

총 설

국내 유도분극 탐사의 연구동향

박삼규*

한국지질자원연구원

Research Trends in Induced Polarization Exploration in Korea

Samgyu Park*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약

유도분극(Induced Polarization, IP)탐사가 1973년에 국내 학술지에 처음 소개되었으며, 그 이후 석탄 및 금속광상탐사에 응용되기 시작하면서 대학 및 연구기관에서 유한요소법에 의한 IP 모델링 연구와 인공모형 시료의 유도분극반응 측정 기술이 개발되었다. 1980년 중반에 광대역유도분극(SIP) 탐사기가 국내에 도입되면서 실내 측정 및 해석 기술이 개발되었으나 자원산업의 쇠퇴와 더불어 광상탐사 현장에서 널리 활용되지는 못했다. 1990년대에는 IP탐사가 황화광물의 열수광상 및 벤토나이트 광화대 조사와 해수 침입에 의한 지하수 오염지역에 적용된 사례가 있다. 2000년대 들어서면서 IP탐사의 3차원 역해석 기술이 개발되고, 국내의 광물자원확보를 위한 정밀물리탐사 기술이 요구되면서 암석 시료의 SIP 측정 및 현장 탐사 기술이 확보되었으며, 해남지역 금은광상의 광화대 탐사에 적용한 결과 SIP탐사 기술이 황화광물을 포함하고 있는 금속광상탐사에 유용함이 입증되었다. 이러한 IP 탐사는 리튬, 코발트, 니켈과 같은 첨단 산업의 핵심광물 탐사에서 효과적일 것으로 여겨지고, 또한 환경오염과 지반조사 분야에서도 유용할 것으로 기대된다.

주요어

유도분극탐사, 광대역유도분극탐사, 금속광상, 황화광물, 역해석

ABSTRACT

Induced polarization (IP) was first published in a Korean academic journal in 1973, and it was soon applied to coal and metal ore exploration. Then, in universities and research institutes, IP modeling studies using the finite element approach and experimental studies on IP responses for artificial samples were conducted. In the mid-1980s, the spectral IP (SIP) measurement module was introduced to Korea, and physical scale modeling and inversion approaches were developed. Due to the decline of the mineral resource industry, this method was not actively applied. However, the SIP method was not applied. In the 1990s, IP exploration was applied in the investigation of hydrothermal deposits of sulfide minerals and bentonite mineralization zones, as well as to areas where the groundwater was contaminated by intruding seawater. In the 2000s, three-dimensional inversion of the IP approach was developed, and high-precision geophysical exploration was required to secure domestic and overseas mineral resources, so SIP experiments on rock samples and approaches for field exploration were developed. The SIP approach was proven useful for the exploration of metal deposits containing sulfide minerals by applying it to explore the mineralization zone of gold-silver deposits in the Haenam region. The IP method is considered to be effective in exploring critical minerals (lithium, cobalt, and nickel) in high-tech industries. It also is expected to be useful for environmental and geotechnical investigations.

KEYWORDS

induced polarization method, spectral induced polarization method, metal deposits, sulfide minerals, inversion

Received: 13 October 2021; Revised: 15 November 2021; Accepted: 29 November 2021

*Corresponding author

E-mail: samgyu@kigam.re.kr

Address: 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, 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

국내 물리탐사가 처음 시도된 것은 1937년 평안북도 삭주군 부온온천을 개발할 때 전기탐사를 실시한 사례가 있으며, 일제강점기의 지질조사소에서 보유한 물리탐사 장비 중에 주로 자연전위법(self-potential method) 탐사가 수행되었다는 기록이 있다(Kwon, 2007). 해방 후 1958년 국립지질조사소에서 태백산지구, 소백산지구 및 경남지역의 광상조사를 위하여 항공자력탐사가 실시되었으며, 금속광상 및 지하수조사를 위한 전기탐사가 적용되기 시작했다. 그 이후 1962년 미국 기술용역단이 국내에 들어오면서 달성중석광산에 전자탐사가 처음으로 실시된 보고서가 있다(Kang *et al.*, 1990).

1980년대 이후부터는 전자기기 및 컴퓨터 발달과 함께 측정 장비 및 역해석 알고리즘이 개발되면서 전기탐사가 국내에 본격적으로 보급되었다. 특히 국내의 지질분포 특성 상 지반의 전기비저항이 높아 비교적 잡음이 높은 지역에서도 안정적으로 자료획득이 가능하고, 조사 현장에서 비파괴로 전기적 물성을 얻을 수 있다는 장점이 있어 탐광조사보다는 지반조사 목적으로 토목 건설 및 환경 분야에 폭 넓게 적용되기 시작하였다.

유도분극(Induced Polarization, IP)탐사는 전기탐사법의 한 종류이지만, 국내에서 널리 사용되어 온 전기비저항탐사에 비해 현장 측정 기술 및 작업성이 용이하지 않아 많이 보급되지 못했다. IP탐사는 지하 매질의 분극 현상을 측정하는 것으로 현장 자료 획득면에서 전기비저항탐사와 유사하지만, 전류차단 후 지층에서 전기적 산란에 걸리는 시간을 해석한다는 점에서 측정 및 해석기술에 차이가 있다. 지층의 전기적 산란을 크게 유도하여 양질의 측정값을 얻기 위해서는 고출력 전류를 땅 속으로 흘려보내야하고, 또 전극과 매질 사이에서 전극 분극 현상이 일어나지 않게 비분극 전극을 사용해야 한다. 따라서 유도분극탐사는 현장 탐사작업과 해석이 쉽지 않지만, 황철석, 황동석, 방연석, 섬아연석 등 황화광물을 함유하고 있는 금속광산에 유용한 탐사법으로 알려져 있다. 그러나 1973년 석유파동으로 국제 자원시장에서 자원민족주의가 대두되었고, 1982년 이후 중국이 세계 자원시장의 공급국으로 부상하면서 상대적으로 소규모 광체를 대상으로 운영되던 우리나라 금속광산이 점차 침체에 접어들면서 IP탐사를 비롯한 물리탐사가 광상탐사에 널리 활용되지 못했다. 그러다가 2002년 이후 중국, 브라질, 인도 등 브릭스(BRICs) 국가 및 개발도상국의 급속한 경제발전에 따른 광물자원 수요가 급증하면서 원자재 가격이 폭등하게 되었다. 이에 우리나라도 광물자원의 자주 개발을 높이기 위해 정밀 자원탐사기술 개발이 요구되면서 시추공을 이용한 토모그래피 탐사 및 광대역유도분극(Spectral Induced Polarization, SIP)탐사 기술을 확보하여 국내의 광물 자원탐사에 활용하게 되었다.

최근 광물자원탐사에 있어서 과거에는 천부의 고품위 광체를 대상으로 시추조사 및 물리탐사를 수행해왔지만, 이른바

‘Easy resource’ 시대에서 ‘Extreme resource’ 시대로 전환됨에 따라 저품위 광체와 심부 광체를 대상으로 정밀하게 탐사할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 이에 유도분극탐사는 산재성(disseminated) 광상이나 황화광물을 포함하고 있는 대부분의 금속광상에 유용한 탐사법으로 국내 연구동향에 대하여 파악할 필요가 있다. 따라서 이 논문에서는 유도분극탐사 기술이 국내에 도입된 이래 현재까지 수치해석기술, 실내 물성측정 기술, 현장 탐사기술 및 적용 사례에 대해서 시대변화에 따른 기술 발달과정을 서술하고자 한다.

유도분극탐사 기술 도입

유도분극탐사 기술이 국내 학술지에 소개된 것은 Cheng (1973)에 의해 대만 오치드섬에서 동광탐사에 적용한 사례가 처음이다. 경사배열법을 이용하여 유도분극탐사를 실시한 결과로부터 얻은 IP 이상대와 지하학적 이상대가 일치되는 2곳에 시추조사를 실시하여 황철광을 찾아냄으로서 그 유효성을 입증하였다. 그 당시 탐사결과의 해석은 구형(sphere) 모델이나, 층서 매질(layered media) 등 간단한 기하학적 모형에 대한 이론식에 의한 해석을 하거나 2차원 각종모형에 대하여 표준곡선(standard curve)을 작성하여 해석하였기 때문에 모형의 전기비저항 및 주파수효과(frequency effect)가 배경값과 차이가 대단히 클 때나 규칙적이고 간단한 기하학적 모형에 대해서만 적용이 가능했다. 그러나 실제 현장은 모형과 다르기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위하여 전자계산기를 이용한 수치 모델링 방법이 사용되기 시작하였으며, 유한차분법(finite difference method), 유한요소법(finite element method), 회로망법(network solution method), 적분방정식법(integral equation method)이 개발되었다.

국내에서는 Chung and Hyun (1979)에 의해서 유한요소법에 의한 IP 모델링 연구가 시작되었다. 우리나라는 지형변화가 심하고 광체가 불규칙적으로 발달되어 있는 점 등을 고려할 때 이론식 및 표준곡선에 의해 IP 해석을 시도하기에는 한계가 있다는 것을 알았다. 따라서 이를 개선하기 위하여 삼각형 요소를 사용한 유한요소법 2차원 모형에 대한 수치모델링 연구가 수행되었다. 그 당시 수치모델링 연구는 전자계산기의 능력 등 사용시간이 충분히 확보되지 못해 불규칙한 모양의 광체나 지형변화에 따른 IP 이론곡선을 다루지는 못하고, 45° 경사 dyke의 심도, 폭, 전기비저항을 변화시켜 IP 이론곡선을 구했다. 또한 유한요소법에 의한 IP 모델링에 있어서 계산오차는 요소의 크기 및 개수, 임의로 주어진 경계조건과 Fourier 변환 등에서 발생하기 때문에 이들은 계산오차 및 계산시간을 줄이기 위하여 주파수영역에서 총 potential을 구하는 대신 이상대 부분에 기인하는 2차 potential만을 구했다. IP 모델링 연구결과 의하면, 쌍극자(dipole-dipole) 배열과 경사(gradient) 배열을 병행하면 광체의 수평위치를 탐지하는데 유용함을 밝혔다.

IP 수치모델링 연구가 이루어지면서 한편으로는 국내 무연탄을 비롯한 광물자원탐사에 유도분극탐사를 적용하기 위한 수조실험이 Jang and Hyun (1983)에 의해 수행되었다. 수조는 경화 플라스틱을 사용하여 가로 180 cm, 세로 140 cm, 높이 90 cm로 제작되었으며, 흑연판을 사용한 판상모형광체에 대하여 경사, 심도, 모암의 전기전도도 등의 조건을 변화시키면서 쌍극자 배열과 슬럼프배열에 대한 2차원 시간영역 유도분극을 측정하였다. 측정결과인 충전성(chargeability) profile과 가단면도를 작성하여 이를 비교 검토한 결과 광체 부존 여부의 확인과 부존 형태에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

유도분극탐사의 기초연구

1980년대에는 전자기기 및 컴퓨터의 발달과 함께 국내에서도 유도분극탐사를 발전시켜 석탄 및 광물자원탐사에 활용하기 위해 대학교 및 연구기관에서 기초적 연구가 활발히 이루어졌다. Kim (1984)은 유도분극탐사에서 지하의 경사 물체에 대한 쌍극자 배열 IP 반응을 적분방정식을 이용한 수치계산 방법으로 구했다. 또한 Suh (1985)에 의해서 광물자원탐사에 있어서 SIP법의 응용에 관한 연구가 보고되면서, 인공모형 광석을 사용하여 SIP 반응과 Cole-Cole 모델(Pelton *et al.*, 1978)을 이용한 SIP법의 자료해석 연구가 이루어졌다(Suh and Jung, 1985). 종래의 IP법은 두 가지 주된 문제점이 있었는데, 하나는 전자기 결합(electromagnetic coupling, EM coupling)에 대한 문제이고, 다른 하나는 광상탐사에서 비경제성 광물인 황철석과 흑연 등의 황화광물이 경제성광물과 유사한 IP 효과를 나타내고 있다는 것이다. 이러한 문제점 중에서 전자기 결합을 개선하고자 광대역 주파수를 사용하는 주파수영역 IP탐사에 대한 연구가 시작되었으며, 1982년에 한국동력자원연구소(현 한국지질자원연구원)에서 미국 Zonge 사로부터 SIP법 탐사가 구입되었다.

국내에 SIP법 탐사가 도입되면서 현장탐사 결과를 해석하는데 필요한 기초적 자료를 제공하고자 인공모형 광체 시료를 대상으로 실내 SIP측정 실험이 수행되었다(Suh *et al.*, 1985; Yoo and Suh, 1986). 이를 위해 실내 측정 장치 및 시스템을 갖추고 다양한 인공모형 시료를 제작하여 주파수에 따른 비저항과 위상을 측정하였다. 이 때 사용한 주파수 범위 및 파형은 0.1 Hz ~ 1,000 Hz의 구형파이며, 1, 3, 5, 7, 9차 조화파들에 대한 측정 자료를 얻어 해석하였다. 측정 자료를 Cole-Cole 모델에 회귀시킨 후 산출된 변수들을 고찰 한 결과 주파수 반응의 진폭과 위상 변화는 황화광물의 입자 크기 및 함량비에 따라 달라지며, 황철석의 입자가 크고 함량이 많을수록 전기비저항은 감소하고, 황철석 입자가 작고 함량이 많을수록 충전성은 증가함을 밝혔다. 또한 국내 9개 광업소의 분탄 및 암석시료의 SIP 측정결과로부터 분탄에 함유된 회분함량이 증가할수록 임계주파수와 최대 위상의 크기는 작아지며, 광산별 탄질의

차이와 회분 내 분극성물질의 함량과 성분 차이 때문에 분탄의 SIP반응이 다르게 나타남을 알았다.

1986년에 미국 Zonge 사로부터 구입한 GDP (Geophysical Data Processor)-12 시스템을 활용하여 강원탄전 정동진리 지역에서 SIP법 시험탐사가 수행되었다(Lee and Koo, 1986). 현장 측선은 측점 간격을 48 m, 총 측선 길이는 672 m이고 쌍극자 전극배열을 사용하여 $n=1 \sim 6$ 까지 측정하였다. 전류전극은 한 곳에 철재 전극 10개와 그 중앙에 알루미늄 호일을 사용하여 접지저항을 낮추려고 노력하였으며, 전위전극은 비분극전극인 다공성전극(porous pot)를 사용하였다. 광대역유도분극탐사는 0.125 Hz, 1 Hz 및 8 Hz의 3개 주파수를 사용하여 현장자료를 얻었다. 동일한 측선에서 전기비저항탐사로 얻은 겔보기비저항 단면과 광대역유도분극탐사로 얻은 겔보기비저항 단면을 비교하였으나 차이가 있어 SIP탐사 자료를 해석함에 있어서 Zonge 사의 전자기결합 제거 기술 도입과 탐사자료를 해석하기 위한 모델링 연구가 필요함을 언급하였다.

이러한 연구 필요성을 인식하여 유도분극탐사에서 2차원 구조에 대한 수치계산방법과 시간영역 유도분극법의 전자기결합의 영향을 계산할 수 있는 연구가 이루어졌다. Kim (1986a)은 지하의 비저항분포를 2차원으로 모델화하여 Fourier 변환된 전위에 대한 차분방정식을 유도하고, 이를 직접 행렬 역산방식으로 풀고 난 후, 역 Fourier 변환을 통하여 점전류원에 대한 전위분포를 구하는 방법을 연구하였으며, 2차원 구조에 대한 음수의 유도분극 반응을 차분법을 이용한 모델링 기술로 검토했다(Kim, 1987, 1988). 또한 균질대지에서 시간영역 유도분극탐사를 실시할 때 생기는 전자기결합의 영향을 간단히 계산할 수 있는 해를 구하고, 이를 현장에서도 사용할 수 있도록 하였다(Kim, 1986b). Lim and Hyun (1989)은 적분방정식을 이용한 3차원 모델링 기술을 이용하여 시추공 내에서 전극의 간격, 이상체의 크기 및 직경에 따른 유도분극 반응을 검토하였다. 또한 Nam and Suh (2001)는 기존의 3차원 전기비저항 모형 반응 계산 알고리즘을 바탕으로 3차원 충전성 모형 반응 계산 알고리즘을 개발하였다.

유도분극탐사 현장 적용성 연구

1990년부터는 국내에 도입된 유도분극탐사의 기초적 연구를 바탕으로 벤토나이트 광상탐사, 해수에 의한 지하수 오염지역 조사에 적용되었다. 국내 벤토나이트 산지인 포항, 감포, 해서 지역의 7개 벤토나이트 광산에서 14개 시료를 채취하여 농도가 다른 전해질에 침윤시켜 전기적 복소비저항 반응의 크기와 위상을 측정하였다. 측정 결과에 의하면 국내산 벤토나이트의 산지별 SIP 반응은 구성 성분이나 구성 원소보다는 주변 모암과의 관련성이나 풍화정도 및 공극률과 공극 내 전해질의 농도차이에 더 큰 영향을 받고 있음을 밝혔다(Hahm *et al.*, 1990). Song *et al.* (1993a, 1993b)은 경북 의성 금성산 칼데라

주변 퇴적층과 후기에 관입 분출한 화산암류 주변에 형성된 오토산 동-연-아연 열수광맥 광상과 흘고개 지역의 벤토나이트 광상탐지 및 형상을 파악하고자 시간영역 측정법 유도분극 탐사를 실시하였다. 지질조사에서 오토산의 동-연-아연 열수광맥 광상은 주 구성 광물로 황철석, 방연석, 섬아연석 등이며, 이들 광물이 분포하고 있는 부광대에서는 겉보기 충전율(apparent chargeability)이 높고, 겉보기 비저항(apparent resistivity)이 낮게 나타남을 알 수 있었다. 또한 흘고개 지역의 벤토나이트 노두가 발달되어 있는 단층선을 따라 설치된 5개 축선의 탐사 결과에서도 벤토나이트 광상이 발달되어 있는 광화대는 황화광물의 부광대와 마찬가지로 겉보기 충전율이 높고, 겉보기 비저항이 낮게 나타나고 있어 이들 탐사축선을 종합적으로 해석하면 벤토나이트 광상의 주향과 분포 형태도 파악할 수 있음을 시사했다.

1990년대 중반에는 유도분극탐사가 광상탐사 외에 지하수 조사에도 처음 적용되었다. Song (1995)은 해수 침입에 의한 지하수 오염 지역과 그렇지 않은 지역에서 유도분극탐사와 수직 전기비저항탐사를 실시하여 이들 결과를 비교하였다. 탐사 결과의 종합적 해석에 의하면 수직 전기비저항탐사 곡선에서 겉보기 비저항이 감소함은 해수로 오염된 지역과 점토성 광물의 존재로 해석할 수 있는데, 이것을 정확하게 해석하기 위해서는 유도분극탐사가 필요함을 강조하였다. 이와 동일한 연구 목적으로 Lee *et al.* (2002)은 주파수영역 유도분극탐사에서 두 개의 주파수를 이용하여 수신 전위파형을 측정할 때 송신 전류파형을 동시에 측정한 후 수신 전위파형을 송신 전류파형으로 디콘볼루션(deconvolution)하여 두개의 주파수에서 겉보기 비저항뿐만 아니라 IP 효과를 보다 정밀하게 산출할 수 있는 방법을 고안하였다. 이 방법을 해수침투 우려 지역에 적용한 결과 저비저항 특성만으로 구별할 수 없었던 IP 효과가 큰 점토층과 IP 효과가 낮은 해수 침투대를 구별할 수 있었다.

광대역유도분극탐사 해석 기술 및 현장 적용성 연구

2002년 이후 중국, 브라질, 인도 등 브릭스(BRICs) 국가 및

개발도상국의 급속한 경제발전에 따른 광물자원 수요가 급증하여 원자재 가격이 폭등하면서 우리나라도 광물자원의 자주 개발을 높이기 위해 국내 휴·폐광산의 재개발과 해외자원 개발에 많은 투자가 이루어졌다. 광물자원개발에 있어서 탐사 대상이 천부 내지 고품위 광체에서 심부 또는 저품위 광체로 전환됨에 따라 지하 부존광체를 정밀하게 평가함에 있어 경제적이고 효율적인 고도의 자원탐사 기술 개발이 요구되면서 광대역유도분극탐사 기술에 대한 관심이 높아졌다. 황화광물을 수반하고 있는 금속광상탐사에 광대역유도분극탐사가 유용함은 널리 알려져 있다. 국내에서는 1980년대 탐사기 도입 및 기초적 연구가 진행되었지만 광업의 침체와 더불어 기술발전이 지체되어 있었다. 2011년부터 국가R&D 프로젝트로 SIP를 이용한 정밀 탐광기술 개발이 수행되면서 역해석 알고리즘 개발, 암석 및 광석의 SIP 특성 연구, 현장 탐사 기술 개발에 박차를 가하기 시작했다.

SIP탐사는 광대역 주파수 영역에서 임피던스 자료를 측정하고, 이 자료로부터 주파수 특성을 추출하기 위한 주파수 분석으로 이루어진다. 지하매질에 대한 광대역 주파수 특성을 정확하고 정량적으로 추정하기 위해서 Son *et al.* (2007)은 SIP 변수의 공간적인 분포를 계산하기 위하여 두 단계로 이루어진 역산 알고리즘을 개발하였다. 첫 번째 단계에서는 각각의 주파수 자료에 대한 복소 전기비저항들 사이에 제한조건을 가하여 모든 광대역유도분극탐사 자료를 한꺼번에 역산하고, 다음으로 이전 단계에서 얻어진 각각의 주파수에 대한 복소 전기비저항 자료로부터 SIP 변수의 공간적인 분포를 계산하기 위하여 Cole-Cole 모델을 이용하여 역산을 통해 SIP 변수들을 계산하였다. 이를 바탕으로 3차원 역해석 프로그램을 개발하였으며, 이를 현장에 적용하였다(Son *et al.*, 2016).

암석 및 광석의 SIP 특성 연구는 1980년대에 Suh *et al.* (1985)과 Yoo and Suh (1986)에 의해서 수행되었던 SIP 측정 장비 및 결과를 바탕으로 Shin *et al.* (2015a, 2015b, 2016)이 황화광물의 원석을 사용하여 만든 다양한 인공시료와 국내 탐광조사로 수행된 시추코어로부터 다량의 모암 및 광석 시료를 대상으로 실내 SIP측정 실험을 수행하였다. 시료의 진폭 및 위

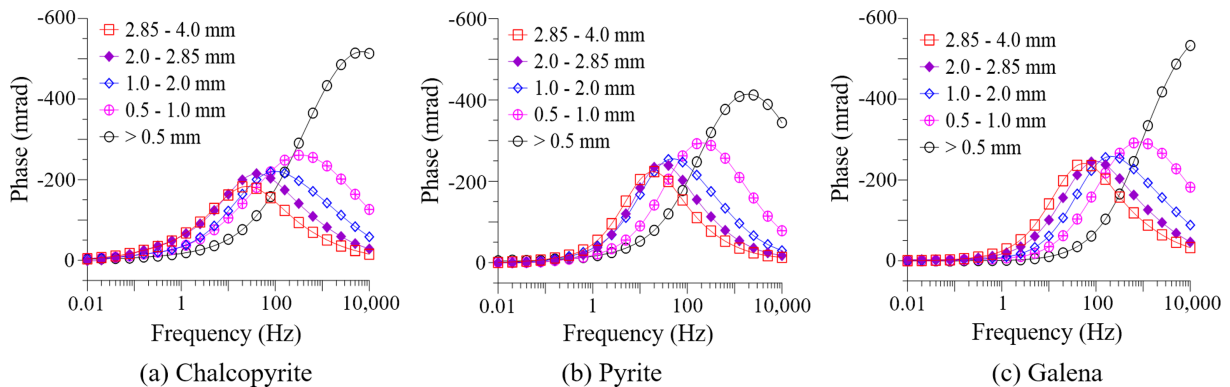


Fig. 1. Phase change according to particle sizes of sulfide minerals with a volume fraction of 20% (Park *et al.*, 2013).

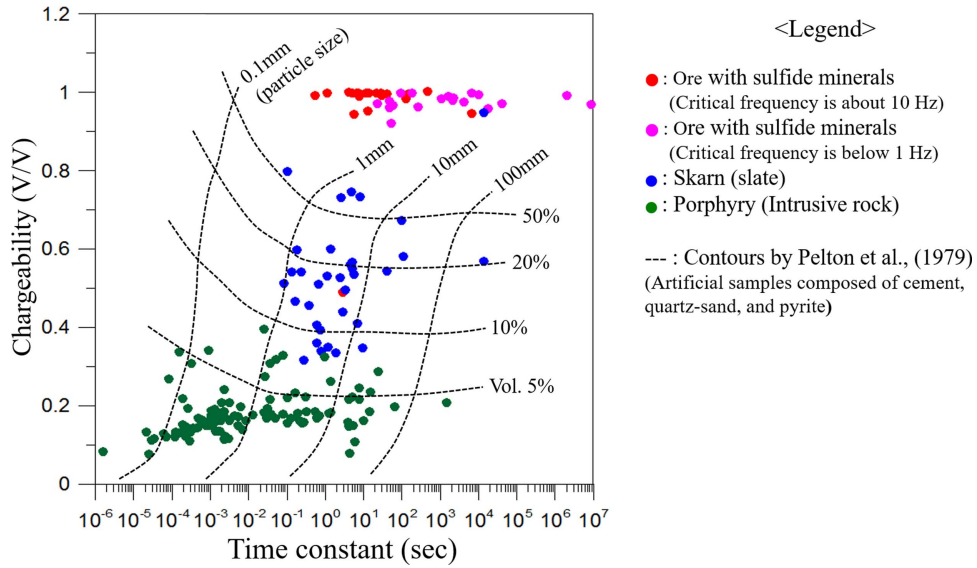


Fig. 2. Relationship between chargeability and time constant calculated from Cole-Cole model using SIP measurement data of several ores and surrounding rock samples collected at Skarn deposits in Korea.

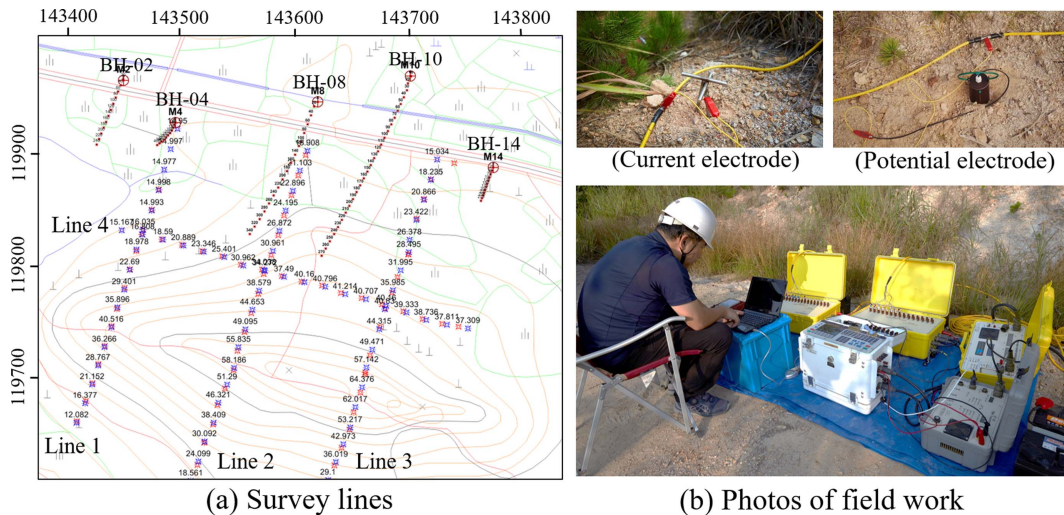


Fig. 3. SIP survey lines and photographs of the field site.

상차는 교류전류 0.1 mA, 주파수 0.01 Hz ~ 10 MHz 범위에서 측정하였으며, 획득한 자료는 등가회로 해석을 수행하여 충전성 및 시간상수를 계산하였다. Fig. 1은 전체시료에 대하여 황화광물의 체적분율이 20%인 인공 시료를 대상으로 황화광물의 입도크기에 따른 위상차의 변화를 나타낸 것이다(Park *et al.*, 2013). 황화광물의 체적분율은 동일하지만, 황화물 광물의 입자 크기가 증가함에 따라 위상차의 크기는 감소하고, 임계 주파수는 낮은 주파수로 이동함을 알 수 있다. 또한 국내 스킨 광장에서 수집한 모암 및 광석 시료의 SIP 측정 결과 사례를 Fig. 2에 보여준다. 스킨 광화작용에 의하여 방연석, 섬아연석 등 황화광물을 포함하고 있는 광석 시료는 주변의 모암보다 충전성과 시간상수가 크게 나타남을 알 수 있다. Shin *et al.* (2015b)은 국내 연·아연광상, 철광상, 금은광상 등에서 채

취한 광석 및 모암 시료의 SIP 이상반응에 대해 기존의 Dias Model (Dias, 2000)과 Cole-Cole 모델을 이용하여 분석한 결과, 광석 시료와 같이 구성광물의 전기적 성질이 불균질한 경우는 실측치와의 오차가 크게 나타남을 알고 이를 개선하기 위하여 새로운 등가회로 모델을 제안하였다.

Park *et al.* (2014)는 광대역유도분극탐사 기술에 대한 현장 적용성을 검증하기 위하여 해남 모이산광산과 가사도 금은광상을 테스트베드로 하여 탐광조사를 실시하였다. Fig. 3은 모이산광산 현장에서 광대역유도분극탐사를 실시하기 위한 탐사측선과 장비 등을 보여준 것이고, Fig. 4는 광대역유도분극탐사 결과를 광산의 3D 지질모델과 비교한 사례를 나타낸 것이다. 탐사측선 2와 3에서 위상차가 크게 나타나는 붉은색 부분이 금은광상의 광화대와 일치함을 알 수 있으며, 이를 통하여

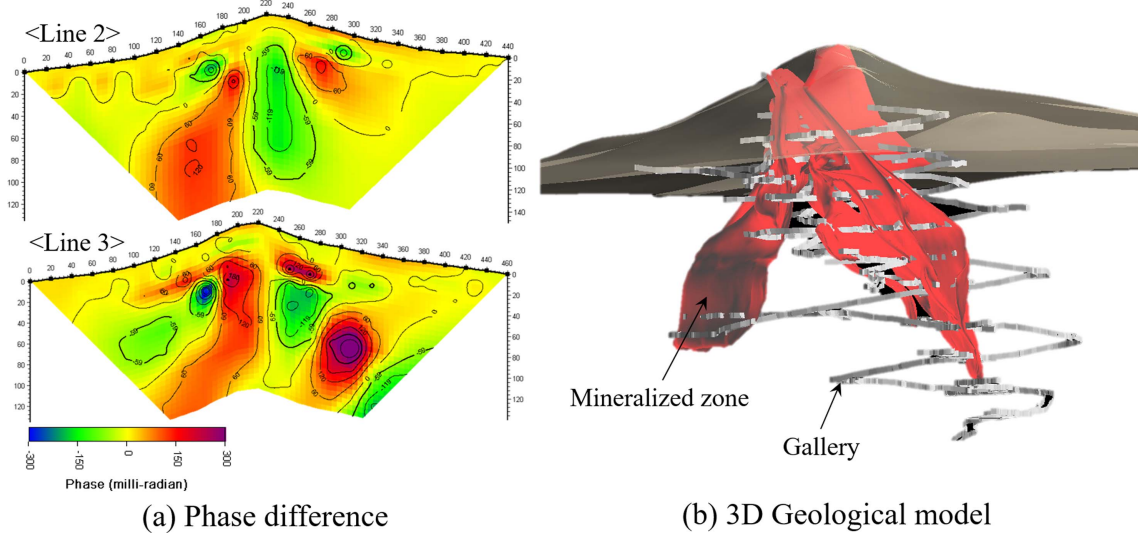


Fig. 4. Comparison of the 3D geological model's phase difference and mineralized zones (modified from Park *et al.*, 2014).

국내 광대역유도분극탐사 기술의 현장 적용성이 입증되었음을 시사하고 있다.

맺음말

물리탐사 기술의 수요는 세계 경제 동향이나 에너지 및 금속광물의 원자재 수급가격과 밀접한 관계가 있다. 금속광상탐사에 유용한 유도분극탐사는 1970년 후반부터 베트남 종전과 함께 금속 원자재 가격이 하락하면서 탐사 수요가 급격히 감소했다. 국내에서는 1970년대에 유도분극탐사가 도입되어 수치모델링 연구와 무연탄을 비롯한 광물자원탐사에 적용하기 위하여 기초적 연구가 수행되었다. 1980년대에 들어서면서 미국 Zonge 사로부터 GDP-12 시스템을 도입하고 난 후 대학 및 연구기관에서 암석 시료 등을 통한 실험실내 SIP 특성 연구와 2차원 수치 모델링 연구가 활발하게 이루어졌지만, 국내 광업이 침체기에 들어서면서 IP탐사 기술 개발도 느리게 이루어졌다. 그러나 2000년대부터 유도분극탐사를 비롯한 물리탐사 기술은 전자기기 및 컴퓨터의 발달에 힘입어 고정밀 측정 장비가 개발되고, 이에 따른 자료획득 기술과 해석 소프트웨어가 개발되었다. 국내에서도 유도분극탐사 3차원 역해석 기술의 개발과 현장 정밀탐사 기술이 개선되어 스킨광상, 금은광상 등 탐광조사에 활용되기 시작했다. 또한 지반의 IP 특성을 이용하여 해수침투 지역의 지하수 조사, 쓰레기 매립지의 환경오염 부지 조사, 지반조사 등 다양한 분야에서도 활용되었다.

그동안 국내에서 연구 개발을 통해 확보하고 있는 유도분극탐사의 현장 자료획득 및 해석 기술, IP 물성측성 분석 기술은 세계적 수준이지만, 국내 광물자원개발 산업이 활발하지 못해 탐광조사에 적용된 사례는 많지 않다. 우리나라는 대부분의 금속광물을 수입에 의존하고 있으며, 최근 전기차 배터리 등 4차 산업혁명 핵심기술에 꼭 필요한 리튬, 코발트, 니켈 등 핵

심광물자원 확보에 사활을 걸고 있다. 국내에서 이러한 핵심광물자원을 확보하기 위한 노력으로 유망 광화대를 대상으로 지질조사 및 탐광조사가 이루어지고 있으며, 천부의 저품위 광상을 정밀하게 조사하기 위한 탐사방법으로 유도분극탐사가 적극적으로 활용할 수 있을 것이다. 또한 국내에서는 환경오염 분야에 적용하기 위한 유도분극탐사의 기초적 연구와 현장탐사 사례가 적지만, 향후 대학 및 연구기관에서 오염물질에 대한 IP 특성 연구가 충분히 이루어진다면 환경오염 분야뿐만 아니라 지반조사 등 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

논문의 완성도를 높일 수 있도록 세심하게 검토해주시고 건설적인 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 본 연구는 한국지질자원연구원의 재원으로 ‘국내 바나듐(V) 등 에너지 저장광물 정밀탐사기술개발 및 부존량’ 예측(GP2020-007)과 글로벌 KIGAM 구현을 위한 국제협력강화 연구(GP2020-028)의 기본사업 일환으로 수행되었습니다.

References

Cheng, J. C., 1973, Application of gradient array to the IP survey on Orchid Island, Taiwan, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **10(4)**, 234-240.
 Chung, S. H., and Hyun, B. K., 1979, Induced polarization modeling by the finite element method, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **16(2)**, 109-118(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

- Hahm, Y. D., Song, Y. H., and Suh, J. H., 1990, The spectral IP responses of some domestic bentonite samples, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **27(4)**, 101-109(in Korean with English abstract).
- Jang, H. S., and Hyun, B. K., 1983, A model study on the application of time domain IP method to plate-like orebodies, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **20(2)**, 89-94(in Korean with English abstract).
- Kang, P. C., *et al.*, 1990, 70-year history of Korea Institute of Energy Research, 297p(in Korean).
- Kim, H. J., 1984, Analyses of dipole-dipole IP responses over dipping structures, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **17(1)**, 49-55.
- Kim, H. J., 1986a, Resistivity and induced polarization modeling for arbitrary two-dimensional structures, *J. Geol. Soc. Korea*, **22(4)**, 366-370.
- Kim, H. J., 1986b, Time-domain electromagnetic coupling in induced polarization surveys on a uniform earth, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **19(3)**, 193-197, <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO198623034628837.pdf>
- Kim, H. J., 1987, Negative induced polarization responses over a layered earth, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **20(3)**, 197-201, <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO198723034628783.pdf>
- Kim, H. J., 1988, Negative induced polarization effects for two-dimensional structures, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **21(2)**, 165-169, <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO198823034628710.page>
- Kwon, B. D., 2007, Current status and perspectives of Korea geophysics, *Symposium of Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, 1-14(in Korean with English abstract).
- Lee, S. K., and Koo, J. H., 1986, Report on the RP and SIP test survey in Korea, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **23(1)**, 1-8(in Korean with English abstract).
- Lee, S. K., Hwang, H. S., Hwang S. H., Park, I. H., and Shin, J. H., 2002, Recognition of seawater intrusion using reference IP technique, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **5(1)**, 56-63(in Korean with English abstract).
- Lim, K. M., and Hyun B. K., 1989, A study on the 3-D modeling of borehole electrical resistivity and induced polarization responses using integral equation method, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **26(2)**, 101-109(in Korean with English abstract).
- Nam, M. J., and Suh, J. H., 2001, Three dimensional induced polarization modeling, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **4(1)**, 1-7(in Korean with English abstract).
- Park, G., Park, S., Son, J. S., Kim, C., and Cho, S. J., 2014, Potential Mapping of Moisan area Using SIP and 3D Geological Modeling, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **17(4)**, 209-215(in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7582/GGE.2014.17.4.209>
- Park, M. K., Park, S., Takakura, S., Yi, M. J., and Kim, J. H., 2013, SIP response of sulfide minerals in artificial specimen, *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium*.
- 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 multi-frequency IP, *Geophysics*, **43**, 588-609, <https://doi.org/10.1190/1.1440839>
- Shin, S. W., Park, S., and Shin, D. B., 2015a, Spectral-induced polarization characteristics of rock types from the skarn deposit in Gagok Mine, Taebaeksan Basin, South Korea. *Environ. Earth Sci.*, **73(12)**, 8325-8331, <http://www.cgl.org.cn/auto/db/detail.aspx?db=706213&rid=1929958&agfi=0&cls=0&uni=True&cid=0&gp=8&showgp=True&prec=False&md=93&pd=6&msd=93&psd=6&mdd=93&pdd=6&count=10&reds=exploration%3Bminerals%3Bore>
- Shin, S. W., Park, S., and Shin, D. B., 2015b, Development of a new equivalent circuit model for spectral induced polarization data analysis of ore samples. *Environ. Earth Sci.*, **74(7)**, 5711-5716, <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201500213549>
- 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(1)-827(16), <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5195681>
- 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, <http://koreascience.kr/article/JAKO200734515055491.pdf>
- Son, J. S., Kim, J. H., Park, S., and Park, M., 2016, 3D inversion of complex resistivity data: case study on mineral exploration site. *EGU General Assembly*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..18.3432S/abstract>
- Song, Y. S., Chae, H. S., Lee, K. S., Chung, S. H., Lee, H. K., and Yun, H., 1993, A case study for detecting bentonite deposits by IP, resistivity and VLF EM method, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **30(2)**, 102-107(in Korean with English abstract).
- Song, Y. S., Chae, H. S., Lee, K. S., Chung, S. H., Lee, H. K., and Yun, H., 1993, Resistivity, IP and VLF EM survey for delineating mineralization zones at Oto Mt. area in Euisung, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **30(6)**, 526-535(in Korean with English abstract).
- Song, Y. S., 1995, Resistivity and IP surveys in the groundwater contaminated zones by sea-water intrusions, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **32(5)**, 400-408(in Korean with English abstract).
- Suh, J. H., 1985, A study on the application of the Spectral IP method in the mineral prospecting, 90p(in Korean with English abstract).
- Suh, J. H., Jung, H. K., Yoo, H. J., and Cho, I. K., 1985, Spectral IP response of synthetic ores, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **22(5)**, 326-334(in Korean with English abstract).
- Suh, J. H., and Jung, H. K., 1985, Interpretation of spectral IP data using Cole-Cole model, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **22(4)**, 301-309(in Korean).
- Yoo, H. J., and Suh, J. H., 1986, A study on the spectral IP responses for domestic coal measures, *J. Korea Inst. Mineral Mining Eng.*, **23(6)**, 371-381(in Korean with English abstract).