

공내수 및 케이싱이 시추공 전자탐사 반응에 미치는 영향

조성준 · 김정호 · 이명종 · 정승환 · 송윤호¹⁾

Effect of Borehole Fluid and Casing on the Borehole Electromagnetic Responses

Seong-Jun Cho, Jung-Ho Kim, Myeong-Jong Yi, Seung-Hwan Chung and Yoonho Song

요 약 : 지하 매질의 전기적 물성 분포를 영상화하기 위한 전자탐사 토모그래피 기술개발의 일환으로 시추공의 공내수 및 케이싱이 전자탐사 반응에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 먼저 시추공에 공내수가 존재할 때 공내수의 전기 전도도를 달리하며 계산한 전자탐사 반응을 고찰한 결과, 단일 시추공 탐사의 경우 송신기에 인접한 곳을 제외하고는 전자탐사 반응은 공내수에 영향받지 않는다. 시추공간 전자탐사의 경우 역시 공내수의 영향을 무시할 수 있어, 전자탐사 토모그래피의 다양한 적용 가능성을 확인하였다. 시추공에 철재 케이싱이 설치되어 있을 때, 단일 시추공 전자탐사 반응은 전적으로 케이싱에 의한 반응이며 주변 매질에 의한 영향은 무시할 수 있는 수준이다. 한편 시추공간 탐사에서는 모암의 전기전도도에 따른 영향을 감지할 수 있으나, 시추공간의 거리가 모암의 표피심도에 비해 매우 가까우면, 근거리장 효과에 의해 모암의 영향이 미약하게 되며 반대로 시추공간의 거리가 멀 경우에는 케이싱에 의한 에너지의 극심한 감쇠로 인해 신호의 측정이 불가능해진다. 따라서 적정수준의 신호수준을 유지하며 모암의 반응을 얻기 위해서는 케이싱의 특성 및 모암의 표피심도를 동시에 고려하여 주파수 범위를 결정해야 하며, 특히 단일 시추공 자료를 이용하여 케이싱의 특성을 정확히 규명할 수 있는 현장탐사 기술의 도움이 요구된다.

Abstract : As a practical developing step of electromagnetic (EM) tomography technique, we quantitatively analyzed the effects of borehole fluid and casing on the borehole EM responses. The EM response turns out to have nothing to do with the property of the borehole fluid except in the close vicinity of the transmitter, which shows the wide perspective of the application of borehole EM. Single-hole responses in the presence of the steel casing thoroughly reflect those of the casing itself since its extremely high induction number or shallow skin depth. EM responses through steel casing do show the information of the host medium. In the near field region which corresponds to low frequency or the vicinity of the borehole, however, we can not separate the signal containing the information of the host from that of casing. Otherwise, the severe attenuation of energy in the casing at high frequencies renders the signal undetectable. The optimum frequency is, therefore, to be chosen to extract the information of the host considering both the property of the casing and the skin depth of the medium and the practical technique to determine the casing property through single-hole measurements is required.

Keywords : 전자탐사 (EM) 토모그래피, 공내수, 케이싱, 시추공 전자탐사

서 론

전자탐사(EM) 토모그래피는 국내 건설현장에서의 지반 안정성 조사 및 폐광지역의 지하공동 탐지 등을 위해 많이 사용되는 지오토모그래피 기술인 탄성파 토모그래피, 레이더 토모그래피 및 전기비저항 토모그래피와 더불어 새로이 적용될 수 있는 지하 영상화 기법이다. 특히 지하 매질의 전기전도도가 높아 레이더 탐사가 적용될 수 없는 지역, 시추공내 지하수가 없거나 또는 불가피하게 PVC 케이싱이 설치되어 전기비저항 토모그래피를 적용할 수 없는 지역에서도 적용 가능한 장점을

가지고 있다. 반면에 EM 토모그래피는 그 이론이 복잡하며, 매우 작은 시추공내 송수신기를 통해 정확한 진폭 및 위상을 측정해야 하는 기술적인 어려움으로 인해 미국등 선진국에서도 극히 최근에야 시도되고 있는 기술이다(Alumbaugh and Morrison, 1995; Wilt *et al.*, 1995 등). 국내에서도 적분방정식에 확장된 Born 근사해를 적용하는(Habashy *et al.*, 1993) 방식의 EM 토모그래피에 대한 이론적인 연구결과가 최근에 발표된 바 있다(조인기와 심현미, 1998).

본 연구에서는 시추공을 이용해야 하는 전자탐사 토모그래피의 특성상, 기본적으로 고려해야 하는 공내수 및 케이싱이

*1999년 5월 7일 접수

1) 한국자원연구소 자원연구부

전자탐사 반응에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 반응 계산은 원통형 좌표계에서 전자기장의 경계치 문제를 푼 후 공간 FFT를 이용하는 Song and Lee(1998)의 알고리즘을 이용하였다. 국내의 많은 시추공에 설치되어있는 PVC 케이싱은 절연체이므로 전자탐사 반응에 영향을 미치지 않기 때문에 분석에서 제외하였다.

석유생산을 위한 생산정의 경우 철재 케이싱이 설치되어 있는데 석유 2차회수를 위한 증기 주입시 증기의 확산방향을 모니터링 하기 위해 전자탐사 토모그래피를 적용하는 시도가 시작되고 있으며(Wu and Habashy, 1994; Wilt et al., 1996), 특히 탐사가 가능한 주파수의 선정과 정확한 케이싱의 반응을 계산하여 전자탐사 토모그래피 적용시 그 영향을 배제할 수 있는 방법들이 활발히 연구되고 있다(Becker et al., 1997; Lee et al., 1998). 본 연구에서는 철재 케이싱이 존재할 때 케이싱의 전기전도도, 상대 투자율, 두께 및 사용 주파수를 달리하며 각각의 변수들이 전자탐사 반응에 미치는 영향을 고찰하고 전자탐사 반응과 케이싱의 표피심도 및 두께와의 상관관계를 정량적으로 확인하였다.

시추공내 전류루프 송신원에 의한 전자기장 계산

Fig. 1은 무한매질내에 위치하는 시추공, 케이싱 및 송신원의 모식도를 보여주는데, 시추공 중심부에 전류원 루프가 위치하며 이때 루프의 반지름은 a 이다. 매질 1이 공내수 또는 공기에 해당하며 매질 2가 케이싱, 매질 3은 모암이 된다. 중심축에서 케이싱까지의 거리는 b , 모암까지의 거리는 d 가 된다.

이러한 전류원 루프를 송신원으로 가지는 모델의 원통형 좌표계에서의 전자탐사 반응을 계산해 보자. 먼저 $e^{i\omega t}$ 를 따르는 주파수 영역에서의 Maxwell 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \hat{z}(\mathbf{r})\mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) - \hat{y}(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}_s(\mathbf{r}) \quad (2)$$

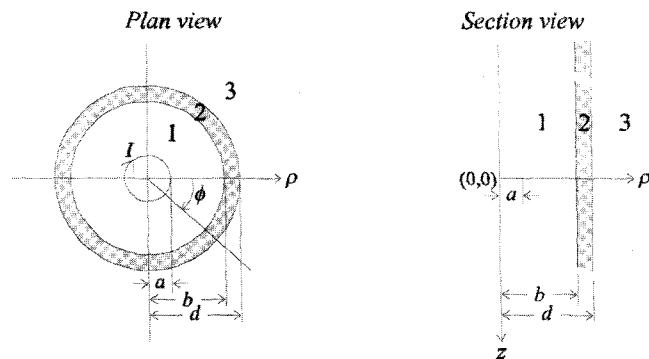


Fig. 1. Sketch of the borehole EM model. The center of the current ring is at the origin. Medium 1 means inside of borehole, medium 2 is casing, and medium 3 is the formation which is the whole space.

여기서 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 는 전기장, $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 는 자기장, $\hat{z}(\mathbf{r}) = i\omega\mu(\mathbf{r})$, $\hat{y}(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) + i\omega\epsilon(\mathbf{r})$, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 은 유전율, $\mu(\mathbf{r})$ 는 투자율, $\sigma(\mathbf{r})$ 는 전기전도도, $\mathbf{J}_s(\mathbf{r})$ 는 송신전류의 분포를 나타내며, 이때 전류분포는 다음과 같다.

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = \frac{a}{\rho} I(\omega) \delta(\rho - a) \delta(z) \hat{\phi} \quad (3)$$

여기서 $I(\omega)$ 는 송신전류이며, 축대칭의 원통형 좌표계 문제인 본 모델은 다음과 같이 전자기장의 특정 성분만으로 표현된다.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \{0, E_\phi(\rho, z), 0\} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_\rho(\rho, z), 0, H_z(\rho, z)\} \quad (5)$$

(1)식을 이용해 (2)식을 전기장에 대해 풀면, 매질 j 에서의 전기장은 다음의 Helmholtz 방정식으로 표현된다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_j^2 \right) E_{\phi,j}(\rho, z) = \hat{z}_j \frac{a}{\rho} I(\omega) \delta(\rho - a) \delta(z) \quad (6)$$

이때 전파상수 (wave propagation constant)는 다음과 같다.

$$k_j = \sqrt{-\hat{z}_j \hat{y}_j} \quad (7)$$

(6)식에서 ρ -축으로 1차 Hankel 변환, z -축으로 Fourier 변환을 통해 매질 1에서 전기장의 특이해를 구한 후, Faraday의 법칙을 이용해 자기장을 구하고, 각 매질 경계에서의 전기장 및 자기장의 접선 성분이 연속이라는 경계조건을 이용하여 완전해를 구하면, ρ - k_z 영역에서 각 매질의 전기장 및 자기장은 다음과 같이 정리된다(Song and Lee, 1998; 조성준 등, 1998).

$$\tilde{E}_{\phi,1}(\rho, k_z) = -\hat{z}_1 a I(\omega) \cdot \begin{cases} I_1(\gamma_1 \rho) K_1(\gamma_1 a) + C_1 I_1(\gamma_1 \rho), & \rho < a \\ I_1(\gamma_1 a) K_1(\gamma_1 \rho) + C_1 I_1(\gamma_1 \rho), & \rho > a \end{cases} \quad (8)$$

$$\tilde{H}_{\rho,1}(\rho, k_z) = -ik_z a I(\omega) \cdot \begin{cases} I_1(\gamma_1 \rho) K_1(\gamma_1 a) + C_1 I_1(\gamma_1 \rho), & \rho < a \\ I_1(\gamma_1 a) K_1(\gamma_1 \rho) + C_1 I_1(\gamma_1 \rho), & \rho > a \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{H}_{z,1}(\rho, k_z) = -a I(\omega) \gamma_1 \cdot \begin{cases} I_0(\gamma_1 \rho) K_1(\gamma_1 a) + C_1 I_0(\gamma_1 \rho), & \rho < a \\ -I_1(\gamma_1 a) K_1(\gamma_1 \rho) + C_1 I_0(\gamma_1 \rho), & \rho > a \end{cases} \quad (10)$$

$$\tilde{E}_{\phi,2}(\rho, k_z) = -\hat{z}_2 a I(\omega) \{ C_2 I_1(\gamma_2 \rho) + D_2 K_1(\gamma_2 \rho) \} \quad (11)$$

$$\tilde{H}_{\rho,2}(\rho, k_z) = -ik_2 a I(\omega) \{ C_2 I_1(\gamma_2 \rho) + D_2 K_1(\gamma_2 \rho) \} \quad (12)$$

$$\tilde{H}_{z,2}(\rho, k_z) = a I(\omega) \gamma_2 \{ C_2 I_0(\gamma_2 \rho) - D_2 K_0(\gamma_2 \rho) \} \quad (13)$$

$$\tilde{E}_{\phi,3}(\rho, k_z) = -\hat{z}_3 a I(\omega) D_3 K_1(\gamma_3 \rho) \quad (14)$$

$$\tilde{H}_{\rho,3}(\rho, k_z) = -iz_3 a I(\omega) D_3 K_1(\gamma_3 \rho) \quad (15)$$

$$\tilde{H}_{z,3}(\rho, k_z) = -a I(\omega) \gamma_3 D_3 K_0(\gamma_3 \rho) \quad (16)$$

여기서, I_0 는 제 1종 0차 modified Bessel 함수, K_0 는 제 2종 0차 modified Bessel 함수, I_1 는 제 1종 1차 modified Bessel 함수 K_1 는 제 2종 1차 modified Bessel 함수이며, k_z 는 z 방향의 공간파수, $\gamma_j = \sqrt{k_z^2 - k_j^2}$ 이다.

윗 식에서 경계면에서의 반사계수는 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{1}{|\underline{A}|} \{-\mu_1 I_1(\gamma_1 a) K_1(\gamma_1 b) A_{11} + \gamma_1 I_1(\gamma_1 a) K_0(\gamma_1 b) A_{21}\} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{\mu_1 \gamma_1}{|\underline{A}|} I_1(\gamma_1 a) \{I_0(\gamma_1 b) K_1(\gamma_1 b) + I_1(\gamma_1 b) K_0(\gamma_1 b)\} \\ &\quad \cdot \{\mu_2 \gamma_3 K_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_3 d) - \mu_3 \gamma_2 K_0(\gamma_2 d) K_1(\gamma_3 d)\} \\ &= \frac{\mu_1 I_1(\gamma_1 a)}{b |\underline{A}|} \{\mu_2 \gamma_3 K_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_3 d) - \mu_3 \gamma_2 K_0(\gamma_2 d) K_1(\gamma_3 d)\} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} D_2 &= \frac{\mu_1 \gamma_1}{|\underline{A}|} I_1(\gamma_1 a) \{I_0(\gamma_1 b) K_1(\gamma_1 b) + I_1(\gamma_1 b) K_0(\gamma_1 b)\} \\ &\quad \cdot \{\mu_2 \gamma_3 I_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_3 d) + \mu_3 \gamma_2 I_0(\gamma_2 d) K_1(\gamma_3 d)\} \\ &= \frac{\mu_1 I_1(\gamma_1 a)}{b |\underline{A}|} \{\mu_2 \gamma_3 K_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_3 d) - \mu_3 \gamma_2 K_0(\gamma_2 d) K_1(\gamma_3 d)\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} D_3 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \gamma_1 \gamma_2}{|\underline{A}|} I_1(\gamma_1 a) \{I_0(\gamma_1 b) K_1(\gamma_1 b) + I_1(\gamma_1 b) K_0(\gamma_1 b)\} \\ &\quad \cdot \{I_0(\gamma_2 d) K_1(\gamma_2 d) + I_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_2 d)\} \\ &= \frac{\mu_1 \mu_2 I_1(\gamma_1 a)}{bd |\underline{A}|} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, 행렬식 $|\underline{A}|$ 는 다음과 같다.

$$|\underline{A}| = \mu_1 I_1(\gamma_1 b) A_{11} + \gamma_1 I_0(\gamma_1 b) A_{21} \quad (21)$$

$$A_{11} = \mu_3 \gamma_2^2 K_1(\gamma_3 d) \{I_0(\gamma_2 b) K_0(\gamma_2 d) - I_0(\gamma_2 d) K_0(\gamma_2 b)\} - \mu_2 \gamma_2 \gamma_3 K_0(\gamma_3 d) \{I_0(\gamma_2 b) K_1(\gamma_2 d) - I_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_2 b)\}$$

$$A_{21} = \mu_2^2 \gamma_3 K_0(\gamma_3 d) \{I_1(\gamma_2 b) K_1(\gamma_2 d) - I_1(\gamma_2 d) K_1(\gamma_2 b)\} - \mu_2 \mu_3 \gamma_2 K_1(\gamma_3 d) \{I_0(\gamma_2 b) K_1(\gamma_2 d) + I_1(\gamma_2 d) K_0(\gamma_2 d)\}$$

한편, 전류루프의 중심축 즉, 시추공 축상에서의 수직 일차 자기장은 다음과 같이 해석적으로 구해지는데(Song and Lee, 1998),

$$\begin{aligned} H_z(0, z) &= \frac{a^2 I(\omega)}{\sqrt{2\pi}} \frac{(ik)^{3/2}}{(z^2 + a^2)^{3/4}} K_{\frac{3}{2}}(ik\sqrt{z^2 + a^2}) \\ &= \frac{a^2 I(\omega)}{2} \frac{(1 + ik\sqrt{z^2 + a^2})}{(z^2 + a^2)^{3/2}} 3^{-ik\sqrt{z^2 + a^2}} \end{aligned} \quad (22)$$

이로부터 전류루프의 중심에서도 정확한 해를 얻게 된다.

(8)식~(16)식 까지의 해는 $\rho - k_z$ 영역에서의 해로 이를 공간영역으로 변환하여야 하는데 통상적인 Fourier cosine 또는 Fourier sine 변환으로는 $z = 0$ 에서의 정확한 해를 얻을 수 없으므로 이산 Fourier 변환을 통해 $\rho - z$ 영역의 해를 구하게 된다. 이때 공간파수(k_z)의 샘플링 갯수와 샘플간격이 해의 정확도를

좌우하는데, ρ 가 커지면 공간파수의 샘플간격을 작게 해야 해의 정확도가 유지되며, ρ 가 작아지면 Nyquist 공간파수가 커져야 해의 정확도가 유지된다. 따라서 주어진 문제에 따라 공간파수의 적절한 샘플링 갯수와 샘플간격을 선정해야 한다(조성준 등, 1998).

시추공 공내수의 영향

시추공내에 공내수가 있을 경우 시추이수의 존재로 공내수의 전기전도도는 지하수의 전기전도도에 비해 훨씬 높게 나타나는 것으로 알려져 있는데 이것이 전자탐사의 반응에 영향을 미칠 수 있으며, 측정신호의 진폭이 해석에 절대적으로 영향을 주는 전자탐사에서 상당한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 이를 확인하는 것은 향후 EM 토모그래피의 측정값 예측 및 해상도 향상에 도움을 줄 것이다.

먼저 단일 시추공 전자탐사에서의 공내수 영향에 대해 살펴보자. 송신원의 위치 및 모델의 구성은 Fig. 2와 같으며 시추공 공내수의 전기전도도를 변화시켜 가며 시추공 중심축 상에서 수직자기장 H_z 를 계산해 보았다.

Fig. 3(a)는 수신기가 송신루프의 중심($z = 0$)에 위치하고 공내수의 전기전도도가 0, 0.001, 0.1, 1 S/m 일 때의 수직자기장 H_z 의 실수성분 및 허수성분을 도시한 것이다. 수직 일차자기장의 직류 반응($I(\omega)/2a = 20$ A/m)이 워낙 우세해 실수성분에서는 거의 공내수의 영향을 감지할 수 없으며, 허수성분의 경우 그 크기가 유도상수(induction number)에 거의 비례하기 때문에 공내수의 전기전도도가 큰 경우에 값이 커지며, 따라서 송신루프 중심에서의 반응이 공내수의 전기전도도에 영향받을 수 있다. 사용 주파수가 높아질수록 작은 시추공의 크기에서도 반응하게 되므로 공내수의 영향을 더 많이 받게 됨을 알 수 있다.

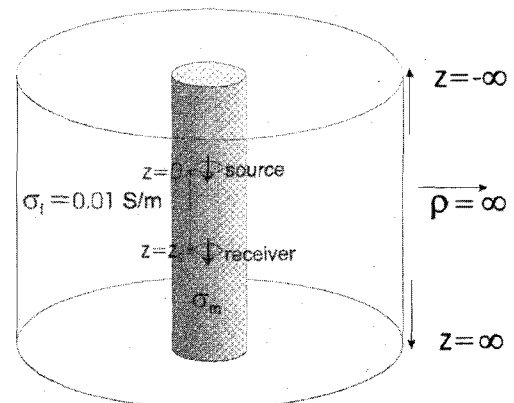


Fig. 2. Model used for estimating the effect of borehole fluid on the vertical component of magnetic field in single-hole configuration. The source is located at $z = 0$, $\rho = 0$ and the receivers are located along the z -axis. Diameters of source loop and borehole are 0.05 m and 0.075 m, respectively. Formation conductivity (σ_f) is 0.01 S/m and borehole fluid conductivity is denoted by σ_m .

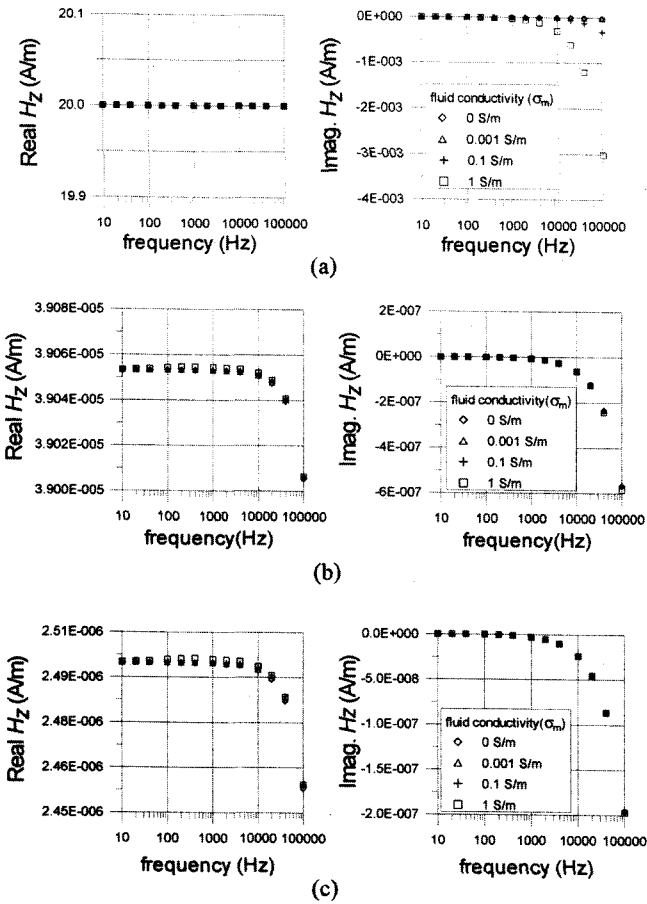


Fig. 3. Real (left) and imaginary (right) components of the vertical magnetic fields with various borehole fluid conductivities in single-hole survey. Receivers are located at (a) 0 m, (b) 2 m, and (c) 5 m along the z-axis.

Fig. 3(b)는 수신기가 $z=2$ m에 위치할 때이다. 실수성분의 경우 주파수가 높아지면 공내수의 전기전도도에 따라 약간씩 크기가 변화하는 것으로 보인다. 그러나 그 차이는 0.1% 이내의 거의 무시할 만한 정도이다. 허수성분에서도 보면 공내수의 전기전도도에 의한 차이를 거의 볼 수 없다. Fig. 3(c)는 수신기가 $z=5$ m에 위치하는 경우로, 사용 주파수가 높아지면 공내수의 전기전도도에 따라 약간씩 자기장의 실수성분이 변화하지만 이 역시 무시할 만한 정도이다. 허수성분은 공내수의 전기전도도에 의한 차이를 거의 볼 수 없다.

결론적으로 말하면 시추공의 중심축을 따르는 단일 시추공 탐사에서는 송신기에 매우 가까운 곳을 제외하고는 공내수의 전기전도도에 의한 자기장의 변화는 무시할 만한 수준이며, 공내수의 유무를 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다.

시추공축 상이 아닌 임의의 위치에서 시추공 공내수의 전기전도도를 변화시켜 가며 자기장을 계산한 것이 Fig. 4와 Fig. 5이다. 이때 수신기의 위치를 제외한 모든 모델 변수는 Fig. 2와 동일하다. Fig. 4는 수신기가 $\rho=3$ m, $z=0$ 에 위치하고 공내수의 전기전도도가 0, 0.001, 0.1, 1 S/m일 때의 수직자기장 H_z 의 실수성분 및 허수성분을 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 실수

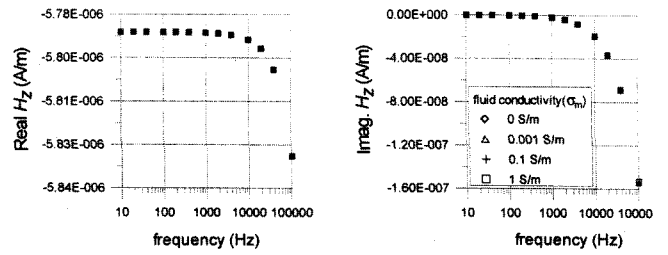


Fig. 4. Real (left) and imaginary (right) components of the vertical magnetic fields with various borehole fluid conductivities. The receiver is located at $\rho=3$ m, $z=0$ m.

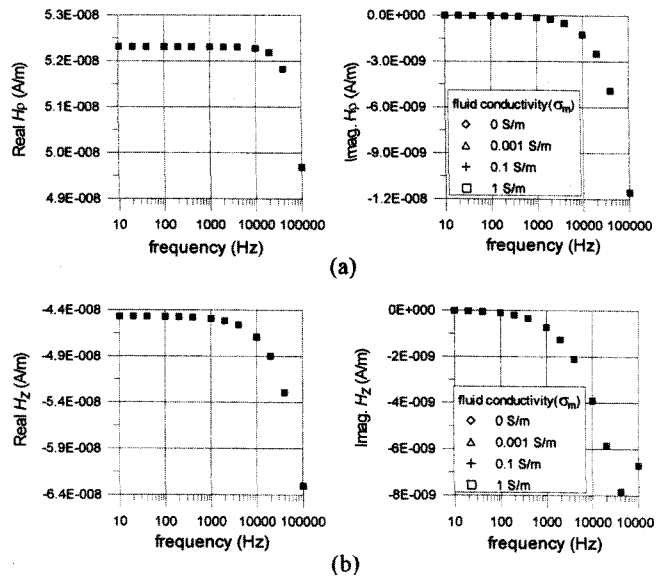


Fig. 5. Real (left) and imaginary (right) components of the (a) horizontal, and (b) vertical magnetic fields with various borehole fluid conductivities. The receiver is located at $\rho=13$ m, $z=4$ m.

성분, 허수성분 둘 다 공내수의 전기전도도에는 상관없이 거의 동일한 자기장 값을 보여 준다.

Fig. 5는 수신기가 $\rho=13$ m, $z=4$ m에 위치하고 공내수의 전기전도도가 0, 0.001, 0.1, 1 S/m 일 때의 수평자기장 H_ρ 의 실수성분 및 허수성분, 그리고 수직자기장 H_z 의 실수성분 및 허수성분을 각각 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 수평 자기장과 수직자기장 모두가 공내수의 전기전도도에 거의 무관함을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 사용되는 크기의 공경을 가지는 시추공에서 공내수와 모암과의 전도도 차이가 100배 이내일 경우, 공내수가 전자탐사 반응에 미치는 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 현실적이지 않아 본 논문에서 다루지는 않았지만 공내수와 모암과의 전도도 차이가 1000배 정도 나더라도 공내수의 영향은 무시할 수 있음을 수치계산 결과 알 수 있었다.

시추공 케이싱의 영향

국내의 경우 일반적인 시추에서 철재 케이싱을 하지 않지만

석유탐사에서 개발공의 경우 철재 케이싱을 설치하는 것이 보통이다. 이러한 철재 케이싱이 존재할 때 상당히 높은 케이싱의 전기전도도 및 투자율에 의해 전자기파의 대부분이 감쇠되어 시추공 전자탐사 반응을 측정하기 힘든 것으로 알려져 있다. 그러나 이는 표피심도(skin depth)와 밀접한 관련이 있는 문제로 주파수가 낮을 경우에는 어느 정도 감쇠는 있지만 신호의 측정이 가능한 것으로 보고된 바 있다(Wilt et al., 1996). 따라서 주어진 철재 케이싱에 대해 어떤 주파수 대역까지 탐사가 가능한지를 확인하는 것은 철재 케이싱이 설치되어 있는 시추공에서 전자탐사를 수행할 때 필수적인 선결 조건이 된다. 또한 케이싱에 의한 전자탐사 반응의 왜곡을 규명하는 것은, 케이싱 문제 뿐만 아니라 전도도의 급격한 변화나 투자율 변화가 전자탐사 반응에 미치는 영향에 대한 기본 자료로도 이용될 수 있을 것이다.

먼저 동일한 시추공에 송신기 및 수신기가 위치하는 단일 시추공 탐사에서 케이싱의 영향을 살펴보겠다. 케이싱의 특성은 투자율과 전기전도도 및 케이싱의 두께로 정의되는데, 이중 투자율과 전기전도도가 전자탐사 반응에 미치는 영향을 알아보기 위해 동일한 표피심도를 유지하도록 케이싱의 투자율과 전기전도도의 조합을 달리하며 수치실험을 수행하였다. Fig. 6은 수신기가 $z=2$ m에 위치할 때 케이싱의 상대투자율 및 전기전도도를 달리하며 실험한 결과이며 이때 케이싱의 표피심도는 네 경우에서 동일하다. 그림에서 보면 실수성분과 허수성분 모두 사용주파수 100 Hz 이상에서는 감쇠가 심해 반응이 미약해진다.

수직자기장의 실수성분을 보면 전 주파수 대역에서 가장 큰 세기를 보이는 것은 상대투자율이 100인 경우이며, 가장 작은 반응을 보이는 것은 상대투자율이 1인 경우이다. 상대투자율이 100인 경우는 주파수가 높아짐에 따라 그 변화 폭이 매우 크며, 상대투자율이 1인 경우는 그 변화가 매우 완만하다. 상대 투자율이 50이나 10인 경우는 앞의 두 경우의 중간정도의 반응을 보여준다. 허수성분 역시 실수성분과 거의 유사한 양상을 보여준다. 동일한 표피심도를 가지더라도 상대투자율이 큰 쪽이 더욱 큰 반응을 나타낼 수 있는데 이는 시추공과 케이싱의

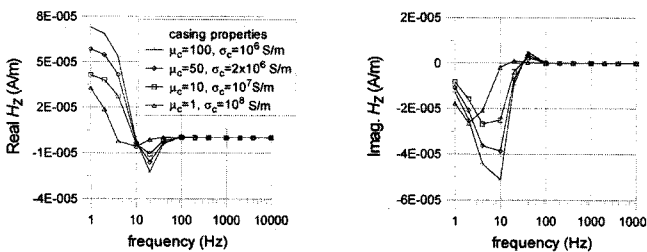


Fig. 6. Real (left) and imaginary (right) components of vertical magnetic fields as a function of frequency for casings which have same skin depth, but different combinations of relative magnetic permeability (μ_r) and conductivity (σ_c). Diameters of source loop, borehole and casing are 0.05 m, 0.07 m and 0.1 m, respectively. The formation conductivity (σ_f) is 0.01 S/m and the receiver is located at $z=2$ m.

Table 1. Numerical experiments for identifying the effects of casing conductivity and relative magnetic permeability on the magnetic field in same casing skin depth

	사용 주파수	케이싱 전도 (σ_c)	케이싱 상대투자율(μ_r)	케이싱 표피심도 $\left(\sqrt{\frac{2}{\sigma_c \omega \mu_c}}\right)$
실험 1	10 Hz	10^6 S/m	100	1.59×10^{-2} m
실험 2	10 Hz	10^8 S/m	1	1.59×10^{-2} m
실험 3	1 kHz	10^6 S/m	1	1.59×10^{-2} m

경계면에서의 상대투자율과 전기전도도의 각기 다른 역할에 기인하며, (21)식에서 케이싱의 투자율이 반사계수항에 곱해지는 것으로부터도 확인된다.

이와 같은 투자율과 전기전도도의 상이한 영향을 자세히 분석하기 위해 Table 1에서의 모델에 대해 $z=2$ m 평면에서 ρ -축을 따라가며 수직자기장을 계산하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. Fig. 7에서 $\rho=0.03$ m에서 $\rho=0.035$ m까지는 철재 케이싱 안쪽의 시추공 내이며, $\rho=0.035$ m에서 $\rho=0.05$ m까지는 철재 케이싱내, $\rho=0.05$ m 이상은 모암의 위치에 해당한다.

먼저 실험 1과 실험 2의 반응을 비교하여 보면, 두 모델의 경우 사용주파수가 동일하고 모암 및 시추공내의 물성 또한 동일하며, 차이가 나는 것은 케이싱의 상대투자율과 전기전도도인데, 표피심도의 관점에서 보면 역시 동일하다. 한편, 실험 2와 실험 3 또한 주파수와 케이싱의 전기전도도가 서로 다르나 이 역시 케이싱의 표피심도 면에서는 동일하다. Fig. 7의 왼쪽에 나타난 수직자기장의 진폭은 실험 1이 실험 2에 비해 전 구간에서 5배 이상 큰 것을 알 수 있으며 실험 2와 3은 거의 동일한 크기를 가짐을 볼 수 있다. ρ 가 0.05 m 이상인 모암에서, 실험 1의 경우 진폭이 줄어드는 추세를 보여주며, ρ 가 계속 증가하면 실험 1과 실험 2의 차이가 시추공내에서 보다 크지 않을 것임을 알 수 있다. 따라서 시추공 내부에서 측정이 이루어지는 단일 시추공 탐사가 동일한 표피심도를 가지는 케이싱에서 투자율의 변화에 대해 민감하게 반응함을 알 수 있다.

오른쪽 그림에 나타난 위상반응의 경우 시추공 안과 바깥쪽의 반응이 진폭에 비해 차이가 많이 난다. 실험 1과 실험 2, 3

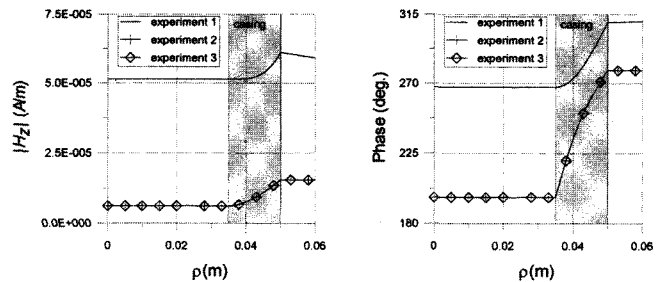


Fig. 7. Amplitude (left) and phase (right) curves of the vertical magnetic fields with same casing skin depth but different casing properties (casing conductivity and relative magnetic permeability). Table 1 shows the used casing properties.

의 위상차이는 시추공 내에서는 약 70° 정도 나는데 비해 케이싱 밖의 모암에서는 30° 정도로 줄어들었다. 이는 실험 1의 경우 시추공 내에서 허수성분이 우세하다가 케이싱을 지나면서 실수성분이 우세해지는 양상을 보이는 반면, 실험 2, 3의 경우는 시추공 내에서 실수성분이 우세하다가 케이싱을 지나면서 허수성분이 우세해지는 데에 기인한다. 이러한 양상은 일반적인 것은 아니고 수신기의 위치에 따라 많이 달라진다. 하지만 동일한 표피심도를 가지더라도 투자율과 전기전도도의 조합이 다르면 상이한 반응을 나타낼 수 있고 그 반응은 특히 시추공 내부 측정 즉, 단일 시추공 탐사에서 크게 나타난다. 실험 2와 실험 3의 결과를 살펴보면, 진폭과 위상반응 모두 동일함을 알 수 있다. 케이싱이 존재할 때의 전자탐사 반응에서 주파수 증감과 전기전도도의 증감은 경계면에서의 반사계수에 동일한 영향을 미치는데, 투자율이 같을 경우 전기전도도와 주파수가 $\gamma_c = \sqrt{k_z^2 - k_c^2}$ 에 미치는 영향이 동일하기 때문이다.

케이싱이 존재할 때 수백 Hz 이상에서의 전자탐사 반응은 케이싱에 의한 감쇠에 전적으로 영향 받으며, 낮은 주파수에서도 케이싱 밖의 모암의 영향 보다는 케이싱 자체의 영향이 매우 크다고 알려져 있다(Augustin et al., 1989; Wu and Habashy, 1994). 특히 단일 시추공 탐사의 경우 송신기 및 수신기가 케이싱이 존재하는 시추공에 위치하므로 케이싱에 의한 영향이 더욱 클 것이다. 이를 확인하기 위해 케이싱의 두께와 케이싱의 표피심도를 변화시켜가며 모암의 영향이 측정되는지를 살펴보았다. Fig. 8은 수신기가 $z=2$ m에 위치한 단일 시추공 탐

사의 경우로, (a)는 케이싱의 두께가 0.015 m 일 때 모암의 전기전도도를 변화시켜 가며 사용주파수에 대한 수직자기장을 도사한 것이다. 그림에서 보듯이 전 주파수 대역에서 모암의 전기전도도에 관계없이 수직자기장의 반응은 동일함을 볼 수 있는데, 이는 모암과는 무관하게 전적으로 케이싱의 영향만을 받는다는 것을 말해준다.

Fig. 8의 (b)는 케이싱의 두께를 0.002 m로 줄여 모암의 영향을 살펴보고자 한 것이다. (a)에 비해 상당히 두께가 줄었지만 그림에서 보듯이 모암의 영향은 거의 없는 것으로 보인다. 1000 Hz 이상의 고주파수에서 아주 조금의 차이는 보이지만 무시할 만한 수준이다. 그 외에도 Fig. 7에서 사용된 다양한 케이싱 물성에 대해 두께를 달리하며 계산해 보았으나 모암의 영향은 감지할 수 없었다. 이를 종합하면 단일 시추공 탐사에서 철재 케이싱이 존재할 때 측정되는 신호는 케이싱내에서 에너지의 극심한 감쇠 때문에 전적으로 케이싱의 물성에 관계되며, 모암의 전기전도도는 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다.

케이싱이 존재할 때 시추공간 EM 토모그래피를 수행하기 위해서는 케이싱의 극심한 감쇠효과에도 불구하고 적절한 신호 수준을 유지할 수 있는 주파수의 선정이 중요하다. 이러한 주파수의 선정 역시 케이싱의 표피심도와 두께에 직접적인 연관이 있다. Fig. 9는 케이싱의 두께를 달리하며, 수평거리가 20 m 떨어진 곳에서의 수직자기장의 세기를 무한 매질에서의 수직자기장의 세기로 나누어준 상대 세기를 도사한 것이다. 그림에서 보면 주파수가 증가함에 따른 세기의 감쇠가 두드러지며, 케이싱의 두께가 두꺼워 짐에 따른 세기의 감쇠 역시 두드러진 현상이다.

무한공간에서의 신호수준의 1/100 까지 감쇠되는 주파수를 케이싱의 두께와 비교해 보면, 각각의 주파수에서의 표피심도의 약 5배 정도의 두께를 가지는 케이싱에서 100배 정도의 (또는 40 dB) 신호감쇠가 일어났음을 알 수 있다. 따라서 신호수준의 감쇠는 케이싱에 의해 주로 영향받으며, 특히 주파수가

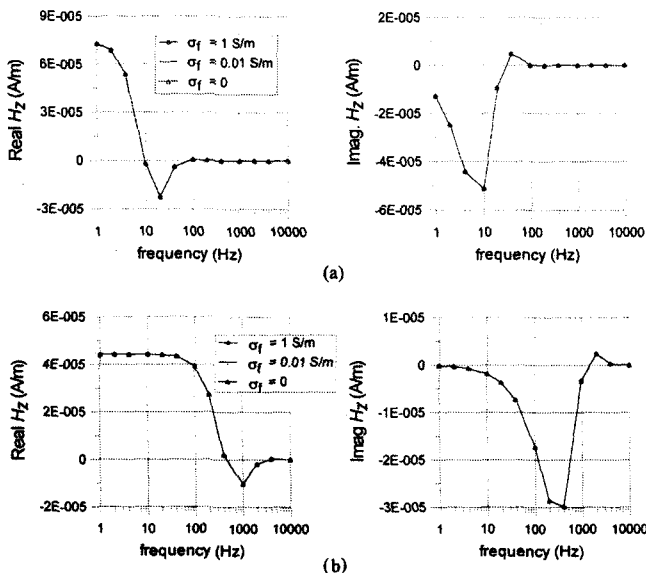


Fig. 8. Real (left) and imaginary (right) components of vertical magnetic fields as a function of frequency with different casing thicknesses for various formation conductivities in single-hole configuration. The receiver is located at $z=2$ m. Diameters of source loop and borehole are 0.05 m and 0.07 m, respectively. The relative magnetic permeability of casing is 100 and the conductivity is 10^6 S/m. The thickness of the casing is (a) 0.015 m, and (b) 0.002 m.

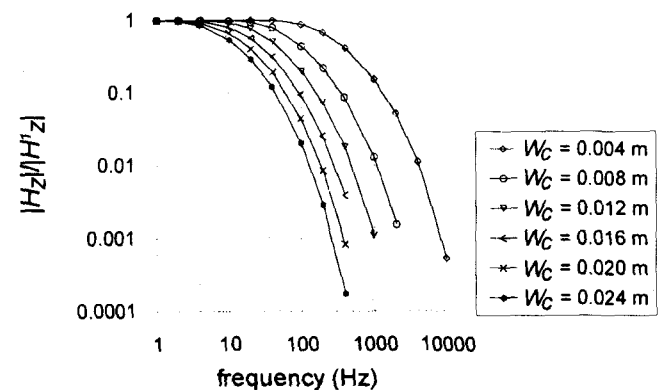


Fig. 9. Vertical magnetic fields normalized by primary H_z field according to the variation of the casing thickness (W_c) in cross-hole configuration. The receiver is located at $\rho=20$ m, $z=0$. The attenuation of fields is increased as casing gets thicker.

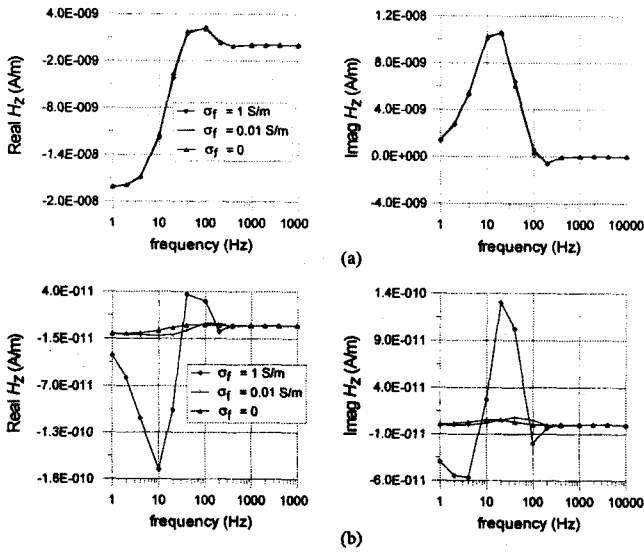


Fig 10. Vertical magnetic fields as a function of frequency for various formation conductivities. The model configuration is same as Fig. 8 (a) except for receiver location. Receiver is located at (a) $\rho = 20$ m, $z = 0$, and (b) $\rho = 100$ m, $z = 0$.

높아지면 케이싱에 의한 감쇠가 신호수준의 감쇠에 전적인 역할을 하는데, 이는 수학적으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(Wu and Habashy, 1994).

$$\Delta\alpha(dB) \approx -20 \frac{W_c}{\delta_c} \log_{10} e \quad (23)$$

여기서, W_c 는 케이싱의 두께이며, δ_c 는 케이싱의 표피심도이다. 한편 위상의 변화는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\Delta\psi(rad) = \frac{W_c}{\delta_c} \quad (24)$$

(23)식과 (24)식은 신호의 감쇠 및 위상의 변화를 표현함에 있어 전적으로 케이싱의 영향만을 고려한 식으로 주파수가 낮아지거나 모암의 전기전도도가 커지면 정확한 값을 주지 못한다. 하지만 케이싱에 의한 대략적인 신호 수준의 감쇠와 위상 변화를 판단하는 목적으로 사용될 수 있을 것이다.

단일 시추공 탐사의 경우 케이싱의 두께가 얇아도 매질에 대한 정보를 거의 제공하지 못하였다. 시추공간 전자탐사에서 모암의 영향을 알아보기 위해 Fig. 8에서와 동일한 조건에서 수신기만 ρ 축으로 20 m에 위치시켜 계산한 결과가 Fig. 10(a)에 보여진다. 그림에서 보면 매질의 전기전도도가 1 S/m인 경우에 매질의 전기전도도가 0 또는 0.01 S/m인 경우와 약간 상이한 것을 알 수 있다. 매질의 전기전도도가 0인 것과 0.01 S/m인 것은 거의 동일하다.

송수신기의 거리가 매질의 표피심도에 비해 아주 가까우면 근거리장 효과에 의해 매질의 영향이 수신기에서 감지되기 힘들다. 이런 경우 고주파수에서의 반응을 얻어야 하는데, 케이싱의 높은 전기전도도에 의해 고주파 성분은 이미 감쇠가 극심해 의미있는 신호를 측정할 수가 없다. 시추공간의 거리가 넓

어지면 매질에 의한 반응을 볼 수 있을 것인데, 이를 확인하기 위해 수신기를 $\rho = 100$ m에 위치시키고 수직자기장의 반응을 살펴본 것이 Fig. 10(b)이다. 그림에서 보듯이 송수신거리가 늘어나자 저주파수 대역에서 모암의 전기전도도 변화에 따른 차이를 확실히 알 수 있다. 모암의 전기전도도가 1 S/m인 경우 표피심도가 짧아 공기중의 자료와 확연한 차이를 보여주나 모암의 전기전도도가 0.01 S/m인 경우 10 Hz에서도 표피심도가 160 m에 이르므로 공기중에서의 자료와 많은 차이는 보여주지 못한다. 따라서 시추공간 전자탐사에서 모암의 전기전도도 변화에 대한 정보를 얻기 위해서는, 사전에 케이싱에 의한 감쇠와 모암의 표피심도를 동시에 고려해서 적정주파수를 선정해야 한다(Becker et al., 1997).

지금까지 살펴본 바와 같이 케이싱이 측정값에 절대적인 영향을 미치므로, 케이싱의 부식이나 두께에 대한 정확한 사전정보가 주변 매질에 대한 정보 추출에 기본이 된다. Fig. 8에서 나타나 바와 같이 단일 시추공 탐사는 케이싱의 특성만을 반영하므로 단일 시추공 탐사자료로부터 케이싱 특성에 대한 정확한 정보를 획득함이 케이싱이 설치되어있는 시추공을 이용한 전자탐사의 성패를 좌우한다고 하겠다. 최근에 이에 대한 시도가 시작되고 있으나(Lee et al., 1998), 제한된 공간인 시추공내에서 정확한 전자기 반응을 획득한다는 것은 역시 기술적으로 매우 어려운 문제이다.

결론

본 연구에서는 전자탐사 토모그래피 기술개발의 일환으로 우선 시추공의 공내수 및 케이싱이 전자탐사 반응에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 반응계산은 원통형 좌표계에서 전자기장의 경계치 문제를 푼 후 공간 FFT를 이용하는 Song and Lee(1998)의 알고리즘을 이용하였다.

시추공에 공내수가 존재할 때 공내수의 전기전도도를 달리 하며 계산한 전자탐사 반응을 고찰한 결과, 송수신기의 바로 근처를 제외하고는 공내수의 존재는 전자탐사 반응에 영향을 거의 미치지 않음을 알았다.

시추공에 철재 케이싱이 설치되어 있을 때, 단일 시추공 전자탐사 반응은 전적으로 케이싱에 의한 반응이며 주변 매질에 의한 영향은 무시할 수 있는 수준이다. 한편 시추공간 탐사에서는 모암의 전기전도도에 따른 영향을 감지할 수 있으나, 시추공간의 거리가 모암의 표피심도에 비해 많이 가까우면, 근거리장 효과에 의해 모암의 영향이 미약하게 되며 반대로 시추공간의 거리가 멀 경우에는 케이싱에 의한 에너지의 극심한 감쇠로 인해 신호의 측정이 불가능해진다. 따라서 적정수준의 신호수준을 유지하며 모암의 반응을 얻기 위해서는 케이싱의 특성 및 모암의 표피심도를 동시에 고려해야 하며, 특히 케이싱의 특성을 정확히 알기 위한 기술의 개발이 선결과제라 하겠다.

공내수의 유무에 관계없이 정확한 지하 매질의 반응을 획득

할 수 있다는 점에서 시추공 전자탐사 또는 EM 토모그래피는, 공내수의 높은 전기전도도에 의한 전류집중의 문제로 단일 시추공 자료도 함께 해석 할 때 특히 분해능에 손실을 입는 전기비저항 토모그래피에 비해 지하 영상화의 정확도가 높다고 하겠다. 또한 전기전도도가 높을 경우 에너지의 극심한 감쇠로 적용이 불가능해지는 레이더 토모그래피에 비해서 비교적 매질의 전기전도도 분포에 자유로운 EM 토모그래피가 다양한 적용성 면에서 유리하다 하겠다. 그러나 유한차분법이나 유한요소법등을 이용해 상당히 정확한 역산해를 구할 수 있는 전기비저항 토모그래피, 또는 탄성파 자료처리에서와 같은 파선 추적법등을 이용해 간단하게 지하 영상을 획득할 수 있는 레이더 토모그래피와는 달리, 그 이론의 복잡함 때문에 현재까지 해석에 있어서 근사해를 동원하는 수준인 EM 토모그래피가 현실화하기 위해서는 정밀 탐사기기의 개발과 더불어 현장 자료에 강력하고 간편하게 적용될 수 있는 해석기법의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. 조성준, 김정호, 이명종, 정승환, 송운호, 1998, 시추공내 수신원에 의한 전자탐사 반응: 전기, 전자탐사법에 의한 지하 영상화 기술 연구, KR-98(C)-09, 한국자원연구소.
2. 조인기, 심현미, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피: 물리탐사, 1, 155-160.
3. Alumbaugh, D. L. and Morrison, H. F., 1995, Theoretical and practical considerations for electromagnetic tomography assuming a cylindrical geometry: *Geophysics*, 60, 846-870.
4. Augustin, A. M., Kennedy, W. D., Morrison, H. F. and Lee, K. H., 1989, A theoretical study of surface-to-borehole electromagnetic logging in cased holes: *Geophysics*, 54, 90-99.
5. Becker, A., Wang, B., Lee, K. H. and Wilt, M., 1997, Subsurface electromagnetic measurement through steel casing: *67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract*, 1965-1968.
6. Habashy, T. M., Groom, R. W. and Spies, B. R., 1993, Beyond the Born and Rytov approximation: A nonlinear approach to electromagnetic scattering: *J. Geophys. Res.*, 98, 1759-1775.
7. Lee, K. H., Kim, H. J. and Song, Y., 1998, Electromagnetic method for analyzing the property of steel casing: *LBNL-41525, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*.
8. Song, Y. and Lee, K. H., 1998, Electromagnetic fields due to a loop current in a cased borehole surrounded by uniform whole space: *LBNL-42371, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*.
9. Wilt, M., Alumbaugh, D. L., Morrison, H. F., Becker, A., Lee, K. H. and Deszcz-Pan, D., 1995, Crosshole electromagnetic tomography: System design consideration and field results: *Geophysics*, 59, 378-390.
10. Wilt, M., Lee, K. H., Becker, A., Spies, B. and Wang, B., 1996, Crosshole EM in steel-cased borehole: *66th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract*, 230-233.
11. Wu, X. and Habashy, T. M., 1994, Influence of steel casing on electromagnetic signals: *Geophysics*, 59, 378-390.