

**터널 건설 예정지구에서의 전기비저항 탐사와 전자탐사의
적용을 통한 연약대 탐지에 대한 사례 연구**

**A case histories on the detection of weak zone using electrical resistivity
and EM surveys in planned tunnel construction site**

권형석¹⁾, Hyoung-Seok Kwon, 송윤호²⁾, Yoonho Song, 이명종²⁾, Myeong-Jong Yi,
정호준¹⁾, Ho-Joon Chung, 오세영³⁾, Se-Young Oh, 김기석⁴⁾, Ki-Seog Kim

¹⁾ (주)희송지오테크 차장, Deputy General Manager, Heesong Geotek Co., Ltd.

²⁾ 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geophysical Exploration & Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³⁾ (주)희송지오테크 과장, Manager, Heesong Geotek Co., Ltd.

⁴⁾ (주)희송지오테크 대표이사, President, Heesong Geotek Co., Ltd.

SYNOPSIS : In tunnel construction, the information on the rock quality and the location of fault or fracture are crucial for economical design of support pattern and for safe construction of the tunnel. The grade of rock is commonly estimated through the observation with the naked eye of recovered cores in drilling or from physical parameters obtained by their laboratory test. Since drilling cost is quite expensive and terrains of planned sites for tunnel construction are rough in many cases, however, only limited information could be provided by core drilling. Electrical resistivity and EM surveys may be a clue to get over this difficulty. Thus we have investigated electrical resistivity and EM field data providing regional information of the rock quality and delineating fault and fracture over a rough terrain.

In this paper, we present some case histories using electrical resistivity and EM survey for the site investigation of tunnel construction. Through electrical resistivity and EM survey, the range and depth of coal seam was clearly estimated, cavities were detected in limestone area, and weak zones such as joint, fault and fracture have been delineated.

Key words : Electrical resistivity survey, Electromagnetic survey, coal seam, limestone cavity, fracture, weak zone

1. 서 론

최근 들어 철도, 도로와 지하저장시설 등과 같은 사회간접시설에 대한 건설이 증대되면서 물리탐사를 이용한 지반조사에 대한 요구가 증대되고 있다. 한국의 경우 국토의 70% 이상이 산악지형으로 새로 건설되는 교량이나 터널 등은 주로 험준한 지형에 건설되고 있다. 이중 터널에 대한 설계를 위해서는 터널 구간과 터널 상하부 구간에 대한 물성이 요구되는데, 시추조사나 실내실험을 통해서만 시추공 사이의 지반에 대한 물성 정보를 유추하기가 힘들다. 또한, 산악지형에서는 시추조사의 비용도 증대할 뿐만 아니라 시추조사를 수행할 수 없는 지역이 증대되어 지표에서 연속적인 지반에 대한 정보를 제공해

주는 물리탐사를 이용한 지반물성의 산출이 요구된다.

물리탐사 방법 중 일반적으로 널리 사용되어 온 굴절법 탄성과 탐사는 지층 구분이나 기반암 심도에 대한 유용한 정보를 제공해 준다. 하지만, 터널의 계획고가 50 m 이상인 산악지형에서는 굴절법 탄성과 탐사의 적용이 제한되며 주로 터널 입출구부에 적용되고 있다. 이에 반해 전기비저항 탐사와 전자탐사는 수백 m 이상 심도의 지반에 대한 정보를 신속하고 경제적으로 제공해준다.

일반적으로 신선한 암반은 전기비저항이 수천 ohm-m 이상으로 높은 반면에 단층 및 파쇄대, 석회암 공동과 탄층 등과 같은 연약대에서는 수백 ohm-m 이하로 매우 낮게 나타난다. 한국에 분포하는 탄층은 주로 강원도를 비롯한 산악지형에 분포하며, 주성분이 무연탄으로 밀도는 약 1.8g/cm^3 , 탄성과 속도는 2,000 m/sec로 다른 암반의 물성과 큰 차이를 보이지 않는 반면에 전기비저항은 수 ohm-m 이하로 극명한 차이를 보인다. 또한 한국에 분포하는 탄층은 퇴적 후 습곡 및 단층 등의 구조작용을 여러 차례 받아 매우 연약한 암반상태를 보인다. 다음으로 석회암 공동은 석회암이 지하수에 의해 용식되어 생성되며, 주로 지하수의 유동 경로인 단층 및 파쇄대를 따라 형성된다. 일반적으로 이러한 단층 및 파쇄대, 탄층과 석회암 공동 등의 연약대에서는 불연속면 틈새에 지하수나 점토 등이 충전되어 있어서 매우 낮은 전기비저항 값을 보이며, 주변 암반과의 전기비저항 대비가 커서 전기비저항 탐사와 전자탐사가 연약대 탐지에 효과적이다.

본 연구에서는 터널 건설 예정지구에서 전기비저항 탐사와 전자탐사의 적용을 통한 연약대의 탐지에 대한 사례를 보여주고자 한다. 먼저, 탄층이 분포하는 산악지형에서 탄층의 분포 범위 및 심도에 대한 사례를 고찰하였으며, 다음으로 석회암 분포지역에서 3차원 전기비저항 탐사를 통한 석회암 공동 탐지에 대한 사례를 고찰하였다. 마지막으로 다수의 탄층이 지표에서 관찰되는 편마암 분포지역에서 전기비저항 탐사를 통한 단층 및 파쇄대의 위치를 탐지하는 사례를 고찰하였다.

2. 탄층의 분포 범위 및 심도 규명

본 조사지역은 터널 건설 예정지역으로 고도차가 600 m 이상으로 매우 험준하고, 터널의 계획심도 또한 평균 200 ~ 400 m, 최대 600 m로 매우 깊을 뿐만 아니라 그 차이도 매우 크다. 주요 암종은 고생대 ~ 중생대의 사암, 석회암, 유문암과 역암이며, 이중 중생대의 사암과 석회암은 석탄층과 탄질세일을 함유하고 있다. 또한, 노년기 지층으로 트러스트의 발달에 의해 석탄층이 수십 cm ~ 수 m 폭으로 사암이나 세일 등과 함께 여러 매가 중첩되어 나타나는 특성을 보이며, 연결성이 매우 불량하여 지표지질조사와 시추조사만으로는 석탄층의 분포범위와 심도를 추정하기는 매우 어렵다.

따라서 경제적이며 안전한 터널 설계를 위해서는 최대 600 m에 달하는 터널 계획심도에서의 암반 상태와 탄층의 분포범위 및 심도에 대한 정보가 요구된다. 이를 위하여 터널 계획노선 상부에서 심부나 전도성 매질이 존재하는 지역에서 탁월한 효능을 발휘하는 CSMT (Controlled-Source Magnetotelluric) 탐사를 수행하였으며, 탄층에 대한 보다 정밀한 영상획득을 위해 탄층분포 지역에서 전기비저항 탐사를 수행하였다.

그림 1에서 아래 그림은 97.90 ~ 109.75 km 구간의 11.85 km의 거리에 대한 CSMT 탐사 결과로 60 ~ 100 m 간격으로 자료를 획득하였으며, 수직으로 3배 확대하여 전기비저항 분포 단면을 작성하였다. 또한, 해석의 편의를 위해 전기비저항 분포의 해석으로 확인되는 단층, 암상경계, 습곡 등의 구조, 시추공과 터널의 위치도 함께 도시하였다. 본 조사에서는 자연장 송신원과 10 Hz ~ 75 kHz 사이의 광대역 전자기장을 평면파 송신원으로 사용하여 전자기장을 함께 측정하였으며, 이를 통해 수 m ~ 1 km 심도에 대한 전기비저항 분포단면을 획득하였다. 그림 1을 보면, 97.9 ~ 106 km 구간에 걸쳐 지표하부 200 m 이상 심도에 분포하는 기반암의 분포 양상을 명확히 보여주고 있으며, 특히 103.2 ~ 103.5 km 구간(이상대 A)을 보면 전기비저항이 급격히 달라지는바 단층파쇄대의 발달을 암시하고 있다. 또한, 106.2 ~ 107.1 km 구간(이상대 B)과 108.5 km 이후 구간(이상대 C)의 200 m 이내 심도에서 100 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 폭넓게 분포하고 있다. 한국에 분포하는 석탄은 무연탄을 많이 함유하고 있어 전기비저항이 수십 ohm-m 이하로 매우 낮으며, 따라서 저비저항 이상대를 탄층 분포지역으로 추정할

수 있으며 그 심도는 200 m 이내이다.

그림 1에서 위의 그림은 105.8 ~ 108.8 km 구간에서의 전기비저항 탐사에 의한 전기비저항 분포 단면으로 쌍극자배열을 이용하여 자료를 획득하였으며 전극간격은 50 m이다. 전기비저항 탐사 결과를 보면, CSMT 탐사에서와 마찬가지로 106.2 ~ 107.1 km 구간과 108.5 km 이후 구간의 200 m 이내 심도에서 수십 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 보여 탄층이 분포함을 암시하고 있다.

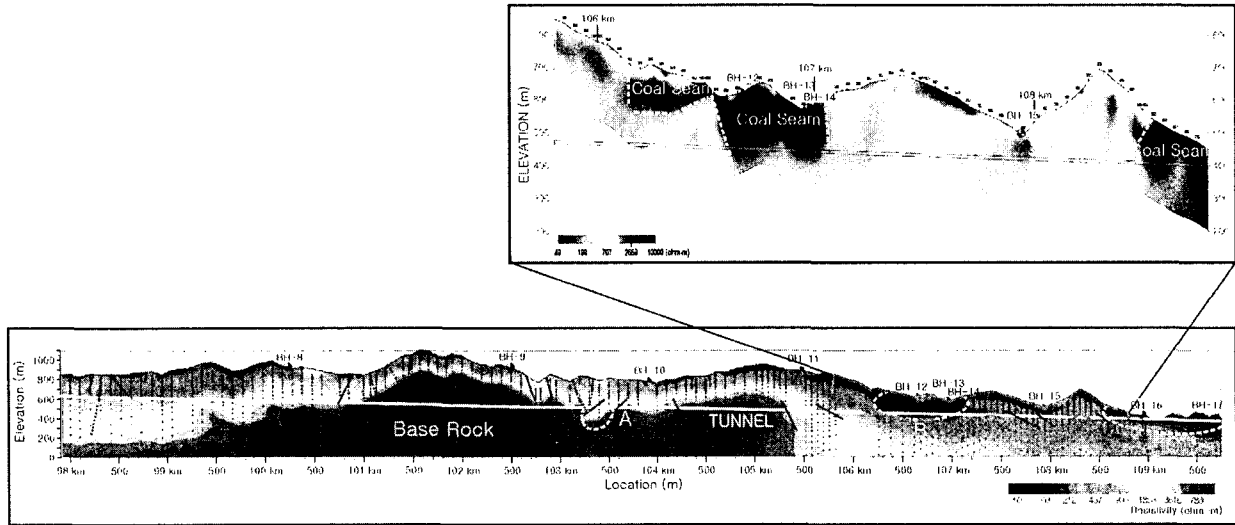


그림 1. 탄층 분포 지역에서의 전기비저항 탐사와 전자탐사에 의한 전기비저항 분포단면. 그림에서 A는 전자탐사에 의해 추정되는 구조대를 나타내며, B와 C는 탄층의 분포범위와 심도를 나타낸다.

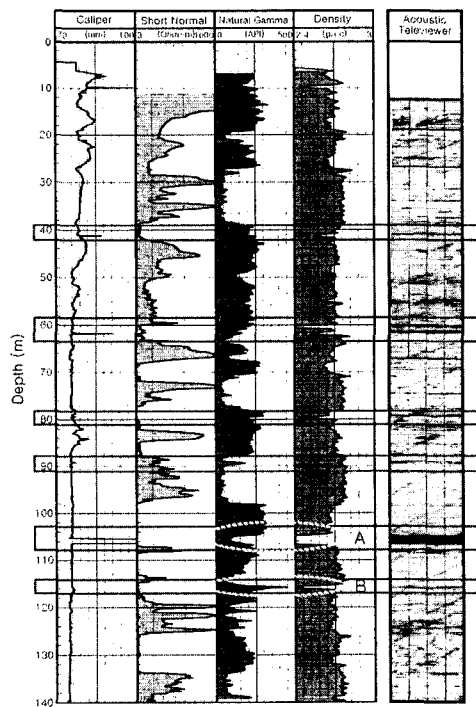


그림 2. 시추공 BH-14에서 측정된 물리검층과 텔레뷰어 영상. 왼쪽에서부터 순서대로 공경검층, 전기비저항 검층, 자연감마 검층, 밀도검층과 텔레뷰어 영상을 도시하였다. 그림에서 A는 대표적인 탄층에 의한 반응을 B는 셰일에 의한 반응을 나타낸다.

그림 2는 탄층의 분포심도와 폭 등의 특성규명을 위하여 106.97 km 지점에 위치한 시추공 BH-14에서 실시한 공경 검층, 단노말전기비저항 검층, 자연감마 검층, 밀도 검층과 텔레뷰어 영상을 순서대로 도시한 것이다. 공경 검층, 전기비저항 검층과 텔레뷰어 영상에서 이상대 구간을 박스로 나타냈는데, 이 구간에서는 시추공 내부가 무너지거나 이수에 씻겨서 코아 회수가 되지 않아 시추조사로는 물성에 대한 정보를 얻을 수 없었다. 이에 반해 물리검층 자료에서는 A와 같이 전기비저항이 수 ohm-m 이하로 매우 낮고, 자연감마와 밀도가 감소하는 구간은 탄층을 나타내며, B와 같이 전기비저항이 낮더라도 밀도차가 크지 않고 자연감마가 인접구간에 비해 증가하는 곳은 세일을 나타낸다.

본 조사에서는 터널의 계획심도가 최대 600 m에 달하는 지역에서 CSMT 탐사를 적용하여 약 1 km 심도의 전기비저항 분포단면을 구하였으며, 이를 통해 수백 m 하부 기반암의 분포 양상과 구조대에 대한 정보를 획득하였다. 또한, 탄층이 분포할 것으로 예상되는 지역에 전기비저항과 CSMT 탐사를 적용하여 탄층의 분포범위와 심도 등에 대한 정보를 획득할 수 있었다.

3. 석회암 분포 지역에서의 석회암 공동 탐지

석회암은 탄산칼슘(CaCO_3)을 주성분으로 하는 퇴적암으로 유기질 토양으로부터 공급되는 이산화탄소(CO_2)가 풍부한 지하수(H_2O)에 의해 쉽게 용해되며, 석회암 지대에서는 지하수면을 중심으로 수평 또는 수직방향으로 다수의 공동이나 동굴이 생성되는 특성을 가진다(2, Waltham, 1994).

본 조사 지역은 터널 건설 예정지역으로 석회암 용식작용에 의해 지표가 함몰되어 생성되는 돌리네가 지표에서 수 m ~ 수십 m 폭으로 여러 개 관찰되었으며, 시추조사 중 다수의 석회암 공동이 발견되었다. 석회암 공동은 용식이 진행됨에 따라 서로 연결되어 채널 형태로 발달하므로, 시추조사에서 발견된 석회암 공동들에 대한 정보만으로는 지하에서의 석회암 공동의 분포양상을 예측할 수 없다. 또한, 지표에 다수의 돌리네들이 군집을 이루어 분포하고 있으며, 지하구조 또한 복잡한 3차원 구조를 보일 것으로 예상되는 바, 석회암 공동의 분포양상 규명을 위해서는 3차원 탐사의 적용이 필요하였다. 본 조사에서는 석회암 공동이 절리, 단층과 파쇄대 등의 연약구간에서 주로 발달하므로 신속하고 경제적으로 이를 탐지할 수 있는 전기비저항 탐사를 적용하였다. 3차원 전기비저항 탐사의 축선은 터널 계획노선을 중심으로 좌/우 10 m, 30 m와 70 m 이격하여 터널 계획노선과 수평하게 7 개의 축선을 설정하였으며, 터널 계획노선과 수직하게 20 m 간격으로 30 개의 축선을 설정하였다. 탐사 시 전극간격은 가탐심도와 분해능을 고려하여 10 m로 설정하였으며, 지하구조에 대한 분해능이 가장 높은 쌍극자배열을 이용하여 자료를 획득하였다.

그림 3은 지표면, 터널 계획노선 종단면과 터널 계획심도 평면에서의 전기비저항 분포 단면을 3차원적으로 도시한 것으로 흰색 점선은 저비저항 이상대를 나타낸다. 지표면과 터널 계획노선 종단면을 보면 저비저항 이상대(A)가 주로 돌리네 발달지역과 일치하게 10 m 이상의 심도까지 발달하고 있다. 터널 계획심도 평면을 보면 100 m 이상의 길이를 가지는 저비저항 이상대(B)가 폭넓게 분포하고 있다. 이 구간은 지표에 100 m 이상의 길이를 가지는 대규모 돌리네가 위치한 곳으로, 지표의 돌리네가 터널 계획심도까지 발달하고 있음을 알 수 있다. 전기비저항 분포단면을 시추조사 결과와 비교하면, 공동 출현 위치는 저비저항 이상대와 저비저항/고비저항 영역의 경계부에 해당하며, 100 cm 이상의 공동은 주로 저비저항 이상대 위치에서 발견되고, 40 ~ 50 cm 정도의 공동들은 저비저항/고비저항 경계부에서 발견되었다. 또한, 시추조사 결과 높은 전기비저항을 보이는 지역에서도 20 cm 미만의 공동이 일부 출현하나 공동구간 이외의 구간에서는 매우 신선한 암반상태를 보여 고비저항 영역에서 존재할 수 있는 공동의 크기나 빈도는 크지 않음을 알 수 있었다.

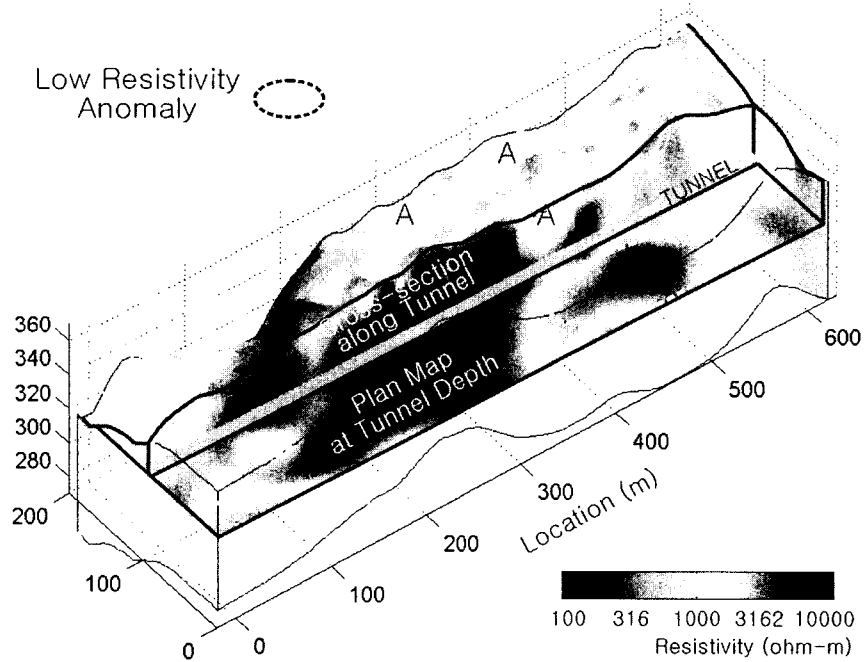


그림 3. 지표, 터널 종단과 터널 계획심도에서의 3차원 전기비저항 영상. 그림에서 흰색 점선은 저비저항 이상대를 나타낸다.

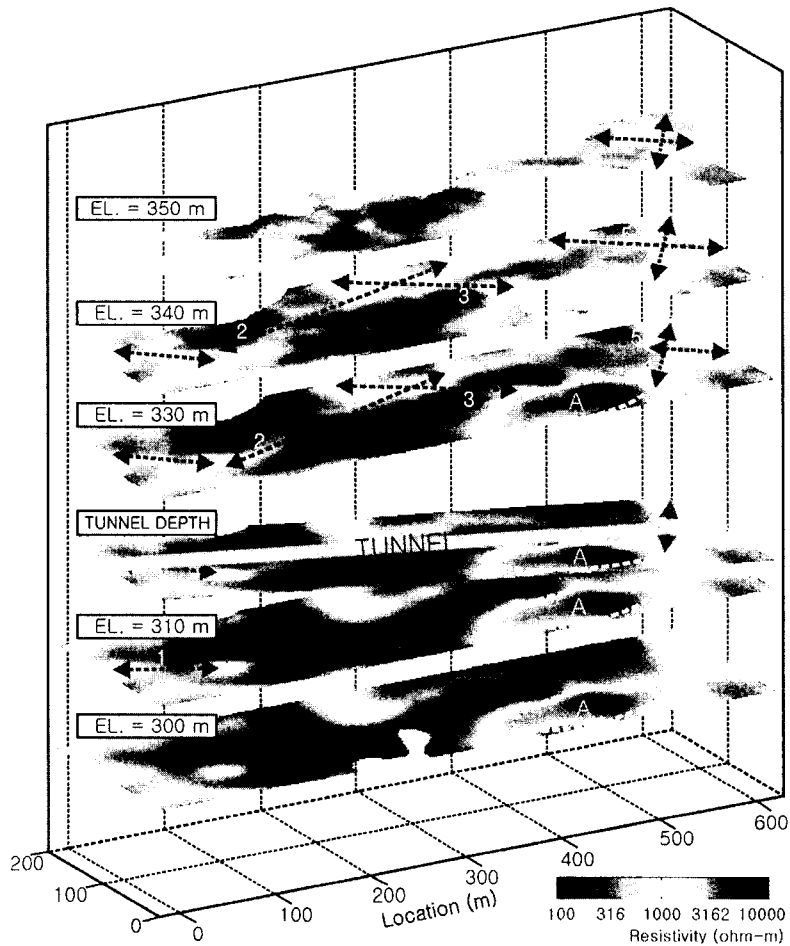


그림 4. 고도 300 m ~ 350 m 에서의 전기비저항 영상. 그림에서 A는 측선 주위에 분포하는 대규모 돌리네의 위치를 도시한 것이며, 화살표는 구조대의 방향을 도시한 것이다.

그림 4는 3차원 전기비저항 자료에서 고도별로 전기비저항 자료를 추출하여 나타낸 고도에 따른 전기비저항 분포단면이다. 그림 4를 보면, 지표 천부의 경우 독립적으로 발달한 저비저항대가 많이 발달하고 있으며 이들의 위치는 대부분 돌리네 지역과 일치하고 있다. 또한 저비저항 이상대의 발달 방향은 노선에 대해 좌측에서 우측으로 사교하는 방향과 우측에서 좌측으로 사교하는 방향으로 대략 2가지 정도의 방향성을 가진다. 지표에서 관찰되는 소규모 돌리네 하부에서는 석회암 공동이 10 m 이내의 심도에 분포하고 있지만, 그 규모가 커짐에 따라 발달심도도 증가하고 있으며, 대규모 돌리네 직하부인 이상대 A는 터널 하부 30 m 이상의 심도까지 수직적으로 발달하고 있는 양상을 잘 보여주고 있다.

지표 및 시추조사에서 다수의 돌리네와 석회암 공동이 관찰되는 지역에서 3차원 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 전기비저항 분포단면을 통해 석회암 공동의 분포 범위, 심도와 발달방향 등에 대한 정보를 획득할 수 있었다. 본 조사 지역에서는 석회암 공동이 지표의 돌리네 직하부에서 수직적으로 분포하고 있었으며, 대규모 돌리네 직하부에서는 30 m 이상의 심도까지 발달하고 있음을 알 수 있었다.

4. 절리, 단층과 파쇄대 등의 연약구간 탐지

절리, 단층과 파쇄대 등의 연약구간은 터널의 시공시 안전에 가장 큰 영향을 주는 요소로 터널 설계 시 이를 반드시 파악하여야 한다. 절리나 단층에 대한 정보는 지표지질조사와 시추조사를 통해 파악하는데, 연장길이, 방향, 경사와 폭 등은 노두관찰을 위해 쉽게 파악이 가능하지만, 발달심도는 파악이 쉽지 않다. 또한, 지표에 노두가 존재하지 않거나 단층이 지하에 존재하는 경우에는 지표지질조사를 통한 단층에 대한 정보획득은 매우 어렵다.

한편, 절리, 단층과 파쇄대 등의 연약구간은 지하수의 유동 경로일 가능성이 높으며, 파쇄가 심하게 발달하여 주변지역에 비해 전기비저항이 매우 낮게 나타난다. 이는 전류가 연약구간을 통해 주로 흐르게 됨을 의미하며, 따라서 전기비저항 및 전자탐사가 지하에 분포하는 연약구간의 탐지에 매우 효과적임을 알 수 있다.

본 조사지역은 철도터널 건설 예정지역으로 호상흑운모편마암과 규장질편마암이 주로 분포하며, 여러 개의 단층이 군집을 이루어 분포하는 단층대이다. 경제적이고 안전한 터널설계를 위해서는 지표에서 관찰되는 단층들이 터널심도까지 발달하는지를 규명하여야 하며, 이를 위해 전기비저항 탐사를 실시하였다. 그림 5는 단층대 지역에서 쌍극자 배열법에 의해 획득된 전기비저항 분포단면으로 DIPROfWin을 이용하여 지형보정과 역산을 실시하였다. 역산방법은 공간적인 분해능에 따라 라그랑지안 상수를 달리 적용하는 ACB(Active Balancing Constraint)법(3, Yi et al., 1998)을 적용하였으며, 이를 통해 심부자료에 대한 분해능을 높일 수 있었다. 그림 5에서 실선은 지표지질조사에 의해 관찰된 단층을 도시한 것이며, 암맥과 터널의 위치도 함께 도시하였다.

그림 5 (a)를 보면, 10 ~ 20 m 심도 하부에 기반암으로 추정되는 1,000 ohm-m 이상의 고비저항대가 분포하며, 터널하부까지 발달하는 3 개의 저비저항 이상대가 나타난다. 먼저, 이상대 A는 풍화 및 파쇄가 심하게 발달한 절취 사면 지역으로 전기비저항이 낮게 나타날 것으로 예견된 곳이다. 하지만 그 값을 보면 100 ohm-m 이하로 일반적인 절취 사면에 비해 그 값이 매우 낮게 나타났는데, 이는 이 구간에 단층이 위치하는 바 단층에 의해 풍화 및 파쇄가 가속화되었기 때문으로 판단된다. 다음으로 이상대 B는 산 정상임에도 불구하고 여러 개의 단층과 암맥의 영향으로 전기비저항이 낮게 나타나고 있다. 한편, 이상대 C는 단층이나 암맥이 분포하지 않는데도 전기비저항이 낮게 나타나고 있는데, 이 구간은 계곡으로 일반적으로 계곡이 지질구조대와 일치하게 발달한다는 사실로 비추어볼 때 구조대의 발달을 예상할 수 있다.

그림 5 (b)는 인접지역에서의 전기비저항 탐사 결과로 그림 5 (a)에서와 마찬가지로 1,000 ohm-m 이상의 고비저항대의 분포양상을 잘 보여주며, 3개의 저비저항 이상대가 모두 단층과 연관되어 있다. 먼저 이상대 A는 비록 단층에 의해 전기비저항 낮게 나타나지만 그 값이 500 ~ 1,000 ohm-m로 단층의 발달심도 및 폭이 그리 크지는 않을 것으로 판단된다. 한편 이상대 B에서는 100 ohm-m 내외의 저비저항대가 심부까지 폭넓게 발달하고 있는데, 이는 이 구간에 위치한 단층과 화강편마암에 의한 영향이다.

화강암은 한국에 가장 널리 분포하는 암종으로 편마암에 비해 전기비저항이 낮으며, 풍화에 의해 쉽게 파쇄되는 특성을 가지고 있다. 이상대 B에서 전기비저항이 매우 낮은 이유는 먼저 암종이 화강편마암이기 때문이며, 단층의 영향으로 풍화 및 파쇄가 심하게 발달하였기 때문이다. 마지막으로 이상대 C를 보면 단층에 의한 영향으로 전기비저항이 낮게 나타나고 있다.

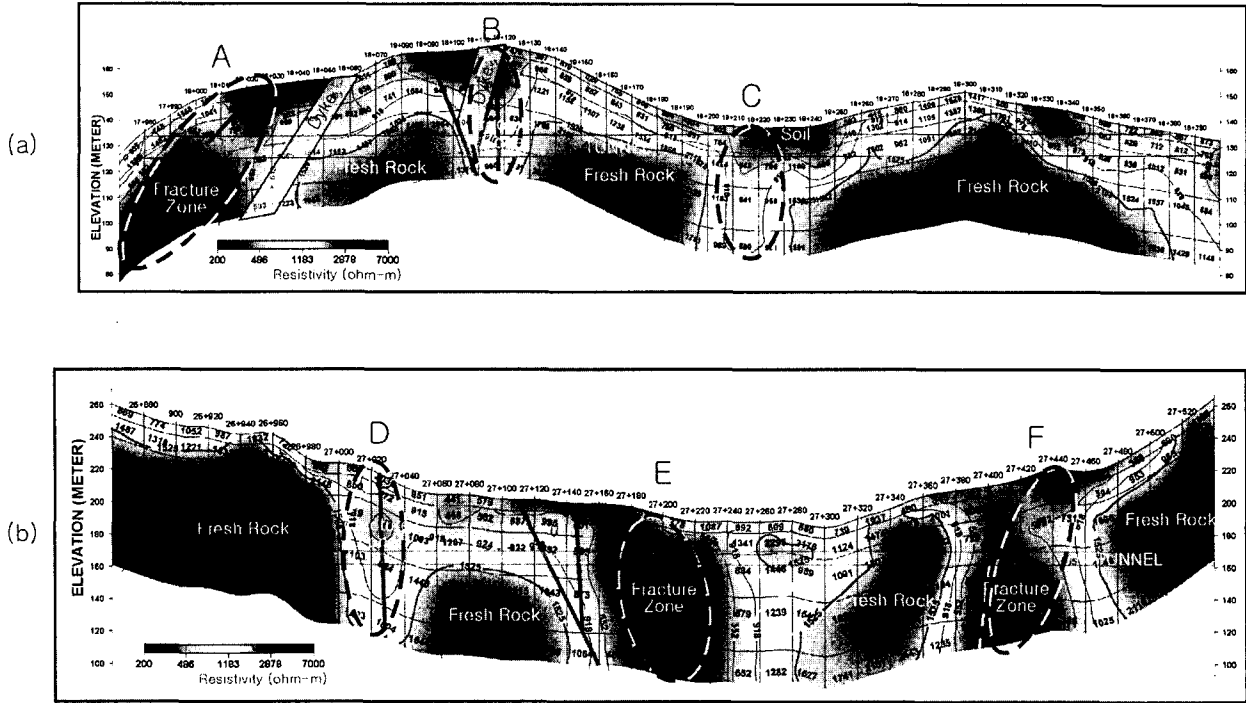


그림 5. 단층이 다수 존재하는 편마암 분포지역에서의 전기비저항 분포 단면. 그림에서 굵은 실선은 지표지질조사에 의한 단층을 나타내며 점선을 저비저항 이상대를 나타낸다.

다수의 단층이 존재하는 단층대 지역에서 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 이를 통해 전기비저항 탐사가 절리, 단층과 파쇄대 등의 연약구간 탐지에 효과적임을 확인하였다. 특히, 전기비저항 탐사는 지표에 노두가 존재하지 않거나 단층이 지하에 존재하여 지표지질조사에서는 확인이 불가능한 경우에 매우 효과적이며, 단층의 발달심도 추정에도 유용함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널 건설 예정지구에서 전기비저항 탐사와 전자탐사에 의한 연약대 탐지에 대한 사례를 고찰하였다. 첫번째로, 단층이 분포하는 산악지형에서 전기비저항과 전자탐사를 적용하여 1 km 이상의 심도에 대한 전기비저항 분포단면을 획득하였으며, 기반암의 경계, 단층에 의한 연약대의 분포범위와 심도를 규명하였다. 다음으로 석회암 지역에서의 3차원 전기비저항 탐사를 적용하였으며, 이를 통해 석회암 공동의 분포범위와 심도 및 발달방향을 알 수 있었다. 본 조사지역에서 석회암 공동은 지표의 돌리네 하부에 수직적으로 분포하고 있었으며, 돌리네 크기에 비례하여 심도가 증가하며 최대 30 m 심도까지 발달하고 있었다. 마지막으로 다수의 단층이 지표 및 시추공에 관찰되는 편마암 분포지역에서 전기비저항 탐사를 적용하여 단층의 예상 발달 심도와 파쇄정도에 대한 정보를 획득하였으며, 전기비저항 탐사가 지표에 노두가 존재하지 않는 지역에서 단층 및 파쇄대 탐지에 효과적임을 확인하였다.

향후 전기비저항 및 전자탐사에 의한 전기비저항 값과 시추 및 여타 조사에 의한 물성의 상관관계에 대한 연구가 지속적으로 진행된다면, 연약대 탐지와 함께 암반물성에 대한 정보도 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Torres-Verdin, C.(1991), "Continuous profiling of Magnetotelluric fields", Ph.D. thesis, Univ. of California, Berkeley.
2. Waltham, A. C.(1994), "Foundations of engineering geology" Blackie Academic & Professional, pp.88.
3. Yi, M.-J., and Kim, J.-H.(1998), "Enhancing the resolving power of the least-squares inversion with active constraint balancing", 68th SEG meeting, New Orleans, USA, Expanded Abstracts, pp.485-488.
4. Yi, M.-J., Kim, J.-H., Song, Y., Cho, S.-J., Chung, S.-H., and Suh, J. H.(2001), "Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data", Geophy. Prosp., 49, pp.483-497.
5. Yi, M.-J., Kim. J.-H., Song. Y., and Chung, S.-H.(2002), "Application of three-dimensional resistivity imaging technique to the site investigations", Symposium on the Application of Geophysics to the Engineering and Environmental Problems, Las Vegas.