

국소 비선형 근사를 이용한 전자탐사 3차원 모델링 및 역산

조성준⁽¹⁾ · 송운호⁽¹⁾ · 서정희⁽²⁾ · 정승환⁽¹⁾

1. 요약

경제적이며 정확한 3차원 전자탐사 모델링을 위해 위해 Habashy et al. (1993)에 의해 제안된 국소 비선형 근사(localized nonlinear approximation)를 이용하여 전자탐사 모델링 알고리즘을 개발하였다. 전자탐사 수치모델링시 많은 계산시간 및 기억용량을 필요로 하는 Green 텐서 적분을 정확하고 빠르게 계산하기 위해, 단일 미소체를 이용한 공간과수 영역에서의 Green 텐서 적분 알고리즘을 제안하였다. 더욱이 Green 텐서의 송수신 방향 및 상반성을 고려하여 각각의 미소체에 의한 전체 미소체에의 Green 텐서 적분을 한 개의 미소체에 의한 전체 미소체에의 Green 텐서 적분 값으로 구하게 하므로 매우 적은 기억용량 만으로 Green 텐서 적분 행렬을 구성할 수 있어, 역산법에 효과적으로 적용할 수 있다. 이 수치 모델링 알고리즘을 기본으로 하여 평활화 제한을 가한 최소자승 역산 알고리즘을 개발하였다. 이 역산 알고리즘을 지표 전자탐사 및 시추공-지표 전자탐사 등에 적용하여 PC에서도 빠르게 3차원 전자탐사 역산이 수행됨을 보였다.

2. 단일 미소체를 이용한 공간과수 영역 Green 텐서의 적분

전기 전도도 이상체에 의한 전체공간내 위치 \mathbf{r} 에서의 국소 비선형 근사에 의한 전기장($\mathbf{E}(\mathbf{r})$)은 다음과 같이 표현된다(Habash et al., 1993).

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx \underline{\underline{\Gamma}}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_b(\mathbf{r}) \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{E}_b(\mathbf{r})$ 는 일차 전기장을 나타내며, $\underline{\underline{\Gamma}}(\mathbf{r})$ 는 산란 텐서 또는 depolarization 텐서라 불리며 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{\underline{\Gamma}}(\mathbf{r}) = \left[\mathbf{I} + \hat{z} \int_V \underline{\underline{\mathbf{G}}}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Delta \hat{y}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \right]^{-1} \quad (2)$$

여기서, $\hat{z} = i\omega\mu$ 는 impedivity, ω 는 각가속도, μ 는 자유공간에서의 투자율, $\underline{\underline{\mathbf{G}}}_E$ 는 전기장 Green 텐서를 나타낸다.

국소 비선형 근사를 이용한 수치 모델링 계산 시 가장 많은 계산 시간을 요하는 작업이 산란 텐서 내의 Green 텐서 적분 계산이며 이를 효율적이며 정확히 계산하기 위해 본 연구에서는 단일 미소체를 이용한 공간과수 영역 Green 텐서 적분 알고리즘을 제안하였다.

$$\begin{aligned} & \int_V \underline{\underline{\mathbf{G}}}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Delta \hat{y}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \\ & \cong \sum_{j=1}^{N_{cell}} \Delta \sigma_j \int_V \underline{\underline{\mathbf{G}}}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \\ & = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{j=1}^{N_{cell}} \Delta \sigma_j \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{z_j} \tilde{\underline{\underline{\mathbf{G}}}}_E(k_x, k_y, z, z') dz' \right] \text{sinc}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \end{aligned} \quad (3)$$

주요어: 전자탐사 3차원 모델링, 3차원 역산, Green 텐서 적분

1) 한국지질자원연구원 2)서울대학교 지구환경시스템 공학부

여기서, N_{cell} 은 미소 육면체로 이산화 된 이상체의 개수이며, k_x, k_y 는 x와 y방향의 공간 파수이다. $\int_{V_j} \mathbf{G}_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}'$ 는 Pulse 기저함수를 가지는 j -번째 미소체와 Green 텐서의 콘볼루션 적분이므로 위와 같이 공간파수 영역에서의 곱으로 표현되며, 이때 $\text{sinc}(k_x, k_y)$ 는 다음과 같다.

$$\text{sinc}(k_x, k_y) = \frac{4 \sin(k_x \frac{dx}{2}) \sin(k_y \frac{dy}{2})}{k_x k_y} e^{-i(k_x x' + k_y y')} \quad (4)$$

(3)식은 z -축 방향으로의 해석적인 Green 텐서 적분과 sinc 함수의 곱셈으로 콘볼루션 적분을 수행하므로 높은 정확도를 얻을 수 있으나, 각각의 미소체에 대한 전체 미소체의 개수인 $N_{cell} \times N_{cell}$ 번 만큼 역푸리에 변환을 해야 하기 때문에 많은 계산시간이 요구되는 문제점을 가지고 있다. 그러나 이러한 문제점은 푸리에 변환의 특성과 Green 텐서의 상반성 및 송수신 방향을 고려하면 $N_{layer} \times N_{layer}$ (z -축 방향의 층수)번 만의 역 푸리에 변환만 필요로 하므로 쉽게 해결할 수 있다. 또한 (3)식을 이용한 Green 텐서의 적분은 역산문제에 적용 할 때 Green 텐서의 적분 값을 저장하여 매 반복 시 이를 이용할 수 있도록 해주어 역산 시간 및 기억용량을 대폭 줄일 수 있다.

3. 수치모형에 대한 역산 결과

본 연구를 통해 개발된 수치 모델링 알고리즘을 기본으로 하는 3차원 전자탐사 역산법을 개발하여 이를 수치모형에 적용해 보았다. 적용된 수치모형은 Fig. 1에 도시하였다. 이상체는 100 ohm-m의 반무한 매질 내에 A-region으로 표시되며 10 ohm-m의 전기비저항값, 크기는 $30 \times 30 \times 10$ m, 중심위치는 (10, -10, 25)이다. B-region으로 표시된 곳이 역산구간이며, 크기는 $90 \times 90 \times 50$ m, $9 \times 9 \times 5$ 개의 격자로 구성된다. 송신기는 시추공 BH-1과 BH-2에 심도 10 m부터 70 m까지 10 m 간격으로 각각 7개씩 도합 14개가 존재하며, 사용 주파수는 1 kHz이다. 수신기는 Fig. 1의 평면도에서 \bullet 으로 표시되어 있는데, (-60, -60, 0)에서 (60, 60, 0)까지 x 및 y 방향으로 각각 20 m 간격으로 7개씩 총 49개가 지표면에 분포되어 있으며, 수직 이차자기장의 실수성분 및 허수성분을 측정하였다.

역산 수행결과를 Fig. 2에 도시하였다. 5회 반복역산 후의 심도별 전기비저항 분포 평면도이며, 계산에 사용된 시간은 AMD-550 CPU를 탑재한 PC에서 약 20분 정도 소요되었다. 그림에서 보면 3층에 존재하는 이상체의 위치 및 전기비저항의 크기를 비교적 잘 나타내준다. 3층의 이상체의 가장 낮은 전기비저항 값은 15 ohm-m 로 실제보다는 약간 높게 나왔으며, 2층과 4층의 경우 이상체의 상하부에 낮은 전기비저항 이상대를 나타내는데 이는 공간적인 평활화를 가하는 역산 알고리즘에 기인한다.

4. 결론

국소 비선형 근사를 이용한 전자탐사 3차원 모델링 및 역산 알고리즘을 개발하였다. 전자탐사 수치 모델링시 많은 계산시간 및 기억용량을 필요로 하는 Green 텐서 적분을 정확하고 빠르게 계산하기 위해, 단일 미소체를 이용한 공간파수 영역에서의 Green 텐서 적분 알고리즘을 적용하였다. 한편, 단순한 지하 모형에 대한 3차원 역산을 통해 개발된 역산 알고리즘의 적용성을 확인할 수 있었다. 특히 본 연구에서 제시된 알고리즘은 역산 계산시간의 많은 부분을 차지하는 수치모델링 시간이 매우 짧고, 요구되는 기억용량이 작아 PC를 이용하여도 효과적으로 3차원 역산에 적용할 수 있다.

참고문헌

Habashy, T. M., Groom, R. W., and Spies, B., 1993, Beyond the Born and Rytov approximations: A nonlinear approach to electromagnetic scattering: J. Geophys. Res., 98, 1759-1775.

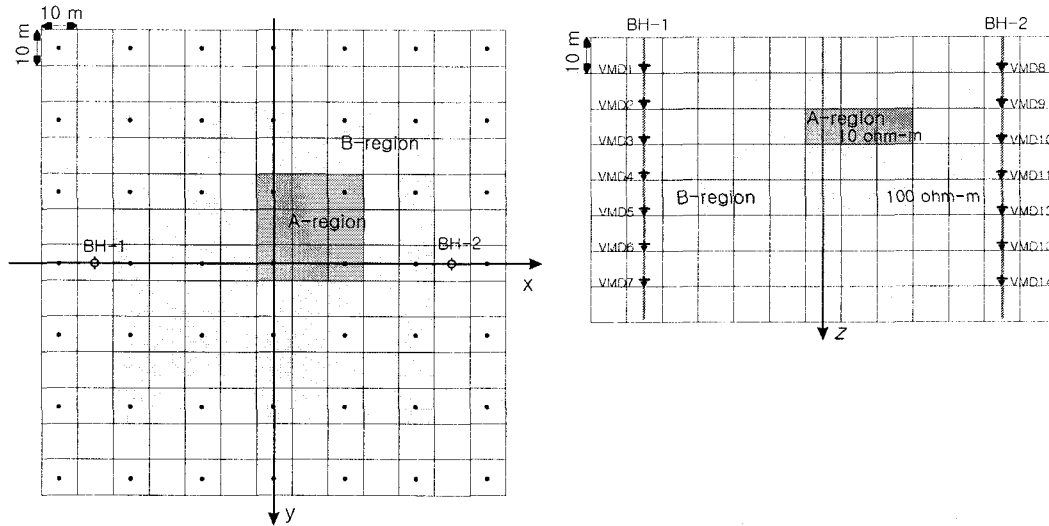


Fig. 1. Inversion model and borehole-to-surface EM measurement configuration (plane view (left), section view (right)). VMD sources are operated at frequency of 1 kHz at 14 points along the two boreholes, BH-1 and BH-2. Receiver positions are superimposed as dots on plane view (left), A-region is anomalous body for numerical modeling and B-region is inversion region.

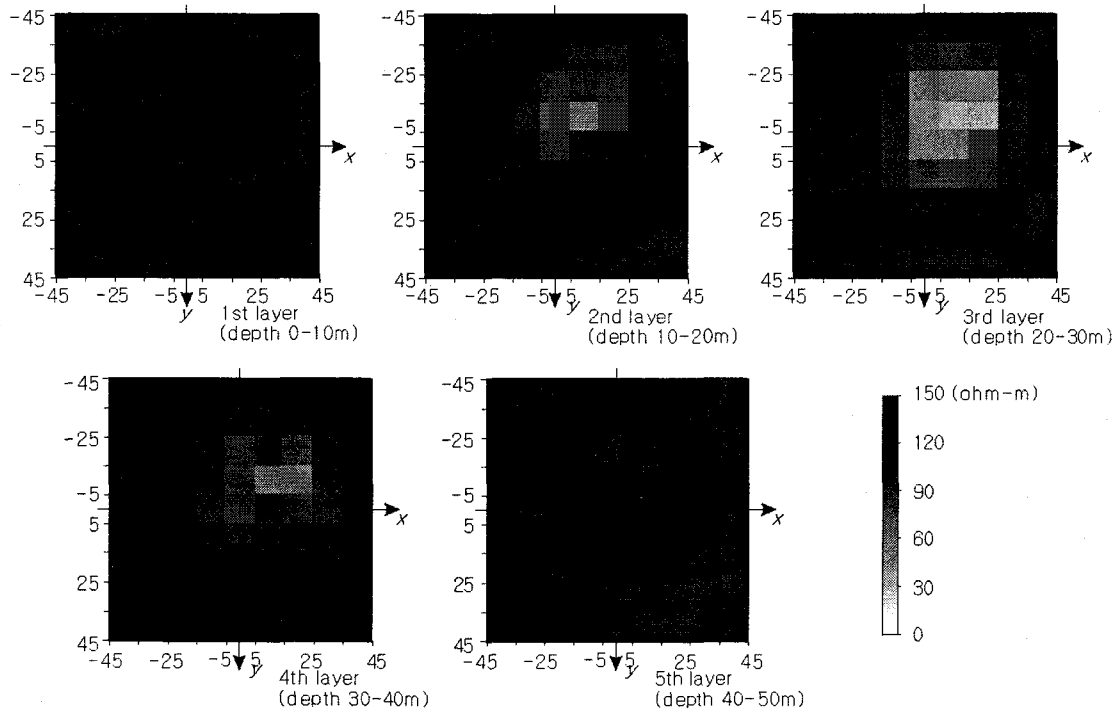


Fig. 2. The depth sliced image of inversion result for the model shown in Fig. 1.