

유도분극 탐사의 원리 및 활용

김빛나래¹ · 남명진^{1*} · 장한누리¹ · 장한길로¹ · 손정술² · 김희준³

¹세종대학교 에너지자원공학과

²한국지질자원연구원

³부경대학교 에너지자원공학과

The Principles and Practice of Induced Polarization Method

Bitnarae Kim¹, Myung Jin Nam^{1*}, Hannuree Jang¹, Hangilro Jang¹, Jeong-Sul Son², and Hee Jun Kim³

¹Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea

³Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

요약: 유도분극(induced polarization; IP) 탐사는 분극 현상으로 인해 매질에서 발생하는 과전압을 측정하는 전기전자 탐사법으로 주로 금속 광상을 찾을 때 사용되었으나 장비의 발전에 힘입어 최근에는 지하수, 환경 오염, 지반 등 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있다. IP 탐사에는 충전율을 측정하는 시간영역 IP 탐사, 진동수 효과를 측정하는 진동수영역 IP 탐사, 그리고 복소수 전기비저항을 측정하는 복소 전기비저항 탐사와 광대역 IP (spectral IP; SIP) 탐사 등이 있다. 또한, 최근에는 전극 형태의 측정 방법의 단점을 보완하기 위해 전자기 유도에 기초한 IP 법도 개발되어 지속적으로 연구가 진행되고 있다. 다양한 IP 탐사법에 대한 체계적인 이해를 돕기 위해 이 논문에서는 1) 송신원 형태와 측정 자료를 기준으로 IP 탐사법을 분류하고 이들에 대한 개념 정리와 함께 2) 각 탐사법의 수치 모델링 및 역산 알고리즘 발전 과정을 자세히 기술하고 3) 마지막으로 IP 탐사의 다양한 현장 활용 사례를 소개하고자 한다.

주요어: 유도분극(IP), 시간영역 IP, 진동수영역 IP, SIP, 복소 전기비저항

Abstract: Induced polarization (IP) method is based on the measurement of a polarization effect known as overvoltage of the ground. IP techniques have been usually used to find mineral deposits, however, nowadays widely applied to hydrogeological investigations, surveys of groundwater pollution and foundation studies on construction sites. IP surveys can be classified by its source type, i.e., time-domain IP estimating chargeability, frequency-domain IP measuring frequency effect (FE), and complex resistivity (CR) and spectral IP (SIP) measuring complex resistivity. Recently, electromagnetic-based IP has been studied to avoid the requirement for spike electrodes to be placed in the ground. In order to understand IP methods in this study, we: 1) classify IP surveys by source type and measured data and illustrate their basic theories, 2) describe historical development of each IP forward modeling and inversion algorithm, and finally 3) introduce various case studies of IP measurements.

Keywords: induced polarization (IP), time-domain IP, frequency-domain IP, SIP, complex resistivity

서론

유도분극(induced polarization; IP) 탐사는 전기비저항 탐사 시 발생하는 지하 매질의 분극 현상을 측정하여 매질의 구조

를 파악하는 탐사법이다. 주로 산재성(disseminated) 광상이나 반암 동광상, 황-관련 금 등 몇몇 중요한 광상 탐사(Sumner, 1976; Fink *et al.*, 1990; Ward, 1990; Gasperikova *et al.*, 2005; Seigel *et al.*, 2007), 탄화수소 탐사를 위한 IP 검층, 환경 분야에서 쓰레기 매립지나 오염된 지하수(Seigel, 1965; Sternberg, 1991; Slater and Sandberg, 2000; Gazoty *et al.*, 2012) 탐사 등에 적용되어 왔다. 특히 최근에는 다른 물리탐사법으로는 탐지하기 어려운, 유기 오염 물질 분포 파악에 대한 유도분극 탐사의 유용성이 입증되면서 관심도가 높아지고 있다.

IP 탐사는 전기비저항 탐사와 동시에 수행할 수 있다는 장점이 있으며, 측정 방법에 따라 시간영역 IP (time-domain IP) 탐사, 진동수영역 IP (frequency-domain IP) 탐사, 복소 전기비

Received: 9 March 2017; Revised: 24 May 2017;

Accepted: 27 May 2017

*Corresponding author

E-mail: nmj1203@gmail.com/nmj1203@sejong.ac.kr

Address: 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 143-747

©2017, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

저항(complex resistivity) 탐사, 광대역(혹은 빛띠) IP (spectral IP; SIP) 탐사 등으로 분류되어 왔다. 또한 최근에는 전기비저항 탐사와 동시에 수행 가능한 기본적인 IP 탐사 방법 외에도, 코일 시스템에 기초한 탐사법을 이용하여 전자기 유도에 의한 분극 현상 측정을 통해 지하 매질의 정보를 파악하려는 시도로까지 확장되고 있다. 이와 같이 다양한 IP 탐사법들은 IP 현상을 측정한다는 공통성은 있지만, 송신원이나 측정 방법들이 조금씩 달라 IP 탐사를 제대로 이해하는 데 어려움이 있었다. 뿐만 아니라, 최근에 IP 탐사법에 대한 적용성이 더욱 확대되면서 각 IP 탐사법에 대한 정확한 이해를 바탕으로 한 적용이 중요해졌다.

전극을 이용하는 전통적 IP 탐사는 기존의 전기비저항 탐사 장비를 그대로 이용하면서 추가적인 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 금속광 탐사를 제외하고는 일반적으로 신호의 크기가 작고 잡음 문제 등으로 양질의 현장 자료를 얻기가 어려웠다. 그러나 최근 24bit A/D 변환기를 도입하는 등 장비의 현대화에 힘입어 측정의 범위 및 정밀도가 높아져 작은 크기의 전위 값뿐만 아니라 전위 값의 작은 변화까지도 측정할 수 있게 되었다. 또한, 장비 자체에서 발생하는 측정기기의 내부 잡음 문제도 크게 줄일 수 있게 되면서 보다 양질의 IP 탐사 자료를 획득할 수 있게 되었다.

매질의 분극 현상을 측정하기 위한 IP 탐사 장비의 발전이 거듭되면서, 탐사에 이용되는 송신원과 측정 자료 등도 조금씩 바뀌어 IP 탐사법을 종합적이고 체계적으로 이해하는 것이 쉽지 않을 뿐만 아니라 탐사법의 이름에 대해서도 다양한 의견이 존재하고 있다. 최근 국내에서 IP 탐사 연구가 활발하게 진행되고 있는 시점에서 이러한 IP 탐사에 대한 체계적인 이해의 중요성이 커지고 있다. 이 논문에서는 IP 탐사법들을 송신원에 따라 분류하고 각 송신원에서 측정하려고 하는 반응과 해석하고자 하는 매질 특성 등에 따라 나누어 설명함으로써 IP 탐사법에 대해 체계적으로 정리하여 독자의 이해를 돕고자 한다. 이를 위해 (1) 유도분극 현상 및 이를 일으키는 메커니즘에 대해 논의한 뒤, (2) 전기비저항 탐사법 형태에 기초하고 있는 전극을 통해 매질에 직접적으로 전류를 주입함으로써 매질 내의 전류 흐름을 야기하는 탐사와 코일 등의 시스템을 이용하여 전자기 유도를 통해 매질 내 전류 흐름을 야기하는 탐사로 IP 탐사법을 크게 나누어 각 탐사법이 기초하고 있는 물리적 특성 및 탐사 방법에 대해 설명한다. 또한, (3) 각 IP 탐사에서의 수치 모델링 및 역산 연구에 대해 분석하고, 마지막으로 (4) 이러한 IP 탐사들이 여러 적용 분야에서 어떻게 활용되고 있는지 알아보기 위해 각 적용 분야별로 대표적인 IP 탐사 적용 사례들을 소개한다. 이 해설에서의 논의로부터 지속적으로 기술이 발전하고 있고 그 적용 분야도 확대되고 있는 IP 탐사에 대한 이해에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

충전을 이상체에 의한 유도분극 현상

유도분극 현상은 외부 전기장에 의해 전류가 흐를 때, 지하 매질의 공극을 채우고 있는 지층수의 이온들이 유도분극 이상체에 축적되면서(전하가 충전되면서) 나타나는 현상이다. 이러한 충전 현상에 대한 모든 메커니즘이 다 밝혀지지 않았으나, 가장 대표적으로 충전 현상을 설명하는 메커니즘으로는 전극 분극(electrode polarization)과 막 분극(membrane polarization)이 있다(부록 A). 전극 분극은 암석 내의 공극을 전도성 입자가 막고 있을 경우 그 전도성 입자 주변에서 발생하며, 막 분극은 공극의 지름이 암석 표면에 형성되는 전기적 이중층(부록 B)의 두께보다 작은 경우에 주로 발생한다.

외부에서 방향과 크기가 일정한 정전기장(electrostatic field)이 걸리면, 유도분극 이상체 내에서는 이상체의 전기적 용량만큼 공극수 내의 이온들이 이상체 주변에 쌓여 평형을 이루게 되며, 외부 전기장이 소멸하면 충전된 이온들이 방전되는 과정에서 전류의 흐름이 생긴다. 만약 외부 전기장이 일정한 진동수로 진동할 경우, 극성이 바뀔 때마다 극성에 상응하는 방향

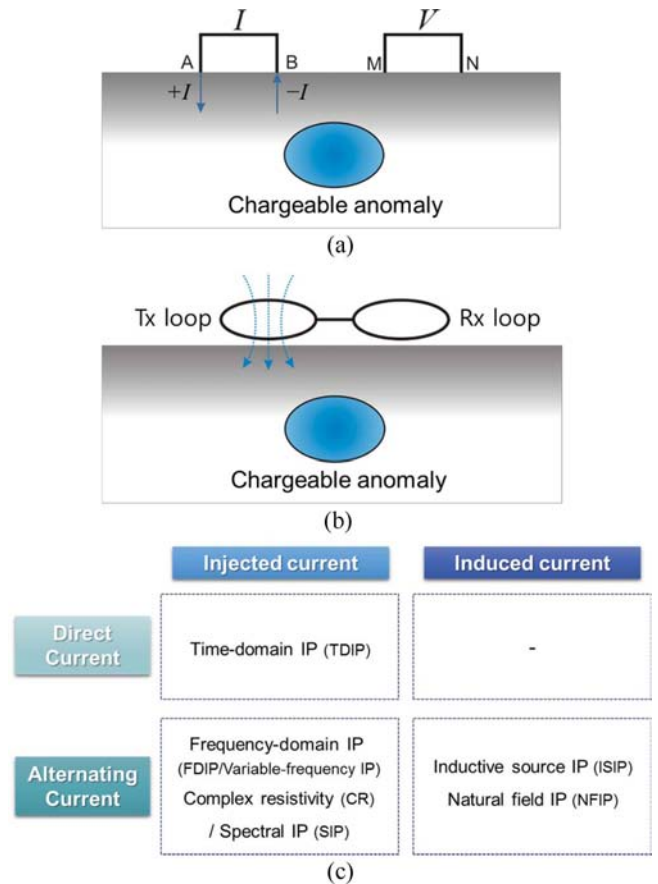


Fig. 1. (a) Electrode configuration for standard resistivity survey, (b) coil configuration for standard electromagnetic (EM) survey and (c) the classification of IP methods.

에 맞도록 충전되기 위해 이온의 이동이 발생한다. 이와 같이 외부 송신원에 의해 발생하는 전기장에 의해 충전이 일어나게 된다는 것은 결과론적으로 매질 내에서 전기적 분극이 유도된 것이며, 이러한 유도분극 현상은 과전압을 야기하므로 이러한 과전압을 측정하여 유도분극 이상체의 분포 등을 파악하는 것이 IP 탐사이다. 외부 전기장을 걸어주는 방법에는 전기비저항 탐사에서처럼 전류 전극(Fig. 1(a))을 통해 전류를 주입하여 매질 내의 전기장을 발생시키는 방법과, 전자탐사에서처럼 코일 혹은 고리(루프) 시스템(Fig. 1(b))을 이용하여 전자기 유도 현상으로 유도 기전력에 의한 전기장을 발생시키는 방법이 있다(Fig. 1(c)).

전기비저항 탐사 형태에 기초한 IP 탐사- 전극에서 전류 주입

전기비저항 탐사에서는 주로 금속 전극을 이용하는데 금속 전극과 매질 사이에서 전극 분극 현상이 일어날 수 있어 IP 탐사의 잡음원이 될 수 있기 때문에, IP 탐사에서는 비분극 전극을 사용한다. 전류 전극 사이에 전위차를 걸어줌으로써 전류를 주입하고 매질 내의 전류 흐름을 야기하는 즉, 전기비저항 탐사 형태에 기초한 유도분극 탐사에서는 전기비저항 탐사에서와 같은 직류 전류를 송신원으로 하는 시간영역 IP와 교류 전류를 송신원으로 하는 진동수영역 IP 탐사, SIP 탐사, 그리고 복소 전기비저항 탐사가 있다. 이론적으로 진동수 영역 IP 탐사는 사각파 송신원을 사용하고 있고 SIP와 복소 전기비저항 탐사에서는 사인파 송신원을 사용한다(Fig. 2).

직류 송신원 이용; 시간 영역 IP 탐사

시간영역 IP 탐사는 전기비저항 탐사와 측정방식이 동일하기 때문에 대부분의 전기비저항 탐사장비에는 시간영역 IP 탐사 측정 기능이 있다. 그러나 시간영역 IP 탐사를 위해서는 충전 현상이 충분히 일어날 수 있도록 보통의 전기비저항 탐사 보다는 전류를 오래 주입하여야 한다는 점과, 송신 전류를 끊은 이후에도 충전된 이온들의 방전 시에 발생하는 과전압의 감쇠(decay)를 측정하기 위해 전위 전극 사이의 전압을 지속적으로 측정하여야 한다는 점에서 일반적인 전기비저항 탐사와는 차이가 있다.

즉, 시간영역 IP 탐사에서는 전기장이 안정될 때까지 직류

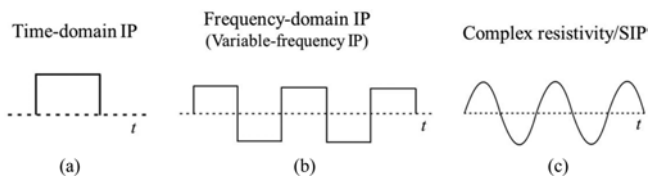


Fig. 2. Theoretical transmitting currents of (a) time-domain IP survey, (b) frequency-domain IP survey, and (c) complex resistivity or SIP survey.

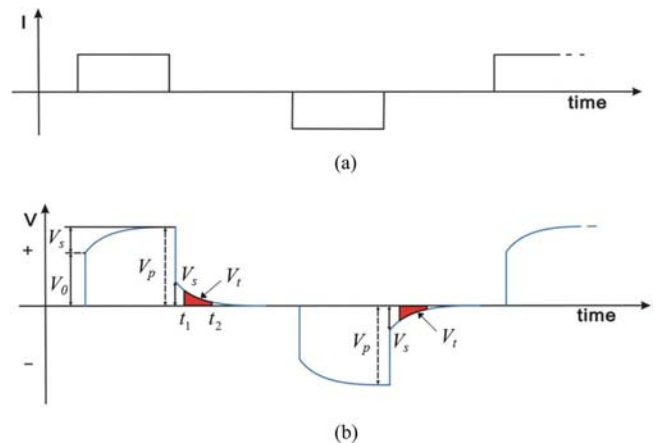


Fig. 3. (a) Direct-current source injected from a source current electrode A and B (Fig. 1(a)), and (b) corresponding voltage measured between potential electrodes M and N.

전류를 주입하다가(on-time), 전류 공급을 중단하고(off-time) 과전압(overvoltage)으로 나타나는 유도분극 반응을 측정하기 때문에 Hallof (1964)는 시간영역 IP 탐사를 pulse transient method 라고 명명하기도 했다. 전류 전극을 통하여 동일한 방향으로 동일한 크기의 전류를 충분히 오랫동안 흘려주면, 매질 내 충전을 이상체에서 발생하는 유도 분극 현상에 의한 과전압(V_s)이 발생하고(Fig. 3), 이로 인해 매질이 비충전성 매질일 경우 측정되는 전압(V_0) (즉 매질의 고유한 전기비저항 구조에 의한 전압 반응) 보다 충전성 매질로 인해 발생한 측정전압(V_p)이 높아지게 된다. 송신 전류를 끊을 경우 과전압으로 인해 곧바로 전압이 0이 되지 않고 짧은 시간 동안 V_s 에서 감소하다가 0이 된다(Fig. 3(b)).

Seigel (1959)은 시간영역 IP 탐사에서 과전압(V_s)과 측정전압(V_p)의 비인 충전율(chargeability, η)을 다음과 같이 제시하였다.

$$\eta = \frac{V_p - V_0}{V_p} = \frac{V_s}{V_p} \tag{1}$$

이와 같이 과전압을 측정전압으로 정규화한 걸보기 충전율을 이용하면 전선의 교차 결합이나 바탕전위 같은 잡음을 줄여 신호대잡음비(S/N)를 높일 수 있는 장점이 있다.

그러나 전류를 흘려 보내주는 순간의 전압(V_0)을 측정하거나 전류를 끊는 순간에 과전압(V_s)을 측정하는 것은 기계적으로 매우 어렵기 때문에, 실제 과전압(V_s) 값을 측정하는 대신에 과전압의 감쇠가 일어나는 동안 일정 시간 간격(t_1 부터 t_2 까지)에서 과전압(V_t)을 측정하거나, 과전압 곡선 아래 적당한 시간 동안의 면적(A)을 적분으로 구하고 다음과 같은 식을 이용하여 걸보기 충전율을 계산한다.

$$\eta_a = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_t(t) dt = \frac{A}{V_p} \tag{2}$$

시간영역 IP 탐사에서는 유도분극이 충분히 일어나 포화상태에 이르도록 충분히 긴 시간 동안(약 2 ~ 4초) 전류를 흘려 보내고 걸보기 충전율을 측정한다. 또한, 전기비저항 탐사에서와 같이 전류전극과 전위전극을 서로 바꾸어가며 반복측정을 시행한다. 이때, 전류를 끊는 시간은 충분히 주어 분극 현상에 의해 충전된 전하가 충분히 자연상태로 돌아갈 수 있도록 한다. 일반적으로 전기비저항 탐사를 수행할 때도 충전율 이상체가 존재할 경우, 유도분극 현상에 의한 과전압 현상이 발생하지만 전기비저항에서는 이러한 과전압은 없다는 가정 하에 자료를 처리하고 해석하게 된다.

교류 송신원 이용

교류 송신원은 두 전류 전극 A와 B에서 사각파(Fig. 2(b)) 혹은 사인파(Fig. 2(c))를 주입하는 것이다. 이론적으로 사각파는 진동수 영역 IP에서 사용하고 사인파는 SIP나 복소전기비저항 탐사에서 사용하는 송신원이다.

사각파란 전극 A와 B에서 번갈아 가면서 일정시간 동안 전류를 주입하는 형태를 반복하는 송신원(Fig. 2(b))이다. 직류 송신원에 기초하는 시간영역 IP 탐사에서도 실제 탐사에서는 A와 B에서 번갈아 가면서 전류를 송신하게 되지만, 이때는 한번의 송신을 끊은 뒤 매질이 충분히 자연상태로 돌아갈 수 있도록 전류를 끊는 시간을 유지한 뒤 전류를 반대방향에서 주입하게 된다. 즉 전류를 끊는 시간이 존재한다(Fig. 2(a))는 점에서 직류 송신원과 사각파와는 차이가 있다.

SIP나 복소 전기비저항 탐사가 기초하고 있는 교류 송신원이 사인파(Fig. 2(c))이지만, 실제 탐사 장비들은 사인파를 주입하기 보다는 주로 사각파를 주입하여 자료를 측정 한 뒤, 자료처리를 수행하여 사인파에 대한 반응을 제공하는 것이 일반적이다. 이와 같이, 대부분의 SIP 장비들에서 사각파 송신원을 이용하는 것은 고출력의 송신이 요구되는 SIP 탐사에서는 사각파가 사인파에 비해 구현하기 용이하기 때문일 것이다.

진동수 영역 IP 탐사는 진동수에 따른 과전압 크기 즉, 전기비저항의 크기만을 측정하여 진동수에 따른 크기 차이를 분석하므로 측정값은 실수값이라고 할 수 있다. 그러나, SIP나 복소 전기비저항 탐사에서는 사인파 송신에 의한 두 전위 전극 사이의 전기비저항의 크기와 위상을 측정하기 때문에 탐사에서 다루는 반응값은 복소수이다.

- 진동수영역 IP 탐사

진동수영역 IP 측정에서는 진동수가 서로 다른 2개의 사각파 송신원(Fig. 4)에 대한 걸보기 전기비저항의 비를 측정한다. 송신원의 주기가 길어지면(즉 진동수가 낮아지면) 충전성 이상체에서 유도분극 현상이 충분히 진행되어 과전압이 상대적으로 큰 반면(Fig. 4(a)), 주기가 짧아지면 분극 현상으로 인한 충전효과가 많이 진행되지 않아 과전압의 크기가 상대적으로 작아지게 된다(Fig. 4(b)). 이와 같이 서로 다른 진동수에서 측

정된 두 전기비저항 값을 이용하여, 진동수 영역 IP에서는 진동수 효과(frequency effect; FE)와 진동수 효과를 백분율로 나타낸 백분율 진동수 효과(percent FE; PFE)를 다음과 같이 정의한다.

$$FE = \frac{\rho_l - \rho_h}{\rho_h} \tag{3}$$

$$PFE = 100 \times \frac{\rho_l - \rho_h}{\rho_h} = 100 \times FE(\%) \tag{4}$$

여기서 ρ_l 과 ρ_h 는 각각 낮은 진동수와 높은 진동수에서 측정된 걸보기 비저항이며 일반적으로 ρ_l 이 ρ_h 보다 큰 값을 가지게 된다. 진동수영역 IP 탐사는 두 전위 전극 사이에서 전압을 측정하기 위해 AC 전압계(AC voltmeter)를 사용한다.

진동수영역 IP탐사에서는 연속적인 사각파 송신원을 이용하는 것이 일반적이지만, 잔여 분극 효과를 없애주기 위해 측정 장비에 따라 전류를 끊는 시간을 어느 정도 주면서(Fig. 5) 탐사한 뒤, 송신끊음 시간에 대한 영향을 후처리로 제거하여 사각파형 송신 반응을 만드는 경우도 있다(Sumner, 1976).

- 광대역 유도분극 탐사

광대역 유도분극 탐사에서는 서로 다른 진동수를 가지는 사인파형 송신원 각각에 의해 발생하는 전압의 크기와 위상(Fig. 6(a))을 측정하여, 두 전위 전극 사이의 걸보기 전기비저항의 크기와 위상을 측정하며(Fig. 6(b)), 이를 통해 매질의 복소 전기비저항 분포를 분석하게 된다. 특히, SIP 탐사에서는 복소

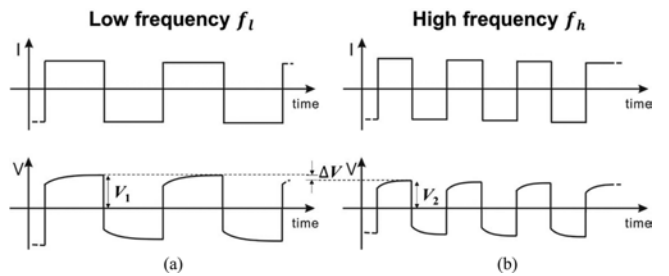


Fig. 4. Alternating currents injected from a source current electrode at high (f_l) and low frequencies (f_h), respectively, and corresponding frequency IP responses at a potential electrode.

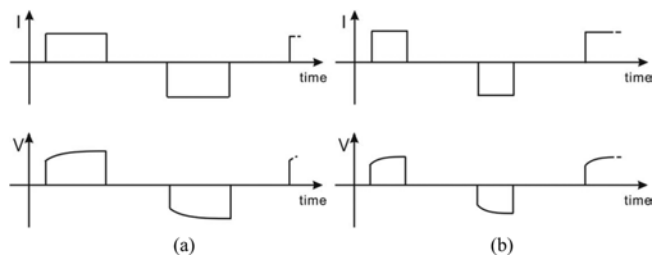


Fig. 5. The pulse can be electrically stored in the voltmeter-receiver and replayed, eliminating the off time to produce the waveforms in Fig. 4 (Sumner, 1976).

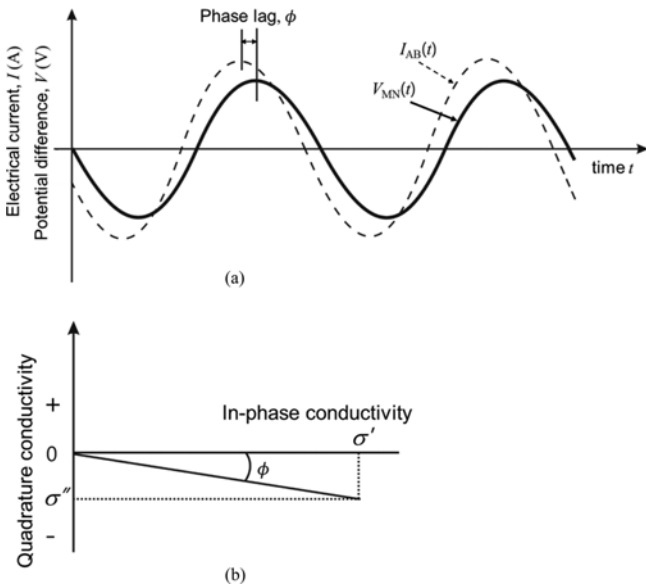


Fig. 6. (a) The source of electrical current (I) in complex resistivity is sinusoidal and it has same period with potential difference (V) but different amplitude. The amplitude and the phase of the conductivity can be recasted into a complex conductivity. (b) This complex conductivity is characterized by an in phase component (real part) and an out-of-phase or quadrature conductivity component (imaginary part). IP effect occurs phase lag (ϕ) between the source current and the measured potential (modified from Revil, 2012).

전기비저항의 진동수에 따른 변화 분석에 초점을 두기 때문에, 10^{-3} Hz ~ 4 kHz 범위 중 2개 이상의 진동수를 이용하여 탐사를 수행하여 반응을 분석하고 해석한다(Fig. 7). 이와 달리 특정 진동수 하나에 대한 전기비저항과 위상 자료만을 이용하여 해석하는 경우도 있는데, 이러한 탐사를 복소 전기비저항 탐사라고 한다(이에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명한다). 그러나 SIP탐사에서도 복소 전기비저항을 다루기 때문에 SIP 탐사를 복소 전기비저항 탐사라고 부르는 경우도 있고 두 탐사를 구분하지 않는 경우도 있다. 이 해설에서는 하나의 진동수에 대한 복소 전기비저항을 얻어내는 방법을 복소 전기비저항

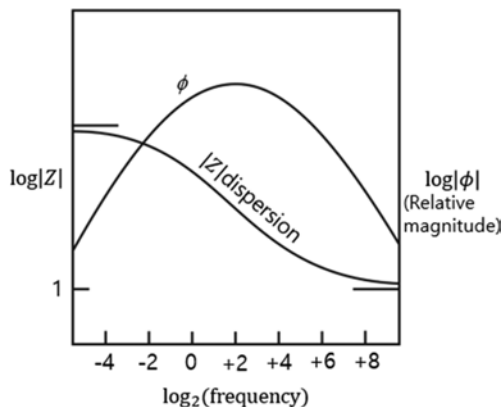


Fig. 7. A typical response of SIP phenomena (Pelton, 1978).

법으로, 여러 진동수에 대한 복소 전기비저항 혹은 복소 전기비저항의 거동을 분석하는 방법을 SIP 법으로 구분하여 설명한다.

SIP 탐사에서는 각 진동수에서 측정된 겉보기 전기비저항의 크기와 위상을 역산하여 매질의 복소 전기비저항 구조를 얻게 된다. 이와 같이 얻은 진동수에 따른 매질의 전기비저항 값을 진동수의 로그(log) 값 축에 도시하여 매질의 특성을 추가적으로 분석한다. 즉, 진동수에 따른 겉보기 복소 전기비저항의 크기와 위상의 이완 현상(relaxation)을 분석한다. 진동수에 따른 복소 전기비저항 값의 양상을 설명하는 많은 모델이 제시되었지만(Ward, 1990), 그 중 현재까지 가장 많이 적용되고 있는 모델은 Cole-Cole 모델이다(Cole and Cole, 1942; Pelton *et al.*, 1978).

$$\tilde{\rho}(\omega) = \rho_0 \left[1 - \eta \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (5)$$

여기서 $\tilde{\rho}(\omega)$ 는 진동수 ω 에 따른 복소 전기비저항, ρ_0 는 매질의 전기비저항(복소 전기비저항과 명확히 구분하기 위해 ‘직류 전기비저항’이라고도 함), τ 는 IP반응의 시간상수, c 는 진동수 지수이다.

시간영역 IP 탐사는 시간영역에서 측정하기 때문에 비교적 측정 시간이 짧은 반면, 전기적으로는 잡음에 취약하다. 이에 반해 SIP는 진동수 영역에서 측정하기 때문에 S/N비가 시간영역 IP에 비해 상대적으로 좋지만, 진동수가 낮은 송신원을 이용할 경우 측정 시간이 매우 길어지게 된다는 어려움이 있다. 각각의 진동수에서 측정된 겉보기 전기비저항을 이용하여 매질의 복소 전기비저항 값을 역산한 뒤, 이 복소 전기비저항 값을 진동수에 따라 분석하는 과정은 Cole-Cole 모델의 정확성 뿐만 아니라, 역산을 통해 추정된 복소 전기비저항의 정확도에도 한계가 있기 때문에 해석에는 한계가 있을 수 밖에 없다.

실제 탐사에서는 SIP 탐사와 진동수 영역 IP 탐사에서 동일하게 사각파 교류송신원을 사용하고 있고, 진동수 IP 탐사가 처음 소개되었을 때에는, 장비 및 해석법 등이 발달하지 않아서 사각파형을 이용하더라도 SIP 탐사에서처럼 사인파에 대한 반응을 뽑아내기에는 어려움이 있었거나 생각하지 못했을 수 있다. 이로 인해, 진동수 영역 IP 탐사에서는 서로 진동수의 사각파형 송신에 대한 전위 전극 사이의 전압의 크기에서 전기비저항 값을 측정하고 비교하는 진동수 효과까지만 고려한 것일 수도 있다. 또한, 사각파형 교류 송신원에 대한 측정 전위 값의 위상 변화(phase shift) 혹은 시간 변화(time shift)만을 측정하는 “위상 IP 탐사”도 존재(Zonge *et al.*, 1972)했었다. SIP가 소개된 1980년대 초 이후에는 진동수영역 IP와 위상 IP의 적용이 확산하게 줄었다는 점 등을 감안한다면, 주파수 영역 IP 탐사 혹은 위상 IP 탐사는 SIP 탐사법의 시초가 되는 탐사법이라고도 할 수 있을 것이다. 즉, 진동수 영역 IP 탐사, 위상 IP 탐사와 SIP 탐사는 IP 탐사법 내에서도 동일한 범주의

탐사법 이라고 할 수 있다. 이를 받아들인다면 SIP 탐사법이 먼저 시도된 후에, 단일 진동수의 반응을 분석하는 복소 전기비저항 탐사법의 적용이 널리 고려되기 시작한 것도 쉽게 이해될 수 있다.

- 복소 전기비저항 탐사

SIP 탐사는 여러 진동수를 이용하여 수행하는 특성 상 탐사 시간이 길어지기도 하고 탐사 자료를 해석하기도 어렵다는 한계가 있다. 즉, Cole-Cole 모델에 기초한 매질의 복소 전기비저항의 진동수에 따른 이완 현상을 분석하기 보다는 단순하게 특정 진동수의 교류 송신원을 이용하여 측정된 겉보기 전기비저항의 크기와 위상 자료를 역산하여 매질의 복소 전기비저항만을 얻어서 이상체 분포 등을 파악하고자 하는 경향이 생겨났으며 이를 일반적으로 복소 전기비저항 탐사법이라 한다. 즉, SIP에서는 이완현상을 설명해 줄 모델(예를 들어, Cole-Cole 모델)을 이용하여 매질의 IP 시간상수, 진동수 지수 등에 대한 추가적인 해석을 시도하는 반면, 복소 전기비저항 탐사에서는 측정 자료를 역산하여 얻은 복소 전기비저항 단면도 즉, 전기비저항과 위상 자체로 자료를 해석하려는 경향이 두드러진다.

일부 학자들은 유도분극 탐사를 아예 복소 전기비저항 탐사로 부르자고 주장하는 경우도 있다(Revil, 2012). 이는 분극 현상의 본질을 감안했을 때 상당히 합리적인 면이 있는 주장일 수 있지만, SIP에서 파생되었다고 할 수 있는 매질 전기비저항의 크기와 위상을 측정하는 복소 전기비저항 탐사법이 있다는 점과 전자기 유도 현상에 기초한 전류 흐름에서 발생하는 유도분극 현상을 측정하는 탐사법도 복소 전기비저항을 다루고 있다는 점을 감안하면 다소 무리가 있는 주장이라고도 할 수 있다.

교류 송신원을 이용하는 SIP나 복소 전기비저항 탐사에서는, 전자기 유도 현상에 의해 기전력이 발생하여 잡음을 발생하는 전자기 결합(EM coupling) 효과가 나타날 수 있다. 이러한 전자기 결합의 효과는 주로 추가적인 위상 지연을 초래하는데, 낮은 진동수 대역에서는 이러한 영향은 무시할 수 있기 때문에 IP 자료로부터 전자기 결합 효과를 제거하기 위한 복잡한 과정은 피할 수 있다. 즉, SIP 탐사나 복소 전기비저항 탐사에서는 위상각 측정은 1 mrad 단위까지 정확하게 측정할 수 있는 반면 전자기 유도 현상에 의해 발생하는 위상차는 유도상수($d\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$, 여기서 d 는 송수신 거리)가 0.03보다 작은 경우 1 mrad보다 작다(Weller *et al.*, 1996).

전자탐사 형태에 기초한 IP 탐사- 전자기 유도 현상에 의한 전류 흐름

IP 탐사는 상대적으로 낮은 진동수 영역에서 이루어지기 때문에 송신 전류를 끊은 후 분극 현상을 측정할 때 EM 유도

현상을 잡음으로 취급하고 발생하지 않는다는 전제 하에 진행된다. 또한, 전자기결합으로 인한 영향을 줄이기 위해 전류를 끊은 직후 감쇠가 일어나는 시간 범위 중에서 초기 시간대에 측정된 자료는 사용하지 않는 것이 보통이었다. 한편, 기존 IP 탐사의 성공적인 적용에도 불구하고 전극을 통한 전류의 직접적인 주입을 이용하는 탐사법은 큰 비용과 많은 시간이 소모된다는 점과 극단적인 전기비저항 환경에서는 탐사가 어렵다는 단점이 있다(Seigel, 1974; Seigel *et al.*, 2007). 이러한 단점을 극복하고자 Seigel (1974)은 전류 전극을 통해 매질로 송신 전류를 주지만 전위를 측정하는 것이 아닌 2차 자기장을 측정하는 자기 유도 분극(magnetic induced polarization; MIP) 법을 고안하였으며 이 방법은 전위 전극 설치 시간이 소요되지 않고 전기전도도가 높은 환경에서도 적용 가능하다는 장점이 있다.

하지만 MIP 법도 여전히 송신 전류 전극을 땅에 접지 시켜야 하기 때문에 전기비저항이 높은 지역에서는 탐사가 힘든 단점이 있어 Hohmann *et al.* (1970)은 전자기유도 송신원을 이용한 IP 효과 측정(inductive induced polarization)에 대한 실험을 실시하였으며 이외에도 비접지 또는 전자기 유도 송신원을 이용한 IP 효과를 측정하려는 연구가 계속되어 왔다(Bhattacharyya, 1964; Dias, 1968; 1972; Morrison *et al.*, 1969). Marchant *et al.* (2013)은 송신 전류 전극을 땅에 접지해야 하는 MIP 법의 비효율성을 해결하기 위해 비 접지 전자기유도 송신원을 주어 충전율을 측정하는 유도송신 IP(inductive source IP; ISIP)를 제안하였으며 이에 대한 역산 알고리즘까지 제시하였다.

진동수영역에서는 여러 진동수의 EM 반응을 얻어야만 IP 효과를 알아낼 수 있는 반면에 시간영역에서는 특별한 추가 작업 없이 동시에 IP 효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. Spies (1980)는 호주, 퀸즐랜드 지역의 pyrrhotitic graphitic shale 지역에서 측정된 시간영역 전자탐사(transient electromagnetic; TEM) 자료에서 일관성 있는 후기 시간대의 부호 역전 현상을 보고하였으며, 이것은 후에 충전성 매질에 대한 IP 반응이 아니면 이론적으로 설명할 수 없다는 연구가 보고되었다(Weidelt, 1982; Guptasarma, 1984). 이후 Smith and West (1988)는 TEM 자료에서의 후기 시간에 일어나는 부호 역전 현상을 유도 모드(inductive mode)와 분극 모드(polarization mode)로 이론적으로 명확하게 설명하였다. 이 두 논문들을 필두로 하여 TEM 반응에 나타나는 IP 효과에 관한 연구가 활발히 진행되게 되었다. 초기에는 EM 반응에 나타나는 IP 효과를 제거하는 것에 주목했던 반면에 최근 들어 이 IP 효과를 적극적으로 활용하려는 노력이 있어왔다. Hoheisel *et al.* (2004)은 충전성 매질에 대한 원거리 TEM 반응의 IP 효과에 대한 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 Cole-Cole 변수들의 변화에 의한 TEM 반응의 IP 효과를 실험하고 있으며 이를 기반으로 실제 현장자료의 IP 변수들을 예측하였다. Hodges and

Chen (2014)과 Smith (2016)는 항공 TEM 반응의 IP 효과를 연구하였다. Kwan *et al.* (2015)은 VTEM 자료의 IP 효과를 연구하고 이 효과를 제거할 수 있음을 현장자료로부터 보여주었다. 이외에도 일반적인 Cole-Cole 모델이 아닌 막 분극 효과의 TEM 자료에 나타나는 영향에 대한 연구 사례도 존재한다 (Hallbauer-Zadorozhnaya *et al.*, 2016). 전자탐사 형태에 기초한 IP에 관한 연구는 EM 반응에서 나타나는 IP 탐사방법 등이 아직 연구단계에 있으나, 최근 다양한 목적과 환경에 IP 탐사를 적용하려는 시도가 증가하고 있어 이에 대한 연구사례도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.

IP 모델링 및 역산의 발전

전극 이용 전류 주입: 전기비저항 탐사 형태에 기초한 IP 탐사

직류 송신원 이용

- 시간영역 IP

Seigel (1959)은 전위 전극에서 측정된 과전압을 표준화하여 충전율(η)이라는 개념으로 시간 영역 IP 자료를 수치적으로 나타내었으며((1)식), 이를 고려하면 시간영역 IP 모델링은 DC 전기비저항 모델링을 기반으로 구현할 수 있다. 즉, 충전율 이상체에서 IP 효과가 일어나기 전과 후의 두 전기비저항 모델에 대한 모델링을 통해 충전율 모델의 수치 반응을 구하게 된다. 전류전극 쌍 사이에 전위차 즉 전압을 걸어 주어 전류(I)를 주입하면 매질 내에서 전압 강하가 발생하여 전위 전극 사이에서 전압(V)을 측정하게 된다. 전류 전극 A와 B에서 송신 전류를 발생시킬 때, 전위에 대한 미분방정식은 포아송 방정식 형태로 다음과 같이 나타내게 된다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi_\sigma) = -I\delta(r-r_A) + I\delta(r-r_B) \quad (6)$$

이 때 매질에 유도분극 현상을 일으키는 미시적 구조가 있을 경우의 전위(ϕ_η)는 매질 고유의 전기전도도 구조에 의한 전위(ϕ_σ)와는 차이가 있다. (6)식의 매질 전기전도도(σ)에 충전율(η)에 의한 IP 효과가 일어난 전기전도도($\sigma(1-\eta)$)를 대입하면 충전 효과가 일어난 후의 전위(ϕ_η)와 전기전도도 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\sigma(1-\eta) \nabla \phi_\eta) = -I\delta(r-r_A) + I\delta(r-r_B) \quad (7)$$

따라서 겉보기 충전율(η_a) 자료는 충전율 이상체의 충전 전, 후 두 전기비저항 모델링을 수행하고 다음과 같이 얻을 수 있게 된다.

$$\eta_a = \frac{\mathcal{F}_{dc}\sigma(1-\eta) - \mathcal{F}_{dc}[\sigma]}{\mathcal{F}_{dc}[\sigma(1-\eta)]} \quad \left(= \frac{V_p - V_0}{V_p} = \frac{V_s}{V_p} \right) \quad (8)$$

여기서 \mathcal{F}_{dc} 는 DC 전기비저항 정모델링 연산자(forward operator)를 의미하며 $\mathcal{F}_{dc}[\sigma]$ 와 $\mathcal{F}_{dc}[\sigma(1-\eta)]$ 는 각각 충전 전과 후의 전기비저항 모델링 연산자로 (6), (7)식을 수치적으로

계산하여 얻은 전위 분포에서 고려하고 있는 두 전위 전극(M, N ; Fig. 1(a)) 사이의 전위 차 즉 전압($V = f_M - f_N$)을 결과로 한다.

시간영역 IP 탐사자료의 1차원 역산법은 크게 2가지 방법으로 시작되었다(Orellana and Mooney, 1966; Inman, 1975). 첫 번째 방법은 비교적 적은 수의 지층을 가정하고 각 층의 전기비저항과 두께를 변수로 하여 추정한다(Orellana and Mooney, 1966; Inman, 1975). 두 번째 방법은 미리 지층을 여러 개의 얇은 층으로 분할한 다음 각 층의 전기비저항을 추정하는 방식이다. 이 방법은 평활화제한 등을 모델 제약 조건으로 주어 부드럽게 변화하는 역산결과를 추정하는 특징이 있다 (Oldenburg, 1978; Constable *et al.*, 1987; Zohdy, 1975). 하지만 두 번째 방법은 실제 지층의 전기비저항이 깊이에 따라 부드럽게 변하지 않기 때문에 오히려 첫 번째 방법이 더 적합하다는 비판을 받았다. 2차원 역산에서는 Labrecque (1991)가 최초로 IP를 선형적으로 역산하는 방법을 제시했으며 Oldenburg and Li (1994)는 선형 역산 알고리즘과 비선형, exact formalism 역산 알고리즘을 제시하고 각 역산 결과를 비교하였다. 선형 역산은 유도분극 현상이 선형적이라는 가정 하에 단 한번의 계산으로 역산 값을 구하기 때문에 계산 시간이 매우 빠르며 0.15 이하의 작은 IP 값 이상체에 대해서는 가장 기본적으로 사용할 수 있는 방법이다. 한편, Oldenburg and Li (2000)는 선형 역산 방법으로 3차원 IP 역산 알고리즘까지 개발하였다. 그러나 단순히 충전율만을 이용하여서는 매질의 유도분극 현상 특성을 정확히 알 수 없기 때문에 다양한 SIP 변수(전기비저항, 충전율, 시간 상수, 진동수 지수)에 대한 정보를 알 수 있도록 시간영역 IP 자료를 Cole-Cole 모델에 적용하는 시도도 이루어졌다. Yuval and Oldenburg (1996)는 충전율이 시간 의존적이라는 전제 하에 2차원 역산을 시도하였으며, Höning and Tezkan (2007)는 전기비저항이 시간 의존적이라는 전제 하에 1차원 및 2차원 역산 알고리즘을 개발하였다.

교류 송신원 이용

- 진동수영역 IP

진동수영역 IP는 transmission surface method (Swift, 1971), 유한요소법(finite element method; Coggon, 1971) 등이 2차원 모델링을, 적분방정식법(integral equation method; Hohmann, 1975) 등이 3차원 모델링을 위해 개발되었다. 허수영역이 없는 순수한 진동수영역 IP는 다른 측정 방법에 비해 비교적 많이 쓰이지 않았는데 1차원 전기비저항 역산(Inman, 1975; Rijo *et al.*, 1977; Petrick *et al.*, 1977)을 기반으로 Pelton (1978)이 FEM transmission-surface 알고리즘으로 개발하여 층서 형태 배경 모델에 2차원 유도분극 이상체가 1개 있는 단순한 모델의 전기비저항 및 진동수 영역 IP자료를 역산하는 데 성공하였다.

- 복소 전기비저항/SIP

복소 전기비저항 모델링은 DC 전기비저항 모델링에 이용된 포아송 방정식((6)식)에서 전기전도도와 전위 값들을 복소수로 하여 계산함으로써 쉽게 구현할 수 있다(이때 사인파 교류 송신원의 위상 값은 0, 즉 위상 이동이 없는 송신원으로 고려하게 되므로 (6)식의 우항의 I 값은 실수로 하며 이는 물리적으로 사인파 송신원의 크기가 된다).

복소 전기비저항 및 SIP 탐사 기법이 널리 활용되기 시작한 90년대 이후에 다양한 복소 전기비저항 모델링 및 역산 기법들이 개발되었다. 초기에는 비교적 간단하게 복소 전기비저항을 활용한 진동수 영역 해석 프로그램이 개발되어 활용되었다(Kemna and Binley, 1996; Shi *et al.*, 1998; Kemna, 2000; Blaschek *et al.*, 2008). 이러한 역산 코드들은 일반적으로 높은 진동수의 송신원을 사용할 때 발생할 수 있는 전자기 결합 효과를 고려하지 않아 낮은 진동수(100 Hz 이하)의 탐사 자료나, 전자기결합 효과가 제거된 탐사 자료의 역산에만 유효한 해석 결과를 제공할 수 있다는 한계점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 전자기결합 효과를 역산에 포함시켜서, IP 현상과 전자기결합의 문제를 동시에 해결하고자 하는 연구가 수행되었다(Commer *et al.*, 2011). 복소 전기비저항 역산에서 이방성을 고려한 연구가 최근에 시도되고 있으며, 이를 이용하여 지하 내부 이상체의 분포양상 등을 연계하여 해석하고자 하는 연구가 수행되었다(Winchen *et al.*, 2009).

단순히 지하의 복소 전기비저항을 사용하는 역산보다는 Cole-Cole 모델을 이용하여 다른 변수로 역산을 수행하고자 하는 연구가 다수 진행되었다(Yuval and Oldenburg, 1997; Routh *et al.*, 1998; Loke *et al.*, 2006). 이러한 변수로 역산을 수행하게 되면, 다수의 주파수에 대한 복소 전기비저항 값은 직류 전기비저항, 충전율, 시간상수, 진동수 지수라는 4개의 변수로 줄어들게 된다. 다만, 이러한 역산방법은 적절한 사전 정보를 이용하여 지층에 대한 물성에 대한 근본적인 가정이 선행되어야 하므로 모든 경우에 일반적으로 적용하기에는 한계점을 가지고 있다. 지층에 대한 사전정보를 통해서 다양한 수학적 물성모델에 대한 가정을 통해서 역산변수를 줄이고자 하는 연구도 수행된 바 있다(Nordsiek and Weller, 2008; Zisser *et al.*, 2010). Son *et al.* (2007)은 다수의 진동수에 대한 복소 전기비저항 자료의 동시역산을 위한 효과적인 역산 제한조건에 대한 연구와 이를 이용하여 Cole-Cole 변수를 추정하고자 하는 연구를 한 바 있다.

전자기 유도 기초 전류 발생: 전자기 유도 탐사 형태에 기초한 IP 탐사

전자기 유도 송신원(Fig. 1(b))에 의한 충전성 매질에 대한 EM 반응 모델링은 기존 알고리즘의 실수 전기비저항을 복소수로 수정하면 된다. 기존의 층서구조에 대한 TEM 모델링 프로그램을 개량한 TEM-IP 모델링 프로그램들이 2000년대 초반까지 많이 발표되었으며, 최근에는 3차원 TEM-IP 모델링

프로그램도 발표되었다(Smith *et al.*, 1988; El-Kaliouby and Poulton, 2001; Kozhevnikov and Artyomenko, 2004; Marchant *et al.*, 2014).

EM자료에 나타나는 IP효과를 적극적으로 활용하려는 시도가 증가함에 따라 역산 알고리즘 프로그램들도 개발되었다. Kozhevnikov and Anotonov (2008; 2009; 2010)은 균질 반무한 공간과 2층 구조모델에 대해서 다양한 Cole-Cole 변수값의 TEM-IP 자료의 역산을 시도하였으며 중앙루프와 동일루프법의 TEM-IP 자료의 복합역산으로 Cole-Cole 변수의 역산의 질이 크게 향상될 수 있음을 발견하였다. Jang *et al.* (2016)은 층서구조 해저 열수광상 모델의 TEM 반응에서 IP효과를 분석하고 많은 사전정보를 가지고 초기 모델을 참 모델에 근접하게 구성할 경우 Cole-Cole 변수의 역산이 거의 완벽하게 이루어질 수 있음을 보여주었다.

2016년에는 캐나다 British Columbia 대학에서 진동수영역과 시간영역의 TEM-IP 역산 프로그램들이 개발되었다. 진동수영역에서 Marchant *et al.* (2013)은 두 개의 진동수에서의 자기장 자료를 측정된 뒤 두 자기장의 차이를 이용한 충전율의 역해석 연구를 수행하였으며, Kang and Oldenburg (2016)는 이러한 전자기 유도 현상 역시 IP 현상의 신호 중 일부로 보고 일반적으로 잡음으로 취급되는 TEM 탐사의 이른 시간 자료로 전기비저항을 역산한 전기비저항 모델과 충전율을 역산하여 일반 DC 전기비저항 역산으로 구한 충전율 모델보다 정확한 충전율 역산 결과를 얻었다.

IP 탐사 현장 적용 사례

IP 탐사는 전통적으로 산재성(disseminated) 광상이나 반암 동광상, 황-관련 금 등 광상, 황화 광물 등의 광물 탐사에 많이 적용되어 온 탐사법이지만, 탄화수소나 지열 저류층 탐사, 환경 분야, 지질 구조 파악 등에도 활발하게 적용되고 있다. 이 장에서는 광물 탐사 분야 이외의 다양한 적용 분야에서의 탐사 및 해석 사례에 대해서 소개하고자 한다.

탄화수소 저류층 탐사

석유 저류층을 찾기 위해 탄성과 탐사와 더불어 전기전자 탐사가 저류층의 전기적 특성을 파악하는 데 활용되면서 IP 탐사를 이용해 저류층을 탐색하고자 하는 시도가 이루어졌다(Seigel, 1974; Allaud and Martin, 1977; Oehler and Sternberg, 1984). 탄화수소 저류층에서 IP 현상이 발생하는 이유는 정확히 밝혀지지 않았지만 저류층에서 상부층으로 탄화수소가 침투(seepage)하면서 황, 철 성분 등이 부화하면서 주변 지층수가 광물화(mineralize)되어 충전율이 발생할 수 있다(Flekkooy *et al.*, 2013).

Davydycheva *et al.* (2006)은 인공송신원 전자탐사(controlled-source EM) 자료를 이용한 IP 반응 역산을 검증하기 위해 시

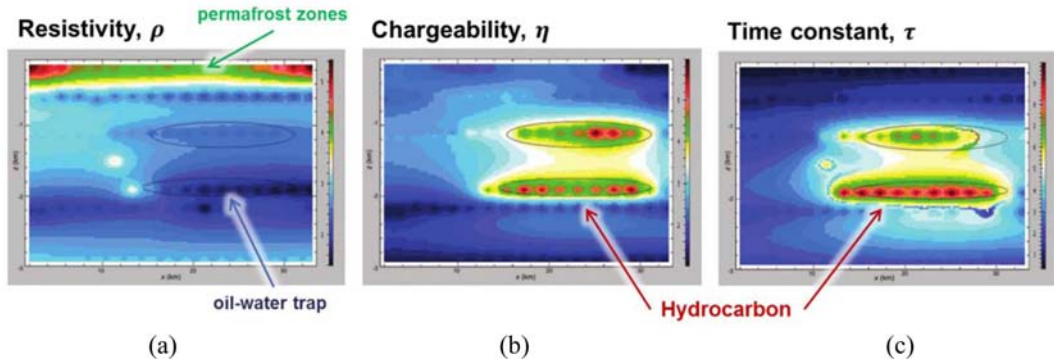


Fig. 8. The images of (a) the resistivity in logarithmic scale, in ohm-m, (b) the IP parameter, and (c) the time-decay constant in tenths of a second. The brown-red color (up to 300 ohm-m in the picture) corresponds to the permafrost zones under the coasts. The dark blue color (a few ohm-m) corresponds to the oil-water trap (Davdycheva *et al.*, 2006).

베리아 서부에 위치한 Ob Estuary 오일 가스 유전에서 탐사를 실시하였다(Fig. 8). 탐사 전 $x = 25$ km 지점에서 수행한 시추 조사 결과 깊이 1150 m 부근에 40 m 두께의 생산성 있는 가스전이, 깊이 1900 m 부근에 20 m 이하의 생산성 없는 유전이 각각 위치한 것이 밝혀졌다. 역산 결과 충전율과 시간 상수 영상에서 탄화수소 존재 여부를 뚜렷이 알 수 있다(Fig. 8(b), (c)). 전기비저항 영상은 충전율이나 시간상수만큼 선명한 탄화수소 이상체를 추정하진 못했지만 해상도가 높아 기저암(초록색)과 해안 영구동토층(빨간색)의 영향을 잘 나타내었다(Fig.

8(a)). 2 km 부근의 낮은 전기비저항대는 오일과 광화된 물 트랩(trap)으로 인한 것인데 전기비저항 이상대는 매우 희미하게 나왔지만 염수의 영향으로 인해 IP 변수들은 뚜렷한 이상을 나타내고 있다. 이완상수도 역산하였으나 실제 모델과는 잘 맞지 않게 나왔다.

지열 저류층 분야

지열 저류층 지대의 변질 부산물(alteration product)로 황철석과 점토 무기질이 종종 발생하며 이는 유도분극 현상을 일

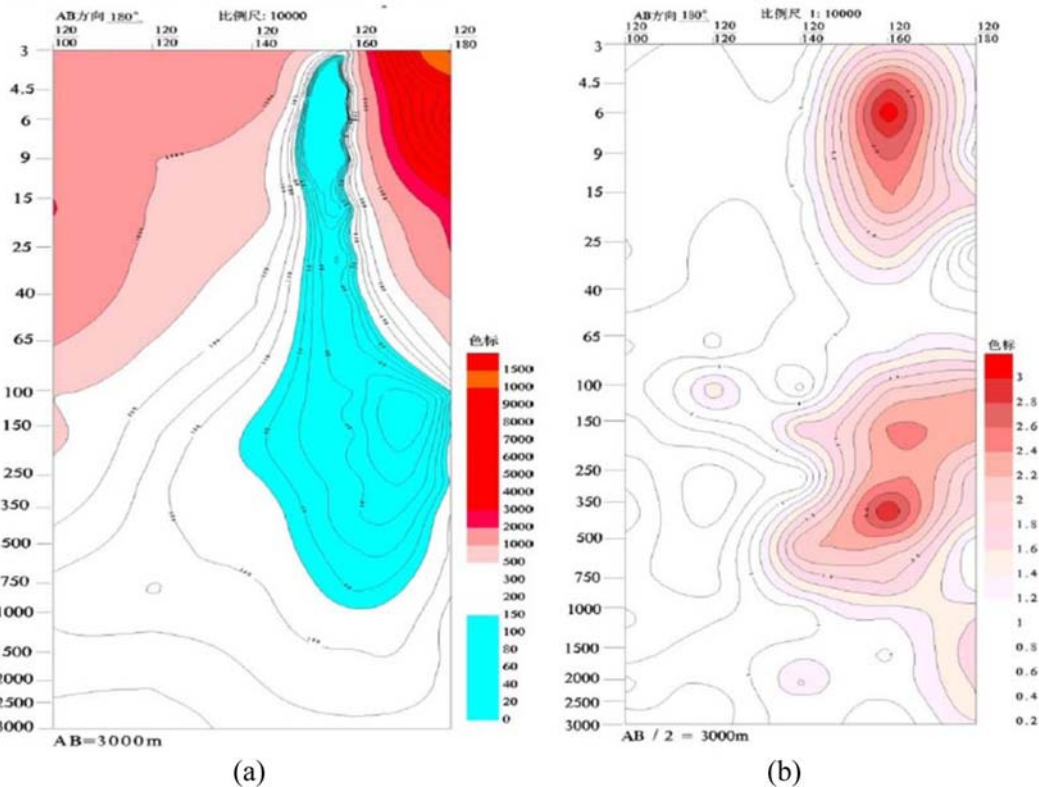


Fig. 9. The sections of (a) apparent resistivity and (b) chargeability in Jeddah geothermal area in Tibet (Hui *et al.*, 2015).

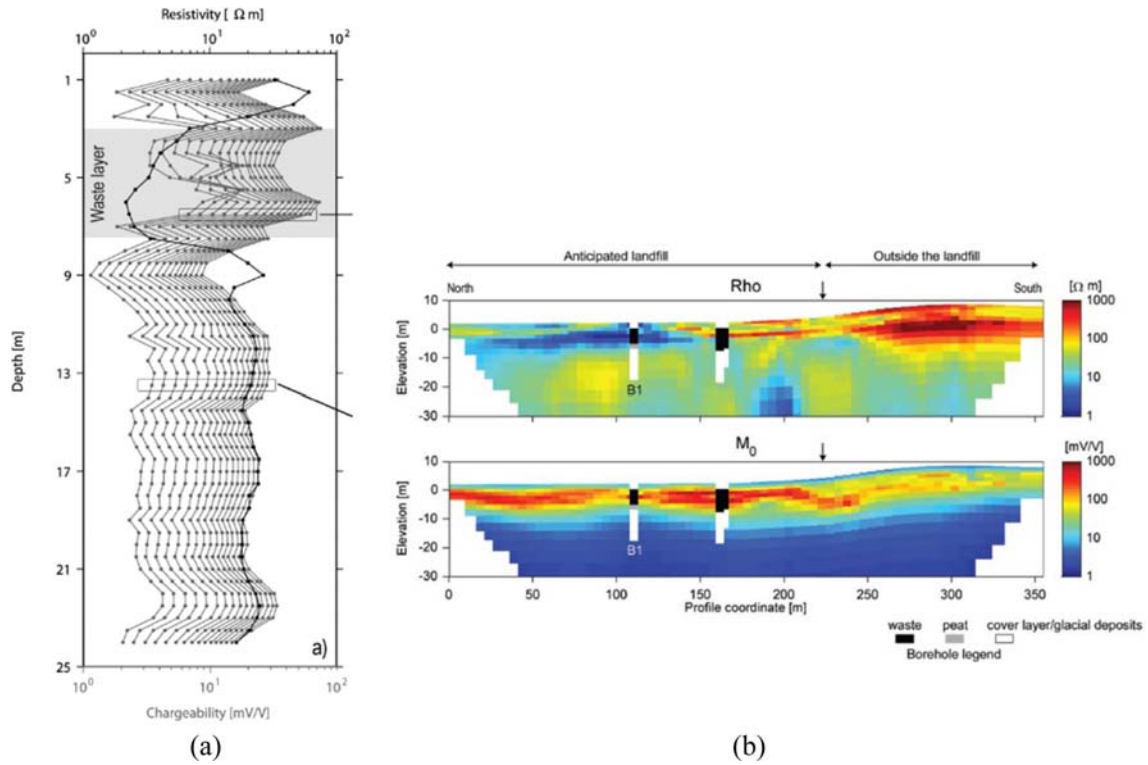


Fig. 10. (a) Resistivity (black curves) and IP (grey curves) data obtained with log drilling. (b) Results from a 1D laterally constrained inversion with superimposed boreholes. Top: resistivity section. Bottom: chargeability section (M_0) (Gazoty *et al.*, 2012).

으킬 수 있는 전극 분극과 막 분극을 유발하여 매질 충전성이 발생하게 되어 유도분극 현상이 일어날 수 있다(Wright *et al.*, 1985; Thanassoulas., 1991). 일반적으로 지열 이상대는 열수로 인하여 낮은 전기비저항, 높은 충전율을 보인다. 지열 저류층 현장에서 IP 탐사는 대수층을 직접적으로 보여주며 비교적 지형에 영향을 받지 않는다는 장점이 있지만 탐사 깊이가 낮은 단점이 있다(Hui *et al.*, 2015).

Hui *et al.* (2015)은 중국 티벳에 위치한 지열 활성지역인 Jeddah, Luoma, Gulu 그리고 Yuzhai에서 전기비저항 탐사와 함께 IP 탐사를 수행하고 지열 저류층 분포를 분석하였다. 그 중, Jeddah 지역에서는 열수 온도가 높은 지역이 겉보기 전기비저항 가단면도에서 낮은 전기비저항을 나타내는 구역과 일치하였다(Fig. 9(a)). 한편, 지하수가 있는 지역에서는 겉보기 충전율이 높게 나타난다는 것을 확인하였다(Fig. 9(b)).

환경 분야

최근 IP 탐사는 환경 분야에서 오염물질을 탐색하거나 분포를 파악하는 데 사용되고 있다(Vanhala, 1997; Kemna *et al.*, 2004; Sogade *et al.*, 2006; Orozco *et al.*, 2012). 특히 시간영역 IP는 쓰레기 매립지에서 쓰레기 특성들과 관련하여 나타나는 충전율을 이용하여 성공적으로 적용되고 있다(Johansson *et al.*, 2007; Leroux *et al.*, 2010; Gazoty *et al.*, 2012). Gazoty *et al.* (2012)은 덴마크 Aarhus에 위치한 Eskelund 쓰레기 매립지

의 특성을 알아내기 위해 전기비저항 탐사와 시간영역 IP 탐사를 함께 실시하였다(Fig. 10). 총 13개의 축선에 대한 지표 탐사 자료와 검층 자료(Fig. 10(a))를 1차원 역산하여 Cole-Cole 모델의 4가지 변수를 구하였다. 검층 자료를 1차원 역산한 결과 쓰레기 매립지가 위치한 층인 4 m ~ 8 m 구간에는

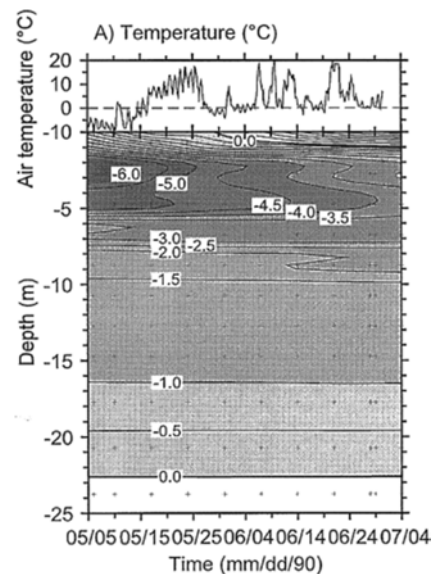


Fig. 11. Temperature and chargeability as a function of depth and time (Fortier and Allard, 1998).

전기비저항은 낮은 반면 충전율은 높게 측정되었다(Fig. 10(b)).

지질 조사

Fortier and Allard (1998)는 캐나다 북부 퀘벡 주에서 저온 층서구조에서 영구동토층의 물리적 변화를 관측하기 위해 전기비저항과 IP 탐사 측정을 하였다(Fig. 11). 탐사 방법은 전기비저항과 IP 측정 모두 시추 검층과 지표 탐사가 쌍극자 배열로 진행되었다. 탐사는 5월 5일부터 7월 4일까지 시간경과를 두고 진행하였는데 깊이 22.7 m 미만인 상부는 큰 변화가 없는 영구동토층인 것을 밝혔다. 전기비저항과 IP 검층으로 얼음층과 얼음 없는 층이 교차하는 것을 탐지하였다. 약 2개월간 반복적으로 진행한 탐사를 통해 동토층의 변화를 볼 수 있었다. 동토층과 비동토층 그리고 얼음층과 얼음이 없는 층의 경계면에서는 IP 효과가 증가하였다.

결 론

IP 탐사는 매질의 분극 현상에 의해 발생하는 충전율 현상을 측정하는 물리탐사법으로 과거에는 S/N가 낮아 널리 활용되지 못하다가 최근 장비의 발전으로 다양한 분야에서 그 활용도가 높아지고 있다. IP 탐사는 측정방법에 따라 종류가 나뉘며 전극에 기초하는 IP 탐사법 중 사용하는 송신원에 따라 직류 전류 송신원을 이용하는 시간영역 IP 그리고 교류 전류 송신원을 이용하는 진동수영역 IP, SIP 및 복소 전기비저항으로 나눌 수 있다. 전극을 이용한 IP 탐사법은 전극을 매질에 설치하는데 시간과 비용이 많이 발생하고 극단적인 전기비저항 환경에서는 탐사가 어렵기 때문에 이를 보완하기 위해 코일 수신기를 이용하여 2차 자기장을 측정하는 MIP법이나 비접지 전자기유도 송신원으로 충전율을 측정하는 ISIP법 등 코일에 기초한 다양한 IP 탐사법이 고안되고 있다. 이 해설에서는 측정 방법에 따른 IP 탐사법 별로 모델링과 역산 알고리즘의 발전 과정에 대하여서 소개하였으며 IP 탐사가 사용되는 여러 가지 현장 사례들을 분석하였다. IP 이상체에서 분극 현상이 발생하는 메커니즘에 대한 깊이 있는 연구가 이루어진다면 IP 이상체의 분포에 기초하여 매질 내의 지질적, 지반적, 환경적 특성을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-B108153-02)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20152510101880)을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

- Bhattacharyya, B. K., 1964, Electromagnetic fields of a small loop antenna on the surface of a polarizable medium, *Geophysics*, **29**, 814-831.
- Blaschek, R., Hördt, A., and Kemna, A., 2008, A new sensitivity-controlled focusing regularization scheme for the inversion of induced polarization data based on the minimum gradient support, *Geophysics*, **73**, F45-F54.
- Cole, K. S. and Cole, R. H., 1942, Dispersion and absorption in dielectrics II. Direct current characteristics, *The Journal of Chemical Physics*, **10**, 98-105.
- Commer, M., Newman, G. A., Williams, K. H., and Hubbard, S. S., 2011, 3D induced polarization data inversion for complex resistivity, *Geophysics*, **76**, F157-F171.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Davydycheva, S., Rykhlini, N., and Legeido, P., 2006, Electrical-prospecting method for hydrocarbon search using the induced-polarization effect, *Geophysics*, **71**, G179-G189.
- Dey, A., and Morrison, H. F., 1973, Electromagnetic Coupling in Frequency and Time-Domain Induced-Polarization Surveys Over a Multilayered Earth, *Geophysics*, **38**, 380-405.
- Dias, C. A., 1968, *A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity*, Ph.D. thesis, University of California, Berkley, USA.
- Dias, C. A., 1972, Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies, *Journal of Geophysical Research*, **77**, 4945-4956.
- Duprat, A., Roudot, M., and Spitz, S., 1986, Testing the TRANSIEL method in mineral and geothermal exploration, *Geophysical Prospecting*, **34**, 445-462.
- El-Kaliouby, H. M., ElDiwany, E. A., Hashish, E., Bayoumi, A., and Poulton, M. M., 2001, Forward modeling and inversion of IP effects in TEM response using measured rock samples data, *71th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001*, 1525-1528.
- Esparza, F. J., and Gómez-Trevino, E., 1997, 1-D inversion of resistivity and induced polarization data for the least number of layers, *Geophysics*, **62**, 1724-1729.
- Fink, J. B., McAlister, E. O., Sternberg, B. K., Wieduwilt, W. G., and Ward, S. H. (Eds.), 1990, *Induced Polarization Applications and Case Histories*, Society of Exploration Geophysicists.
- Flekkoy, E. G., Garina, S., Kjerstad, J., Legeydo, P., Springer, M., and Vladimirov, V., 2013, Hydrocarbon Detection through Induced Polarization-Case Studies from the North Sea, 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013.
- Fortier, R., and Allard, M., 1998, Induced polarization and resistivity logging in permafrost, *The 7th International*

- Permafrost Conference, Yellowknife, Canada, 275-282.*
- Gasperikova, E., Cuevas, N. H., and Frank Morrison, H., 2005, Natural field induced polarization for mapping of deep mineral deposits: A field example from Arizona, *Geophysics*, **70**, B61-B66.
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., and Christiansen, A. V., 2012, Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: The Eskelund case study, *Near Surface Geophysics*, **10**, 575-586.
- Guptasarma, D., 1984, Positivity of the coincident loop transient electromagnetic response, *Geophysics*, **49**, 194-194.
- Hallbauer-Zadorozhnaya, V. Y., Santarato, G., Zeid, N. A., and Bignardi, S., 2016, A non-linear induced polarization effect on transient electromagnetic soundings, *Journal of Applied Geophysics*, **133**, 16-24.
- Hallof, P. G., 1964, A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method, *Geophysics*, **29**, 425-433.
- Hodges, G., and Chen, T., 2014, IP effect in Airborne TDEM data?: Model studies and field examples, *84th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014*, 828-832.
- Hoheisel, A., Hördt, A., and Hanstein, T., 2004, The influence of induced polarization on long-offset transient electromagnetic data, *Geophysical Prospecting*, **52**, 417-426.
- Hohmann, G. W., 1975, Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling, *Geophysics*, **40**, 309-324.
- Hohmann, G. W., Kintzinger, P. R., Van Voorhis, G. D., and Ward, S. H., 1970, Evaluation of the measurement of induced electrical polarization with an inductive system, *Geophysics*, **35**, 901-915.
- Hönig, M., and Tezkan, B., 2007, 1D and 2D Cole-Cole-inversion of time-domain induced-polarization data, *Geophysical Prospecting*, **55**, 117-133.
- Inman, J. R., 1975, Resistivity inversion with ridge regression, *Geophysics*, **40**, 798-817.
- Jang, H., Kim, H. J., and Nam, M. J., 2016, In-Loop Transient Electromagnetic Responses with Induced Polarization Effects of Deep-Sea Hydrothermal Deposits, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **54**, 7272-7278.
- Johansson B., Jones S., Dahlin T. and Flyhammar P., 2007, Comparisons of 2D- and 3D-Inverted Resistivity Data As Well As of Resistivity- and IP-Surveys on a Landfill, *Near Surface 2007, Istanbul, Turkey, Expanded Abstracts*, 42.
- Kang, S., Oldenburg, D. W., Yang, D., and Marchant, D., 2014, On recovering induced polarization information from airborne time domain EM data, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, Society of Exploration Geophysicists*, 1785-1789.
- Kwan, K., Prikhodko, A., Legault, J. M., and Goncharov, E., 2015, Airborne Inductively Induced Polarization effects in and their removal from the VTEM data from Mirny, Russia, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015, Society of Exploration Geophysicists*, 2032-2036.
- Kemna, A., and Binley, A., 1996, Complex electrical resistivity tomography for contaminant plume delineation, *Proc. 2nd Meeting on Environmental and Engineering Geophysics, Environ. Eng. Geophys. Soc., Eur. Section*, 196-199.
- Kemna, A., Binley, A., Ramirez, A., and Daily, W., 2000, Complex resistivity tomography for environmental applications, *Chemical Engineering Journal*, **77**, 11-18.
- Kemna, A., Binley, A. M., and Slater, L., 2004, Cross-borehole IP imaging for engineering and environmental applications, *Geophysics*, **69**, 97-107.
- Kozhevnikov, N. O., and Antonov, E. Y., 2008, Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: Numerical simulation experiment with homogeneous half-space, *Journal of Applied Geophysics*, **66**, 31-43.
- Kozhevnikov, N. O., and Artyomenko, I. V., 2004, Modelling the effect of dielectric relaxation in frozen ground on the results of the transient electromagnetic measurements, *Earth's Cryosphere*, **8**, 30-39.
- LaBrecque, D. J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A., and Owen, E., 1996, The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, *Geophysics*, **61**, 538-548.
- Leroux, V., Dahlin, T., and Rosqvist, H., 2010, Time-domain IP and Resistivity Sections Measured at Four Landfills with Different Contents, *Near Surface 2010, Zürich, Switzerland, Expanded Abstracts*, P09.
- Loke, M. H., Chambers, J. E., and Ogilvy, R. D., 2006, Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data, *Geophysical Prospecting*, **54**, 287-301.
- Marchant, D., Haber, E., and Oldenburg, D. W., 2012, Inductive source induced polarization, *Geophysical Journal International*, **192**, 602-612.
- Marchant, D., Haber, E., and Oldenburg, D. W., 2014, Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data, *Geophysics*, **79**, E303-E314.
- Manzella, A., 1973, Geophysical methods in geothermal exploration, *Apuntes de clases. Pisa, Italia: Italian National Research Council International Institute for Geothermal Research*, http://www.cec.uchile.cl/~cabierta/revista/12/articulos/pdf/A_Manzella.pdf (Se accedió el 10 de agosto de 2009).
- Mooney, H. M., Orellana, E., Pickett, H., and Tornheim, L., 1966, A resistivity computation method for layered earth models, *Geophysics*, **31**, 192-203.
- Morrison, H. F., Phillips, R. J., and O'Brien D. P., 1969, Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space, *Geophysical Prospecting*, **17**, 82-101.
- Nordsiek, S., and Weller, A., 2008, A new approach to fitting induced-polarization spectra, *Geophysics*, **73**, F235-F245.
- Oehler, D. Z., and Sternberg, B. K., 1984, Seepage-Induced Anomalies, *AAPG Bulletin*, **68**, 1121-1145.
- Oldenburg, D. W., 1978, the Interpretation of Direct Current Resistivity Measurements, *Geophysics*, **43**, 610.
- Oldenburg, D. W., and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data, *Geophysics*, **59**, 1327-1341.
- Oldenburg, D. W., and Li, Y., 2000, 3-D inversion of induced

- polarization data, *Geophysics*, **65**, 1931.
- Orozco, A. F., Kemna, A., Oberdörster, C., Zschornack, L., Leven, C., Dietrich, P., and Weiss, H., 2012, Delineation of subsurface hydrocarbon contamination at a former hydrogenation plant using spectral induced polarization imaging, *Journal of Contaminant Hydrology*, **136**, 131-144.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., and Nelson, P. H., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP, *Geophysics*, **43**, 588-609.
- Revil, A., Karaoulis, M., Johnson, T., and Kemna, A., 2012, Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology, *Hydrogeology Journal*, **20**, 617-658.
- Risk, G. F., 1975, Detection of buried zones of fissured rock in geothermal fields using resistivity anisotropy measurements, *Geophysical papers submitted to the Second UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, CA, Ma*, 20-29.
- Risk, G. F., 1975, Monitoring the boundary of the Broadlands geothermal field, New Zealand, *Proc. Second UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco*.
- Routh, P. S., Oldenburg, D. W., and Li, Y., 1998. Regularized inversion of spectral IP parameters from complex resistivity data, *68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998*, 810-813.
- Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method, *Geophysics*, **59**, 1839-1848.
- Schlumberger C., 1920, *Etude sur la Prospection Electrique du Sous-sol.*, Gauthier-Villars, Paris.
- Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D. S., and Vozoff, K., 2007, The early history of the induced polarization method, *The Leading Edge*, **26**, 312-321.
- Seigel, H. O., 1959, Mathematical formulation and type curves for induced-polarization, *Geophysics*, **24**, 547-565.
- Shi, W., Rodi, W., and Morgan, F. D., 1998, 3-D induced polarization inversion using complex electrical resistivities, *Symp. on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP1998), Proc. Environ. Eng. Geophys.*, 785-794.
- Slater, L. D., and Sandberg, S. K., 2000, Resistivity and induced polarization monitoring of salt transport under natural hydraulic gradients, *Geophysics*, **65**, 408.
- Smith, R., 2016, Induced-polarization effects in airborne electromagnetic data: Estimating chargeability from shape reversals, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016, Society of Exploration Geophysicists*, 2211-2217.
- Smith, R. S., 1988, *A plausible mechanism for generating negative coincident-loop transient electromagnetic responses*, Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Smith, R. S., and West, G. F., 1988, Inductive interaction between polarizable conductors: An explanation of a negative coincident-loop transient electromagnetic response, *Geophysics*, **53**, 677-690.
- Smith, R. S., and West, G. F., 1989, Field examples of negative coincident-loop transient electromagnetic responses modeled with polarizable half-planes, *Geophysics*, **54**, 1491-1498.
- Sogade, J. A., Scira-Scappuzzo, F., Vichabian, Y., Shi, W., Rodi, W., Lesmes, D. P., and Morgan, F. D., 2006, Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes, *Geophysics*, **71**, B75-B84.
- Son, J. S., Kim, J. H., and Yi, M. J., 2007, A new algorithm for SIP parameter estimation from multi-frequency IP data: Preliminary results, *Exploration Geophysics*, **38**, 60-68.
- Spies, B. R., 1980, A field occurrence of sign reversals with the transient electromagnetic method, *Geophysical Prospecting*, **28**, 620-632.
- Sternberg, B. K., and Oehler, D. Z., 1984, Electrical methods for hydrocarbon exploration: I. Induced polarization (INDEPTH) method: unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas III, *Proc. Symp. III, Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas, Dallas, Texas, SMU Press*, 188-201.
- Sumner, J. S., 1976, *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*, Elsevier, Amsterdam.
- Syukri, M., Kamaruddin, N. A., and Saad, R., 2014, The Application of Induced Polarization and Chargeability for Geothermal Fluid in Volcanic Area, Northern Sumatra, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **19**, 2411-2417.
- Swift Jr, C. M., 1971, Theoretical magnetotelluric and Turam response from two-dimensional inhomogeneities, *Geophysics*, **36**, 38-52.
- Thanassoulas, C., 1991, Geothermal exploration using electrical methods, *Geoexploration*, **27**(3), 321-350.
- Vanhala, H., 1997, Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method, *Geophysical Prospecting*, **45**, 303-326.
- Ward, S. H., and Sill, W. R., 1982, *Resistivity, induced polarization, and self-potential methods in geothermal exploration* (No. DOE/ID/12079-90; ESL-108), Utah Univ., Salt Lake City (USA).
- Weidelt, P., 1982, Response characteristics of coincident loop transient electromagnetic systems, *Geophysics*, **47**, 1325-1330.
- Weller, A., and Borner, F. D., 1996, Measurements of spectral induced polarization for environmental purposes, *Environmental Geology*, **27**, 329-334.
- Weller, A., Seichter, M., and Kampke, A., 1996, Induced-polarization modelling using complex electrical conductivities. *Geophysical Journal International*, **127**, 387-398.
- Winchen, T., Kemna, A., Vereecken, H., and Huisman, J.A., 2009, Characterization of bimodal facies distributions using effective anisotropic complex resistivity: A 2D numerical study based on Cole-Cole models, *Geophysics*, **74**, A19-A22.
- Wright, P. M., Ward, S. H., Ross, H. P., and West, R. C., 1985, State-of-the-art geophysical exploration for geothermal resources, *Geophysics*, **50**, 2666-2696.
- Yuval and Oldenburg, D. W., 1996, DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems – results from the

Copper Cliff mine tailings impoundments, *Journal of Applied Geophysics*, **34**, 187-198.

Zisser, N., and Nover, G., 2009, Anisotropy of permeability and complex resistivity of tight sandstones subjected to hydrostatic pressure, *Journal of Applied Geophysics*, **68**, 356-370.

Zohdy, A. A., Anderson, L. A., and Muffler, L. J. P., 1973, Resistivity, self-potential, and induced-polarization surveys of a vapor-dominated geothermal system, *Geophysics*, **38**, 1130-1144.

부 록

A. 전극 분극 및 막분극

- 전극 분극

전극 분극(electrode polarization)은 입자 분극(grain polarization)이라고도 하며 전도성을 가진 입자에 의해 나타난다. 땅속 암석에는 서로 연결된 공극이나 미세한 균열이 있어 그 사이로 지하수가 흐르고 그 안에 포함된 이온들도 이동한다. 유도 전류를 위해 전압을 걸게 되면 지하수 안에 있던 양이온과 전자가 반대 방향으로 흐르게 되는데 전도성 입자가 전류의 흐름 통로를 막고 있으면 전하가 입자 표면으로 모이면서 축전지처럼 입자가 전하를 축적하게 된다. 전류의 흐름과 반대로 전도성 입자 양 끝에 전위차가 발생하게 되며 입자 내부에 분극이 일어나며 이는 입자 두 극이 완전히 분리될 때까지 진행된다. 걸었던 전압을 다시 끊으면 전도성 입자는 잡고 있던 이온을 다시 전해질로 방출하면서 과도 전류가 발생하며 이 효

과가 지표에서 측정된다.

- 막분극

전극 분극이 전도성 입자가 통로를 막는 것이었다면 전해질 분극(electrolytic polarization)이라고도 불리는 막분극(membrane polarization)은 이온 구름에 의해 통로가 막혀 분극이 발생하는 것이다. 막분극이 발생하는 원인은 크게 두 가지가 있다. 먼저, 공극 통로의 표면에 있는 알짜 음전하로 인해 생긴 전기적 이중층(부록 B)의 양전하 구름(positively charged cloud)이 생기는데 통로 지름이 이 이중층 두께보다 작으면 전하들이 지나다닐 통로가 막히게 된다. 전압이 걸리면 막힌 통로 양쪽에 각각 음전하와 양전하가 쌓여 전위차가 발생하고 전압이 끊기면 다시 이온 농도가 되돌아오며 IP 효과가 측정된다. 또 다른 요인은 알짜 음전하를 가지고 있는 점토 입자나 섬유질 광물의 섬유실이 공극 통로에 있을 경우 전기적 이중층이 이들을 둘러싸게 되고 통로가 막히게 되면 분극이 발생하는 것이다.

B. 전기적 이중층

점토 결정은 주로 Si^{4+} 와 Al^{3+} 로 이루어져 있기 때문에 점토 결정 격자 주변에 음이온이 결집되어 결과적으로 점토 입자 표면은 음전하로 대전된다. 이렇게 음으로 대전된 점토 입자 표면이 양(+)이온을 끌어들이며 전기적 이중층(EDL, electrical double layer)을 형성하게 된다.