

## 기름 유출로 인한 토양 및 지하수의 오염

김동진<sup>1</sup> · 양재의<sup>2</sup> · 유진열<sup>3</sup> · 김희갑<sup>4</sup> · 김기동<sup>5</sup>

<sup>1</sup>국립환경과학원 실내환경과

<sup>2</sup>강원대학교 자원생물환경학부

<sup>3</sup>상지대학교 자연과학연구지원센터

<sup>4</sup>강원대학교 환경과학과

<sup>5</sup>상지대학교 화학과

jinner@me.go.kr

### 요약문

Soil contamination with petroleum oil around a military army was investigated. It showed that soils of a riverside highland, an entrance of the military army, and nearby roads were contaminated with total petroleum hydrocarbons (TPH) released from the military army to the depth of approximately 2 m. The measured concentrations were as high as 15,277 mg/kg. A wide range of soil in the riverside highland was contaminated by the movement of oil to the surface soil, which occurred with the vertical movement of groundwater table caused by the change of river water level and groundwater level. Spilled petroleum oil components were released into Wonju Stream by the increase of hydraulic conductivity and the groundwater flow.

key words: soil contamination, petroleum, TPH, groundwater.

### 1. 서론

군부대에서 발생하는 토양오염 사고는 현장 접근이 통제되어 있어, 오염 조사가 지연되고 복원 과정이 공개되지 않아 사회적으로 많은 갈등을 일으키고 있다<sup>1),2)</sup>. 특히 기름에 의한 토양오염지역의 조사는 오염 확산 범위가 넓어 많은 시간과 비용이 소요된다. 그러나 토양오염 조사 시 오염경로와 오염범위를 정확히 파악하지 못하여 한정된 오염물질만 분석할 경우, 추가 오염이 발생하는 일이 종종 일어난다. 또한 복원방법 선정 시 오염물질과 오염지역의 특성이 고려되지 않아 환경적으로뿐만 아니라 경제적인 손실을 초래하기도 한다.

본 연구지역은 하천 인근에 위치한 군부대에서 기름 유출로 인해 토양오염이 발생한 곳으로, 지형적 특성이 다른 지역과는 매우 다르다. 게다가 인근지역의 지하수에서 benzene, trichloroethylene(TCE) 및 perchloroethylene(PCE) 등이 검출되고, 인근 하천에 기름띠가 계속 발생하고 있어 2차 오염의 가능성이 높아, 원주시, 군부대 및 시민단체 간에 많은 갈등을 일어나고 있는 곳이다. 따라서 본 연구에서는 군부대 주변의 유류오염 지역을 대상으로 오염지역의 특성을 파악하고, 토양과 지하수의 오염 피해 영향과 유류에 의한 지하수의 오염가능성을 분석하고자 한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 지하수 수질 조사

유출된 기름에 의한 지하수의 오염 가능성을 파악하기 위하여 군부대 및 토양오염 지역에 지하수 관정(monitring well) 4개를 설치하였다. 그리고 군부대 주변 1km 내에 기존에 개발된 지하수 관정 11개 등 총 15개 지하수 관정에 대해 4회에 걸쳐 수질조사를 실시하였다. Volatile organic compounds(VOCs)는 먹는물공정시험방법에 따라 purge & trap 장치(Tekmar, LSC3000)가 부착된 GC/MSD(Finnigan Mat, Magnum)로 분석하였다(Table 1).

**Table 1.** Analysis of groundwater samples for VOCs

VOCs	Method
BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes), TCE, PCE, carbon tetrachloride, 1,1-dichloroethene, dichloromethane, 1,2-dibromo-3-chloropropane, 1,1,1-trichloroethane	Korea Drinking Water Analytical Method

### 2.1. 토양오염도 조사

토양시료는 시추장비(geoprobe)를 이용하여 표층부터 심층 3 ~ 5 m 까지 굴착한 후 채취하였다. 기름이 유출된 원주천 하천부지, 도로 및 군부대 주변에 유류오염이 의심되는 곳 등 총 26개 지점에서 81개의 토양시료를 채취하였다(Table 2). 토양시료는 유류오염을 확인하기 위해 BTEX와 TPH(total petroleum hydrocarbon)를 토양공정시험방법에 따라 purge & trap 장치가 부착된 GC/MSD와 GC/FID(Varian, GC-3800)로 분석하였다.

**Table 2.** Number of soil samples collected at each location

Soil sampling	Number of samples	Remark
Total number of soil sampling sites	26 (81)	( ): Total
Riverside highland	9 (31)	in Wonju Stream
Road	6 (20)	
Usan industrial complex of	11 (30)	The other side of Sasa Stream

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 지하수 조사 결과

군부대 인접지역의 6개 관정과 토양 오염지역으로부터 약 1km 정도 떨어져 있는 일부 지하수 관정에서 benzene, carbon tetrachloride, TCE, PCE 등이 검출되었다(Fig. 1). 또한 일부 지하수 시료에서는 TCE와 carbon tetrachloride 농도가 지하수수질기준을 초과하였다(TCE, BDL~0.355 mg/L; PCE, BDL~0.48 mg/L; carbon tetrachloride와 benzene, BDL~0.083 mg/L).

군부대 인근의 일부 지하수 관정과 유출된 기름에서 benzene, toluene 등이 검출되었으나, TCE, PCE 등은 검출되지 않았다. 또한 TCE, PCE가 검출된 지하수 관정에서는 이보다 용해도가 높은 benzene 등이 검출되지 않았다. 이러한 오염원의 종류와 특성을 고려해 볼 때, 이지역의 지하수 오염은 유류 유출에 의한 오염으로 보기 어렵다<sup>3,4)</sup>.

### 3.2. 토양오염도 조사 결과

토양시료 중 TPH는 전체 조사 지점 81개 시료 중 17개 시료(9개 지점)에서 검출되었다(Fig. 2)

조사지점 중 THP의 농도가 가장 높은 곳은 하천부지 상류지점의 표층토양으로, 토양오염 대책기준을 3배 이상 초과하였다(15,276.5 mg/kg). 하천부지의 1~2 m 심층토양이 약 10,000 mg/kg의 높은 농도분포를 보였다. 표층토양까지 오염이 확산된 것은 오염지역이 하천변인데다가 하천의 수위 변동에 따른 지하수의 수직이동에 기인한 것으로 판단된다. 또한 오염 토양의 심도가 낮게 조사된 것도 이 지역의 지하수 포화대가 약 2m에 형성되었기 때문이다<sup>5)</sup>.

조사기간 중 하천부지의 심층에 유동상 유류가 많이 분포하고 있었으며, 이 유류가 원추천으로 유입되는 것을 막기 위해 차수벽(steel sheet pile)을 설치한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 토양 오염도를 조사한 결과, 차수벽 바깥쪽 토양에서도 THP가 높게 검출되었다(905.1 mg/kg). 이것은 이 지역의 토양이 대부분 모래(sand)로 구성되어 있고, 수리전도도가 다른 지역에 비해 커서 지하수 흐름에 따라 차수벽 사이로 유류가 유출된 것으로 판단된다<sup>6)</sup>. 또한 이 부근의 하천에 기름띠(oil slick)가 계속 발생하는 것도 이러한 토양의 물리적 특성 때문인 것으로 보인다.

하천부지 반대 방향인 군부대 출입구 주변과 도로 중앙선 부근 토양에서도 TPH 농도가 17.7~1,088.7 mg/kg로 검출된 것으로 미루어 보아, 유류가 도로를 포함하여 하천의 주변까지 광범위하게 오염시킨 것으로 판단된다. BTEX 농도는 TPH와는 달리 BDL~70.4 mg/kg로 낮은 분포를 보였다. 이것은 군부대에서 유출된 기름이 경유(50% 이상), 윤활유, 휘발유 등으로 BTEX의 함량이 적으며, 유출이 일어난 지 오래되어 토양 중에서 휘발 또는 생분해되었기 때문인 것으로 추측된다.

토양오염도 조사 결과에 따른 토양오염 면적은 군부대지역을 제외한 원추천 하천부지와 도로지역으로 각각 4,200 m<sup>2</sup>와 12,600 m<sup>3</sup>로 추정되었다.

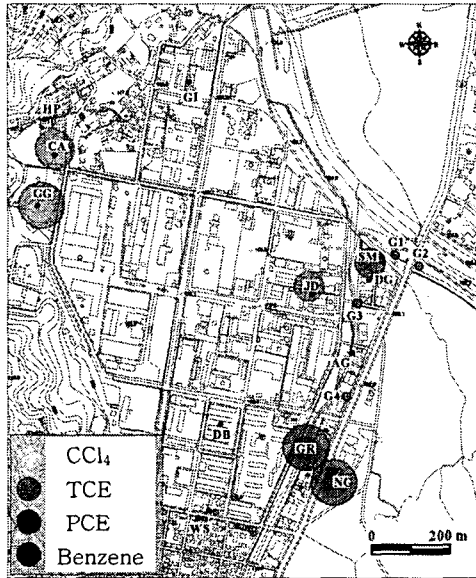


Fig. 1. Distribution of organic contaminants in groundwater.

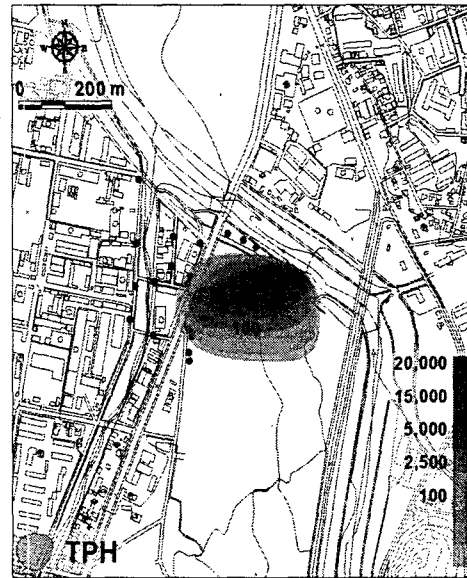


Fig. 2. A contour diagram of soil TPH contamination.

#### 4. 결론

본 연구지역과 같이 하천변에 위치한 지역에서의 토양오염은 하천수와 지하수 등에 대한 2차 오염 유발요소가 매우 크다. 또한 유류와 같은 LNAPLs(light-non-aqueous phase liquids)는 구성 성분에 따라 심층토양에서의 이동 특성이 다르며, 지하공간에서 오염물질의 확산을 예측하기 위해서는 지하수의 분포 및 흐름에 대한 정확한 이해가 필요하다. 따라서 토양 및 지하수에 대한 오염을 조사하고 또는 복원방법을 수립할 경우 오염물질의 특성과 오염지역의 지형적, 물질적 특성 등을 충분히 고려

하여야 한다.

#### 5. 참고문헌

- 1) 농업기반공사, 육군 구2정비창 오염부지 정화사업 공법실증실험, 2002.
- 2) 부산광역시 남구, 문현지구 토양환경 복원사업의 성공적 성과 사례; 문현 금융단지 오염부지 정화사업 중심 연구보고서, 2003.
- 3) Griffin R. A., Personal communication, 1985.
- 4) Roy W.R., and Griffin R.A., Mobility of organic solvents in water saturated soil materials, Environment Geology and Water Science, 7: 241-247, 1985
- 5) Lowe F. Donald, Carroll L. Oubre, C. Herb Ward, Surfactants and Cosolvents for NAPL Remediation; A Technology Practices Manual, Lewis Publishers. pp. 412. 1998.
- 6) Dragun J., The Soil Chemistry of Hazardous Materials. Hazardous Material Control Research Institute, Silver Spring, MD, 1988.