지하수 오염조사를 위한 전자탐사 기법의 활용

손정술*, 김정호*, 이명종*, 박삼규*, 고경석*, 정지민*

* : 한국지질자원 연구원

1. 서론

전자탐사 방법중 송수신기 고정형 소형루프 탐사법은 최근 국내에 도입되어 이의 해석 및 적용에 관한 다양한 연구결과가 발표되고 있다(Won et al, 1996; 설순지 등, 2002; 송윤호와 정승환, 2002; 조인기와 임진택, 2003; 임진택과 조인기, 2003; 송성호 등, 2003). 소형 루프 전자탐사 방법은 다수의 송신주파수를 사용함으로써 수직적인 전기전도도 분포를 파악할 수 있는 방법이며, 비접촉식 탐사법으로 현장 작업 및 이동이 매우 편리한 장점을 가지고 있다. 그러나, 제한된 크기의 송신원과 고정된 송수신기 간격으로 인하여, 그 가탐심도가 비교적 천부로 제한되는 한계점 또한 가지고 있다(송윤호와 정승환, 2002).

소형 루프 전자탐사 방법은 주로 2차원 측선탐사를 바탕으로 탐사가 수행되었다. 2차원 탐사의 경우는 측선의 측량이 비교적 손쉬운 평탄한 지형에서는 탐사 결과의 처리 및 해석이 용이하나, 복잡한 지형지물이 존재하는 경우에는 측선측량의 어려움으로 인하여 탐사 수행 및 해석이 힘들었다. 그러나, 최근의 탐사기기는 GPS 연결을 지원하여 GPS를 이용한 실시간 위치 측량이 가능하므로 측선의 구애를 받지 않은 면적 개념의 탐사가 가능하게 되었다. 이 연구에서는 쓰레기 매립장 및 과거 광미 적치장이었던 지역의 부근에서 침출수로 인한 지하수 오염 조사를 위해 면적탐사의 개념을 적용한 전자탐사 결과를 소개하고자 한다. 쓰레기 매립장 침출수 오염에 대한 조사는 충남 금산군 쓰레기 매립장 주변에서 수행되었으며, 광미 적치장이었던 지역에서의 침출수 오염조사 지역인 경우에는 현재 폐광된 경남 창원 인근의 구룡광산 주변에서 수행되었다. 두 지역 모두 침출수로 인한 지하수 오염이 예상되는 지역으로, 지하수 및 지표수에 대한 모니터링이 진행되고 있는 지역으로 지화학조사 결과 침출수의 오염이 확인된 지역이다.

2. 탐사자료의 획득 및 자료처리

탐사에 사용된 장비는 미국 Geophex사의 GEM2H 장비로서, 기존의 GEM2 장비에 송신 모멘트를 크게 하고, 송수신 코일의 간격을 넓혀 보다 심부의 반응을 측정할 수 있도록 하는 개선된 장비이다. 송수신 코일의 간격은 2.05 m 로 기존의 1.66 m 보다 넓어져 전체 센서의 크기가 커졌을 뿐, GEM2와 동일한 방식의 탐사기로서 다중주파수를 이용한 수직탐

사가 가능한 장비이다. 탐사를 통해서 얻어지는 자료는 2차장의 동상(in-phase)성분과 이상(quadrature)성분을 1차장으로 나눈 값으로 그 단위는 ppm 이다. 이러한 자료로부터 지하매질에 대한 정보를 획득할 수 있는 가장 간단한 방법이 겉보기 비저항(apparent resistivity)으로의 변환이다. 겉보기 비저항은 탐사기 하부의 지하매질에 대한 모든 영향이 반영되어 나타나는 값으로 지하의 참 전기비저항을 의미하지는 않으나, 지하구조의 변화를 손쉽게 판별할 수 있는 해석 방법이다. 보다 정확한 해석을 위해서는 적절한 자료처리와 역산의 해석과정이 필요하게 된다. 이 연구에서는 대상 지역의 탐사자료의 특성에 따라, 겉보기 비저항만을 이용하거나, 역산을 통한 전기비저항 계산을 수행하였다. 겉보기 비저항 변환이나 역산을 위한 기본적인 자료처리로 저주파 통과필터링(low-pass filter)을 적용하여, 천부 매설물에 의한 고주파 성분 및 잡음에 의한 영향을 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 금산쓰레기 매립장 주변에서 수행한 전자탐사 측선도이다. 탐사기는 초당 3개씩의 자료를 얻도록 설정하여 수행하였으며, 330 ~ 20010 Hz 까지 총 10개의 주파수를 이용하였으며, GPS를 연결하여 측정과 동시에 위치정보가 기록되도록 설정하였다. 탐사에 사용된 GPS장비는 Trimble 사의 5700 시리즈를 RTK 모드로 운용하였다.

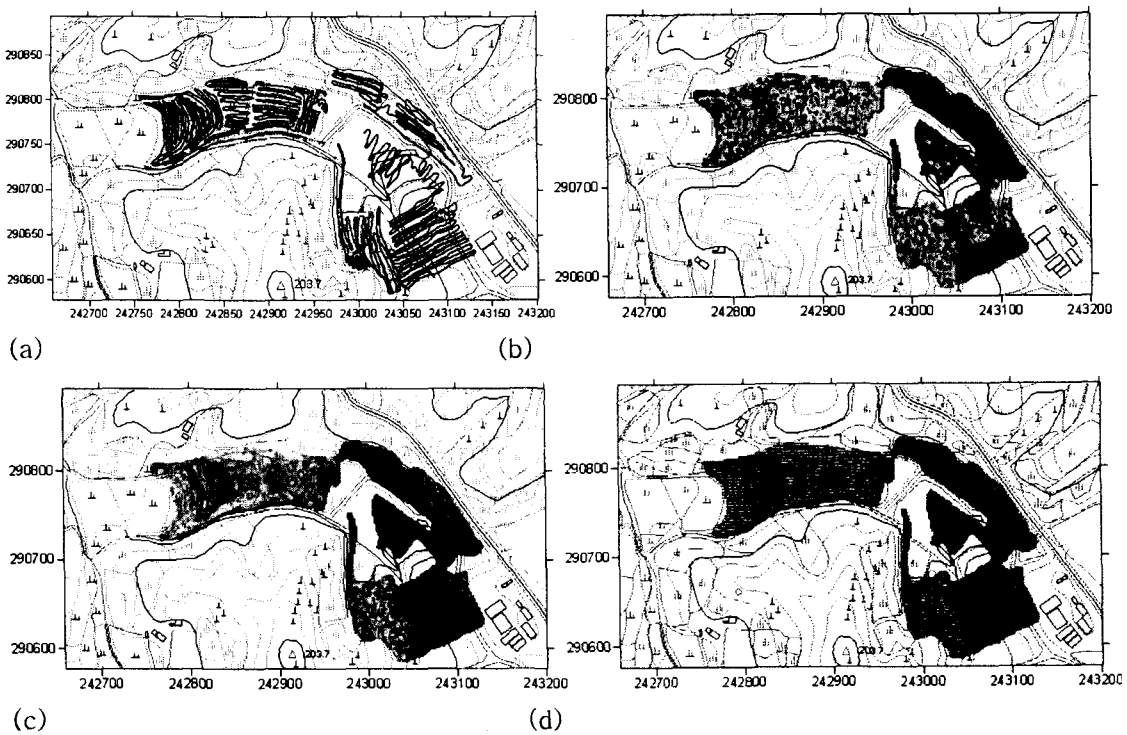
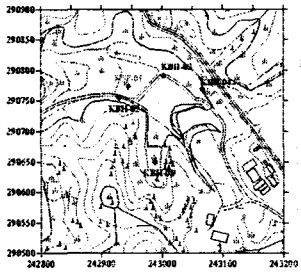


그림 1 금산 쓰레기 매립장 주변의 전자탐사자료의 측선도 및 겉보기비저항 단면도. (a) 전자탐사 측선도, (b) 9210 Hz, (c) 14850 Hz, (d) 20010 Hz 주파수에 대한 겉보기 비저항 단면도



No.	pH*	EC**	Cl	SO4	Mg	Ca	Na	K	Sr***
KBH-01	6.3	227	13.8	17.3	2.2	25.9	12.9	2.1	231
KBH-02	6.76	738	93.9	35.6	7.8	71.5	57.0	8.7	764
KBH-03	7.44	1118	76.6	191.8	19.0	119.0	58.2	14.1	694
KBH-04	7.1	461	34.6	33.6	5.0	61.4	28.0	4.6	674
KSP-01	7.94	527	71.6	25.9	5.9	38.7	44.8	24.5	330

(*는 μs/cm, **는 ppm, ***는 ppb)

그림 2. 매립장 주변의 관정의 위치 및 관정 내 지하수의 지구화학 분석결과.

측정된 탐사자료 중 자료의 질이 비교적 양호한 고주파수 3개의 자료에 대한 겉보기 전기비저항으로 변환한 결과인 그림 1(b), (c), (d)를 살펴보면, 매립지 상부에서의 낮은 전기비저항 값을 보여주고 있는 것을 볼 수 있으며(그림에서 짙은 색으로 표시된 부분), 하부의 논이나 매립지 남쪽의 밭 지역인 경우에는 높은 전기비저항 값(그림에서 연한 색으로 나타나는 부분)을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 고주파수의 탐사자료이므로 비교적 천부의 결과의 전기비저항 값들을 대표한다는 점이 한계점이기는 하나, 매립지 상부 및 북쪽의 겉보기비저항 값과 비교하여 본다면, 침출수로 인한 오염이 비교적 덜 된 지역이라 생각된다. 반면, 매립지 상부와 그 북쪽의 지역인 경우에는 매우 낮은 전기비저항 값을 보이는 것으로 보아, 침출수로 인한 오염이 북쪽으로 진행된 것으로 추정된다. 이러한 결과는 매립지의 지형 구조상 남쪽에 침출수 방지를 위한 차단막 공사가 북쪽으로 경사를 가지고 수행되어 있으며, 북쪽의 지형이 낮은 쪽이므로 많은 양의 침출수가 발생하였을 경우에 상부방향으로 진행되었을 것이라는 추정과도 일치된다. 또한, 이러한 사실은 4개의 관정에서 실시한 지하수의 성분분석 결과에서도 명확히 확인된다. 이 지역의 지하수의 전기전도도의 배경치가 200 μs/cm 정도임을 고려하면 매립지 남부에 위치한 시추공 KBH-1은 침출수로 인한 오염이 되지 않은 지역임을 알 수 있으며, 매립지 북쪽에 위치한 나머지 세공과의 전기전도도 및 성분 분석결과와 그 차이가 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히, 화학 성분중 K인 경우에는 그 수치가 높은 요인이 인위적인 기원인 경우가 대부분이므로 K의 함량이 높다는 사실은 침출수로부터 기인한 결과임을 알 수 있다. 전자탐사의 결과도 이러한 지하수 분석결과에 전반적으로 일치하고 있으나, KBH-2의 경우에는 전자탐사 결과에는 그 영향이 나타나지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 관정 KBH-2의 심도가 다른 것들에 비해 깊다는 점과 지형적인 원인으로 인하여 지하수위 보다 높은 지역에 시추된 관정이라는 점에서 지하수 오염이 나타나는 심도가 깊어, 비교적 천부의 결과인 전자탐사에 그 영향이 나타나지 않는

것으로 생각된다.

그림 3은 폐광주변의 지하수 오염조사를 목적으로 실시된 경남 창원 소재 구룡광산 인근에서의 전자탐사 측선도이다. GEM2H 장비를 동일한 방식으로 운용하였으며, 자료는 초당 1개, 330 ~ 14950 Hz 까지 총 5개 주파수를 설정하였다. GEM2H는 그 장비 특성상 각각의 송신주파수가 동일한 송신에너지를 나누어 사용하므로 송신주파수가 많아질수록 각 주파수별 송신에너지가 작아지는 특성을 가진다. 신호대 잡음비를 높이기 위하여 주파수의 개수를 반으로 줄였으며, 자료중합수를 높여 자료수는 이전의 탐사에 비해 크게 줄어들었다. 위치측정을 위해서 실시간 DGPS 장비인 Trimble 사의 PathFinder 를 사용하였다.

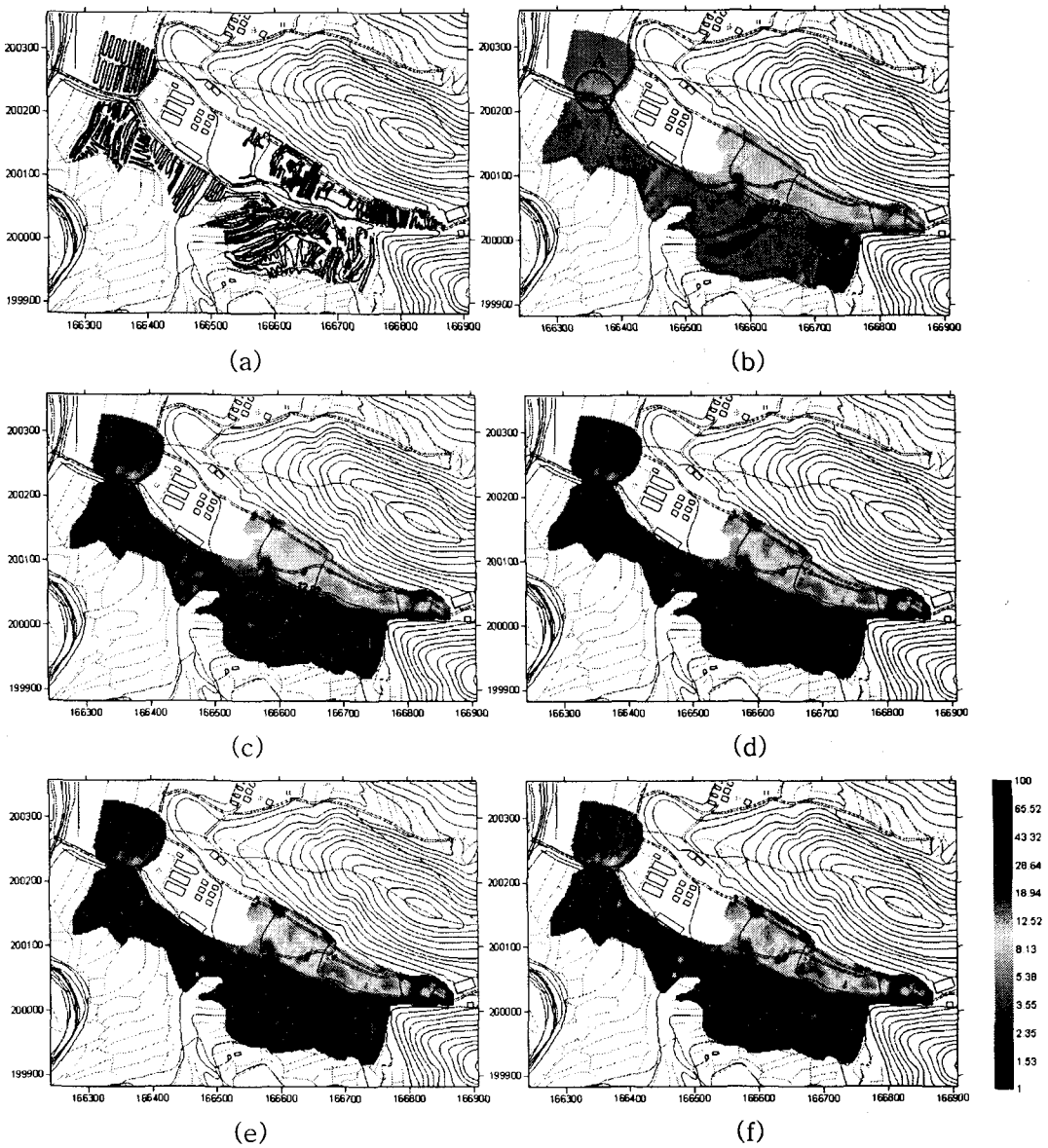


그림 3. 구룡광산 주변에서의 전자탐사 측선도 및 심도별 역산해석 단면.
(a)전자탐사 측선도, (b) 심도 0.10 m, (b) 심도 0.35 m, (c) 심도 0.85 m, (d) 심도 1.8 m, (e) 심도 3.65 m 에서의 전기비저항 분포도.

탐사 측선상의 자료가 비는 곳은예전 광산소유 건물이었던 지역으로 현재 개사육 농장으로 이용되고 있어 탐사가 불가능하였다. 획득된 전자탐사 결과는 저주파수 통과필터링을 통해 천부 금속성 이상체에 의한 영향을 제거한 후, 각각의 위치의 탐사자료에 대하여 1차원 역산을 수행한 후 역산해석 결과를 각각의 심도별 전기비저항 단면으로 구성하여, 그 결과를 그림 3(b)~(f)에 도시하였다. 탐사 대상지역 내에는 지표상에 금속성 쓰레기 및 건축자재가 쌓여있는 부분이 많아, 이러한 영향이 탐사자료상에 고주파 잡음으로 나타났다. 물론, 이러한 금속성 이상체가 탐사대상인 경우에는 신호로 해석되어야 하나, 지층의 전기적 물성분포의 파악이 목적인 이번 탐사에서는 잡음으로 간주하여, 저주파 통과 필터링을 통해 제거하였다. 그러나, 이러한 천부 금속성 이상물의 영향은 필터링 후에도 완전히 제거되지 않아 그 영향이 역산해석 단면에서 남아있으므로 해석상의 주의가 필요하다.

그림 3에서 전기비저항이 낮게 나타나는 지역이 예전에 광미적치장이었던 지역으로 전자탐사 해석결과에서 뚜렷하게 그 영역이 구분되는 것을 알 수 있다. 이러한 저비저항대는 역산 결과의 심도가 깊은 단면에서도 그 영향이 뚜렷이 보이는 것으로 보아, 광미가 매우 두껍게 쌓여져 있었던 것으로 추정된다. 그 외의 지역에서의 전기비저항은 모두 일정한 값 이상을 가지는 것을 볼 수 있으며, 확연히 차이가 나는 부분은 나타나지 않는다. 다만, 특기할 부분이 A로 표시되는 지역으로 주변부에 비해 저비저항 이상대로 나타나는 부분을 확인할 수 있다. 아 지역은 논으로서 광산건물의 바로 입구부에 위치하며, 침출수의 유출이 육안으로 확인되었던 지역이다. 역산결과에서 저비저항대가 고 심도까지 연속적으로 나타나는 사실로 보아 침출수로 인한 오염이 비교적 깊은 심도까지 진행된 것으로 추정되었다.

탐사를 수행한 두 지역 모두 지하수위가 지표면에 거의 근접하고 있었기 때문에 침출수로 인한 지하수 오염의 분포를 전자탐사 결과로부터 유추할 수 있었으나, 그 오염의 심도가 깊은 경우에는 전자탐사 단독으로는 탐지가 불가능하므로 보다 일반적인 오염조사를 목적으로 하는 경우에는 가탐심도가 깊은 다른 탐사법과의 복합적인 적용 및 해석이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론.

두 지역에서의 전자탐사 적용 결과 침출수로 인한 오염이 진행되는 지역은 해석 단면에서 뚜렷한 저비저항대로 구분되어 나타나, 전자탐사 기법이 단시간내에 지층의 전기전도도 분포를 파악해 오염지역을 확인하는데 아주 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 반면에 가탐심도가 비교적 천부로 제한되는 한계점으로 인하여 오염의 심도가 조금만 깊어져도 그 탐지가 어려운 한계점 또한 확인할 수 있었다. 따라서, 보다 깊은 심도까지의 오염조사를 위해서는 전자탐사와 동시에 가탐심도가 깊은 다른 탐사법과의 복합적인 적용이 필요할 것으로 사료된다.

GPS와 동시에 운용하는 경우 넓은 지역에 대하여 보다 빠른 탐사가 가능하며, 수직적인 전기비저항 분포의 파악이 가능하다는 장점으로 인하여 향후 오염조사를 목적으로 전자탐사의 폭넓은 활용이 기대된다.

참고문헌

설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 물리탐사 5, 309-315.

송성호, 용환호, 안중기, 김기표, 제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용: 물리탐사 6, 143-152.

송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정: 물리탐사, 5, 299-308.

임진택, 조인기, 소형루프 전자탐사법에 의한 지하 영상화: 물리탐사 6, 187-194.

조인기, 임진택, 주파수 수직 전자탐사 자료의 1차원 역산: 물리탐사 6, 180-186.

Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., and Sutton, L. C., 1996, GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor: J. Environ. Eng. Geophys., 1, 129-137.