

FDM을 이용한 MT 탐사의 3차원 모형 반응 연구

한누리¹⁾ · 이성곤²⁾ · 송윤호²⁾ · 서정희¹⁾

An Interpretive Analysis of Magnetotelluric Response for a Three-dimensional Body Using FDM

Nuree Han¹⁾, Seong Kon Lee²⁾, Yoonho Song²⁾ and Jung Hee Suh¹⁾

요 약 : 본 논문에서는 자기지전류 탐사법에 대한 3차원 이상체의 모형 반응 결과를 분석하였다. 분석에 이용된 3차원 모형은 비전도성 배경 매질 내에 전도성 고립이상체가 존재하는 모형과, 같은 모형에 전도성 표토층을 추가한 모형이다. 지하의 전도성 이상체에 의한 길보기 전기비저항 이상에는 뚜렷한 주파수 의존성이 존재하며, 이는 이상체 주변에 발생되는 전류 집중 및 유도 전류 거동의 주파수 의존성 때문이다. 지표에서 tipper와 induction vector의 반응에도 뚜렷한 주파수 의존성이 존재하였으며, 그 외에도 tipper와 induction vector의 반응은 이상체의 위치와 직접적인 연관성이 존재하였다. 또한, 2차원 탐사를 가정하여 한 축선에서 길보기 전기비저항과 위상, induction vector를 분석하면, 3차원 이상체의 존재 여부 및 위치 파악에 도움을 줄 것으로 판단되었다. 전도성 표토층을 추가한 모형의 반응은 대체적으로 고립이상체 모형의 반응과 비슷한 양상을 나타내었지만, 전도성 표토층의 영향으로 이상체에 의한 반응의 크기가 감소하였으며, 이상체의 영향이 나타나는 영역도 크게 감소하였다. 위와 같이 본 연구에서 논의된 3차원 모형 반응에 대한 분석 결과 및 그 방법은 지하 구조의 3차원 반응의 이해와 MT 탐사 자료의 해석에 효과적인 지침이 될 것으로 생각된다.

주요어 : 3차원 MT 모형 반응 계산, 길보기 전기비저항, 위상, 이차 전기장, tipper, induction vector

Abstract : In this study, the characteristics of magnetotelluric (MT) responses due to a three-dimensional (3-D) body are analyzed with 3-D numerical modeling. The first model for the analysis consists of a single isolated conductive body embedded in a resistive homogeneous half-space. The second model has an additional conductive overburden while the other conditions remain the same as the first one. The analysis of apparent resistivities shows well that the 3-D effects are dominant over some frequency range for the first model. Two mechanisms, current channeling and induction, for secondary electric fields due to the conductive body are analyzed at various frequencies: at high frequencies induction is more dominant than channeling, while at low frequencies channeling is more dominant than induction. Tippers have a strong relation to the position of anomalous body and the real and imaginary parts of induction vector also indicate the position of anomalous body. Off-line conductive anomaly sometimes causes severe problem in 2-D interpretation. In such case, induction vector analysis can give information on the existence and location of the anomalous body. Each parameter of the second model shows similar responses as those of the first model. The only difference is that the magnitude of all parameters is decreased and that the domain showing the 3-D effects becomes narrower. As shown in this study, the analysis of 3-D effects provides a useful and effective means to understand the 3-D subsurface structure and to interpret MT survey data.

Keywords : 3-D MT modeling, apparent resistivity, phase, secondary field, tipper, induction vector

서 론

자기지전류(magnetotelluric, 이하 MT) 탐사법은 대략 0.01 Hz에서 수십 Hz의 주파수를 갖는 자연 전자기장을 이용하여 지하의 전기전도도를 규명하는 전자탐사법이다. 이 탐사법은 자연 전자기장의 저주파 특성으로 인하여 심부 지열 탐사, 지각 구조 규명 및 지진의 관측과 원인 규명에 많이 이용되었으

며, 최근 국내에서도 포항 지역의 지열 개발을 위해 한국지질자원연구원을 중심으로 활발한 탐사가 진행 중이다(송윤호 등, 2003).

현재 MT 탐사법은 장비 및 측정 시간, 비용 등의 현실적인 제약으로 인하여 3차원 탐사를 적용하기 어렵다. 그 결과, 축선을 설정하여 자료를 측정하고, 2차원 역산 해석을 하는 방법이 주로 이루어지고 있다. 지하구조를 2차원으로 가정하면,

*2004년 4월 6일 접수

1) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 물리탐사연구실

2) 한국지질자원연구원

입사 전기장이 지질 구조선에 평행한 TE(transverse electric) 모드와 입사 전기장이 지질 구조선에 수직인 TM(transverse magnetic) 모드로 전자기장을 완전히 분리할 수 있어 이론적으로도 수식을 매우 단순화시킬 수 있다. 따라서, 2차원 수치 모형과 역산에 대해서는 많은 연구가 발표되었다(이성곤, 1993; Sasaki, 1989).

그러나, 실제 지하구조는 3차원이므로 지하구조를 2차원으로 가정한 2차원 역산 해석을 적용하기 위해서는 매우 깊은 주의가 필요하며, 또한 2차원 가정이 실제 지질구조와 많은 차이가 있는 경우 오류를 범하기 쉽다. 특히, 3차원의 경우에는 전기장의 입사 방향에 관계없이 전하가 집적되는 면이 존재하므로 2차원에서와 같은 모드 분리 방식이 성립되지 않는다. 이러한 문제의 복잡성 때문에 3차원의 경우 임의의 모형에 대한 전자기장의 거동을 정확히 예측하기 매우 어렵다. 따라서 모형 반응 계산과 자료 해석 등의 기술이 상대적으로 늦게 발달했고 아직도 수치 모형 프로그램들은 일반화되지 않고 있으며, 제한적인 모델에 대한 연구 결과만이 발표되고 있다. 제한적이지만, 모형 반응 계산을 통하여 3차원 모형 반응을 분석하는 것은 지하구조의 3차원 반응을 이해하고 MT 탐사 자료의 효율적인 해석을 위하여 매우 중요하다.

본 논문에서는 3차원 MT 모형 반응 계산을 이용하여 3차원 MT 반응을 분석하였다. 모형 반응 계산에 이용한 3차원 MT 모델링은 Mackie *et al.*(1994)의 알고리즘을 기본으로 했다. 이는 staggered grid(Yee, 1966)상에서 유한차분법을 이용하여 자기장 해를 구하는 것으로, 본 연구에서는 연구 목적에 맞게 이를 변형하여 사용했다. 특히, 이 연구에서는 3차원 이상체 모형에 의한 반응을 검토하기 전기비저항과 위상, 이차 전기장의 vector map, tipper와 induction vector 등 MT 반응의 해석 매개변수를 이용해서 분석하였다. 또한, 이상체 및 관측점간의 위치에 따른 매개변수들의 변화를 분석하고, 이를 2차원의 경우와 비교하여 MT 현장 탐사 자료 해석에 지침을 제공하고자 하였다.

이 론

유한차분법을 이용한 3차원 모형 반응 계산

3차원 MT 모형 반응 계산은 Maxwell 방정식에 기초한다. MT 탐사에서 주로 이용하는 주파수 대역에서는 변위전류(displacement current)를 무시할 수 있는 준정적(quasi-static) 근사가 성립하며, 자연 전자기장을 이용하므로 지배방정식은 송신원이 없는 형태의 식이 된다. 전자기장의 시간 의존성을 $e^{-i\omega t}$ 로 가정할 때, 주파수 영역 Maxwell 방정식은 다음과 같은 적분 형태로 표현된다(Mackie *et al.*, 1993).

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \iint \sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \iint i\omega\mu\mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

여기서, σ : 전기전도도(electric conductivity, S/m)

ω : 각 주파수(angular frequency, Hz)

μ : 투자율(magnetic permeability, H/m)

\mathbf{H} : 자기장(magnetic field intensity, A/m)

\mathbf{E} : 전기장(electric field intensity, V/m)

\mathbf{J} : 전류밀도(current density, A/m²)

이 연구에서는 Fig. 1과 같이 모형을 직육면체 격자로 나누고, MT 지배방정식에 부합하도록 \mathbf{H} 는 격자의 모서리를 따라, $\sigma\mathbf{E}$ (혹은 \mathbf{J})는 격자면에 수직인 벡터를 따라 정의하였다(Mackie *et al.*, 1993). (1)식과 (2)식을 차분식으로 전개하기 위하여 전체 모형을 Fig. 2와 같은 격자 구조로 나누었다. 격자 간격은 일정하지 않으며 전기비저항이 서로 다른 경계면을 기준으로 경계면 주변에서 격자 간격이 가장 작고, 경계면으로부터 멀어짐에 따라 격자 간격이 증가한다. 이와 같은 격자의 구성은 모두 같은 크기의 격자를 이용하는 경우보다 계산 시간을 단축시키고, 경계면 주위에서 변화가 심한 전자기장을 효율적으로 계산할 수 있게 해주는 장점이 있다. 경계면 근처의 가장 작은 격자 크기는 매질의 전기비저항과 주파수에 따라 결정된다. 이는 지구에 입사하는 전자기장의 크기가 지표에서 크기의 $1/e$ 이 되는 심도인 표피심도(skin depth)가 매질의 전기비저항이 낮아질수록, 평면파 전자기장의 주파수가 높아질수록 작아지기 때문이다. 따라서, 전기비저항이 낮고 주파수가 높은 경우에는 표피심도 내에서 변화가 큰 전자기장의 반응을 정확히 계산하기 위해서 더 작은 격자 간격을 이용하게 된다.

(1)식과 (2)식에 대한 차분식 중 x 방향 성분을 정리하면 각각 다음과 같다(Mackie *et al.*, 1993).

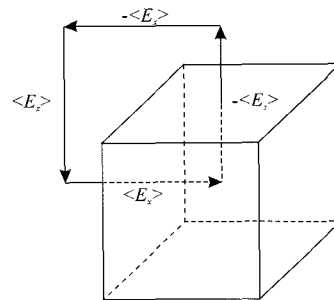
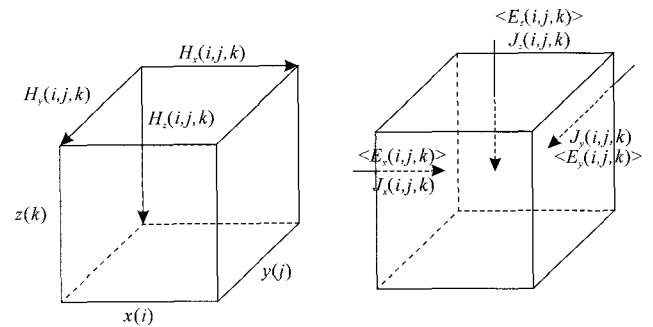


Fig. 1. \mathbf{H} fields are defined along block edges and \mathbf{J} and \mathbf{E} fields across the block faces.

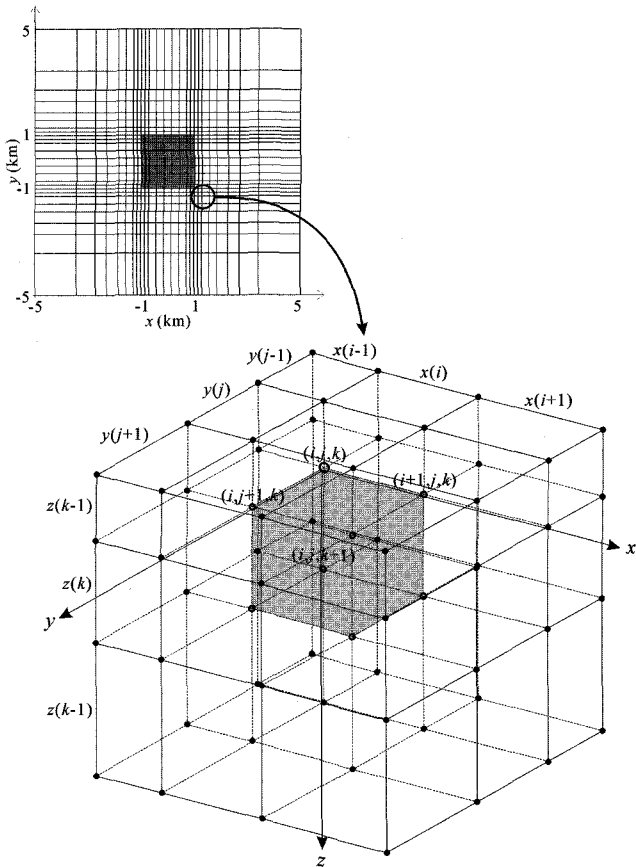


Fig. 2. The discretization of a 3-D model using rectangular elements. The element size is increased with the distance from the boundary of different conductivities.

(1)식으로부터 x 방향 전류밀도(J_x):

$$\begin{aligned} & H_y(i, j, k)\Delta y_j + H_x(i, j+1, k)\Delta z_k - H_y(i, j, k+1)\Delta y_j - H_z(i, j, k)\Delta z_k \\ & = [H_z(i, j+1, k) - H_z(i, j, k)]\Delta z_k - [H_y(i, j, k+1) - H_y(i, j, k)]\Delta y_j \\ & = J_x(i, j+1/2, k+1/2)\Delta y_j \Delta z_k \end{aligned} \quad (4)$$

(2)식으로부터 x 방향 자기장(H_x):

$$\begin{aligned} & i\omega\mu H_x(i, j, k) \left[\frac{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}}{2} \right] \left[\frac{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}}{2} \right] \\ & = \left[\rho_{i,j,k-1} \frac{\Delta z_{k-1}}{2} + \rho_{i,j,k} \frac{\Delta z_k}{2} \right] J_x(i+1/2, j+1/2, k) \\ & \quad - \left[\rho_{i,j,k} \frac{\Delta y_j}{2} + \rho_{i,j-1,k} \frac{\Delta y_{j-1}}{2} \right] J_y(i+1/2, j, k+1/2) \\ & \quad - \left[\rho_{i,j-1,k} \frac{\Delta z_k}{2} + \rho_{i,j-1,k-1} \frac{\Delta z_{k-1}}{2} \right] J_z(i+1/2, j-1/2, k) \\ & \quad + \left[\rho_{i,j-1,k-1} \frac{\Delta y_{j-1}}{2} + \rho_{i,j,k-1} \frac{\Delta y_j}{2} \right] J_y(i+1/2, j, k-1/2) \end{aligned} \quad (5)$$

전류밀도와 자기장의 y 방향과 z 방향 성분도 위와 같은 방식으로 전개되며, 이와 같이 계산된 전류밀도의 y 방향, z 방향 성분을 (5)식에 대입하면 아래의 (6)식과 같이 전기비저항과 자

기장의 세 성분에 관한 식으로만 정리된다.

$$\begin{aligned} & i\omega\mu H_x(i, j, k) \left[\frac{\Delta y_j + \Delta y_{j-1}}{2} \right] \left[\frac{\Delta z_k + \Delta z_{k-1}}{2} \right] \\ & = \left[\rho_{i,j,k-1} \frac{\Delta z_{k-1}}{2} + \rho_{i,j,k} \frac{\Delta z_k}{2} \right] \left[\frac{H_x(i,j,k) + H_x(i+1,j,k)}{\Delta y_j} + \frac{H_x(i,j+1,k) - H_x(i,j,k)}{\Delta x_i} \right] \\ & \quad - \left[\rho_{i,j,k} \frac{\Delta y_j}{2} + \rho_{i,j-1,k} \frac{\Delta y_{j-1}}{2} \right] \left[\frac{H_x(i,j,k) + H_x(i,j,k+1)}{\Delta x_i} + \frac{H_x(i+1,j,k) - H_x(i,j,k)}{\Delta z_k} \right] \\ & \quad - \left[\rho_{i,j-1,k} \frac{\Delta z_k}{2} + \rho_{i,j-1,k-1} \frac{\Delta z_{k-1}}{2} \right] \left[\frac{H_x(i,j-1,k) + H_x(i+1,j-1,k)}{\Delta y_{j-1}} + \frac{H_x(i,j,k) - H_x(i,j-1,k)}{\Delta x_i} \right] \\ & \quad + \left[\rho_{i,j-1,k-1} \frac{\Delta y_{j-1}}{2} + \rho_{i,j,k-1} \frac{\Delta y_j}{2} \right] \left[\frac{H_x(i,j,k-1) + H_x(i,j,k)}{\Delta x_i} + \frac{H_x(i+1,j,k-1) - H_x(i,j,k-1)}{\Delta z_{k-1}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식으로부터 각 격자의 전기비저항과 격자 크기 정보가 주어질 경우 모든 격자점에서 자기장의 세 성분을 계산할 수 있다.

이 논문에서 사용한 모델링 알고리즘(Mackie *et al.*, 1994)에서는 바깥 경계면 상에서 수평방향 자기장 H_x 또는 H_y 값을 부여하는 Dirichlet 조건을 경계조건으로 사용했다. 모형의 내측면에 적절한 자기장 값은 2차원 TM 모드 모형 반응 계산으로부터 얻었는데, TE 모드가 아닌 TM 모드 반응을 이용한 이유는 경계면을 가로지르는 전기장이 존재하는 TM 모드 반응이 TE 모드 반응보다 3차원 경우에 더 유사하기 때문이다(Mackie *et al.*, 1994). 한편, 지표 상부에는 그 두께가 지수적으로 증가하는 공기층들을 추가하였다. 이와 같은 공기층은 지표 경계에서 전기장의 불연속 문제를 해결하기 위해 반드시 필요하다. 각 공기층의 두께는 지표에서 가장 얇고 위로 올라갈수록 지수적으로 증가하며, 총 두께는 전류 집중에 의한 자기장 변화가 감소되어 없어질 정도의 두께가 되어야 한다. 공기층의 전기비저항 값은 원래는 무한대지만 모형 반응 계산시 수치적으로 안정성에 문제가 없을 정도의 큰 값인 10^6 ohm-m로 지정하였다(Mackie *et al.*, 1993).

MT 탐사는 저주파수 자연 전자기장을 이용하며, 송신원으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 우리가 탐사를 수행하는 영역에서는 평면파 가정이 성립한다. 따라서 그 송신원은 동일한 값을 가지는 얇은 판으로 생각할 수 있으며 이 판을 지표 경계 어느 곳이나 위치시킬 수 있는데, 본 연구에서는 송신원을 공기층 상부에 위치시켰다. 모형의 바닥 경계에는 1차원 평면파 임피던스를 적용하였다.

MT 탐사법의 매개변수들

본 논문에서는 MT 탐사에서 3차원 반응을 분석하기 위하여 겉보기 전기비저항과 위상, 이차 전기장, tipper, induction vector와 같은 매개변수들을 이용하였다. 이 절에서는 이와 같은 MT 반응의 매개변수들에 대하여 논하고자 한다.

MT 탐사는 대략 0.001 Hz에서 수십 Hz의 저주파수 자연 전

자기장을 이용하며, 송신원으로부터 매우 멀리 떨어져 있기 때문에 우리가 탐사를 수행하는 영역에서는 평면파 가정이 성립한다. 전기장과 자기장의 비를 임피던스라고 하며, 평면파 가정 하에서 균질 반무한 공간인 경우 공간적으로 서로 직교하는 전기장과 자기장으로 구해지는 지표면에서의 임피던스는 지하의 전기비저항 ρ 와 다음과 같은 관계를 갖는다 (Vozoff, 1991).

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1+i) \sqrt{\frac{\rho\omega\mu}{2}} \quad (7)$$

지표에서 겉보기 전기비저항 ρ_a 는 동일한 임피던스를 나타내는 균질한 반무한 공간의 전기비저항으로, (7)식으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_{a,xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad (8)$$

한편, 위상 ϕ 는 전기장과 자기장의 상대적인 위상차로 정의되며, 이는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\phi_{xy} = \phi_{E_x} - \phi_{H_y} \quad (9)$$

균질 반무한 공간의 경우 (7)식에서와 같이 매질의 전기전도도에 관계없이 수평방향 전기장이 수평방향 자기장보다 항상 45° 만큼 위상이 앞서게 된다. 만약, 지하의 물성 변화가 있다면 위상이 45°로부터 벗어나게 되므로 겉보기 전기비저항 뿐 아니라 위상을 측정함으로써 지하의 정보를 얻을 수 있다.

한편, 저주파를 이용하는 MT 탐사에서 3차원 구조에 의한 전자기장의 변화는 전기비저항이 서로 다른 경계에서 일어나는 전류 집중 현상과 전도체 내부에서 발생하는 전자기 유도 현상으로 나뉘어진다(Park et al., 1983; Park, 1985). 전류 집중에 의한 효과는 거의 직류의 영향에 가까운 양상을 나타내며, 저주파에서 주파수에 독립적인 전기장 왜곡을 나타낸다. 반면, 이상체 내부의 전자기 유도에 의한 효과는 주파수에 의존적인 양상을 나타내며, 주파수 증가에 따라 전자기 유도에 의한 전기장의 왜곡도 심해진다(Park, 1985). 따라서, 각 주파수 별로 이차 전기장의 vector map을 그려보는 것은 이차장의 생성 메카니즘을 이해하는데 유용하다.

Maxwell 방정식에 의하면 $\nabla \times \mathbf{E}$ 의 수직 성분이 작으면 $H_z \approx 0$ 이라고 가정할 수 있다. $\nabla \times \mathbf{E}$ 가 큰 수직 성분을 가지는 영역은 횡방향으로 전기전도도가 변화하는 접촉면 근처이므로, 수직성분 자기장의 존재는 경계면의 존재를 시사한다. 따라서, 이의 분석은 이상체를 해석하는데 매우 유용한 변수가 된다. 임의의 주파수에서 수직방향 자기장의 변화는 수평방향 자기장과

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y \quad (10)$$

의 관계가 있으며(Vozoff, 1991), (10)식에서 T_x 와 T_y 각각은 자

기장 벡터의 수평면에서의 기울어짐을 표현하므로 tipper라고 한다. 지하구조가 3차원인 경우에는 경계면 근처에서 tipper의 두 성분 모두 값을 가지므로, tipper는 3차원 이상체의 존재 유무의 확인 뿐만 아니라, 주향방향을 찾거나 접촉면에서 어느 쪽이 더 전도성 영역인가를 판단하는데 널리 이용된다.

Tipper의 크기는 다음의 (11)식으로 정의된다.

$$|T| = \{|T_x|^2 + |T_y|^2\}^{1/2} \quad (11)$$

이 값은 일반적으로 0.1에서 0.5 사이의 작은 값을 가지며, 이상체 경계에서 가장 큰 값을 나타내고 경계면에서 멀어지면서 비전도성 지역 내부보다 전도성 지역 내부에서 더 빠른 감쇠를 보인다. Tipper를 이용한 MT장의 분석 방법 중 또 다른 방법으로 induction vector를 이용하는 방법이 있다(Berdichevsky et al., 2002).

$$\text{Re}(T) = \text{Re}(T_x)\hat{x} + \text{Re}(T_y)\hat{y} \quad (12-1)$$

$$\text{Im}(T) = \text{Im}(T_x)\hat{x} + \text{Im}(T_y)\hat{y} \quad (12-2)$$

여기서 \hat{x} , \hat{y} 는 각각 x, y 방향의 단위 vector이다.

위의 (12)식은 induction vector를 나타낸 식이며, 이 중 실수 성분 (12-1)식은 수평방향 자기장과 동상 성분을 나타내며, 허수 성분 (12-2)식은 이상 성분을 나타낸다. Induction vector의 실수 성분이 가지는 중요한 특징은 상대적으로 비전도성 지역을 가리킨다는 것이다(Berdichevsky et al., 2002)(단, 이와 같은 특징은 위의 (12)식과 같은 정의에서만 성립하며, 실수 성분의 부호를 반대로 정의하는 경우에는 induction vector의 실수 성분이 전도성 지역을 가리킨다). 따라서 induction vector의 실수 성분은 지역적으로 전도성과 비전도성 구조를 규명하는데 매우 유용하다(양준모 등, 2002). 한편, induction vector의 허수 성분은 주파수에 따라 방향이 바뀌는 복잡한 양상을 나타내며 아직까지 정확한 분석이 이루어지지 않고 있다.

결과 및 고찰

3차원 이상체에 의한 반응을 살펴보기 위하여 고립이상체 및 전도성 표토층이 포함된 모형을 설정하고 주파수별로 겉보기 전기비저항과 위상, 이차 전기장, tipper, induction vector 등의 반응을 분석하였다. 입사하는 자기장이 x방향인 경우와 y방향인 경우를 각각 H_x 분극, H_y 분극이라 하였다.

고립이상체 모형 반응 분석

각 변의 길이가 2 km인 정육면체 모양의 고립이상체가 반무한 공간 내의 1 km 지하 지점에 위치한 모형(Fig. 3)에 대하여 0.001 Hz에서 100 Hz 대역의 주파수에서 모델링을 수행하였다. 이상체의 전기비저항은 1 ohm-m로 전도성이며, 반무한 공간의 전기비저항은 100 ohm-m이다. 이 모형에 대한 반응 계산을 위하여 설정된 격자의 개수는 x, y, z 방향으로 각각 174개,

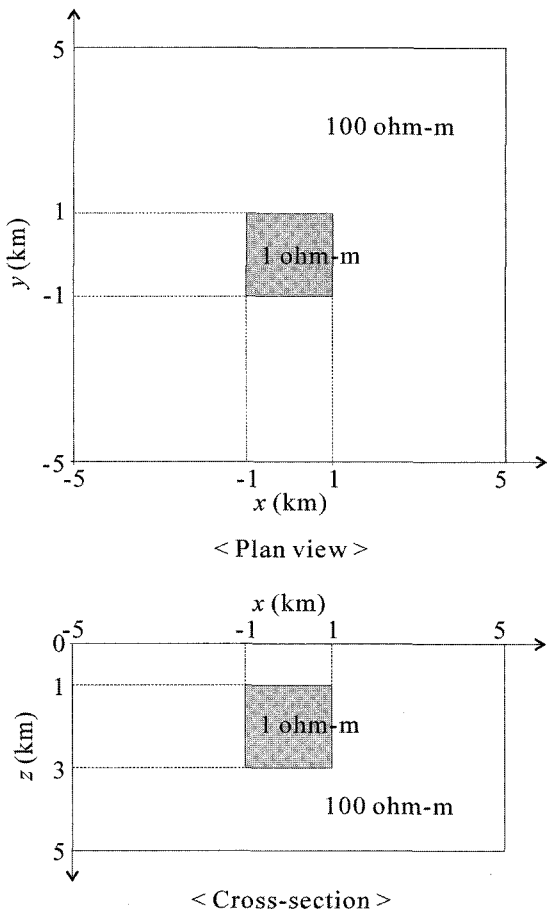


Fig. 3. The model used for analyzing the magnetotelluric effect of an isolated 3-D body. The isolated body of 1 ohm-m with dimension of 2 km×2 km×2 km is embedded in depth in a homogeneous half-space of 100 ohm-m.

174개, 55개이고, 이 때 공기층은 14개의 격자로 구성되어 있다. 격자 간격은 이상체 경계면에서 가장 작으며 경계면으로부터 멀어지면서 1.1 또는 1.2의 비를 유지하며 증가하도록 구성하였다.

지표에서의 반응 분석

Fig. 4는 Fig. 3의 모델에 대하여 지표에서 주파수 별 겹보기 전기비저항을 나타낸 것이다. 이들은 H_y 분극의 결과이며, 이 모형은 정육면체 형태이므로 H_x 분극의 결과는 H_y 분극의 결과를 90° 회전시킨 것과 정확히 일치한다. 겹보기 전기비저항은 0.1 Hz와 1 Hz, 10 Hz에서만 이상체의 영향이 나타났다. 위상의 경우에도 겹보기 전기비저항과 같은 주파수 범위에서만 지표에서 이상체의 영향이 나타났다.

이와 같이, 너무 높거나 너무 낮은 주파수에서 이상체의 영향이 나타나지 않은 원인을 분석하기 위하여 이상체의 길이를 y 방향으로 무한히 연장시킨 2차원 이상체의 겹보기 전기비저항 반응과 비교하였다. 그 결과, 2차원 이상체의 경우에는 저주파에서도 지표에서 이상체의 영향이 잘 나타났지만, 100 Hz

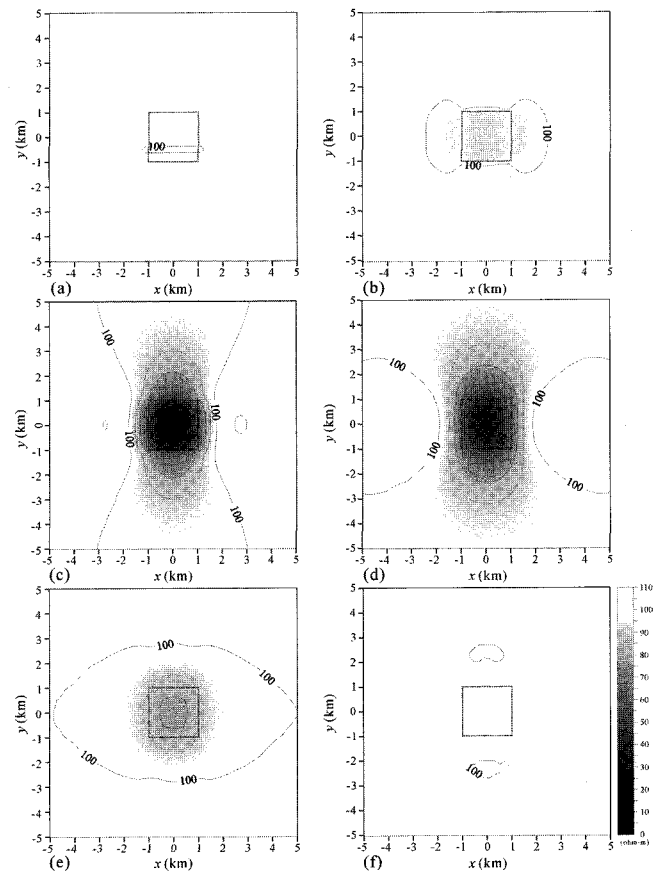


Fig. 4. Contour maps of apparent resistivity on the surface of the model shown in Fig. 3 at six frequencies: (a) 0.001 Hz, (b) 0.01 Hz, (c) 0.1 Hz, (d) 1 Hz, (e) 10 Hz, and (f) 100 Hz.

에서는 고립이상체 모형과 같이 지표에서 이상체의 영향이 나타나지 않음을 확인했다. 두 모형은 y 방향 길이만 차이가 있으므로, 저주파에서 3차원 고립이상체의 영향이 지표에 나타나지 않은 것은 이상체의 크기가 표피 심도에 비해 상대적으로 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 이상체의 길이를 y 방향으로 연장시키며 지표에서 반응을 비교해본 결과, Fig. 5와 같이 0.01 Hz의 경우 이상체의 길이가 200 km 정도 되어야 지표에서 반응이 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 각 변의 길이가 2 km인 고립이상체는 0.001 Hz와 0.01 Hz에서 지표에서 이상체의 영향이 나타나지 않으므로 앞으로의 논의에서 이 두 주파수는 제외하였다. 한편, 100 Hz에서 이상체의 영향이 나타나지 않은 것은 이 주파수에서 표피심도가 0.5 km로 이상체의 심도인 1 km에 미치지 못하기 때문이라고 생각된다. 이를 확인하기 위하여 이상체의 위치를 지표쪽으로 이동시켜본 결과, Fig. 6과 같이 이상체의 심도가 0.3 km보다 크면 지표에서 이상체의 영향이 나타나지 않았다. 따라서, 100 Hz도 이 모형의 3차원 반응을 나타내기에는 적합하지 않으므로 논의에서 제외하였다.

이와 같이 지하의 전도성 이상체에 의한 겹보기 전기비저항의 이상은 뚜렷한 주파수 의존성이 존재하며, 0.1 Hz와 1 Hz,

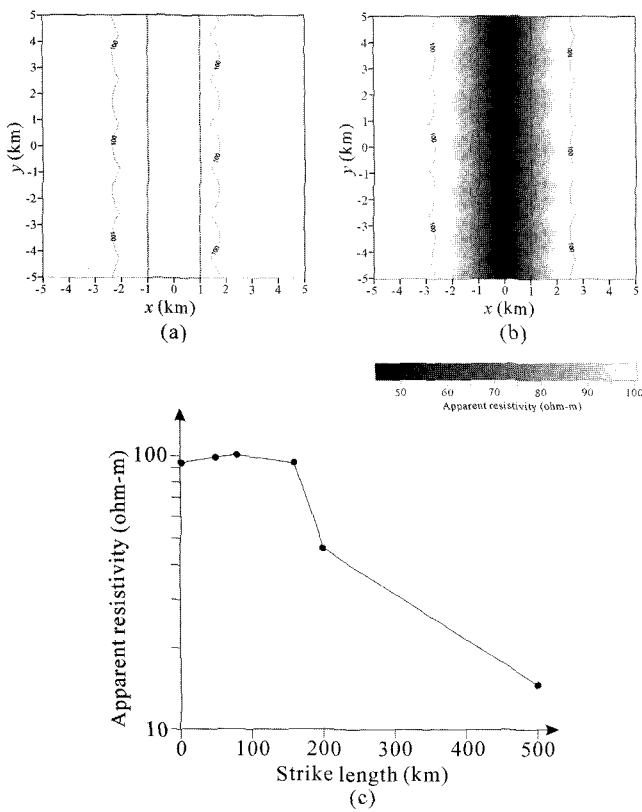


Fig. 5. Effect of strike length of the conductive body. (a) and (b) represent contour maps of apparent resistivity when the body elongated to 200 km in the y direction at 0.001 Hz and 0.01 Hz, respectively. (c) represents the apparent resistivity measured at the origin with varying y-dimension of the body at 0.01 Hz.

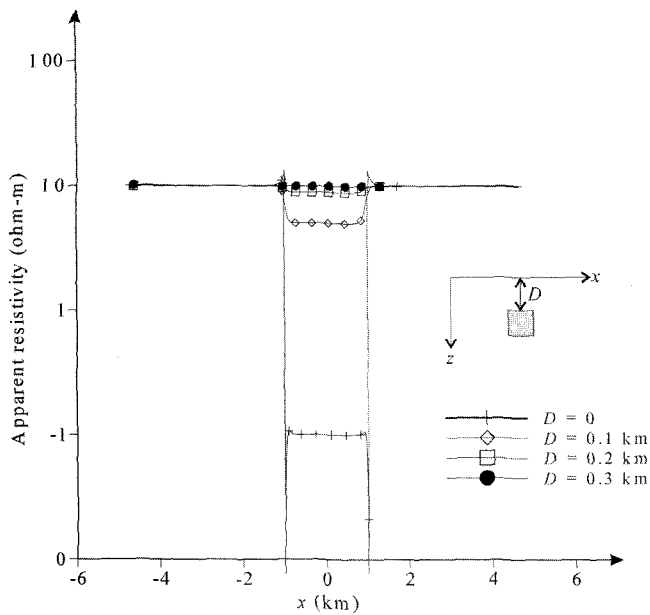


Fig. 6. The profiles of apparent resistivity at 10 Hz with various depths of the anomalous body from the surface along direction at $y=0$.

10 Hz가 이 모형의 3차원 반응을 잘 나타내는 것으로 판단되었다. 따라서, 다음에서는 이 세 주파수에서 MT 반응의 매개 변수인 이차 전기장과 tipper, induction vector의 반응을 중점적으로 분석하였다.

Fig. 7은 H_y 분극에서 이차 전기장의 실수 성분과 허수 성분을 나타낸 것이다. 이 때, 일차 전기장은 반무한 공간에서의 전기장이고, 이차 전기장은 이상체의 존재로 인해 형성된 전기장이다. 전기장의 실수 성분, 허수 성분은 각각 일차 자기장 평면과 송신원과 동상성분, 이상성분이 된다. 따라서 이차 전기장의 실수 성분과 허수 성분을 통해 이상체에 의해 발생된 전류의 흐름을 파악할 수 있다.

0.1 Hz에서 반응을 살펴보면, 이상체 내부에는 직선 형태의 큰 전기장이 나타났으며, 외부에는 이상체를 둘러싸는 형태의 작은 전기장이 나타났다. 이상체 내부의 직선 형태의 벡터는

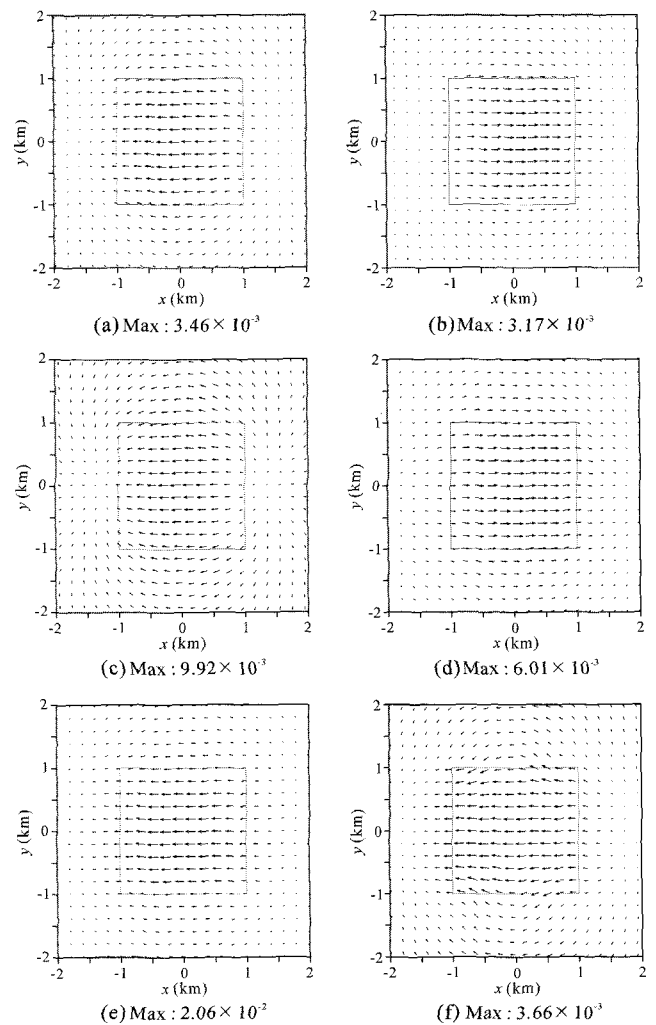


Fig. 7. Vector plots of secondary electric fields for the model shown in Fig. 3 at various frequencies.

(a) Real and (b) imaginary components at 0.1 Hz
 (c) Real and (d) imaginary components at 1 Hz
 (e) Real and (f) imaginary components at 10 Hz.

경계면에서 전하 축적에 의한 전류 집중의 영향이고, 외부의 벡터는 전도성 이상체에 의한 유도 전류의 영향이다. 유도 전류에 의한 회전하는 형태의 전기장은 3차원 이상체의 경우에 만 나타나는 특성이다. 각 성분의 방향을 살펴보면, 실수 성분의 방향은 일차 전기장과 같은 방향이며 허수 성분은 일차 전기장과 반대 방향이다. 1 Hz의 반응은 0.1 Hz의 반응과 그 양상은 비슷하지만, 0.1 Hz에서보다 이차 전기장이 더 넓은 범위에서 더 큰 값을 가졌다. 10 Hz에서 실수 성분의 크기는 1 Hz보다 감소했으며, 허수 성분은 방향이 바뀌었다. 이와 같이 실수 성분은 최대가 되고, 허수 성분은 방향이 바뀌는 반응으로부터 critical period(Dosso *et al.*, 2000)가 1 Hz와 10 Hz 사이에 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 각 주파수별로 지표에서 tipper의 크기 $|T|$ 를 나타낸 것이고, (d)는 지표면에서 $y=0$ 을 따라 tipper의 크기를 표현한 것이다. 그림에서와 같이 tipper는 이상체 경계면 약간 외곽에서 가장 큰 값을 가지고 경계면에서 멀어질수록 값이 감소하는 양상을 나타냈다. 또, 전도성 이상체 내부로의 값의 변화가 비전도성 배경매질로의 값의 변화보다 훨씬 더 급격하게 감소하였다.

Fig. 9에 각 주파수 별로 식 (12)와 같이 tipper의 실수 성분과 허수 성분을 나타낸 induction vector를 도시했다. 주파수에 관계없이 각 성분의 방향은 이상체 경계면에 수직인 방향을 나타내고 있으며, 이로부터 이상체의 모양을 추정할 수 있다. 0.1 Hz에서 induction vector는 실수 성분은 상대적으로 비전도

성인 배경매질을 향하고, 허수 성분은 전도성 이상체를 향하는 반응이 나타났다. 1 Hz에서 실수 성분의 크기는 0.1 Hz의 경우보다 증가하여 최대값을 가졌으며, 각 성분의 방향은 0.1 Hz에서와 같은 방향을 나타냈다. 10 Hz에서 실수 성분은 1 Hz보다 크기가 감소했으며 앞의 두 주파수와 같은 방향을 나타냈으며, 허수 성분은 크기는 증가했지만 방향이 반대가 되었다. 이와 같이 1 Hz에서 실수 성분의 크기가 최대가 되고, 10 Hz에서 허수 성분의 부호가 바뀌는 반응은 앞서 알아본 이차 전기장과 같은 반응으로서, induction vector의 분석을 통해서도 1 Hz와 10 Hz 사이에 critical period가 있음을 확인하였다. 마지막으로 실수 성분과 허수 성분은 각각 이상체의 중심점에 대하여 대칭인 모양으로 나타나는데, 이는 이상체가 정육면체이므로 그 내부의 여러 가지 유도 현상이 이상체의 중심을 기준으로 대칭이 되기 때문이다.

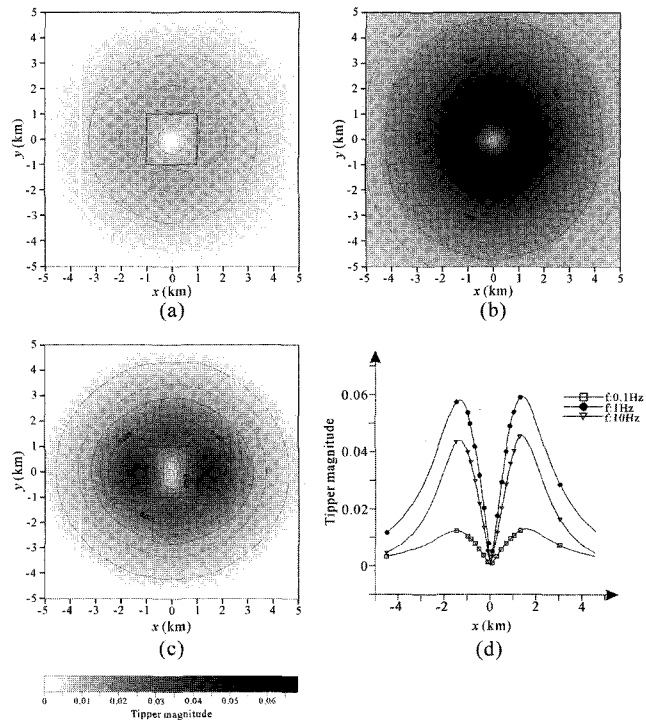


Fig. 8. The magnitude of tipper for the model shown in Fig. 3 (a) 0.1 Hz, (b) 1 Hz, (c) 10 Hz and (d) profiles along x direction at $y=0$.

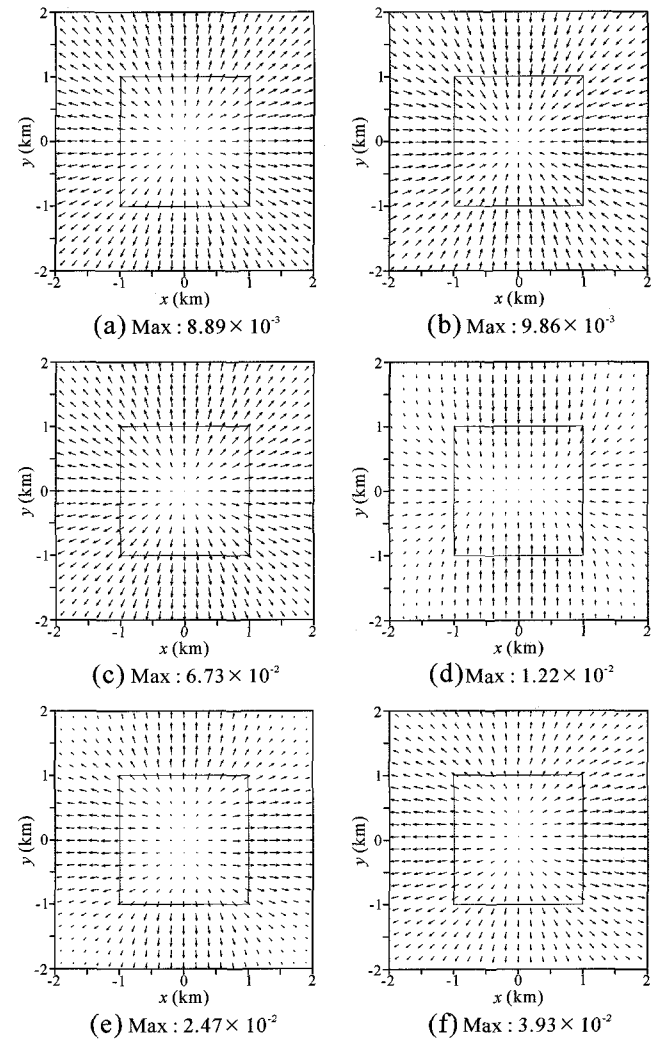


Fig. 9. Induction vectors for the model shown in Fig. 3. (a) Real and (b) imaginary components at 0.1 Hz (c) Real and (d) imaginary components at 1 Hz (e) Real and (f) imaginary components at 10 Hz.

거리에 따른 반응 분석

지금까지는 지표에서 넓은 영역에 걸쳐서 여러 MT 반응 매개변수들의 변화 양상을 고찰하였다. 위와 같이 지표에서 면적으로 자료를 획득하여 해석하는 것이 지하 구조 규명에 가장 정확한 방법이지만, 실제 탐사에서는 경제적 여건상 3차원 탐사를 수행하기란 매우 어렵다. 따라서, 이 절에는 실제 2차원 탐사에 유사하게 몇몇 축선에서 겘보기 전기비저항과 위상, induction vector의 반응을 분석함으로써 2차원 탐사시 3차원 이상체의 영향을 알아보려고 한다.

Fig. 10은 이상체 중심부와 그로부터 1 km, 2 km, 3 km 떨어진 x축에 평행한 축선에서 1 Hz의 겘보기 전기비저항과 위상을 나타낸 것이다. 겘보기 전기비저항은 이상체 직상부에서는 약 30 ohm-m 정도의 값을 나타내어 이상체의 영향이 뚜렷하다. 그렇지만, 거리가 증가함에 따라 배경매질의 전기비저항 값에 근접하여 3 km 떨어진 지점에서는 배경매질의 값과 거의 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 한편, 위상에서도 이상체 직

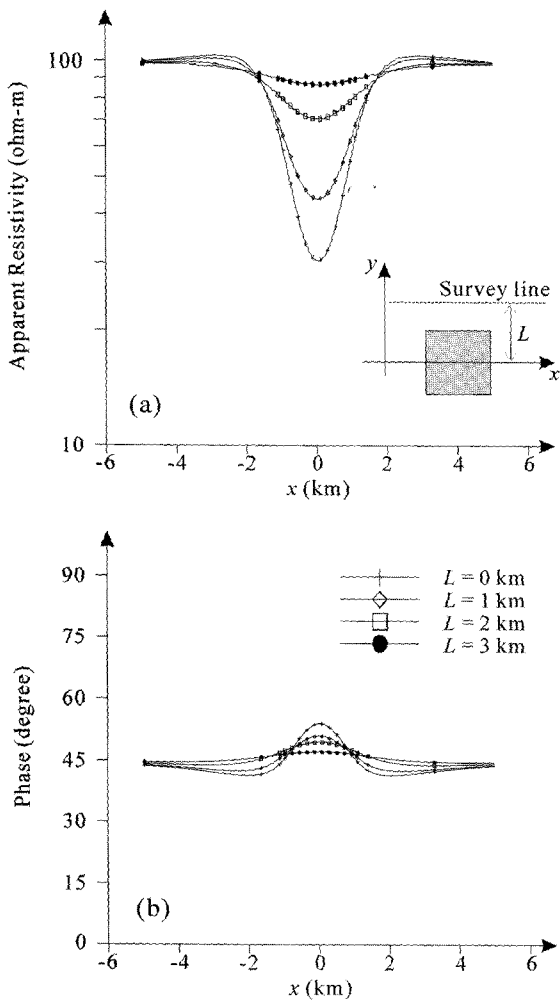


Fig. 10. The profiles of (a) apparent resistivity and (b) phase at 1 Hz along the survey lines with various offset from the center of the 3-D body.

상부로부터 3 km 떨어진 지점에서부터는 거의 45°에 근사한 값이 나타났다(Fig. 10(b)). 이와 같은 결과로부터, 1 Hz에서는 이상체 중심으로부터 약 2 km 떨어진 지점까지 이상체의 영향이 겘보기 전기비저항과 위상에 나타나지만, 그 이상 떨어진 지점에서는 이상체의 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 한편, 이상체 중심으로부터 2 km 떨어진 지점에서는 비록 축선 직하부에 이상체가 존재하지 않더라도, 3차원 이상체의 영향으로 인하여 마치 직하부에 약간의 전도성 이상체가 존재하는 것과 같은 반응이 나타났으며, 이로 인해 3차원 이상체의 영향을 고려하지 않은 2차원 해석은 오류를 낼 수 있을 것으로 생각된다.

1 Hz에서 이상체 직상부와 그로부터 1 km~4 km 떨어진 지점에서 induction vector의 두 성분을 Fig. 11에 나타냈다. 이상

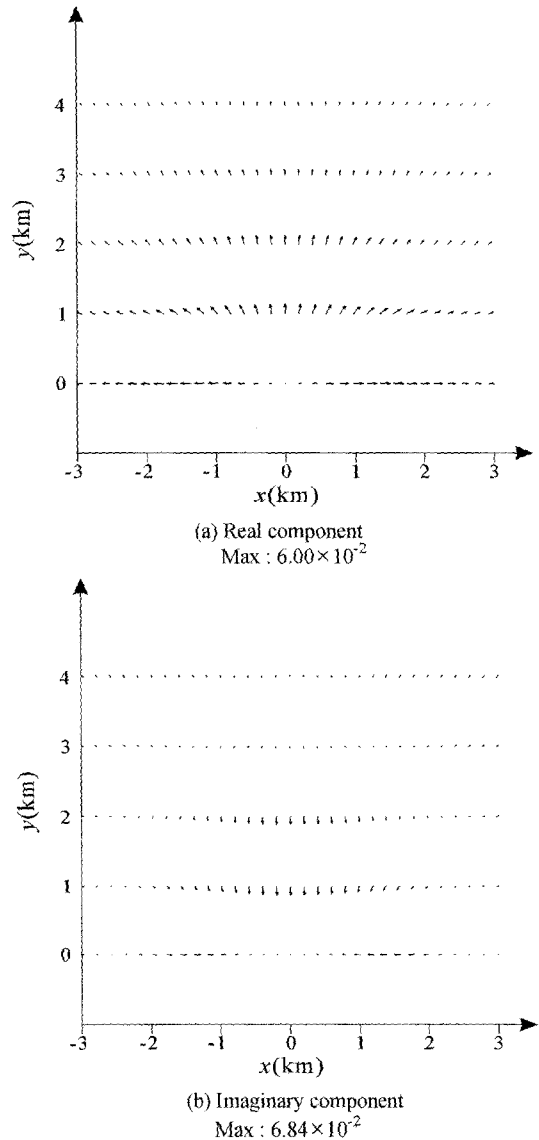


Fig. 11. Induction vectors at 1 Hz along the survey lines with various offset from the center of the 3-D body.

체 직상부에서 induction vector의 실수 성분과 허수 성분은 각각 중앙으로부터 나가는 방향과 들어오는 방향을 나타내고 있으며, induction vector의 성질로부터 축선 중앙에 전도성 지역이 있음을 알 수 있다. 이상체로부터 1 km 떨어진 지점에서 실수 성분은 중앙에서부터 퍼져 나가는 모양이고, 허수 성분은 중앙으로 모여서 아래로 내려가는 모양이다. 이는 induction vector의 특성에 비추어 볼 때 이상체가 x축 상에는 중심에 존재하고 y축 상에는 이 축선보다 더 아래쪽에 존재함을 나타낸다고 볼 수 있다. 이와 마찬가지로 2 km, 3 km 떨어진 지점에서의 induction vector에서도 축선의 중앙 아래쪽에 전도성 이상체가 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 여기서 주목할만한 점은, 앞의 겉보기 전기비저항 자료가 이상체로부터 3 km 떨어진 지점에서 이상체의 영향을 거의 나타내지 못했던 것에 비해 induction vector는 3 km 떨어진 지점에서도 이상체의 위치와 특성(전도성 또는 비전도성)을 어느 정도 나타내고 있다는 점이다. 즉, induction vector에서는 겉보기 전기비저항이나 위상보다 이상체로부터 더 멀리 떨어진 축선에서도 지하의 3차원 이상체에 의한 반응이 나타났다.

일반적인 MT 탐사의 역산 해석에서는 주로 겉보기 전기비저항과 위상이 사용된다. 그렇지만, 겉보기 전기비저항과 위상만을 이용하여 해석할 경우에는 앞서 고찰한 바와 같이 3차원 이상체의 직상부가 아닌 일정 거리 떨어진 지점에서 탐사를 수행한 경우 해석상의 오류를 범할 수 있다. 그러나, 같은 축선에서 induction vector를 그려보면 보다 효과적으로 이상체의 위치와 특성에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 제한된 2차원 탐사로부터 지하의 정보를 해석하기 위해 겉보기 전기비저항과 위상 뿐만 아니라 induction vector도 함께 분석하는 것이 해석의 오류를 줄이는 하나의 방법일 것으로 생각된다.

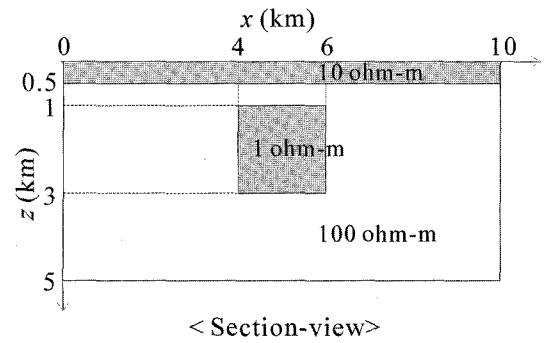
전도성 표토층을 추가한 모형 반응 분석

이 절에서는 앞에서 분석한 정육면체 고립이상체 모형에 전도성 표토층을 추가한 모형의 반응을 분석하였다. 전도성 표토층의 두께는 지표로부터 0.5 km이고, 전기전도도는 10 ohm-m이며, 그 외 이상체와 배경매질의 조건은 Fig. 3에서 설정된 것과 동일하다(Fig. 12). 표토층이 포함된 모형을 표현하기 위해 z 방향 격자수를 55개에서 63개로 늘렸다. 다음에서는 표토층이 없는 모형과의 차이를 중심으로 전도성 표토층의 영향을 알아보려고 한다.

지표에서의 반응 분석

전도성 표토층을 추가한 모형은 전체적으로 이상체에 의한 반응이 전도성 표토층의 영향으로 고립이상체 모형보다 감소한다.

Fig. 13은 1 Hz에서 겉보기 전기비저항과 위상을 나타내고 있다. 1 Hz에서 겉보기 전기비저항은 지표에서 이상체의 영향



< Section-view >

Fig. 12. The model used for the analysis for the effect of the conductive overburden. The thickness and conductivity of the overburden are 0.5 km and 10 ohm-m, respectively. The other conditions are the same as the model shown in Fig. 3.

이 나타나는 하지만, 이상체 직상부와 전체 측정 영역 사이의 값의 차이가 작아서 이상체를 파악하기가 쉽지 않다(Fig. 13(a), (c)). 이 외에 0.1 Hz에서는 지표에서 이상체의 영향이 약간 나타나기는 했지만 거의 구분이 어려우며, 그 외의 주파수에서는 주파수가 증가함에 따라 지표에서의 겉보기 전기비저항이 감소하는 반응으로 전도성 표토층이 존재함을 알 수 있지만, 이상체의 영향은 나타나지 않는다. 한편, 1 Hz에서 위상은 전체 측정영역에서 약 22°, 이상체 직상부에서는 약 30° 정도의 값을 가져서 전체 모형이 2층 구조이며 전도성 이상체가 존재함을 나타낸다(Fig. 13(b), (d)). 또, 0.1 Hz에서는 전체 측정영역에서 대략 33°의 값으로 전도성 층 아래 비전도성 층이 존재하는 2층 구조에서의 값을 나타내지만, 이상체의 영향

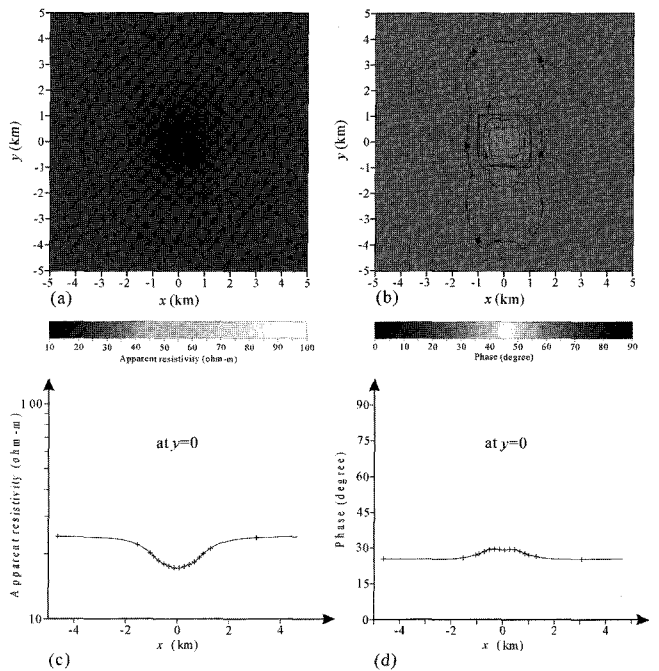


Fig. 13. Contour maps of (a) apparent resistivity and (b) phase and profiles of (c) apparent resistivity and (d) phase for the model shown in Fig. 12 at 1 Hz.

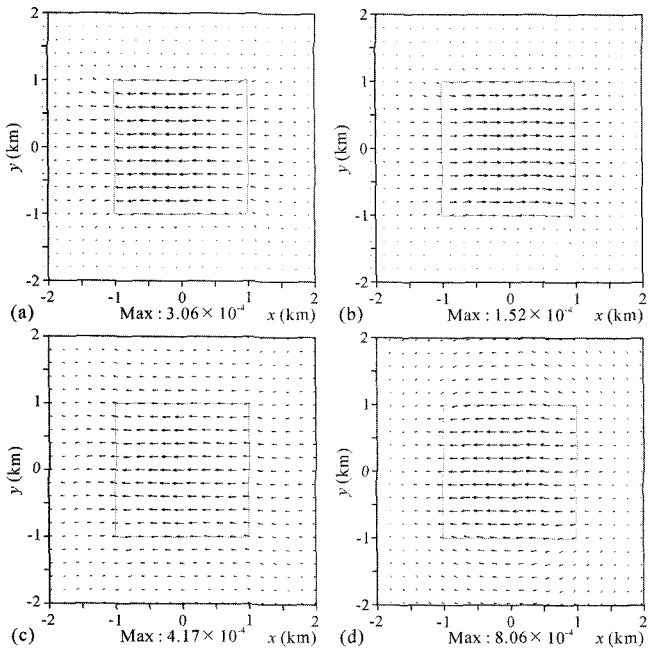


Fig. 14. Vector plots of secondary electric fields for the model shown in Fig. 12.

(a) Real and (b) imaginary components at 0.1 Hz,
 (c) Real and (d) imaginary components at 1 Hz.

은 나타나지 않으며, 그 외의 주파수에서는 이상체 직상부를 포함하여 전체 측정영역에서 45°에 근사한 값을 나타낸다. 앞서 연구한 고립이상체 모형과의 큰 차이는 10 Hz에서 포피심도가 전도성 표토층의 두께와 같아진 결과, 10 Hz에서는 이상체의 영향이 나타나지 않는 것이다.

Fig. 14는 0.1 Hz와 1 Hz에서 이차 전기장의 실수 성분과 허수 성분을 나타낸 것이다. 전체적으로 이차 전기장의 크기가 고립이상체 모형의 1/10 정도로 감소했으며, 이는 전도성 표토층에서 에너지 감쇠가 크게 일어나서 이상체에 도달하는 에너지가 작기 때문에 이상체에 의해 발생된 이차 전기장의 크기도 작아진 것이다. 0.1 Hz에서 실수 성분과 허수 성분의 방향은 고립이상체의 경우와 같이 실수 성분은 일차 전기장과 같은 방향이고, 허수 성분은 반대 방향이다. 그림에서 보듯이, 2차 전기장의 형태는 이상체를 중심으로 좌우에서 집중되어 흐르는 형태로 수평방향 전류 집중의 영향만 나타나고 전도성 이상체에 의한 유도 전류의 영향은 약해서 나타나지 않았다. 1 Hz의 경우 실수 성분은 0.1 Hz와 같은 반응 양상이 나타나지만, 허수 성분은 0.1 Hz의 반응과 비교해볼 때, 벡터의 방향과 모양이 모두 바뀌었다. 벡터의 방향은 고립이상체 모형에서의 10 Hz 반응에서와 같이 방향이 역전되었고, 이로부터 전도성 표토층의 영향으로 인해 critical period가 증가했음을 알 수 있었다. 한편, 벡터의 모양은 수평 방향 전류 집중의 영향과 유도 전류의 영향이 복합된 형태로 나타났다. 표토층이 없는 경우 이차 전기장에 수평방향 전류 집중과 전자기 유도의 영향이 복합적으로 나타났지만, 전도성 표토층이 추가된 모형에서

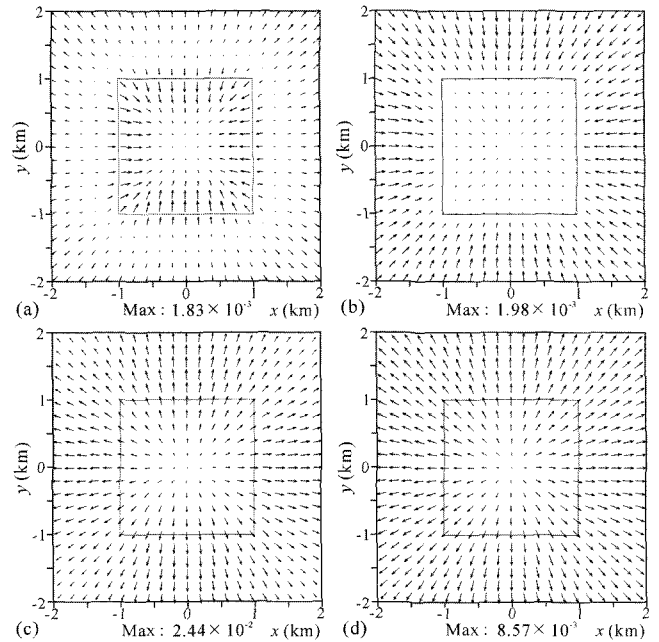


Fig. 15. Induction vectors of the model shown in Fig. 12.

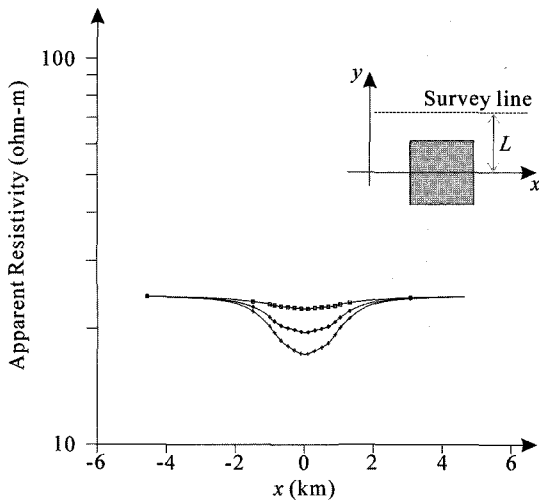
(a) Real and (b) imaginary components at 0.1 Hz,
 (c) Real and (d) imaginary components at 1 Hz.

는 수평방향 전류 집중의 영향이 우세하게 나타났으며, 또한, 이차 전기장의 크기는 전도성 표토층이 추가된 모형에서 정도로 감소했다. 전도성 표토층이 추가된 모형에서 tipper는 표토층이 없는 경우와 비슷한 반응을 나타냈으며, 그 크기는 표토층이 없는 경우에 비해 크게 감소하였다.

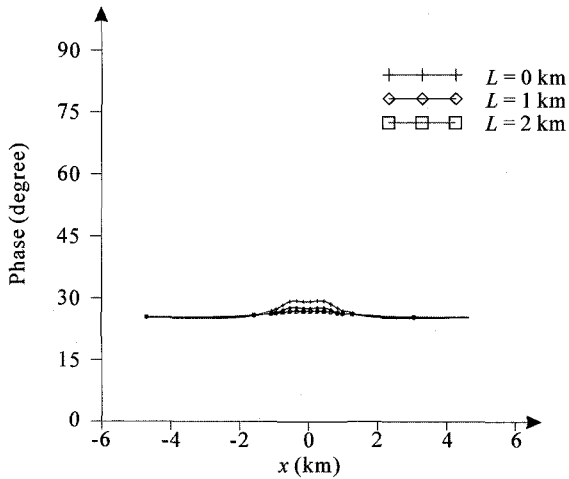
Fig. 15는 0.1 Hz와 1 Hz에서 induction vector의 실수 성분, 허수 성분을 각각 벡터로 나타낸 것이다. 전체적으로, induction vector의 반응도 앞서 연구한 다른 매개변수들과 마찬가지로 표토층이 없는 경우와 비교해볼 때 반응의 크기가 감소하였다. 0.1 Hz에서는 실수 성분과 허수 성분 모두 이상체 경계를 기준으로 벡터의 방향이 바뀌는 복잡한 양상을 띠고 있으며, 이 때 벡터의 크기는 매우 작음을 알 수 있다. 1 Hz의 경우에는 고립이상체 모형의 10 Hz 반응과 비슷하게 실수 성분과 허수 성분이 모두 비전도성 지역을 향하는 반응이 나타났다. 허수 성분의 방향은 이보다 작은 주파수에서 벡터의 방향과 반대가 된 것이며, 이는 앞서 서술한 바와 같이 전도성 표토층을 추가한 모형에서는 1 Hz와 10 Hz 사이에 critical period가 존재함을 의미한다.

거리에 따른 반응 분석

Fig. 16은 1 Hz에서 이상체 직상부와 그로부터 1 km, 2 km 떨어진 x축에 평행한 축선에서 겘보기 전기비저항과 위상을 나타내고 있다. 이상체 직상부 축선에서 겘보기 전기비저항은 이상체가 존재하는 부근에서 감소하여 전도성 이상체의 영향이 나타났지만, 이상체로부터 2 km 떨어진 축선에서는 이상체의 영향을 확인할 수 없었다. 위상에서는 겘보기 전기비저항에



(a)

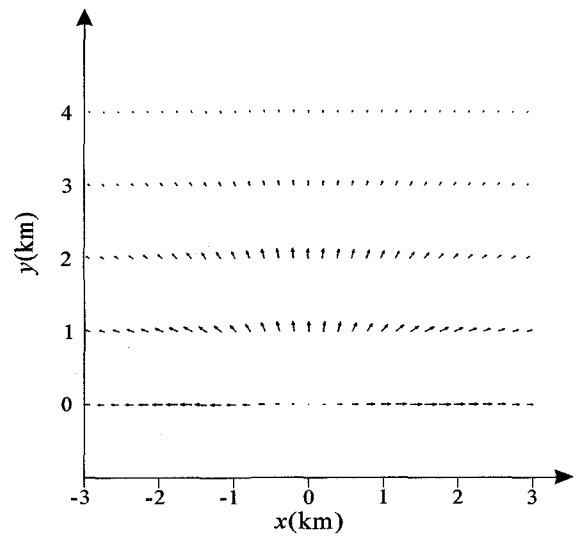


(b)

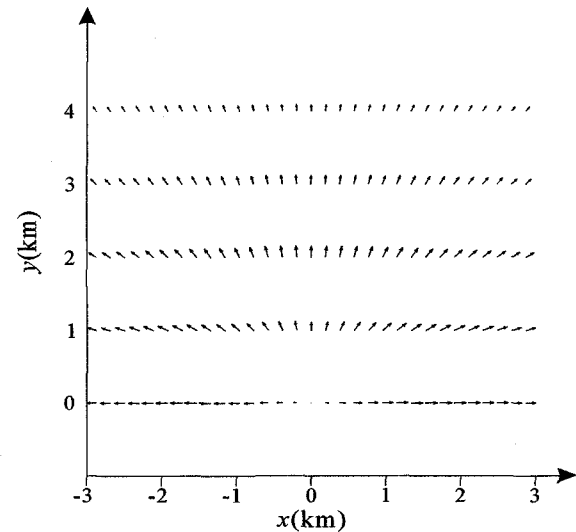
Fig. 16. The profiles of (a) apparent resistivity and (b) phase along x direction at 1 Hz along survey lines having offsets of 0 km, 1 km, 2 km from the center of the body.

서보다 이상체의 영향이 더 작게 나타나 이상체 직상부의 축선에서만 이상체의 영향을 확인할 수 있었다. 이를 고립이상체의 경우와 비교해보면, 겉보기 전기비저항과 위상 모두 전도성 표토층의 영향으로 이상체의 반응이 감소했으며, 이에 따라 이상체의 영향이 나타나는 축선까지의 거리도 감소하였다.

1 Hz에서 이상체 직상부와 그로부터 1 km~4 km 떨어진 축선에서 induction vector를 Fig. 17에 나타냈다. 이상체 직상부에서 실수 성분과 허수 성분은 모두 중앙으로부터 나가는 방향이고 이로부터 축선 중앙에 전도성 지역이 있음을 알 수 있다. 이상체로부터 거리가 증가하면서 induction vector의 방향은 실수 성분과 허수 성분 모두 중심으로부터 위쪽으로 퍼져 나가는 방향이 된다. 벡터의 크기를 살펴보면, 이상체로부터 2 km 떨어진 지점까지 크기의 감소가 거의 일어나지 않았으며 따라서, 이상체로부터 대략 2 km 떨어진 지점까지는 이상체의



(a) Real component
Max : 2.24×10^{-2}



(b) Imaginary component
Max : 8.27×10^{-3}

Fig. 17. Induction vectors at 1 Hz along the survey lines with various offset from the center of the 3-D body.

위치와 특성 파악이 가능했다.

이와 같이 전도성 표토층이 추가된 경우에도 각 축선에서 induction vector는 겉보기 전기비저항과 위상보다 더 넓은 범위에서 이상체의 영향이 나타났다. 따라서, 표토층이 없는 경우와 마찬가지로 제한된 2차원 탐사에서 겉보기 전기비저항과 위상 뿐만 아니라 induction vector도 함께 분석하는 것이 해석의 정확성을 높일 것임을 확인하였다.

결론

본 논문에서는 심부 지열 및 지각 구조 규명 등과 관련하여 많이 사용되는 MT 탐사법에 대하여, 3차원 이상체의 모형 반

응 결과를 중심으로 MT 탐사 자료의 여러 매개변수들에 대해 고찰하였다.

3차원 이상체의 MT 반응 분석을 위하여 100 ohm-m의 반무한 공간 내 지하 1 km 지점에 전기비저항이 1 ohm-m이고 각 변의 길이가 2 km인 정육면체 모양의 전도성 고립이상체가 있는 모형과, 이 모형에 0.5 km 두께의 10 ohm-m의 전도성 표토층이 추가된 모형을 설정하였다. 이 두 모형에 대하여 MT 반응 매개변수들을 분석하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

고립이상체 모형의 경우 겉보기 전기비저항 자료의 분석으로부터 지표에서 3차원 이상체의 반응이 가장 잘 나타나는 주파수는 0.1 Hz에서 10 Hz 사이의 주파수임을 확인하였다. 0.1 Hz 보다 작은 주파수에서 지표에 이상체의 영향이 나타나지 않은 원인은 표피심도에 비해 3차원 이상체가 상대적으로 매우 작기 때문인 것으로 분석되었고, 10 Hz 보다 큰 주파수에서 그 원인은 표피심도가 이상체의 심도에 미치지 못하기 때문인 것으로 분석된다. 한편, 전도성 표토층이 추가된 모형에서는 지표에서 이상체의 영향이 나타나는 주파수 대역이 0.1 Hz에서 1 Hz 범위로 좁아졌으며, 이는 전도성 표토층의 영향으로 전자기장의 에너지가 감소했기 때문으로 생각된다. 이와 같은 연구로부터, 3차원 이상체를 대상으로 MT 탐사를 수행할 때에는 탐사 대상체의 크기와 위치, 특성 등을 고려해서 적절한 주파수 대역을 선정해야함을 알 수 있었다.

위에서 찾은 적절한 주파수 대역에서 이차 전기장의 거동을 vector map을 통하여 알아본 결과 이차 전기장은 이상체 경계면에서의 전하 축적에 의한 수평방향 전류 집중과 전도성 이상체 내부의 전자기 유도에 의한 유도전류에 의해 형성되었다. 전도성 표토층이 추가된 모형에서는 이차 전기장의 크기가 감소했으며, 전류 집중의 영향이 유도 전류의 영향보다 우월하게 나타났다.

또한, 지표에서 tipper를 분석한 결과 이상체 경계면 약간 외곽에서 tipper의 절댓값이 최대가 되었으며, 경계면 양쪽에서 tipper의 크기의 감소가 전도성 이상체에서 더 급격하게 나타났다. Induction vector는 두 모형 모두 실수 성분이 비전도성 지역을 향하는 특성을 나타냈으며, 허수 성분의 부호가 바뀌는 critical period는 고립이상체 모형의 경우 1 Hz와 10 Hz 사이에, 전도성 표토층이 추가된 모형의 경우 0.1 Hz와 1 Hz 사이에 존재함을 알 수 있었다.

지표 전체에서의 반응을 분석하는 것 외에 2차원 탐사와 같이 한 축선을 따라 겉보기 전기비저항과 위상, induction vector를 함께 해석하였다. 그 결과, 이와 같은 해석은 각각의 변수들을 따로 해석하는 경우보다 지하의 3차원 이상체에 대해 보다 효과적으로 정확한 정보를 제공하였다. 비록 정확한 지하 구조의 규명을 위해서는 3차원 탐사가 필요하지만, 실제 탐사에서 경제성과 현실성을 고려했을 때 2차원 탐사를 수행하더라도 겉보기 전기비저항과 위상, induction vector를 함께 이용하면 3차원 이상체에 대한 비교적 정확한 정보를 얻을 수 있

음을 확인하였다.

이상에서, 고립이상체에 의한 3차원 반응은 MT 장의 반응을 해석하는 여러 변수들에 모두 나타나며 각각은 긴밀히 연관되어 있음을 알 수 있었다. 각각의 매개변수들을 종합하여 해석하는 것은 정확하고 효율적인 지하 구조 규명을 위해 바람직함을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 일반사업인 “심부 지열에너지 개발 사업”에서 연구비 일부를 지원 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 송윤호, 박영수, 임무택, 조성준, 이성근, 손정술, 김형찬, 기원서, 고희재, 임성근, 정지민, 2003, 지열에너지 개발을 위한 심부 폴리탐사, KR-2002-B-14, 한국지질자원연구원.
- 양준모, 오석훈, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2002, 3차원 전도체의 공간적 위치 및 크기에 따른 차이지시자의 특성 연구, 지구물리, **5**, 305-319.
- 이성근, 1993, 2차원 MT 모델링과 공간 필터링을 이용한 정적효과 제거에 관한 연구, 공학석사 학위논문, 서울대학교.
- Berdichevsky, M. N., and Dmitriev, V. I., 2002, Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems, *Soc. Explor. Geophys.*
- Dosso, H. W., and Chen, J., 2000, Analogue model study of EM induction in elongated conductors-2D and 3D induction arrow responses, *Earth Planets Space*, **52**, 355-360.
- Mackie, R. L., Madden, T. R., and Wannamaker, P. E., 1993, Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations-Theory and comparisons to integral equation solutions, *Geophysics*, **58**, 215-226.
- Mackie, R. L., Smith, J. T., and Madden, T. R., 1994, Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations - The magnetotelluric example, *Radio Science*, **29**, 923-935.
- Park, S. K., 1985, Distortion of magnetotelluric sounding curves by three-dimensional structures, *Geophysics*, **50**, 785-797.
- Park, S. K., Orange, A. S., and Madden, T. R., 1983, Effects of three-dimensional structure on magnetotelluric sounding curves, *Geophysics*, **48**, 1402-1405.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics*, **54**, 254-262.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Misac N. Nabighian, Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. II, Soc. Explor. Geophys.*
- Yee, K. S., 1966, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, **AP-14**, 302-307.