

소형 루프 전자탐사에서 기하학적 수직탐사와 주파수 수직탐사

조인기* · 안경찬

강원대학교 지질, 지구물리학과

Geometric and Frequency Soundings in Small-Loop Electromagnetic Surveys

In-Ky Cho* and Kyoung-Chan Ahn

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 소형 루프 전자탐사법은 효과적인 물리탐사법으로 다양한 목적으로 천부 조사에 널리 사용되고 있다. 소형 루프 전자탐사에서는 기하학적 수직탐사와 주파수 수직탐사가 적용되고 있으나, 주파수 수직탐사의 경우 그 유효성 대하여 논란이 지속되고 있다. 이 연구에서는 소형 루프 전자탐사에 대한 1차원 모델링을 통하여 기하학적 수직탐사와 주파수 수직탐사의 유효성을 검증하고자 하였다. 수치 실험 결과 기하학적 수직탐사는 효과적으로 지하의 심도에 따른 지하의 정보 해석이 가능한 것으로 나타났다. 반면 주파수 수직탐사는 송수신 간격이 비교적 클 경우, 즉 유도상수가 크다는 조건을 만족해야만 유효한 해석이 가능하며, 그렇지 못할 경우 하부 지층의 정보해석이 불가능한 것으로 나타났다.

주요어: 소형 루프 전자탐사, 기하학적 수직탐사, 주파수 수직탐사

Abstract: Small-loop EM techniques have been used in many geophysical investigations, including shallow engineering and environmental surveys. Even though geometric and frequency soundings have been widely used, there is a debate regarding the effectiveness of frequency sounding, especially when the coil spacing is small. In this study, we analyzed the effectiveness of geometric as well as frequency soundings via the one-dimensional modeling of small-loop EM surveys. The numerical results reveal that geometric sounding can effectively provide underground information. Conversely, the frequency soundings are only effective when the loop spacing is relatively large, that is, when the induction number is large. On the contrary, the frequency soundings fail to provide any information concerning the subsurface layers if the loop spacing is not large.

Keywords: small-loop electromagnetic, geometric sounding, frequency sounding

서 론

소형 루프 전자탐사(small loop EM)는 송수신원으로 소형 루프를 사용하는 비접촉식 방법으로 기동성과 현장 작업의 편의성이 뛰어나다. 또한 수평 동일면 배열(horizontal coplanar, HCP), 수직 동일면 배열(vertical coplanar, VCP), 수직 배열(perpendicular, PERP) 등 다양한 송수신 배열이 가능하며, 각 배열의 감도 및 가탐심도가 서로 다르므로 조사목적에 따라

선택적으로 사용 가능하다. 비록 소형 루프 전자탐사법은 신호의 크기가 미약하여 가탐심도가 작고 전자기적 잡음에도 취약하다는 단점이 있으나, 넓은 지역을 신속하게 조사할 수 있다는 장점으로 인하여 천부의 환경 오염대 조사, 토양 특성 조사 및 유물조사 등에 활발히 적용되고 있다(Simpson *et al.*, 2009; Beamish, 2011; Delefortrie *et al.*, 2014).

소형 루프 전자탐사에서는 송수신 루프 간격을 변화시키는 기하학적 수직탐사(geometric sounding)와 주파수를 변화시키는 주파수 수직탐사(frequency sounding)가 모두 가능하다. 기하학적 수직탐사는 전기 비저항 탐사에서와 마찬가지로 송수신 간격이 증가할수록 보다 깊은 지층의 정보를 얻을 수 있다. 반면 주파수 수직탐사는 주파수가 낮을수록 분산 깊이가 증가하는 현상을 이용하여 고주파는 천부, 저주파는 심부의 정보를 해석해 내는 방법이다. 필요에 따라서는 두 수직탐사를 모두 적용하게 되면 더 좋은 결과를 기대할 수도 있다.

소형 루프 전자탐사법의 가탐심도는 송수신의 주파수, 송수신 간격, 송수신 배열 방법 및 지하 매질의 전기 전도도 분포

Received: 3 June 2020; Revised: 2 November 2020;

Accepted: 9 November 2020

*Corresponding author

E-mail: E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwondo, 200-701, Korea

©2020, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

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

등의 다양한 변수에 의해 결정된다. 일반적으로 송신원의 주파수가 낮을수록, 송수신 간격이 클수록 가탐심도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 현재 시판되고 있는 소형 루프 전자탐사 시스템은 송수신 간격이 고정된 일체형 다중 주파수 기기와 송수신 간격의 조정이 가능한 분리형 기기가 있으며, 다중 주파수를 지원하면서도 송수신 간격의 변화도 가능한 분리형 다중 주파수 측정 장비도 있다. 대개 일체형 다중 주파수 측정 기기는 측정의 정확도를 높이고 탐사의 편의성을 위하여 송수신 간격을 대략 1.5 ~ 2 m 정도로 작게 설정하고 있다.

McNeill (1980, 1996), McNeill and Bosnar (1999)는 송수신 간격이 작을 경우, 즉 저 유도상수(low induction number) 대역의 경우, 주파수 수직탐사는 무의미하다고 주장하였다. Cho and Lim (2003a)은 이러한 문제점의 해결을 위하여 연속된 두 개의 주파수에서 측정된 이상성분의 차를 사용하는 역산법을 제시한 바 있다. 반면, Won *et al.* (1996)은 일체형 다중 주파수 장비를 개발하였으며, Won (2003)은 다중 주파수 전자탐사 방법으로 충분히 수직탐사가 가능하다고 주장하였다. 이후 다양한 목적으로 주파수 수직탐사 자료의 역산을 통한 지하 영상화에 관한 연구가 발표되었다(Fullagar and Oldenburg, 1984; Esparza and Gomez-Trevino, 1987; Zhang *et al.*, 2000; Seol *et al.*, 2002; Cho and Lim, 2003b; Lim and Cho, 2003; Song and Cho, 2009; Kim *et al.*, 2010). 이와 같이 소형 루프 전자탐사의 주파수 탐사의 유효성에 관한 논란은 아직도 지속되고 있다.

이 연구에서는 균질 반무한 공간 및 2층 구조 모델에 대한 수치 실험을 통하여 수평 동일면 배열(HCP) 소형 루프 전자탐사 반응 특성을 고찰하고, 기하학적 수직탐사와 주파수 수직탐사가 유효하기 위한 조건을 검토하였다.

기본이론

수평 루프(horizontal loop) 혹은 수직 자기 쌍극자(vertical magnetic dipole)가 수평 다층 구조의 지표면에 위치할 경우 전자기장은 다음과 같이 주어진다(Ward and Hohmann, 1988).

$$E_{\phi} = -\frac{i\omega\mu_0 m}{4\pi} \int_0^{\infty} (1 + \gamma_{TE}) \lambda J_1(\lambda \rho) d\lambda \quad (1)$$

$$H_{\rho} = \frac{m}{4\pi} \int_0^{\infty} (1 - \gamma_{TE}) \lambda^2 J_1(\lambda \rho) d\lambda \quad (2)$$

$$H_z = \frac{m}{4\pi} \int_0^{\infty} (1 + \gamma_{TE}) \lambda^2 J_0(\lambda \rho) d\lambda \quad (3)$$

여기서 w 는 각주파수, μ_0 는 진공에서의 투자율, m 은 자기 쌍극자 모멘트, ρ 는 송수신 간격, J_0 와 J_1 는 Bessel 함수이다. 또한 γ_{TE} 는 지층 경계면에서의 반사 계수로 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1}, \quad (4)$$

$$\hat{u}_1 = u_1 \frac{\hat{u}_2 + u_1 \tanh(u_1 h_1)}{u_1 + \hat{u}_2 \tanh(u_1 h_1)}, \dots, \quad (5)$$

$$\hat{u}_n = u_n \frac{\hat{u}_{n+1} + u_n \tanh(u_n h_n)}{u_n + \hat{u}_{n+1} \tanh(u_n h_n)}, \dots, \hat{u}_N = u_N$$

식 (5)에서 $u_n^2 = \lambda^2 - k_n^2$, $k_n^2 = -iw\mu_0\sigma_n$ 으로 주어지며, σ_n 과 h_n 은 n 번째 층의 전기 전도도 및 두께이다. 식 (1) ~ (3)에 주어지는 Hankel 변환은 Anderson (1979)의 ZHANKS를 사용하여 계산할 수 있다.

일반적으로 주파수 영역 소형 루프 전자탐사의 반응 특성을 분석하기 위하여 유도상수가 사용된다. 유도상수는 표피심도(skin depth, δ)에 대한 송수신 간격의 비로 정의된다(Spies and Frischknecht, 1991).

$$B = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}} \rho = \frac{|k| \rho}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

일반적으로 주파수 영역 소형 루프 전자탐사에서 유도상수가 같을 경우 주파수나 전기 전도도에 관계없이 동일한 반응 값을 나타낸다. 따라서 유도상수를 사용하면 주파수, 전기 전도도 및 송수신 간격 등의 변수를 하나의 변수로 통합하여 분석할 수 있다는 장점이 있다. 또한 전자기장은 유도상수가 작은 근거리장(near field)과 큰 원거리장(far field)으로 구분하기도 한다. 한편 유도상수가 작을 경우, 지하 매질에 발생하는 유도 전류는 주로 송신원에 의한 1차장에 의해 결정된다. 예를 들어 수평 다층 구조의 경우 각 지층에 생성된 유도 전류들 사이에 간섭(interaction)은 무시할 수 있다(Spies and Frischknecht, 1991). 반면 유도상수가 큰 경우에는 각 지층에서 생성된 유도 전류 사이의 간섭이 증가하며, 1차장에 의한 유도 전류와는 상당히 다른 반응 양상을 나타낸다. 따라서 유도상수의 크기에 따라 전자탐사는 여러 가지 방법으로 구분되며, 각 방법은 서로 다른 해석 방법을 적용해야 효과적으로 지하의 정보를 추출해 낼 수 있다.

저 유도상수 대역(Low induction number)

이제 유도상수가 작은 값($B \ll 1$)을 갖기 위해서는 주파수, 매질의 전기 전도도, 송수신 간격이 작아야 한다. 이 영역에서는 $|k_1|$ 이 매우 작은 값을 보이므로

$$u_1 = \sqrt{\lambda^2 - k_1^2} = \lambda \sqrt{1 - k_1^2 / \lambda^2} \approx \lambda (1 - 0.5 k_1^2 / \lambda^2). \quad (7)$$

물론 이러한 근사는 적분 변수 λ 가 작아지면, 즉 적어도 $0 \leq \lambda \leq |k_1|$ 의 구간에서는 성립하지 않는다. 그러나 $|k_1|$ 이 작은 경우, 이 구간은 매우 좁으며, 식 (3)에 주어진 피적분 함수

에는 λ^2 이 존재하므로 자기장의 수직 성분은 이 구간의 함수 값에 크게 영향을 받지 않는다.

한편 2층 구조 모델의 경우 식 (4)에 주어진 반사 계수는 식 (5)를 사용하여 지수 함수로 나타내면

$$\gamma_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1} = \frac{(\lambda - u_1)/(\lambda + u_1) + (u_1 - u_2)/(u_1 + u_2)e^{-2u_1h}}{1 + (\lambda - u_1)/(\lambda + u_1) \cdot (u_1 - u_2)/(u_1 + u_2)e^{-2u_1h}}, \quad (8)$$

로 쓸 수 있다. 식 (7)로부터

$$\frac{\lambda - u_1}{\lambda + u_1} \approx \frac{k_1^2}{4\lambda^2} \quad \text{and} \quad \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \approx \frac{k_2^2 - k_1^2}{4\lambda^2} \quad (9)$$

로 근사할 수 있으며, 식 (8)의 반사계수는 다음과 같이 단순화된다(Kaufman, 1994).

$$\gamma_{TE} \approx \frac{k_1^2}{4\lambda^2} + \frac{k_2^2 - k_1^2}{4\lambda^2} e^{-2\lambda h_1} \quad (10)$$

한편 식 (3)에 주어진 자기장의 수직 성분은 송신원에 의한 1차장(primary field)과 지하 매질에 유도된 유도 전류에 의한 2차장(secondary field)

$$H_z^S = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \gamma_{TE} \lambda^2 J_0(\lambda \rho) d\lambda. \quad (11)$$

의 합으로 주어진다.

식 (11)에 식 (10)을 대입하면 2차 자기장의 수직 성분은 다음과 같이 계산된다.

$$H_z^S = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \left[\frac{k_1^2}{4\lambda^2} + \frac{k_2^2 - k_1^2}{4\lambda^2} e^{-2\lambda h_1} \right] \lambda^2 J_0(\lambda \rho) d\lambda. \quad (12)$$

식 (12)에 다음의 Lipschitz 적분식

$$\int_0^\infty e^{-\lambda h_1} J_0(\lambda \rho) d\lambda = (\rho^2 + h_1^2)^{-1/2} \quad (13)$$

을 적용하면, 2차 자기장의 수직 성분은

$$H_z^S = \frac{m}{4\pi\rho} \left[\frac{k_1^2}{4} + \frac{k_2^2 - k_1^2}{4} \frac{1}{\sqrt{1 + 4(h_1/\rho)^2}} \right] \quad (14)$$

로 주어진다(McNeill, 1980). 식 (14)에서 유도상수가 작을 경우를 생각해 보자. 식 (6)에 주어진 유도상수가 작은 값을 갖기 위해서는 k 는 물론 송수신 간격 ρ 도 작아야 한다. 만약 제 1층의 두께 h_1 이 ρ 에 비하여 큰 경우를 가정하면 식 (14) 우변의 두 번째 항은 매우 작은 값을 가지며, 결과적으로 H_z^S 에 영향을 주지 못한다. 즉 H_z^S 는 k_1 의 값에 의해서 결정된다. 따라서 H_z^S 는 이상성분(quadrature component)만이 존재하며, 그 크기는 제 1층의 전기 전도도와 주파수에 정비례하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 유도상수가 작은 대역의 경우에는 주파수

를 변화시키는 주파수 수직탐사는 무의미하다는 것을 알 수 있다. 즉 주파수가 달라도 H_z^S 는 주파수에 의한 변화만을 보이며, 1층의 두께나 2층의 전기 전도도에 관한 해석은 어렵게 된다.

반면 송수신 간격을 달리하는 기하학적 수직탐사의 경우 H_z^S 는 각 층의 전기 전도도 및 두께에 관한 정보를 내포하고 있다. 예를 들어 식 (14)에서 송수신 간격이 매우 크거나 작을 경우에는 H_z^S 는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$H_z^S \approx \begin{cases} \frac{m}{4\pi\rho} \cdot \frac{k_1^2}{4} & \text{if } h_1/\rho \rightarrow \infty \\ \frac{m}{4\pi\rho} \cdot \frac{k_2^2}{4} & \text{if } h_1/\rho \rightarrow 0 \end{cases} \quad (15)$$

즉 제 1층의 두께에 비하여 송수신 간격이 작을 경우, H_z^S 는 제 1층의 전기 전도도에 관한 정보를 제공하며, 그 반대의 경우에는 제 2층의 전기 전도도에 관한 정보를 제공한다. 따라서 유도상수가 작은 영역에서 획득된 자료는 다음과 같이 겉보기 전도도로 변환하여 해석 가능하다(McNeill, 1980).

$$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0 \omega \rho^2} \text{Im} \left(\frac{H_z^S}{H_z^P} \right) \quad (16)$$

Fig. 1은 간단한 2층 구조에 대하여 수평 루프(HCP) 전자탐사 1차원 모델링 통하여 주파수에 따른 2차 자기장의 이상성분 변화 양상을 나타낸 것이다. 제 1층은 전기 비저항 100 Ωm, 두께 10 m, 제 2층은 1000 Ωm, 송수신 코일 간격은 2 m로 설정하였으며, 송수신기는 모두 지표면에 위치하는 것으로 가정하였다. 식 (11)에 주어진 2차 자기장의 수직성분은 이상성분

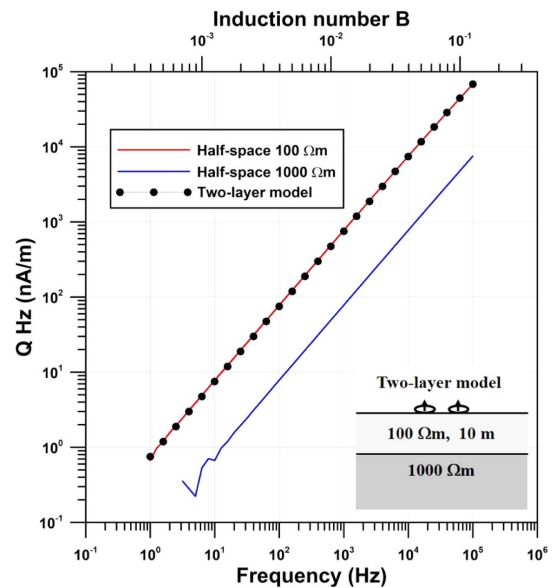


Fig. 1. Quadrature component of the vertical magnetic field as a function of frequency when a vertical magnetic dipole is located at the surfaces of a 100 Ωm, 1000 Ωm half-spaces and a two-layered earth model. The induction number shown at the top is calculated for the 100 Ωm half-space.

만이 존재하여, 동상성분(in-phase component)은 거의 1차장과 같은 값을 보이므로 그림에 나타내지 않았다. 또한 제1층의 전기 비저항인 100 Ωm와 제2층의 전기 비저항인 1000 Ωm의 균질 반무한 공간에 대한 반응 양상도 비교를 위하여 함께 나타내었다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 2차 자기장의 이상성분은 $\sigma\omega$ 에 비례함을 잘 보여주고 있다 (Kaufman, 1994; Cho and Lim, 2003a). 만약 주파수 수직탐사가 가능하려면, 저주파수 대역에서는 제1층의 전기 전도도를 갖는 균질 반무한 공간의 반응, 고주파수 대역에서는 제2층의 전기 전도도를 갖는 균질 반무한 공간의 반응에 수렴하는 양상을 보여야 한다. 그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 2층 구조 모델에 대한 반응 양상은 제1층의 전기 비저항인 100 Ωm 반무한 공간의 반응 양상과 거의 일치하고 있다. 이는 주어진 모델에서 $h_1/\rho = 5$ 로 비교적 크기 때문에, 식 (14)의 두 번째 항이 매우 작은 값을 보이며, 결과적으로 2차 자기장은 제1층의 k_1 값에 의해 결정됨을 의미한다. 한편 Fig. 1의 상부 축에 표시한 B 는 0.01 S/m(제1층의 전기 전도도)인 반무한 공간에 대한 유도상수이다. 거의 모든 주파수 대역에서 B 가 0.1 이하의 값을 보이고 있어, 저 유도상수 대역에서 모델링이 수행되었음을 알 수 있다. 따라서 저 유도상수 대역의 경우 낮은 주파수를 사용하여도 제1층의 두께나 제2층의 전기 전도도를 해석하기 어려우며, 단지 제1층의 전기 전도도에 관한 해석이 가능하다.

Fig. 2는 동일한 2층 구조 모델에 대하여 기하학적 수직탐사를 수행한 결과를 나타낸 것이다. 신호원의 주파수가 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz인 경우에 대하여, 송수신 코일의 간격을 1 m에서 100 m까지 변화시키면서 겘보기 전도도의 변화 양상을

나타낸 것이다. 송수신 코일의 간격이 작을 경우에는 제1층의 전기 전도도에 수렴하고 있으며, 간격이 증가하면서 점차 제2층의 전기 전도도에 수렴하는 것을 알 수 있다. 그러나 주파수가 10 kHz일 경우에는 송수신 간격이 커질 경우 겘보기 전도도가 제2층의 전기 전도도보다 매우 작게 나타나고 있다. 이는 송신 주파수가 10 kHz로 높고, 송수신 간격이 큰 경우 유도상수가 지나치게 커져서 저 유도상수 조건을 만족시키지 못하기 때문으로 해석된다. 즉 송신 주파수가 10 kHz이고, 송수신 간격이 100 m일 경우 제1층에서의 유도상수 $B_1 \approx 2.0$, 제2층에서의 유도상수는 $B_2 \approx 0.6$ 정도의 비교적 큰 값을 갖기 때문에 저 유도상수 조건에 위배된다. 이 경우 식 (16)에 주어진 겘보기 전도도를 사용하여 해석하는 것은 무리가 있다. 따라서 기하학적 수직탐사의 경우에도 저 유도상수 조건을 만족하는 주파수 및 송수신 간격을 적용해야 식 (16)을 사용한 해석이 가능할 것으로 판단된다. 만약 이 조건을 만족하지 못할 경우에는 역산법을 적용해야만 제2층의 정보 해석이 부분적으로 가능해 보인다.

이상에서 유도상수가 작은 경우 주파수 수직탐사는 무의미하여, 기하학적 수직탐사만이 하부 지층의 정보를 제공함을 알 수 있다. 이러한 분석은 지층의 수가 많은 다층 구조에서도 유효하다. 송수신 간격이 좁은 저 유도상수 대역에서 현장 작업의 수월성만을 고집하여 주파수 수직탐사를 수행하게 되면, 천부 지층의 전기 전도도만을 해석할 수 있으며, 층의 두께나 하부 층에 대한 해석이 불가능하다. 또한 기하학적 수직탐사의 경우에도 하부 지층의 정보를 얻기 위해서는 송수신 간격이 상부 층의 두께에 비하여 충분히 커야 하며, 저 유도상수 조건을 만족하는 범위내의 송수신 간격 및 주파수를 사용해야 할 것으로 판단된다.

주파수 수직탐사

앞서 언급한 바와 같이 기하학적 수직탐사는 송수신 간격을 변화시키면서 자료를 획득해야 하므로 현장 작업이 어렵다는 단점이 있다. 반면 주파수 수직탐사의 경우에는 현장 탐사가 용이하다는 상대적인 강점을 가지고 있다. 그러나 소형 루프 전자탐사의 경우, 앞서 기술한 바와 같이 주파수를 변화시켜도 심부의 정보를 얻어낼 수 없기 때문에 그 유효성에 대하여 많은 논란이 있어 왔다. 여기서는 소형 루프 전자탐사에서 주파수 수직탐사의 가능성을 분석하여 그 유효성을 검증하고자 한다.

2층 구조 모델의 경우 식 (8)에서 $|u_1 h_1|$ 의 크기에 따라 반사 계수는 다음과 같이 단순화된다.

$$\gamma_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1} \approx \begin{cases} \frac{\lambda - u_1}{\lambda + u_1} & \text{if } |u_1 h_1| \rightarrow \infty \\ \frac{\lambda - u_2}{\lambda + u_2} & \text{if } |u_1 h_1| \rightarrow 0 \end{cases} \quad (17)$$

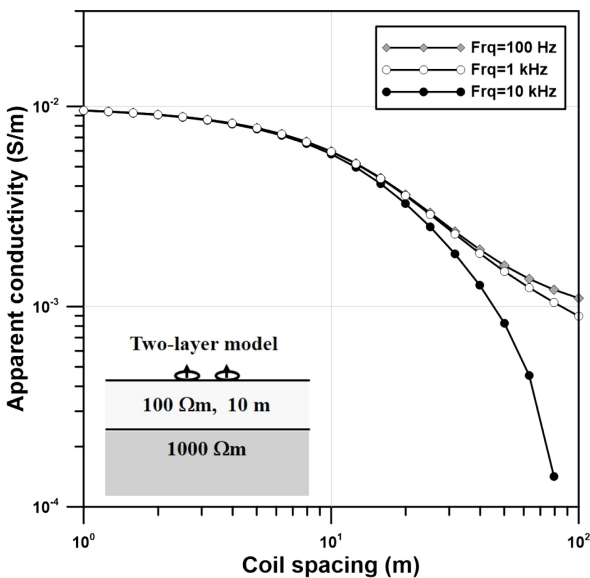


Fig. 2. Geometric sounding curves for a two-layered earth model as a function of the coil spacing. The conductivity and thickness of the first layer are 0.01 S/m and 10 m, respectively. The conductivity of the second layer is 0.001 S/m.

식 (17)은 $|u_1 h_1|$ 의 크기에 따라 제1층과 제2층의 전기 전도도를 갖는 균질 반무한 공간에 대한 반사 계수를 나타낸다. 따라서 2차 자기장의 수직 성분은 $|u_1 h_1|$ 이 큰 경우에는 제1층, 작은 경우에는 제2층의 정보를 제공하게 된다. 한편 $|u_1 h_1|$ 은 주파수 및 지하 매질의 전기 전도도의 함수로 주어지므로, 주파수를 조정하여 고주파수는 천부, 저주파수는 심부의 정보를 해석할 수 있다. 즉 $|u_1 h_1|$ 를 변화시킬 수 있다면 소형 루프 전자탐사에서는 주파수 수직탐사가 가능함을 의미한다.

이제 $|u_1 h_1|$ 의 특성 및 그에 따른 전자자기장의 거동 특성을 살펴보자. 앞 절에서 기술한 바와 같이 제1층 및 제2층의 유도상수가 작을 경우에는 주파수를 조정해도 제2층의 정보를 얻어낼 수 없다. 따라서 유도상수가 충분히 큰 경우에 제2층의 정보 추출이 가능한가를 살펴보자. 유도상수는 신호원의 주파수, 매질 전기 전도도, 송수신 간격의 함수로 주어진다. 유도상수가 큰 값을 갖도록 하기 위해서는 송수신 간격을 크게 설정하는 것이 필수적이다. 이는 지하 매질의 전기 전도도는 이미 주어진 값으로 탐사자가 조절할 수 없는 변수이며, 주파수도 측정 기기마다 상, 하한이 고정되어 있기 때문이다. 현재 상업용 측정 기기의 주파수 범위는 수 십 Hz에서 최대 100 kHz를 넘지 않는다. 이러한 조건에서 주파수 수직탐사가 가능하기 위해서는, 즉 큰 유도상수 조건을 만족시키기 위해서는 송수신 간격을 넓게 설정하는 것이다.

한편 식 (17)에 주어진 반사 계수는 $|u_1 h_1|$ 의 함수로 주어진다. 따라서 유도상수가 크다는 조건하에서 $|u_1 h_1|$ 가 매우 작은 값부터 큰 값을 갖도록 주파수를 조정할 수 있어야 주파수 수직탐사가 가능해진다. 즉 낮은 주파수에서는 $|u_1 h_1|$ 이 거의 0에 수렴하는 작은 값을 보이고, 주파수가 증가하면 $|u_1 h_1|$ 이 매우 큰 값을 보여야 한다. 식 (3)에 주어진 Hankel 적분에서 Bessel 함수는 적분 변수 λ 값이 커지면 진동하는 특성을 보인다. 따라서 2차 자기장은 주로 λ 의 값이 작은 구간에서의 핵함수(kernel function) 값에 의해 결정된다. 또한 $u_1 = \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}$ 으로 주어지며, 적분 변수 $\lambda = [0, \infty]$ 범위내의 실수이므로 $|k_1 h_1| \leq |u_1 h_1|$ 의 값을 보인다. 주파수가 높아 표피심도가 제1층의 두께보다 매우 작을 경우, $|u_1 h_1|$ 은 매우 큰 값을 보이게 되어 2차 자기장은 주로 제1층의 전기 전도도에 의해 결정된다. 따라서 제 1층의 전기 전도도에 관한 정보를 해석해 낼 수 있다.

한편 식 (17)에 주어진 바와 같이 제2층의 정보는 $|u_1 h_1|$ 이 작은 경우에 해석 가능하다. 적분 변수 λ 의 값이 작은 구간에서 $|u_1 h_1|$ 이 0에 수렴하기 위해서는 적어도 $|k_1 h_1| \rightarrow 0$, 즉 $|h_1/\delta_1| \rightarrow 0$ 의 조건을 만족해야 한다. 따라서 제1층의 두께가 표피심도에 비하여 매우 작아야만 $|u_1 h_1|$ 은 매우 작은 값을 보이게 되며, 이 때 2차 자기장은 제2층의 정보를 제공할 수 있게 된다. 그러나 앞 절에서 설명한 바와 같이 유도상수가 작은 경우에는 2차 자기장은 주파수에 단순 비례하는 특성을 보이므로 유도상수가 큰 경우에만 제2층의 정보를 해석할 수 있다.

결과적으로 제2층의 정보 해석을 위해서는 $|h_1/\delta_1|$ 를 매우 작게 하는 동시에, 유도상수는 큰 값을 갖도록 해야 한다. 그러나 이 두 조건을 동시에 만족시키는 것은 쉽지 않다. 즉 표피심도와 유도상수는 서로 반비례하는 특성을 보이므로 송수신 간격이 작을 경우 주파수만을 조정하여 이 두 조건을 동시에 만족시킬 수는 없다. 따라서 송수신 간격을 크게 설정하여 표피심도가 클 경우에도 유도상수가 충분히 큰 값을 갖도록 해야만 주파수 수직탐사가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 제1층이 두께 10 m, 전기 비저항이 100 Ωm이고, 2층의 전기 비저항이 1000 Ωm인 2층 구조 모델에 대하여 송수신 간격 100 m인 수평 루프 전자탐사 모델링을 수행하고, 이상성분의 주파수 반응 양상을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 저주파 대역의 경우 하부 층의 전기 비저항 1000 Ωm인 반무한 공간의 반응 양상과 잘 일치하고 있다. 예를 들어 주파수가 100 Hz일 경우 $\delta_1 = 503$ m, $|h_1/\delta_1| \approx 0.02$ 정도의 작은 값을 가지므로 가탐심도는 충분하다. 또한 $|u_1 h_1|_{\min} = |k_1 h_1| = \sqrt{2} h_1/\delta_1 \approx 0.0283$ 로 매우 작기 때문에 식 (17)에서 H_z^s 는 제2층의 전기 전도도를 갖는 반무한 공간의 반응에 근접한다. 또한 유도상수는 $B_1 = 0.2$ 로 충분히 작지는 않지만 어느 정도 저 유도상수 조건을 만족한다. 따라서 H_z^s 는 식 (15)에 의해 근사할 수 있으며, 이 경우 $h_1/\rho = 0.1$ 이므로 제2층의 전기 전도도를 갖는 반무한 공간의 반응에 근접한 값을 보이게 된다. 반면 고주파 대역의 경우에는 제1층과 2층의 전기 전도도를 갖는 반무한 공간의 반응과는 차이를 보이고 있다. 주파수가 10 kHz일 경우, $B_1 \approx 2.0$ 으로 근거리장에 속하며,

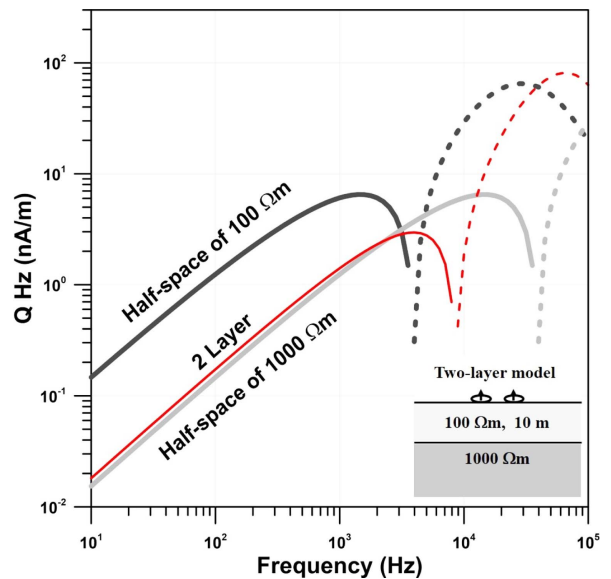


Fig. 3. Quadrature component of a vertical magnetic field 100 m from a vertical magnetic dipole at the surface of a two-layered earth model. For comparison, the quadrature components of the vertical magnetic fields of a 100 Ωm and 1000 Ωm half-spaces are also displayed. Solid lines indicate negative values, while dashed lines indicate positive values.

$|h_1/\delta_1| \approx 0.2$, $|u_1 h_1|_{\min} \approx 0.283$ 로 중간 정도의 값을 나타낸다. 따라서 H_2^s 는 제1층과 제2층의 영향을 모두 받아 두 반무한 공간에 대한 반응 사이의 값을 보이는 것으로 해석된다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 감도가 높은 제1층의 전기 전도도에 대한 정보는 충분히 해석 가능한 것으로 판단된다. 다만 기하학적 수직탐사에서와 같이 겉보기 전도도에 의한 해석법을 적용하기는 어려울 것으로 판단되며, 역산을 통한 해석이 가능할 것으로 보인다.

주파수 수직탐사에서 송수신 간격에 관계없이 고주파 반응으로부터 제1층의 전기 전도도 값을 충분히 해석할 수 있다. 그러나 제2층의 정보를 해석하기 위해서는 $|h_1/\delta_1|$ 이 거의 0에 수렴해야 하며, 유도상수가 충분히 커야 한다는 두 개의 조건을 동시에 만족해야 한다. 이제 소형 루프 전자탐사가 이러한 조건을 만족할 수 있는가를 실질적인 측면에서 살펴보자. 우선 현재 상용되고 있는 일체형 다중 주파수 소형 루프 전자탐사 기기의 주파수 범위는 수 10 Hz에서 100 kHz를 넘지 않는다. 현장 자료 획득의 편의성을 위하여 송수신 루프 간격이 2 m로 고정되어 있고, 지하 매질의 전기 전도도는 0.1 S/m에서 0.001 S/m의 범위를 갖는다고 가정하자. 이 경우 표피심도는 $5 \text{ m} < \delta < 5 \times 10^3 \text{ m}$, 유도상수는 $0.4 \times 10^{-3} < B < 0.4$ 의 범위내의 값을 보인다. 따라서 주파수를 작게 하면 $|h_1/\delta_1|$ 는 거의 0에 근접하는 값을 보인다. 그러나 이는 주파수가 작아지면 유도상수도 작아지므로 유도상수가 어느 정도 커야한다는 두 번째 조건을 만족시키기 어렵다. 앞서 기술한 바와 같이 유도상수가 작으면 주파수를 작게 해도 소형 루프 전자탐사는 제2층의 정보를 제공하지 못한다. 높은 주파수를 적용한다 해도 유도상수의 최댓값은 0.4 정도로 충분히 크지 못하며, 오히려 표피심도가 작아진다는 문제점이 발생한다. 결과적으로 송수신 간격이 2 m 이내로 작게 설정된 일체형 소형 루프 전자탐사에서 주파수 수직탐사는 의미를 상실하게 된다.

한편 유도상수가 큰 경우에는 소형 루프 전자탐사에서도 주파수 수직탐사가 의미를 가질 수 있다. 그러나 소형 루프 전자탐사에서 유도상수를 증가시키기 위해서는 송수신 간격을 매우 크게 설정해야 하는데, 이 경우 수신 신호가 너무 작아져 안정적 측정이 어렵게 된다. 즉 현재 시판되고 있는 소형 루프 전자탐사 기기의 측정 한계가 수십 ppm 정도에 지나지 않으므로 주변의 인공 잡음 문제를 고려하지 않는다고 해도 안정적 측정이 쉽지 않다.

결 론

소형 루프 전자탐사는 비접촉식 탐사법으로 현장 작업이 용이하고 신속하게 지하의 정보를 얻어 낼 수 있는 효과적인 물리탐사법이다. 현재 상용화된 소형 루프 전자탐사 장비는 송수신 간격이 고정된 일체형과 송수신 간격의 변화가 가능한 분리형으로 구분된다. 일체형의 경우에는 다중 주파수를 사용하

여 소위 주파수 수직탐사를, 분리형의 경우에는 기하학적 수직탐사를 통하여 심도에 따른 지하의 정보를 해석하는 방법이 사용되고 있다. 일체형 다중 주파수 소형 루프 전자탐사 기기는 송수신 간격이 2 m 내외로 매우 작게 설정되어 있어, 장비의 크기가 작고 기동성이 뛰어나 효율적인 현장 작업이 가능하다. 그러나 송수신 간격이 작을 경우, 유도상수가 작아 주파수 수직탐사의 유효성에 대한 논란이 지속되어 왔다.

이 연구에서는 1차원 수치 모델링을 통하여 주파수 수직탐사의 유효성을 분석하고자 하였다. 수치 모델링 결과 저 유도상수 대역의 경우 주파수 수직탐사는 그 의미가 없는 것으로 나타났다. 즉 저 유도상수 조건을 만족하는 범위 내에서 주파수를 변화시킬 경우, 측정되는 2차 자기장, 특히 해석에 주로 사용되는 이상성분은 단순히 주파수에 따라 선형적으로 변화하며, 지하 매질의 심도에 따른 물성 변화를 반영하지 못하는 것을 확인하였다. 따라서 저 유도상수 대역 소형 루프 전자탐사에서는 주파수 수직탐사가 어려우며, 기하학적 수직탐사를 통하여 심도에 따른 정보를 해석하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 기하학적 수직탐사도 저 유도상수 조건을 만족해야 겉보기 전도도를 통한 해석이 유효하며, 이 조건을 위배할 경우에는 역산 등의 해석법을 사용해야 할 것으로 판단된다.

References

- Anderson, W. L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering, *Geophysics*, **44(7)**, 1287-1305, doi: 10.1190/1.1441007.
- Beamish, D., 2011, Low induction number, ground conductivity meters: A correction procedure in the absence of magnetic effects, *J. Appl. Geophys.*, **75(2)**, 244-253, doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.07.005.
- Cho, I. K., and Lim, J. T., 2003a, Frequency sounding in small-loop EM surveys, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **6(3)**, 119-125 (in Korean with English abstract).
- Cho, I. K., and Lim, J. T., 2003b, One-dimensional inversion of electromagnetic frequency sounding data, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **6(4)**, 180-186 (in Korean with English abstract).
- Delefortrie, S., Saey, T., Van De Vijver, E., De Smedt, P., Missiaen, T., Demerre, I., and Van Meirvenne, M., 2014, Frequency domain electromagnetic induction survey in the intertidal zone: Limitations of low-induction-number and depth of exploration, *J. Appl. Geophys.*, **100**, 14-22, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.10.005.
- Esparza, F. J., and Gomez-Trevino, E., 1987, Electromagnetic sounding in the resistive limit and the Backus-Gilbert method for estimating averages, *Geoexploration*, **24(6)**, 441-454, doi: 10.1016/0016-7142(87)90013-5.
- Fullagar, P. K., and Oldenburg, D. W., 1984, Inversion of horizontal loop electromagnetic frequency soundings, *Geophysics*, **49(2)**, 150-164, doi: 10.1190/1.1441646.
- Kaufman, A. A., 1994, *Geophysical field theory and method, Part C*, Academic Press, Inc., 41-57.

- Kim, K. J., An, D. K., Cho, I. K., Kim, B. C., Kyung, K. H., and Hong, J. H., 2010, Site investigation of a reclaimed saline land by the small loop EM method, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **13(2)**, 175-180 (in Korean with English abstract).
- Lim, J. T., and Cho, I. K., 2003, Subsurface imaging by a small-loop EM survey, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **6(4)**, 187-194 (in Korean with English abstract).
- McNeill, J. D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, *Technical Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.*
- McNeill, J. D., 1996, Why doesn't Geonics Limited Build a Multi-Frequency EM31 or EM38, *Technical Note TN-30, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada.*
- McNeill, J. D., and Bosnar, M., 1999, Application of dipole-dipole electromagnetic systems for geological depth sounding, *Technical Note TN-31, Mississauga, Ontario, Canada.*
- Seol, S. J., Song, Y., Cho, S. J., Son, J. S., and Chung, S. H., 2002, Detection of buried objects and imaging of subsurface resistivity structure using loop-loop EM methods, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **5(4)**, 309-315 (in Korean with English abstract).
- Simpson, D., Van Meirvenne, M., Saey, T., Vermeersch, H., Bourgeois, J., Lehouck, A., Cockx, L., and Vitharana, U. W., 2009, Evaluating the multiple coil configurations of the EM38DD and DUALEM-21S sensors to detect archaeological anomalies, *Archaeol. Prospect.*, **16(2)**, 91-102, doi: 10.1002/arp.349.
- Song, S. H., and Cho, I. K., 2009, Application of a streamer resistivity survey in a shallow brackish water reservoir, *Explor. Geophys.*, **40(2)**, 206-213, doi: 10.1071/EG08126.
- Spies, B. R., and Frischknecht, F. C., 1991, Electromagnetic sounding, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol 2, *Soc. Explor. Geophys.*, 285-426. doi: 10.1190/1.9781560802686.ch5.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1988, Electromagnetic theory for geophysical applications, in Nabighian, M.N., Ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory*, Vol 1, *Soc. Explor. Geophys.*, 130-311, doi: 10.1190/1.9781560802631.ch4.
- Won, I. J., 2003, Small frequency-domain electromagnetic induction sensors, *The Leading Edge*, **22(4)**, 320-322, doi: 10.1190/1.1572084.
- Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R., and Sutton, L. C., 1996, GEM-2: a new multifrequency electromagnetic sensor, *J. Environ. Eng. Geophys.*, **1(2)**, 129-137, doi: 10.4133/jeeg1.2.129.
- Zhang, Z., Routh, P. S., Oldenburg, D. W., Alumbaugh, D. L., and Newman, G. A., 2000, Reconstruction of 1-D conductivity from dual-loop EM data, *Geophysics*, **65(2)**, 492-501, doi: 10.1190/1.1444743.