

유류오염토양 복원을 위한 설계인자 선정에 관한 연구

조장환, 전권호, 서창일, 박정구

환경관리공단 토양복원진단팀 (e-mail : cho6272@empal.com)

<요약문>

The objective of this study was to decide the designing factor for remediation of the contaminated site. The soil and ground-water samples were analyzed and hydro- geological characteristics was assayed for the survey of pollution level. Also air-permeability test and MPN(most probable number) test were conducted for selecting the designing factor. The contaminants were mainly found in north-west part of the site and were expected to move toward the south. Ex-situ technology was expected more useful than in-situ one with the results of air-permeability test saying that air permeability was relatively low. Additional microbes were expected for remediation efficiency because residual microbes were loosely populated. The choosing of the designing factor was requisite for remediation of contaminated site.

key words : contaminated site, remediation, designing factor, air-permeability, MPN

1. 서론

오염토양의 복원을 위해서는 오염물질의 종류, 오염면적 및 농도뿐만 아니라 대상지역의 수리·지질학적 특성을 파악하는 것이 중요하다. 이를 위한 조사절차를 토양환경보전법에서는 기초조사, 개황조사, 정밀조사의 3단계로 명시하고 있다¹⁾. 이중에서도 오염지역의 정밀조사는 복원을 위한 설계인자 도출시 직접적인 영향을 미친다. 정밀조사는 크게 토양 및 지하수의 오염현황 파악 및 향후 오염범위 예측 등으로 나뉘 수 있는데, 일정 지점의 토양 및 지하수의 농도를 분석하여 오염현황을 파악하고, 지하수의 흐름방향 및 속도를 파악하여, 향후 오염확대범위 등을 추정한다.

오염토양 복원기술은 처리 위치에 따라 크게 원위치(In-situ)처리와 위치외(Ex-situ)처리로 구분되며, 원위치 토양오염정화 기법중 하나인 토양증기 추출법은 통기계수(Air permeability)가 10^{-6}cm^2 이상에서 효과적인 것으로 알려져 있다²⁾. 오염토양의 미생물처리공법에 영향을 미치는 주요 인자로는 토양의 수분함량, pH 및 미생물 개체수 등이 있는데, 미생물의 개체수가 낮을수록 미생물에 의한 오염물질의 분해에 많은 시간이 소요된다. 본 연구의 목적은 유류오염지역의 복원을 위한 정밀조사 및 복원공법의 타당성을 조사하여 최적의 복원 공법을 선정하기 위한 설계인자를 도출하는 것이다.

2. 본 론

2.1 정밀조사

2.1.1 대상오염 부지

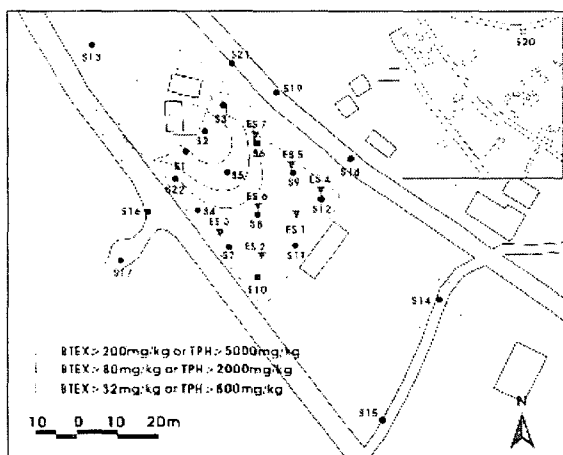
복원 대상 부지는 인천시 00지역에 위치하고 있으며, 지난 수십년간 중산간부에 설치된 유류 수송관로의 균열에 의한 유류누출에 의해 토양 및 지하수가 오염된 것으로 알려져 있다. 연구대상 지역은 현재 사용이 보류된 상태이며 면적은 약 1,200㎡ 이었다.

2.1.2 토양 및 지하수 시료 채취

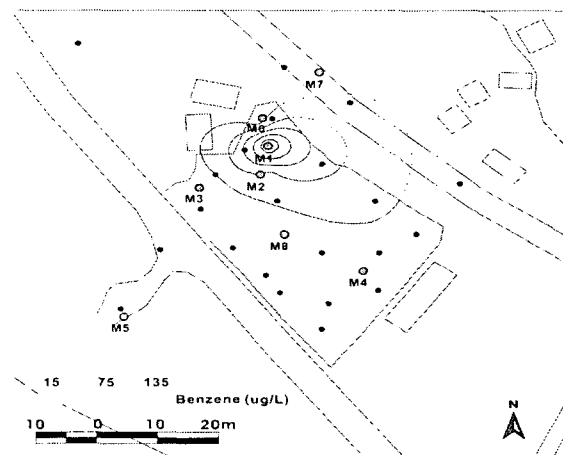
기계식 토양시료 채취기인 지오-프로브(Geo-prove)를 이용하여 총 29개 지점에 지하 3.5m 까지 3심도(1심도 : 0.5~1.5m, 2심도 : 1.5~2.5m, 3심도 : 2.5~3.5m)로 토양시료를 채취하여 분석하였다. 또한 8 지점에 지하수 관측정을 설치하여 지하수를 채취하여 분석하였다. 토양오염물질의 분석항목은 석유계 총탄화수소(TPH : Total Petroleum Hydrocarbon)와 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene 및 Xylenes)이었으며, 지하수 시료는 BTEX를 분석하였다.

2.1.3 토양 오염도 분포

분석결과 BTEX는 1심도에서 전반적으로 오염이 심하지 않았으며, S3과 S5를 중심으로 102.5~119.7mg/kg의 농도를 나타내었다. 2심도는 오염이 심한 구간으로 나타났으며 S1, S2 및 S5를 중심으로 133.7~533.4mg/kg을 나타내었다. 3심도는 1심도와 2심도의 중간정도의 오염농도를 나타내었는데, S6과 S21을 중심으로 112.8~256.1mg/kg의 농도를 나타내었다. 석유계총탄화수소의 경우 1심도에서는 S1과 S5를 중심으로 2,408.4~3,590.3mg/kg의 농도를 나타내었으며, 2심도에서는 S1, S2, S3 및 S5를 중심으로 2,059.7~2,318.7mg/kg의 농도를 나타내었다. 3심도에서는 S6, S18 및 S21에서 오염이 발견되었으며 오염농도는 2,141.8~2,580.3mg/kg이었다. 전반적으로 대상부지의 북쪽과 서쪽을 중심으로 오염이 상대적으로 높게 분포되어 있는 것으로 나타났다. [그림 1]은 오염대상부지의 시료채취 위치 및 오염토양 현황을 나타내었으며 [그림 2]는 지하수 관측정의 위치와 지하수 오염현황을 내었다. 각 지점의 오염농도를 분석한 후 3D 그래픽 프로그램인 Sulfer ver. 6 (Golden Software, Inc.)를 이용하여 나타내었다.



[그림 1] 토양 시료의 농도분포



[그림 2] 지하수시료의 농도분포 (1차, 벤젠)

2.1.4 지하수 오염도 분포

1차(2003. 10. 16)와 2차(2003. 11. 14.)에 걸쳐 채취한 지하수의 수질분석결과를 [표 1]에 나타내었다. 1차 및 2차 시료 모두 일부 관측점에서 BTEX는 지하수용도별 수질기준중 생활용수 기준을 초과하고 있다. 1차와 2차 모두 M1과 M2 관점에서 생활용수 기준으로 지하수용도별수질기준을 초과하고 있다. 2차보다는 1차에서 더 높은 오염정도를 보여주고 있다. BTEX중에서 톨루엔을 제외한 나머지 벤젠, 에틸벤젠 및 크실렌이 수질기준을 초과하고 있다. M1 관점에서 벤젠의 생활용수 기준농도 0.015 mg/L를 10배 이상을 초과하여 0.176 mg/L을 농도를 나타내었다. 벤젠 외에도 M1 관점에서는 에틸벤젠, 크실렌도 생활용수 기준농도를 훨씬 초과하였다. M2 관정도 역시 벤젠, 에틸벤젠 및 크실렌이 각각 0.040 mg/L, 0.152 mg/L 및 1.070 mg/L로 검출되었다. 2차 시료에서는 M1 및 M2 관정을 중심으로 오염되어 있는 것으로 판단되었다.

[표 1] 지하수 시료분석

(단위 : mg/L)

		M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8
Benzene	1차	0.176	0.040	불검출	0.002	불검출	불검출	불검출	0.002
	2차	0.030	0.011	불검출	0.004	불검출	불검출	불검출	0.003
Toluene	1차	0.004	0.019	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	2차	0.008	0.005	불검출	0.001	불검출	불검출	불검출	불검출
Ethyl-benzene	1차	1.261	0.152	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
	2차	0.024	0.022	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
Xylenes	1차	1.004	1.070	불검출	불검출	불검출	0.001	불검출	불검출
	2차	0.091	0.394	불검출	0.003	불검출	0.003	불검출	불검출

- 생활용수 기준농도 : Benzene(0.015mg/L), Toluene(1mg/L), Ethylbenzene (0.45mg/L), Xylenes (0.75mg/L)

2.2 설계인자 선정

2.2.1 투기계수 산출

토양의 투기계수(Air permeability)는 매질인 토양이 얼마나 기체를 잘 통과시키는지에 대한 지표로 실제 현장규모의 In-situ 시스템 설계시 처리효율을 예측할 수 있는 주요 인자중의 하나이다. 본 실험은 현장 실험을 통해 지층에 외부 공기 주입과 토양가스 추출 실험을 통해 거리/시간별 압력 변화를 모니터링 하였으며, 이 결과를 토대로 투기계수를 산출하였다.

현장에 설치된 관정은 공기의 주입과 추출을 위한 주입/추출정(이하 '처리정')과 압력 변화를 측정하기 위한 관측정 등 2가지로 나눌 수 있다. 관정은 목적에 따라 그 기능과 설치방식을 달리하였는데, 처리정은 1기로 관측정 중앙에 배열되었으며, 3.3m 구간에 표층으로부터 3m까지의 무공관과 0.3m의 유공관으로 구성되었다. 모든 관정의 재질은 PVC로 제작되었다. 관측정은 처리정을 중앙으로 좌우에 1m, 2m, 3m간격으로 설치되었다. 배관의 구성과 설치 깊이는 처리정과 동일하다. 압력 손실을 막기위해 상부는 실리콘 마개로 밀봉되었으며, 마개를 통해 고무호스를 관측정 내부로 삽입하여 압력을 측정하기 위한 미량 압력/진공계와 연결되도록 하였다.

투기계수의 산출은 아래의 [식 1]³⁾을 이용하였으며, 토양의 공극률은 일반적인 토양에 해당하는 0.5로 가정하고, B, A에 회귀분석 결과를 대입하여 각 관측정에서 투기계수를 산출하였다.

$$k = \frac{10^{-8} r^2 e u}{4 P_{atm}} \exp\left(\frac{B}{A} + 0.5772\right) \quad [\text{식 1}]$$

산출한 결과, 관측점 1은 6.97×10^{-11} cm³, 관측점 2의 경우에는 4.76×10^{-10} cm³를 나타내었다. 이는 일반적인 점토층이나 실트층의 통기성을 반영하는 것으로 SVE나 Bioventing과 같은 In-situ 방식에 의한 부지의 오염복원은 효율적이지 않은 것으로 판단되었다³⁾.

2.2.2 미생물 분석

토양 1 g을 10 mL의 멸균된 saline 용액(0.9% NaCl 용액)에 첨가하여 220 rpm에서 3시간 동안 균질화 시킨 후 적절히 희석하여 미생물 분석을 위한 시료로 사용하였다. 종속영양세균(heterotrophic bacteria)의 검출은 LB 평판배지에 희석 도말방법에 의해 접종한 후 25 °C에서 3일간 배양하여 형성된 균락을 계수 한다. 유류분해 미생물(petroleum degrading bacteria)은 최적확수(Most probable number: MPN)계수법을 이용하여 측정하였다⁴⁾. MPN배지로는 Bushnell-hass (Difco)배지를 사용하고, 유일 탄소 원으로는 diesel(5%, w/v)을 이용하였다. 접종된 배지는 25 °C에서 1~2주간 배양하고 0.3% INT 50 μl을 첨가하고 24시간 더 배양하여 색깔의 변화를 양성반응으로 간주하였으며 Tomas' simple formula을 이용하여 유류분해 미생물 수를 계수하였다. 토양시료내 미생물을 측정된 결과 총세균수는 5×10^4 CFU/g-soil 로 낮은 편이었고, 유류분해 미생물 수도 1.9×10^3 MPN/g-soil 정도로 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

3. 결 론

정밀조사 결과 대상부지의 북서쪽을 중심으로 TPH 및 BTEX에 의해 토양 및 지하수가 우려기준 (TPH : 2,000mg/kg, BTEX : 80mg/kg)을 초과한 것으로 나타났다. 공기투과율이 $6.97 \times 10^{-11} \sim 4.76 \times 10^{-10}$ cm³로 상대적으로 낮아 원위치 처리공법을 적용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 나타났다. 또한 토양을 굴착하여 미생물처리 공법을 적용할 경우, 토착미생물의 개체수가 5×10^4 CFU/g-soil로 상대적으로 낮아, 외부에서 미생물을 투입하는 것이 오염토양 복원에 유리한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 토양환경보전법, 환경부, 2002.1.
- 2) EPA, Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA: Soil Vapor Extraction, EPA/540/2-91/019B September 1991.
- 3) EPA, Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA: Soil Vapor Extraction, Interim Guidance, EPA/540/2-91/019A September 1991.
- 4) J. L. Oblinger and J. A. Koburger. Understanding and Teaching the Most Probable Number Technique. J. Milk Food Technol. 38(9): 540-545. 1975.