

## 구형도체에 대한 루프-루프 전자탐사 자료 역산

정현기<sup>1)\*</sup>

### Loop-loop EM Inversion for a Conducting Sphere

Hyun-Key Jung\*

(Received 13 October 2014; Final version Received 20 October 2014; Accepted 16 October 2014)

**Abstract :** The electromagnetic(EM) response of a conductive sphere excited by an alternating magnetic field has been a traditionally important problem. In this study, following the former studies, EM inversion is applied to frequency domain EM data for estimation of location, size, and electrical characteristic of a conducting sphere in a magnetic dipole field using Levenberg-Marquardt method. Earth parameters are well resolved even on 7 data points line survey with single frequency. In areal survey, single frequency survey data with many spatial measuring points shows better estimates for the all parameters than multi frequency survey data with a few measuring points. This enhanced algorithm implemented using MATLAB could be applied to airborne EM interpretation, loop-loop EM data analysis on land, and borehole 3D application. It also can be quite helpful for a realtime interpretation of fast survey application which can sweep large minefield.

**Key words :** EM inversion, Conducting sphere, Frequency domain EM

**요약 :** 고전적인 3차원 전자탐사뿐만 아니라 최근의 항공 전자탐사나 지상 다주파수 전자탐사에 있어 그 3차원 해석은 역산기술의 발전에도 불구하고 쉽지 않다. 막대한 메모리와 전산시간을 요구하는 3차원 전자탐사 자료 역산 대신에 단순한 구형도체에 대해 간단한 3차원 역산을 할 수 있는 연구결과를 제공한다. Levenberg-Marquardt 알고리즘을 적용시켜 지하도체의 위치, 크기 및 전기적 물성을 최적 추정하게 되는 주파수 영역 전자탐사 자료의 역문제 계산을 수행하였다. 전산 모델링 및 역산 절차는 MATLAB 환경에서 프로그래밍 하였다. 이 연구결과는 항공 전자탐사, 다양한 배열의 지상 루프-루프 전자탐사, 시추공 전자탐사 등의 자료해석에 적용 가능하다. 특히 자화율/전기전도도 동시 반영의 지뢰탐지 등과 같은 UXO(Unexploded Ordnance) 탐지에 실시간 역산 활용될 수 있다.

**주요어 :** 전자탐사자료 역산, 구형도체, 주파수영역 전자탐사

## 서 론

고전적인 3차원 전자탐사뿐만 아니라 최근의 항공 전자탐사나 지상 다주파수 전자탐사에 있어 그 해석은 역산기술의 발전에도 불구하고 쉽지 않다. 항공 전자탐사의 경우 3차원 해석을 위해서는 지하 전도체를 단순한 구형이나 육면체 판으로 상정하여 해석하게 된다. 최근에 기술의 발전으로 3차원 전자탐사 자료의 역산이 시도

되고 있으나 여전히 막대한 메모리와 컴퓨터 계산시간을 요구하기 때문에 현장문제는 지하 대상체를 구나 판으로 상정하여 실용적인 해석을 하게 된다. 전기탐사가 최근 하드웨어 및 역산 소프트웨어에 있어 괄목할 발전을 하였으나 전극을 지표에 직접 접촉해야 하는 고질적인 현장문제와 대상체가 높은 전도체일 경우에는 전자탐사에 비해 적용성이 불리하다. 거꾸로 전자탐사는 현장에서 애로사항인 전극의 양호한 매설문제가 없고 또한 높은 전도체의 탐지에 유리하다 하겠다. 이 연구에서는 단순한 구형도체에 대해 막대한 메모리와 전산 계산시간을 요구하는 3차원 전자탐사 자료처리 대신에 간단한 3차원 역산을 할 수 있는 연구결과를 제공한다.

이 연구에서는 나아가 이러한 개선된 방법을 이용하여 주어진 임의의 측정자료에 최근 각종 비선형 역문제에 효

1) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부,  
과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학과

\*Corresponding Author(정현기)

E-mail; hkjung@kigam.re.kr

Address; Dept. of Exploration Geophysics and Mining  
Engineering, Korea Institute of Geoscience and  
Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

과적으로 널리 쓰이고 있는 레벤버그-마퀴트(Levenberg-Marquardt) 법을 적용시켜 지하도체의 위치, 크기 및 전기적 물성을 최적 추정하게 되는 주파수영역 전자탐사자료의 역문제를 시도하였다. 또한 MATLAB을 활용하여 모델링 및 역산 알고리즘을 개선하여 편리하고 빠르게 사용할 수 있도록 하였다. 이는 구형 매질 도전체의 신속한 탐지가 필요한 현장의 발생과 더불어 최근의 저전력 고속 전자 발전에 힘입어 휴대용 실시간 현장 그래픽 탐지기 설계에도 도움을 줄 수 있다.

최근 다양한 항공 전자탐사 시스템들이 현장에서 활발하게 응용되고 있다. 이들 전자탐사자료로부터 3차원 대상체를 영상화하는 기술은 여전히 어려운 문제로, 대용량의 계산처리능력과 복잡한 알고리즘을 필요로 한다. 3차원 대상체의 크기 및 깊이 정보를 얻기 위해 탐사자료를 해석할 때 빠르게 초기값을 추정하는 것은 역산결과의 정확도와 역산속도에 매우 중요하다. 그래서 항공 전자탐사 자료의 해석을 우선적으로 간단하게 접근하고자 할 때 구형(Sphere)과 판형(Plate) 모델 두 가지를 사용한다.

구형 도전체의 전자반응 해석은 3차원 수치모델링을 수행할 경우 계산 시간이 많이 소요되므로 지상 및 항공 전자탐사에서 탐사 대상체가 덩어리 형태일 경우 구형으로 가정하여 신속한 반응 해석을 시도한다. 이 고전적 해석하는 최근까지 주파수영역 지뢰 전자반응 응용에도 유용하다(Huang and Won, 2003). 더구나 구형도체의 크기, 전기전도도, 위치 등을 파악하기 위한 탐사 주파수 및 최적 측정 등의 선정을 위한 대량의 3차원 역산 실험은 거의 불가능하므로 해석해를 실용적으로 동원한다. 이러한 응용은 근래에 매장 도전체 또는 지뢰 등의 신속한 광역 탐사 필요성과 더불어 아예 탐지기내에 역산 알고리즘을 내장할 수 있도록 한다. 이는 휴대용 소형 단말기의 급격하고 다양한 상업화 추세에 비추어 볼 때 가까운 시일 안에 지구물리 탐사장비도 착용(Wearable) PC 형태로 발전될 것으로 예견되는데, 이 때 적용 기초 근거가 될 수 있다.

### 연분수전개 고속 모델링 계산

구형도체의 전자탐사 반응 계산은 전통적으로 매우 중요한 문제로 평면파의 경우 그 계산이 아주 간단하지만 일반적으로 많이 사용하는 자기쌍극자원의 경우 매우 복잡해진다.

Wait(1953)가 구형도체 직상부에 송신자기쌍극자가 있을 경우, 임의 위치에서의 자장의 세기를 유도한 이후 시간영역 및 주파수영역에서의 전자반응 계산에 대한 많

은 연구가 있었다. 도체에 대한 송수신 코일의 임의의 위치에서의 전자반응의 계산이 Best and Shammam (1979)에 의해 이루어졌으며, Rai (1982, 1983)는 이를 광체의 자화율이 전자탐사에 미치는 영향에 관한 연구에 적용하였다. 그러나 이러한 연구들에서도 그 해가 매우 복잡하고 반응함수(Response function)의 계산에 있어 다극자(Multipole)에 대해 고려할 때  $n=20$  이상의 계산을 할 수 없었다. 하지만 송수신 간격이 가깝다면 다극자  $n=20$  이상에 대해서 계산해야 정확한 반응함수를 구할 수 있다.

Jung and Suh(1985)는 자기쌍극자원에 의한 구형도체의 주파수영역 전자반응의 일반해 계산에 좌표계 회전과 연분수전개(Cuyt et al, 2008)를 이용하여 계산과정을 더 빠르고 간단하게 하였으며, 넓은 범위의 반응변수에 대하여 반응함수를 정밀하게 계산할 수 있도록 하였다.

그 결과를 좀 더 단순화 정리하면 다음과 같다. Fig. 1의 송신점에서 임의 방향의 송신 자기쌍극자  $m_t = (m_r, m_\theta, m_\phi) e^{j\omega t}$ 가 주어질 때 구하고자 하는 이차장의 세기  $H_R^{(s)}$ 는 총 5개의 성분으로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$H_R^{(s)} = (H_r^r + H_\theta^r, H_r^\theta + H_\theta^\theta, H_\phi^\phi) \quad (1)$$

여기서  $r, \theta, \phi$ 는 구좌표계의 성분들이고,  $\omega$ 는 송신 각주파수,  $H_r^r, H_\theta^r, H_r^\theta, H_\theta^\theta, H_\phi^\phi$ 는 아래첨자 방향의 송신성분에 의한 위첨자 방향 성분의 이차장 세기를 나타내며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_r^r &= -\frac{m_r}{4\pi} \cdot e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \cdot \frac{a^{2n+1}}{(rr_0)^{n+2}} \cdot n(n+1)P_n(\cos\gamma) \\ H_r^\theta &= -\frac{m_r}{4\pi} \cdot e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \cdot \frac{a^{2n+1}}{(rr_0)^{n+2}} \cdot nP_n^1(\cos\gamma) \\ H_\theta^r &= \frac{m_\theta}{4\pi} \cdot e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \cdot \frac{a^{2n+1}}{(rr_0)^{n+2}} \cdot nP_n^1(\cos\gamma) \\ H_\theta^\theta &= -\frac{m_\theta}{4\pi} \cdot e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \cdot \frac{a^{2n+1}}{(rr_0)^{n+2}} \cdot (n^2 P_n - \frac{n}{n+1} \cot\gamma P_n^1) \\ H_\phi^\phi &= -\frac{m_\phi}{4\pi} \cdot e^{j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \cdot \frac{a^{2n+1}}{(rr_0)^{n+2}} \cdot \frac{n}{n+1} \csc\gamma P_n^1 \quad (2) \end{aligned}$$

여기서  $Z_n$ 은 반응함수이고,  $P_n$ 과  $P_n^1$ 은 르장드르 함수이다.

복소형태의 반응함수  $Z_n$ 은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$Z_n = \frac{ka - \frac{I_{n+\frac{1}{2}}(ka)}{I_{n-\frac{1}{2}}(ka)} \cdot [n + K(n+1)]}{ka + \frac{I_{n+\frac{1}{2}}(ka)}{I_{n-\frac{1}{2}}(ka)} \cdot [n(K-1)]} \quad (3)$$

여기서  $K = \frac{\mu}{\mu_0}$ ,  $k^2 = j\sigma\mu\omega$ ,  $I_{n+\frac{1}{2}}$  과  $I_{n-\frac{1}{2}}$  는 Modified spherical Bessel function이다.  $K=1$ 이라고 가정하면, 식 (3)은 다음의 식 (4)로 쓸 수 있다.

$$Z_n = 1 - \frac{2n+1}{ka} \cdot \frac{I_{n+\frac{1}{2}}(ka)}{I_{n-\frac{1}{2}}(ka)} = 1 - \frac{2n+1}{ka} \cdot J_{n+1}(ka) \quad (4)$$

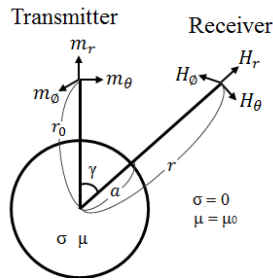
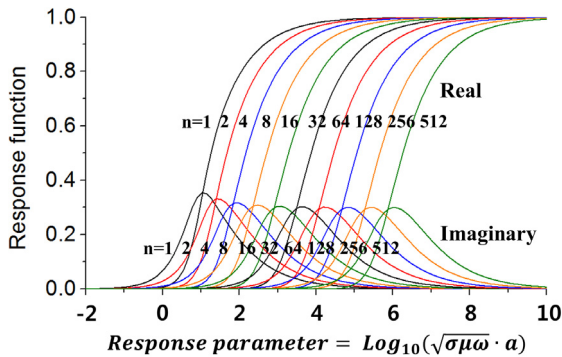


Fig. 1. Coordinate system in which the transmitter axis coincides with the z-axis.



(a) K=1

여기서  $J_{n+1} = I_{n+\frac{1}{2}} / I_{n-\frac{1}{2}}$ 이다.

연분수전개를 위해 식 (5)의 순환공식을 이용하여 식 (6)을 얻을 수 있으며, 이를 순차적으로 연분수전개하면 식 (7)과 같이 된다. 이제 반응함수  $Z_n$ 의 계산결과로 Fig. 2와 같은 곡선들을 얻게 된다. 여기서는 이전과 달리  $n=20$  이상도 계산할 수 있으며, 반응변수의 범위도 훨씬 넓게 계산할 수 있다.

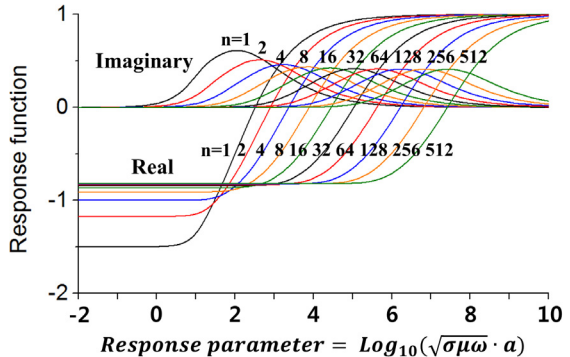
$$I_{n-\frac{1}{2}}(ka) - I_{n+\frac{3}{2}}(ka) = \frac{2n+1}{ka} \cdot I_{n+\frac{1}{2}}(ka) \quad (5)$$

$$J_{n+1} = \frac{1}{J_n} - \frac{2n+1}{ka} \quad (6)$$

$$J_n = \frac{ka}{(2n+1) + ka \cdot J_{n+1}} \quad (7)$$

$$= \frac{ka}{(2n+3) + \frac{k^2 a^2}{(2n+1)(2n+3) + \frac{k^2 a^2}{(2n+3)(2n+5) + \dots}}$$

계산과정에 있어 순환공식의 이용으로 인해 누적될 수 있는 반올림(round off) 오차 및 절단(truncation) 오차를 최소화하기 위해 르장드르 다항식을 식 (8)과 같은 형태를 취하여 사용하였다(Arfken and Weber, 2012).



(b) K=10

Fig. 2. The graphical relationship between real and imaginary part of response functions and response parameter for the multipole moments of order 1, 2, 4, 8, 16... and 512 for a spherical conductor in the field of a magnetic dipole. The relative permeability K is equal to (a) 1 (b) 10.

$$\begin{aligned}
 P_1(\cos \gamma) &= \cos \gamma, & P_2(\cos \gamma) &= \frac{1}{2}(3\cos^2 \gamma - 1) \\
 P_{n+1} &= 2\cos \gamma P_n - P_{n-1} - \frac{(\cos \gamma P_n - P_{n-1})}{(n+1)} \\
 \left( \frac{P_1^1}{\sin \gamma} \right) &= 1, & \left( \frac{P_2^1}{\sin \gamma} \right) &= 3 \cos \gamma \\
 \left( \frac{P_{n+1}^1}{\sin \gamma} \right) &= 2\cos \gamma \left( \frac{P_n^1}{\sin \gamma} \right) - \left( \frac{P_{n-1}^1}{\sin \gamma} \right) \\
 &+ \frac{\left\{ \cos \gamma \left( \frac{P_n^1}{\sin \gamma} \right) - \left( \frac{P_{n-1}^1}{\sin \gamma} \right) \right\}}{n} \quad (8)
 \end{aligned}$$

### 역산 방법

앞서 기술한 개선된 모델링 알고리즘을 이용하여 각종 비선형 역문제에 효과적으로 널리 쓰이고 있는 레벤버그-마퀴트법을 적용시켜 역문제를 계산할 수 있도록 하였다.

레벤버그-마퀴트법은 가우스-뉴턴법(Gauss-Newton method) 보다 안정적으로 해를 찾을 수 있으며, 비교적 빠르게 해에 수렴하기 때문에 비선형 최소제곱 문제에 있어서 자주 사용된다. 이 방법은 가우스-뉴턴법과 최대경사법(Steepest gradient method)이 결합된 방법이라고 할 수 있다. 발산의 우려는 크지만 빨리 수렴하는 가우스-뉴턴법과 수렴속도는 느리지만 반드시 국부적인 최소값에라도 수렴하는 최대경사법의 장점을 취하여 혼합된 방식이다. Damping factor  $\lambda$ 를 조절하여 해를 찾아가게 되는데, 임의의 반복(Iteration) 단계에서의 잔차가 이전 단계에서의 잔차에 비해 증가하거나 감소폭이 적으면 최대경사법 방식으로 빠르게 해를 찾고, 감소하면  $\lambda$ 에 작은 값을 사용하여 가우스-뉴턴 방식으로 해를 찾는다. 따라서 다른 방법들과 비교하여 안정적이면서도 빠르게 해를 찾을 수 있어서 대부분의 비선형 최소제곱 문제에 적용된다.  $\lambda$ 의 초기값 설정 및 증감 비율은 특정 문제에 따라 경험과 시행착오를 요구하는 문제이다. 이 연구에서는 대부분  $\lambda$ 의 초기값을 0.01로 하고 한 번의 계산 후 발산하면 4배하고, 수렴하면 1/4배하여 다음 단계로 넘어가도록 하였다.

역산은 초기값을 어떻게 주느냐에 따라 그 결과가 크게 달라질 수 있어 초기값 설정은 매우 중요한 문제이다. 초기값을 실제 해에 근접한 값으로 설정할수록 좋은 결과를 얻을 수 있다. 따라서 대략적으로라도 해를 구해서 그 값을 초기값으로 넣을 수 있다면 훨씬 효율적인 역산을 할 수 있는 것이다. 이러한 측면에서 이 연구의 결과는 단순 피상체 탐지문제에 있어 큰 계산용량과 많은 시

간이 필요한 3차원 전자탐사자료 역산의 효율을 높일 수 있을 것이다. 또한 항공 전자탐사 자료의 해석 및 지상 루프-루프 전자탐사 자료에도 적용 가능하며, 이를 확장하면 시추공 전자탐사, Square loop 송신 지표-시추공 전자탐사, 시간영역 전자탐사 등의 전자탐사 자료 역산에 활용 가능하다. 특히 자화율 물성을 전기전도도 물성과 함께 반영하는 3차원 형상 UXO(Unexploded Ordnance) 탐지(Huang and Won, 2001; Huang and Won, 2003)와 같은 실시간 역산이 요구되는 분야에서 유용하게 활용될 수 있다.

### 역산결과 비교

#### 측선상 자료의 역산

이 논문에서 작성한 역산해석 프로그램을 적용해보기 위해 Lodha and West(1976)의 모형 중 하나를 사용하여 네가지 경우의 인위적인 자료를 만들었다. 주어진 모형은 광체 심도  $Z_0=15$ , 구의 반경  $a=5$ , 전기전도도  $\sigma=955$ 이며 탐사 주파수는 1000Hz이고 측선은 광체 직상부를 지난다. 지표면상의 구의 중심의 좌표  $X_0, Y_0$ 는 임의의 원점 선택에 의해 62.5, 80으로 주어진다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 A의 경우는 13측점에 대한 자료에 역문제를 적용시킨 것이다. 나머지 세가지 경우와 마찬가지로 역산시의 초기값은  $X_0=50, Y_0=100, Z_0=17, a=4, \sigma=1000$  으로 설정하였다. Table 1에서 그 결과를 살펴보면 거의 모든 추정값이 참값에 맞게 잘 산출되었다. 매우 만족스러운 결과이지만 그 중에서  $Y_0$ 의 추정값이 상대적으로 조금 좋지 않으며 이와 관련하여  $Z_0, a, \sigma$  등도 조금씩 참값과 차이를 보인다.

B의 경우는 A의 경우와 모든 조건이 똑같으나  $Y_0$ 의 값을 안다고 가정하고 역문제를 적용시킨 것이다. 추정 결과가 나아졌으나 여전히  $Z_0, a, \sigma$ 의 값이 참값과 조금 다르다. 이는 구의 심도, 반경, 전기전도도가 상호 연관성이 있기 때문이라 생각된다. 역해계산 소요시간은 A나 B나 비슷하다. C의 경우는 측점수가 대폭 줄어든 7측점의 경우이다. 측정 개수가 감소하였으나 양호한 추정이 이루어졌으며 당연히 전산 소요시간은 적어졌다. D의 경우는 Fig. 3에서와 같은 5측점에 대해 500, 1000, 2000, 4000 Hz의 4개 주파수를 각각 사용한 자료에 대해 역문제를 적용시킨 것이다. 결과적으로 20개의 자료가 주어진 셈인데 증가한 자료의 개수에 비해 추정 결과는 오히려 조금 못하다. 그러나 전반적으로 양호한 추정이 이루어진 셈이며 전산 소요시간은 역시 예상대로 증가하였다. 이러한 사실에서 볼 때 여러 주파수의 자료보다는 공간적으로 일정 수 이상의 보다 많은 지점에서의 자료가 역문제에 유리함을 알 수 있다.

**지표면 측정자료의 역산**

한 개 측선을 따른 자료가 아닌 지표면 여러 지점에서의 여러 주파수 측정자료에 대해 역문제를 적용시켜 보았다. 모형은 시간영역에서 적용한 Lee(1984)의 경우와 똑같이 하였는데 Fig. 4와 같다. 즉,  $Z_0=100$ ,  $a=50$ ,  $\sigma=5$ 에 대해 지표면상에서의 4측점 5개 주파수의 자료를 사용하였다. Lee는 시간영역에서 반경 50의 원형 송수신 동일루프를 사용하고 측정 채널은 0.5, 1, 2, 3, 4 ms로 하였으나 본 논문에서는 송수신간격 50의 수평동일평면 자기쌍극자배열에 대해 0.5, 1, 2, 4, 8 kHz의 주파수를 사용하였다. 주파수의 선정은 Lee의 시간영역의 경우와 비슷한 조건으로 맞추기 위해 대략  $2\pi ft=1$ 이 되게 정하였다. 여기서  $f$ 는 주파수(Hz)이고  $t$ 는 채널 시간(sec)이다. 역해 계산시의 초기값은 Lee의 경우와 마찬가지로 설정하였다.

Table 2에 결과가 주어지는데 괄호안의 숫자는 Lee의 추정값이고,  $\sigma_m$ 은 Lee만의 변수로서 모암의 전기전도도이다. 우선 전혀 잡음이 섞이지 않은 인위적 자료의 경

우 양호한 추정값이 얻어졌으며 특히  $X_0$ ,  $Y_0$ 가 잘 맞았고  $Y_0$ 는 완전한 참값이 산출되었다. 이는 쌍극자배열의 방향성과 연관이 있다고 생각된다.  $Z_0$ ,  $a$ ,  $\sigma$ 가 참값에 덜 가까운 것은 앞서의 한 측선상의 자료의 역해의 경우와 마찬가지로 세 변수가 상호연관성이 있는 때문이라 생각된다. 다음에 무작위 오차(Random error)를 똑같은 모형에 대해 5%, 10%, 20%씩 섞은 경우를 살펴보자. Table 2에서 보다시피 전반적으로 Lee의 경우와 큰 변화의 폭이 없는 추정값들이 산출되었다. 역시  $X_0$ ,  $Y_0$ 값은 잘 추정되었고 나머지 값들은 상대적으로 덜 만족스럽게 추정되었다. 그러나 최대 20%의 무작위 오차를 섞은 자료에 대해서도 양호한 추정 결과가 얻어졌다. 단, 인위적으로 섞은 오차는 각 측정에서의 측정값 자체에 대한 %이다. 여기서 주어진 조건에서는 4측점에서의 이상값의 크기가 거의 비슷하다.

Table 3은 역해계산에 있어 초기값의 선정이 최종 결과에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 여러 가지 경우로 초기값을 변화시켜본 결과이다. 초기값 선정

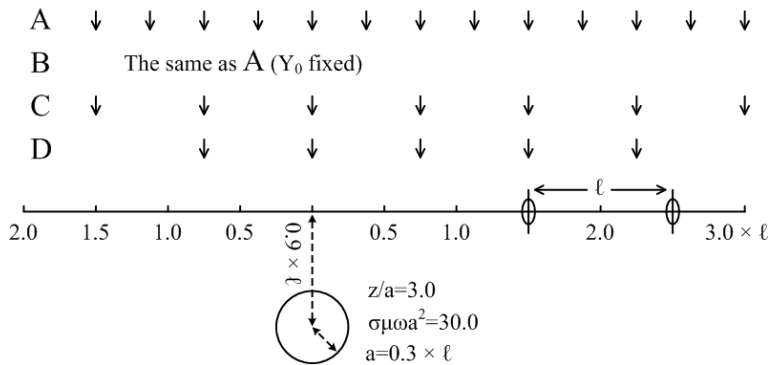


Fig. 3. Various line survey data of a model where  $z=0.9l$ ,  $z/a=3.0$ , and  $\sigma\mu\omega^2=30.0$  for inversion.

Table 1. Inversion results of line survey data for Fig. 3.

	True value	Initial value	A. 13 data	B. 13 data $Y_0$ fixed	C. 7 data	D. 5 data 4 frequencies
$X_0$	62.5	50	62.499	62.50	62.49	62.49
$Y_0$	80	100	80.329	(80)	78.92	78.99
$Z_0$	15	17	14.990	15.026	14.90	14.885
$a$	5	4	4.998	5.011	4.985	4.97
$\sigma$	955	1000	955.64	951.4	952.5	963.17
$f$			1000 Hz	1000 Hz	1000 Hz	500, 1000, 2000, 4000 Hz
Relative CPU Time			1.30	1.25	0.95	1.50

을 제외한 모든 주어진 조건은 앞서의 Fig. 4의 경우와 동일하다. 몇몇 경우는 발산하였고 나머지 거의 모든 경우도 만족할 수 없는 결과나 엉터리 결과를 얻었다. 향후 개선된 방법이 필요하지만 현재 결국 Table 2에서 선정된 초기값들의 수준이 역해계산이 가능한 한계이며 이 수준만 하더라도 충분히 실용성이 있을 만큼 참값에서 제법 멀리 떨어진 수치들이다. Table 3에서 빈칸의 괄호는 초기값을 워낙 멀리 두었기 때문에 한 번의 반복계산도 이루지 못하고 발산한 경우들이다. 그리고 표에서  $Z_0$ 의 최종 추정값이 음의 값으로 나오는 경우가 몇 개 있

는데 이는 지면에 대해 수평동일평면 쌍극자배열 전자탐사의 경우 아래, 위를 전혀 구분할 수 없기 때문이다. 즉 똑같은 조건의 구형 광체가 지면 아래에 있거나 지면 위에 있거나 그 전자반응의 값은 같기 때문이며, 역해의 고찰시 큰 문제가 되지 않기 때문에 음의 값을 무시해 버려도 광체의 심도 추정에 전혀 상관이 없다.

Table 3에서 좋지 않은 결과를 얻은 거의 모든 경우에 있어서도  $Y_0$ 의 값만은 매우 잘 추정되고 있다. 이는 각 측정에서의 송수신코일의 배열과 관련이 있다. 각 측정에서 송수신코일의 배열을 Fig. 4의 경우와 수직되게 한

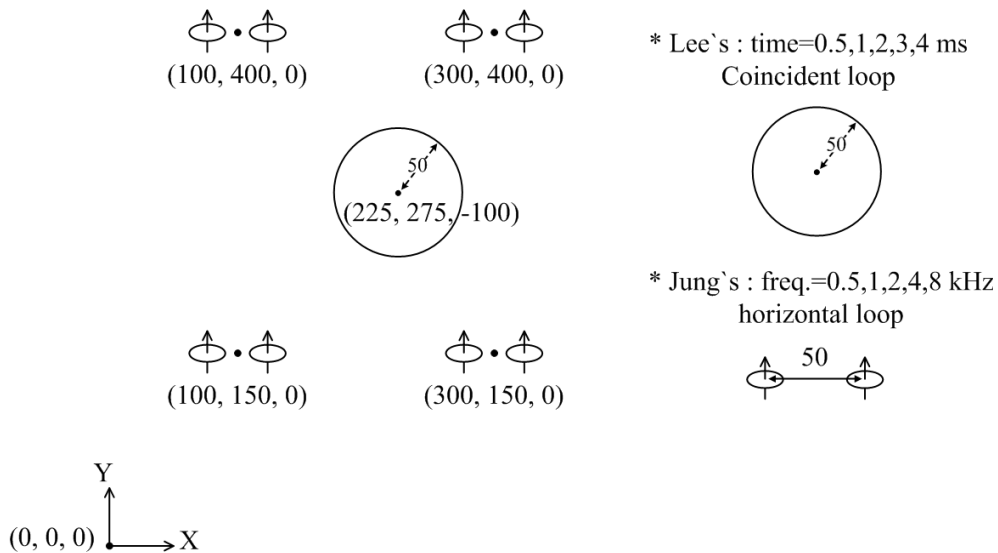


Fig. 4. Areal survey data for inversion. The model geometry is same as Lee(1984).

Table 2. Inversion results of areal survey data for Fig. 4.

Parameter	True Value of parameter	Estimates of parameter	Final Value for 0% noise	RANDOM ERROR		
				5%	10%	20%
$(\sigma_m)$	0.0 (0.01)	(0.005)		(0.01)	(0.01)	(0.01)
$\sigma$	5.0 (5.0)	2.50	4.91	4.87 (4.90)	4.79 (4.60)	4.82 (4.88)
$a$	50.0 (50.0)	30.0	50.48	50.62 (50.47)	51.00 (51.72)	50.70 (51.16)
$X_0$	225.0 (225.0)	190.0	225.31	225.02 (225.05)	224.83 (224.02)	223.83 (222.21)
$Y_0$	275.0 (275.0)	290.0	275.00	274.72 (274.64)	274.72 (275.79)	273.83 (273.77)
$Z_0$	100.0 (100.0)	60.0	102.62	103.57 (100.53)	105.67 (102.39)	104.36 (102.70)

다면  $X_0$ 의 값이 아주 잘 추정될 수 있을 것이다. 송수신 동일루프의 시간영역 전자탐사와는 달리 주파수영역 쌍극자배열 전자탐사의 경우 송수신코일을 적절히 변화시켜 배열함으로써 보다 나은 지하정보의 추정을 가능하게 할 수 있다. 한편 Table 3에서 대부분의 경우 발산하거나 만족할만한 결과를 얻지 못한 것은 1차원 측정 자료로부터 2, 3차원의 지하정보를 얻으려는 근본적인 문제점 때문이다. 이러한 수학적으로 불가능한 문제를 해결

하기 위해 중력 및 자력탐사의 경우와 마찬가지로 광체 모양을 특정하게 가정하거나 여러 가지 제약조건을 가하게 되지만 측정 자료에 잡음이 많이 섞이거나 초기값의 선정이 좋지 않으면 추정변수들의 값이 원하지 않는 극부적 극점에 도달하게 되는 경우를 피할 수 없다.

역산을 할 때 초기값의 선정은 표준곡선이나 특성곡선을 이용할 수 있으나 경험과 시행착오를 요구한다.

**Table 3.** The effect of initial value and random noise in the inversion of areal survey data for Fig. 4.

Random noise	$X_0$ (225)	$Y_0$ (275)	$Z_0$ (100)	$a$ (50)	$\sigma$ (5)	Iterations	Relative CPU time	Results
0%	190 (225.31)	290 (275.00)	60 (102.62)	30 (50.48)	2.5 (4.91)	9	1.71	EXCELLENT
0%	1025 ( - )	1075 ( - )	60 ( - )	30 ( - )	2.5 ( - )	0	0.41	DIVERGE
0%	625 ( - )	675 ( - )	60 ( - )	30 ( - )	2.5 ( - )	0	0.35	DIVERGE
0%	325 (220.24)	375 (275.00)	60 (34.60)	30 (43.08)	2.5 (6.91)	27	3.87	POOR
0%	275 (220.66)	325 (275.00)	60 (45.71)	30 (43.64)	2.5 (6.91)	28	4.92	POOR
0%	275 (222.43)	325 (275.00)	70 (73.97)	35 (46.13)	3 (5.90)	12	2.39	FAIR
0%	210 (232.04)	260 (275.00)	60 (-148.04)	30 (61.25)	10 (3.37)	9	2.07	POOR
0%	190 (252.07)	290 (275.00)	60 (-235.38)	30 (94.31)	10 (-1.52)	16	3.04	POOR
0%	210 (239.95)	260 (270.00)	60 (187.37)	100 (74.23)	2.5 (2.35)	16	3.39	POOR
0%	190 (257.66)	290 (275.00)	60 (254.46)	100 (103.49)	2.5 (1.30)	17	4.26	POOR
0%	210 ( - )	260 ( - )	200 ( - )	30 ( - )	2.5 ( - )	0		DIVERGE
0%	190 (227.98)	290 (275.00)	200 (122.87)	30 (54.70)	2.5 (4.19)	16	2.64	FAIR
5%	190 (225.34)	290 (274.97)	60 (100.66)	30 (50.22)	2.5 (4.88)	14	2.86	GOOD
10%	190 (230.53)	290 (274.93)	60 (135.42)	30 (58.02)	2.5 (3.63)	16	2.54	FAIR
10%	210 (223.51)	260 (274.94)	60 (80.56)	30 (47.15)	2.5 (5.47)	14	2.71	FAIR
10%	190 (220.28)	290 (274.95)	70 (-17.94)	35 (42.75)	3.0 (6.88)	25	4.39	POOR

## 결 론

## 사 사

고전적인 3차원 전자탐사뿐만 아니라 최근의 항공 전자탐사나 지상 다주파수 전자탐사에 있어 그 해석은 역산기술의 발전에도 불구하고 용이하지 않다. 항공 전자탐사의 경우 3차원 해석을 위해서는 지하 전도체를 단순한 구형이나 육면체 판으로 상정하여 해석하게 된다. 최근에 기술의 발전으로 3차원 전자탐사 자료의 역산이 시도되고 있으나 여전히 막대한 메모리와 컴퓨터 계산시간을 요구한다. 그렇지만 상당한 현장문제는 지하 대상체를 구나 판으로 상정하여 실용적인 해석을 한다. 이 연구에서는 단순한 구형 도체에 대해 막대한 메모리와 전산 계산 시간을 요구하는 3차원 전자탐사 자료처리 대신에 간단한 3차원 역산을 할 수 있는 연구결과를 제시하였다.

구형 도체에 대한 주파수영역 전자반응의 일반해 계산에 좌표계 회전과 연분수 전개를 이용하여 계산 과정을 더 빠르고 간단하게 하였으며, 넓은 범위의 반응변수에 대하여 반응함수를 정밀하게 계산할 수 있도록 한 선행연구에서 나아가 역해를 계산하는 프로그램을 개발하였다. 또한 이들 모델링 및 역산 프로그램은 MATLAB을 활용하여 편리하고 빠르게 사용할 수 있도록 개선하였다. 이를 이용하여 지하도체의 위치, 크기 및 전기적 물성을 추정하는 주파수영역 전자탐사자료의 역문제를 계산하였다.

측선상 자료의 역문제에 있어 7축점 단일 주파수만의 자료로서도 양호한 추정값이 산출되었으며, 여러 주파수의 적은 축점 자료보다 공간적으로 보다 많은 지점에서 자료의 역문제 해석에 유리하였다. 광체의 심도 및 반경, 전기전도도는 상호연관성이 있으며 광체의 지표면상의 위치가 가장 잘 추정되었다. 지표면상의 4축점 각 5개 주파수 자료의 역문제에 있어서는 최대 20%의 무작위 오차를 혼합해도 동일한 구형광체 존재 조건의 시간영역의 역해에 상응되는 양호한 추정값이 산출되었다.

이 연구의 결과는 항공 전자탐사 자료의 해석에 적용될 수 있고 GEM 계열 EM 탐사기와 같은 지상 루프-루프 전자탐사 자료에도 적용 가능하다. 또한 이 연구를 바탕으로 향후 확장하면 시추공 전자탐사, Square loop 송신 지표-시추공 전자탐사, 시간영역 전자탐사 등의 전자탐사 자료 역산에 활용 가능하다. 특히 자화율 물성을 전기전도도 물성과 함께 반영하는 3차원 형상 UXO 탐지와 같은 실시간 역산이 요구되는 분야에서 유용하게 활용될 수 있다. 즉, 항공/육상/시추공 루프-루프 전자탐사 일선 현장 문제의 상당수는 현재까지 여전히 구형도체에 가까운 덩어리 형태의 이상체 추적이기 때문에 2차원에 비해 고도로 복잡한 3차원 전자탐사 일반 역산해법보다 이 연구결과의 적용이 훨씬 실용적일 수 있는 것이다.

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “심부 금속광체 정밀 물리탐사 및 채광기술 개발”과 민군겸용 기술개발사업인 “이상체 정밀 탐지용 고감도 전/자기장 통합 모니터링 시스템 기술 개발”의 일환으로 수행되었다.

## References

- Arfken, G. and Weber, H., 2012, *Mathematical Methods for Physicists*, Academic Press; Seventh Edition.
- Best, M.E. and Shamma, B.R., 1979, “A generalized solution for a spherical conductor in a magnetic dipole,” *Geophysics*, Vol. 44, pp. 781-800.
- Cuyt, A.A.M., Petersen, V., Verdonk, B., Waadeland, H. and Jones, W.B., 2008, *Handbook of continued fractions for special functions*, Springer.
- Huang, H. and Won, I.J., 2001, “Inversion of Multifrequency Electromagnetic Data to a Conductive and Permeable Sphere,” *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2001*. pp. EEM5-EEM5.
- Huang, H. and Won, I. J., 2003, “Characterization of UXO-like targets using broadband electromagnetic induction sensors,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 3, pp. 652-663.
- Jung, H.K. and Suh, J.H., 1985, “Frequency-domain EM response of a spherical conductor to a magnetic dipole field: Part I. Forward problem,” *Journal of the Korean Institute of Mineral and Mining Engineers*, Vol. 22, No. 1, pp. 17-24.
- Lee, T.J., 1984, “Inversion of transient electromagnetic data from spherical conductor,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 22, pp. 14-20.
- Lodha, G.S. and West, G.F., 1976, “Practical airborne EM (AEM) interpretation using a sphere model,” *Geophysics*, Vol. 41, pp. 1157-1169.
- Rai, S.S. and Verma, S.K., 1982, “Quantitative interpretation of horizontal-loop EM measurements using a permeable sphere model,” *Geophysical Prospecting*, Vol. 30, pp. 486-500.
- Rai, S.S., 1983, “The effect of induced multipoles on horizontal-loop EM response of a permeable conducting sphere,” *Geoexploration*, Vol. 21, pp. 13-18.
- Wait, J.R., 1953, “A conducting permeable sphere in the presence of a coil carrying an oscillating current,” *Can. J. Phys.*, Vol. 31, pp. 670-678.



**정 현 기**

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1981년 서울대학교 대학원 지구물리탐사  
공학석사  
1986년 서울대학교 대학원 지구물리탐사  
공학박사

현재 한국지질자원연구원 탐사개발연구실 책임연구원  
(E-mail; [hkjung@kigam.re.kr](mailto:hkjung@kigam.re.kr))

---