

## 지형을 포함한 MT 탐사 자료의 2차원 모델링과 역산

이성곤<sup>1)</sup> · 송윤호<sup>1)</sup> · 김정호<sup>1)</sup> · 정승환<sup>1)</sup>

### Two-dimensional Modeling and Inversion of MT Data Including Topography

Seong Kon Lee<sup>1)</sup>, Yoonho Song<sup>1)</sup>, Jung-Ho Kim<sup>1)</sup> and Seung-Hwan Chung<sup>1)</sup>

**요 약 :** 본 연구에서는 지형을 포함한 2차원 MT 역산 알고리즘을 개발하였다. 역산 과정시 필요한 모델 반응 계산을 위하여 유한요소법을 이용하였다. 공기와 지표면의 경계를 기준으로 고도에 따라 각 요소들의 절점을 수직으로 이동시킴으로써 추가적인 계산시간의 증가없이 간편히 지형을 구현하였다. 역산에서는 공간적인 합수로서 라그랑지 곱수를 결정하는 알고리즘을 채택하여 역산의 분해능과 안정성을 높이고자 하였다. 수치모델 실험을 통하여 TM과 TE모드 자료의 지형효과를 고찰하였고, 수치 자료의 역산을 통하여 지형을 포함한 역산의 타당성을 살펴보았다. 또한 현장 자료에 대하여 적용하여 본 연구에서 개발된 지형을 포함한 MT 자료 역산 알고리즘의 적용성을 확인하였다.

**주요어 :** MT, 지형효과, 역산, 모델링, 유한요소법, 2차원

**Abstract :** We have developed a two-dimensional (2-D) magnetotelluric (MT) inversion algorithm, which can include topographic effects in inversion. We use the finite element method (FEM) to incorporate topography into forward calculation. Topography is implemented simply by moving nodes of rectangular elements in z-direction according to the elevation of air-earth interface. In the inversion process, we adopt a spatially variable Lagrangian multiplier algorithm in the smoothness-constrained least-squares inversion. The inversion algorithm developed in this study reconstructs subsurface resistivity structure quite well when topography variation exists. Also, it turns out to be effective in both resolution and stability from a model study and field data application.

**Keywords :** MT, topography, inversion, modeling, FEM, 2-D

## 서 론

MT(magnetotelluric) 탐사는 자연적인 전자기장에 의한 지하의 반응을 측정하여 지하 구조를 규명하는 탐사 방법으로서 맨틀과 같은 심부 지하 구조 규명, 심부 광물 혹은 지열수 탐사에 사용되어 왔다. MT 탐사법은 원거리 전자기장의 평면파 가정에 기초하기 때문에 송신원을 사용하는 일반 전자탐사법에 비하여 그 해석 이론이 비교적 용이한 장점을 갖고 있다. 그러나, 일부 주파수 대역에서는 자연 전자기장 신호가 거의 없는 등 전체적인 신호가 매우 미약하여 특히 송전선 등과 같은 인공적인 원인에 의한 전자기적 잡음 때문에 현장 자료 획득, 처리, 해석에 있어 어려움이 많다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 1 kHz 미만의 주파수 대역에서는 자연 전자기장을 이용하고, 잡음 수준이 비교적 강한 1 kHz에서 70 kHz 정도까지의 주파수 대역에서는 인공적인 송신원을 이용하여 일반적인 MT 탐사를 보완한 CSMT(controlled source MT) 탐사가 조사 심도 수 백 m 내외의 지반조사 등의 목적에 이용되

기도 하며, 국내에도 연구소 및 대학교 등의 연구 기관과 지반조사 업체 등에 이 탐사 기기가 도입되어 현장에 이용되고 있다.

국내에서도 MT 탐사에 관한 연구가 많이 발표되고 있다. 1990년대 초반 MT 측정 기기가 도입되어 심층 지하수 및 지열 자원 탐사(정승환 등, 1994), 지질 구조 탐사(송윤호 등, 1992) 등에 MT법이 적용되었으며, 원거리 기준점(remote reference) 탐사(조인기 등, 1993), EMAP(Electromagnetic Array Profiling) 탐사(송윤호 등, 1993) 등이 도입되어 자료 획득 기술에 있어서 많은 발전이 있었다. 이와 함께 1차원 및 2차원 역산(김희준, 1990), 정적효과를 제거하기 위한 공간주파수 영역 필터링(송윤호 등, 1993; 이성곤 등, 1994), 지형보정 혹은 지형을 포함한 역산(손정술, 1996; 신동훈, 2000) 등에 관한 연구 결과가 발표된 바 있다.

이제까지 대부분의 2차원 MT(혹은 CSMT) 탐사 자료의 해석은 정적효과를 제거한 후 주로 연속적인 1차원 역산에 의해 이루어지고 있다. 이는 기본적으로 MT 탐사가 주파수 영역의

\*2002년 10월 24일 접수

1) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부(Geophysical Exploration and Mining Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource)

수직 탐사 (frequency sounding)이고, 또한 일정 간격으로 2차원 탐사 자료를 획득하기에는 우리나라의 지형의 기복이 심하고 전자기적 잡음원이 산재해 있는 등 현장 탐사 여건이 열악하기 때문이다. 그러나, 최근 물리탐사 기술이 토목 및 지반 조사 목적에 널리 응용되면서 탐사 심도가 비교적 깊은 경우나 지표 전기비저항이 매우 낮아 전기비저항탐사가 상대적으로 비효율적인 지역에서 2차원 CSMT 탐사에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 우리나라와 같이 지형의 기복이 심한 지역에서 획득된 2차원 MT 탐사 자료에 대한 효율적인 해석 기술이 필요하게 되었다.

이를 위하여 본 연구에서는 지형을 포함한 2차원 MT 탐사 자료의 모델링 및 역산 알고리즘의 개발에 초점을 맞추었다. 즉, 일반적인 우리나라의 지형을 고려하여 지형효과를 모델링 뿐 아니라 역산 과정에 직접 포함시키고자 하였으며, TE, TM 모드 걸보기 비저항 및 위상에 대한 개별적인 역산 및 두 모드의 복합 역산을 수행할 수 있도록 하였다. 또한, 역산 알고리즘에 공간적인 함수로서 라그랑지 곱수(Lagrangian multiplier)를 도입하는 ACB(Active Constraint Balancing)법 (Yi and Kim, 1998)을 채택하여 현장 자료 역산에 대한 안정성과 분해능을 향상시키고자 하였다.

### 유한요소법을 이용한 모델링과 지형의 구현

지형효과를 역산에 포함시키기 위해서는 지형효과를 정확히 묘사할 수 있는 모델링 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위하여 유한요소법을 채택하였고, 주향 방향 이외의 전자기장을 구하기 위하여 Rodi(1976)가 제안한 알고리즘을 지형이 있는 경우에도 적합하도록 변형하여 모델링의 정확도를 높이고자 하였다.

주향방향이 y 인 2차원 지하 구조에서 MT 전자기장은 TE 모드와 TM 모드의 두 성분으로 완전히 분해할 수 있으며, 시간 의존성(time dependence)을  $e^{i\omega t}$ 로 가정하면 TE 모드 및 TM 모드의 지배방정식은 Maxwell 전자기 방정식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다(Rodi, 1976).

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\tau} \nabla V \right) = \gamma V \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\tau I \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -\tau J \quad (3)$$

여기서  $\sigma$ 를 전기전도도(단위: S/m),  $\mu$ 를 투자율(단위: H/m),  $\omega$ 를 MT 전자기장의 각 주파수,  $i = \sqrt{-1}$ 이라 할 때, TM 모드에서는  $V = H_y$ ,  $I = -E_z$ ,  $J = E_x$ ,  $\gamma = i\omega\mu$ ,  $\tau = \sigma$ 가 되고, TE 모드에서는  $V = E_y$ ,  $I = H_z$ ,  $J = -H_x$ ,  $\gamma = \sigma$ ,  $\tau = i\omega\mu$ 가 된다.

$U$ 를 시험함수라 할 때, 바깥쪽 경계  $\partial\Omega$ 로 둘러 쌓인 전체

모델링 영역  $\Omega$ 에서 가중잔여법을 이용하여 (1)식의 변분식을 유도하면 다음과 같은 (4)식이 된다.

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\tau} \nabla U \cdot \nabla V dS + \int_{\Omega} \gamma UV dS = \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \cdot \left( U \frac{1}{\tau} \nabla V \right) dl \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{n}$ 은 경계  $\partial\Omega$ 에 대하여 영역  $\Omega$ 의 바깥쪽 방향을 나타내는 단위벡터(outward normal)이다. 전체 영역  $\Omega$ 를 유한개의 요소  $\Omega_e$ 로 나누고, 적절한 기저함수(basis function)  $\{N_i, i=1, \dots, N_e\}$ 를 선택하여 각 요소  $\Omega_e$ 에서 Galerkin 근사를 도입하면, (4)식은 각 요소에서 다음의 (5)식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Omega_e} \frac{1}{\tau} \nabla N_i \cdot \nabla N_j dS + \int_{\Omega_e} \gamma N_i N_j dS = \int_{\partial\Omega_e} \frac{1}{\tau} N_i \frac{\partial V}{\partial n} dl, j=1, \dots, N_e \quad (5)$$

이 식을 이용하여 모든 요소에 대하여 계산하고 전체 행렬식으로 조립하여 경계조건을 적용하면 전체 행렬방정식을 구성할 수 있으며, 이의 해를 구함으로써 주향 방향의 전기장 혹은 자기장을 구할 수 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 모형 반응을 구하고자 설정된 격자 구조에 대한 모식도를 나타내고 있다. 굵은 선으로 나타낸 부분은 모형 반응을 계산하고자 하는 수치모델 영역이며, 따라서 역산에서는 추론되는 지하 구조를 의미한다. 그 이외의 격자는 1차원 층서 구조의 경계조건을 적용하기 위하여 도입되었는데, 모델 영역 내 2차원 구조의 영향을 무시할 수 있을 정도로 연장하였다.

한편, 지형은 Fig. 1과 같이 사각형 요소의 절점을 수직으로 이동하여 사각형 요소를 변형시켜 구현하였다. 즉, 평탄한 지표를 기준면으로 상정하여 지표면에 해당하는 격자점들을 지표의 고도에 따라 위치시키고, 지표면으로부터 거리가 멀어질수록 각 절점의 수직 이동량을 일정한 비율로 감소시켜 TE 모드에서는 맨 위와 맨 아래에서, TM 모드에서는 맨 아래에서 평탄하게 되도록 하였다. 이러한 이유는 수치모델 영역의 맨

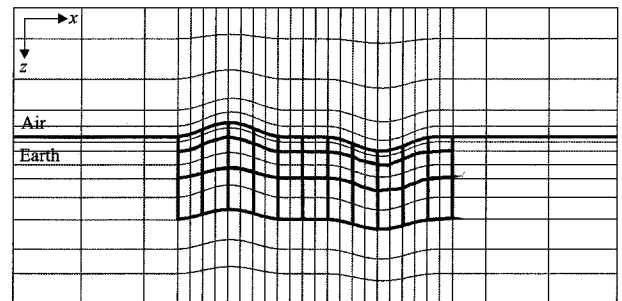


Fig. 1. Schematics of finite element mesh including surface topography. The topography is implemented by moving the nodes of a quadrilateral element in z-coordinate. The ratio of slope variation in the mesh gradually decreases from the earth surface to the top and the bottom of mesh to be finally flat so that 1-D boundary condition can be applied.

위와 아래의 경계에 추가하는 1차원 경계조건이 성립하기 포함이다.

### 수치미분의 향상을 위한 보조장 계산 알고리즘

MT 모델링에서는 유한요소 방정식의 해를 구하여 주향 방향의 전기장 혹은 자기장을 정확히 구하는 것도 중요하지만, 정확한 MT 임피던스 혹은 겐보기 비저항과 위상을 계산하기 위해서는 유한요소 모델링을 통하여 얻은 각 TE, TM 모드의 해( $E_y$ ,  $H_y$ )로부터 (3)식과 같이  $z$ 에 대해 미분하여 주향 방향과 수평 직교 방향의 전자기장( $H_x$ ,  $E_x$ )인 보조장(auxiliary field)을 계산하여야 한다. 따라서 정확한 보조장의 계산은 MT 모델링에 있어서 매우 중요한 요소로 작용한다. 이는 모델링에 의하여 해를 정확히 구하였다 하더라도 보조장 계산을 위한 수치 미분에서의 오차가 임피던스 혹은 겐보기 비저항 및 위상 계산의 정확도를 좌우하기 때문이다. 일반적으로 보조장을 구하기 위하여 흔히 전진차분, 후방차분 혹은 중앙차분(Wannamaker *et al.*, 1986) 등을 이용하기도 하고, Padé 근사(Press *et al.*, 1992)와 같은 좀 더 정확한 방법을 이용하기도 한다. 그러나, TM 모드의 경우 보조장  $E_x$ 의 값의 변화가 매우 클 수 있기 때문에 정확히 보조장을 계산하기 위하여 격자 간격을 매우 조밀하게 하여야 하는 어려움이 있다.

그러나 Rodi(1976)는 2차원 유한요소법을 이용한 MT 모델링에서 보조장을 구하기 위한 매우 정확한 알고리즘을 제안하였는데, 이 알고리즘의 주된 개념은 (4)식의 유한요소 방정식에 기초한다. (4)식에서 볼 수 있듯이 우변은 요소 경계에서의 미분과 시험함수의 곱에 대한 요소 경계에서의 선적분으로 나타내어 지는데, 이 관계를 이용하는 것이다. 즉, (5)식의 좌변은 일단 유한요소 행렬 방정식을 풀어 절점에서의  $V$  값을 구하면 쉽게 얻을 수 있기 때문에 지표면 격자를 포함하는 요소

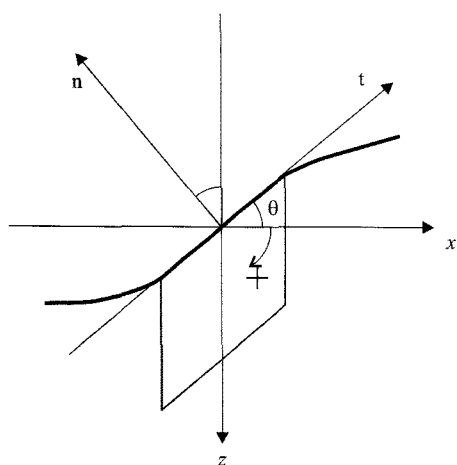


Fig. 2. Normal and tangential vector with respect to the rugged surface. The slope is defined as an angle  $\theta$  ( $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ ) between the tangent of rugged surface and  $x$ -axis. The direction of increase in  $\theta$  is indicated as the plus sign (+).

에 대해서만 행렬 방정식을 구성하여 이의 해를 구하면 우변 항의 미분값을 구할 수 있는 것이다.

그러나, 지형이 있는 경우 이 방법을 적용하면, (4)식에서 알 수 있듯이 구해지는 보조장은  $z$ 에 대한 미분이 아니라 지형 경사면에 수직한 방향에 대한 미분을 구하게 된다. 따라서, 임피던스를 구하기 위해서는 Fig. 2에서와 같이 접선 방향( $t$ )의 미분 계수와 구해진 수직 방향( $n$ ) 미분 계수를 이용하여  $x$ ,  $z$ 에 대한 미분 계수를 구하여야 한다. 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 경사면의 각이  $\theta$ 라 할 때 다음과 같은 (6)식에 의하여 보조장을 계산하였다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial n} & \frac{\partial z}{\partial n} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial n} \\ \frac{\partial V}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial n} \\ \frac{\partial V}{\partial t} \end{pmatrix} \quad (6)$$

이 방법은 일단 유한요소 방정식의 해를 이용하여 지표면에 설정된 절점에서만 유한요소식을 구하기 때문에 많은 계산 시간의 증가 없이 구하고자 하는 미분을 정확히 구할 수 있는 장점이 있다. 특히, TM 모드에서는 경계 조건에 의하여 지표면에서의 자기장  $H_y$ 는 항상 일정하므로 지형이 있을 때에도 지표면의 접선 방향에 대한 미분  $\partial H_y / \partial t$ 는 항상 0이 되어 이에 대한 고려를 하지 않아도 된다. 또한, TE 모드에서는 주향 방향 전기장 성분  $E_y$ 만 존재하고 또한 부드럽게 변화하므로, 접선 방향에 대한 미분  $\partial E_y / \partial t$ 보다 수직 방향에 대한 미분  $\partial E_y / \partial n$ 에 의한 영향 훨씬 크므로 이 방법은 지형이 있을 때에도 매우 효율적임을 알 수 있다.

### 지형을 포함한 반복적 비선형 역산

본 연구에서는 지형을 포함한 MT 자료의 역산을 위하여 평활화 제한을 가한 반복적 비선형 역산을 이용하였으며, Yi and Kim(1998)이 제안한 공간적인 함수로서 라그랑지 곱수 알고리즘(ACB)을 적용하여 분해능과 안정성을 높이고자 하였다.

측정된 자료를  $\mathbf{d}=(d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ , 지하의 전기비저항 모델 변수를  $\mathbf{m}=(m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ 이라 할 때, 모델변수의 증분 벡터  $\Delta \mathbf{m}$ 은 (7)식과 같이 표현된다(Sasaki, 1989).

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{d} \quad (7)$$

여기서,  $\mathbf{J}$ 는 모델 변수에 대한 자료의 민감도(sensitivity) 혹은 자코비안(Jacobian)이고,  $\mathbf{C}$ 는 평활화 제한 연산자 행렬이다.

평활화 제한 최소자승 역산에서  $\lambda$ 는 역산 과정에서 자료의 분해능과 역산의 안정성 중 어느 요소에 더 가중치를 줄 것인가를 결정하는 계수로 일반적으로 상수이다. 그러나, 이 값을 얼마로 할 것인가는 매우 어려운 문제로 Yi and Kim(1998)은 역산과정에서 변수 분해 행렬의 값에 따라 공간적인 함수로 다음의 (8)~(11)식과 같이 를 설정하는 알고리즘을 제안하였다.

$$\log(\lambda_i) = \log(\lambda_{\min}) + \frac{\log(\lambda_{\max}) - \log(\lambda_{\min})}{\log(SP_{\max}) - \log(SP_{\min})} \{\log(SP_i) - \log(SP_{\max})\} \quad (8)$$

$$SP_i = \sum_{j=1}^M \{w_{ij}(1 - S_{ij})R_{ij}\}^2 \quad (9)$$

$$\mathbf{J}^{-g} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = [R_{ij}] = \mathbf{J}^{-g} \mathbf{J} \quad (11)$$

여기서 (9)식의  $w_{ij}$ 는  $i$  번째 모델 변수와  $j$  번째 모델 변수 사이의 공간적 거리이며,  $S_{ij}$ 는 공간적 평활화 연산자가 적용되는 모델 변수에 대한 요소들 (9)식의 계산에서 제거하기 위하여 도입된 부분으로 더욱 자세한 설명은 Yi and Kim(1998)을 참조하기 바란다.

### 수치모델을 이용한 지형효과 고찰

지형을 포함한 모델링의 정확성 및 이에 포함된 보조장 계산 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 3(a)에 나타나 있는 모델에 대하여 적용하였다. 이 모델은 Fig. 3(a)와 같이 중앙의 지표면의 경사가 산 모양으로 변화하고 있으며, Wannamaker *et al.* (1986)에 의하여 설정된 것과 같은 것이다. 산의 폭은 2,400 m이고, 최대 높이는 100 m이다. 지표면의 고도는 중앙점에서 고도가 최고이며, 코사인 함수와 같은 모양으로 감소하여 양 끝에서는 0이 된다. 지하의 전기비저항은 100 ohm-m로 균질하며 사용 주파수는 10 Hz이다.

Fig. 3(b), (c)는 이 모델에 대하여 Wannamaker *et al.* (1986)의 알고리즘을 채택한 결과와 본 연구에서 사용된 모델링의 결과를 보여주고 있다. Wannamaker *et al.* (1986)은 삼각형 요소를 이용하여 지형을 구현하였으며, 보조장을 계산하기 위하여 지표 부근에서 조밀한 격자를 구성하여 3점 중앙차분 혹은 전방차분을 사용하였다. 정확한 비교를 위하여 모델링에서 얻은 수치해의 지표면에 대한 수직 및 접선 방향의 미분계수로부터 (6)식을 이용하여  $x, z$ 에 관한 미분을 구한 후, 이로부터 TE와 TM 모드의 겹보기 비저항과 위상을 구하였다. 실선 및 점선은 Wannamaker *et al.* (1986)의 TE 모드 및 TM 모드의 결과이고 사각형과 삼각형은 본 연구에서 구한 결과로, 겹보기 비저항과 위상 모두 잘 일치하고 있다.

이미 알려진 바와 같이 겹보기 비저항 및 위상에서의 지형에 의한 왜곡은 TE 모드에서 보다 TM 모드에서 더욱 커짐을 Fig. 3(b), (c)에서 확인할 수 있다(Wannamaker *et al.*, 1986; Chouteau and Bouchard, 1988). 그러나, 산에 의한 지형효과와 양상은 TE 모드와 TM 모드가 다른 모습을 나타내고 있다. 즉, TE 모드의 경우는 산의 중앙부에서 최대값을 보이고 산의 양 끝 부분에서 100 ohm-m 보다 낮아졌다가 100 ohm-m에 수렴하고 있고, TM모드의 경우는 산의 중앙부에서 최소값을 나타

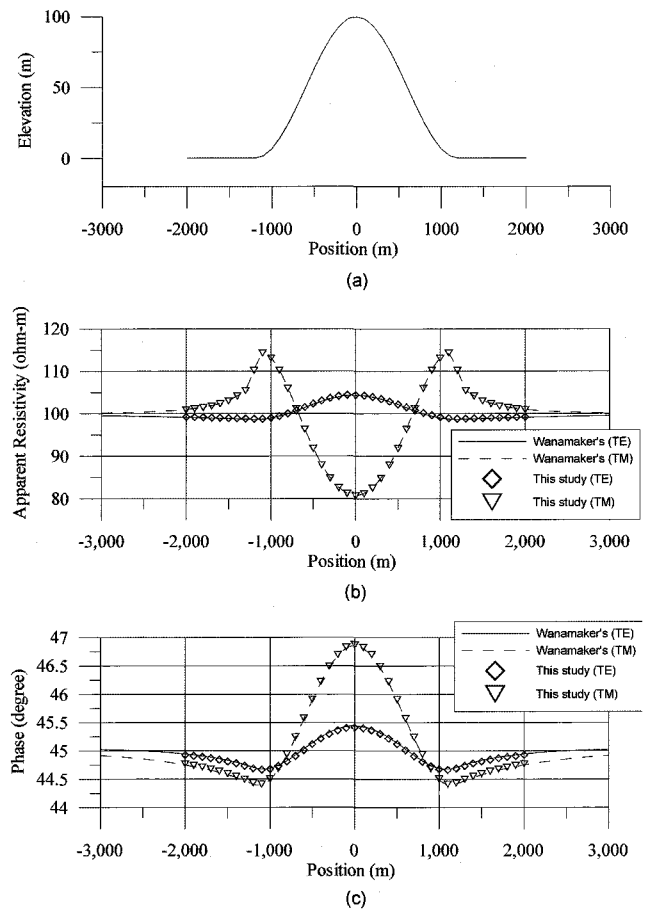


Fig. 3. MT topographic responses (amplitude (b) and phase (c)) for a cosinusoidal hill (a). Lines represent the results of Wannamaker *et al.* (1986) while symbols are from our code.

내고 산의 양 끝에서 최대값을 보이고 있다. 평탄한 균질 반무한 공간에 비하여 최대값과 최소값의 차이는 TM 모드의 경우 약 35%, TE 모드의 경우 약 7%를 보이고 있다. 위상에 있어서의 왜곡은 두가지 모드 비슷한 양상을 보이고 있으며, TM 모드의 경우 44.5°에서 47° 정도, TE 모드의 경우 44.7°에서 45.5°로 그 변화량이 겹보기 비저항에 비하여 상대적으로 작다.

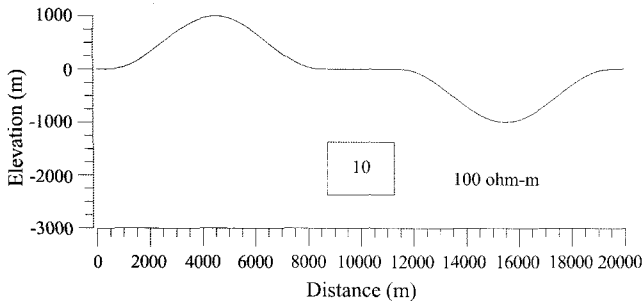
위에서와 같이 겹보기 비저항은 지형에 의하여 크게 왜곡이 되지만, 위상은 겹보기 비저항에 비하여 영향을 덜 받음을 알 수 있다. 이러한 지형효과와 특성은 지표의 불균질도에 의하여 위상의 변화가 거의 없이 겹보기 비저항이 동일 주파수에서 큰 변화를 보이는 정적효과와 매우 비슷하다. 따라서, EMAP 탐사에서 정적효과를 제거하기 위하여 실시하는 공간주파수 영역 필터링이 지형효과를 제거하는(Torres-Verdin and Bostick, 1992)테에도 효과가 있음을 나타낸다고 할 수 있다.

### 지형이 있는 모델에 대한 역산의 적용

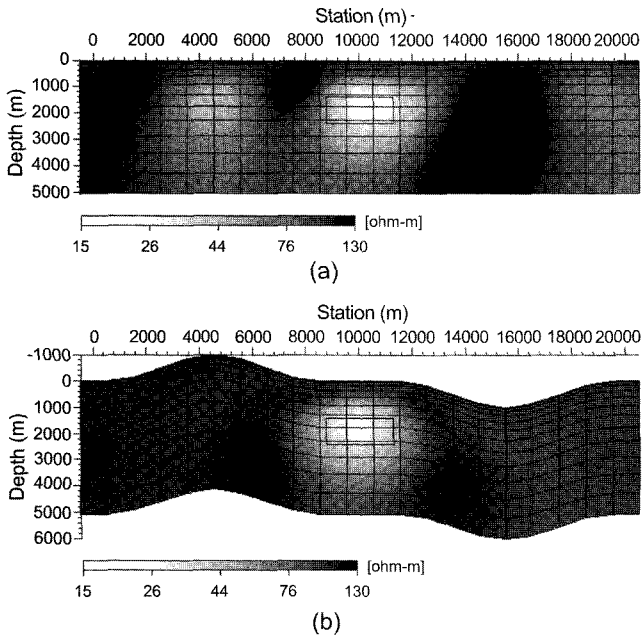
본 연구에서 개발된 역산 알고리즘의 적용성을 살펴보기 위하여 지형의 기복이 있는 모델의 수치 자료에 대하여 본 역산

을 적용하였다. 이를 위하여 지형을 포함한 역산과 지형을 포함하지 않는 역산 결과를 상호 비교하였다. Fig. 4는 이 수치적 역산 실험을 위하여 설정한 모델이다. Fig. 4에서와 같이 산과 골이 인접하여 있으며, 중간에 평탄한 구간이 있다. 앞서와 같이 지형은 코사인 함수 형태의 부드러운 변화를 갖고 있으며, 지하의 전기전도도는 100 ohm-m이다. 또한 중앙 부근에는 10 ohm-m의 저비저항 이상대가 있으며, 위치는 수평거리 8,750~11,250 m 지점 사이 심도는 1,400~2,400 m 사이에 있다. 산과 골 지형의 고도차는 지표면을 기준으로 최대 각각 1,000 m 이다. 이 경사도는 실제 현장 상황에 비하여 다소 과장된 면이 있지만 이론적 모델에 대하여 지형효과를 명확히 살펴보기 위하여 설정되었다.

Fig. 5(a)는 Fig. 4에 도시한 수치모델의 TM 모드 자료에 대해 평탄한 지표면을 가정하여 역산한 결과이다. 역산 결과로부



**Fig. 4.** A model for the performance test of topographic inversion developed in this study. A conductor of 10 ohm-m is placed in a homogenous half-space of 100 ohm-m with the surface topography comprising a hill and a valley. The vertical exaggeration is 2:1.

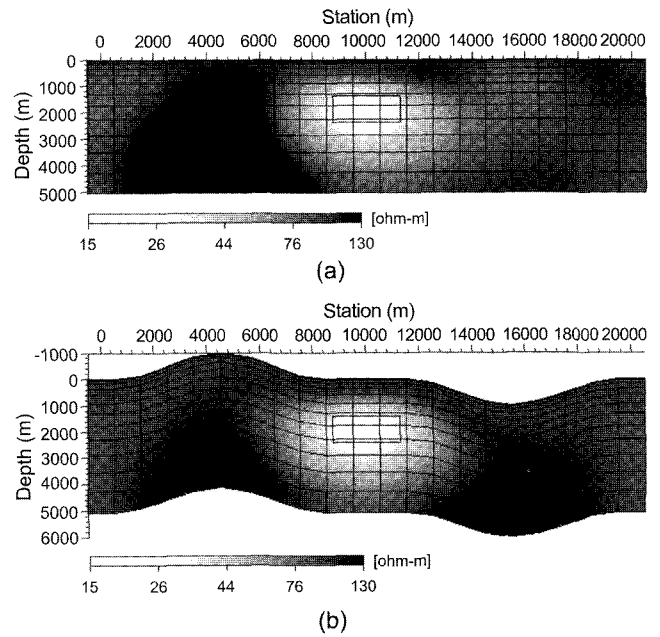


**Fig. 5.** Comparisons of inversion results from (a) non-topographic and (b) topographic inversion methods for TM mode synthetic data for a model shown in Fig. 4.

터 저비저항대를 구분할 수 있으나, 그 모양은 찌그러지고 비대칭이며 위치 또한 실제와 약간 다르게 나타나고 있다. 또한, 저비저항대 양쪽으로 거짓 이상대가 나타나고 있는데, 산 아래 부분에는 실제 비저항보다 낮은 저비저항대가, 골 아래 부분으로는 실제보다 높은 비저항대로 영상화되었다.

TE 모드의 경우도 저비저항대의 모양과 위치에 있어서 실제와 다르게 영상화되어 있다. 그러나, TM 모드의 결과와는 반대로 Fig. 6(a)와 같이 산 아래 부분에는 실제 비저항보다 높게, 골 아래 부분에서는 실제보다 낮은 비저항대로 영상화되었음을 알 수 있다.

위와 같은 역산 결과들은 지형효과가 생기는 원리와 밀접한 관계가 있다. 즉, 지형효과는 공기와 지표 경계면을 따라 흐르는 전류가 산 아래 부분에서는 분산되고 골 아래서는 집중되기 때문에 발생하는 현상으로(Wannamaker *et al.*, 1986; Chouteau and Bouchard, 1988), 이는 지하의 전류가 공기와 지표면의 경계를 따라 흐를 뿐 이에 수직한 방향으로 흐를 수 없기 때문이다. 따라서, 지형에 의하여 수평 방향 전류에 의하여 지표면의 경계에 전하가 축적되어 겉보기 비저항 값에 영향을 미치게 된다. 또한, TE 모드의 경우도 원리적으로는 TM 모드와 동일하다고 볼 수 있다. 즉, 산 부근에서는 주향방향에 전류에 의한 자기장의 크기가 상대적으로 작아지고, 골 부근에서는 상대적으로 커지게 되는데, 전기장 및 자기장이 지형과 관계없이 연속적이기 때문에 그 크기는 TM모드와는 달리 크지 않다. 그러나 TE 모드의 자료가 비록 TM 모드의 자료보다 지형효과가 적지만, 평탄한 지표면을 가정한 역산 결과를 보면 Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 역산된 전기비저항 값은 TM모드



**Fig. 6.** Comparisons of inversion results from (a) non-topographic and (b) topographic inversion methods for TE mode synthetic data for a model shown in Fig. 4.

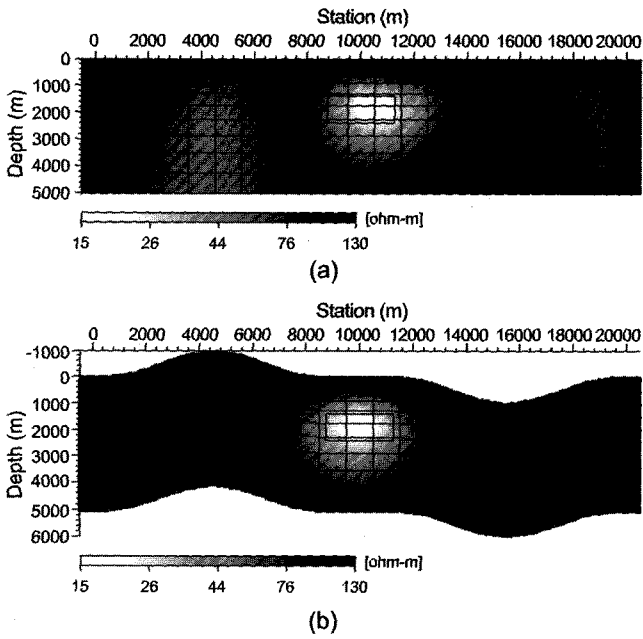


Fig. 7. Comparisons of inversion results from (a) non-topographic and (b) topographic inversion methods for joint set of TM and TE mode synthetic data for a model shown in Fig. 4.

와 비슷한 정도로 왜곡되어 있다. 이러한 양상은 실제 현장 탐사 자료에 대한 역산 해석시 지형의 영향을 덜 받는 TE 자료의 역산 결과도 지형에 의하여 왜곡될 수 있음을 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 7(a)는 TM 모드와 TE 모드 자료에 대한 평탄한 지형을 가정한 복합 역산 결과를 나타내고 있다. 앞선 두 경우의 결과와 마찬가지로 지형에 의하여 저비저항대의 모양과 위치가 왜곡되어 나타나고 있다. 역산 결과는 TE 모드 보다 TM 모드 자료에 대한 역산 결과와 더 비슷한 양상을 보이고 있는데, 이는 겉보기 비저항에 있어 지형효과 크기가 TM 모드에서 더

크고, 민감도에 있어서도 TM 모드가 TE 모드보다 더 크기 때문으로 생각된다. Fig. 5(b), 6(b) 및 7(b)은 앞의 Fig. 5(a), 6(a) 및 7(a)에 나타난 역산에 사용된 동일한 각 자료에 대하여 지형을 포함한 역산을 적용한 결과이다. 지형에 의한 왜곡은 모든 경우의 역산에서 거의 없으며, 지하의 저비저항대의 모양 및 위치, 전기비저항 값이 정확하게 분해되었다.

### 현장자료에의 적용

본 연구에서 개발된 지형을 포함한 역산 알고리즘의 현장 자료에 대한 적용성을 알아보기 위하여 CSMT 탐사 자료에 대하여 적용하였다. 역산에 적용된 현장 자료는 철도 터널 공사를 위한 지반조사 목적으로 강원도 태백시 지역에서 획득된 것으로, 조사의 목적은 터널 공사 구간 내의 연약대 혹은 단층대와 터널의 안정성에 영향을 줄 수 있는 얇게 협재된 석탄층을 파악하기 위함이다. 본 조사 지역은 산이 많고 지형의 기복이 심한 지역으로, 획득된 자료는 지형에 의한 영향을 많이 받았을 것으로 생각된다. 또한 이 지역은 석탄 부존 지역으로서 가행하고 있는 광산이 존재하고 있으며, 탐사 심도와 국내 석탄의 전기전도도가 매우 높은 점을 고려하여 볼 때 CSMT 탐사가 효율적일 것으로 판단되었다.

추선은 Fig. 8의 하단 그림과 같이 설계 구간에 설정된 좌표를 기준으로 98,000~109,700m까지 약 11.7km이다. 105,800~108,300m의 일부 구간에서 쌍극자배열 전기비저항탐사도 실시되었으며 Fig. 8의 상단에 그 결과가 나와 있다. MT 자료는 60m 마다 획득되었으며 탐사 시스템은 미국 EMI사의 ImageM 시스템을 이용하였는데 이 시스템은 미약한 자연 전자기장을 보완하기 위하여 1kHz 이상에서는 인위적으로 전자기장을 송신하여 측정하는 시스템이다. 그러나, 이 시스템을 이용할 때에도 MT 해석의 일반적인 가정인 평면과 가정은 성

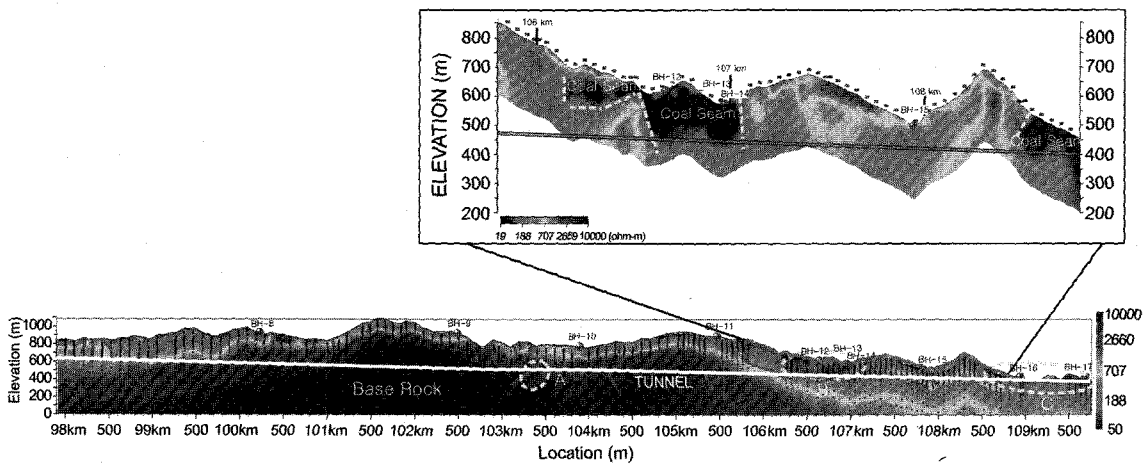


Fig. 8. The MT data for performance test of topographic inversion were acquired at the site where railway tunnel was planned in 1998. Interpretation results of dipole-dipole data (upper) and CSMT data applied with 1-D Bostick pseudo inverse followed by EMAP filtering (lower).

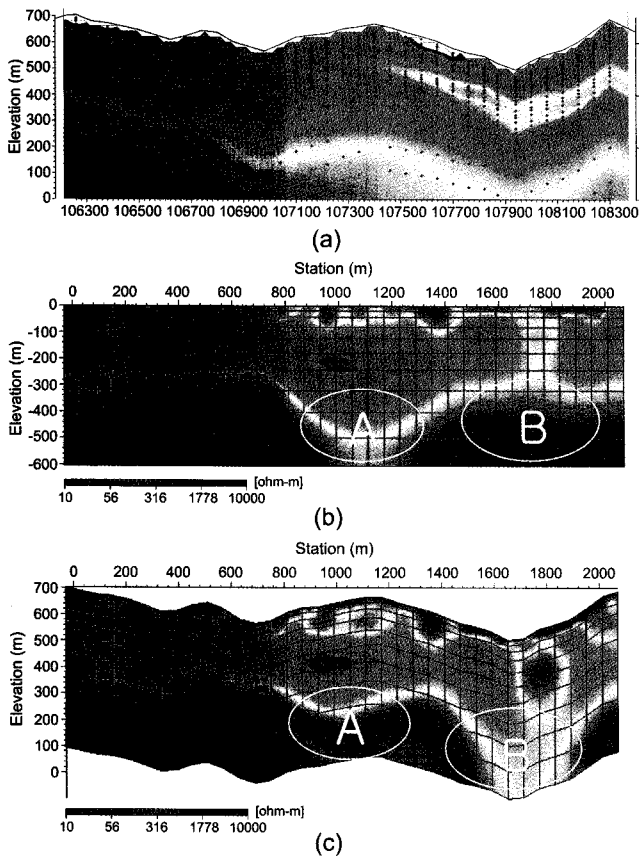


Fig. 9. Comparisons of results from (a) 1-D Bostick pseudo inverse followed by EMAP filtering, (b) non-topographic inversion, (c) topographic inversion developed in this study.

립할 수 있음이 알려져 있다(Morrison and Nichols, 1996).

Fig. 8은 쌍극자 배열 탐사 결과와 공간주파수 영역 필터링을 거친 후 1차원 Bostick 역산(Tores-Verdin and Bostick, 1992)을 통하여 얻어진 전체 축선의 해석도를 나타내고 있다. 건설 예정 터널이 흰 실선으로 표시하였고, B라고 표시된 부분은 위의 결과와 시추 자료의 대비를 통하여 석탄층으로 판명되었다.

본 연구에서 개발된 지형을 포함한 역산 알고리즘을 적용하기 위하여 106,260~108,300 m 구간의 TM 모드 자료에 대하여 적용하였다. 이 자료는 60 m씩 떨어진 35개 측정점에서 58개의 주파수 성분의 겹보기 비저항 및 위상 자료로 재구성되었다. 주파수는 11.7 Hz에서 73.6 kHz까지 로그 등간격으로 설정되었다. 중간에 험한 지형 조건으로 인해 접근이 용이하지 않은 세 측정점에서 측정이 불가능하였다. 전체 자료 중 양질의 자료만을 추출하여 역산에 입력된 총 자료의 수는 1,610개이다.

Fig. 9(a)는 공간주파수 영역 필터링을 거친 후 1차원 Bostick 역산 결과이고, (b)는 평탄한 지표면을 가정된 역산 결과이며, (c)는 동일한 자료에 대한 지형을 포함한 역산을 적용

한 결과이다. 세가지 방법에 의한 결과를 비교하여 보면 Fig. 8(a)의 106,580~106,900 m로 표시된 저비저항대 이상대가 영상화되었다는 점에서 유사한 결과를 보여 주고 있다. Fig. 9(a)의 Bostick 역산 결과를 보면 대체로 이상대의 형태는 수평 방향으로 평활화되어 있으며, 영상화된 저비저항대의 모양은 지표면의 지형의 형상과 매우 흡사하게 나타나 있다. 또한, Fig. 9(b)와 (c)에서 보이는 지표면 근처의 고비저항대는 나타나 있지 않다. 이는 연속된 수평 방향 전기장 성분의 고주파수의 공간주파수 성분을 제거하여 정적효과를 제거하는 공간주파수 영역 필터링의 영향과 2차원 구조에 대한 1차원 해석의 한계로 보여진다. Fig. 9(b)와 (c)를 비교하여 보면, 전체적으로 비슷한 양상을 보이거나 A와 B로 표시되어 있는 부분에서 명확한 차이를 보이고 있다. 이 부분에서 지표면의 지형 변화는 산 모양에서 골 모양으로 변해가고 있는데, Fig. 9(c)의 지형을 포함한 역산 결과보다 Fig. 9(b)의 지형을 포함하지 않은 역산 결과에서는 겉보기 비저항이 A에서는 낮게 B에서는 높게 나타나고 있다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 TM 모드 자료의 지형을 포함한 역산과 포함하지 않은 역산 결과를 비교하여 볼 때 지형의 효과에 기인한 것으로 판단되며, 현장 자료에 대하여 지형을 포함한 역산이 효율적으로 적용되고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다.

## 결론

본 연구에서는 지형의 효과를 직접 역산에 포함시켜 수행하는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘들은 2차원 탐사로 획득된 TE와 TM 모드 겹보기 비저항 및 위상 자료에 대한 개별역산 뿐 아니라 복합역산을 수행할 수 있다.

지형효과를 고려한 모델 반응 계산을 역산 과정에서 효율적으로 수행하기 위하여 유한요소법을 이용하였으며, 사각형 요소의 절점을 수직 방향으로 이동시켜 추가적인 계산 시간의 증가 없이 지형을 구현하였다. 또한 겹보기 비저항 및 위상을 구하기 위하여 매우 중요한 보조장의 계산은 Rodi(1976)가 제안한 방법을 이용하였고, 지표 지형이 있을때도 성립하도록 변형하여 그 타당성을 검증하였다. 또한 수치모델에 대하여 지형 효과의 특징에 대하여 고찰하였는데, 수치모델링 자료에 대하여 지형을 포함한 역산을 적용하여 일반 평탄한 지표면을 가정한 역산과 비교하였다. 그 결과 TE와 TM모드 모두에서 지형효과를 특성을 파악하였으며 지형을 포함한 역산을 적용한 결과 본 연구에서 개발된 역산의 효율성을 확인할 수 있었다. 또한 산악지역에서 획득된 현장자료에 적용하여 기존의 1차원 및 2차원 역산과 비교함으로써 현장 자료에의 적용성을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 지형을 포함한 2차원 MT 역산 알고리즘의 접근 방식은 여타 다른 전자기 탐사 역산에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 김희준, 1990, 지자기 지전류 자료의 2차원 역산: 지질학회지, **26**, 442-449.
- 손정술, 1996, 유한요소법을 이용한 MT 탐사자료의 지형보정: 공학석사학위논문, 서울대학교.
- 송운호, 조인기, 정승환, 김정호, 전정수, 1992, 제주도에서의 MT 탐사: 전기, 전자탐사 연구 KR-92-1G-5, 한국자원연구소, 33-69.
- 송운호, 조인기, 정승환, 김정호, 전정수, 1993, 2차원 MT 탐사-EMAP 탐사: 전기, 전자탐사 연구 KR-93-1G-7, 한국자원연구소, 37-86.
- 신동훈, 2000, 지형효과를 고려한 2차원 지자기지전류 역산: 공학석사학위논문, 서울대학교.
- 이성근, 현병구, 정승환, 송운호, 1994, 2차원 MT 모델링과 공간 필터링을 이용한 정적효과 제거에 관한 연구: 한국자원공학회지, **31**, 444-456.
- 정승환, 오재호 외 16인, 1994, MT 및 DGS 탐사에 의한 경상분지내 지열 및 탄화수소 탐사: 한국자원연구소 KR-94(T)-18, 과학기술처.
- 조인기, 송운호, 정승환, 김정호, 전정수, 1993, 원거리 기준점 MT 탐사: 전기, 전자탐사 연구 KR-93-1G-7, 한국자원연구소, 5-34.
- Morrison, H. F., and Nichols, E. A., 1996, Continuous impedance profiling for mineral exploration: *66th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1286-1289.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., 1992, Numerical recipes in FORTRAN: the art of scientific computing: *Cambridge Univ. Press*.
- Rodi, W. L., 1976, A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **44**, 483-506.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data: *Geophysics*, **54**, 254-262.
- Torres-Verdin, C., and Bostick, F. X. Jr., 1992, Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: Electromagnetic array profiling (EMAP): *Geophysics*, **57**, 603-622.
- Yi, M.-J., and Kim, J.-H., 1998, Enhancing the resolving power of the least-squares inversion with active constraint balancing: *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 485-488.
- Wannamaker, P. E., Stodt, J. A., and Rijo, L., 1986, Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements: *Geophysics*, **51**, 2131-2144.