

## 2차원 MT 자료의 3차원 역산을 통한 제주도 지전기구조 연구

최지향<sup>1</sup> · 김희준<sup>2</sup> · 남명진<sup>3</sup> · 이태종<sup>4\*</sup> · 한누리<sup>1</sup> · 이성곤<sup>4</sup> · 송윤호<sup>4</sup> · 서정희<sup>5</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부

<sup>2</sup>부경대학교 환경탐사공학과

<sup>3</sup>Dept. of Petroleum and Geosystems Eng., The University of Texas at Austin, USA

<sup>4</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부

<sup>5</sup>별세, 전 서울대학교 지구환경시스템공학부

## A Study on Geoelectrical Structure of Jeju Island Using 3D MT Inversion of 2D Profile Data

Jihyang Choi<sup>1</sup>, Hee Joon Kim<sup>2</sup>, Myung Jin Nam<sup>3</sup>, Tae Jong Lee<sup>4\*</sup>, Nuree Han<sup>1</sup>,  
Seong Kon Lee<sup>4</sup>, Yoonho Song<sup>4</sup> and Jung Hee Suh<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil, Urban and Geosystem Eng., Seoul National University

<sup>2</sup>Dept. of Environmental Exploration Eng., Pukyong National University

<sup>3</sup>Dept. of Petroleum and Geosystems Eng., The University of Texas at Austin

<sup>4</sup>Groundwater and Geothermal Resources Div., KIGAM

<sup>5</sup>Deceased, Formerly Dept. of Civil, Urban and Geosystem Eng., Seoul National University

**요약:** 2차원 측선을 따라 획득한 MT 탐사 자료를 3차원 역산하여 제주도 지전기 구조의 해석을 시도하였다. 이에 앞서 TM 모드 자료와 TE 모드 자료를 각각, 또는 두 모드의 자료를 동시에 이용하여 2차원 역산을 수행하였다. 이 세가지 2차원 역산을 통해 얻은 영상을 3차원 영상과 비교분석하기 위해 측선을 포함하는 3차원 모델을 구성하여 3차원 역산 결과를 도출하였다. 모든 역산 결과에서 전체적으로 동일한 층서구조를 확인할 수 있었으나 3차원 역산에서는 보이지 않는 전기비저항 이상대가 2차원 역산에는 나타난다. 이는 측선 직하부에 있지 않은 3차원 이상체의 영향으로 2차원 역산 결과가 왜곡된 것이라 유추할 수 있다. 역산 영상의 비교 분석 결과 측선 하부에서 제주도의 지전기 구조는 심도 5 km 이내에서는 전체적으로 고비저항-저비저항-고비저항의 3층 수평 층서 구조임을 알 수 있었고, 3차원 역산이 더욱 신뢰성 있는 영상을 보임을 확인하였다.

**주요어:** 자기지전류 탐사, 제주도, 지전기 구조, 2차원 복합역산, 3차원 역산

**Abstract:** Traditional two-dimensional (2D) interpretation of magnetotelluric (MT) data utilizes only transverse magnetic (TM)-mode data, because 2D inversion of transverse electric (TE)-mode data results in spurious features when 3D structures exist in the subsurface. The application of a 3D inversion algorithm to a single MT profile can reduce contamination due to off-profile anomalies and help us to incorporate TE-mode data in the interpretation. In this study, we conduct 2D and 3D inversions of MT data observed along two lines in Jeju Island. First, we invert apparent resistivities and phases in the TM and TE modes separately. Then, we perform 2D joint inversion of both TM- and TE-mode data and 3D inversion of both  $Z_{xy}$ - and  $Z_{yx}$ -mode data corresponding to TE- and TM-mode data in 2D. The resistivity images derived from all four data show that the geoelectrical structure in Jeju Island is a three-layered earth with the resistive-conductive-resistive stratigraphy within a depth of 5 km. The 3D inversion does not produce clear anomalies in the reconstructed profile image, while all of 2D do. This attributed to the possibility that 2D inversion results are distorted by exiting off-profile 3D anomalies in Jeju. With 3D inversion of 2D profile MT data, we can deduce more reliable results that are not seriously distorted by off-profile 3D anomalies.

**Keywords:** MT, Jeju Island, geoelectrical structure, joint 2D inversion, 3D inversion

2007년 9월 14일 접수; 2007년 10월 14일 채택

\*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: Groundwater and Geothermal Resources Division  
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources  
92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

## 서론

제주도는 우리나라에서 가장 큰 섬으로, 한반도 남해안으로부터 약 90 km 정도 떨어져 있다. 총 면적은 1,792 km<sup>2</sup>이고, N70E 방향으로 기울어져 있는 장축의 길이가 74 km, 장축에 거의 수직인 단축의 길이가 32 km인 타원형의 화산섬이다. 제주도는 전체적으로 방패형 화산의 형태를 띠며 약 500년 전까지 화산폭발이나 지진과 같은 화산활동이 있었다는 기록이 있으나 현재는 휴화산으로 여겨지고 있다(원종관, 1975). 중심에는 한라산이 해발 1,950 m의 높이로 솟아있고 한라산을 중심으로 단축인 남북방향으로는 급경사가 나타나고 장축인 동서 방향은 완만하게 용암대지가 해안까지 연장되어 있으며 약 360 여개의 기생화산이 고루 분포하고 있다. 제주도는 비교적 안정된 대륙지각인 유라시아판 위에 있는 한반도 주변의 신생대 화산지대에 위치하며, 기반암 위를 덮고 있는 화산암은 대부분 현무암과 안산암 등으로 구성되어 있다(윤선 등, 2005).

제주도 하부의 지전기 구조에 대한 정보는 지하수 탐사를 위한 시추와 지열탐사를 위한 장공시추(이상규 등, 1995)를 통한 시추공 자료와 심부 전기탐사 자료(이기화, 김형수, 1993) 등으로 얻어진 바 있다. 이렇게 파악된 제주도의 지층은 전체적으로 1차원적이고 현무암질 용암대지, 결정질 화산 쇄설물층인 서귀포층(Seogwipo Formation, SF), 미고결층인 U층(Unconsolidated Formation, UF), 중생대 백악기에서 신생대 팔레오세 사이에 형성된 화강암질 기반암으로 크게 구분할 수 있다.

이러한 사전정보를 바탕으로 한국지질자원연구원에서는 제주도의 과거 화산활동과 관련된 지열자원의 부존여부와 부존량을 확인하고, 심부 파쇄대와 지하수대의 구조를 파악하는 것을 목적으로 2004년부터 지속적으로 제주도 전 지역에 걸쳐 자기지전류(magnetotelluric, MT) 탐사를 수행하고 있다(Lee et al., 2006). MT 탐사는 저주파수 대역에서 측정되어 지하 수 km 깊이의 심부 지질구조의 해석을 가능하게 한다. 그런데 우리나라와 같이 지층의 전기비저항이 전반적으로 높은 경우는 침투심도가 MT 탐사 대역의 최고 주파수에서도 수백 m가 된다. 따라서 천부의 분해능을 확보하기 위해서 MT 탐사 시 가청주파수 자기지전류(audio-frequency MT; AMT) 탐사자료를 함께 획득하여 MT 대역과 AMT 대역의 자료를 결합하여 지질구조 해석에 이용하고자 하였다(이태종 등, 2006).

획득된 MT 탐사자료를 해석하는 방법 중 가장 적용하기 쉬운 1차원 해석은 지열지대와 같이 지하구조가 복잡한 지역에는 맞지 않고, 3차원 해석이 최근 컴퓨터의 고속화 및 고용량화에 힘입어 시도되고 있지만(Nam et al., 2006) 아직은 계산 시간이 많이 걸리는 등의 한계가 있어서 2차원 해석이 가장 적용도가 높다고 볼 수 있다. 2차원 MT 탐사자료는 자기장이 측선과 수직인 TM (transverse magnetic) 모드와 전기장이 측선과 수직인 TE (transverse electric) 모드로 획득하는데, 해석

을 위해서는 TM 모드 자료만을 이용하는 것이 대부분이다. 이는 지하에 3차원 구조가 있는 경우 특히 TE 모드의 자료가 크게 왜곡되어 역산에 이용하기 적합하지 않기 때문이다(Wannamaker et al., 1984). 측선 직하부에서 떨어진 곳에 존재하는 3차원 이상체에 의해 MT 자료가 영향을 받지만 2차원 역산의 경우에는 주향 방향 즉, 지하구조가 탐사 측선에 수직인 방향으로 변화가 없다고 가정하기 때문에 측정자료를 이용한 해석에는 한계가 있다.

2차원 측선에서 획득된 제주도의 2004년 자료에 대한 2차원 역산이 Lee et al. (2006)과 Choi et al. (2007)에 의해서 연구된 바 있다. 이 기존의 경우도 TM 모드 자료만을 이용하여 역산하였는데, 이 연구에서는 TM 모드 자료와 TE 모드 자료를 각각 이용한 2차원 역산(각각 'TM 역산', 'TE 역산'이라 칭함)과 두 모드의 자료를 함께 사용하는 2차원 복합역산(joint TM/TE inversion, 'TM/TE 역산'이라 칭함), 그리고 2차원 측선을 포함하는 3차원 공간에 대한 3차원 역산을 적용하여 더욱 신뢰성 있는 지전기 구조를 밝혀내고자 한다. 특히, 3차원 역산을 통해 종래의 2차원 역산 결과에서 실제로 존재하지 않는 구조나 이상대가 나타날 가능성을 최대한 배제하고, 또한 TM 모드 자료뿐 아니라 TE 모드 자료도 함께 활용하는 방법을 모색하고자 한다.

## AMT와 MT 탐사자료

제주도에서의 2004년 MT 탐사는 한라산의 서쪽과 동쪽에서 남북방향으로 진행하는 두 측선 E와 W를 따라서 수행되었다(Fig. 1). 한라산의 중산간 지역을 통과하게 배열한 두 측선 사이의 거리는 약 25 km 이상 떨어져 있으며, 각 측선에 약 1 km 간격으로 측정점을 배열하였다. 측선 W의 길이는 약 20.7 km, 측선 E는 약 19.4 km이다. 탐사기기는 캐나다 Phoenix Geophysics 사의 MTU-5A로서 24 bit 측정분해능과 GPS를 통한 동기화 기능을 가진 5채널 시스템이다. 이 시스템은 지표에서 전기장 2성분, 자기장 3성분의 텐서 측정이 가능하다. 자기장 센서는 MT 대역에서는 MTC-50 유도코일센서(주파수 범위: 0.0002 ~ 400 Hz)를 이용하고, AMT 대역에서는 MTC-

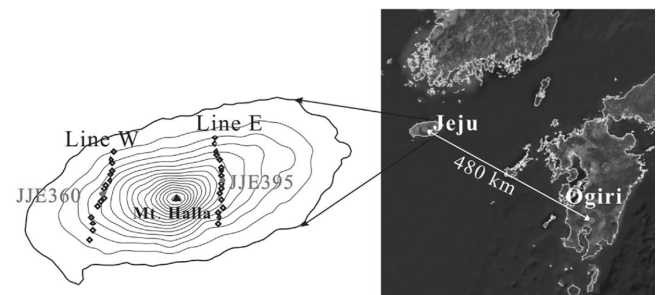


Fig. 1. A location map of AMT and MT survey stations made in 2004 along lines W and E in Jeju Island. A remote reference site is located at Ogiri in Kyushu, Japan.

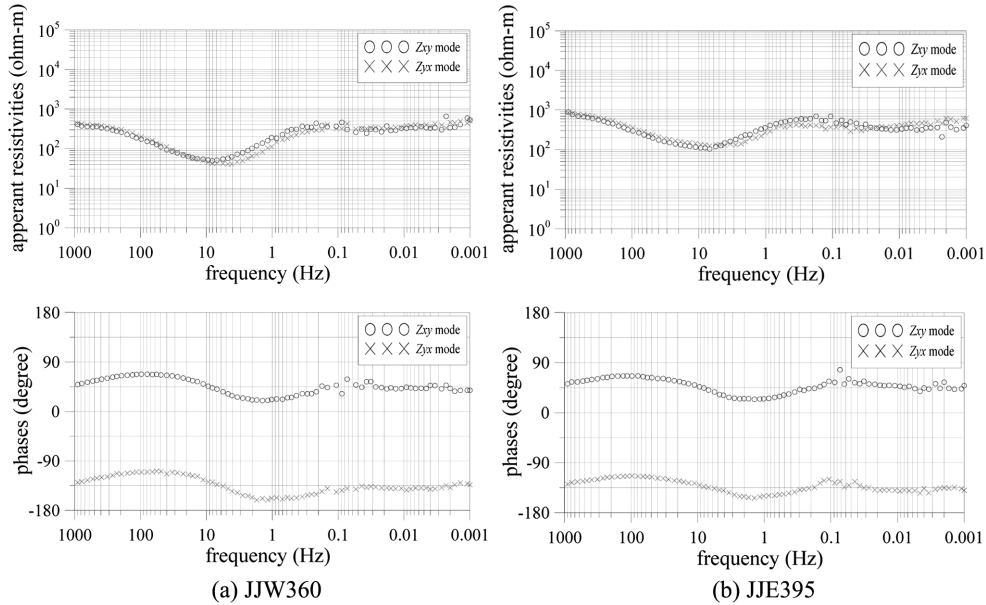


Fig. 2. Observed apparent resistivities (upper) and phases (lower) at JJW360 (a) and JJE395 (b) x points to the north.

30 유도코일센서(주파수 범위: 0.1 ~ 10,000 Hz)를 사용하였다. AMT와 MT 탐사를 통해 획득된 자료의 전체 주파수 대역은 0.00034 ~ 10,400 Hz이다. 현장탐사는 17시부터 다음날 08시까지 15시간 동안 MT 대역의 자료를 획득하고 측정 지점의 자기장센서를 고주파수용으로 교체하여 10시부터 14시까지 4시간 동안 AMT 대역의 자료를 취득하는 방식으로 진행하였다. 자료처리를 위한 원거리 기준점은 제주도에서 480 km 떨어진 일본 Kyushu Ogiri 지역에 있으며(Fig. 1), 원거리 보정을 통해 자료의 질은 크게 향상된다(Uchida *et al.*, 2006)

Fig. 2는 측선 W와 E의 중앙에 있는 두 측정점 JJW360과 JJE395에서의 AMT와 MT 탐사자료를 결합한 겹보기비저항과 위상이다. 두 측정점에서의 수직탐사 곡선은 제주도 전 지역의 탐사 결과와 유사한 양상을 보이고 있으며 이를 통해 제주도의 개략적인 지전기 구조를 3층 구조로 볼 수 있다. 고주파수 대역에서는 고비저항으로 나타나고 중간주파수 대역에서는 전기비저항이 낮아졌다가, 저주파수 대역으로 가면서 전기비저항이 다시 높아지는 저항성-전도성-저항성의 3층구조이다. 다만, 0.1 ~ 1 Hz 대역 부근에서 하부보다 더 높은 저항값을 보이는 것이 특징적이다.

### 역산 알고리즘

2차원과 3차원 역산은 각각 Uchida (1993)와 Sasaki (2004)의 알고리즘을 이용하였다. 두 방법 모두 가우스-뉴턴법(Gauss-Newton approach)에 기초하여 유사한 형태의 목적함수를 구성한다. 3차원 역산 알고리즘(Sasaki, 2004)을 먼저 살펴보자. 정적효과에 대한 변수를 도입하고, 자료와 모델에 대한 가중치를 이용한 목적함수  $U$ 를 다음과 같이 구성한다.

$$U = \|\mathbf{W}_d(\Delta\mathbf{d} - \mathbf{J}\Delta\mathbf{m} - \mathbf{G}\mathbf{s})\|^2 + \lambda^2[\|\mathbf{C}\mathbf{m}^{k+1}\|^2 + \alpha^2\|\mathbf{W}_m(\mathbf{m}^k - \mathbf{m}_b)\|^2 + \beta^2\|\mathbf{s}\|^2], \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{W}_d$ 와  $\mathbf{W}_m$ 은 측정자료와 모델변수에 대한 가중행렬(weighting matrix)이고,  $\mathbf{J}$ 는 자코비안 행렬(Jacobian matrix),  $\mathbf{d}$ 는 측정자료(observed data),  $\mathbf{m}$ 은 모델변수(model parameter),  $\mathbf{m}_b$ 는 배경매질의 모델변수,  $\Delta\mathbf{d}$ 는  $\mathbf{d}$ 와 계산된  $\mathbf{d}^{est}$  간의 차,  $\Delta\mathbf{m}$ 은 모델변수의 업데이트 벡터,  $\mathbf{G}$ 는 정적효과에 대한 변수인  $\mathbf{s}$ 와 관련된 값으로 구성된 행렬,  $\mathbf{C}$ 는 모델 roughness 행렬,  $\lambda$ 는 라그랑지 곱수(Lagrange multiplier),  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 가중계수,  $\|\cdot\|^2$ 는  $l_2$ -norm이다. (1)식의 우변 첫 번째 항은 탐사자료와 계산자료의 오차에 대한 항이고, 두 번째 항은 모델 roughness를 제어하는 부분, 모델변수의 변화량의 크기를 제한(Marquardt, 1963)하는 부분, 정적효과 변수가 가우스 분포(Gaussian distribution)를 따른다는 가정(Ogawa and Uchida, 1996)하에  $\mathbf{s}$ 를 제어하는 부분으로 구성되는 항이다. (1)식에서 정적효과 변수와 모델에 대한 가중치에 대한 부분을 제거하기 위해서  $\mathbf{s} = \mathbf{0}$ ,  $\alpha = \beta = 0$ 로 놓으면 Uchida (1993)의 2차원 역산의 목적함수가 된다.

두 가지 역산 알고리즘에서 (1)식에 대한 rms 오차를 계산하는 방식은 차이가 있다. 3차원 역산 알고리즘에서는 측정자료에 대한 표준편차의 역수를 가중행렬로 이용하므로(Lee *et al.*, 2003) rms 오차의 정의에도 이를 도입한다.

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}(\Delta\mathbf{d}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta\mathbf{d})}, \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 자료 개수이다. 한편 2차원 역산 알고리즘에서는 겹보기비저항과 위상의 가중치를 조절하는 계수  $w$ 를 이용해서 rms 오차를 계산한다.

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N/2} \{ [\ln(\rho_a / \rho_a^{est})]^2 + w^2 (\phi - \phi^{est})^2 \}} \quad (3)$$

여기서  $\rho_a$ 는 걸보기비저항,  $\phi$ 는 위상, 위첨자  $est$ 는 모델링을 통해 계산한 자료를 의미한다.

계산자료 오차항과 모델변수 제어항의 상대적인 크기를 조절하는  $\lambda$ 를 결정하는 방법은 두가지 역산 알고리즘에서 차이가 있다. 3차원 역산은 각 반복마다 경험적으로 선택된 여섯 개의  $\lambda$ 값에 대해 계산한 rms 오차 중 최소가 되는  $\lambda$ 를 택하여 다음 단계로 진행하는 경험적인 방법을 이용하며, 2차원 역산은 각 반복에서 ABIC (Akaike's Bayesian Information Criterion; Akaike, 1980)를 최소로 하는  $\lambda$ 를 이용한다.

## MT 탐사 자료의 역산

측선 W와 E에서 각각 15개의 측정점에서 획득된 AMT와 MT 탐사 자료 중 0.044 ~ 640 Hz의 주파수대역의 15개 주파수를 이용하여 역산을 수행하였다. 측선의 고도차는 측선 W의 경우 288 m, 측선 E의 경우 430 m에 불과해 측선의 길이에 비해 경사도가 매우 낮다. 따라서 이번 연구에서는 지형은 고려하지 않았다. 수평으로 가정한 두 측선의 고도는 각각 251 m와 250 m이다. 측선 W에서 측정된 자료는 전기비저항의 범위가 20.80 ~ 2,358.84 ohm-m이고 기하평균(geometric mean)은 148.26 ohm-m이며 위상의 범위는 1.55 ~ 85.47 도이다. 측선 E의 경우 전기비저항의 기하평균은 240.58 ohm-m로 측선 W보다 높은 값이며, 그 범위는 2.79 ~ 7,832.41 ohm-m로 측선 W보다 넓은 분포를 보인다. 위상의 범위도 0.32 ~ 89.80 도로 측선 W보다 넓다.

### 2차원 역산

2차원 역산에서는 측선 W의 경우 TM 역산 시 313개의 역산 블록을 설정하고 229 × 30 (TE 모드)의 경우 공기층을 포함하여 38) 개의 모델링 격자로 나누어 계산한다. 측선 E는 역산 블록은 동일하게 313개이고, 모델링 격자는 215 × 30 (TE 역산)의 경우 38) 개이다. 2차원 역산 결과의 rms 오차 양상을 Fig. 3에 나타내었다. 초기 3회 반복 동안 rms 오차는 급격히 감소한 후 거의 변화가 없는데, TM 역산 결과 rms 오차는 TE 역산의 경우보다 조금 더 큰 값을 보이고, TM/TE 역산의 경우에는 rms 오차가 단일역산의 경우보다 큰 값에서 수렴하고 있다. 측선 W에 대한 9회 반복의 역산 결과로 rms 오차는 TM 역산의 경우 28.891에서 4.103까지, TE 역산의 경우 23.556에서 2.003까지, 복합역산의 경우 26.657에서 4.856까지 감소하였다. 이 때 단일역산의 계산시간은 3.0 GHz PC에서 약 880 분 걸렸고, 복합역산은 그 2배의 시간이 걸렸다. 측선 E의 경우에도 9회 반복하는 경우 rms 오차가 27.985에서 3.389 (TM 역산), 23.626에서 2.290 (TE 역산), 26.117에서 6.361 (TM/

TE 역산)까지 감소하였고, TM 또는 TE 역산의 계산시간은 각각 약 937분이었다.

Fig. 4의 영상은  $x$ 축의 진행방향을 따라 남쪽에서 북쪽으로 가는 측선 W와 E에 대한 심부의 전기비저항 단면으로 크게 3층 구조로 볼 수 있다. 먼저 단일역산의 결과를 보면 수천 ohm-m 고비저항대인 1층이 수십 ~ 수백 m의 두께로 나타나는데, 역산 시 가정한 측선의 고도를 고려하면 이 고비저항대는 거의 해수면의 높이까지 분포한다고 볼 수 있다. 제주도의 화산활동 시기에 분출한 용암이 지표면을 따라 해수면까지 흘러서 형성된 현무암질 용암대지(lava plateau)를 제 1층으로 보면, 용암대지 아래의 퇴적지질구조인 2층과의 뚜렷한 물성 차이를 쉽게 설명할 수 있다. 2층은 100 ohm-m 이하의 저비저항대로 약 1 km 깊이까지 분포하는데, MT 탐사의 특성상 저비저항대의 하부 경계를 명확히 구분하는 것은 쉽지 않기 때문에 (Sasaki, 1989) 경계의 정확한 심도가 다소 과대 평가될 수 있다. 기반암 위의 2층은 서귀포층으로 불리는 결정질 화성쇄설물의 퇴적층과 U층으로 보인다. 서귀포층은 1층의 용암대지가 생성되기 전의 화산활동에 의한 화성쇄설물과 제주 고산체의 퇴적물들이 해안 ~ 외대륙붕의 천해환경에서 퇴적되어 형성되었고(Yi *et al.*, 1998), U층은 서귀포층과 기반암 사이, 또는 서귀포층이 절충되어 있는 경우에는 기반암 상부에 있는 미고결층으로 시추 시에 코어로 채취되지 않는 층서로 제주도 인근 해역까지 연장되어있는 층이다(오진용 등, 2000). 서귀포층과 U층이 모두 해성층으로 전기비저항이 낮기 때문에 두 층의 전기적 구분은 어렵다. 측선의 중심 부분과 북쪽(오른쪽)에서 이 층의 두께가 커지는 부분이 측선 W의 TE 역산 결과(Fig. 4b)와 측선 E의 TM과 TE 역산 결과(Figs. 4d와 e)에서 보이고 있다. 그 아래로 3층은 심부로 갈수록 전기비저항이 커짐을 볼 수 있다. 2층과 3층 경계의 심도는 알개는 1 km 미만부터 깊게는 2 km까지로 나타나는데, 전기비저항 단면의 심도 0 km가 해수면 위 약 250 m인 것을 감안하면 기반암인 3층의 실제 심도는 해수면 아래 600 ~ 700 m라고 볼 수 있고 이는 기존의 시추결과(오진용 등, 2000)와도 비슷한 심도이다. 화강암질 기반암인 3층은 수천 ohm-m 이상의 전기비저항 값을 보이고 심도 4 km 정도에서 10,000 ohm-m에 가까운 고비저항대도 나타난다.

TE 역산 결과는 대체로 TM 역산 결과와 유사한 양상을 보이지만 제 2층 하부경계의 변화가 더 크다. 측선 W의 TM 역산 결과는 거의 수평 층서의 구조를 나타내고 있으나 TE 역산 결과는  $x$  방향 0.5 ~ 1 km 부분에서 1층의 고비저항대와 2층의 저비저항대의 두께가 확연히 커지고, 1.8 ~ 2.1 km 부분에서 저비저항인 2층과 기반암인 3층 사이의 경계 심도가 상당히 깊어지는 모습이 보인다. 또한 TM 역산 영상의 기반암층 오른쪽에 나타나는 수만 ohm-m의 고비저항대는 TE 역산 결과에서는 나타나지 않는다. 측선 E의 전기비저항 단면은 두 가지 모드 결과에서 유사하게 측선의 중심부에서 1층과 2층의

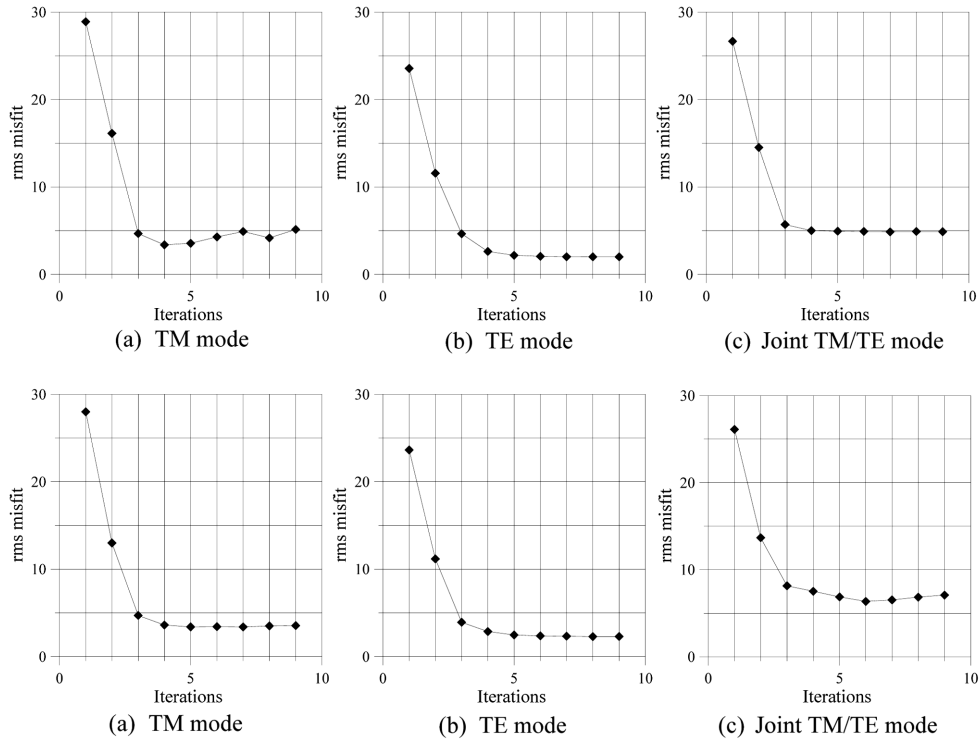


Fig. 3. Rms misfits as a function of iterations for 2D inversion of TM-, TE- and joint TM/TE-mode AMT and MT data observed along lines W (a ~ c) and E (d ~ f).

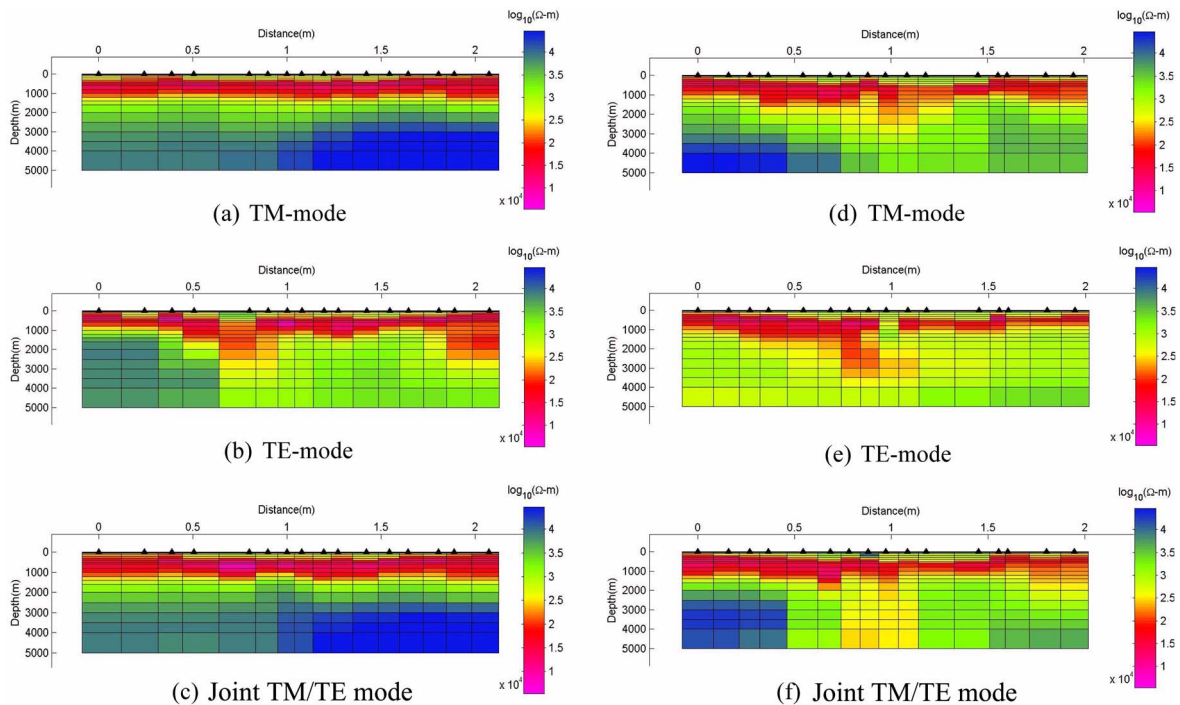


Fig. 4. Reconstructed images derived from 2D inversions of TM-, TE- and joint TM/TE-mode AMT and MT data observed along lines W (a ~ c) and E (d ~ f). The right-hand side of each profile corresponds to north.

두께가 커지는 모습을 보이지만 위치와 모양에 차이가 있다. 특히 TE 역산 영상 x 방향 1 km 하부의 ㄷ자 형태의 저비저항 형태가 독특하다. 축선의 위치(Fig. 1)를 고려하면 축선 W

보다 축선 E가 한라산에 가깝게 위치하기 때문에 이 특이한 형태가 한라산의 지형의 효과 때문인지 또는 한라산 심부의 이상대의 가능성을 나타내는 지표인지에 대한 해석의 의문이

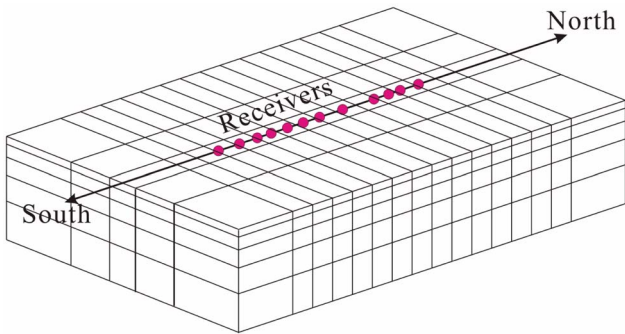


Fig. 5. A rough outline of 3D inversion blocks. Dots indicate receivers.

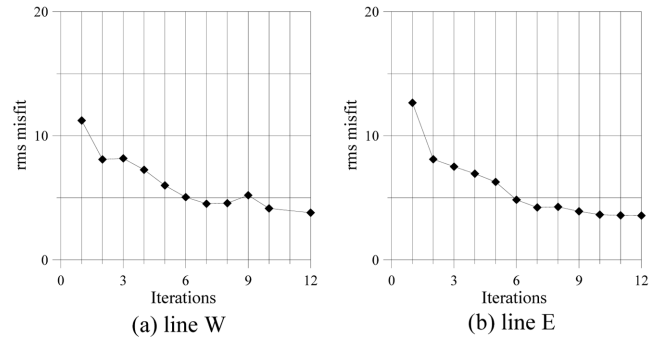


Fig. 6. Rms misfits as a function of iterations for 3D inversion of AMT and MT data along lines W (a) and E (b).

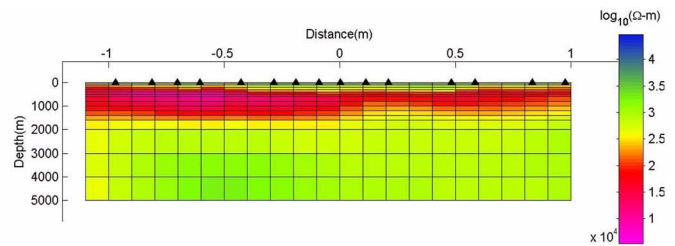
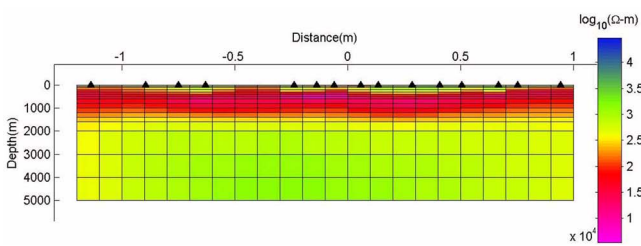


Fig. 7. Reconstructed images derived from 3D inversion of AMT and MT data along lines W (a) and E (b). The right hand side of each profile corresponds to north.

남는다.

TM 모드 자료와 TE 모드 자료를 모두 이용한 TM/TE 역산의 결과 단면은 대체적으로 TM 역산의 영상과 유사한 전기비저항 구조를 나타낸다. TE 역산에서 x 방향 1 km 하부의 층서 경계가 TM 역산에 비해서 더 깊은 심도에서 나타나는 것이 TM/TE 역산에 영향을 주는 것으로 보인다. TE 역산의 경우에는 rms 오차가 약 2 정도까지 낮게 나왔으나 TM/TE 역산의 경우에는 측선 W의 경우에는 4 이상, 측선 E의 경우에는 6 이상의 값을 보이며 더 감소하지 않는 것으로 보아 역산 결과가 충분한 분해능을 보이지 않을 가능성이 있다.

### 3차원 역산

2차원 역산에서 이용한 TM 모드와 TE 모드 자료를 분극 방향에 맞추어  $Z_{xy}$  모드와  $Z_{yx}$  모드 자료로 대입하여 3차원 역산한다. 3차원 역산을 위한 모형은 측선을 중앙에 두고 측선에 수직인 방향으로 역산 블록을 두 블록씩 연장하여 설정하였다(Fig. 5). 3차원 역산의 격자구성은, 측선 W와 E 모두  $26 \times 5 \times 23$  개 역산 블록과  $52 \times 10 \times 38$  개(공기층 9개 포함) 모델링 격자이다. Fig. 6은 반복회차에 따른 rms 오차의 양상이다. 12회 반복했을 때 측선 W의 경우 rms 오차는 11.225에서 3.802로, 측선 E의 경우 12.658에서 3.571로 수렴하였고 이에 대한 계산시간은 각각 1,995분과 1,844분이었다. 전기비저항 단면은 뚜렷한 3층 구조를 보이며 특히 2층의 저비저항대가 다른 층과 더욱 뚜렷하게 대비된다(Fig. 7). 3차원 영상에서는 2차원 TM 역산 결과와 비교하였을 때 1층의 두께는 거의 차

이가 없으나 2층의 하부경계 심도가 100~200 m 정도 더 깊게 나타나고 있다. 기반암 층은 수천 ohm-m의 거의 균질한 고비저항대로 나타난다. 2차원 역산 결과 단면의 측선 W의 북쪽과 측선 E의 남쪽에 보이던 10,000 ohm-m에 가까운 고비저항대와 TE 역산 결과에서 측선 중앙 부분에 나타나던 저비저항대는 3차원 영상에서는 보이지 않는다. 측선 직하부에는 전기비저항 이상대가 존재하지 않음을 알 수 있으나 측선에서 벗어난 부분에 전기비저항 이상대가 있을 가능성이 아직 있다.

### 결론

제주도 중산간 지역의 2차원 측선에서 획득된 MT 탐사 자료를 이용하여 2차원 TM 역산뿐 아니라 TE 역산, 두 모드를 모두 이용한 TM/TE 역산과 한 측선을 모델 안에 포함하는 3차원 모델을 설정하여 적용한 3차원 역산까지 4가지 해석 방법을 적용하였다.

측선 W와 E의 TE 역산 결과는 TM 역산 결과와 비슷한 양상을 보이지만 두 결과에서 일치하지 않는 전기비저항 이상대가 존재한다. TM/TE 역산 결과는 대체적으로 TM 역산 결과와 유사하지만 TE 역산 영상의 모습도 일부 나타난다. 3차원 역산 영상의 전반적인 구조는 2차원 TM 모드 역산의 영상과 유사하지만, 2차원 역산 결과에서 보이던 이상대들이 나타나지 않았다. 3차원 역산을 통해서 제주도의 지전기적 구조가 심도 5 km 이내에서 전체적으로 고비저항-저비저항-고비저항의 3층 형태인 수평 층서 구조임을 확인할 수 있다.

제주도에서 측정한 자료 중 중간주파수 대역에 해당되는 자료를 써서 전체적으로 뚜렷한 층서구조를 보이는 결과를 얻을 수 있었지만, 지표 부근의 복잡한 구조나 심부 구조에서는 정확한 영상을 얻지 못했다. 이번 연구에서 사용한 주파수 대역보다 더 넓은 주파수 대역의 자료를 이용해 추가 분석할 필요가 있다. 그리고 제주도 지전기 구조에 대한 심도있는 해석을 위해서는 2004년 이후 획득된 2차원 측선 자료에 대해 바다의 영향을 고려한 역산 시도가 필요할 것이다.

## 사 사

이 연구에서 이용한 제주도 지역의 현장자료는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지열수 자원 실용화 기술 개발'의 지원으로 얻어졌다. 또한 이 연구는 2006년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었다(KRF-2006-311-D00985).

## 참고문헌

- 오진용, 이성숙, 윤선, 고기원, 윤희수, 이종덕, 2000, 제주도 지하층서, 지질학회지, **36**, 181-194.
- 원종관, 1975, 제주도의 형성과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 이학논문집, **1**, 건국대학교 응용과학연구소.
- 윤선, 현원학, 정차연, 2005, 제주도 한라산의 지질, 지질학회지, **41**, 481-497.
- 이기화, 김형수, 1993, Electrical Sounding in the Cheju Island, 지질학회지, **29**, 30-38.
- 이상규 외 36인, 1995, 제주도 지열자원 탐사 및 최적 활용방안 연구(III), 통상산업부, 382 p.
- 이태종, 이성근, 송윤호, Uchida, T., 2006, MT 탐사자료 해석에서 AMT 대역 자료의 효용성, 물리탐사, **9**, 261-270.
- Akaike, T., 1980, Likelihood and Bayes procedure, *Bayesian Statistics*, University Press, Valencia, 143-166.
- Choi, J., Kim, H. J., Nam, M. J., Lee, T. J., Lee, S. K., Song, Y., and Suh, J. H., 2007, Geoelectrical structure of Jeju Island deduced from 2D inversion of AMT and MT data, 2007 한국 물리탐사학회 · 대한지구물리학회 공동학술대회, 287-290.
- Lee, T. J., Uchida, T., Sasaki, Y., and Song, Y., 2003, Characteristics of static shift in 3-D MT inversion, *Multitamsa*, **6**, 199-206.
- Lee, T. J., Lee, S. K., Song, Y., and Uchida, T., 2006, The deep geological structure of Jeju Island deduced from 2-D interpretation of AMT and MT data, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on RAEG 2006*, 30-31 Mar., Daejeon, 109-114.
- Marquardt, D. W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **2**, 431-441.
- Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., and Suh, J. H., 2006, Three-Dimensional Correction in Magnetotelluric Surveys Using Edge Finite-Element Modeling, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on RAEG 2006*, 30-31 Mar., Daejeon, 59-64.
- Ogawa, Y., and Uchida, T., 1996, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophysics*, **66**, 69-76.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics*, **54**, 254-262.
- Sasaki, Y., 2004, Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data, *Earth Planets Space*, **56**, 239-248.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D Inversion for Magnetotelluric Data Based on Statistical Criterion ABIC, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **45**, 841-858.
- Uchida, T., Song, Y., Lee, T. J., Lee, S. K., and Lim, S. K., 2006, Far remote reference analysis of MT and AMT data in Jeju Island, Korea, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on RAEG 2006*, 30-31 Mar., Daejeon, 75-78.
- Wannamaker, P. E., Hohman, G. W., Ward, S. H., 1984, Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths, *Geophysics*, **49**, 1517-1533.
- Yi, S., Yun, H., and Yoon S., 1998, Calcareous nanoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleoceanographic implications, *Paleontological Research*, **2**, 253-265.