

소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정

송윤호¹⁾ · 정승환¹⁾

Sensitivity Analysis and Estimation of the Depth of Investigation in Small-Loop EM Surveys

Yoonho Song¹⁾ and Seung-Hwan Chung¹⁾

요 약 : 소형루프 전자탐사의 가탐심도를 추정하기 위하여 주파수영역에서 2층구조에 대한 감도를 해석적으로 유도하였다. 이를 기초로 송수신 간격 2 m 내외의 다중주파수 전자탐사 기기의 감도를 분석하고, 반응의 크기를 기준으로 가탐심도를 추정하였다. 먼저 감도 계산 결과는 하부층에 대한 감도는 동상성분이 이상성분에 비해 매우 높고 상부층의 두께가 20 m에 이르더라도 저주파수 대역에서는 상부층의 감도에 비해 절대적으로 크다는 것을 나타낸 반면, 이상성분은 하부층에 대한 감도가 매우 약함을 보여준다. 따라서 다중 주파수를 이용한 소형루프 전자탐사에서는 동상성분의 정확한 측정이 가탐심도의 증대에 필수적임을 입증하였다.

전기비저항이 100 ohm-m인 상부층 밑에 10 ohm-m의 전기비저항을 갖는 하부층이 존재할 경우에는, 동상성분의 정확한 측정을 통하여 잡음 수준을 고려하더라도 10 m까지의 가탐심도를 충분히 확보할 수 있으며, 따라서 매립장의 침출수 분포 범위 영상화 등을 위해서 유용할 것으로 보인다. 그러나 전기비저항이 1,000 ohm-m로 높은 기반암이 존재할 경우에는 비록 하부층의 감도는 상부층에 비해 매우 높으나 반응의 절대값이 매우 미약하여 탐지가 어려우며 이상성분 자료와의 복합적인 해석을 통해서도 기기의 정확도를 고려할 때, 가탐심도가 5 m를 넘기 힘든 것으로 나타났다. 따라서 전기비저항이 높은 지역에서는, 송수신 간격이 2 m 내외로 짧은 다중주파수 소형루프 전자탐사법이 금속성 매설물의 탐지를 위해서는 유용하지만 기반암의 심도 규명에는 적절치 않다.

주요어 : 소형루프 전자탐사, 감도 분석, 가탐심도, 동상성분

Abstract : We have derived an analytical expression for the sensitivity of the frequency domain small-loop electromagnetic (EM) surveys over a two-layer earth in order to estimate the depth of investigation with an instrument having the source-receiver separation of about 2 m. We analyzed the sensitivities to the lower layer normalized by those to the upper half-space and estimated the depth of investigation from the sensitivity analyses and the mutual impedance ratio. The computational results showed that the in-phase components of the sensitivity to the lower layer dominates those to the upper layer when the thickness of the upper layer is less than 20 m, while the quadrature components are not sensitive to the lower layer over the entire frequency range. Hence we confirmed that the accurate measurement of the in-phase component is essential to increase the depth of investigation in the multi-frequency small-loop EM survey.

When conductive basement of 10 ohm-m underlies the upper layer of 100 ohm-m, an accurate measurement of the in-phase components ensures the depth of the investigation more than 10 m even accounting a noise effect, from which we conclude that the small-loop EM survey is quite effective in imaging the conductive plume down to a considerable depth. On the other hand, in the presence of the resistive basement of 1,000 ohm-m, the depth of investigation may not exceed 5 m considering the instrumental accuracy, which implies that the application of the small-loop EM survey is not recommended over the resistive environment other than detecting the buried conductor.

Keywords : small-loop EM survey, Sensitivity, Depth of investigation, In-phase component

서 론

송·수신기로 소형루프를 이용한 전자탐사법은 그 역사가 70년 이상된, 가장 오래된 물리탐사 방법 중의 하나로 주로 전기전도성 광채 탐사에 이용되어 왔다(Spies and Frischknecht, 1991). 최근 들어 매립장의 침출수 범위 탐지나 전도성 매설물

의 탐지로 그 영역을 확대해온 소형루프 전자탐사법은 특히 간편한 송·수신기 일체형 다중주파수 탐사기기의 출현으로(Won *et al.*, 1996) 국내에서도 활발히 적용되기 시작하고 있다(송윤호 등, 2001).

한편, 전자탐사 기술은 그 기본 이론이 전기비저항 탐사에 비하여 복잡하여 PC를 이용한 간편한 자료해석 방법은 많이

*2002년 10월 21일 접수

1) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부(Geophysical Exploration and Mining Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource)

개발되지 않았으며, 따라서 소형루프 전자탐사자료의 해석은 주로 1차원 역산에 의존해왔고(Spies and Frischknecht, 1991), 극히 최근에는 근사해를 이용한 2.5차원 역산에 대한 접근이 이루어지고 있다(Song *et al.*, 2001). 한편 최근에 국내에서 사용되기 시작한 송·수신기 일체형 다중주파수 소형루프 전자탐사 기기인 GEM-2 시스템(Won *et al.*, 1996)의 경우에는 송수신 간격이 1.66m로 매우 짧으며, 송신 모멘트를 증가시킨 GEM-2H 시스템의 경우에도 송수신 간격은 2.05m에 불과하다. 이러한 짧은 송수신 간격을 갖는 탐사기기를 지하구조의 영상화에 동원하고자 한다면 원하는 가탐심도를 5m 내외로 생각할 때, 지하를 1차원 층구조로 충분히 가정할 수 있으며 또한 다중주파수를 지원하기 때문에 지하의 전기비저항 분포를 신속히 영상화 할 수 있는 장점이 있다(설순지 등, 2002).

그러나 소형루프 전자탐사법은 그 가탐심도가 지하 천부로 제약되는 근본적인 한계를 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 종종 실제적인 가탐심도에 대한 논란이 있는 것도 사실이다. 가탐심도는 송수신 간격, 사용주파수 뿐만 아니라 지하의 전기비저항 분포의 복합적인 함수이므로, 평면파를 송신원으로 이용하는 MT탐사와 달리 일률적인 기준을 정할 수는 없다. 이 연구에서는 소형루프 전자탐사 반응의 감도(sensitivity)를 정량적으로 분석함으로써 가탐심도를 추정하는 접근 방법을 시도하였다.

먼저 McGillivray *et al.* (1994)가 유도한 주파수 영역 전자탐사 감도의 해석적 해로부터 2.5차원 및 1차원 탐사에 대한 해석적인 감도 식을 유도하였으며, 지하 2층구조에 대한 수평 동일면 배열 및 수직 동일면 배열 탐사 반응의 상부층 및 하부층의 전기전도도 변화에 대한 감도를 정리하였다. 감도 분석은 상부층의 감도에 대한 하부층의 감도에 대한 비율을 계산하여 수행되었으며, 최종적으로 실제 반응 값을 계산한 결과와 비교함으로써 실현 가능한 가탐심도를 추정하였다.

주파수 영역 전자탐사의 감도

3차원 지하구조에서 지하 전기전도도 변화에 대한 수신 전기장 또는 자기장의 감도는 상반성(reciprocity)에 의해 다음과 같이 해석적으로 표현될 수 있다(McGillivray *et al.*, 1994; Sasaki, 2001).

$$\frac{df}{d\sigma_j} = \int_{V_j} \mathbf{E}^S(\mathbf{r} - \mathbf{r}_S) \cdot \mathbf{E}^R(\mathbf{r} - \mathbf{r}_R) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

여기서 f 는 수신되는 전기장(E) 또는 자기장(H) 성분(E_x, E_y, E_z, H_x, H_y 또는 H_z), σ_j 는 j 번째 블록 또는 영역의 전기전도도, V_j 는 j 번째 영역의 체적, $\mathbf{E}^S(\mathbf{r} - \mathbf{r}_S)$ 는 \mathbf{r}_S 에 위치한 송신원에 의한 전기장, $\mathbf{E}^R(\mathbf{r} - \mathbf{r}_R)$ 는 수신된 전자기장 성분과 동일하고 단위 모멘트를 가지며 수신점 \mathbf{r}_R 에 위치한다고 가정한 송신원에 의한 전기장이다. 즉 소형루프 전자탐사의 수평 동일

면(Horizontal Co-Planar; HCP) 배열의 경우, 송신은 수직 자기쌍극자원(M_z)이고 수신은 수직 자기장(H_z)이므로, 송신원은 $-\hat{z}_0 M_z = -i\omega\mu M$ (M 은 쌍극자 모멘트로서 단위는 A/m^2)의 모멘트를 갖는 M_z 송신원이며 가상송신원은 단위 모멘트를 갖는 M_z 송신원이 된다.

이를 3차원 송신원에 의한 2차원 구조에 대해 생각하면, 즉 주향 방향이 y 인 2.5차원 문제인 경우 전기전도도는 x 와 z 만의 함수이며 전자기장의 감도는 다음과 같이 y 방향에 대한 무한 적분의 형태로 나타나게 된다.

$$\frac{df}{d\sigma_j} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iint_{S_j} \mathbf{E}^S(x - x_S, y - y_S, z; z_S) \cdot \mathbf{E}^R(x - x_R, y - y_R, z; z_R) dx dz \right] dy \quad (2)$$

논의를 간단히 하기 위해서 송신원이 $(0, 0, z_S)$ 에, 수신기는 x 축의 축선상에($y=0$) 위치한다고 하면 (2)식은 다음으로 표현된다.

$$\frac{df}{d\sigma_j} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iint_{S_j} \mathbf{E}^S(x, y, z; z_S) \cdot \mathbf{E}^R(x - x_R, y, z; z_R) dx dz \right] dy \quad (3)$$

위 식에서 만약 하나의 전기장이 y 의 우함수(even function) 즉, y 축에 대칭이고 다른 하나의 전기장이 기함수(odd function)라면, 그 적분 값은 0이 되고 따라서 감도가 없다는 것을 말한다. 이를 M_z 송신원에 대해 예를 들면, 전기장은 y 의 우함수인 반면, 만약 측정 성분이 H_y 라면 y 방향의 자기쌍극자(M_y)를 가상 송신원으로 한 전기장은 y 의 기함수이다. 따라서 M_z 송신원에 대해 2차원 구조의 주향 방향에 직교하는 축선상의 H_y 측정은 지하구조에 대한 감도가 없음을 말하며, 이는 M_z 송신원이 TE(Transverse Electric) 모드 송신원이라는 점에서도 확인된다. 반면 H_x 의 측정은 이를 가상 송신원으로 한 전기장 또한 y 의 우함수이므로 (3)식의 적분 값이 사라지지 않아 지하구조에 대한 감도가 있음을, 즉 지하구조에 대한 정보를 제공함을 말해준다. (3)식에서 두 전기장이 모두 y 의 우함수이거나 또는 모두 y 의 기함수이면 Fourier 변환의 convolution 정리를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{df}{d\sigma_j} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int \tilde{\mathbf{E}}^S(x, k_y, z; z_S) \cdot \tilde{\mathbf{E}}^R(x - x_R, k_y, z; z_R) ds \right] e^{+ik_y y} dk_y, \quad (4)$$

여기서 ‘~’는 y 방향으로 Fourier 변환된 양을 말하며 k_y 는 y 방향의 공간 파수이다. 그러나 (3)식에서 (4)식으로 변환할 때, 수식의 부호에 대해 매우 세심하게 주의를 기울여야 하는데, 이는 만약 두 전기장 성분 모두 y 의 기함수일 경우 (4)식에서의 변환은 음(-)의 기호를 동반해야 하기 때문이다. 그 예로, M_z 송신원에 의한 H_z 측정을 들 수 있으며 이 때, \tilde{E}_x^S 와 \tilde{E}_x^R 는 y 의 기함수이므로

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iint_{S_j} E_x^S(x, y, z; z_S) E_x^R(x - x_R, y, z; z_R) dx dz \right] dy \\
 &= - \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iint_{S_j} E_x^S(x, y, z; z_S) E_x^R(x - x_R, -y, z; z_R) dx dz \right] dy \\
 &= - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iint_{S_j} \tilde{E}_x^S(x, k_y, z; z_S) \tilde{E}_x^R(x - x_R, k_y, z; z_R) ds \right] e^{+ik_y y} dk_y \Big|_{y=0}
 \end{aligned} \tag{5}$$

와 같이 음의 부호가 따라오게 된다.

지하구조가 수직 방향에 따라서만 변화하는 1차원 층서구조의 경우에는 전기전도도가 심도 z 만의 함수가 되며 감도는 다음과 같이 수평방향으로의 무한 적분을 포함하게 되고,

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_j} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{z_j} \mathbf{E}^S(x, y, z; z_S) \cdot \mathbf{E}^R(x - x_R, y, z; z_R) dz \right] dx dy, \tag{6}$$

이는 다시 Fourier 변환의 convolution 정리를 이용해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f}{\partial \sigma_j} &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{z_j} \tilde{\mathbf{E}}^S(k_x, k_y, z; z_S) \cdot \tilde{\mathbf{E}}^R(k_x, k_y, z; z_R) dz \right] \\
 & e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \Big|_{x=x_R, y=0}
 \end{aligned} \tag{7}$$

이 때에도 각 성분의 x 또는 y 에 대한 대칭성에 따른 부호에 대해 반드시 고려해줘야 한다. (7)식은 수형 루프 송신원에 대한 1차원 감도 또는 Frechet 미분을 유도한 Fullagar and Oldenburg(1984)의 결과의 일반화로 볼 수 있다.

소형루프 전자탐사의 감도 계산

GEM-2 시스템과 같이 송·수신기가 일체형으로 제작되어 있고, 송수신 간격이 1.66 m로 매우 짧을 경우(송신 모멘트를 증대시키기 위해 2.05 m을 채택한 GEM-2H도 실용화되어 있음), 지반의 전기비저항 변화의 탐지를 위해서는 송수신 간격보다 깊은 심도를 대상으로 하므로 매설물 탐지의 경우와는 달리 지하구조를 수평 층서구조인 1차원으로 가정하는 것이 가능하다. 이 경우, 자료처리 및 해석은 매우 빨라지게 되는데, 다만 짧은 송수신 간격으로 인해 탐사심도가 천부로 제한되는 단점이 있다. 앞절에서 유도된 1차원 구조에서의 감도의 표현인 (7)식을 이용하여 이러한 소형루프 전자탐사 시스템의 감도를 계산해보자.

잘 알려져 있다시피, 송·수신기가 일체형이므로 수평 동일면(HCP) 배열과 수직 동일면(Vertical Co-Planar; VCP) 배열 방식이 가능하며 각각의 경우에 대해 감도를 분석할 수 있다. (7)식을 이용하면 균질 반무한 공간내에 얇은 층이 존재할 때 이 층의 전기전도도 변화에 대한 감도도 분석 가능하나 가탐

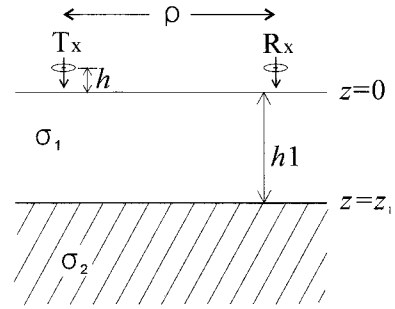


Fig. 1. HCP configuration over a two-layer earth model.

심도의 분석이라는 면에서 2층 구조를 가정하여 상부층의 감도에 대한 하부층의 감도 비를 살펴보는 것이 의미있을 것이다.

먼저 HCP 배열에 대해 살펴보자. Fig. 1은 2층 층서구조의 지상 높이 h 에 위치한 소형루프 전자탐사의 모식도를 보여준다. 현장탐사를 생각하면 높이 h 는, 사람이 들고 이동하면서 측정할 때에는 보통 사람의 허리 높이인 약 1 m, 또는 차량으로 GPS를 연결하여 끌고 갈 때에는 0 m로 생각하면 된다. HCP 배열이므로 M_z 송신원에 의한 H_z 측정에 해당하므로 (7) 식으로부터 상부층의 전기전도도에 대한 수신 자기장 $H_z(x_R, 0, -h)$ 의 감도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial H_z}{\partial \sigma_1} &= \frac{1}{4\pi^2 \hat{z}_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{z_1} \tilde{\mathbf{E}}^S(k_x, k_y, z; -h) \cdot \tilde{\mathbf{E}}^R(k_x, k_y, z; -h) dz \right] \\
 & e^{ik_x x_R} dk_x dk_y,
 \end{aligned} \tag{8}$$

윗 식에서 $\tilde{\mathbf{E}}^R$ 은 단위 모멘트가 아니라 실제 자기쌍극자 송신원에 의한 전기장이므로 적분항의 앞에 $1/\hat{z}_0$ 가 곱해져 있다. 여기서 음의 부호가 빠져있는 이유는 수직 자기쌍극자 송신원의 경우에 E_x 는 y 의 기함수, E_y 는 x 의 기함수이므로 Fourier 변환의 convolution 정리에 의해 음의 부호가 따라오기 때문이다. 한편, 송·수신기의 높이가 같으므로 윗 식에서 $\tilde{\mathbf{E}}^S$ 및 $\tilde{\mathbf{E}}^R$ 은 동일해진다. 또한 2층 구조의 상부층에서의 전기장은 TE 모드 포텐셜을 이용해 수평 파수영역에서 다음과 같이 표현된다(Ward and Hohmann, 1988).

$$\tilde{\mathbf{E}}_1(k_x, k_y, z; -h) = -(ik_y \mathbf{i} - ik_x \mathbf{j}) \hat{z}_0 R_{TE1} \frac{1}{2u_0} \tag{9}$$

여기서 상부층내에서의 TE 모드 반사계수 R_{TE1} 은 전자기장의 수평성분이 경계면에서 연속이라는 경계조건으로부터 다음과 같이 구해지며,

$$R_{TE1} = 2u_0 R(\lambda) \{ (u_1 + u_2) e^{-u_1 z} + (u_1 - u_2) e^{u_1(z - 2z_1)} \}, \tag{10}$$

$$R(\lambda) = \frac{e^{-u_0 h}}{(u_0 + u_1)(u_1 + u_2) + (u_0 - u_1)(u_1 - u_2) e^{-2u_1 z_1}}, \tag{11}$$

$$u_j = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_j^2} = \sqrt{\lambda^2 - k_j^2}, \quad (12)$$

그리고

$$k_j = \sqrt{-i\omega\mu_j\sigma_j} = \sqrt{-\hat{z}_j\sigma_j}, \quad (13)$$

이다. 여기서 k_j , u_j 및 μ_j 는 각각 j 번째 층에서의 전파상수, 수직 파수 및 투자율이고, λ 는 수평 파수, ω 는 각 주파수, 그리고 \mathbf{i} , \mathbf{j} 는 각각 x 및 y 방향의 단위 벡터이다. 따라서 (8)식 우변항의 괄호 안 적분식은 다음과 같이 정리된다.

$$\int_0^{z_1} \tilde{\mathbf{E}}^S \cdot \tilde{\mathbf{E}}_M^R dz = -\hat{z}_0^2 \lambda^2 R^2(\lambda) A(u) \quad (14)$$

여기서

$$A(u) = \left[\frac{1 - e^{-2u_1 z_1}}{2u_1} \{ (u_1 + u_2)^2 + (u_1 - u_2)^2 e^{-2u_1 z_1} \} + 2z_1 (u_1 + u_2)(u_1 - u_2) e^{-2u_1 z_1} \right] \quad (15)$$

이다. 한편, 하부층에 대한 감도는 다음으로 표현되며

$$\frac{\partial H_z}{\partial \sigma_2} = \frac{1}{4\pi^2 \hat{z}_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{z_1}^{\infty} \tilde{\mathbf{E}}^S(k_x, k_y, z; -h) \cdot \tilde{\mathbf{E}}_M^R(k_x, k_y, z; -h) dz \right] e^{ik_x x} dk_x dk_y, \quad (16)$$

여기서 하부층의 전기장은 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_2(k_x, k_y, z; -h) = -(ik_x \mathbf{i} - ik_y \mathbf{j}) \hat{z}_0 R_{TE2} \frac{e^{-u_2(z-z_1)}}{2u_0} \quad (17)$$

여기서, 전자기장의 경계조건으로부터 반사계수는 다음과 같이 구해진다.

$$R_{TE2} = 4u_0 u_1 e^{-u_1 z_1} R(\lambda) \quad (18)$$

그러므로 (16)식 우변항의 괄호 안 적분은

$$\int_{z_1}^{\infty} \tilde{\mathbf{E}}^S \cdot \tilde{\mathbf{E}}_M^R dz = -\hat{z}_0^2 \lambda^2 [R_{TE2}]^2 \frac{1}{8u_0^2 u_2} \quad (19)$$

과 같이 구해진다.

실제의 수치적인 계산에서는 (8)식과 (16)식에 나타난 바와 같은 2차원 역 Fourier 변환에 의하지 않고 1차원 구조의 대칭성에 기초한 원통형 좌표계에서의 Hankel 변환을 이용하면 (Ward and Hohmann, 1988), 이미 널리 사용되고 있는 digital filtering 기법의 ZHANKS 코드(Anderson, 1979)를 사용하여 쉽게 계산할 수 있게 되며 최종적으로 다음 식으로 정리된다.

$$\frac{\partial H_z}{\partial \sigma_1} = -\frac{\hat{z}_0}{4\pi} \int_0^{\infty} 2R^2(\lambda) A(u) \lambda^3 J_0(\lambda \rho) d\lambda, \quad (20)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial \sigma_2} = \frac{\hat{z}_0}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{4u_1^2}{u_2} R^2(\lambda) e^{-2u_1 z_1} \lambda^3 J_0(\lambda \rho) d\lambda, \quad (21)$$

여기서 J_0 는 제1종 0차의 Bessel 함수이다.

다음으로 VCP 배열에 대해 살펴보자. VCP 배열은 y 방향의 수평 자기쌍극자(M_y) 송신원에 의한 같은 방향의 수평 자기장(H_x)를 측정하는 것이며 Fig. 1에 보여진 HCP 배열과 송·수신기의 방향만 제외하면 동일하다. VCP 배열은 TM(Transverse Magnetic) 모드 전자기장을 포함하므로 지하구조가 2차원 또는 3차원일 경우 지하 천부에 대한 감도가 상대적으로 높은 등, HCP 배열과는 매우 다른 감도를 보이거나(Song *et al.*, 2001), 1차원 층서구조 상에서는 큰 차이가 없게 되는데 이 이유는 다음과 같다. 수평 자기쌍극자 송신원에서는 수직 자기쌍극자 송신원과 달리 TE 및 TM 모드 포텐셜 모두에 의해 전자기장이 규정되는데, 물리탐사에서 사용하는 준정적 근사(quasi-static) 대역($<10^5$ Hz)에서는 지하에서의 TM 모드 반사계수가 무시될 수 있다(Ward and Hohmann, 1988). 따라서 상부층과 하부층에서의 전기장은 공간 파수영역에서 각각 다음과 같이 TE 모드만의 반사계수로 규정되게 되므로 HCP 배열과 큰 차이가 없게 되며 단지 수평 파수에 대한 항만이 달라지게 된다.

$$\tilde{\mathbf{E}}_1(k_x, k_y, z; -h) = -\hat{z}_0 (k_y \mathbf{i} - k_x \mathbf{j}) \frac{k_y}{\lambda^2} R_{TE1} \frac{1}{2u_0} \quad (22)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_2(k_x, k_y, z; -h) = -\hat{z}_0 (k_y \mathbf{i} - k_x \mathbf{j}) \frac{k_y}{\lambda^2} R_{TE2} \frac{e^{-u_2(z-z_1)}}{2} \quad (23)$$

그러므로 HCP 배열에서의 경우와 같이 전기장 벡터의 내적과 그의 적분을 통한 후, 공간 파수 k_y 항의 존재에 따른 수평미분을 고려한 Bessel 함수의 미분정리를 이용하면(Ward and Hohmann, 1988), x 축을 따른 축선상에서($y=0$) 최종적으로 VCP 배열에서의 감도를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial H_y}{\partial \sigma_1} = -\frac{\hat{z}_0}{4\pi x} \int_0^{\infty} 2R^2(\lambda) A(u) e^{-2u_1 z_1} J_1(\lambda \rho) d\lambda \quad (24)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial \sigma_2} = -\frac{\hat{z}_0}{4\pi x} \int_0^{\infty} \frac{4u_0^2 u_1^2}{u_2} R^2(\lambda) e^{-2u_1 z_1} J_1(\lambda \rho) d\lambda \quad (25)$$

여기서, J_1 는 제1종 1차의 Bessel 함수이며 $\rho = x = x_R$ 이 된다.

감도분석

이제 2층 구조에서 상부층과 하부층에 대한 HCP 배열 및 VCP 배열의 감도를 나타내는 (20), (21)식 및 (24), (25)식에 의해 계산된 감도를 분석해보자. Fig. 2는 상부층 및 하부층의 전기비저항이 각각 100 ohm-m와 10 ohm-m일 때, 측정되는 반응인 상호 임피던스(mutual impedance)의 감도 비를 상부층

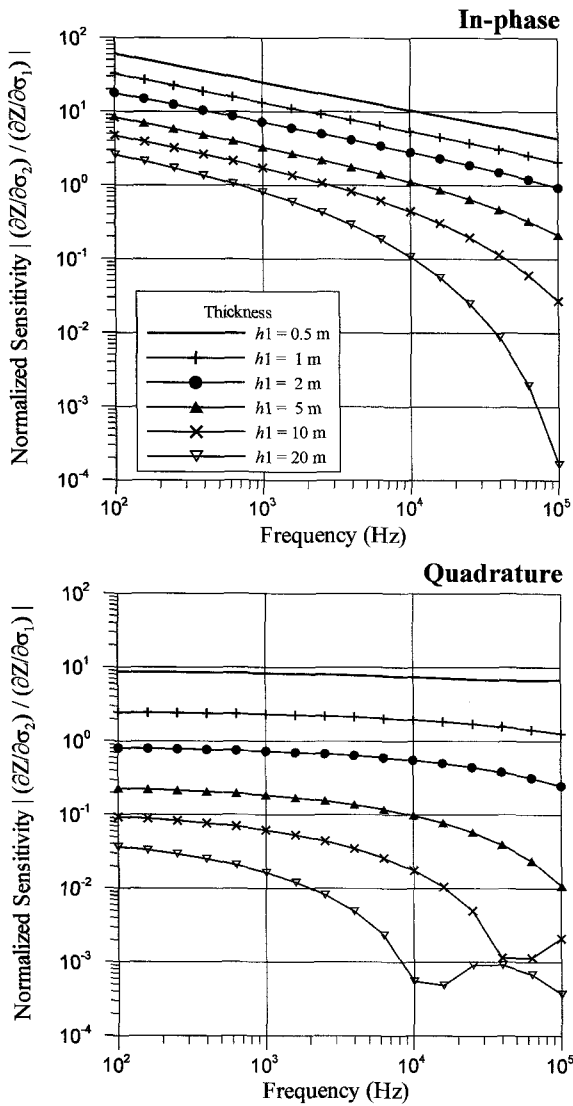


Fig. 2. In-phase (upper) and quadrature (lower) components of the sensitivities of mutual impedance ratio to the lower layer normalized by those to the upper layer for HCP configuration over a two-layer earth as a function of frequency when the thickness of the upper layer (h_1) varies. Resistivity values of the upper and lower layers are 100 ohm-m and 10 ohm-m, respectively, and the source-receiver separation is 2.05 m.

의 두께(h_1)의 변화에 따라 주파수의 함수로 나타낸 것이다. 이때 송·수신기는 지표상에 위치하고 간격은 2.05 m로서 송신 모멘트를 증가시킨 GEM-2H와 동일하며, 1.66 m인 GEM-2의 경우에도 감도 분포의 양상은 동일하며 단지 그 크기만 약간 달라지게 된다. 그림의 위는 동상성분, 아래는 이상성분의 비를 각각 보여주며 하부층의 감도를 상부층의 감도로 나눈 것이므로 그 값이 1 보다 크면 하부층에 대한 감도가 더 크다는 것을 즉, 하부층에 의한 반응이 전체 반응값에 더 많은 영향을 미침을 말한다. 그림에서 보면 동상성분의 경우 상부층의 두께가 20 m에 이르더라도 600 Hz 이하의 주파수에서는 하부층에 대한 감도가 더 크을 알 수 있으며 주파수가 증가할수록

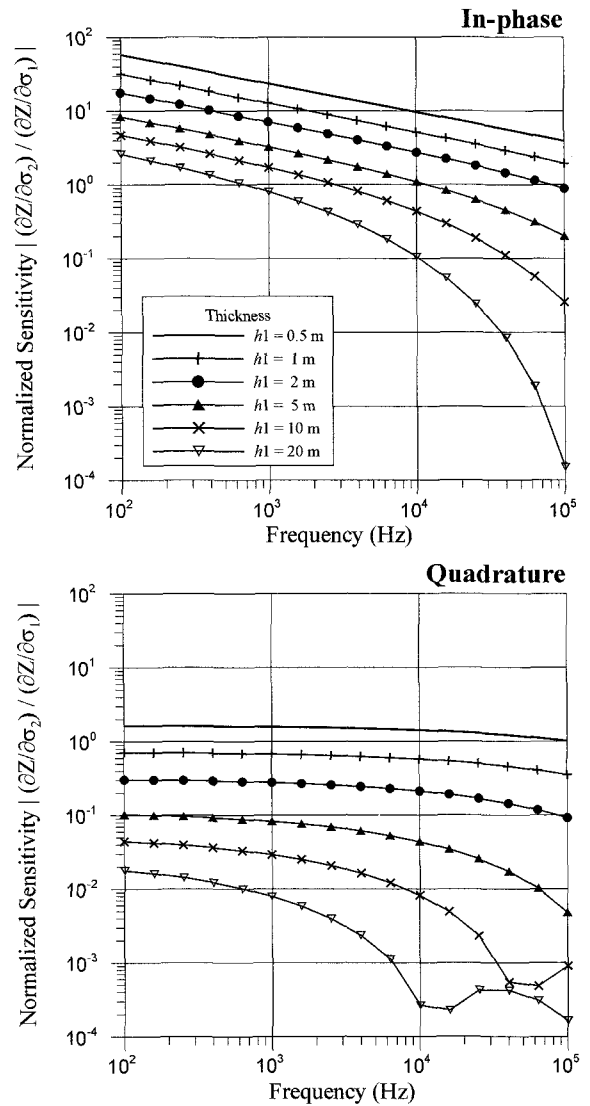


Fig. 3. In-phase (upper) and quadrature (lower) components of the sensitivities of mutual impedance ratio to the lower layer normalized by those to the upper layer for VCP configuration over a two-layer earth as a function of frequency when the thickness of the upper layer (h_1) varies. Resistivity values of the upper and lower layers are 100 ohm-m and 10 ohm-m, respectively, and the source-receiver separation is 2.05 m.

하부층의 감도가 감소하는 즉, 상부층의 반응이 측정값에 주로 영향을 미치게 됨을 보여준다. 반면에 이상성분은 상부층의 두께가 2 m만 되더라도 하부층의 감도가 상부층 보다 작아지며 5 m 두께에서는 모든 주파수 대역에서 상부층의 감도에 비해 1/5 이하 수준이므로 탐지가 어렵게 됨을 말해준다. 더욱이 이상성분의 감도는 주파수가 변화하더라도 큰 차이를 보여주지 않고 있는데, 이는 상부층의 영향이 전 주파수대역에 골고루 영향을 미치고 있기 때문이며, 이와는 반대로 동상성분은 상부층의 영향이 고주파수 대역에서만 반응에 작용하고 있다.

한편 Fig. 3은 Fig. 2의 경우와 동일한 조건에서 VCP 배열의 감도 비를 보여주고 있다. 동상성분은 HCP 배열과 거의 동

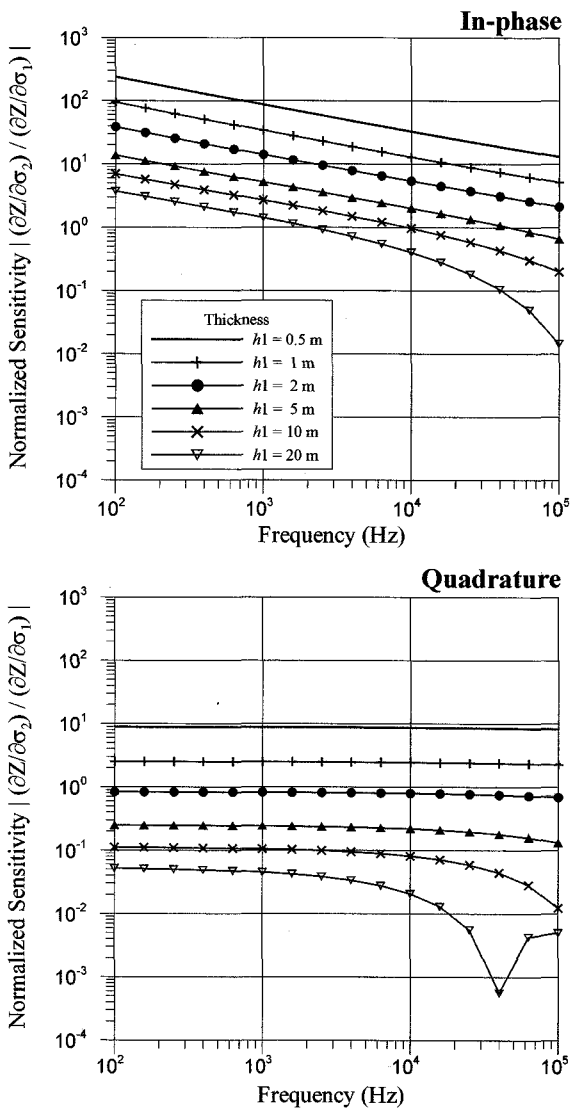


Fig. 4. In-phase (upper) and quadrature (lower) components of the sensitivities of mutual impedance ratio to the lower layer normalized by those to the upper layer for HCP configuration over a two-layer earth as a function of frequency when the thickness of the upper layer (h_1) varies. Resistivity values of the upper and lower layers are 100 ohm-m and 1,000 ohm-m, respectively, and the source-receiver separation is 2.05 m.

일하며 이상성분도 양상은 동일하고 단지 그 크기가 작아지는 데, 이는 앞서의 감도 계산식(20), (21), (24) 및 (25)식에서 살펴본 바와 같이 층서구조에서의 두 배열의 반응이 모두 TE 모드 반사계수에 의해 규정되기 때문이다. 한편 이상성분의 반응이 더욱 작아 이상성분만의 측정으로는 심도 5 m에 존재하는 하부층의 감지조차 거의 불가능해 진다.

지금까지는 하부층이 상부층에 비해 전기전도도가 높은 경우를 살펴보았는데, Fig. 4와 Fig. 5는 이와 반대로 하부층의 전기비저항이 1,000 ohm-m로 상부층에 비해 매우 비저항이 높아 통상적인 전자탐사에서는 분해가 어려운 것으로 여겨지는 경우에 대한 감도 비를 나타낸 것이다. 하부층의 전기비저

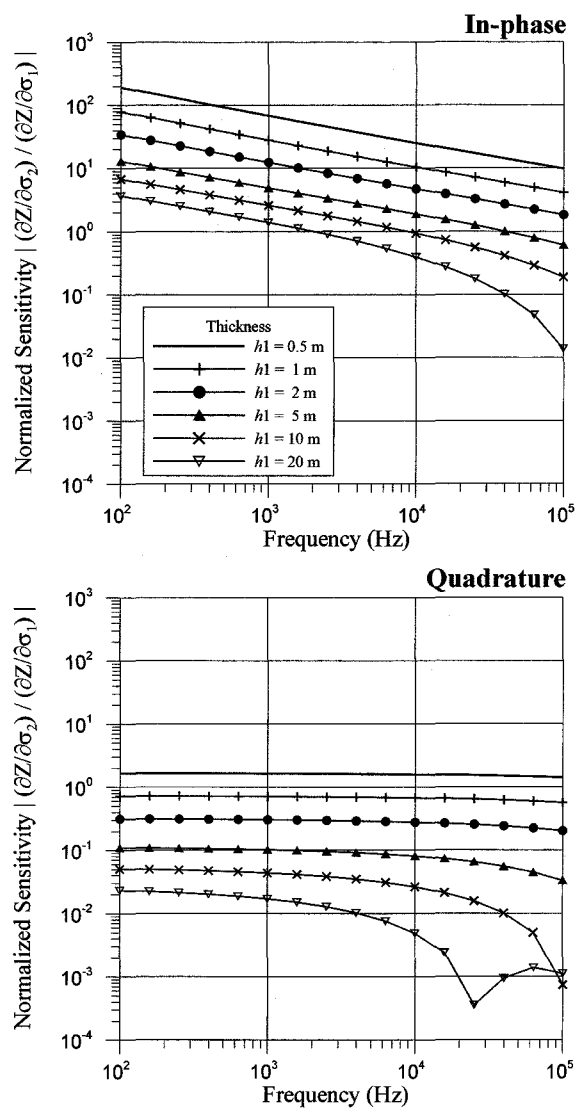


Fig. 5. In-phase (upper) and quadrature (lower) components of the sensitivities of mutual impedance ratio to the lower layer normalized by those to the upper layer for VCP configuration over a two-layer earth as a function of frequency when the thickness of the upper layer (h_1) varies. Resistivity values of the upper and lower layers are 100 ohm-m and 1,000 ohm-m, respectively, and the source-receiver separation is 2.05 m.

항을 제외하고는 모든 변수가 앞의 경우와 동일하다.

먼저 HCP 배열의 경우인 Fig. 4를 살펴보면 하부층의 전기 전도도가 높은 경우인 Fig. 2에 비해 저주파수 대역에서 감도 비가 더 큰 결과를 보여주어 적어도 감도분석 결과만으로는 하부층에 대한 탐지 가능성이 더 높음을 보여준다. 특히 상부층의 두께가 10 m일 경우에도 10 kHz 보다 낮은 주파수에서는 상부층의 감도 보다 하부층의 감도가 더 커서 충분히 탐지가 가능함을 알 수 있으며, 이에 반해 이상성분은 상부층의 두께가 증가할수록 감도가 많이 떨어짐을 보여준다. 이러한 양상은 VCP 배열의 결과인 Fig. 5에서도 대동소이하여 탐사심도를 증가시키기 위해서는 동상성분 자료의 해석이 필수적임을

확인시켜 준다.

모든 경우에 이상성분의 감도 비는 주파수에 큰 영향을 받지 않는 반면, 동상성분은 주파수가 낮아질수록 하부층의 감도가 증가되는 양상을 뚜렷이 보여주어 주파수 변화를 통한 수직탐사(parametric sounding)란 측면에서는 동상성분의 측정을 이용한 탐사가 이루어져야 함을 명확히 보여주고 있다. 이러한 결과는 Kaufman and Hoekstra(2001, Ch. 1)가 근거리장 영역에서의 근사식의 분석을 통해 이미 잘 정리해놓은 결과와 일치하고 있다. Kaufman and Hoekstra(2001)는 자기쌍극자 송신원에 의한 짧은 거리에서의 2차 자기장 반응을 근거리장 영역에서의 근사식과 그 전개식을 통해 자세히 분석하여, 이론적으로 동상성분 반응은 주파수가 낮아질수록 더욱 더 심부의 정보를 포함하게 되고, 2층 구조에서는 상부층의 두께가 아무리 증가하더라도 주파수만 낮아지면 하부층의 전기전도도만이 반응을 좌우하며, 그 크기는 하부층 전기전도도의 3/2제곱에 비례함을 증명하였다. 반면에 이상성분 반응의 경우에는 아무리 주파수가 낮아지더라도 상부층의 전기전도도에 비례하는 항을 포함하고 있어 가탐심도는 단지 송수신 간격에 의존함을 밝혔다. 따라서 동상성분을 정확히 측정할 수만 있다면, 이론적으로는 주파수를 충분히 낮춤으로써 소형루프 전자탐사법으로 원하는 가탐심도를 달성할 수 있게 된다.

가탐심도의 추정

그렇다면 현실적으로 소형루프 전자탐사법이 심부 탐사에 동원되지 못하는 원인 즉, 가탐심도를 제약하는 이유는 과연 무엇인가를 살펴보자. 가장 근본적인 원인으로서 주파수가 감소함에 따라 동상성분 2차장 반응의 크기가 주파수의 3/2제곱에 비례하여 감소하기 때문이다. 동일 평면 배열에서 동상성분 반응은 공기중을 통과하는 1차장을 포함하게 되며 이 1차장은 다음과 같이 주파수와 무관하고 단지 송수신 간격 r 의 3제곱에 반비례한다.

$$|H_p| = -\frac{M}{4\pi r^3} \quad (26)$$

따라서 지하에 의한 반응인 2차장은 통상 이러한 1차장에 대한 비인 상호 임피던스 비로 표현되게 되는데 그 크기는 보통 수 %이하이며 이러한 이유로 GEM2 기기에서는 반응의 크기를 1차장에 대한 2차장 비의 ppm 단위로 나타내고 있다. 기술적으로 이러한 1차장을 정확하게 제거하여 단순히 2차장만을 측정하는 것은 매우 어려운 일이며, 이러한 이유로 종래의 많은 소형루프 탐사기기가(예를 들어, Geonics사의 EM 시리즈) 1차장이 존재하지 않는 이상성분만을 측정하는 방식으로 제작되어 왔다. 따라서 지금까지의 소형루프 탐사에서는 주로 송수신 간격을 변화시키는 기하학적 수직탐사(geometric sounding) 방식을 채택할 수 밖에 없었으며, 이것이 소형루프 전자탐사

송수신 간격의 약 1/2에 해당하는 가탐심도를 가지며 천부탐사에만 활용되게 하는 이유였다.

한편 최근에 개발된 GEM-2 기기는 탐사기기내에 bucking coil을 내장시키는 방식을 채택함으로써 1차장을 상쇄시켜 비교적 정확하게 2차장의 동상성분까지도 측정하는 형식으로 한 단계 발전된 패러다임을 추구하고 있다. 그러나 기술적인 한계로 인하여 주파수를 무한정 낮출 수는 없으며 현재로는 300 Hz에서 24 kHz 범위내에서 다중주파수 측정이 가능하다. 더욱이 측정 단위가 ppm 이라고 해서 수 ppm 단위까지 정확한 이하의 반응값이 얻어진다고 보기는 어렵다.

Fig. 2에서 Fig. 5까지의 감도 비 계산 결과를 보면 300 Hz 정도의 주파수일 경우, 20 m 하부에 존재하는 층에 대한 감도가 상부층에 비해 최소한 2배 이상 높으므로 이론적으로는 20 m 까지의 가탐심도는 최소한 보장된다고 볼 수도 있다. 그러나 현실세계에서는 항상 다양한 종류의 잡음이 존재하고 있음을 고려해야 한다. 중요한 잡음원으로서 도심지의 인공 전자기적 잡음, 기기의 잡음 및 측정 잡음을 들 수 있는데 특히 동상성분 측정에서 가장 큰 영향을 미치는 요소는 측정 잡음이다. 송·수신기가 서로 분리되어 있을 경우 송신루프와 수신루프가 정확하게 동일면을 이루는 것은 거의 불가능하다. 서로 동일 평면이 아니게 되면 1차장은 (26)식에 나타난 바와 달라지게 되며 따라서 통상 지하의 반응에 비해 수백 배 이상인 1차장을 잘 못 고려한 자료해석은 지하구조와 거리가 먼 결과를 낼 수 밖에 없다. 이러한 이유로 GEM-2탐사기기는 송신기와 수신기를 일체형으로 제작하여 적어도 송·수신기는 동일 평면을 만족하게 하였다. 그러나 동일평면이 만족되었다 하더라도 지표면과 완벽한 수평(HCP 배열) 또는 정확한 수직(VCP 배열)을 현장탐사에서 유지하는 것 또한 현장 탐사 여건상 용이하지 않으며 많은 경우 지표면이 평탄하지 않다는 것을 고려하면 더욱 어렵게 된다. 따라서 동일 평면으로부터의 편차가 정규분포를 보인다는 가정하에서, 가능한 한 측정간격을 촘촘히 하여 많은 수의 연속적인 측정자료를 획득한 뒤, 중앙값 필터나 공간 저주파통과 필터 등을 적용하여 신호대 잡음비를 증가시키는 방법 등을 모색함이 필요하다.

Fig. 6은 HCP 배열에서 송수신 간격이 2.05 m일 때, 상부층과 하부층의 전기비저항이 각각 100 ohm-m, 10 ohm-m인 2층 구조의 지표상에서 상호 임피던스 비의 동상성분 및 이상성분을 보여준다. 동상성분의 반응 곡선(위 그림)에서 음영 처리한 부분은 현재 GEM-2 기기로 측정 가능한 주파수 대역을 가리킨다. 그림에서 실선은 상부층이 존재하지 않을 때이며 맨 아래 곡선이 하부층이 존재하지 않을 경우의 반응이 된다. 동상성분의 경우 시작하는 주파수의 차이는 있으나 모든 경우에 대해 주파수가 감소함에 따라 상부층의 반응에서 하부층의 반응으로 가까워지고 있으며 두께가 얇을수록 고주파수 대역에 까지 하부층의 반응이 나타나고 있다. 한편 이상성분(아래 그림)에서 보면 모든 경우에서 반응은 하부층만의 반응에 가까

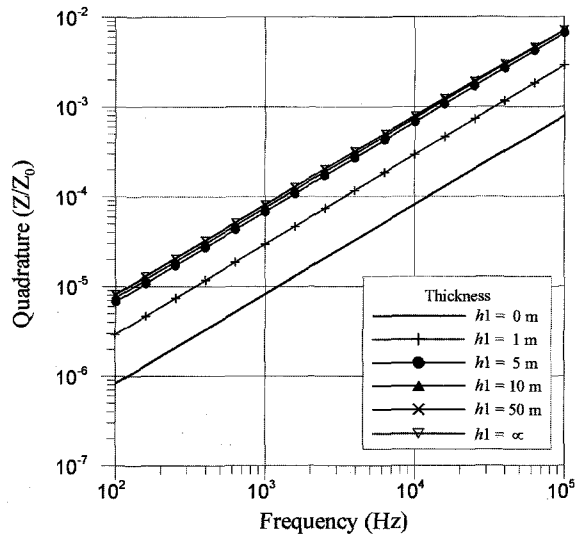
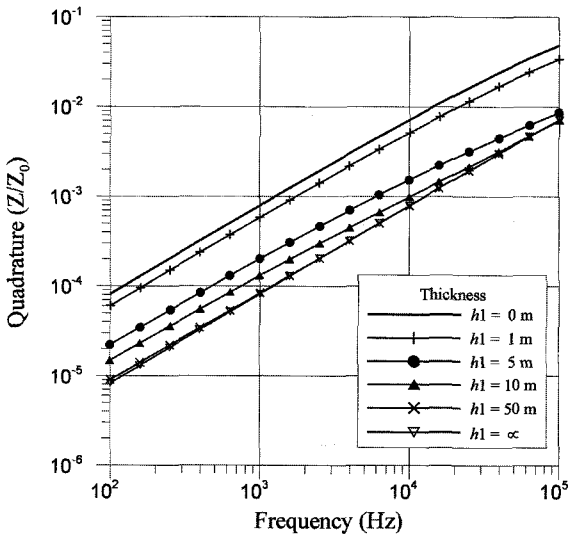
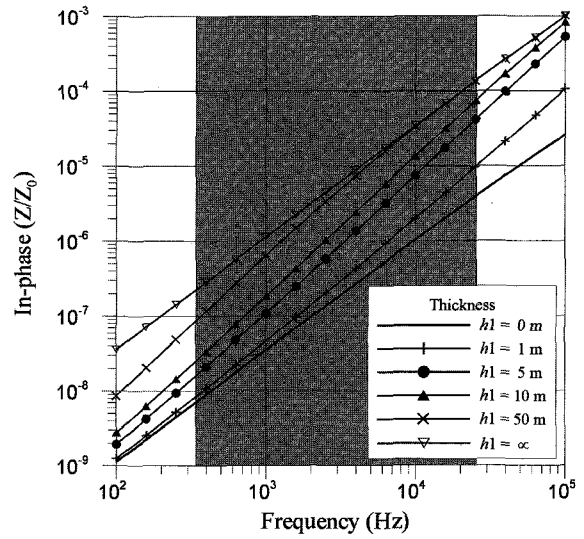
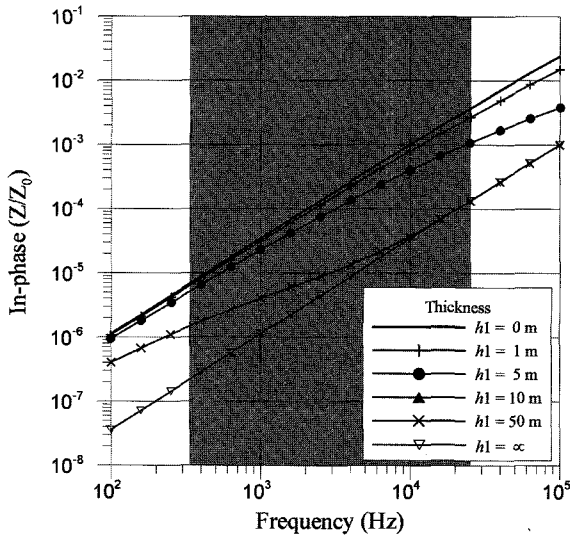


Fig. 6. In-phase (upper) and quadrature (lower) components of the mutual impedance ratio for HCP configuration over a two-layer earth as a function of frequency when the thickness of the upper layer (h_1) varies. Resistivity values of the upper and lower layers are 100 ohm-m and 10 ohm-m, respectively, and the source-receiver separation is 2.05 m.

Fig. 7. In-phase (upper) and quadrature (lower) components of the mutual impedance ratio for HCP configuration over a two-layer earth as a function of frequency when the thickness of the upper layer (h_1) varies. Resistivity values of the upper and lower layers are 100 ohm-m and 1,000 ohm-m, respectively, and the source-receiver separation is 2.05 m.

워지지 않고 있으며, 이는 앞서 분석한 바와 같이 주파수에 무관하게 상부층의 반응이 포함되어 있기 때문이다.

이제 동상성분을 이용했을 때의 반응을 가탐심도 면에서 고찰해보자. 감도 비의 계산 결과인 Fig. 2에서 보면, 상부층의 두께가 10 m 이내일 경우 20 kHz 이하의 주파수에서 하부층에 대한 감도가 상부층에 대한 감도의 1/5 (20%)보다 항상 큰 것으로 나타난다. 역산에서의 분해능을 생각할 때, 20% 보다 큰 감도를 갖고 있는 모델 변수는 수치적 잡음을 고려하더라도 분해가 가능하다고 볼 수 있다. 한편 상호 임피던스 비인 Fig. 6에서 보면, 상부층의 두께가 10 m인 경우 반응 값은 6 kHz 이상의 주파수 대역에서는 100 ppm 보다 커지며 주파수 상한에서는 400 ppm 이상의 값을 갖는다. 물론 이 때, 이상성

분의 값은 약 2,000 ppm으로 훨씬 크지만 하부층에 대한 감도는 상부층에 비해 1% 이하이기 때문에(Fig. 2) 가탐심도 면에서는 의미 없는 값이다.

설순지 등(2002)의 결과를 볼 때, 각종 주변 잡음에 대해 의미 있는 신호대 잡음비를 갖는 측정값은 약 100 ppm 내외로 볼 수 있다. 물론 아직까지 국내에서 많은 측정 자료가 얻어지지 않았고, 또한 잡음 수준이 측정 지역, 지표 조건 등에 따라 많이 달라지기 때문에 일률적인 기준을 정한다는 것은 무리가 있겠지만 앞서 서술한 바와 같이 좁은 간격의 측정 후 필터링을 통한 신호대 잡음비 향상 등을 통한다면 기기의 측정단위가 ppm인 점을 고려할 때 100 ppm의 신호 수준은 충분히 달성될 수 있을 것이다. 따라서 이 경우에 10 m의 가탐심도는 충

분히 확보된다고 할 수 있다.

또 다른 예로, 하부층의 전기비저항이 높아 전자탐사 반응이 약해지는 경우에 대해서도 살펴보자. Fig. 7은 Fig. 4와 마찬가지로 상부층의 전기비저항이 100 ohm-m, 하부층의 전기비저항이 1,000 ohm-m인 경우에 HCP 배열에서의 상호 임피던스비의 동상성분(위) 및 이상성분(아래)을 보여준다. 그 외 다른 측정변수는 앞서의 Fig. 4 및 Fig. 6과 동일하다. 그림에서 보면 앞서의 전도성 하부층의 경우에 비해 반응값이 매우 작아진 것을 볼 수 있는데, 이는 상부층이 없을 때(즉, $h_1 = 0$ m)의 반응값이 동상성분의 경우 약 1/1,000로 감소하기 때문이다. 이와 같이 상부층의 두께가 0 m인 즉, 전기비저항 1,000 ohm-m 인 반무한 균질 공간의 반응은 상한 주파수에서도 4 ppm에 불과하여 잡음 수준이하의 값이다. 따라서 GEM-2 기기와 같이 송수신 간격이 매우 작은 소형루프 전자탐사 기기는 전기비저항이 1,000 ohm-m에 이르는 지역에서는 금속성 매설물의 탐지에는 유용하지만 지하의 층서구조에 대한 정보획득에는 부적절함을 보여준다.

감도 면에서 보면, 비저항이 높은 하부층의 경우에 대한 감도 비의 계산 결과인 Fig. 4로부터 상부층의 두께가 20 m인 경우에도 GEM-2의 모든 주파수 대역에서 하부층의 감도가 상부층의 감도에 비해 1/5 이상이다. 그러나 Fig. 7에서 보면 반응의 크기가 급격하게 줄어들어 두께가 10 m 일 때, 주파수 상한에서 반응 값이 70 ppm 정도로 매우 미약하다. 한편 두께가 얇아질수록 하부층에 대한 감도는 커지나 반응값의 절대값이 점점 작아지므로 잡음 수준을 극복하기 어렵다. 따라서 동상성분의 측정만으로 천부에 위치하는 고비저항 기반암의 탐지에는 부적절하며, 이상성분의 감도가 두께 5 m 이내에서는 상부층에 비해 1/5 이상이며 반응값도 커지므로 탐지가능성이 오히려 높다. 따라서 100 ohm-m 표토층 하부에 있는 비저항 1,000 ohm-m의 기반암의 가탐심도는 최대 5 m 이내로 보는 것이 타당할 것이다.

VCP 배열의 경우에도 앞의 감도 계산 결과(Fig. 3, Fig. 5)에서 확인한 바와 같이 대동소이하나, 이상성분에서 하부층의 감도가 더 떨어진다는 면에서 볼 때, 비저항이 높은 기반암의 탐지에는 적용성이 더 떨어진다.

결 론

지금까지 McGillivray *et al.* (1994)이 정리한 전자탐사 반응의 감도에 대한 해석적 해에서 출발하여 2.5차원 및 1차원 전자탐사의 감도를 해석적으로 유도하였고, 이를 기초로 소형루프 전자탐사 반응의 감도를 정리하였으며, 최근에 국내에서 사용되기 시작하는 다중주파수 전자탐사 기기인 GEM-2 시스템의 규격에 맞게 감도를 분석하고, 반응의 크기를 기준으로 가탐심도를 추정하였다.

먼저 감도분석을 통하여 하부층에 대한 감도는 동상성분이

이상성분에 비해 매우 높고 상부층의 두께가 20 m에 이르더라도 저주파수 대역에서는 상부층의 감도에 비해 절대적으로 크다는 것을 보임으로써, 다중주파수를 이용한 소형루프 전자탐사에서는 동상성분의 정확한 측정이 가탐심도의 증대에 필수적임을 입증하였다.

전기비저항이 100 ohm-m인 상부층 밑에 10 ohm-m의 전기비저항을 갖는 하부층이 존재할 경우 GEM-2 기기에서 사용 가능한 주파수 대역인 330 Hz에서 24 kHz에 걸쳐 하부층에 대한 감도는 두께가 10 m 이내인 상부층에 대한 감도에 비해 최소 1/5 이상, 저주파수 대역에서는 2배 이상으로 충분한 분해능을 가지고 있으며, 상호 임피던스 반응의 크기도 100 ppm 이상으로 나타났다. 따라서 동상성분을 정확하게 측정하고자 노력한다면, 잡음 수준을 고려하더라도 전기전도성 하부층(예를 들어 매립장의 침출수 등에 대해서는 10 m까지의 가탐심도를 확보할 수 있을 것이다.

한편 전기비저항이 1,000 ohm-m로 높은 기반암이 존재할 경우에는 비록 하부층이 감도는 상부층에 비해 매우 높으나 반응의 절대값이 매우 미약하여 탐지가 어려우며 이상성분 자료와의 복합적인 해석을 통해서도 최대 5 m 이내로 가탐심도가 제약되는 것으로 나타났다. 따라서 송수신 간격이 2 m 내외로 짧은 다중주파수 소형루프 전자탐사는 전기비저항이 높은 지역에서는 금속성 매설물의 탐지를 위해서는 유용하지만 기반암의 심도 규명에는 적절치 않다. 이러한 경우에 가탐심도의 증가를 위해서는 잡음에 강력하고 정밀한 탐사기기가 개발되어야 할 것이다.

이 연구를 통하여 최근에 급증하는 환경오염범위 조사에서와 같이 심도 10 m 내외의 전기전도성 침출수의 분포 범위 규명 등을 위해서 다중주파수 소형루프 탐사기기가 신속한 지하영상화 도구로서 매우 유용히 사용될 수 있음을 보였으며, 가탐심도의 좀 더 명확한 규명을 위해서는 다양한 현장에 대한 적용을 통한 잡음 수준 분석과 기기의 정밀도 한계 규명 등이 뒤 따라야 할 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술부 지원 국가지정연구실 사업인 “전기·전자탐사를 이용한 지하구조의 3차원 진단기술 개발” 연구의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 물리탐사, 5, 이번 호.
 송윤호, 박삼규, 설순지, 조성준, 정승환, 2001, 물리탐사를 이용한 국내 유류오염지역 조사 사례: 환경오염지역 평가를 위한

- 물리탐사 기술, 한국지구물리탐사학회 2001 정기총회 및 제3회 특별 심포지움, 122-140.
- Fullagar, P. K., and Oldenburg, D. W., 1984, Inversion of horizontal loop electromagnetic frequency sounding: *Geophysics*, **49**, 150-164.
- Kaufman, A. A., and Hoekstra, P., 2001, *Electromagnetic soundings*: Elsevier Science B.V.
- McGillivray, P. R., Oldenburg, D. W., Ellis, R. G., and Habashy, T. M., 1994, Calculation of sensitivities for the frequency-domain electromagnetic problem: *Geophys. J. Int.*, **116**, 1-4.
- Sasaki, Y., 2001, Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC: *J. Appl. Geophys.*, **46**, 45-54.
- Song, Y., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2001, An efficient 2.5-D inversion of loop-loop EM data: *Proc. 5th SEGJ Internat. Symp.*, 153-160.
- Spies, B. R., and Frischnecht, F. C., 1991, Electromagnetic sounding, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics - Applications: Soc. Expl. Geophys.*, 285-426.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1988, Electromagnetic theory for geophysical applications, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol. I: Soc. Expl. Geophys.*, 131-312.
- Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., and Sutton, L. C., 1996, GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor: *J. Environ. Eng. Geophys.*, **1**, 129-137.