

# 물리탐사기법을 이용한 유류오염부지조사

김창렬<sup>1)\*</sup> · 고경석<sup>2)</sup> · 김정호<sup>3)</sup>

## 1. 서 론

환경오염부지에서 사용되는 지구물리탐사기법은 비파괴 조사방법(non-invasive probing tool)으로서, 일반적으로 조사대상 부지의 (1) 천부 지질구조 및 수리지질구조 파악, (2) 오염원(예, UST 및 배관 등의 지하매설물 또는 매립지) 및 오염대(지하수 오염원 또는 오염토양) 탐지 등의 오염부지특성조사 뿐만 아니라 오염부지정화 수행에 있어 (3) 정화과정의 모니터링 수단으로도 활용되고 있다(박삼규, 2001). 오염대 조사에 있어 수리지질학적 조사방법은 환경오염을 일으키는 오염물질에 대한 직접적인 조사방법인데 반해, 물리탐사기법은 오염물질이 갖는 전기적인 물성(예, 전기전도도 또는 유전율)의 변화에 의한 신호 차이를 측정하여 오염대를 규명하는 간접적인 방법이다. 유류로 오염된 부지에서 일반적으로 사용되고 있는 물리탐사기법으로는 전기비저항탐사, 전자탐사, GPR 탐사, 자연전위탐사, 자력탐사 등의 다양한 탐사방법이 토양 및 지하수 조사와 함께 부지조사결과 해석에 사용되고 있다. 본 연구에서는 유류오염 부지에서 오염분포 또는 오염경로 등의 오염대에 대한 전기적 물성 반응 및 물리탐사기법의 적용성을 고찰하였다.

## 2. 유류오염대의 전기적 물성 모델 및 특성

유류로 오염된 지하 모델은 전기적 물성(전기비저항 또는 전기전도도)에 따라 다음의 두 모델로 구분할 수 있다(Atekwana et al., 2000). (1) 고비저항 모델(resistive model): 오염 초기 변질되지 않은 신선한 상태의 유류로 오염된 지하 모델, 그리고 (2) 저비저항(또는 고전기전도도) 모델 (conductive model): 오염 초기와는 달리 상당한 시간이 경과하여 왕성한 미생물 활동에 의해 유류가 생분해되어 오염대(특히, 지하수면 직 상하부의 smeared zone)의 주위보다 전기비저항이 매우 낮은 상태의 지하 모델. 그러나 오염 초기의 고비저항 모델에서 시간이 경과함에 따라 저비저항 모델로 가는 중간 단계에 관한 연구는 체계적으로 연구된 사례가 아직 학계에 보고되지 않고 있다.

유류는 구성요소인 탄화수소화합물 자체가 무극성(non-polar)으로 전기적인 부도체이기 때문에 유류에 의한 오염은 전반적으로 지하의 전기비저항을 높이는 것으로 여겨져 왔다. 그러나 유류오염이 발생한 후 오랜 시간이 경과한 부지에서는 지하에 분포하고 있는 미생물에 의한 유류의 생분해(biodegradation)작용에 의해 오염되지 않은 주위의 매질보다 오염토양의 전기전도도가 높아지는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 현상의 주요한 원인은 다음과 같다. 일반적으로 오염원에서 누출된 유류는 지하수면을 따라 이동하는 동안 유류의 주요 구성 석유화합물인 BTEX 등의 탄소 원자 수가 작은 탄화수소류부터 미생물 작용에 의해 생분해(Biodegradation)가 일어난다. 이러한 미생물 생분해 작용에 의해 산소와의 접촉이 많은 불포화대 및 지하수면 직하부 토양 매질내의 산소, 철, 망간, 질산 등을 이용해 유기 탄소를 이산화탄소로 분해하는 과정에서 탄산(carbonic acids) 또는 유기산(organic acids)이 생성된다. 오염토양은 환원환경으로 변하여 철과 같은 금속 물질은 환원반응(예를 들면 철은  $Fe^{+3}$ 에서  $Fe^{+2}$

1) 한국지질자원연구원 지반안전연구부 (ryoll102@kigam.re.kr)

2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부 (kyungsok@kigam.re.kr)

3) 한국지질자원연구원 지반안전연구부 (jungho@kigam.re.kr)

로 원자가 감소반응)이 일어나 매질 입자 표면을 용출시키면서 침출수를 발생하여, 지하수내 이온양이 증가하고 바로 하부 지하수층 내의 총용존량 (total dissolved solid; TDS)을 증가시켜, 오염 매질의 전기전도도를 증가시키기 때문이다(Atekwana et al., 2000). 이러한 환원반응으로 원자가가 감소한 이온 물질이 지하수 이동과 함께 하천 등으로 용출되면 공기 중의 산소와 반응하여 산화침전물(예, 유류오염부지에서 발견되는 붉은색의 철산화물)을 생성한다. 이는 철 등의 금속물질이 환원환경에서 산화환경으로 변화된 환경에서 일어난 산화반응 때문이다.

### 3. 물리탐사 적용 사례

#### 3.1 S 저유소 부지

조사부지는 1970년부터 송유관 관련 저유소(항공유 및 경유)로 활용되어 왔으나, 수년 전부터 저유소 활용이 중지되어 방치되어 있는 상태이다. 최근 수행된 토양오염정밀조사에 의하면 부지 내 분포하고 있는 지하저장탱크 및 펌프장 부근의 토양이 유류로 오염된 것이 확인되었으며, 부지 북동쪽의 하류부 개천 및 동쪽 경계부 펌프장 부근의 개거수로에서 붉은색의 철산화물이 분포하고 있어 유류오염의 징후가 발견되었다. 그림 1에 조사부지의 유류오염 구간 및 물리탐사 측선도를 나타내었다.

오염대 조사를 위한 물리탐사로는 전기비저항 탐사(탐사장비: AGI사의 SuperSting R8/IP, 전극 간격: 2m, 전극배열: 쌍극자 및 변형된 단극 배열) 및 GPR 탐사(탐사장비: Mala Geoscience사의 RAMAC/GPR 시스템, 250 MHz 안테나)를 수행하였다.

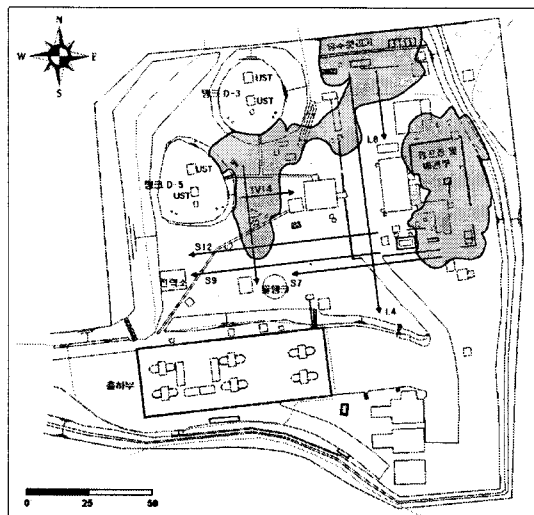


그림 1. S 저유소 부지 오염 분포도 및 물리탐사 측선도.

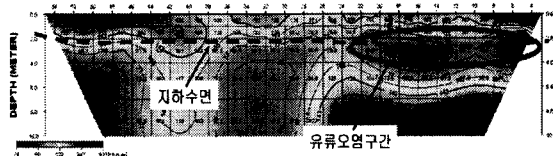


그림 2. 탐사 측선 S7의 2차원 전기비저항 해석 영상

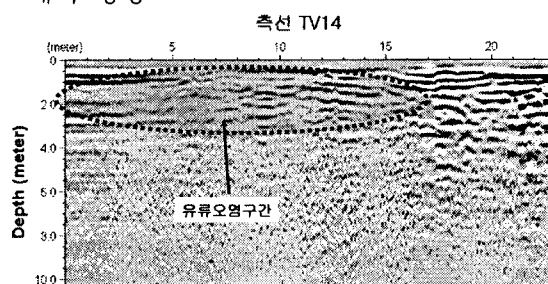


그림 3. 측선 TV14의 2차원 GPR 해석 영상

토양오염정밀조사 시 작성된 토양 시추자료 및 전기비저항 탐사 자료를 종합하여 보면 조사부지는 두꺼운 성토층(주로 점토가 우세한 토양)으로 피복된 것으로 판단되며, 원 지형이 부분적으로 기복이 심한 요철형태로 되어 있어 기반암 또는 풍화암이 노출되어 볼록한 부분은 고비저항의 이상대로, 오목한 지형의 성토된 부분은 저비저항의 이상대로 영상화된 것으로 판단된다. 그림 2의 측선 거리 0-22m 부근 지하수면 상하부(smearred zone)의 매우 낮은 저비저항 이상대는 유류 누출이 상당히 오랜기간 동안 경과한 부지에서 유류로 오염된 토양 및 지하수 구간에서 발생한 미생물 생분해 작용으로 인하여 환원환경에서 용출된 금속이온이 증가가 지하매질의 전기비저항을 감소(전기전도도 증가)시켜 나타난 현상(Sauck, 2000; Atekwana et

al., 2000)으로 판단된다. 이러한 해석결과는 그림 1에 표시된 부지오염분포와도 상당히 일치하고 있다.

그림 3의 측선 TV14에서 취득한 GPR 탐사 결과, 지하수면에서 반사된 GPR 신호는 명확히 탐지되지 않았다. 그러나 측선 거리 약 0-17m 구간의 상부에서 전자파의 감쇄가 측선의 다른 부분보다 심하게 나타난 것은 이 구간이 유류오염이 심하여 미생물 작용으로 인한 전기전도도의 증가로 야기된 전자파의 감쇠로 해석되며, 이는 그림 1의 오염분포도와도 상당히 일치하는 결과를 보인다.

### 3.2 D 주유소 부지

조사부지는 지방 국도 주변 D 주유소와 그 주변 지역으로 과거 토양 및 지하수가 유류로 오염되어 수년전 토양 오염 조사가 수행되었던 지역이다. 조사부지내의 주유소는 1975년부터 2002년까지 운영되었고 이후 운영이 중지되어 현재까지 폐쇄되어 있다. 주유소 건물 주변에는 총 7기의 휘발유 및 경유를 저장하던 지하저장탱크(Underground Storage Tank, UST) 및 유류배관이 매설되어 상태로 남아 있다. 또한, 부지 내에는 과거 토양오염조사 시 설치된 관측정에서 조사 당시(2005년)에도 유류오염이 발견되었으며, 주유소 건물 남서쪽으로 경사진 초지 및 소하천이 분포하고 있는 데 이 소하천과 인접한 토양에서는 유류 누출 및 붉은색의 철산화물 침전물이 함께 발견되었다.

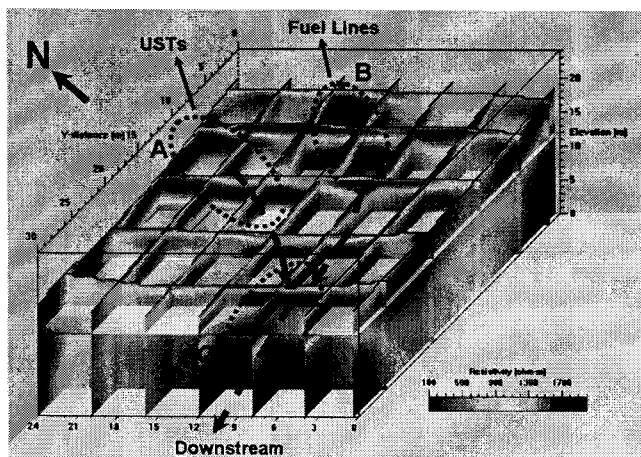


그림 4. D 주유소 부지내(그림 5의 사각형 구간)에서 수행된 3차원 전기비저항 탐사 자료의 역산 해석 영상. A, B, C: 저비저항 이상대(오염추정구간)

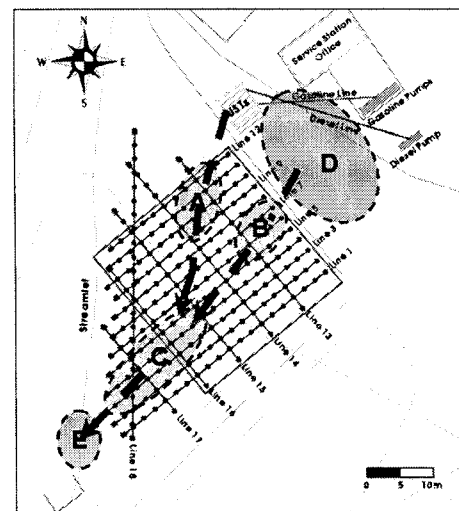


그림 5. 오염 분포도 및 유류 이동 경로. D, E: 오염확인구간

오염대 조사를 위한 물리탐사로 주유소 건물 남서쪽의 초지에서 3차원 전기비저항 탐사(탐사장비: AGI사의 SuperSting R8/IP, 전극 간격: 2m, 전극배열: 쌍극자 및 변형된 단극 배열)를 수행하였다. 그림 4는 3차원 역산을 수행, 조사 지역의 전기비저항 분포를 3차원으로 나타낸 해석 도면이다. 그림에서 A, B, 그리고 C로 표시된 구역은 100 Ohm-m 이하의 저비저항대를 나타내는 부분으로 일반적으로 오염되지 않은 토양의 전기비저항보다는 상당히 낮은 값을 갖는다. 이들 이상대들은 지표에서 심도 2~6 m 구간에 분포하고 있다. 이 저비저항대는 유류로 오염된 토양 및 지하수 구간에서 발생한 미생물의 생분해 작용으로 인해 토양 및 지하수의 전기비저항이 감소한 것으로 추정된다. 이 구간은 지하수면이 분포하고 있는 심도로서 주로 퇴적토 및 기반암의 풍화잔류토양층 등으로 구성되어 있다. 조사 부지가 LNAPL (Light

Non-aqueous Phase Liquids)의 일종인 휘발유 및/또는 경유로 오염된 것을 고려하면, 오염유류는 이 구간의 지하수면을 따라 하류부로 이동하여 초지를 거쳐 소하천에 이른 것으로 판단된다. 따라서 조사 부지의 계절별 지하수위의 변화를 고려하면 대부분의 오염토양은 이 구간 지하수면 상하에 분포하고 있을 것으로 판단된다.

3차원 전기비저항 탐사결과 및 토양 시추조사결과를 종합하여 부지의 유류오염구간 및 오염경로를 그림 5에 도시하였다. A, B, 및 C 구역은 3차원 역산 결과 저비저항대로 영상화되어 오염이 상대적으로 많이 된 것으로 해석된 구역이며, D 구역은 관측정에서 오염이 확인된 구역, E 구역은 오염토양 및 철산화 침전물이 발견된 장소이다. 부지 주유소의 UST 및 유류배관에서 누출된 유류의 주요한 이동 경로는 공극률 및 수리전도도가 상대적으로 높은 선택적인 흐름경로를 따라 소하천 하류부로 이동(A 또는 B를 거쳐 C를 경유)한 것으로 판단되며, 이 경로상의 토양 및 지하수의 오염이 상대적으로 심한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

S 저유소에서 유류 오염대 탐지를 위한 물리탐사 결과, 오염토양은 장기간에 걸쳐 미생물에 의한 유류 생분해 작용으로 기인한 저비저항의 이상대가 탐지되었으며, 토양오염정밀조사 시 작성된 오염분포도와 상당히 일치하는 탐사자료를 취득하였다. 특히 전기비저항 자료는 D 주유소 부지의 사례와 같이 3차원 역해석을 수행하면 오염대의 3차원 공간적인 분포 파악에 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다. 부지의 최상부층이 점토를 함유한 비교적 두꺼운 성토층으로 구성되어 있는 지질특성으로 인해 GPR 자료는 전자파의 감쇠가 심하여 유용한 정보 제공에 제한점이 존재한다.

D 주유소 부지에서 물리탐사결과, 전기비저항 탐사 자료는 S 저유소 부지에서와 같이 장기간에 걸친 미생물 생분해 작용에 의해 유류오염토양은 주위에 비하여 상당히 저비저항의 이상대를 나타내고 있다. 또한 3차원 전기비저항 탐사자료는 유류오염분포 및 오염경로 추정에 상당히 유용한 정보를 제공하여 주었다.

환경오염지역에서 수리지질특성조사의 일환으로 사용되는 환경물리탐사 기법은 그 차체의 탐사 자료뿐만 아니라 지하수위 자료, 오염분포자료, 시추조사 자료 등 수리지질조사 자료와 함께 사용할 때 보다 정확한 해석결과를 도출할 수 있으며, 비파괴 조사방법으로서 전통적인 수리지질조사에서 공간적인 자료 취득의 한계를 보완하는 유용한 조사 기법으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

#### 사사

본 연구는 환경부 토양오염확산방지 사업인 “탐사식 조사기법을 이용한 오염부지 현장평가 프로토콜 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 박삼규 (2001) 오염 토양·지하수의 조사기술, 한국농공학회지, 43권, 제6호, p.15-23.
- Atekwana, E. A., Sauck, W. A., and Werkema Jr., D. D. (2000) Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site, J. Applied Geophysics, v.44, p.167-180.
- Sauck, W. A. (2000) A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments, J. Applied Geophysics, v.44, p.151-165.