

수직 횡등방성 전기적 이방성을 고려한 자기지전류탐사 모델링

김빛나래 · 남명진 *

세종대학교 에너지자원공학과

Magnetotelluric modeling considering vertical transversely isotropic electrical anisotropy

Bitnarae Kim and Myung Jin Nam*

Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University

요약: 자연 전자기장을 이용하여 지하 매질의 전기적 구조를 규명하는 자기지전류(magnetotelluric; MT) 탐사의 정확한 해석을 위해서는 특정 전기적 구조에 대한 정확한 수치적 반응을 구할 수 있는 3차원 모델링이 필수적이다. 특히, 매질 내에 전기적 이방성이 있을 때는 MT 반응이 달라지므로 전기적 이방성의 영향을 고려한 MT 탐사 모델링이 필요하다. 특히, MT 탐사기법을 이용한 지열저류층의 모니터링과 같이 MT 반응의 작은 변화를 분석해야 하는 시간경과 자료의 해석의 경우, 대상 지역에 이방성이 존재할 경우 이를 고려할 수 있는 정확한 모델링이 필수적이다. 이 연구에서는 기존의 등방성만을 고려하던 유한차분법 MT 모델링 알고리즘을 수직 혹은 수평 횡등방성 이방성을 고려할 수 있도록 개선하였다. 개발한 알고리즘을 박리층 모델을 이용하여 검증한 후, 수직횡등방성 이방성이 MT 반응에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 향후에는 수평 횡등방성 이방성이 MT 반응에 미치는 영향에 대해서도 분석하고자 하며, 알고리즘을 더욱 발전시켜 경사 횡등방성 이방성까지 고려할 수 있도록 발전시키고자 한다.

주요어: 전기적 이방성, MT, 모니터링, 인공 지열 저류층

Abstract: Magnetotelluric (MT) survey investigates electrical structure of subsurface by measuring natural electromagnetic fields on the earth surface. For the accurate interpretation of MT data, the precise three-dimensional (3-D) modeling algorithm is prerequisite. Since MT responses are affected by electrical anisotropy of medium, the modeling algorithm has to incorporate the electrical anisotropy especially when analyzing time-lapse MT data sets, for monitoring engineered geothermal system (EGS) reservoir, because changes in different-vintage MT-data sets are small. This study developed a MT modeling algorithm for the simulation MT responses in the presence of electrical anisotropy by improving a pre-existing staggered-grid finite-difference MT modeling algorithm. After verifying the developed algorithm, we analyzed the effect of vertical transversely isotropic (VTI) anisotropy on MT responses. In addition, we are planning to extend the applicability of the developed algorithm which can simulate not only the horizontal transversely isotropic (HTI) anisotropy, but also the tilted transversely isotropic (TTI) anisotropy.

Keywords: electrical anisotropy, MT, monitoring, engineered geothermal system (EGS)

서 론

자기지전류(magnetotelluric; MT) 탐사법은 자연전자기장에 의한 지표에서의 전기장 및 자기장을 측정하여 지하 매질의

전기적 구조를 규명하는 탐사 방법으로 현재 많은 전자(electromagnetic; EM) 탐사법들 중 가장 성공적으로 활용되고 있는 탐사법이다. MT 탐사에 이용되는 송신원인 자연전자기장은 MT장이라고도 하며 이는 지전류(telluric current)와 지자기장(geomagnetic field)으로 이루어져 있다. MT장은 전리층과 자기권내 전류에 의해 기인하며, 이는 측정장소 및 시간에 따라 항상 변화하기 때문에 MT 탐사에서는 지구 내부의 전기전도도 구조를 규명하기 위해 측정된 전기장 및 자기장을 그대로 사용하는 것이 아니라 자기장과 전기장 간의 관계(Tikhonov, 1950)나 자기장 성분들간의 상호 관계(Vozoff, 1991)를 이용한다.

MT 탐사는 0.001 Hz에서 수십 kHz 범위의 낮은 진동수 소스를 이용하기 때문에 탐사심도가 매우 깊어 심부 전기비저항

Received: 22 September 2015; Final version Received: 30 November 2015;
Accepted: 30 November 2015

*Corresponding author

E-mail: nmj1203@gmail.com/nmj1203@sejong.ac.kr

Address: 209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

©2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구조를 규명하는 데 유용하여, 탄화수소 탐사(Orange, 1989; Berdichevsky and Dmitriev, 2002; Zhdanov *et al.*, 2004)뿐만 아니라 지구 지각 구조나 상부 맨틀에 대한 연구를 위한 심부 지질구조 탐사(Pham *et al.*, 1986; Slolon *et al.*, 2005), 광물 탐사(Tuncer, 2006), 환경 분야 탐사(Tezkan, 2005; Unsworth *et al.*, 2007) 등에도 활용되고 있다. MT 탐사는 특히 지열 에너지 분야에서 그 중요성이 매우 높는데(Goldstein, 1988; Bedrosian *et al.*, 2004; Mendrinis *et al.*, 2010), 최근에는 단순히 심부 지열에너지원의 탐사에 그치지 않고 인공 지열 저류층(engineered geothermal system; EGS)에 대한 모니터링 등에도 널리 이용되고 있다(e.g., Peacock *et al.*, 2013; Nam and Song, 2014).

특히, Peacock *et al.* (2013)은 호주 남부 Paralana 지역에서 인공 지열 저류층 모니터링을 위한 시간경과 MT 탐사를 수행하였는데, 그 반응의 변화 폭이 매우 작기 때문에 대상 지역에 존재하는 전기적 이방성을 고려한 자료 해석이 필요함을 확인하였다. MT 탐사 모니터링을 실시하면서 3D 모델링 결과와 비교하였는데 실제 지질 구조에는 이방성 구조가 존재하였으나 이를 등방성 이상체로 근사하여 모델링 하였기 때문에 겉보기 전기비저항이 과대평가될 수 있다고 주장하였다. 뿐만 아니라 Lee *et al.* (2007)은 Pek and Verner (1997)의 2차원 MT 모델링 코드를 이용하여 강원도 옥천대 지역에서 나타나는 이방성 매질의 특성을 연구하면서 이방성으로 인해 발생할 수 있는 수치적인 오차를 확인하였다.

전기적 이방성이란 매질 전기전도도가 방향에 따라 다른 경우를 말하며, 가장 많이 고려되는 것은 하나의 방향으로만 물성이 다르고 다른 방향에 수직인 평면 상에서는 모든 방향으로 물성 값이 같다는 횡등방성(Transverse Isotropy, TI)이며, 이러한 TI 이방성에는 수직횡등방성(Vertical Transverse Isotropy, VTI), 수평횡등방성(Horizontal Transverse Isotropy, HTI), 경사횡등방성(Tilted Transverse Isotropy, TTI)이 있다. 일반적으로 MT 연구에서 주로 다루어 왔던 것은 수직횡등방성으로 이는 수평방향의 전기전도도는 동일하고 수직 방향의 전기전도도만 다른 것으로 주로 수평 사암-셰일 박리층과 같이 공극이 큰 층과 작은 층이 교대로 쌓여 있을 때 나타나는 전기적 특성이다(Park *et al.*, 2014). 이러한 전기적 이방성을 가진 이상체가 지하 매질에 존재할 경우, 일반적인 등방성 이상체가 있는 것과는 전류 흐름이 다르게 나타나기 때문에, 수치 모델링에서 매질의 전기적 이방성에 대한 고려가 필요하다.

Mann (1965)은 MT 탐사에서 전기적 이방성에 대한 개념을 소개하면서 수치반응에서 이방성 매질이 등방성 매질과는 다른 결과를 보여준다는 것을 증명하였다. Reddy and Rankin (1975)이 최초로 이방성을 고려하는 2차원 MT 모델링 알고리즘을 제시하면서 이방성 층에 이방성을 지닌 암맥이 있는 모델을 분석하였다. 이방성을 고려하는 2차원 MT 모델링 코드로 현재까지 가장 널리 알려진 알고리즘은 Pek and Verner

(1997)으로 유한차분법(finite-difference method; FDM)을 이용하여 임의의 이방성에 대하여 지표면 MT 반응을 구하였다. 3차원 모델링으로는 Martinelli and Osella (1997)가 Rayleigh-Fourier 기법을 이용한 수직 이방성 3D 모델을 제시하였으며, Weidelt (1999)가 엇갈린 격자 유한차분법(staggered-grid finite-difference method)을 이용한 3차원 이방성 매질에서 MT 수치 반응 알고리즘을 개발하였다.

이방성을 고려한 3차원 MT 탐사 모델링은 국내에서는 아직 고려한 선례가 없기에, 이 연구에서는 수직횡등방성이나 수평횡등방성 이상체까지 고려할 수 있도록, 기존의 엇갈린 격자 유한차분 3차원 MT 모델링 알고리즘을 개선하고, 수직횡등방성 이상체가 MT 반응에 미치는 영향을 분석하고자 한다(기존 알고리즘에 경사횡등방성을 구현은 더욱 복잡하므로 이 연구에서는 감안하지 않는다). 이 연구에서는 먼저 MT 모델링에 이용되는 지배방정식과 전기적 이방성을 고려할 수 있는 MT 모델링 알고리즘에 대하여 간략히 설명한 후, 이를 박리층 모델과 비교함으로써 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다. 또한, 심부에 존재하는 지열 저류층과 전기적 이방성 이상체가 함께 있는 수치 반응을 통해 전기적 이방성 이상체의 영향을 분석하고자 한다. 이 연구에서는 Sasaki (1999)의 3차원 모델링 알고리즘을 기반으로 이방성을 고려할 수 있도록 모델링 알고리즘을 개발하였으며, MT 장의 송신원을 고려하기 위하여 1차원 배경매질을 가정한 Dirichlet 경계조건을 이용하였다.

전기적 이방성을 고려한 MT 모델링

Maxwell 방정식

MT 탐사는 인공적인 송신원을 이용하지 않고 낮은 진동수의 자연 전자기장을 지표면에서 측정하는 탐사법이다. MT 탐사에서 측정하는 전자기장은, 시간 의존성을 $e^{+i\omega t}$ 라고 할 때, 다음과 같은 진동수 영역에서의 Maxwell 방정식에 기초하여 설명할 수 있다.

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 는 각각 전기장 및 자기장이고, ω 는 각진동수, μ_0 는 진공에서의 투자율($=4\pi \times 10^{-7}$), σ 는 매질의 전기전도도이다. MT 탐사에서는 지구 대기권 내의 자연전자기장에 의한 지표 반응을 측정하므로, 인위적인 송신원은 없으므로 (1)식과 (2)식에 송신원이 없는 Maxwell 방정식을 고려하고 있지만, 이는 일반적으로 고려하고 있는 영역의 경계에서 전자기장 값을 알고 있는 경계값 미분방정식을 고려하고 있기 때문이다. 낮은 진동수를 이용하는 MT 탐사에서의 자연 전자기장은 탐사 대상 영역에서는 평면파로 가정할 수 있으며 공기 층과 지표면의 큰 물성 차이로 인해 이 입사 평면파는 입사각과 관계없이

지표면에서 수직으로 전파한다.

전기적 이방성을 고려한 MT 탐사 모델링

일반적으로 MT 탐사 모델링에서 매질의 전기전도도가 등방성이라는 가정 하에, 스칼라(scalar) 값을 이용하지만, 이 연구에서는 수직횡등방성이나 수평횡등방성의 전기적 이방성을 구현하기 위해 전기전도도를 다음과 같이 대각 행렬에만 값이 존재하는 텐서($\tilde{\sigma}$)로 가정하였다.

$$\sigma = \tilde{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 각각 x, y, z 방향의 전기전도도이다(경사 횡등방성의 경우에는 비대각성분에서 값이 존재하게 되어 수직횡등방성이나 수평횡등방성 이상체보다 고려해야 할 텐서 성분이 늘어나 계산이 복잡해진다.).

경계값 Maxwell 방정식을 풀기 위해서 먼저, (1)식 양변에 curl을 취하고, (2)식을 대입하여 정리하면 다음과 같은 전기장에 대한 Helmholtz 방정식을 얻는다.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu_0\tilde{\sigma}\mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

위 식을 전체 계산 영역에서 수치적으로 풀어 전기장을 계산한 후, (1)식을 이용하여 자기장을 계산함으로써 MT 탐사에서 측정하는 지표면 자연전자기장을 계산하게 된다(Kim *et al.*, 2004). 이때, (4)식은 송신원은 없지만 모델링 영역의 경계에 값이 존재하는 경계값 미분방정식이므로 경계조건에 대해서 고려해야 한다. 일반적으로 MT 탐사 모델링에서는 이상체가 모델링 영역 내에 존재하지만 계산 영역의 경계는 이상체의 영향이 미치지 않을 만큼 충분히 멀리 떨어져 있다고 가정하고, 이때 배경 매질은 일반적으로 층서구조를 이용한다. 즉, 평면파에 의한 1차원 층서구조에 대한 (4)식은 해석해가 존재하므로 이를 이용하여 경계 값을 계산한 후 (4)식을 수치적으로

계산한다.

이방성을 고려하기 위하여 (4)식을 엇갈린 격자를 이용한 유한차분법으로 차분식을 구성함에 있어 x, y, z 방향에 따라 서로 다른 전기전도도 값을 적용할 수 있도록 하였다(부록 A). 이와 같이 구성한 최종 선형방정식을 풀어서 전기장을 계산한 뒤, (1)식에 기초하여 보조장인 자기장을 계산하고, 원하는 수신기 위치에서 MT 반응인 걸보기비저항, 위상을 계산하였다. 이 연구에서는 이러한 MT 반응들 중 MT 자료의 역산에 비대각 임피던스 값으로부터 계산하는 걸보기비저항과 위상만이 가장 많이 이용되기 때문에 이들 반응만을 고려하였다.

수치 연구

횡등방성 이방성 중 이 연구에서는 수평 퇴적층에서 주로 관찰되는 수직횡등방성에 대해서만 수치 해석을 수행하였다. 이러한 수직횡등방성에서는 수평 방향 전기비저항은 동일하고 수직방향 전기비저항만 다르므로($\sigma_x = \sigma_y \neq \sigma_z$, 수평 전기전도도(σ_h)와 수직 전기전도도(σ_v)로 나누어 생각할 수 있다(그러므로 수평 전기비저항(ρ_h)과 수직 전기비저항(ρ_v)로도 생각할 수 있다). 전기적 이방성을 보이는 매질로는, 사암-셰일 박리층으로 이러한 층서에서는 전류의 흐름이 수직 방향보다 수평 방향으로 원활히 흐르게 되므로 수직 전기비저항이 수평 전기비저항 보다 크게 나타난다. 이 때, 수직 전기비저항과 수평 전기비저항의 관계를 이방성 계수(anisotropy coefficient, λ)로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\rho_v}{\rho_h} \quad (5)$$

알고리즘 검증

수직횡등방성 이상체를 고려한 MT 모델링 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 전기비저항이 다른 두 개의 얇은 층이 교

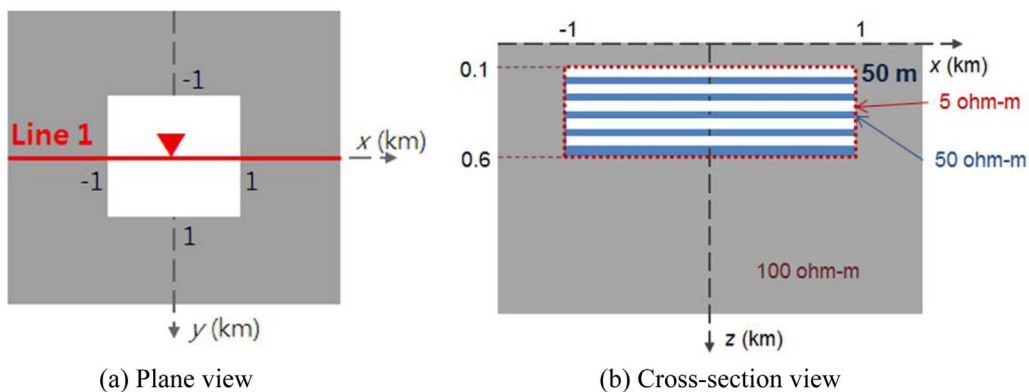


Fig. 1. (a) Plane and (b) cross-sectional views of 3D laminated model to verify the developed algorithm verification. The red line in (a) is a profile for Fig. 3 and the red triangle is a point for the sounding curves in Fig. 4. Shale zone (white area) and sand-stone zone (blue area) alternate with each other and each layer's thickness is 50 m.

대로 층서구조를 이루고 있는 박리층 모델을 Fig. 1과 같이 설정하여, 이를 같은 조건에서 이상체의 전기비저항만 다르게 설정한 이방성 모델 및 등방성 모델과 비교하였다(저자들이 찾아본 바로 기존의 연구 중 수직횡등방성 MT 반응 계산 결과를 제시한 믿을 만한 저널 논문을 찾을 수 없어, 본 연구에서 개발한 알고리즘을 검증할 수 있는 유일한 방법이 이와 같은 모델을 상정하는 것이라 판단하였다). 박리층 모델은 이방성 모델 중 대표적인 사암-셰일 박리층을 가정하였는데 일반적으로 셰일은 공극률이 작지만 분자 구조 내 수분 때문에 전기비저항이 낮은 특성을 고려하여 셰일층의 전기비저항은 5 ohm-m로 설정하였고, 사암은 셰일에 비해 전기비저항이 높으므로 사암층의 전기비저항은 50 ohm-m로 설정하였다(Fig. 1b). 지표면으로부터 100 m 아래에 위치한 박리층 이상체의 총 두께는 500 m이며, 이상체는 총 10개의 층으로 각각 50 m 두께를 가지며, 수치모델링 격자는 61 × 61 × 74로 하였다. 전기적 이방성 이상체 모델(Fig. 2a)에서 수직 전기비저항(ρ_v)과 수평전기비저항(ρ_h)은 Klein 모델(Park *et al.*, 2014)을 이용하여 계산하였다.

$$\rho_v = V_m \cdot \rho_m + V_M \cdot \rho_M \quad (6)$$

$$\rho_h = \left(\frac{V_m}{\rho_m} + \frac{V_M}{\rho_M} \right)^{-1} \quad (7)$$

여기서 ρ_m 는 공극률이 작은 층의 전기비저항이며, ρ_M 는 공극률이 큰 층의 전기비저항이다(이 때 공극률이 작은 층을 셰일층, 공극률이 큰 층을 사암층이라고 생각해도 무방하다). V_m 과 V_M 는 각각 공극률이 작은 층의 부피비와 큰 층의 부피비이며 두 층이 박리층 이상체 내에서 두께가 일정하므로 $V_m = V_M = 0.5$ 라고 할 수 있다. 식 (6), (7)을 이용하였을 때 얻은 이방성 이상체의 수직전기비저항은 27.5 ohm-m이며, 수평전기비저항은 9.1 ohm-m이다. 흔히 이방성 모델의 수평 전기비저항은 등방성 모델의 전기비저항과 같다고 보기 때문에 등방성 모델의 전기비저항은 9.1 ohm-m로 상정하였다(Fig. 2b). 물리검층에서는 이방성 모델 대신 유효 등방성 모델을 사용하기도 하는데 이를 이방성 모델 결과와 함께 비교하기 위해 Moran-Gianzero 모델을 이용하여(Moran and Gianzero, 1979) 유효 등방성 전기비저항을 구하였으며($\rho_t = 15.8$ ohm-m) 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$\rho_t = \sqrt{\rho_v \cdot \rho_h} \quad (8)$$

진동수 0.01 Hz에 대한 수치 모델링 결과로부터 겉보기 전기비저항과 위상을 축선에 따라 분석한 그래프는 Fig. 3과 같다. 겉보기 전기비저항과 위상 모두 도시하였을 때 xy 분극(Fig. 3a)에서 yx 분극(Fig. 3b)보다 상대적으로 더 큰 반응이 나타났는데 박리층 모델(파란색)과 등방성 모델의 결과(빨간색)는 상당히 비슷한 경향성과 값을 보였다. 반면, 유효 등방성 모

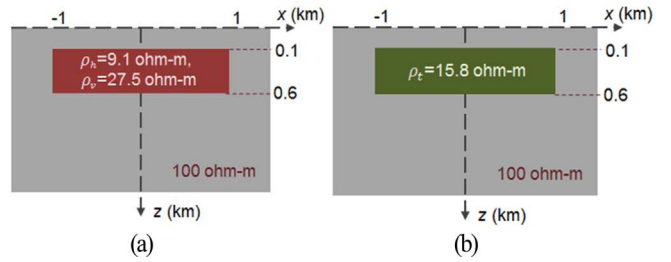


Fig. 2. Cross-sectional views of (a) the anisotropic model corresponding with the laminated model in Fig. 1 and (b) the isotropic model with the effective isotropic resistivity from Moran-Gianzero equation (Park *et al.*, 2014).

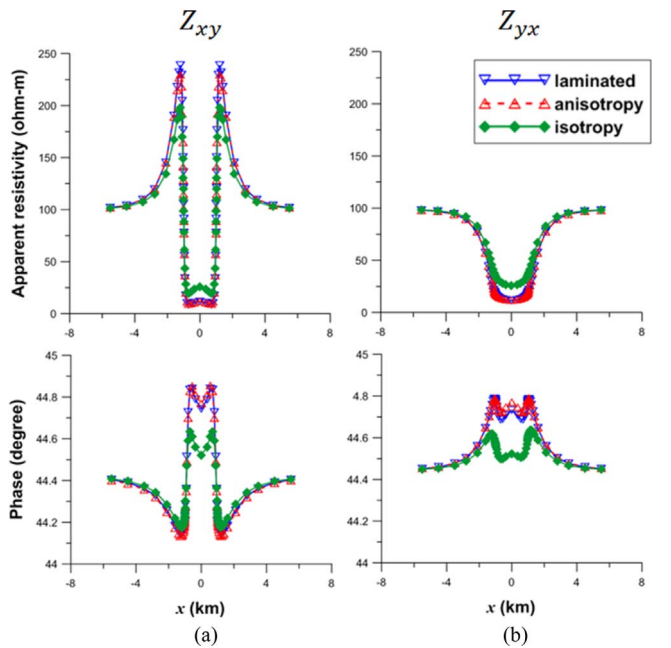


Fig. 3. Modeling results along the line in Fig. 1 at 0.01 Hz; apparent resistivity and phase of (a) Z_{xy} and (b) Z_{yx} mode.

델(초록색)은 경향성은 비슷하지만 값에서 다소 차이를 보인다. 이는 x, y 원점에서 진동수에 따른 반응 그래프(Fig. 4)에서도 확인할 수 있는데, 상대적으로 높은 진동수 영역에서는 다소 차이가 나지만 낮은 진동수 영역으로 갈수록 값이 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 로그 스케일로 그려진 겉보기 비저항 그래프의 특성상 차이가 많이 나타나는 것으로 보이나, 실제로는 거의 차이 없는 결과 값을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 이 연구에서 채택한 이방성 수치모델링 알고리즘의 타당성을 확인할 수 있었다.

다만, 유효 등방성 모델은 겉보기 전기비저항에서는 큰 차이를 보이며 위상에서도 나머지 두 모델과 차이를 보이는 것으로 보아 MT에서는 수직 횡등방성에 대해 유효 등방성 모델이 잘 맞지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 유효 등방성 모델이 개발되고 적용된 분야인 물리검층에서는 검층 환경의 특성상, 전류가 주로 수직방향으로 흐르지만 자연 평면파에 의한

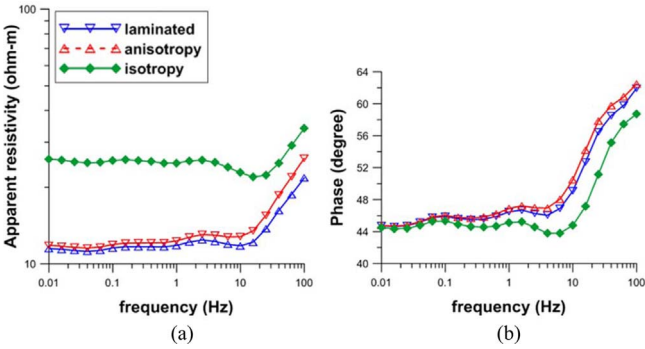


Fig. 4. Sounding curves at the center of model. (a) Apparent resistivity and (b) phase of Z_{xy} mode.

전자기장을 측정하는 MT 탐사에서는 주된 전류 흐름이 수평 방향이기 때문이다.

수치 실험: 지열 저류층과 전기적 이방성 이상체 모델

지열 저류층 상부의 전기적 이방성을 가진 이상체의 영향을 분석하기 위해 Fig. 5와 같은 모델을 설정하였다. 인공 지열 저류층을 모사하기 위해 주입정으로부터 생산정으로 물이 흐른다고 가정하여 $2 \times 0.5 \times 1$ (km)의 크기로 x 축을 따라 긴 모양의 전기비저항 이상대를 심도 2 km에 설정하였고 배경 전기비저항은 1000 ohm-m이며 지열 저류층 전기비저항은 1 ohm-m로 설정하였다. 또한, 사암-셰일 박리층과 같은 수직 이방성을 지닌 층적 퇴적층이 지열 저류층을 덮고 있는 상황을 구현하기 위해 지표면에 위치한 수직 이방성 전기비저항 이상체의 y 축 방향 길이는 2.5 km, 두께는 2 km으로, 수평 전기비저항은 5 ohm-m로 설정하였다. 전기적 이방성이 있을 때와 그렇지 않을 때의 반응을 비교하기 위해 이상체가 이방성을 가질 때와 등방성을 가질 때(이 때 전기비저항은 수평 전기비저항과 같은 5 ohm-m)로 나누어 모델링 하고 함께 그래프에 도시하여 이방성 효과를 가시적으로 볼 수 있도록 하였다.

진동수 및 수직횡등방성 이방성 이상체 길이에 따른 MT 반응 변화 양상

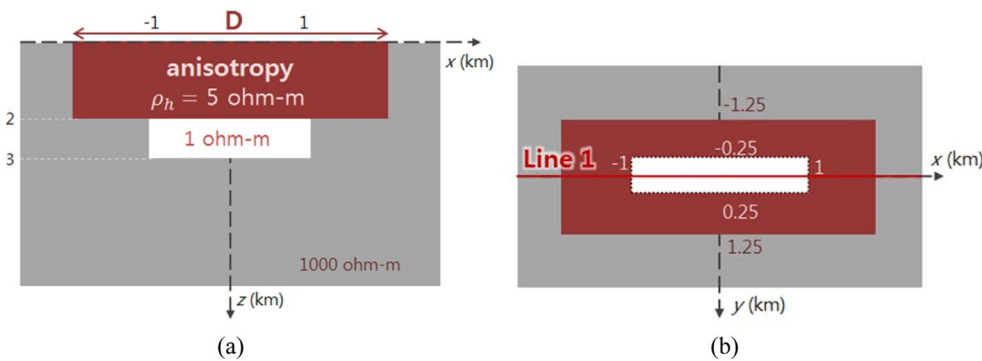


Fig. 5. (a) Plane and (b) cross section views of the 3D model with a geothermal reservoir underlying an anisotropic overburden.

이방성 계수가 $2(\lambda=2)$ 인 수직횡등방성 전기적 이상체($\rho_v = 20$ ohm-m)의 길이에 따른 MT 반응의 변화를 보기 위해 이상체의 x 축 방향의 길이(D)가 2 km, 4 km, 6 km로 늘어날 때 (Fig. 5a)의 반응을 계산하였다.

- 진동수의 영향

먼저 측선을 따라 나타나는 겉보기 전기비저항과 위상의 양상을 보기 위해 이방성 이상체 길이가 2 km일 때의 진동수 0.1 Hz 와 10 Hz의 수치모델링 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 두 진동수 모델링 결과 모두 상부의 이상체가 등방성일 때와 비교하여, 수직 횡등방성 이방성을 가질때 MT 반응의 차이를 보인다. 특히, 상대적으로 낮은 진동수인 0.1 Hz일 때 겉보기 전기비저항 값의 차이가 확연한 반면, 상대적으로 높은 진동수

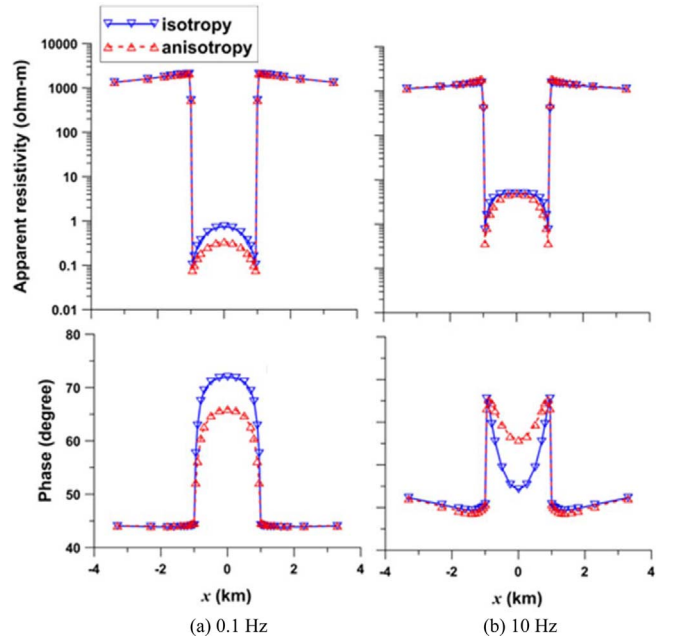


Fig. 6. Modeling results along the line when $D = 2$ km (Fig. 5); apparent resistivity and phase of Z_{xy} mode (a) at 0.1 Hz and (b) 10 Hz. The blue and red lines show the curves of the models with isotropic and anisotropic overburden ($\rho_v = 20$ ohm-m), respectively.

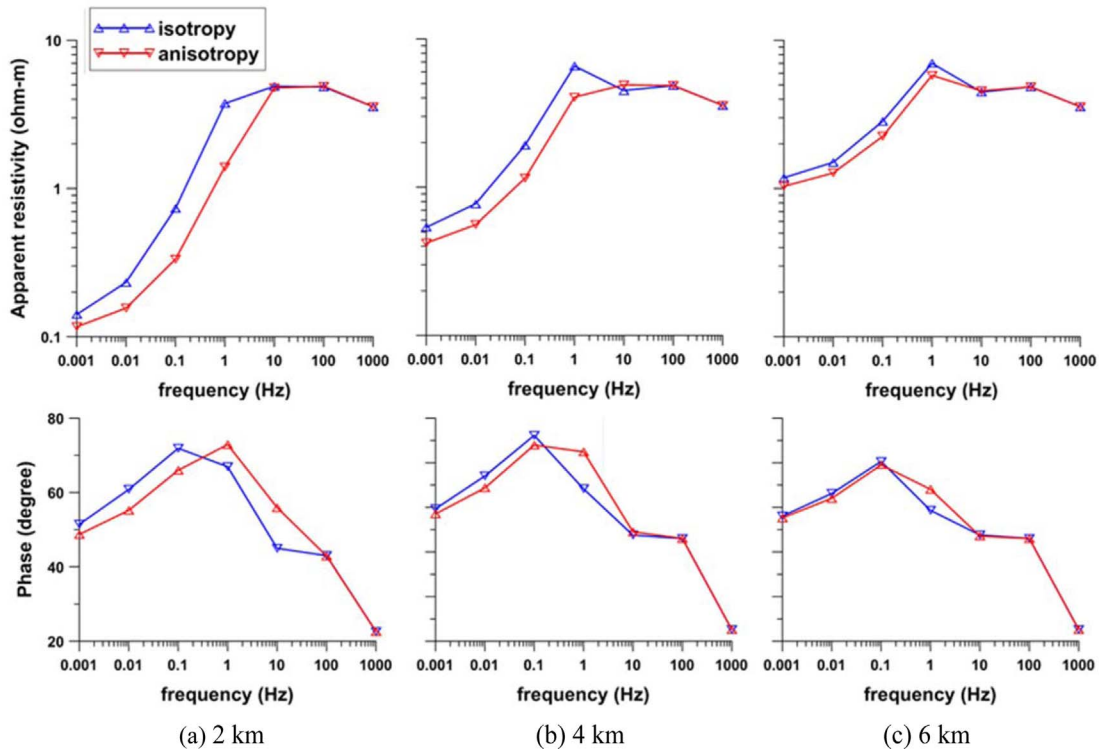


Fig. 7. Zxy mode sounding curves of the geothermal reservoir models (Fig. 5) with (a) 2 km, (b) 4 km, (c) 6 km length overburden at the center of model. The blue and red lines show the curves of the models with isotropic and anisotropic overburden respectively.

인 10 Hz에서는 겉보기비저항의 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 그러나 위상에 있어서는 두 진동수 결과 모두에서 차이를 보인다. 이러한 진동수에 따른 MT 반응의 차이는, x 방향의 전기장을 이용하는 Zxy 모드에서 x 방향 전류 흐름의 왜곡에 의해 더욱 크게 영향을 받게 된다는 점(Wannamaker *et al.*, 1984; Nam *et al.*, 2008)과 진동수에 따른 표피심도(skin depth)로 설명될 수 있을 것이다. 이러한 진동수에 따른 전기적 이상체 영향을 보다 면밀히 관찰하기 위해서, 상부 이상체가 수직횡등방성 이방성을 가질 때와 가지지 않을 때의 가장 큰 차이를 보일 것으로 예상되는 이상체 중앙(수평 원점)에 위치한 수신기에서의 MT 반응을 분석하였다.

상부 2 km 이상체 중앙에서 Zxy 모드 MT 반응을 진동수에 따라 계산한 결과(Fig. 7a)를 살펴보면 겉보기 비저항은 0.001 Hz에서 1 Hz까지는 그 차이가 일정하다가 1 Hz부터 줄어들어 10 Hz에서는 상부 이상체의 전기적 이방성 유무와는 무관하게 동일한 겉보기 전기비저항이 나타나고 있다. 진동수가 높아지면서(10 Hz 보다 커지면) 이방성 효과가 최소로 나타나는데, 이는 이상체 경계에서 발생한 수직 방향의 전류의 영향이 이방성의 중앙까지 도달하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 전기장이 수평으로 분극된 평면파 송신원을 가정하는 MT 탐사에서 수직횡등방성 이방성의 영향 즉 수직 전기비저항의 영향이 나타나기 위해서는 수직방향의 전류의 흐름이 있어야 하며, 이러한 수직방향의 전류 흐름은 이상체의 양 끝단

에서 가장 크게 발생한다(1차원 층서 구조인 경우에는 모든 진동수 영역에서 수직방향 전류 흐름이 없기 때문에 수직횡등방성 이방성의 영향은 나타나지 않을 것이다). 이에 대해서는 다양한 크기의 수직횡등방성 이상체에 대한 진동수에 따른 반응의 분석을 통해 보다 심도 있는 분석을 향후 수행하여야 할 것이다.

겉보기비저항과 달리(비록 그 양상은 다르지만) 위상은 0.001 Hz에서 100 Hz까지 전기적 이방성의 영향이 관찰됨을 알 수 있다. 지표 측선상의 겉보기 전기비저항(Fig. 6a)과 위상(Fig. 6b) 모두 이방성 이상체의 중앙 부분에서 가장 큰 차이를 보이며 이상체의 x축 가장자리에 가까워질수록 등방성 그래프와 이방성 그래프가 수렴하는 것을 볼 수 있다. 위상의 경우, 대체로 0.1 Hz 이하에서는 이상체가 이방성일 때보다 등방성일 때 위상이 더 크게 나타났으나(Fig. 7b) 진동수가 1 Hz 이상일 때 이방성 위상이 등방성 위상 보다 크게 나타나거나 거의 비슷하게 나타났다.

- 수직횡등방성 이방성의 길이에 따른 영향

이상체 중앙의 지표측점의 진동수별 분석 곡선 그래프에서 겉보기 전기비저항(Fig. 7)의 경우 이상체 길이의 변화와 상관없이 높은 진동수 영역에서는 이상체의 이방성 여부와 상관없이 값의 차이가 보이지 않다가 10 Hz 이하에서부터 차이가 나타난다. 또한, 겉보기 전기비저항과 위상 모두 전기비저항 이

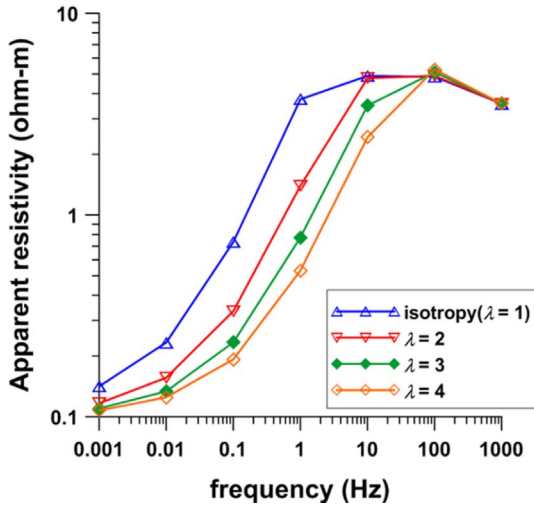


Fig. 8. Comparison of Z_{xy} mode apparent resistivities with respect to anisotropy coefficient. The length of overburden is 2 km.

상체 길이가 가장 작은 2 km일 때 차이가 가장 크게 났으며 이상체 길이가 6 km일 때 차이가 가장 적었다. 수직 횡등방성 이방성 이상체가 지열 저류층과 같은 전기비저항 이상체와 함께 있을 경우 수직 전류흐름이 두 이상체의 양 끝 가장자리에 나타난다. 때문에 이방성 이상체의 길이가 줄어들수록 두 이상체의 수직 전류 흐름이 겹쳐져 수직 횡등방성 이방성 효과가 더 커지는 것이라 볼 수 있다.

- 이방성 계수에 따른 MT 반응 변화 양상

이상체의 이방성 특성 변화에 따른 반응 양상을 분석하기 위해, 이방성 이상체의 이방성 계수를 1, 2, 3 그리고 4로 각각 변경하면서 MT 반응을 구한 결과를 비교하였다(Fig. 8). 이상체의 x 축 폭은 앞선 모델링 결과에서 이방성 결과와 등방성 결과 차이가 가장 컸던 2 km로 설정하였다. 수평 전기비저항 (ρ_h)이 5 ohm-m라고 하면 이방성 계수가 1, 2, 3, 4로 변할 때, (5)식을 이용하여 계산되는 수직 전기비저항(ρ_v)은 각각 5, 20, 45, 80 ohm-m 이다. 이방성 계수가 1, 2, 3, 4로 증가할수록 이방성 모델의 Z_{xy} 모드 겹보기 전기비저항이 등방성일 때 보다 그 크기가 감소하였으며, 그 변화폭은 점점 줄어들었다. 특히, 변화가 가장 크게 나타난 1 Hz에서의 겹보기 전기비저항은 등방성(이방성 계수 $\lambda = 1$) 모델 대비 62.7% ($\lambda = 2$), 79.3% ($\lambda = 3$), 85.8% ($\lambda = 4$) 감소하였으나 변화폭은 2.3, 0.62, 0.24 ohm-m 로 점점 줄어든다. 이러한 경향은 1 Hz보다 낮은 주파수에서도 나타났으며 이를 바탕으로 이방성 계수가 커진다고 하여 이방성 효과도 선형적으로 커지는 것은 아님을 알 수 있다.

결 론

전기적 이방성은 방향에 따라 매질의 전기비저항이 다를 때

나타난다. 이 연구에서는 수직 방향과 수평 방향의 전기비저항이 다른 이방성 매질의 전기적 특성을 고려할 수 있는 MT 모델링 알고리즘을 개발하였다. 이에 대한 검증을 위해 전기적 이방성 모델 중 대표적인 사암-셰일 박리층 모델과 개발된 알고리즘으로 구현한 이방성 모델, 그리고 물리검층에서 이방성 대신 사용되는 유효 등방성 모델에 대하여 수치 모델링을 수행하고 각각의 결과를 서로 비교하였다. 박리층 모델과 이방성 모델에 대한 결과는 높은 진동수에서는 약간의 차이를 보이나 거의 동일하게 나타났으나, 유효 등방성 모델에 대한 결과는 다른 두 모델의 결과에 비해 겹보기 비저항과 위상에서 큰 차이를 보여 MT 자료 해석에서는 적합하지 않을 것으로 판단된다. 심부 2 km에 위치한 지열 저류층과 그 상부에 위치한 이방성 이상체에 대한 수치 모형 반응에서는 이방성 이상체의 길이가 줄어들수록 수직 전기비저항의 영향이 크게 나타났다. 또한, 이방성 계수가 커질수록 등방성 결과와 차이는 커지지만 그 변화폭은 점점 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 향후 이 연구에서 개발한 MT 모델링 알고리즘을 기반으로 수직횡등방성뿐만 아니라 수평, 경사횡등방성 이상체나 지층에 의한 영향 등에 대한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원(No. 20133030000220)을 받아 수행한 연구 논문입니다.

References

- Bedrosianm, P. A., Weckmann, U., Ritter, O., Hammer, C., Hübner, J., and Jung, A., 2004, Electromagnetic monitoring of the Gross Schönebeck stimulation experiment, *proceedings Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gessellschaft*, **64**, 124-130.
- Berdichevskii, M. N., Dmitriev, V. I., and Keller, G. V., 2002, Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems, No. 11, *Society of Exploration Geophysicists Books*.
- Goldstein, N. E., 1988, Subregional and detailed exploration for geothermal-hydrothermal resources. *Gordon and Breach Science Publishers*, **1**, 303-431.
- Han, N. R., Nam, M. J., Kim, H. J., Lee, T. J., Song, Y. H., and Suh, J. H., 2008, Application of Two-Dimensional Boundary Condition to Three-Dimensional Magnetotelluric Modeling, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **11**(4), 318-325.
- Klein, J. D., Martin, P. R., and Allen, D. F., 1997, The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs, *The Log Analyst*, **38**(3), 25-36.
- Kim, H. J., Nam, M. J., Song, Y. H., and Suh, J. H., 2004, Review on the Three-dimensional magnetotelluric modeling,

- Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, **7**(2), 148-154.
- Lee, C. K., Lee, H. S., Kwon, B. D., Cho, I. K., Oh, S. H., and Lee, T. J., 2007, Electrical anisotropy of the Okchon belt inferred from magnetotelluric data, *Journal of the Korean Earth Science Society*, **28**, 227-239.
- Mann, J. E., 1965, The importance of anisotropic conductivity in magnetotelluric interpretation, *Journal of Geophysical Research*, **70**, 2940-2942.
- Martinelli, P., and Osella, A., 1997, MT forward modeling of 3-D anisotropic electrical conductivity structures using the Rayleigh-Fourier method, *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, **49**(11-12), 1499-1518.
- Mendrinou, E., Choropanitis, I., Polyzou, O., and Karytas, C., 2010, Exploring for geothermal resources in Greece, *Geothermics*, **39**(1), 124-137.
- Moran, J. H., and Gianzero, S., 1979, Effects of formation anisotropy on resistivity-logging measurements, *Geophysics*, **44**, pp. 1266-1286.
- Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., and Suh, J. H., 2008, Three-dimensional topography corrections of magnetotelluric data, *Geophysical Journal International*, **174**(2), 464-474.
- Nam, M. J., and Song, Y. H., 2014, A study on magnetotelluric-based 4D imaging of engineered geothermal reservoir, Nov. 17-20, AFORE2014, Yeosu, pp. 179.
- Orange, A. A., 1989, Magnetotelluric exploration for hydrocarbons, *Proceedings of the IEEE*, **77**(2), 287-317.
- Park, C. H., Cheon, S. W., Ku, B. J., and Nam, M. J., 2014, A Review and Analysis on Constructing Electrical Resistivity Models for Hydrocarbon Reservoirs Based on the Characteristics of Shale Distribution, *Journal of Korean Society Mineral Energy Resource Eng.*, **51**(1), 97-115.
- Peacock, J. R., Thiel, S., Heinson, G. S., and Reid, P., 2013, Time-lapse magnetotelluric monitoring of an enhanced geothermal system, *Society of Exploration Geophysicists*, **78**(3), B121-B130.
- Pek, J., and Verner, T., 1997, Finite-difference modelling of magnetotelluric fields in two-dimensional anisotropic media, *Geophysical Journal International*, **128**, 505-521.
- Pham, V. N., Boyer, D., Therme, P., Yuan, X. C., Li, L., and Jin, G. Y., 1986, Partial melting zones in the crust in southern Tibet from magnetotelluric results, *Nature*, **319**, 310-314.
- Reddy, I. K., and Rankin, D., 1975, Magnetotelluric response of laterally inhomogeneous and anisotropic media, *Society of Exploration Geophysicists*, **40**, 1035-1045.
- Sasaki, Y., 1999, Three-dimensional frequency-domain electromagnetic modeling using the finite-difference method, *Butsuri Tansa*, **52**, 421-431.
- Slolon, K. D., Jones, A. G., Nelson, K. D., Unsworth, M. J., Kidd, W. F., Wei, W., Tan, H., Jin, S., Deng, M., Booker, J. R., Li, S., and Bedrosian, P., 2005, Structure of the crust in the vicinity of the Banggong-Nujiang suture in central Tibet from INDEPTH magnetotelluric data, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B10102.
- Tezkan, B., Georgescu, P., and Fauzi, U., 2005, A radio-magnetotelluric survey on an oil-contaminated area near the Brazi Refinery, *Romania Geophysical Prospecting*, **53**, 311-323.
- Tikhonov, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, *Dokl. Aca. Nauk., USSR*, **73**, 295-297.
- Unsworth, M., Soyer, W., Tuncer, V., Wagner, A., and Barners, D., 2007, Hydrogeologic assessment of the Amchitka Island nuclear test site (Alaska) with magnetotellurics, *Geophysics*, **72**(3), B47-B57.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian M. N., *Electromagnetic methods in applied geophysics, Society of Exploration Geophysicists*, **2**, 641-711.
- Wannamaker, P. E., Hohmann, G. W., and Ward, S. H., 1984, Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths, *Geophysics*, **49**(9), 1517-1533.
- Weidelt, P., 1999, 3D conductivity models: implications of electrical anisotropy, *Society of Exploration Geophysicists*, pp. 119-137.
- Zhdanov, M. S., Wan, L., Constable, S., and Key, K., 2004, New development in 3-D marine MT modeling and inversion for off-shore petroleum exploration, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pp. 588-591.

부록. 전기적 이방성을 고려한 엇갈린 격자 유한 차분식 전개

시간 의존성을 $e^{i\omega t}$ 로 가정하면 송신원을 고려하지 않은 진동수 영역의 전기장에 대한 Maxwell 방정식은 다음과 같은 Helmholtz 방정식으로 표시된다.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu_0\tilde{\sigma}\mathbf{E} = 0 \quad (\text{A-1})$$

여기서 $\tilde{\sigma}$ 는 전기비저항 텐서로 x, y, z 축 방향으로 각각 전기전도도가 다르다고 가정하면 식 (3)과 같이 대각 성분만 각 방향에 따른 값을 가지고, 나머지 비대각 성분들은 0이 된다. 식 (A-1)을 수치적으로 풀기 위해 Faraday 법칙과 Ampere 법칙을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{i}{\omega\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \\ H_y &= \frac{i}{\omega\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

$$\begin{aligned} H_z &= \frac{i}{\omega\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \tilde{\sigma}_x E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \tilde{\sigma}_y E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \tilde{\sigma}_z E_z \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

(A-1)식에 대한 차분식 구성에 대한 이해를 돕기 위해, (A-3) 식 첫 번째 식인 E_x 에 대한 식의 차분 전개를 보이하고자 한다. 먼저 고려하고 있는 (A-3)의 첫 번째 식을 다음과 같이 전개 된다.

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_x\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) E_x\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) &= \frac{H_z\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right)}{\frac{1}{2}(\Delta y_j + \Delta y_{j-1})} \\ &\quad - \frac{H_x\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - H_x\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right)}{\frac{1}{2}(\Delta z_k + \Delta z_{k-1})} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

여기서

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_x\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) &= \frac{\sigma_x(i, j, k)\Delta y_j\Delta z_k + \sigma_x(i, j-1, k)\Delta y_{j-1}\Delta z_k}{(\Delta y_j + \Delta y_{j-1})(\Delta z_k + \Delta z_{k-1})} \\ &\quad + \frac{\sigma_x(i, j-1, k-1)\Delta y_{j-1}\Delta z_{k-1}}{(\Delta y_j + \Delta y_{j-1})(\Delta z_k + \Delta z_{k-1})} \end{aligned}$$

(A-4)식에서 자기장 값들은 (A-2)식을 대입하여 모두 전기장에 대한 식으로 정리되어, (A-1) 식의 성분들 중 x 방향의 차분식을 구성할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_x\left(1+\frac{1}{2}, j, k\right) &\left\{ \begin{aligned} &i\omega\mu\tilde{\sigma}_x\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \\ &+ \frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta y_j} + \frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta y_{j-1}} \\ &+ \frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_k} + \frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_{k-1}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-6}) \\ &+ E_x\left(1+\frac{1}{2}, j-1, k\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta y_{j-1}} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ E_x\left(1+\frac{1}{2}, j, k-1\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_{k-1}} \right\} \\ &+ E_x\left(1+\frac{1}{2}, j, k+1\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_k} \right\} \\ &+ E_x\left(1+\frac{1}{2}, j+1, k\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_{k-1}} \right\} \\ &+ E_y\left(i, j-\frac{1}{2}, k\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta x_j} \right\} \\ &+ E_y\left(i+1, j-\frac{1}{2}, k\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta x_j} \right\} \\ &+ E_y\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta x_j} \right\} \\ &+ E_y\left(i+1, j+\frac{1}{2}, k\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}} \frac{1}{\Delta x_j} \right\} \\ &+ E_y\left(i, j, k-\frac{1}{2}\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_{k-1}} \right\} \\ &+ E_y\left(i+1, j, k-\frac{1}{2}\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_j} \right\} \\ &+ E_z\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_k} \right\} \\ &+ E_z\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_k} \right\} \\ &+ E_z\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) \left\{ -\frac{2}{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}} \frac{1}{\Delta z_k} \right\} \end{aligned}$$

위와 같이, (3)식의 두 번째와 세 번째 식을 전개하면, y 와 z 성분 방향의 (A-1) 차분식을 구성할 수 있게 된다.