

유류로 오염된 토양 복원을 위한 토양가스추출 및 세척공정의 현장적용 연구

A Study on the In-Situ Soil Vapor Extraction and Soil Flushing for the Remediation of the Petroleum Contaminated Site

고 석 오* / 권 수 열** / 유 희 찬*** / 강 희 만**** / 이 주 광****
Ko, Seok-Oh / Kwon, Soo-Youl / Yoo, Hee-Chan / Kang, Hee-Man / Lee, Ju-Goang

Abstract

Field investigations for subsurface soil and groundwater at a gas station showed that the site was severely contaminated and even petroleum compounds as free liquid state were observed. Pilot-scale soil flushing and soil vapor extraction process(SVE) were applied to evaluate the effectiveness of pollutants removal. Surfactant solution, Tween 80, was used to enhance the solubility of petroleum compounds and resulted in about 10 times increase on TPH(Total Petroleum Hydrocarbon) concentration. As for SVE method, maximum concentration of TPH and BTEX reached within 24 hours of extraction and then continuously decreased. Considerations on the groundwater level and the kinetic limitation for volatilization of contaminants have to be taken into account for the effective application of SVE process.

Keywords : Soil Flushing, Soil Remediation, Soil Vapor Extraction, Surfactant, TPH

요 지

현재 운영중인 주유소를 대상으로 토양 및 지하수 오염 정도를 조사하였고 오염물 제거를 위한 물리·화학적 복원기술 적용성에 대한 연구를 실시하였다. 현장의 토양이나 지하수는 국지적으로 차이가 있었으나 토양오염 대책기준을 초과하여 토양층에 유동성 (Free Liquid) 상태의 유류가 존재할 정도로 상당히 오염되어 있다는 것을 확인하였다.

유류 오염 토양에 pilot scale 규모의 토양세척법과 토양가스추출법 (SVE)을 설치하여 운전하였다. 토양세척법의 경우 계면활성제인 Tween80 용액을 주입 한 후 하부에서 추출된 유출수내의 오염물질의 농도를 측정한 결과 용해도 증가에 의하여 TPH 농도의 증가는 약 10배에 이르는 것으로 조사되었으나 유류 유동성의 증가는 관측되지 않았다. SVE법의 경우 추출 1일 경과 후 BTEX와 TPH에 대하여 각각 4kg/day 및 90 kg/day의 최대 제거효율을 보였으며 추출이 지속됨에 따라 제거율이 감소하였다. SVE공정의 효과적 운영을 위하여는 지하수위의 높이에 대한 고려와 오염물의 휘발화 (volatilization)와 추출속도의 평형화를 위한 조절이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 석유계 탄화수소, 토양 복원, 계면활성제, 토양가스추출, 토양세척

* 정회원 · 경희대학교 토목건축공학과

** 한국방송통신대 보건위생학과

*** (주)대우건설 기술연구소

**** 한국도로공사 연구소

1. 서 론

급격한 경제성장의 결과로서 최근에는 각종 토양 오염으로 인한 환경 오염 사고가 발생함에 따라, 토양 오염에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 산업활동 및 자동차 보급대수의 증가와 함께 유류 사용량이 증대되면서 주유소를 비롯한 유류 저장시설의 숫자 또한 1980년대 중반 이후 급격히 증가하였다. 근래에는 유류를 저장하고 있는 주유소와 유해화학물질을 저장하고 있는 상업시설의 지하저장탱크에서 유해 오염물질의 누출로 인한 토양 및 지하수의 오염이 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 특히, 주유소 지하저장탱크에서 유류의 누출로 인한 오염은 토양의 생태계를 파괴하고 지하수를 오염시켜 심각한 문제를 야기하고 있다.

현재 국내 지하저장탱크의 현황을 보면 유류 및 유독 화학물질 저장시설 탱크수는 54,461개소(1996년 기준)이며 이중 5년이 지난 저장 탱크수는 26,038개소로 48%를 차지하며 지하 유류 저장탱크 중 누유가 예상되는 탱크수는 5,600개소로 추정되고 있다. 또한 전국적으로 8,300여개소의 주유소가 있고 이중 3,000여개 정도의 주유소 저장탱크에서 누유가 발생되는 것으로 추정되고 있다 (한국도로공사, 1998). 외국도 국내와 비슷한 실정으로서 미국의 경우, 2000년 기준으로 누유가 확인된 저장탱크의 숫자가 약 412,000개소에 달하고 있다 (U.S. EPA, 2001).

유류의 누출로 인한 토양 및 지하수의 오염영향을 최소로 하기 위하여 다양한 기술들이 개발되어 적용되고 있다. 대표적인 복원방법으로는 오염지역 내 토양의 굴착후 현장 밖으로 운반하여 처리하거나 매립하는 방법을 들 수 있다. 그러나 이러한 부지의 방법은 굴착 시 오염물의 노출에 따른 위해성, 높은 복원비용 등으로 인하여 적용성에 한계가 있다. 따라서 부지내에서 오염물을 바로 처리하는 방법이 적용되었으며 토양내 유류성분의 경우에는 토양가스추출법 (soil vapor extraction, SVE)이나 바이오벤팅 방법이 가장 광범위하게 사용되어 왔다.

오염된 토양 및 지하수의 복원을 위한 기술을 적용하기 위하여 우선적으로 오염물의 종류 및 특성과 오염부지의 수리지질학적 특성을 검토해야 하며 복원기술별로 소요비용, 소요기간, 유지관리 용이성 등 다양한 항목에 대한 종합적인 평가에 의하여 복원기술을 적용해야 한다 (배우근, 1999). 본 연구에서는 실제 주유소를 대상으로 하여 현장조사를 통한 토양 및 지하수의 유류오염 현황을 파악하였고 지역적 특성 및 오염특성을 감안하여 가장 적합한 복원기술을 적용하여 효과를 분석하였다. 즉, 오염된 주유소 토양의 오염정도, 토양의 물리·화학적 특징을 조사하여 오염토양 복원을 위한 기초자료로 사용하였다. 사용토양 및 지하수의 복원을 위하여 우선적으로 현장의 오염도 분석을 이용하여 유동상태의 NAPL로 존재하는 유류제거 기술을 우

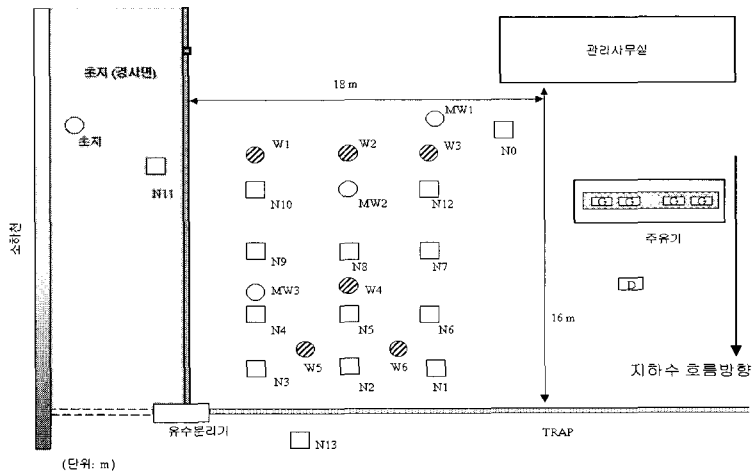


그림 1. D 주유소 현장도 및 추출공/관측공 설치위치

선적으로 적용하였다. 또한 토양 공극내에 존재하는 NAPL을 제거하기 위하여 가장 일반적인 기술인 토양세척법과 SVE 기술을 적용하는 시험을 실시하여 각 복원기술의 적용 시 효과와 고려사항을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 대상지역

대상지역은 현재 운영중인 D 주유소로서 총 6개의 지하저장탱크가 설치되어 있으며 이 중 5개의 휘발유 주유기 및 1개의 경유 주유기까지 연결된 관로가 지하에 매설되어 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 유류저장탱크 및 관리 사무실 하부지역인 가로 16m, 세로 18m 지역을 대상으로 하였다.

2.2 대상지역 토양 특성 및 오염도 조사

대상지역의 수리지질학적 특성과 오염도 평가를 위하여 관측공 (monitoring well) 설치 시 채취한 토양을 분석하였다. 토양을 보링하는 동안 시료의 교란을 최소화 하기 위하여 항타식으로 보링을 진행하였으며 직경 6 cm, 길이 80 cm인 Split-spoon sampler를 이용하여 깊이별로 2개씩의 토양을 채

취하였다 (Nilson, 1995). 채취된 토양은 40mL Vial에 넣은 후 용매로서 Methylene Chloride를 이용하여 저온에서 보관하여 분석장소로 운반하였다. 깊이별로 시료를 채취하면서 시료 채취지점, 수분함량, 냄새, 색깔 그리고 토양의 종류 및 pH 등을 현장 또는 운반 후 분석하였다.

장기적인 모니터링을 위해 토양 시추 후 즉시 직경 5 cm인 PVC 관을 설치하여 관측공으로 이용하였다. 가스 채취 및 압력측정을 위하여 직경 0.6 cm, 길이가 각각 120 및 250 cm인 gas 관 2 개를 설치하였다. 그림 1과 2에 관측공의 배치 및 구조를 나타내었다.

관측공을 설치한 후 지하수위가 안정될 때까지 기다린 후 펌프를 이용하여 일정 깊이별로 지하수 시료를 채취하였다. 시료는 Teflon-Sealed Cap이 달린 250 mL serum bottle에 head space가 발생하지 않도록 저장하였으며 0 - 4°C에서 보관한 후 분석을 실시하였다. 토양 및 지하수내 유류 오염물의 농도는 Capillary 컬럼 (HP-5)를 갖춘 GC-FID (HP 6890 Plus)를 이용하여 분석하였다. 또한, 시료채취 전후에 수위측정기 (Type KL 010, OTT Messtechnik, Germany)를 이용하여 지하수위를 측정하였다. 지하수의 수리전도도 분석을 위하여

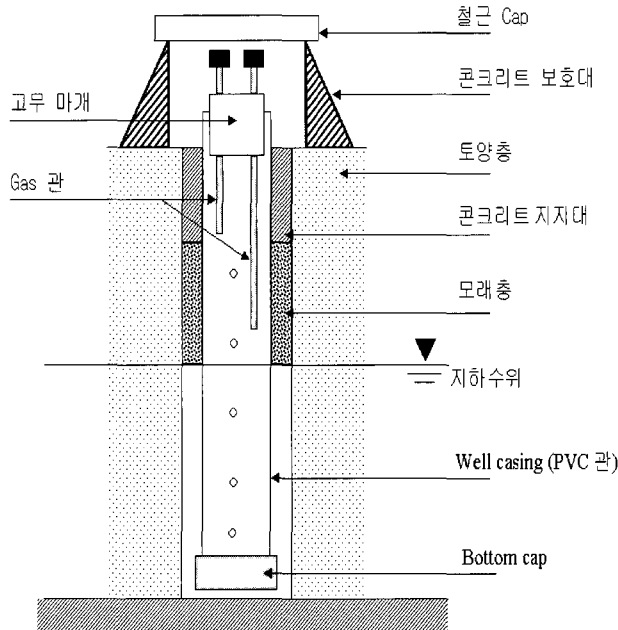


그림 2. 관측공 설치사양

각 관측공에서 Slug test를 실시하였다.

2.3 복원 시험을 위한 시설

D 주유소에 대한 현장조사 결과 토양 및 지하수가 심하게 오염되어 있으며 과도한 양의 유류 누출로 인하여 공극을 포화한 상태로 자유 유체 (free fluid)의 형태로 존재한다고 판단되었다. 이들 유류층의 제거 시간을 최대한 단축시키기 위한 시스템을 도입하여 시험하였다. 즉, 일차적으로 자유 유체로 존재하는 유류층을 최대한 제거하고 토양의 공극내에 NAPL로서 존재하는 유류오염물을 가스추출법을 이용하여 제거하는 시험을 실시하였다.

2.3.1 공극내 포화된 유류 NAPL의 제거

토양 공극에 포화되어 있는 유류 NAPL을 제거하기 위하여 지하수의 펌핑을 통한 방법을 시험하였다. 또한 공극내의 유류 NAPL과 토양입자간의 표면장력을 감소시켜 NAPL의 이동성이 높이기 위하여 상부에서 계면활성제 용액을 공급하고 하부에서 지하수를 펌핑하여 처리하는 시험을 하였다. 이를 위하여 그림 1과 같이 지하수의 추출을 위한 것과 토양내 오염물의 세정을 위한 주입정으로 구분하여 설치하였다. 각 주입공과 추출공의 구조는 관측공의 사양과 유사하게 하였다. 오염물의 세척을 위한 주입공 (W1, W2, W3)은 상부 지역에 3 곳에 설치하였으며 세척용액은 FRP 물탱크에 저장시킨 후 펌프를 통하여 각각 주입되도록 하였다. 오염지역의 하부 지역에는 지하수의 추출을 위한 추출공 (W5, W6)을 2곳 설치 하였으며 펌프를 통하여 지하수를 추출하고 각 공에서의 유량과 시료를 채취할 있도록 설치하였다. 추출된 지하수는 주유소에서 설치한 유수분리기로 보내도록 하였다.

2.3.2 공극내 잔류된 유류 NAPL의 제거

SVE 시설을 이용하여 유류 오염성분을 제거하기 위하여 오염 지역의 중앙 하부지역에는 토양증기 추출을 위한 추출공 (W4)을 1개 설치하였으며 콘테이너 시설 내부에 토양가스의 추출을 위한 블로워를 설치하였다. 또한 블로워의 앞단에 가스내 수분을 제거할 수 있는 기액 분리기를 설치하였다. 진공펌프(삼화전기사)는 최대 진공압 1100mmH₂O, 공기량 최대 13m³/min 의 용량이다. 토양가스 추출관은 5 m의 깊이로 설치하였다. 추출정은 직경

50mm의 PVC 파이프로 되어 있으며 스크린은 상부 1m까지, 슬릿형 스크린을 제작하였다. 가스의 유량과 압력을 측정하기 위하여 Amemometer와 휴대용 압력계를 사용하였다. 가스의 채취를 위하여 채취관에 샘플링 펌프 (Gilian5, Gilian, Inc.)를 연결한 후 5분 동안 활성화된 컬럼 (SKC, Model No. 226-01)에 가스를 흡착하였다. 활성화탄에 흡착된 가스성분은 CS₂ 용액을 이용하여 추출한 후 분석하는 대기오염공정시험방법 (환경부, 1997)에 의하여 분석하였다. 가스추출시설의 운전 기간동안 유효한 영향반경과 가스투과계수 (air permeability)의 평가를 위하여 추출압력을 변화 시켜가며 주위의 관측공에서의 압력을 측정하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 현장 수리지질학적 특성

관측공 설치시 채취한 토양을 조사한 결과 연구대상 지역은 일반적으로 지표면에서 2 m 깊이까지는 불균일한 모래 및 자갈 재질의 매립토로 구성되어 있으며 2 ~ 4 m 깊이에서는 퇴적토, 4 m 이하는 풍화토로 조정되는 있는 것으로 나타났다. 특히 지표면에서 1 m 깊이의 토양의 경우 색깔이 회색을 띠며 냄새가 많이 발생하는 것으로 보아 오염도가 심한 것으로 판단되었으며 주유소 건설시 지반조성을 위하여 성토된 자갈 및 모래층이 주요 성분이었다.

대상지역의 토양 투수계수 결정을 위하여 현장의 몇 개 지역에 대한 Slug 시험을 실시하여 얻은 각 관측지역의 투수계수 값은 $2.37 \times 10^{-5} \sim 1.44 \times 10^{-4}$ cm/sec의 범위를 나타냈으며 일반적인 사질토의 특성치를 나타내고 있다 (Domenico, 1990). 투수계수는 지역에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 이러한 현상은 대상 주유소 지역을 건설하기 위하여 사면지역을 토사로 매립하여 지반을 편평히 하는 과정에서 토양이 불규칙하게 분포되어 지층 자체가 간격이 가까운 지역에서도 불규칙한 토양특성을 가지게 되었음을 간접적으로 시사하고 있다. 지하수위 조사결과, 현장지역의 지하수 흐름은 지역의 지면 경사와 동일한 흐름을 보여 저장탱크에서 하부로 흐르고 있었으며 지하수위는 각 관측공 별로 지표면 밑으로 약 1.1 ~ 4.5m의 깊이로 광범위한 차이를 나타내고 있었다. 이 수치는 유류층

두께를 감안하지 않은 것으로서 유류층은 0 ~ 2.2m의 두께로 각 관측공별로 차이가 있었다. 일반적으로 관측공에서 측정된 유류층의 두께는 실제 불포화 토양에서 1/5가량의 두께를 보이는 것으로 알려져 있다 (U.S. EPA, 1996). 따라서 연구대상 지역의 토양의 공극은 유류에 의하여 과포화된 상태로 있다고 판단된다.

3.2 토양오염도 측정결과

표 1에서 나타난 바와 같이 토양 내 BTEX 및 TPH농도는 지하저장 탱크에서 먼 지점에서 높게 나타났으며 지하저장탱크에 가까운 지점일수록 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 지하저장탱크로부터의 유류누출이 상당히 오래 전에 발생된 후 하부로 이동중에 있음을 간접적으로 의미하고 있다. 토양내 유류오염물의 농도는 TPH 기준으로 각각

2,000 및 5,000mg/kg인 토양오염우려기준 및 대책 기준치를 크게 웃돌아 이 지역에 대한 복원이 필요한 것으로 나타났다. 지중 깊이별 오염분포에서는 대부분의 토양에서 지표면에서 약 1m 깊이에서 높았고 지하수위 바로 위에 위치한 토양이 오염되어 있다.

다음 표 2는 관측공 설치 후 지하수위가 형성된 지 2주일 후에 측정된 자료이다. 지하수내 TPH 농도는 80~750 mg/l 내외로서 토양뿐만 아니라 이 지역 지하수도 유류에 의해 많이 오염이 된 것으로 나타났다. 지하수의 pH는 6.2~7.1, 온도는 14~19℃ 범위였다.

3.3 공극내 포화된 유류 NAPL의 제거

토양 및 지하수의 오염도를 조사한 결과 토양내의 유류성분은 공극내에 포화되어 유동 가능한 유

표 1. 현장 토양 시료분석

MW No.	Depth, m	TPH, mg/kg	BTEX, mg/kg
N1	1.10	260,888.9	98,266.7
	2.60	7,362.6	469.2
N2	0.80	73,215.9	7,884.5
	3.40	2,483.2	102.8
N3	1.40	48,986.5	3,172.0
	4.30	7,970.9	1,015.1
N4	1.40	12,341.2	1,734.7
	3.20	8,042.3	1,731.5
N5	1.40	3,865.1	320.9
	2.20	5,029.4	464.3
N6	1.40	1,073.9	459.7
	3.70	8,954.8	739.6
N7	1.50	1,235.5	219.1
	2.40	5,188.0	424.9
N8	1.20	4,552.8	1,059.1
	2.90	331.5	342.4
N9	3.20	4,133.8	945.2
N10	1.30	676.5	1,150.1
	2.50	950.7	N.D.
N11	1.80	2,664.5	251.4
	3.40	32.3	380.3
N12	1.30	317.5	68.6
	3.50	4,483.5	450.7
N13	0.60	51,084.0	5,890.4
	3.50	1,989.9	245.2

표 2. 주유소 지역 지하수내 오염물 농도자료

MW No.	Depth, m	TPH, mg/L	DO, mg/L	pH	ORP, mV	Temp., C
N0	4.9	471.3	4.4	6.2	47.0	18.1
N2	1.8	750.4	4.0	6.8	40.2	13.8
N3	2.1	654.7	6.2	7.1	22.2	13.8
N7	3.8	80.6	6.6	6.9	21.2	18.6
N8	1.1	199.0	1.0	6.8	14.2	14.5
N9	4.3	443.9	4.8	6.6	47.6	17.4
N12	3.2	400.2	3.8	6.4	27.4	18.7
	5.2	462.3	3.6	6.3	36.9	17.6

류 (free NAPL)로서 존재하고 있는 오염이 극심한 상태로써 일반적으로 유류오염 토양 복원에 많이 쓰이는 SVE 기술이나 생물학적 분해공법 등의 적용 시 오랜 시일이 소요된다고 판단된다. 따라서 우선적으로 유동 가능한 공극내 포화된 유류를 제거하는 시설 운영을 하였으며 지하수의 펌핑을 통하여 유동성 유류를 제거하였다. 펌핑율은 두 공에서 5L/min으로 유지하였으나 W5 추출정에서는 지하수 유동량이 적어 펌핑율을 1 ~ 2L/min으로 감소시켜 운전하였다. 추출시 인근 관측공 (N1 ~ N6)에서의 지하수위는 약 50cm 정도 낮아졌으며 상부 관측공 (N7 ~ N9)의 수위는 20cm 정도 낮아졌다.

지하수의 펌핑 기간동안 추출된 유출수를 지속

적으로 샘플링하였으며 초기에는 검은 색의 유류가 추출되었고 시간이 경과할수록 투명한 지하수가 추출되었다. 투명한 지하수임에도 불구하고 냄새가 심하게 났다. 오염물의 농도 분석결과, TPH 기준으로 최대 672,000 mg/L의 농도를 보이다가 추출이 지속됨에 따라 농도는 감소하여 500mg/L 정도의 일정값을 유지하였다.

추출되는 지하수내의 유류성분 농도가 일정 수준을 유지함에 따라 보다 신속하게 유류성분을 제거하고자 상부에 설치한 주입공에 용수를 공급한 후 추출하였으나 추출된 지하수내 유류성분의 농도는 그다지 증가하지 않았다. 이는 유류의 점성이 높아 토양내 유동성이 낮은 때문이라고 판단된다. 따라서 유류 NAPL의 유동성과 용해도를 증가시키

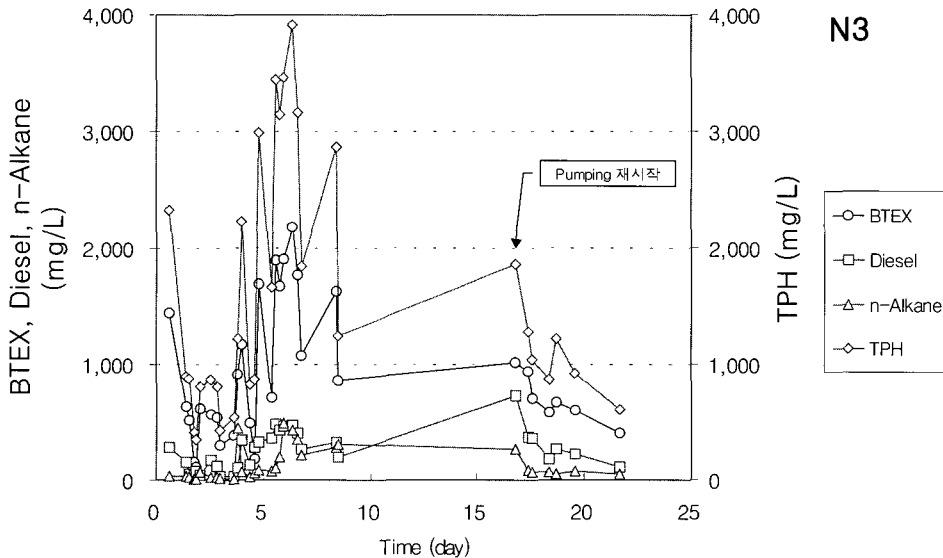


그림 3. 계면활성제 주입후 시간에 따른 BTEX, Diesel 및 TPH 농도변화

기 위하여 비이온성 계면활성제인 Tween 80을 주입하였다. Tween 80 용액 (0.12M)을 5일간 주입하였고 하부에서 추출된 유출수내의 오염성분 농도를 그림 3에 함께 나타내었다. Tween 80 용액의 주입 후 오염물의 농도는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. Tween 80이 오염물의 제거에 미치는 주된 영향은 유류 오염물 NAPL의 유동화 (mobilization)와 용해도의 증가에 의한 것으로서 유출수에서 나타난 BTEX, Diesel 및 n-Alkane의 농도는 계면활성제 주입 전과 후의 비율이 최대 각각 15배, 7.8배 및 47배의 농도 증가를 보였다. TPH를 기준한 농도의 증가는 약 10배의 증가를 보였다. 이러한 결과로부터 오염성분의 증가치는 주로 계면활성제에 의한 용해도의 증가에 기인한 것이라 판단되며 유동화에 의한 것은 포함되지 않은 것이라 판단된다. 용액의 주입을 멈춘 후 8일 이후에 재 펌핑한 유출수에서는 계면활성제가 지속적으로 관측되었으며 유류 오염물의 농도 또한 배경 값보다 높은 값을 보였다. 펌핑이 지속됨에 따라 계면활성제 및 오염성분의 농도 또한 지속적으로 감소하였다.

3.4 SVE 공정에 의한 유류성분 제거

3.4.1 영향반경 및 공기투과계수의 결정

공기를 주입/추출할 경우의 영향 반경 (radius of influence)을 구하기 위하여 추출관에서 떨어진 관측공에서의 지중압력 차를 측정하여 이를 거리에 따른 변화를 측정하였고 대략 3.65 ~ 3.84 미터의 영향반경을 나타내었다. 이 값은 일반적인 사질토의 경우보다 작은 값이므로 강우로 인하여 지하수위가 상당히 상승하였을 때 영향반경에 대한 실험을 실시한 결과라 판단된다. 영향 반경 값을 이용하여 대상 지역에 대한 불포화층의 공기투수계수를 아래의 식을 이용하여 계산하였다 (김재덕 등, 2000).

$$k = \frac{Q\mu \ln(R_w / R_i)}{\pi H P_w [1 - (P_{atm} / P_w)^2]}$$

여기서, k 는 공기투수계수 (darcy), Q 는 가스유량 (m^3/hr), μ 는 가스 점도(cp), P_w 는 추출정에서의 절대압력 (atm), P_{atm} 은 대기압 (atm), R_w 는 추출관 파이프의 직경 (m), R_i 는 영향반경 (m) 이다. 영향반경이 3.7m일 경우의 대상지역의 공기투과계

수는 1.6 darcy로 계산되었다.

3.4.2 추출 가스의 분석 결과

우선적으로 블로워를 최대의 압력 (1100 mm H₂O)으로 가동하여 가스 성분 및 지하수위의 변화에 대한 예비실험을 실시하였다. 토양 가스의 추출 전 지하수위는 약 280 cm로서 최대의 압력으로 추출할 경우 지하수위가 100cm 이상으로 상승함에 따라 유효한 불포화층의 두께가 상대적으로 감소하는 결과를 초래하였다. 이에 따라 채취된 가스성분은 일부 불포화층에서의 나온 가스성분과 지하수에서 휘발된 가스성분으로 구성되었다고 말할 수 있다. 따라서 가스성분의 추출 효과를 극대화시키기 위하여 압력의 조절을 통한 불포화층의 두께를 증가시킬 필요가 있다. 따라서 가스추출 압력을 252 mmH₂O로 감소시켜 운전하였고 이에 따라 지하수위의 약 20cm 정도만이 상승하는 결과를 보였다. 이와 같은 운전 결과 가스농도의 변화를 아래의 그림 4에 나타내었다.

가스의 추출압력을 감소시켜 운전한 결과, 가스성분의 농도변화도 초기에 증가하는 경향을 보이다가 최고농도를 나타낸 후 추출이 계속 진행됨에 따라 서서히 감소하는 경향을 보여주었다. 일정 기간이 경과한 후에 추출공에서의 지하수위를 측정된 결과 350cm 정도로 유지됨에 따라 가스 추출압력을 최대로 증가 (1100mmH₂O)시켰고 이에 따라 채취된 가스성분의 농도는 다시 급격히 증가하였다. BTEX 성분을 합한 농도는 약 7.6g/m³ 정도였고 BTEX 중 Benzene 성분이 높은 비율을 보이다가 Toluene 성분이 점차 증가하여 최고농도인 3.3 g/m³의 값을 보였다. TPH의 농도는 시간에 따라 상대적으로 불규칙한 양상을 보여주고 있으나 전체적으로는 추출이 계속 진행됨에 따라 가스성분의 농도는 계속 감소하는 경향을 보여주었다.

현장에서 채취한 누유 원액 NAPL의 head space 중의 BTEX와 TPH 농도는 각각 74.1g/m³과 245.2g/m³로서 SVE 시설에서의 최고 농도보다 훨씬 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 가스가 추출된 공 주위의 불포화층 공극내에서의 NAPL 오염물은 부분적으로 포화되어 있다는 것을 알 수 있다. 토양가스 추출 시 검출되지 않았던 n-alkane 족과 DROs (diesel range organics)는 NAPL 원액에서 검출이 되었고 농도는 각각 38.7 및 25.1g/m³

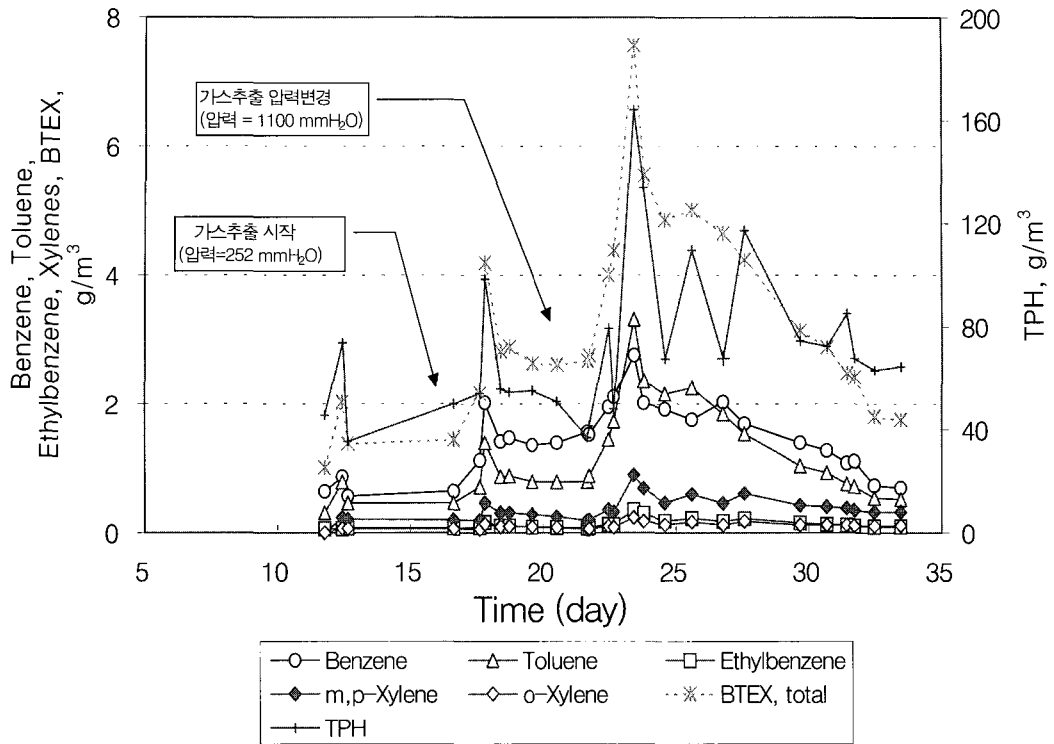


그림 4. 시간에 따른 가스내 BTEX 및 TPH 농도 변화(SVE)

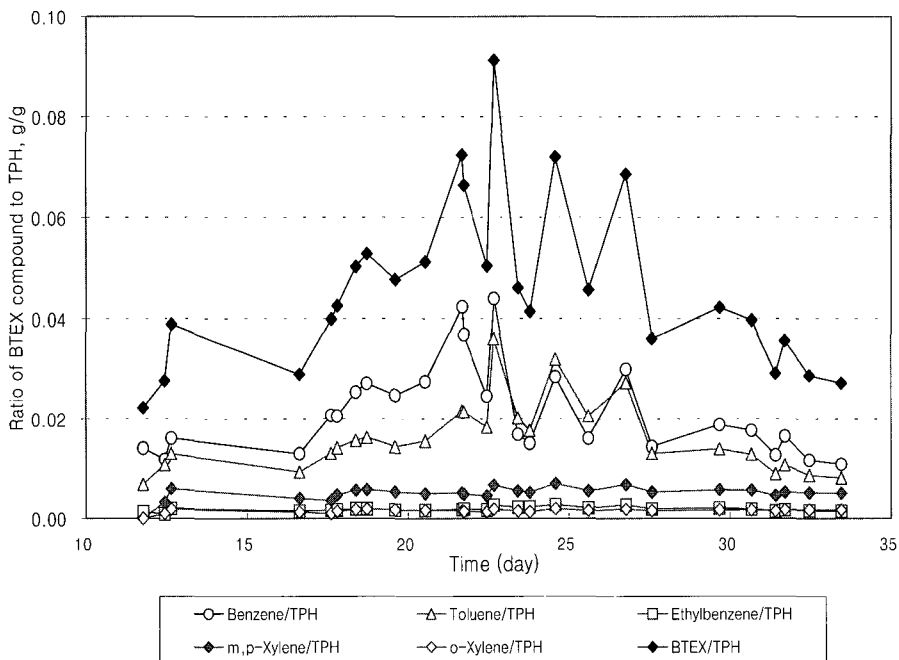


그림 5. 가스 추출에 따른 BTEX 성분들의 비율 변화(SVE)

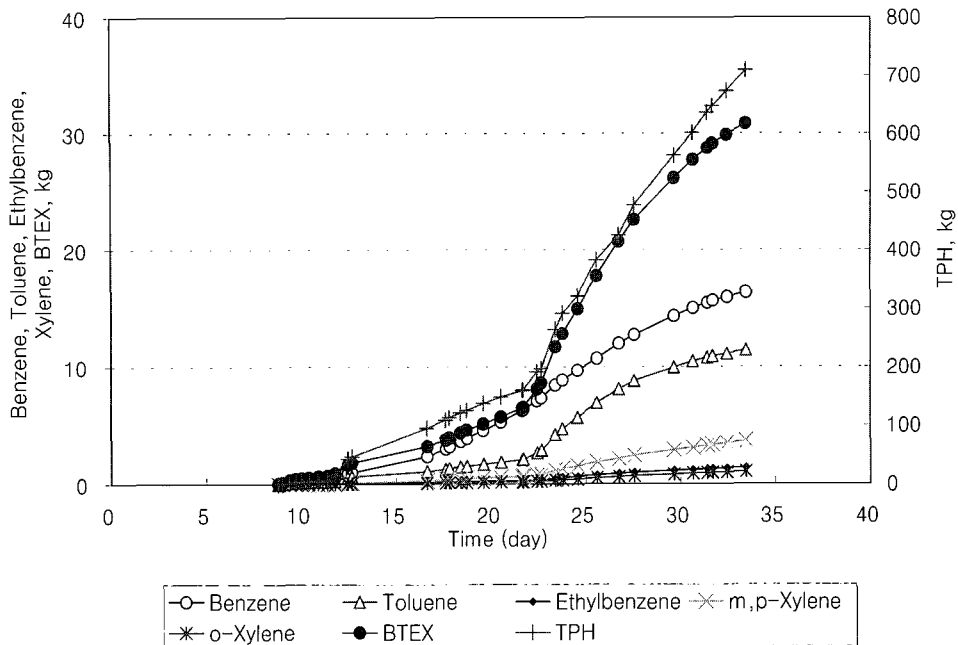


그림 6. SVE 운전에 따른 유류오염 가스 (BTEX, TPH) 누적 제거량

이었다. 결국 SVE 시설의 운전을 통하여 주로 BTEX 및 휘발성이 높은 오염성분들은 평형상태가 아니라 비평형 상태에서 휘발하여 제거되며, 더 무겁고 휘발성이 낮은 성분은 불포화층 및 지하수에 잔존한다는 결과를 보여주고 있다.

3.4.3 추출 가스 조성 분석

가스 추출에 따른 BTEX 성분들의 비율 변화를 아래의 그림 5에 나타내었다. TPH에 대한 BTEX의 비율은 0.02 ~ 0.08의 범위를 보여주고 있으며 이 비율은 추출 초기에 증가하다가 최대값을 보인 후 휘발성 성분이 점차 제거됨에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 따라서 시간이 경과할수록 휘발성이 낮은 오염성분이 잔류하여 비율이 높아짐을 나타낸다. BTEX 성분 중 Benzene의 비율이 높게 나타났고 시간이 경과할수록 Toluene과의 비율이 비슷하게 유지되었다. 성분들의 추출되는 양은 Benzene > Toluene > Xylene > Ethylbenzene의 순서였다.

3.4.4 가스추출에 의한 유류 오염성분 제거량

본 연구에서 토양가스 추출법의 현장시험을 통하여 제거된 가스성분의 누적량을 아래 그림 6에

나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 휘발성이 강한 순서대로 Benzene, Toluene의 순서대로 제거가 되었으며 m,p-Xylene의 경우에는 Ethylbenzene의 경우보다 제거되는 양이 많았다. 약 19일의 운전기간동안 BTEX와 TPH 총량 기준으로 약 30kg 및 708kg이 제거되었다. 그러나 시간의 경과에 따라 가스농도가 계속 감소하므로 증가율은 크지 않으리라 판단된다. 유류 오염가스 성분의 제거 효율은 BTEX와 TPH 각각에 대하여 4kg/day 및 90kg/day의 최대 제거 효율을 보인후 시간에 따라 감소하였다.

4. 결론

유류에 의해 오염된 토양복원을 위한 물리화학적 기술의 적용성을 평가하기 위하여 주유소의 토양과 지하수의 현장조사를 실시하였다. 토양내 TPH 및 BTEX의 농도는 토양오염 대책기준인 5,000mg/kg과 200mg/kg을 훨씬 초과하는 오염도를 나타내고 있으며 유류 NAPL은 국지적으로 토양 공극내에 포화상태로 존재하고 있었다. 지하수의 오염물 농도 또한 TPH 기준으로 최대 750mg/L의 높은 농도를 나타내었다. 유류 성분은 지표 밑 1m 부근과 지하수위의 상하 부근에서 높은 농도를 나타내었다. 현장 토양은 주로 사질토로 구성되어

있었으며 유류는 주유소의 하류지역으로 유동되어 오염의 확산이 진행중인 것으로 판단되었다. 토양 복원을 위한 현장 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유류의 과다한 누출로 인하여 토양 공극내에 과포화되어 유동성있는 상태로 존재하는 경우 기존의 복원기술을 적용하기 전에 유류를 신속하게 제거 할 필요가 있으며 펌핑시간의 경과에 따라 지하수내 오염물의 농도는 점차 감소하여 일정하게 유지되었다.
- 2) 토양 공극내에 존재하는 유류의 유동성과 용해도를 증가시키기 위하여 계면활성제인 Tween 80을 투입하여 TPH 기준으로 약 10배의 용해도증가를 관측하였으나 유동성의 증가도는 미미하였다. 이는 오염물인 유류가 비중이 낮은 NAPL로 존재하여 계면활성제와의 접촉이 크지 않았던 것인 기인한다고 판단된다.
- 3) 토양에 잔존하는 유류 NAPL의 제거를 위하여 SVE시설을 이용 시 지하수의 상승정도를 검토할 필요가 있으며 수위가 높은 경우에는 SVE보다는 Dual-Phase 추출이나 Bioventing 방법 등의 적용을 고려할 필요가 있다.
- 4) SVE시설 운전 후 24시간 이내에 가스의 농도는 최대값을 나타내었으며 시간의 경과에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 휘발성 성분비율이 점차 감소하고 가스 추출에 따른 유류성분의 휘발화 (volatilization)에 대한 시간적제한 (kinetic limitation)에 의한 것이라 판단된다. 따라서 연속적 운전보다는 간헐적 운전에 대한 고려가 오염물 제거효과 및 경제적 측면에서 필요하다고 판단된다.
- 5) 가스 추출에 따른 TPH에 대한 BTEX의 비율

은 0.02 ~ 0.08의 범위를 나타내었으며 BTEX 성분중 Benzene 비율이 높다가 시간경과에 따라 Toluene과의 비율이 유사하게 유지되었다. 추출되는 성분의 양은 Benzene > Toluene > Xylene > Ethylbenzene의 순이었다. SVE 운전에 따른 BTEX 및 TPH의 제거 효율은 최대 8kg/day와 40kg/day의 값을 나타내었다.

5. 참고문헌

- 1) 한국도로공사 (1998) 고속도로 주변과 주유소의 토양오염에 관한 연구, pp. 45-165
- 2) U.S. EPA (2001) **Corrective Action Measures Archive**, Office of Underground Storage Tank
- 3) 배우근 (1999) 토양오염 복원기술의 적용 및 평가. '99 세계환경의 날 기념 국제 세미나 논문집, 국립환경연구원
- 4) 환경부 (1997) 토양오염공정시험법, 환경부
- 5) Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990) **Physical and Chemical Hydrogeology**, John Wiley and Sons, New York.
- 6) U.S. EPA (1996) **How to Effectively Recover Free Product at Leaking Underground Storage Tank Sites**, EPA 510-R-96-001.
- 7) Neal Wilson, **Soil Waste and Ground Water Sampling**, Lewis Publishers, 1995.
- 8) 김재덕, 김영래, 황경영, 이성철(2000) "토양중 기추출법에 의한 휘발유 오염토양의 현장 복원 연구," 한국토양환경학회지, 5권, 1호, pp. 13-23.