

절개사면에서 전기비저항 토모그래피 적용 기법

박충화 · 박종오*

대전대학교 지반설계정보공학과

A Technical Application of Resistivity Tomography in Cut Slope

Chung Hwa Park, and Jong Oh Park*

Department of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

천매암 및 편암으로 구성된 기지의 절개사면에서 제시된 이상대는 사면 하단부에 설정된 전류원과 상단부의 전위전극으로 하는 단극-쌍극자 배열을 이용한 전기비저항 토모그래피 방식으로 파악되었다. 해석 방법은 각 축선에서 얻어진 측정 자료를 가지고 3차원 전기비저항 역산 방법으로 하였다. 각 축선에 따른 영상들을 볼 때, 사면의 중앙부에 위치한 단층은 사면에 거의 수직인 방향으로 연장된 영상들로 제시 되었다. 수치모델링 결과에서 이상대의 영상들은 절개사면에서 제시된 위치에 매우 정확한 결과들로 보여 주었으며, 단층은 절개사면으로부터 거리가 멀어질수록 지표로부터 그 심도가 깊어지는 경향으로 나타났다.

주요어 : 절개사면, 이상대, 전기비저항 토모그래피, 3차원 전기비저항 역산

To find out the anomalous zone in cut slope composed of phyllite and shist, we performed resistivity tomography using a pole-dipole array. The electrical distribution that propagates from a current source in lower part of slope is measured by a potential electrode in upper part of slope. Apparent resistivity data are inverted with an iterative regularized inversion method to reconstruct 3D resistivity image. By comparing with the resistivity images in relation to each section, the images of anomalous zone correspond to their positions represented in cut slope. Therefore, the application of resistivity tomography in cut slope is useful to recognize the extension of anomalous zone.

Key words : cut slope, anomalous zone, electrical resistivity tomography, inversion, 3D resistivity image

서 론

암반사면의 사태는 사면을 구성하고 있는 지질매체와 사면의 경사각에 따라서 그 거동이 달라진다. 즉, 대부분의 자연사면이나 절개사면은 토사부분의 파괴보다 토사하부 암반 내에 존재하는 연약한 불연속면을 따라 파괴가 발생하는 것이 일반적이다. 그러므로 사면의 붕괴는 일반적으로 암석의 종류, 풍화정도, 암석 내에 발달한 지질구조와 같은 불연속면과 사면의 경사각에 관련되므로 특히 불연속면의 물리적 특성과 파쇄대의 존재 등을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 암반사면 내의 불연속면은 함수비 증가에 따른 내부마찰각 감소 및 간극수압 증가로 인한 전단강도 감소 등이 파괴의 원인으로

볼 수 있다. 본 연구는 이러한 절개사면에서 분해능이 향상된 전기비저항 토모그래피 탐사 방법으로 사면 내에 존재하는 연약대의 발달상황 등을 전기비저항 물성치로 3차원적으로 영상화하여 사면 파괴를 미연에 방지하고자 한다.

사면파괴는 퇴적암의 층리면을 따른 평면파괴, 단층 파쇄대를 따른 활동파괴, 변성암의 엽리에 규제된 파괴, 열수변질 작용의 영향에 의한 파괴 및 상이한 지층의 경계부에서 파괴 등으로 복잡한 지질적 특성에 관여하여 발생된다(이창섭, 2007). 또한 산사태는 일시적으로 발생하는 것이 아니라 장기간에 걸친 강우의 지하 침투로 인하여 암반 내의 많은 불연속면이 활동 파괴면으로 작용하여 붕괴되므로 자동화 계측을 통한 사면 안정성

*Corresponding author: jopark@dju.ac.kr

판단이 필요하다(라원진 외, 2004). 따라서 암반사면으로 구성된 지역은 지질적 상황들을 예측하기 위하여 사면 내에 존재하는 불연속면의 물리적 특성, 연장성 및 방향 등을 물리탐사 기법을 통하여 정확히 파악하여야 할 것이다.

이상대 파악을 위한 물리탐사 기법 연구로는 암반사면 사태의 원인 규명을 위한 전기비저항 탐사(황학수 외, 2001)와 노두에 관찰되는 단층과 관입암의 발달 양상을 파악하기 위하여 물리탐사 기법을 적용하여 지반특성 연구(김지수 외, 2005) 등이 있다. 또한 전기비저항 토모그래피 탐사의 적용은 광화대에 대한 전기비저항 토모그래피(유영준 외, 2004; 박종오 외, 2006)와 불포화대 토양특성 분석을 위한 전기비저항 토모그래피(용환호와 송성호, 2004) 및 화강암 석산지역에서의 3차원 전기비저항 토모그래피(이명종 외, 2002) 등이 있다. 특히 전기비저항을 이용한 탐사는 단층과 같은 연약대와 모암과의 전기비저항 물성치의 대비가 뚜렷하게 구분이 될 것이므로 지질구조 탐지에 매우 효과적이다(Guo *et al.*, 1999).

본 연구는 천매암 및 편암으로 구성되어 있는 절개사면 내에 존재하는 단층을 중심으로 전기비저항 탐사를 수행하였다. 일반적인 탐사 방법은 시추공이 존재하지 않을 경우 사면의 상부에서 탐사를 수행하는 것이 보편적이지만 측정자료가 적어 해상도가 떨어질 수 있으며 또한 각 축선간의 연계성을 뚜렷하게 확인할 수 없다. 그러므로 전기비저항 탐사는 단극쌍극자 배열 방법으

로 절개사면 하부에 전류원과 사면 상부에 전위전극으로 하여 토모그래피 방식을 적용하였다. 또한 사면의 상부에 있는 전위전극의 축선들은 사면 외측으로 일정한 간격을 벌려가며 측정하므로써 사면 내부에 있는 암상의 변화 및 불연속면에 대한 모든 정보들을 파악할 수 있을 것이다. 전극들의 위치는 3차원 모형에서 절개사면에 따른 지형기복의 영향을 그대로 반영하여 선정하였다.

본 연구의 목적은 기지의 절개사면에서 제시된 단층과 같은 불연속면을 대상으로 전기비저항 토모그래피 탐사를 통하여 얻은 보다 많은 자료를 가지고 3차원 역산을 이용하여 단층의 방향 및 연장성 등을 분해능이 높은 영상으로 파악하는데 있다.

전기비저항 탐사 배경

본 연구지역은 충청북도 옥천군 이원면에 위치하였으며 시대미상의 옥천 누층군, 주라기의 옥천화강암, 백악기의 반상 흑운모화강암과 석영반암 및 제4기 충적층으로 구성되어 있다. 이러한 지역에 단층은 N10~40°E 주향으로 발달하며 도로 개설을 위한 절개사면에 거의 수직으로 다량의 충전 물질을 포함하고 약 0.81 m 내의 폭을 보이고 있다(Fig. 1). 또한 페그마타이트의 관입은 단층을 기준으로 볼 때 좌측에 약 7 m 떨어져서 1.225 m 폭을 보이며 발달된 양상이다. 전반적인 사면

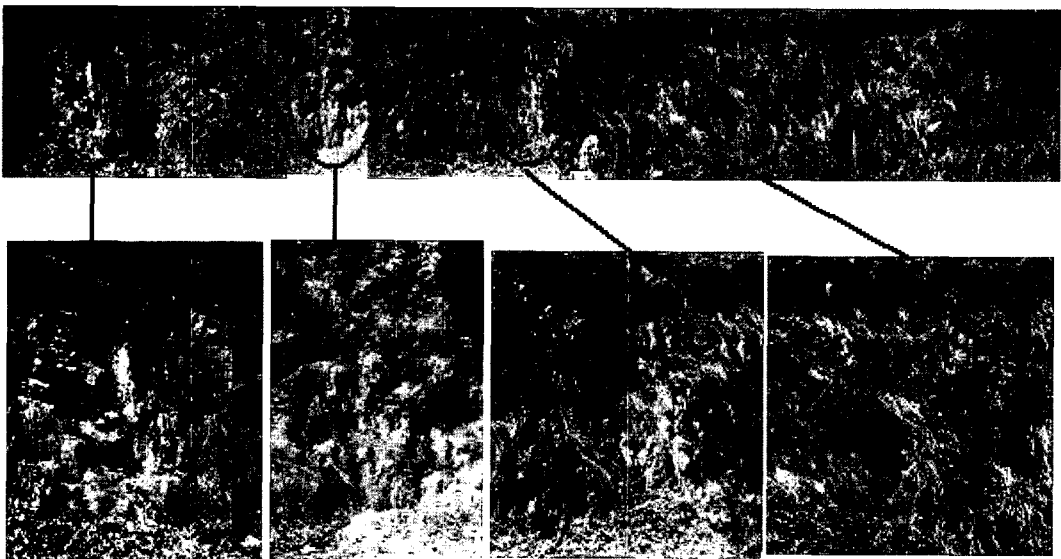


Fig. 1. Photography of the geological structure from the known cut slope in the study area.

주변의 암상들은 옥천 누층군으로서 회색 및 녹색의 천매암과 편암 등으로 구성되어 있으며 퇴적암이 광역변성작용의 결과에 의하여 이들의 암체로 변성된 것으로 보인다. 절개사면에서 보이는 암질의 상태는 보편적으로 많은 풍화를 받은 것으로 나타났다.

전기비저항 탐사는 암석의 종류, 공극, 온도 및 지질적 순환과정 등을 통하여 외견비저항 값이 많은 변화를 보인다(Ward, 1990). 이들의 변화에 따른 전기비저항의 값은 풍화, 변질, 단층 및 연약대에서 대체로 낮은 값을 보이는 반면 경화작용, 탄소화합물의 침전 및 규산화 작용에서 비교적 높은 값을 나타낼 것이다. 즉, 전기비저항 탐사 배경은 모암인 천매암과 편암에 대하여 다량의 충진 물질을 포함하고 있는 단층사이에 전기비저항 물성치의 대비가 현저할 것으로 보이므로 단층의 방향과 연장성을 파악할 수 있을 것으로 보인다. 또한 절개사면은 Fig. 1에서와 같이 지표에 노출되어 많은 풍화작용을 받아 단층의 충진 물질과 물성의 차이가 없겠지만 사면 안측에서 비교적 신선암으로 구성되어 있으므로 이들의 물성 대비가 뚜렷할 것으로 보인다.

전기비저항 탐사 방법은 절개사면에서 이상대로 보이는 지점을 중심으로 하여 사면 하부와 상부에 측선을 설정하여 토모그래피 배열과 사면의 상부에서 쌍극자 배열 방식을 적용한 것이다(Fig. 2). 이러한 방법들은 기존의 방식과 달리 측정 자료의 양이 방대하여 사면 내부의 많은 정보들을 포함하므로 분해능이 향상된 영상들을 얻을 것으로 보인다. 또한 Fig. 2에서 사면 하부에 있는 전류원은 지하 하부를 통하여 사면 상부까지 흘러가서 전위전극에 도달되기 때문에 사면 내부의 지질적 구조의 변화에 대한 전기장의 반응이 민감할 것으로 보인다.

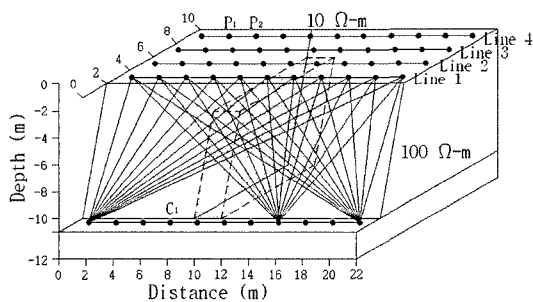


Fig. 2. 3D view for cut slope model to generate synthetic data using dipole-dipole array and pole-dipole array. A anomalous zone of 10 Ω-m is located in the middle part in the 100 Ω-m background.

전기비저항 토모그래피 탐사는 지표 전기비저항 탐사가 가지는 분해능의 한계를 극복하고자 전극들을 지표에 비하여 이상체에 근접한 시추공내에도 설치함으로써 매우 높은 분해능의 지하 전기비저항 영상을 획득하는 탐사법 및 해석법으로 통상적인 전기비저항 탐사 가운데 가장 분해능이 높은 방법이다(이명종 외, 2002). 탐사 방법으로는 일반적으로 시추공간 탐사(crosshole survey), 두 시추공에 대한 동일 시추공 탐사(inline survey), 시추공 대 지표탐사(hole-to-surface survey) 또는 지표 대 시추공 탐사(surface-to-hole survey) 등의 3가지 형태로 수행된다. 전극 배열은 분해능의 측면에서 쌍극자 배열이 가장 높으나 측정전위 값에서 반대의 경향을 나타낸다(김정호 외, 2001). 본 연구지역에서는 토모그래피 탐사에서 분해능 측면에서 쌍극자 배열 방식을 적용하는 것이 타당할 것으로 보이나 사면의 높이 때문에 전류전극에 대한 측정전위 값이 너무 작을 것으로 보아 단극-쌍극자 배열 방식을 선택하였다. Sasaki (1992)는 단극-쌍극자 배열이 분해능 및 전위 크기에서 볼 때 가장 적절한 탐사 방식이라 제안하였다. 또한 전극배치에서 전류전극과 전위전극은 일직선으로 위치하지 않기 때문에 전기장의 반응이 매우 적을 것으로 보아 쌍극자 배열로 정확한 포텐셜 값을 얻을 수 없다고 본다. Jackson et al (2001)에 의하면 전기장의 반응은 전류전극이 전위전극에 일직선으로 위치한 경우가 수직으로 위치한 경우보다 더 민감하다고 설명하였다.

수치 모델

본 연구의 수치모델은 Fig. 2에서 제시된 배경값이 100 Ω-m의 균질한 사면의 모형에 대하여 사면의 중앙에 2m의 폭을 갖는 10 Ω-m의 이상대가 수직으로 모형 상단에서 2m를 제외하고 관입된 모양으로 구성되어 있다. 모형에서 사면은 경사가 약 85°정도이며 높이가 10m이다. 배열 방법은 모형의 상단에서 4개 측선의 쌍극자 배열과 모형 하단에 전류원과 상단에 전위전극으로 하는 토모그래피 방식으로 단극-쌍극자 배열을 병행하였다. 전극 간격들은 전류전극과 전위전극 모두 2m로 동일하게 하였다.

모델에서 입력 자료는 쌍극자 배열에서 n=8로 하여 144개의 자료와 단극-쌍극자 배열에서 440개의 자료로 전체 584개이다. 단극-쌍극자 배열의 전기비저항 값은 모형 하단의 전류원에 대한 한 쌍의 전위 전극에서 측정된 포텐셜 값과 전극 배열에 관한 기하학적인 거리

계수를 곱하여 계산되어진다. 이러한 자료중에 단극-쌍극자 배열 방법에서 극성변화로 인하여 겉보기 비저항이 음으로 나타나는 값들은 역산과정에서 제외시켰다. 그러므로 겉보기 비저항은 항상 양으로 제시되며 역산에 사용되는 매개변수에 있어서 블록과 측정된 겉보기 전기비저항이 Rijo *et al.*, (1977)가 제시한 것과 같이 상용대수로 선택되어 입력된다.

3차원 역산 모델은 $37 \times 25 \times 20 (= 18,500)$ 개의 유한요소 절점으로 구성하였으며, 2m 간격(절점 2개)을 하나의 블록으로 하여 전체 1156(= 330)개의 블록으로 나누었다. 깊이 방향은 블록을 일정한 크기로 하였으며 사면 하단부에서 2m 깊이를 포함하여 전류원에 대한 전위 분포의 영향을 허부까지 파악하였다. 모형에서 전류원이 위치한 전체 블록들은 실제 공기로 포함되어 있어 Fox *et al.* (1980)이 제시한 것과 같이 공기와 지하 매질의 전기비저항 대비를 크게 하여야 하여야 할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 공기와 지하 매질의 전기비저항 대비를 10^3 으로 크게 차이로 하여 수치 모델링을 실시하였다. 그리고 비선형 역산 방법은 Constable *et al.* (1987)이 제시한 3점의 라그랑지 곱수 값을 변화시켜 최소자승 오차가 가장 적은 최적의 라그랑지 곱수를 결정하는 방법을 이용하였으며 역산 과정에서 10번의 반복을 통하여 계산되어졌다.

Fig. 3은 쌍극자 배열과 단극-쌍극자 배열을 이용한 토모그래피 탐사에서 각 측선이 위치한 단면에 대한 전

기비저항 영상을 나타낸 것이다. 실제 단면에 대한 영상들을 Fig. 2의 모형과 비교하여 보면 Fig. 3 (a)는 사면의 경사면을 제시한 단면으로 이상대의 전 구간이 약 11~20 Ω -m 내의 값들로 매우 정확한 위치에 나타났으며 단면 상부와 하부에 모형에서 제시된 배경치 값과 비슷하게 보여 주었다. 그리고 Fig. 3 (b)의 영상에서 이상대는 심도 8m 깊이까지 약 8~11 Ω -m 내의 값들로 그 위치에 나타났다. 그러나 심도 8~10 Ω m 사이는 약 45 Ω -m의 값으로 이상대가 매우 희미한 영상으로 보였으며 그 하부에서 배경치 값으로 나타났다. Fig. 3 (c)와 (d)의 영상들은 2~6m 사이에 약 8~11 Ω -m 내의 값들을 보여주었지만 그 하부 6~8m 깊이에서 약 16~20 Ω -m의 값들로 대체적으로 좋은 결과를 도출하였다. 그러나 심도 8~10m 깊이에서는 측선 3에서 70 Ω -m과 측선 4에서 80 Ω -m의 값들로 절개사면의 단면에서 거리가 멀어질수록 깊이에 따른 이상대의 심도 파악이 거의 불가능하였다.

각 측선에서 쌍극자 배열과 단극-쌍극자 배열을 이용한 토모그래피 방식으로 얻은 자료에 대한 결과를 비교하여 보면 이상대의 영상들은 각 측선들이 절개사면에서 멀어질수록 심도 파악이 점점 낮게 나타나기 때문에 쌍극자 배열 자료에 대한 결과 보다 토모그래피 방식의 결과가 더 우세하게 나타난 것으로 보인다. 즉, 사면에서 단극-쌍극자 배열을 이용한 토모그래피 방식은 사면 하단의 전류원에 대하여 각 측선의 전위전극 위치가 사

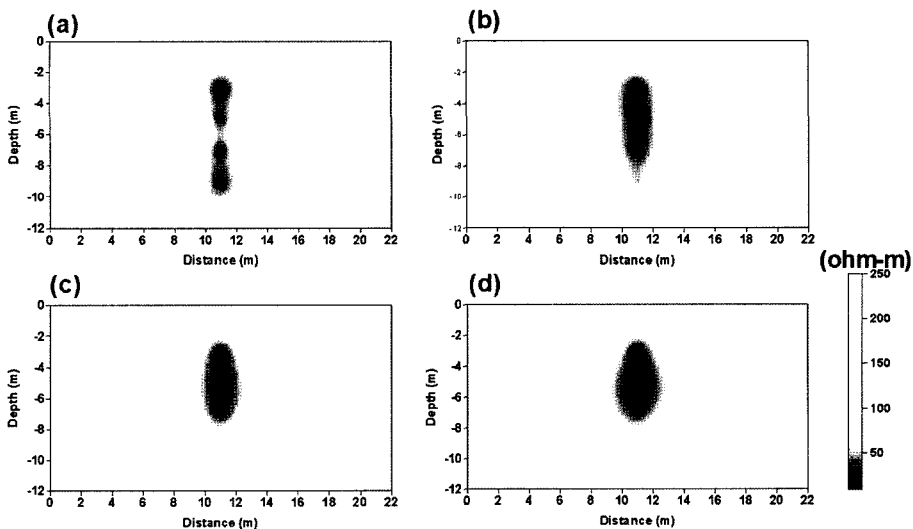


Fig. 3. Resistivity sections reconstructed from 3D inversion in cut slope model for the line 1 (a), line 2 (b), line 3 (c), and line 4 (d) represented in Fig. 2. The anomalous zone is successfully imaged in the results.

면 상단에 위치하기 때문에 각 측선이 멀어질수록 깊은 심도까지 전기장 분포가 미치지 못하므로 Fig. 3과 같은 영상들로 제시된 것으로 파악된다. 즉, 사면에서 단극-쌍극자 배열을 이용한 이상대 구간의 파악은 사면의 단면을 포함하여 각 측선에 따라 매우 정확하게 나타났지만 측선이 멀어질수록 해석 심도가 작다는 단점이 있다. 그러나 쌍극자 배열 탐사보다 사면에서 토모그래피 방식을 이용한 단극-쌍극자 배열 탐사가 분해능 측면에서 볼 때 이상대의 연장성 파악에 훨씬 탁월한 것으로 보여 주었다.

연구 방법 및 결과

본 연구는 Fig. 1에서 제시되는 천매암질인 절개사면 내에 있는 단층을 중심으로 단극-쌍극자 배열을 사면의 하단에 전류원과 상단에 전위전극으로 하는 토모그래피 탐사 방식을 사면에 적용하였다. 전기비저항 탐사는 사면 하단에서 상단까지 약 6.5m 높이인 절개사면으로 상단에서 4개 측선을 2m 간격으로 설정하였으며 각 측선마다 21개의 전극을 2m 간격으로 전체 40m 구간을 측정하였다. 사면 경사는 약 30°로 기울기를 보이고 있으며 측선 1이 6.9m 높이며 측선 4가 약 10.7m 높이이다. 한 측선에서의 자료 획득은 토모그래피 탐사 방식으로 21개 전류원에 대해 420개의 측정 자료를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 4개 측선으로 구성되며 측선 4에서 9개의 전류원에 대한 자료만을 측정하였으므로 전체 1,440개의 자료를 획득하였다.

3차원 역산 모델은 사면에서 보이는 이상대가 거의 1m 정도의 폭을 보이고 있으므로 절점 간격을 1m로 하여 $57 \times 25 \times 15 (= 21,375)$ 개의 유한요소로 구성하였다. 또한 모델 블록은 측선 방향과 심도에서 한 개 절점 간격을 하나의 블록으로 하며 측선 수직방향에서 2개 절점 간격을 하나의 블록으로 전체 $42 \times 5 \times 7 (= 1,470)$ 로 일정하게 나누었다. 지형 기록은 사면 지역으로 약간의 고도 차이를 보이므로 역산과정에서 포함하여 수행하였다.

Fig. 4는 각 측선에서 토모그래피 탐사 방식으로 얻어진 자료에 대한 3차원 역산 결과에 대한 단면도이다. 측선 1에 대한 영상은 절개사면의 단면에 대한 것으로 주로 전기비저항 물성 차이가 보이는 모암인 천매암, 페그마타이트 및 단층 지역으로 구분할 수 있다. 페그마타이트 지역에 대한 전기비저항 영상은 사면 하단부에 고비저항이나 상단부로 갈수록 낮은 전기비저항 분포를 보이며 측선이 멀어질수록 비저항 값이 서서히 높아지는 것으로 보아 이는 측선을 따라 연장됨을 알 수 있다. 이러한 영상들은 사면 절개부에서 많은 풍화로 인하여 낮은 전기비저항 분포를 보이나 사면 안측으로 갈수록 풍화 정도가 적어 비교적 높은 값을 갖는 것으로 판단된다. 또한 측선 거리 0~10m 부근의 낮은 전기비저항 영상은 경사진 이상대 구간의 존재로 인하여 제시된 것으로 보여진다. 단층 부분에 대한 영상은 그 위치에서 약 1m 정도 좌측으로 이동되어 나타났다. 각 측선을 따른 연장성을 볼 때 거의 수직인 방향으로 향하고 있다. 단층 상부에 비교적 높은 전기비저항 분포는 단층에 의한 점토 및 각력들이 표토까지 존재하지 않기 때문이

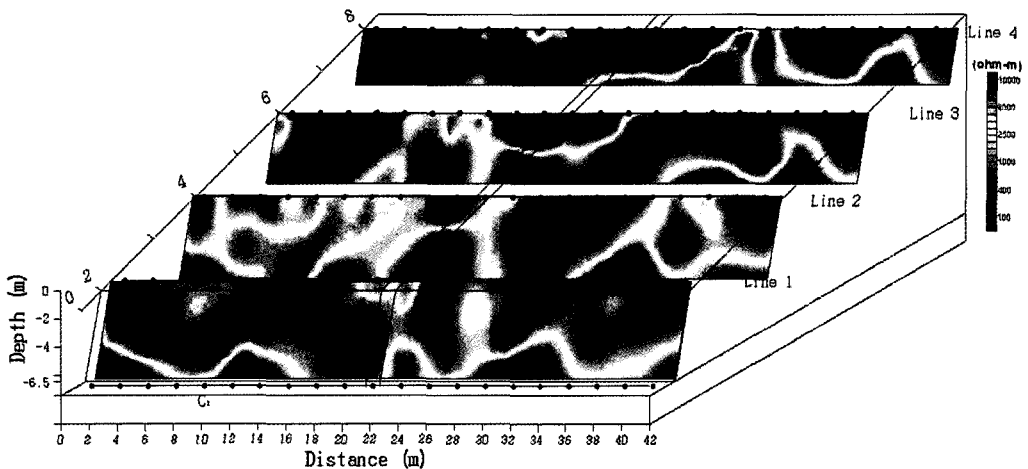


Fig. 4. Resistivity sections reconstructed from 3D inversion in the resistivity tomography using a pole-dipole array. The resistivity images for cut slope relatively show similar trend. The y-axis is exaggerated by four times.

며, 상부는 주변과 동일한 표토층으로 구성되어 높은 값을 보인 것으로 해석된다. 측선 거리 30 m 부근은 사면 단면에서 단단한 지층으로 보이거나 실제 구조선 등이 발달되어 틈새가 벌어져 있는 구간이다. 이러한 위치에서 각 측선에 대한 전기비저항 영상들을 비교하여 보면 구조선은 사면 안측으로 갈수록 연장성을 갖고 매우 폭 넓게 발달되어 있는 영상으로 제시되었다.

토의 및 결론

사면파괴는 일반적으로 퇴적암과 변성암에서 층리와 엽리면을 따른 파괴, 단층과 이상대를 따른 파괴 및 상이한 지층의 경계부에서 파괴 등으로 발생되어진다. 이러한 지질적 특성들은 사면 내에 존재하는 불연속면의 발달 등으로 근거되므로 전기비저항 탐사를 통하여 그 방향 및 연장성을 파악하는 것이 중요할 것이다. 그러므로 전기비저항 탐사는 암석의 종류 및 지질구조에 따른 전기적 물성 차이에 의해 외견비저항 값이 많은 변화를 보이므로 단층과 같은 지질구조 탐지에 매우 효과적이다.

수치모델링은 모형에서 사면의 상단과 하단부로 구성되어 있으므로 공기와 지하 매질로 구분되기 때문에 그 전기비저항 대비를 10^3 차이로 하여 실시하였다. 모형에서 전류원의 위치는 실제 지표에 있으므로 지형보정을 이용하여 그 위치를 설정하게 하여야 하나 사면 단면의 기복 차이가 너무 크기 때문에 모델링 수행시 정확한 결과를 도출하기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 전류원을 모형 안에 존재하는 것으로 하여 역산을 수행하였다. 역산 결과에 대한 영상들을 비교하여 보면 사면 중앙부에 $10 \Omega\text{-m}$ 의 이상대가 수직으로 관입된 현상에 대한 것으로 그 위치에 약 8~20 $\Omega\text{-m}$ 내의 값들로 분포하였으며 그 상부와 하부에서 배경치 값들로 제시되 매우 정확한 결과를 도출하였다. 그러나 각 측선들이 절개사면에서 거리가 멀어질수록 이상대의 심도는 점점 낮게 나타나므로 쌍극자 배열에 대한 결과 보다 단극-쌍극자 배열을 이용한 토모그래피 방식이 분해능 측면에서 그 연장성 파악이 훨씬 탁월한 것으로 해석되었다.

본 연구는 천매암 및 편암으로 구성된 기지의 절개사면에서 제시된 이상대를 대상으로 단극-쌍극자 배열을 이용한 전기비저항 토모그래피 방식으로 얻은 자료를 가지고 3차원 전기비저항 역산 방법으로 해석하였다. 배열 방법은 사면 하단에 있는 전류원에 대하여 사면 상단에서 전위를 측정하기 때문에 쌍극자 배열이 분해능 측면에서 가장 높으나 측선 전위 값이 너무 작아 정확

한 결과를 얻을 수 없으므로 단극-쌍극자 배열을 이용하였다. 전기비저항 영상들을 비교하여 보면 단층지역은 거의 수직 방향을 보이며 사면 안측으로 연장되어 있음을 알 수 있다. 페그마타이트 지역의 영상은 풍화정도에 따라 비저항 분포가 다르나 사면 상부에 많은 풍화로 인하여 낮은 전기비저항 분포를 보였다. 측선 거리 30 m 부근은 틈새가 벌어져 있는 구조선이 존재하는 구간으로 사면 안측으로 갈수록 폭 넓게 발달되어 있는 영상으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기탐사를 위한 전극 배열법의 비교, 한국자원공학회지, 38, 116-128.
- 김지수, 한수영, 서용석, 이용재, 2005, 물리탐사를 이용한 청주 화강암 지역의 지반특성 파악, 대한지질공학회지, 15, 41-55.
- 라원진, 최정찬, 김경수, 조용찬, 2004, 황령산 사면 계측 관리 분석에 관한 연구, 대한지질공학회지, 14, 429-442.
- 박종오, 송무영, 박충화, 유영준, 2006, 마산 용장광산에서 금광에 대한 물리탐사의 적용, 대한지구물리한국 물리탐사학회 공동학술대회 논문집, 213-220.
- 용환호, 송성호, 2004, 불포화대 토양 특성 분석을 위한 전기비저항 토모그래피의 적용성, 물리탐사, 7, 184-190.
- 유영준, 유인걸, 김정호, 2004, 삼보광산 금 광화대에 대한 전기탐사 반응, 물리탐사, 7, 217-224.
- 이명중, 김정호, 정승환, 서정희, 2002, 전기비저항 토모그래피에 의한 지하구조의 3차원 영상화, 물리탐사, 5, 236-249.
- 이창섭, 2007, 사면파괴 사례와 안정화 대책, 2007년도 지질공학 workshop, 대한지질공학회지, 149-214.
- 황학수, 기원서, 이태섭, 박종오, 최정환, 문창규, 2001, 암반사면 사태의 원인규명을 위한 지질조사 및 전기비저항 탐사, 대한지질공학회지, 11, 295-301.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: A practical logarithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, Geophysics, 52, 289-300.
- Fox, R. C., Hohmann, G. W., Killpack, T. J., and Rijo, L., 1980, Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys, Geophysics, 45, 75-93.
- Guo, W., Dentith, M. C., Xu, J., and Ren, F., 1999, Geophysical exploration for gold in Gansu Province, China, Exploration Geophysics, 30, 76-82.
- Jackson, P. D., Earls, S. J., and Reece, G. J., 2001, 3D resistivity inversion using 2D measurements of the electric field, Geophysical Prospecting, 49, 26-39.
- Rijo, L. R., Pelton, W. H., Feitosa, E. C., and Ward, S., H., 1977, Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande Do Norte, Brazil, Geophysics, 42, 995-1005.
- Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography

inferred from numerical simulation, Geophysical Prospecting, 40, 453-463.

Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, Geotechnical and Environmental Geophysics, 147-186.

2007년 5월 3일 원고접수, 2007년 6월 14일 게재승인

박충화

대전대학교 공과대학 지반설계정보공학
300-716, 대전광역시 동구 용운동 96-3번지
Tel: 042-280-2571
Fax: 042-280-2570
E-mail: chpark@dju.ac.kr

박종오

대전대학교 공과대학 지반설계정보공학
300-716, 대전광역시 동구 용운동 96-3번지
Tel: 042-280-2575
Fax: 042-280-2570
E-mail: jopark@dju.ac.kr