

유류 오염토양 복원을 위한 토양세척 장비의 적용성 연구

공준·최상일

광운대학교 환경공학과

A Treatability Study on the Soil Washing Device for the Remediation of Oil-Contaminated Soil

Jun Kong, Sang-il Choi

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

Treatability tests of a soil washing device were performed for the remediation of oil-contaminated soil. The contaminant-containing soil with water was first fed into a co-current screw conveyor and then into a counter-current washer. Surfactant was introduced into the washer and feeding soil was continuously separated on the basis of #40 mesh at the same time. A washing efficiency of 97.9% was achieved by the the soil washing device optimized.

Key words : oil-contaminated soil, remediation, soil washing device, screw conveyor, washer, surfactant

요약문

본 연구에서는 유류 오염토양 복원을 위한 효율적인 세척 공정과 장비를 구성하여 현장 적용 가능성

을 검토하였다. 토양세척 장비는 co-current식 전세척장치와 counter-current식 세척조로 구성된다. 토양 이송 및 부분 세척이 이루어지는 전세척장치를 통과한 토양과 물은 세척용액이 첨가되는 세척조로 유입되며, 적정 운전 조건하에서 내벽에 부착된 나선형 웨어에 의해 일정 입경을 기준으로 토양이 분리되며, 동시에 각 웨어 사이에 부착된 임펠러의 교반력에 의해 토양내 오염물질이 탈착된다. 실험 결과, 전세척장치는 토양주입량 1 kg/min, 진탕비 1, 회전속도 50 rpm에서 최대 세척효율 83.6%(#4-)을 보였으며, 세척조에서는 토양·물 주입위치 15 cm, 회전속도 5 rpm, 경사각 6°, 세척용액 주입유량 0.8 L/min일 때 최대 세척효율인 97.9%(#4-)를 나타내었다.

주제어 : 유류 오염토양, 복원, 토양세척 장비, 전세척장치, 세척조, 세척제

1. 서 론

토양세척 기법(soil washing)은 흔히 분리기법이라 할만큼 세척공정 뿐만 아니라 분리공정 또한 중요하다. 토양세척 및 분리공정은 다음 2가지 사항을 기초로 한다. 첫째, fine fraction(63 μm 이하)은 높은 비표면적을 가지고 있어 제거대상 오염물질이 강하게 흡착되어 있기 때문에 현장 오염토양으로 부터 미세토양을 분리시킴으로써 처리대상 토양의 부피를 줄일 수 있다. 둘째, 오염부하가 높은 미세토양은 물리적인 압밀과 부착에 의해 coarse fraction(2 cm 이상)과 sandy fraction(63 μm - 2 cm)에 결합되어 있으므로 기계적 교반으로 쉽게 탈착시킬 수 있다¹⁾. 따라서 토양의 입경분포가 토양세척의 효율을 예측할 수 있는 매우 중요한 지표이다. 예를 들면, 전체 토양 중 자갈이나 모래의 함유율이 높은 토양은 세척공정이 매우 효율적인 반면 silt나 clay의 함유율이 약 25%(wt) 이상일 경우에는 비효율적인 단점이 있다²⁾.

오염물질의 탈착에 영향을 미치는 또 다른 인자는 기계적 교반력과 대상 오염물질에 대한 세척제의 용해력이다³⁾. 따라서 유류 오염토양을 복원하고자 할 때, 최적의 세척제를 선정·적용하는 것과 함께 효율적인 세척장비의 개발은 필수적이다.

본 연구에서는 co-current식 전세척장치(screw conveyor)와 counter-current식 세척조로 구성된 세척장비의 현장 적용성을 검토하기 위하여, 각 운전인자들을 최적화시키고 scale-up을 위한 기초 자료를 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용토양 및 분석방법

본 연구에서 사용된 인공 오염토양을 제조하기 위하여 이용된 토양은 서울특별시 도봉구에 위치한 녹천역 부근의 야산에서 채취하였으며, 큰 입경의 토양과 협잡물질을 제거하기 위하여 채취된 토양 중 #4체(4.7mm)를 통과하는 토양만을 사용하였으며 주요 특성은 Table 1과 같다.

균일한 오염토양을 제조하기 위하여 L사 디젤 적량을 n-hexane에 용해시켜 첨가한 후, 회전식 교반장치를 이용하여 3일간 혼합시킨 후, 4°C에서 암냉 보관하며 최소 4주 이상 경과된 토양만을 사용하였다.

시료의 분석방법으로는 TPH(total petroleum hydrocarbon)중 DRO(diesel range organics)를 분석하기 위하여 EPA Method 8015와 3550을 적용하였으며, GC/FID(HP 5890 Series II,

Table 1. The Characteristics of the Soil

pH	Organic Content	Particle Density	Bulk Density	CEC	Effective Size	Uniformity Coefficient
4.22	7.39(%)	2.09	1.35	4.24meq/100g	0.87mm	2.90

Table 2. The Analytical Conditions of TPH by Gas Chromatography

GC Model	HP 5890 II
Column	HP-1
Injection Mode	split
Injection Temp.	250 °C
Detector Temp.	290 °C
Oven Temp.	
Initial	80 °C, 4min
Slope	10 °C/min
Final	290 °C, 3min
Carrier Gas	N ₂
Flow Rate	5 mL/min
Detector	FID
Injection Volume	1 µl
Split Ratio	70

USA)를 이용하여 분석하였다(Table 2).

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 인공 오염토양의 입경별 오염 부하량은 입경이 미세할수록 증가하였으

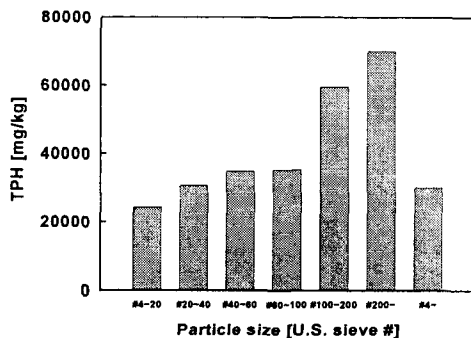


Fig. 1. Concentrations vs. particle sizes.

며, 전체(#4체 이하)토양의 초기 TPH 농도는 약 30,000 mg/kg dry soil 였다.

2.2 회분식 세척실험

연속식 세척장비를 설계하기 위한 기초 연구로써 용량 9L, stroke 4cm, frequency는 0~4Hz 까지 조절 가능한 stainless steel 용기를 사용하여, 세척제의 종류, 세척제의 농도, 세척시간에 따른 세척효율을 검토하였다.

세척제의 종류에 따른 효율을 검토하기 위하여 비이온계/음이온계 혼합 계면활성제 (POE₅+POE₁₄/SDS), 비이온계 혼합 계면활성제 (POE₅+POE₁₄), 음이온계 계면활성제(SDS), 생물계면활성제(BS)를 선정하여 오염토양 1kg과 3% 세척용액 4L를 이용하여 20°C에서 3시간 세척하였다. 세척제의 농도에 관한 실험은 오염토양 1kg, 세척용액 4L, 적용 계면활성제는 POE₅+POE₁₄/SDS (1:1)였으며 적용 농도는 1, 2, 3, 4, 5%로 변화시키며 20°C에서 3시간 동안 세척하였다. 세척시간에 따른 실험은 오염토양 1kg, POE₅+POE₁₄/SDS (1:1) 2% 세척용액 3L를 이용하여 20°C에서 kinetic study를 실시하였다.

2.3 연속식 세척실험

2.3.1 실험장치

본 연구에 적용된 세척장비는 Fig. 2와 같이 토양주입장치(belt conveyor), co-current식 전세척장치, counter-current식 세척조로 구성되어 있

다. 물이 주입되는 co-current식 전세척장치에서는 스크류 축의 회전력에 의한 토양 이송 및 스크류의 각 pitch 사이에 부착된 임펠러의 기계적 교반력에 의해 연속적으로 세척이 이루어진다. 전세척장치를 통과한 토양과 물은 세척용액이 첨가되는 세척조로 유입되며, 유입된 토양 중 일정 크기 이상 토양은 세척용액과 반대 방향으로 이동하게 된다. 즉 적정 운전 조건하에서 세척조의 내벽에 부착된 나선형 웨어에 의해 일정 입경을 기준으로 토양이 분리되는 동시에, 각 웨어 사이에 부착된 임펠러의 교반력에 의해 오염토양이 세척된다.

1.5m³/day 규모로 연속식 토양세척장치를 설계·제작하였다. 전세척장치는 길이 740mm, 직경 40mm, pitch 간격 16mm인 나선형 축을 삽입하여 토양의 이송과 교반이 효율적으로 이루어질 수 있도록 하였으며, 주입부 내부로 토양과 물이 함께 주입될 수 있도록 노즐을 설치하였고 축의 회전 속도는 조절 가능하도록 설계하였다. 세척조는 이송 기능을 제공하기 위해 길이 500mm, 직경 140mm인 원형판 내벽에 pitch 간격 28mm, 높이 25mm인 나선형 웨어를 부착하였고 웨어 사이에 45° 각도의 임펠러를 부착하여 교반 효과가 극대

화되도록 하였으며, 경사각을 조절할 수 있도록 하였다.

2.3.2 실험방법

Clark et. al은 counter-current식 공정에서 토양 입경분포, 토양의 이송속도, 계면활성제 용액의 유량이 중요한 인자라고 하였으며⁴⁾, 예비실험을 통하여 중요하다고 판단된 운전인자들에 대하여 연속식 세척실험을 실시하였다.

2.3.2.1 전세척장치

토양 주입량은 0.5~3 kg/min, 주입되는 물의 양은 1~4 L/min, 회전속도는 25~100 rpm으로 조절하면서 실험하였다. 실험시 전세척장치의 경사각은 예비실험의 결과를 토대로 7.5°로 고정하였다. #40, #60, #100, #200체를 이용하여 세척된 토양을 분리시켜 입경별 세척효율을 알아 보았다.

2.3.2.2 세척조

전세척장치에서 나온 토양과 물이 세척조에 주입될 때, 각 운전인자에 따라 세척효율 및 토양의 분리 정도가 많은 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 예비실험의 결과를 토대로 하여, 세척제는 비이온·음이온 혼합계면활성제인 POE₅+POE₁₄/SDS (1:1)로 선정·적용하였고, 세척제 적용 농도는 전세척장치에서 나오는 물과 합류될 때 2% 정도가 유지될 수 있도록 하였다. 토양의 주입 위치는 세척과 분리가 가능한 세척용액 주입부로부터 10~25cm 떨어진 위치를 기준으로 실험하였고 세척조의 회전속도는 5~20 rpm, 세척제 주입유량은 0.4~1.7 L/min, 세척조의 경사각은 4~8.5°로 변화시키며 세척실험을 실시하였다. 세척 후 토양 입경별 세척효율을 살펴 보았다.

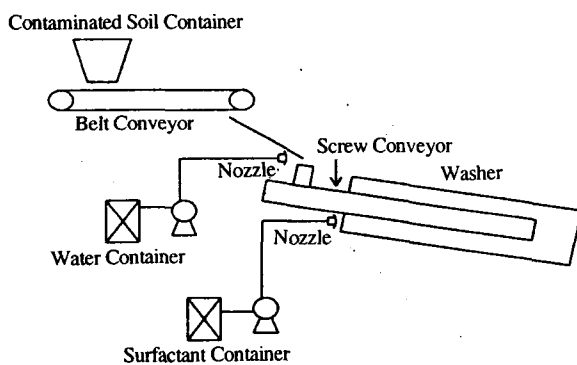


Fig.2. Schematic diagram of soil washing device.

3. 결과 및 고찰

3.1 회분식 세척실험

세척 성능에 영향을 미치는 인자 중에서 적용 세척용액에 대한 처리대상 오염물질의 용해도는 매우 중요하다. 일반적으로 비이온계와 음이온계의 혼합 계면활성제가 비이온계 계면활성제를 단독으로 적용할 때보다 세척 효율이 높은 것으로 알려져 있다⁵⁾. 본 실험에서는 비이온계 계면활성제인 POE₅와 POE₁₄, 음이온계 계면활성제인 SDS를 단독 또는 혼합하여 세척실험을 실시하였다. 또한 비교 목적상 생물 계면활성제인 BS도 적용하였다.

세척제 선정 실험 결과, 비이온계 혼합 계면활성제(POE₅+POE₁₄)와 음이온계 계면활성제(SDS)가 1:1로 조합된 경우의 세척효율이 여타 경우에 비해 상대적으로 좋았다(Fig. 3). 이는 비이온계와 음이온계 계면활성제에 의해 형성되는 혼합 계면활성제 미셀(micelle)의 크기와 안정도가 상호 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 단독 계면활성제에 비해 세척효율을 상승시키는 것으로 판단된다⁶⁾.

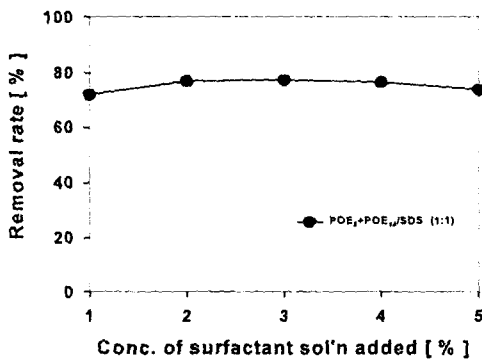


Fig. 3. Removal rate vs. particle size (30,000mg TPH/kg dry soil, conc. of surfactant solution = 3%, dilution ratio = 4, shaking time = 3hr, temperature = 20℃).

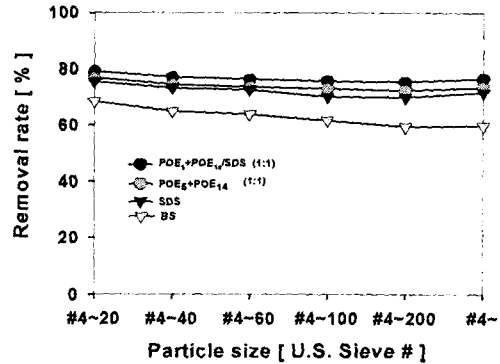


Fig. 4. Removal rate vs. conc. of surfactant solution(30,000mg TPH/kg dry soil, particle size = #4-, dilution ratio = 4, shaking time = 3hr, temperature = 20℃).

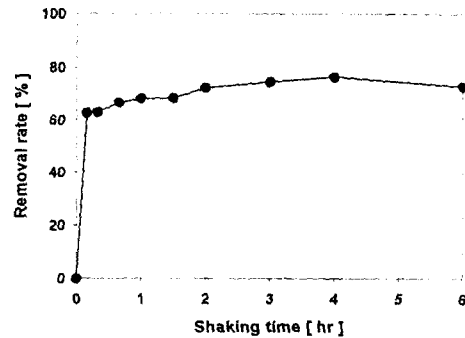


Fig. 5. Removal rate vs. shaking time (30,000mg TPH/kg dry soil, particle size = #4-, conc. of surfactant solution = 2%, dilution ratio = 3, temperature = 20℃).

혼합 세척용액(POE₅+POE₁₄/SDS, 1:1)의 농도를 1, 2, 3, 4, 5%로 변경 적용한 결과, 상대적인 세척효율에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Fig. 4). 본 실험 조건하에서는 최대 효율에 도달할 수 있는 농도는 3% 일 때 77.3% 정도였으나, 적용

세척제의 농도가 너무 높은 경우 세척제에 대한 소요 비용 증대는 물론 세척유출수 후처리시 많은 문제를 야기시키므로 적용 농도를 2%(세척효율 76.9%)로 유지하는 것이 적절하다고 판단하였다.

세척시간별 실험 결과는 약 10분 경과시 약 63%의 처리효율을 보였으며 3시간이 경과한 이후에는 약 14% 정도만 증가할 뿐 별다른 효율 증가는 나타나지 않았다(Fig. 5). 오염토양의 초기 농도나 정화 목표치에 따라 최적 세척시간은 다소 차이가 있을 수 있지만, 세척장치의 설계 및 운전시 현장 특성에 맞는 경제적이고 효율적인 세척시간을 결정하는 것은 매우 중요한 일이라고 판단된다.

3.2 연속식 세척실험

3.2.1 전세척장치

물이 주입되는 전세척장치의 경우, 스크류의 회전력과 물의 분사효과에 의해 토양의 이송이 원활히 이루어졌으며, 스크류의 각 pitch 사이에 설치된 임펠러의 기계적 교반력에 의해 입경이 큰 토양은 세척효과가 매우 탁월하였으며 미세할수록 세척효과가 저하되는 현상이 관찰되었다. 특히 #200체보다 작은 미세토양은 오히려 초기치 보다 다소 높은 결과가 관찰되었는데 이는 탈착된 오일에 의한 재흡착 현상에 기인하는 것으로 판단된다⁹⁾. Fig. 6에서 알 수 있듯이 토양세척기법 적용시 토양의 입경분포가 세척효율을 좌우하는 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다. 그리고 전세척장치의 세척효율에 영향을 미치는 중요한 운전인자들 중 회전속도는 50rpm, 진탕비는 1, 토양 주입량은 1kg/min일 때 가장 좋은 세척효율(#4-, 83.6%)를 나타내었다.

3.2.2 세척조

회분식 실험결과를 토대로 하여 세척제를 적용

한 결과, 세척제를 적용하지 않은 전세척장치와는 달리 미세토양에 대한 세척효율이 크게 상승됨을 알 수 있었다(Fig. 7).

전세척장치에서 이송된 토양과 물이 세척조내로 주입되는 위치에 따라서 토양의 세척과 분리 효율에 큰 차이가 발생됨을 알 수 있었다. 적절한 주입 위치의 범위는 세척용액 주입부로부터 10~25cm이며 #40체 크기를 기준으로 토양이 분리되었고, 세척효율은 15cm 위치에서 가장 양호한 세척효율(#4-, 97.9%)을 나타내었다(Fig. 7). 토양과 물의 주입위치가 세척용액 주입부로부터 너무 가까운 지점일 경우에는 세척용액과 #40체 보다 큰 토양과의 접촉시간이 짧아져 세척효율이 저하되고, 세척용액 주입부로부터 너무 먼 지점에 주입할 경우에는 분리효율이 저하될 뿐만 아니라 오염부하량이 상대적으로 높은 미세토양에 대한 접촉시간이 짧아져 세척효율이 저하되었다. 따라서 현장에서는 scale-up 세척조에 대해 최적 주입위치를 도출하여 적용함으로써 효율성을 제고시킬 수 있을 것으로 기대된다.

회전속도의 경우, 세척조내 토양의 체류시간을 좌우하는 운전인자로서 세척조의 회전속도를 20rpm 이상으로 운전하였을때 세척과 분리 효과가 현저히 저하되었고 5rpm으로 유지하였을 때 세척 및 분리 성능이 가장 뛰어났다(Fig. 7).

세척용액의 주입 유량을 0.4L/min 이상으로 유지해야만 토양과 세척용액의 counter-current 이송이 원활히 이루어졌고, 0.4L/min 미만으로 적용한 경우에는 세척용액이 구배에 의해 웨어를 넘어 하부 방향으로 흐르기 보다는 세척조 내벽에 부착된 나선형 웨어의 회전력에 의해서 토양과 함께 세척제 주입부로 재배출되었다. 적용 가능 범위내에서는 세척제 주입 유량을 0.4L/min 이상으로 유지하더라도 세척효율에는 그다지 큰 영향이 나타나지 않았다. 세척용액의 주입유량 증가는 세척유출수의 처리량을 증가시키고 후처리 장비의 용량을

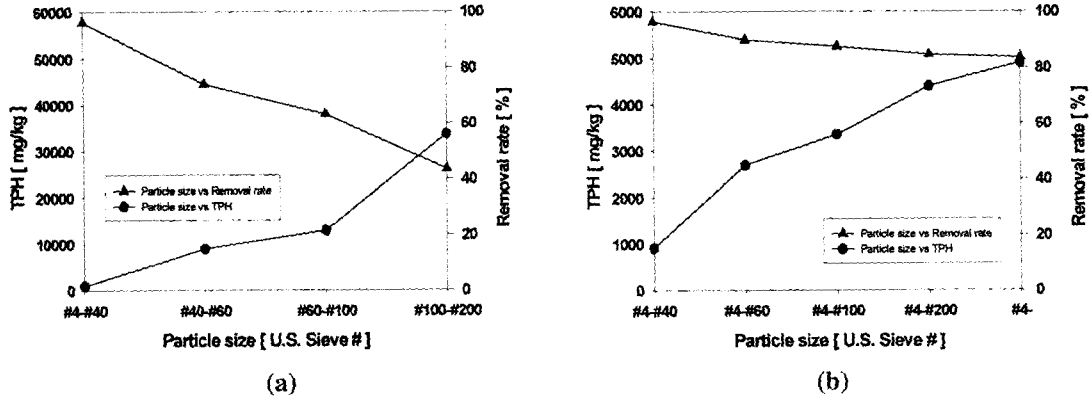


Fig. 6. The washing efficiency of screw conveyor (30,000mg TPH/kg dry soil, water, soil applied = 1kg/min, temperature = room temperature, inclined degree = 7.5°, rotating speed = 50rpm, dilution ratio = 1).

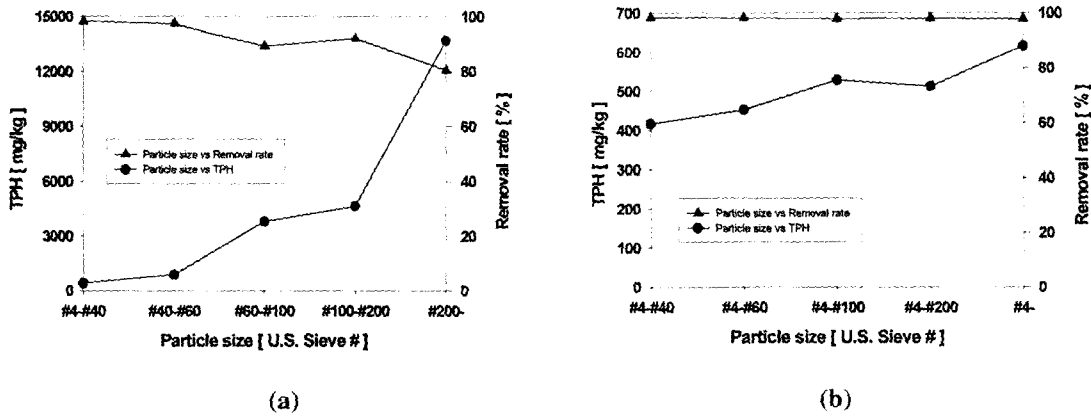


Fig. 7. The washing efficiency of washer (30,000mg TPH/kg dry soil, POE5+POE14/SDS (1:1) 2%, soil applied = 1kg/min, surfactant solution applied = 0.8 L/min, temperature = room temperature, inclined degree = 6°, rotating speed = 5 rpm, applying distance from the upper end of the washer = 15cm).

증가시키기 때문에 주입유량을 낮추는 것이 바람직하나, 경제적인 0.4L/min 보다는 안전측인 0.8L/min(#4-, 제거효율 97.9%) 정도로 유지하며 운전하는 것이 보다 바람직하다고 판단된다.

세척조의 경사각을 4, 6, 7.5, 8.5°로 변화시켜

가며 세척효율을 비교한 결과, 경사각이 커짐에 따라서 #40체 이하의 토양에 대해서는 세척과 분리효율이 다소 저하되는 경향을 나타내었다. 본 연구에서 적용한 경사각 중 세척과 분리 효율이 가장 양호한 경사각은 6°였다.

4. 결 론

본 연구에 적용된 연속식 세척장비는 토양 세척과 분리가 동시에 이루어지므로 경제성이 매우 뛰어나고 현장 적용성이 높은 것으로 판단되었다. 전 세척장치에서는 물만을 사용하여 경제치라고 판단되는 진탕비 1의 결과를 도출하였고, 전세척장치로 인해 세척조에서 적은 양의 세척제 사용이 가능하였다. 즉 본 세척장비는 물과 계면활성제 모두를 적용하므로써 오염물질의 물리·화학적 특성변화에 따른 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단되었다.

Co-current식 전세척장치는 회전속도, 진탕비, 토양 주입량이 중요한 운전인자였으며, counter-current식 세척조는 토양과 물의 주입위치, 세척조의 회전속도, 세척용액의 주입유량, 경사각 등이 세척과 분리효율을 좌우하는 중요한 운전인자였다. 토양의 입경분포가 세척효율을 예측하는 지표로써 매우 중요한 인자라고 판단되며, 오염물질의 탈착에 영향을 미치는 인자는 기계적 교반력의 크기와 세척용액에 대한 대상 오염물질의 용해력이었다.

세척제로는 비이온·음이온 혼합 계면활성제인 $POE_5+POE_{14}/SDS(1:1)$ 가 선정되었고 세척제의 최적 적용 농도는 2% 였으며, 전세척장치의 경우 회전속도는 50rpm, 진탕비는 1, 토양 주입량은 1 kg/min으로 유지할 때 가장 좋은 세척효과(#4-, 83.6%)를 나타내었다. 세척조는 토양과 물의 주입위치 15cm, 회전속도 5rpm, 세척용액 주입유량 0.8 L/min, 경사각 6°에서 최대 세척효율인 97.9%(#4-)를 보였다.

유류 오염토양의 효율적인 복원을 위해서는 향후 scale-up된 장비의 현장 적용 실험이 필요하며, 세척시 발생하는 유출수 및 미세토양의 후처리에 관한 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부/한국생산기술연구원에서 지원하는 1997년도 청정생산기술사업의 연구비에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Domenic Grasso, Hazardous Waste Site Remediation Source Control, Lewis Publishers, USA, G-Chemical Extraction/Soil Washing pp. 3 (1993).
2. William C. Anderson, P.E., DEE, Innovative Site Remediation Technology Soil Washing/Soil Flushing, Vol 3, American Academy of Environmental Engineers, pp. 4.3 (1993).
3. Domenic Grasso, Hazardous Waste Site Remediation Source Control, Lewis Publishers, USA, G-Chemical Extraction/Soil Washing pp. 18 - 38 (1993).
4. Clarke, A. N., et al., "Soil Clean-up by Surfactant Washing [Laboratory Results and Mathematical Modeling]", Separation Science and Technology, Vol 26, pp. 310 (1991).
5. K. H. Raney, "Optimization of Nonionic/Anionic Surfactant Blends for Enhanced Oily Soil Removal", Journal of American Oil Chemists Society, Vol 68, pp. 525 (1991).
6. 최상일, 이재영, 장민, "소수성 유기오염물질로 오염된 토양에 대한 혼합 계면활성제를 이용한 토양세척기법의 적용성 연구", 대한지하수환경학회지, 제4권 제2호, pp. 103 - 108, (1997).
7. 장운영, 신정엽, 최대기, 황경엽, "오염토양 복원을 위한 토양세척공정개발", 한국토양환경학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 65 - 68 (1997).