

전기비저항 영상화 기법의 토목 및 환경분야 적용사례연구

Case Studies of Electrical Resistivity Imaging Technique
in Civil & Environmental Engineering Areas

정 연 문* ¹	이 영 남* ²
Jung, Yun - Moon	Lee, Young - Nam
김 정 호* ³	조 인 기* ⁴
Kim, Jung - Ho	Cho, In - Ky

Abstract

Electrical resistivity method, one of the most widely used geophysical prospecting methods, has been usually applied to explorations for groundwater and underground resources. However, it has been extending its scope to civil & environmental engineering areas since it has been developed so as to image underground structures effectively. A FEM algorithm for the dipole-dipole array was developed to correct topographic effects which have a serious influence on electrical methods. Applicability of the electrical resistivity imaging technique to civil & environmental engineering areas was verified through three case histories in this study: First, thickness of soil layers was profiled to judge the possibility of developing borrow-pits in an industrial complex site. Second, weak zones such as fractures and coal seams were detected to provide geological information for design and construction in a high mountain tunnel site. Third, horizontal/vertical distribution of the contaminated zone and depth of waste disposal were delineated in a completed industrial waste disposal site.

요 지

전기비저항 탐사는 가장 널리 사용되는 물리탐사 기술 중의 하나로 지하수 및 지하자원 탐사에 널리 사용되어 왔으나 근래에 들어 단순한 이상대의 확인이 아닌 지하 구조를 영상화하는 것으로 확대, 발전되면서 토목 및 환경 분야에 많은 적용이 시도되고 있다. 본 연구에서는 전기탐사에서 큰 영향을 미치는 지형효과를 보정하는 유한요소법 알고리즘을 개발하였으며 세 가지 현장 적용

-
- *1 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원
 - *2 정희원, 현대건설(주) 기술연구소 연구위원
 - *3 한국자원연구소 자원탐사부 책임연구원
 - *4 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과 조교수

사례를 통하여 토목 및 환경 분야에서의 전기비저항 영상화 기법의 적용 가능성을 입증하고자 하였다. 첫째, 공단조성공사 현장에서 토사층의 두께를 파악하여 토취장 후보지의 개발 가능성 여부를 판단하였고, 둘째, 산악지형에서 시공될 고심도 터널 예정구간내의 파쇄대, 탄층과 같은 연약대 등을 파악하여 터널 설계 및 시공에 필요한 지질 정보를 제공하였으며, 셋째, 매립이 완료된 산업 폐기물 처분장에서 오염대의 수평/수직적인 분포 및 폐기물 처분의 최대 심도등을 파악하였다.

Keywords : Electrical resistivity imaging, Topographic effects correction, Borrow-pit, Mountain tunnel, Waste disposal

1. 서 론

전기비저항 탐사는 1910 년대에 최초로 제안된 역사가 깊으며 널리 사용되는 물리탐사 기술중의 하나로 광범위한 분야에 적용되어 왔는데, 특히 지하수 및 지하자원 탐사에 널리 사용되어 왔다. 그러나 근래에 들어 단순한 이상대 (anomaly)의 확인이 아닌 지하 구조를 영상화하는 것으로 확대, 발전되면서 지하수 및 지하자원 탐사뿐만 아니라 기타 다른 분야, 특히 토목 및 환경 분야에 많은 적용이 시도되고 있다. 외국과 비교하여 비저항이 높은 국내 지반 조건은 비저항 탐사 적용의 호조건임에도 불구하고 토목 분야에서는 거의 시도된 바가 없으며, 환경 분야에 있어서는 최근에 쓰레기 매립장 조사등의 목적으로 일부 사용되기 시작하고 있는 실정이다.

토목 분야를 위한 물리탐사법으로 가장 많이 활용되고 있는 탄성과 탐사는 지반구조의 파악뿐만 아니라 탄성과 속도로부터 공학적인 물성을 유도할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 국내의 경우 국토의 대부분이 산악지형이므로 현장탐사의 수행이 대단히 어려우며 또한 수평 층서구조의 탐지가 용이하나 수직적인 구조의 탐지를 위해서는 고도의 해석 기법이 요구되는 단점이 있다. 이는 탄성과 탐사를 통한 기반암내의 연약대 또는 파쇄대의 탐지가 쉽지 않다는 사실을 의미한다.

반면에 전기비저항 탐사는 국내의 지하수 탐사에서 많이 사용되었으며 그 성공률이 상당

히 높은 것으로 알려져 있다. 이와 같은 전기비저항 탐사의 성공은 토목 분야를 위한 지반 조사에 있어서도 성공적일 수 있다는 점을 의미한다. 왜냐하면 지하수 탐사나 지반 조사 등에 있어서 중요한 의미를 갖는 것은 수직 파쇄대의 탐지 및 그 분포상황의 파악이기 때문이다.

전기비저항 탐사법의 적용 영역에서 확대되기 시작한 부분이 바로 환경 분야이다. 전기비저항 영상은 지하의 전기전도도의 분포를 영상화함으로써 오염 물질의 공간적 확산, 오염도 분포, 오염원의 위치, 침출수 누출 여부 및 그 정도 등에 대한 정보를 제공할 수 있다. 이와 같은 적용이 가능한 것은 토양 혹은 암반내의 금속 이온 또는 유독 물질의 함량 증가가 전기전도도의 증가로 나타나기 때문이다. 전기비저항 영상의 획득에 의한 환경 오염 조사는 저렴한 경비로써 넓은 지역을 빠른 시간 내에 조사가 가능하다는 장점을 갖고 있으며 토양내의 수평적인 오염도의 분포뿐만 아니라 심도 변화에 따른 정보를 획득할 수 있다. 또한 탐사의 동시성이 가능하여 시간의 변화에 따른 오염상황의 변화, 즉 오염의 모니터링이 가능하다는 점 또한 그 장점으로 들 수 있을 것이다.

본 연구에서는 전기비저항 영상화 기법의 원리를 설명하고 본 연구에서 개발된, 쌍극자 탐사에서 지형효과를 보정할 수 있는 유한요소법 알고리즘을 간략하게 기술한 후에, 토목 및 환경 분야에서의 세 가지 지반조사 적용 사례로서 토취장 개발을 위한 지반조사, 고심도 산

악터널 설계를 위한 지반조사 및 폐기물 처분
 장에서의 지반조사를 제시하기로 하겠다.

2. 전기비저항 영상화 기법

2.1. 개요 및 원리

지하의 전기적인 물성 차이에 의한 반응을
 지표 또는 지하에서 측정하여 지하 구조를 파
 악하는 방법을 전기탐사라 한다. 그 중 전기비
 저항 영상화 기법은 한 쌍의 전류전극을 통하
 여 직류 전류 또는 저주파 교류 전류를 인공적
 으로 흘려 보내어 다른 한 쌍의 전위전극에서
 전위차를 측정함으로써 탐사 지역의 전위 분포
 를 해석하여 지하 하부의 지질구조 영상을 획
 득하는 전기탐사법이다. 그러므로 지하지질의
 변화에 따른 전기비저항의 변화는 전기비저항
 영상법의 기본이 된다. 그림 1은 각종 암석의
 비저항 분포 양상을 나타낸 것이다. 국내 지질
 의 기반암을 형성하는 화강암이나 변성암 등은

모두 고비저항 영역에 속하며 이에 반해 풍화
 대 및 토양층은 이보다 낮은 비저항을 보여 준
 다. 이와 같은 비저항 분포의 차이 때문에 비
 저항 영상법에 의하여 파쇄대는 물론 풍화대,
 토양층의 영상을 얻을 수 있다.

전기비저항탐사는 한 쪽에서 지표면에 설치
 된 전류전극을 통하여 전류 I 를 대지에 공급
 하므로써 생기는 전위차 ΔV 를 다른 쪽에 설
 치된 전위전극에서 측정하는 전기탐사법의 일
 종이다. 만약 지하매질이 균일하다면 전류전극
 에 의한 등전위선은 왜곡됨이 없이 이 전류 경
 로에 수직하게 같은 값의 전위를 갖는 등전위
 선이 형성되며 이 등전위선은 지면까지 이어져
 다른 쪽의 전위전극에서 측정하여 전류 및 전
 극의 위치, 입력전류의 크기등을 알면 균질한
 지하매질의 진비저항(true resistivity)을 알게
 된다. 그러나 대부분의 지하매질은 불균질, 비
 등방성이며 여러가지 값의 전기비저항값을 가
 진 매질들이 전류의 흐름에 영향을 주기 때문

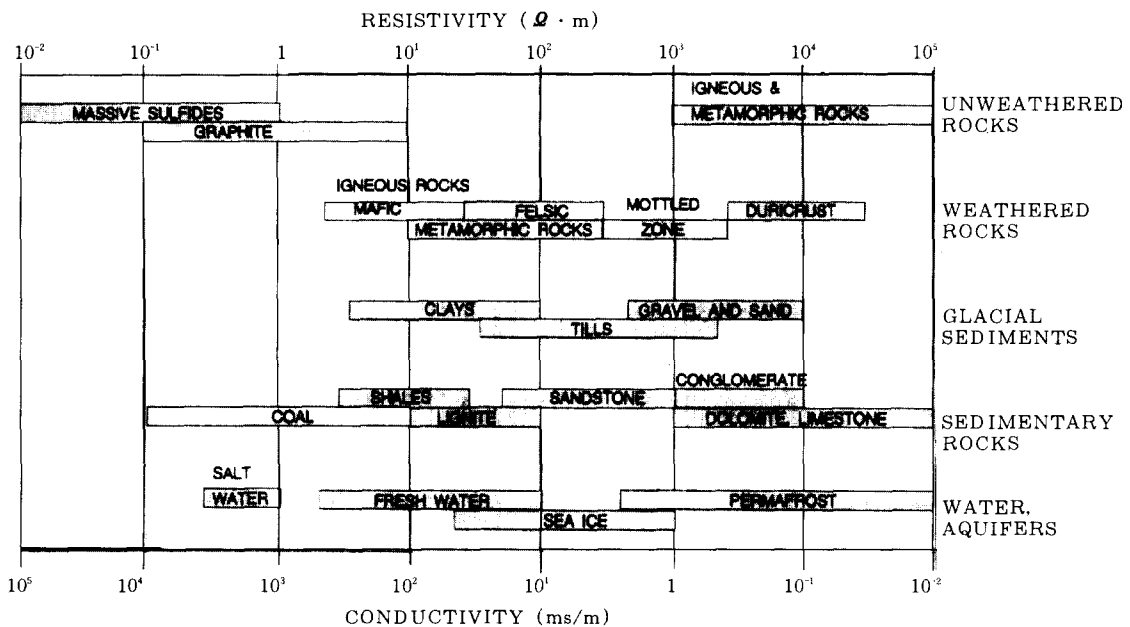


그림 1. 각종 암석의 비저항 분포(Palacky, 1987)

에 등전위선의 왜곡이 일어나며 여기에서 야기되는 전위차를 전위전극에서 측정하여 지하 이상대의 유무를 파악하게 된다.

전류의 흐름에 저항하는 성질은 전기저항과 전기비저항이 동일하지만 전기저항은 물질의 형태등에 따라 달라지며, 전기비저항은 변하지 않는 그 물질의 고유 성질, 즉, 단위체적당 물질이 갖는 저항을 의미하며, 전기전도도의 역수이다. 전기비저항은 단면적에 반비례하고 길이에 비례하는 저항의 성질로 다음과 같은 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{A \Delta V}{L I} (\Omega m) \quad (1)$$

여기서, ρ 는 전기비저항, L 은 전위전극간의 길이, ΔV 는 전위차, I 는 전류의 크기, A 는 단면적이다.

전류 및 전위전극이 지표면에 위치할 때 전류가 전류원을 중심으로 반구면을 통하여 흐르므로 지표에서 거리 r 만큼 떨어진 위치에서의 반구의 표면적은 $2\pi r^2$ 이고 길이는 r 이므로 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

두 개의 전류전극 C_1, C_2 에서 흐르는 전류,에 의해 전위전극 P_1, P_2 에서 측정되는 전위 V_{P_1}, V_{P_2} 는

$$V_{P_1} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{+I}{C_1 P_1} + \frac{-I}{C_2 P_1} \right) \quad (3)$$

$$V_{P_2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{+I}{C_1 P_2} + \frac{-I}{C_2 P_2} \right)$$

과 같이 되며 따라서 이에 의한 전위차는

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right) \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 이를 다시 식(2)에 대입시키면

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)} \frac{\Delta V}{I} = 2\pi \frac{\Delta V}{I} G \quad (5)$$

와 같이 전기비저항식으로 표현된다. 여기서 거리계수(Geometric Factor) G 는 전극의 배열에 따라 정해지는 상수로 측정된 전위값에 적용시킴으로써 겉보기 비저항값을 구해낼 수 있다. 현장탐사에서 얻어지는 값들은 겉보기 전기비저항치(apparent resistivity)로 지하매질이 균질할 경우에는 그 매질에 대한 진비저항치가 될 수 있으나, 대부분의 경우에서와 같이 불균질, 비등방성의 매질에서는 지하매질의 진비저항치와 어느 정도 관련을 갖고 있으나, 진비저항치와 특정한 함수관계를 갖지는 않는다. 이러한 겉보기 전기비저항값은 역산을 통하여 개략적인 지하의 진비저항 분포를 파악하는데 사용된다.

전기비저항 탐사법은 사용하는 전류전극과 전위전극의 종류, 전류전극과 전위전극의 배열방법, 전극간의 간격등에 의해 여러가지 방법(Wenner, Schlumberger, dipole-dipole, pole-dipole, pole-pole등)으로 나누어진다. 그 중 쌍극자 배열방법(dipole-dipole)이 다음 절에서 설명될 여러가지 장점으로 인하여 많이 사용되고 있다.

2.2. 쌍극자배열 전기비저항 탐사

쌍극자배열 전기비저항 탐사는 수평 및 수직탐사를 동시에 수행함으로써 신속하게 광역적인 측선 하부의 2차원적 전기전도도 분포를 파악할 수 있다. 쌍극자배열 탐사는 그림 2에 나타난 바와 같이 전류전극과 전위전극의 간격(쌍극자 길이)을 모두 a 로 일정하게 고정하고 전류전극과 전위전극 사이를 $2a, 3a, \dots, na$ 간격으로 단계적으로 이동하면서 전위차를 측정하여 겉보기 비저항 값을 계산한다.

여기서 n 은 전극전개수라 하며 탐사심도를 결정짓는데, 쌍극자 길이 a 는 지하구조에 대한 분해능과 밀접한 관계가 있으므로 탐사목적, 정밀도 등을 고려하여 결정한다. 통상 쌍극자 배열 탐사의 가탐심도는 쌍극자 길이 a 의 5배 정도이다.

겉보기 비저항 ρ_a 는 두 개의 전류전극에 흘려준 전류의 세기를 I , 두 개의 전위전극 사이에서 측정된 전위차를 ΔV 를 할 때, 다음 식으로 표시된다.

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

야외탐사 결과는 그림 2의 아래와 같이 전위전극 중심과 전류전극의 중심을 연결하는 선을 밀변으로 하는 직각이등변 삼각형의 꼭지점에 겉보기 비저항 값을 기입하여 수평 및 수직적 변화를 해석하게 된다. 이와 같은 쌍극자 배열 탐사결과로부터 획득된 겉보기 비저항 단면을 가단면도(pseudo-section)라고 한다. 이 가단면도에 나타난 겉보기 비저항 값은 지하의 진비저항 값을 나타내는 것도 아니고 아울러 표시된 수직점이 얻어진 비저항 값을 야기시키는 원인의 진짜심도를 표시하는 것은 아니다. 그러므로 지하의 위치별 전기비저항 분포를 정량적으로 규명하기 위해서 수치역산(numerical inversion)을 이용한 기법이 필요하다.

한편 쌍극자 길이 a 를 원하는 탐사심도 또는 지질학적 조건에 따라 변경할 수 있으며, 전극간격 전개수 n 을 조정함으로써 수직변화 양상을 탐지할 수 있다. 쌍극자배열 탐사는 1점이 아닌 1 축선상에서 수평 및 수직탐사를 동시에 수행하므로 2차원적 탐사로 간주된다. 물론 쌍극자 배열 탐사의 축선상에서 각 측정마다 수직탐사를 수행하더라도 1개점이 아닌 축선상의 하부에 2차원적인 비저항 분포를 파악할 수 있으나, 탐사기간 및 비용면에 있어서 쌍극자배열 탐사에 비해 비경제적이게 된다. 또한 수직탐사는 각 측정 사이에 국부적인 이상대가 존재할 경우 이를 놓칠 우려가 많으나

쌍극자 배열 탐사는 연속적인 2차원 탐사이므로 이러한 가능성을 줄일 수 있다.

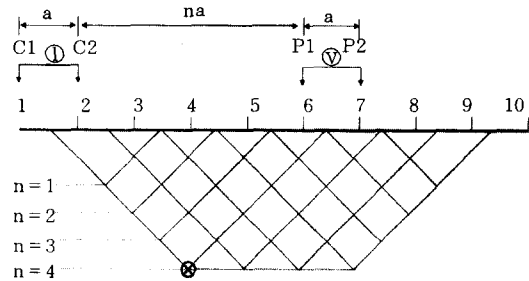


그림 2 쌍극자배열 전기비저항 탐사에서의 겉보기 비저항 가단면도 작성법.

2.3. 지형효과 보정

전기비저항 탐사에 있어서 인공적으로 지하에 공급된 전류에 의한 지하 매질 내의 전위분포 양상은 지하매질의 전기전도도 분포에 절대적으로 지배받게 되나, 지하의 등전위선은 실제적인 지하매질의 물성 변화뿐만 아니라 지표의 지형구조(topography structure)에 의해서도 변화하게 된다. 따라서 겉보기 전기비저항 값으로 표현되는 지하 전기전도도의 분포는 탐사 현장의 지형에 의해 왜곡되어 진다. 즉, 탐사 현장의 지형구조를 고려하지 않은 채, 평탄한 지형구조의 가정하에서 계산된 겉보기 전기비저항값을 사용하는 기존의 전기비저항 탐사 자료에는 지형효과에 의한 왜곡이 존재하게 되고, 이는 자료해석시에 심각한 오차를 가져올 수 있다. 이와 같은 지형효과는 전기·전자탐사에 있어서 잡음의 하나로 간주되며, 특히 우리나라와 같이 산악지형이 많은 경우에는 지형효과가 상당히 크게 나타나게 되므로 반드시 보정 또는 제거되어야 할 부분이다.

전기비저항 모형계산에 대한 수치해석적 접근으로는 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM) 등이 많이 사용되었으나, 본 연구에서와 같이 지형효과를 다루기 위해서는 모형설정의 용이함이 중요한 변수가 되며 상대적으로

요소선택의 폭이 넓음으로 인하여 지형과 같은 입의 형상을 잘 묘사할 수 있는 강점을 가진 유한요소법을 모형반응 계산에 사용하였다. 유한요소법을 이용한 모형계산의 기본개념은 지하구조를 수많은 요소로 분할하고 이들로 구성된 격자상의 절점에서의 포텐셜 값을 구하는 것으로 요약할 수 있다. 이때 지하구조는 (x, z) 의 2차원이고 전원은 (x, y, z) 의 3차원인 문제에 있어서는 주향 방향으로의 푸리에 변환(Fourier transform)을 통하여 3차원 효과를 제거해야 하며, 이로부터 얻은 지배방정식을 기본으로 하여 가중잔여법을 통해 유한요소방정식을 전개하였다.

본 연구에서는 $z=0$ 인 지표면 상에는 Neumann 조건을, 그리고 모형계산영역의 좌측, 우측 및 하부의 인위적 경계면에 대해서는 혼합경계조건(mixed boundary condition)을 각각 적용하였으며 유한요소방정식의 해는 공간과수 영역의 포텐셜이므로 푸리에 역변환시켜야 하는데 본 연구에서는 공간과수 k_y 영역의 포텐셜을 각 구간마다 지수함수로 근사시켜 수치적분하는 방법을 채택하였으며, 특이(singular)한 $k_y=0$ 부근에서는 정확한 계산을 위하여 log함수로 근사시켜 적분하였다(Dey and Morrison, 1979 ; Zhao et al., 1986).

지표 지형구조에 의해 발생하는 지형효과에 의한 왜곡을 없애고자 하는 지형보정은 본 연구에서와 같이 지형구조를 고려한 모형계산 알고리즘의 경우, 역산 단계에서 지형을 포함한 역산모형을 사용함으로써 수행할 수 있으나, 편의성을 도모하고자 우선 가단면도상에서의 보정에 초점을 맞추어 프로그램을 작성하였다. 먼저 지표의 불규칙 지형에 의한 지형효과 보정을 위해서는 지형에 의한 반응을 계산하는 것이 필수적이며 이를 위해서는 지형구조를 모형계산에 포함시켜야 한다. 지형구조를 모형계산에 포함시키는 방법은 다양한 방식으로 적용될 수 있는 바, 본 연구에서는 좌표변환행렬(Jacobian)을 이용하여 지형구조를 구현하였다.

한편 일반적으로 지형보정은 측정자료에 지형보정 계수(topography correction factor)를 곱해줌으로써 수행되며, 이때 지형보정 계수는 주어진 지형구조를 가지는 균질 등방성 매질에 대해 모형계산을 통해 얻어진 전기비저항값으로 평탄한 지형구조를 가지는 균질반무한 공간의 전기비저항값을 나누어줌으로써 계산된다.

3. 현장 적용 사례

3.1. 토취장 개발을 위한 지반조사

공단조성공사 현장에서 토취장 개발을 위한 부지확보 차원에서 토취장 후보지의 개발 가능성 여부를 판단하고 개략적인 토취량 산출을 위하여 전기비저항 영상화 기법이 수행되었다. 그림 3은 조사지역에 대한 지형도로서 측선 A-A'와 B-B' 및 시추공 BH-2, BH-3과 BH-4의 위치가 표시되어 있다. 전기비저항 탐사 결과를 시추자료와 비교하기 위하여 BH-3과 BH-4를 포함하도록 측선을 설정하였다. A-A'와 B-B'의 2개의 측선상에서 쌍극자 배열 탐사를 실시하였으며 A-A' 측선의 길이는 270m, 쌍극자 길이는 10m이며, B-B' 측선의 길이는 91m, 쌍극자 길이는 7m로 설정하였다.

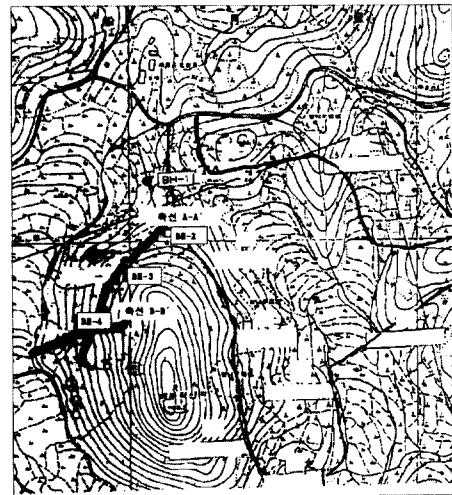


그림 3. 토취장 예정지의 지형도 및 전기비저항 탐사 측선도

각 측정점의 고도가 일정하지 않기 때문에 앞에서 언급한 개발 프로그램을 이용하여 지형보정을 시행한 후, 자료처리를 수행하였다. 그림 4는 A-A' 측선의 탐사 결과 영상을 보여주고 있다. 전기비저항의 분포가 저비저항(청색)일수록 풍화토나 파쇄대일 확률이 높고, 고비저항(적색)일수록 경암쪽에 가깝다. 대략 630Ω m 이하의 저비저항대인 초록색 부위는 풍화토 및 풍화암으로, 630-1000Ω m 사이의 분홍색 부위는 연암으로, 그리고 그 이상은 고비저항대는 경암으로 해석된다. 토취 가능성이 있는 부분은 비저항 영상에서 초록색으로 나타나는 저비저항대, 즉 풍화토 및 풍화암부분까지임을 알 수 있다. BH-4는 시추작업을 위하여 사면 부위를 4-5m 정도를 절토한 상태였으며 BH-4의 위치가 지표면 아래에서부터 시작된 것으로 표시한 것도 이 때문이다.

전기비저항 탐사 결과에 의하면, 지표면에서 연암까지의 경계가 BH-3에서는 지표 하부 7-8m에서, BH-4에서는 지표 하부 15-17m에서 각각 나타나고 있으며 이는 시추 결과와도 일치하는 것이며 이후 실제 토취장 굴착시에도 확인이 되었다. BH-4 주변 지역이 BH-3 주변 지역에 비하여 풍화토 및 풍화암의 두께가 두

껍기 때문에 토취장의 개발에 유리할 것으로 판단되며 보다 정확한 토취량의 산정에 전기비저항 탐사 결과의 응용이 가능할 것이다. 만약 전기비저항 탐사 결과 없이 시추 자료만을 가지고 토취량을 산정한다면 그림 4의 점선으로 표시한 바와 같이 시추 자료상의 연암 심도를 직선으로 연결시킬 것이나 이로부터 추정되는 토취량은 실제 토취량과는 상당한 차이가 발생할 것이다.

3.2. 고심도 산악터널 설계를 위한 지반조사

험준한 산악지형에서 시공될 고심도 터널 예정구간내의 전반적인 지질구조 및 파쇄대, 탄층 등의 연약대, 지하수의 분포 상황 등을 파악하여 터널 설계에 필요한 정보를 제공하기 위하여 전기비저항 영상화 기법이 수행되었다. 000-000간 4차선 확포장 공사현장의 00터널 예정구간에서 지반조사의 일환으로 쌍극자 배열 탐사를 수행하였다. 탐사 측선의 총연장은 1,320m이며 터널의 지반고와 계획고의 차이는 최대 약 183m이므로 200m 이상의 가탐심도가 확보되도록 쌍극자 길이를 40m로 설정하였다. 그림 5는 측선도를 보여주고 있다.

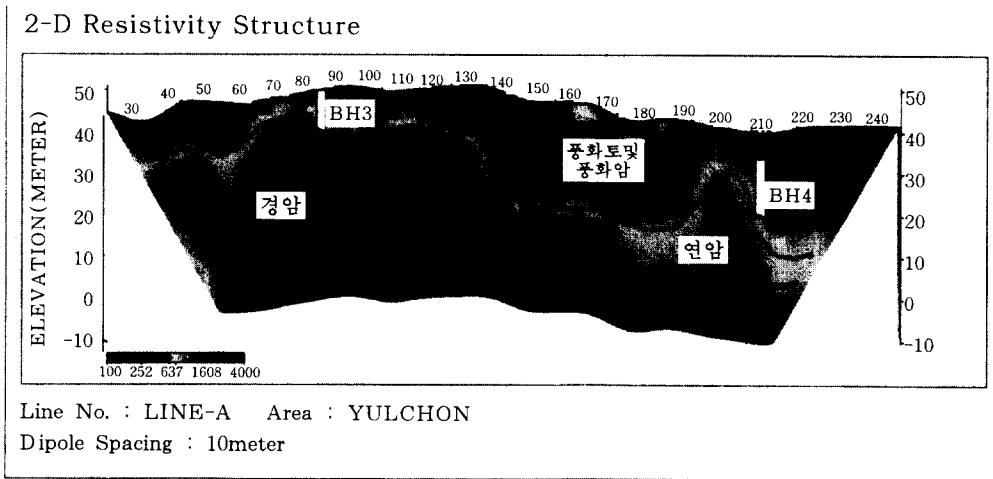


그림 4. 측선 A-A' 전기비저항 영상도

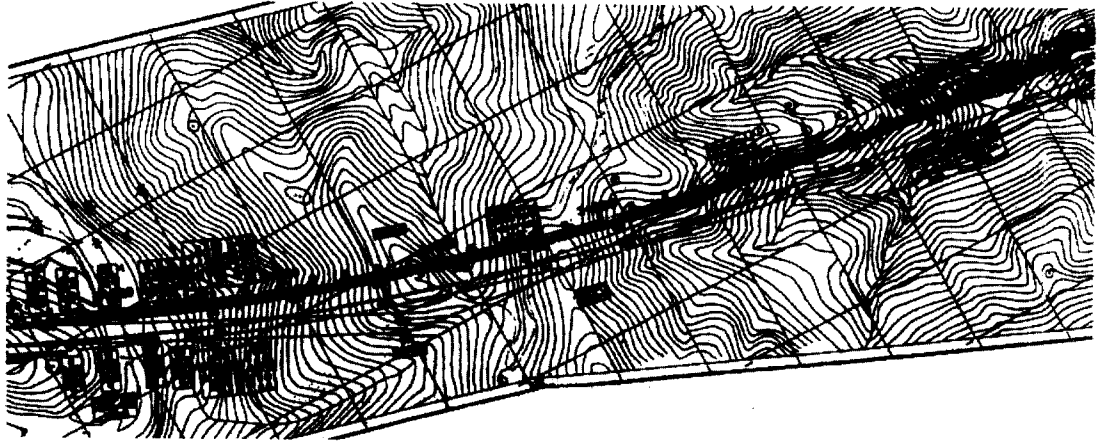


그림 5. oo터널 예정구간 전기비저항 탐사 측선도

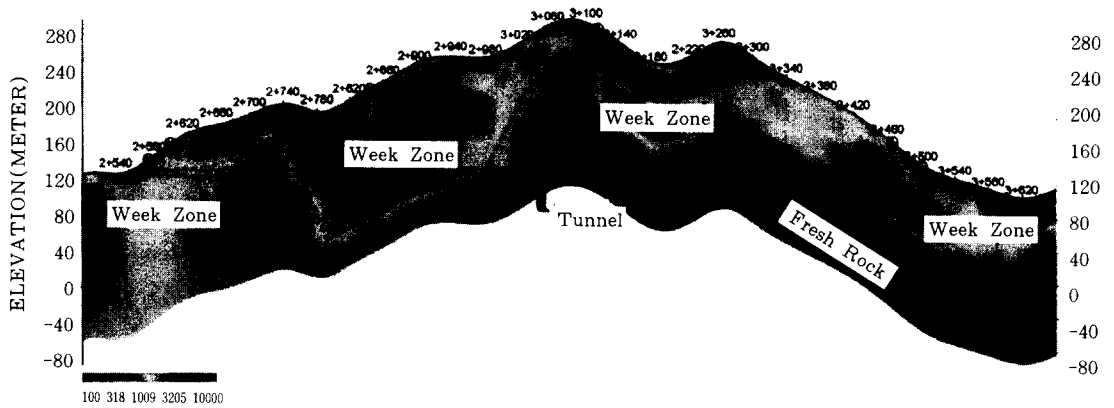


그림 6. oo터널 예정구간 전기비저항 영상도

앞의 사례에서와 마찬가지로 각 측점의 고도가 일정하지 않기 때문에 앞에서 언급한 개발 프로그램을 이용하여 지형보정을 시행한 후, 자료처리를 수행하였다. 본 조사에서 얻어진 탐사 결과 영상이 그림 6에 나타나있다. 전체적으로 이 지역은 지질적으로 매우 복잡한 구조를 갖고 있음을 알 수 있으며 다수의 연약대가 분포하고 있음을 시사하고 있다. 영상에서 청색은 저비저항을, 적색은 고비저항을 각

각 의미하며 조사 지역의 전반적인 전기비저항은 대략 100-10,000 Ω m 범위의 값을 보이고 있다. 조사 지역을 크게 나누어 보면 2+500m 지점에서부터 2+740m 지점까지는 500-2000 Ω m의 중간정도의 비저항을 보이며, 2+740m-3+000m 구간은 100-500 Ω m의 저비저항대, 3+000m-3+380m 구간은 2000 Ω m 이상의 고비저항과 저비저항대가 교차해서 나타나는 매우 복잡한 양상을 보이고 있다. 3+380m-3+640m

구간은 천부에서는 저비저항 및 중간 정도의 비저항을 보이며 지표기준으로 심도 100m 이상에서는 매우 높은 고비저항을 보이고 있다. 그림에서 점선으로 표시한 부분은 저비저항과 고비저항의 경계면을 나타낸 것으로 연약대로 해석되는 부분이다. 2+740m, 3+000m, 3+120m, 3+240m 지점은 본 조사 결과 얻어진 대표적인 연약대로 해석되며 특히 2+740m, 3+000m 지점은 경계면이 상당히 심부까지 발달해 있다.

이 지역의 지질은 평안누층군의 최하부층인 만항층이 전 조사구간에 분포하나 본 지역은 습곡, 단층 등의 지질운동과 심한 풍화작용으로 매우 복잡한 지질구조를 보인다. TB-5과 TB-6의 시추 주상도가 그림 7에 표시되어 있다. 시추공 TB-5의 시추결과에 의하면 풍화암과 연암, 보통암 및 경암이 호층으로 분포하고 있다. 따라서 지층 경계면이나 본 지역에 잘

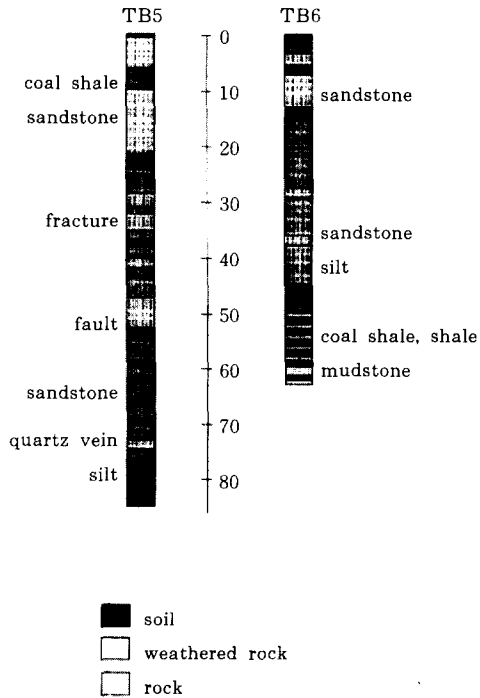


그림 7. TB-5와 TB-6의 시추주상도

발달된 절리면을 따라 다량의 수분을 함유한 것으로 보이며 전기비저항 조사 결과에서는 저비저항대로 나타나고 있다. 시추공 TB-6의 시추결과에는 풍화암, 연암, 보통암 및 경암이 호층으로 반복되어 나타나고 있다. 그러나 지표면 기준으로 심도 50m-60m 구간에서 협재되어 나타나는 탄질 세일은 3+100m-3+240m의 구간에 분포하는 것으로 해석된다.

전기비저항 탐사 결과에서 저비저항과 고비저항의 경계면은 하나의 구조선으로 해석된다. 이는 암상의 경계면일 수도 있으며, 단층이나 파쇄대등에 의한 것일 수도 있으나 이러한 경계면은 토목 시공시에는 하나의 연약대가 될 수가 있다. 또한 이러한 경계면은 대부분의 경우에 공극률이 높기 때문에 지하수의 이동 경로가 되므로 출수의 가능성도 높아 터널 시공 시 특별한 조치가 요구된다.

3.3. 폐기물 처분장에서의 지반조사

매립이 완료되어 그 상부에 토양층을 성토하여 경작이 실시되고 있는 산업폐기물 처분장에서 오염대의 수평/수직적인 분포 및 폐기물

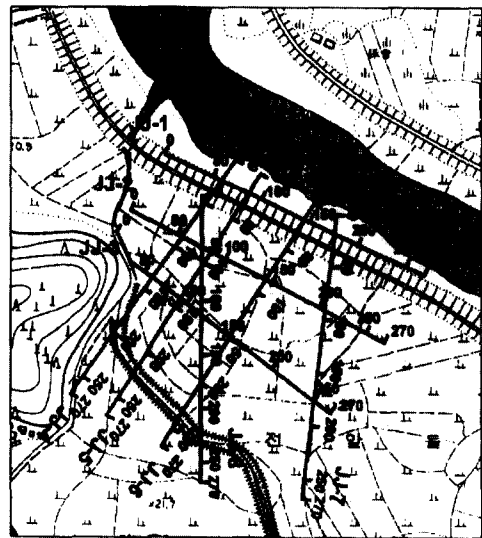
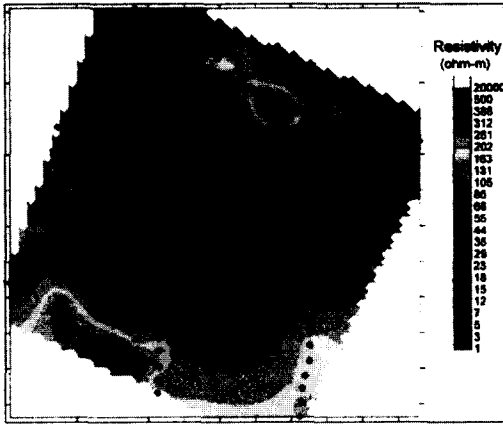
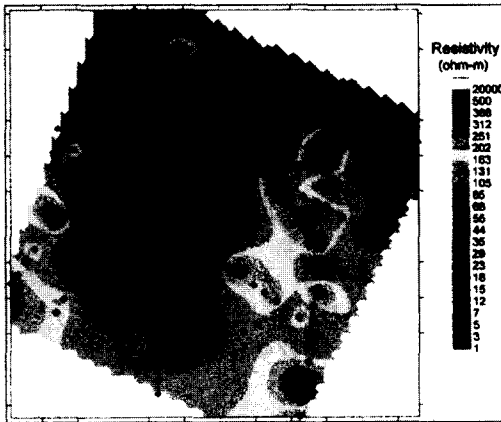


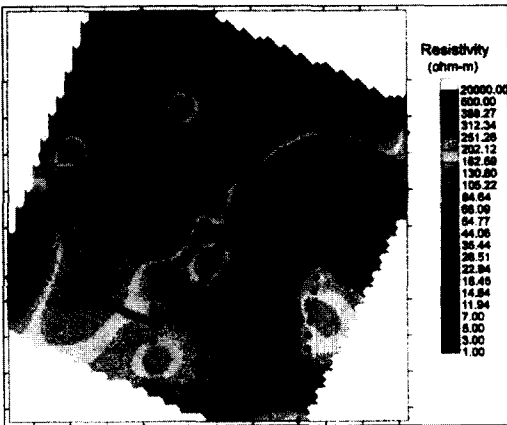
그림 8. 폐기물 처분장 시험 장소의 탐사 축선도.



(a) 2m 심도



(b) 7m 심도



(c) 15m 심도

그림 9. 심도에 따른 수평적 비저항 분포도

처분의 최대 심도등의 파악을 목적으로 전기 비저항 영상화 기법이 수행되었다. 폐기물 처분장은 전주시 완산구 효자동 마전리에 위치하고 있으며 그림 8은 탐사측선도이다. 길이가 각각 270m인 8개의 측선상에서 쌍극자 길이는 10m로 하여 쌍극자배열 탐사를 실시하였다.

자료 분석 결과를 종합적으로 나타낸 영상이 그림 9에 나타나 있으며 이는 각 측선의 2차원 역산결과 계산된 진비저항 값을 이용하여 나타낸 심도별 전기비저항의 수평적 분포이다. 그림에서 청색은 저비저항을, 적색은 고비저항을 각각 의미하며 굵은 선은 처분지의 경계가 되는 제방을 나타낸 것이다. 각 심도 공히 처분장 내부에 대단히 낮은 저비저항대가 발달하고 있으며, 전기비저항 영상법이 오염대 파악에 탁월함을 잘 말해 주고 있다. 특히 심도 7m에 있어서의 수평적 비저항 포에서는 삼천천 쪽을 제외하고는 처분장 부지와 저비저항대의 분포가 정확하게 일치하고 있다. 이는 삼천천 쪽을 제외하고는 처분장의 방벽이 오염물질의 확산을 잘 막아주고 있으며 오염물질이 삼천천 방향으로 확산되었을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 7m 심도의 전기비저항 분포에서 처분장 부지의 경계에 대응되는 전기비저항 값은 20-50Ωm내외이다.

그림 10은 전기비저항의 분포로 유추할 수 있는 폐기물 처분장의 처분 심도를 3차원 영상으로 나타낸 것이다. 그림 10을 작성하는 기본 자료는 처분장 바깥쪽의 측선 자료는 모두 심도 0으로 하고, 처분장 내부의 자료는 30Ωm를 나타내는 심도를 이용한 것이다. 물론 전기비저항 값을 기준으로 하였으므로, 심부까지 오염물질이 확산된 부분에 대하여서는 실제 심도보다 깊게 나올 가능성을 배제할 수 없다.

그러나 전체적으로 의미있는 모양을 보여주며, 중앙 부위가 가장 깊으며, 주변을 보았을 때에 삼천천 쪽으로 약간 깊은 모양을 보여주고 있다.

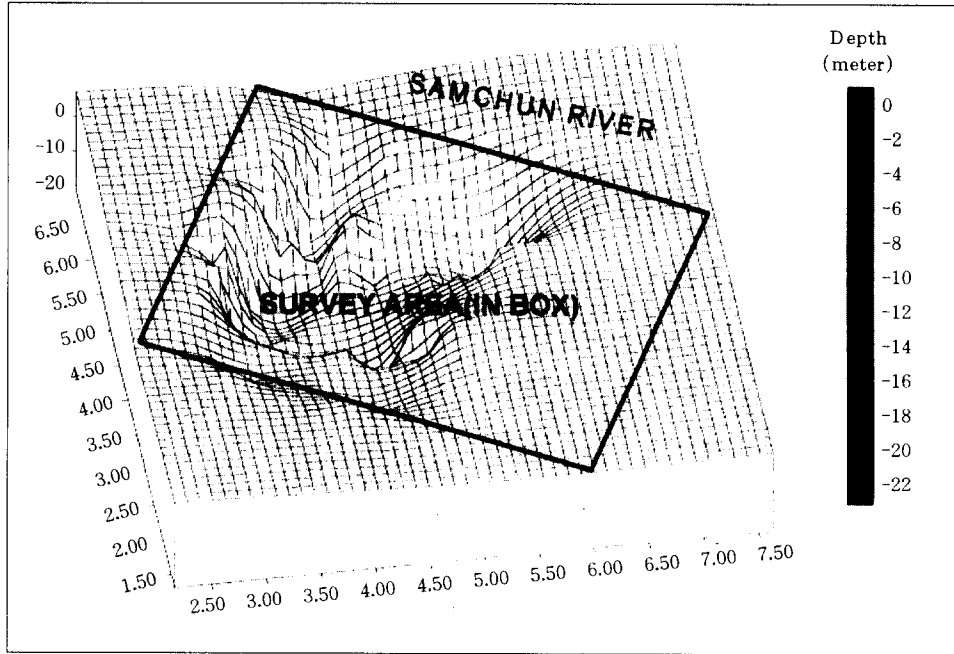


그림 10. 전기비저항의 분포로 유추한 폐기물 처분장의 처분 깊이의 3차원 영상

4. 결 론

세 가지 현장 적용 사례를 통하여 전기비저항 영상화 기법의 토목 및 환경분야에서의 적용성을 입증하였다.

첫째, 토사층의 두께를 파악하여 토취장 후보지의 개발 가능성 여부를 판단하였다.

둘째, 고심도 터널 예정구간내의 파쇄대, 탄층과 같은 연약대등을 파악하여 터널 설계 및 시공에 필요한 지질 정보를 제공하였다.

셋째, 오염대의 수평/수직적인 분포 및 폐기물 처분의 최대 심도등을 파악하여 지반의 전반적인 오염 상태를 판단하였다.

또한 본 연구를 통하여 쌍극자배열 전기비저항 탐사 자료의 지형효과를 보정하기 위한 유한요소법 알고리즘이 개발되었다. 우리나라와 같이 산악지형이 많은 경우에는 지형효과가 상당히 크게 나타나게 되므로 반드시 보정 또는 제거되어야 결과의 정확한 해석이 가능하다.

전기비저항 영상화 기법은 넓은 지역의 지반조사를 저렴한 경비로써 빠른 시간 내에 수행할 수 있으며, 특히 수직으로 발달한 이상대의 탐지에 탁월하다는 장점이 있다. 반면에 탐사 결과가 정성적이며 기타 공학적인 물성과의 상관 관계가 아직 정립되어 있지 않다는 단점도 있다. 앞으로 많은 현장 적용을 통한 탐사 자료의 축적 및 연구를 통하여 이와 같은 문제에 대하여 진전을 보일 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김정호 (1987), 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산, 박사학위논문, 서울대학교.
2. 오창환 (1996), "전주 서신지구 폐기물 매립지역 및 야적장 주변의 오염 토양 예비 조사", 한국토양환경학회 세미나, 전주, pp. 49-58.
3. 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭 (1996), "난지

- 도에 인접한 한강변에서의 쌍극자-쌍극자 전기 탐사”, 자원환경지질, 제29권, 제3호, pp. 335-343.
4. 이명종 (1994), 시추공간 전기비저항 자료의 영상화, 석사학위논문, 서울대학교.
 5. 현대건설 (1997), 전기비저항 영상화기법 및 토목/환경분야 적용성 연구, 기술연구소 연구 보고서, pp. 65-95.
 6. 현병구 (1995), 물리탐사 용어사전, 선일문화사.
 7. Dey, A., and Morrison, H.F. (1979), “Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures”, Geophys. Prop., Vol. 27, pp. 106-136.
 8. Palacky, G. J. (1988), Resistivity characteristics of geologic targets, in Nabighian, M.N. Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics-theory, Vol. 1: Soc. Explor. Geophys., pp. 56-125.
 9. Zhao, J. X., Rijo, L., and Ward, S. H. (1986), “Effects of geologic noise on cross-borehole electrical surveys”, Geophysics, Vol. 51, pp. 1978-1991.

(접수일자 1998. 3. 16)