

논문

광물탐사를 위한 진동수영역 유도분극 물리검층

신승욱*

한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구센터

Geophysical Logging of Frequency-domain Induced Polarization for Mineral Exploration

Seungwook Shin*

Mineral resources development research center, Mineral resources division, Korea institute of geoscience and mineral resources (KIGAM)

요약

유도분극법은 분극된 광물 입자와 공극을 채우는 지하수의 계면에서의 전기화학적 반응 차이를 영상화시키는 기술로서 광물탐사와 수리지질학적 조사에서 유용하다. 진동수영역 유도분극법은 시간영역 유도분극탐사법보다 더 나은 품질의 자료를 얻을 수 있지만 긴 자료취득 시간 때문에 현장 탐사에서 활발하게 적용되지 않았다. 하지만 현재 광물탐사 프로젝트는 과거와 비교하여 심부에 있거나 품위가 낮은 광체로 탐사 대상이 바뀔에 따라 고품질의 탐사법을 사용하는 것이 중요하다. 또한 자동 계측에 의해 단축된 탐사 시간은 진동수영역 유도분극탐사법의 현장 적용 가능성을 높였다. 따라서 이 연구는 광물탐사에서 광체 탐지 적합성을 파악하기 위하여 국내 스킨 광상의 탐사 시추공을 대상으로 진동수영역 유도분극 물리검층을 수행했다. 심도별 서로 다른 두 진동수에서 측정된 임피던스 자료로부터 교류 전기비저항, 백분율 진동수 효과, 금속계수를 계산했다. 자철석과 황철석을 포함하는 구간은 다른 구간과 비교하면 상대적으로 낮은 교류 전기비저항, 높은 백분율 진동수 효과, 큰 금속계수를 보였다. 따라서 진동수영역 유도분극법은 앞으로의 광물탐사에서 유용할 것으로 여겨진다.

주요어

진동수영역 유도분극, 백분율 진동수 효과, 금속계수, 광물탐사

ABSTRACT

Induced polarization (IP) is useful for mineral exploration and hydrogeological studies by visualizing the electrochemical reactions at the interface between polarized minerals and groundwater. Frequency-domain IP (FDIP) is not actively applied to field surveys because it takes longer to acquire data, despite its higher data quality than conventional time-domain IP. However, data quality is more important in current mineral exploration as the targets gradually shift to deep or low-grade ore bodies. In addition, the measurement time reduced by automated instrumentation increases the potential for FDIP field applications. Therefore, we demonstrate that FDIP can detect mineral exploration targets by performing geophysical logging in the boreholes of a skarn deposit, in South Korea. Alternating current (AC) resistivity, percent frequency effect (PFE) and metal factor (MF) were calculated from impedance values obtained at two different frequencies. Skarn zones containing magnetite or pyrite showed relatively low AC resistivity, high PFE, and high MF compared to other zones. Therefore, FDIP surveys are considered to be useful for mineral exploration.

KEYWORDS

frequency-domain induced polarization, percent frequency effect, metal factor, mineral exploration

Received: 29 April 2021; Revised: 21 June 2021; Accepted: 1 July 2021

*Corresponding author

E-mail: sw.shin@kigam.re.kr

Address: Mineral resources development research center, Mineral resources division, Korea institute of geoscience and mineral resources (KIGAM), 124 Gwahak-ro, Yuseong-Gu, Daejeon 31432, South Korea

©2021, 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.

서론

진동수영역 유도분극법(Frequency-domain induced polarization, FDIP)은 지표면에 4개의 전극을 설치한 다음 두 개의 전극을 통해 다중의 진동수(0.1 Hz ~ 1 kHz)를 가지는 사인파를 송신하고, 나머지 두 개의 전극을 통해 수신 신호를 측정하는 전기탐사이다. 서로 다른 두 진동수에 측정된 임피던스를 이용하여 지하 매질의 특성을 파악한다. 이때 임피던스 변화는 광물입자와 공극을 채우는 지하수 사이의 계면에서의 전기화학적 반응으로 생기는 전기이중층의 특성에 의해 결정된다(Macdonald and Johnson, 2005).

광물탐사에서 열수 변질로 생성되는 점토광물과 탐사 대상인 금속광물은 주변모암의 규산염 내지 탄산염 광물과 비교하면 전기이중층을 두껍게 형성시키기 때문에 대부분의 광체는 주변 모암 보다 강한 IP 효과를 보인다(Barreto and Dias, 2014; Shin *et al.*, 2016). 이러한 유도분극 특성은 FDIP 뿐만 아니라 직류전류가 차단된 이후의 전위감쇠 곡선을 측정하는 시간영역 유도분극법(Time-domain IP, TDIP)을 통해서도 파악할 수 있다(Telford *et al.*, 1990). 전류 차단 후 과도 전압은 매우 작기 때문에 TDIP 자료는 잡음에 취약하다. 따라서 만족스러운 현장 TDIP 자료를 얻기 위해서는 1A 이상의 전류를 주입할 수 있는 강한 송신원과 수신전극으로 비분극 전극을 필요로 한다.

반면에 FDIP는 정상상태에서의 임피던스 자료를 얻으므로 안정적인 현장 자료를 얻을 수 있다. 다중 진동수에서 얻은 임피던스뿐만 아니라 송수신 신호 사이의 위상을 측정하는 광대역유도분극법(Spectral IP, SIP)이 많은 주목을 받고 있다. SIP는 진동수에 따른 임피던스와 위상 스펙트럼 특성을 분석하고, 지층 내부의 미시구조를 가정한 등가회로 모델을 통하여 전기비저항, 충전성, 이완시간, 진동수 지수 등의 정량적인 지구물리학적 변수들을 추출할 수 있다(Pelton *et al.*, 1978).

등가회로 모델 중 콜-콜 모델이 가장 잘 알려져 있으나, 지난 수 십 년간 다수의 연구자에 의해 다양한 등가회로 모델이 제안되었다(Dias, 2000). 대부분의 등가회로 모델은 많은 회로 소자들로 구성되어 있어 각 소자들의 초기 값을 적절하게 설정하기 위해 많은 시간이 필요하다. 또한 모델링 과정에서 비현실적이거나 발산하는 결과가 산출되는 경우가 빈번하게 발생한다. FDIP의 진폭은 안정적으로 측정되는 반면에 위상은 송수신 신호의 파형 간 각속도를 정밀하게 측정된 신호이므로 외부 전자기 잡음에 취약할 수 있다.

FDIP는 단지 진폭 자료만을 사용하기 때문에 SIP와 비교하면 민감도는 다소 떨어진다. 하지만 탐사자료 측정과 분석이 쉽고, 자료의 신뢰도가 높아 현장 적용성이 SIP보다 양호할 것으로 여겨진다. 더욱이 FDIP의 긴 측정 시간은 최근 자동 계측기술의 발전으로 상당히 단축됐다(Martin *et al.*, 2020). 이 연구에서는 국내 스카른 몰리브덴 광상에 굴착된 두 개의 시

추공을 대상으로 현장 FDIP 물리검층을 수행했다. 또한 심도별로 얻은 검층 자료로부터 백분율 진동수 효과(percent frequency effect, PFE)와 금속계수(metal factor, MF)를 계산했고, 시추코어의 암석기재 결과와 비교함으로써 FDIP의 광물탐사 적합성을 검토하고자 한다.

연구방법

현장 FDIP 검층 실험은 충청북도 제천시 금성면 대장리의 금성광산의 탐사 시추공에서 수행했다(Fig. 1). 금성광산은 몰리브덴을 대상으로 개발하고 있는 가행 광산으로 고생대 탄산염암과 이를 관입하는 중생대 백악기 화성암체 사이에 접촉교대작용인 스카른화 과정에서 만들어진 열수의 광화작용으로 광상이 형성됐다(Choi *et al.*, 2007). 광물탐사 해석결과로부터 큐폴라 타입의 몰리브덴 광체가 심부에 부존할 가능성이 높은 것으로 해석되었다. 이를 확인하기 위하여 이 연구에서는 심도 400 m인 두 개의 시추공에 대한 시추조사를 수행했고, 시추코



Fig. 1. Satellite map around Geumseong mine.



Fig. 2. Image of petrography of drilling cores in Geumseong mine.

어의 암석기재를 통한 주상도를 작성했다(Fig. 2).

이 연구는 FDIP의 광물탐사 적용 가능성을 파악하는 데 목적이 있기 때문에 광체 구간과 광체와 인접한 주변 암석을 대상으로 검층을 수행했다. 1번 시추공에서 광체구간은 241.9 m ~ 243.6 m 심도 구간에서 확인됐고, 다량의 자철석이 석류석 스카른에 함유되어 있었다. 2번 시추공에서 광체구간은 94.1 m ~ 98.0 m 심도 구간과 99.0 m 심도에서 각각 확인됐다. 94.1 m ~ 98 m 심도 구간에서는 10% 가량의 황철석이 휘석 스카른에 함유됐고, 99 m 심도에서 다량의 자철석이 휘석 스카른에 함유되어 있었다. FDIP 검층은 1번 시추공의 223 m ~ 262 m 구간을 대상으로 수행했고, 2번 시추공의 89 m ~ 105 m 구간을 대상으로 수행했다. 1번 시추공에서는 2 m ~ 4 m 간격으로 자료를 획득했고, 2번 시추공에서는 검층 구간이 좁아서 1 m 간격으로 자료를 획득했다.

FDIP 검층 계측 장비는 Fig. 3a와 같이 미국 Zonge 사의 GDP-32II 시스템과 한국지질자원연구원에서 개발한 검층기와 윈치로 구성된다. Fig. 3b에서 PVC 파이프를 이용하여 제작된 검층기는 4.7 cm의 직경과 172 cm의 길이를 가진다. 이 검층기에는 배터리와 증폭 회로가 내장되어 있어 수신되는 신호의 손실을 막는다. 세 개의 전극이 검층기에 30 cm 간격으로 설치됐고, 자료의 질을 향상시키기 위하여 Pb-PbCl₂ 비분극 전극으로 제작됐다. 자료 취득 과정에서 전류전극의 음극은 지표에 설치되었다. 윈치의 전선은 세 개의 강선을 사용했고, 이 강선은 장비 하중을 충분히 견딜 수 있도록 케블라 섬유와 우레탄으로 피복했다.

GDP-32II는 0.125 Hz ~ 1,024 Hz 범위의 진동수를 변조시켜 광대역유도분극 자료를 얻을 수 있는 장비로서 변조한 특정 진동수의 신호를 LDT-10B 송신기를 연동시켜 땅속으로 주입하고, 윈치에 설치된 배전반과 연결하여 검층기에서 수신되는 자료를 기록한다. FDIP 측정은 일반적으로 10 Hz 이하의

진동수 범위에서 임의의 두 진동수를 선택하고 임피던스 값을 측정한다. 현장 검층에서는 0.125 Hz와 8 Hz의 두 진동수를 사용했다. 땅속으로 주입하는 전류량은 LDT-10B 수신기에서 전류가 포화되지 않는 범위에서 최대치로 설정했다.

두 진동수에서 측정한 임피던스에 거리계수를 곱해서 겔보기 교류 전기비저항을 계산했다. 0.125 Hz 교류 전기비저항은 진동수가 충분히 낮아서 직류 전기비저항 특성과 거의 유사하다. 따라서 이때의 교류 전기비저항을 이용하여 지층의 전기전도도 특성을 파악했다. 지층의 FDIP 반응 특성을 파악하기 위하여 두 진동수에서의 겔보기 교류 전기비저항으로부터 PFE와 금속계수를 산정했다. PFE는 식 (1)로 정의되고, 금속계수는 식 (2)로 정의된다.

$$PFE = \frac{\rho_{low} - \rho_{high}}{\rho_{high}} \times 100 \quad (1)$$

$$MF = 200,000 \pi \frac{\rho_{low} - \rho_{high}}{\rho_{high} \rho_{low}} \quad (2)$$

여기서, ρ_{low} 는 낮은 진동수인 0.125 Hz에서 얻은 겔보기 교류 전기비저항이고, ρ_{high} 는 높은 진동수인 8 Hz에서 얻은 겔보기 교류 전기비저항 값이다.

연구결과

두 시추공에서 얻은 검층 자료로부터 교류 전기비저항, 백분율 진동수 효과(PFE), 금속계수(MF)를 각각 계산했고, 심도별 교류 전기비저항, PFE, MF 그래프를 시추 주상도와 함께 Fig. 4에 같이 도시했다. 1번 시추공은 Fig. 4a와 같이 상부에서부터 석회암(limestone), 석류석 스카른(garnet skarn), 각석암(amphibolite), 다량의 자철석을 함유한 백운암질 스카른(dolomitic skarn), 석류석 스카른, 석회암의 암상 변화가 확인

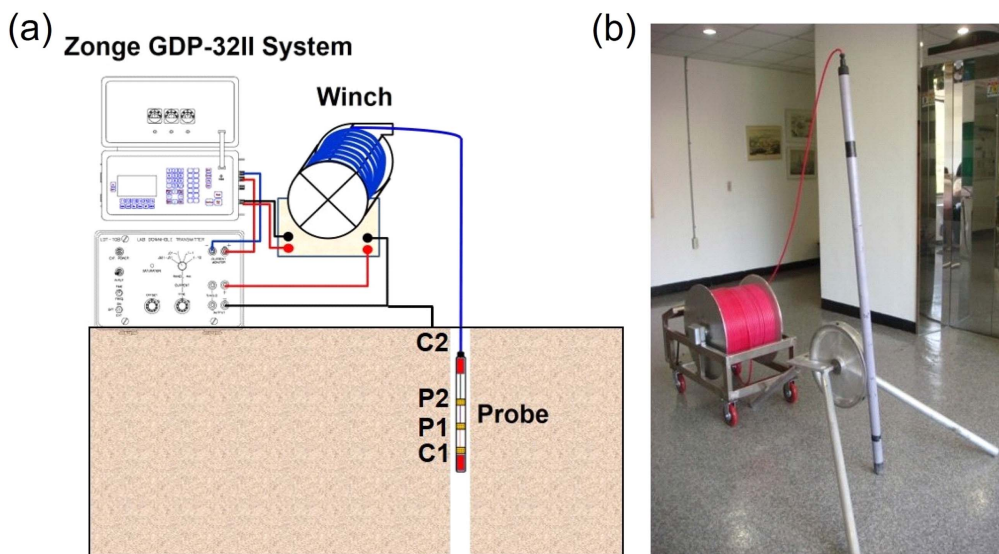


Fig. 3. Images of schematic FDIP geophysical logging system (a) and probe connected with winch (b).

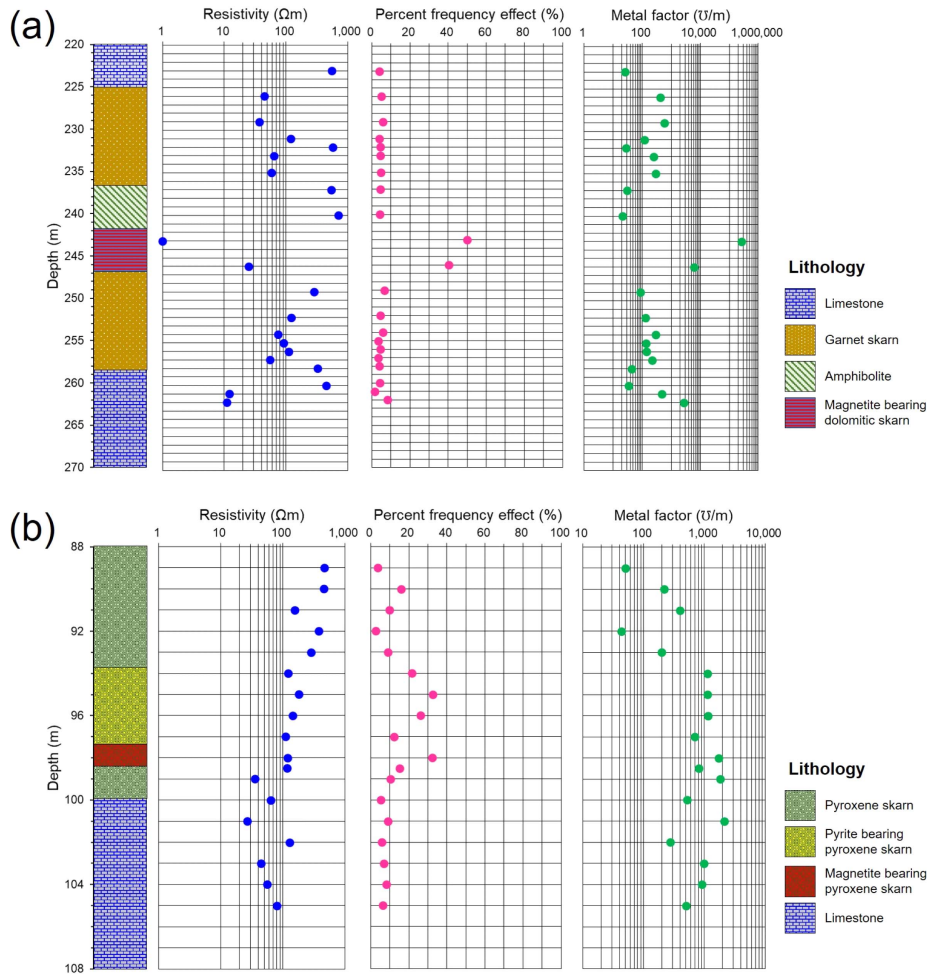


Fig. 4. Geologic columns and geophysical logging results showing zones of (a) 220 m ~ 270 m at borehole No. 1 and (b) 88 m ~ 108 m at borehole No. 2.

됐다. 1번 시추공의 검층결과 223 m 심도의 상부 석회암에서 교류 전기비저항은 558 Ωm 로 측정됐고, PFE와 MF는 각각 4%와 27 U/m 로 계산됐다. 226 m ~ 235 m 심도 구간의 석류석 스카른에서 교류 전기비저항은 37 Ωm ~ 571 Ωm 의 범위를 보였다. 이 구간에서 PFE는 4% ~ 6%의 범위를 보였고, MF는 29 U/m ~ 587 U/m 의 범위가 나타났다. 237 m와 240 m 심도의 각섬암에서 교류 전기비저항은 543 Ωm 와 711 Ωm 이었다. 두 측정점의 PFE는 둘 다 4%이었고, MF는 30 U/m 과 21 U/m 이었다. 249 m ~ 283 m 심도 구간의 하부 석류석 스카른에서 교류 전기비저항은 55 Ωm ~ 451 Ωm 의 범위를 보였다. 이 구간에서 PFE는 3% ~ 7%의 범위를 보였고, MF는 35 ~ 295의 범위가 나타났다. 243 m와 246 m 심도의 자철석을 포함하는 백운암질 스카른에서 교류 전기비저항은 1 Ωm 와 25 Ωm 이었다. 두 측정점의 PFE는 50%와 40%였고, MF는 264,867과 6,087이었다. 261 m와 262 m 심도의 하부 석회암에서 교류 전기비저항은 12 Ωm 와 11 Ωm 이었다. 두 측정점의 PFE는 2%와 8%였고, MF는 481 U/m 과 2,781 U/m 이었다.

다량의 자철석을 포함하는 백운암질 스카른의 검층 결과는

다른 구간과 확연한 차이를 보이고, 금속계수 결과에서 물성대비가 특히 두드러진다. 따라서 자철석 광체는 FDIP를 이용하여 효과적으로 감지할 수 있을 것으로 판단된다. 석류석 스카른 구간은 교류 전기비저항과 금속계수의 분포가 넓었다. 스카른 암석은 형성과정에서 마그마로부터 분리된 열수 유체의 광화작용을 선택적으로 받기 때문에 많은 스카른 암석 내 포함된 금속광물을 흔히 관찰할 수 있다. Kim *et al.* (2015)에 따르면 스카른 암석은 접촉변질작용을 받아서 공극이 발달하므로 주로 주변모암 보다 전기전도성이 양호할 수 있는 것으로 해석했다. 이러한 두 가지 요인으로 인하여 석류석스카른의 일부 구간에서 다소 낮은 교류 전기비저항과 높은 금속계수가 나타난 것으로 판단된다.

261 m와 262 m 심도의 하부 석회암층은 자철석을 포함하는 백운암질 스카른 구간을 제외하면 교류 전기비저항이 상당히 낮고, MF는 다른 구간과 비교하면 상대적으로 높았다. 반면에 이러한 이상반응은 PFE 결과에서는 뚜렷하지 않다. 하부 석회암층은 암석 기재 결과에서 점토와 같은 이질을 협제하고 있었다. 점토는 양도체이며, 막분극에 의한 IP 반응이 나타나

는 것으로 알려졌다. 이 구간의 교류 전기비저항은 다른 구간과 비교하여 특히 낮았고, 262 m 심도의 PFE와 MF는 자철석을 포함하는 백운암질 스카른 구간을 제외하면 가장 높았다.

2번 시추공의 암상은 Fig. 4b와 같이 휘석 스카른(pyroxene skarn)과 석회암으로 이루어졌고, 10% 가량의 황철석과 다량의 자철석이 휘석 스카른에 함유된 구간이 확인됐다. 2번 시추공의 검층결과 89 m ~ 93 m 심도의 상부 휘석스카른에서 교류 전기비저항은 157 Ω m ~ 469 Ω m의 범위를 보였다. 이 구간에서 PFE는 3% ~ 16%의 범위를 보였고, MF는 43 \bar{U} /m ~ 398 \bar{U} /m 범위가 나타났다. 94 m ~ 98 m 심도의 황철석을 함유하는 휘석스카른에서 교류 전기비저항은 110 Ω m ~ 180 Ω m의 범위를 보였다. 이 구간에서 PFE는 12% ~ 32%의 범위를 보였고, MF는 694 \bar{U} /m ~ 1,715 \bar{U} /m의 범위가 나타났다. 98.5 m ~ 100 m 심도의 하부 휘석 스카른에서 교류 전기비저항은 35 Ω m ~ 116 Ω m의 범위를 보였다. 이 구간에서 PFE는 5% ~ 15%의 범위를 보였고, MF는 520 \bar{U} /m ~ 1,825 \bar{U} /m의 범위가 나타났다. 101 m ~ 105 m 심도의 석회암에서 교류 전기비저항은 27 Ω m ~ 130 Ω m의 범위를 보였다. 이 구간에서 PFE는 6% ~ 9%의 범위를 보였고, MF는 276 \bar{U} /m ~ 2,113 \bar{U} /m의 범위가 나타났다.

황철석 내지 자철석이 관찰되었던 94 m ~ 98 m 심도 구간의 휘석 스카른은 다른 구간과 비교하여 상대적으로 교류 전기비저항이 낮고, PFE와 MF가 높았다. 따라서 금속광물이 풍부한 암석의 FDIP 물성은 주변암석과 잘 구분되는 것으로 판단된다. 2번 시추공에서의 PFE와 MF는 1번 시추공의 석류석 스카른과 비교하면 전체적으로 높았다. 2번 시추공 검층구간에서 PFE와 MF가 1번 시추공의 석류석 스카른 보다 더 높은 것은 2번 시추공의 암석이 더 많은 양의 광석광물을 함유한 것으로 여겨진다.

결 론

본 연구는 스카른 광상인 제천 금성광상의 탐사 시추공에서 FDIP 검층을 수행했고, 검층결과로부터 광물탐사에서 FDIP법의 적용성을 검토했다. 검층결과 상대적으로 많은 양의 자철석 내지 황철석을 함유한 광체구간은 스카른 변질대 및 석회암 구간과 비교하면 상대적으로 교류 전기비저항이 낮았고, PFE와 MF는 높은 특징을 보였다. 점토와 같은 이질을 포함하는 하부 석회암의 PFE와 MF는 광체구간과 구분되지만 교류 전기비저항은 유사한 범위를 보였다. 전기비저항 탐사결과에 의존하여 광물탐사를 수행한다면 하부 석회암과 같이 전도성 구간을 광체로 해석하는 오류를 범하기 쉽다. 하지만 FDIP법은 양질의 전기비저항과 IP 자료를 제공하기 때문에 광물탐사에서 광체구간 해석의 신뢰도를 높이는 데 도움을 줄 수 있을 것

으로 판단된다. 지표 FDIP 탐사의 국내 적용사례가 아직 충분하지 않으므로 향후 다양한 광물탐사에서 적용하고자 한다.

감사의 글

논문의 완성도를 높일 수 있도록 충실하게 검토해주시고 건설적인 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께 진심으로 감사한 마음을 전합니다. 본 연구는 한국지질자원연구원의 재원으로 '국내 바나듐(V) 등 에너지 저장광물 정밀탐사기술개발 및 부존량 예측(GP2020-007)' 기본사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Barreto, A., and Dias, C. A., 2014, Fluid salinity, clay content, and permeability of rocks determined through complex resistivity partition fraction decomposition, *Geophysics*, **79**(5), D333-D347, doi:10.1190/geo2013-0306.1.
- Choi, S.-G., Park, J.-W., Seo, J.-E., Kim, C.-S., Shin, J.-K., Kim, N.-H., Yoo, I.-K., Lee, J.-Y., and Ahn, Y.-H., 2007, Hidden porphyry-related ore potential of the Geumseong Mo deposit and its genetic environment, *Econ. Environ. Geol.*, **40**(1), 1-14 (in Korean with English abstract).
- Dias, C. A., 2000, Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks, *Geophysics*, **65**(2), 437-451, doi:10.1190/1.1444738.
- Kim, E.-J., Shin, D., Shin, S., Nam, H.-T., and Park, S., 2015, Skarn zonation and rock physical properties of the Wondong Fe-Pb-Zn polymetallic deposit, Korea, *Geosciences Journal*, **19**(4), 587-598, doi:10.1007/s12303-015-0017-2.
- Macdonald, J. R., and Johnson, W. B., 2005, *Fundamentals of Impedance Spectroscopy*, *Impedance Spectroscopy*, John Wiley & Sons, Inc., 1-26, doi: 10.1002/9781119381860.ch1.
- Martin, T., Günther, T., Orozco, A. F., and Dahlin, T., 2020, Evaluation of spectral induced polarization field measurements in time and frequency domain, *J. Appl. Geoph.*, **180**, 104141. doi:10.1016/j.jappgeo.2020.104141.
- Pelton, W., Ward, S., Hallof, P., Sill, W., and Nelson, P., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP, *Geophysics*, **43**(3), 588-609, doi: 10.1190/1.1440839.
- Shin, S. W., Park, S., and Shin, D. B., 2016, Spectral-induced polarization characterization of rocks from the Handuk iron mine, South Korea, *Environ. Earth Sci.*, **75**(9), 827, doi: 10.1007/s12665-016-5618-1.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., 1990, *Applied geophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 770, doi: 10.1017/CBO9781139167932.