

전기비저항탐사에서 전류포화현상

강혜진 · 조인기*

강원대학교 지구물리학과

Current Saturation in the Electrical Resistivity Method

Hye-Jin Kang and In-Ky Cho*

Kangwon National University, Department of Geophysics

요약: 이 연구에서는 지하 이상체와 배경매질의 전기전도도 대비가 큰 경우 측정 겉보기비저항이 일정한 값에 수렴하는 전류포화현상에 대하여 이론적 고찰을 수행하였다. 이를 위하여 몇 가지 간단한 지하구조 모형에 대한 이론해를 통하여 표면전하의 거동을 살펴보았으며, 이들 표면전하가 전류포화를 일으키는 원인 및 겉보기비저항에 미치는 영향을 고찰하였다. 결과적으로 전기비저항 탐사에서 측정하는 겉보기비저항 이상의 크기는 포화현상에 따라 일정값에 수렴하게 됨을 확인하였으며, 실제 겉보기비저항 이상의 크기는 이상체가 완전도체 혹은 부도체일 경우보다 작다는 것을 입증하였다. 또한 대개 전기전도도 대비가 100배 이상이 될 경우, 전류포화현상이 발생하는 것으로 해석된다.

주제어: 전기비저항 탐사, 표면전하, 전류포화, 겉보기비저항

Abstract: In this study, we investigated the current saturation which forces the apparent resistivity to converge when the conductivity contrast between the anomalous body and background medium is greater than a specific value. Analyzing theoretical and numerical solutions for some simple models, we studied the behavior of the surface charge, and how the surface charge cause the current saturation and finally lead to the convergence of the apparent resistivity in the resistivity method. As a consequence of above analysis, we verified that the current saturation makes the apparent resistivity converge to a specific value and the magnitude of the apparent resistivity anomaly be less than that of the ideal conductor or insulator in the resistivity method. In general, current saturation is considered to occur when the conductivity contrast becomes larger than 100.

Keywords: resistivity method, surface charge, current saturation, apparent resistivity

서 론

전기비저항 탐사에서 지하 이상체의 전기전도도가 증가하면 겉보기비저항 이상의 크기도 증가하는 것으로 인식되고 있다. 이는 비록 겉보기비저항이 지하 매질의 참 전기비저항을 의미하지는 않지만 지하 매질의 참 전기비저항을 상당부분 반영하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 겉보기비저항은 배경매질과 이상체의 전기전도도 대비가 클 경우 이상체의 참 비저항과는 심한 차이를 나타낼 수 있다. 이는 이상체에 흐르는 전류의 양이 전기전도도 대비가 커지면 한계를 보이는 전류포화(current saturation) 현상에 기인한다.

전기비저항 탐사에서 전류전극을 통하여 지하에 전류를 주

입하면 이상체가 전도성일 경우에는 이상체로 전류가 집중되며, 반대로 비전도성일 경우에는 이상체를 피하여 전류가 흐르게 된다. 즉 이상체의 물성에 따라 전류가 전도성 이상체로 집중되는 전류집중(current channeling) 현상이 나타나게 되며, 물성대비가 커지게 되면 전류포화현상이 발생한다. 전기전도도 대비가 적을 경우에는 이상체에 흐르는 전류는 전기전도도 대비에 비례하여 증가하다가, 궁극적으로는 전류포화현상이 발생하여 일정값에 수렴하게 된다. 마찬가지로 겉보기비저항 이상의 크기도 전류포화현상이 발생하는 단계가 넘어서면 일정값에 수렴하게 된다. 한편, 판상 전도체의 전류집중 현상(Edwards, 1983; Nabighian, 1984)과 3차원 전도체의 전류포화현상(Eloranta, 1986; 조인기, 1989)이 발생하는 것으로 발표된 바 있다.

이 논문에서는 이러한 전류포화현상이 일어나는 발생구조에 대하여 분석하였다. 우선 2층 구조 모델, 원통형 및 구형 이상체 모델에 대한 이론적 고찰을 통하여 이상체의 경계면에 생성되는 표면전하의 분포특성과 그 양이 전류포화를 일으키는

2010년 6월 15일 접수; 2010년 10월 20일 수정; 2010년 11월 2일 채택
*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,
Chuncheon, Kangwondo, 192-1, Korea

발생구조를 알아보고, 최종적으로 겐보기비저항 자료에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 수치 모델링을 통하여 2차원 및 3차원 이상체에서 발생하는 전류포화현상과 그에 의한 겐보기비저항의 변화 양상을 해석하고자 하였다.

전류포화현상

전기비저항 탐사에서는 한 쌍의 전류전극을 통하여 지하에 전류를 주입하고, 다른 한 쌍의 전위전극에서 전위차를 측정하여 지하의 전기비저항 분포에 관한 정보를 얻어낸다. 전류전극에서 전류를 주입하면 지하매질에는 균질 반무한 공간에서의 전기장인 1차전기장(primary electric field, E_p)이 형성되며, 이상체의 표면에는 1차전기장에 의하여 표면전하가 생성된다. 이 표면전하는 Coulomb의 법칙에 의하여 2차전기장(secondary electric field, E_s)을 만들어 낸다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_s. \tag{1}$$

따라서 전기비저항 탐사에서는 이 2차장만이 이상체의 위치, 크기, 형상, 전기비저항 등에 관한 각종 정보를 가지고 있다. 실제 전기비저항 탐사에서 측정되는 양은 전위전극 사이의 전위차이며, 전위도 마찬가지로 1차전위(primary potential, V_p)와 2차전위(secondary potential, V_s)의 합으로 나타난다.

$$V = V_p + V_s. \tag{2}$$

따라서 2차전기장 혹은 2차전위를 만들어 내는 유일한 원인 제공자인 표면전하는 전기비저항 탐사법의 근간이라고 볼 수 있다. 외부에서 전기장이 가해지면 전도성 이상체의 표면에 생성되는 표면전하의 양 ρ_s 는 경계조건에 의해

$$\rho_s = 2\epsilon_0 \frac{\sigma_b - \sigma}{\sigma_b + \sigma} E_{avg}^{(n)} \tag{3}$$

로 주어진다(Kaufman, 1992, p.265-266). 여기서 σ_b 는 배경매질의 전기전도도, σ 는 이상체의 전기전도도, ϵ_0 는 유전율, 첨자 (n) 은 경계면에 수직한 방향을 의미하며, σ_{avg} 와 $E_{avg}^{(n)}$ 는 경계면에서의 평균 전기전도도와 전기장 수직성분의 평균을 의미한다. (3)식에서 표면전하의 양은 전기전도도차에 비례하므로 전기전도도차가 클수록 증가한다. 이 표면전하에 의해 생성되는 2차전기장은 측정방향의 단위벡터를 \mathbf{a}_r 이라 할 때

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_s \frac{\rho_s(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} \mathbf{a}_r ds', \tag{4}$$

2차전위는

$$V_s(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_s \frac{\rho_s(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} ds' \tag{5}$$

로 주어진다. 따라서 전기비저항 탐사에서 이상 전위의 크기는

표면전하의 기하학적 분포특성과 그 양에 비례한다. 즉 지하에 주입되는 전류의 크기가 클수록 1차전기장이 커지고, 이에 의해 이상체 표면에 생성되는 표면전하의 양이 증가하며, 결과적으로 측정점에서의 2차전위가 증가하게 된다.

한편, 전기전도도 σ_b 인 균질한 배경매질에 전기전도도 σ 인 전도성 이상체가 존재할 경우, 이상체와 배경매질 사이의 경계면에서 전기장 E 와 전류밀도 J 는 다음의 경계조건을 만족한다.

$$\sigma_b E_b^{(n)} = \sigma E^{(n)}, \quad \frac{J_b^{(t)}}{\sigma_b} = \frac{J^{(t)}}{\sigma}, \tag{6}$$

여기서 첨자 (n) 은 경계면에 수직방향, (t) 는 경계면에 접선방향을 의미한다. 전기장의 접선성분은 연속이고, $\sigma_b < \sigma$ 이므로 이상체내의 전기장은 배경매질에서의 전기장보다 그 크기가 작다. 그러나 전류밀도는 이상체 내부에서 오히려 그 크기가 증가한다. 즉 전도성 이상체 내부에서 전기장은 감소하고 전류밀도는 증가하게 된다. 만약 이상체가 완전도체(ideal conductor)일 경우, 이상체 내부에서의 전기장은 1차장과 2차장의 크기가 같고 방향이 반대여서 0이 되고, 전기장의 접선성분이 연속이라는 가정에 의해 이상체 표면에서의 전기장의 접선성분 또한 0이 되며, 따라서 전류밀도의 접선성분도 존재하지 않는다. 반면에 전류밀도의 수직성분이 연속이므로 (6)식에서 비록 전기장이 0이라도 전기전도도가 무한대이기 때문에 전류밀도는 경계면에 수직한 성분만이 존재하고 유한한 값을 가지게 된다. 이와 같이 이상체와 배경매질 사이의 전기전도도 대비가 커지게 되면 이상체에 흐르는 전류의 크기가 일정값에 수렴하는 전류포화현상이 발생한다.

이러한 전류포화현상은 모두 표면전하에 기인한다. 전도성 이상체 표면에 생성되는 표면전하의 양은 이상체가 완전도체일 경우 최대값에 도달한다. 그러나 이상체와 배경매질 사이의 전기전도도 대비가 적을 경우에는 표면전하의 양은 전기전도도 대비에 비례해 증가하지만, 일정 수준에 도달하게 되면 그 증가율이 현격하게 둔화되며, 궁극적으로는 총 표면전하의 양과 이상체에 흐르는 전류의 양은 일정값에 수렴하게 된다. 이러한 현상은 전기비저항 탐사 결과와도 직접적으로 관련된다. 즉 이상체와 배경매질의 전기전도도 대비가 적을 경우에는 겐보기비저항 이상은 전기전도도 대비에 비례해 증가하지만, 전기전도도 대비가 어느 정도 이상이 되면 전류포화현상에 의해 겐보기비저항 이상은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값에 수렴하게 된다.

1차원 모델

수평 2층 구조에서 1층의 두께가 d , 전기비저항이 ρ_1 , 2층의 전기비저항이 ρ_2 일 경우, 지표면에서 전류전극을 통하여 전류 I 를 주입하면 전류전극에서 수평거리 r 만큼 떨어진 경계면에

서의 전기장의 수직성분은

$$E^{(n)} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{d}{(r^2 + d^2)^{3/2}} = E_p \cos\theta \quad (7)$$

로 주어진다(Grant and West, 1965; Kaufman, 1992). 여기서 r 은 전류전극으로 부터의 수평거리이며, θ 는 수평 경계면에 수직인 방향과 1차전기장이 이루는 각도이다. 경계면에 위치하는 표면전하는 경계면상에서 전기장의 수직성분을 생성하지 않는다. 따라서 경계면 상에서 전기장의 수직성분은 전류전극에 의한 1차전기장의 수직성분과 동일하다. 결과적으로 (3) 식으로부터 1층과 2층의 경계면에 생성되는 표면전하밀도는

$$\rho_s = 2\varepsilon_0 K E^{(n)} = 2\varepsilon_0 K E_p \cos\theta = \frac{\varepsilon_0 \rho_1 I}{\pi} K \frac{d}{(r^2 + d^2)^{3/2}},$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (8)$$

이 된다. (8)식에서 표면전하의 기하학적 분포양상은 전기전도도 대비에 무관하며, 그 크기는 1차전기장의 크기와 전기비저항 반사계수 K 에 비례한다. 즉 전기전도도 대비나 1차전기장의 크기는 표면전하의 분포양상에는 영향을 미치지 못하며 단순히 표면전하의 양을 결정하게 된다. 이는 전기비저항 탐사에

서 측정되는 저항값(V/I)은 주입되는 전류의 양에 관계없으며, 전기비저항 반사계수 K 에 의해 결정됨을 의미한다. 또한 전기비저항 반사계수는 $|K| \leq 1$ 의 조건을 만족하므로, 결과적으로 측정 저항 또는 최종적인 겉보기비저항이 일정범위 내의 값을 갖도록 제한한다. 결국 2층 구조 모델의 경우에도 전기전도도 대비가 클 경우 전류포화현상에 의해 최종적으로 얻어지는 겉보기비저항이 일정값으로 수렴하는 양상을 보이게 된다.

Fig. 1은 상부층의 두께가 10 m, 전기비저항 100 ohm-m인 2층 구조 모델에서 제2층의 전기비저항이 변화할 경우 겉보기비저항의 반응양상을 나타낸 것이다. 사용된 전극배열은 슬럼버져 배열이며, 전기전도도 대비가 100배 이상일 경우에 전류포화현상에 의하여 겉보기비저항은 2층이 완전도체일 경우의 값에 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

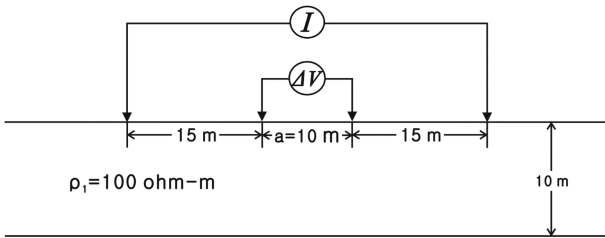
한편 전기비저항 수직탐사(sounding)에서 웨너 혹은 슬럼버져 배열의 경우 전류전극 사이의 간격이 커질수록 심부층의 전기비저항 값에 수렴한다. 이는 전류포화현상과는 관련이 없다는 점에 유의해야 한다. 예를 들어 2층 구조에서 2층이 완전도체일 경우 전류전극 사이의 간격이 매우 크면 겉보기비저항은 거의 0에 수렴하게 된다. 이는 전기비저항 수직탐사의 원리에서 전류전극 사이의 간격이 커지면 겉보기비저항은 2층의 전기비저항을 나타내는 특성에 기인한다.

2차원 모델

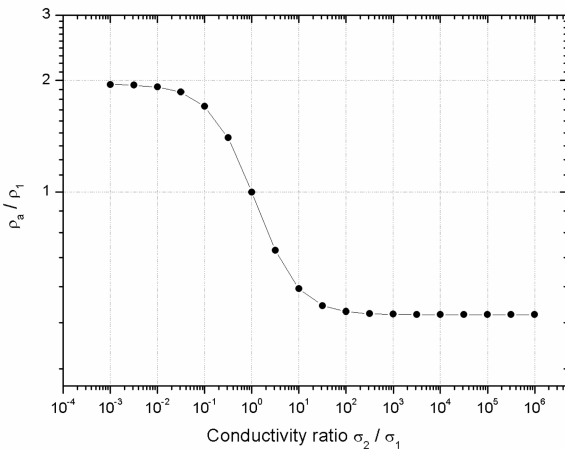
Fig. 2에 주어진 바와 같이 전기전도도 σ_b 인 전체공간(whole space)내에 존재하는 전기전도도 σ 인 타원형 이상체(elliptic cylinder)에 균일한 1차전기장(uniform primary electric field)이 가해진 경우를 생각해 보자. 이 경우 이상체의 기하학적 형상을 고려하여 타원 좌표계를 도입하면

$$x = a \cosh \zeta \cos \eta, \quad y = y, \quad z = a \sinh \zeta \sin \eta \quad (9)$$

로 표현할 수 있다. 타원형 이상체의 x -축 방향 길이 a , z -축 방향 길이를 b 라 하면, a 는 중심에서 초점까지의 거리로 $\sqrt{a^2 - b^2}$ 이며, 이상체 외부 및 내부에서의 전위는 각각 다음과



(a)



(b)

Fig. 1. An example showing the effect of current saturation. (a) Two layer model. (b) Normalized apparent resistivity curves as the function of conductivity contrast.

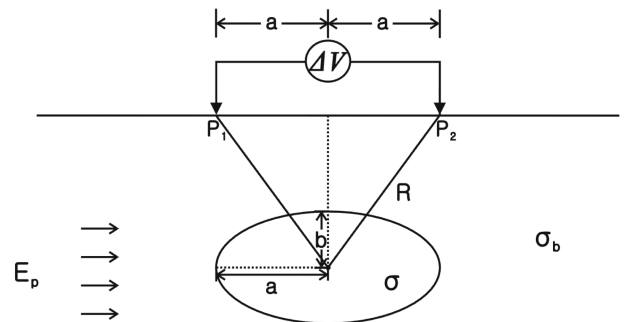


Fig. 2. An elliptic cylinder model in a uniform primary electric field.

같이 주어진다(Kaufman, 1992, p.344).

$$V_1 = -\alpha E_p \left(\cosh \xi + \frac{\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_b}\right) \sinh \xi_0 e^{\xi_0}}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} e^{-\xi} \right) \cos \eta, \quad (\xi \geq \xi_0) \quad (10-1)$$

$$V_2 = -\alpha E_p \frac{1 + \tanh \xi_0}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} \cosh \xi \cos \eta, \quad (\xi < \xi_0). \quad (10-2)$$

또한 타원좌표계의 기하학적 형상에서

$$\tanh \xi_0 = \frac{b}{a}, \quad \sinh \xi_0 = \frac{b/a}{\sqrt{1 - b^2/a^2}}, \quad e^{\xi_0} = \sqrt{\frac{1 + b/a}{1 - b/a}}$$

의 관계를 갖는다.

또한 타원형 이상체 외부에서 전기장은

$$E_{1\xi} = \frac{E_p}{\sqrt{\cosh^2 \xi - \cos^2 \eta}} \left(\sinh \xi - \frac{\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_b}\right) \sinh \xi_0 e^{\xi_0}}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} e^{-\xi} \right) \cos \eta, \quad (\xi \geq \xi_0) \quad (11-1)$$

$$E_{1\eta} = \frac{-E_p}{\sqrt{\cosh^2 \xi - \cos^2 \eta}} \left(\cosh \xi + \frac{\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_b}\right) \sinh \xi_0 e^{\xi_0}}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} e^{-\xi} \right) \sin \eta, \quad (\xi \geq \xi_0) \quad (11-2)$$

내부에서의 전기장은

$$E_{2\xi} = \frac{E_p}{\sqrt{\cosh^2 \xi - \cos^2 \eta}} \frac{1 + \tanh \xi_0}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} \sinh \xi \cos \eta, \quad (\xi < \xi_0) \quad (12-1)$$

$$E_{2\eta} = \frac{-E_p}{\sqrt{\cosh^2 \xi - \cos^2 \eta}} \frac{1 + \tanh \xi_0}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} \cosh \xi \sin \eta, \quad (\xi < \xi_0) \quad (12-2)$$

이때 타원형 이상체의 표면에 생성되는 표면전하밀도는 (3)식과 (11), (12)식으로부터

$$\rho_s = \frac{\epsilon_0 E_p}{\sqrt{\cosh^2 \xi_0 - \cos^2 \eta}} \frac{\left(\frac{\sigma}{\sigma_b} - 1\right) e^{\xi_0} \tanh \xi_0 \cos \eta}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0}, \quad (\xi = \xi_0) \quad (13)$$

로 주어진다. 전도성 이상체일 경우 η 가 $-\pi/2$ 에서 $\pi/2$ 구간에서는 양의 표면전하가, 나머지 구간에서는 음의 표면전하가 분포함을 알 수 있다. 즉 이상체의 좌측에는 음의 표면전하가, 우측에는 양의 표면전하가 생성된다. 물론 부도체일 경우에는 이와는 반대의 표면전하분포를 보이게 된다. 또한 생성되는 표면전하의 양은 전기전도도 대비와 밀접한 관계가 있다.

이제 타원형 이상체 내부에서의 전기장과 전류밀도에 대하여 생각해 보자. 타원형 이상체에 의한 표면전하, 전기장과 전류밀도는 전기전도도 대비 뿐 아니라 이상체의 형상에 의해서도 좌우되지만, 여기서는 문제를 단순화하기 위하여 $a = b$ 인 원통형 이상체로 가정하자. 이 경우 x -축상에서 x -축 방향의

전기장은

$$E_{2x} = -E_{2\eta} = \lim_{\xi_0 \rightarrow 0} \frac{E_p}{\sqrt{\cosh^2 \xi_0 - \cos^2 \eta}} \frac{1 + \tanh \xi_0}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b} \tanh \xi_0} \cosh \xi_0 \sin \eta = \frac{2E_p}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b}}, \quad (14)$$

전류밀도는 Ohm의 법칙에서

$$J_{2x} = \sigma E_{2x} = \frac{2\sigma E_p}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_b}}. \quad (15)$$

따라서 이상체가 완전도체일 경우 전기장은 0이 되며, 전류밀도는 이상체가 없을 경우의 2배가 된다. 반면 이상체가 부도체일 경우에는 이상체 내부의 전기장은 2배가 되며, 전류밀도는 0이 된다. 결국 2차원 타원형 이상체와 배경매질의 전기전도도 대비에 의해 생성되는 표면전하, 전기장, 전류밀도의 크기 등은 전기전도도 대비에 따라 변화하지만, 부도체 혹은 완전도체 사이의 값을 보이며, 이는 2차원 이상체의 경우에도 전류포화현상이 발생함을 잘 설명해 주고 있다.

이제 이러한 전류포화현상이 전기비저항 탐사결과인 겉보기 비저항에 미치는 영향에 대하여 알아보자. 문제를 단순화하기 위하여 Fig. 2에 주어진 전위전극 P_1, P_2 사이의 간격을 $2a$ 라 하면, 전위차는 (10-1)식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta V = 2aE_p \left[1 - K \cdot \frac{a^2}{R^2} \right], \quad K = \frac{\sigma - \sigma_b}{\sigma + \sigma_b}, \quad (R \geq a). \quad (16)$$

가해진 1차전기장에 의한 1차전위차 $\Delta V_p = 2aE_p$ 이므로 겉보기 비저항은

$$\rho_a = \rho_b \frac{\Delta V}{\Delta V_p} = \rho_b \left[1 - K \cdot \frac{a^2}{R^2} \right], \quad (R \geq a) \quad (17)$$

(17)식에서 겉보기비저항은 원통형 이상체의 반사계수와 이상체와 측정점의 기하학적 위치에 의해 결정된다. 반사계수는 $|K| \leq 1$ 의 값을 가지므로 부도체나 전도체 모두 동일한 크기의 겉보기비저항 이상을 나타내게 되며, 이는 앞의 2층 구조 모델과 동일하다.

앞의 이론해는 전체공간내의 원통형 이상체에 균일 1차전기장이 가해진 경우의 해이다. 여기서는 실제 전기비저항 탐사에서 사용하는 지표상의 점 전류원에 의해 발생하는 1차전기장이 가해진 경우를 다룬다. 이 경우 이론해가 존재하지 않으므로 수치 모델링을 사용하였다. 한편 이론해와 수치해를 비교하기 위해서는 가능한 동일한 조건을 만들어 주어야 한다. 이를 위하여 Fig. 3(a)와 같은 모델을 제시한다. 우선 균일 전기장 조건을 만들기 위하여 전류전극 사이에 충분한 거리가 확보되어야 하며, 원통형 이상체는 두 전류전극의 중앙에 위치해야 한다. 두 전류전극의 중앙에서는 전기장의 수평방향이 우세하며, 균일 전기장에 가깝게 된다. 전체공간을 가정하기 위하

여 이상체와 축선의 심도를 1000 m 이상으로 설정하였으며, 모델링 방법으로 3차원 적분방정식법을 사용하였기 때문에 2차원 이상체를 가정하기 위하여 이상체의 주향방향 길이를 전류전극 사이의 간격보다 충분히 길게 설정하였다. 또한 원통형 이상체를 동일한 체적을 갖는 정사각형 2차원 이상체로 대체하였다. Fig. 3에 주어진 모델은 이론해에서 반경 5 m인 원통형 이상체를 동일 면적의 정사각형 2차원 모델로 대체한 것이다.

Fig. 3(b)는 전기전도도 대비에 따른 적분방정식 결과인 수치해와 이론해를 비교한 것이다. 전반적으로 그 반응양상은 매우 유사하며, 전기전도도 대비가 클 경우 전류포화현상에 의하여 겉보기비저항 이상이 수렴하는 양상은 확실하게 나타나고 있다. 이론해의 경우 부도체인 경우에는 $1.2\rho_b$, 전도체인 경우에는 $0.8\rho_b$ 의 값을 보인다. 반면, 수치해는 부도체인 경우 겉보기비저항이 $1.19\rho_b$, 전도체인 경우 $0.78\rho_b$ 에 수렴하는 양상을 보인다. 이러한 차이는 원통형 이상체를 정사각형 이상체로 근사하는 과정과, 균일 전기장을 근사하는 과정에서 발생한 것으로 보인다. 또한 표면전하가 집적되는 정사각형의 측면 상부로부터 측정점까지의 거리가 원통형 이상체의 경우보다 더 가깝다는 점도 오차의 원인 중의 하나인 것으로 생각된다. 그러나 실질적으로 이 오차는 전류포화현상을 설명하는데 크게 문제가 되지 않는다.

이러한 전류포화현상은 지표 전기비저항 탐사의 경우에도

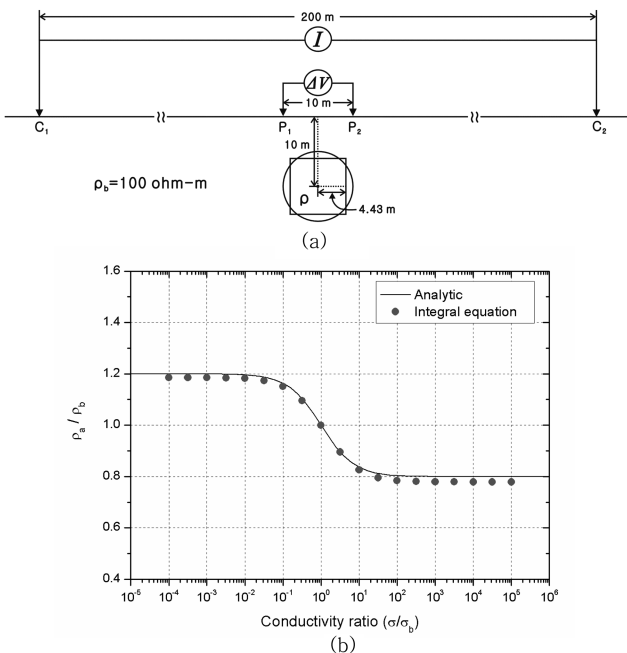


Fig. 3. An example showing the effect of current saturation. (a) A circular cylinder and corresponding rectangular cylinder model in a homogeneous whole space. (b) Normalized apparent resistivity variations as the function of conductivity contrast. Solid line in (b) represents analytic solution in whole space due to uniform primary electric fields while dots are from integral equation solution.

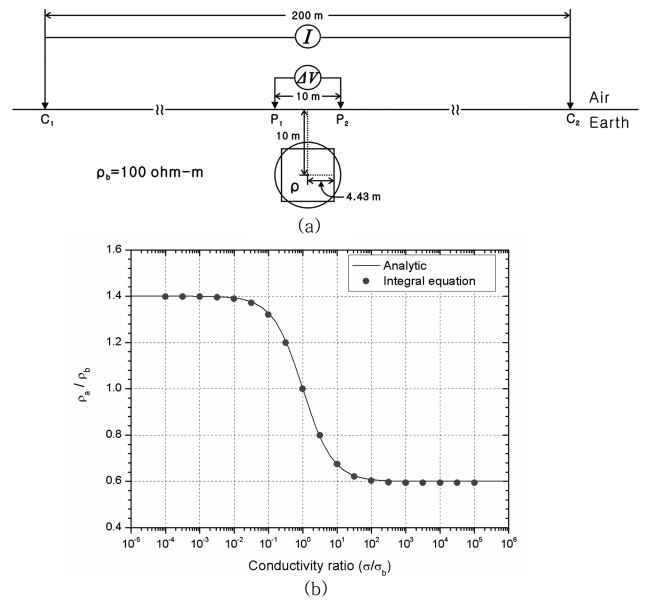


Fig. 4. An example showing the effect of current saturation. (a) A circular cylinder and corresponding rectangular cylinder model in a homogeneous half-space. (b) Normalized apparent resistivity variations as the function of conductivity contrast. Solid line in (b) represents analytic solution multiplied by 2 for whole space due to uniform primary electric fields while dots are from integral equation solution.

동일하게 나타난다. Fig. 4(a)는 전류원과 측점이 지표면에 위치하며, 이상체도 지표면 근처로 이동했다는 점을 제외하면, Fig. 3(a)의 모델과 동일하다. 물론 지표 경계면 효과로 인하여 전위, 전기장, 전류밀도 등은 전체공간의 경우와는 차이가 존재한다. Fig. 4(b)는 적분방정식을 사용하여 전기전도도 대비에 따른 겉보기비저항 변화양상을 균일 1차전기장 이론해 결과와 비교한 것이다. 반무한 공간에서 존재하는 원통형 이상체에 대한 균일 1차전기장 해는 전체공간에서의 겉보기비저항 이상을 단순히 2배로 증가시키는 방법을 사용하였다. 이 경우, 지표 경계면에 의해 생성되는 영상 이상체(image source)와 실제 이상체 사이의 상호작용을 고려하지 못한다는 점을 유의해야 한다. 그럼에도 불구하고 적분방정식법의 결과는 앞서 설명한 전체공간의 경우와 매우 유사한 양상을 보이고 있다. 이상체가 주변매질에 비하여 비전도성일 경우에는 균일 전기장의 결과와 잘 일치하는 양상을 나타내며, 전기전도도 대비 10^{-2} 이하에서 겉보기비저항이 일정값에 수렴하고 있다. 이상체가 전도성일 경우에도 전기전도도비 10^2 이상에서 거의 수렴하고 있다.

3차원 모델

Fig. 5에 나타난 것처럼 전기전도도 σ_b 인 전체공간 내에 존재하는 전기전도도 σ 인 구형 이상체(sphere)에 균일한 1차전

기장이 가해진 경우를 생각해 보자. 이 경우 구형 이상체 중심으로부터 R 만큼 떨어진 지점에서에의 전위는 다음과 같이 주어진다(Kaufman, 1992, p.340).

$$V_1 = -E_p R \cos \theta + \frac{\sigma - \sigma_b}{\sigma + 2\sigma_b} \frac{a^3}{R^2} E_p \cos \theta \quad (R \geq a), \quad (18-1)$$

$$V_2 = -\frac{3\sigma_b}{\sigma + 2\sigma_b} E_p R \cos \theta \quad (R < a). \quad (18-2)$$

(18)식에서 이때 구형 이상체의 표면에 생성되는 표면전하밀도

$$\rho_s = 3\epsilon_0 \frac{\sigma - \sigma_b}{\sigma + 2\sigma_b} E_p \cos \theta \quad (R = a). \quad (19)$$

로 주어진다. 이 표면전하는 $\theta = \pi/2$ 평면을 기준으로 양 쪽 구면에 음과 양전하가 대칭으로 분포하며, 이러한 전하분포에 의해 2차전기장이 생성된다. (19)식에 나타난 바와 같이 생성되는 표면전하의 크기는 구면과 1차전기장이 수직인 지점에서 최대값을 보이며, 이 크기는 절연체일 경우에는 $\rho_s = -1.5\epsilon_0 E_p$, 완전도체일 경우에는 $\rho_s = 3\epsilon_0 E_p$ 가 된다. 또한 구형 이상체 내부에서의 전기장과 전류밀도는

$$E_2 = \frac{3\sigma_b}{\sigma + 2\sigma_b} E_p, \quad J_2 = \sigma E_2 = \frac{3\sigma\sigma_b}{\sigma + 2\sigma_b} E_p \quad (R \leq a), \quad (20)$$

이 된다. 구형 이상체가 완전도체일 경우 내부의 전기장은 0이 되며, 전류밀도는 $J = 3\sigma_b E_p$ 로 이상체가 없을 경우의 3배로 증가한다. 반대로 이상체가 절연체일 경우 $E = 1.5E_p$ 로 증가하며, 전류밀도는 0이 되어 전류가 흐르지 않게 된다(Kaufman, 1992).

이상에서 구형 이상체와 배경매질간의 전기전도도 대비가 크지 않을 경우에는 생성되는 표면전하, 전기장, 전류밀도는 전기전도도 대비에 비례하여 증가/감소하는 특성을 보인다. 그러나 대비가 커지게 되면 부도체 또는 완전도체의 반응값으로 수렴하게 된다. 결과적으로 전기전도도 대비가 일정값 이상이 되면 표면전하밀도, 전기장, 전류밀도의 변화가 거의 없어지게 되는 전류포화현상이 발생하게 된다.

이제 이러한 전류포화현상이 전기비저항 탐사결과인 겉보기

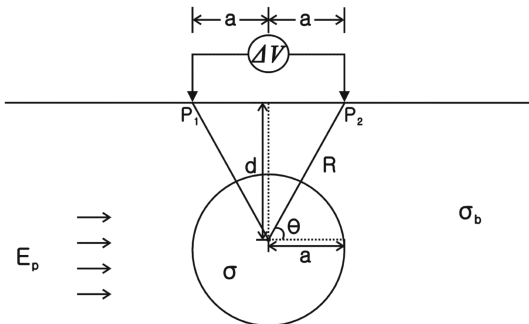


Fig. 5. A sphere model in a uniform primary electric field.

비저항에 미치는 영향에 대하여 알아보자. Fig. 5에 주어진 전위전극 P_1P_2 사이의 전위차는

$$\Delta V = 2aE_p \left[1 - K \cdot \frac{a^3}{R^3} \right], \quad K = \frac{\sigma - \sigma_b}{\sigma + 2\sigma_b}, \quad (R \geq a). \quad (21)$$

가해진 1차전기장에 의한 1차전위차 $\Delta V_p = 2aE_p$ 이므로 겉보기비저항은

$$\rho_a = \rho_b \frac{\Delta V}{\Delta V_p} = \rho_b \left[1 - K \cdot \frac{a^3}{R^3} \right], \quad (R \geq a) \quad (22)$$

가 된다. 여기서 구형 이상체에 의한 전기비저항 반사계수는 $-0.5 \leq K \leq 1$ 이므로 겉보기비저항도 범위가 제한된다. 예를 들어 Fig. 5에서 $a = 5m, d = 10m$ 이고, 구형 이상체가 절연체일 경우 $\rho_a = 1.045\rho_b$, 완전도체일 경우 $\rho_a = 0.911\rho_b$, 나머지 경우에는 이 범위내의 값을 갖는다. 즉 전기전도도 대비가 증가해도 일정값 이상에서는 겉보기비저항은 전류포화현상에 의하여 거의 변화를 보이지 않음을 의미한다.

Fig. 6은 원통형 및 구형 이상체에 대하여 표면전하밀도가 최대가 되는 점에서의 전기전도도 대비에 따른 표면전하밀도의 변화양상이며, 표면전하밀도의 크기가 작기 때문에 $\epsilon_0 E_p$ 로 정규화한 값을 도시하였다. 표면전하밀도가 최대가 되는 점은 원통형 모델의 경우 $\eta = 0$ 인 원통의 표면이며(Fig. 2), 구형모델의 경우 $\theta = 0$ 인 구의 표면이다(Fig. 5). 두 경우 모두 전기전도도 대비가 100배 정도에서 모두 일정값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 우선 2차원 모델인 원통형 이상체인 경우 2층 구조 모델과 같이 반사계수는 $-1 \leq K \leq 1$ 의 범위를 가지며, 반사계수에 비례하는 표면전하밀도는 반사계수와 동일한 변화양상을 보인다. 즉 원통형 이상체가 부도체와 완전도체에 가까울 경우 동일한 크기의 표면전하가 생성됨을 알 수 있으며, 다만 전하의 극성만이 반대로 나타난다. 반면 구형 이상체의 경우 반사계수는 $-0.5 \leq K \leq 1$ 의 범위를 가지므로 전도성 이상체가

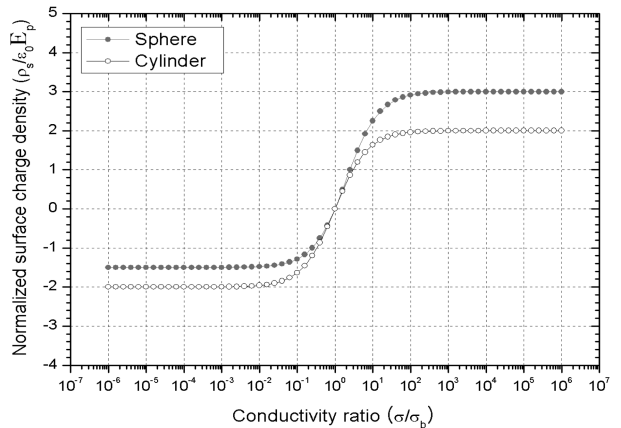


Fig. 6. Normalized surface charge density for the cylinder and sphere models as the function of conductivity ratio at the point showing the maximum surface charge density.

비전도성 이상체 보다 더 많은 양의 표면전하를 생성한다. 또한 전도성 이상체의 경우 구형 이상체가 원통형 이상체보다 더 많은 양의 표면전하를 생성하며, 부도체인 경우에는 원통형 이상체에 생성되는 표면전하의 양이 더 많다는 것을 알 수 있다. 표면전하의 양은 측정되는 겉보기비저항 이상의 크기를 결정한다. 즉 표면전하의 양이 클수록 겉보기비저항 이상의 크기는 커지며, 작을수록 작아진다. 결과적으로 반사계수는 이상체의 기하학적 형상에 따라 달라지며, 이에 의해 생성되는 표면전하의 양과 획득되는 겉보기비저항 이상의 크기도 달라진다. 또한 $R > a$ 일 경우 2차원 원통형 이상체의 경우 겉보기비저항 이상은 대략 $(a/R)^2$ 에 비례하지만, 구형 이상체는 $(a/R)^3$ 에 비례한다. 즉 겉보기비저항 이상은 이상체의 기하학적 형상과 전극의 위치에 의해서도 지배됨을 알 수 있다. 이상의 분석은 표면전하밀도가 최대가 되는 점에서 수행되었지만, 다른 지점에서 그 크기만이 작아질 뿐 변화양상은 거의 유사할 것으로 해석된다.

Fig. 7은 반무한 공간에 위치한 구형 이상체에 대한 이론해와 수치해를 비교한 것이다. 사용된 모델은 전류원과 측정지표면에 위치하며, 이상체도 지표면 근처로 이동했다는 점을 제외하면, 앞의 전체공간 정유면체 모델과 동일하다. 물론 이 경우 지표 경계면 효과로 인하여 전위, 전기장, 전류밀도 등은 앞의 전체공간의 경우와는 차이가 존재한다.

Fig. 7(b)는 전기전도도 대비에 따른 적분방정식을 사용하여

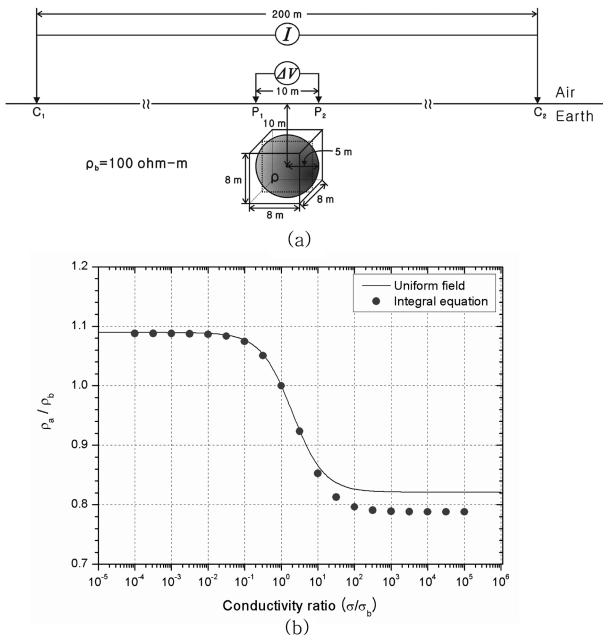


Fig. 7. An example showing the effect of current saturation. (a) A sphere and corresponding cube model in a homogeneous half-space. (b) Normalized apparent resistivity variations as the function of conductivity contrast. Solid line in (b) represents analytic solution multiplied by 2 for whole space due to uniform primary electric fields while dots are from integral equation solution.

얻어진 겉보기비저항 변화양상을 균일 1차전기장 해와 비교한 것이다. 반무한 공간에서 존재하는 구형 이상체의 균일 1차전기장 해는 전체공간에서의 겉보기비저항 이상을 단순히 2배로 증가시키는 방법을 사용하였다. 이 경우 지표 경계면에 의해 생성되는 영상 이상체와 실제 이상체 사이의 상호작용을 고려하지 못한다는 문제가 있으나, 그 오차는 10% 이내인 것으로 보고된 바 있다(Grant and West, 1965).

우선 적분방정식법의 결과는 앞서 설명한 전체공간의 경우와 매우 유사한 양상을 보이고 있다. 이상체가 주변매질에 비하여 비전도성일 경우에는 균일 전기장의 결과와 잘 일치하는 양상을 나타내며, 약 전기전도도 대비 10^{-2} 이하에서 겉보기비저항이 일정값에 수렴하고 있다. 이상체가 전도성일 경우에도 전기전도도 대비 10^2 이상에서 거의 수렴하고 있다. 전도성 이상체일 경우 균일 전기장 해보다는 겉보기비저항 이상이 더 크게 나타나고 있으나, 그 차이는 최대 4% 이내로 전류포화현상을 설명하는 데는 큰 문제가 없다. 또한 전기비저항 탐사에서 전기전도도 대비가 10^2 배 이상일 경우 완전도체로 가정해도 무리가 없다는 Eloranta (1986)의 주장과도 일치한다.

한편 이상의 분석은 균일 전기장을 가정한 이론해와 수치해를 근거로 이루어졌다. 여기서는 실제 현장조사와 같이 반무한 공간에 이상체가 존재하고, 통상적인 전기비저항 지표탐사가 수행될 경우에 대한 전류포화현상을 알아보기로 한다. Fig.

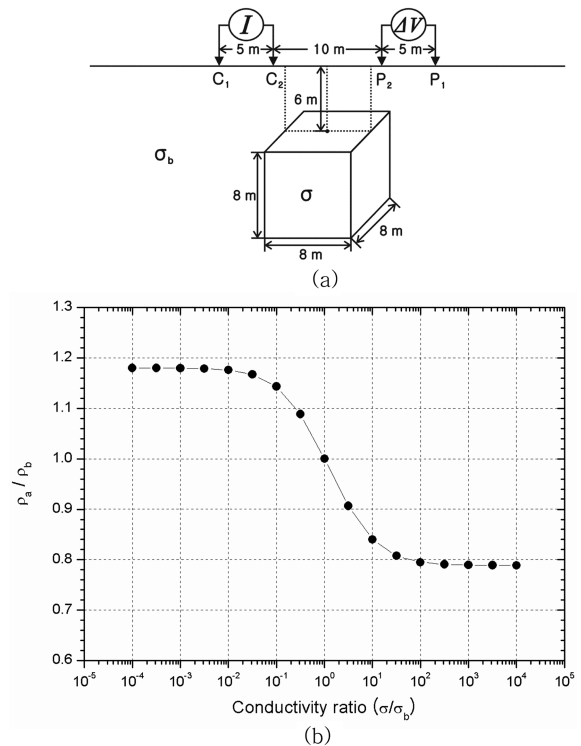


Fig. 8. An example showing the effect of current saturation in the case of surface dipole-dipole resistivity measurement. (a) A cube model in homogeneous half-space. (b) Normalized apparent resistivity as the function of conductivity ratio.

8(a)는 전극의 위치 및 지하 이상체 모델을 나타낸 것이며, (b)는 정육면 이상체와 배경매질간의 전기전도도 대비 변화에 따른 겉보기비저항의 변화양상을 나타낸 것이다. 이론해가 존재하지 않으므로 적분방정식법을 사용하여 겉보기비저항을 산출하였다. 이 경우에도 전기전도도 대비가 100배 이상이면 전류포화현상이 발생하고, 겉보기비저항이 일정값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 다만 앞의 구형 이상에 대한 균일 전기장해의 경우보다 겉보기비저항 이상의 크기가 다소 작게 나타나는데, 이는 가해진 1차전기장이 균일장이 아니기 때문인 것으로 해석된다. 또한 여기에 나타내지는 않았지만 이러한 전류포화현상은 이상체의 심도가 증가할 경우에도 동일하게 나타나는 것으로 확인되었다. 즉 이상체의 심도가 깊을 경우에는 겉보기비저항 이상의 크기는 작아지지만, 전기전도도 대비가 100배 이상에서는 일정값에 수렴하는 것을 확인하였다.

이상에서 전기비저항 반사계수와 이상체 경계면과 1차전기장의 방향에 따라 생성되는 표면전하의 양이 결정되고, 이에 의해 겉보기비저항 이상의 크기도 결정된다. 전류포화현상은 이상체와 배경매질간의 전기전도도 대비가 매우 클 경우에 나타나는 현상으로 이상체에 흐르는 전류의 양이 포화되어 더 이상의 증가나 감소가 발생하지 않는 현상이다. 이러한 전류포화현상은 역산에서 이상체의 정확한 물성을 추정하는데 방해요인으로 작용하지만, 실제 지하에 존재하는 이상체의 전기전도도는 그리 높지 않기 때문에 큰 문제는 없어 보인다.

결 론

본 연구에서는 전기비저항 탐사에서 이상체와 배경매질 사이의 전기전도도 대비가 매우 클 경우에 발생하는 전류포화현상에 대하여 해석적 방법과 수치 모델링을 통하여 고찰하였다. 또한 이 전류포화현상이 겉보기비저항 이상에 미치는 영향을 분석하였다.

전기비저항 탐사에서 발생하는 겉보기비저항 이상은 이상체와 배경매질의 경계면에 형성되는 표면전하에 의해 발생한다. 일반적으로 이 표면전하의 양이 클수록 겉보기비저항 이상은 증가하므로 이 표면전하가 많이 발생하도록 탐사 계획을 수립하는 것이 중요하다. 표면전하의 양을 증가시키기 위해서는 우선 강력한 1차전기장을 가해 주는 것이 필요하다. 또한 1차전기장이 이상체와 배경매질의 경계면을 수직으로 통과하도록 해야 한다. 한편 표면전하 자신은 물론 이에 의해 생성되는 2차전기장과 2차전위, 나아가서는 겉보기비저항 이상은 전기비저항 반사계수와 이상체의 형상에 의해 결정된다. 이 반사계수

는 배경매질과 이상체의 전기비저항의 함수로 주어지며, 이상체의 형상에 따라 다른 값을 보이지만, 일정 범위내의 값을 갖는다. 따라서 전기전도도 대비가 클 경우 전류포화현상이 발생하며, 전류포화현상은 겉보기비저항 이상의 범위를 제한하게 된다. 2층 구조, 원통형 및 구형 이상체에서는 대략 전기전도도 대비가 100배 이상이면 전류포화현상이 발생하는 것으로 나타났으며, 다른 형태의 모델도 이 정도에서 전류포화현상이 발생할 것으로 예상된다.

역산의 관점에서 전류포화현상은 바람직하지 못한 측면이 있다. 일단 전류포화가 일어나면 이상체의 전기비저항이 변해도 측정값의 변화가 나타나지 않으며, 이는 역산을 통하여 이상체의 정확한 전기비저항을 추정하는데 어려움이 있음을 의미한다. 물론 역산을 통하여 얻어진 전기비저항 값으로부터 전반적인 전기비저항 분포를 파악하는 데는 문제가 없다. 단지 주변보다 극단적으로 너무 크거나 작은 전기비저항 값이 역산에서 얻어졌다면 이의 신뢰도는 크지 않다는 점에 유의해야 할 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0002440).

참고문헌

- 조인기, 1989, 시추공-시추공 전기 및 자기비저항법의 3차원 모델링 및 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- Edwards, R., N., 1983, An approximate model of the magnetometric resistivity (MMR) and magnetic induced polarization (MIP) responses of dipping dikes beneath a conductive overburden, *Exploration Geophysics (ASEG)*, **14**, 30-35.
- Eloranta, E. H., 1986, Potential field of a stationary electric current using Fredholm's integral equations of the second kind, *Geophysical Prospecting*, **34**, 856-872.
- Grant, F. S., and West, G. F., 1965, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, McGraw Hill Book Company.
- Kaufman, A. A., 1992, *Geophysical Field Theory and Method, Part A*, Academic Press, Inc.
- Nabighian, M. N., Oppliger, G. L., Edwards, R. N., Lo, B. B. H., and Cheesman, S. J., 1984, Cross-hole magnetometric resistivity (MMR), *Geophysics*, **49**, 1313-1326.