

주파수 수직 전자탐사 자료의 1차원 역산

조인기¹⁾ · 임진택¹⁾

One-dimensional Inversion of Electromagnetic Frequency Sounding Data

In-Ky Cho¹⁾ and Jin-Taik Lim¹⁾

요 약 : 수평(HCP) 및 수직동일면(VCP) 배열을 사용하는 다중 주파수 소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산 프로그램을 개발하였다. 역산방법은 ACB 최소자승법을 사용하였으며, Jacobian 행렬을 해석적으로 계산하였다. 간단한 1차원 모델에 대한 이론자료를 계산하고, 동상 및 이상성분 자료를 사용하여 역산을 수행하였다. 역산 결과 동상 및 이상성분을 모두 사용할 경우 가장 정확하게 각 층의 전기전도도 및 심도를 추정하는 것으로 나타났다.

주요어 : 소형루프 전자탐사, 1차원 역산, 수평(HCP) 및 수직동일면(VCP) 배열

Abstract : We have developed an one-dimensional (1D) inversion program that can invert multiple frequency small-loop EM data from horizontal coplanar (HCP) and vertical coplanar (VCP) configurations. The inverse problem is solved using least-squares method with active constraint balancing (ACB) method and Jacobian matrix is calculated analytically. Tests using synthetic data from simple 1D models indicate that conductivity and depth of each layer can be estimated properly when both real and imaginary data are used together.

Keywords : small-loop EM, 1D inversion, HCP and VCP

서 론

다중주파수 소형루프 전자탐사법은 비접촉식으로 기동성과 현장작업의 편의성이 뛰어나기 때문에 신속하게 넓은 지역을 조사할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 이 방법은 최근에 환경 분야에서 요구되는 신속한 천부탐사기법으로 적용성이 가장 뛰어난 방법 중의 하나로 알려져 있다. 다중주파수 소형루프 전자탐사법의 1차원 역산에 관한 다양한 연구결과가 발표된 바 있으며(Glenn *et al.*, 1973; Fullagar and Oldenburg, 1984; Zhang *et al.*, 2000; 설순지 등, 2002), 최근에는 2.5차원 역산에 관한 접근도 이루어지고 있다(Song *et al.*, 2001). 하지만 국내의 경우 소형루프 전자탐사 자료의 해석은 아직도 정성적 단계에 머무르고 있으며, 역산방법의 정확성에 관한 구체적인 연구결과는 발표된 바 없다. 한편 Zhang 등(2000)은 소형루프 송신원을 사용하는 항공 전자탐사 자료에 대한 1차원 역산을 수행하여 3차원 이상체의 탐지 가능성을 모색한 결과, 비록 근사적이기는 하지만 1차원 역산으로도 신속하게 3차원 이상체의 위치 및 심도에 관한 정량적 정보를 파악할 수 있으므로, 1차원 역산이 전자탐사 자료의 해석에 매우 효과적임을 주장한 바 있다. 물론 가장 좋은 방법은 3차원 역산을 통하여 지하의

3차원적인 전기비저항 구조를 획득하는 것이지만, 3차원 역산을 수행하기에는 아직도 많은 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 현재 국내에 도입된 다중주파수 소형루프 전자탐사 장비가 지원하는 HCP 및 VCP 배열에 대한 1차원 역산 프로그램을 개발하고, 간단한 층서 구조에 대한 이론자료에 대하여 역산을 수행하고 그 효율성을 분석하였다.

모델링

소형 루프 전자탐사는 송수신 루프 사이의 간격이 루프의 반경에 비하여 매우 크기 때문에 일반적으로 자기쌍극자로 가정하여 모델링을 수행한다. Ryu 등(1972)은 수직 자기 쌍극자원에 의한 이론해를 구한 바 있으며, Dey and Ward(1970), Ward and Hohmann(1988)은 수평 다층구조에 대한 이론해를 계산하였다. 여기서는 독자의 이해를 위하여 간단하게 수평 다층 구조 모델에 대한 수평 및 수직 자기쌍극자원의 이론해를 소개한다.

Fig. 1에 주어진 바와 같이 N 개의 지층으로 이루어진 수평 다층 구조를 가정하고, 지표에서 h 만큼의 높이에 모멘트 m 인 수직 자기 쌍극자원(vertical magnetic dipole; VMD)이 존재할 경우, 2차 자기장의 수직성분은 다음과 같이 주어진다.

*2003년 10월 24일 접수

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

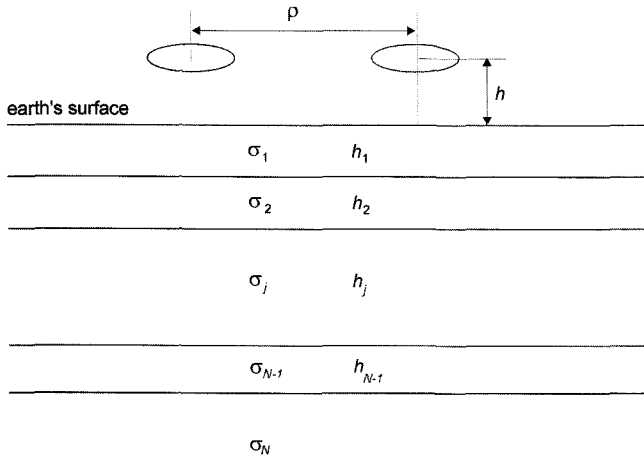


Fig. 1. Source-receiver configuration over a 1-D earth. Source and receiver dipole is located at height h above the earth's surface. Source-receiver separation is ρ , and the earth is modeled as N layers. The conductivity and thickness of the th layer are denoted as σ_j and h_i , respectively.

$$H_{z\ HCP}^S = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \gamma_{TE} e^{-2u_0 h} \lambda^2 J_0(\lambda \rho) d\lambda. \quad (1)$$

(1)식에서 $H_{z\ HCP}^S$ 에서 윗첨자 S 는 2차장, 아래첨자 z 는 자기장의 방향, HCP 는 배열방법을 나타내며,

$$\begin{aligned} \gamma_{TE} &= \frac{u_0 - \hat{u}_1}{u_0 + \hat{u}_1}, \quad u_j^2 = \lambda^2 - k_j^2, \quad k_j^2 = -i\omega\mu\sigma_j, \quad \hat{u}_N = u_N, \\ \hat{u}_j &= u_j \frac{\hat{u}_{j+1} + u_j \tanh(u_j h_j)}{u_j + \hat{u}_{j+1} \tanh(u_j h_j)}, \quad (j = N-1, N-2, \dots, 1) \end{aligned} \quad (2)$$

수평 자기 쌍극자원(horizontal magnetic dipole: HMD)의 경우에도 (1)식과 유사하게

$$H_{x\ VCP}^S = \frac{m}{4\pi\rho} \int_0^\infty \gamma_{TE} e^{-2\lambda h} \lambda J_1(\lambda \rho) d\lambda \quad (3)$$

로 주어진다. (1)식과 (3)식에 주어지는 Hankel 변환은 예를 들어 Anderson(1979)의 ZHANKS를 이용하여 계산할 수 있다.

감도행렬

일반적으로 역산에서 가장 중요한 과정 중의 하나가 감도행렬을 구성하는 것이다. 소형 루프 전자탐사의 경우 1차원 모델링이 (1) 및 (3)식에 주어진 바와 같이 간단하기 때문에 차분식을 사용할 수도 있으나 정확성 및 계산시간의 절감을 위하여 해석적인 방법을 사용하는 것이 효과적이다. 수평 다층 구조의 경우 모델 변수는 각 지층의 전기전도도 및 두께이다. 감도행렬은 모델변수의 미소변화에 따른 모델반응 값의 변화율이므로 전기전도도와 두께에 대한 편미분으로 주어진다.

$$\frac{\partial H_{z\ HCP}^S}{\partial \sigma_j} = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\partial \gamma_{TE}}{\partial \sigma_j} \cdot e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda \rho) d\lambda, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial H_{x\ VCP}^S}{\partial \sigma_j} = \frac{m}{4\pi\rho} \int_0^\infty \frac{\partial \gamma_{TE}}{\partial \sigma_j} \cdot e^{-2\lambda h} \lambda J_1(\lambda \rho) d\lambda, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4-2)$$

(4)식에 주어진 γ_{TE} 의 편미분은

$$\frac{\partial \gamma_{TE}}{\partial \sigma_j} = \frac{\partial}{\partial \sigma_j} \left[\frac{u_0 - \hat{u}_1}{u_0 + \hat{u}_1} \right] = \frac{-2u_0}{(u_0 + \hat{u}_1)^2} \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial \sigma_j}$$

이며, $\hat{u}_{j+1}, \hat{u}_{j+2}, \dots, \hat{u}_N$ 이 σ_j 의 함수가 아니라는 점을 고려하면 $\partial \hat{u}_1 / \partial \sigma_j$ 의 계산은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \hat{u}_1}{\partial \sigma_j} = \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial \hat{u}_2} \frac{\partial \hat{u}_2}{\partial \hat{u}_3} \cdots \frac{\partial \hat{u}_{j-1}}{\partial \hat{u}_j} \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial \sigma_j}$$

여기서 (2)식의 점화식을 이용하여 각각의 편미분을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \hat{u}_j}{\partial \sigma_{j+1}} = \frac{u_j^2 [1 - \tanh^2(u_j h_j)]}{[u_j + \hat{u}_{j+1} \tanh(u_j h_j)]^2}$$

$j > N$ 일 경우에는

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \sigma_j} = \frac{\partial u_j \hat{u}_j}{\partial \sigma_j u_j} + \frac{u_j}{[u_j + \hat{u}_{j+1} \tanh(u_j h_j)]^2}$$

$$\left[\frac{\partial u_j \hat{u}_{j+1} [\tanh^2(u_j h_j) - 1] + (u_j^2 - \hat{u}_{j+1}^2) \frac{\partial \tanh(u_j h_j)}{\partial \sigma_j} \right]$$

이며, $j = N$ 일 경우에는

$$\frac{\partial \hat{u}_N}{\partial \sigma_N} = \frac{i\omega\mu}{2u_N}$$

여기서

$$\frac{\partial u_j}{\partial \sigma_j} = \frac{i\omega\mu}{2u_j},$$

$$\frac{\partial \tanh(u_j h_j)}{\partial \sigma_j} = [1 - \tanh^2(u_j h_j)] h_j \frac{\partial u_j}{\partial \sigma_j}.$$

한편 두께에 대한 편미분도 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial H_{z\ HCP}^S}{\partial h_j} = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\partial \gamma_{TE}}{\partial h_j} \cdot e^{-2\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda \rho) d\lambda, \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial H_{x\ VCP}^S}{\partial h_j} = \frac{m}{4\pi\rho} \int_0^\infty \frac{\partial \gamma_{TE}}{\partial h_j} \cdot e^{-2\lambda h} \lambda J_1(\lambda \rho) d\lambda, \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (5-2)$$

(5)식에서

$$\frac{\partial \gamma_{TE}}{\partial h_j} = \frac{-2u_0}{(u_0 + \hat{u}_1)^2} \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial h_j},$$

$$\frac{\partial \hat{u}_1}{\partial h_j} = \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial \hat{u}_2} \frac{\partial \hat{u}_2}{\partial \hat{u}_3} \cdots \frac{\partial \hat{u}_{j-1}}{\partial \hat{u}_j} \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial h_j},$$

$$\frac{\partial \hat{u}_j}{\partial h_j} = \frac{u_j(u_j^2 - \hat{u}_{j+1}^2)}{[u_j + \hat{u}_{j+1} \tanh^2(u_j h_j)]^2} \frac{\partial \tanh(u_j h_j)}{\partial h_j},$$

$$\frac{\partial \tanh(u_j h_j)}{\partial h_j} = u_j [1 - \tanh^2(u_j h_j)].$$

(4) 및 (5)식에 주어지는 Hankel 변환도 ZHANKS를 이용하여 용이하게 계산이 가능하며, 단 한번의 Hankel 변환으로 감도 행렬의 각 요소를 계산할 수 있다.

역산

일반적으로 물리탐사자료의 역산에는 감쇠최소자승법의 일종인 Marquardt 법이 널리 사용되고 있으며 이 경우 목적함수 S 는 다음과 같이 주어진다.

$$S = (\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta\mathbf{p})^T (\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta\mathbf{p}) + \lambda (\mathbf{I}\Delta\mathbf{p})^T (\mathbf{I}\Delta\mathbf{p}) \quad (6)$$

여기서 $\Delta\mathbf{p}$ 는 모델변수의 증분벡터, \mathbf{I} 는 단위행렬, λ 는 역산의 안정성을 도모하기 위한 감쇠인자인 Marquardt 변수. \mathbf{e} 는 오차벡터, \mathbf{J} 는 감도행렬이다, 오차 \mathbf{e} 와 감도행렬 \mathbf{J} 는 현장 측정값인 자료벡터 \mathbf{d} , 모델링 함수를 \mathbf{F} 로 하면 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{p}), \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}}. \quad (8)$$

이 경우 반복적 비선형 역산에서 구해지는 증분벡터는 다음과 같다.

$$\Delta\mathbf{p} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e}. \quad (9)$$

하지만 Marquardt 법의 경우에는 추정 모델변수가 경우에 따라서는 지질 모델과는 동떨어진 급격한 변화 양상을 보일 수도 있으므로 이를 억제하기 위한 방법으로 평활화 제한법이 도입되었다(Constable, 1987). 하지만 이 방법도 고정된 라그랑지 곱수를 사용하므로 모든 모델변수에 동일한 제약을 가하게 되어 분해능이 저하된다. Yi and Kim(1998)은 이러한 문제점을 극복하기 위하여 변수분해행렬과 Backus-Gilbert 분산함수로부터 구해지는 공간적으로 변화하는 라그랑지 곱수를 사용하는 ACB(active constraint balancing) 법을 제안하였다. ACB법에서 목적함수는

$$S = (\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta\mathbf{p})^T (\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta\mathbf{p}) + (\mathbf{C}\Delta\mathbf{p})^T \Lambda (\mathbf{C}\Delta\mathbf{p}) \quad (10)$$

로 주어지며, 여기서 \mathbf{C} 는 평활화 제한을 가하는 roughness 행렬이고, Λ 는 모델변수의 공간적 위치에 따라 그 값을 달리하는 라그랑지 곱수 행렬로 대각성분만 존재한다. (10)식의 목적함수를 최소화하는 증분벡터 $\Delta\mathbf{p}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\mathbf{p} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mathbf{C}^T \Lambda \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e}. \quad (11)$$

소형루프 전자탐사에 얻어지는 자료는 1차 자기장에 대한 2차 자기장의 동상 및 이상성분의 비율이다. 일반적으로 수평 다층 구조의 경우 이상성분이 동상성분에 비하여 대부분의 주파수 대역에서 매우 큰 값을 보이므로 잡음에 강하지만, 저주파수 대역의 경우 이상성분은 동상성분에 비하여 제 2층에 대한 정보를 얻어내기 힘들다는 단점이 있다(Kaufman, 1994; 조인기와 임진택, 2003). 본 연구에서는 동상성분 또는 이상성분 하나만을 사용하거나 이들 모두를 사용하여 역산을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 지하 모델은 지층의 수를 12개로 고정하고 제 1층의 두께를 1m로 설정하고 심도가 증가함에 따라 지수 함수적으로 각 층의 두께를 증가시켰다. 최대 심도는 소형루프 전자탐사법의 가탐심도를 고려하여 20m로 설정하였다. 이 경우 모델변수는 각 층의 전기전도도로 항상 양의 값을 가져야 하므로 자연대수를 취하여 사용하였다. 한편 자료벡터는 이론값을 측정값으로 정규화하여 자연대수를 취한 것과 유사한 특성을 나타내도록 하였다(이명중, 2000).

역산 결과 및 고찰

개발된 역산 프로그램의 검증을 위하여 모델링을 통하여 얻어진 이론자료에 대하여 역산을 수행하였다. 사용된 주파수 대역은 300 Hz~30,000 Hz이며, 로그 스케일로 균등한 간격으로 21개의 주파수 자료를 사용하였다. 송수신 간격은 GEM2H 장비를 고려하여 2.02 m로 하였으며, 지표에서 측정이 이루어진 것으로 가정하였다. 한편 앞서 언급한 바와 같이 소형루프 전자탐사의 경우 현장에서 얻어지는 자료는 1차장에 대한 2차장의 동상 및 이상성분이므로 역산에서는 이들 중 하나의 성분을 사용하거나 또는 두 성분 모두를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 이들 각각의 방법을 간단한 2층 및 3층구조에 적용하여, 각 방법의 적용성을 검토하였다.

2층 구조 모델

Fig. 2는 제 1층과 2층의 전기비저항이 각각 100과 1000 ohm-m이고, 제 1층의 두께가 5m인 수평 2층 구조에 대한 HCP 및 VCP 배열을 사용하여 동상 및 이상성분을 계산하고, 동상성분 또는 이상성분만을 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 역산시 초기값은 동상성분의 경우 조인기와 임진택(2003)의 동상성분을 이용한 겉보기전도도를, 이상성분의 경우에는 McNeill(1980)의 겉보기 전도도를 계산하여 설정하였다. 우선 HCP 배열의 경우 동상성분의 역산결과는 어느 정도 제 2층의 전기비저항을 추정하고 있으나, 이상성분의 역산결과는 참값과는 상당한 차이를 보여주고 있어, 이상성분만을 사용할 경우 제 2층의 전기비저항에 대한 정량적 정보를 추출하기가 상당히 어려움을 잘 보여주고 있다. 이는 송윤호와 정승환(2002) 및 조인기와 임진택(2003)에 의해 주장된 바와 같이 이상성분만으로는 제2층의 전기비저항에 관한 정보를 얻기가 힘들다는

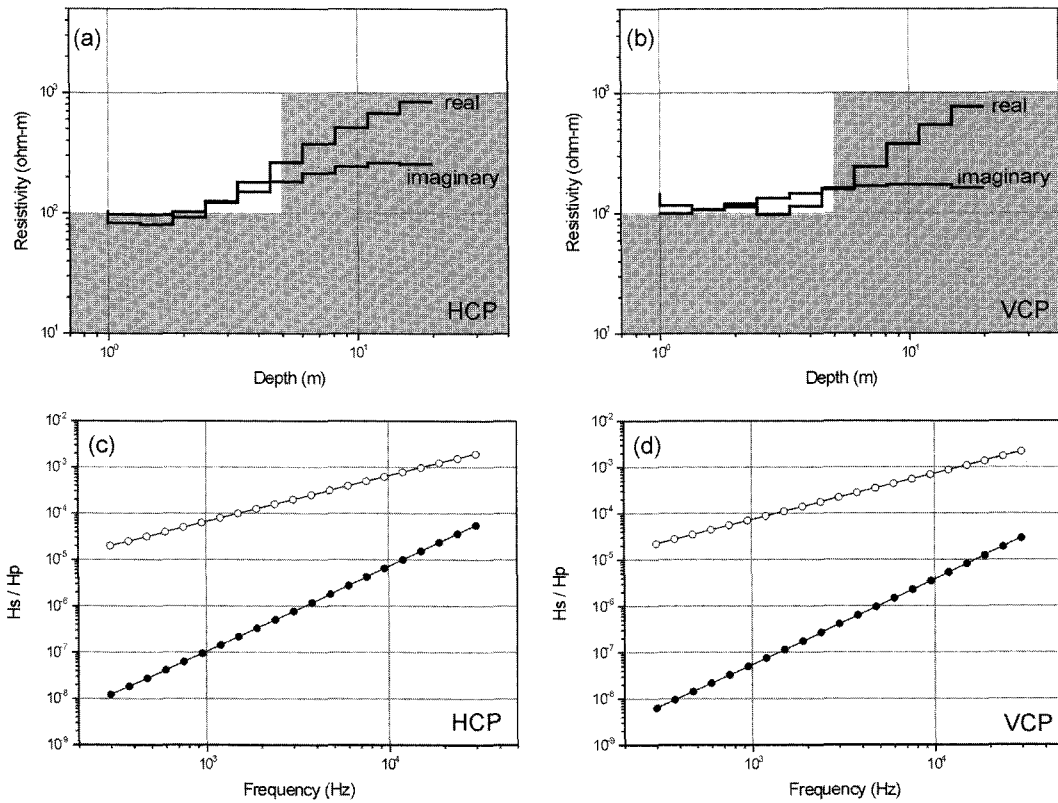


Fig. 2. The results of inversions of the 1D data, at 21 frequencies from HCP and VCP loop systems when the real or imaginary data is used. Panels (a) and (b) show the recovered models (solid line) and true model (shaded region) from the inversion of the HCP and VCP data, respectively. Panels (c) and (d) plot the corresponding predicted data (discrete points) and observed data (lines). The predicted real and imaginary data are shown by the solid and open circles, respectively.

결과와 잘 일치하고 있다.

한편 VCP 배열의 경우에는 HCP 배열의 경우와 비교해 볼 때, 역산 결과가 참값에 비하여 더욱 큰 차이를 보이기는 하지만 전체적인 양상은 매우 유사하다. 즉 동상성분만을 사용하여 역산을 수행하였을 경우에는 어느 정도 지하 모델을 추정하고 있으나, 이상성분만을 사용하였을 경우에는 거의 수평구조에 가까운 믿을 수 없는 결과를 나타내고 있다. 물론 Fig. 2의 (c)와 (d)에 나타난 바와 같이 현장자료와 이론자료(predicted data)는 그래프 상에서 육안으로 식별할 수 없을 정도로도 매우 정확히 일치하고 있다. 따라서 수평루프 전자탐사 자료의 역산에서 이상성분만을 사용하여 역산을 수행하게 되면 2층구조의 경우 적어도 하부층의 전기비저항에 대한 정량적 정보를 얻기는 매우 힘들 것으로 판단된다.

Fig. 3은 동일한 2층 구조 모델에 대하여 동상성분과 이상성분을 모두 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 두 배열에 대한 역산 결과가 거의 차이가 없으며, 비교적 정확히 제 1층과 2층의 전기전도도를 추정하고 있다. 심도는 평활화 제한으로 인하여 점진적으로 변화하는 양상을 나타내며, 현장자료와 추정자료가 잘 일치하고 있어 역산 오차가 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 2층 구조의 경우 소형루프 전자탐사 자료의 역산은 동상과 이상성분을 모두 사용하는 것이 바람직하며, 특히 이상성

분만으로 역산을 수행할 경우에는 제 2층의 전기비저항은 신뢰도가 매우 떨어진다는 점을 명심해야 할 것으로 판단된다.

3층 구조 모델

Fig. 4는 제 1층부터 전기비저항이 각각 100, 10, 및 1000 ohm-m이고, 1층과 2층의 두께가 4m 및 2m인 수평 3층 구조 모델에 대한 HCP 및 VCP 배열의 동상성분 또는 이상성분만을 사용하여 수행한 역산 결과이다. 배열방법에 따라 약간의 차이는 있으나 동상성분만을 사용한 경우의 역산 결과는 마치 2층구조의 형태를 보이고 있으며, 이상성분만을 사용한 경우에는 반무한 공간의 형태를 나타내고 있다. 어느 경우에도 제 2층의 저비저항층을 감지하고 못하고 있어, 하나의 성분만을 사용하여 역산을 수행할 경우 2층구조 모델의 경우보다 더욱 심각한 해석상의 오류를 범할 수 있음을 잘 보여주고 있다.

한편 Fig. 5는 Fig. 4의 경우와 동일한 3층 구조 모델 자료의 동상과 이상성분을 모두 사용하여 역산을 수행한 결과이다. 참 모델값과는 약간의 차이가 있으나 두 배열 모두 3층 구조 모델을 비교적 잘 구현하고 있다. 우선 HCP 배열에 대한 역산 결과에서는 천부 지층의 전기비저항이 참값에 비하여 약간 크게 나타나고 있으며, 두께 2m인 저비저항 이상대의 전기비저항이 참값보다 높게, 3층의 전기비저항은 참값보다 약간 낮

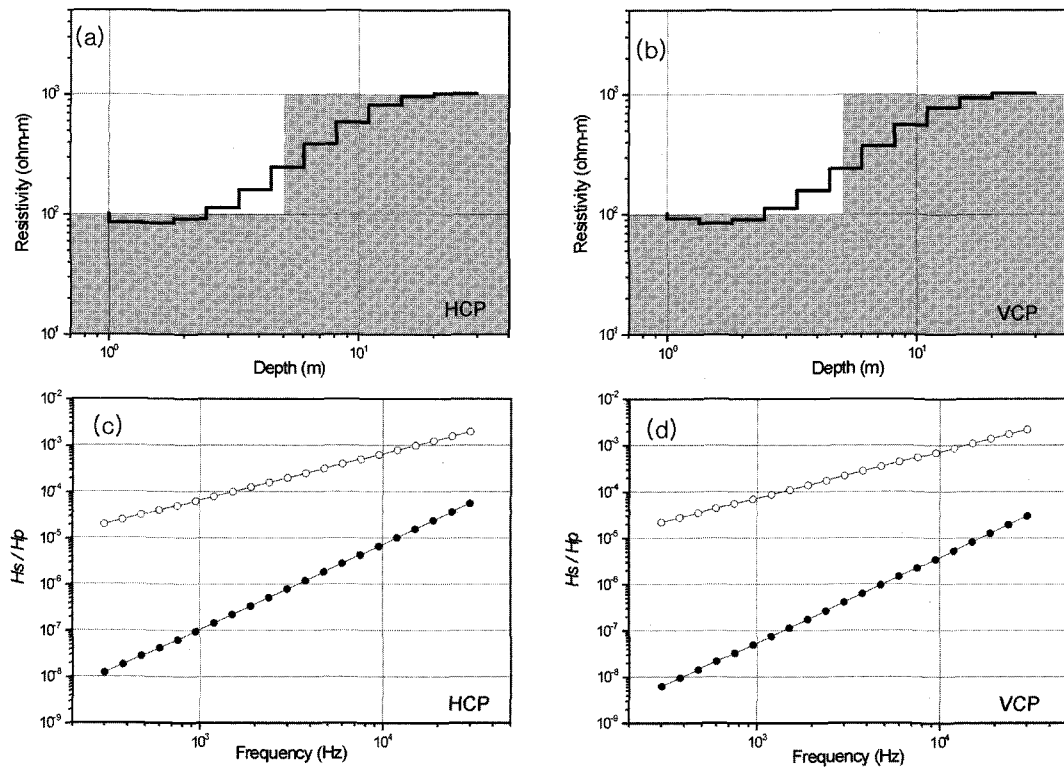


Fig. 3. The results of inversions of the 1D data, at 21 frequencies from HCP and VCP loop systems when both the real and imaginary data are used. Panels (a) and (b) show the recovered models (solid line) and true model (shaded region) from the inversion of the HCP and VCP data, respectively. Panels (c) and (d) plot the corresponding predicted data (discrete points) and observed data (lines). The predicted real and imaginary data are shown by the solid and open circles, respectively.

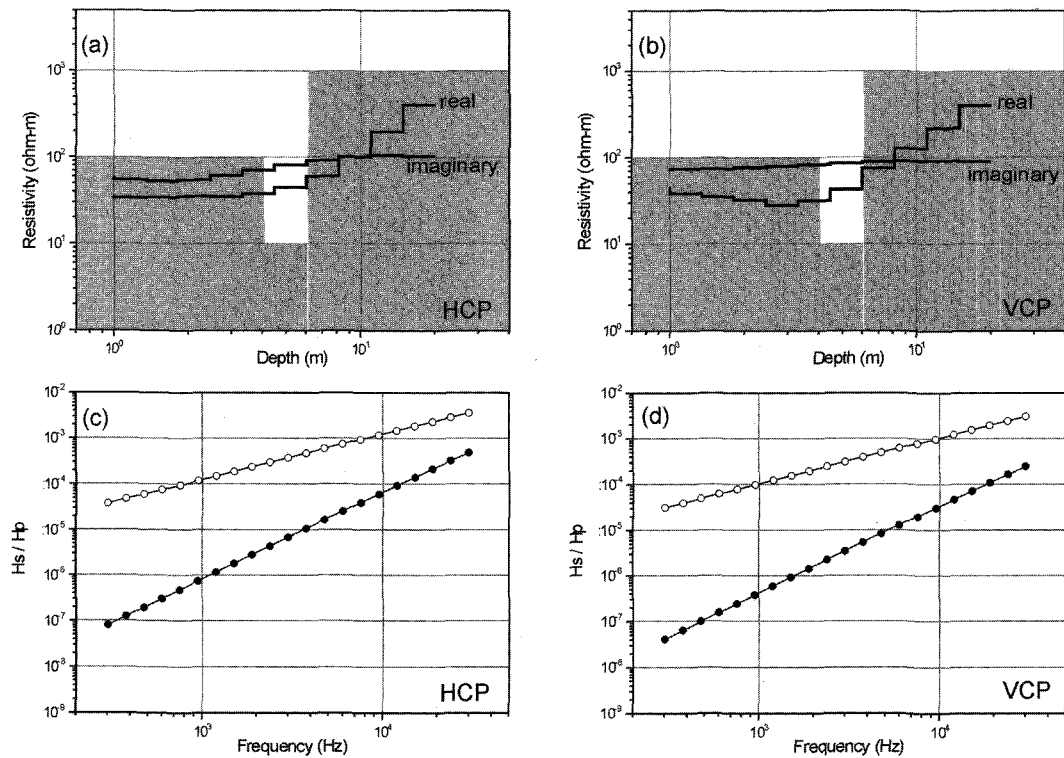


Fig. 4. The results of inversions of the 1D data, at 21 frequencies from HCP and VCP loop systems when the real or imaginary data is used. Panels (a) and (b) show the recovered models (solid line) and true model (shaded region) from the inversion of the HCP and VCP data, respectively. Panels (c) and (d) plot the corresponding predicted data (discrete points) and observed data (lines). The predicted real and imaginary data are shown by the solid and open circles, respectively.

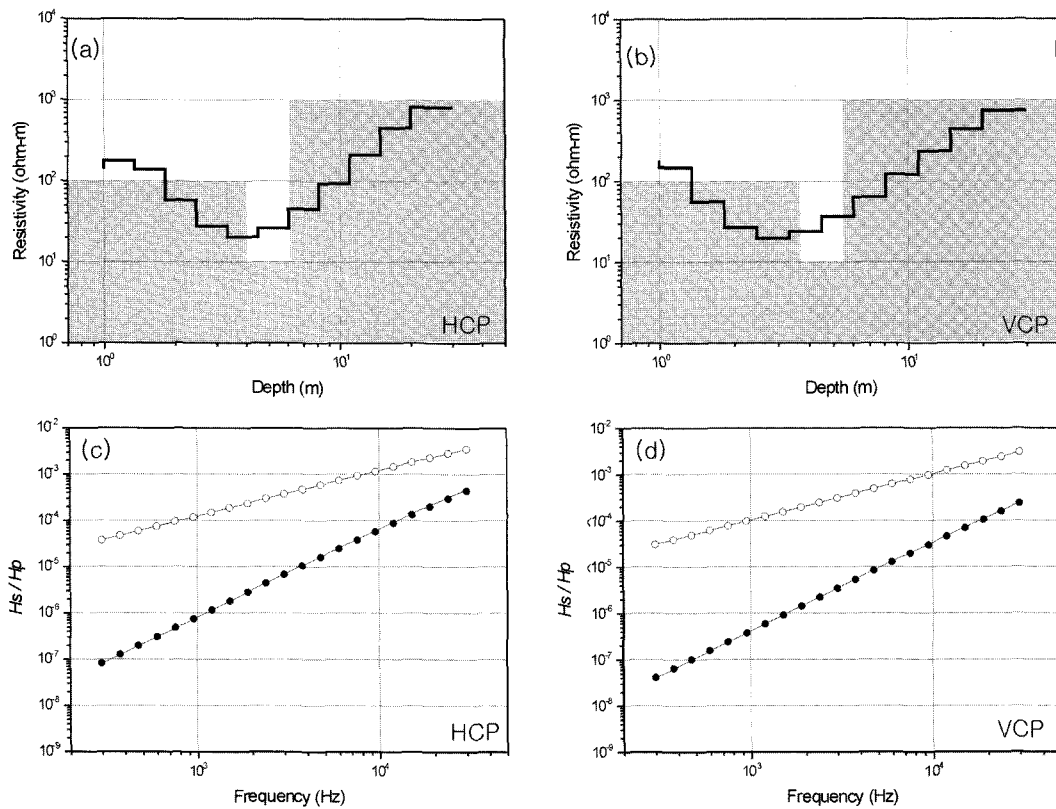


Fig. 5. The results of inversions of the 1D data, at 21 frequencies from HCP and VCP loop systems when both the real and imaginary data are used. Panels (a) and (b) show the recovered models (solid line) and true model (shaded region) from the inversion of the HCP and VCP data, respectively. Panels (c) and (d) plot the corresponding predicted data (discrete points) and observed data (lines). The predicted real and imaginary data are shown by the solid and open circles, respectively.

게 나타나고 있다. 이는 역산시 각 층의 두께를 지수 함수적으로 증가시켰기 때문에 정확하게 각 층의 두께가 일치하지 않기 때문에 나타나는 현상으로 생각되며, 또한 평활화 제한으로 인하여 급격하게 변화하는 모델변수 즉 전기비저항을 역산 알고리즘이 정확히 추정하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 물론 이 경우에도 Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 추정자료와 현장자료간의 차이는 눈으로 식별하기 어려울 정도로 잘 일치하고 있다. 한편 VCP 배열의 경우에도 HCP 배열의 경우와 유사한 특성을 보이지만, 10 ohm-m의 저비저항 층의 심도가 참값에 비하여 더 얕은 것처럼 나타나고 있으며, 3층의 전기비저항도 VCP 배열의 결과에 비하여 참값과의 차이가 크게 나타나고 있다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 VCP 배열이 HCP 배열에 비하여 가탐심도가 낮기 때문인 것으로 생각된다. 또한 Fig. 5(d)에 나타난 바와 같이 VCP 배열의 동상과 이상 성분 모두 HCP 배열의 경우보다 그 크기가 작다는 점도 VCP 배열의 약점 중의 하나로 해석된다.

결론 및 토의

소형루프 전자탐사 자료의 1차원 역산 프로그램을 개발하고 이론자료에 대하여 역산을 수행하였다. 역산에서 가장 중요한

과정중의 하나인 감도행렬을 해석적으로 계산하였으며, 역산 방법은 근래에 개발된 ACB 법(이명중, 2000)을 적용하였다. 간단한 2층 및 3층 구조모델에 대하여 HCP와 VCP 배열에 대하여 1차장으로 정규화된 2차장의 동상성분, 이상성분을 측정 자료로 사용하여 역산을 수행하였다. 2층구조 모델의 경우는 동상성분만을 사용하거나, 동상과 이상성분을 모두 사용해야 양호한 결과를 얻을 수 있으며, 이상성분만을 사용할 경우에는 2층의 전기비저항에 대한 정확한 추정이 곤란한 것으로 나타났다. 3층구조 모델의 경우에는 하나의 성분만을 사용할 경우에는 역산 결과의 신뢰도가 너무 떨어지므로 동상과 이상성분을 모두 사용해야만 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 특징은 HCP 및 VCP 배열 모두에 나타나는 공통적인 현상이며, 배열법만을 비교할 경우에는 HCP 배열이 VCP 배열에 비하여 보다 양호한 결과를 나타내었다. 향후 다양한 층서 구조 모델에 대한 연구와 현장자료에 대한 적용이 이루어진다면, 정량적 천부 전자탐사의 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

설순지, 송윤호, 조성준, 손정술, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐

- 사법을 이용한 매설물 탐지 및 지하 전기비저항 영상화: 물리 탐사, **5**, 309-315.
- 송윤호, 정승환, 2002, 소형루프 전자탐사의 감도분석 및 가탐심도 추정: 물리탐사, **5**, 299-308.
- 이명중, 2000, 전기비저항 탐사자료를 이용한 지하구조의 3차원 영상화: 공학박사 학위논문, 서울대학교.
- 조인기, 임진택, 2003, 소형루프 전자탐사법에서의 주파수 수직 탐사: 물리탐사, **6**, 119-125.
- Anderson, W. L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering: *Geophysics*, **44**, 1287-1305.
- Dey, A., and Ward, S. H., 1970, Inductive sounding of a layered earth with a horizontal magnetic dipole: *Geophysics*, **35**, 660-703.
- Fullagar, P. K. and Oldenburg, D. W., 1984, Inversion of horizontal loop electromagnetic frequency sounding: *Geophysics*, **49**, 150-164.
- Glenn, W. E., Ryu, J., Ward, S. H., Peeples W. J., and Phillips, R. J., 1973, The inversion of vertical magnetic dipole sounding data: *Geophysics*, **38**, 1109-1129.
- 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.
- Ryu, J., Morrison, F. H., and Ward, S. H., 1970, Electromagnetic fields about a loop source of current: *Geophysics*, **35**, 892-896.
- 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.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data: *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1988, Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic methods in applied geophysics: *Soc. Expo. Geophys.*, 131-311.
- Yi, M. J., and Kim, J. H., 1998, Enhancing the resolving power for the least-squares inversion with active constraint balancing: *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, P079.
- 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.