raton, 257.
- Lee, S.-H., Kim, E.-Y., Seo, S.-K., Kim, G.-B., Kim, J.-H. and Lee, J.-K., 2008, Remediation of heavy metal contamination in OBOD site with soil washing: selection of extractants, *Journal of KoSSGE*, 13(2), 44-53.
- Ministry of Environment, 2002, *Soil remediation technology and casebook*, 106.
- Ministry of Environment, 2007, *Official test method of soil*, 296.
- Moutsatsou, A., Gregou, M., Matas, D. and Protonarios, V., 2006, Wasing as a remediation technology applicable in soils heavily polluted by mining-metallurgical activities, *Chemosphere*, 63, 1631-1640.
- Sabatini, D.A., Knox, R.C. and Harwell, J.H., 1995, Emerging technologies in surfactant-enhanced subsurface remediation. In: Sabatini, D.A., Knox, R.C., Harwell, J.H. (Eds.), *Suractant-Enhanced Subsurface Remediation, Emerging Technologies*, ACS Symposium Series 594, American Chemical Society, Washington DC, 1-9.
- West, C.C. and Harwell, J.H., 1992, Surfactant and subsurface remediation, *Environmental Sciences Technology*, 26, 2324-2330.
- Yang, J.-W. and Lee, Y.-J., 2007, Status of soil reme-

diation and technology development in Korea, *Korean Chem. Eng. Res.*, 45(4), 311-318.

원고접수일 : 2012년 4월 27일

수정본채택 : 2012년 7월 11일(1차)

2012년 8월 7일(2차)

게재확정일 : 2012년 8월 13일

김만일

306-711 대전광역시 대덕구 신탄진로 200

한국수자원공사 댐·유역관리처

Tel: 042-629-2798

Fax: 042-629-2799

E-mail: mikim@kwater.or.kr

정교철

760-749 경북 안동시 송천동 388

안동대학교 지구환경과학과

Tel: 054-820-5753

Fax: 054-822-5467

E-mail: jeong@andong.ac.kr

김을영

437-703 경기도 의왕시 안양판교로 30

한국농어촌공사 환경지질처

Tel: 031-420-3738

Fax: 031-421-4814

E-mail: eykim@ekr.or.kr