

확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피

조인기 · 심현미¹⁾

1. 서론

본 연구에서는 확장된 Born 근사법을 모델링 알고리즘으로 하는 EM 2.5차원 역산 프로그램^{1,2,3)}을 사용하여 주파수 변화 및 이상체의 위치변화에 따른 토모그래피 영상의 변화 양상을 고찰하였다. 사용된 역산법은 평활화 제한을 가한 감쇠최소자승법이며, 측정값은 적분 방정식법에 근거한 3차원 EM 모델링 프로그램⁴⁾을 통하여 계산된 2차 자기장의 수직성분으로 제한하였다.

2. 이론

일반적인 Born 근사에서는 이상체 내부에서의 전기장을 이상체가 없을 경우의 1차장으로 근사한다. 이 방법은 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 탈분극텐서 Γ 와 1차 전기장 E_P 의 곱으로 근사한다.⁵⁾

$$E(\mathbf{r}) \approx \Gamma(\mathbf{r}) \cdot E_P(\mathbf{r}). \quad (1)$$

2.5차원 문제에서 탈분극텐서는

$$\Gamma(\mathbf{r}) = [I - (k_b^2 I + \nabla \nabla) \sigma_a \Lambda(\mathbf{r})]^{-1} \quad (2)$$

로 주어진다. 여기에서 k_b 는 전파상수, I 는 단위텐서, σ_a 는 모암과 이상체 사이의 전기전도도 차,

$$\Lambda(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sigma_b} \int_S \int_{-\infty}^{\infty} g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dy' dS' \quad (3)$$

로 주어진다. (3)식에서 σ_b 는 모암의 전기전도도, $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 는 무한공간에서의 스칼라 그린 함수이다. 확장된 Born 근사법을 모델링 알고리즘으로 사용할 경우 역산과정에서 가장 많은 계산시간이 소요되는 Jacobian 행렬의 계산에 필요한 탈분극텐서의 편미분은 다음과 같이 간단한 3×3 행렬의 곱으로 나타나게 되므로 매우 경제적이다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \sigma} = -\Gamma \cdot \Lambda \cdot \Gamma. \quad (4)$$

주요어: EM 토모그래피, 감쇠최소자승법, 확장된 Born 근사

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

3. 역산결과 및 고찰

측정자료의 계산을 위하여 우선 송·수신 시추공 사이의 거리를 50m, 시추공의 길이를 100m로 고정하였다. 측정은 자기 쌍극자 송신원을 송신 시추공을 따라 5m간격으로 이동시키면서, 각각의 송신원에 대하여 수신 시추공에서 5m 간격으로 2차 자기장의 수직성분을 측정하는 것으로 설정하였으며, 총 측정값은 $N=21 \times 21$ 개이다. 모형의 크기는 $10m \times 10m$ 크기의 정사각형 이상체이며, 이상체의 전도도는 $0.1S/m$, 모암의 전도도는 $0.01S/m$ 로 하였다. 적분 방정식에 근거한 3차원 모델링에서 2차원 대상체에 대한 반응을 구하기 위하여 대상체의 주향방향 길이를 시추공간의 거리의 2배 이상이 되도록 하였다. 이때 사용주파수는 1kHz, 10kHz, 100kHz 이다. 역산을 위하여 송·수신 시추공 사이의 대상 지역을 크기 $5m \times 5m$ 인 200개의 정사각형 요소로 분할하였으며, 라그랑지 곱수 $\mu=0.1 \sim 0.5$ 로 범위내의 적절한 값을 경험적으로 선택하여 사용하였다. 초기값은 항상 모암의 전기전도도와 같은 값으로 설정하였다.

동일 크기의 단일 이상체와 서로 분리된 2개의 이상체에 대하여 주파수를 1kHz, 10kHz, 100kHz로 변화시키면서 얻어진 영상을 비교하였다. 주파수 변화에 따른 역산결과를 살펴보면 1kHz, 10kHz, 100kHz의 세 가지 경우 모두 비교적 정확하게 이상체의 위치를 추정하고 있지만, 저주파보다는 고주파가 해상도가 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 동일한 크기 및 물성을 갖는 이상체가 역산 대상 영역의 정사각형 요소에서 벗어나 위치할 경우의 역산 결과에서도 이상체의 위치를 비교적 정확히 추정하고 있어 본 역산법이 매우 효과적임을 알 수 있었다. 한편 다른 토모그래피법에서와 마찬가지로 EM 토모그래피에서도 수직해상도가 수평해상도에 비하여 월등한 것으로 나타났다.

4. 결론

확장된 Born 근사법을 사용하는 EM 토모그래피법은 계산시간이 짧고, 비교적 정확히 이상체의 위치 및 형상을 구현할 수 있어 매우 효과적인 방법으로 판단된다. 그러나 본 연구에 사용된 알고리즘은 모암의 전기전도도를 정확히 알고 있을 경우로 국한되며, 또한 지표면에 의한 영향을 고려하지 않았으므로 실제 현장자료에 적용하기에는 제약이 따른다. 따라서 모암의 전도도 결정 및 지표면의 영향에 대한 연구가 필요하며, 나아가서는 자기장의 수평성분도 사용하게 되면 보다 좋은 결과가 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 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.
2. 조인기, 서정희, 1998, "확장된 Born 근사에 의한 시추공간 전자탐사 2.5차원 모델링", 물리탐사, 1, 127-135.
3. 조인기, 심현미, 1998, "확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피", 물리탐사, 1, 155-160.
4. 조인기, 정승환, 1998, "시추공간 전자탐사법의 3차원 모델링", 한국자원공학회지, 35,

50-58.

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.

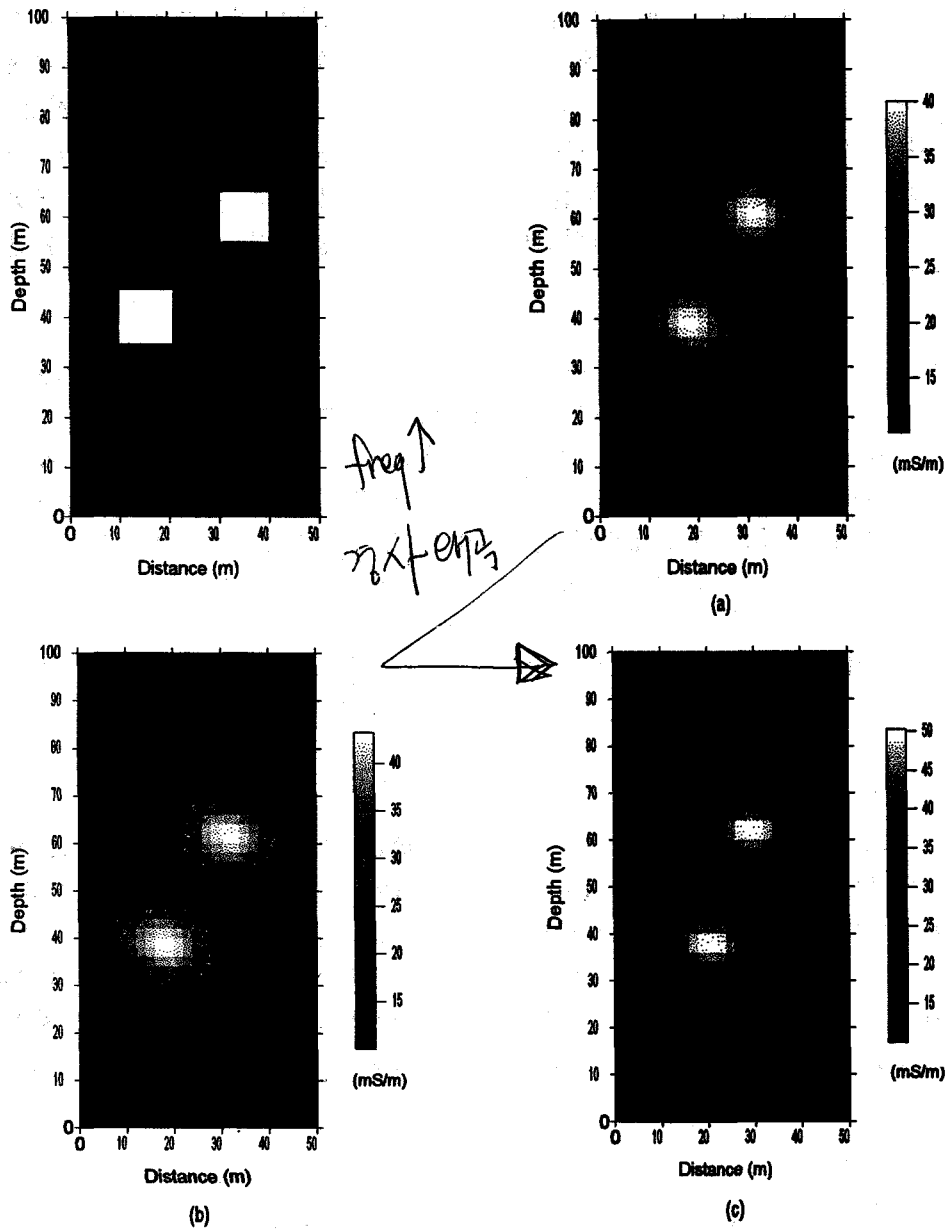


Fig. 1. Two block model for 2.5D EM tomography and reconstructed image. The model is 10 m X 10 m block of conductivity 0.1S/m and embedded in a 0.01S/m background medium. The frequency is (a) 1kHz, (b) 10kHz, (c) 100kHz.