

광대역유도분극 이상 자료의 해석을 위한 새로운 등가회로 모델

신승욱^{1,2} · 박삼규^{1*} · 신동복²

¹한국지질자원연구원 탐사개발연구실

²공주대학교 지질환경과학과

New Equivalent Circuit Model for Interpreting Spectral Induced Polarization Anomalous Data

Seungwook Shin^{1,2}, Samgyu Park^{2*}, and Dongbok Shin³

¹Exploration Geophysics and Mining Engineering Dept., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

요약: 지층의 전기화학적 특성을 이용한 광대역유도분극(SIP) 탐사는 황화광물을 포함한 금속광물탐사에 유용한 기술이다. 탐사자료로부터 IP 물성을 계산하기 위해서는 등가회로 분석을 수행한다. 분석에 사용되는 암석의 SIP 반응을 고려한 등가회로 모델은 해의 비유일성이라는 문제를 가지기 때문에 정확한 분석을 위해 적절한 모델을 설정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이 연구는 SIP 이상반응을 나타내는 광석의 분석에 적합한 새로운 모델을 제안하고자 하였다. 이 모델은 기존의 Dias model과 Cole-Cole model의 비교를 통하여 적합성을 검증하였다. 그 결과, Dias model과 Cole-Cole model을 이용한 분석 결과의 NRMSE 오차는 각각 10.05%와 17.03%를 보였다. 하지만 제안한 새로운 모델의 NRMSE 오차는 0.87%로 상당히 낮았기 때문에 다른 모델보다 SIP 이상 자료의 등가회로 분석에 유용하고 판단하였다.

주요어: 광대역유도분극, 등가회로 분석, Cole-Cole model, Dias model, 전기 이중층

Abstract: Spectral induced polarization (SIP) is a useful technique, which uses electrochemical properties, for exploration of metallic sulfide minerals. Equivalent circuit analysis is commonly conducted to calculate IP parameters from SIP data. An equivalent circuit model, which indicates the SIP response of rock, has a non-uniqueness problem. For this reason, it is very important to select the proper model for accurate analysis. Thus, this study focused on suggesting a new model, which suitable for the analysis of an anomalous SIP response, such as ore. A suitability of the new model was verified by comparing it with the existing Dias model and Cole-Cole models. Analysis errors were represented as a normalized root mean square error (NRMSE). The analysis result using the Dias model was the NRMSE of 10.50% and was the NRMSE using the Cole-Cole model of 17.03%. However, because the NRMSE of the new model is 0.87%, it is considered that the new model is more useful for analyzing the anomalous SIP data than other models.

Keywords: spectral induced polarization, equivalent circuit analysis, Cole-Cole model, Dias model, electrical double layer

서론

지하에 직류전류를 흘려주면 지층의 광물은 분극된다. 분극된 광물과 지하수의 계면에 형성된 전기 이중층의 영향으로 전기에너지가 저장된다(Schiffbauer and Yossifon, 2014). 이

에너지는 충전된 축전기와 같이 외부 전원을 차단하더라도 일정시간 동안 전류를 흐르게 하고, 시간경과에 따라 지수 함수적으로 감쇄한다. 저장된 에너지 양을 지구물리학에서는 충전성으로 정의하고, 에너지의 감쇄는 시간상수를 이용하여 기술한다. 충전성과 시간상수를 이용하여 암석의 전기화학적 특성을 기술할 수 있고, 두 물성의 분포로부터 지층을 영상화하는 탐사 기술을 유도분극(Induced polarization; IP) 탐사라고 한다(Seigel *et al.*, 2007).

초기에 개발된 시간영역 IP 탐사는 전자기 유도에 의한 전자기적(Electromagnetic; EM) 효과가 IP 측정 자료에 영향을 주는 EM coupling 문제가 발생하였다(Wynn and Zonge, 1975). 이를 해결하기 위해 IP 효과가 크고, EM 효과가 작은 낮은 주파수 대역(1 mHz ~ 1 kHz)의 교류전류를 이용한 광

2014년 10월 28일 접수; 2014년 11월 17일 수정; 2014년 11월 25일 채택
*Corresponding author

E-mail: samgyu@kigam.re.kr

Address: 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

©2014, 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.

대역유도분극(Spectral induced polarization; SIP) 탐사가 개발되었다(Zonge and Wynn, 1975). 이 탐사기술은 시간영역 IP 탐사의 문제를 상당히 개선하였고, 광물 탐사에서 많이 적용되었다(Pelton *et al.*, 1978; Vanhala and Peltoniemi, 1992). 또한 SIP 반응과 지층의 수리전도도 사이에 상관성을 통하여 대수층의 특성을 파악하기 위한 연구가 수행되었다(Revil and Florsch, 2010).

암석의 SIP 반응은 하나의 등가회로 모델로 가정할 수 있다. 이 모델을 기반으로 한 등가회로 분석을 통하여 충전성과 시간상수를 도출한다(Pelton *et al.*, 1978). 이 분석 방법은 두 물성을 도출하기 위한 효과적인 기술이지만, 한 시료의 측정자료를 분석함에 있어서 다수의 모델로 설명할 수 있는 해의 비유일성이라는 문제를 가진다(Macdonald and Johnson, 2005). 지난 수십 년간 암석의 SIP 반응을 적절하게 설명하기 위한 다양한 모델이 제안(Dias, 2000)되었으며, Dias model(Dias, 1972)과 Cole-Cole model(Pelton *et al.*, 1978)이 가장 대표적이다. 그러나 이 모델들은 SIP 이상반응을 보이는 광석의 측정자료 분석에서 오차가 매우 크거나 발산하는 문제가 발생하였다.

이 연구에서는 광석의 SIP 이상 반응을 보이는 광석의 SIP 측정 자료를 적절하게 해석할 수 있는 새로운 모델을 고안하였으며, Dias model과 Cole-Cole model을 이용한 분석 결과와 비교함으로써 제안한 모델의 적합성을 검증하고자 한다.

등가회로 모델

한 주파수에서 측정된 전위차와 위상은 오일러의 정리로 실수성분과 허수성분의 임피던스로 변환할 수 있다. 변환된 임피던스는 복소평면에서 한점으로 나타내고, 전체 주파수 대역에서 측정된 자료는 하나의 궤적으로 도시할 수 있다. 이 궤적을 각속도에 대한 복소 임피던스의 식으로 표현할 수 있고, 아래의 식 (1)과 같다.

$$Z(\omega) = Z'(\omega) - iZ''(\omega) \tag{1}$$

이 식에서 Z' 와 Z'' 는 실수성분과 허수성분의 임피던스 (ohm-m), ω 는 각속도, $i = \sqrt{-1}$ 이다.

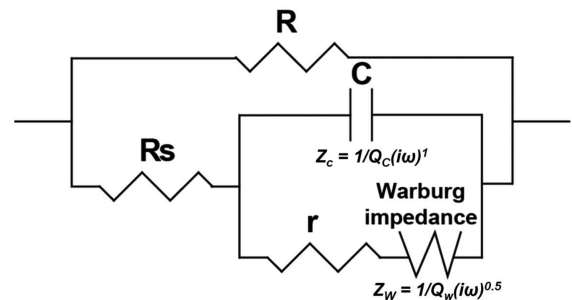
실수성분의 임피던스는 주파수가 변하더라도 크기가 항상 일정하지만, 허수성분의 임피던스는 주파수에 따라 크기가 변한다. 허수성분 임피던스의 주파수 특성 때문에 SIP 반응이 발생하고, 그 원인은 분극된 광물입자와 전해질의 계면에서 형성되는 전기 이중층으로 알려졌다(Jougnot *et al.*, 2010). 이러한 전기 이중층은 조밀 이중층과 확산 이중층으로 이루어져 있다(Nguyen and Amiri, 2014).

실수성분 임피던스는 주파수에 변화에 무관한 저항을 이용하여 설명하고, 허수성분 임피던스는 주파수에 따라 임피던스가 변하는 capacitor, Warburg impedance, constant phase element(CPE)를 이용하여 설명할 수 있다. 따라서 이들이 서

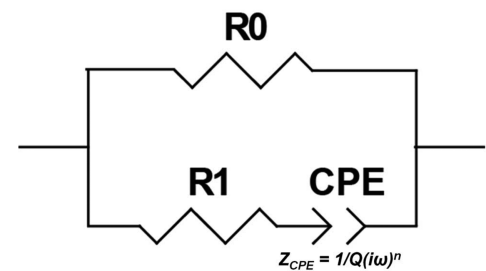
로 연결된 등가회로를 가정하여 암석의 SIP 반응을 설명할 수 있다(Macdonald and Johnson, 2005).

Dias model(Fig. 1(a))은 저항, capacitor, Warburg impedance를 이용하여 암석의 SIP 반응을 설명하고자 했다. Capacitor와 Warburg impedance는 주로 전기적으로 균질한 물질에서 발생하는 전기 이중층을 가정하는데 사용된다. Capacitor는 조밀 이중층을 설명하고, Warburg impedance는 확산 이중층을 설명한다. 이 모델은 전기적으로 유전체의 특성을 가지고 있는 조암광물로 구성된 암석의 SIP 반응 특성과 상당히 잘 부합한다. 그러나 유전체 특성을 가지고 있는 맥석광물과 전도성 특성을 가지고 있는 광석광물이 섞여있는 광석의 SIP 반응 특성을 설명하기에는 부적합하다.

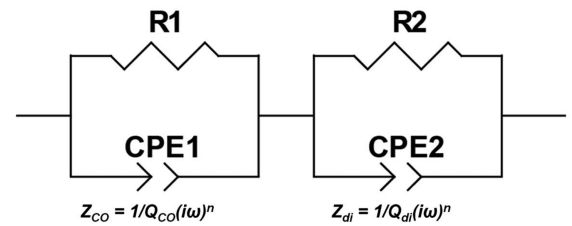
광석과 같이 전기적으로 불균질한 시료의 SIP 반응 특성을 설명하기 위해서는 CPE가 사용되며(Katz and Willner, 2003), Fig. 1(b)와 같이 CPE를 사용한 Cole-Cole model이 제안되었다(Pelton *et al.*, 1978). 하지만 이 모델은 단지 하나의 CPE를 사용했기 때문에 광석 시료와 같이 두 개의 이중층 특성을 동



Z: impedance, C: capacitor, Q_c : capacitance of a capacitor, Q_w : capacitance of the Warburg impedance
(a) Dias model



CPE: constant phase element, n: frequency constant
(b) Cole-Cole model



Q_{co} : capacitance of a compact layer, Q_{di} : capacitance of a diffuse layer
(c) new model

Fig. 1. Equivalent circuit models for the analysis.

시에 설명할 수 없으므로 부적합하다고 판단하였다. 따라서 두 모델의 장점은 살리고, 단점을 해결하기 위해 Fig. 1(c)와 같은 새로운 모델을 고안하였다. 이 모델은 두 개의 CPE를 사용하여 전기적으로 불균질하더라도 잘 부합하고, 두 이중층의 특성을 동시에 설명할 수 있을 것으로 판단하였다.

등가회로 분석

등가회로 분석은 분극된 암석을 가정한 회로모델을 기반으로 IP 물성을 계산하는 기술이다. 이 연구에서는 등가회로 분석을 위하여 상용화된 프로그램인 Z-view(Solartron Co.)를 이용하였고, 이 프로그램은 반복연산을 통하여 측정결과와 가장 근사한 분석 결과를 자동으로 계산한다.

분석에서 초기 모델값을 부적절하게 입력하면 발산하거나 이론적으로 부적합한 결과가 나올 수 있고, 특히 허수성분에 지수항이 부적절한 경우 발산이 자주 일어난다. Dias model의 허수성분은 지수가 고정된 capacitor와 Warburg impedance를 사용하기 때문에 다른 모델과 비교하여 상대적으로 발산의 위험성이 적다. 반면에 지수의 변화가 자유로운 CPE를 사용하는 Cole-Cole model과 새로 제안된 모델은 쉽게 발산할 수 있다.

이 두 모델에서의 발산을 줄이기 위하여 CPE의 지수를 1 (capacitor) 또는 0.5(Warburg impedance)로 고정해서 분석한 결과를 초기값으로 입력했고, 지수를 자유롭게 두어 다시 분석했다. 이때 반복 횟수가 너무 많으면 발산할 수 있기 때문에 최대 10회로 제한하였다.

등가회로 분석을 통해 획득한 모델에 각 성분의 값으로부터 IP 물성을 계산할 수 있다(Dias, 2000). 조밀 이중층은 주로 1 kHz 이상의 고주파수에서 이완되기 때문에 SIP보다는 EM의 주파수 대역에 가깝다 따라서 조밀 이중층을 가정한 CPE1 성분을 무시해야 한다. 이 성분을 무시하면 충전성과 시간상수는 식 (2)와 식 (3)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$m = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{2}$$

$$\tau = \left(\frac{R_2}{Q_{di}} \right)^{1/n_{di}} \tag{3}$$

이 식에서 m은 충전성(mV/V), ρ_0 는 0 Hz의 전기비저항(ohm-m), ρ_∞ 는 ∞ Hz의 전기비저항(ohm-m), R_1, R_2 는 두 이중층의 전기비저항(ohm-m), τ 는 이완시간(sec), Q_{di} 는 확산 이중층에 의한 CPE2의 전기용량(F), n_{di} 는 CPE2의 지수항이다.

등가회로 분석의 오차는 Normalized root mean square (NRMSE)를 사용하여 분석의 정확도를 제시하였고(Niranjan, 2004). NRMSE는 아래의 식 (4)로 계산할 수 있다.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i) - f_a(x_i, y_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i)]^2}} \times 100 \tag{4}$$

이 식에서 $f(x_i, y_i)$ 은 측정된 주파수에 따른 복소 임피던스, $f_a(x_i, y_i)$ 는 분석된 주파수에 따른 복소 임피던스이다.

시료채취 및 SIP 자료획득

시료는 강원도 정선 한덕철광에서 광체를 대상으로 채취하였고, 현미경 관찰을 통하여 다량의 자철석이 수반된 것을 확인하였다(Fig. 2). 이 시료의 광물조성을 파악하기 위하여 XRD 정량분석을 수행했다. 그 결과 자철석이 85.8 w%, 흑운모가 10.3 w%, 방해석이 2.9 w%, 석영이 1.0 w%로 자철석이 상당히 우세하였다(Fig. 3). 수포화된 시료의 SIP 측정자료를 얻기 위해 물을 채운 데시케이터와 진공펌프를 사용하여 시료를 포화시켰고(Bieniawski and Bernede, 1979), Impedance spectroscopy 기기(Solartron Co.)를 사용하여 0.01 Hz ~ 100 kHz의 주파수 대역에 대한 SIP 자료를 획득하였다. 실험에서 전극과 측정홀더는 안정적으로 전기적 물성을 얻을 수 있는 Park and Matsui(1998)의 측정시스템을 사용하였다.

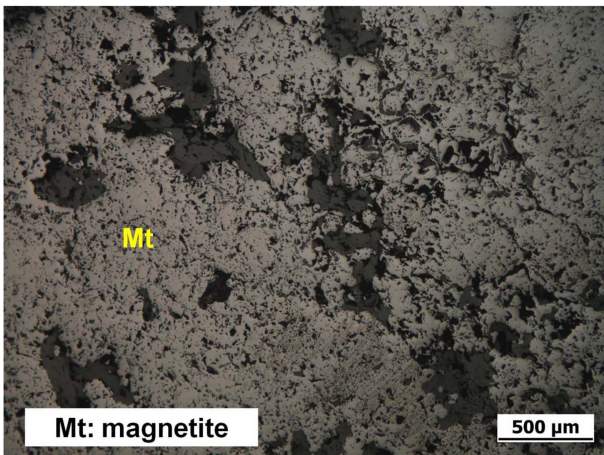


Fig. 2. Photomicrograph of an ore sample.

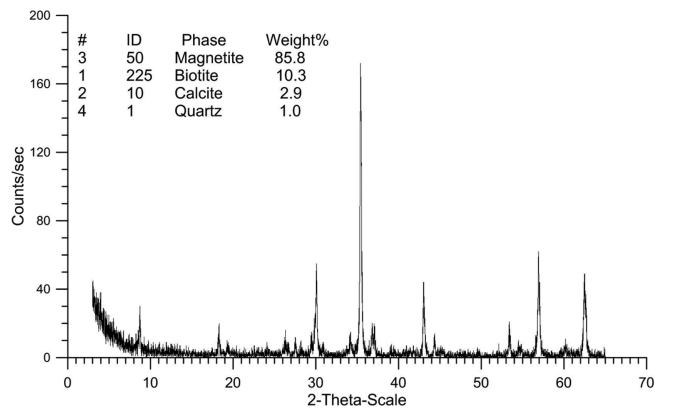


Fig. 3. X-ray diffraction analysis result of an ore sample.

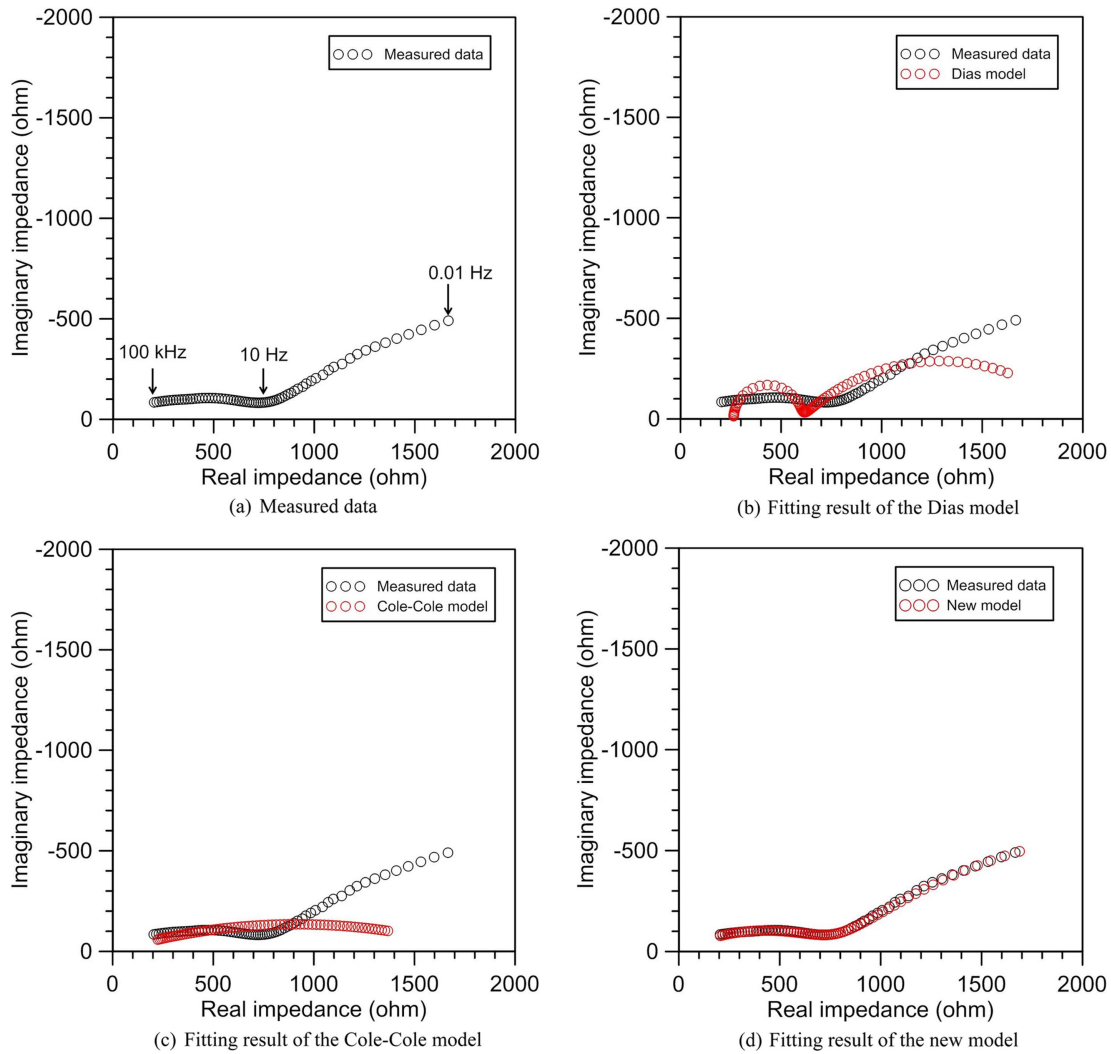


Fig. 4. Nyquist diagrams of the measured data of the ore sample and the fitting results using each model.

연구결과

측정자료와 분석결과는 Fig. 4와 같이 나이키스트 임피던스 그래프를 이용하여 도시하였다. 측정결과에서 광석의 SIP 반응은 0.01 Hz ~ 10 Hz의 저주파수 대역과 10 Hz ~ 100 kHz의 고주파수 대역에서 특성이 확연하게 달랐다. 특히, Fig. 4(a)와 같이 저주파수 대역에서 반응이 우세하다. 확산 이중층은 조밀 이중층과 비교하면 상대적으로 저주파수 대역에서 영향력이 크기 때문에 광석의 SIP 반응은 확산 이중층의 영향력을 크게 받는 것으로 보인다. 이러한 SIP 반응 특성은 Pelton *et al.* (1978)에서 나타난 광석의 SIP 반응과 상당히 유사하다.

앞서 언급한 3가지 모델 중에서 가장 먼저 Dias model을 이용하여 등가회로 분석을 수행하였다. Dias model의 분석결과는 측정결과에서 나타난 두 이중층의 특성을 잘 반영하였지만, 측정결과와 상당한 차이를 보였다(Fig. 4(b)). 다음으로 Cole-Cole model을 적용하여 등가회로 분석을 수행하였다. 이 모델

의 분석결과는 측정결과와 큰 차이를 보였고, 또한 두 이중층의 특성을 반영하지 못했다(Fig. 4(c)). 마지막으로 이 연구에서 제안된 새로운 모델을 이용하여 등가회로 분석을 수행하였다. 이 모델에 대한 분석은 두 이중층의 특성을 잘 설명할 뿐만 아니라 측정결과와 상당히 잘 일치하였다(Fig. 4(d)).

Table 1은 분석으로부터 계산된 IP 물성과 분석오차를 계산한 NRMSE 값을 표로 나타낸 것이다. 이 연구에서 제안된 모델의 NRMSE는 앞서 언급한 바와 같이 0.87%로 상당히 오차가 작았지만, Dias model은 10.50%이고, Cole-Cole model은

Table 1. SIP parameters and normalized root mean square errors determined by the analysis using each model.

Model	Chargeability (mV/V)	Time constant (sec)	NRMSE (%)
Dias model	867	1.76E-04	10.50
Cole-Cole model	1000	5.09E-02	17.03
New model	798	1.03E+02	0.87

17.03%로 측정자료와 분석결과 사이에 차이를 정량적으로 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 모델이 Dias model과 Cole-Cole model에 비하여 광석의 SIP 반응을 분석하는데 더 적합한 것으로 판단된다. 모든 분석 결과에서 충전성이 700 mV/V 이상으로 상당히 크고, 제안된 모델의 경우 시간상수가 103초라는 것은 시료가 다량의 자철석을 수반하기 때문에 적합하다고 판단된다. 하지만 Dias model과 Cole-Cole model의 시간상수가 1초보다 작은 것은 부적합한 것으로 판단된다.

결 론

이 연구는 광체의 SIP자료를 분석하는데 적합한 등가회로 모델을 제시하기 위하여 수행하였다. 이를 위해 가장 대표적인 Dias model과 Cole-Cole model을 검토하였다. 그 결과 Dias model은 전기적으로 균질한 조암광물로 구성된 암석의 SIP 반응을 적절하게 설명할 수 있지만, 광석과 같이 구성광물의 전기적 성질이 불균질한 경우에는 부적절한 것으로 판단하였다. 이러면 CPE를 사용하는 것이 더 적합하기 때문에 Cole-Cole model이 적합할 것으로 판단하였다. 하지만 Cole-Cole model은 단지 하나의 CPE를 사용하기 때문에 두 개의 이중층 영향이 동시에 나타난 광석시료의 SIP 반응을 설명하는데 부적절하였다.

기존 두 모델의 장단점을 고려하여 새로운 모델을 제안하였다. 그 결과 이 모델은 기존 모델을 적용한 분석결과와 비교하여 광석의 SIP 반응 특성을 잘 반영할 뿐만 아니라 측정결과와 오차가 가장 낮았다. 계산된 IP 물성 또한 기존 모델을 이용한 물성에 비하여 합리적인 값이 도출되었다. 따라서 이 모델은 광석의 SIP 반응을 분석하는데 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 산업자원통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 에너지기술개발사업 ‘광대역 유도분극을 이용한 정밀 탐광기술 개발 (20112010300050)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Bieniawski, Z. T., and Bernede, M. J., 1979, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part I. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **16**(2), 138-140.
- Dias, C. A., 1972, Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies, *Journal of Geophysical Research*, **77**(26), 4945-4956.
- Dias, C. A., 2000, Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks, *Geophysics*, **65**(2), 437-451.
- Jougnot, D., Ghorbani, A., Revil, A., Leroy, P., and Cosenza, P., 2010, Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: a mechanistic approach, *Geophysical Journal International*, **180**(1), 210-224.
- Katz, E., and Willner, I., 2003, Probing Biomolecular Interactions at Conductive and Semiconductive Surfaces by Impedance Spectroscopy: Routes to Impedimetric Immunosensors, DNA-Sensors, and Enzyme Biosensors, *Electroanalysis*, **15**(11), 913-947.
- Macdonald, J. R., and Johnson, W. B., 2005, Fundamentals of Impedance Spectroscopy, *Impedance Spectroscopy*, John Wiley & Sons, Inc., 1-26.
- Nguyen, P. T., and Amiri, O., 2014, Study of electrical double layer effect on chloride transport in unsaturated concrete, *Construction and Building Materials*, **50**, 492-498.
- Niranjan, U., 2004, Simultaneous storage of medical images in the spatial and frequency domain: A comparative study, *Biomedical Engineering Online*, **3**(17), 1-10.
- Park, S., and Matsui, T., 1998, Basic study on resistivity of rocks, *Butsuri Tansa (Geophysical Exploration)*, **51**(3), 201-209 (in Japanese).
- Pelton, W., Ward, S., Hallof, P., Sill, W., and Nelson, P., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency, *Geophysics*, **43**(3), 588-609.
- Revil, A., and Florsch, N., 2010, Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media, *Geophysical Journal International*, **181**(3), 1480-1498.
- Schiffbauer, J., and Yossifon, G., 2014, Influence of electric-double-layer structure on the transient response of nano-channels, *Physical Review E*, **89**(5), 053015.
- Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D., and Vozoff, K., 2007, The early history of the induced polarization method, *The Leading Edge*, **26**(3), 312-321.
- Vanhala, H., and Peltoniemi, M., 1992, Spectral IP studies of Finnish ore prospects, *Geophysics*, **57**(12), 1545-1555.
- Wynn, J. C., and Zonge, K. L., 1975, EM coupling, its intrinsic value, its removal and the cultural coupling problem, *Geophysics*, **40**(5), 831-850.
- Zonge, K., and Wynn, J., 1975, Recent advances and applications in complex resistivity measurements, *Geophysics*, **40**(5), 851-864.