

## 지형이 있는 모형에 대한 MT 탐사 모델링에서의 수직성분 자기장의 계산

남명진<sup>1)</sup>, 노지은<sup>2)</sup>, 박경열<sup>2)</sup>, 유수중<sup>2)</sup>, 이여찬<sup>2)</sup>, 조현철<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>세종대학교 에너지자원공학과, [nmj1203@sejong.ac.kr](mailto:nmj1203@sejong.ac.kr)/[nmj1203@gmail.com](mailto:nmj1203@gmail.com)

<sup>2)</sup>경기과학고등학교

### Computing Vertical Magnetic Fields in Modeling MT responses to a Model with Surface Topography

Myung Jin Nam<sup>1)</sup>, Ji Eun Roh<sup>2)</sup>, Kyoung Yeol Park<sup>2)</sup>,  
Su Jong Yoo<sup>2)</sup>, Yeo Chan Lee<sup>2)</sup>, and Hyeon Cheol Cho<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Sejong University, Department of Energy and Mineral Resources Engineering

<sup>2)</sup>Kyeonggi Science High School

#### 서론

자연 전자기장을 이용하는 자기지전류(magnetotelluric, MT) 탐사는 탄화수소탐사(Berdichevsky and Dmitriev, 2002), 심부 지각 및 맨틀 구조 규명(Unsworth et al., 2005), 지진관측 및 예측(Honkura et al., 1976), 지열에너지자원 탐사(Goldstein, 1988) 등에 널리 이용되어 왔다. 특히, 최근 한국에서는 지열에너지 탐사(Lee et al., 2010) 및 이산화탄소의 지중저장을 위한 부지 선정(이태중 등, 2010) 등에 MT 탐사가 널리 이용되고 있다. 뿐만 아니라, 최근 인공저류층 지열시스템(enhanced geothermal system, EGS)에 기초한 지열 발전에 대한 관심이 국내에서도 아주 높아지고 있기 때문에 국내에서 MT 탐사에 대한 수요는 더욱 증가할 것이다.

유독 산이 많은 국내에서는 MT 탐사의 수요와 중요성이 증가되는 만큼 지형이 있는 지역에서의 MT 모델링 기술의 중요성 또한 증대되고 있다. 최근 Nam et al. (2007)은 지형을 포함한 MT 탐사 모델링 알고리즘을 개발하였으며, Nam et al. (2008)은 지형에 의해 왜곡된 MT 자료를 보정하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 또한 지열에너지 부존 여부 탐지를 위해 제주도에서 수행한 MT 탐사 자료 해석을 위해 제주도 지형에 대한 MT 탐사 모델링을 수행하고 실제 현장자료와의 비교 연구도 수행하였다(Nam et al., 2009). 이상의 논문에서는 MT 탐사 자료로 수평 전기장 및 자기장만을 이용하는 걸보기비저항과 위상만을 고려하였다. 남명진 등(2007)은 지형이 있는 지역에서 걸보기비저항과 위상 외에 수직자기장까지 이용하는 티퍼와 인덕션 벡터(induction vector) 등이 지형에 의해 왜곡되는 것을 고찰한 바 있으나 여기에서는 수직 자기장의 계산에 있어 근사값을 이용하였다. 이 논문에서는 수직 자기장을 정확히 계산하는 방법에 대해 고찰함으로써 지형의 변화가 있는 지표에서 티퍼, 인덕션 벡터 등을 정확히 계산할 수 있도록 하고자 한다.

#### 수직 자기장을 이용하는 MT 반응들

수직 자기장( $H_z$ )의 변화는 수평 자기장( $H_x, H_y$ )과 다음과 같은 관계가 있다(Vozoff, 1991).

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y. \quad (1)$$

위 식에서  $T_x (= a + ib)$ 와  $T_y (= c + id)$ 는 티퍼( $\mathbf{T} = (T_x, T_y)$ )의 성분이며, 티퍼의 크기( $|\mathbf{T}|$ )와 방향은 3차원에서 다음과 같이 정의된다(Zonge and Hughes, 1991).

$$T = |\mathbf{T}| = (|T_x|^2 + |T_y|^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\phi_T = \frac{(a^2 + c^2)\tan^{-1}(c/a) + (b^2 + d^2)\tan^{-1}(d/b)}{T^2}. \quad (3)$$

이때 티퍼의 크기는 항상 1보다 작고, 티퍼의 방향은 수평과 수직 자기장의 coherency가 최대인 방향으로 각도는 깊이 방향으로  $z$ 가 증가하는 좌표축에서  $x$  축을 기준으로 시계 방향이 +이다(Ting and Hohmann, 1981).

티퍼 값을 보이기 위한 다른 방법으로 induction vector를 이용하기도 하는데 induction vector의 실수 및 허수성분은 다음과 같이 정의된다(Berdichevsky and Dmitriev, 2002).

$$\text{Re}(\mathbf{T}) = \text{Re}(T_x) \mathbf{i} + \text{Re}(T_y) \mathbf{j}, \quad (4)$$

$$\text{Im}(\mathbf{T}) = \text{Im}(T_x) \mathbf{i} + \text{Im}(T_y) \mathbf{j}, \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ 는  $x, y$  방향의 단위 벡터이다.

수직자기장을 이용하는 MT 반응을 계산하기 위해서는 두 개의 서로 수직하게 분극된 입사 평면파에 대한 전기장 및 자기장을 계산할 수 있어야 하므로(Zonge and Hughes, 1991), Nam et al. (2007)의 알고리즘을 이용하여 입사 평면파의 전기장이  $x$  방향으로 분극된  $xy$  분극, 전기장이  $y$  방향으로 분극된  $yx$  분극에서의 전기장을 계산한 후 이 전기장으로부터 수평 자기장  $H_x, H_y$  및 수직 자기장  $H_z$ 을 계산하여야 한다.

### 자기장의 계산

계산영역의 요소의 각 모서리에서 계산된 전기장 값으로부터 보조장인 자기장을 계산하기 위해서는 아래 두 식과 같은 맥스웰방정식의 적분형 혹은 미분형을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\int_S i\omega\mu_0 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = -\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}. \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \nabla \times \mathbf{E} \quad (7)$$

Nam et al. (2007)은 걸보기비저항 및 위상의 계산을 위해 필요한  $H_x, H_y$ 를 계산하기 위해 (6)식을 차분적으로 계산하였으며, Sasaki (1999)는 (7)식을 차분적으로 계산하였다.  $H_z$ 의 계산 역시 지형이 없는 경우라면 (6)식 혹은 (7)식을 요소의 모서리에 정의된 전기장을 이용하여 차분적으로 계산할 수 있다. (6)식을 차분적으로 계산하여  $H_z$ 를 계산한다고 가정하면, 하나의 지표면 요소 면의 네 모서리에 정의된 전기장(Fig. 1a)을 이용하여  $H_z$ 를 구할 수 있다. 그러나 지형이 있는 경우, 모서리에 있는 전기장만을 이용할 경우 모서리가 이루는 면에 수직한 자기장( $H_n$ )이 계산 될 뿐(Fig. 1b)  $H_z$ 가 계산되지 않는다. 비록, 리시버 위치에서 세 성분의 자기장  $H_x, H_y, H_n$ 을 계산할 수 있다고 하더라도 이 세 자기장은 서로 직교하지 않으므로 (선형 독립이 아니므로), 이 세 자기장에 기초하여  $H_z$ 를 계산할 수는 없다. 즉, 모서리에 정의된

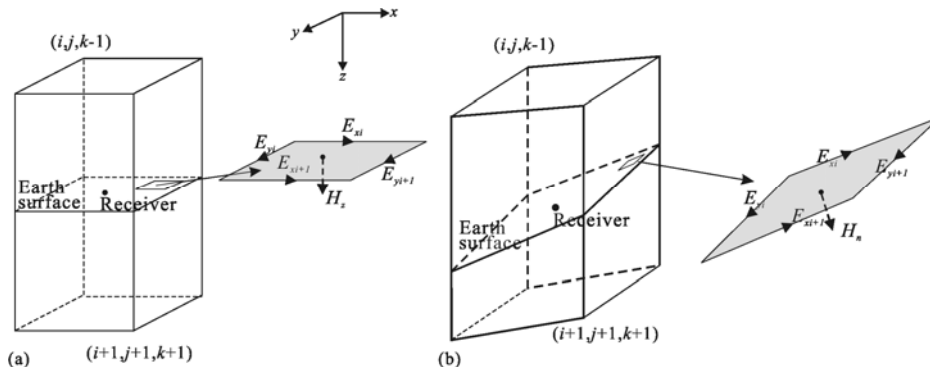


Fig. 1. Computing  $H_z$  using electric field on edges of flat (a) and topographic (b) earth surfaces.

전기장만을 이용해서 차분적으로  $H_z$ 를 계산한다면 지형이 있는 모형에서는  $H_z$ 를 계산할 수

없게 된다.

유한차분법을 이용한다면 지형을 계단식으로만 표현할 수 있으므로, 경사면에서  $H_z$ 를 계산하는 경우는 없지만, 유한요소법을 이용한 경우에는 경사면을 구현할 수 있으므로 지표 지형이 있는 경우에 앞서 언급한 바와 같이  $H_z$ 의 계산에 있어 어려움이 있다. 이러한 어려움은 유한요소법의 방법론 자체를 이해하고 이용하면 자연스럽게 해결된다. 유한요소법에서는 먼저 기저함수를 이용하여 구하고자 하는 해를 연속함수의 형태로 표현한다. 이 연구에서는 전기장의 계산하므로, 전기장의 물리적 특성을 만족하는 기저함수 중 가장 단순한 형태인, 모서리에 정의된 선형 벡터기저함수( $\Phi_i$ )를 이용한다고 가정하고, 우리가 구하고자 하는 계산영역전체에서의 전기장  $\mathbf{E}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

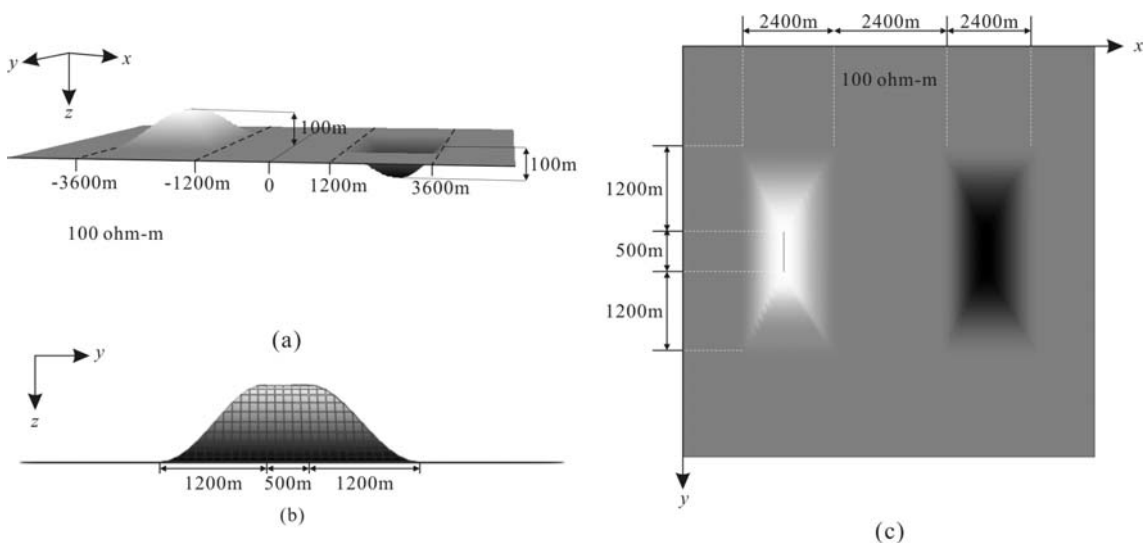
$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N E_i \Phi_i \tag{8}$$

여기서  $N$ 은 모서리의 수,  $E_i$ 는 선형 벡터기저함수  $\Phi_i$ 의 가중치이다. 기저함수와 가중치의 곱들의 합으로 표현된  $\mathbf{E}$ 는 선형벡터기저함수가 한번 미분가능하기 때문에 한번의 미분이 가능하게 된다. 이 점을 이용하여 (8)식을 맥스웰방정식의 변분식에 대입하여  $E_i$ 에 대한 행렬식을 구성하여  $E_i$  값을 계산 수 있고 결과적으로  $\mathbf{E}$ 를 구할 수 있게 되는 것이다. 그러므로 계산된  $\mathbf{E}$ 를 이용하여 보조장인 자기장을 계산할 때에는 Nam et al. (2007)에서와 같이 차분적인 방법을 이용하지 않고, (7)식에 (8)식을 대입하여 원하는 위치에서의  $H_x, H_y$  뿐 아니라  $H_z$  또한 쉽게 계산할 수 있게 된다.

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \nabla \times \sum_{i=1}^N E_i \Phi_i = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \sum_{i=1}^N E_i \nabla \times \Phi_i \tag{9}$$

**수치실험 및 결론**

3차원 지형이 있는 모형에서  $H_z$ 를 계산하기 위해 남명진 등(2007)에서 고려한 3차원 언덕과 골이 있는 모형을 이용하였다(Fig. 2). 이 모형에 대한  $H_z$ 를 차분적으로 계산한 경우와 (9)식을 이용하여 계산한 값들을 비교함으로써 차분적으로는 계산한 근사  $H_z$ 와 기저함수를 이용하여



**Fig. 2.** A sinusoidal hill-and-valley model (남명진 등, 2007) (a).  $yz$ -section (b) and  $xy$ -plane views (c) of the topographic surface.

계산한  $H_z$  사이에 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 차이는  $H_z$ 를 이용하여 계산하는 MT

반응들의 정확도에도 영향을 미치게 된다. 또한 차분적 견지에서 정확한 계산이 가능한 수평 전자기장들만을 이용하는 걸보기 비저항 경우, 차분적으로 계산한 경우와 (9)에 기초하여 기저함수의 미분을 이용하여 계산한 결과를 비교했을 때 지형의 변화가 시작되는 지점에서 차분적으로 계산한 경우 약 10%의 오차가  $Z_{xy}$  모드에서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 구체적인 결과는 학회의 발표에서 제시하고 분석 논의한다.

## 사사

이 연구는 “ 2010년 경기과학영재 R&E 지원 사업 ” 의 지원을 받아 수행되었다.

## 참고문헌

- 남명진, 김희준, 송운호, 이태중, 서정희, 2007, MT 탐사의 3차원 지형효과, 물리탐사, 10, 275-284.
- 이태중, 한누리, 고광범, 황세호, 박권규, 김형찬, 박용찬, 2010, 이산화탄소 지중저장 Pilot 선정을 위한 의성지역 MT 탐사, 지구물리와 물리탐사, 12, 281-288.
- Berdichevsky, M. N., and Dmitriev, V. I., 2002, *Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems*, Soc. Explor. Geophys.
- Goldstein, N. E., 1988, Subregional and detailed exploration for geothermal-hydrothermal resources, *Geotherm. Sci. Tech.*, **1**, 303-431.
- Honkura, Y., Niblett, B. R., and Kurtz, R. D., 1976, Changes in magnetic and telluric fields in a seismically active region of eastern Canada : Preliminary results of earthquake prediction studies, *Tectonophysics*, **34**, 219-230.
- Honkura, Y., Niblett, B. R., and Kurtz, R. D., 1976, Changes in magnetic and telluric fields in a seismically active region of eastern Canada: Preliminary results of earthquake prediction studies, *Tectonophysics*, **34**, 219-230.
- Lee, T. J., Han, N., and Song, Y., 2010, Magnetotelluric survey applied to geothermal exploration: An example at Seokom Island, Korea, *Exploration Geophysics*, **41**, 61-28.
- Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., Son, J. S., and Suh, J. H., 2007, 3D magnetotelluric modeling including surface topography, *Geophysical Prospecting*, **55**, 277-287.
- Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., and Suh, J. H., 2008, Three-dimensional topography corrections of magnetotelluric data, *Geophys. J. Int.*, **174**, 464-474.
- Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., and Suh, J. H., 2009, Three-dimensional topographic and bathymetric effects on magnetotelluric responses in Jeju Island, Korea, *Geophys. J. Int.*, **176**, 457-466.
- Ting, S. C., and Hohmann, G. W., 1981, Integral equation modeling of three-dimensional magnetotelluric response, *Geophysics*, **46**, 182-197.
- Unsworth, M.J., Jones, A. G., Wei, W., Marquis, G., Gokarn, S. G., Spratt, J. E., and the INDEPTH0MT tem, 2005, Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data, *Nature*, **438**, 78-81.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. II, 641-711.
- Zonge, K. L., and Hughes, L. J., 1991, Controlled source audio-frequency magnetotellurics, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetics in Applied Geophysics*, Vol II, Soc. Expl. Geophys., 713-809