

# 확장된 Born 근사에 의한 전기비저항 3차원 토모그래피

조인기 · 김진호<sup>1)</sup>

## 1. 서 론

역산방법에 근거한 전기비저항 3차원 토모그래피법의 개발을 위해서는 효과적인 모형반응 계산 알고리즘이 필요하다. 일반적으로 3차원 전기비저항 탐사의 모형반응 계산방법으로 적분방정식법, 유한차분법 및 유한요소법 등이 사용되고 있다. 그러나 이들 방법은 지하를 여러 개의 요소로 분할하여 수치 해를 구하는 과정에서 대형 행렬방정식을 풀어야 한다는 문제점이 있다. 특히 3차원 모형반응 계산에서는 조사 대상지역 전체를 매우 많은 수의 요소로 분할해야하므로 행렬방정식이 커지게 된다. 따라서 이의 해를 구하기 위해서는 계산시간이 너무 많이 소요되며, 대용량의 컴퓨터가 요구되기도 한다.

이러한 문제점을 해결을 위하여 제안된 방법이 Born 근사법이다. Born 근사법은 이상체 내에서의 전기장을 1차 전기장 ( $E_p$ )으로 근사하는 방법으로 이론이 간단하고, 계산시간이 짧으며, 행렬방정식을 풀지 않아도 된다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 이상체의 크기가 크거나, 모양과 이상체간의 전기전도도차가 클 경우에는 너무 부정확한 결과를 나타낸다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 일반적 Born 근사법의 이러한 문제점을 해결하는 데 효과적인 것으로 알려진 확장된 Born 근사법<sup>2,3,4,5)</sup>에 의한 전기비저항 탐사 3차원 토모그래피 프로그램을 개발하고, 그 결과의 정확성을 검토하기 위하여 이론자료에 대한 전기비저항 3차원 역산을 수행하였다. 사용된 역산 방법은 평활화 제한을 가한 감쇠 최소자승법이다.

## 2. 이 론

확장된 Born 근사법은 Born 근사법의 단점을 보완하기 위해 제안된 방법으로 비록 정확도에서는 적분방정식법에 미치지 못하지만 계산시간이 적분방정식법에 비하여 짧고 Born 근사보다 매우 정확한 근사법이다. 이 방법은 각 요소에서의 전기장을 탈분극텐서( $\Gamma$ )와 1차 전기장의 곱으로 근사하는 방법으로  $n$ 번째 요소에서의 전기장은 다음과 같이 주어진다.

$$E_n \approx \Gamma_n \cdot E_{Pn}. \quad (1)$$

(1)식에서 탈분극텐서는

$$\Gamma_n = \left[ I + \sum_{k=1}^N \sigma_{ak} \Lambda_{mk} \right]^{-1} \quad (2)$$

이며,

$$\Lambda_{mk} = -\frac{1}{\sigma_B} \int_{v_k} g(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}') dv \quad (3)$$

---

주요어: 확장된 Born 근사법, 전기비저항법, 3차원 토모그래피

1) 강원대학교 지구물리학과

이다. (2), (3)식에서  $\sigma_B$  는 모암의 전기전도도,  $\sigma_a$ 는 모암과 이상체간의 전도도차,  $\mathbf{I}$ 는 단위텐서,  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 는 반무한 공간에서의 스칼라 그린함수이다. 확장된 Born 근사법은 이상체와 주변매질간의 전기전도도 차이가 상당히 클 경우에도 비교적 정확히 각 요소에서의 전기장을 근사할 수 있는 것으로 보고된바 있다<sup>1,2)</sup>. 또한 이 방법은 역산시 가장 많은 계산 시간이 소요되는 Jacobian 행렬의 계산을 이미 계산된 탈분극텐서를 이용하여 빠르게 계산할 수 있다. 즉, Jacobian 행렬의 계산에 필요한 탈분극텐서의 편미분은 (2)식을 이용하여 간단히 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \Gamma_n}{\partial \sigma_j} = - \Gamma_n \cdot \Lambda_{nj} \cdot \Gamma_n \quad (4)$$

### 3. 결과 및 고찰

3차원 역산을 위해서는 우선 지하를 3차원으로 가정하고 N개의 육면체 요소로 분할한다. 본 연구에서는 현재 3차원적 정밀 조사가 요구되는 지반조사를 목적으로 하여 조사심도를 50m로 고정하였으며, 수평방향의 크기도 조사대상 영역을 50m × 50m로 설정하였다. 크기 50m × 50m의 정사각형 조사대상영역 내에 심도 50m인 4개의 시추공에서 자료를 획득한 것으로 가정하였다. 각 시추공의 위치는 조사대상영역의 중앙을 원점으로 할 경우 각각 H<sub>1</sub> (-20m, -20m), H<sub>2</sub> (20m, -20m), H<sub>3</sub> (20m, 20m) 및 H<sub>4</sub> (-20m, 20m)로 설정하였다. 조사 대상영역은 크기 5m × 5m × 5m인 정육면체 요소로 분할하였다. 따라서 총 요소의 개수는 10 × 10 × 10 = 1000 이다. 전극배열은 양극자(bipole-bipole)배열을 사용하였으며, 측정은 두 개의 시추공에 동일심도에 전류전극을 위치시키고 나머지 두 개의 시추공에서 전위전극을 동일심도를 유지하면서 2.5m 간격으로 이동시키면서 겐보기비저항 자료를 획득하였다. 이러한 작업이 끝나면 전류전극을 2.5m 이동시키고 앞의 과정을 반복하여 자료를 획득하였다. 따라서 본 연구에 사용된 총 자료의 수는 1764개가 된다.

역산 알고리즘의 정확성 및 안정성을 검토하기 위하여, 확장된 Born 근사법을 사용하여 얻어진 이론자료에 대하여 역산을 수행하였다. 주변매질의 전기전도도 0.01 S/m를 정확히 안다는 가정 하에 원점을 중심으로 크기 10m × 10m × 10m, 전기전도도 0.1 S/m인 정육면 이상체에 대한 이론자료를 계산하고, 이를 측정값으로 하여 역산을 수행하였다. Fig. 1은 그 결과를 3차원으로 표현한 것으로 비교적 정확히 이상체의 위치를 추정하고 있다. 따라서 확장된 Born 근사법을 사용한 역산 알고리즘은 전기비저항 3차원 토모그래피에서 적절하게 사용될 수 있음을 보여준다.

### 4. 결론

현재 2차원 역산에 의존하고 있는 전기비저항 토모그래피를 3차원으로 확장하기 위하여 3차원 역산 알고리즘을 개발하고 정육면 이상체에 의한 이론자료에 대하여 전기비저항 3차원 토모그래피 영상을 구현하였다. 그 결과 비교적 정확히 이상체의 위치 및 형상을 추정하였다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 주변 모암의 전기전도도를 이미 안다는 가정 하에 개발되었다. 하지만 실제로는 조사대상 지역의 전기전도도는 알려진 값이 아니므로 본 연구의

결과는 근본적으로 한계를 갖고 있다. 그러나 측정된 전체자료를 분석하면 조사 대상지역의 평균적인 전기전도도를 예측할 수 있을 것으로 보이며, 이 값이 약간의 차이가 있다고 해도 얻어지는 결과가 모암의 전도도에 대한 상대적인 영상을 보여주므로 큰 문제는 아닌 것으로 보인다. 앞으로 모암의 전도도 결정 및 좀더 복잡한 모형에 대한 연구가 이루어진다면 전기비저항 3차원 토모그래피를 국내에 정착시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 조인기, 서백수, 김진호, 1999, "확장된 Born 근사법에 의한 전기비저항 3차원 모델링", *한국자원공학회지*, 인쇄중
2. Habashy, T.M., Groom, R.W., and Spies, B.R., 1993, "Beyond the Born and Rytov approximations: A nonlinear approach to electromagnetic scattering", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, pp.1759-1775.
3. 조인기, 서정희, 1998, "확장된 Born 근사에 의한 시추공간 전자탐사 2.5차원 모델링", *물리탐사*, Vol. 1, pp. 127-135.
4. Torres-Verdin, C., and Habashy, T.M., 1994, "Rapid 2.5 dimensional forward modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximation", *Radio Science*, Vol. 29, No. 4, pp. 1051-1079.
5. 조인기, 심현미, 1998, "확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피", *물리탐사*, Vol. 1, pp. 155-160

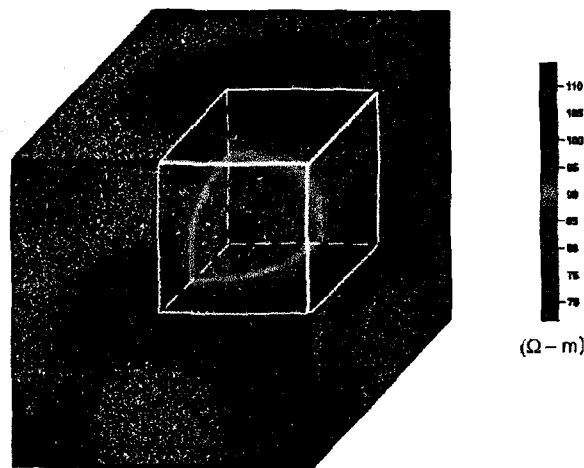


Fig. 1. Volume image of the inversion result for a cubic model