

# 신속한 3차원 전자탐사 모델링

조인기 · 김하림

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

## 요 약

적분 방정식법은 매우 강력한 3차원 전자탐사 모델링 기법이다. 그러나 이 방법은 이상체내에의 전기장의 계산을 위하여 대형 선형 방정식의 해를 구해야 하므로 계산시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 특히 3차원 역산의 경우에는 이러한 적분방정식의 단점은 치명적이 될 수 밖에 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 다양한 근사법이 개발되었지만, 이들 방법은 모두 Green 텐서의 적분을 수행해야 하며, 이 적분은 상당한 계산시간이 소요된다. 한편 전자탐사에서 Green 텐서는 거리가 증가함에 따라 급격히 감소하는 양상을 보이므로, 모델링을 위하여 이상체를 여러 개의 미소요소로 분할할 경우, 먼 거리에 있는 미소요소는 측정 미소요소에서의 전기장에 크게 영향을 미치지 못한다. 본 논문에서는 이점에 착안하여 먼 거리에 있는 미소요소에 의한 Green 텐서를 무시함으로써 획기적으로 계산시간을 단축할 수 있었다. 결과의 정확성 검토를 위하여 간단한 형태의 이상체에 대하여 본 방법을 사용하여 전기장을 계산한 결과 적분 방정식법, 확장 Born 근사 및 급수법의 결과와 거의 일치하는 정확한 결과를 얻을 수 있었으며, 계산시간을 단축할 수 있었다.

**주요어:** 전자탐사 모델링, 적분 방정식법, Green 텐서

**In-Ky Cho and Ha-Lim Kim, 2002, Rapid 3-D EM modeling. Journal of the Korean Geophysical Society. v. 5, n. 1, p. 63-71**

**ABSTRACT:** The integral equation method is a powerful tool for electromagnetic numerical modeling. But the difficulty of this technique is the size of their linear equations, which demands excessive memory and calculation time to invert. This limitation of the integral equation method becomes critical in inverse problem. To overcome this limitation, a lot of approximation and series methods, such as conventional Born, modified Born and extended Born, were developed. But all the methods need volume integration of Green tensor, which is very time consuming. In electromagnetic theory, Green tensor rapidly decreases as the distance between source and field cell increases. Therefore, the source cell which are far away from the field cell does not make an effect on the electric field of the field cell. Consequently, by ignoring the effect of Green tensor due to far away source cells, computing time for electromagnetic numerical modeling can be reduced dramatically. Comparisons of this new method against a full integral equation, extended Born approximation and series code show that the method is accurate enough and much less time consuming.

**Key words:** electromagnetic modeling, integral equation, Green tensor

*(In-Ky Cho and Ha-Lim Kim, Department of Geophysics, College of Natural Science, Kangwon National University, 192-1, Hyoja 2-dong, Chunchon, Kangwon, E-mail : choik@kangwon.ac.kr)*

## 1. 서 론

적분 방정식법은 비교적 단순한 형태의 3차원 이상체에 대한 전자탐사 반응을 계산하는 데 매우 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 그 해가 거

의 해석적 해에 가까워 매우 정확한 방법이다. 그러나 적분 방정식법은 이론이 복잡하고 이상체의 크기가 커질 경우에는 계산시간이 너무 많이 소요된다는 단점이 있다. 특히 계산시간이 많이 걸린다는 단점은 이 방법을 이용한 역산 알고리즘

의 개발에 치명적인 단점이라 할 수 있다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 다양한 근사법이 개발된 바 있으며, 각 근사법은 나름대로 장단점을 갖고 있다. 일반적으로 전자탐사 모델링에서 가장 쉽게 적용할 수 있는 방법은 이상체 내에서의 전기장을 송신원에 의한 1차 전기장으로 근사하는 Born 근사법(Born approximation)을 들 수 있다. 그러나 이 방법은 이상체의 전기전도도가 주변 매질의 전기전도도에 큰 차이가 나거나 신호원의 주파수가 높을 경우 그 정확성이 매우 떨어지는 것으로 보고된 바 있다. 이러한 Born 근사법의 한계를 극복하기 위하여 확장 Born(extended Born or localized-nonlinear) 근사(Torres-Habashy et al., 1993; 조인기 · 서정희, 1998; 조인기 · 심현미, 1998), 수정 Born(modified Born) 근사(Zhdanov · Fang, 1996), 준선형(quasi-linear) 및 준해석(quasi-analytic) 근사(Zhdanov · Fang, 1997) 및 각 근사법에 해당되는 급수(series) 전개법(Zhdanov · Fang, 1997; Zhdanov et al., 2000; 안희운 · 조인기, 2001; 조인기 외, 2001)이 개발되어 있다. 그러나 이들 방법은 모두 이상체를 작은 미소요소(cell)로 분할하고 각 미소요소들 간의 Green 텐서를 적분해야 한다. 만약 이상체의 크기가 매우 크거나, 역산에서와 같이 대상영역 전체를 미소요소로 분할해야 하는 경우에는 미소요소의 수가 급격하게 증가하게 된다. 이 경우 Green 텐서의 계산 및 적분에 엄청난 계산시간이 소요되므로 실질적으로 이들 방법을 사용하는 모델링 및 역산을 어렵게 하는 근본적인 원인이 된다.

한편 Green 텐서는 미소요소로부터 측정점까지의 거리, 배경 매질의 전기전도도와 신호원 주파수의 함수로 주어지며, 특히 거리의 증가에 따라 매우 급격하게 감소하는 특성을 보인다. 따라서 먼 거리에 있는 미소요소는 측정점의 전기장에 크게 영향을 미치지 않으므로 먼 거리에 있는 미소요소의 영향을 무시하면 Green 텐서의 계산시간을 상당히 단축시킬 수 있다. 본 연구에서는 미소요소로부터의 거리, 신호원의 주파수 및 배경 매질의 전기전도도 등에 따른 Green 텐서의 특성을 분석하여 어느 정도 멀리 떨어져 있는 미소요소의 영향을 무시할 수 있는가를 검토하였다. 또한

이러한 방법을 이용하여 계산시간을 단축할 경우에 얻어지는 이상체내에서의 전기장을 적분 방정식법의 결과와 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

## 2. 기본 이론

균질 무한 공간(homogeneous whole space)내에 전기전도도 이상체가 존재할 경우 전기장은 다음과 같이 제2종 Fredholm 방정식으로 주어진다(Hohmann, 1975; Hohmann, 1988, 조인기 · 정승환, 1997).

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_b(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_a(\mathbf{r}) \\ &= \mathbf{E}_b(\mathbf{r}) + \mathbf{G}_B[\Delta\sigma \mathbf{E}] \end{aligned} \quad (1)$$

(1)식에서 적분 연산자

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_B[\Delta\sigma \mathbf{E}] &= \int_v \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \Delta\sigma(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') dv' \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{E}_b$ 는 송신원에 의한 1차 전기장(background field),  $\mathbf{E}_a$ 는 이상체에 의한 2차 전기장(anomalous field),  $\Delta\sigma(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) - \sigma_b$ ,  $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 는 무한 공간에 대한 Green 텐서로

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{\sigma_b} [k_b^2 \mathbf{I} + \nabla \nabla] g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (3)$$

로 주어진다. 무한 공간에서 스칼라 Green 함수  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 은

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

이며,  $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ ,  $k_b^2 \approx -i\omega\mu\sigma_b$ 으로 전도성 매질에서의 전파상수이다. 반무한 공간(half-space)에 대한 스칼라 Green 함수는 더욱 복잡하며 (4)식에 지표면에 의한 영상원(image source)이 추가되어야 한다(Hohmann, 1975; 조인기 · 최경화, 1999).

(1)식의 해는 일반적으로 적분 방정식법을 사용하여 구하게 된다. 그러나 적분 방정식법은 그 정확성은 뛰어나지만 계산시간이 많이 소요된다는 단점이 있어, 다양한 근사법이 널리 사용되고 있다. 이들 근사법 중에서 가장 간단한 방법은 이상체내에서의 전기장을 송신원에 의한 1차 전기장으로 간주하는 Born 근사법이다. 이 경우 2차 전기장은 다음 (5)식과 같이 주어진다.

$$\mathbf{E}_a^B(\mathbf{r}) = \mathbf{G}_B [\Delta\sigma \mathbf{E}_b]. \quad (5)$$

그러나 이 방법은 이상체와 배경 매질간의 전기전도도 비가 너무 크거나, 이상체의 크기가 클 경우 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있다 (Habashy *et al.*, 1994).

이러한 Born 근사의 정확성을 높이기 위하여 도입된 방법이 수정 적분 연산자  $\mathbf{C}$ 를 사용하여 2차장을 계산하는 방법이다. 수정 적분 연산자를 사용하면 다음과 같은 2차장에 대한 적분 방정식을 얻을 수 있다 (Zhdanov · Fang, 1997).

$$\begin{aligned} \alpha \mathbf{E}_a &= \mathbf{C}(\alpha \mathbf{E}_a) \\ &= \mathbf{G}_{MB} (\beta \alpha \mathbf{E}_a) + \mathbf{G}_{MB} (\beta \alpha \mathbf{E}_a) - \beta \alpha \mathbf{E}_a. \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식에서

$$\alpha = \frac{2\sigma_b + \Delta\sigma}{2\sqrt{\sigma_b}}, \quad \beta = \frac{\Delta\sigma}{2\sigma_b + \Delta\sigma}, \quad (7)$$

수정된 적분 연산자  $\mathbf{G}_{MB}$ 는 임의의 벡터  $\mathbf{x}$ 에 대하여

$$\mathbf{G}_{MB}(\mathbf{x}) = \sqrt{\sigma_b} \mathbf{G}_B [2\sqrt{\sigma_b} \mathbf{x}] + \mathbf{x} \quad (8)$$

로 정의되며(Singer · Fainberg, 1995),  $\|\mathbf{G}_{MB}\| \leq 1$ 의 특성을 가지므로, (6)식의 해를 구하기 위하여 반복법이 사용된다. 즉

$$\alpha \mathbf{E}_a^{(N)} = \mathbf{C}[\alpha \mathbf{E}_a^{(N-1)}], \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

이며, 반복회수가 무한히 증가시키면 실제 2차장을 계산할 수 있다.

$$\alpha \mathbf{E}_a \rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \alpha \mathbf{E}_a^{(N)}. \quad (10)$$

(9)식에 주어진 반복적 방법을 이용하여 2차장을 계산하는 방법은 초기값을 선정해 주는 방법에 따라 수정 Born 급수, 확장 Born 급수, 준선형 급수, 준해석 급수 전개법 등으로 나누어진다.

우선 수정 Born 급수는 2차장의 초기값을 0으로 설정해 주는 경우에 해당된다.

$$\alpha \mathbf{E}_{aMB}^{(0)} = 0. \quad (11)$$

이 초기값을 (9)식에 대입하면

$$\alpha \mathbf{E}_a^{MB} = \alpha \mathbf{E}_{aMB}^{(1)} = \sqrt{\sigma_b} \mathbf{E}_a^B \quad (12)$$

이 되며, 이를 수정 Born 근사라 한다. (9)식을 이용하여 이를  $N$ 차 항까지 확장하여 수정 Born 급수를 구하면

$$\alpha \mathbf{E}_{aMB}^{(N)} = \sum_{k=1}^{N-1} (\mathbf{G}_{MB} \beta)^k [\alpha \mathbf{E}_a^{MB}] \quad (13)$$

이 된다. (13)식에서  $\|\mathbf{G}_{MB}\| \cdot \|\beta\| \leq 1$ 의 수렴 조건을 만족하므로 수정 Born 급수는 항상 수렴한다(Zhdanov · Fang, 1997).

마지막으로 확장 Born 근사는 이상체내에서의 전기장을

$$\mathbf{E}^{LN} \approx \mathbf{\Gamma} \mathbf{E}_b \quad (14)$$

와 같이 1차장과 탈분극 텐서(depolarization or scattering tensor)의 곱으로 근사하는 방법이다 (Torres-Verdin · Habashy, 1994). (14)식에서 탈분극 텐서는

$$\mathbf{\Gamma} = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_B [\Delta\sigma \mathbf{I}])^{-1} \quad (15)$$

로 주어진다. 이 경우 2차장은

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_a^{LN} &= \Gamma \mathbf{E}_b - \mathbf{E}_b \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{G}_B[\Delta\sigma \mathbf{I}])^{-1} \mathbf{G}_B[\Delta\sigma \mathbf{I}] \mathbf{E}_b \end{aligned} \quad (16)$$

앞에서와 마찬가지로 (16)식을 초기값으로 (9)식에 순차적으로 대입하면

$$\begin{aligned} \alpha \mathbf{E}_{aLN}^{(N)} &= \sum_{k=1}^{N-1} (\mathbf{G}_{MB} \beta)^k [\alpha \mathbf{E}_a^{MB}] \\ &+ (\mathbf{G}_{MB} \beta)^N [\alpha \mathbf{E}_a^{LN}] \end{aligned} \quad (17)$$

인 확장 Born 급수를 얻을 수 있다.

### 3. Green 텐서의 특성

(1)식에 주어진 적분방정식에서 2차 전기장은 Green 텐서, 전기장, 배경 매질과 이상체의 전기전도도 차의 곱에 대한 적분으로 주어진다. 불행하게도 이 적분에는 구하고자 하는 값인 전기장이 포함되어 있으므로 해석적 해를 구할 수 없으며, 이상체를 여러 개의 미소요소(cell)로 분할한다면, 각 미소요소 내에서의 전기전도도 및 전기장이 일정하다고 가정하고, (1)식을 선형방정식으로 변환하여 수치적으로 해를 구하게 된다. 따라서 (1)식의 적분에서 한 개의 특정 미소요소가 다른 미소요소의 전기장에 미치는 영향을 나타내는 Green 텐서의 적분은 적분방정식의 해를 구하는 가장 핵심적인 부분이 된다. 이제 미소요소들 사이의 거리 및 전파상수  $k$ 의 값에 따른 Green 텐서의 공간적 변화양상을 검토하고자 한다. 우선 (3)식에 주어진 바와 같이 Green 텐서는 두 미소요소간의 거리, 배경 매질의 전기전도도 및 송신 주파수의 함수로 주어지며, 거리의 증가에 따라 Green 텐서는 급격하게 감소할 것이라는 점을 예측할 수 있다. 하지만 전파상수  $k$ 는 거리보다 비교적 복잡하게 감쇠에 영향을 미치므로 거리만으로 Green 텐서의 거동양상을 분석하는 것은 의미가 없다. 하지만 전파상수  $k$ 도 (3)식에서 지수함수적으로 Green 텐서를 감소시키게 되므로 매

우 큰 값일 경우에는 Green 텐서는 0에 수렴함을 알 수 있다. 만약 Green 텐서가 거리에 따라 매우 급격히 감소하여 일정 거리 이상에 있는 미소요소에 의한 영향을 무시할 수 있다면 획기적으로 적분 횟수를 줄일 수 있으며, 이는 계산시간을 상당히 단축시키는 효과를 가져오게 된다. 따라서 과연 Green 텐서가 얼마나 빨리 감소하는가는 (1)식의 적분을 계산하는 과정에서 매우 중요한 요소 중의 하나가 된다.

Fig. 1은 구형 좌표계에서 거리의 증가에 따른 Green 텐서의  $R$  방향의 성분의 공간적 변화 양상을 나타낸 것이다. 즉

$$G_{RR} = \frac{1}{\sigma_b} [k_b^2 + \nabla_R \nabla_R] g(\mathbf{r}, \mathbf{r}'). \quad (18)$$

예상한 바와 같이  $R$ 의 크기가 증가함에 따라 Green 텐서의 크기는 매우 급격하게 감소함을 알 수 있다. 따라서 (1)식에 주어진 적분에서 특정 미소요소에서의 전기장은 자기 자신에 의한 영향이 가장 지배적임을 알 수 있다. MT 탐사를 제외한 일반적인 전자탐사에서 사용하는 송신 주파수의 하한을 약 10 Hz라고 할 경우,  $R > 10$  m 일 경우에 Green 텐서는 거의 0에 수렴하는 값을 보이고 있다. 물론 주파수가 높을 경우에는 감쇠율이 증가하므로 더 짧은 거리에서 Green 텐서

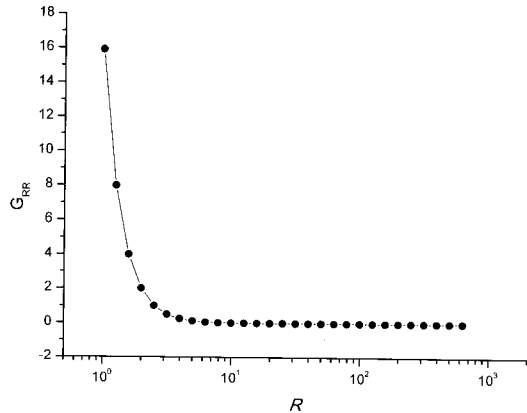


Fig. 1. Behavior of Green tensor as a function of distance  $R$ (m) when the background conductivity of homogeneous whole space is 0.01 S/m and the source frequency is 10 Hz.

가 0에 수렴하게 될 것이다.

Fig. 1은 배경매질의 전기전도도를 0.01 S/m로 설정한 경우이긴 하지만, 배경매질의 전기전도도가 0.001 S/m의 경우에도 거리  $R$ 이 10 m 이상이면 Green 텐서의 값은 거의 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 적분 방정식법 및 이의 근사해를 구하는 과정에서 Green 텐서는  $R < 10$  m 인 경우의 값만을 사용하여 계산해도 그 정확성에는 크게 문제가 없을 것으로 판단된다. 실제 Fig. 1의 계산에 사용된 주파수는 10 Hz, 배경매질의 전기전도도는 0.01 S/m 로 전파상수와 거리의 곱이 매우 작기 때문에 Green 텐서는 거의  $R^3$  에 역비례하게 되며, 전자탐사에 주로 사용되는 주파수 대역(1 Hz~100 kHz) 및 일반적인 배경매질의 전기전도도 범위( $10^{-4}$ ~1 S/m) 내에서는 Green 텐서의 감소 양상은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 전기장의 분포

앞 절에서  $R > 10$  m 일 경우에는 Green 텐서가 거의 0에 수렴하므로 측정점에서의 전기장에는 거의 영향을 미치지 않을 것이라는 가정을 확인하기 위하여, 적분 방정식법, 확장 Born 근사 및 급수법 등을 사용하여 각 전도성 이상체 내에서의 전기장을 계산하고 그 분포양상을 관찰하였다. 우선 송신원은 소형 루프 전자탐사법에서 가장 널리 사용되는 수직 자기 쌍극자(VMD)으로 설정

하였으며, 송신 주파수는 1000 Hz, 배경매질의 전기전도도는 0.01 S/m, 이상체의 전기전도도는 0.1 S/m, 이상체의 크기는  $15 \times 15 \times 1$  m<sup>3</sup>인 판상 전도체로 가정하였다. 이상체는 수치 계산을 위하여 크기  $1 \times 1 \times 1$  m<sup>3</sup>의 미소 요소로 분할하였으며, 미소요소의 총 수는  $N=225$  개다. 물론 계산의 편의를 위하여 무한공간을 가정하였으며, 송신원은 이상체의 중앙에서 수직으로 10 m 상부에 위치하는 것으로 가정하였다(Fig. 2).

Fig. 3은 Fig. 2에 주어진 모델에 대하여 적분 방정식법, 확장 Born 근사법 및 급수법을 사용하여 계산된  $x$ -축 방향 전기장의 동상 및 이상성분의 분포양상을 나타낸 것이다. 모든 경우에 동상 성분에 비하여 이상성분의 크기가 월등히 큰 값을 보이고, 전기장의  $x$ -축 방향 성분이 이상체의 중앙부인  $x=0$  인 곳에서는 매우 작은 값을 보이고 있으며, 중앙에서  $y$ -축 방향으로 멀어질수록 그 값이 증가하는 양상을 보이고 있다. 이 경우는  $x$ ,  $y$ -축 방향으로 완전한 대칭성을 보이게 되므로, 이상체에 유도되는 유도전류는 동상 및 이상 성분 모두 판상 전도체의 가장자리를 따라 원형으로 회전하는 형태가 됨을 쉽게 유추할 수 있다. Fig. 3 (b)는 각종 근사법 중 비교적 정확한 것으로 알려진 확장 Born 근사법을 이용하여 이상체 내에서의 전기장의 분포 양상을 구한 결과이다. Fig. 3 (a)에 주어진 적분 방정식법의 결과와 비교해 볼 때 유도전류의 방향성은 거의 같은 특성을 보이나 그 크기는 상대적으로 작아졌음을 확

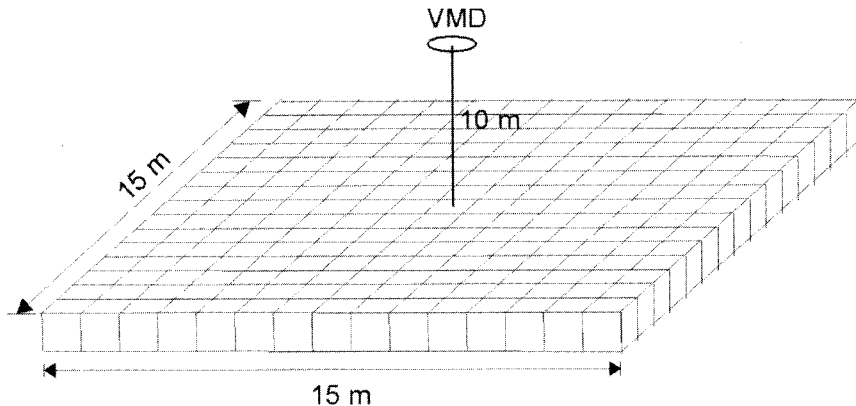


Fig. 2. VMD source geometry and discretization for modeling. Conductivity of background and anomalous body are 0.01 and 0.1 S/m, respectively.

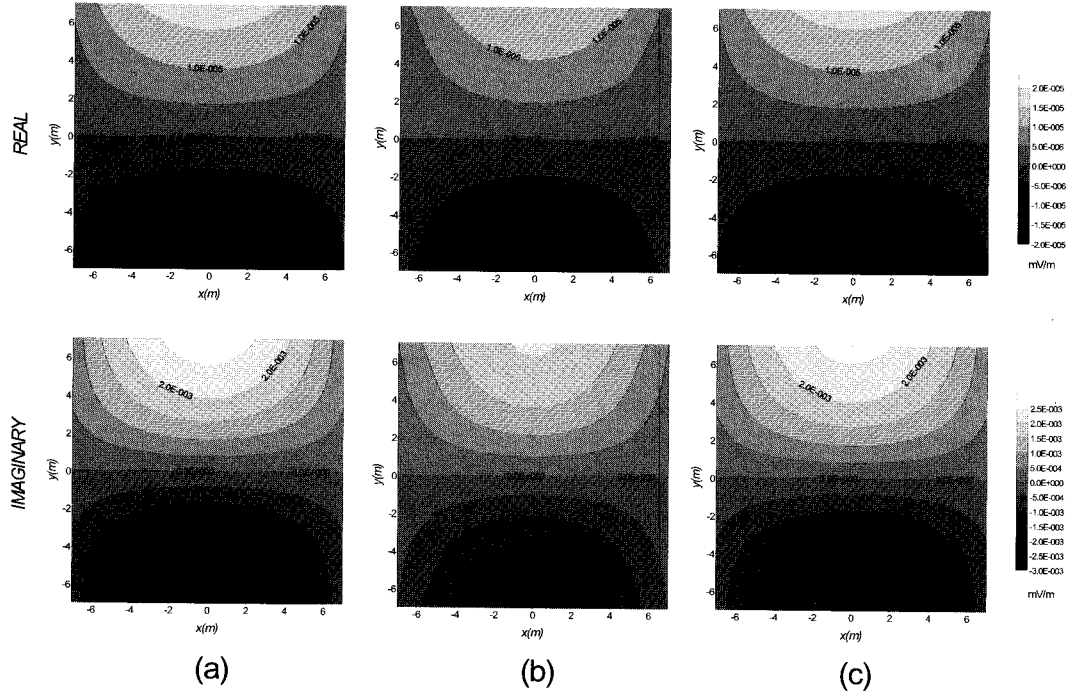


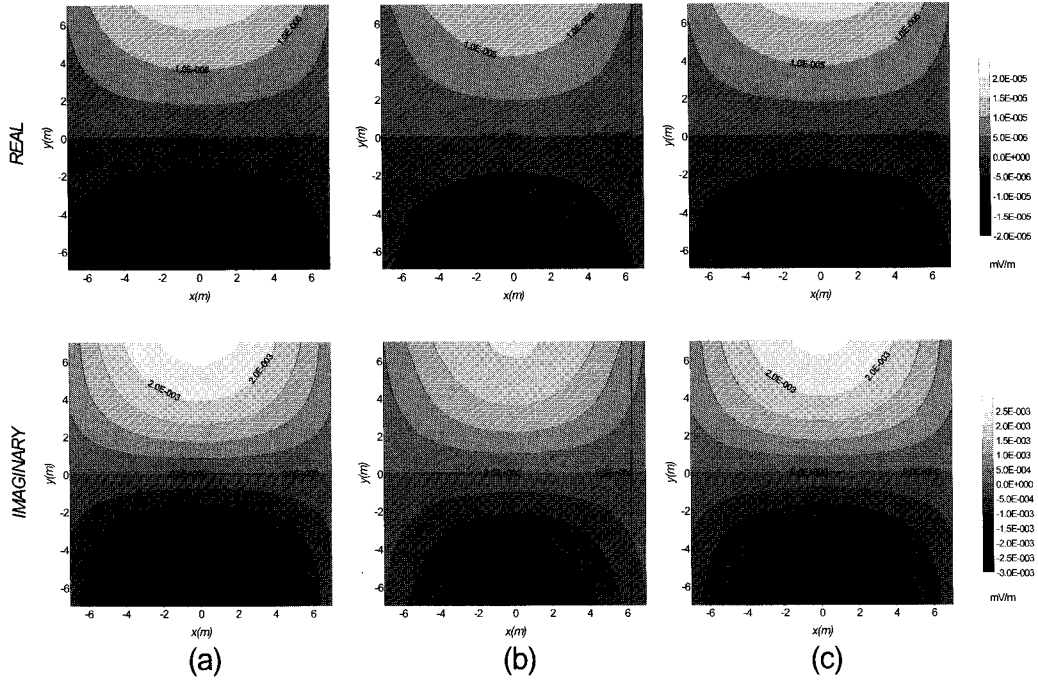
Fig. 3. Distribution of scattering electric field ( $E_x$ ) in an anomalous body computed by (a) the full integral equation, (b) the extended Born approximation and (c) the extended Born series method.

인할 수 있으며, 이는 근사법의 오차에 해당된다. Fig. 3 (c)는 정확성을 높이기 위하여 10차 항까지 전개한 확장 Born 급수법을 사용하여 이상체 내에서의 전기장 분포 양상을 구한 결과로 Fig. 3 (a)의 적분방정식의 결과와 거의 동일한 전기장 분포 양상을 보이고 있어, 급수 전개법이 매우 정확한 방법임을 잘 대변해주고 있다.

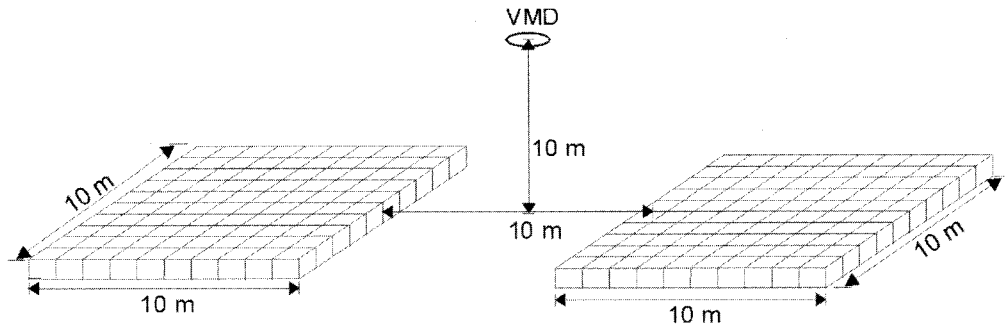
한편 Fig. 3의 결과는 각 미소요소 사이의 거리에 관계없이 모든 미소요소에 의한 영향을 고려하여 이상체 내부에서의 전기장을 계산한 결과이다. 이 경우 Green 텐서의 적분은  $N \times N$  회 수행되었다. 실질적으로는 Green 텐서는  $3 \times 3$  이므로 체적적분을  $3N \times 3N$  회 수행해야 한다. 이제 계산시간의 단축을 위하여 제안된 방법인 미소요소간의 거리  $R < 10$  m 인 경우의 Green 텐서만을 적분하여 계산된 전기장을 살펴보자(Fig. 4). 미세한 오차는 있으나 적분 방정식법은 물론이고 확장 Born 근사 및 급수법 모두 Fig. 3의 경우와 거의 동일한 분포양상을 보이고 있어 본 논문에서 제안된 방법을 사용해도 그 정확성에는

큰 문제가 없음을 잘 보여주고 있다. Fig. 3은 Green 텐서의 적분을  $225 \times 225 = 50,625$  회 실시한 결과이며, Fig. 4는 40,401회 실시한 결과이다. 이 경우는 미소요소의 수의 225로 비교적 작기 때문에 약 10,000 회 정도의 적분에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있었지만, 미소요소의 수가 매우 큰 역산의 경우에는 엄청난 계산시간을 절약할 수 있을 것이 자명하다. 또한 실제 전자탐사 모델링과 역산의 경우에는 본 연구에서 적용한 전체 공간이 아니라 반무한 공간에 대한 복잡한 Green 텐서를 적분해야 하므로 본 연구의 경우보다 훨씬 많은 계산시간이 소요될 것이다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법의 효율성이 더욱 커질 것으로 기대된다.

본 연구에서 제안된 방법의 정확성을 다시 한번 검증하기 위하여 두 개의 분리된 이상체가 서로 멀리 떨어져 있을 경우에 각 이상체에서의 전기장을 계산하여 보았다. 두 이상체 사이의 거리는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 10 m이며, 각 이상체의 크기는  $10 \times 10 \times 1$  m<sup>3</sup>인 판상 전도체로



**Fig. 4.** Distribution of scattering electric field ( $E_x$ ) in an anomalous body, computed by (a) the integral equation, (b) the extended Born approximation and (c) the extended Born series method. When the distance  $R$  is greater than 10 m, the volume integral of Green tensor was not carried out and its value was set to zero in order to save computing time.



**Fig. 5.** VMD source geometry and discretization of two separated bodies for modeling. Each body has a size of  $10 \times 10 \times 1 \text{ m}^3$  and conductivity of background and two bodies are 0.01 and 0.1 S/m, respectively.

가정하였다. 이상체는 수치 계산을 위하여 크기  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ 의 미소요소로 분할하였으며, 미소요소의 총 수는  $N=200$  개다. 물론 계산의 편의를 위하여 무한공간을 가정하였으며, 수직 자기 쌍극자 송신원이 두 이상체의 중앙에서 수직으로 10 m 상부에 위치하는 것으로 설정하였다. Fig. 6은 Fig. 5의 우측 이상체내에서의 전기장의  $x$  성분을 나타낸 것으로 (a)는 각 미소요소에 대한 Green

텐서를 모두 적분하여 계산된 결과이며, (b)는  $R < 10 \text{ m}$ 인 경우의 Green 텐서만을 적분하여 계산된 결과이다. 이 경우는 두 독립된 이상체의 사이의 거리가 10 m, 송신 주파수가 1000 Hz, 배경매질의 전기전도도 0.01 S/m 이며, 다른 이상체에 속한 미소요소들 사이의 간섭이 매우 미약한 경우에 해당된다. 사용된 방법은 적분 방정식 법이며, 본 논문에는 수록하지 않았으나 확장된

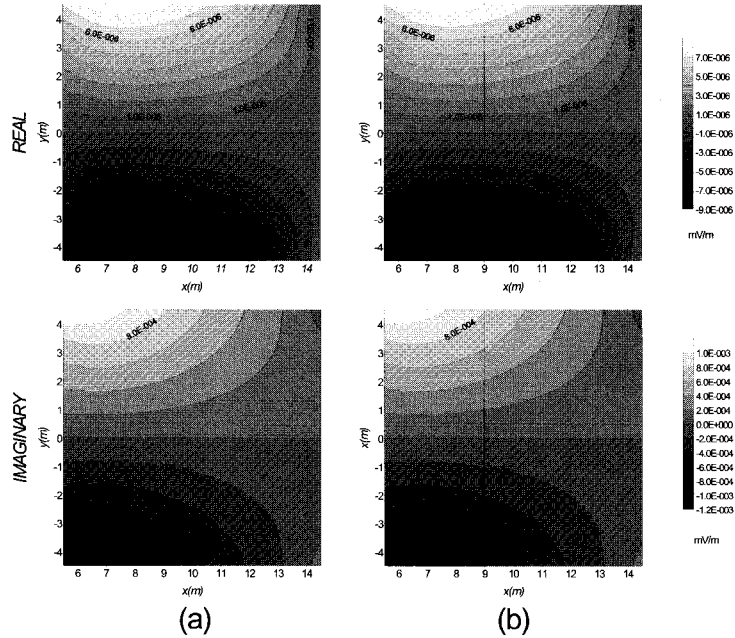


Fig. 6. Distribution of scattering electric field ( $E_x$ ) in the right body of Fig. 5 by (a) full integral equation method and (b) integral equation method which did not conduct the integration of Green tensor in the case of  $R > 10$  m.

Born 근사 및 급수법의 결과도 동일하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 전기장의 동상 및 이상성분 모두 정확하게 일치하고 있어, 각 미소요소들 사이의 거리가 클 경우에는 그 영향이 미미하므로 불필요한 Green 텐서의 적분을 수행하지 않아도 매우 정확한 결과를 얻을 수 있음을 잘 보여주고 있다.

### 5. 결론 및 토의

적분 방정식법은 그 정확성이 뛰어나도 불구하고 이론이 복잡하고 이상체의 크기가 클 경우 계산시간이 너무 많이 소요된다는 단점을 갖고 있다. 이 방법에서는 대부분 복잡한 Green 텐서의 적분에 상당한 시간이 소요되므로, 대상영역이 넓어 분할된 미소요소의 수가 큰 역산에 적분 방정식법의 적용을 방해하는 중요한 요인 중의 하나이다. 본 연구에서는 Green 텐서가 미소요소들 사이의 거리가 증가함에 따라 급격히 감소한다는 점에 착안하여 불필요한 Green 텐서의 적분을 수행하지 않아도 비교적 정확하게 이상체내에서의

전기장을 계산할 수 있는 방법론을 제시하였다. 즉 두 미소요소 사이의 거리  $R$ 이 10 m 보다 클 경우에는 Green 텐서의 적분은 매우 작은 값을 가지므로 무시하고, 가까운 미소요소들 간의 Green 텐서만을 적분함으로써 계산시간의 단축을 꾀하였다. 단순한 형태의 판상 전도체에 대하여 본 방법을 적용한 결과 매우 정확한 결과를 얻을 수 있었으며, 상당한 계산시간을 단축할 수 있었다. 본 연구에 사용된 모델은 그 크기가 작음에도 불구하고 Green 텐서의 적분 회수를 줄일 수 있었으며, 대형 모델의 경우에는 상당한 계산시간의 단축을 기대할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 안희윤, 조인기, 2001, 3차원 전자탐사 모델링에서 근사법의 비교, 한국자원공학회지, 38, 169-177.
- 조인기, 서정희, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 시추공간 전자탐사 2.5차원 모델링, 물리탐사, 1, (2), 127-135.
- 조인기, 심현미, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피: 물리탐사, 1, (3), 155-160.



- 조인기, 용환호, 안희윤, 2001, 급수 전개법에 의한 3차원 전자탐사 모델링, 물리탐사, 4, (3) 70-79.
- 조인기, 정승환, 1998, 시추공간 전자탐사법의 3차원 모델링, 한국자원공학회지, 35, 50-58.
- 조인기, 최경화, 1999, 확장된 Born 근사에 의한 시추공간 전자탐사 3차원 모델링, 물리탐사, 2, (3), 142-147.
- Hohmann, G. W., 1975, Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling, Geophysics, 40, 309-324.
- Hohmann, G. W., 1988, Numerical modeling for electromagnetic methods in applied geophysics, in Nabighian, M.N. Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory Vol. 1, Soc. Expl. Geophys., 312-363.
- Singer, B. S., and Fainberg, E. B., 1995, Generalization of iterative dissipative method for modeling electromagnetic fields in nonuniform media with displacement currents, Journal of Applied Geophysics, 34, 41-46, 1995.
- Habashy, T. M., Groom, R. W., and Spies, B. R., 1993, Beyond the Born and Rytov approximations, Journal of Geophysical Research, 98, 1759-1775.
- Torres-Verdin, C., and Habashy, T. M., 1994, Rapid 2.5-dimensional forward modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximation, Radio Science, 29, 1051-1079.
- Zhdanov, M. S. and Fang, S., 1996, Quasi-linear approximation in 3-D EM modeling, Geophysics, 61, 646-665.
- Zhdanov, M. S. and Fang, S., 1997, Quasi-linear series in three-dimensional electromagnetic modeling, Radio Science, 32, 2168-2188.
- Zhdanov, M. S., Dmitriv, V. I., Fang, S., and Hursan G., 2000, Quasi-analytical approximations and series in electromagnetic modeling, Geophysics, 65, 1746-1757.

---

2002년 2월 8일 원고접수

2002년 3월 25일 원고채택