가곡 스카른광상 암석의 물리적 특성

신승욱^{1,2} · 박삼규^{1*} · 김형래²

¹한국지질자원연구원 자원탐사개발연구실

²공주대학교 지질환경과학과

Physical Properties of Rocks at the Gagok Skarn Deposit

Seungwook Shin^{1,2}, Samgyu Park^{1*}, and Hyoung-Rae Kim²

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

²Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

요약: 물리탐사는 금속광상에서 광화대를 탐사하는데 효율적인 방법으로 국내·외에서 전략광물자원을 개발하기 위하여 널리 이용되고 있다. 물리탐사 결과로부터 광화대를 정확하게 해석하기 위하여 암석의 물리적 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이 연구는 국내 대표적 스카른 광상인 가곡광산의 광석 및 모암을 대상으로 실내에서 다양한 물성을 측정하였으며, 그 결과로부터 가곡 스카른 광상을 구성하는 지층의 물리적 특성을 파악하고자 하였다. 암석시료는 시추코어 및 노두에서 채취하였으며, 시료의 물성은 실내 암석물성 측정시스템을 이용하여 밀도, 대자율, 전기비저항, 광대역 유도분극을 측정하였다. 그 결과 광석은 모암에 비하여 낮은 전기비저항과 높은 대자율 및 밀도를 보였으며, 광대역 유도분극에서 큰 위상과 특정한 임계주파수가 나타났다. 광석의 광대역 유도분극 측정 자료를 Cole-Cole 역산을 통하여 얻은 충전성과 시간상수로부터 황화광물의 함량과 입자의 크기를 추정할 수 있어 스카른 광상 탐사에서 유용할 것으로 기대된다.

주요어: 스카른 광상, 암석물성, 전기비저항, 광대역유도분극

Abstract: Geophysical exploration is widely used to develop strategic mineral resources in the world because of its efficient method in detecting mineralized zones in the metallic ore deposit. It is important to understand the physical properties of the stratum so that geophysical data can be more accurately interpreted. This paper is to comprehend physical properties of the rock at the Gagok mine, a typical skarn deposit in Korea. Thus, laboratory tests were conducted on specimens of ore and host rocks which were collected from rock outcrops and drill cores at the Gagok mine. Using the measurement system of rock physical property, we investigated the density, magnetic susceptibility, resistivity, and spectral induced polarization. According to the results, all physical properties of specimens had wide differences depending on contents of ore minerals, which are formed by skarnization. Especially, using the chargeability and time constant from the calculated spectral induced polarization data by the Cole-Cole inversion, we could estimate the volume contents as well as the grain size of the sulfide minerals. Therefore, the spectral induced polarization technique may be considered a useful method when exploring metallic ore deposit with sulfide minerals.

Keywords: skarn deposit, rock physical properties, resistivity, spectral induced polarization

서론

우리나라는 자원 다소비형 국가로써 2002년 이후 중국, 브

라질, 인도 등 브릭스(BRICs) 국가 및 개발도상국의 급속한 경제발전에 따른 광물자원 수요증가와 원자재 가격폭등에 따라 전략광물자원의 안정적인 확보를 위하여 국내·외 광상탐사에 필요한 자원탐사 기술 고도화에 노력하고 있다. 광산 개발의 초기 계획단계에서 광화대를 효율적으로 찾기 위하여 다양한 물리탐사 방법이 이용되고 있으며, 물리탐사 결과로부터 얻은 전기비저항, 충전율, 자화율 및 밀도와 같은 물리량의 차이로 지하구조를 파악하여 광화대를 해석하고 있다. 이러한 지층의 물리적 특성을 파악하기 위하여 현장에서 채취한 암석시료를 이용하여 실내에서 물성을 측정하고 있으며, 많은 연구사례가 축적되어 있다.

2013년 5월 20일 접수; 2013년 8월 21일 수정; 2013년 8월 23일 채택

*Corresponding author

E-mail: samgyu@kigam.re.kr

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

©2013, 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.

선행연구로 Kim and Choi (1999)은 코어시료를 이용하여 여러 가지 전기비저항 측정 방법을 비교 실험하여 전기비저항의 대표치를 결정하기 위한 최적 방법을 제안하였다. Lee and Lee (2009)은 시멘트로 제작한 시료를 물로 포화시키고, 시료의 함수율에 따른 전기비저항 변화를 파악하였다. 그리고 표준화된 측정공정을 제안하여 측정에서 발생하는 오차를 줄이도록 하였다. Park (2004)는 지반의 전기비저항에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 암석시료에 다양한 전기전도도를 가진 물로 포화시켜 전기비저항 변화를 측정하였다. 그 결과 일부 다공질 사암을 제외한 대부분의 암석시료는 Archie (1942)의 경험식보다 Patnode and Wyllie (1950)의 경험식을 적용하는 것이 바람직하다는 사실을 입증하였다. Park (2005)은 점토 광물의 함량에 따른 전기비저항 변화를 파악하기 위하여 공업용 한천과 두 종류의 점토광물로 만든 인공 시료의 전기비저항을 측정하였다. 점토광물의 함량이 높을수록 전기비저항은 낮았으며, 이러한 관계를 이용하여 상관관계식을 유도하였다. Sung (2010)은 국내 암석물성 데이터베이스를 구축하기 위해 국내 여러 지역에서 산출되는 암석에 대한 다양한 물성을 측정하였고, Glass beads와 황화금속 광물을 배합한 인공 시료의 광대역 유도분극을 측정한 결과로부터 통계적 기법을 적용하여 광석의 품위평가에 이용하고자 하였다.

국외의 경우 체계적인 표준 암석 물성 실험법이 제안됨으로써(Franklin, 1979), 신뢰성 있는 자료의 획득이 가능하다. 이를 바탕으로 물성 변화로부터 풍화작용 정도, 공극의 형태 및 열수 변성작용 정도를 파악하는 연구에 이용되었다(Petersson and Eliasson, 1997; Papida *et al.*, 2000; Sardini *et al.*, 2006; Pola *et al.*, 2012). 또한 광장에서 산출되는 다양한 암석의 광물조성 차이를 이해하는데 이용되었다(Emerson, 1986; Bishop and Emerson, 1999).

기존의 국내 암석 물성 연구는 아직까지 측정 방법의 표준화와 물성에 영향을 주는 요인을 이해하는데 초점을 두고 있어 동일 암석에 대한 물성 사이의 상관성 및 특성을 파악하기에는 미흡하다. 또한 탐광조사에 활용되고 있는 다양한 물리탐사 결과를 해석하기 위한 암석의 물성 측정 및 해석 방법에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이 연구는 스카른 광상의 가곡광산을 대상으로 시추코어 및 노두로부터 광석과 모암 시료를 채취하고, 실내에서 전기비저항을 비롯한 다양한 물성을 측정하여 광석 및 모암별 물성치의 분포 범위 및 특성을 파악하여 스카른 광상의 광화대 물리탐사 결과를 해석하는데 기초적 자료로 활용하고자 한다.

연구지역 개요

지질 및 광상

연구지역인 가곡광산(구 제2연화광산)은 행정구역상 강원도 삼척시 가곡면 풍곡리에 해당하며, 현재는 휴광 중인 광산이

Fig. 1. Geological map of the Gagok mine area.

다. 그러나 1971년부터 1978년까지 597,351 톤의 광석을 생산한 실적이 있으며, 평균 품위는 Pb가 3.9%, Zn이 0.2%, Cu가 0.1%를 기록하였다. 국내에서 두 번째로 큰 규모의 연-아연 광산이었다(Yun and Einaudi, 1982).

삼척 일대는 EW 방향의 향사축을 갖는 함백향사가 발달되어 있으며, 대체적으로 NS 계의 스러스트 단층에 의해 서쪽 상반이 상승하고 동쪽 하반이 하강한 지질구조를 보인다(KORES, 1981). 가곡광산의 경우 NS계 스러스트 단층이 우세하게 분포하고 있으며(Fig. 1), 단층의 방향으로 화성암이 관입하고 있는 특징을 보인다(Yun and Einaudi, 1982). 가곡광산 지질은 기반암으로 K-Ar 연령이 730 ± 22 Ma에 해당하는 선캄브리아기의 홍제사 화강암이 존재하고, 그 위를 고생대 캄브리아기-오르도비스기의 조선누층군이 묘봉층-풍촌층-화철층-동점층의 순서로 덮여 있다(Fig. 1). 이 지층들은 K-Ar 연령이 72.6 ± 2.2 Ma에 해당하는 중생대 백악기 말의 석영 몬조니 반암에 의해 관입 당하였다(Yun and Silberman, 1978; Choi *et al.*, 2010).

광상은 탄산염암을 관입한 화성암의 접촉부에서 형성된 스카른 광상 유형에 해당한다. 관입 접촉부에는 스카른에 의해 석류석, 헤넬버자이트, 투휘석, 투각섬석, 각섬석, 녹섬석, 규회석 등의 석회-규산염 광물이 배태되어 있다. 또한 열수의 광화작용에 의하여 부분적으로 섬아연석, 방연석, 황동석, 자철석, 자류철석, 황철석 등의 황화금속 광물이 층상내지 판상으로 배태되어 있으며, 내성스카른에 비해 외성스카른에 발달되어 있다. 또한 관계화성암이 광체에 가까운 곳에 배태하고 있는 근지성 유형에 해당한다(Yun and Einaudi, 1982; Choi *et al.*, 2009).

시료 채취

지질도에 표시된 12개 시추공(Fig. 1)의 시추코어에서 184개의 다양한 암석시료를 채취하였으며, 추가적으로 광산 입구에 있는 3곳의 노두에서 6개의 홍제사 화강암을 채취하였다. 지층별로 시료의 수량을 Table 1에 나타냈다. 특히 스카른을 받은 암석 중에서 육안으로 섬아연석, 방연석, 황동석, 자류철석

Table 1. Rock specimens obtained from the Gagok mine area.

Rock	Number of specimen (EA)
Ore	38
Skarn	76
Limestone	10
Slate	21
Felsite	5
Granite porphyry	12
Granite	20
pegmatite	8

및 황철석과 같은 황화금속 광물이 다량으로 관찰되는 시료를 광석으로 나타냈다.

채취한 암석시료는 물성측정을 위하여 원통형으로 성형하였으며, 시추코어는 양 단면을 평행하게 절단하였다. 그리고 노두에서 채취한 암석은 실내에서 코어링 과정을 통하여 원통형으로 성형하였다.

암석 물성 측정 시스템

밀도 측정

암석의 기본적 물성인 밀도는 부력법을 이용한 수포화 밀도로서, 진공펌프로 포화시킨 시료에 대해 수중 및 공기 중에서 측정된 무게를 이용하여 (1)과 (2)식으로 계산하였다(Franklin, 1979). 이때 정확한 밀도 계산을 위해서 시료의 공극을 채우는 물의 비중이 동일해야 하기 때문에 탈이온수와 NaCl을 일정한 몰농도(0.001 M)로 혼합한 염수를 이용하였다.

포화방법은 염수와 시료를 각각 다른 데시케이터에 넣고 진공펌프로 일정시간 감압시켜 염수와 시료 속에 들어 있는 공기를 제거시켰다. 이 염수를 시료가 담긴 데시케이터로 옮겨 48시간 이상 다시 감압시켜 시료의 공극을 염수로 채웠다. 데시케이트를 흔들어 기포가 발생하지 않으면 완전히 포화된 것으로 여겼다.

수중에서 시료의 무게는 소수점 둘째 자리까지 측정할 수 있는 전자저울 아래에 줄을 연결하고 그 줄에 시료를 매달아 물을 채운 용기 안에서 측정하였고, 공기 중에서 시료의 무게는 표면의 물기를 닦은 수건으로 닦은 다음 전자저울로 측정하였다.

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \approx M_{sat} - M_{sub} \quad (\because \rho_w = 1 \text{ g/cm}^3) \quad (1)$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{V} \approx \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_{sub}} \quad (2)$$

여기서, V 는 시료의 겉보기 부피(cm^3), M_{sat} 는 포화된 시료의 질량(g), M_{sub} 는 포화된 시료를 수중에서 측정된 질량(g), ρ_w 는 물의 밀도(g/cm^3) ρ_{sat} 는 포화된 시료의 밀도(g/cm^3)이다.

대자율 측정

암석의 자화정도 차이를 나타내는 대자율은 MS-2(Barington Co.) 측정기를 사용하였다. 정확한 측정을 위하여 공기 중에서 대자율이 $\pm 1 \times 10^{-5}$ SI로 안정되도록 일정시간 동안 예열을 통하여 교정하였다.

암석시료가 이방성일 경우 측정 방향에 따라 차이가 발생할 수 있기 때문에 일반적으로 시료를 분쇄하여 분말상태에서 대자율을 측정한다. 그러나 이 연구에서는 같은 시료에 대해서 여러 가지 물성을 측정하기 때문에 시료를 보존해야 한다. 따라서 원통형 시료의 대자율은 윗면과 아랫면에 센서를 직접 접촉해서 측정하는 방법을 선택하였다.

측정기 제작사(Barington Co.)에서 제공하는 표준시료를 분말 상태로 측정한 대자율보다 분말 시료를 직육면체 용기에 넣고 양 단면에서 측정한 대자율이 작았으며, 실험으로 얻은 보정계수는 1.28이었다. 따라서 원통형 시료에서 측정한 대자율 값에 1.28을 곱하여 분말 시료에서 측정한 값으로 보정하였다.

전기비저항 측정

암석의 전기 전도성 차이를 나타내는 전기비저항은 아크릴 소재로 만든 직육면체의 홀더에서 포화된 시료를 고정시켜 정전류 방식의 Handy Viewer MINI-OHM(OYO Co.) 측정기로 측정하였다.

측정을 위하여 암석시료는 밀도 실험에서 동일한 방법으로 포화시켰다. 그리고 포화된 시료는 젖은 수건으로 표면의 물기만 닦고 시료 홀더에 고정시켰다. 이때 시료표면이 건조될수록 전기비저항이 증가하기 때문에(Kim and Choi, 1999) 이를 막기 위하여 시료홀더의 바닥에 물을 붓고 뚜껑을 덮어, 포화상태를 유지하였다(Park, 2004).

전극방식은 GS식 4극법을 응용한 방법으로써, 전극과 시료 사이에 시료의 공극을 채운 염수보다 농도가 100배 높은 염수(NaCl 0.1M)를 적신 거름종이(Filter paper)를 삽입하여 시료와 전극의 접촉면에서 발생하는 과전압 현상(Madden, 1961)을 줄였다(Park, 2004).

광대역 유도분극 측정

암석의 전기 용량성 차이를 나타내는 광대역 유도분극은 지하에 교류전류를 흘려보내면 점토, 황화금속 광물 등 분극현상을 발생시키는 물질에 의해 위상과 임피던스의 변화를 측정하는 방법이다.

광대역 유도분극의 실내 암석 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 송신기, 수신기, Decade resistance box 및 시료홀더로 구성되어 있다. 송신기는 전원의 방식에 따라 정전압 전원의 ZT-30(Zonge Co.)과 정전류 전원의 LDT-10B(Zonge Co.)로 구분되며, 시료의 저항에 따라 선택적으로 사용하였다. 수신기는 광대역 유도분극, 시간영역 유도분극, 전기비저항, TEM,

Fig. 2. Spectral induced polarization measurement system.

CSAMT와 같은 여러 종류의 탐사가 가능한 GDP-32 (Zonge Co.)를 사용하였다. Decade resistance box는 수신기에서 송신 전류를 모니터링하기 위한 분로저항기(shunt resistor)로, 10진 저항의 스위치로 되어 있다. 시료홀더와 전극은 전기비저항 측정시스템과 같은 장치를 사용하였으며, 모든 실험장치의 설치가 끝나면 포화된 암석시료를 측정하였다.

측정시스템의 검증을 위하여 유도분극 효과가 없는 전기저항을 측정하였다. 그러나 측정결과 주파수가 10 Hz 보다 큰 주파수 영역에서 유도분극 효과를 나타내는 위상이 관찰되었으며, 주파수가 커질수록 반응이 커졌다. 이 현상을 송수신전선 사이에서 발생하는 유도성 결합(inductive coupling)에 의한 잡음(Hallof, 1974; Wynn and Zonge, 1975)이 원인일 것으로 판단하였다. 측정에서 잡음을 줄이기 위하여 송신전선과 수신전선 사이의 거리를 이격시키고, 전선의 길이를 최대한 짧게 설치하였다.

또한 송신되는 전류량 및 전원방식에 영향을 고려하여 다양

한 전기저항을 대상으로 송신되는 전류량, 송신기의 종류 및 분로저항의 크기 등을 순차적으로 변화시켜 자료를 얻었다. 그 결과 최대 주파수인 1,024 Hz에서 위상이 가장 작게 측정된 조건을 제시하였다(Table 2). 암석시료는 전기비저항 측정에서 얻은 시료의 저항크기에 따라 Table 2에서 최적의 조건을 적용시켜 광대역 유도분극 자료를 얻었다.

암석물성 측정결과

실험을 통해 얻은 암석 물성자료는 암종별로 박스플롯(Skeletal box-and-whisker plot)을 이용하여 물성의 분포 및 왜도(skewness)를 효과적으로 나타냈다. 박스플롯은 자료에서 최솟값과 최댓값을 양 끝선에 두고, 자료의 25%(제1사분위수)와 75%(제3사분위수) 사이의 분포를 상자로 표시한다. 그리고 중간값(median)에 해당하는 위치에 상자 안에 선으로 나타낸다.

밀도

Fig. 3은 다양한 시료의 밀도 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 보면 화강암 및 페그마타이트 등의 관입암, 모암의 석회암, 슬레이트, 스카른, 광석 순으로 밀도가 높게 나타난다. 광석과 스카른 시료 경우 전체시료 밀도의 평균보다 높은 시료 비율이 62.3%를 차지하였고, 반면에 주변모암인 슬레이트와 석회암, 관입암의 규장암, 화강반암, 화강암 및 페그마타이트 시료의 경우에는 18.4%를 차지하였다. 이 차이는 스카른에 의한 광화작용으로 광석과 스카른 시료의 경우 밀도가 높은 방연석, 섬아연석을 비롯한 다양한 금속광물을 수반하기 때문인 것으로 판단된다.

대자율

암석의 대자율은 물질이 자화될 수 있는 정도를 나타내는 지수로서 암석에 포함되어 있는 자성광물의 함량에 따라 달라진다. 가곡광산에서 채취한 암석 시료의 대자율은 Fig. 4와 같

Table 2. Optimal measurement conditions of the minimum phase difference in 1,024 Hz using fixed resistance device.

R (ohm)	I (mA)	Shunt R (ohm)	ϕ (m rad)	Z (ohm)	Tx
100	0.102	100	-0.4	96	LDT-10B
180	0.100	180	-0.5	177	LDT-10B
300	0.101	300	-0.5	291	LDT-10B
500	0.100	500	-0.8	495	LDT-10B
1000	0.996	1,000	-1	996	LDT-10B
2,000	0.992	2,000	-0.1	1,981	LDT-10B
3,000	3.981	3,000	-2.5	2,960	ZT-30
5,000	2.370	5,000	-2.4	5,025	ZT-30
10,000	1.196	10,000	-1.9	9,903	ZT-30
20,000	0.596	20,000	-1.1	19,930	ZT-30
30,000	0.399	30,000	0	29,730	ZT-30
51,000	0.234	51,000	1	50,960	ZT-30
100,000	0.120	100,000	8.3	99,540	ZT-30
200,000	0.059	200,000	16.5	201,100	ZT-30

Fig. 3. Density distribution obtained from the Gagok mine area.

Fig. 4. Magnetic susceptibility distribution obtained from the Gagok mine area.

이 각 시료마다 넓은 분포범위를 나타내고 있다. 시료의 대자율 평균값으로 보면 광석과 슬레이트 시료가 $3,000 \times 10^{-5}$ SI 이상을 나타내고, 스카른 시료는 756×10^{-5} SI를 보이고 있어 주변의 모암이나 관입암에 비하여 월등히 크게 나타난다. 관입암 중에서는 화강반암, 규장암, 화강암 순으로 대자율이 작고, 모암인 석회암과 관입암인 페그마타이트는 10×10^{-5} SI 이하로 자성광물을 거의 수반하지 않은 것으로 보인다.

스카른에 의하여 광화작용을 받은 암석은 일반적으로 Fig. 5와 같이 자성이 강한 자류철석 및 자철석 등을 수반하는 것으로 알려져 있고(Emerson, 1986; Heo *et al.*, 2012), 반면 모암인 석회암과 관입암은 주로 방해석, 석영 및 장석 등의 자성이 약한 광물들을 수반하고 있다. 이러한 이유로 스카른에 의해 광화작용을 받은 광석, 일부 스카른 및 슬레이트 시료는 대자율이 주변모암 시료들과 현저한 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 5. Photomicrographs of rock samples from the Gagok mine. amp = amphibole, mt = magnetite, pyrr = pyrrhotite, sch = scheelite (Heo *et al.*, 2012).

Fig. 6. Resistivity distribution obtained from the Gagok mine area.

전기비저항

Fig. 6은 암석 및 광석 시료의 전기비저항 분포를 나타내고 있다. 광석, 스카른 시료는 전기비저항의 분포범위가 넓게 나타나는데, 이것은 전도성이 높은 금속광물의 함유량에 따른 것으로 판단된다. 광석 시료에 있어서 자류철석, 자철석, 황동석 등 전도성이 높은 금속광물의 함유량이 많거나 맥상으로 분포하고 있을 경우 전기비저항이 10 ohm-m 이하로 낮게 나타난다. 스카른을 비롯한 슬레이트, 석회암, 규장암, 화강반암 및 화강암 시료는 공극률이 작고, 구성광물이 전도성이 낮은 방해석과 세립이나 중립 결정의 석영, 장석, 운모 등으로 구성되어 있어 6,000 ~ 18,000 ohm-m의 전기비저항 범위를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 스카른 광상의 경우, 전도성이 높은 금속광물을 함유하고 있는 광화대 구간은 주변 모암보다 전기비저항이 현저히 낮게 나타남을 알 수 있다.

광물자원 탐사에서 유용하게 사용되는 전기비저항과 대자율의 측정 결과로부터 Table 3과 같이 물성치의 분포 범위를 이용하여 3가지의 물성그룹으로 구분하였으며, Fig 7에 그래프로 도시하였다. 물성 그룹 1은 대자율이 100×10^{-5} SI 보다 크고, 전기비저항은 100 ohm-m 이하에 속하는 시료들로서 전도성이 높은 금속광물을 함유하고 있는 광석 시료(82.5%)와 일부 스카른(2.7%) 시료가 여기에 속한다.

물성 그룹 2는 대자율이 100×10^{-5} SI 보다 크고, 전기비저항은 100 ohm-m 이상에 속하는 시료들로서 금속광물의 함량은 미량이지만 자성광물을 수반하고 있을 것으로 추측되며 광

Table 3. Classification of the rock group using resistivity and magnetic susceptibility.

Group	Resistivity (ohm-m)	Magnetic susceptibility (10^{-5} SI)
1	0-100	above 100
2	above 100	above 100
3	above 100	below 100

Fig. 7. Relationship between resistivity and magnetic susceptibility for the group distribution.

석(17.5%), 스카른(40.0%), 슬레이트(71.4%), 규장암(20.0%), 화강반암(66.7%) 및 화강암 (35.0%) 시료로 구성되어 있다.

물성 그룹 3은 대자율이 100×10^{-5} SI 보다 작고, 전기비저항은 100 ohm-m 이상에 속하는 시료들로서 스카른(57.3%), 석회암(100%), 슬레이트 (6.8%), 규장암(80.0%), 화강반암(33.3%), 화강암(65.0%) 및 페그마타이트(100.0%) 시료로 구성되어 있다.

전기비저항과 대자율로 구분한 3가지 물성 그룹에서 스카른 광화작용으로 형성된 광석 시료는 대부분 물성 그룹 1에 속하고, 모암의 석회암과 슬레이트, 관입암의 화강반암 화강암, 페그마타이트 시료는 물성 그룹 2, 3에 속해 있다.

광대역 유도분극

Fig. 8은 광대역 유도분극의 특성을 알아보기 위하여 유도분극 반응이 없는 저항과 유도분극 반응이 강한 축전기를 이용한 예비실험 결과이다. 저항은 용량성이 없기 때문에 모든 주파수 영역에서 위상이 0 mrad에 수렴해야 하지만 Fig. 8(a)와 같이 주파수가 10 Hz 이상의 영역에서 음수의 위상이 측정되었다.

이러한 저항의 위상은 용량성에 의한 위상반응이 아니라 저항 내부의 유전체 물질의 유전율 변화에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 이 유전율의 변화는 상대유전율 및 전기비저항이 작은 경우에 위상에 미치는 영향이 무시할 수 있을 만큼 미약하지만(Knight and Nur, 1987) 상대유전율 및 전기비저항이 큰 경우에는 주파수가 높아질수록 위상이 커지게 되고, Fig. 8(a)에서 10,000 ohm의 저항은 다른 저항보다 전기비저항이 높기 때문에 10 Hz 이상의 주파수 영역에서 가장 큰 위상을 나타낸다.

(a) Phase spectra of resistance

(b) Phase spectra of condenser

Fig. 8. Frequency domain phase spectra for resistance and condenser.

축전기는 Fig. 8(b)와 같이 주파수가 증가할수록 위상이 커지다가 특정 주파수 이상에서는 위상이 작아지며, 이 위상의 주파수 스펙트럼에서 변곡점을 임계주파수라 한다. 임계주파수는 축전기의 정전용량이 1 μ F 일 때 8 Hz이고, 0.1 μ F 일 때 24 Hz 보이며, 정전용량이 커질수록 임계주파수는 낮아진다. Sung (2010)에 의하며, Glass bead에 동일한 황철석 중량비를 입자 크기를 달리하여 섞은 후에 광대역유도분극을 측정한 결과 황철석의 입자크기가 클수록 임계주파수가 낮아짐을 알 수 있었다.

Fig. 9는 광대역유도분극 측정결과를 주파수에 따른 위상반응에 따라 4가지 곡선 형태로 구분하였으며, 각 곡선 형태에 해당하는 대표적인 시료의 단면사진을 나타내고 있다. Fig. 9(a)의 곡선 형태 1은 축전기의 실험결과와 같이 주파수가 증가할수록 위상이 커지다가 특정 주파수 이상에서는 위상이 작아지는 형태로서, 1 ~ 32 Hz의 주파수 영역에서 임계주파수

Fig. 9. Phase difference curve for each type obtained from the Gagok mine area.

를 가진 시료이다. 광석 시료의 30%가 여기에 속하며, Fig. 9(a)의 광석 5 시료와 같이 육안으로 자류철석 등이 맥상으로 보이며, Heo *et al.* (2012)의 분석한 광물의 모달 함량에 따르면, 자류철석, 황동석, 섬아연석 등의 황화금속 광물이 30 ~ 40 vol.%를 차지하고 있다.

Fig. 9(b)의 곡선 형태 2는 1 Hz 이하의 주파수 영역에서 임계주파수를 가진 시료들로 주파수가 증가할수록 위상이 작아지는 경향을 나타내고 있으며, 광석 시료의 69%가 여기에 속한다. Fig. 9(b)의 광석 28 시료의 단면사진을 보면 황철석 맥이 관찰되며, Heo *et al.* (2012)의 분석한 광물의 모달 함량에 따르면 황화금속 광물이 약 20 vol.%를 차지하고 있다. 일반적으로 임계주파수는 정전용량이 커질수록 낮고, 정전용량은 축전기 내부의 도체 반지름에 비례하기 때문에 임계주파수가 낮은 곡선 형태 1이 곡선 형태 2보다 황화금속 광물이 맥상으로 분포하거나 입자크기가 클 것으로 추측된다.

Fig. 9(c)의 곡선 형태 3은 100 Hz 이상의 주파수 대역에서 위상이 증가하는 형태를 보인다. 대부분 표봉층의 슬레이트(71.4%) 시료가 여기에 속하며, 일부 스카른(20%), 규장암(20%), 화강반암(8%)와 화강암(10%) 시료로 구성되어 있다. Fig. 9(c)의 슬레이트 9 시료를 육안으로 관찰하면 자철석의 세맥이 존재하고 있으며, 휘석, 각섬석, 석류석 등의 스카른 광물이 포함되어 있다.

Fig. 9(d)의 곡선 형태 4는 황화금속 광물이 거의 포함되어 있지 않은 스카른(80%), 석회암(100%), 슬레이트(28.6%), 규장암(80%), 화강반암(91.7%), 페그마타이트(100%)로 구성되어 있다. 관계화성암인 화강암 19 시료는 석영 및 장석으로 이루어져 있다.

Cole-Cole 역산

Fig. 10은 규사에 유도분극 효과가 강한 황철석의 함량과 입자의 크기를 변화시킨 실내실험 결과로서, 측정 자료를 Cole-Cole 모델 역산을 통하여 계산된 충전성과 시간상수를 그래프로 나타내었다(Pelton *et al.*, 1978). 이 그래프에서 충전성은 황철석의 함량이 증가하면 커지고, 시간상수는 황철석이 같은 함량일 때 입자가 클수록 커지는 것을 알 수 있다.

이 연구에서도 암석 및 광석시료의 광대역 유도분극 측정결과를 이용하여 Cole-Cole 모델 역산을 수행하여 충전성과 시간상수를 계산하고(Son *et al.*, 2007), 그 결과를 곡선 형태에 따라 구분하여 Fig. 11에 도시하였다.

Cole-Cole 모델 역산은 모든 주파수 대역을 사용하고자 하였으나 10 Hz 이상에서 시료의 유전체 특성으로 위상이 급격하게 상승함에 따라 충전성이 1 이상으로 계산되는 오류가 발생하였다. 따라서 시료의 유전체 특성을 보이지 않는 10 Hz 이하의 주파수 영역만을 사용하였다.

Fig. 11의 충전성과 시간상수에 대한 곡선 형태의 분포를 보면, 황화금속 광물을 다량으로 포함하고 있는 곡선 형태 1과

Fig. 10. Grain size (mm) and concentration (%) of contour in samples chargeability and time constant plot (Pelton *et al.*, 1978).

곡선 형태 2는 0.9 이상의 높은 충전성을 보이며 10 이상의 시간상수에 속해있다. 다음으로 소량의 황화금속 광물을 포함하고 있는 곡선 형태 3의 시료는 충전성이 대부분 0.3 ~ 0.8에 속하며, 관계화성암 등 황화금속 광물이 거의 없는 곡선 형태 4는 충전성과 시간상수가 작게 나타난다. 이러한 결과로부터 Cole-Cole 모델 역산의 충전성 및 시간상수로부터 황화금속 광물의 상대적인 함량과 입자의 크기를 유추할 수 있을 것으

Fig. 11. Chargeability and time constant distribution obtained from the Gagok mine area.

로 보인다.

이 연구에서 측정한 물성은 스카른 광상의 광화대 물리탐사 결과를 해석하는데 기초적 자료로 활용하기 위하여 암석별 통계적인 값으로 요약해서 Table 4에 나타났다.

토의 및 결론

가곡광산(제2연화광산)의 스카른 광체는 조선누층군의 풍춘

Table 4. Geophysical properties of distribution obtained from the Gagok mine area.

Physical property	Value	Ore	Skarn	Limestone	Slate	Felsite	Granite porphyry	Granite	Pegmatite
Density (g/cm ³)	mean	3.535	3.043	2.703	3.036	2.575	2.644	2.736	2.591
	median	3.548	2.979	2.705	3.089	2.592	2.640	2.653	2.597
	minimum	2.973	2.572	2.690	2.668	2.476	2.578	2.487	2.552
	maximum	4.476	4.178	2.713	3.550	2.637	2.756	3.613	2.622
Magnetic susceptibility (10 ⁻⁵ SI)	mean	3,712	756	11	65	117	417	106	2
	median	1,820	93	13	453	75	212	22	1
	minimum	95	8	1	19	5	28	4	1
	maximum	11,143	8,348	32	11,849	390	1,064	567	4
Resistivity (ohm-m)	mean	141	9,953	9,462	9,496	6,972	18,871	9,263	3,053
	median	6	5,064	9,567	3,623	6,721	9,674	7,484	2,820
	minimum	1	97	6,816	1,435	340	1,565	1,907	1,504
	maximum	1,495	164,437	13,397	59,010	11,944	74,819	41,863	4,737
Inverted chargeability	mean	0.97	0.23	0.15	0.47	0.27	0.25	0.23	0.17
	median	0.99	0.17	0.16	0.51	0.19	0.23	0.19	0.17
	minimum	0.49	0.08	0.11	0.14	0.16	0.16	0.14	0.15
	maximum	1.00	0.95	0.17	0.75	0.54	0.54	0.57	0.20
Inverted timeconstant	mean	2.72E+05	1.84E+02	6.29E-01	7.71E+01	3.97E-02	6.94E+00	7.06E+02	8.31E+00
	median	5.04E+01	1.99E-03	2.17E-03	1.41E+00	2.60E-02	1.32E+00	1.97E-01	1.91E-01
	minimum	5.47E-01	1.56E-06	1.93E-04	3.30E-04	2.24E-03	1.55E-04	8.19E-05	5.40E-03
	maximum	8.74E+06	1.37E+04	6.06E+00	1.48E+03	1.32E-01	4.10E+01	1.41E+04	6.47E+01

층 및 묘봉층과 이를 관입한 화강반암의 접촉부와 인접부를 따라 전반적으로 층상~판상으로 배태되고 있으며, 광상은 전반적으로 Ca계열 규산염광물이 지배적인 스카른화작용으로 석류석, 휘석, 각섬석 등의 스카른 광물과 섬아연석과 방연석, 자류철석, 자철석, 황동석 등의 광석광물이 산출된다. 스카른 광체의 부존여부와 그 연장선을 파악하기 위해서 다양한 물리탐사법을 적용하고 있다.

특히 황철석, 방연석, 섬아연석 등의 황화금속 광물을 수반한 금속광상에 유도분극(induced polarization)탐사가 널리 사용되고 있으며, 최근 들어 유도분극탐사의 난점인 전자기 결합 효과를 제거하기 위하여, 광대역 주파수에 대한 진폭 및 위상을 측정하는 광대역 유도분극(Spectral Induced Polarization; SIP)탐사법이 개발되어 광상탐사에 적용을 시도하고 있다.

이러한 탐사방법을 통해 얻은 결과로부터 광화대를 해석하기 위해서는 주변 모암과 광화대의 전기적 물성차이를 파악하는 것이 중요하며, 더 나아가 다량의 주파수별 유도분극 자료를 해석하여 광종 구별 및 유용광물의 함량 등을 파악할 수 있기를 기대한다. 이러한 측면에서 이 연구는 가곡광산의 스카른 광석과 모암을 비롯한 주변 암석 및 관계화성암을 대상으로 밀도, 대자율, 전기비저항, 광대역유도분극을 측정하여 물리탐사 결과에 의한 스카른광상 해석에 기초자료를 제시하고자 하였다.

연구 결과에서 섬아연석과 방연석, 자류철석 및 자철석을 함유하고 있는 스카른 광석은 모암 및 주변암석에 비하여 높은 밀도와 대자율, 낮은 전기비저항, 강한 유도분극 반응을 보이고 있어 황화금속 광물의 영향을 잘 반영하고 있다. 100 ohm-m의 전기비저항과 100×10^{-5} SI의 대자율을 기준으로 구분하면 광석 시료는 기준보다 낮은 비저항과 높은 대자율을 보이며, 주변 모암의 물성과 확연하게 구별되었다.

광대역 유도분극에서는 주파수에 따른 위상으로부터 유도분극 효과를 파악하여 황화금속 광물에 대한 정보를 정성적으로 파악하였다. 또한 측정 자료를 Cole-Cole 모델 역산을 통해서 유도분극 매개변수인 충전성과 시간상수를 얻었으며, 괴상의 황화금속 광물을 다량으로 수반하고 있는 광석은 주변모암에 비하여 충전성과 시간상수가 컸다. 또한 분산상으로 황화금속 광물을 배태하는 일부 스카른 및 슬레이트를 광석과 구분될 뿐만 아니라 다른 주변모암과 효과적으로 구분되었다. 따라서 광대역 유도분극은 황화금속 광물의 상대적인 함량과 입자의 크기를 유추하는데 효과적으로 이용될 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Transaction of American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers*, **146**(99), 54-62.
- Bishop, J. R., and Emerson, D. W., 1999, Geophysical properties of zincbearing deposits, *Australian Journal of Earth Sciences*, **46**(3), 311-328.
- Choi, B. K., Choi, S. G., Seo, J. E., Yoo, I. K., Kang, H. S., and Koo, M. H., 2010 Mineralogical and geochemical characteristics of the Wolgok-Seongok orebodies in the Gagok skarn deposit : Their genetic implications, *Journal of Economic and Environmental Geology*, **43**(5), 477-490.
- Choi, S.-G., Choi, B. K., Ahn, Y. H., and Kim, T. H., 2009, Re-evaluation of genetic environments of zinc-lead deposits to predict hidden skarn orebody, *Journal of Economic and Environmental Geology*, **42**(4), 301-314.
- Emerson, D. W., 1986, Physical properties of skarns, *Exploration Geophysics*, **17**(4), 201-212.
- Franklin, J. A., 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Part I, *International Society for Rock Mechanics*, 143-151.
- Hallof, P. G., 1974, The IP phase measurement and inductive coupling, *Geophysics*, **39**(5), 650-665.
- Heo, S. Y., Oh, J. H., Yang, K. H., Hwang, J. Y., and Park, S. G., 2012, The relationship between the mineral characteristics and spectral induced polarization for the core rock samples from the Gagok skarn deposit, *Journal of Economic and Environmental Geology*, **45**(4), 351-363.
- Kim, Y. H., and Choi, Y. G., 1999, Experimental verification on factors affecting core resistivity measurement (II) - characteristics of time series data and determination method of resistivity, *Journal of Korean Geophysical Society*, **2**(4), 269-279.
- Knight, R. J., and Nur, A., 1987, The dielectric constant of sandstones, 60 kHz to 4 MHz, *Geophysics*, **52**(5), 644-654.
- KORES, 1981, Economic mineral deposits in Korea, **8**, 184-185.
- Lee, S. K., and Lee, T. J., 2009, Electrical resistivity of cylindrical cement core with successive substitution by electrolyte of different conductivity, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **12**(4), 328-337.
- Madden, T. R., 1961, *Electrode polarization and its influence on the electrical properties of mineralized rock*, PhD thesis, MIT, 161.
- Papida, S., Murphy, W., and May, E., 2000, Enhancement of physical weathering of building stones by microbial populations, *International biodeterioration and biodegradation*, **46**(4), 305-317.
- Park, M. K., 2005, Laboratory study on the electrical resistivity characteristics with contents of clay minerals, *Mulli-Tamsa*, **8**(3), 218-223.
- Park, S. G., 2004, Physical property factors controlling the

- electrical resistivity of subsurface, *Mulli-Tamsam*, **7**(2), 130-135.
- Patnode, H. W., and Wyllie, M. R. J., 1950, The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation, *Journal of Petroleum Technology*, **2**(2), 47-52.
- 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**(3), 588-609.
- Petersson, J., and Eliasson, T., 1997, Mineral evolution and element mobility during episyenitization (dequartzification) and albitization in the postkinematic Bohus granite, southwest Sweden, *Lithos*, **42**(1), 123-146.
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V., and Norini, G., 2012, Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks, *Tectonophysics*, **566**, 67-86.
- Sardini, P., Siitari-Kauppi, M., Beaufort, D., and Hellmuth, K. H., 2006, On the connected porosity of mineral aggregates in crystalline rocks, *American Mineralogist*, **91**(7), 1,069-1,080.
- Son, J. S., Kim, J. H., and Yi, M. J., 2007, IP Modeling and Inversion Using Complex Resistivity, *Mulli-Tamsa*, **10**(2), 138-146.
- Sung, N. H., 2010, *Measurement System Construction and Data Base Application of Rock Physical Properties*, PhD, Chonbuk National University, Korea, 117.
- Yun, S., and Einaudi, M. T., 1982, Zinc-lead skarns of the Yeonhwa-Ulchin district, South Korea, *Economic Geology*, **77**(4), 1,013-1,032.
- 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 Geological Society of Korea*, **15**, 89-99.
- 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.