

단극-쌍극자 배열을 이용한 경사시추공-지표 탐사에서 전기비저항 토모그래피

박종오^{1*} · 김희준² · 박충화¹

¹대전대학교 지반설계정보공학과

²부경대학교 환경탐사공학과

Resistivity Tomography in an Inclined Borehole to Surface Survey Using a Pole-dipole Array

Jong-Oh Park^{1*}, Hee-Joon Kim², and Chung-Hwa Park¹

¹Dept. of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

²Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

지표가 불규칙한 지형에서 경사시추공을 이용한 단극-쌍극자 배열 전기비저항 토모그래피 탐사를 보면, 우리는 시추공 안에 있는 전류원과 지표의 지형기복 사이의 최단거리에 위치한 전위전극에서의 극성변화, 지형기복에 따른 거리계수와 포텐셜의 변화 및 모델링에서 경사 시추공에 위치한 전극과 절점의 공간적인 불일치 등을 고려할 수 있다. 요소분할 방법은 시추공이 곡선이거나 경사져 있을 경우와 하나의 요소에 여러 개의 전극이 있을 때 각 전극에 대한 절점 좌표를 지정할 수 있기 때문에 매우 효과적인 방법이라고 본다. 시추공과 지형기복이 동일한 경사를 갖는 경우에서의 역산 결과는 매우 좋은 영상으로 나타났으며 최소자승근의 오차가 안정적으로 수렴되는 경향을 보였다.

주요어 : 경사시추공, 토모그래피 탐사, 극성변화, 요소분할, 지형기복, 최소자승근

In an electrical tomographic survey using an inclined borehole with a pole-dipole array, we must consider several factors: a singular point associated with zero potential difference, a spatial discrepancy between electrode and nodal point in a model due to an inclined borehole, and a variation of geometric factors in connection with an irregular topography. Singular points which are represented by the normal distance from current source to the ground surface can be represented by several regions due to an irregular topography of ground surface. The method of element division can be applied to the region in which the borehole is curved, inclined or the distance between the electrodes is shorter than that of nodal points, because the coordinate of each electrode cannot be assigned directly to the nodal point if several electrodes are in an element. Test on a three-dimensional (3-D) synthetic model produces good images of conductive target and shows stable convergence.

Key words : Inclined borehole, polarity, singular point, potential differences, element division

서 론

경사 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사에서 전류를 시추공에서 방사할 경우에는 수직선상으로 최단거리에 위치한 지점들에서의 전위의 극성변화, 지형기복에 따른 거리계수와 포텐셜의 변화 및 모델링에서 경

사 시추공에 위치한 전극과 절점의 공간적인 불일치를 고려하여야 할 것이다.

전위의 극성변화는 일반적으로 Jackson *et al.*(2001)에 의하면 지형이 평탄하며 균질한 모형일 경우에서 전위전극이 전류원에 수직선상의 최단거리에 위치한 지점이며 지하구조가 비균질 모형일 경우에서 전류 흐름에

*Corresponding author: jopark@dju.ac.k

대하여 3차원적으로 파악되지 않기 때문에 전기장의 벡터 성분을 이용하여 공간적 변화로 제시되어야 할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 지형기복을 갖는 균질모형에 대하여 전위의 극성 및 거리계수의 변화를 정확히 파악하고자 한다. 지형기복에 따른 거리계수의 변화는 시추공과 지형의 경사가 동일한 경우 특이해를 보이는 지점들이 많이 나타날 것이며 포텐셜 분포는 Fox *et al.*(1980)이 제시한 것과 같은 형상으로 보일 것이다.

전기비저항 탐사에서 시추공이 곡선이거나 경사져 있는 구간과 부분적으로 절점 간격보다 조밀하게 배치된 전극이 있는 구간을 고려하여 볼 때, 우리는 그 구간에 대하여 모형에서 제시된 절점 구성과 전극에 대한 기하학적 좌표의 일치가 매우 어렵기 때문에 요소의 분할 방법과 선형 형상함수를 이용하여 임의 위치에 있는 전극에 대한 포텐셜 값을 각 절점에 추정하는 내삽법으로 문제점을 해결할 수 있다. 요소분할 방법은 하나의 요소에 여러 개의 전극이 있을 때 각 전극에 대한 좌표를 지정할 수 있기 때문에 매우 효과적이다. 그러나 요소분할에 의한 절점 증가는 역산에서 해상도를 좋게 하지만 컴퓨터 용량 및 계산 시간이 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서 요소의 분할은 3차원 모형에서 전극과 절점의 위치가 일치하지 않은 구간만을 선택하여 분할하였으며 모든 방향에 대하여 임의적으로 나눌 수 있게 하였다 (박종오 등, 2006). 이러한 방법은 정확한 역산 결과물을 도출할 수 있으므로 환경문제와 같은 정밀도를 요구하는 탐사에 적합할 것으로 본다.

이론적 배경

전기비저항·탐사는 지하에 일정 전류의 흐름에 대한 쌍의 전위전극에서 측정된 포텐셜 값과 전극 배열에 관한 기하학적 거리 계수(K)를 곱하여 계산되어지며 이러한 측정 값들은 항상 양의 겹보기 전기비저항으로 나타난다. Fig. 1은 경사시추공-지표 탐사로서 전이 구간(transition zone)이 시추공 안에 있는 전류원의 수직선 상부에 해당되는 지점을 도식화한 것으로 거리계수 및 포텐셜이 특이해로 나타난다. 즉, 특이해는 식 (1)과 같이 거리 C_1P_1 과 C_1P_2 의 차이가 거의 0으로 근접하여 무한대 값을 갖는 지점이다.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_1P_2}\right)} \tag{1}$$

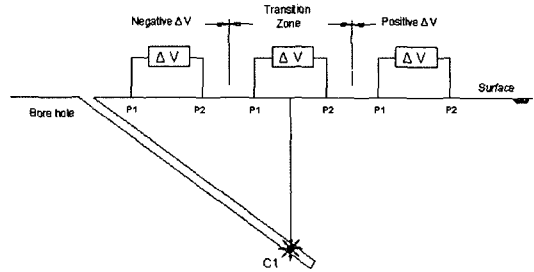


Fig. 1. Measurements of potential differences in an inclined borehole-to-surface survey. Transition zone can be defined by an region having nearly zero potential differences.

실제 탐사에서는 지하 구조가 불균질하며 또한 지형이 불규칙하기 때문에 전류 흐름에 따른 전기장의 방향을 파악할 수 없으므로 전류원에 대한 전위전극에서의 극성변화를 알 수 없다. 따라서 전류원에 대한 전위전극의 위치에 따른 극성변화는 지하에 분포하는 전도체의 크기, 위치 및 심도와 지형기복에 따라서 전기장이 어떻게 변화되는지를 파악하여야 할 것이다.

3차원 전기비저항 문제에 대한 FEM의 적용은 Pridmore *et al.*(1981)와 Yang(2002) 등에 의하여 상세히 연구되어져 왔다. 이러한 방법은 복잡한 기하학적 문제, 일반적인 경계조건 및 포텐셜 분포의 공간적 변화에 비교적 쉽게 적용되어지는 장점을 가지고 있다. 일반적으로 전기장에 대한 포텐셜의 지배 방정식은 Poisson 방정식으로 3차원 공간을 적절한 간격으로 나눈 요소에 대한 변분 적분으로 다음과 같이 제시 할 수 있다.

$$\chi = \int [\sigma(\nabla\phi)^2 - 2\phi\nabla \cdot J_s] dv \tag{2}$$

여기서 σ 는 전기전도도 (S/m), ϕ 는 포텐셜 (V), J_s 는 전류전극의 전원이다.

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 나타난다. 이러한 육면체 요소는 길고 얇은 요소 격자보다 비교적 빠른 수렴비와 정확한 결과를 얻을 수 있다(Zhou and Greenhalgh, 2001). 각 요소에 대한 포텐셜 변화는 요소의 좌표를 지형기복에 따라 변형된 값들을 포함하여 변분 적분의 일차 미분이 최소화 되도록 하는 계수 행렬 방정식의 풀이로 얻어진다. 이러한 계수 행렬 방정식은

ICCG 반복법을 이용하여 수렴한계비 이하의 오차 범위에 도달 할 때까지 반복하여 풀이되어 진다.

물리탐사에서 비선형 최소자승 역산은 측정자료와 이론 모델 반응치의 차에 대한 목적함수를 최소화하는 방식으로 얻어진다. 이러한 역산은 블록의 모델 변수벡터를 최적화하기 위하여 모델 블록의 전기비저항에 관한 측정자료의 미분법을 사용하며 가장 매끄러운 해를 구하기 위하여 최소화해야 할 목적함수는 아래와 같다.

$$U = \|W_d(J\Delta m - \Delta d)\|^2 + \lambda \|W_m L(m + \Delta m)\|^2 \quad (3)$$

여기서 $\| \|^2$ 은 유클리디안 놈(Euclidean norm), W_d 및 W_m 는 각각 자료와 모델의 가중행렬, λ 는 라그랑지 곱수, 그리고 L 은 모델 거칠기를 정량화하기 위한 유한차분 연산자이다 (Sasaki, 1989; deGroot-Hedlin and Constable, 1990). 또한 역산에서 사용되는 매개변수는 블록과 측정된 겉보기 전기비저항에 대한 상용대수를 취하여 사용된다(Rijo *et al.*, 1977). 모델변수 벡터 은 목적함수의 최소자승 해로 구해지며 일반적으로 정규 방정식 및 관측방정식의 형태로 유도되어진다. 본 연구에서는 10번의 반복 역산과정에서 5번을 이미 선정된 라그랑지 곱수에 대한 목적함수의 오차를 최소화하는 방법과 나머지 5번을 3점의 라그랑지 곱수를 변화시키면서 최적의 라그랑지 곱수를 선택하는 방법을 혼용하였다.

연구 방법

경사시추공-지표 탐사에서 지형기복의 영향은 포텐셜 분포와 거리계수의 변화에 따라 민감한 반응을 보일 것이다. 즉, 지형효과를 포함한 3차원 전기비저항 탐사에 대한 포텐셜 분포는 Fox *et al.*(1980)가 제시한 이론을 근거로 박종오 등(2004)이 전도성 이상체를 포함한 모형에서 지형의 기복을 무시할 경우 역산 결과에 대한 전기비저항 영상들이 상당히 왜곡됨을 보여주었다. 또한 거리계수에 대한 특이점은 경사시추공 내에 위치한 전류원에 대하여 지형기복과 수직인 범선거리로 제시된다 (Fig. 2). 그러나 일반적으로 지형이 평탄하며 균질한 모형일 경우 포텐셜 분포와 거리계수는 극성변화가 항상 동일한 지점에서 같은 양상으로 나타나므로 항상 양의 겉보기 전기비저항 값을 보인다. 그러나 실제 탐사에서는 측정 기기의 민감도, 지형기복에 따른 포텐셜 분포 및 거리계수에 대한 변화양상의 차이, 불균질한 지하구

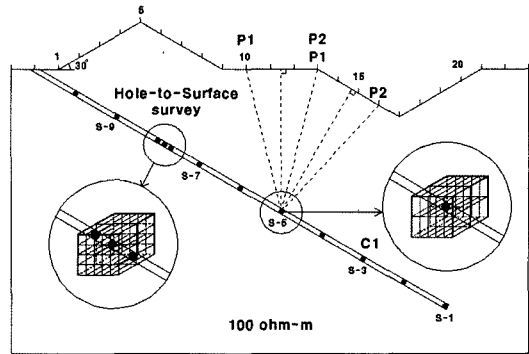


Fig. 2. Singular points, where potential differences between two potential electrodes (P1 and P2) are nearly zero, occurring on the ground surface due to a current source in an inclined borehole. A method of element division showing in the circle may be required near the source point.

조에 따른 극성변화로 인하여 항상 양의 겉보기 전기비저항을 제시 할 수 없을 것이다. 그러므로 본 연구에서는 모델에서의 수치계산 자료를 근거로 하여 지형기복에 따른 포텐셜 및 거리계수의 변화를 미리 파악하므로서 측정자료에 대한 신뢰도를 향상시키고자 한다.

전기비저항 탐사에서 전기장의 계산은 포텐셜에 대한 지배 방정식을 이용하여 지하구조에 대하여 3차원 공간을 적절한 간격으로 나눈 요소에 대한 적분형태 범함수로 유도되는 요소방정식을 풀이하여 각 절점 값을 계산한다. 즉, 임의의 절점에 위치한 전류전극에 대한 다른 절점에서 포텐셜 분포 값은 모델 해석에 있어서 매우 중요한 요소로 작용한다. 그러므로 모형에 대한 정확한 수치 해를 계산하기 위하여는 절점에 대한 전극의 위치를 정확하게 파악하여야 할 것이다. 일반적으로 절점 간격의 선정은 전체 영역을 일정 비율로 나누어진 간격으로 구분이 되며 경우에 있어서 컴퓨터 용량 및 계산 시간을 감소하기 위하여 절점의 간격을 크게 할 수 있다. 3차원 모형에서의 절점 구성은 시추공이 곡선이거나 경사져 있는 구간이거나 부분적으로 절점 간격보다 조밀하게 배치된 전극이 있는 구간에서 절점과 전극의 좌표가 정확하게 일치하지 않기 때문에 많은 문제점들을 내포한다. 즉, 절점과 전극의 좌표를 정확하게 일치하기 위하여 우리는 일반적으로 전체 영역을 많은 절점으로 나누거나 선형 형상함수를 이용한 내삽법을 통하여 해결할 수 있다(Fig. 2). 물리탐사 역산에서 요소의 크기는 Phillips *et al.*(2001)와 Oldenburg *et al.*(1998)가 광물 자원 탐사에서 이상체의 크기보다 작게 하여야 매우 정

확한 결과를 얻을 수 있지만 컴퓨터 용량의 커지며 계산 시간이 증가하기 때문에 본 연구에서 제시한 요소분할로 인한 절점 증가는 같은 맥락으로 볼 수 있다.

본 연구는 3차원 모형을 일정한 비율로 나눈 절점으로 구성된 후 전극과 절점의 위치가 일치하지 않은 구역을 선택하여 요소를 분할하는 방법으로 포텐셜을 계산하였다. 요소 분할은 일정한 크기의 요소를 x 방향으로 5등분, z 방향으로 2등분하였다. 이러한 구성체는 요소의 크기에 대한 비가 1대 5 정도가 되므로 Pridmore *et al.*(1981)이 제시한 수렴 한계비 안에 있으므로 안정된 해를 얻는데 무리가 없다고 본다. 요소 분할로 인한 비대칭 구성은 반복법에서 오차한계를 10으로 할 때 대칭적 구성보다 약 2.5배의 수렴횟수가 걸린다. 그러나 이러한 방법은 구성 모델의 전 영역을 매우 작은 절점으로 나눌 필요가 없기 때문에 결과적으로 컴퓨터의 용량 및 계산 시간의 절약을 기여 할 수 있을 것으로 본다.

경사시추공-지표 탐사에 대한 수치모델

경사시추공-지표 탐사에 대한 모델 검증은 배경 값이 100ohm-m의 균질 모형에 대하여 평탄한 지형과 지형기복이 30° 경사를 갖는 산과 계곡이 있는 경우로 분리 실시하였다 (Fig. 2). 또한 모델 영역에 대한 요소의 구성은 외곽의 경계 영역을 제외하고 요소를 일정한 비율로 나눈 경우와 모형에서 경사시추공이 있는 요소들에서 전류원과 절점의 위치가 정확하게 일치하지 않는 경우 요소 분할을 하였다. 전자의 경우는 절점의 위치가 정확하게 일치하지 않을 수 있으므로 경사 방향에 대한 점원의 좌표를 계산하여 소수점 이하를 삭제시켜 그 위치를 설정하였다. 지표에 있는 전위전극은 Fig. 2에서와 같이 시추공을 기준으로 21개의 전극을 설치하였으며 4개의 전극 간격을 전위전극으로 설정하여 각 전극마다 연속적으로 19개의 측정자료를 얻었다. 이러한 방법을 이용하여 우리는 평탄한 지형과 기복을 갖는 지형에 대한 모형 및 요소의 크기를 일정한 비율과 매우 작게 분할한 모형으로 각각 구분하여 각 전류원의 위치에 따른 포텐셜 및 거리계수에 대한 걸보기 전기비저항의 분포 양상들을 분석하였다. 측정자료에 대한 분석은 Fig. 2에서 시추공이 있는 전류원 S-1과 S-5에 대하여 각각 비교하였다.

결과에 대한 전반적인 경향을 비교하여 보면 우리는 요소의 분할에 따른 포텐셜 분포 및 거리계수의 차이가

지형기복의 영향보다 매우 작게 나타나는 것을 알 수 있으므로 특별한 경우를 제외하고 요소분할을 가급적 피하는 것이 좋다고 본다. 그러나 지형기복에 대한 전극의 분포는 Oppliger(1984)에 의하면 지형 경사에 매우 민감하게 반응하므로 항상 지형보정을 실시하여야 한다. 즉, 본 연구에서는 30°의 지형 경사에 대하여 포텐셜 및 걸보기 전기비저항의 분포가 매우 불규칙하게 변화하는 것으로 나타났다. 거리계수(K)는 경사시추공 내에 있는 전류원 C1에서 전위전극 P₁과 P₂에 대한 거리의 차이를 나타내는 것으로 실제 지형기복이 있으면 기복에 따른 거리를 포함시켜 계산하여야 한다. 지형기복에 따른 거리계수는 기준 고도를 0으로 하는 평탄한 모형에서 전위전극의 위치를 파악한 후 지형기복에 맞는 고도 값을 각 절점에 대입하여 전류원에 대한 기복을 갖는 전위전극 간의 거리를 계산하여 얻어진다.

Fig. 3과 4는 경사시추공의 최하부에 위치한 전류원 S-1과 중간 부분에 위치한 전류원 S-5에 대한 포텐셜 분포, 거리계수 및 걸보기 전기비저항 분포를 나타낸 그림이다.

평탄한 지형에서 포텐셜 분포는 Fig. 1에서 제시된 것과 같이 전류원의 직상부 위치에서 포텐셜 값과 거리계수가 음에서 양으로 전환되는 극성변화 구간이 존재하며 거리가 멀어질수록 싸인함수 형태를 보이며 거의 0으로 접근된다. 거리계수는 극성이 변하는 지점을 중심으로 쌍곡선함수 형태를 보이며 감소하다가 거리가 멀어질수록 서서히 증가하는 경향이다 (Fig. 3 and 4(b)). 걸보기 전기비저항은 전반적으로 요소의 크기에 상관없이 전류원의 직상부를 제외하고 모형에서 제시된 100ohm-m과 거의 비슷한 값을 보였다. 그러나 전류원 S-1지점은 요소를 분할한 경우가 일정한 요소인 경우보다 약 10~20% 정도 신뢰도가 떨어지게 나타났는데, 이는 요소 분할로 인하여 포텐셜 값이 작게 나타났기 때문으로 판단된다(Fig. 3(c)).

지형기복에 따른 포텐셜의 변화는 일반적으로 산 정상에서 음의 작은 값을 보였으며 산 능성을 따라 서서히 큰 값으로 변화된 반면 계곡 중심에서 상대적으로 양의 큰 값으로 나타났다(Fig. 3 and 4(a)). 즉, Fig. 3(a)에서의 포텐셜 변화는 계곡부근이 극성의 변환 지점으로 전위전극 13~15번에서 음의 값이며 17~19번에서 양의 값으로 나타났다. 계곡부근에서의 걸보기 전기비저항은 산 정상보다 큰 값의 포텐셜 분포에 대한 거리계수의 비로 나타내므로 상대적으로 큰 값으로 나타나는 것을 알 수 있다. 거리계수에서 특이점이 나타나는 위치

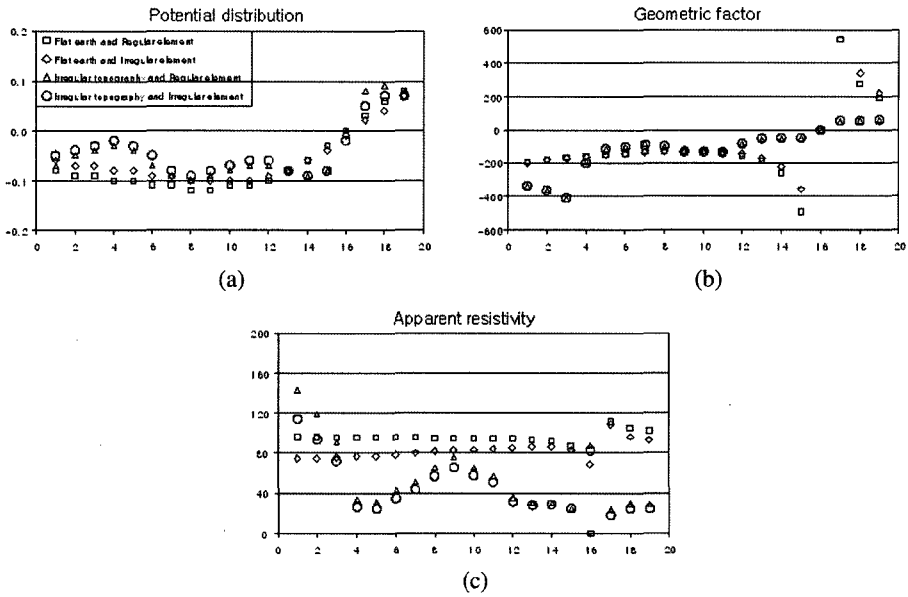


Fig. 3. Potential distribution (a), geometric factor (b), and apparent resistivity value (c) for the potential electrodes in the current source S-1 located at the lowest part of the borehole in the borehole-to-surface survey.

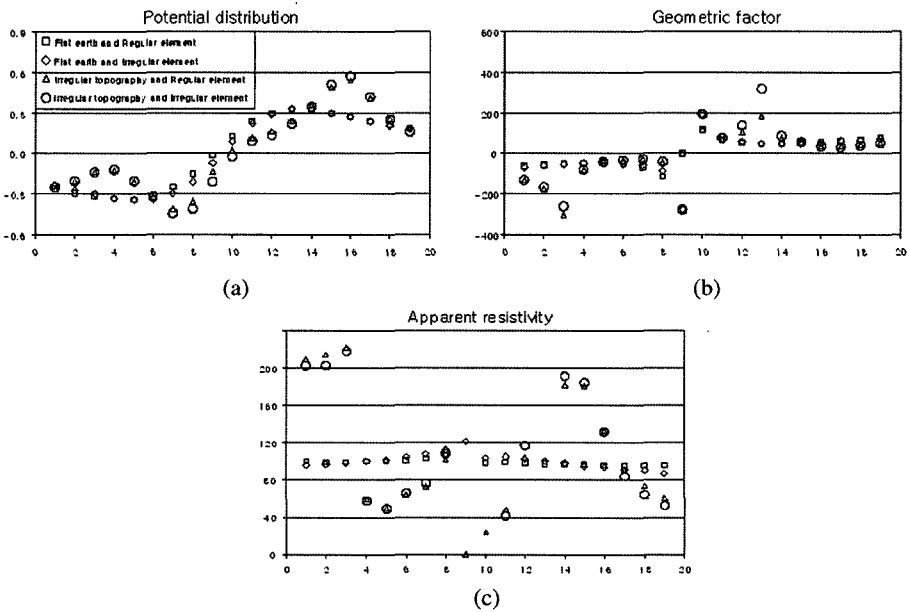


Fig. 4. Potential distribution (a), geometric factor (b), and apparent resistivity value (c) for the potential electrodes in the current source S-5 located at the middle part of the borehole in the borehole-to-surface survey.

들은 전류원에서 지표가 일직선으로 만난 범선 부분에 해당되므로 각 전류원에 대한 직상부의 지점, 산 및 계곡인 3개 지점으로 나타났다. Fig. 3 (b)에서의 특이 지

점은 전위전극 3번 위치로 산 정상상을 경계로 하고 있으며 계곡의 16번에서 직상부 지점이다. Fig. 4는 거리계수가 전위전극 9에서 특이 지점이 나타났으며 포텐셜 분

포는 산에서 등전위선이 발산하므로 전위차가 작은 반면 계곡에서 등전위선이 수렴하므로 전위차가 크게 나타났다. 지형기복에 따른 겉보기 전기비저항은 전반적으로 요소 분할에 관계없이 산 정상에서 가장 작은 값을 보였지만 산 능성을 따라 서서히 증가하면서 평지부근에 배경 값으로 수렴되어 진다. Fig. 3에서의 겉보기 전기비저항은 계곡 부근에서 특이점이 존재하는 지점으로 거리계수 값들이 작기 때문에 Fox *et al.*(1980)이 제시한 것과 같은 겉보기 전기비저항을 보이지 않았다. Fig. 4에서의 겉보기 전기비저항은 포텐셜 분포가 지형 기복의 영향에 따라 나타났지만 거리계수가 계곡 및 산 부근에서 특이점으로 변화 폭이 매우 크므로 모형에서 제시된 값과 큰 차이를 보였다. 즉, 겉보기 전기비저항에서 특이 값들은 지형기복에 따른 거리계수의 변화에 대하여 더 많은 영향이 있으며 산 경계에 위치한 전위전극 13번, 9번과 13번 위치이다.

경사시추공-지표 탐사에서 요소분할 및 지형기복에 따른 경향을 종합하여 볼 때 우리는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 특이 지점은 전류원으로부터 지표가 수직으로 만난 법선지점, 산 능성 및 계곡 부근인 3개 지점에 해당된다.

2) 겉보기 전기비저항 값은 전반적으로 포텐셜 분포와 유사하게 나타난 반면 특이 값들을 보이는 지점들은 거리계수 변화에 더 민감한 반응을 보였다. 이러한 값은 거리계수와 포텐셜 분포에 대한 극성변환의 차이로 인하여 음의 값이 계산되어 질 수 있다.

3) 경사시추공을 이용한 탐사에서 전극과 절점의 좌표가 일치하지 않는 경우를 볼 때, 우리는 요소의 분할 방법과 선형 형상함수를 이용하여 임의 위치에 있는 전극에 대하여 포텐셜 값을 각 절점에 추정하는 방법이 있다. 이러한 방법의 이용은 전극과 절점의 좌표를 정확히 일치시키므로 역산에서 향상된 해상도를 보일 것이다. 요소 분할은 하나의 요소에 여러 개의 전극이 존재할 경우 각 전극의 좌표를 절점에 지정할 수 있으므로 매우 효과적이다.

4) 각 요소에 대한 포텐셜 계산은 반복법에서 오차한계를 10으로 할 때 요소를 분할한 경우가 분할하지 않은 경우보다 수렴 횟수가 약 2.5배 많이 걸리는 단점이 있다.

3차원 역산 모형

본 연구에서 제시된 모형은 양측에 산과 계곡이 30의

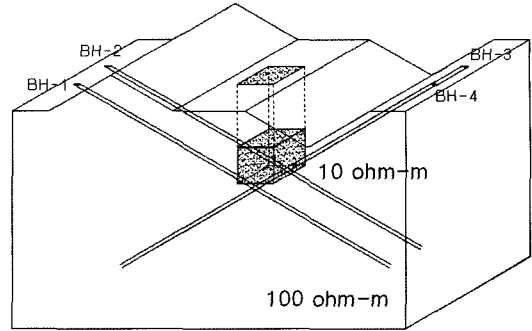


Fig. 5. 3D view of a model with irregular topography to generate synthetic data. Four inclined boreholes exist in the model and a conductive body of 10 ohm-m is located in the middle part in the 100 ohm-m background.

경사를 갖고 중앙에 평탄한 지형으로 배경치 겉보기 전기비저항이 100 ohm-m이며 중앙 하부에 10 ohm-m의 전도체가 절점 단위 2×2×2의 입방체 모양으로 구성되어 있다(Fig. 5). 이러한 모형에서 경사시추공은 모형의 양측에 지형과 동일한 경사를 보이며 각각 2개가 일직선으로 존재한다.

요소의 분할은 경사시추공이 있는 구간에 대하여 x와 z 방향의 요소를 두 개로 나누어 모형에서 전극들의 좌표를 절점에 가깝도록 하였다. 요소의 분할 방식은 분할을 너무 작게 할 경우 절점의 양이 매우 방대해져 컴퓨터의 시간 소요가 많으며 모델에 대한 수치오차가 커지기 때문에 하나의 절점에 여러 개의 전극이 존재하여 프로그램에 문제를 발생하지 않는 범위내로 요소를 양분하였다. 역산과정에서 입력자료는 우선 포텐셜이 거의 0에 가까운 값, 점원 직상부 및 지형 고도로 인하여 거리계수가 무한대로 나타나는 지점, 모형 안에 있는 이상체로 인하여 포텐셜 극성이 변화하여 겉보기 전기비저항이 음으로 나타나는 지점의 값들을 제외한 자료들이다.

역산과정은 지형효과를 포함하여 일정한 크기의 요소와 분할된 요소의 차이에 따른 전기비저항 영상을 비교하였으며 각각 3%의 오차를 포함한 자료를 가지고 수행하였다. 역산에서 블록의 선정은 모든 방향에 대하여 2개의 절점을 하나의 블록으로 하여 축선 방향으로 4개, 깊이 방향으로 6개로 하였다. 비선형 역산은 라그랑지 곱수를 변화시켜 오차가 최소화되도록 방식으로 10번의 반복 과정을 통하여 계산되었으며 배경치 전기비저항 값은 각각 수치모형에서 계산된 자료의 평균을 취하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 경사시추공-지표 탐사에서 단면 및 평면도 대한 전기비저항 영상으로 모형에서 제시된

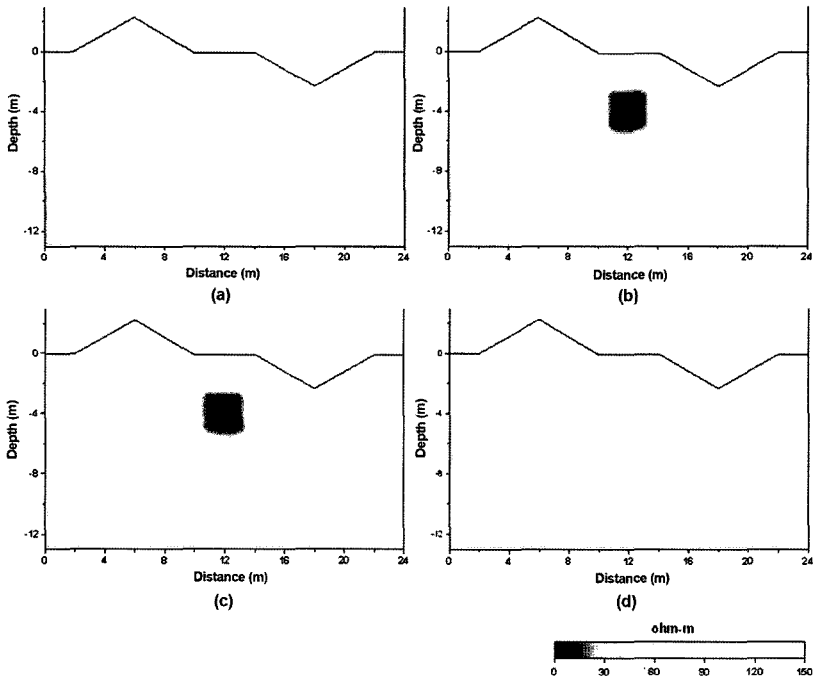


Fig. 6. Resistivity sections reconstructed from the 3D inversion in the borehole-to-surface survey. The conductive body is successively imaged in the correct position in the sections of (b) and (c). The sections (a) and (d) are images for a homogeneous 100 ohm-m in the half space.

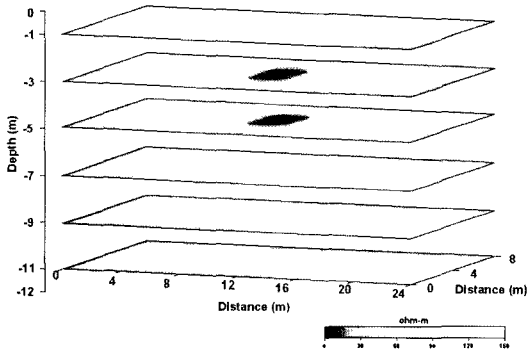


Fig. 7. Horizontal resistivity slices reconstructed from the 3D inversion including topographic effect for the 10 ohm-m conductive body model in the borehole-to-surface survey. The conductive body is successively imaged in the correct position.

10 ohm-m의 전도체가 매우 정확한 위치에 근접한 값을 보인 결과이다. 즉, Fig. 6(b), (c)에서의 영상은 전도체가 있는 위치에 약 10 ohm-m 내외의 값을 보인 반면 그 주위의 블록에 약 90~120 ohm-m의 값으로 분포하여 매우 이상적인 결과를 도출하였다. 또한 축선 1과 4

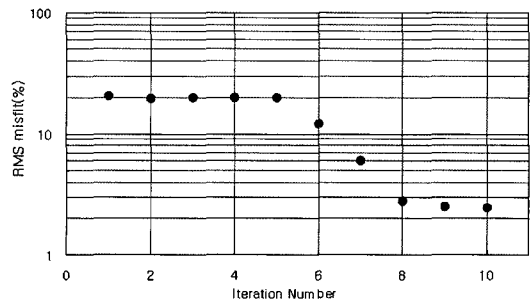


Fig. 8. Convergence during inversion in an inclined borehole-to-surface surveys. The final rms misfits are lower than 3% after eight iterations, which are close to the noise level added to the synthetic data.

(Fig. 6(a), (d))에서의 영상은 전도체가 포함되지 않은 단면으로 거의 배경치에 가까운 분포로 나타났다.

역산에서 최소자승 오차는 초기에 29%의 오차이며 10번 반복과정을 통하여 2.5%로 수렴되었다. 즉, 2.5%의 오차는 입력자료의 3% 오차를 감안하면 약간 상한 된 값이다(Fig. 8).

토의 및 결론

경사 시추공을 이용한 단극-쌍극자 배열 전기비저항 토모그래피 탐사는 일반적으로 전위전극이 전류원에 대하여 수직선 상부에 위치한 지점에서 전위의 극성변환이 나타나며 시추공이 기울어져 있기 때문에 모델에서의 절점과 시추공 내의 전극이 공간적으로 일치하지 않는 문제점이 있다. 또한 이러한 탐사 방법은 불규칙한 지형기록에 따른 거리계수의 변화에 대한 겉보기 전기비저항의 관계 등을 면밀히 검토하여야 할 것이다.

요소분할 방법은 경사시추공이 있는 구간, 시추공이 곡선으로 휘어진 구간 및 부분적으로 절점 간격보다 조밀하게 배치된 전극이 있는 구간에 적용되어지며 특히 하나의 요소에 여러 개의 전극이 존재할 경우 각 전극의 좌표를 절점에 지정할 수 있으므로 매우 효과적이다. 이러한 방법은 전극과 절점의 좌표를 정확히 일치시켜 역산결과에 향상된 해상도를 보일 것이므로 정밀도를 요구하는 환경탐사에 적합할 것으로 본다. 분할 방법은 3차원 모형에서 전극과 절점의 위치가 일치하지 않은 구간만을 선택적으로 분할되며 모든 방향에 대하여 임의적으로 나눌 수 있게 하였다. 그러나 요소분할로 인한 절점 증가는 컴퓨터 용량의 증가를 초래하며 x 방향으로 5등분과 z 방향으로 2등분 분할하면 원래의 요소보다 수렴 횟수가 약 2.5배 많이 걸리는 단점이 있다.

수치모델링에 대한 결과를 비교하여 보면 포텐셜 분포 및 거리계수는 요소의 분할의 차이에 따라서 매우 작은 변화 값으로 나타났으므로 특별한 경우를 제외하고 요소 분할을 가급적 피하는 것이 좋다. 그러나 30의 지형 경사를 갖는 모형에서 포텐셜 및 겉보기 전기비저항의 분포는 지형 기록에 따라 매우 불규칙하게 변화되는 것으로 나타났다. 평탄한 지형에서 포텐셜 분포는 전류원의 직상부 위치에서 극성 변화구간이 존재하며 이 지점에서 거리가 멀어질수록 싸인함수의 형태를 보인 반면 거리계수는 쌍곡선함수의 형태로 나타났다. 겉보기 전기비저항은 전반적으로 요소의 크기에 상관없이 전류원의 직상부를 제외하고 모형에서 제시된 100 ohm-m과 거의 비슷한 값들로 나타났다. 지형기록을 포함한 경우에서 포텐셜 분포는 전반적으로 산 정상에서 작은 값을 보인 반면 계곡 중심에서 큰 값으로 나타났다. 거리계수에서 특이점이 나타나는 위치들은 전류원에서 지표가 일직선으로 만난 법선 부분으로 각 전류원에 대한 직상부의 지점, 산 및 계곡인 3개 지점에서 나타났다. 겉보기 전기비저항은 지형이 평탄한 경우 전반적으로 극성 변

화지점을 제외하고 안정된 값들을 보인 반면 지형경사를 포함한 경우 지형 영향과 전극의 위치에 따라 매우 복잡하게 나타났으며 거리계수에 가장 민감한 영향을 보였다. 음의 겉보기 전기비저항은 지하 매질의 불균질성도 있지만 전위전극에서 측정된 포텐셜과 거리계수의 극성이 일치하지 않는 지점으로 역산과정에서 제외시켰다.

경사시추공-지표 탐사에 대한 전기비저항 영상은 모형에서 제시된 10ohm-m의 전도체가 정확한 위치에서 매우 근접된 값으로 나타났으며 그 주변 블록은 배경치와 가까운 값들로 분포되어 이상적인 결과를 도출하였다. 또한 전도체가 포함되지 않은 단면들은 거의 배경치 값에 가까운 분포로 나타났다. 역산에서 최소자승 오차는 지표-경사시추공 탐사에서 초기에 29%의 오차가 10번 반복과정을 통하여 2.5%로 수렴하였다. 이러한 오차는 입력자료의 3% 오차를 감안하면 약간 상향된 값이다.

참고 문헌

- 박종오, 김희준, 송무영, 2004, 지형효과를 포함한 3차원 전기비저항 역산, 대한지질공학회지, 14, pp.21-28.
- 박종오, 김희준, 박충화, 2006, 경사시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피, 2006년도 학술발표회 논문집, 대한지질공학회, pp.145-153.
- deGroot-Hedlin, C. D. and Constable, C., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, pp.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, pp.75-93.
- Jackson, P. D., Earl, S. J., and Reece, G. J., 2001, 3D resistivity inversion using 2D measurements of the electric field, *Geophysical Prospecting*, 49, pp.26-39.
- Oldenburg, D. W., Li, Y., and Farquharson, C. G., Kowalczyk, P., Aravanis, T., King, A., Zhang, P., and Watts, A., 1998, Applications of geophysical inversions in mineral exploration, *The Leading Edge*, 17, pp.461-465.
- Oppliger, G. L., 1984, Three-dimensional terrain corrections for mise-a-la-masse and magnetometric resistivity surveys, *Geophysics*, 49, pp.1718-1729.
- Phillips, N., Oldenburg, D., Chen, J., Li, Y., and Routh, P., 2001, Cost effectiveness of geophysical inversions in mineral exploration: Applications at San Nicolas, *The Leading Edges*, pp.1351-1360.
- Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H., and Sil, W. R., 1981, An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions, *Geophysics*, 46, pp.1009-1024.
- 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, pp.995-1005.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics*, 54, pp.254-262.
- Yang, J. S., 2002, Three-dimensional complex resistivity analysis for clay characterization in hydrogeologic study, Ph. D dissertation, Univ. of California, Berkeley.
- Zhou, B., and Greenhalgh, S.A., 2001, Finite element three-dimensional direct current modeling: accuracy and efficiency considerations, *Geophys. J. Int.*, 145, pp.679-688.

2006년 7월 3일 원고접수, 2006년 9월 7일 게재승인

박종오

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

김희준

부경대학교 환경탐사공학과
608-737, 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6231
E-mail: hejkim@pknu.ac.kr

박충화

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