

전기장 또는 자기장 송신원을 이용한 벡터 CSMT

이희순* · 송윤호**

Controlled Source Magnetotellurics with Vector Measurement Using Electric and Magnetic Sources

Heuisoon Lee* and Yoonho Song**

ABSTRACT : The horizontal magnetic dipole as well as electrical dipole was adopted as a source to compute one-dimensional electromagnetic field behavior in controlled source magnetotellurics. The Cagniard impedances due to horizontal magnetic dipole source, especially phases, showed better frequency characteristics than those due to electric one. The magnetic dipole is inferior to the electric dipole in the point of relatively weak transmitting power at low frequency. But considering high resistivity characteristics of Korean geology, the magnetic dipole source is recommended for the survey up to depth of 500 m. A vector CSMT was introduced to get more reliable data in the area of two- or three-dimensional structures. A software and interpretation technique using polarization ellipses were developed. The technique was tested by synthetic data, which provided theoretical basis of the methodology. Although CSMT has inevitable limitation of investigation depth due to practically possible source-receiver separation, we proposed to use the technique developed in this paper where MT is not available, for example, in extremely noisy area or for shallow target.

서 론

인공송신원을 이용하는 자기지전류 (Magnetotelluric; MT) 탐사는 1970년대 중반 Goldstein, Strangway (1975)가 인공송신원 AMT (Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric; CSAMT) 탐사를 제안한 후로 지열탐사 등의 심부 지질조사에 많이 사용되어 왔다 (Zonge, Hughes, 1991). CSMT (Controlled Source Magnetotelluric) 탐사의 큰 장점은 MT 탐사와 같이 평면파 가정에 입각한 카니אר (Cagniard) 겹보기 비저항을 사용하여 해석이 간편하며, MT 탐사의 단점인 미약한 송신원의 문제를 해결하였다는데에 있다. 그러나 CSMT 탐사는 송신주파수의 문제점 및 송수신 간격이 표피심도의 4배 이하 일 때에는 평면파 가정을 만족하지 않는 근본적인 한계로 인하여 가탐심도에 필연적으로 제한을 가지며, 자연장을 능가하는 강

력한 일차장을 발생시키기 위해서 매우 강력한 송신원을 동원해야 하는 현실적인 문제점을 내포하고 있다.

국내에서도 CSAMT 탐사를 탄층 탐사, 심부 암반지하수 탐사, 심부 지하구조 탐사 등에 성공적으로 적용한 바 있는데 (김정호 등, 1989; 정승환 등, 1992; 박영수 등, 1993; 이상규 등, 1996), 그 동안의 CSAMT 탐사는 한 방향의 송신 집지선을 설치하고 이에 평행한 전기장과 직교하는 방향의 자기장을 측정하여 겹보기비저항 및 위상차를 계산함으로써 해석하는 스칼라 CSAMT가 주로 이용되어 왔다. 그러나 지하구조는 근본적으로 1차원 층서구조가 아니며, CSMT 송신원의 방향에 따른 특정 수신 방향에서의 전자기장이 세기가 약해지는 등의 문제 때문에 스칼라 측정만으로는 지하의 수평적인 전기전도도 변화에 대한 해석에서 오류를 범할수 있다. Fig. 1에는 스칼라, 벡터 그리고 텐서 CSAMT 탐사법에 대한 모식도가 나와있다.

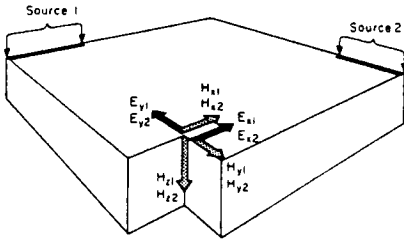
본 연구의 기본 방향은 크게 두가지로 나눌수 있다. 첫째는 스칼라 방식의 측정 및 해석상에서 전도도 변화에 분해능이 떨어지는 문제에 대한 해결책으로 벡터 측정을 통한 해석법을 개발하고 이의 효용성을 입증하고자 하였다.

둘째는 기존의 CSAMT 탐사의 집지전선 송신원을 대체하는 새로운 송신원에 대한 문제이다. 기존의 CSAMT

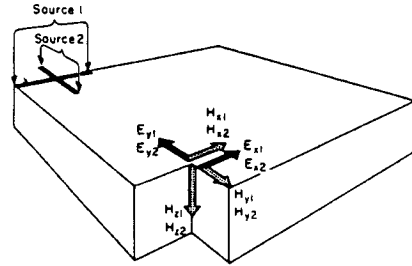
* 인천교육대학교 과학교육과 (Inchon National University of Education, Department of Science Education, Inchon 407-753, Korea)

** 한국자원연구소 자원탐사연구부 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Resources Exploration Division, Taejeon 305-350, Korea)

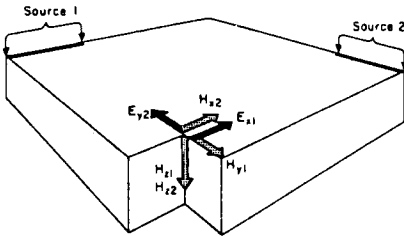
(a) Tensor CSAMT, Separated Sources



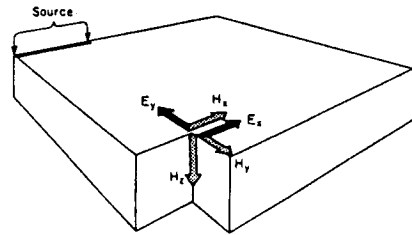
(b) Tensor CSAMT, Coincident Sources



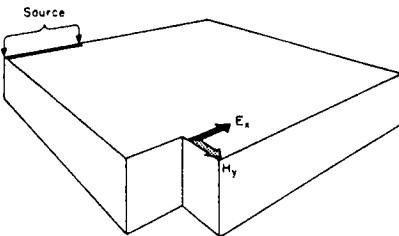
(c) Partial-Tensor CSAMT, Separated Sources



(d) Vector CSAMT



(e) Scalar CSAMT



(f) Scalar CSAET

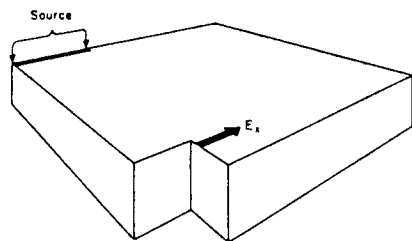


Fig. 1. Definition of tensor, vector and scalar CSAMT (after Zonge, Hughes, 1991).

탐사에서 사용하는 방법은 접지 전선을 이용한 강력한 송신원을 발생시키는 것으로 비경제성 및 위험성이 문제점으로 남아있다. 이러한 문제점을 극복해 보고자 하는 노력의 일환으로 최근 수평자기쌍극자원을 송신원으로 이용하는 인공송신원 MT 방법이 발표된 바 있다 (Nichols, et al., 1994). 자기장 송신원의 경우 접지가 불필요하므로 위험성을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면, 표피심도 증가를 위해 필수적인 저주파에서의 강력한 송신이 곤란한 단점이 있다. 그러나 국내 대부분의 지역에서 지하매질의 전기비저항이 외국에 비해 대부분 수백배에 이르므로 상대적으로 국내에서는 고주파수의 전자탐사가 유리한 점을 고려한다면 앞으로 자기쌍극자원을 송신원으로 이용하는 방식의 효율성이 높다고 하겠다.

일차장으로 전기장을 사용하느냐 혹은 자기장을 사용하느냐에 따라 측정되는 전자기장의 거동은 매우 달라지

게 되는데, 특히 근거리장 영역에서의 주파수 반응은 서로 정반대의 양상을 보인다. 따라서 본 연구에서는 송신원으로 전기쌍극자를 사용하는 경우와 자기쌍극자를 사용하는 경우에 대해 결보기 비저항 및 위상곡선을 계산하여 비교·고찰하여, 앞으로 필요성이 증대될 자기쌍극자 송신원 방식의 CSMT에 대비한 이론적 근거를 마련하고자 하였다.

층서구조에서의 전자기장

송신원으로 전기쌍극자를 사용하느냐 또는 자기쌍극자를 사용하느냐에 따라 측정되는 반응은 매우 상이한 양상을 보인다. 지금까지 전기쌍극자 혹은 접지전선을 송신원으로 하여 수치계산을 수행한 경우는 많으나, 자기쌍극자 송신원에 의한 지표에서의 전자기장 반응계산은 상대적

으로 적다. 이는 자기쌍극자 송신원의 경우 탐사방법이 소형 루프를 사용함으로써 단순히 상호 임피던스비 등으로 해석을 수행하였기 때문인데, 본 연구에서처럼 MT 탐사의 해석법을 이용한 정밀 해석을 시도하기 위해서는 정확한 수치계산이 필수적이라 하겠다.

송신방향이 수평인 자기쌍극자를 송신원으로 사용하는 이유는 접지전선 송신원과 같이 1차장의 수직성분을 최소화하기 위함이다. 서로 직교하는 전기장장의 수직성분을 측정하여 가나아르 겐보기비저항을 계산, 해석하기 위하여는 가능한 한 강력한 1차장의 수평성분이 유리하기 때문이다. 이러한 수평성분 측정에 의한 탐사법은 단순히 겐보기비저항 계산에서의 간단함 뿐만이 아니라 지하층 서구조에 대한 해상도 면에서도 매우 유리하다.

일반적으로 CSMT탐사의 송신원으로는 길이 1~2 km의 접지 전선을 사용하는데, 접지에 대한 항을 무시할 경우 이는 전기쌍극자로 근사할 수 있다 (정승환, 1989). 1차원 층서구조에서 지표에 위치한 x-방향의 전기쌍극자 송신원과 수평자기쌍극자 송신원에 의한 지표에서의 수평성분에 관한 식은 Ward, Hohmann (1987)과 송윤호 등 (1994)에 잘 정리되어 있다.

Fig. 2에는 전기비저항이 100 ohm-m 인 반무한매질에 대하여 전기쌍극자와 자기쌍극자를 송신원으로 이용하였을 경우에 이로부터 2 km 떨어진 곳에서의 가나아르 겐보기 비저항과 위상차를 도시하였다. 여기서 송-수신기 간의 거리를 2 km 로 선정 한 이유는 자기쌍극자 송신원의 경우 저주파수에서의 강력한 송신이 어렵고 또한 인공 송신원을 사용하는 MT 탐사의 장점은 지하 500 m 내외의 탐사심도에 있기 때문에, 이러한 탐사심도에 대하여 원거리장을 만족하는 4배 거리를 선정하였기 때문이다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 전기쌍극자에 의한 겐보기 비저항은 전이대 (transition zone)에서 약간의 언더슈트

(undershoot)가 나타나지만, 자기쌍극자에 의한 겐보기 비저항에는 저주파수 대역에서의 급격한 감쇠이전인 전이대에서 매우 큰 오버슈트 (overshoot) 양상을 보인다.

전기쌍극자에 의한 반응의 경우 저주파수 대역 즉, 근거리장에서는 이차장이 단지 송신원의 특성만을 반영하여 주파수에 따라 지하구조에 대한 정보를 보여주는 못한다. 또한 근거리장에서의 겐보기비저항은 전기장과 자기장의 비에 주파수의 역을 곱하는 방식으로 구해지기 때문에, 주파수가 감소할 때 로그-로그 도표에서 경사 -45°로 증가하게 되는 것이다. 반면 자기쌍극자 송신원의 경우, 이에 의한 전기장은 근거리장에서 주파수에 반비례하고 겐보기비저항은 전기장과 자기장의 비의 곱에 비례하므로 주파수로 나누어진다 하더라도 주파수의 일차항이 남게되어, 주파수가 감소할 때 45°에 비례하여 감소하는 양상을 보일 수 밖에 없다.

위상차에서의 특징은 전기쌍극자에 의한 위상차는 0°으로 수렴하는데 비해 자기쌍극자에 의한 위상차는 90°에 수렴한다는 것인데, 이는 기본적인 비오-사바르 (Biot-Savart)법칙과 패러데이 (Faraday)의 전자기유도 법칙으로 설명될 수 있다. 즉 전기쌍극자 송신원의 경우에 의한 자기장은 위상지연을 수반하지 않지만, 자기장에 의한 전기장은 시간에 대한 음의 1차 미분항으로 표현되는 -90°의 위상차를 수반하기 때문이다. 한편 전기쌍극자 송신원에 의한 위상반응은 전이주파수 대역에서 마치 또다른 층이 존재하는 것과 같은 양상을 보여주므로 자기쌍극자원에 의한 반응이 해석의 오류를 줄일 수 있다.

층서구조에 대한 반응의 특성은 접지전선을 사용한 경우에 김정호 등 (1989)에 잘 나타나있다. 따라서 여기서는 국내지질환경과 유사한 특징적인 경우에 한해서만 전기 및 자기쌍극자 송신원에 의한 반응의 특성을 살펴보고

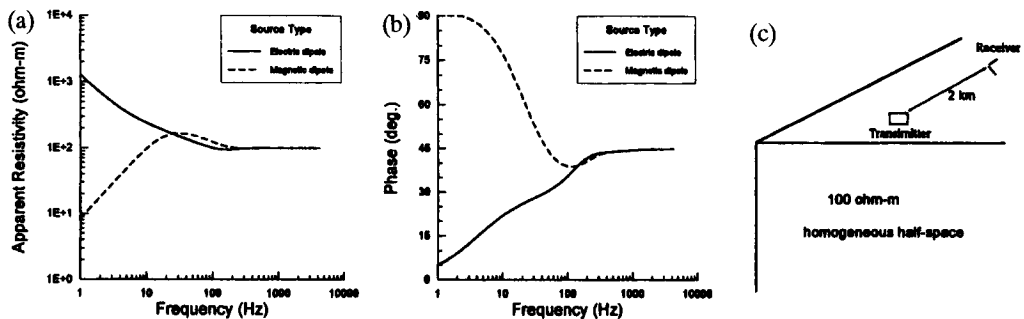


Fig. 2. Cagniard apparent resistivities (a), impedance phases (b) and earth model (c) as a function of frequency, 2 km transversely from a horizontal electric and magnetic dipole sources at the surface of a homogeneous earth. The electric dipole transmitter is located in parallel with the E-filed receiver and the magnetic dipole transmitter is perpendicular to that.

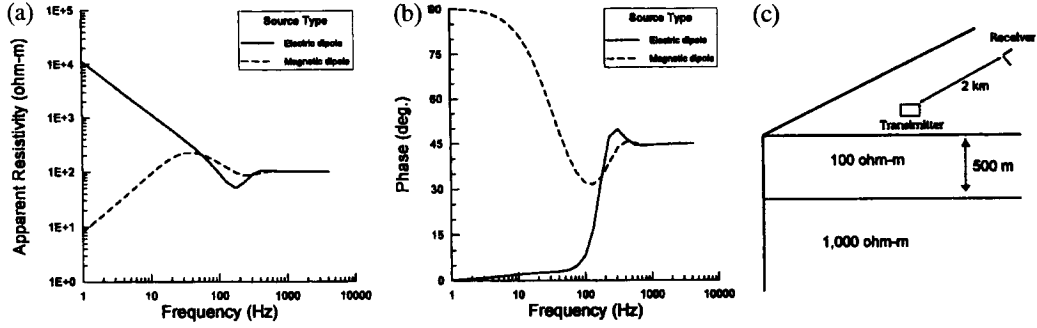


Fig. 3. Cagniard apparent resistivities (a), impedance phases (b) and earth model (c) as a function of frequency, 2 km transversely from a horizontal electric and magnetic dipole sources at the surface of a two-layered earth. The electric dipole transmitter is located in parallel with the E-filed receiver and the magnetic dipole transmitter is perpendicular to that.

자 한다. Fig. 3에는 2층구조인 경우로 1,000 ohm-m의 반무한매질위에 두께 500 m 이고 비저항이 100 ohm-m 인 상부층이 존재할 때의 반응을 보여준다. 고주파수에서는 원거리장을 만족하므로 두 경우 모두 상부층의 전기비저항인 100 ohm-m 를 보여준다. 반면 어떠한 곡선도 하부층의 존재를 잘 보여주지 못하는데, 이는 송-수신거리가 2 km로 하부층에 대한 정보를 나타내는 범위는 근거리장 영역에 속해있기 때문이다. 전기쌍극자를 사용하였을 경우 전이대에서 커다란 언더슈트를 관찰할 수있는데, 이로부터 하부에 고비저항 매질이 존재함을 짐작케 하며, 이러한 양상은 두 송신원에 의한 위상반응에서 더욱 잘 나타난다.

Fig. 4는 3층 구조의 경우로 상부층의 전기비저항 500 ohm-m, 두께가 100 m 이고, 중간층의 전기비저항이 50 ohm-m, 두께가 50 m, 그리고 하부 반무한매질의 전기비저항이 3,000 ohm-m 인 층서구조에서의 겹보기비저항과 위상차를 보여준다. 이러한 층서구조 모델은 국내의 지하수 탐사등에서 흔히 접하게 되는 구조이다. 전기쌍극자에

의한 까나아르 겹보기비저항은 고주파수대역에서는 상부층의 정보를 나타내다가 근거리장이 시작되는 전 전이대의 징후인 언더슈트가 저비저항 중간층의 반응에 섞여 잘 구분되지 않으며 이는 위상차에서도 마찬가지이다. 반면 자기쌍극자에 의한 반응은 뚜렷이 중간층의 존재를 보여주어, 이 경우 자기쌍극자 송신원이 지하의 전도도 구조를 잘 대변해 준다고 할 수 있겠다.

이러한 특성은 지하구조 모델의 선택에 따른 특이한 현상으로 생각할 수도 있으나, 국내에서 현실적으로 접하게 되는 지하구조는 최하부층이 고비저항인 경우가 대부분으로 전기쌍극자 또는 접지전선 등을 송신원으로 사용할 때 필연적으로 발생하는 언더슈트 효과를 감안한다면 자기쌍극자 송신원이 상대적으로 해석에 유리하다고 할 수 있다. 더구나, Fig. 2에서 살펴본 바와 같이 반 무한매질의 경우에서도 전기쌍극자에 의한 위상곡선은 여러층의 존재양상을 보여준다. 어떠한 경우에도 자기쌍극자 송신원에 의한 반응의 위상곡선이 전기쌍극자 송신원에 의한 것에 비해 전이대역이 좁은 양상을 보이므로 상대적으로 해

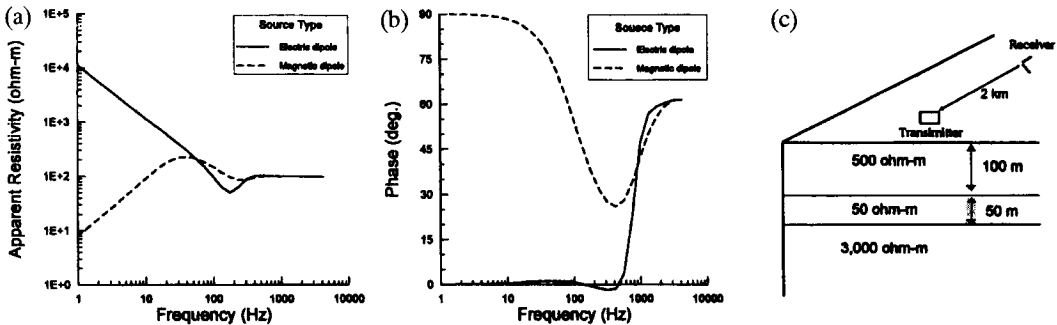


Fig. 4. Cagniard apparent resistivities (a), impedance phases (b) and earth model (c) as a function of frequency, 2 km transversely from a horizontal electric and magnetic dipole sources at the surface of a three-layered earth. The electric dipole transmitter is located in parallel with the E-filed receiver and the magnetic dipole transmitter is perpendicular to that.

석에 유리하다는 것을 보여주고 있다.

분극타원 (Polarization ellipse)

자유공간에서 전자기파의 전파는 파동방정식을 따르며 전기장과 자기장의 위상이 서로 동일한 선형분극의 양상을 나타낸다. 지하에 입사한 전자기장의 거동은 분산방정식을 따르게 되는데, 송신원으로 부터 표피심도의 4배 이상 떨어진 원거리장 영역에서의 1차원 층서구조를 제외하고는 1차장과 2차장의 합성장은 항상 타원분극의 양상을 나타낸다. 또한 지하구조가 서로 다른 전기전도도를 가지는 2차원 또는 3차원의 구조이면 전자기장은 1차원일 때의 방향에서 벗어나게 되며, 2차장의 위상지연 때문에 타원형으로 분극된다.

2차원 또는 3차원 구조에 의한 전자기장의 왜곡은 두가지 원인으로 구분할 수 있는데 첫째는 지하에 금속광체나 석탄층 같은 전기전도도가 대단히 높은 전도체가 존재하여 전자기유도로 인한 맴돌이전류 (eddy current)가 발생하는 경우이다. 이때 맴돌이 전류는 2차 자기장을 유기시켜 결과적으로 측정되는 반응에서는 전기장 및 자기장이 왜곡되게 된다.

두번째로 전자기유도가 아닌 단순한 전기장의 왜곡이 나타나는 경우로 전기장의 왜곡은 전기전도도가 변하는 곳에서는 항상 나타나지만 자기장은 크게 왜곡되지 않는다. 그 이유는 전도도경계면에서 전자기장의 거동의 차이에서 찾아질 수 있는데, 즉 전기장은 접선성분이 불연속면에서 연속이지만 수직성분이 불연속이기 때문에 전기전도도가 변하는 경계면에서는 필연적으로 전기장의 왜곡이 생기며 따라서 전기장은 전도도 경계면에 평행하게 분극되는 성질을 갖는다. 반면, 자기장은 불연속면에서 접선과 수직성분이 모두 연속이어서 이러한 왜곡이 발생하지 않는다.

이러한 전기장 왜곡의 대표적인 예가 MT 탐사자료 해석에서 큰 문제가 되는 천부 불균질체에 의한 정적효과 (송윤호 등, 1993) 이다. 정적효과는 전도도 경계면에서 발생하는 전하축적에 의한 것으로 이는 주파수에 무관하며, 따라서 교류자기장을 유도하지 않으므로 자기장의 왜곡은 발생하지 않게 된다.

또 다른 예로 전기전도도가 높지않은 파쇄대 또는 암상 경계면이 존재한다고 가정하자. 이 때에도 전기장은 그 경계면에 평행하게 분극되게 된다. 그러나 매질의 전기비저항이 높기 때문에 오옴 (Ohm)의 법칙에 의해 산란전류는 작게되며 따라서 유도되는 2차 자기장 또한 작게된다. 그러므로 결과적인 자기장의 왜곡은 전기장에 비해 상대적으로 미약할 수밖에 없다.

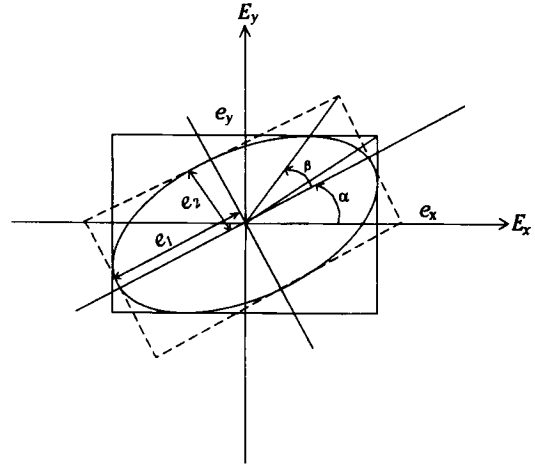


Fig. 5. The polarization ellipse and tilt angle.

Fig. 5는 분극타원의 결과로 나타나는 전형적인 타원분극을 보여주며 이때 통상적으로 지표면과 분극타원의 장축이 이루는 각을 경사각 (tilt angle) 이라 한다. 그러나 이러한 경사각의 개념은 단지 지표면과의 각이 아니라 임의의 기준, 예를 들어, 전기쌍극자 송신원의 경우 일차장의 방향과 분극타원의 장축이 이루는 각으로 해석할 수도 있다. 분극타원식의 유도 및 경사각 (식 1)의 계산은 매우 복잡한 수식을 동원함으로써 얻어지게 되며, 이러한 분극타원식과 이의 좀더 일반화된 개념인 포앵가레 구 (Poincare sphere)에 대한 자세한 수식의 유도는 송윤호 등 (1994)에 잘 나와있다.

$$\tan 2\alpha = \frac{2 \left(\frac{e_y}{e_x} \right) \cos \phi}{1 - \left(\frac{e_y}{e_x} \right)^2} \quad (1)$$

여기서 e_x, e_y 는 서로 직교하는 전기장 (혹은 자기장)의 수평성분이고, ϕ 는 두 성분의 위상차, 그리고 α 는 경사각이다.

본 연구에서는 임의의 송신원에 의한 서로 직교하는 전자기장 측정치로부터 분극타원을 계산하여 도시하는 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 특정 주파수에 대해 수신 위치에 따른 실제 위치별로 분극타원을 도시할 수 있으며, 또한 임의의 수신위치에서 측정 주파수별 분극타원의 도시도 가능하다. 분극타원의 계산과 동시에 각 측정 또는 주파수에서의 경사각과 전자기장의 최대값이 계산되며, 이는 뒤에 설명할 최대값을 이용한 또 다른 결보기비저항 계산에 이용된다.

Fig. 6은 개발된 소프트웨어를 이용하여 1,000 ohm-m 반무한매질의 지표에 위치한 전기쌍극자에 의한 주파수

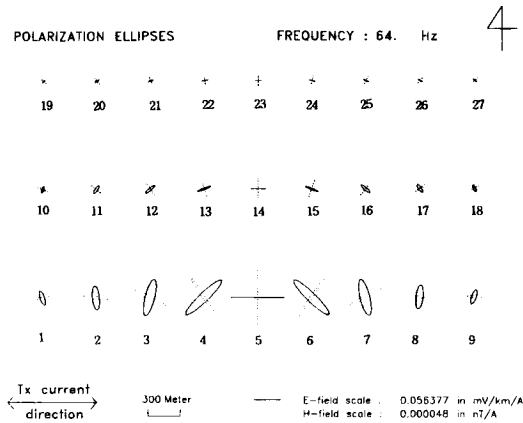


Fig. 6. The polarization ellipses at each field station due to horizontal electric dipole source at the surface of 1,000 ohm-m homogeneous earth which shows the behavior of the primary electric and magnetic field.

64 Hz 에서의 측정자료로 부터 측정별 분극타원을 도시한 그림이다. 그림에서 5번 측정점은 전기쌍극자의 중심으로부터 직각방향으로 1.5 km 떨어져 있다. 그림은 소프트웨어 출력을 그대로 나타낸 것으로서 전기장은 실선으로 자기장은 점선으로 표시되며, 평면상에서 가장 큰 전자기장의 값으로 정규화되어 도시되고 그 값이 선분의 길이와 함께 우측하단에 나타난다. 쌍극자의 중심에서 그 방향과 직교하는 방향으로의 3측점은 분극된 모습이 보이지 않지만 (5, 14, 23 번 측정), 중심에서 벗어나면 분극타원의 양상을 보여준다. 사용된 모형이 균질 반무한 공간이므로 타원분극의 양상이 나타나지 않아야 하지만, 그림에서 분극타원을 볼 수 있는 것은 이 주파수가 근거리장 영역에 속해 있음을 증명한다. 따라서 송신원에 가까운 측정에서 타원분극의 형태가 뚜렷해 진다.

Fig. 7은 Fig. 6의 16번 측정점에서의 주파수별 분극타원의 양상을 출력한 것이다. 고주파수에서는 원거리장 영역에 속하므로 선형분극의 양상을 보이나 주파수가 낮아질 수록 근거리장 영역에 들어 타원분극의 형상을 나타낸다. 여기서 중요한 것은 송신원의 영향으로 근거리장 영역에서의 전기장 분극타원의 장축은 어떤 경우에도 원거리장 영역 즉, 선형분극된 경우의 축방향과 일치하지 않는다. 따라서 전기장 분극타원의 장축과 자기장분극타원의 장축이 이루는 각도 또한 고주파수인 경우를 제외하고는 90°가 되지 않는다. Fig. 2에서 보여지는 전기쌍극자에 의한 전기장의 위상곡선에서 나타나는 바와 같이 원거리장으로부터 근거리장 영역으로 주파수가 감소할 때, 단조감소가 아닌 큰 변화를 보이는 것이 이로써 설명될 수 있다.

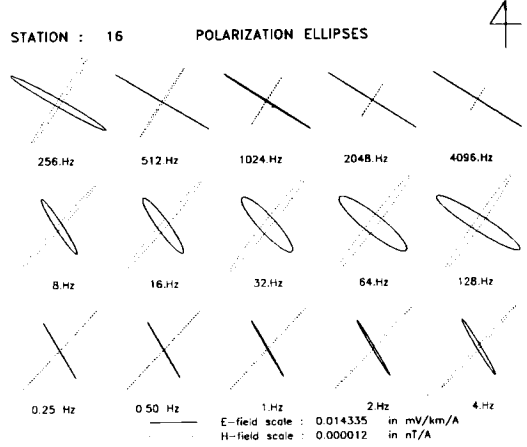


Fig. 7. The polarization ellipses as a function of frequency at the station 16 of Fig. 6.

Fig. 8은 Fig. 7에 나타난 측정에서의 가나아르 걸보기 비저항 및 위상차 곡선을 보여준다. 그림에서 E_x/H_y 로 표

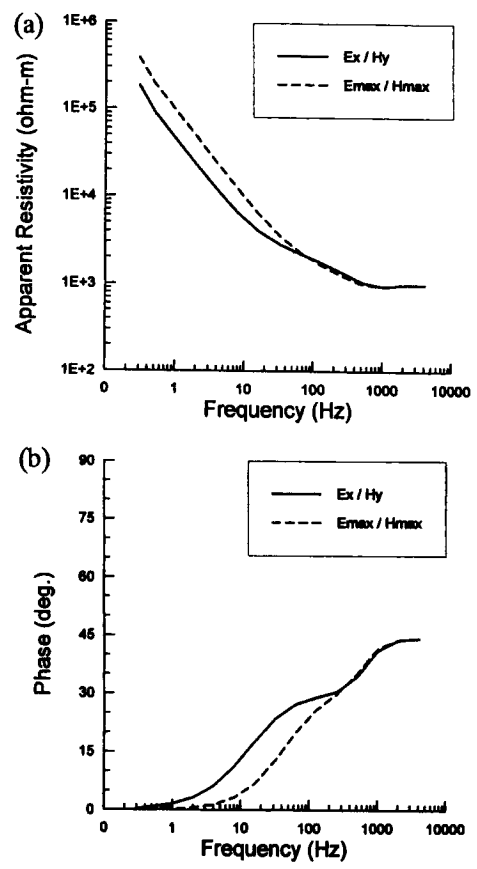


Fig. 8. Cagniard apparent resistivity and phase curves at the station of Fig. 7.

시한 곡선은 통상적인 CSAMT에서 사용하는 송신방향의 전기장 및 그에 수직인 방향의 자기장성분을 이용한 겹보기비저항 곡선 및 위상차 곡선이다. 한편 E_{max}/H_{max} 로 표시된 곡선은 Fig. 7에서 볼 수 있는 분극타원의 최대값 즉, 장축방향 값을 이용한 결과를 보여준다. 그림에서 보면 겹보기비저항 곡선은 두 경우가 거의 비슷하지만 위상차 곡선은 서로 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다. 즉, 최대값을 이용한 위상곡선은 균질 반무한 공간의 정보를 나타내는 45°에서 저주파로 갈수록 0°로 거의 단조감소하는 반면, 종래의 방식으로 계산된 위상곡선은 마치 또다른 층이 존재하는 것과 같은 양상을 보인다. 이는 이 축점이 송신원으로 부터 대각선으로 벌어져 있는 결과인데, 물론 CSAMT 탐사에서 축선이 항상 접지 송신원의 범위에 들어 있다면 해석에 문제가 되지 않겠지만, 종종 현장에서 발생하는 경우와 같이 송신원으로 부터 대각선으로 30° 이상 벌어져있는 경우 해석에 오류를 발생시킬 수 있다.

송신과 평행 및 직교하는 전기장 및 자기장을 사용하는 종래의 까니아르 겹보기비저항 (ρ_c)과 본 연구에서 제안하는 최대값 이용방식 (ρ_{max})을 정리하면 다음과 같다.

$$\rho_c = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2, \phi_c = \phi_E - \phi_H \quad (2)$$

$$\rho_{max} = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_{max}}{H_{max}} \right|^2, \phi_{max} = \phi_{E_{max}} - \phi_{H_{max}} \quad (3)$$

여기서 E : 전기장의 세기 (V/m)

H : 자기장의 세기 (A/m)

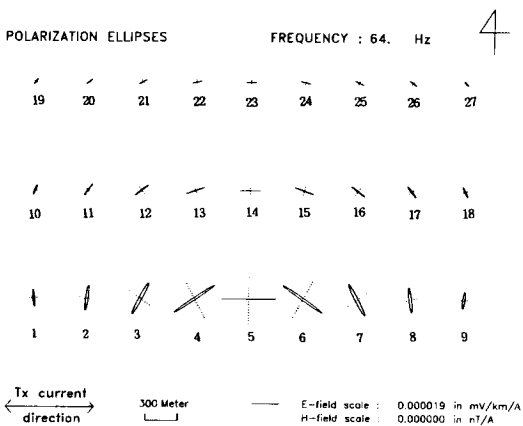


Fig. 9. The polarization ellipses at each field station due to horizontal magnetic dipole source is the surface of 1,000 ohm-m homogeneous earth which shows the behavior of the primary electric and magnetic field.

- μ : 진공에서의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- ω : 각주파수
- ϕ : 위상차
- ϕ_E : 전기장의 위상
- ϕ_H : 자기장의 위상

Fig. 6에서 사용한 동일한 송-수신 방식과 지하 모형에 대해 자기쌍극자 송신원을 사용하였을때의 출력역이 Fig. 9에 보여진다. 이 경우 자기쌍극자의 방향이 남북 방향이므로 송신원의 영향이 없는 원거리장 영역에서의 반응 양상은 전기쌍극자 송신원에 의한 반응인 Fig. 6과 동일하여야 하며, 비교 결과는 이를 입증한다. 그러나 반응의 크기는 자기쌍극자원의 경우가 훨씬 작는데 이는 전자기장의 이론반응 계산에서 충분히 예측 가능하다. 이 경우에도 역시 근거리장 영역에서는 지구구조가 균질함에도 불구하고 송신원의 영향으로 타원분극을 보이는데 그 정도는 전기쌍극자의 경우 (Fig. 6)에 비해 미약하다.

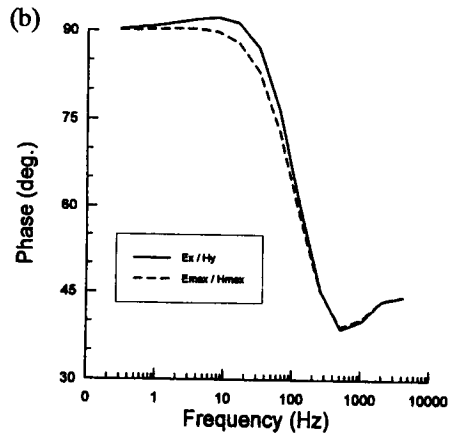
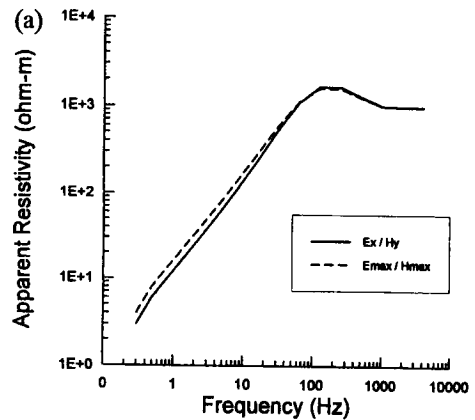


Fig. 10. Cagniard apparent resistivity and phase curves at the station 16 of Fig. 9.

Fig. 10 은 Fig. 9의 16번 측정에서 계산된 까니아르 결보기비저항과 전자기장의 최대값을 이용한 결보기 비저항 그리고 각 경우의 위상차를 보여준다. 이 경우에는 전기쌍극자의 경우 (Fig. 8) 에 비해 두 가지 결과가 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 이 때도 최대값을 이용한 경우 (E_{max}/H_{max})의 위상차 곡선은 근거리장 영역으로 접근할 때 쉽게 90°로 접근하는 반면, 종래의 방법에 의한 경우 (E_s/H_s)는 오버슈트를 보여준다.

지금까지의 결과는 1차원 층서구조일 경우라도 송신원과의 각도에 따라 차이는 있지만 서로 직교하는 전기장 및 자기장 성분을 모두 측정함으로써 최대값을 이용하여 결보기 비저항 및 위상차를 계산함이 유리하다는 것을 입증해 준다. 더구나 지하구조는 어떠한 경우에도 완벽한 층서구조일 수 없으며, 2차원 혹은 3차원 구조일 경우 종래의 스칼라 CSAMT 는 해석상 오류를 야기할 소지가 매우 많음을 알 수 있다. 또한 앞서 살펴본 바와 같이 천부 불균질체에 의한 정적효과가 발생할 경우에 이는 단지 전기장에만 영향을 미치게 되므로 벡터 측정을 통한 타원분극의 고찰로 이를 충분히 파악할 수 있게 된다.

결 론

MT 탐사에서 미약한 송신원의 문제를 극복하기 위한 CSMT 탐사법의 현장적용성 및 해석시의 분해능을 향상시키고자 송신방식과 측정방식의 변화를 전제로한 새로운 탐사방법 및 해석법의 개발을 시도하였다.

첫째, 접지전선을 송신원으로 이용하는 종래의 CSA-MT 탐사법에서 송신원 설치의 문제점을 해결하기 위하여 수평자기쌍극자를 송신원으로 사용하는 경우의 반응을 계산하고 그 특성을 비교, 고찰하였다. 자기쌍극자 송신원에 의한 반응, 특히 위상차 곡선은 전기쌍극자 송신원에 비해 양호한 주파수 특성을 보여주어 해석상 유리한 것으로 나타났다. 앞으로 현장탐사를 위한 탐사기법 등의 개발이 요구된다. 자기쌍극자는 접지전선에 비해 저주파수 대역에서 강력한 송신원을 발생시킬 수 없는 단점이 있으나, 국내 지질의 높은 전기비저항을 감안할 때 심도 500 m 내외의 탐사시 활용도가 매우 높으리라 판단된다.

둘째, 기존의 스칼라 CSAMT 에서의 전기전도도 변화에 대한 분해능 감소를 해결하기 위하여 벡터 CSMT 개념을 도입하고, 분극타원도를 작성하여 해석하는 소프트웨어 및 해석법을 개발하였다. 벡터 측정을 통한 2차원적

해석에서 단순히 송신방향에 평행한 전기장과 이에 수직인 자기장 성분만을 가지고 까니아르 임피던스를 계산하는 방식에서 벗어나, 전기장 및 자기장의 최대값을 이용하여 임피던스를 구함으로써 2차원 구조에 의한 정적효과 등을 감소시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

인공송신원을 이용한 AMT 혹은 MT 탐사법은 송신주파수 및 송-수신기 간격의 제약에서 오는 가탐심도의 제약이라는 필연적인 문제를 안고 있다. 그러나 MT 탐사의 수행이 어려운 극심한 잡음 지역에서의 탐사 또는 특정 탐사심도를 위해서 적용될 때, 본 연구에서 개발된 소프트웨어 및 해석법의 도입은 간편성과 정확성의 면에서 훌륭한 성과를 제공하리라 판단된다.

참고문헌

- 김정호, 정승환, 전정수 (1989) CSAMT 탐사자료의 1차원 해석에 관한 연구. 한국자원공학회지, 26권, p.423-431.
- 박영수, 송윤호, 이희일, 임무택, 정현기, 박인화, 이상규, 이태섭 (1993) 조령지역 암반수 개발을 위한 물리탐사. 대성탐사개발 (주).
- 송윤호, 이희순, 정승환, 김정호, 정현기, 최종호 (1994) 벡터 CSAMT, 전기, 전자탐사 연구. KR-94 (C)1-17, 한국자원연구소.
- 송윤호, 조인기, 정승환, 김정호, 전정수 (1993) 2차원 MT 탐사-EMAP 탐사: 전기, 전자탐사 연구. KR-93-1G-7, 한국자원연구소.
- 이상규, 황세호, 박인화, 이희순 (1996) CSAMT와 LOTEM을 병행한 대규모 심부 물리탐사. 한국자원공학회 제 66회 학술발표회 논문집, p.233-236.
- 정승환, 조인기, 김정호, 전정수 (1989) CSAMT 탐사자료의 1차원 자동역산 탐사기술개발연구. KR-89-2D-2, 한국동력자원연구소.
- 정승환, 김정호, 조인기, 전정수 (1992) 종합적 물리탐사에 의한 파쇄대 및 심부 지하수 탐사. 지질공학, 2권, p.113-130.
- Goldstein, M.A., and Strangway, D.W. (1975) Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. Geophysics, v. 40, p. 669-683.
- Nichols, E.A., Morrison, H.F., and Lee, S. (1994) Controlled source magnetotellurics for groundwater. 64th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded abstract, p. 553-554.
- Ward, S.H., and Hohmann, G.W. (1987) Electromagnetic theory for geophysical applications, in Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol. I: Soc. Expl. Geophys. p. 131-311.
- Zonge, K.L. and Huges, L.J. (1991) Controlled source audio-frequency magnetotellurics, in Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol. II. Soc. Expl. Geophys., p. 713-809.