

## 전기비저항 탐사의 다양한 배열 방법에 대한 해석 기법

박 충 화\*

대전대학교 지반설계정보공학과

### The Technical Solution for Various Array Methods in Resistivity Survey

Chung Hwa Park\*

Department of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

전기비저항 탐사에 있어서 지하에 분포하는 이상대를 정확하게 파악하기 위하여 다양한 배열 방법들이 요구되어 진다. 탐사 방법들은 험난한 산악지형에서 지형기복에 따른 장비와 인력의 이동에 대한 불편함을 줄이기 위하여 일정한 고도에 서의 곡선적 측선에 대한 탐사, 시추공이 경사·곡선·수평적으로 되어 있을 경우 지표의 임의적 위치에서의 탐사, 여러 개의 전류원에 대하여 임의의 위치에서 포텐셜을 측정하는 탐사 등으로 분류된다. 본 연구는 이러한 다양한 배열 방법으로 얻어진 복합적 자료들에 대하여 3차원 역산 방법을 사용하여 보다 신속하고 정확한 영상들로 나타내고자 한다. 또한 단층지역에서 곡선적 배열 방법으로 얻어진 측정 자료에 대한 3차원 역산 결과로부터 단층의 경사, 방향 및 폭 등에 관하여 정확한 전기비저항 영상들의 비교 결과도를 제시하였다.

**주요어** : 전기비저항 탐사, 곡선적 탐사, 복합적 자료, 3차원 역산, 전기비저항 영상.

Various array methods are required in the electrical resistivity survey in order to find anomalous zone reliably. Array methods are classified as several groups. Among these group, a curved survey along the fixed elevation is designed to increase the mobility of men and survey equipments at the rough terrain. Another method is performed at the survey using inclined, curved, and horizontal boreholes. A survey can also be conducted in an arbitrary location by measurements of potentials for a multi sources. The complex data acquired using various array methods are represented by a correct images reconstructed from the 3D inversion. The element division is applied to the region in which the boreholes are curved and inclined because of a spatial discrepancies between the coordinate of each electrode and the nodal point in a model. The resistivity images are obtained from a good agreement for the anomalous zones in open slope and in survey using an inclined borehole.

**Key words** : electrical resistivity, curved survey, inclined, multi sources, complex data, element division, resistivity images.

### 서 론

단층, 파쇄대 및 이상대는 연약대와 같은 지질구조선을 따라 발달하기 때문에, 주변 도암과 물리적 성질의 차이가 현저할 것이며, 전기전도도와 관련된 전기비저항 탐사로 탐지될 수 있을 것이다. 이러한 이상대와 같은 구조선은 지표상에서 탐지하는 방법만으로는 어느 정도

한계를 보이기 때문에, 시추공 및 지하 터널을 이용한 토모그래피 탐사 등과 같이 다양한 배열 방법을 이용하여 파악되어 질 수 있다. 또한 탐사의 정확도를 높이기 위하여 다양한 배열 방법을 통하여 얻어진 복합적 자료 들은 종합적으로 역산 과정 등을 통하여 해석 되어진다. 그러므로 우리는 기존의 탐사 방법과 달리, 현장의 조건 에 따른 다양한 배열 방법들을 선택하여 지하에 존재하

\*Corresponding author: chpark@dju.ac.kr

는 이상대를 신속하게 탐사하고, 보다 정확한 해석 결과를 얻는 것을 목적으로 하고 있다.

자료 해석으로는 우선 기본적으로 관측 자료를 기초로 하여 지하구조에 따른 물리적 성질을 추정한다. 지하구조의 모델에 대한 매개변수는 이론치와 실제로 얻은 관측치를 비교하여 양자가 잘 부합되도록 함으로써 실제에 가까운 값으로 접근하는 것으로 측정자료에 대한 분해능과 안정성을 고려하여야 한다. 즉, 3차원 전기비저항 역산은 반복 과정을 통하여 목적함수를 최소화하는 방법으로 각 반복단계마다 특정해의 크기 및 방향을 최소화하도록 조정하는 평활화 제한법 등을 사용한다 (Constable *et al.*, 1987; Labrecque *et al.*, 1996). 역산 방법으로는 측정 자료와 모델자료에 대한 최소자승 오차의 크기가 부드럽고 연속적으로 감소하여 수렴할 수 있도록 하여야 한다. 본 연구의 목적함수 최소화는 비선형 문제이기 때문에 반복과정마다 임의의 선정된 3개의 곱수를 2차 포물선 함수로 표시하여 오차의 최소값으로 나타나는 지점을 선택하는 방식을 사용하였다.

전기비저항 탐사에서 3차원적 해석은, 험난한 산악지형에서 일정한 고도를 유지하며 곡선적 측선에 대한 탐사, 경사시추공에서 여러 가지 배열에 대한 탐사, 지하공간의 내부에 있는 전류원에 대한 지표의 전위 전극에서 측정되는 다양한 배열의 탐사에 매우 효율적으로 적용되어질 수 있다. 또한 이러한 수치 해석은 여러 전극들에서 동시에 공급한 전류원에 대하여 임의의 위치에서 포텐셜을 측정하는 배열 방식 등을 이용하여 지하구조를 해석할 수 있다.

본 연구에서는 반복적 비선형 최소자승법을 이용한 3차원 전기비저항 역산 방법을 적용하여 임의의 지역에서 복잡한 배열 방법에 대한 전기비저항 토모그래피 탐사 결과와 지표에서 곡선형의 조사 측선에 대한 탐사 결과에 대한 영상들을 지질구조와 비교·분석하고자 한다.

### 탐사 배경 및 이론

전기비저항 탐사는 지표나 시추공에 있는 전류원에 대하여 지표 및 시추공에서 다양한 배열에 따른 전위차를 측정하여 지하구조를 영상화하는 방법으로, 주변 지질과 탐지 대상체의 물리적 성질인 전기비저항 대비가 있는 지질구조를 파악하는데 매우 탁월한 것으로 알려져 있다.

지형 기복이 있는 지표에서의 전기비저항 탐사는 지형효과에 따른 포텐셜 분포 및 거리계수의 변화가 민감

하게 나타날 것이다. 즉, 포텐셜 분포는 지하 하부에 전도성 이상체를 포함한 모형에서 Fox *et al.*(1980)가 제시한 이론을 근거로 지형의 기복을 무시할 경우 역산 결과에 대한 전기비저항 영상들이 상당히 왜곡된다. 지표상에서 실시되는 전기비저항 탐사는 일반적으로 측선들을 직선적으로 배열하여야 하기 때문에 지형기복이 있을 경우 지형을 가로 질러서 위치하여야 할 것이다. 즉, 험난한 산악에서는 측선들이 직선일 경우 지형 고도를 따라 인력 및 장비의 이동을 하여야 하는 불편성이 있으므로 지형의 일정한 고도를 따라 곡선형의 측선들로 배열하는 것이 편리할 것이다. Fig. 1a는 지표가 복잡한 지형기복으로 되어 있을 경우로 가정할 때 3차원 모형을 이용하여 측선을 곡선적으로 배열한 경우이다. 자료의 해석은 곡선형 측선에서 얻어진 외견비저항에 대하여 박종오 등 (2004)이 제시한 3차원 역산을 통하여 얻어진 결과에서 측선이 통과된 블록들만을 선택하여 해석하는 방식이다. 즉, 측선 배열은 2차원적이지만 전류원의 흐름이 반구형의 3차원적으로 퍼져 나가기 때문에 3차원 모델로 해석이 가능하다.

Fig. 1a와 같이 시추공이 경사져 있거나 지하 하부에 터널이 존재할 경우 단극-쌍극자 배열 방법을 이용한 시추공-지표 탐사는 지하에 일정 전류의 흐름에 대한 한 쌍의 전위 전극에서 측정된 포텐셜 값과 전극 배열에 관한 기하학적 거리 계수(K)를 곱하여 계산되어진다. 그

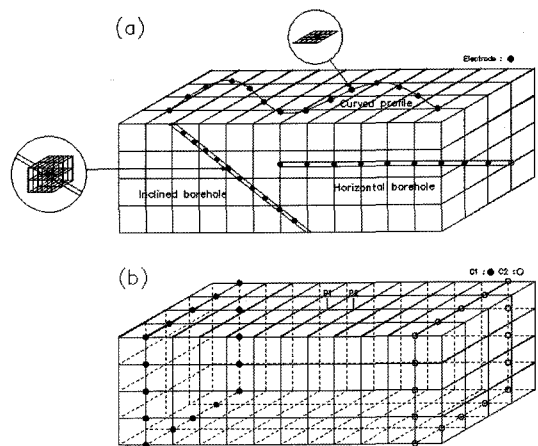


Fig. 1. 3D view of a model with various array methods applied to the horizontal or inclinatory borehole and the curved profile in surface (a), the potential measurement for multi sources and sinks (b). A method of element division showing in the circle coincides the source with the nodal point.

러나 시추공 안이 있는 전류원의 수직선 상부에 있는 지점은 전위구간(transition zone)으로 거리계수 및 포텐셜이 특이해로 나타나며 극성의 변화로 인하여 양자 모두 음에서 양으로 바뀌는 구간이다. 이러한 측정값들은 일반적으로 항상 양의 겹보기 전기비저항으로 나타나며 역산에 사용되는 매개변수로는 블록과 측정된 겹보기 전기비저항에 대한 상용대수가 선택되어진다(Rijo *et al.*, 1977).

상기와 같은 탐사 방법은 측선이 곡선이거나 시추공이 경사져 있기 때문에 절점과 전극이 일치하지 않으므로 요소의 분할 방법이나 선형함수를 이용하여 임의의 위치에 있는 전극에 대한 포텐셜 값을 각 절점에 추정하는 내삽법으로 문제점을 해결할 수 있다. 본 연구에서 채택된 요소분할 방법은 Fig. 1a와 같으며, 하나의 요소 안에 전극들이 포함되어 있을 때 요소 분할로 전극에 대한 절점의 좌표를 지정하도록 하였다(박종오 외, 2006). 그러나 요소분할 방법은 컴퓨터 용량 및 계산시간의 증대를 초래하는 단점 등이 있다.

전기비저항 탐사에 있어 외견비저항은 암석의 종류, 공극, 온도 및 지질적 순환과정 등을 통하여 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. 실제 탐사에서 얻어지는 외견비저항은 이들의 변화에 대한 전반적인 값들로서 정확한 지질구조 및 암석의 물성치로 대변될 수 없다. 그러므로 시추 및 지표에서 얻은 암석에 대한 물성치는 Parasnis(1973)이 제안한 직사각형이나 원형의 시추 코어에서 직접적으로 전류를 흘려보내 비저항을 계산하는 방법이 있다. 이러한 방법에 대한 수치적 해석은 3차원 모형을 Fig. 1b와 같이 전류원을 선으로 구성된 각 절점들에 동시에 흘려보내면서 임의의 위치에서 포텐셜을 계산하는 방식이다. 전위 분포를 나타내는 포아송 방정식은 다음과 같이 표현되어진다(Dey and Morrison, 1979)

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = \nabla \cdot J_s = \sum_{i,j,k=1}^n I \delta(x_i) \delta(y_j) \delta(z_k) \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 전기전도도(S/m),  $\phi$ 는 포텐셜(V),  $J_s$ 는 전류 밀도로 퍼지는 전원,  $I$ 는 전류 전극의 전원,  $\delta$ 는 Dirac delta함수이다.

전기장은 포텐셜에 대한 지배 방정식을 이용하여 지구구조에 대하여 3차원 공간을 적절한 간격으로 나눈

요소에 대한 적분형태 범함수로 유도되는 요소방정식을 풀이하여 각 절점 값들이 계산되어 풀이된다. 절점에서의 포텐셜 값은 3차원 모형에 대한 전체 영역을 육면체 조합의 유한요소로 구성되어지며 각 육면체의 절점들은 선형다항식을 이용하여 5개 사면체 요소의 절점에 대한 포텐셜 값의 합으로 계산된다.

비선형 최소자승 역산은 측정 자료와 이론모델 반응치의 차에 대한 목적함수를 최소화하는 방식으로 얻어지며, 전기전도도로 구성된 블록의 모델 변수벡터를 최적화하기 위하여 모델블록의 전기비저항 값에 관한 측정 자료의 미분법으로 최소자승방법을 사용한다. 역산에서 가장 매끄러운 해를 구하기 위하여 최소화해야 할 목적함수는 아래와 같다.

$$U = \|W_d(J\Delta m - \Delta d)\|^2 + \lambda \|W_m L(m_0 + \Delta m)\|^2 \quad (2)$$

여기서  $\|\cdot\|^2$ 은 유클리디안 놈(Euclidean norm),  $W_d$  및  $W_m$ 는 각각 자료와 모델의 가중행렬,  $\lambda$ 는 라그랑지 곱수, 그리고  $L$ 은 모델 거칠기를 정량화하기 위한 유한차분 연산자이다(Sasaki, 1989; deGroot-Hedlin and Constable, 1990).

## 적용 사례

### 단층지역에서 전기비저항 탐사(I)

본 연구는 강원도 영월군 지역에서 보여 지는 우회도로의 사면 노두에 약 1m의 폭을 갖는 단층이 Fig. 2a와 같이 거의 수직적 경사를 가지고 도로 하부까지 연장되어 나타나는 지역을 중심으로 수행되어졌다. 이 지역의 사면에 있는 단층의 형상이 지하로 어떻게 연장되어 있는지를 파악하는 것을 주 목적으로 전기비저항 탐사는 쌍극자 배열 방법으로 실시하였다. 쌍극자 배열 탐사는 전극 간격을 5m로 전체 240m를 연장하였으며,  $n$ 을 8까지 실시하였다. 탐사측선은 일반적으로 직선적 배열로 연장이 되나 급경사와 같은 지형적 조건으로 Fig. 2b와 같이 도로를 따라 곡선으로 배열하였다. 노두에 있는 단층은 전극 10과 11번 사이에 존재한다. 탐사에 대한 해석은 연구 영역을 Fig. 2b와 같이 설정한 후 3차원적 요소로 분할하였으며, 탐사자료에 대한 모델 블록에 있어서는 3차원 전기비저항 역산 결과로 얻어진 측선이 포함된 블록들로 영상화하였다. 역산결과는 Fig. 2c와 같이 단층이 위치한 지역(측선거리 90~100m 부근)에 약 300 ohm-m 이하의 저 비저항대가 거의 수직으로 위치하고 있다. 단층지역의 주변은 매우 높은 전

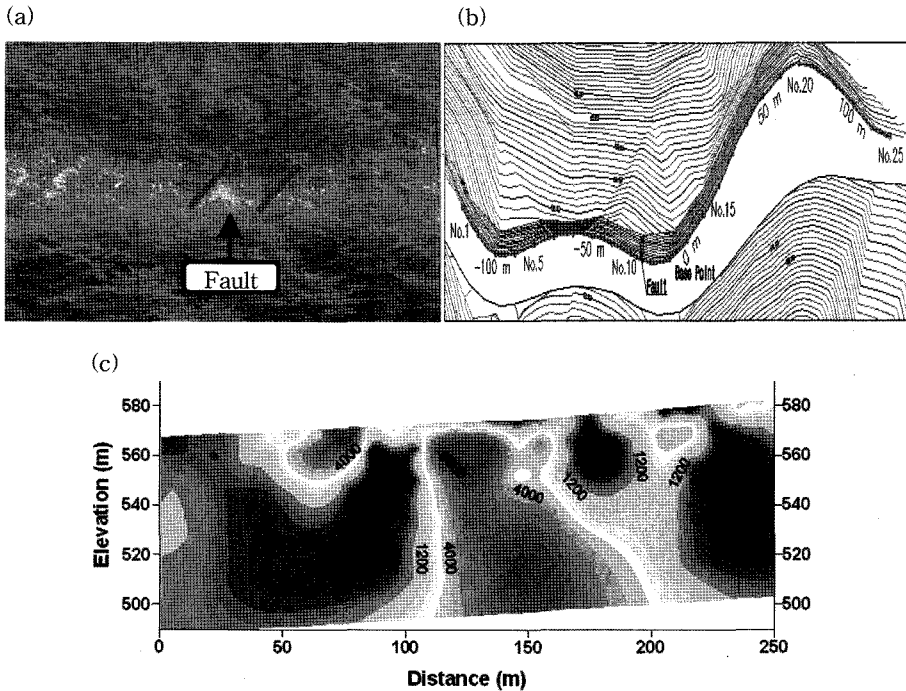


Fig. 2. The resistivity survey in fault zone (I). (a) Photography of fault represented in an outcrop; (b) curved profile along the road; (c) resistivity image reconstructed from the 3D inversion. The fault strike is marked by a dashed line.

기비저항 분포를 보이는데 이는 단층을 생성할 수 있는 외력이 연성보다 취성적인 암석에 작용하였기 때문으로 해석된다. 즉, 크게 작용된 외력은 취성의 물성에서 그 힘을 이기지 못하여 쉽게 깨지는 반면 연성의 물성에서 그 힘에 대하여 소성적으로 작용하였기 때문으로 판단된다. 축선거리 180 m~250 m에서 나타나는 저 비저항대는 지표에 많은 풍화를 받은 암석들이 하부까지 연장되었기 때문으로 사료된다.

#### 이상대 지역에서 전기비저항 탐사(II)

본 연구 지역은 사례(I)에서 약 1 km 하부에 위치한 지역으로 Fig. 3a와 같이 약 30 cm 이상의 폭을 갖는 이상대가 거의 수직으로 위치하는 지역이다. 탐사방법은 사례(I)과 동일한 방법으로 실시하였으며 이상대의 위치가 전극 9와 10번 사이에 존재한다(Fig. 3b). 외견비저항은 곡선 축선에 따른 거리계수와 측정 자료에서 얻어진 포텐셜을 곱하여 계산되어졌다. 해석은 축선 배열이 거의 S자형을 보였으므로 역산 결과에서 축선이 통과하는 블록들만을 선택하여 영상화하였다. 3차원 전기비저항 역산결과에 대한 영상에서 이상대의 위치인 축선거

리 90 m 부근은 지표에서 제시되지 않았지만 심부에서 1,000 ohm-m 이하의 값으로 수직적으로 발달된 것을 볼 수 있다(Fig. 3c). 또한 축선거리 150 m의 계곡부근은 천부에서 저 비저항대를 보이며 심부에 있는 이상대 지역과 연결된 영상으로 나타나므로 계곡의 물이 연약대를 따라 이상대 지역으로 유입되는 것으로 판단된다. 또한 지표에 보이는 약 30 cm 폭의 이상대는 전기비저항 영상에서 상부에 매우 적게 나타나다 사라졌지만 하부로 갈수록 폭 넓게 보이므로 매우 큰 폭의 연약대가 있을 것으로 사료된다.

#### 경사시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사(III)

본 연구지역의 지질은 주로 셰일이며, 이를 후기에 관입한 화강섬록암과 안산암질 암맥 등으로 구성되어진다. 또한 이러한 지질적 상황을 근거로 하여 후기에 석영맥은 주로 지질구조에 관련된 연약대의 지층을 따라 맥상 형태로 관입하였다. 전기비저항 탐사 목적은 연약대 및 석영맥 등을 탐지하기 위하여 설치된 경사시추공에 여러 가지 복합적 배열방법을 이용하여 보다 정확한 지질 구조를 파악하는데 있다.

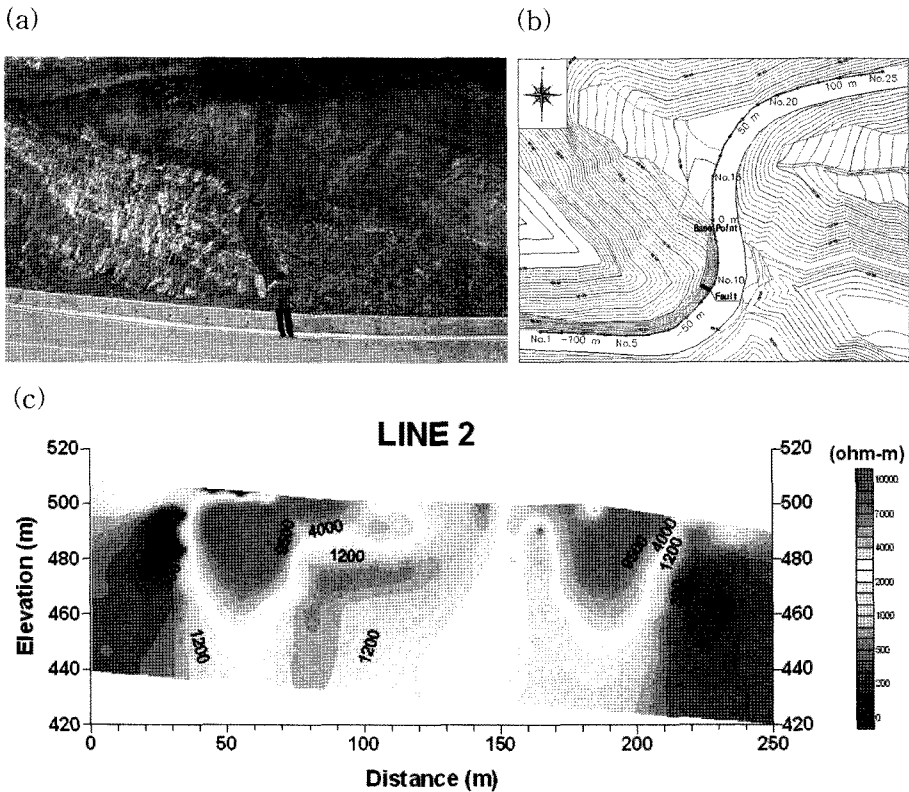


Fig. 3. The resistivity survey in anomalous zone (II). (a) Photography of anomalous zonet represented in an outcrop (a); curved profile along the road (b); resistivity image reconstructed from the 3D inversion (c).

경사시추공을 이용한 단극-쌍극자 배열 방법은 시추공-지표, 지표-시추공 탐사와 경사시추공 내에서 쌍극자 배열 탐사를 실시하였다. 또한 지표에서의 탐사는 5m 간격의 쌍극자 배열 방법으로 n을 12까지 실시하여 자료를 얻었다. 시추공의 각도는 Fig. 4a에서 65경사이며, Fig. 4b에서 70°경사를 보인다. Fig. 4a의 영상은 시추공-지표 탐사에서 시추공 내에 25개 전류 전극에 대하여 지표의 32개 전위 전극에서 얻은 800개, 지표-시추공 탐사에서 지표의 35개 전류 전극에 대하여 시추공 내의 22개 전위 전극에서 얻은 770개, 공내 쌍극자 배열에서 n을 12까지 하여 얻은 198개 및 지표에서 쌍극자 배열로 114개를 측정하여 얻어진 역산 결과이다. Fig. 4b의 영상은 시추공-지표 탐사에서 시추공 내에 38개 전류 전극에 대하여 지표의 32개 전위 전극에서 얻은 1,216개, 지표-시추공 탐사에서 지표의 35개 전류 전극에 대하여 시추공 내의 35개 전위 전극에서 얻은 1,225개, 공내 쌍극자 배열에서 n을 12까지 하여 얻은 366개 및 지표에서 쌍극자 배열로 114개를 측정하여 얻

은 역산 결과이다.

일반적으로 유화광물을 포함한 광화대는 단층이나 파쇄대와 같은 연약대 지역을 따라 열수용액의 관입 형태로 존재하며 주변 모암의 접촉부에 대한 변질화 작용으로 인하여 대체로 낮은 전기비저항 분포를 보인다(Guo et al., 1999). 이러한 근거를 토대로 단면에 대한 영상들을 비교하여 보면 Fig. 4a에서 이상대는 해발고도 30m~10m 부근에 해당되며 맥상의 형태로 나타난다. 해발고도 30m 부근은 모암인 셰일 지층의 틈새를 따라 열수가 관입하여 형성된 광맥으로 셰일 지층을 분리해 놓은 형상이다. 해발고도 90m 부근의 저 비저항대는 광화대 구간이기 보다는 많은 풍화를 받아 지하수 함량의 증가 및 지질구조에 따른 연약대로 보이며, 지표로부터 해발고도 30m부근과 연결된 통로로 나타났다. Fig. 4b에서 이상대는 해발고도 50m에서 -10m까지 약 60m 깊이에 폭 넓게 나타났으며 약 170m 깊이에 있는 이상대와 연결성이 미약하게 보였다.

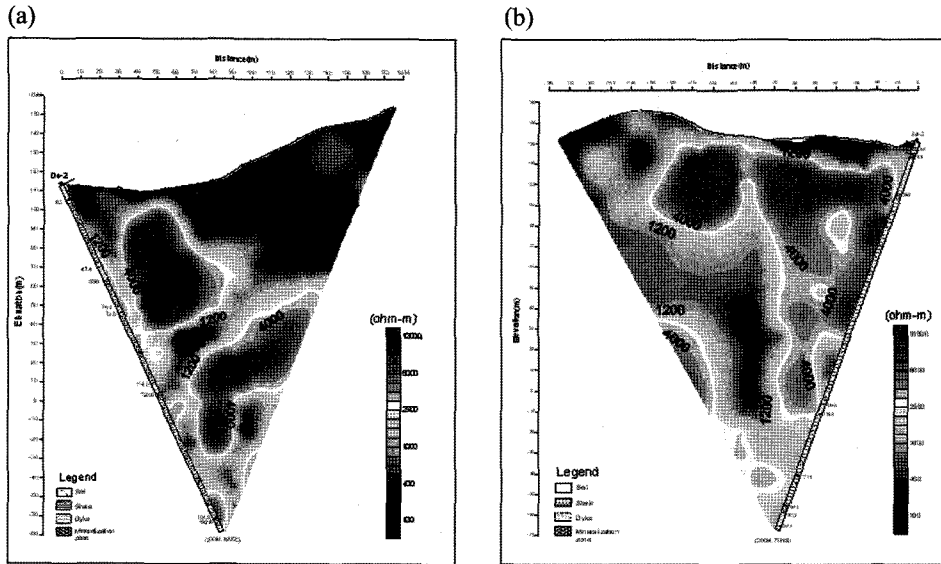


Fig. 4. Comparison between resistivity sections reconstructed from the 3D inversion and logging data for borehole.

## 토의 및 결론

전기비저항 탐사에서 3차원적 역산 해석은 험난한 산악지형에서 일정한 고도를 유지하며 곡선형으로 수행되어지는 탐사, 경사시추공에서 여러 가지 배열에 대한 탐사 및 터널 내부와 외부에 있는 전류원에 대한 지표의 전위 전극에서 측정되는 임의적 배열과 같은 다양한 탐사를 실시할 경우 이상체의 구조를 3차원적으로 조망하기 때문에 매우 효율적으로 사용되어질 수 있다.

전기비저항 탐사는 주변 모양과 찾고자 하는 대상체의 전기적 물성 변화의 차이가 크게 나타나는 지역에서 다양한 배열 방법 등을 통하여 얻은 복합적 자료를 가지고 3차원 역산방법을 이용하여 입체적인 물성 대비로 영상화된다. 3차원 역산방법은 임의적 여러 배열방법에서 전극의 위치가 절점에 일치하지 않은 경우 요소 분할을 통하여 포텐셜 값이 요소에 대한 적분형태 범함수로 풀이하여 각 절점 값들이 계산되어진다. 즉, 3차원 모형에서 요소분할 방법을 이용한 탐사는 지형기록을 갖는 지역에서 인력과 장비의 이동의 편리를 위해 곡선적 배열 탐사, 곡선과 경사시추공에서의 복합적 배열 탐사 등을 통하여 찾고자 하는 이상대를 좀더 정확하게 찾고자 하는 방법이다. 그러나 요소분할은 요소의 증가로 인하여 컴퓨터의 용량 및 계산 시간이 증가하는 단점이 있다.

노두에서 확인된 단층에 대한 탐사의 영상들은 연구영역을 3차원적 모델로 설정하여 수행하였으며, 곡선적

배열로 제시된 블록들만을 선택하여 영상화하는 기법을 사용하였다. 사례(I)에서의 영상은 축선거리 90~100m 부근에 단층이 위치한 지역으로 약 300 ohm-m 이하의 저비저항대가 거의 수직으로 보이므로 이는 노두에서 제시된 단층의 위치와 매우 정확하게 일치하는 것을 알 수 있으며 하부로 갈수록 폭이 커지는 것으로 나타났다. 또한 축선거리 180m~250m에서 나타나는 저비저항대는 지표에 많은 풍화를 받은 암석들이 하부까지 연장되었기 때문으로 보인다. 사례(II)의 영상은 이상대 위치인 축선거리 90m 부근의 심부에서 1,000 ohm-m 이하의 값을 보이며 수직적으로 발달된 것을 볼 수 있다. 또한 축선거리 150m의 계곡 부근은 저비저항대와 연결성을 보이므로 계곡의 물이 연약대를 따라 이상대 지역으로 유입되는 것으로 판단된다. 전반적으로 영상들을 비교하여 보면 전기비저항 분포는 이상대 주변에 매우 높은 값을 보이므로 주로 취성인 암석들로 되어있는 것으로 해석되어지며 그 변화 폭이 이상대를 따라 가파른 경향으로 나타난다. 경사시추공을 이용한 전기비저항 탐사는 경사시추공을 이용하여 시추공-지표탐사, 지표-시추공 탐사, 경사 시추공 내에서의 쌍극자 배열 탐사, 지표에서의 쌍극자 배열 탐사를 병행하였으며 이로부터 얻은 복합적 자료를 가지고 역산과정을 수행하였다. 영상에 대한 결과들을 비교하여 보면 이상대 구간은 전반적으로 모암인 셰일 지층을 대상으로 관입되어 있는 형상으로 모양을 갈라 놓은 영상들로 나타났다.

이러한 결과를 종합하여 볼 때, 지표에서 보여주는 지질구조선을 대상으로 하는 탐사 결과들은 주변 모양과 이상대의 전기적 물성 변화의 차이가 크게 보이므로 지표에 제시된 이상대 위치에서 동일한 주향과 폭 등을 갖고 그 하부까지 연장성을 나타냈다. 또한 경사시추공 탐사에서 복합적 자료를 이용한 전기비저항 역산 결과는 시추공에서 제시된 지질구조선 부근에서 맥상 형태의 영상들이 상부와 연결성을 보이는 영상으로 제시되었다. 이러한 영상들은 지표 및 시추자료에서 제시된 지질구조선과 거의 일치하는 결과들을 제시하고 있다. 따라서 다양한 배열에 따른 복합적 탐사를 3차원적으로 동시에 해석하는 기법을 적용한다면 보다 더 정확한 결과를 도출할 수 있다고 사료된다.

### 참 고 문 헌

- 박종오, 김희준, 송무영, 2004, 지형효과를 포함한 3차원 전기비저항 역산, 대한지질공학회지, 14, 21-28.
- 박종오, 김희준, 박충화, 2006, 단극-쌍극자 배열을 이용한 경사시추공-지표 탐사에서 전기비저항 토모그래피, 대한지질공학회지, 16, 255-263.
- 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.
- Dey, A. and Morrison, H. F., 1979, Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
- deGroot-Hedlin, C. D. and Constable, C., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- 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 explotation for gold in Gansu Province, China, *Exploration Geophysics*, 30, 76-82.
- LaBrecaue, D. J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A., and Owen, E., 1996, The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, *Geophysics*, 61, 538-548.
- Parasnis, D. S., 1973, *Mining geophysics*, Elsevier scientific publishing company, 160-168
- 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., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics*, 54, 254-262.
- Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 147-186.

---

2007년 1월 12일 원고접수, 2007년 3월 11일 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