

지반조사를 위한 loop-loop 전자탐사 기법의 적용

유진상¹⁾ · 송윤호²⁾ · 설순지²⁾ · 송영수¹⁾

An Application of loop-loop EM Method for Geotechnical Survey

Jin-Sang You¹⁾, Yoonho Song²⁾, Soon-Jee Seol²⁾ and Young-Soo Song¹⁾

요 약 : 토목이나 건설 그리고 환경 분야에서 요구하는 지반 조사에 대한 공학적인 적용을 위하여 주파수 영역 루프-루프 전자탐사 연구를 수행하였다. 이를 위하여 송신 루프와 수신 루프가 동일면을 이루는 수평동일면 배열과 수직동일면 배열을 이용하였고, 각 배열에 대해 세 개의 이상성분을 측정 자료로 하여 영상을 구성하였다. 본 연구에서의 모형 반응 계산은 확장된 Born 근사를 이용한 2.5차원 적분방정식을 이용하였고, 역산 과정에서 분해능의 향상을 위해 ACB (Active Constraint Balancing)를 채택하였다. 모형 반응을 통한 1차원 및 2차원 역산 알고리즘을 적용시켜 본 결과, 층서 구조에서는 비교적 1층의 전기전도도가 높을수록 모델 변수의 추정치도 용이하였으며, 2차원 고립 이상체에 대한 역산 결과는 전도성 이상체와 비전도성 이상체의 위치를 잘 확인할 수 있었다. 또한 VCP 배열 자료의 역산 결과보다 HCP 배열 자료의 역산 결과에서 보다 나은 해상도를 보였으며, HCP 배열과 VCP 배열의 자료를 동시에 역산하였을 경우에 분해능의 향상을 확인하였다. 실제 루프-루프 전자탐사의 현장 자료 획득을 위해서 캐나다 Geonics 사의 전자탐사 장비 EM34-3XL을 이용하였으며, 전기비저항 탐사 자료와 동일 축선상에서 비교·분석하였다. 역산 결과, 1차원 역산 보다는 2차원 역산 알고리즘을 이용하여 구성한 영상에서 전기비저항 탐사 결과와 매우 유사한 만족할만한 전기비저항 분포를 확인할 수 있었다. 따라서 현장에서의 개략적인 지반 조사를 위한 루프-루프 전자탐사의 응용이 기대된다.

Abstract : Loop-loop electromagnetic (EM) survey in frequency domain has been carried out in order to provide basic solution to geotechnical applications. Source and receiver configuration may be horizontal co-planar (HCP) and/or vertical co-planar (VCP). Three quadrature components of mutual impedance ratio for each configuration are used to construct the subsurface image. For the purpose of obtaining the model response and validating the reasonable performance of the inversion, we obtained each responses of two-layered and three-layered earth models and two-dimensional (2-D) isolated anomalous body. The response of 2-D isolated anomalous body has been calculated using extended Born approximation for the solution of 2.5-D integral equation describing EM scattering problem. As a result of the least-squares inversion with variable Lagrangian multiplier, we could construct more resolvable image from HCP data than VCP data. Furthermore, joint inversion of HCP and VCP data made better stability and resolution of the inversion. Resistivity values, however, did not exactly match the true ones. Loop-loop EM field data was obtained with EM34-3XL system manufactured by Geonics Ltd. (Canada). Electrical resistivity survey was conducted on the same line for the comparison in advance. Since the constructed image from loop-loop EM data by 2-D inversion algorithm showed almost similar resistivity distribution to that from electrical resistivity one, we expect the developed 2.5-D loop-loop EM inversion program can be applied for the reconnaissance site survey.

Keywords : loop-loop EM survey, extended Born approximation, 2.5-D integral equation, 2-D inversion algorithm

서 론

루프-루프 전자탐사는 주로 지하의 층서 구조나 전도체 그리고 파쇄대의 탐지에 이용되어 왔으나(Villigis-Carcia and West, 1983; Poddar and Dhanasekaran 1986), 최근에 들어서 토목이나 건설, 환경 분야에서 요구하는 지반에 대한 기초 자료를 제공하기 위해 현장 적용이 활발히 이루어 지고 있다

(McNeil, 1980; Won *et al.*, 1996; 조인기와 송윤호, 1999). 그러나 오래전부터 전자탐사에 대한 많은 이론적인 연구(Wait, 1951; Ryu *et al.*, 1970; Ward and Hohmann, 1988 등)가 수행 되었음에도 불구하고 현장에서의 자료 획득은 생각만큼 쉽지 않다. 탐사를 수행하는 사람의 전문적인 지식이 요구되고, 현장 조건에 대한 충분한 사전 정보 및 적절한 주파수와 장비의 선택이 중요하다. 더구나 루프-루프 전자탐사는 주위의 잡음에

*2001년 1월 29일 접수

1) 전북대학교 자원공학과(Dept. of Mining and Mineral Resources Eng., Chonbuk National University)

2) 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

민감할 뿐 아니라, 송신루프와 수신루프의 배열의 오차가 자료의 질에 상당한 영향을 미치므로 충분한 신호대 잡음비를 갖는 탐사자료를 얻기가 쉽지 않다. 그리고 현장에서 획득한 자료의 적절한 해석도구의 부재로 인해 1차원 역산 알고리즘이나 제한된 정량적인 해석(Spies and Frischknecht, 1991; Frischknecht et al., 1991)에 국한되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 루프-루프 전자탐사의 현장 자료를 이용한 의미있는 지하영상을 구성하고 정량적인 해석을 가능하게 하기 위해 1차원 및 2차원 역산 알고리즘(Song et al., 2001)을 도입한다.

현장 자료의 획득은 캐나다 Geonics사의 EM34-3XL을 이용하여 수평동일면 배열(horizontal coplanar; HCP)과 수직동일면 배열(vertical coplanar; VCP)에서 각각 3개의 자료를 얻었다. 수치 모델링을 이용하여 각 배열에 따른 반응의 차이를 검토하고, 1차원 및 2차원 역산의 두 종류의 역산법을 이용하여 현장탐사 자료를 역산하여 그 영상을 비교한다. 이에 부가하여 역산 결과의 비교를 위해 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 서로 다른 두 종류의 탐사법에 의한 영상을 비교함으로써 루프-루프 배열 전자탐사 역산 영상의 타당성으로 보이고자 한다.

논의의 편의를 위하여 이 연구에서 도입한 주요 해석 기법의 하나인 Song et al.(2001)의 2.5차원 수치 모델링 및 역산 기법에 대하여 간단히 서술한다.

확장된 Born 근사를 이용한 2.5차원 모형 반응

지하구조를 주향 방향이 y축인 2차원 구조로 가정하면 이에 대한 전기전도도는 x와 z의 함수로서 표현한다.

$$\Delta\sigma(r') = \sigma(x', z') \tag{1}$$

그리고 (1)식은 y에 대해 공간파수 영역(spatial wavenumber domain)으로 Fourier 변환을 하면 y는 k_y 로 변환된다(송윤호, 정승환, 2000).

$$\tilde{H}(x, k_y, z) = \tilde{H}^p(x, k_y, z) - \hat{z} \int_v \tilde{G}^H(x-x', k_y, z; z') \cdot \Delta\sigma(x', z') \tilde{E}(x', k_y, z') dx' dz' \tag{2}$$

이 (2)식은 조화 전기장 (harmonic electric field)을 만족하는 전자기 산란 문제에서의 해와 같은 2.5차원 적분방정식의 기본 골격을 이룬다.

$$\tilde{E}(x, k_y, z) = \tilde{E}^p(x, k_y, z) - \hat{z} \int_v \tilde{G}^E(x-x', k_y, z; z') \cdot \Delta\sigma(x', z') \tilde{E}(x', k_y, z') dx' dz' \tag{3}$$

여기에 확장된 Born 근사(Habashy et al., 1993)를 적용하면

$$\tilde{E}(x, k_y, z) \approx \tilde{I}(x, k_y, z) \cdot \tilde{E}^p(x, k_y, z) \tag{4}$$

여기서, $\tilde{I}(r)$ 는 산란 텐서 또는 탈분극 텐서라 불리며 공간파수 영역에서 다음과 같이 나타낸다.

$$\tilde{I}(x, k_y, z) = \left[\underline{I} - \hat{z} \int_v \tilde{G}^E(x-x', k_y, z; z') \cdot \Delta\sigma(x', z') dx' dz' \right]^{-1} \tag{5}$$

반복적 비선형 역산 및 부등식 제한

본 연구에서는 평활화 제한을 가한 감쇠 최소자승법(smoothness constraint least-squares method)을 이용한다. 한편 모델변수가 공간적으로 부드럽게 변화하면서 추정값과 추정값의 오차를 최소화하는 모델 증분벡터를 구하면 다음과 같다(Sasaki, 1989).

$$\Delta m = [J^T J + \lambda (\partial^2 \Delta m)^T (\partial^2 \Delta m)]^{-1} J^T \Delta d = J^{-g} \Delta d \tag{6}$$

여기서, J^{-g} : 의사 역행렬

Δd : 정규화된 오차 벡터

지하구조에 대한 사전 지식을 역산에 추가하거나 지질학적으로 의미없는 해를 배제하기 위해 새로운 단계마다 모델변수에 대해 부등식 제한 조건(Kim et al., 1999)을 적용한다. 모델변수 m 의 값이 상한 U 와 하한 L 사이에 존재할 경우 다음과 같이 새로운 변수 x 로 변환하면,

$$x = \ln \left(\frac{m-L}{U-m} \right), \quad L \leq m \leq U \tag{7}$$

(7)식의 관계에 의해서 매 반복시마다 모델변수 m 은 다음과 같이 새로이 개선된다(Kim et al., 1999).

$$m^{updated} = \frac{L(U-m) + U(m-L)e^{\Delta x}}{(U-m) + (m-L)e^{\Delta x}} \tag{8}$$

여기서, Δx 는 x 의 증분이다.

공간적으로 변화하는 Lagrange 곱수의 도입

일반적인 평활화 제한 최소자승 역산에서는 (6)식의 평활화 계수 (λ)가 상수이나 Yi and Kim(1998)은 이를 공간의 함수로서 개념을 새로이 설정하였다. 이는 각 변수의 민감도(sensitivity)에 따라 평활화의 정도를 다르게 결정함으로써 역산 결과 얻어지는 지하구조를 주어진 자료에 대해 최대한의 분해능(resolution)을 갖도록 하는 방법이다.

추정자료와 추정한 모델변수 사이에서 발생하는 변수 분해행렬(parameter resolution matrix)은 다음과 같다(Menke, 1984).

$$R = J^{-g} J \tag{9}$$

만약 $\mathbf{R}=\mathbf{I}$ 이면 추정된 모델변수는 완전한 참값(true value)이 된다. 이 변수 분해 행렬을 이용하여 Backus-Gilbert 분산 함수(spread function)를 정의한다.

$$S_i = \sum_{j=1}^N w(i,j)R_{i,j}^2 \quad (10)$$

여기서, $w(i,j)$ 는 변수 블록 i 와 j 사이의 거리

(10)식의 분산 함수 정의로부터 각 블록(block)의 분해능에 따라 라그랑지 곱수가 능동적으로 변화하는 Active constraint balancing(ACB)을 적용한다(Yi and Kim, 1998).

$$\log(\lambda_i) = \log(\lambda_{\min}) + \frac{\log(\lambda_{\max}) - \log(\lambda_{\min})}{\log(S_{\max}) - \log(S_{\min})} \{ \log(S_i) - \log(S_{\min}) \} \quad (11)$$

여기서, λ_{\min} 는 라그랑지 곱수의 하한

λ_{\max} 는 라그랑지 곱수의 상한

이렇게 지하구조를 구성하는 각 블록의 분해능에 따라 능동적으로 라그랑지 곱수의 공간 분포를 계산하게 된다. 이 분해능의 고저에 따라 상대적으로 덜 민감한 블록에는 큰 라그랑지 곱수가, 상대적으로 민감한 블록에는 작은 라그랑지 곱수가 설정이 되어 오차를 최소화함은 물론 분해능을 최대한으로 향상시킨다.

수치 모델링을 통한 고찰

일반적인 지표 전자탐사에서는 HCP 배열과 VCP 배열을 이용하여 자기장의 수평성분과 수직성분을 측정하게 된다. 한편 현장탐사에서 동상성분 반응이 루프의 기하학적인 배열에 민감하여 정량적인 해석에 어려움이 있으므로 이상성분만을 이용하고자 한다. Fig. 1은 본 연구의 현장탐사와 동일한 조건을 적용하기 위해 이용한 배열법으로 두개의 송·수신 루프 사이의 간격은 10 m, 20 m, 40 m이고 각각의 송·수신 간격에 따라 주파수는 6,400 Hz, 1,600 Hz, 400 Hz로 고정시킨다. 이론적으로 유도 상수에 해당하는 ω^2 이 각 루프 간격에 대해 일정하며 낮은 주파수를 사용하므로 $|kr| \ll 1$ 로 근거리장(near field) 조건을 따른다.

Fig. 2는 3층 구조 모델에 대한 역산 결과로 주파수 영역 전자탐사 반응은 EMID(Pellerin *et al.*, 1995)를 이용하고, HCP 배열과 VCP 배열의 이상성분을 측정자료로 하여 1차원 역산 알고리즘에 적용시켜 본 것이다. 모델 구성은 각 층의 전기비저항에 따라 A, Q, H, K형의 네 가지 유형으로 나누었으며 각각의 경우에 대해 각 층의 전기비저항과 두께를 역산한다. 1층, 2층, 3층의 전기비저항을 각각 ρ_1, ρ_2, ρ_3 라 했을 때, (a)의 A형 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)은 실제 모델을 비교적 정확하게 추정하고 있다. 그리고 (b)의 Q형 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$)에서는 항상 참 전기비저항 값보다 낮은 값이 계산되고 있다. 이는 (a)에서와 같이 1

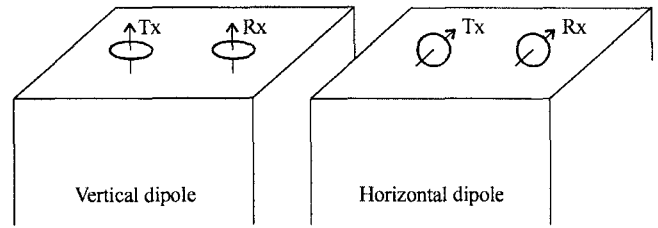


Fig. 1. HCP and VCP coil configurations.

층이 2층과 3층에 비해 전기비저항이 낮을 경우 제대로 역산이 이루어지는 것에 비해 (b)와 같이 1층의 전기비저항이 다른 층에 비해 높을 경우에는 제대로 모델을 추정하지 못함을 의미한다. (c)의 H형 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$)은 전기비저항이 낮은 2층을 구별해 내고 있으나 3층의 전기비저항 값은 분해하지 못하고 있다. 한편 (d)의 K형 ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)의 경우에도 1층과 3층 사이에 존재하는, 전기비저항이 높은 2층은 비교적 잘 구별해 내고 있으나 각 층의 두께의 추정은 어렵다.

이상의 결과로 네 가지 유형의 모델 구조 중에서 1층의 전기비저항이 낮을수록 1차원 역산결과가 좋은 것으로 판단되며, 이론 자료의 이상성분만을 측정 자료로 한 1차원 역산에서 어느 정도 모델의 추정이 가능할 것으로 보인다.

한편 2차원 모델에 대한 연구로서 블록 모델을 이용한 2차원 고립 이상체를 설정하였는데 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 반무한 매질의 전기비저항은 100 ohm-m이고, 전기비저항 값이 10 ohm-m인 저비항 이상체와 전기비저항 값이 1000 ohm-m인 고비저항 이상체의 크기는 5×5 m이다.

Fig. 4는 Fig. 3의 지하구조 모형에 대한 주파수 영역 전자탐사의 반응으로 계산은 2.5차원 적분방정식법을 이용하였으며, 수평탐사를 수행한 결과이다. (a)의 HCP 배열의 반응곡선은 전도성 이상체의 양끝에서 반응이 다소 증가하였다가 전도성 이상체의 중앙부위로 가면서 감소하여 중앙부위에서 극소값을 보이는 아래로 오목한 좌우 대칭형이다. 골의 폭도 주파수가 증가할수록 좁아지고 있다. 비전도성 이상체에서는 이와 반대로 양끝에서 반응이 다소 감소하였다가 중앙부위에서 위로 볼록한 경향을 보인다. 한편 (b)의 VCP 배열에서는 HCP 배열에서 보여주는 반응만큼 큰 진폭을 보여주고 있지는 않으나 두 이상체에서 모두 아래로 오목한 반응을 보여주고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 수치 모델링 자료를 2차원 역산하여 영상을 구성한 것이다. HCP 배열의 역산 결과, 이상체 주위의 참값과는 다른 값이 나타나고 있지만 전체적으로 전도성 이상체 뿐만 아니라 비전도성 이상체까지도 그 부존 위치 및 형상의 추정이 가능한 지하구조 영상을 보여주고 있다. 이 전도성 이상체의 전기비저항 값은 20 ohm-m 정도로 참값에 상당히 근접한 값이 계산되었으며, 비전도성 이상체의 경우 전기비저항이 높은 이상체에 대해서는 감도가 떨어진다 전자탐사의 특성에도 불구하고 그 형상을 어느정도 잘 그려내고 있다. VCP 배열에서는 HCP 배열보다 지하구조를 반영하지는 못하지만

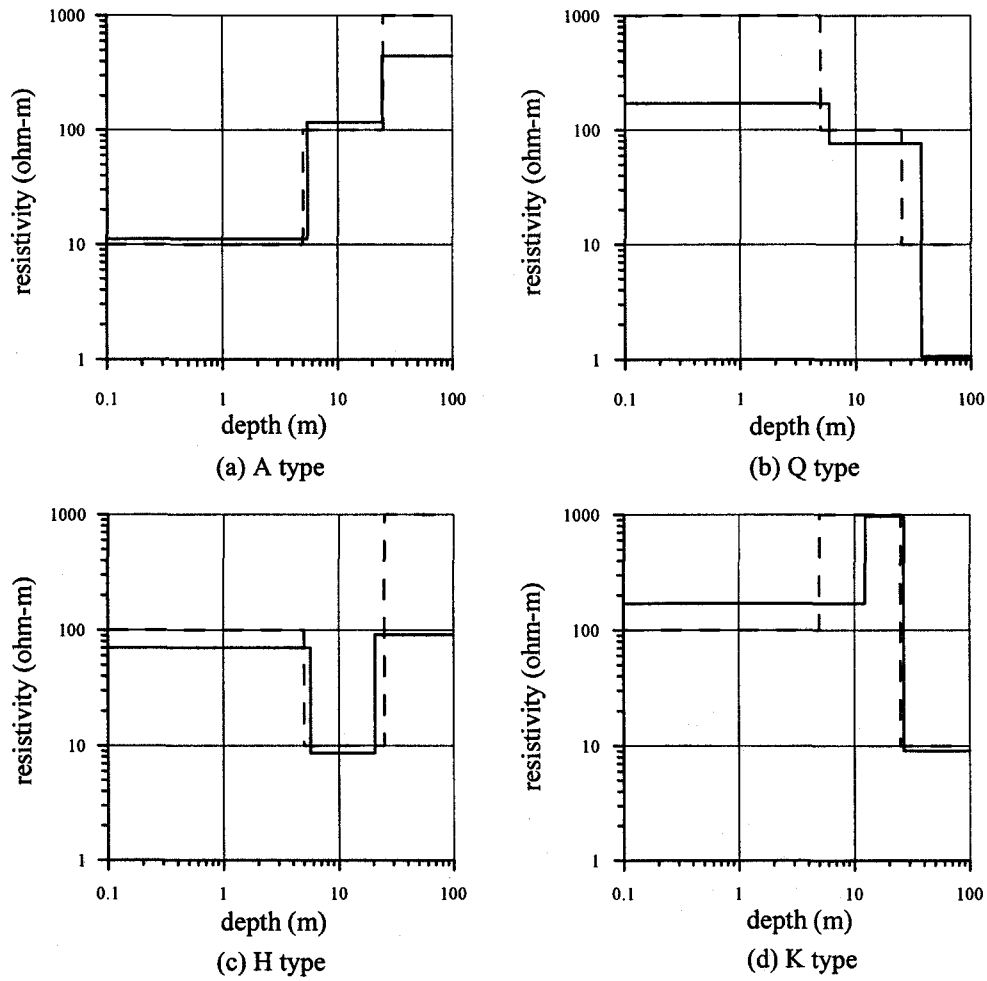


Fig. 2. The 1-D inversion results for the theoretical responses of the four three-layered earths. Dashed lines represent true models while solid ones correspond to inverted values.

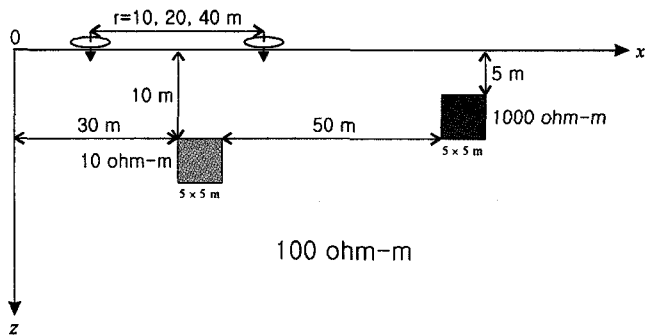


Fig. 3. A conductive block and a resistive block model embedded in a homogeneous half-space taken for the forward modeling and the inversion tests.

상대적으로 볼 때 비전도성 이상체를 잘 보여주고 있다. 한편 HCP와 VCP 배열에서의 측정 자료를 동시에 역산하였을 경우는 이상체의 위치와 크기가 미미하나마 명확해졌고, VCP 배열의 자료를 추가함으로써 분해능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

현장 자료에의 적용

이상과 같은 수치 모델링을 통한 실험에서 루프-루프 전자 탐사 자료의 역산 영상으로 지하구조를 적절히 반영할 수 있음을 알 수 있다. 현장 적용 실험을 위하여 전기전도도가 비교적 높으며 지형변화가 심하지 않은 평야를 대상으로 현장 자료를 획득하였다. 측정기는 캐나다 Geonics사의 EM34-3XL를 이용하였으며 현장에서 측정되는 자료는 겉보기 전기전도도 (mS/m) 뿐이다. 측정값의 변화가 심하므로 이동 평균법 (moving average method)을 이용하여 평활화(smoothing)하고 (12) 식을 이용하여 근거리장 조건에서의 상호 임피던스 비 (mutual impedance ratio)로 변환한(Spies and Frischknecht, 1991) 후 역산을 수행한다. 이때 송·수신 루프 사이의 간격은 10 m, 20 m, 40 m이고 각각의 송·수신 간격에 따라 주파수는 6,400 Hz, 1,600 Hz, 400 Hz 이다.

$$\text{Im}\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \cong \frac{\sigma_a \mu_0 \omega r^2}{4} \tag{12}$$

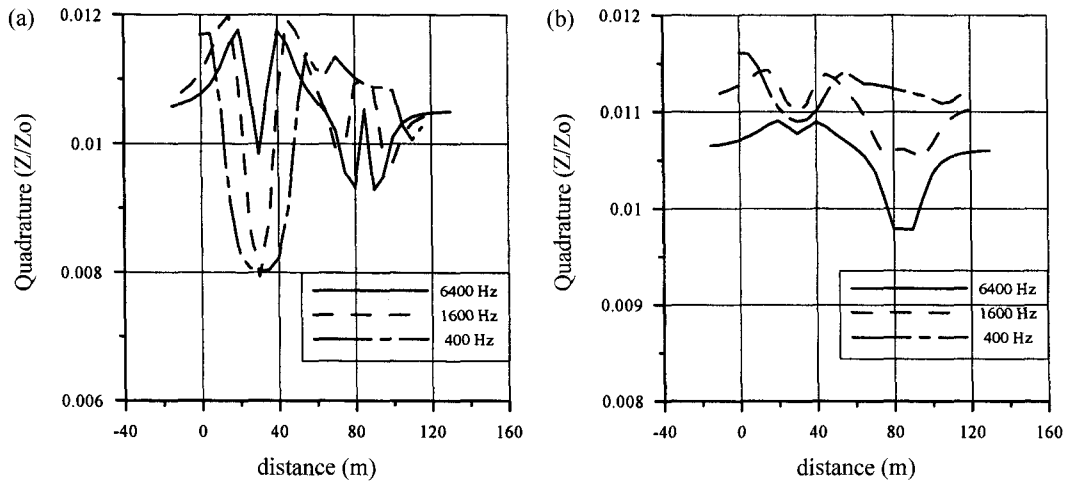


Fig. 4. Quadrature responses of the mutual impedance using (a) HCP and (b) VCP configurations for the model shown in Fig. 3.

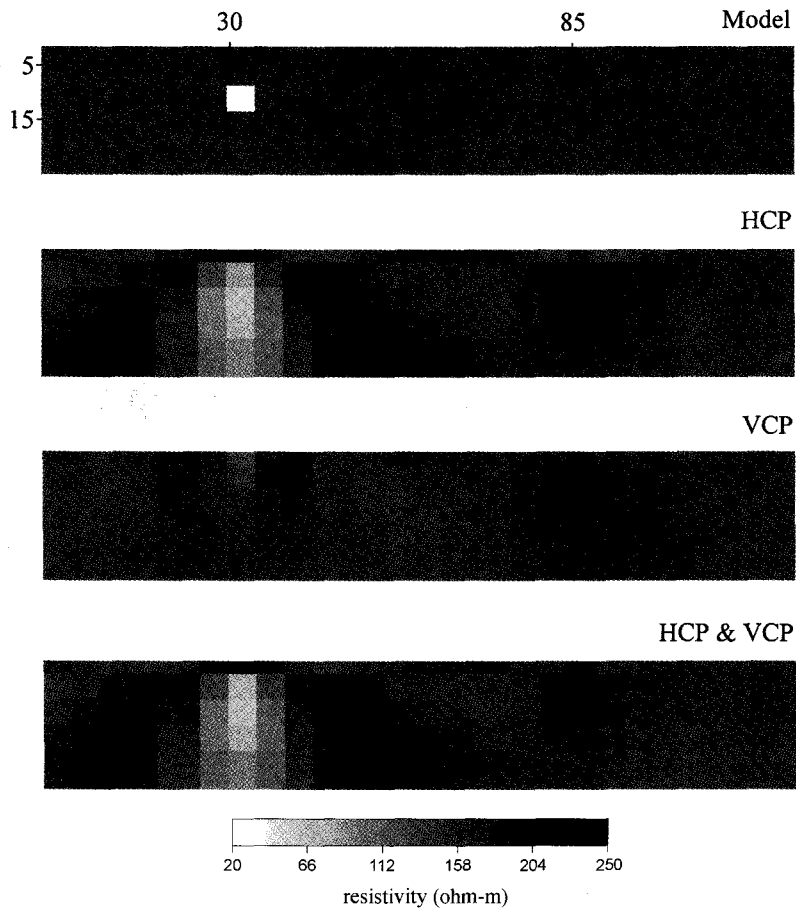


Fig. 5. Two-dimensional inversion results for the model responses shown in Figure 4.

우선 현장의 지하구조를 조사하기 위해 토목이나 건설 및 환경 분야에서 적용이 활발하게 이루어지고 있는 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 이 역산 결과와 루프-루프 전자탐사 자료의 역산 결과를 비교하고자 한다. 전기비저항 탐사는 쌍극자 간격 5 m의 쌍극자 배열을 이용하였고, 역산은 이미 상용화 되

어 있는 DIPROfWIN (김정호, 1999)을 이용하였다.

Fig. 6은 본 연구의 탐사 측선에 대한 전기비저항 탐사 자료의 2차원 역산 결과이다. 심도 5 m 이하의 전기비저항 값은 60 ohm-m 내외이고 탐사 측선의 65 m 지점에서 심도 20 m까지 상대적으로 전기비저항이 낮게 분포하고 있다. 전체적으로

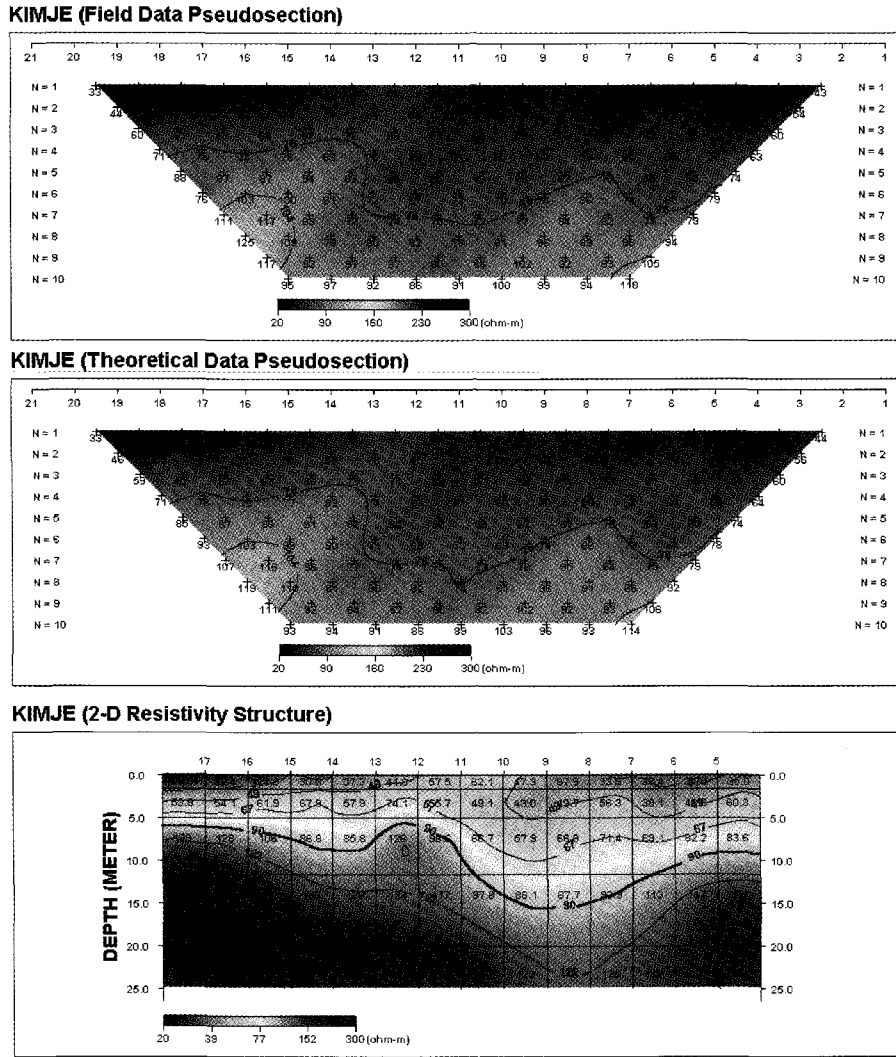


Fig. 6. The result of two-dimensional inversion using resistivity survey data at KIMJE. Data were measured with dipole-dipole array and deployed dipole spacing was 5 m.

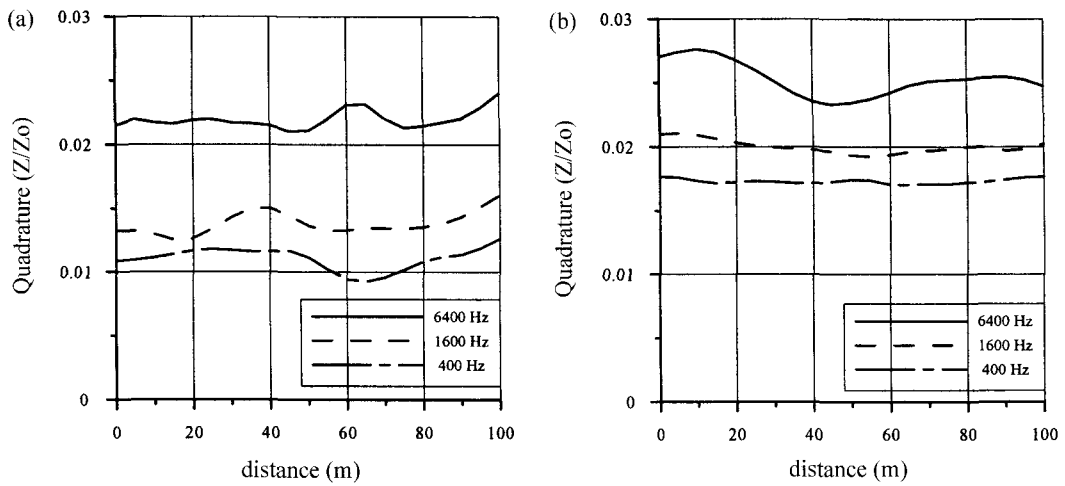


Fig. 7. The field data in terms of the mutual impedance using (a) HCP and (b) VCP configurations measured on the same line as resistivity survey data shown in Fig. 6.

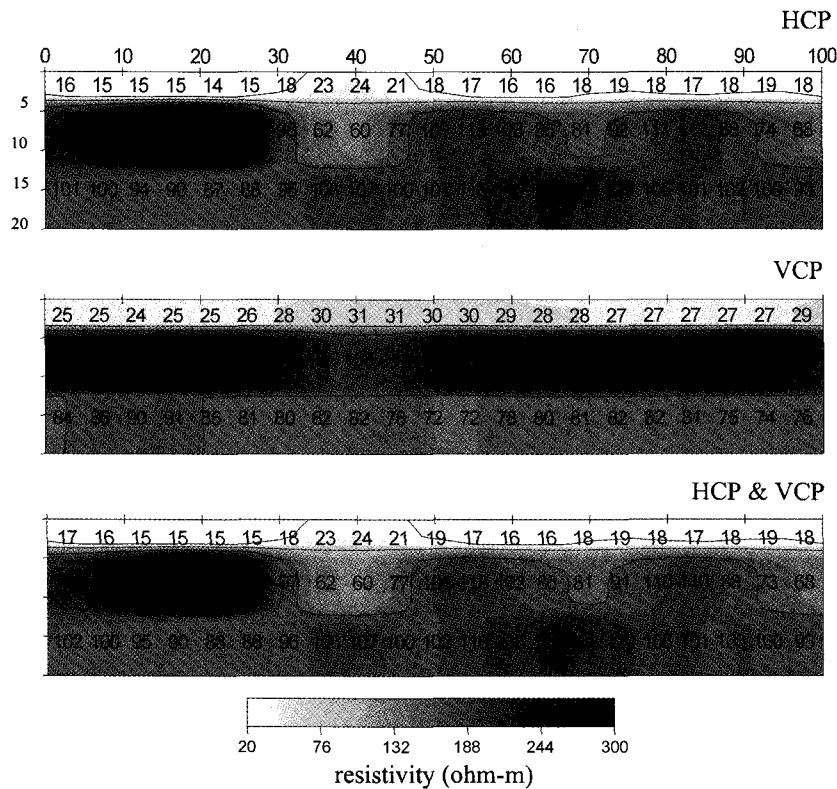


Fig. 8. One-dimensional inversion results of loop-loop EM field data shown in Fig. 7.

는 심도가 깊어질수록 전기비저항 값이 증가하며 150 ohm-m 이상의 분포를 보이고 있다.

Fig. 7은 전기비저항 탐사를 실시했던 Fig. 6의 동일한 측선에 대한 루프-루프 전자탐사 자료이다. (a)의 HCP 배열과 (b)의 VCP 배열 모두 한 지점에 대해 루프 간격이 증가할수록 즉, 주파수가 낮아질수록 이상성분의 반응값은 작아지고 있고, 거리에 따른 반응값도 수평적으로 변화하고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 현장 자료를 토대로 1차원 역산에 적용하여 영상을 구성한 것이다. 지하구조는 3층 구조로 가정하고 1층과 2층의 두께는 4m와 8m로 고정하여 각 층의 전기비저항 값만을 역산한다. HCP 배열의 영상에서는 심도가 증가함에 따라 전반적으로 전기비저항이 증가하는 양상을 보이고 있다. 왼쪽의 측점 20m 부분에서 전기비저항 값이 200 ohm-m 정도의 고비저항이, 측점 40m와 70m 부근에서는 상대적으로 낮은 저비저항대가 2층까지 발달하고 있음이 특징적이다. VCP 배열에서의 영상은 수평적인 변화가 거의 없는 전형적인 층서 구조를 보이고 있으며 2층의 전기비저항이 가장 높은 것으로 나타난다. VCP 배열에서의 영상은 3층의 층서 구조를 보여주고 있으며 2층의 전기비저항이 높게 분포되어 있다. 한편 40m 근처의 2층에서 전기비저항이 조금은 낮게 분포하고 있다. 전기비저항의 분포는 낮은 곳은 20 ohm-m 안팎이고 높은 곳은 200 ohm-m 정도이며 대부분 110 ohm-m의 전기비저항 분포를 보이는 것으로 나타난다.

Fig. 9는 현장자료를 2차원 역산한 결과이다. 초기의 역산수행을 위해 블록은 5×5 m의 크기로 분할하고, 배경매질의 전기전도도는 50 ohm-m로 전기비저항 탐사 결과보다 낮게 선택하였다. HCP 배열에 대한 2차원 역산 결과를 토대로 구성한 영상을 살펴보면 측점 70m 부근에서 낮은 전기비저항이 심도 12m 정도까지 아래로 분포하고 있고, 측점 45m 부근에서는 높은 전기비저항이 심도 3m 정도까지 위로 분포하고 있다. 전기비저항 값이 낮은 부분은 30 ohm-m이고 높은 부분은 200 ohm-m인 것으로 나타난다. VCP 배열에서의 영상은 단순히 심도가 깊어질수록 전기비저항이 커지는 층서 구조를 보여주고 있어 실제 지하구조의 해석에서는 VCP 배열만의 현장자료가 도움을 주지 못하고 있다. 그러나 HCP 배열과 VCP 배열 자료를 동시에 2차원 역산한 영상은 HCP 자료만을 이용한 경우와는 상당한 정도 차이를 보이고 있다. 가장 큰 차이가 나타나는 부분은 측점 거리 15m와 65m 지점이며 전기비저항 영상과 비교하여 볼 때에 두 자료를 복합한 영상이 전기비저항 영상과 가장 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 수치모델링을 통한 고찰에서 보여준 것처럼 역산 과정에서 VCP 배열에서의 자료를 동시에 이용함으로써 지반조사를 위한 지하구조의 해석에 있어 보다 정확한 정보를 제공할 수 있는 것이다.

이상의 전기비저항 탐사 자료와 루프-루프 전자탐사 자료의 역산 결과를 비교하면, 주파수 영역 전자탐사 자료의 1차원 역

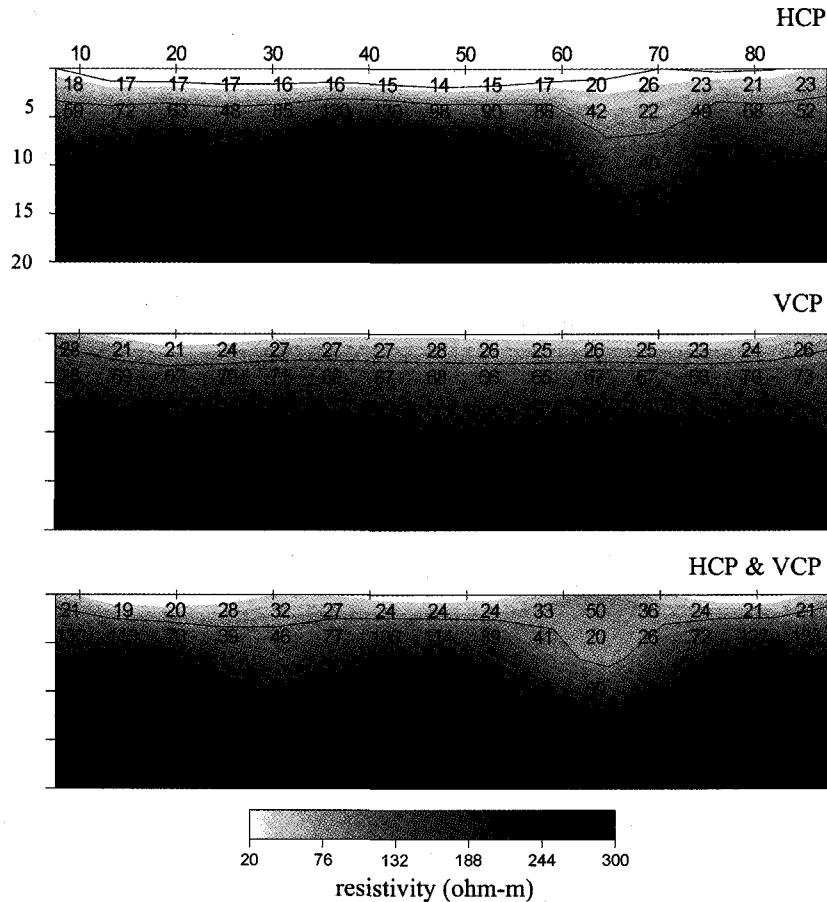


Fig. 9. Two-dimensional inversion results of loop-loop EM field data shown in Fig. 7.

산 결과로부터 정성적인 전기비저항 분포의 변화 양상을 정성적으로 파악할 수 있으나, 층의 두께나 혹은 전기비저항의 정량적인 변화의 유추는 어려운 것으로 나타나고 있다. 그러나 1차원 역산은 시간적으로 현장에서 얻은 자료를 빨리 확인해 볼 수 있는 장점이 있으므로 충분한 의미를 갖는다고 생각된다. 이에 반해 전자탐사자료의 2차원 역산 영상은 1차원 역산 영상에 비해 훨씬 더 적절한 지하구조 영상을 제공할 수 있으며, 전기비저항탐사의 영상과 거의 유사한 영상을 제공할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 지금까지 반응곡선의 정성적 분석에만 주로 의존하여왔던 루프-루프 전자탐사 자료의 해석에 2차원 역산을 도입하여 지하의 영상을 구성함으로써 정량적인 해석이 가능할 것이다.

결 론

루프-루프 전자탐사는 지표에 전극을 설치하기가 어렵거나 매우 전기전도도가 높은 매질로 뒤덮여 있어 전기비저항 탐사가 불가능할 경우 유용한 도구로 이용할 수 있으며, 작업 또한 신속하고 간편하며, 경제적으로도 저렴하기 때문에 많은 관심을 끌고 있는 분야이다. 이 연구에서는 1차원 역산 및 2차원

역산 알고리즘을 Geonics사의 EM34-3XL 전자탐사 장비로부터 획득한 현장 자료에 적용하였다.

3층의 층서 구조에 대한 모형반응을 토대로 1차원 역산에 적용시켜 본 결과, 비교적 1층의 전기비저항이 낮은 구조에서 모델의 추정이 용이한 것으로 나타났다. 2차원 역산 실험에서는 HCP 자료와 VCP 자료를 복합 역산한 경우가 가장 우수한 것으로 나타났으며, VCP 자료만을 역산 하였을 경우에는 지하구조를 적절히 영상화할 수 없음을 확인하였다.

루프-루프 전자탐사 현장 자료를 획득하여 역산한 결과, 수치 모델링 자료를 이용한 실험 결과와 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다. HCP 배열과 VCP 배열 자료를 복합하여 2차원 역산한 영상이 가장 우수하였으며, 특히 전기비저항 탐사 영상과 가장 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 이 연구를 통해 대부분 반응곡선의 분석을 통한 정성적인 해석에 그쳐왔던 루프-루프 전자탐사의 해석에 있어서도 최신의 전자탐사 자료 역산 기법을 도입하여 지하의 영상을 구성함으로써 정량적인 해석이 가능하다는 사실을 예시하였으며, 따라서 지금까지 한정적인 분야에서만 사용되었던 전자탐사의 활발한 현장 적용이 기대된다. 나아가서 이 연구에서 논의한 HCP 배열과 VCP 배열의 이상성분 자료의 복합역산 뿐만 아니라 동상성분 자료

지 이용하는 역산법에 대한 연구와 함께, 더 나은 영상을 얻기 위해서 다중 간격(multi-separation)에서의 다중 주파수(multi-frequency)를 이용하여 현장탐사를 수행할 수 있는 장비의 개발이 요구된다.

참고문헌

- 김정호, 1999, DIPRO for Windows V. 3.2: Copyright(c) Hee Song Geotek. Co.
- 송윤호, 정승환, 2000, 적분방정식 전자탐사 모델링에서 Green 텐서의 특이 적분: 물리탐사, **3**(1), 13-18.
- 조인기, 송윤호, 1999, 지반조사를 위한 전자탐사의 적용: 한국 지구물리탐사학회, 제 2회 학술발표회 논문집, 37-47.
- Frischknecht, F. C., Labson, V. F., Spies, B. R., and Anderson, W. L., 1991, Profiling methods using small loop sources, in Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics - Vol. 2 Applications, Ch. 3: *Soc. Expl. Geophys.*
- Habashy, T. M., Groom, R. W., and Spies, B. R., 1993, Beyond the Born and Rytov approximations : A nonlinear approach to electromagnetic scattering: *J. Geophys. Res.*, **98**, 1759-1775.
- Kim, J. H., Song, Y., and Lee, K. H., 1999, Inequality constraint in least-squares inversion of geophysical data: *Earth Planets Space*, **51**, 255-259.
- McNeil, J. D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers: TN-6, Geonics Ltd., Canada.
- Menke, W., 1989, Geophysical Data Analysis - Discrete Inverse Theory: Academic Press, Inc.
- 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.
- Poddar, M., and Dhanasekaran, P. C., 1986, Electromagnetic sounding of the Kapurdi lignite deposit in western Rajasthan, India: *Geophys. Pros.*, **34**, 580-594.
- Ryu, J. S., Morrison, H. F., and Ward, S. H., 1970, Electromagnetic fields about a loop source of current: *Geophysics*, **35**, 862-896.
- Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data: *Geophysics*, **54**, 254-262.
- Song, Y., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2001, An efficient 2.5-D inversion of loop-loop EM data: 5th Internat. Symp., SEGJ., in-press.
- Spies, B. R., and Frischknecht, F. C., 1991, Electromagnetic sounding, in Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics - Vol. 2 Applications, Ch. 5: *Soc. Expl. Geophys.*
- Villigas-Carcia, C. J., and West, G. F., 1983, Recognition of electromagnetic overburden anomalies with horizontal loop electromagnetic survey data: *Geophysics*, **48**, 42-51.
- Wait, J. R., 1951, The magnetic dipole over the horizontally stratified earth: *Can. J. of Physics*, **29**, 577-592.
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1988, Electromagnetic theory for Geophysical applications, in Nabighian, M. N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics - Vol. 1 Theory, Ch. 4: *Soc. Expl. Geophys.*
- Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., and Sutton, L. C., 1996, GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor: *J. Env. Eng. Geophys.*, **1**, 129-137.
- Yi, M. -J., and Kim, J. -H., 1998, Enhancing the resolving power of the least-squares inversion with Active Constraint Balancing: 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 485-488.