

토양세척장치에 의한 유류로 오염된 현장부지의 토양복원

이달희^{1*} · 나인욱² · 황경엽²

¹연세대학교 지하수 · 토양환경연구소, ²한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

Soil Remediation Using Soil Washing System in Hydrocarbon Contaminated Field

Dal-Heui Lee^{1*}, In-wook Na² and Kyung-Yub Hwang²

¹Institute of Groundwater and Soil Environment, Yonsei University, Seoul, Korea

²Water Environment and Remediation Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul, Korea

1. 서 론

토양복원을 위한 정화기술의 선택은 오염물의 종류와 부지특성 등을 고려한 처리효율의 극대화와 전체 복원비용의 최소화를 위하여 신중하게 이루어진다. 현재 현장에서 적용되고 있는 여러 가지 형태의 토양 정화기술들과 적용사례들에 대한 문헌상의 보고는 기술 선택과정의 중요성을 일깨워주고 있다.

일반적으로 널리 알려진 토양복원기술로는 기계적 마찰과 세정수를 이용한 세척방법, 온도를 높여 고온에서 오염물을 토양으로부터 분리하는 열적 처리방법, 미생물을 이용한 생물학적 처리방법, 반응화합물을 첨가하여 화학적 변환에 의해 오염물의 위해도를 저감시키는 화학적 처리방법과 휘발성 오염물질의 처리에 적합한 토양증기추출법 등이 있다(Domenic Grasso, 1993; 장운영 등, 1998). 이러한 각 처리 방법을 수행하기 위한 장치는 저마다 다양한 형태의 구조를 가지고 있으며, 현장위주의 설계를 통하여 공정이 이루어진다. 이러한 토양복원기술의 특성상 대상 오염토양의 특성에 따라 유동적인 장치 설비가 필요하고 운전조건도 각 경우에 맞게 조절되어야 하므로, 경제적이고 국내오염현황에 적합한 토양복원 장치개발이 필요하다 하겠다. 그 중에서 토양세척공정은 1980년대 초부터 유럽국가, 즉 독일, 네덜란드, 벨기에 등에서 활발하게 적용되어왔으며 좀 더 최근에는 미국, 캐나다 등 북미지

역에서도 폭 넓게 사용되고 있는 기술 가운데 하나로 고전적인 채광공정과 폐수처리공정의 기본토대에 바탕을 두고 있다(Domenic, 1993). 적용범위에 있어서도 토양에 국한하지 않고 강이나 호수, 또는 수로나 도크, 그리고 항구 등에서 준설된 퇴적침전물의 세척 등 적용범위가 광범위한 기술로 알려져 있다.

토양세척기법은 흔히 분리기법이라 할 만큼 세척공정 뿐만 아니라 분리공정 또한 중요하다. 토양세척 및 분리공정은 다음 2가지 사항을 기초로 한다(Anderson, 1993; 공준과 최상일, 1998). 첫째, fine fraction(63 μm 이하의 토양입자)은 높은 비표면적을 가지고 있어 제거대상 오염물질이 강하게 흡착되어 있기 때문에 현장 오염토양으로부터 미세토양을 분리시킴으로써 처리대상 토양의 부피를 줄일 수 있다. 또한 본 단계에서 오염물도 일부 제거된다. 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 있다. 따라서 토양의 입경분포가 토양세척의 효율을 예측할 수 있는 매우 중요한 지표이다(Feng *et al.*, 2001). 예를 들면, 전체 토양 중 자갈이나 모래의 함유율이 높은 토양은 세척공정이 매우 효율적인 반면 silt나 clay의 함유율이 약 25%(wt) 이상일 경우에는 비효율적인 단점이 있다(Anderson, 1993; Feng *et al.*, 2001).

본 연구에서는 현장 적용 규모의 토양 세척 장치를 개발, 각 운전인자들을 최적화시키고 기초 자료를 도

*Corresponding author: dalheui@hanmail.net

출하고자 하였으며, 실제 오염 부지 정화에 적용하여 정화효율을 나타내고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 토양 및 분석 방법

정화대상토양은 약 20년 전부터 유류, 유기용제 등으로 오염되어있는 경기도 H사 현장 부지에서 채취하였으며, 시료의 분석방법으로 대상 토양의 입도 분포는 Particle size analysis in Methods of Soil Analysis, part 1의 방법에 따라 측정하였다(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1991). 오염토양과 처리토양의 TPH(total petroleum hydrocarbon), BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) 농도는 토양오염공정시험방법에 따라 분석하였는데, TPH는 디클로로메탄으로 추출하였고, BTEX는 메탄올로 추출하여 자동주입기(auto-sampler)가 부착된 GC(gas chromatography)/FID(flame ionization detector) (HP 5890 series II, USA)를 이용하여 분석하였다. GC의 분석 조건은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 장치 구성 및 운전 방법

전체 토양세척장치는 Fig. 1에서 개략적으로 나타내었으며, Fig. 2는 현장모습을 나타내었다. 장치 구성 및 운전 방법은 다음과 같이 이루어져 있다. 먼저, 5cm×5cm의 진동체를 통과한 오염토양은 시간당 7~10톤 처리 용량의 주 세척장치에서 세척수와 교반 장치에 의해 세척이 이루어진다.

주 세척 장치는 제 1차와 제 2차 세척부로 나누어져 있다. 진동체를 통과한 오염된 토양은 컨베이어벨트

I. Pre-soil analysis

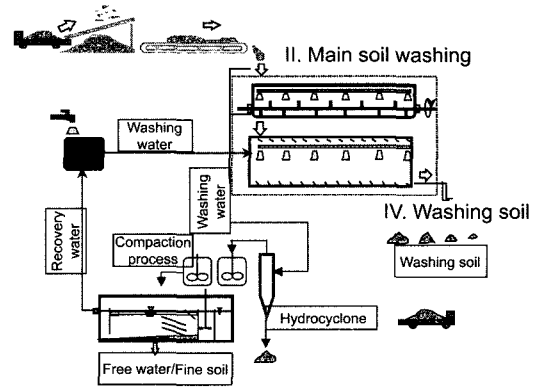


Fig. 1. The process of soil washing.

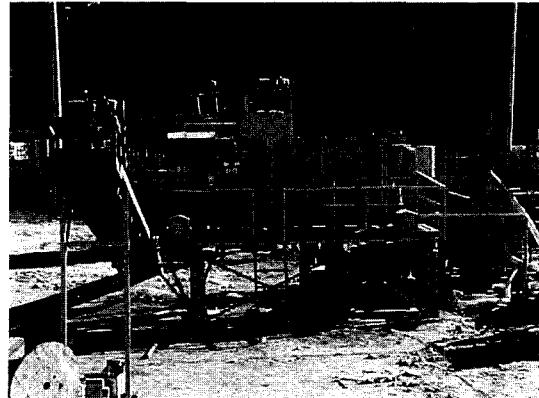


Fig. 2. The soil washing machine in field.

를 통해 호퍼(hopper)로 이송되어 저장되며, 이 호퍼는 왕복축이 연결되어 주 세척 장치에 토양을 일정한 속도로 보내도록 설계되어있다. 제 1차 세척부는 외부 케이싱과 소정경사를 가지는 교반 날이 일정간격으로 배열되어 있는 여러 개의 평행한 회전축과 여러 개의 세척수 분사용 압력 분사노즐이 구비되어있어 세척수와 오염토양의 교반효과가 극대화될 수 있도록 하였다. 제 2차 세척부는 종축으로 길게 신장되어 있는 원통형 외부드럼 내의 표면에 토양이동을 위한 나선형 날을 구비하며, 세척수를 분사하기 위한 압력노즐, 상기 마찰수단의 종축과 상기 외부드럼의 종축 사이의 각도를 조절하는 기울임 조절 장치 및 오염물 배출수단을 구비하고 있다.

세척된 토양은 주 세척 장치를 통하여 밖으로 배출된다. 오염된 세척수는 펌프에 의하여 하이드로사이클론을 통과하여 fine sand 범위의 토양을 분리한다.

Table 1. The Analytical Conditions of TPH and BTEX by Gas Chromatograph.

| Column | HP-1 |
|------------------|---------------|
| Injection Temp | 300°C |
| Detector Temp | 320°C |
| Oven Temp | |
| Initial | 50°C, 2 min |
| Slope | 8°C/min |
| Final | 320°C, 10 min |
| Carrier gas | He |
| Flow rate | 1 ml/min |
| Detector | FID |
| Injection Volume | 1 µl |

Table 2. The process parameter of soil washing.

| processing velocity | washing water | compaction material | |
|---------------------|---------------|---------------------|--------------|
| 7~10 ton/h | 100~150 l/min | coag. 30 ppm | flocu. 3 ppm |

그 이하의 미세토양은 응집조로 들어가 응집된 후 침전 조에서 세척 수중의 미세토양은 슬러지로 분리되어 세척 수는 다시 주 세척장치로 재순환되어 사용된다. 모든 운전조건은 제어 패널에서 이루어지도록 하였으며, Table 2에서 간단히 요약하였다.

3. 실험 결과 및 토의

현장토양을 샘플링하여 토양의 TPH, BTEX 농도와 토양의 입도 분포를 측정하여 Table 3에 나타내었다. 오염농도는 BTEX 20~263 ppm, TPH 80~1,020 ppm 범위였는데 토양오염 우려기준(BTEX 80 ppm, TPH 2,000 ppm)을 고려해볼 때 BTEX농도는 초과하지만 TPH 농도는 초과하지 않았다. 토양입경분포를 볼 때 대부분 모래로 구성되어 있는 사질토의 특성을 나타내어 일반적으로 토양세척공정을 적용하였을 때 경제성이 있는 것으로 판단되었다.

토양 세척 후, 세척수에는 모래가 20%(wt), silt 52%, Clay 28%로 측정되었는데(Table 4) 유입토양의 모래 65~99%, silt 0.4~34%, clay 0.6~1% 값과 비교하였을 때 주 세척 장치에서 오염토양 중 미세토양을 세척수로 분리시킴을 알 수 있다. 또한, 오염된 세척수는 fine sand 범위 입도 분리를 위하여 펌프를

통하여 하이드로사이클론(hydro-cyclone)으로 이동하였다. 세척수의 고형물 농도가 3~7%(wt) 정도를 나타내었으며, 하이드로사이클론을 통해 배출되는 세척수의 고형물 농도는 28~32%, 하이드로사이클론을 통해 작은 응집조로 들어가는 세척 수의 고형물 농도는 1~3% 범위의 값을 나타내었다. 오염된 세척수의 무게 비율로 약 50~60%정도가 하이드로사이클론을 통해서 분리됨을 알 수 있었다.

Table 4에서보면 하이드로사이클론에서 세척 수중에서 토양의 입도 분리가 이루어지고 있으며, 미세토양에서 TPH, BTEX 농도가 상대적으로 높게 검출되었다. 또한, 세척토양은 대부분이 모래로 구성되어 있고, 토양 중에 TPH와 BTEX 농도가 전혀 검출되지 않았다. Fig. 3에서는 토양세척에 따른 세척토양의 BTEX의 농도를 나타내었다. Table 3, 4와 Fig. 3에서 알 수 있듯이 BTEX 20~263 ppm, TPH 80~1,020 ppm

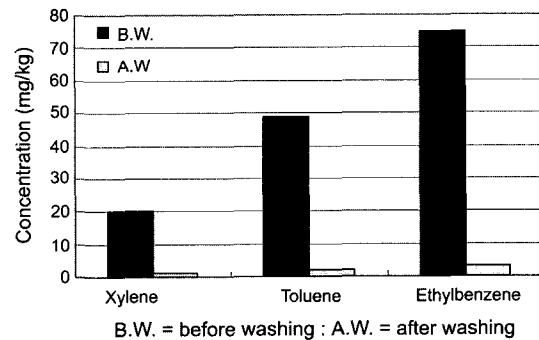


Fig. 3. BTEX concentration change in washed soil according to soil washing.

Table 3. The composition and concentration of field sample.

| Sample No. | Contamination density (mg/kg) | | | | Soil analysis (% wt) | | | |
|------------|-------------------------------|---------|---------|-----------|----------------------|------|------|------|
| | TPH | Benzene | Toluene | E-benzene | Xylene | Sand | Silt | Clay |
| 1 | 80 | - | 49 | 4 | 6 | 95 | 4.4 | 0.6 |
| 2 | 230 | - | - | - | 20 | 65 | 34 | 1 |
| 3 | 230 | - | - | 5 | 37 | 97 | 2.3 | 0.7 |
| 4 | 1,020 | - | - | 75 | 188 | 99 | 0.4 | 0.6 |

Table 4. The effect of separation in hydrocyclone.

| | Soil analysis (% wt) | | | Contamination density (mg/kg) | | | | |
|---------------------|----------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------|---------|-----------|--------|
| | Sand | Silt | Clay | TPH | Benzene | Toluene | E-benzene | Xylene |
| Washing water | 20 | 52 | 28 | 30 | - | 5 | 2 | 4 |
| Hydrocyclone bottom | 38 | 50 | 12 | - | - | 3 | - | 1 |
| Hydrocyclone upper | 5 | 63 | 32 | 50 | - | 13 | 3 | 6 |
| Wasing soil | 99.9 | less than 0.1 | less than 0.1 | - | - | - | - | - |

인 오염토양이 처리 후 모두 1 ppm이하를 나타내어 제거율 99%이상을 나타내었다. 또한 현재 오염부지의 오염도가 상대적으로 낮은 값을 보이기 때문에 앞으로 이보다 심한 오염부지에 대해서도 적용할 예정이다.

하이드로사이클론을 통해 나온 세척수는 응집조로 들어가게 되는데 Jar Test를 통해 응집제 PAC 30 ppm, 고분자응집제 3 ppm을 주입하였다. 여기서 발생하는 슬러지는 부지 옆에 저장해두었지만, 앞으로 탈수하여 매립하거나 생물학적 처리를 시도해보려고 한다. 또한 응집을 시킨 후 슬러지 침전조가 약 4 m³ 정도 되었고 침전조로 유입되는 유량은 50~100 L/min 정도 되었는데, 침전조내의 슬러지 양에 따라 슬러지는 넘치는 경우가 가끔 있었다. 따라서 앞으로 침전조 설계와 또한 슬러지 처리에 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

시간당 오염토양 10톤 처리속도의 토양 세척 장치를 개발하여 실제 오염된 부지에 적용한 결과 세척수 유량 100~150 L/min 유량의 조건에서 BTEX 20~263 ppm, TPH 80~1,020 ppm 농도의 오염토양이 처리후 99% 이상의 제거율을 나타냄을 알 수 있었으며, 오염

된 세척수를 재사용하기 위해 하이드로사이클론과 응집을 이용하여 효과적으로 미세토양을 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

앞으로 토양오염도가 매우 심한 부지에 적용하는 일, 이동형 토양세척장치 개발, 미세토양 슬러지 처리를 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 공준, 최상일 (1998) 유류 오염토양 복원을 위한 토양세척장비의 적용성 연구. 한국토양환경학회지, 3권, p. 109-116.
- 장윤영, 신정엽, 황경엽 (1998) 파일럿 규모의 토양세척장치 개발. 한국토양환경학회지, 3권, p. 55-62.
- Anderson, W.C. (1993) Innovative site remediation technology, soil washing/soil flushing. Springer Verlag, Berlin.
- Domenic, G. (1993) Hazardous waste site remediation source control, Chemical Extraction/Soil Washing. Lewis Publishers, USA, p. 18-38.
- Feng, D., Lorenzen, L., Adrich, C. and Mare, P. W. (2001) Ex-Situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods. Minerals Engineering, v. 14, p. 1093-1100.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1991) American Public Health Association, Washington, D.C., p. 55-140.

2002년 3월 27일 원고접수, 2002년 8월 13일 게재승인.