

소형루프 전자탐사법에서의 주파수 수직탐사

조인기¹⁾ · 임진택¹⁾

Frequency Sounding in Small-Loop EM Surveys

In-Ky Cho¹⁾ and Jin-Taik Lim¹⁾

요 약 : 소형루프 전자탐사법은 다양한 현장에 성공적으로 적용되어온 효과적인 물리탐사법으로 특히 천부 지반조사나 환경오염대의 조사에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 저유도상수(low induction number) 대역에서 수행되는 소형루프 전자탐사에서는 주로 기하학적 수직탐사(geometric sounding)이 사용되어 왔으나, 근자에 이르러 정확한 2차장의 측정이 가능한 일체형의 다중 주파수 소형루프 전자탐사장비가 개발되면서, 주파수 수직탐사(frequency sounding)이 시도되고 있다. 본 논문에서는 간단한 2층구조에 대하여 수평루프 전자탐사 모델링을 수행하였다. 분석 결과 동상성분의 경우에는 주파수 수직탐사이 가능하지만, 이상성분의 경우에는 기하학적 수직탐사가 효과적인 것으로 확인되었다. 그러나 동상성분의 경우 신호의 크기가 이상성분에 비하여 미약하므로 국내에서와 같이 전기전도도가 낮고 전자기적 잡음 수준이 높은 지역에서는 적용이 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 이상성분이 신호의 크기가 커 안정적 자료획득이 가능하며, 두 개의 주파수에 측정된 이상성분의 차가 동상성분과 같은 거동특성을 보인다는 점에 착안하여, 기존의 방법과는 다른 주파수 수직탐사 방법을 제시하고자 하였다. 또한 지하의 전기전도도를 비교적 잘 반영하는 겉보기 전도도를 정의하였다.

주요어 : 소형루프 전자탐사, 주파수 수직탐사, 기하학적 수직탐사, 겉보기 전도도

Abstract : The small-loop electromagnetic (EM) technique has been used successfully for many geophysical investigations, particularly for shallow engineering and environmental surveys. In conventional small loop EM operating at small induction numbers, geometric sounding has been widely used because the depth of penetration of EM energy depends only on the source-receiver separation. Recently developed small loop EM system, however, measures the secondary magnetic field, H_z^s , at multiple frequencies with a fixed source-receiver separation and frequency sounding is tried actively. In this study, we analyzed the behavior of in-phase and quadrature components of H_z^s for horizontal coplanar (HCP) configuration over two-layer models. Through this theoretical analysis, it was found that the in-phase component of H_z^s is more suitable for frequency sounding than the quadrature component. But, the in-phase component of H_z^s is too small to measure, especially in resistive and noisy environment like Korea. Using the fact that the quadrature component is much greater than the in-phase component and the difference of quadrature component of H_z^s measured at two frequencies shows the same behavior as the in-phase component, we suggested an alternative frequency sounding technique. Also, we defined an apparent conductivity, which reflects well the conductivity of subsurface layers.

Keywords : small-loop EM, frequency sounding, geometric sounding, apparent conductivity

서 론

소형루프 전자탐사법은 여러 물리탐사법 중 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나로, 송수신 간격의 변화(geometric sounding) 또는 주파수 변화(frequency sounding)를 이용하여 지하의 전기전도도 분포에 관한 정보를 얻어내는 방법이다. 이 방법은 송수신원으로 소형루프를 사용하는 비접촉식으로 기동성과 현장작업의 편의성이 뛰어나다는 장점이 있으나, 송수신원으로 소형루프를 사용하므로 신호의 크기가 미약하여 가탐심도가 작으며, 전자기적 잡음에도 취약하다는 단점을 갖는다. 그러나 최근 토목 및 환경분야의 다양한 문제해결을 위해서는

천부의 지하구조에 관한 정확한 정보를 제공해 줄 수 있는 다양한 탐사기법의 개발이 시급히 요구되고 있으며, 이러한 사회적 요구를 감안할 때 소형루프 전자탐사법은 전기비저항탐사, GPR 탐사와 함께 천부 물리탐사의 중요한 위치를 차지할 것으로 기대된다.

소형루프 전자탐사법의 가탐심도는 송수신의 주파수, 송수신 간격, 송수신 배열방법 및 지하 매질의 전기전도도 분포 등의 복잡한 함수이므로 일률적 기준을 제시할 수 없으나, 일반적으로 송수신의 주파수가 낮을수록, 송수신 간격이 클수록 가탐심도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 소형루프 전자탐사 기기는 주파수 변화에 따른 반응을 측정하는 다중 주파

*2003년 6월 5일 접수

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

수 기기와 송수신 간격을 변화시키는 기기가 개발되어 있다. 다중 주파수 탐사기기의 경우에는 측정의 정확도를 높이고 탐사의 편의성을 위하여 송수신 간격이 대략 2 m 내외로 고정되어 있다. 한편 McNeill(1996, 2000)은 송수신 간격이 짧을 경우, 정확히 표현하자면 유도상수(induction number, B)가 매우 작을 경우, 주파수 수직탐사는 의미가 없으므로 실질적으로 다중 주파수 전자탐사기기의 불필요성을 주장하기도 하였다. 하지만 Won(2003)은 다중 주파수 전자탐사법으로 충분히 전기전도도의 수직적 분포를 규명할 수 있다고 주장하고 있으며, 국내에서도 설순지 등(2002)은 주파수 수직탐사 자료의 역산을 통하여 지하의 전기비저항 분포에 관한 정보의 정량적 추정 방법을 발표한 바 있다. 본 논문에서는 균질 반무한 공간 및 2층 구조 모델에 대한 수평 동일면(horizontal coplanar, HCP) 배열 소형루프 전자탐사의 반응 특성을 고찰하여, 송수신 간격이 짧게 고정되어있고 저유도상수 대역에서 수행되는 주파수 수직탐사의 가능성을 타진하였다.

기본 이론

수평 다층 구조 모델에 대한 소형루프 전자탐사 반응에 대한 이론해는 이미 여러 사람들에 의해 제시된 바 있다(Ryu *et al.*, 1970; Ward and Hohmann, 1988; Zhang and Oldenburg, 1997; Zhang *et al.*, 2000). 여기서는 논문의 이해를 돕기 위하여 HCP 및 VCP(vertical coplanar) 배열 소형루프 전자탐사의 동상 및 이상성분의 결과식을 간략히 정리한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 각 층의 전기전도도 및 두께를 σ_i , t_i 라고 송수신기가 지표로부터 h 만큼의 높이에 위치한다고 가정하자. 또한 송수신원으로 사용된 루프를 쌍극자원으로 가정하면 2차장

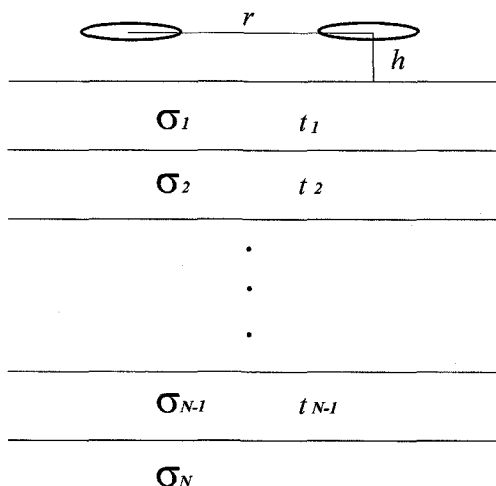


Fig. 1. Source-receiver configuration over a layered earth. Source and receiver dipole are located at height h above the earth's surface. Source-receiver separation is r , and the earth is modeled as N layers. The conductivity and thickness of the i th layer are denoted as σ_i and t_i , respectively.

(H^S)은 다음과 같이 주어진다.

$$H_z^S = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \gamma_{TE} e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{HCP}) \quad (1)$$

$$H_x^S = \frac{m}{4\pi r} \int_0^\infty \gamma_{TE} e^{-2\lambda h} \lambda J_1(\lambda r) d\lambda \quad (\text{VCP}) \quad (2)$$

(1), (2)식에서 m 은 송신원의 자기 쌍극자 모멘트, r 은 송수신 간격, J_0 , J_1 은 Bessel 함수이며, 반사계수 γ_{TE} 는

$$\gamma_{TE} = \frac{Y_0 - \hat{Y}_1}{Y_0 + \hat{Y}_1} \quad (3)$$

로 주어진다. 반사계수 γ_{TE} 는 다음의 점화식을 이용하여 계산하게 된다.

$$\hat{Y}_n = Y_n \frac{\hat{Y}_{n+1} + Y_n \tanh(u_n t_n)}{Y_{n+1} + Y_n \tanh(u_n t_n)}, \quad (4)$$

$$Y_n = \frac{u_n}{i\omega\mu_n},$$

$$\hat{Y}_N = Y_N,$$

$$u_n = \sqrt{\lambda^2 - k_n^2},$$

$$k_n^2 = \omega^2 \mu_n \epsilon_n - i\omega\mu_n \sigma_n \approx -i\omega\mu_n \sigma_n.$$

(1), (2)식에 주어지는 Hankel 변환은 Anderson(1979)의 ZHANKS 프로그램을 사용하여 계산할 수 있다. 본 논문에서는 수평다층구조에 대한 이론해를 근거로 프로그램을 작성하고 다양한 모델에 대하여 HCP 배열을 사용할 경우 2차 자기의 동상 및 이상성분의 변화양상을 고찰하였다.

균질 반무한 공간

소형루프 전자탐사법의 자료해석에서 반무한 공간의 반응양상은 모든 자료해석의 기준이 된다. 즉 반무한 공간의 반응과의 비교를 통하여 지하의 전기전도도 분포에 관한 정보를 얻어내게 된다. 일반적으로 주파수 영역 전자탐사의 경우 가탐심도는 침투심도 혹은 표피심도(skin depth; δ)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (5)$$

와 연관된다. 소형루프 전자탐사법의 가탐심도를 고려할 때 천부 10 m 내외의 전기전도도는 지역에 따라 큰 차이를 보이나 대략 0.1~0.001 S/m 정도의 범위내에 있으며 국내의 경우 평균적으로 0.01 S/m 정도를 가정할 수 있다. 또한 송신원의 주파수 대역은 미국 Geophex사의 소형루프 탐사기기인 GEM2H를 고려하여 300~50,000 Hz로 가정하였다. 이 경우 표피심도 $7 < \delta < 912$ 의 값을 보이므로 약간의 무리는 있으나 대부분의

경우 유도상수 $B = r/\delta \ll 1$ 의 조건을 만족한다. 즉 저유도상수 대역에 해당된다. 이 경우 균질 반무한 공간에 대한 HCP 배열에서의 동상 및 이상성분은 다음과 같은 급수로 표현된다 (Kaufman, 1994).

$$\frac{InH_z^S}{H_z^P} = \frac{2\sqrt{2}}{15} (\omega\mu\sigma r^2)^{3/2} - \dots \quad (6)$$

$$\frac{QH_z^S}{H_z^P} = \frac{\omega\mu\sigma r^2}{4} + \frac{2\sqrt{2}}{15} (\omega\mu\sigma r^2)^{3/2} - \dots \quad (7)$$

(6), (7)식에서 InH_z^S 과 QH_z^S 는 2차 수직 자기장의 동상 및 이상성분을 의미한다. 위 급수에서 $\omega\mu\sigma r^2$ 의 값이 작을 경우 동상 및 이상성분은 모두 급수의 첫 번째 항에 크게 좌우되므로, 동상성분은 $\omega^{3/2}$ 과 $\sigma^{3/2}$ 에 비례하며, 이상성분은 ω 와 σ 에 비례하게 된다. 또한 이상성분의 크기가 동상성분에 비하여 매우 크음을 알 수 있다. Fig. 2는 반무한 공간의 전기전도도가 변화할 경우 주파수에 따른 소형루프 전자탐사의 동상 및 이상성분의 1차장에 대한 2차장의 비를 도시한 것이다. 송수신 간격은 GEM2H 장비를 고려하여 2.05 m를 사용하였으며, 송수신기는 모두 지표면에 위치하는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 균질 반무한 공간에서의 2차 자기장의 주파수에 따른 변화 양상이 (6), (7)식의 급수에 주어진 바와 같이 동상성분은 $\omega^{3/2}$ 에, 이상성분은 ω 에 비례함을 잘 보여주고 있다. 단지 매질의 전기전도도가 1 S/m로 매우 높을 경우 $\omega\mu\sigma r^2$ 의 값이 커지면서 고주파수 대역은 저유도상수 대역을 벗어났기 때문에 (6), (7)식의 급수와 일치하지 않지만, 이 정도의 전기전도도를 갖는 지역은 일부 탄층지역이나 해수침투 지역을 제외하고는 현실적으로 거의 존재하지 않는다.

따라서 이론적으로 동상성분은 이상성분에 비하여 지하의 주파수 및 전기전도도에 대한 변화량이 크므로 해석시 보다 유리하다. 하지만 현실적으로 측정기기의 측정한계를 고려할 때 문제는 달라진다. GEM2H 장비의 경우 기기의 측정한계를 대략 100 ppm 정도(송윤호와 정승환, 2002)로 가정할 경우 동상성분의 경우 측정 가능한 주파수 및 전기전도도 범위가 매우 좁아지므로 자료획득에 상당한 어려움이 예상된다. 반면 이상성분의 경우에는 동상성분에 비하여 신호의 크기가 크므로 안정적으로 자료획득을 할 수 있는 범위가 훨씬 넓어진다. 예를 들어 측정한계를 100 ppm으로 가정할 경우 Fig. 2에 나타난 바와 같이 0.01 S/m 이하의 전기전도도를 갖는 매질의 경우에는 동상성분은 대부분의 주파수 대역에서 측정한계 이하의 값을 보이는 반면, 이상성분의 경우에는 대략 1000 Hz 이상의 주파수 대역에서는 측정이 가능하다. 한편 2차장이 아니라 총자기장을 측정하는 장비의 경우에는 동상성분 중 1차장의 크기가 2차장에 비하여 훨씬 크기 때문에 실질적으로 측정되는 값은 1차장과 거의 동일하다. 따라서 안정적 자료획득이 가능하지만, 유도상수가 작은 영역에서는 주파수에 따른 변화

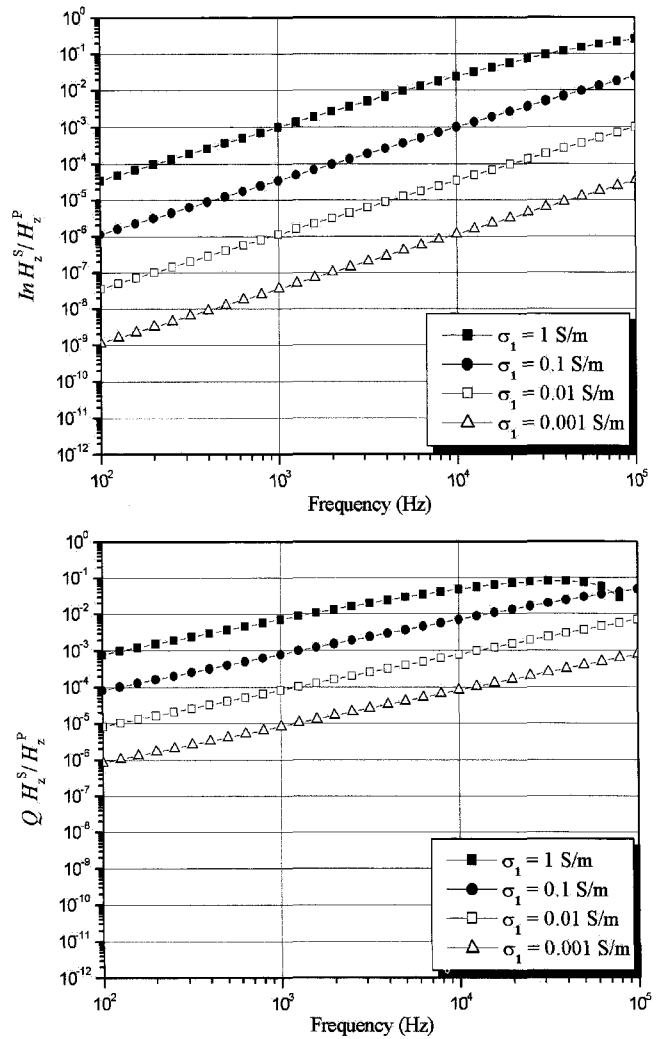


Fig. 2. In-phase and quadrature components of the secondary magnetic field for HCP configuration over a homogeneous half-space as a function of frequency when the conductivity of the half-space varies. The source-receiver separation is 2.05 m.

가 거의 없기 때문에 뚜렷한 해석 방법이 없으며, 이는 총자기장을 측정하는 Geonics사의 장비들이 이상성분을 위주로 해석을 시도하는 주된 이유이기도 한다.

2층 구조

2층 구조모델의 경우 소형루프 전자탐사의 반응값에 영향을 미치는 요소는 제 1층의 전기전도도(σ_1)와 두께(t_1), 2층의 전기전도도(σ_2)이다. 물론 송수신 루프의 간격(r) 및 고도(h)도 반응값의 크기를 좌우하지만, 여기서는 앞의 반무한 공간의 경우와 마찬가지로 $r = 2.05$ m, $h = 0$ m로 고정된 HCP 배열을 가정한다. 이제 반무한 공간의 경우와 유사하게 저유도상수 조건($B \ll 1$)과 제 1층의 두께가 표피심도보다 작다는 조건($t_1/\delta_1 \ll 1$)을 만족한다고 가정할 경우 소형루프 전자탐사의 반응값은 다음과 같은 급수 형태로 나타낼 수 있다(Kaufman, 1994).

$$\frac{\ln H_z^s}{H_z^p} = \frac{2\sqrt{2}}{15} (\omega\mu\sigma_2 r^2)^{3/2} \dots \quad (8)$$

$$\frac{QH_z^s}{H_z^p} = \frac{\omega\mu r^2}{4} (\sigma_1 Q_1 + \sigma_2 Q_2) + \frac{2\sqrt{2}}{15} (\omega\mu\sigma_2 r^2)^{3/2} \dots \quad (9)$$

where

$$Q_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+4z_1^2}}, \quad Q_2 = \frac{1}{\sqrt{1+4z_2^2}}$$

(8), (9)식의 급수에서 동상성분은 2층의 전기전도도와 관련되며, 1차장으로 정규화하지 않은 2차장의 동상성분은 송수신 간격에 무관하다. 이는 $B \ll 1$ 과 $t_1 \ll \delta_1 \ll 1$ 의 조건을 만족할 경우 유도전류가 주로 2층에 분포하며, 이 경우 동상성분은 주로 2층의 전기전도도에 그 값이 좌우됨을 의미한다. 물론 1층의 두께가 두꺼울 경우($t_1/\delta_1 > 1$)에는 유도전류는 1층에 머무르게 되며, 반응값의 크기는 1층의 전기전도도에 따라 좌우된다. 따라서 동상성분은 주파수에 따라 1층 및 2층의 전기전도도에 관한 정보를 모두 가지고 있으며, 결과적으로 1층의 두께에 관한 정보도 갖고 있다고 볼 수 있으므로 주파수 수직탐사가 가능할 것이다. 그러나 앞의 반무한 공간의 경우에서 언급한 바와 같이 동상성분은 신호의 크기가 매우 작을 수밖에 없기 때문에 현장조사에 적용하는 데는 한계가 있다.

한편 이상성분의 경우에는 자기장의 크기는 급수의 첫 번째 항에 좌우되므로 McNeill(1980)은 다음과 같이 수평 다층구조에 대한 이상성분의 간단한 모델링 방법을 제안한 바 있다.

$$QH_z^s = -\frac{\omega\mu M}{16\pi r} (\sigma_1 Q_1 + \sigma_2 Q_2 + \dots + \sigma_N Q_N), \quad (10)$$

where

$$Q_i = \frac{1}{\sqrt{4(z_i/r)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{4(z_{i+1}/r)^2 + 1}}$$

여기서 z_i 는 i 번째 층의 상부까지의 깊이를 의미한다. 또한 (9)식의 급수에서 첫 번째 항은 모든 모델변수(σ_1 , σ_2 , t_1)가 포함되어 있으므로 주파수 및 송수신 간격을 변화시키면서 측정이 이루어진다면 모델변수의 분리가 가능하다. 그러나 (9)식에서 송수신 간격이 고정되어 있고, 이 간격이 1층의 두께에 비하여 매우 작을 경우에는 $Q_1 \approx 1$, $Q_2 \approx 0$ 이 되어 이상성분은 제 1층의 전기전도도 σ_1 의 값에만 좌우된다. 이는 동상성분 경우 가탐심도는 송수신 간격과 관계없이 단지 송수신 주파수에 의해 결정되는 반면, 이상성분의 경우에는 주파수에 무관하게 송수신 간격에 의해 결정됨을 의미한다. 따라서 동상성분은 주파수 수직탐사가, 이상성분은 기하학적 수직탐사가 유리하다고 볼 수 있다. 물론 이러한 가정은 모두 저유도상수 조건을 만족시키는 주파수 및 송수신 간격을 사용하는 소형루프 전자

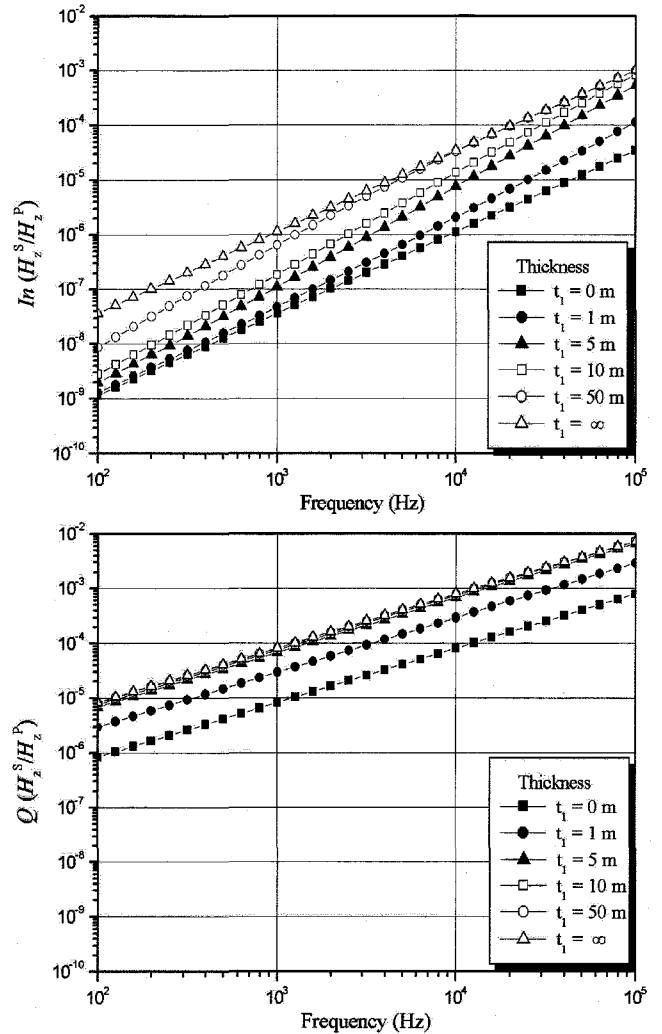


Fig. 3. In-phase and quadrature components of the ratio of the secondary magnetic field to the primary field (H_z^s/H_z^p) for the HCP configuration over a two-layer model as a function of frequency when thickness of the upper layer varies. Conductivities of the upper and lower layer are 0.01 S/m and 0.001 S/m, respectively, and source-receiver separation is 2.05 m.

탐사법의 경우에 국한된다.

Fig. 3은 위의 내용을 확인하기 위하여 간단한 2층 구조에 대하여 HCP 배열의 주파수 변화에 따른 동상 및 이상성분의 변화 양상을 나타낸 것이다. 제 1층의 전기전도도를 0.01 S/m, 제 2층의 전기전도도를 0.001 S/m로 가정하고 1층의 두께를 변화시키면서 모델링을 수행한 결과이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 동상성분의 경우 고주파수에서는 1층의 전기전도도를 갖는 반무한 공간의 반응값에 접근하며, 저주파에서는 2층의 전기전도도를 갖는 반무한 공간의 값에 접근하는 양상을 보여 주고 있다. 물론 주파수 대역의 한계로 인하여 1층의 두께가 얇을 경우에는 2층의 반응값에 가깝지만 전체적으로 볼 때 주파수 수직탐사가 가능함을 확인할 수 있다. 반면 이상성분의 경우에는 두께 변화에 따라 반응값의 크기만이 거의 선형적으

로 변화할 뿐, 반무한 공간의 반응값과 크게 다르지 않다. 따라서 이상성분을 사용할 경우 주파수 수직탐사는 의미를 잃게 된다. 이와 같은 이유로 송윤호와 정승환(2002)은 주파수 수직탐사의 경우 이상성분보다는 동상성분을 이용하는 것이 효과적이라고 주장한 바 있다. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 동상성분은 신호의 크기가 작다는 치명적인 약점을 지니고 있다. 특히 매질의 전기비저항이 높거나 잡음 수준이 높은 지역의 조사에는 거의 적용이 불가능할 수도 있다. 이러한 제약은 소형루프 전자탐사법의 적용성을 크게 위축시킬 것이 자명하므로 가능하다면 안정적인 자료획득이 가능한 이상성분을 이용한 해석방법의 제시가 필요하다.

겉보기 전도도

한편 소형루프 전자탐사에서 얻어지는 결과는 측정기기에 따라 약간의 차이는 있으나 주로 1차장에 대한 총자기장 또는 2차 자기장의 동상 및 이상성분의 비이다. 이들 반응값은 각 지층의 전기전도도 및 두께의 함수로 주어지긴 하지만 직접적으로 지하의 전기전도도를 나타내지는 않는다. 따라서 소형루프 전자탐사법의 경우에도 전기비저항탐사에서의 유사하게 지하의 전기전도도에 관한 정보를 나타내는 겉보기 전도도의 개념이 도입되어 사용되고 있다. (7)식에서 첫 번째 항만을 생각하면 이상성분은 전기전도도에 비례하므로 McNeill(1980)은 겉보기 전도도(apparent conductivity)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu r^2} \frac{QH_z^S}{H_z^P} \quad (11)$$

(7)식에서 이상성분은 주파수에 비례하므로 겉보기 전도도는 주파수에 무관하고 송수신 간격만의 함수로 주어지며, 이 경우 주파수 수직탐사는 의미가 없고, 단지 송수신 간격을 변화시키는 기하학적 수직탐사 방법에 의존해야 한다. Fig. 4는 McNeill(1980)이 2층 구조에 대하여 (11)식의 겉보기 전도도 정의를 사용하여 얻어진 결과로 저유도상수 대역에서 수행되는 소형루프 전자탐사에서 기하학적 수직탐사가 매우 효과적임을 나타내는 이론적 근거이다. 하지만 기하학적 수직탐사를 수행하기 위해서는 송수신 간격을 달리하며 측정이 수행되어야 하므로 탐사의 신속성이 장점 중의 하나인 소형루프 전자탐사법의 효율성을 크게 떨어뜨리게 될 것이다. 또한 이 경우에는 송수기가 분리되어 있으므로 송수신 간격, 루프의 수평을 유지하는데 상당한 어려움이 따르며, 이러한 제약은 결과적으로 자료의 정확성을 떨어뜨리는 근본적인 원인이 된다. 따라서 송수신 간격이 고정된 다중 주파수 탐사방법을 적용하는 것이 현장조사 수월성이나 정확도면에서 매우 유리하다.

한편 송수신 간격이 고정된 다중 주파수 탐사장비를 사용할 경우에는 어쩔수 없이 주파수 수직탐사를 수행해야 한다. 이를

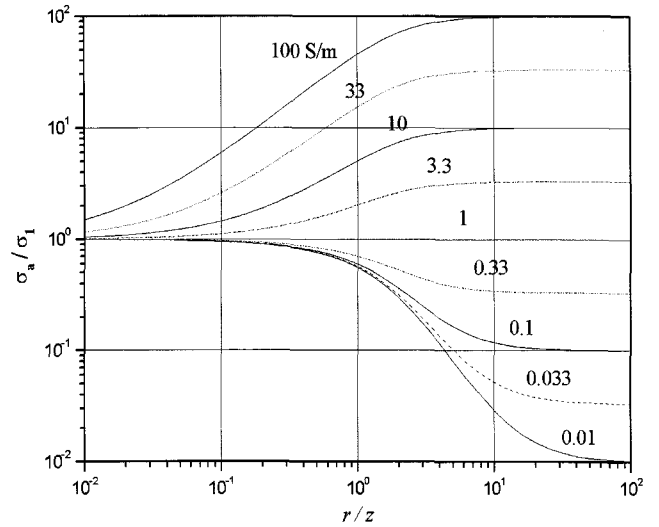


Fig. 4. Small induction number, two-layer frequency domain EM geometric sounding curves for the HCP configuration, plotted as a function of the ratio of source-receiver separation r to thickness of the upper layer, t_1 (after McNeill, 1980).

위해서는 앞 절에서 설명한 바와 같이 동상성분을 이용해야 하며, 이 때 겉보기 전도도는 (6)식으로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_a = \frac{1}{\omega \mu r^2} \left(\frac{15 \ln H_z^S}{2\sqrt{2} H_z^P} \right)^{2/3} \quad (12)$$

이 방법은 이론적으로는 가탐심도가 확보되므로 바람직하지만, 동상성분은 신호의 크기가 작다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 따라서 안정적 자료획득이 가능한 이상성분을 사용하는 것이 효과적이나, 이상성분은 제 1층의 전기전도도에 크게 좌우되므로 2층의 전기전도도에 관한 해석이 어렵다는 단점이 있다. Kaufman(1994)은 (8), (9)식의 급수에서 이상성분의 2차항이 동상성분의 1차항과 동일하다는 점에 착안하여 이상성분으로도 2층의 전기전도도를 해석해 낼 수 있는 방법을 제안하였다. 즉 두 개의 주파수에 대한 이상성분의 차는

$$\frac{QH_z^S(\omega_1) - \omega_1/\omega_2 \cdot QH_z^S(\omega_2)}{H_z^P} = \frac{2\sqrt{2}}{15} (\sigma_2 \mu r^2)^{3/2} \omega_1 (\sqrt{\omega_2} - \sqrt{\omega_1}) + \dots \quad (13)$$

이 되므로 동상성분과 마찬가지로 2층의 전기전도도에 크게 좌우되는 급수를 얻게 된다. 이 급수는 동상성분과 마찬가지로 2층의 전기전도도에 관한 정보를 내포하고 있다. 물론 이 경우에도 그 절대적인 값은 작을 수 밖에 없지만 동상성분의 경우와는 근본적으로 다르다. 이 반응값은 두 주파수에서의 이상성분의 반응값 차이를 이용하므로 비록 그 값은 작지만, 이상성분은 동상성분에 비하여 월등히 크므로 주파수에 따른 전체적인 변화양상으로부터 잡음에 오염된 자료의 제거가 가능할 것

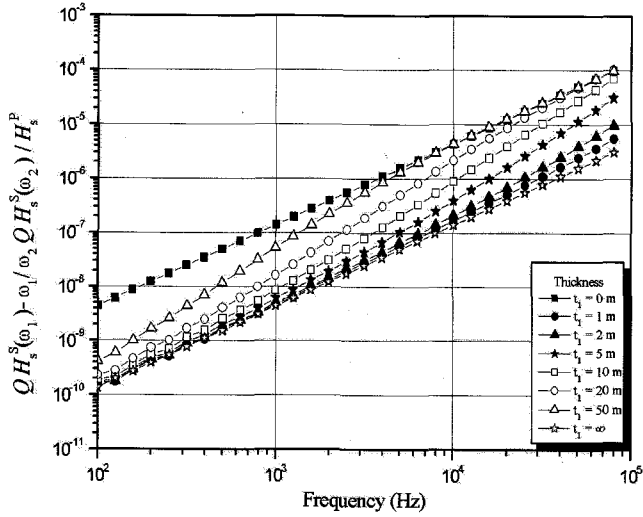


Fig. 5. The difference of quadrature components measured at two frequencies, $(QH_z^s(\omega_1) - \omega_1/\omega_2 \cdot QH_z^s(\omega_2))/H_z^p$, for the HCP configuration over two-layer models as a function of frequency when thickness of the upper layer varies. Conductivities of the upper and the lower layer are 0.01 S/m and 0.001 S/m, respectively, and source-receiver separation is 2.05 m.

이며, 이 경우 비록 그 절대적 크기가 작다고 해도 2층의 전기 전도도에 관한 정보의 추출이 가능할 것이다. 물론 이 과정에서 잡음이 증폭될 가능성을 배제할 수 없으므로 자료처리 과정에서 세심한 주의를 기울여야 할 것이다. Fig. 5는 2층구조에 모델링을 통하여 주파수에 따른 차이, 즉 $(QH_z^s(\omega_1) - \omega_1/\omega_2 \cdot QH_z^s(\omega_2))/H_z^p$ 의 반응값을 도시한 것으로, 예상한 바와 같이 고주파수 대역에서는 1층의 반응값에, 저주파수에서는 2층의 반응값에 접근하는 양상을 보여주고 있으며, 이는 앞의 동상성분의 반응양상과 매우 유사하다. 따라서 이 반응값을 이용하게 되면 동상성분에서와 같이 주파수 수직탐사가 가능할 것으로 보인다.

이제 반무한 공간에 대한 이상성분의 급수전개식인 (9)식에 동일한 방법을 적용하면 좀 복잡하기는 하지만 다음과 같이 겹보기 전도도를 정의할 수 있다.

$$\sigma_a = \frac{1}{\mu r^2} \left(\frac{15}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{QH_z^s(\omega_1) - \omega_1/\omega_2 \cdot QH_z^s(\omega_2)}{H_z^p \cdot \omega_1(\sqrt{\omega_2} - \sqrt{\omega_1})} \right)^{2/3} \quad (14)$$

이 겹보기 전도도는 1차항 H_z^p 가 r^3 에 비례한다는 점을 감안하면 송수신 간격에 무관하며, 이상성분만을 사용하여 계산된 값이라는 사실을 알 수 있다. Fig. 6은 (14)식을 사용하여 제 1층과 2층의 전기전도도비가 0.1인 2층구조 모델에 대하여 1층의 두께 변화에 따른 겹보기 전도도의 변화 양상을 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 고주파 대역에서는 1층의 전기전도도를, 저주파 대역에서는 2층의 전기전도도에 접근하는 양상을 나타내고 있다. 따라서 이 방법을 사용하게 되면 비록 송수신 간격이 짧은 일체형 다중 주파수 장비를 사용하여도 주파수 수직탐사가 가능할 것으로 판단된다.

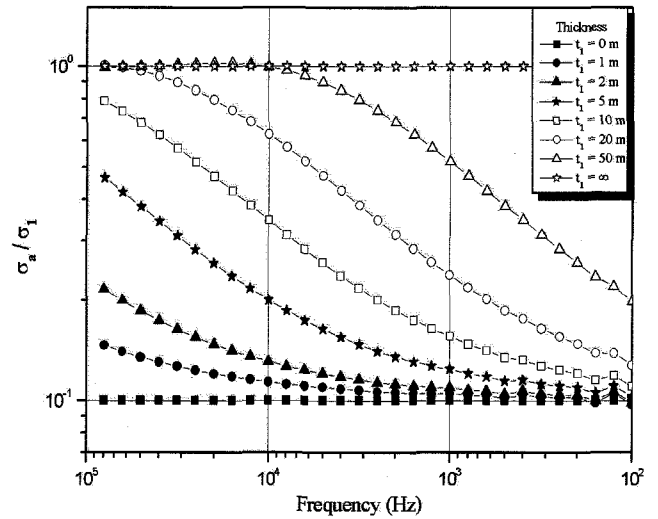


Fig. 6. Two-layer frequency sounding curves with varying thickness of the upper layer for the HCP configuration, plotted as a function of frequency. Conductivity ratio of the upper to the lower layer is 0.1, and source-receiver separation is 2.05 m.

결론

주파수 영역 소형루프 전자탐사법에서 송수신 간격이 짧게 고정된 다중 주파수 탐사장비를 사용하여 자료를 획득할 경우, 동상 및 이상성분은 서로 다른 특성을 나타낸다. 지하의 모델을 수평 다층의 1차원 구조로 가정하고 송수선의 주파수가 저유도상수 조건을 만족할 경우 2차항의 동상성분은 주파수에 따라 1층 및 2층의 전기전도도를 반영하는 반면, 이상성분은 거의 반무한 공간과 유사한 반응을 나타낸다. 따라서 저유도상수 조건을 만족하는 주파수 대역에서 이상성분을 이용한 주파수 수직탐사는 상당히 어려우며, 이론적으로는 동상성분을 이용해야만 가능하다. 그러나 동상성분은 그 절대적인 크기가 작아 자료획득 단계에서 상당한 어려움이 예상된다.

본 논문에서는 저유도상수 조건을 만족할 경우, HCP 배열에 대해 2차 자기장을 급수전개하면 동상성분의 1차항과 이상성분의 2차항이 동일하다는 점에 착안하여, 서로 다른 두 주파수에서의 반응을 이용하여 이상성분 급수에서 1차항을 제거하면, 동상성분과 같이 주파수 수직탐사가 가능하다는 Kaufman(1994)의 주장을 확인하였다. 이상성분 급수에서 1차항을 제거할 경우, 비록 그 절대적인 값은 동상성분과 유사하게 매우 작지만, 비교적 안정적 자료획득이 가능한 이상성분만을 이용하여 계산된 값이므로 측정이 곤란한 동상성분을 이용하는 것보다 훨씬 효과적인 것으로 생각된다. 또한 이 관계식으로부터 겹보기 전도도를 유도하였으며, 여기서 정의된 겹보기 전도도는 고주파 대역에서는 제 1층의 전기전도도에, 저주파 대역에서는 2층의 전기전도도에 접근함을 확인하였다. 따라서 이 방법을 사용할 경우, 상대적으로 안정적 자료획득이 가능한 다중 주파수 소형루프 전자탐사 자료의 이상성분을 이용하여 지

하 매질의 전기전도도 분포에 관한 정략적 정보를 효과적으로 추출해 낼 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형 루프 전자탐사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 폴리탐사, **5**, 309-315.
- 송윤호, 정승환, 2002, 소형 루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정: 폴리탐사, **5**, 299-308.
- Anderson, W. L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering: *Geophysics*, **44**, 1287-1305.
- Kaufman, A. A., 1994, Geophysical field theory and method, Part C: *Academic Press, Inc.* 41-57.
- McNeill, D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers: *Technical Note TN-6*, *Geonics Ltd, Toronto*.
- McNeill, D., 1996, Why doesn't Geonics Limited build a multi-Frequency EM31 or EM38?: *Technical Note TN-30*, *Geonics Ltd, Toronto*.
- McNeill, D., 2000, Application of dipole-dipole EM systems for geological depth sounding: *Technical Note TN-31*, *Geonics Ltd, Toronto*.
- Ryu, J., Morrison, F. H., and Ward, S. H., 1970, Electromagnetic fields about a loop source of current: *Geophysics*, **35**, 892-896.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1988, Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic methods in applied geophysics: *Soc. Expo. Geophys.*, 131-311.
- Won, I. J., 2003, Small frequency-domain electromagnetic induction sensors: *The Leading Edge*, **22**, 320-322.
- Zhang, Z., and Oldenburg, D. W., 1997, Recovering magnetic susceptibility from electromagnetic data over 1D earth: *Geophys. J. Internat.*, **130**, 422-434.
- 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**, 492-501.