

## 확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피

조인기<sup>1)</sup> · 심현미<sup>2)</sup>

### EM Tomography by Extended Born Approximations

Cho, In-Ky and Sim, Hyun-Mi

**요 약** : 확장된 Born 근사법을 사용하는 2.5차원 EM 모델링 알고리즘을 이용하여 2차원 역산에 근거한 EM 토모그래피 기법을 개발하였다. 역산법은 평활화 제한을 가한 감쇠최소자승법을 사용하였으며, 측정값은 2차 자기장의 수직성분으로 제한하였다. 적분방정식법에 근거한 3차원 EM 모델링 프로그램을 이용하여 단순한 형태를 갖는 모형에 대한 이론 자료를 계산하고, 이 자료를 측정값으로 EM 토모그래피 영상을 획득하였다. 거의 모든 경우에 EM 토모그래피 영상은 이상체의 위치는 비교적 정확히 추정하였으나, 전도도는 실제 값보다 상당히 낮게 추정하였다. 해상도 분석결과 수직해상도가 수평해상도에 비하여 월등히 뛰어난 것으로 나타났다.

**Abstract** : EM tomography technique has been developed. The algorithm used the extended Born approximations for forward modeling and reconstructed a conductivity image by a smoothness constraint least squares inversion method. Observed data, the vertical components of secondary magnetic fields, were simulated with the 3-D integral equation code. The results showed that the location of anomalous body could be imaged very well, but conductivity of the body was lower than real one and the vertical resolution was much higher than the horizontal resolution.

**Keywords** : EM 토모그래피, 감쇠최소자승법, 확장된 Born 근사

## 서 론

EM 토모그래피는 탄성파, 레이더 및 전기비저항 토모그래피법과 함께 매우 중요한 정밀물리탐사 기술로 토목 및 환경 분야의 적용을 위한 다양한 연구가 지속되고 있다 (Alumbaugh and Morrison, 1995; Torres-Verdin and Habashy, 1994; Wilt *et al.*, 1995; Zhou *et al.*, 1993).

EM 토모그래피는 수 Hz에서 수 MHz까지 주파수를 사용할 수 있으며, 송 수신 시추공 간격, 시추공 사이의 평균 전기 전도도, 주변의 잡음 수준 등 다양한 탐사조건에 따라 적정 주파수를 선정하여 사용하게 된다. EM 토모그래피는 전기비저항 토모그래피와 동일하게 조사 대상지역의 전기전도도 분포에 관한 정보를 얻게 되지만, 플라스틱 케이싱이 설치된 시추공에서도 자료의 획득이 가능하며, 전기비저항 토모그래피의 적용이 어려운, 전도도가 매우 높은 환경에서도 효과적으로 적용 가능하다. 또한 시추공에 공내수가 없을 경우에도 측정이 용이하다는 점도 빼 놓을 수 없는 EM 토모그래피의 장점이다. 한편 현재 해상도가 가장 뛰어난 것으로 알려진 레이더 토모그래피의 경우 수십 MHz 이상의 고주파수를 사용하기 때문에 전도성 매질에서 감쇠가 극심하므로 시추공 간격

이 넓은 경우에는 적용이 어렵게 된다. 이러한 경우 EM 토모그래피는 매우 훌륭한 대안이 될 수 있다.

그러나 EM 토모그래피법은 전자파의 복잡한 분산특성 때문에 아직 확실한 해석기술이 개발되어 있지 않은 실정이다. 현재 EM 토모그래피 기술의 개발을 위해서 가장 필요한 부분은 계산시간이 빠른 모델링 알고리즘이다. 본 연구에서는 계산시간이 매우 짧은 것으로 알려진 확장된 Born 근사법을 사용하는 2.5차원 EM 모델링 알고리즘(Habashy *et al.*, 1993; 조인기와 서정희, 1998)을 이용하여 2차원 역산에 근거한 EM 토모그래피 기법을 개발하였다. 역산법은 평활화 제한을 가한 감쇠최소자승법을 사용하였으며, 측정값은 2차 자기장의 수직성분으로 제한하였다. 적분방정식법에 근거한 3차원 EM 모델링 프로그램(조인기와 정승환, 1998)을 이용하여 단순한 형태를 갖는 모형에 대한 이론 자료를 계산하고, 이 자료를 측정값으로 EM 토모그래피 영상을 구성하였다. 거의 모든 경우에 EM 토모그래피 영상은 이상체의 위치는 비교적 정확히 추정하였으나, 전도도는 실제 값보다 상당히 낮게 추정하였다.

본 연구에 사용된 알고리즘은 무한 균질 매질(homogeneous whole space)을 가정하였으며, 역산시 무한 균질 매

\*1998년 10월 19일 접수

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과(Dept. of Geophysics, Kangwon National University)

2) 강원대학교 대학원 지질학과(Dept. of Geology, Kangwon National University)

질의 전기전도도를 안다는 가정 하에 성립한다. 따라서 본 연구의 결과는 근본적으로 제약이 따르지만, 이 문제는 차후의 지속적인 연구를 통하여 충분히 해결 가능한 것으로 보인다.

### 확장된 Born 근사법에 의한 2.5차원 모델링

균질 무한공간에 존재하는 이상체에 의한 전기장은

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_p(\mathbf{r}) + \int_{V_s} \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \sigma_a(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') dV', \quad \mathbf{r}' \notin V_s \quad (1)$$

로 주어진다(Hohmann, 1988). 여기서  $\mathbf{E}_p(\mathbf{r})$ 은 송신원에 의한 1차 전기장(primary electric field), 그린 텐서  $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 은

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{\sigma_b} [k_b^2 \mathbf{I} + \nabla \nabla] g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (2)$$

이며,  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 은 균질 무한공간에 대한 스칼라 그린 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-ik_b |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (3)$$

일반적인 Born 근사에서는 이상체 내부에서의 전기장을 이상체가 없을 경우의 1차장으로 근사한다. 즉 (1)식을

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx \mathbf{E}_p(\mathbf{r}) + \int_{V_s} \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \sigma_a(\mathbf{r}') \mathbf{E}_p(\mathbf{r}') dV', \quad \mathbf{r}' \notin V_s \quad (4)$$

로 근사하는 방법으로 이상체와 모암간의 전도도 차이가 작을 경우에는 상당히 효과적인 근사법으로 알려져 있다. 그러나 전도도 차이가 커지거나, 이상체의 크기가 클 경우에는 상당한 오차를 유발하게 된다. 한편 확장된 Born 근사법은 Born 근사법의 이러한 취약점을 보완하기 위하여 도입된 방법으로 이상체 내부에서의 전기장을 다음과 같이 근사한다.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}') \approx \tilde{\Gamma}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{E}_p(\mathbf{r}'), \quad \mathbf{r}' \in V_s. \quad (5)$$

여기서  $\tilde{\Gamma}(\mathbf{r})$ 은 탈분극(depolarization) 텐서라 불리며

$$\tilde{\Gamma}(\mathbf{r}) = [\mathbf{I} - (k_b^2 \mathbf{I} + \nabla \nabla) \int_{V_s} dV' g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \hat{\sigma}(\mathbf{r}')]^{-1}, \quad \mathbf{r}' \in V_s \quad (6)$$

로 정의된다(Habashy *et al.*, 1993). 2.5차원 모델링을 위해서 지하 매질이 y축 방향을 따라 변화가 없는 2차원 모델을 가정하면, (6)식은

$$\tilde{\Gamma}(\mathbf{r}) = [\mathbf{I} - (k_b^2 \mathbf{I} + \nabla \nabla) \int_S \int_{-\infty}^{\infty} g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dy' \hat{\sigma}(\mathbf{r}') dS']^{-1} \quad (7)$$

이 된다. 유의할 점은 (7)식의 적분결과가 y값에 무관하다는 점이다(조인기와 서정희, 1998). (7)식을 (4)식에 대입하면 2차 전기장은

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \sigma_a(\rho') \tilde{\Gamma}(\rho') \cdot \mathbf{E}_p(\mathbf{r}') dy' dS' \quad (8)$$

이 되며, 2차 자기장은

$$\mathbf{H}_s(\mathbf{r}) = \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \nabla g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \sigma_a(\rho') \tilde{\Gamma}(\rho') \cdot \mathbf{E}_p(\mathbf{r}') dy' dS' \quad (9)$$

로 주어진다(Torres-Verdin and Habashy, 1994; 조인기와 서

정희, 1998).

이제 지하 대상 매질을 여러 개의 정사각형 요소로 분할하면, j번째 정사각형 요소에 의한 탈분극 텐서는

$$\tilde{\Gamma}(\rho) = [\mathbf{I} + \sum_{j=1}^N \hat{\sigma}_j \Lambda_j(\rho)]^{-1} \quad (10)$$

로 간단히 표현된다. 여기서

$$\Lambda_j(\rho) = -\frac{1}{2\pi} (k_b^2 \mathbf{I} + \nabla \nabla) \int_{AS_j} K_0(ik_b |\rho - \rho'|) dS' \quad (11)$$

이다. 이 때  $|\rho - \rho'|^2 = (x-x')^2 + (z-z')^2$ ,  $K_0$ 는 제2종 Bessel 함수이며,  $\hat{\sigma} = \sigma_x / \sigma_b$ 이다. (11)식의 계산은 사각형 요소를 원통형 요소로 근사할 경우 이론해가 존재한다(조인기와 서정희, 1998).

### 반복적 비선형 역산

물리탐사법의 역산문제는 측정값과 이론값의 오차를 최소화시키는 지하모델 변수를 찾아내는 문제이다. 그러나 이러한 역산은 근본적으로 유일해가 존재하지 않는다. 따라서 최근 역산의 개념은 단순히 수학적 오차를 줄이는데 그치지 않고 많은 해의 집합 중에서 원하는 특성을 갖는 해를 구하는 것으로 확장되고 있다. 이러한 역산 방법 중에서 가장 널리 사용되고 있는 방법이 평활화 제한을 가한 감쇠최소자승법(smoothness constraint least squares method)이다. 평활화 제한은 지하의 모델이 매우 부드럽게 변한다는 가정 하에 오차 뿐 아니라 모델변수의 공간적 변화량까지도 최소화시키는 방법이다.

전자탐사에서 얻어지는 측정값을 나타내는 벡터를

$$\mathbf{d} = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_N\}^T, \quad (12)$$

주어진 모델변수 벡터  $\mathbf{p}$ 에 의한 이론값을

$$\mathbf{F}[\mathbf{p}] = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_N\}^T \quad (13)$$

라 하면, 오차벡터는

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{p}] \quad (14)$$

이 된다. 반복적 비선형 역산에서 초기 변수벡터를  $\mathbf{p}_1$ 이라 하면, 변수벡터의 미소증분  $\Delta \mathbf{p}$ 에 의한 이론 값은 테일러 급수 전개에 의하여

$$\mathbf{F}[\mathbf{p}_1 + \Delta \mathbf{p}] \approx \mathbf{F}[\mathbf{p}_1] + \mathbf{J}_1 \Delta \mathbf{p} \quad (15)$$

로 주어진다. 여기서

$$\mathbf{J}_1 = \left. \frac{\partial \mathbf{F}[\mathbf{p}]}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_1} \quad (16)$$

로 Jacobian 행렬이다. 한편 모델변수의 공간적 변화량을 2차 미분으로 가정하면 roughness 행렬은

$$\mathbf{R} = \partial^2 \Delta \mathbf{p} \quad (17)$$

이다. 마지막으로 역산에서 최소화시켜야 할 목적함수는

$$U = \| \mathbf{e}_1 - \mathbf{J}_1 \Delta \mathbf{p} \|^2 + \mu \| \partial^2 \Delta \mathbf{p} \|^2 \quad (18)$$

이며, 여기서  $\| \cdot \|$  은 Euclidean norm,  $\mu$  는 라그랑지 곱수이다. (18)식은 평활화 제한을 가한 감쇠최소자승법 중 Creeping(Parker, 1986; 이명종 등, 1997)에 해당된다. 이 목적 함수를 미분하여 증분벡터를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta \mathbf{p} = [\mathbf{J}_1^H \mathbf{J}_1 + \mu \partial^2 \partial^2]^{-1} \mathbf{J}_1^H \mathbf{e}_1 \quad (19)$$

(19)식에서  $\mathbf{J}_1^H$  는 Hermitian transpose 행렬이다.

물리탐사 자료의 역산에서 가장 중요한 부분은 (16)식에 주어지는 Jacobian 행렬의 계산이다. Jacobian 행렬을 구하기 위하여 (9)식을 모델변수 벡터로 미분하면

$$J_{ij} = \frac{\partial H_i}{\partial \sigma_j} = \sum_{m=1}^M \int_{\Delta S_m} \int_{-\infty}^{\infty} \nabla g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \frac{\partial}{\partial \sigma_j} [\sigma_a(\boldsymbol{\rho}') \tilde{\Gamma}(\boldsymbol{\rho}')] \cdot \mathbf{E}_p(\mathbf{r}') dy' ds' \quad (20)$$

이 된다. 따라서 Jacobian 행렬의 계산에서 가장 복잡한 부분은 탈분극 텐서의 미분이다. 그러나 이는 (10)식을 미분하여 간단하게 해결된다(Torres-Verdin and Habashy, 1994; 1995).  
 즉

$$\frac{\partial \tilde{\Gamma}}{\partial \sigma_j} \left[ \mathbf{I} + \sum_{m=1}^M \hat{\sigma}_m \Lambda_m \right] + \frac{\Lambda_j}{\sigma_b} \tilde{\Gamma} = 0$$

이므로

$$\frac{\partial \tilde{\Gamma}}{\partial \sigma_j} = -\tilde{\Gamma} \cdot \frac{\Lambda_j}{\sigma_b} \cdot \tilde{\Gamma} \quad (21)$$

이 된다. 따라서 일단 탈분극 텐서가 계산되면 Jacobian 행렬은 단순한 행렬식의 곱으로 주어진다. 역산 과정에서 가장 많은 계산시간이 소요되는 부분은 (9)식과 (20)식에 주어지는  $y'$  에 대한 무한적분이다. 이 무한 적분은 수치적분에 의존해야 하므로 상당한 계산시간이 요구된다. 특히 역산의 경우 요소의 수가 증가하게 되면 적분시간은 기하 급수적으로 증가한다. 다행하게도 (9)식과 (20)식의 적분에서 2차원 거동을 보이는  $\sigma_a$  및  $\tilde{\Gamma}$  는  $y'$  의 함수가 아니므로  $y'$  에 대한 무한적분은 한번만 수행하면 된다. 역산에서 계산시간을 절약하기 위해서는 조사 대상 영역을 미리 고정된 요소로 나누어 놓고 수치적분을 수행한 다음 저장하여 사용하는 방법이 효과적이다.

### 결과 및 고찰

일반적으로 시추공을 이용한 전자탐사에서는 공간적 제약으로 인하여 자기장의 수직성분을 측정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 2차 자기장의 수직성분을 측정값으로 하고, 지하의 모델변수로는 전기전도도를 사용하였다. 여기서 2차 자기장은 무한 균질매질에 의한 자기장을 제외한 순수한 이상체에 의한 자기장을 의미한다. 원칙적으로 매질의 전기전도도

에 따라 자기장이 변화하므로 총 자기장을 측정값으로 해야 하나 본 연구에서는 EM 토모그래피의 시도라는 측면에서 모암의 전기전도도를 이미 안다는 가정 하에 출발한다.

전자탐사 자료를 이용하여 시추공 사이의 영상을 구현하기 위해서는 우선 두 시추공 사이의 조사 대상 지역을 다수의 정사각형 요소로 분할해야 한다. Fig. 1에서와 같이 송·수신 시추공 사이의 거리를 50m, 시추공의 길이를 100m로 고정하고, 시추공 사이의 대상 지역을 크기 5m×5m인 200개의 정사각형 요소로 분할하였다. 따라서 역산에서 사용되는 모델 변수의 총수 M=200개이다. 한편 측정은 자기 쌍극자 송신원을 송신 시추공을 따라 5m 간격으로 이동시키면서, 각각의 송신원에 대하여 수신 시추공에서 5m 간격으로 2차 자기장의 수직성분을 측정하는 것으로 설정하였으며, 총 측정값의 수 N=21×21개이다. 여러 번의 시행착오를 거쳐  $\mu=0.5$ 로 고정

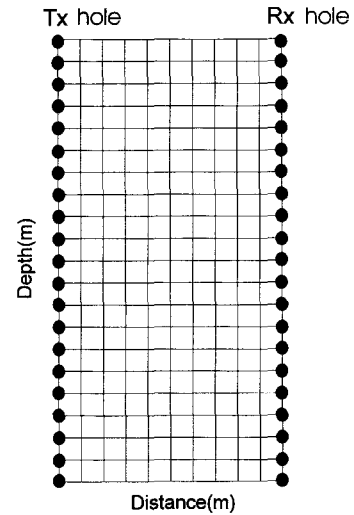


Fig. 1. Source and receiver geometry and discretization for inversion.

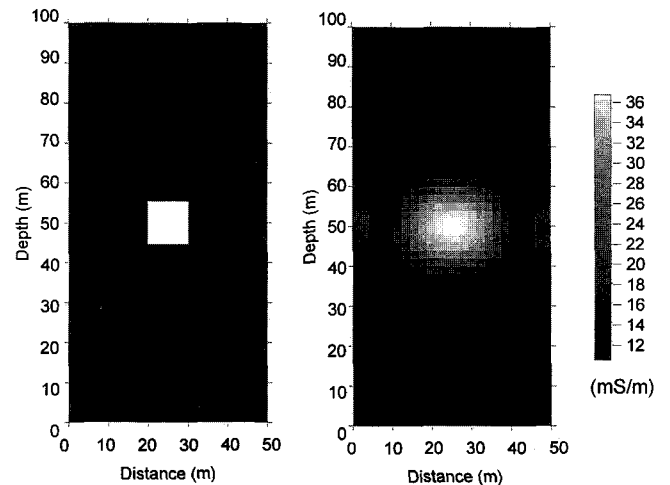
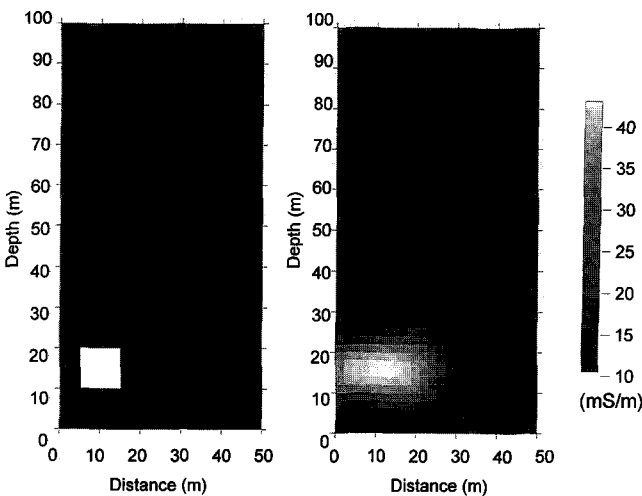


Fig. 2. Model for 2.5D EM tomography and reconstructed image. The model is 10m×10m block of conductivity 0.1S/m and embedded in a 0.01S/m background medium.

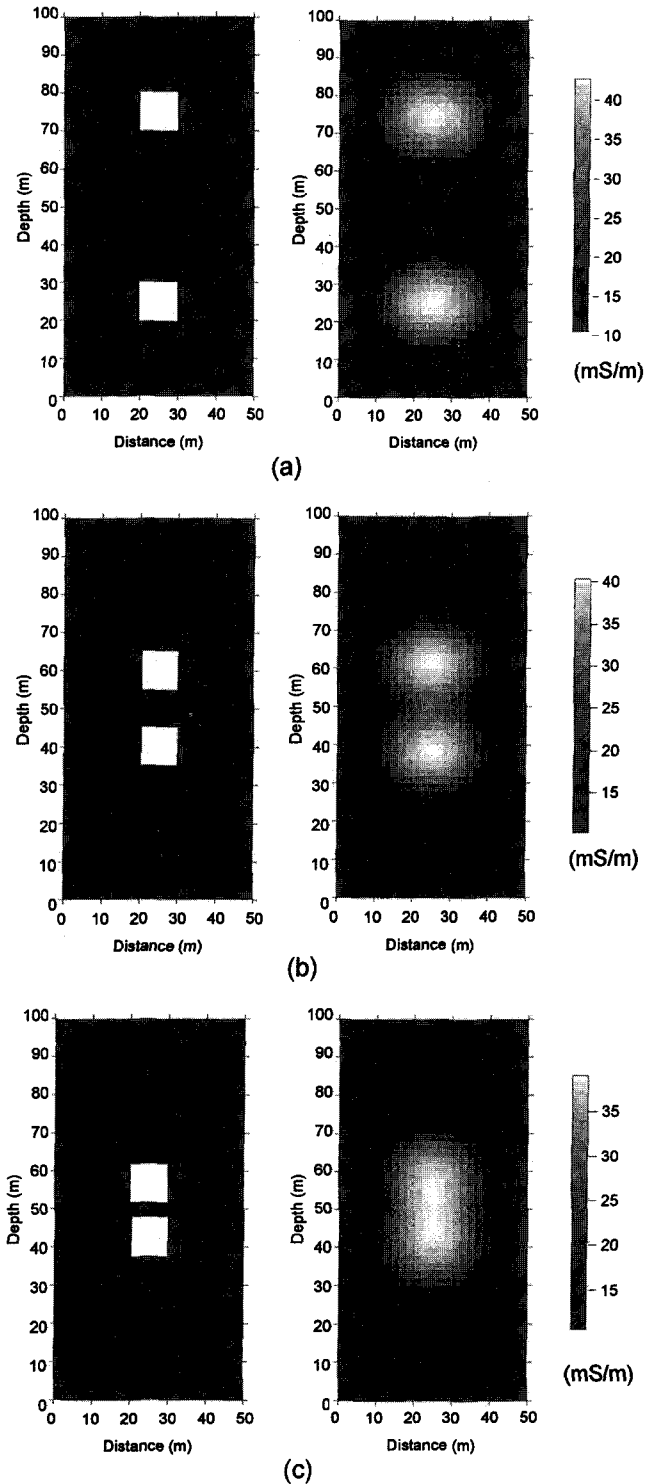
하였으며, 사용주파수는 10 kHz, 모암의 전도도는 0.01 S/m로 하였다. 본 연구에서는 EM 토모그래피 알고리즘의 검증 을 위하여 Fig. 2에 주어진 모형에 대하여 모델링을 수행하였다. 모형의 크기는 10m×10m 크기의 정사각형 이상체이며, 이상체의 전도도는 0.1 S/m이다. 사용된 모델링 기법은 3차원 적분방정식법이다(조인기와 정승환, 1998). 적분 방정식에 근거한 3차원 모델링에서 2차원 대상체에 대한 반응을 구하기 위하여 대상체의 주향방향 길이를 시추공간의 거리의 2배 이상이 되도록 하였다. 이 경우 3차원 이상체의 반응을 2차원 이상체로 가정할 수 있다(Spies and Habashy, 1995). 이 모델링 자료를 측정값으로 하여 역산을 수행하였다. Fig. 2의 오른쪽 그림은 역산 결과 얻어진 EM 토모그래피 영상이다. 영상을 살펴보면 정확하게 이상체의 위치를 표현하고 있어 본 알고리즘이 이상체의 위치를 파악하는데는 비교적 효과적임을 알 수 있다. 그러나 원래 이상체의 전도도가 0.1 S/m인데 비하여 영상에서 얻어진 결과는 최대가 0.04 S/m를 넘지 못하고 있다. 또한 이상체의 크기가 주어진 모델에 비하여 상당히 크게 퍼져서 나타나고 있다. 이는 역산 방법 자체가 공간적으로 부드러운 해를 강요하므로 이상체의 크기가 크게 나타나는 것이다. 또한 이상체의 크기가 커지므로 이의 보상효과로 이상체의 전도도를 주어진 모델보다 낮게 추정하는 것으로 해석된다.

역산에서 중요한 점은 오차가 안정적으로 주어진 허용 오차 범위 내에 수렴하는데 걸리는 시간이다. 본 역산 알고리즘에서는 오차는 매우 안정적으로 수렴하였으나, 수렴속도는 상당히 느린 것으로 나타났다. 그러나 모델링 및 Jacobian 행렬의 계산속도가 매우 빠르므로 20회 정도의 반복계산에 소요되는 시간은 Pentium II 200 MHz 컴퓨터에서 약 20분 정도였다. 물론 이 계산시간은 (9)식 및 (20)식에 나타난 무한적분에 걸리는 시간을 제외한 것이다.



**Fig. 3.** Model for 2.5D EM tomography and reconstructed image. The model is 10m×10m block of conductivity 0.1S/m and embedded in a 0.01S/m background medium.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 크기 및 물성을 갖는 이상체가 역산 대상 영역의 가장자리에 위치할 경우의 역산 결과이다. 이상체의 형상이 상당히 왜곡되어 나타나고 있으나 위치는 비



**Fig. 4.** Two block models for 2.5D EM tomography and reconstructed image. Vertical distance between two blocks is (a) 40m, (b) 10m, (c) 5m. The size and conductivity of each block are same as Fig. 2.

교적 정확히 추정하고 있다. 이상체의 영상이 왜곡된 이유는 토모그래피에서 커버리지가 낮기 때문으로 판단된다. 특이한 점은 이상체의 최대 전도도는 이상체가 시추공 사이의 중앙에 있는 Fig. 2의 경우보다 오히려 높게 나타나고 있다. 이는 이상체와 송신 또는 수신 시추공과의 거리가 매우 가깝기 때문에 발생하는 현상으로 보인다.

Fig. 4는 수직해상도를 알아보기 위하여 분리된 2개의 이상체간의 수직거리 변화에 따른 토모그래피 영상을 나타낸 것이다. 사용된 이상체는 모두 10m×10m 크기의 정사각형 이상체이며, 이상체의 전도도는 0.1 S/m이다. 수직거리가 40m, 10m일 경우에는 정확하게 분리된 영상이 나타나고 있으며, 5m일 경우에도 어느 정도 분리된 이상체임을 알 수 있다. 따라서 EM 토모그래피의 수직해상도는 상당히 양호한 것으로 판단된다. 한편 수평 해상도를 알아보기 위하여 Fig. 5에 수평적 거리변화에 따른 EM 토모그래피 영상을 나타내었다. 이상체간의 수평거리가 20m일 경우에는 분리된 영상을 보이고 있으나 이상체의 형상이 상당히 왜곡되어 나타나고 있으

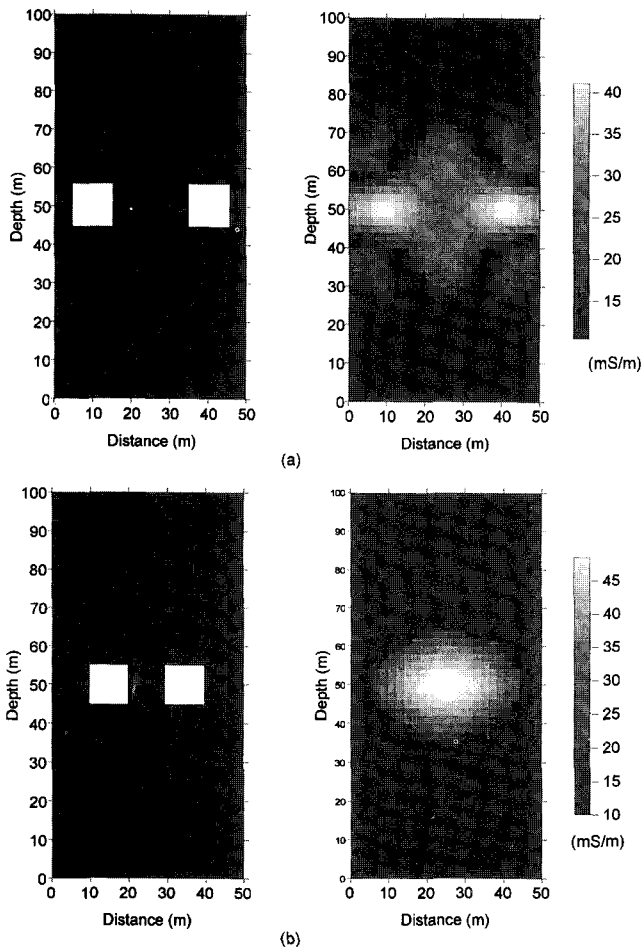


Fig. 5. Two block model for 2.5D EM tomography and reconstructed image. Horizontal distance between two blocks is (a) 20m, (b) 10m. The size and conductivity of each block are same as Fig. 2.

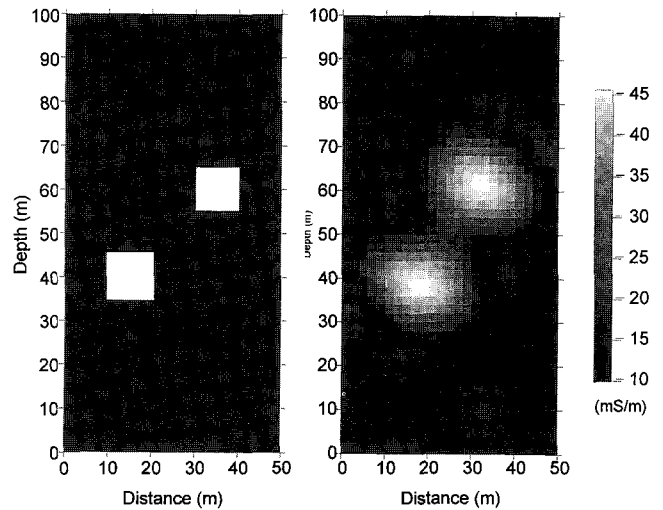


Fig. 6. Two block model for 2.5D EM tomography and reconstructed image. The size and conductivity of each block are same as Fig. 2.

며, 주변에 상당한 잡음이 나타나고 있다. 이상체간의 수평거리가 10m일 경우에는 완전히 하나의 이상체가 존재하는 것으로 나타나고 있어, 구분이 불가능하다. 따라서 EM 토모그래피에서도 다른 토모그래피와 마찬가지로 수직해상도는 좋으나 수평해상도는 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 두 개의 이상체가 수직, 수평적으로 분리되어 있을 경우의 EM 토모그래피 영상이다. EM 토모그래피의 수직해상도가 뛰어나므로 확실하게 두 개의 분리된 영상을 보여주고 있으나, 주변에 약간의 잡음이 나타나고 있다.

이상 다양한 모델에 대한 이론자료를 3차원 적분 방정식을 통하여 구하고, 이를 측정값으로 하여 얻어진 EM 토모그래피 영상을 검토하였다. 모든 경우에 이상체의 위치를 비교적 정확히 추정하였으나, 이상체의 전도도는 주어진 모델과 상당한 차이를 나타내는 것으로 나타났다. 또한 수직해상도는 뛰어났으나 수평해상도는 매우 낮은 것으로 나타났다. 앞으로 사용 주파수의 변화, 이상체가 시추공 밖에 있을 경우, 전도도 변화, 이상체의 크기 변화 등에 다양한 연구가 수행된다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 결론 및 토의

역산법에 근거하여 EM 토모그래피 알고리즘을 개발하고 단순한 모형에 대한 이론자료에 대하여 EM 토모그래피 영상을 구현하였다. 이론 자료는 3차원 적분방정식법에서 계산된 결과를, 역산에 사용된 모형반응은 확장된 Born 근사에 의한 2.5차원 모델링 기법을 사용하였다. 역산법은 최근 각종 물리탐사 자료의 역산에 널리 사용되고 있는 평활화 제한을 가한 감쇠최소자승법을 사용하였다.

본 연구에서 개발된 알고리즘은 비교적 많은 횡수의 반복 계산이 요구되나 전체적인 계산시간은 모형반응 계산시간이

짧기 때문에 상당히 빠른 것으로 나타났다. 또한 오차도 매우 안정적으로 수렴하는 것으로 나타났다. 단순한 형태를 갖는 사각형 모형에 대한 이론자료를 측정값으로 하여 EM 토모그래피 영상을 얻어 본 결과, 비교적 정확히 이상체의 위치를 추정하였으며, 2개의 분리된 이상체의 경우에도 정확한 위치 추정이 가능하였다. 그러나 이상체의 전도도는 주어진 모형보다 상당히 낮게 나타났다. 해상도 분석결과 수직해상도가 수평해상도에 비하여 월등히 뛰어난 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 알고리즘은 무한 균질 매질의 전기전도도를 이미 안다는 가정 하에 개발되었다. 실제적으로 조사 대상지역의 전도도는 알려진 값이 아니므로, 본 연구결과는 근본적으로 한계를 갖고 있다. 그러나 측정된 전체 자료를 분석하면 조사 대상지역의 평균적인 전도도를 예측할 수 있을 것으로 보이며, 이 값이 약간의 차이가 있다고 해도 얻어지는 결과가 모암의 전도도에 대한 상대적인 영상을 보여줌으로 큰 문제는 아닌 것으로 보인다. 앞으로 주파수 변화에 대한 연구 및 복잡한 모형에 대한 연구가 이루어진다면 빠른 시일 내에 EM 토모그래피 기술을 국내에 정착시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구비의 지원을 받은 "전자탐사법에 의한 지하영상화" 과제의 일부로 수행되었다. 당 기관에 감사한다.

## 참고문헌

1. 조인기, 서정희, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 시추공간 전자탐사 2.5차원 모델링: 물리탐사, **1**, 127-135.
2. 조인기, 정승환, 1998, 시추공간 전자탐사법의 3차원 모델링: 한국자원공학회지, **35**, 50-58.
3. 이명종, 김정호, 정승환, 조성준, 이희일, 1997, 전기비저항 토모그래피 영상법 개발연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-96-(C)-10, 62-108.
4. Alumbaugh, D. L. and Morrison, H. F., 1995, Crosswell electromagnetic tomography. Theoretical and practical considerations for cylindrical geometry: *Geophysics*, **60**, 846-870.
5. 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.
6. Hohmann, G. W., 1988, Numerical Modeling for Electromagnetic Methods of Geophysics, in Nabighian, M.N. Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics-theory*, Vol.1: *Soc. Expl. Geophys.*, 312-363.
7. Parker, R. L., 1986, *Nonlinear problems by linearization: Short course on geophysical inverse theory and applications*, Scripps Institution of Oceanography.
8. Spies, B. R. and Habashy, T. M., 1995, Sensitivity analysis of crosswell electromagnetics: *Geophysics*, **60**, 834-845.
9. Torres-Verdin, C. and Habashy, T. M., 1994, Rapid 2.5 dimensional forward modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximation: *Radio Sci.*, **29**(4), 1051-1079.
10. Torres-Verdin, C. and Habashy, T. M., 1995, A two-step linear inversion of two-dimensional electrical conductivity: *IEEE, Trans. Antennas Propag.*, **43**(4), 405-415.
11. Wilt, M., Alumbaugh, D. L., Morrison, H. F., Becker, A., Lee, K. H. and Deszcz-Pan, M., 1995, Crosswell electromagnetic tomography: System design considerations and field results: *Geophysics*, **60**, 871-885.
12. Zhou, Q., Becker, A. and Morrison, H. F., 1993, Audio-frequency electromagnetic tomography in 2-D: *Geophysics*, **58**, 482-495.