

유류 오염토양 복원을 위한 물리적 기술의 현장적용에 관한 기초연구

강희만 · 이주광 · 이용은 · 고석오*

한국도로공사

*경희대학교

env@freeway.co.kr

요 약 문

유류 오염 토양에 pilot scale 규모의 토양세척법(soil flushing)과 토양증기추출법(SVE)을 설치하여 운전하였다. 토양세척법의 경우 용매인 알콜류를 주입하고 2일 이후부터 계면활성제인 Tween 80 용액을 주입 한 후 하부에서 추출된 유출수내의 오염물질의 농도를 측정 한 결과 BTEX, Diesel 및 n-Alkane의 농도는 계면활성제 주입 전과 후의 비율이 최대 각각 15배, 7.8배 및 47배의 농도 증가를 보였으며 TPH 농도의 증가는 약 10배에 이르는 것으로 조사되었다. 또한 토양증기추출법의 경우 가스 추출로 제거된 가스성분의 누적량을 보면 약 19일의 운전기간동안 BTEX와 TPH 총량 기준으로 약 30 kg 및 708 kg이 제거되었으며 BTEX와 TPH에 대한 최대 제거효율은 각각 4 kg/day 및 90 kg/day 였다.

1. 서론

현장조사시 토양에 누출된 유류의 오염도가 높아 토양공극에 오염물질이 액상으로 존재하는 경우 생물학적 처리공법의 적용만으로는 오염물질의 처리에 한계가 있다. 토양세척법은 오염물질의 용해도를 증가시키기 위해 첨가제를 함유한 물 또는 순수한 물을 토양에 주입한 후 오염물질이 용해된 세척수를 추출하여 토양내 존재하는 오염물질을 제거하는 공법으로서 토양내 액상으로 존재하는 오염물질에 적합한 공법이다. 또한 토양증기추출법은 불포화 대수층에서 토양을 진공상태로 만들어 증으로써 토양으로부터 휘발성, 준휘발성 오염물질을 제거하는 공법으로 설치가 용이하고 복원기간이 짧으며 다른 기술과 복합적으로 사용될 수 있다는 잇점이 있어 많이 사용되는 공법이다. 본 연구에서는 물리적 기술로 분류되는 토양 세척법과 토양증기추출법의 현장 적용성 평가를 위하여 pilot scale 규모의 시설을 현장에 설치하여 운전하였다.

2. pilot 시설

파일럿 시설은 크게 오염물 세정을 위한 주입정, 지하수의 추출정 그리고 토양층에 잔존하는 유류오염물을 제거하기 위한 토양증기추출(주입)시설 등으로 나누어 설치하였다. 오염물의 세척을 위한 주입공은 상부 지역에 3 개를 설치하였으며 인근 하천에서의 저장수를 세척용액으로 주입되도록 하였다. 오염지역의 하부 지역에는 지하수의 추출을 위한 추출공을 2개 설치하였으며 펌프를 통하여 지하수를 추출하고 각 공에서의 유량을 측정하고 시료를

채취할 있도록 설치하였다. 오염 지역의 중앙 하부지역에는 토양증기 추출을 위한 추출공을 1개 설치하였는데 블로워를 이용하여 공기를 주입하도록 하였고 추출압력, 가스량 등도 측정할 수 있도록 하였다.

3. 토양세척법(Soil Flushing)

Slug 시험을 이용하여 대수층 (unconfined aquifer)의 투수계수를 구한 결과 2.37×10^{-5} 에서 1.44×10^{-4} (cm/sec) 범위였는데 이는 사질토, 매립된 토양, 자갈과 사질토 등 다양한 면서도 불규칙한 토양으로 구성되어 있음을 나타낸다. 알콜류에 의한 유류 오염성분의 용

해도 증가에 대한 실험 결과 용해도는 알콜류의 농도 증가에 비례하여 증가하고 있었다. Methanol의 경우 BTEX 및 Diesel 성분에 대해서 높은 용해도 증가 효과를 보여 Methanol 농도가 790 mg/L일 경우 용해도는 각각 12배 및 7배 증가하였다. 반면에 1-Pentanol 및 1-Hexanol의 경우는 TPH에 대해서 Methanol에 비하여 높은 효과를 나타내어 각각 6.3배 및 5.1배의 증가를 보여주었다.

위와 같은 실험 결과에 의하면 TPH 기준으로 1-Pentanol이 가장 높은 용해도 증가효과를 보여 주고 있다. 그러나 실질적인 면에서 BTEX 및 Diesel 성분의 용해도 증가효과가 높은 Methanol이 타 용매에 비하여 더 좋은 용매라 판단된다. 또한 정확한 효과 판단을 위하여는 오염 성분들과 알콜류와의 상호작용에 의한 용해도 증가에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

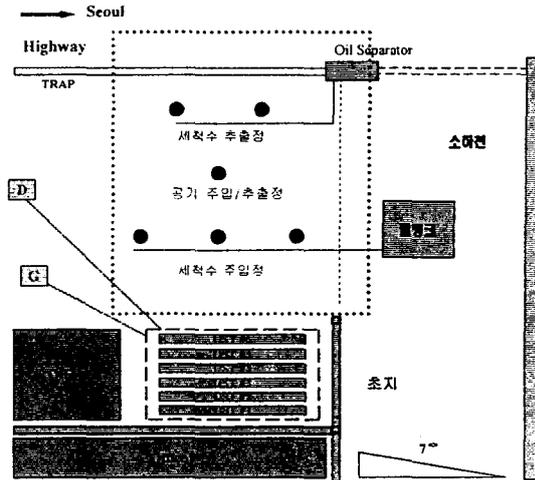


그림 1. 현장실험 도면

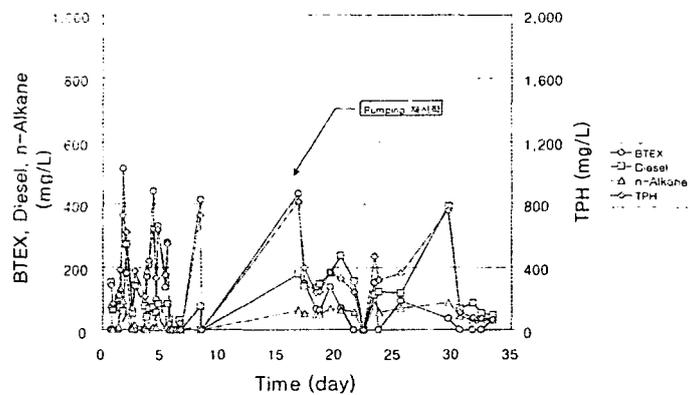


그림 2. 알콜류 주입 후 시간에 따른 BTEX, 디젤 및 TPH 농도 변화

한편 용매인 알콜류를 주입하고 2일 이후부터 계면활성제인 Tween 80 용액을 주입 한 후 하부에서 추출된 유출수내의 오염물질의 농도를 측정한 결과 BTEX, Diesel 및 n-Alkane의 농도는 계면활성제 주입 전과 후의 비율이 최대 각각 15배, 7.8배 및 47배의 농도 증가를 보였으며 TPH 농도의 증가는 약 10배에 이르는 것으로 조사되었다. 한편 용매의 주입을 멈춘 후 8일 이후에 재 펌핑한 유출수에서도 유류 오염물의 농도는 배경 값보다 높은 값을 보였는데 이러한 결과로부터 용매의 주입은 유류 오염물을 세정하는데 어느 정도 효과가 있는 것으로 판단된다.

3. 토양증기추출법(SVE, Soil Vapor Extraction)

추출실험에 영향을 미치는 영향반경 및 공기투과계수를 측정해 본 결과 영향반경은 대략 3.65 ~ 3.84 m였으며 영향반경이 3.7m일 경우의 공기투과계수는 1.6 darcy로 계산되었다. 가스추출 압력을 252 mmH₂O로 하여 추출실험을 하면서 토양가스를 채취하여(시료채취시간 5분) 농도의 변화를 살펴본 결과 초기에는 증가하는 경향을 보이다가 최고농도를 나타낸 후 감소하는 경향을 보여주었다. 한편 가스 추출압력을 최대로 증가(1,100mmH₂O)시킨 후에는 가스농도는 다시 급격히 증가하였는데 BTEX 최대농도는 약 7.6 g/m³ 정도였고 BTEX 중 Benzene 성분이 높은 비율을 보이다가 Toluene 성분이 점차 증가하여 최고농도인 3.3 g/m³의 값을 보였다. TPH의 농도는 최대 164 g/m³ 까지 증가되었다가 추출이 계속 진행됨에 따라 가스성분의 농도는 계속 감소하는 경향을 보여주었다. 토양가스중 n-alkane족과 DROs는 검출되지 않았다. 결국 SVE 시설의 운전을 통하여 주로 BTEX 및 휘발성이 높은 오염 성분들은 제거가 되나 더 무겁고 휘발성이 낮은 성분은 불포화층 및 지하수에 잔존한다는 결과를 보여준다.

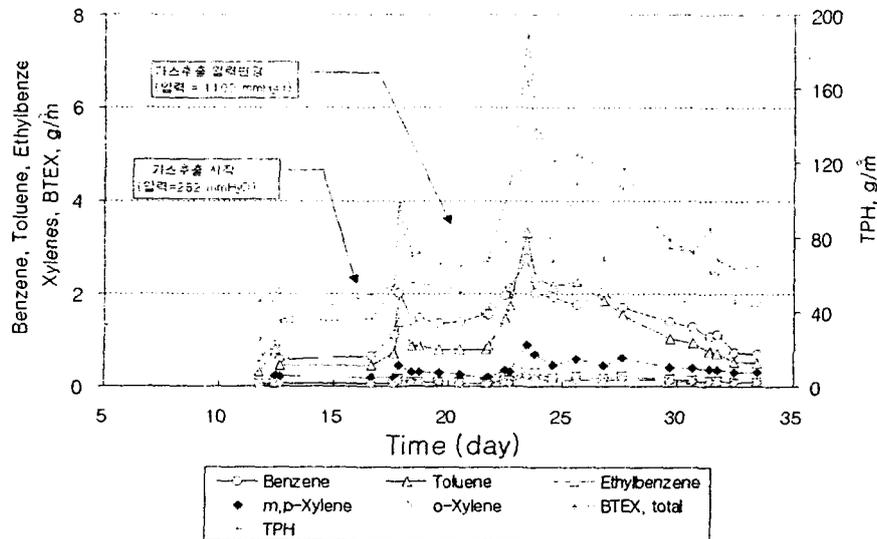


그림 3. 시간에 따른 BTEX 및 TPH 가스 농도 변화

가스 추출에 따른 BTEX 성분들의 비율은 TPH에 대한 BTEX의 비율로 0.02 ~ 0.08의 범위였으며 시간이 지날수록 감소하였다. BTEX 성분들 중 추출되는 양은 Benzene > Toluene > Xylene > Ethylbenzene 의 순서였다. 가스 추출법으로 제거된 가스성분의 누적량을 보면 약 19일의 운전기간동안 BTEX와 TPH 총량 기준으로 약 30 kg 및 708 kg이 제거되었다. 또한 BTEX와 TPH 각각에 대하여 4 kg/day 및 90 kg/day의 최대 제거 효율을 보인 후 시간에 따라 감소하였다.

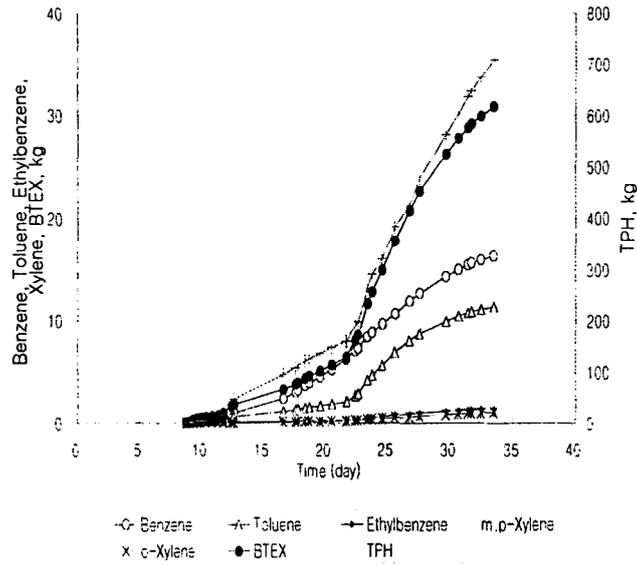


그림 4. SVE 운전에 따른 유로 오염 가스(BTEX, TPH) 누적 제거량

참고문헌

1. 배우근, 토양오염 복원기술의 적용 및 평가, 21세기 토양환경관리를 위한 발전방향. '99 세계 환경의 날 기념 국제세미나, 국립환경연구원, 1999.
2. Domenico P. A. and Schwartz F. W., Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, 1990.
3. Hyperventilate users manual by PC. Johnson, Shell development Westhollow research center, Houston ,TX
4. Thornton J. S., Wootan, W. L., Venting for the removal of hydrocarbon vapors from gasoline contaminated soil, J. Environ. Sci. Health, A17(1), 31-44
5. US EPA, How to evaluate alternative cleanup technologies for UST sites. EPA 510-B-94.003, 1994.