

가곡광산 연-아연 광체의 광대역유도분극 반응 특성

신승욱^{1,2} · 박삼규^{1*} · 신동복²

¹한국지질자원연구원 탐사개발연구실

²공주대학교 지질환경과학과

Spectral Induced Polarization Response Characterization of Pb-Zn Ore Bodies at the Gagok mine

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: 가곡광산은 스킨형 광상으로서 섬아연석, 방연석, 황동석, 자류철석 등의 황화광물을 수반한다. 이러한 광물은 전극분극에 의한 IP effect가 크기 때문에 광대역유도분극(spectral induced polarization; SIP)법을 이용하여 효과적으로 탐사할 수 있다. 따라서 이 연구는 황화광물 함량 및 입자의 크기를 지시하는 충전도와 시간상수를 실내 SIP 측정을 통하여 구하고 이로부터 가곡광산 내 두 광체에 대한 광화작용 차이를 비교하는데 목적을 두었다. 이를 위해 남쪽의 월곡광체와 북쪽의 선곡광체를 대상으로 시료를 채취하였다. 시료의 광화작용 특성을 파악하기 위해 휴대용 XRF 측정기를 이용하여 금속의 함량을 측정했고, 실내 암석 SIP 측정시스템을 이용하여 SIP 자료를 획득했다. XRF 측정결과 가곡광산 광체는 철, 아연, 납, 구리 등의 금속을 수반하고 있다. 특히 아연과 철의 함량이 다른 금속과 비교하여 매우 높았고, 이 두 금속은 현미경 관찰을 통하여 섬아연석과 자류철석에 의한 영향으로 판단하였다. SIP 등가회로 분석 결과, 월곡광체가 선곡광체에 비하여 금속의 함량이 더 높았기 때문에 황화광물을 더 많이 수반하는 것으로 판단했고, 이는 SIP에서 충전도의 결과와 잘 부합한다. 반면 선곡광체의 시간상수가 더 컸기 때문에 선곡광체가 월곡광체보다 황화광물 입자 크기가 더 큰 것으로 판단했다.

주요어: 광대역유도분극, 충전도, 시간상수, 등가회로 분석

Abstract: Gagok Mine, which is skarn deposits, includes sulfide minerals such as sphalerite, galena, chalcopyrite, and pyrrhotite. To explore these minerals, spectral induced polarization (SIP) is relatively effective compared to other geophysical exploration methods because there is a strong IP effect caused by electrode polarization. In the SIP, the chargeability related to sulfide mineral contents and the time constant related to the grain size of the minerals are obtained. For this reason, we aim to compare difference in the mineralized characteristics between two orebodies in the Gagok Mine by using the chargeability and the time constant. For this study, we sampled ores from the south of Wolgok orebody and the north of Sungok orebody. In order to recognize the mineralization characteristics, the metal content of the samples was measured by a portable XRF and the SIP data of the samples were acquired by using a laboratory SIP measurement system. As a result, the metals in the samples such as Pb, Zn, Cu, and Fe were detected by the portable XRF measurement. In particular, the Fe and Zn contents were far higher than the other metals. The Fe and the Zn were caused by the sphalerite and the pyrrhotite through microscopy. The Wolgok orebody had higher sulfide mineral contents than the Sungok orebody and the result corresponded with the chargeability result. However, we considered that the Sungok orebody had a larger sulfide mineral grain size than the Wolgok orebody because the time constant of the Sungok orebody was larger.

Keywords: spectral induced polarization, chargeability, time constant, equivalent circuit analysis

2014년 10월 28일 접수; 2014년 11월 12일 수정; 2014년 11월 24일 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.

서 론

가곡광산은 마그마가 석회암층을 관입하면서 형성된 스킨 광산으로서 섬아연석, 방연석, 황동석, 자류철석과 같은 황화 광물의 광체를 수반한다. 광체는 마그마에 의해 유도된 광화유체(ore-bearing fluid)가 단층이나 층리와 같은 틈을 통해 압력이 낮은 상부로 이동하면서 온도가 떨어져 광석광물이 정출되는 광화작용 때문에 형성된다(Meinert *et al.*, 2005). 광화작용은 마그마의 구성성분에 따라 달라지고(Fornadel *et al.*, 2011; Yücel-öztürk *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2014b), 시공간적인 차이에 따른 광화유체의 열수시스템에 의해 달라진다(Baker *et al.*, 2004; Landtwing *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2014a). 광화작용의 특성을 파악하기 위해서는 현미경 관찰 및 지화학 자료 분석과 같은 광물학적인 연구가 수행된다. 이러한 연구 방법은 큰 규모의 광산에 대한 조사를 수행하기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요하다.

이와 달리 지구물리탐사는 넓은 지역을 효율적으로 조사할 수 있는 연구방법이다. 특히 가곡광산과 같이 다량의 황화광물을 수반하는 광체는 SIP 탐사를 통하여 효과적으로 조사할 수 있다(Bishop and Emerson, 1999). SIP 탐사는 광석광물의 함량을 추정하는 충전도와 입자 크기를 추정하는 시간상수를 제공하기 때문에 광화작용의 특성을 파악하는데 유용할 것으로 판단된다. 따라서 이 연구는 가곡광산 내 광화작용 특성이 서로 다른 두 광체를 대상으로 SIP를 이용하여 광화작용 특성을 비교하기 위한 목적으로 수행되었다. 시료는 북쪽의 선곡광체

와 남쪽의 월곡광체를 대상으로 채취하였다. 광화작용 특성은 휴대용 XRF 측정과 반사현미경 관찰을 통하여 파악했고, SIP 물성은 실내 SIP 측정과 등가회로 분석을 통해 얻었다.

지 질

가곡 광산은 휴광 이전까지 제 2 연화 광산의 상호로 개발되었고, 1971년 개업한 이후 1979년까지 총 591,351 metric tone의 광석을 생산했다(Yun, 1979). 소재지는 행정구역상 강원도 삼척시 가곡면 풍곡리이고, 다양한 광상이 발달하고 있는 태백산 분지의 남동부에 위치한다.

가곡광산의 지질은 최하부에 원생대의 화강암체가 기반암으로 존재하고, 그 위를 고생대 조선누층군이 부정합으로 덮고 있다(Fig. 1). 이 조선누층군은 지역에 따라 영월형, 태백형, 정선형, 문경형, 평창형과 같이 5개의 그룹으로 세분된다(Chough *et al.*, 2000). 가곡광산의 조선누층군은 태백형이고, 묘봉층, 풍촌층, 화절층, 동점층, 두무동층의 층서를 이루고 있다. 이 지층을 중생대 석영문조니반암이 NS 방향으로 관입하는 지질 특성을 보인다(Yun and Silberman, 1979).

석회암은 묘봉층의 M2층과 풍촌층의 P1층에 풍부하며, 이 지층과 관계화성암이 접하는 곳에 스킨화가 발달하였다. 스킨은 Ca 계열의 헤덴버자이트와 같은 휘석류가 우세하고, 광화작용으로 선곡광체, 월곡광체, 금곡광체를 형성하였다(Yun and Einaudi, 1982).

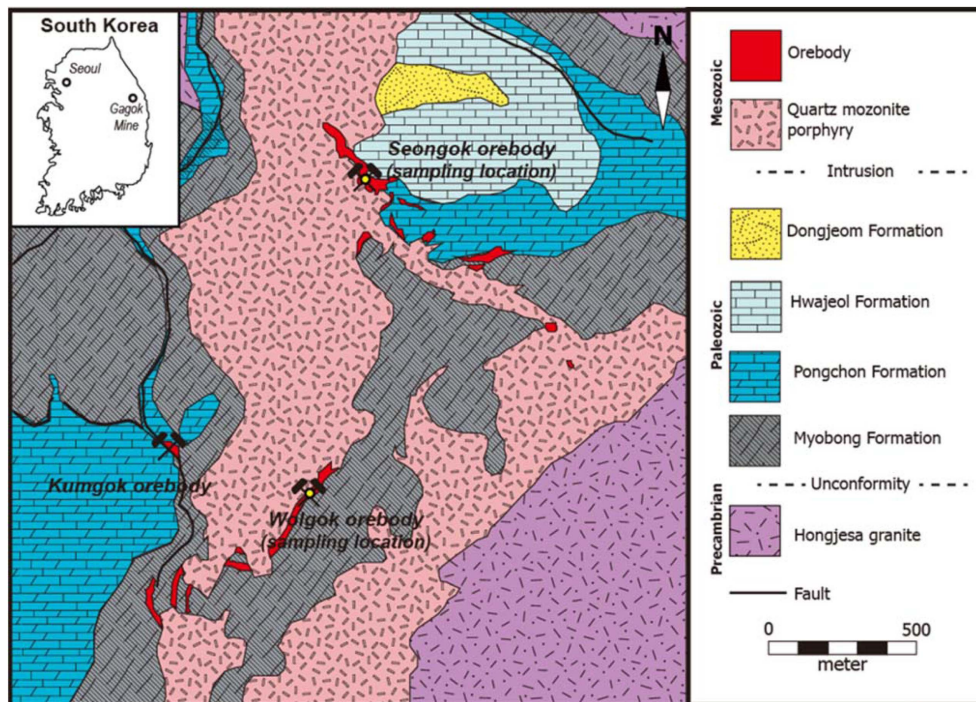


Fig. 1. Geological map of the Gagok mine area (after Yun and Einaudi, 1982).

연구방법

시료의 광화작용 특성을 파악하기 위해 북쪽의 선곡광체와 남쪽의 월곡광체를 대상으로 총 104개를 채취했고, 물성측정을 위해 원통형으로 코어링 했다. 육안관찰을 통하여 시료들 중에서 다량의 광석광물이 관찰되는 25개를 선별하였다.

광화작용 특성을 파악하기 위하여 휴대용 XRF기기인 NITON Analyzer (Thermo Co.)를 사용하여 시료에 수반된 금속성분을 측정하였고, 시료의 위면, 아래면, 옆면에 대하여 6 지점을 측정했다. Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Mo, Nb, Zr, Sr, Rb, Bi, As, Se, Pb, W, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti 등 총 24 종류의 금속성분을 검출하였다. 그리고 일부 시료를 연마편으로 제작하여 반사현미경 관찰을 통해 수반되는 광석광물의 종류를 파악하였다.

SIP 자료 획득을 위하여 시료를 지하수와 전기전도도가 유사한 NaCl 0.001 M 수용액을 채운 데시케이터에 넣어 진공펌프를 사용하여 포화시켰다(ISRM, 1979). 포화된 시료는 내부에 수분이 마르지 않도록 젖은 수건으로 표면의 물기를 제거하였고, 시료에 암석의 전기적 물성을 안정적으로 얻을 수 있는 것으로 알려진 Park and Matsui (1998)의 측정홀더 및 전극 방법을 이용하였다(Fig. 2).

전극과 측정기기를 연결하고, 시료의 SIP를 측정하였다. SIP 측정기기는 Zonge 사의 탐사 장비를 사용하였으며, 송신부(LDT-10B)와 수신부(GDP-32II)로 구성된다. 측정은 0.125 ~ 1024 Hz의 주파수 대역에서 수행하였고, 이때 송신 전류는 포화하지 않는 범위 내에서 최대로 인가하였다.

획득한 측정자료로부터 SIP 물성을 계산하기 위하여 등가회로 분석을 수행하였다. 등가회로 분석은 암석의 SIP 특성을 설명하기 위하여 SIP 반응을 일으키는 암석을 저항과 축전기와 같은 전기성분이 연결된 등가회로 모델로 가정하고, 수학적인 역산 및 모델링을 통해 전기성분들의 값을 분석하는 기술이다. 분석으로부터 얻은 전기성분들의 값을 이용하여 충전도나 시간상수와 같은 SIP 물성을 계산할 수 있다. 이 연구에서 등가

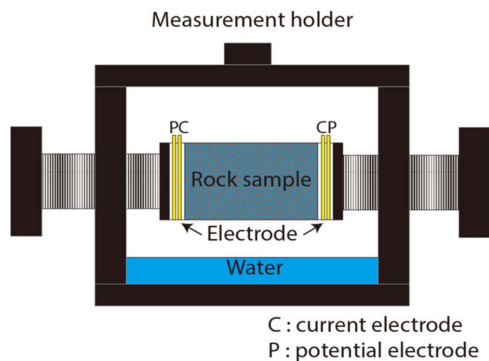


Fig. 2. Schematic view of a sample installed in electrodes and measurement holder.

회로 분석은 상용화된 프로그램인 Z-view (Solatron Co.)를 이용하여 수행하였다.

광석의 등가회로 분석에서 기존에 알려진 모델을 사용할 경우 분석 오차가 커서 부적합하다고 판단하였다. 따라서 이 연구를 위해 새로운 광석 모델을 가정하였고, 이 모델을 사용하여 등가회로 분석을 수행하였다.

등가회로 모델

암석의 SIP 반응을 설명하기 위한 다양한 등가회로 모델이 존재한다(Dias, 2000). 암석의 SIP 반응은 광물입자와 전해질 계면에서의 전기이중층에 의하여 발생하는 것으로 알려졌으며, 전기이중층은 확산이중층과 조밀이중층으로 이루어진다(Nguyen and Amiri, 2014). 이러한 두 전기이중층의 SIP 반응을 설명하기 위해 물질의 전기적 성질이 균질한 경우 축전기와 Warburg impedance를 일반적으로 사용한다. Dias model (Dias, 1972)은 이 두 전기성분을 사용함으로써 모든 구성광물이 전기적으로 유전체인 일반 암석의 전기이중층을 적절하게 설명한다.

하지만 광석은 도체에 가까운 광석광물과 유전체의 맥석광물이 혼재되어 전기적으로 불균질하므로 Dias model을 적용하기에는 부적합하다. 이러면 Cole-Cole model (Pelton *et al.*, 1978)에 적용된 Constant phase element (CPE)를 이용하는 것이 바람직하다(Katz and Willner, 2003). 그러나 Cole-Cole model은 단지 하나의 CPE를 사용하기 때문에 확산이중층과 조밀이중층을 동시에 설명하기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 광석의 전기이중층 특성을 고려한 새로운 등가회로 모델을 고안하였다(Fig. 3).

R1-CPE1 병렬회로는 조밀이중층에 의해 발생하는 전기이중층의 효과를 나타내며, R2-CPE2는 확산이중층에 의해 발생하는 전기이중층을 나타낸다. 조밀이중층은 높은 주파수 대역의 SIP 반응에 영향을 주며, 임계주파수는 10⁶ Hz 이상의 고주파수이다(Barreto and Dias, 2013). 1kHz 이상의 주파수는 SIP 대역이 아니므로 SIP 물성 계산을 할 때 조밀이중층의 SIP 반응을 일으키는 CPE1 성분을 제외하고 물성을 계산해야 한다. SIP 물성인 충전도와 시간상수의 계산은 아래의 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

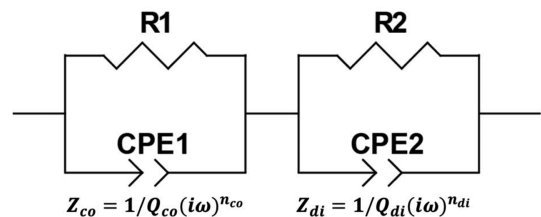


Fig. 3. New equivalent circuit model for analysis of SIP response of ore samples.

$$m = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$\tau = \left(\frac{R_2}{Q_{di}} \right)^{1/n_{di}} \quad (2)$$

이 식에서 m 은 충전도 (mV/V), ρ_0 는 0 Hz의 전기비저항 (ohm-m), ρ_∞ 는 ∞ Hz의 전기비저항(ohm-m), R_1 , R_2 은 두 이 중층의 전기비저항(ohm-m), τ 는 시간상수(sec), Q_{di} 는 확산이 중층에 의한 CPE2의 전기용량(F), n_{di} 는 CPE2의 지수항이다.

새로운 등가회로 모델을 사용한 분석결과의 정확도를 파악하기 위하여 측정자료와 분석결과 사이의 오차는 Normalized root mean square (NRMSE)를 사용하여 제시하였다(Niranjan, 2004). NRMSE를 계산하는 방법은 아래의 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i) - f_a(x_i, y_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i)]^2}} \times 100 \quad (3)$$

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.

결 과

시료의 XRF를 측정된 결과 금속성분 대부분은 검출한계 미만이거나 함량이 매우 적었지만, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn은 다른 금속과 비교하여 상대적으로 함량이 많았다. 이 금속들의 함량을 표로 도시하였고(Table 1), 합으로 나타내면 11.7 ~ 41.1

Table 1. Results of portable XRF measurement of samples.

No.	Elevation (m)	Pb	Zn	Cu	Fe
S1	160	0.0323	1.7155	0.0438	11.6005
S2	160	0.9180	7.9527	0.0907	28.1008
S3	220	1.8927	7.4860	0.1098	26.7707
S4	220	0.5633	8.0508	0.0947	18.6057
S5	280	0.0130	5.6742	0.0443	17.6412
S6	280	0.0688	2.5717	0.0310	13.9460
S7	280	0.0135	3.8020	0.2568	11.0040
S8	280	0.0480	4.7242	0.1520	9.3963
S9	280	0.0113	11.7435	0.1233	14.5072
S10	280	0.0160	19.8902	0.4033	19.9823
S11	400	3.8047	12.1103	1.6152	12.9433
S12	400	0.1467	2.8580	0.0378	8.8560
S13	400	0.0070	9.5703	0.8867	15.6077
W1	280	0.0212	8.3620	0.1023	12.7768
W2	280	0.0032	4.1533	0.1002	16.7987
W3	340	0.0012	13.2393	0.0533	17.2230
W4	340	2.2468	11.5012	0.2230	13.8007
W5	340	2.4783	5.5503	0.1135	28.0050
W6	460	0.0042	1.3645	0.0552	15.8857
W7	460	0.0053	6.9805	0.3185	26.6363
W8	460	0.0088	0.0053	0.0158	11.4858
W9	460	0.0092	0.0593	0.3495	35.2505
W10	520	0.0443	7.6063	0.1533	18.5678
W11	520	3.9265	7.7638	0.0143	28.7647
W12	520	0.1133	0.0483	0.0137	30.5785

w% 범위로 상당히 많은 금속을 수반하는 것으로 판단되었다. 금속 중 Fe가 가장 우세하고, 그 다음으로 Zn과 Mn이 많은 양을 차지했다. 하지만 Pb와 Cu는 다른 금속과 비교하여 상대적으로 양이 적었다.

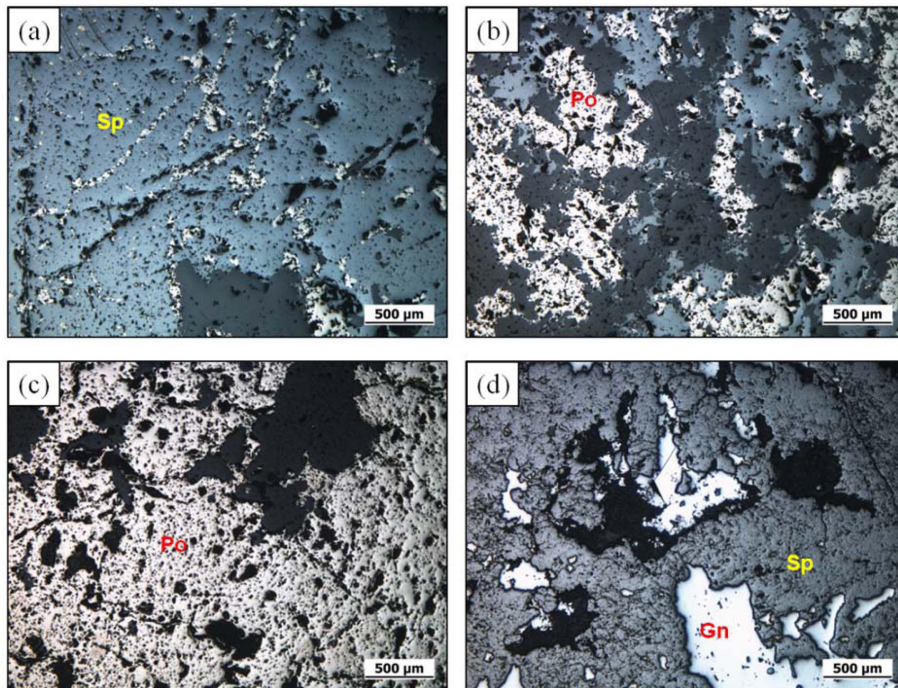


Fig. 4. Photomicrograph of samples from Sungok (a and b) and Wolgok (c and d) orebodies. (Sp: sphalerite, Po: pyrrhotite, Gn: galena).

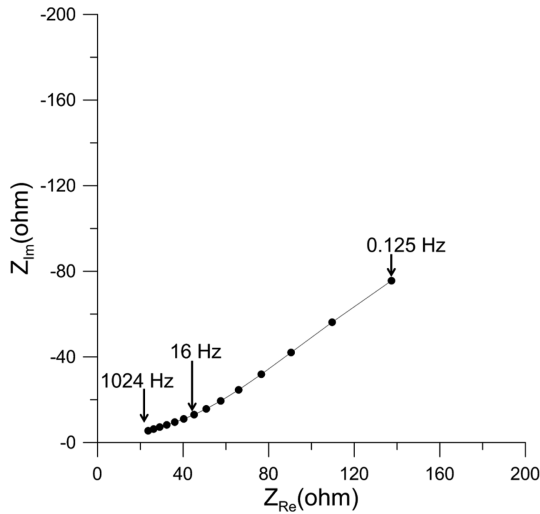


Fig. 5. Nyquist plot of the SIP response of an ore sample (No. S3).

일부 시료에 대한 반사 현미경 관찰을 수행하였다(Fig. 4). 그 결과 괴상의 섬아연석이 관찰되었고(Fig. 4a, d), 그리고 괴상의 자류철석이 관찰되었다(Fig. 4b, c). 따라서 광체에 수반된 아연과 철 성분은 섬아연석과 자류철석에 의한 영향으로 판단하였다.

시료의 SIP 측정자료는 Nyquist 그래프로 도시하여 SIP 특성을 파악하였다. 그래프에서 허수성분의 임피던스는 낮은 주파수에 크고, 주파수가 높아질수록 작아지는데 이는 전극분극에 의해 나타나는 IP effect의 특성을 잘 나타내는 것이다(Fig. 5). 모든 광석이 이와 유사한 궤적 형태를 나타냈다.

시료의 SIP자료로부터 충전도와 시간상수를 계산하기 위해 등가회로 분석을 수행하였고, 그 결과를 표로 정리하였다(Table 2). 분석의 NRMSE는 6% 보다 작기 때문에 분석이 상당히 잘 수행되었다고 판단된다. 모든 시료의 충전도는 900 mV/V 이상의 큰 값이 계산되었고, 시간상수는 1초 이상이었다. 이는 시료가 광석광물을 다량으로 수반한다는 것을 고려했기 때문에 받아들여질 만한 값이었다.

선곡광체와 월곡광체의 광화작용 특성과 SIP 물성을 서로 비교하기 위하여 XRF에서 Pb, Zn, Cu, Fe의 함량을 합한 것

Table 2. SIP parameters and normalized root mean square errors of samples determined by equivalent circuit analysis.

No.	Elevation (m)	Chargeability (mV/V)	Time constant (sec)	NRMSE (%)
S1	160	997.3145	1.1271E+02	1.3432
S2	160	997.9496	1.4705E+02	2.5737
S3	220	993.8655	1.7660E+04	1.7013
S4	220	999.7630	5.7689E+04	2.7914
S5	280	994.4541	2.8020E+00	5.2958
S6	280	994.4674	5.9166E+00	0.9567
S7	280	987.0163	8.0140E+00	1.0022
S8	280	996.4325	1.9644E+03	2.0389
S9	280	991.5413	3.9090E+03	1.0115
S10	280	996.6917	5.9527E+01	3.7864
S11	400	995.0906	3.0680E+00	1.2033
S12	400	995.5344	1.1117E+01	1.6283
S13	400	991.1128	1.4757E+01	0.4374
W1	280	996.8993	3.4986E+02	1.4297
W2	280	997.6960	9.4039E+01	3.0859
W3	340	908.7627	3.7851E+00	1.7915
W4	340	993.7499	2.2115E+01	1.2638
W5	340	998.8025	3.3372E+01	2.4219
W6	460	999.4376	2.9595E+02	4.8547
W7	460	999.6579	1.3222E+03	2.1687
W8	460	999.5785	3.9259E+02	2.7118
W9	460	997.4621	3.6129E+01	4.5433
W10	520	995.9007	6.8047E+00	0.5015
W11	520	990.3952	4.2436E+00	3.5034
W12	520	989.8311	5.9217E+00	3.1266

과 SIP에서 충전도와 시간상수에 대한 중간 값을 그래프로 도시하였다(Fig. 6). 대표 값으로 중간 값을 사용한 것은 산술평균의 경우 최대값이나 최소값에 왜곡되어 계산될 수 있기 때문이다. 그 결과 월곡광체는 선곡광체와 비교하여 금속함량이 높았고, 충전도가 더 크기 때문에 이 두 결과는 상당히 잘 부합하였다. 하지만 시간상수는 선곡광체가 오히려 월곡광체보다 더 높았고, 이는 선곡광체에 수반된 황화광물의 입자 크기가 월곡광체보다 더 크다는 것을 의미한다.

결론

공간적 구배에 의해 광화작용의 특성이 다른 두 광체를 대

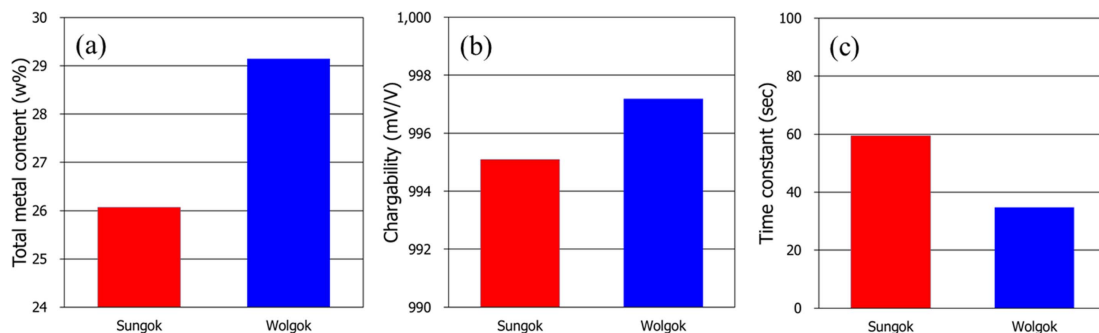


Fig. 6. Bar plot of the Sungok and Wogok orebodies related to the total metal content (a), chargeability (b), and time constant (c).

상으로 이 차이를 SIP 물성으로 파악하기 위하여 연구를 수행하였다. 시료는 가곡광산에서 공간적 구배가 있는 선곡광체와 월곡광체를 대상으로 채취했다. 휴대용 XRF를 이용하여 금속 성분의 함량을 측정하였고, 실내 암석 SIP 측정시스템을 이용하여 측정자료를 얻었다.

XRF 측정 결과 시료는 아연과 철이 다른 금속보다 우세하였고, 이는 반사현미경 관찰에서 석아연석과 자류철석의 영향으로 판단하였다. 이러한 황화광물의 영향으로 SIP에서 충전도는 매우 큰 값으로 분석되었고, 시간상수는 1초 이상이었다.

월곡광체는 선곡광체와 비교하여 XRF 결과로부터 광화작용이 더 발달한 것으로 판단되었고, 이러한 영향으로 충전도 또한 더 큰 값을 보이는 것으로 판단하였다. 하지만 시간상수의 결과로부터 광석광물의 입자의 크기는 선곡광체가 월곡광체에 비하여 상대적으로 더 큰 것으로 판단하였다.

감사의 글

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

References

- Baker, T., Van Achterberg, E., Ryan, C. G., and Lang, J. R., 2004, Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit, *Geology*, **32**(2), 117-120.
- Barreto, A., and Dias, C., 2013, Complex resistivity decomposition of the Dias's model in partition fractions applied to electrolyte salinity, clay content and hydraulic permeability determination, 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, 26-29 August 2013, 1095-1104.
- Bishop, J. R., and Emerson, D. W., 1999, Geophysical properties of zinc-bearing deposits, *Australian Journal of Earth Sciences*, **46**(3), 311-328.
- Chough, S. K., Kwon, S. T., Ree, J. H., and Choi, D. K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view, *Earth-Science Reviews*, **52**(1-3), 175-235.
- 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.
- Fornadel, A. P., Spry, P. G., Melfos, V., Vavelidis, M., and Voudouris, P. C., 2011, Is the Palea Kavala Bi-Te-Pb-Sb±Au district, northeastern Greece, an intrusion-related system?, *Ore Geology Reviews*, **39**(3), 119-133.
- ISRM, 1979, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. 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.
- 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.
- Landtwing, M. R., Pettke, T., Halter, W. E., Heinrich, C. A., Redmond, P. B., Einaudi, M. T., and Kunze, K., 2005, Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: The Bingham porphyry, *Earth and Planetary Science Letters*, **235**(1-2), 229-243.
- Meinert, L., Dipple, G., and Nicolescu, S., 2005, World skarn deposits, *Economic Geology*, **100**, 299-336.
- 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.
- Yücel-öztürk, Y., Helvacı, C., and Satır, M., 2005, Genetic Relations Between Skarn Mineralization and Petrogenesis of the Evciler Granitoid, Kazdağ, Çanakkale, Turkey and Comparison with World Skarn Granitoids, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **14**(3), 255-280.
- Yun, S., 1979, Structural and compositional characteristics of skarn zinc-lead deposits in the Yeonhwa-Ulchin mining district, southeastern Taebaegsan region, Korea: Part II. The Yeonhwa II mine, *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, **12**(3), 147-176.
- Yun, S., and Einaudi, M. T., 1982, Zinc-lead skarns of the Yeonhwa-Ulchin District, South Korea, *Economic Geology*, **77**(4), 1013-1032.
- Yun, S., and Silberman, M. L., 1979, K-Ar Geochronology of Igneous Rocks in the Yeonhwa-Ulchin Zinc-Lead District and Southern Margin of the Taebaegsan Basin, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, **15**(1), 89-100.
- Zhao, J., Qin, K., Li, G., Cao, M., Evans, N. J., McInnes, B. I. A., Li, J., Xiao, B., and Chen, L., 2014a, The exhumation history of collision-related mineralizing systems in Tibet: Insights from the thermal study of the Sharang and Yaguila deposits, central Lhasa, *Ore Geology Reviews*. (in press)
- Zhao, X., Yang, Z., Zheng, Y., Liu, Y., Tian, S., and Fu, Q., 2014b, Geology and genesis of the post-collisional porphyry-skarn deposit at Bangpu, Tibet, *Ore Geology Reviews*. (in press)