

## 유류 오염토양 복원을 위한 토양세척 공정의 개발

### Development of the Soil Washing System for the Remediation of Oil-Contaminated Soil

공 준 · 조 장 환 · 이 지 희 · 최 상 일

광운대학교 환경공학과

#### 요 약 문

본 연구에서는 유류 오염토양 복원을 위한 효율적인 세척공정을 구성하여 현장적용 가능성을 검토하였다. 토양세척공정은 co-current식 전세척장치와 counter-current식 세척조로 구성된다. 물이 주입되는 co-current식 전세척장치에서는 스크류 축의 회전력에 의한 토양 이송 및 스크류의 각 pitch 사이에 부착된 임펠러의 기계적 교반력에 의한 세척이 동시에 이루어진다. 전세척장치를 통과한 토양과 물은 세척조로 유입되어 세척용액과 반대방향으로 이동하게 된다. 세척조의 내벽에 부착된 나선형 웨어에 의해 적정 운전조건하에서 일정 크기를 기준으로 토양이 분리되며, 각 웨어 사이에 부착된 임펠러의 교반력에 의해 오염토양이 세척된다. 실험결과, 운전시 고려해야 할 주요 영향인자들은 전세척장치에서의 토양주입량은 1 kg/min, 진탕비는 1, 회전속도는 50 rpm에서 최대 세척효율(#4-, 83.6%)을 보였으며, 세척조에서는 토양·물 주입위치 15 cm, 회전속도 5 rpm, 경사각 6°, 세척용액 주입유량이 0.8 L/min일 때 최대 세척효율인 97.9%(#4-)를 나타냈다.

---

주제어 : 유류 오염토양, 토양세척공정, 전세척장치, 세척조, 세척용액

#### 1. 서론

토양세척기법은 흔히 분리기법이라 할 만큼 세척공정 뿐만 아니라 분리공정 또한 중요하다. 즉 토양세척 및 분리공정은 다음 2가지 사항을 기초로 한다. 첫째, fine fraction은 높은 비표면적을 가지고 있어 제거대상 오염물질의 대부분이 강하게 흡착되어 있으므로, 미세토양을 분리시킴으로써 처리대상 토양의 부피를 줄일 수 있다. 둘째, coarse fraction과 sandy fraction은 제거대상 오염물질이 물리적 압밀과 부착 형태로 토양입자에 결합되어 있기 때문에 물리적 교반으로도 쉽게 탈착시킬 수 있다<sup>1)</sup>. 이를 위해서는 오염물질의 탈착에 영향을 미치는 물리적 교반력의 크기와 세척용액에 대한 대상 오염물질의 용해도가 매우 중요한 인자이다. 따라서 유류 오염토양을 복원하고자 하는 경우, 최적의 계면활성제를

선정·적용하는 것과 효율적인 세척장비의 개발은 필수적이다.

본 연구에 적용된 세척조는 화학물질을 추출하거나 증류할 때 널리 사용되는 counter-current 방식을 이용하였다. 즉 대상 오염토양과 세척제 용액이 서로 반대 방향으로 이동하면서 오염물질이 세척용액에 의해 세척되도록 하였다. 토양의 이송 및 분리가 가능하면서 토양에 충분한 기계적 교반력을 공급하도록 하기 위하여 세척조 내벽에 나선형 웨어 및 각 웨어사이에 임펠러를 설치하였다.

본 연구에서는 세척장비의 적용성 실험을 통해 각 운전인자들을 최적화시키고 scale-up을 위한 기초 자료를 도출하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용토양

토양은 서울특별시 도봉구에 위치한 녹천역 부근의 야산에서 채취하였으며, #4체(4.7mm)를 통과하는 토양만을 사용하였다. 오염토양을 제조하기 위하여 L사 디젤 적량을 n-hexane에 용해시켜 회전혼합장치를 이용하여 3일간 교반시킨 후, 4℃에서 암냉 보관하며 최소 4주 이상 경과된 토양만을 사용하였다. 그리고 채취한 토양에 대한 기초 특성을 살펴본 결과 #40체 이하 크기의 토양(fine sand)이 전체 중량의 약 21% 정도이며 #200체 이하의 토양(silt & clay)은 약 3% 정도로 토양세척기법을 적용하기에 적합한 토양이라고 판단되었다. 시료분석은 GC/FID(HP 5890 Series II, USA)를 이용하여 분석하였다.

### 2. 회분식 세척실험

본 실험은 연속식 세척장비를 설계하기 위한 기초 연구로써 세척제 종류, 세척용액의 농도, 세척시간에 따른 세척효율을 각각 검토하였다. 회분식 세척용기의 용량은 9L, 재질은 stainless steel이며, stroke 4cm, frequency는 0~4Hz까지 조절 가능하다. 세척후 토양의 입경별 분리는 #40, #60, #100, #200의 체를 shaker에 설치하여 30분간 진동시킨 후 시료를 채취하였다.

### 3. 연속식 세척실험

#### 가. 실험장치

세척장치는 1.5 m<sup>3</sup>/day 규모로 연속식 운전이 가능하도록 설계·제작되었으며, Fig. 1과 같이 토양주입장치(belt conveyor), 전세척장치(screw conveyor), 세척조(washer)로 이루어져 있다.

#### 나. 실험방법

##### (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 고정하고 세척실험을 실시하였다. 세척 후 입경별 세척효율을 알아보기 위해 #40,

#60, #100, #200체를 이용하여 토양을 분리하였다.

#### (2) 세척조

전세척장치에서 나오는 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 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>/SDS (1:1)로 선정·적용하였고 세척제 적용농도는 전세척장치에서 나오는 물과 합류될 때 2% 정도가 유지될 수 있도록 하였다. 토양의 주입 위치는 세척용액 주입부로부터 10~25 cm 떨어진 위치로 변화시키며 실험하였고 세척조의 회전속도는 5~20 rpm, 세척제 주입 유량은 0.4~1.7 L/min, 세척조의 경사각은 4~8.5°로 변화시키며 세척실험을 실시하였다. 세척 후 #40, #60, #100, #200체를 이용하여 토양을 분리시킨 후 입경별 세척효율을 살펴보았다.

### III. 결과 및 고찰

회분식 세척실험 결과, 세척제로는 비이온·음이온 혼합계면활성제인 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>/SDS (1:1)가 선정되었고 적용 농도는 2%, 세척시간은 약 10분 경과시 63%의 처리효율을 보였으며 3시간이 경과한 이후에는 그로부터 약 15% 정도 증가된 후 별다른 증가를 나타내지 않았다. 오염토양의 초기 농도나 정화 목표치에 따라 최적 세척시간에 다소 차이가 있기 때문에 운전시 현장 특성을 충분히 고려해야 한다고 판단된다.

물이 주입되는 전세척장치의 경우, 스크류의 각 pitch 사이에 설치된 임펠러의 기계적 교반력에 의해 굵은 토양은 세척효과가 매우 탁월하였으며 미세할수록 세척효과가 저하되는 현상이 관찰되었다. 특히 #200체 보다 작은 미세토양은 오히려 초기치 보다 다소 높은 결과가 관찰되었는데 이는 탈착된 오일에 의한 재흡착 현상으로 판단된다<sup>2)</sup>. 또한 세척효율에 영향을 미치는 중요한 운전인자들중 회전속도는 50 rpm, 진탕비는 1, 토양 주입량은 1 kg/min일 때 가장 좋은 세척효과(#4-, 83.6%)를 나타냈다(표 1).

세척조에서는 계면활성제의 세척 메카니즘과 세척조 내벽의 나선형 웨어 사이에 부착된 임펠러의 기계적 교반력에 의해 세척효과가 매우 뛰어났으며, 나선형 웨어, 세척조의 경사각 및 회전속도, 세척용액 주입유량, 토양·물 주입위치의 조절에 의해 #40체 기준으로 토양이 완전히 분리되었다. 토양·물 주입위치는 15 cm, 회전속도는 5 rpm, 세척용액 주입유량은 0.8 L/min, 경사각은 6° 에서 가장 좋은 세척결과인 97.8%(#4-)의 세척효율을 보였다(표 1).

### IV. 결론

본 연구에 적용된 세척장치는 세척과 동시에 토양의 분리가 연속적으로 일어나고 세척효과 또한 매우 뛰어나 경제적이며 현장 적용성이 높다고 판단된다.

세척제로는 비이온·음이온 혼합계면활성제인 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>/SDS (1:1)가 선정되었고 적용 농도는 2%에서 세척효율이 가장 뛰어났으며, 전세척장치는 회전속도는 50 rpm, 진탕비는 1, 토양 주입량은 1 kg/min일 때 가장 좋은 세척효과를 나타내었다. 세척조는 토양·물 주입위치 15 cm, 회전속도 5 rpm, 세척용액 주입유량 0.8 L/min, 경사각 6° 에서 최대 세척효율인 97.8%(#4-)를 나타내었다.

유류오염 토양의 효율적인 복원을 위해서는 향후 scale-up된 장비의 현장 적용 실험이

필요하며, 세척시 발생하는 유출수 및 미세토양의 처리에 관한 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1) Domenic Grasso, Hazardous Waste Site Remediation Source Control, Lewis Publishers, USA, G-Chemical Extraction/Soil Washing pp.3 (1993).
- 2) 장운영 외 3인, 전남지부 결성 및 1997년도 추계 학술발표회 논문집, 한국토양환경학회, pp.65~68 (1997).

Table 1. The Efficiencies of the Soil Washing Device

토양크기 (mesh)	초기농도 (mg/kg)	전세척장치			세척조			
		제거효율 %			제거효율 %			
		토양주입량	진탕비	회전속도	주입위치	회전속도	주입유량	경사각
		1 kg/min	1	50 rpm	15 cm	5 rpm	0.8 L/min	6°
#4-	30,000	83.6			97.9			
#4-#40	25,800	96.3			98.4			
#40-#60	34,800	76.1			97.5			
#60-#100	35,200	70.6			89.2			
#100-#200	59,500	54.4			92.2			
#200-	70,000	NA			80.4			

▶ NA = Not Available

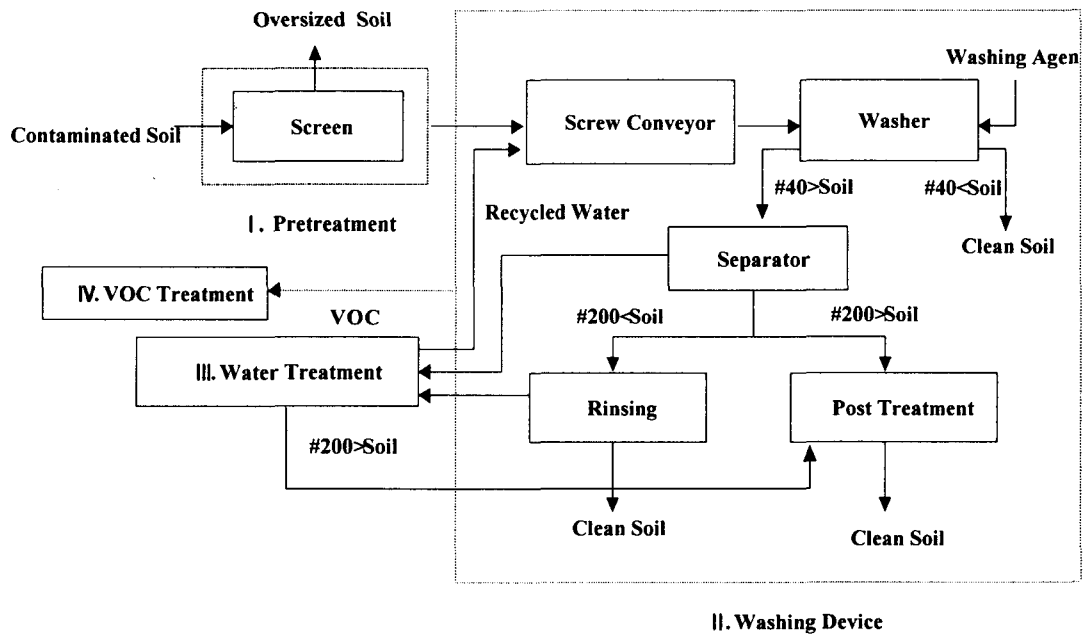


Fig. 1. Schematic diagram of soil washing system.