

## Cagniard 임피던스를 이용한 수평 자기쌍극자 송신원 전자탐사 자료의 해석

권형석<sup>1)</sup> · 송윤호<sup>2)</sup> · 설순지<sup>3)</sup> · 손정술<sup>2)</sup> · 서정희<sup>4)</sup>

### Interpretation of Finite HMD Source EM Data using Cagniard Impedance

Hyoung-Seok Kwon<sup>1)</sup>, Yoonho Song<sup>2)</sup>, Soon-Jee Seol<sup>3)</sup>, Jeong-Sul Son<sup>2)</sup> and Jung-Hee Suh<sup>4)</sup>

**요약 :** 이 연구에서는 1 kHz~1 MHz 주파수 대역의 수평 자기쌍극자 송신원에 의한 Cagniard 임피던스를 이용하여 지하매질의 2차원적인 전기전도도 분포에 대한 해석기법을 개발하고자 하였다. 먼저, 균질 반무한 공간과 수평 층서구조 모형에서 수평 자기쌍극자 송신원이 존재하는 경우, 서로 직교하는 수평 전기장과 자기장의 비로 정의되는 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을 계산하는 방법에 대해 고찰하였다. 평면파 가정을 이용하는 종래의 방법을 이용하여 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을 계산할 경우에는 유한한 송신원의 영향으로 음의 겉보기 비저항이 나와 이의 적용을 어렵게 한다. 이에 반해, 수평 자기쌍극자 송신원을 고려할 경우 안정적인 양의 겉보기 비저항을 구할 수 있었으며, 이를 통해 지하매질의 개략적인 전기전도도 분포를 획득할 수 있었다. 다음으로, 전도성 또는 비전도성 고립이상체가 존재하는 2차원 모형을 설정하여 Cagniard 임피던스와 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항의 적용성을 고찰하였으며, 그 결과 배경매질과 이상체의 전기전도도 분포를 구할 수 있었다. 또한, 전도성과 비전도성 고립이상체가 복합적으로 존재하는 2차원 모형에서 주파수에 따른 겉보기 비저항 가단면도와 Cagniard 임피던스 위상 가단면도를 작성하였으며, 이를 통해 2차원 구조에 의한 소로브에 의해 다소 왜곡되기는 하지만 전기적 이상체의 위치와 개략적인 전기전도도 분포를 획득할 수 있었다.

**주요어 :** 전자탐사, 수평 자기쌍극자, 송신원 효과, Cagniard 임피던스, 겉보기 비저항

**Abstract :** We have introduced a new approach to obtain the conductivity information of subsurface using Cagniard impedance over two-dimensional (2-D) model in the presence of horizontal magnetic dipole source with the frequency range of 1 kHz~1 MHz. Firstly, we designed the method to calculate the apparent resistivity from the ratio between horizontal electric and magnetic fields, Cagniard impedance, considering the source effects when the plane wave assumption is failed in finite source EM problem, and applied it to several numerical models such as homogeneous half-space or layered-earth model. It successfully provided subsurface information even though it is still rough, while the one with plane wave assumption is hard to give useful information. Next, through analyzing Cagniard impedance and apparent resistivity considering source effect over 2-D models containing conductive- or resistive-block, we showed that the possibility of obtaining conductivities of background media and anomaly using this approach. In addition, the apparent resistivity considering source effect and phase pseudosections constructed from Cagniard impedance over the isolated conductive- and resistive block model well demonstrated outlines of anomalies and conductivity distribution even though there were some distortions came from sidelobes caused by 2-D body.

**Keywords :** electromagnetic, horizontal magnetic dipole, source effect, Cagniard impedance, apparent resistivity

## 서론

이 연구에서는 지표에 위치한 주향(y) 방향의 수평 자기쌍극자(horizontal magnetic dipole; HMD)  $M_y$ 를 송신원으로 사용하여 지표에서 서로 직교하는 전기장  $E_x$ 와 자기장  $H_z$ 를 계

산였다. 또한, 이로부터 전기장과 자기장의 비인 Cagniard 임피던스 자료를 얻어 이를 분석하고 정량적인 해석을 수행함으로써 지하매질의 전기전도도 분포를 규명하는 방법을 개발하고자 하였다. 사용하는 주파수는 1 kHz~1 MHz 대역으로 100 kHz 이하의 주파수를 사용하는 통상적인 전자탐사에 비해 높

\*2002년 4월 16일 접수

1) (주)희송지오택

2) 한국지질자원연구원, 탐사개발연구부 (Geophysical Exploration and Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

3) 부경대학교 환경탐사공학과 Post Doc.

4) 서울대학교 지구환경시스템공학부

은 주파수 대역까지 포함하며, 이는 지반조사나 환경오염 조사에 필요한 20 m~30 m 내의 심도의 고분해능 자료를 얻기 위함이다.

수평 또는 수직 코일이나 루프를 이용하는 대부분의 전자탐사에서는 전체 자기장을 측정하여 일차 자기장과 비인 상호 임피던스비(mutual impedance ratio)를 통해 겉보기 비저항을 계산한다. 하지만, 이 방법은 지하매질에 2차원 구조를 가지는 이상체가 존재하는 경우 두개의 peak 값을 가지며 부호가 변하는 경우가 많아 이로부터 계산되는 겉보기 비저항이 음의 값이 되어 그 적용을 어렵게 한다. 이와는 달리, 자연장을 송신원으로 사용하는 MT 탐사에서는 평면파 가정을 이용하여 서로 직교하는 수평 전기장과 자기장의 비인 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을 계산하는 방법을 사용함으로써 이러한 문제를 완화시킨다. 이는 Cagniard 임피던스가 전기장에 비해 직교하는 자기장으로 나누어 줌으로써 자기장에 비해 송신원의 영향이 작으며, 항상 양의 값을 갖기 때문이다. 그러나, 유한한 거리에 위치한 자기쌍극자와 같이 평면파 가정을 만족하지 않는 경우에는 기존의 간단한 겉보기 비저항 계산, 비교적 빠른 2차원 역산 등 Cagniard 임피던스 방법의 장점을 이용할 수 없으며, 송신원의 영향을 반드시 고려해야 한다.

이에 송윤호 등(2001)은 균질한 반무한 공간에 수평 자기쌍극자 송신원이 존재하는 경우에 송신원 효과를 고려하여 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을 계산하는 방법을 제안하였으며, 균질한 반무한 공간과 수평 층서구조 모형에 대한 적용을 통해 그 효용성을 검증하였다.

하지만, 송신원 효과를 고려하여 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을 계산하는 방법을 실제 현장자료에 적용하기 위해서는 2차원 모형에 대한 적용성이 요구된다. 이에 이 연구에서는 2차원 모형을 설정하여 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항 계산방법을 적용하였으며, 이를 통해 이 방법의 효용성을 고찰하였다. 먼저, 전도성 또는 비전도성 고립이상체가 존재하는 모형을 설정하여 이상체 상부에서의 Cagniard 임피던스와 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항의 양상에 대해 살펴보았다. 다음으로 전도성과 비전도성 고립이상체가 복합적으로 존재하는 모형을 설정하여 Cagniard 임피던스로부터 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항 가단면도와 Cagniard 임피던스 위상 가단면도를 작성하였다. 또한, 이를 통해 2차원 구조가 1차원적인 해석인 겉보기 비저항과 Cagniard 임피던스 위상에 미치는 영향과 이들을 이용한 이상체의 탐지 가능성을 살펴보았다.

이 연구에서는 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항 가단면도와 Cagniard 임피던스의 위상 가단면도와 같이 2차원 이상의 구조를 가지는 현장에서 간편하고 신속하게 적용할 수 있는 해석기법을 개발하고자 하였다. 이 연구에서 반응계산은 권형석 등(2002)에 의해 개발된 2.5차원 유한요소 모델링 알고리즘을 이용하였다.

## 수평 자기쌍극자 송신원

### Cagniard 임피던스

자연장을 송신원으로 사용하는 MT 탐사에서는 송신원이 평면파라는 가정하에 서로 직교하는 수평 전기장과 자기장의 비인 Cagniard 임피던스를 이용하여 지하매질의 전기전도도를 구한다. 송신원이 표피심도(skin depth)  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ 의 4배 이상되는 충분히 먼 거리에 있다면, 송신원에 의한 일차장보다 이상체에 의한 이차장이 커서 원거리장(far field)으로 근사시킬 수 있고(Zonge and Hughes, 1991), 이 경우 평면파 가정의 적용이 가능하므로 Cagniard 임피던스는 준정적 근사(quasi-static approximation)를 만족할 때 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} e^{i\frac{\pi}{4}} \quad (1)$$

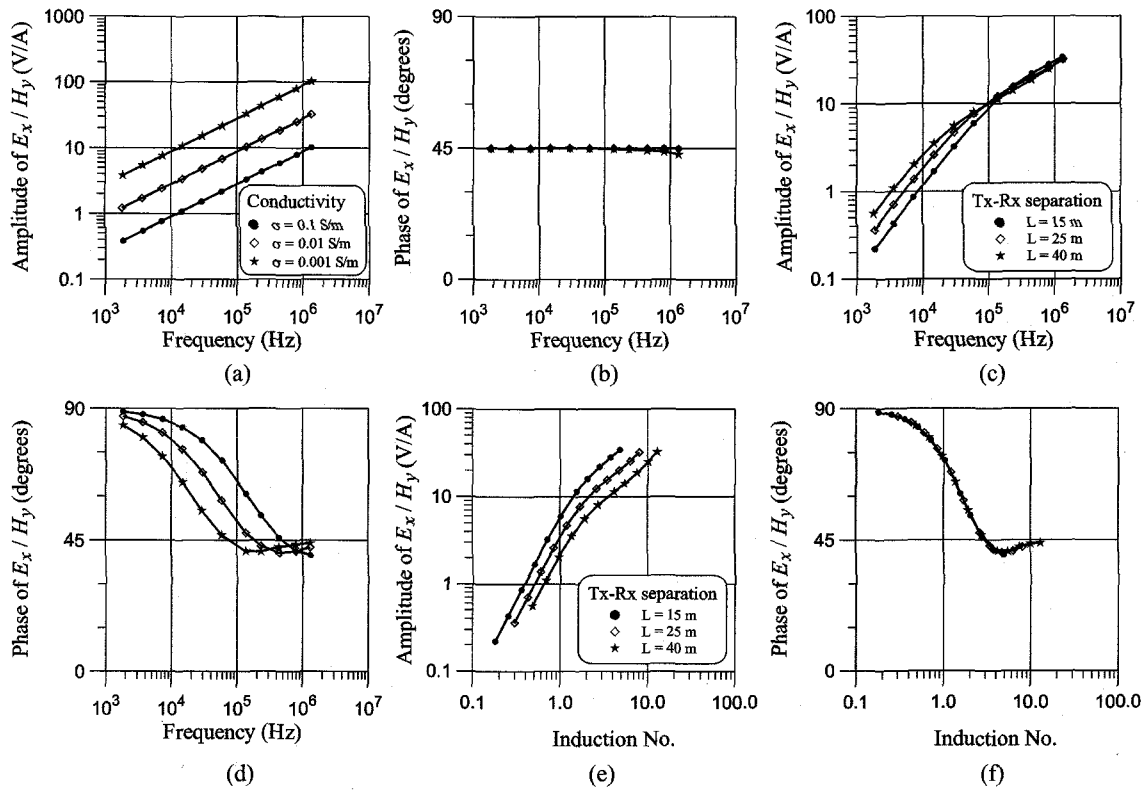
여기서  $Z_{xy}$ 는 Cagniard 임피던스(V/A),  $E_x$ 는 x방향 전기장(V/m),  $H_y$ 는 y방향 자기장(A/m),  $\omega$ 는 각주파수(Hz),  $\mu$ 는 투자율(H/m),  $k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma}$ 는 전파상수,  $\sigma$ 는 전기전도도(S/m),  $i$ 는 허수를 나타내며, 이 연구에서 투자율은  $\mu = \mu_0(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ 로 가정하였다.

Fig. 1(a)와 (b)는 전기전도도가 0.1, 0.01, 0.001 S/m인 균질 반무한 공간에서 평면파 송신원에 의한 Cagniard 임피던스의 진폭과 위상을 도시한 것이다. 먼저, (a)의 진폭을 보면 주파수와 진폭에 대한 로그-로그 그래프에서 1/2의 기울기를 갖는 직선으로 표현된다. 이는 100 kHz 이하의 주파수 대역에서는 변위전류에 의한 영향을 무시할 수 있다는 준정적 근사에 의해 전파상수가  $k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma}$ 이 되어 (1)식과 같이 Cagniard 임피던스의 진폭이  $\sqrt{\omega}$ 에 비례하기 때문이며, (b)의 위상은 주파수와 독립적으로 45°의 값을 갖는다.

이에 반해 수십 m 거리에 위치한 자기쌍극자를 송신원으로 사용하는 경우에는 수백 kHz 이하의 주파수 대역에서 송신원에 의한 일차장의 영향으로 Cagniard 임피던스를 (1)식과 같이 간단하게 나타낼 수 없다. 다음 식은 송신원이 y 방향의 수평 자기쌍극자  $M_y$ 일 때의 Faraday 법칙을 성분별로 정리한 것이다.

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} + i\omega\mu H_y = -i\omega\mu M_y \quad (2)$$

Fig. 1(c)와 (d)는 전기전도도가 0.01 S/m인 균질 반무한 공간에서 수평 자기쌍극자 송신원에 의한 Cagniard 임피던스의 진폭과 위상으로, 송신원의 거리가 15, 25, 40 m일 때의 값을 도시한 것이다. 여기서, 수평 자기쌍극자 송신원  $M_y$ 와 자기장 코일  $H_y$ 는 동일 평면(coplanar)에 위치하며, 전자기장은 쌍극자 송신원에 의한 수평 층서구조에서의 전자기장을 정확히 계산한다고 알려진 EM1D 프로그램(Pellerin et al., 1995)을



**Fig. 1.** Amplitude (a) and phase (b) curves of impedance by plane wave for homogeneous half-space with varying conductivity, and those by HMD source ((c) and (d)) for 0.01 S/m homogeneous half-space with varying Tx-Rx separation as a function of frequency. (c) and (d) are redrawn as a function of induction number for more quantitative interpretation of source effect ((e) and (f)).

이용하여 계산하였다. Fig. 1(c)와 (d)를 보면 주파수가 증가함에 따라 임피던스의 진폭은 1/2의 기울기를 보이며 위상은 45°에 근사하여 평면파 송신원과 유사한 특성을 보인다. 특히, 임피던스의 진폭을 보면 100 kHz 이상의 주파수 대역에서 송신원에 의한 영향이 줄어들어 송수신기의 거리와 무관하게 진폭이 동일한 값을 보이고 있다. 이에 반해, 저주파 대역에서는 Cagniard 임피던스의 진폭이 1/2 이상의 기울기를 보이며 위상은 90°로 근사하고 있다. (2)식을 보면, 자기쌍극자 송신원에 의한 전기장은 주파수에 비례하여 증가하는데 반해 자기장은 일정한 값에 수렴하며, 전기장은 90°의 위상차를 보이는데 반해 자기장은 위상차가 나타나지 않는다. 따라서 전기장과 자기장의 비인 Cagniard 임피던스는 주파수가 감소함에 따라 주파수에 비례하여 진폭이 감소하고 위상은 90°로 근사하게 되며, 이는 자기장 송신원의 특성을 보여주는 것이다(송윤호 등, 1994).

유한한 거리에 위치한 쌍극자 송신원에 의한 전자기장은 매질의 전기전도도, 주파수와 송수신기의 거리 등에 의해 특성이 결정되므로, Fig. 1(c)와 (d)의 곡선은 배경매질의 전기전도도에 따라 주파수 대역이 달라진다. 이에 유한한 거리에 위치한 쌍극자 송신원에 의한 전자기장은 유도상수(induction number)  $|k|L = \sqrt{\omega\mu\sigma}L$  를 이용하여 주로 나타내며, 여기서  $L$ 은 송수신기의 거리이다. 일반적으로 유한한 송신원에 의한 전자기

장은 유도상수가 1 이하인 거리에서는 송신원에 의한 일차장이 지배적인 근거리장(near field)의 특성을 보이며, 2~3 이상의 거리에서는 일차장보다 이차장의 영향이 큰 원거리장의 특성을 보인다(West and Macnae, 1991). Fig. 1(e)와 (f)는 Cagniard 임피던스의 진폭과 위상을 유도상수에 대해 도시한 것으로, 임피던스의 진폭을 보면 1 이하의 유도상수에서는 2 내외의 기울기를, 2 이상에서는 1 내외의 기울기를 보인다. 이는 유도상수는  $\sqrt{\omega}$ 에 비례하는데 반해, 임피던스의 진폭은 유도상수 1이하의 근거리장에서는  $\omega$ 에 비례하며, 2 이상의 원거리장에서는  $\sqrt{\omega}$ 에 비례하기 때문이다. 한편, (f)의 위상을 보면, 1 이하의 유도상수에서는 70° 이상으로 송신원에 의한 일차장이 큰 영향을 보이는 것을 알 수 있으며, 2 이상에서는 45° 내외의 값을 보여 송신원에 의한 영향이 크게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한, 임피던스의 진폭과 달리 송수신기의 거리와 무관하게 동일한 값을 보여, 송수신기의 거리와 주파수에 따른 전자기장의 특성을 정량적으로 해석하는데 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

**송신원을 고려한 겉보기 비저항**

지하매질의 전기전도도 분포에 대한 정보를 얻는 가장 손쉬운 방법으로는 지하매질을 균질한 반무한 공간으로 가정했을 때의 전기비저항 값을 의미하는 겉보기 비저항( $\rho_a$ )을 들 수 있

다. 송신원에 의한 일차장이 존재하지 않는 평면파 송신원은 준정적 근사에 의해 (1)식으로부터 간단하게 겉보기 비저항을 구할 수 있다.

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (3)$$

이에 반해 수십 m 거리에 위치한 쌍극자 송신원의 경우에는 송신원에 의한 일차장이 존재하여 (3)식과 같이 간단한 식을 통해 겉보기 비저항을 구할 수는 없다. 균질 반무한 공간에 수평 자기쌍극자 송신원  $M_y$ 와 자기장 코일  $H_y$ 가 지표상의 동일 평면(coplanar)에 존재하며, 송수신기의 거리가  $L$ 이라 하면 Cagniard 임피던스는 다음과 같이 표현된다(송윤호 등, 2001).

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = i\omega\mu k^2 L^3 \frac{I_1\left(\frac{ikL}{2}\right) K_1\left(\frac{ikL}{2}\right)}{[3+k^2L^2 - (3+3ikL - k^2L^2)e^{-ikL}]} \quad (4)$$

여기서  $I_1$ 과  $K_1$ 은 각각 제1종 및 제2종 변형된 Bessel 함수이다. (4)식에서 전파상수는 준정적 근사에 의해  $k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma}$ 가 되므로 Cagniard 임피던스는 반무한 공간의 전기전도도  $\sigma$ 를 변수로 갖는 복소함수가 된다. 따라서 계산된 Cagniard 임피던스로부터 쌍극자 송신원을 고려하여 겉보기 비저항을 구하기 위해서는 (4)식을 만족하는 해인 전기전도도를 찾으면 된다(송

윤호 등, 2001).

송신원에 의한 일차장이 겉보기 비저항에 미치는 영향을 알아보기 위해 전기전도도가 0.01, 0.001 S/m인 균질 반무한 공간에서 수평 자기쌍극자 송신원에 의한 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을 구하였으며, Fig. 2는 그 결과이다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 Cagniard 임피던스로부터 (3)식의 평면파를 가정하여 구한 겉보기 비저항으로, 모델이 균질한 반무한 공간이므로 송신원의 효과만 없다면 겉보기 비저항은 참 비저항이 되어야 한다. 그러나, 앞서 Cagniard 임피던스에 대한 고찰에서 알 수 있듯이 원거리장 근사가 가능해서 평면파 가정을 만족하는 고주파 대역에서는 반무한 공간의 전기비저항 값에 수렴하는 양상을 보이나, 저주파 대역에서는 송신원의 영향으로 올바른 값을 찾아가지 못하고 주파수가 낮아짐에 따라 감소하는 양상을 보인다. 이는 저주파 대역에서는 Cagniard 임피던스가 주파수에 비례하므로 Cagniard 임피던스의 제곱을 주파수와 투자율의 곱으로 나눈 값인 겉보기 비저항도 주파수에 비례하기 때문이다. 한편, 전기비저항이 0.01 S/m이고 송수신기의 거리가 15, 25, 40 m일 때, 송수신기의 거리가 표피심도의 4배 이상이 되어 원거리장 근사가 가능해지는 주파수는 각각 1.80 MHz, 640 kHz 및 250 kHz 이상이다. 따라서 1 kHz~1 MHz의 주파수 대역에서는 평면파 가정을 만족하는 주파수 대역이 작아 평면파 가정을 이용한 겉보기 비저항을 사용하는데

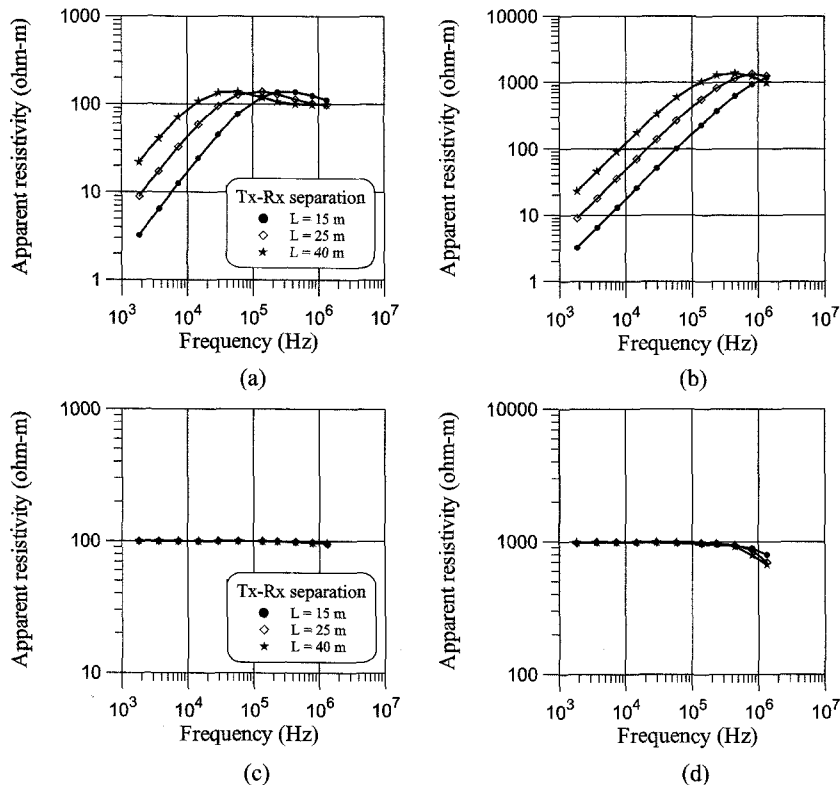


Fig. 2. Apparent resistivity curves for 0.01 S/m (a) and 0.001 S/m (b) homogeneous half-spaces adopting plane wave assumption, and those considering source effect from impedance data excited by HMD source ((c) and (d)).

는 한계가 있다.

Fig. 2(c)와 (d)는 Cagniard 임피던스로부터 (4)식과 같이 송신원 효과를 고려하여 구한 겉보기 비저항이다. 고주파 대역에서 주파수가 증가함에 따라 변위전류의 영향에 의해 겉보기 비저항이 참 비저항을 약간 벗어나는 것을 제외하면 모든 주파수 대역에서 참 비저항을 잘 찾아간다. 이로부터 이 연구에서 적용된 알고리즘이 송신원 효과를 훌륭히 제거해 줌을 확인할 수 있다.

### Cagniard 임피던스와 겉보기 비저항

#### 수평 층서구조 모형

지하매질이 균질 반무한 공간이 아닌 수평 층서구조를 이룰 때, Cagniard 임피던스와 겉보기 비저항의 변화를 살펴보기 위하여 3층 구조 모형을 설정하였다. 첫번째 층과 두번째 층의 두께는 각각 3 m, 5 m, 전기전도도는 각각 0.01, 0.1, 0.001 S/m로 중간에 전도성 지층이 존재하는 모형이며, y 방향의 수평 자기쌍극자 송신원  $M_y$ 에 의한 전기장  $E_x$ 와 자기장  $H_y$ 를 계산하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 송수신기의 거리가 15, 25, 40 m일 때의 Cagniard 임피던스의 진폭과 위상을 유도상수에 대해 도시한 것이다. (a)의 진폭을 보면, 두번째 층과 세번째 층의 전기전도도의 변화로 인해 2 이상의 유도상수에서 앞서 반

무한 공간에서에 비해 기울기가 증가하였음을 알 수는 있으나 이로부터 지하매질의 전기전도도에 대한 정보를 유추해내기는 쉽지 않다. 한편, (b)의 위상은 두번째 층의 전기전도도가 첫번째 층에 비해 높으므로 유도상수가 낮아짐에 따라 처음에는 증가하며, 전기전도도가 낮은 세번째 층에 의해 감소하다가, 송신원의 영향으로 유도상수 1 이하의 근거리장에서 90°에 근사하며 증가하고 있다. 따라서 임피던스의 위상을 통해서만 비록 송신원에 의한 왜곡이 존재하지만 전기전도도 분포에 대한 정성적인 해석은 가능하리라 판단된다. Fig. 3(c)는 계산된 Cagniard 임피던스로부터 송신원 효과를 고려하여 구한 겉보기 비저항으로, Cagniard 임피던스와 달리 고주파에서 저주파로 가면서 천부에서 심부로의 개략적인 지하구조의 변화를 보여주고 있다.

겉보기 비저항에서는 주파수에 따른 반응값만을 제공하므로 심도에 따른 전기비저항 값을 구하기 위해 복소 임피던스 자료에 대한 1차원 역산을 수행하였으며, 그 결과를 (d)에 도시하였다. 여기서, 역산방법은 2차 평활화 제한을 가한 반복적 최소자승법을 사용하였다. (d)에서 굵은 실선은 모델의 전기비저항 값이고, 점선과 가는 실선은 송수신기의 거리가 각각 15 m와 40 m일 때의 결과를 나타내며, 반복역산의 초기 모형으로는 0.01 S/m의 균질한 반무한 공간을 가정하였다. 역산 결과를 보면 첫번째 및 두번째 층의 전기비저항은 참 값에 근사

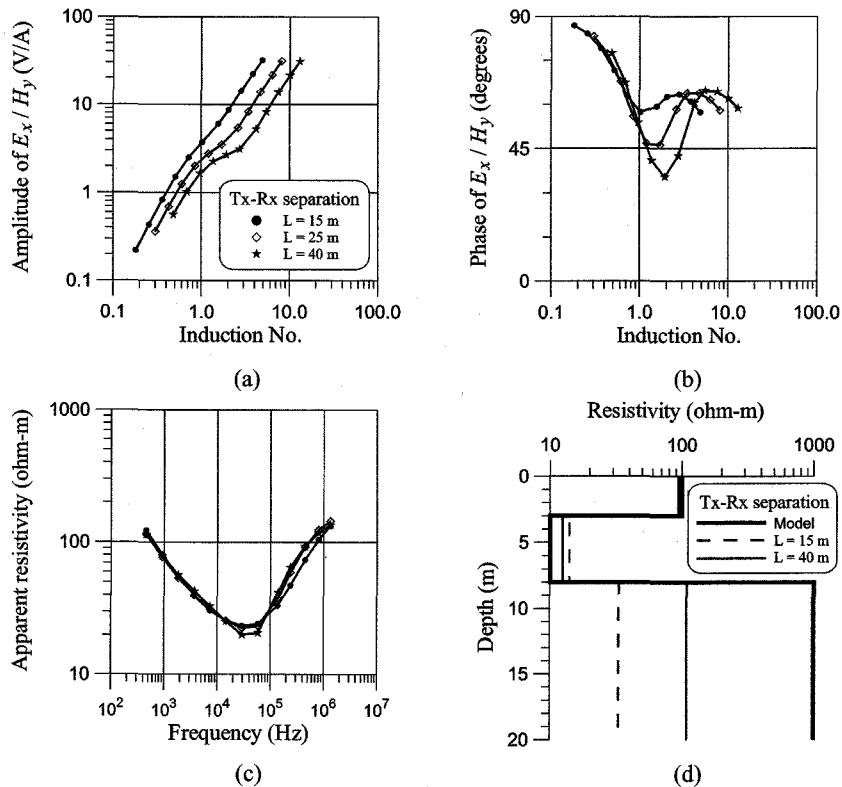


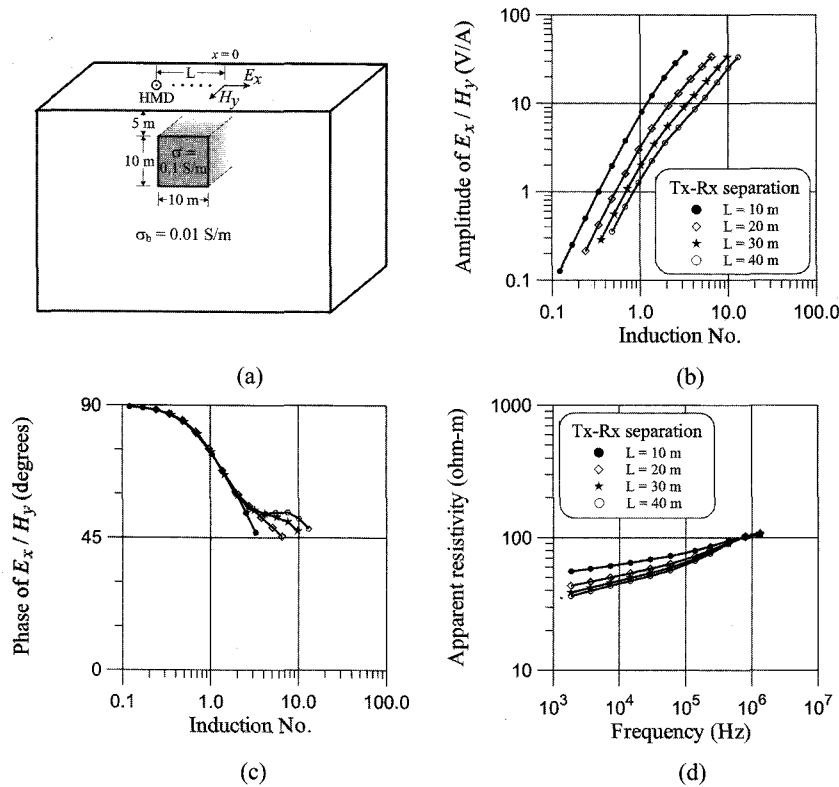
Fig. 3. Amplitude (a) and phase (b) curves of impedance, apparent resistivity curves (c) and one-dimensional inversion results (d) obtained from impedance for a layered-earth model with varying Tx-Rx separation.

한 값을 잘 찾아가고 있으나, 최하부 층의 전기비저항은 참 값을 제대로 찾아가지 못하고 있다. 이는 상부의 전도성 지층에 의해 하부 매질의 정보가 가리워지는 가리움(masking) 효과와 최하부 층의 정보를 유추할 수 있는 저주파 대역이 최하부 층의 정보보다는 송신원에 의한 일차장을 주로 포함하고 있기 때문이다. (b)의 위상을 보면, 최하부 층의 고비저항대로 인해 2~5 범위의 유도상수에서 유도상수가 낮아짐에 따라 위상이 감소하는 양상이 유도상수 1 이하의 근거리장에서 송신원의 영향으로 90°에 근사하며 왜곡됨을 알 수 있다. 한편, 송수신기의 간격이 넓은 40 m의 자료에서 보다 참 값에 근사한 값을 찾아가고 있는데, 이는 송신원의 특성만을 나타내는 근거리장에 포함되는 주파수 대역이 송수신기의 거리가 멀어질수록 작아지기 때문이다.

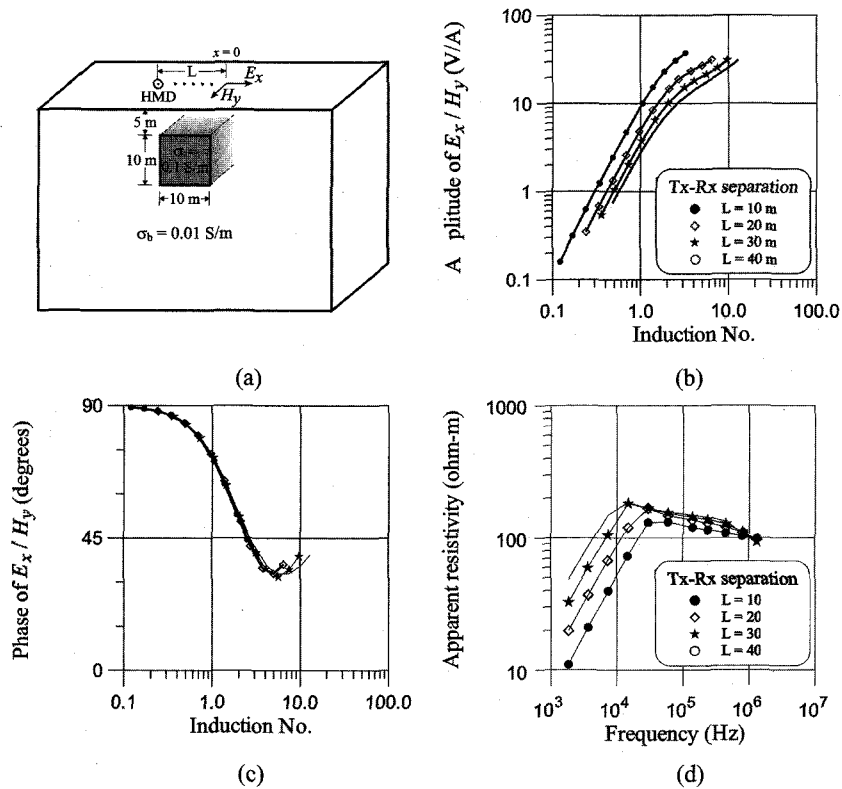
이상의 결과를 통하여 수평 층서구조가 존재할 경우 Cagniard 임피던스로부터 송신원의 효과를 고려하여 계산되는 겉보기 비저항과 임피던스 위상이 지하매질의 개략적인 전기전도도 변화를 잘 표현해 줌을 알 수 있다. 또한, 1차원 역산을 통하여 심도에 따른 지하구조의 변화도 확인할 수 있었으나, 심부의 정보를 얻기 위해서는 송수신기의 거리가 큰 변수로 작용함을 알 수 있었다.

**고립이상체 모형**

송신원의 효과를 고려한 겉보기 비저항의 현장자료에서의 적용성을 살펴보기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 전기전도도 0.01 S/m인 반무한 공간 내에 전기전도도 0.1 S/m인 전도성 고립이상체가 존재하는 모형을 설정하였다. 고립이상체의 크기는 10 m × 10 m, 위치는 -5 m~5 m, 심도는 5 m~15 m이고, 송신원은 수평 자기쌍극자  $M_y$ 이며, 수신기는 송신원의 우측에 위치한다. Fig. 4(b)와 (c)는 수신기가 전도성 매질의 영향이 크게 나타나는 고립이상체 직상부에 위치할 때 송수신기의 거리에 따른 Cagniard 임피던스의 진폭과 위상을 도시한 것으로, 송수신기의 거리는 10, 20, 30, 40 m이며, 사용된 주파수는 총 11개로 1.86, 3.68, 7.35, 14.7, 29.4, 58.8, 138, 235, 444, 800, 1330 kHz이다. (c)의 임피던스 위상을 보면, 송신원의 영향으로 유도상수 1 이하에서는 90°로 근사하고, 유도상수 2 이상에서는 전기전도도가 높은 이상체의 영향으로 50°~55°로 증가한 후 45°로 감소하고 있다. 또한, 앞서 수평 층서구조 모형에서 처럼 전기전도도가 낮은 고립이상체 하부의 배경매질에 의한 위상의 감소는 송수신기의 거리가 40 m일 때 일부 보일 뿐 거의 나타나지 않는다. Fig. 4(d)는 Cagniard 임피던스로부터 송신원 효과를 고려하여 계산된 겉보기 비저항으로, 고주파 대역에서 배경매질의 전기비저항 100 ohm-m로 근사하며, 주파수가 감소함에 따라 전도성 이상체의 영향으로 겉보기 비저항이 감소하며, 송수신기의 거리가 증가함에 따라 그 값이 낮아지고



**Fig. 4.** Amplitude (b) and phase (c) curves of impedance and apparent resistivity curves (d) over the isolated conductive-block model shown in (a) when receiver is located at the center of the body on the surface with varying Tx-Rx separation. A conductive (0.1 S/m) block with dimension of 10 m × 10 m is embedded in a 0.01 S/m homogeneous half-space at the depth of 5 m.



**Fig. 5.** Amplitude (b) and phase (c) curves of impedance and apparent resistivity curves (d) over the isolated resistive-block model shown in (a) when receiver is located at the center of the body on the surface with varying Tx-Rx separation. A resistive (0.001 S/m) block with dimension of 10 m × 10 m is embedded in a 0.01 S/m homogeneous half-space at the depth of 5 m.

있다.

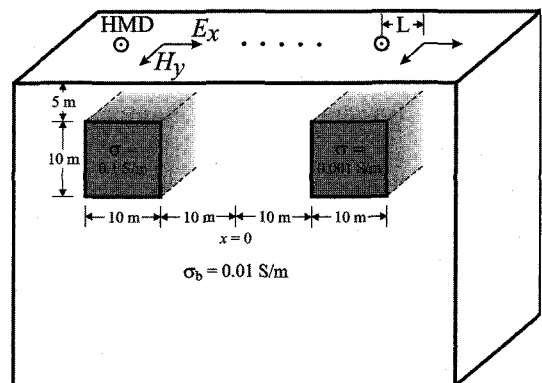
비전도성 고립이상체가 존재하는 모형에서의 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항의 양상을 살펴보기 위하여 Fig. 5(a)와 같이 전기전도도 0.01 S/m인 반무한 공간 내에 전기전도도 0.001 S/m인 비전도성 고립이상체가 존재하는 모형을 설정하였다. 비전도성 고립이상체의 크기 및 위치, 송수신기의 거리 및 위치와 사용 주파수는 앞서 전도성 고립이상체의 경우와 동일하게 적용하였다. Fig. 5(b)와 (c)는 임피던스의 진폭과 위상을 도시한 것으로, 임피던스의 위상을 보면, 전반적으로 앞서 전도성 고립이상체가 존재하는 모형에서와 유사한 양상을 보여주나, 전기전도도가 낮은 이상체의 영향으로 유도상수 2 이상에서 30°~35°로 감소한 후 45°로 증가하고 있다. Fig. 5 (d)는 Cagniard 임피던스로부터 송신원 효과를 고려하여 계산된 겉보기 비저항으로, 고주파 대역에서 배경매질의 전기비저항 100 ohm-m로 잘 근사하고, 주파수가 감소함에 따라 비전도성 이상체의 영향으로 겉보기 비저항이 증가하다 감소하며, 송수신기의 거리가 증가함에 따라 그 값이 높아지고 있다.

### 겉보기 비저항과 위상 가단면도

전도성과 비전도성 고립이상체가 복합적으로 존재하는 모형을 구성하고 Cagniard 임피던스로부터 송신원 효과를 고려하

여 구한 겉보기 비저항과 Cagniard 임피던스 위상의 양상을 살펴보았다. Fig. 6은 이에 대한 모식도로 전기전도도 0.01 S/m인 반무한 공간 내에 전기전도도 0.1 S/m인 전도성 고립이상체와 전기전도도 0.001 S/m인 비전도성 고립이상체가 함께 존재하며, 크기는 10 m × 10 m, 위치는 각각 -20 m~-10 m와 10 m~20 m이며, 심도는 5 m~15 m이다.

각 수신점에서 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항을



**Fig. 6.** An isolated conductive- and resistive-block model. Conductive (0.1 S/m) and resistive (0.001 S/m) blocks with the same dimension of 10 m × 10 m are embedded in a 0.01 S/m homogeneous half-space at the depth of 5 m and -20 m to -10 m and 10 m to 20 m in x-direction, respectively.

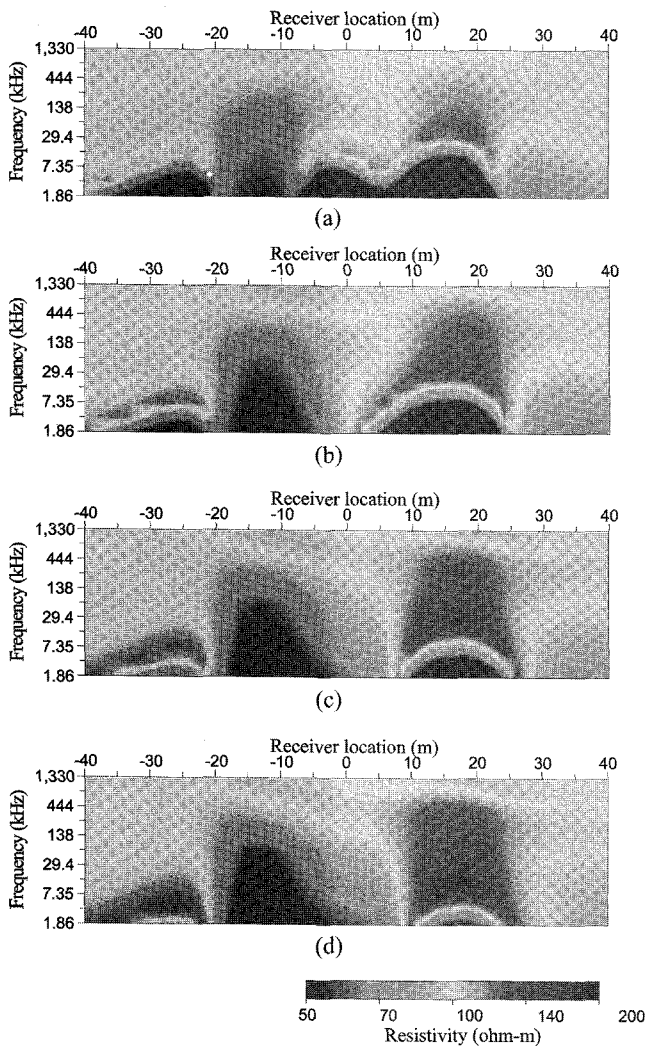


Fig. 7. Apparent resistivity pseudosections for the isolated conductive- and resistive-block model shown in Fig. 6 with different Tx-Rx separations; (a) 10 m, (b) 20 m, (c) 30 m, and (d) 40 m.

계산하였으며, 이를 통해 주파수에 따른 겉보기 비저항을 2차원적으로 표현하는 겉보기 비저항 가단면도를 작성하였으며 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 가로축은 수신점의 위치, 세로축은 주파수이며, (a)~(d)는 각각 송수신기의 거리가 10, 20, 30, 40 m일 때의 결과이다. 세로축에서 주파수는 천부에 해당하는 고주파를 위에, 심부에 해당하는 저주파를 아래에 순서대로 도시하였다. 송수신기가 고립이상체로부터 먼 거리에 위치할 때의 겉보기 비저항을 보면, 송수신기의 거리와 무관하게 거의 모든 주파수대역에 걸쳐 100 ohm-m로 배경매질의 전기비저항에 잘 근사하고 있다. 한편, 전도성 고립이상체 직상부 주위에서의 반응을 보면, 저주파 대역에서 전도성 매질에 의해 겉보기 비저항이 낮게 나타나고 있으며, 송수신기의 거리가 증가함에 따라 겉보기 비저항이 낮게 나타나는 주파수가 증가하고 있다. 또한, 고주파 대역에서 배경매질의 전기비저항 값인 100 ohm-m로 잘 근사하고 있어, 향후 역산을 수행

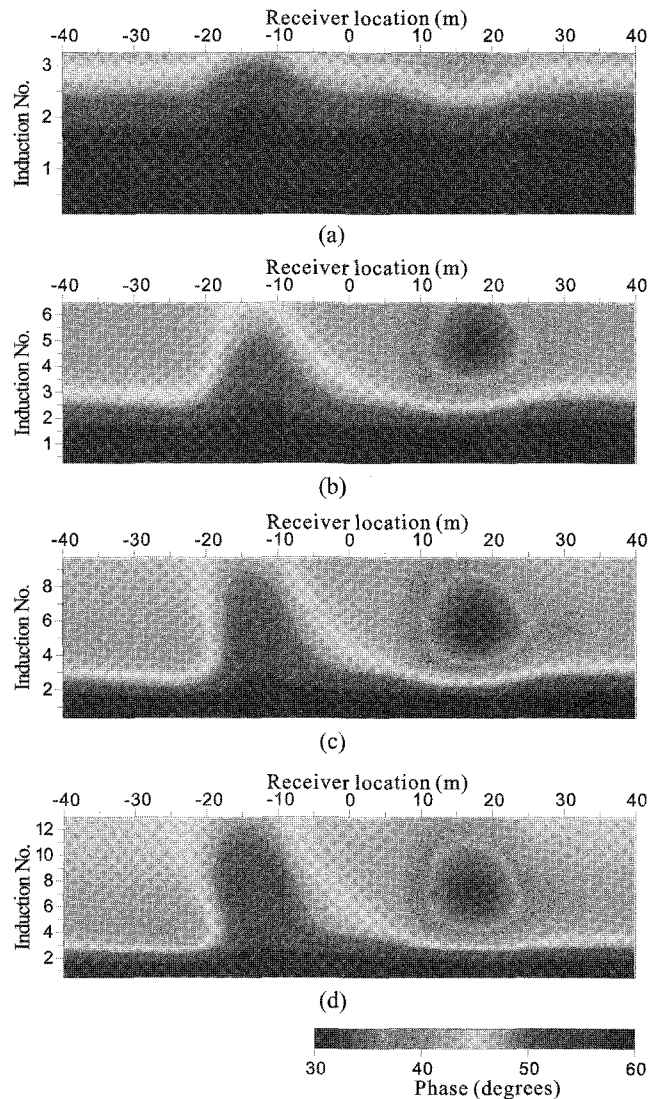


Fig. 8. Phase pseudosections for the isolated conductive- and resistive-block model shown in Fig. 6 with different Tx-Rx separations; (a) 10 m, (b) 20 m, (c) 30 m, and (d) 40 m.

한다면 전도성 고립이상체의 상부 경계는 규명할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 저주파 대역에서는 겉보기 비저항이 주파수가 감소함에 따라 계속 감소하고 있어 하부 경계의 규명은 쉽지 않을 것으로 판단된다.

한편, 고립이상체 좌측에서의 반응을 보면 지비저항 또는 고비저항 이상대가 나타나고 있는데, 이 이상대는 실제 지하매질에는 존재하지 않는 것이다. 일반적으로 2차원 구조에서는 송수신기의 위치에 따라 이상체 좌우에 소로브(side lobe)가 나타나는데(Frischknecht *et al.*, 1991), 이를 1차원으로 해석하게 되면 Fig. 7과 같이 이상체 좌우에 거짓 이상대가 나타난다. Fig. 7의 거짓 이상대의 양상을 보면, 송수신기의 거리가 짧을수록 그 값이 낮게 나타나며, 송수신기의 거리가 멀어짐에 따라 전기비저항이 증가하고 있다. 특히, (a)의 송수신기의 거리가 10 m일 때의 결과를 보면, 고립이상체 좌측의 거짓 이상대



의 값이 직상부 보다 낮게 나타나 전도성 매질의 위치를 제대로 표현하지 못하고 있다. 전도성 고립이상체 우측에서도 좌측과 유사하게 거짓 이상대가 나타나고 있으며, 그 위치는 (a)에서 0 m 지점, (b)에서 10 m 지점으로 거짓 이상대의 위치가 송수신기의 거리가 멀어짐에 따라 우측으로 이동하고 있다. Fig. 7은 수신기의 위치를 기준으로 겉보기 비저항을 도시한 것으로, 거짓 이상대는 송신원이 고립이상체 직상부에 위치할 때 나타나고 있다. 따라서 이 거짓 이상대 역시 송수신기 위치에 따라 이상체 좌우에 나타나는 소로브에 의해 나타나는 이상대임을 알 수 있다.

한편, 비전도성 고립이상체 직상부 주위에서의 반응을 보면, 저주파 대역에서 겉보기 비저항이 낮게 나타나고 있으며, 송수신기의 거리가 증가함에 따라 겉보기 비저항이 낮게 나타나는 주파수가 감소하고 있다. 특히 (d)의 송수신기의 거리가 40 m 일 때의 결과를 보면, 일부 저주파를 제외하고 거의 모든 주파수대역에서 비전도성 고립이상체의 존재를 잘 보여주고 있다. 한편, 고립이상체 좌측 및 우측에서의 반응을 보면, 실제 배경매질의 전기비저항보다 낮게 근사되고 있지만 전도성 고립이상체 주변에 비해 실제 값에 잘 근사하고 있다. 이는 비전도성 고립이상체에서의 이차장의 크기가 전도성 고립이상체에 비해 작기 때문이다.

지표에서 측정된 전자기장의 수평성분을 이용하여 각 수신점에서 주파수에 따른 임피던스의 위상을 2차원적으로 표현하는 위상 가단면도를 작성하였으며 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에서 (a)~(d)는 각각 송수신기의 거리가 10, 20, 30, 40 m 일 때의 결과이다. 송신원이 자기쌍극자인 경우 임피던스의 위상이 커지면 송신원에 의한 영향과 중첩되어 지하매질의 전기전도도에 대한 정보를 추출하기 어려워진다. 일반적으로 임피던스의 위상은 전도성 이상체가 존재하는 경우에는  $45^\circ$  보다 크게 나타나며, 비전도성 이상체가 존재하는 경우에는  $45^\circ$  보다 작게 나타난다. Fig. 8을 보면, 2 이하의 유도상수에서는 모든 지점에서 위상이  $60^\circ$  이상으로 나타나 이상대의 존재를 알기 어려운 반면에, 3 이상의 유도상수에서는 전도성과 비전도성 이상체에서 주위보다 위상이 다르게 나타나 이의 존재를 쉽게 알 수 있다.

전도성과 비전도성 고립이상체 직상부 주위에서의 반응을 보면, 송수신기의 거리가 10 m 일 때는 송수신기의 거리가 짧아 유도상수가 3 이하로 고립이상체에 의한 위상의 변화가 3 내외의 유도상수에서만 일부 미약하게 나타나고 있는데 반해, 송수신기의 거리가 증가함에 따라 유도상수의 최대값이 증가하여 고립이상체에 의한 위상의 변화를 보다 잘 보여주고 있다. 특히, 임피던스의 위상은 겉보기 비저항과 달리 2차원 구조에 의한 왜곡이 매우 적게 나타나며, 이로 인해 고립이상체의 수평 경계 탐지에 매우 효과적임을 알 수 있다. 따라서, 임피던스의 위상 변화를 통해 겉보기 비저항에서 나타나는 이상대가 이상체를 지시하는 것인지, 2차원 구조에 의한 왜곡인지

를 효율적으로 구별할 수 있게 된다. Fig. 8에서 고립이상체에 의한 위상의 변화가 나타나는 지점의 위치가 이상체보다 약간 우측에서 나타나는 이유는 송신원이 수신기보다 좌측에 위치하여 그 영향을 받기 때문이다.

이상의 연구를 통해 이 연구에서 적용한 겉보기 비저항이 송수신기의 거리가 40 m 인 경우 거의 모든 주파수대역에 걸쳐 송신원 효과를 효과적으로 제거하여 주고 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 2차원 고립이상체 모형에서의 배경매질의 전기전도도는 물론 전도성 또는 비전도성 매질의 위치 및 개략적인 전기전도도 분포에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 또한, 임피던스의 위상은 2차원 구조에 의한 왜곡이 비교적 작게 나타나서 고립이상체의 존재유무, 공간적 위치 추정에 많은 도움을 주었다. 일반적으로 2차원 구조에서는 자기장의 측정만으로 이들에 대한 정보의 획득이 어려운 바 서로 직교하는 전기장과 자기장의 측정을 통한 Cagniard 임피던스 분석 방법이 2차원 지하구조의 규명에 보다 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항은 임피던스의 위상과 함께 현장 탐사 시 간편하고 신속한 탐사 및 해석 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

이상의 연구에서는 최근에 개발되어 적용성에 대한 시험이 진행되고 있는 1 kHz~1 MHz 주파수 대역의 수평 자기쌍극자를 송신원으로 하여 전기장과 자기장을 측정하는 탐사법에서 얻어지는 Cagniard 임피던스 자료를 효과적으로 해석하는 기법을 개발하고자 하였다.

균질한 반무한 공간에서 수평 자기쌍극자 송신원에 의한 Cagniard 임피던스를 계산하여 평면파 가정을 이용한 겉보기 비저항을 적용한 결과, 유한한 거리에 위치한 송신원에 의해 관심 주파수 대역에서 송신원에 의한 영향만 보일 뿐 지하매질의 전기전도도에 대한 정보는 획득할 수 없었다. 이에 반해, 송윤호 등(2001)이 제안한 송신원 효과를 고려하여 겉보기 비저항을 구하는 방법은 송신원의 영향을 효과적으로 고려해 줌으로써 지하매질의 전기전도도 물성을 추출할 수 있음을 확인하였다.

송신원 효과를 고려하여 겉보기 비저항을 구하는 방법의 2차원 구조에서의 적용성을 고찰하기 위하여 균질한 반무한공간에 전도성 또는 비전도성 고립이상체가 존재하는 모형을 설정하여 Cagniard 임피던스와 겉보기 비저항을 계산하였다. 그 결과, 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항이 고주파 대역에서 배경매질의 전기전도도에 수렴하였으며, 저주파 대역에서 고립이상체의 존재에 대한 정보를 제공하였다.

균질한 반무한공간에 전도성과 비전도성 고립이상체가 복합적으로 존재하는 모형에 대해 각각의 측정 자료를 이용하여 Cagniard 임피던스로부터 겉보기 비저항 가단면도를 작성하였

다. 그 결과 이상대 주위에 2차원 구조에 의한 거짓 이상대가 분포하지만, 전반적으로 배경매질의 전기비저항과 이상체의 위치와 개략적인 전기비저항 값은 탐지할 수 있었다. 또한, Cagniard 임피던스의 위상 가단면도를 작성하였으며, 그 결과 겉보기 비저항 가단면도에 비해 2차원 구조에 의한 왜곡이 작게 나타나서 겉보기 비저항 가단면도에 나타나는 거짓 이상대의 구별과 이상체의 경계면 탐지에 매우 효과적이었다.

이상의 연구를 통해 수평 자기쌍극자 송신원을 사용하여 서로 직교하는 전기장과 자기장을 측정하는 탐사법에서는 Cagniard 임피던스가 현장에서 간편하고 신속하게 적용할 수 있는 분석 및 해석도구로 매우 효과적임을 알 수 있었다. 특히, 2차원 구조에서는 송신원 효과를 고려한 겉보기 비저항 가단면도와 Cagniard 임피던스 위상 가단면도가 이상체의 존재 유무와 그 위치 및 규모를 추정하는데 유용한 도구로 판단된다. 향후, 보다 정확한 이상체의 위치, 심도 및 전기전도도를 구하기 위해서는 2차원 효과를 효과적으로 제거해줄 수 있는 2차원 역산을 적용하여야 할 것이다.

### 참고문헌

권형석, 송윤호, 손정술, 서정희, 2002, 수평 자기쌍극자 송신원

- 을 이용한 2.5차원 전자탐사 모델링: 물리탐사, **5**, (계재예정)  
 송윤호, 이희순, 정승환, 김정호, 정현기, 최종호, 1994, 벡터 CSAMT: 전기, 전자탐사 연구, KR-94(C)I-17, 한국자원연구소, 1-61.  
 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명중, 설순지, 박인화, 2001, 지반 물리탐사 연구, 1999-R-TI02-P-01, 산업자원부.  
 Frischknecht, F. C., Labson, V. F., Spies, B. R., and Anderson, W. L., 1991, Profiling methods using small sources: *Electromagnetic methods in applied geophysics-Application*, Soc. Expl. Geophys.  
 Pellerin, L., Labson, V. F., and Pfeifer, M. C., 1995, VETEM - A very early time electromagnetic system: *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*, 725-731.  
 West, G. F., and Macnae, J. C., 1991, Physics of electromagnetic induction exploration method: *Electromagnetic methods in applied geophysics-Application*, Soc. Expl. Geophys.  
 Zonge, K. L., and Hughes, L. I., 1991, Controlled source audio-frequency magnetotellurics, in Nabighian, M. N., Ed.: *Electromagnetic methods in applied geophysics-Application*, Soc. Expl. Geophys.