

지형효과를 포함한 3차원 전기비저항 역산

박종오^{*1)}, 김희준²⁾, 송무영³⁾

¹⁾대전대학교 지구시스템공학과, ²⁾부경대학교 환경탐사공학과, ³⁾충남대학교 지구환경과학과

Three-dimensional Resistivity Inversion Including Topographic Effect

Jong-Oh Park^{*1)} · Hee-Joon Kim²⁾ · Moo-Young Song³⁾

¹⁾Daejeon University, Dept. of Geosystem Engineering

²⁾Pukyong National University, Dept. of Environmental Exploration Engineering

³⁾Chungnam National University, Dept. of Earth and Environmental Sciences

지형효과를 포함하는 3차원 전기비저항 역산법은 전기비저항 탐사자료의 해석에 있어서 실제 지하구조에 존재하는 3차원 전도성 이상체의 특성을 파악함으로써 원리적으로 정확한 영상을 획득할 수 있는 방법이라고 본다. 본 연구는 수치모델링에서 유한요소법을 이용하였으며, 역산에서 설정된 블록에 대하여 감도 분석을 통하여 자코비안 계산의 효율성을 극대화 하였다. 또한 역산과정에서는 라그랑지 곱수의 값을 변화시키면서 최소자승근 오차의 최소가 되는 최적의 값을 선택하는 방법으로 역산의 분해능을 향상 시켰다. 전기비저항 탐사에서 지형 효과의 해석으로는 지형의 기복을 포함하여 얻어진 순차모델링 자료를 가지고 역산 방법에서 지형의 기복을 무시하여 얻어진 결과와 지형의 기복을 포함하여 얻어진 결과를 비교하여 불규칙한 지형효과에 의한 왜곡된 전기장 반응으로 인한 오해석을 파악하는데 있다.

주요어: 3차원 전기비저항 역산, 지형효과, 자코비안, 최소자승근 오차, 라그랑지 곱수.

Three-dimensional (3-D) resistivity inversion including a topographic effect can be considered theoretically to be the technique of acquiring the most accurate image in the interpretation of resistivity data, because it includes characteristic image that the actual subsurface structure is 3-D. In this study, a finite-element method was used as the numerical method in modeling, and the efficiency of Jacobian calculation has been maximized with sensitivity analysis for the destination block in inversion process. Also, during the iterative inversion, the resolution of inversion can be improved with the method of selecting the optimal value of Lagrange multiplier yielding minimum RMS(root mean square) error in the parabolic equation. In this paper, we present synthetic examples to compare the difference between the case which has the topographic effect and the other case which has not the effect in the inversion process.

Key Words : 3-D resistivity inversion, topographic effect, Jacobian, RMS error, Lagrange multiplies.

* Corresponding author: jopark@dju.ac.kr

서 론

전기비저항 탐사는 국내에서 지반조사를 포함한 지질구조 파악에 주로 사용되는 방법으로 토목공사, 지반침하 및 환경 분야에서 다양하게 사용되어지고 있다. 그러므로 전기비저항 탐사에서는 실제 지하구조에 존재하는 3차원 전도성 이상체에 대한 정확한 해석이 필수적이다. 국내에서 3차원 전기비저항 해석으로는 ACB(Active Constraint Balancing)법을 이용하여 역산의 안정성 및 분해능을 향상시켜 정확한 지하구조의 영상을 획득할 수 있는 알고리즘의 개발(이명종 등, 1999; Yi et al., 2001)로 인하여 실제 탐사에 적용성 및 지하구조 파악에 정확성을 보여왔다. 이러한 기술의 적용은 석회암 지역에서 공동과 교량부지에 대한 지하구조 영상화 및 퇴적암 지층에서 오수처분장의 위치선정 등의 다양한 분야에 사용되어 왔다(Yi, et al, 2002). 실제 탐사에서는 불규칙한 지형에 대하여 수행 되어졌지만, 이를 평탄한 지형에서의 겉보기 비저항으로 해석함으로써 오해석의 원인이 되어진다. 그러므로 지형 효과의 제거는 공기층을 포함한 전체 영역에 대하여 유한요소로 나눈 후 지층과 대기의 전기비저항 대비를 크게 하여 지형에 의한 왜곡된 겉보기비저항 값의 보정(Fox et al., 1980), 지형자체를 역산에 포함하여 2차원적으로 해석(Tong and Yang, 1990), 지형 기록에 따라 격자시스템을 변형하여 3차원적으로 해석하는 방법(Holcombe and Jiracek, 1984; 이명종 등, 1999) 등이 있다.

3차원 역산은 측정자료와 계산된 자료의 오차를 최소화하는 방식으로 이루어진다. 이 때 모델의 반응변수벡터를 모델 변수인 전기전도도로 편미분한 값을 구하는 Jacobian 계산이 필요하다. 지구물리 역산은 대부분 불안정성을 가지며, 초기 모델 변수벡터에 민감한 영향을 보이므로 해를 풀이하는데 있어서 제한을 가하게 된다. 이러한 제한자는 역산과정에서 측정자료에 대한 분해능 및 안정성을 고려하여 광범위하게 적용되어 왔으며, 모델 변수벡터가 가능한 실제 해에 가장 가까운 값으로 접근하도록 하는 것이다(Constable et al., 1987; deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1994).

본 연구에서는 수치적 모델링에서 유한요소법을 이용하였다. 지형효과를 포함하여 구성된 요소들은 육면체를 5개의 사면체로 분할하여 각 절점에 대한 미지함수인 포텐셜값을 계산하도록 하였다. 지형 효과에 대한 해석은 지형 기록을 포함한 이론 자료를 가지고 역

산과정에서 균질모형에 대한 지형기록을 무시한 효과, 전도성 이상체를 포함한 모형에서 지형 기록을 무시한 효과 및 지형 기록을 포함한 효과를 비교하여 지형에 의한 전기비저항의 왜곡된 영상들을 파악하여 보았다. 역산 방법은 선정된 3점의 라그랑지 곱수들에 대한 최소자승근 오차를 2차 포물선 방정식에 이용하여 오차가 최소로 되는 최적의 라그랑지 곱수를 찾는 방식으로 하였다. 또한 본 연구에서는 역산과정에서 모델변수 갱신이 너무 지나치게 이루어지지 않도록 제한하는 방법을 사용하였다.

이론적 고찰

전기비저항 모델링

3차원 공간내의 점진원 (x_s, y_s, z_s)에 의한 지하 매질내의 임의 위치 (x, y, z) 에서 전위분포를 나타내는 포아송 방정식은 다음과 같이 표현되어진다(Dey and Morrison, 1979).

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 전하밀도이며, δ 는 Dirac delta 함수이다. 식 (1)을 그린 정리(Green's theorem)로 이용하여 3차원 영역에서의 면적분 값은 포텐셜 $\phi(x, y, z)$ 이 연속적이어야 한다. 그러므로 경계 조건에서 지표의 경우에는 Neumann 조건에 의하여 포텐셜의 직교 미분이 0이 되며, 무한거리의 인위적인 경계면은 혼합경계조건(mixed boundary condition)으로 설정하였다. 3차원 전기비저항 모델링에서는 각 절점을 (i, j, k)로 하였을 때 각 육면체의 구성 요소를 5개의 사면체로 분할 하였다(Fig. 1).

이러한 모델링에서 사용한 유한요소법은 전체 유한요소 영역에 대하여 기저함수를 이용하여 식 (1)에 대한 해로 풀이된다(Coggon, 1971; Pridmore, et al., 1981). 그러므로 각 요소에 대한 포텐셜의 변화는 최소화 되어져야 하므로 기저함수를 미분으로 취하여 이를 0으로 하여 선형 연립방정식에 대한 행렬 형태로 제시된다. 이러한 행렬방정식은 지배방정식에 대한 블록의 형상과 전기전도도의 함수로 나타난다. 행렬 방정식의 해법은 3차원의 경우 직접법보다 컴퓨터 용량이 작게 필요로 하는 반복법이 유리하므로 그 중에서 비교적 수렴속도가 빠른 ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient; Dey and Morrison, 1979)법으로

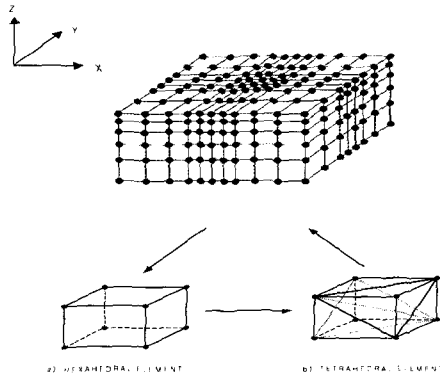


Fig. 1. A 3D mesh assembled from hexahedral elements. A hexahedral element (a) is assembled from five tetrahedrons (b).

하였다.

비선형 역산에서 필요한 Jacobian의 계산은 모델의 반응벡터를 모델 변수인 전기전도도로 편미분한 값을 구하는 가장 중요한 단계이다. 행렬방정식에서 제시하는 전원은 모델 변수에는 무관하므로 유한요소 방정식을 역산 블록의 비저항에 관하여 미분을 취하여 다음과 같이 쓸 수 있다 (Tripp et al., 1984; 김정호 등, 1989).

$$K \frac{\partial \phi}{\partial \rho(i, j, k)} = - \frac{\partial K}{\partial \rho(i, j, k)} \phi \quad (2)$$

식 (2)의 좌측항 $\frac{\partial \phi}{\partial \rho(i, j, k)}$ 은 수진위치에서 전 원항에 대한 블록 (i, j, k) 의 포텐셜에 해당되며, 우측항은 블록 (i, j, k) 에서 존재하는 가상전원 (virtual source)들이다. 상반성 원리(reciprocity principle)를 이용하면 이는 수진위치에 가상전원이 존재한다는 가정 하에 각 절점에서의 포텐셜 값을 중첩하여 계산하는 것과 동일하다. 결국 실제 전원과 수진위치에서의 가상전원에 관한 모든 절점에서 포텐셜이 한번에 계산하고 이러한 포텐셜이 모델변수에 대한 편미분으로 저장한다.

최소자승역산

비선형 최소자승 역산은 측정자료와 이론모델 반응치의 차에 대한 목적함수를 최소화하는 방식으로 얻어지며, 전기전도도로 구성된 블록의 모델 변수벡터를 최적화하기 위하여 모델 블록의 전기비저항에 관

한 측정자료의 미분법을 사용한다. 즉, i 차 쌍극자 배열의 전류전극과 전위전극에 대한 모델링 반응값 $\rho_a(i, m)$ 은 비선형 벡터함수로 초기 모델 변수벡터 m^0 에 접근한 모델 변수벡터 m 에 대한 응답을 Taylor 급수로 전개하여 그 중에서 1차 항까지 이용하여 선형화하면 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$\rho_a(i, m) = \rho_a(i, m^0) + \sum_k \frac{\partial \rho_a(i, m)}{\partial m_k} \Big|_{m=m^0} (m_k - m_k^0) \quad (3)$$

상기 방정식은 초기 모델 변수벡터 m^0 에 관하여 $\rho_a(i, m)$ 를 측정자료 d 로 바꾸어 잔여차 $\delta \rho_a (= d - \rho_a(i, m^0))$ 와 미지 함수인 모델 변수벡터 $\delta m (= m - m^0)$ 이다. 이러한 모델의 매개 변수화는 일반적으로 모델을 일정한 전기비저항을 갖는 블록들로 나누어져야 한다(deGroot-Hedlin and Constable, 1990). 측정된 겐보기비저항과 모델의 겐보기비저항은 일반적으로 전기비저항 탐사에 있어서 항상 양의 수로 제시되므로 상용대수를 취하여 사용한다(Rijo et al., 1977). 역산에서 안정된 해를 구하기 위하여는 측정자료의 오차와 모델 증분벡터가 수렴할 수 있도록 구하고자 하는 해에 제한을 가한다. 그러므로 모델 변수벡터 δm 은 목적함수를 최소자승 해로 구할 수 있으며 다음과 같이 관측방정식의 행렬 형태로 풀이할 수 있다.

$$\begin{vmatrix} A & \delta \rho_a \\ \sqrt{\lambda} C & -\sqrt{\lambda} C m^k \\ \sqrt{w \lambda} I & 0 \end{vmatrix} \delta m = \begin{vmatrix} \delta \rho_a \\ -\sqrt{\lambda} C m^k \\ 0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

여기서 A 는 Jacobian 행렬로서 모델의 반응벡터에 대한 모델 변수벡터의 편미분 행렬, λ 는 라그랑지 곱수, w 는 가중치, C 는 블록에 대한 평활화 제한 값이다(Sasaki, 1994).

목적함수의 최소화에서 가중치 λ 는 반복적 비선형 역산에서 안정성을 도모하기 위한 것이며, 가중치가 너무 크면 $A^T A$ 의 고유치 항이 상대적으로 적게 나타나며 역산의 안정성을 극대화 할 수 있으나 분해능이 떨어지게 되는 반면 가중치가 너무 작으면 $A^T A$ 의 고유치 항이 상대적으로 크게 나타나며 역산의 안정성에 치명적인 결과를 초래하므로 적당한 값을 선택할 필요가 있다. 그리고 Marquardt 제한자는 초기

모델의 변수벡터에 대한 갱신된 모델 변수벡터 δm_0 가 0이 되면서 식 (4)의 우변항이 0이 되고 좌변항에 $\sqrt{\omega\lambda}$ 을 대각선 행렬에 곱하여 계산이 이루어진다. 이러한 목적함수의 최소화는 측정자료에 대한 모델 변수벡터의 오차가 허용 수준이 될 때까지 반복 수행하여 얻어진다.

라그랑지 곱수 (Lagrange Multiplier)

지구물리 역산은 대부분의 경우 불안정성을 내포하고 있으므로 이와 같은 점을 개선하고자 라그랑지 곱수를 사용하여 역산에 의하여 계산되는 해에 제한을 가하고자 한다. 제한 조건의 부가 정도는 라그랑지 곱수의 크기로 정의되며, 많은 경우 최적의 라그랑지 곱수의 값을 정하는 것이 역산의 분해능을 좌우하는 요소로서 작용한다. 즉, 라그랑지 곱수는 블록의 크기와 유사하게 영상의 평활함을 조절하는 계수로 역산의 안정성 및 분해능을 좌우하는 요소이다. 큰 값의 라그랑지 곱수는 역산의 안정성을 기대할 수 있으나 분해능을 저하시키며, 작은 값의 라그랑지 곱수는 역산의 안정성에 좋지 않은 결과를 초래할 가능성이 있다. 그러므로 안정성과 분해능을 고려한 적절한 라그랑지 곱수의 값이 필요하다. Yi et al.(2001)은 역산의 분해능 향상을 위하여 감도의 정도에 따라 각 모델 변수에 서로 다른 라그랑지 곱수를 곱하는 ACB(Active Constraint Balancing)방법으로 접근하여 역산의 안정성 및 분해능을 향상하였다.

본 연구에서는 Constable et al.(1987)이 제시한 바와 같이 역산과정에 있어서 각 반복횟수 마다 라그랑지 곱수의 값을 변화 시키면서 최소자승근 오차가 가장 적은 최적의 라그랑지 곱수를 선택하여 역산의 분해능을 향상시키는 방법으로 제안하였다. 최적의 라그랑지 곱수는 로그 공간 내에서 일정 비율의 간격을 가진 3점의 라그랑지 곱수에 대한 최소자승근 오차를 2차 포물선 방정식으로 이용하여 오차의 최소값으로 나타나는 지점의 값이다(Fig. 2).

$$x_* = \frac{y_1(x_2^2 - x_3^2) - y_2(x_1^2 - x_2^2)}{2[y_1(x_2 - x_3) - y_2(x_1 - x_2)]} \quad (5)$$

여기서 $x_* = \log(\lambda_*)$, $x_1 = \log(\lambda_1)$,

$$x_2 = \log(\lambda_2), \quad x_3 = \log(\lambda_3)$$

$$y_1 = \log\left(\frac{rms_1}{rms_2}\right),$$

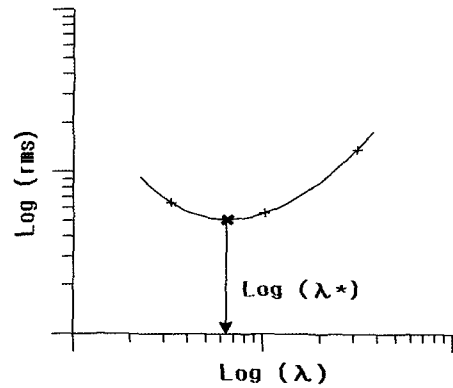


Fig. 2. The optimal Lagrange multiplier λ_* yielding the smallest rms value, which is evaluated from three Lagrange multipliers of λ_1 , λ_2 , and λ_3 in the parabolic equation.

$$y_2 = \log\left(\frac{rms_2}{rms_3}\right)$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: 선정된 라그랑지 곱수

λ_* : 최소자승근 오차가 최소인 라그랑지 곱수

rms_1, rms_2, rms_3 : $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 대한 오차

지형효과를 포함한 3차원 비저항 모델링

실제 탐사에 있어서는 불규칙한 지형에서 탐사를 수행하였지만, 이를 평탄한 지형으로 가정하여 해석하므로 지형효과에 의한 왜곡된 전기장의 반응으로 오해석을 하기 쉽다. 불규칙한 지형을 가진 균질한 대지 표면에서 전류전극에 대한 등전위선의 형상을 보면 산 정상부에서는 등전위선이 발산하는 형상을 보이므로 전위차가 낮아져 겉보기 비저항이 낮게 나타나는 반면, 계곡에서는 등전위선이 수렴하므로 겉보기 비저항이 높게 나올 것이다(Fox et al., 1980). 그러므로 불규칙한 지형에 대한 효과를 포함한 해석은 지형기복에 따라 유한요소의 격자 망을 변형하는 방식으로 하였다.

본 연구에는 지표가 불규칙한 지형을 가진 3차원 모델을 $77 \times 57 \times 30 (=131,670)$ 개의 유한요소 절점들로 구성하였다. 모델에서의 측정 방법은 쌍극자 배열의 측선 수를 6개, 각 측선에 대한 전극 개수를 16개로 전체

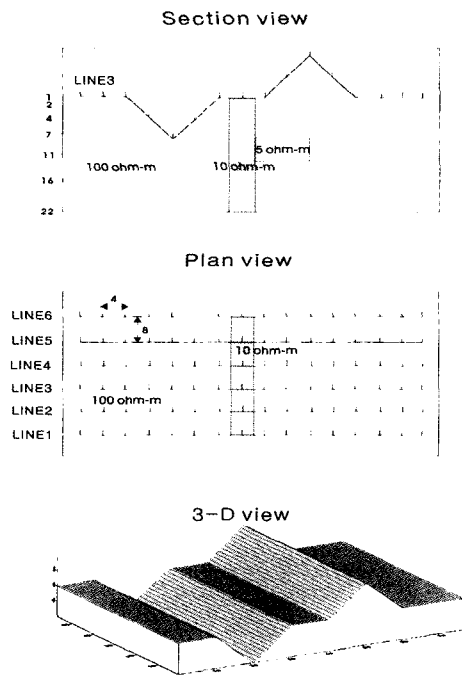


Fig. 3. Plan, section, and 3-D views of a model to generate synthetic data for investigating the effect of irregular topography. A 3-D body of 5 ohm-m and a 10 ohm-m dyke exist in the middle part of the model.

96개의 전극으로 각 측선마다 n 을 10까지로 하였다. 또한 각 측선의 간격은 8개의 절점 간격으로 동일하게 배열하였으며, 각 전극 간격이 4의 절점 간격으로 하여 각 측선마다 64개의 절점을 이용하였다. 불규칙한 지형에서는 y 방향으로 주향을 갖는 계곡과 산 능선 부분으로 나누어져 있으며 x 방향의 절점 1에 대하여 높이 방향의 절점을 1로 하여 45°의 경사도를 갖는 지형이다(Fig. 3). 자료 획득으로는 3차원 유한요소법을 이용한 모델링에서 전체 6개 측선에서 570개의 겹보기 비저항 자료를 얻었다. 모델 블록은 x, y 방향에 대하여 4개의 절점을 한 개의 블록으로 하여 전체 $16 \times 11 (=176)$ 개로 나누었으며, z 방향에 대하여 6개 블록으로 감도가 큰 천부의 경우에 역산 블록의 크기를 작게 설정하였으며 감도의 정도가 낮은 심부의 경우에 블록의 크기를 크게 하였다.

모델 블록은 Fig. 3에서 제시하는 모형으로 배경치가 100 ohm-m의 균질한 전기비저항을 갖는 모형에 대하여 5 ohm-m와 y 방향으로 주향을 갖는 10 ohm-m의

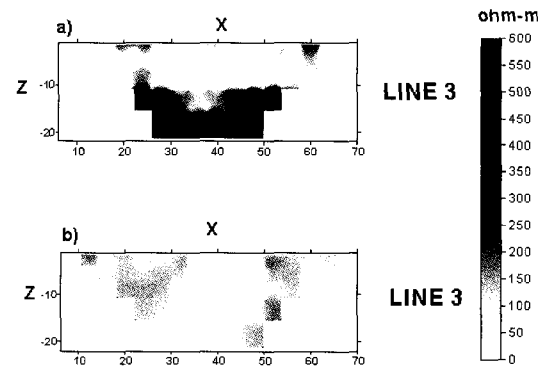


Fig. 4. Relationship between the case which has not the topographic effect (a) and the other case which has the effect (b) with Marquardt constraint along lines 3. Resistivity sections is reconstructed from the 3-D inversion.

전도성 블록들로 구성된다. 이러한 모델 블록에 대하여 역산에서는 전기비저항 블록을 $16 \times 11 \times 6 (=1,056)$ 개로 나누었으며, 200 ohm-m의 전기비저항 값을 초기 모델에 이용 하였다. Sasaki(1992)는 라그랑지 곱수들의 변화에 대한 rms 잔여의 변화를 파악한 바, 최적의 라그랑지 값에 대한 선택의 중요함을 제시 하였다. 모델 보정의 크기와 평활함을 조절하는 Marquardt 제한자의 가중치는 0.1로 하였다. 이러한 가중치는 대각선행렬에 곱하여져 계산이 된다. 또한 제한자는 역산과정에서 모델변수 갱신이 너무 지나치게 이루어지지 않도록 제한하는 방법으로 실제 탐사자료의 겹보기비저항 대비가 클 경우 제한을 가하게 된다. Kim et al.(1999)은 실제 지하 정보에 대하여 신뢰할 수 있는 두 경계 값을 이용하여 모델변수를 제한하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 모델변수 갱신이 너무 지나치게 이루어지지 않도록 제한을 하였다.

Fig. 4는 10 ohm-m와 5 ohm-m의 전도성 이상체에 대하여 지형의 기복을 포함한 모델의 이론자료를 가지고 역산과정에서 지형의 기복을 무시한 결과(a)와 지형의 기복을 포함한 결과(b)의 단면도이다. Fig. 4 (a)는 전체적인 전기비저항의 영상들이 전도성 이상체를 포함하여 상당히 왜곡되어 나타나고 있으며 계곡부근에서 높은 전기비저항이 보이는 반면 산 정상부에서 낮은 전기비저항이 분포되어 보인다. 특히 계곡의 경사부근에서는 낮은 전기비저항의 분포로 인하여 전도성 이상체가 존재하는 것으로 보인다. Fig. 4 (b)는 10 ohm-m의 암맥과 하부에 존재하는 5 ohm-m의 전도성 이상체에 대한 단면도로서 대체적으로 영상이 잘 반영

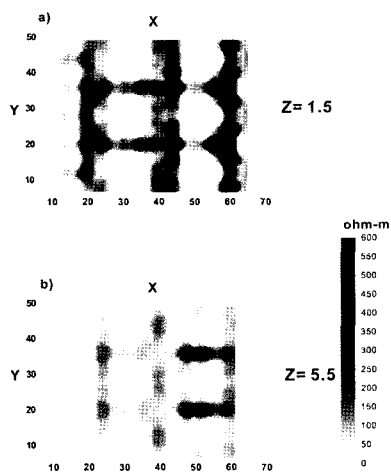


Fig. 5. Resistivity planes reconstructed from the 3-D inversion excluding topographic effect for 100 ohm-m homogeneous model with Marquardt constraint in depths of 1.5 (a) and 5.5 (b).

되고 있다. 그러나 수직으로 심부까지 발달하고 있는 10 ohm-m의 전도성 이상체의 영상은 전반적으로 천부에서 분해능이 높아 뚜렷하게 보이는 반면 심부로 들어갈수록 분해능이 비교적 낮아 희미한 영상으로 보인다.

전기비저항 탐사에 있어서 지형 효과에 대한 해석은 지형 기복을 포함한 이론 자료를 가지고 역산과정에서 균질모형에 대한 지형기복을 무시한 효과, 전도성 이상체를 포함한 모형에서 지형 기복을 무시한 효과 및 지형 기복을 포함한 효과를 비교하여 지형에 의한 전기비저항의 왜곡된 영상들을 파악하여 보았다.

Fig. 5는 100 ohm-m의 균질모형에 대하여 지형 기복을 포함한 모형의 이론자료를 가지고 역산과정에서 지형 기복을 무시한 결과에 대한 평면도로 불규칙한 지형의 기복에 따른 전기비저항 영상들로 나타난다. Fig. 5 (a)는 천부에 대한 영상으로 계곡부근에서 높은 전기비저항이 y 방향으로 일직선의 띠모양을 보이고 있으나, 계곡의 경사부근에서 낮은 전기비저항이 같은 방향으로 나타난다. 또한 산 정상부근에서는 낮은 전기비저항의 이상체가 있는 것으로 나타나다가 산 능성으로 내려가면서 높은 전기비저항의 영상이 있는 것으로 보인다. Fig. 5 (b)의 영상은 하부에 대한 영상으로

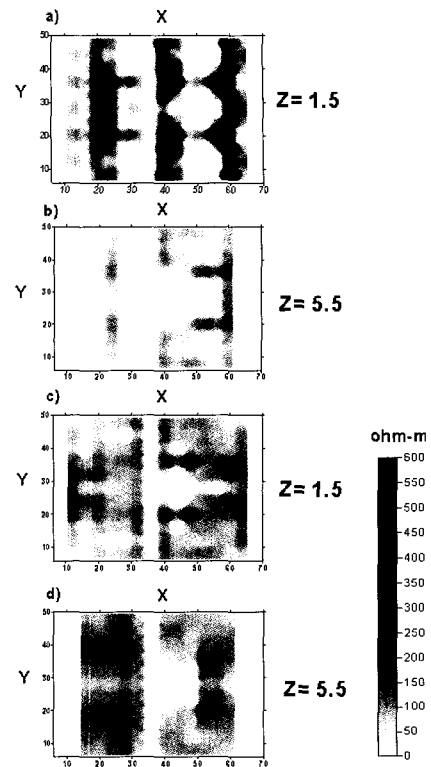


Fig. 6. Relationship between the case which has not the topographic effect (a),(b) and the other case which has the effect (c),(d) with Marquardt constraint in depths 1.5 and 5.5. Resistivity planes is reconstructed from the 3-D inversion.

천부보다 지형 기복에 의한 영향이 적게 나타나는데 이는 지형 기복에 따라 유한요소의 격자가 변형하는 방식으로 계산되므로 하부로 갈수록 지형의 영향이 적게 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 10 ohm-m와 5 ohm-m의 전도성 이상체에 대하여 지형의 기복을 포함하여 얻어진 이론자료를 역산과정에서 지형 기복을 무시한 결과 (a), (b)와 지형 기복을 포함한 결과 (c), (d)의 평면도이다. Fig. 6 (a)는 10 ohm-m의 전도성 이상체 영상이 중앙부에 낮은 전기비저항으로 나타나며 Fig. 5 (a)에서 제시되는 지형 기복에 의한 영상들과 포함되어 보인다. Fig. 6 (b)의 영상은 5 ohm-m의 전도성 이상체가 다소 크게 보이며 중앙부에 y 방향의 주향으로 낮은 전기비저항이 지형의 영향으로 넓게 분포하며 전도성 이상체의 영향으로

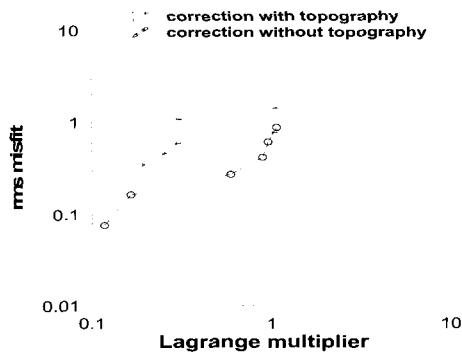


Fig. 7. Convergence during inversion with and without topographic effect. Including the topographic effect in the inversion process is quite effective for attaining a lower rms misfit.

Fig. 5 (b)와 다소 상이한 영상으로 나타났다. Fig. 6 (c)는 천부에서 나타나는 전기비저항 영상으로서 10 ohm-m의 이상체 분포가 뚜렷하게 보이나, 축선이 설정되지 않은 블록에서 대칭 형태의 이상체가 약간 분포되어 있는 것으로 나타났다. Fig. 6 (d)는 10 ohm-m와 5 ohm-m 전도성 이상체를 제시하는 평면도로 대체적으로 정확한 영상들을 보이고 있다. 이러한 지형 효과를 포함하여 얻어진 결과를 보면 3차원 이상체의 영상이 정확하게 보이고 있으며 왜곡된 형상을 거의 보이지 않고 있다. 그러므로 3차원 전기비저항 역산에서는 지형의 기복에 대하여 고려를 하지 않는 경우에 잘못된 해석이 가능하며 정확한 지하구조의 영상을 획득하기 어렵다.

Fig. 7은 지형효과를 무시한 결과와 포함한 경우의 반복과정마다 얻어진 최적의 라그랑지 곱수에 대한 최소자승근 오차의 관계를 나타내고 있다. 6번의 반복 역산과정에서 얻은 라그랑지 곱수에 대한 최소자승근 오차의 관계는 지형효과를 포함한 경우에서 7.6%, 지형효과를 무시한 경우에서 34.4%를 나타냈다. 즉, 역산과정에서 지형 효과를 포함한 경우는 지형 효과를 무시한 경우 보다 최소자승근 오차가 훨씬 적게 나타났으며, 또한 신속하게 수렴하는 것을 알 수 있다.

토의 및 결론

비선형 최소자승 역산은 측정자료와 이론모델 반응치의 차에 대한 목적함수를 최소화하는 방식으로 수행

되며 각 반복과정마다 일정 비율을 가진 3점의 라그랑지 곱수의 값들을 2차 포물선 방정식을 이용하여 오차의 잔차가 최소가 되는 최적의 라그랑지 곱수를 선택하는 방식이다. 이러한 방식은 각 반복과정에서 이용되는 많은 점들의 라그랑지 곱수를 3점으로 한정하였으며 일정 비율로 나뉘어서 선정된 라그랑지 곱수로부터 모델변수에 적합한 최적의 라그랑지 곱수를 직관이 아닌 계산으로 풀이되므로 역산의 분해능이 향상 될 것으로 본다. 그러나 각 반복 역산과정마다 라그랑지 곱수를 변화하는 방법은 방대한 계산시간을 요할 것으로 보인다. 이러한 문제점의 해결 방법으로는 처음의 반복 역산과정에서 3점의 라그랑지 곱수 중에 제일 큰 값을 고정하여 역산을 수행하여 오차의 잔차를 최소화한 후 마지막 반복 역산과정에서 3점의 라그랑지 곱수를 변화하여 최적의 라그랑지 곱수를 선택하는 방식으로 하므로 컴퓨터의 계산시간을 줄일 수 있다고 본다.

본 연구에서는 Fig. 3에서 제시하는 모형에 대하여 지형의 기복을 포함하여 얻어진 이론자료를 가지고 역산에서 균질모형에 대한 지형 기복을 무시한 효과, 전도성 이상체를 포함한 모형에서 지형의 기복을 무시한 효과 및 지형 기복을 포함하여 얻어진 결과를 비교하였다. 균질모형에서 지형의 기복을 무시하여 얻어진 역산 결과는 전반적으로 지형의 기복에 따른 전기비저항의 영상들로 제시되었다. 전도성 이상체를 포함한 모형에서 지형의 기복을 무시하여 얻어진 역산 결과는 전체적인 전기비저항의 영상들이 전도성 이상체를 포함하여 상당히 왜곡되어 나타나고 있다. 즉, 계곡부근에서는 고비저항이 띠모양의 형태를 보이며, 산 정상부에서는 저비저항이 분포되어 보인다. 지형의 기복을 포함하여 얻어진 이론자료를 역산과정에서 지형의 자료를 포함하여 얻어진 결과는 3차원 이상체의 영상이 정확하게 보이고 있으며 왜곡된 형상을 거의 나타나지 않고 있다. 그러므로 3차원 전기비저항 역산에서는 지형의 기복에 대하여 고려를 하지 않는 경우에 오해석이 가능하며 정확한 지하구조의 영상을 획득하기 어렵다. 또한 라그랑지 곱수에 대한 최소자승근 오차의 관계를 보면 지형효과를 포함한 경우가 지형 효과를 무시한 경우보다 훨씬 적은 오차를 보였으며 신속하게 수렴하는 것을 알 수 있다.

이러한 3차원 전기비저항 해석은 반복 역산과정에서 최소자승근 오차에 대한 최적의 라그랑지 곱수 값을 이용하여 측정자료의 오차와 모델중분 벡터가 수렴할 수 있도록 하는 방식으로 지하구조를 영상화하는 것이 좋다고 판단된다.

References

- 김정호, 현병구, 정승환, 1989, Reciprocity원리를 이용한 2차원 비저항 탐사자료의 효율적 역산, 대한광산학회지, 26, 18-27.
- 이명중, 김정호, 조성준, 정승환, 송윤호, 1999, 전기 비저항 탐사자료의 3차원 역산, 물리탐사, 2, 191-201.
- Coggon, J. H., 1971, Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method, Geophysics, 36, 132-156.
- 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.
- deGroot-Hedlin, C. D., and Constable, C., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, Geophysics, 55, 1613-1624.
- Dey, A., and Morrison, H. F., 1979, Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. Geophysics, 44, 753-780.
- 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.
- Holcombe, H. T., and Jiracek, G. R., 1984, Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys. Geophysics, 49, 439-452.
- Kim, H. J., Song, Y. H., and Lee, K. H., 1999, Inequality constraint in least-squares inversion of geophysical data, Earth Planets Space, 51, 255-259.
- 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, 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, 995-1005.
- Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, Geophysical Prospecting, 40, 453-463.
- Sasaki, Y., 1994, 3-D resistivity inversion using the finite-element method, Geophysics, 59, 1839-1848.
- Tong, L. T., and Yang, C. H., 1990, Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion, Geophysics, 55, 354-361.
- Tripp, A. C., Hohmann, G. W., and Swift, C. M., 1984, Two-dimensional resistivity inversion, Geophysics, 49, 1708-1717.
- 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, Geophysical Prospecting, 49, 483-497.
- Yi, M. J., Kim, J. H., Song, Y., Cho, S. H., 2002, Application of three-dimensional resistivity imaging technique to the site investigations, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.

투 고 일 2004년 1월 12일

심 사 일 2004년 1월 13일

심사완료일 2004년 2월 27일

박종오
대전대학교 지구시스템공학과
300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel : 042-280-2575
Email : jopark@dju.ac.kr

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

송무영
충남대학교 지구환경과학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel:042-821-6423
Email : mysong@cnu.ac.kr