

산악지역 내 LNAPL 오염의 개념모델 정립을 위한 사례연구

강우재 · 공준 · 전진오 · 이상봉 · 황종식 · 배우근*

(주)에코솔루션

*한양대학교 토목환경공학과

e-mail: wjkang@ecosol.co.kr

ABSTRACT

Since mountainous area has access restrictions for field work, assessors need to establish a conceptual model of the contamination prior to the field investigation. In this study, we established a conceptual model of the contamination based on site inspection and geological survey, followed by the field investigation for the petroleum spill site. In the conceptual model, we estimated that the contamination should have spread by groundwater and topographical characteristics within the top soil layer. The spread of contamination through rock was not considered in the conceptual model due to impermeable characteristics of metasyenite.

The contaminated environmental media of the petroleum spill site include soil and groundwater. According to the analysis result of the contamination, the volume of contaminated soil is estimated approximately 4,150 cubic meters (7,055 ton) with most contaminants existing along the groundwater flow within top soil layer.

Key word: mountainous area, site assessment, petroleum, Conceptual Model, LNAPL

1. 서론

유류 오염부지에 대한 복원 조사(Remedial Investigation)시, 우선적으로 오염물질과 지질/수리지질 특성 등 오염의 이동과 확산 경로에 영향을 주는 인자들을 고려하여 조사 부지에 대한 개념모델(Conceptual Model)을 수립하여야 한다. 개념모델을 통해 시료채취 및 분석 계획을 수립하여 조사의 신뢰성을 확보할 수 있다. 지금까지 대부분의 복원 조사는 현장의 제한 요소가 적은 정유사, 주유소, 산업기지 등을 대상으로 삼아왔다. 그러나 산악지역과 같은 특수한 현장 조건에서는 장비 진입, 작업자 안전, 시간과 비용 등 상당히 많은 제한 요소가 존재한다. 따라서 산악지역의 특성을 고려한 오염물질 이동 및 확산 경로에 대한 개념모델을 수립하여 현장의 제한 요소를 극복하고 조사의 신뢰성을 확보하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 유류 오염된 산악지역을 대상으로 현장답사를 통해 오염원을 발견하고 지표지질조사를 통하여 지질 특성을 파악한 후, 개념모델을 정립하여 현장 조사, 자료 평가 및 해석을 통해 대상부지의 실제 오염현황과 개념모델의 결과를 비교하고자 한다.

2. 본론

2.1 조사배경

연구 조사 지역은 경기도 00시 일대에 위치한 해발 560 미터의 00 산으로 관측기지로 이용되고 있으며 주변에 500 미터 내외의 산지에 둘러 쌓여 있으며 하류의 민간에 지하수를 음용수로 사용하고 있었다. 조사는 산림이 풍성한 2000년 8월에 조사를 실시하였기 때문에 현장 작업에 제한 요소가 매우 많았다. 그리고 약 1년 전부터 대상부지의 진입로에 노출된 암벽을 통해 상당량의 기름이 흘러나왔으며 조사 당시에도 암벽에 기름 흔적을 발견할 수 있었다. 조사 결과, 오염원은 난방용 JP-8류 기름을 저장하는 지하 및 지상 저장탱크의 배관 누출로 판명되었다. 오염물질인 JP-8은 물보다 가벼운 LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)의 일종이며 Figure 2-1과 같이 토양과 지하수에 오염된다¹⁾.

2.2 개념모델 정립

산악지역의 오염물질과 지형 특성을 고려한 오염의 개념모델을 수립하여 시료채취 및 분석 계획을 수립하고자 지표지질 조사를 실시하였다.

Figure 2-2와 같이 대상부지는 화성기원의 변성암으로 이루어진 암반층 위에 얇은 풍화층과 표토층이 순차적으로 존재하는 지층으로 부지의 북동쪽 방향으로 급한 경사를 이루고 있다. 또한 몇 개의 단층(Fault)이 존재하고 단층의 갈라진 부분은 점토로 채워져 있다. 지하수의 흐름은 단층을 따라 형성되어 표토층과 암반층 사이로 흐른다.

지표지질 조사를 바탕으로 오염물질은 지형과 지하수의 흐름에 크게 영향을 받으며 이동하므로 대상 부지의 오염으로 인해 오염가능성이 높은 환경매체를 표토층 및 풍화층의 토양, 단층의 암반, 피압 및 비피압 대수층, 주변 계곡의 지표수 및 침전물로 판단하여 지하수의 흐름을 따라 대상부지의 요지(凹地)를 중심으로 시료채취 및 분석 계획을 수립하였다(Figure 2-3). 이 지역은 화성암으로 이루어진 지역이므로 암반층을 통한 오염의 확산의 가능성은 적으나 표토층을 따라 이동한 오염물질들이 주변 계곡 등으로 유입되어 산 아래 지역의 지표수 및 지하수를 오염시킬 가능성은 배제할 수 없었다.

2.3 현장 조사

환경 매체에 대한 시료 채취는 Table 2-1에 제시한 바와 같으며, 채취된 시료는 TPH와 BTEX 분석을 실시하였다. 부지가 매우 경사지고 장비의 진입이 어려워 전동타격기 및 핸드 Auger를 이용하여 환경 매체의 시료 채취 및 지하수 관측정을 설치하였다.

Table 2-1. Summary of environmental media sampling

Media	Sampling Location	Analysis for TPH/BTEX	Free Oil (Water table)
Soil	Boreholes	97 / 45 samples	-
Groundwater	Monitoring Wells	4 / 4 samples	0.2~0.5cm (0.05~1.0m)
Groundwater	Residential Well	2 / 2 sample	ND
Surface Water	Valley	2 / 2samples	ND
Sediment	Valley	2 / 2 samples	-

그리고 지질 및 수리지질 특성 파악을 위해 Table 2-2와 같이 디스크 장력 침투계 (disc-tension infiltrometer)를 이용한 침투시험(infiltration test), 순간수위변화시험(slug test), 그리고 토양입자 분석(soil grain-size analysis) 및 물리적 실험을 실시하였다.

Table 2-2. Test Results for geology and hydrogeology tests

	Test	Estimated Hydraulic Conductivity	Remark
	Hydro-geology	Infiltration Test	$1.02 \times 10^{-3} \sim 9.42 \times 10^{-3}$
Slug Test		$1.91 \times 10^{-4} \sim 4.95 \times 10^{-3}$	Saturated Zone
Infiltration Test		$1.60 \times 10^{-4} \sim 3.62 \times 10^{-4}$	Hazen method
Geology	Parameter	# 1	# 2
	Soil pH	4.98	4.99
	Porosity	0.4	0.42
	Bulk Density (g/cm ³)	1.72	1.71
	Soil Permeability (darcy)	1.38×10^{-5}	1.1×10^{-4}
	Moisture Content (%)	26.88	24.40

2.4 오염해석

시료 분석 및 현장 조사를 통한 자료를 종합한 결과, 오염 가능성 있는 환경매체 중 표토층의 토양이 평균 깊이 1.5 미터까지 약 4,150m³정도 오염되었고 평균 오염농도는 TPH 2,830mg/kg이었다. 그리고 지하수는 골짜기를 따라 유동성 기름이 약 7,070m²정도로 오염 확산되었다. 그리고 나머지 환경매체는 법적 확인기준치 이하 혹은 검출되지 않았다. Figure 2-5와 2-6는 토양 오염의 분포를 나타내었다.

3. 결론 및 제언

지형과 지하수의 특성에 따라 LNAPL이 이동·확산하여 여러 환경매체에 오염된 현상이 초기에 정립한 개념 모델과 상당히 일치하였으며 이는 산악지역과 같은 제한 요소가 매우 많은 곳에는 조사의 신뢰성, 시간, 비용 등의 인자가 매우 크게 좌우하므로 개념 모델 정립의 중요성을 보여준 사례이다.

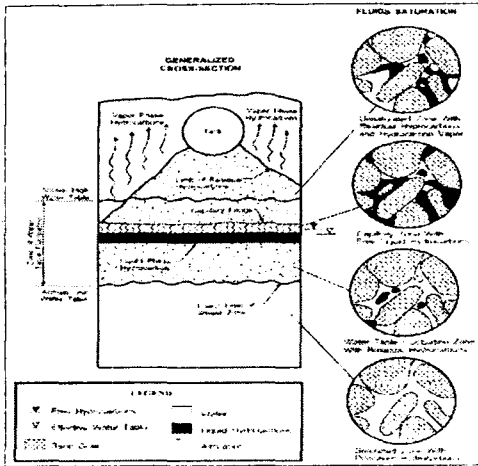


Figure 2-1. Distribution of hydrocarbon phases (EPA, 1996)

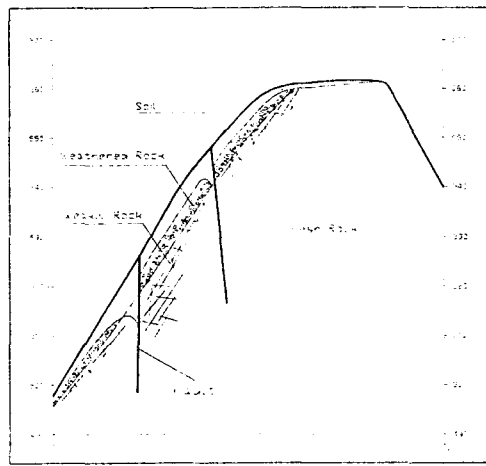


Figure 2-2. Geological profile of subject site

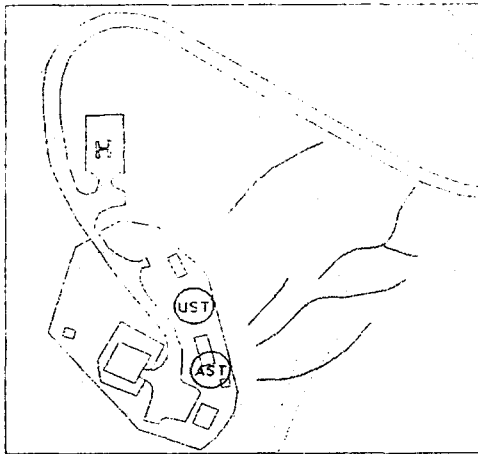


Figure 2-3. Planned sampling area

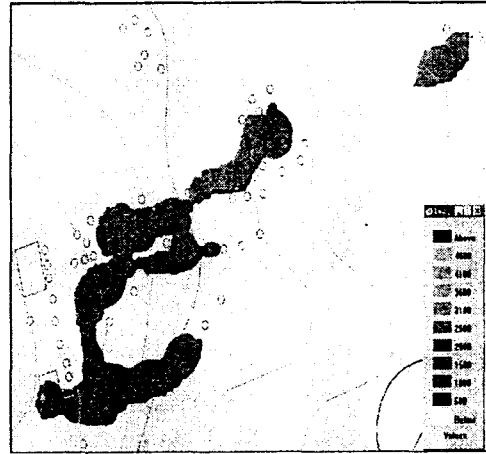


Figure 2-4. Visualization of contamination

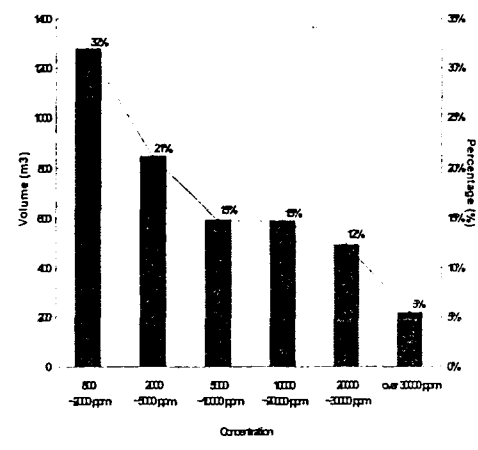


Figure 2-5. Distribution of contaminated soil by concentration

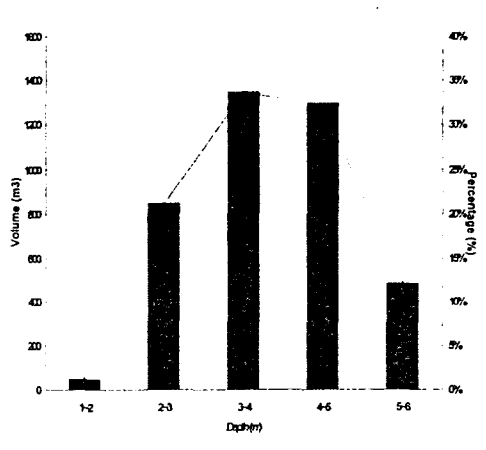


Figure 2-6. Distribution of contaminated soil by depth