철광산 지역에서의 물리탐사 기술 적용 연구

김기연¹ · 오석훈^{2,*}

¹기상청 국립기상연구소, 156-720, 서울특별시 동작구 여의대방로16길 61

²강원대학교 에너지 · 자원공학과, 200-701, 강원도 춘천시 강원대학길 1

A Geophysical Survey of an Iron Mine Site

Kiyeon Kim¹ and Seokhoon Oh^{2,*}

¹National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

²Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

Abstract: DC electrical and electromagnetic survey was applied to evaluate the reserve of an iron mine site. We analyzed the borehole cores and the cores sampled from outcrops in order to decide which geophysical method was efficient for the evaluation of iron mine site and to understand the geological setting around the target area. Based on the core tests for specific weight, density, porosity, resistivity and P-wave velocity, showing that the magnetite could be distinguishable by the electrical property, we decided to conduct the electrical survey to investigate the iron mine site. According to previous studies, the DC electrical survey was known to have various arrays with high resolutions effective to the survey of the iron mine site. However it was also known that the skin depth is too shallow to grasp the deep structure of iron mine. To compensate the weakness of the DC electrical method, we applied the MagnetoTelluric (MT) survey. In addition, a Controlled Source MT (CSMT) method was also applied to make up the shortcoming of MT method which is weak for shallow targets. From the DC electrical and MT survey, we found a new low resistivity zone, which is believed to be a magnetite reserve beneath the old abandoned mine. Therefore, this study was confirmed for additional utility value.

Keywords: iron mine, physical properties test, DC resistivity, MT survey, CSMT survey

요 약: 철광산 지역의 매장량 평가를 위해 전기 및 전자탐사 방식의 물리탐사를 수행하였다. 철광산 조사에 적합한 물리탐사 기법을 결정하고 연구지역의 지질정보에 대해 파악하기 위해, 대상 지역의 시추 코어와 노두 파편으로부터 획득한 암석 코어를 분석하였다. 획득한 코어에 대해 비중, 밀도, 공극률, 비저항, P파 속도 등 5가지 물성을 측정하고, 자철광체가 전기적 특성에 민감하게 반응한다는 것을 확인하고 전기 탐사를 수행하기로 결정하였다. 전기비저항 탐사는 기존의 연구들을 통해서 적용 기법들이 다양하고 해상도 또한 높은 편이 알려져 있어 철광산의 조사에 적합할 것으로 판단되었으나, 심부에서는 해상도가 낮으며 탐사의 수행도 어렵다는 한계를 가지고 있다. 이에 전기비저항 탐사를 보완하기 위해 물리탐사법 중 비교적 깊은 탐사심도를 가지는 MT (MagnetoTelluric) 탐사를 추가적으로 수행하였다. 또한 MT 탐사의 천부 정보에 대한 취약성을 보완하기 위해 인공송신원을 사용하는 CSMT (Controlled Source MT) 탐사를 추가적으로 실시하였다. 전기 및 전자탐사를 통해 채광이 이루어진 광산 하부에 저비저항체가 있음을 발견하였으며, 향후 추가적인 이용 가치를 확인하였다.

주요어: 철광산, 물성 시험, 전기비저항탐사, MT 탐사, CSMT 탐사

*Corresponding author: gimul@kangwon.ac.kr

Tel: +82-33-250-6258

Fax: +82-33-250-5550

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

최근 세계적으로 자원 확보가 큰 화두로 떠오르면서 국내에서도 기존 광산들의 재평가 및 재개발이 속속들이 이루어지고 있다. 본 연구의 연구지역은 과거 국내 최대의 철광산이었으나, 폐광 이후 현재 재개발을 진행하고 있다.

광산의 재개발을 위해서는 현재 잔존하는 광체의 위치와 그 부존량에 대해서 알아야만 한다. 이 때 필요한 광체의 정보는 과거에 실시했던 시추공과 개발하면서 남긴 기록들이 전부이다. 재개발을 준비하면서 광산지역의 노두가 있는 곳을 중심으로 추가적인 시추를 진행하고 있지만 고가의 비용과 한정된 지역의 자료만을 가지는 시추공의 특성상 앞으로의 광산 개발을 계획하기에는 무리가 따르게 된다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해서 물리탐사를 실시하여 시추공간의 지질정보를 추가적으로 획득함으로써 광산의 개발계획 수립에 많은 도움이 될 것이다.

본 연구에서는 자철광체의 탐사에 앞서 연구지역에 알맞은 탐사법을 결정하기 위해 연구지역에서 채집한 노두 파편을 코어로 제작하고, 추가적으로 가장 최근에 시추했던 시추코어들을 이용하여 물성 시험을 실시하였다. 물성 시험을 통해서 결정한 물리탐사 기법은 전기비저항탐사와 자기지전류(MagnetoTelluric) 탐사이다. 따라서 본 연구에서는 이 두 종류의 탐사를 수행하고 복합해석하였다. 기본적으로 자철 광체는 강한 자성을 가지고 있으며 전기가 잘 흐르는 특성을 보여준다. 따라서 전기비저항탐사를 수행할 경우 자철 광체와 비자철 광체의 구분이 비교적 명확할 것으로 판단된다. 하지만 전기비저항탐사는 천부에서는 자료의 해상도가 높은 편이지만, 심부에서는 해상도가 낮아 자료의 신뢰도가 떨어진다. 이러한 점을 보완하기 위해 수행한 것이 MT(MagnetoTelluric) 탐사이다. MT 탐사는 자연적 전자기장을 이용하여 지하의 전기비저항을 측정하며 전기비저항탐사에 비해서 탐사심도가 깊은 편이다. 따라서 전기비저항탐사를 수행하였을 때보다 심부의 비저항 양상을 파악 가능하며, 전기비저항탐사를 수행하기 어렵거나 더 깊은 심도의 자료가 요구될 경우에 적극 활용할 수 있다. 하지만 반대로 천부에서의 탐사결과는 비교적 신뢰도가 떨어진다. 이유는 MT 탐사의 에너지원인 지전류가 매우 약하기 때문으로 이러한 한계를 극복하기 위해서 CSMT 탐사를 병행하였다. CSMT(Controlled Source MT) 탐사는 인공적인 전자기장을 이용하기 때문에 보다 고주파수를 이용, 천부 탐사에도 효과를 나타낸다. 이 연구에서는 MT 탐사와 CSMT 탐사의 측정 결과를 모두 사용하기 위해 두 탐사 결과의 신뢰도 높은 부분만을 결합하여 하나의 주파수로 가공하였으며 이 자료를 이용해 역산을 수행하였다.

연구지역은 기존의 광산 개발을 통해서 얕은 심도에 위치한 광체들은 이미 생산이 되었다고 판단하고 있으며, 이로 인해 새로운 광체의 부존 위치에 대해 파악하는 것이 시급하다고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 MT 탐사를 적극 활용함으로써 현재 생산 중인 광체보다 깊은 심도에 위치해 있는 새로운 광체의 부존 위치 및 가능성을 확인하는 것이 주목적이라고 할 수 있다.

연구지역의 지질 자료

연구지역은 양양 115 광구와 양양 116 광구의 경계에 위치해 있다. 양양 지역의 지질은 선캄브리아인 편마암류와 변성퇴적암류/변성화산암류, 변성염기성암류, 시대미상의 섬장암(반정질 엽리상, 반정질 괴상, 엽리상, 괴상), 그리고 쥐라기 흑운모 화강암과 반화강암질/페그마타이트질 화성암이 관입하고 있다. 철광체는 주로 변성퇴적암류/변성화산암류 내의 변성염기성암류에 속한 각섬암과 감섬석-흑운모 편암을 따라 배태되고 있으며, 광체 하반을 따라 변성퇴적암류/변성화산암류, 변성염기성암류 및 섬장암이 전반적으로 조화적인 관계로 보고되고 있다(Lee, 1979). Fig. 1은 양양 지역의 지질도로서 철 광상은 변성염

Fig. 1. Geological map of Yangyang area. The red box indicates the study area.

Fig. 2. Correlations among rock physical properties: (a) Resistivity-Density (b) Porosity-Density (c) Resistivity-Porosity (d) Density-Specific gravity (e) P-wave velocity-Density.

기성암류에 부존하고 있다(Choi et al, 2010). 지질도 안에 있는 사각형은 본 연구의 연구지역을 나타낸 것이다.

양양 지역에는 약 20개의 철광체가 존재하는데 연구지역내에서 확인되는 광체는 논화광체, 양논광체, 양양광체, 수강광체 및 도목광체로 크게 5가지로 분류할 수 있으며, 이 광체들은 다시 크고 작은 여러 개의 광체로 이루어져 있다. 그중에서도 양양광체, 수강광체, 양논광체가 주요 광체이다.

암석코어 물성 시험

본 연구에서 목표로 하고 있는 광물은 자철광체로서 일반적으로 전자기적인 반응에 민감하다고 알려져 있다. 또한, 물리탐사 수행 결과는 지하 물성들의 특성을 복합적으로 반영하기 때문에 연구지역 암석들에 대한 물성 연구는 현지 암반의 일반적인 상관관계를 파악하고 현지에서 실시할 물리탐사 기법 적용성에 타당성을 부여할 수 있다. 이러한 물성 시험을 위하여 본 연구에서는 연구지역에 위치한 노두에서 암석

을 채취하고 코어 시료를 제작하였다. 코어 시료의 개수는 총 22개로써 각각의 위치에서 채취한 암석 중에서 연구지역의 대표 암석인 섬장암과 편마암, 광체 등을 적절히 분배하였다. 이와 함께 재개발 준비를 위해 2010년과 2011년 시공한 시추 코어를 추가적으로 획득하여 5가지 물성(밀도, 공극률, 함수율, 전기비저항, P파 속도)을 측정하였다.

각기 구해진 물성은 단순히 수치로 판단하기보다는 각 물성들간의 영향을 파악하기 위해 상관관계 그래프로 나타내었다(Fig. 2). Fig. 2a는 측정한 코어의 비저항과 밀도의 상관관계에 대해서 나타낸 것으로써, A군은 비저항 10^3 - $10^4 \Omega m$, 밀도 2.50 - $3.20 g cm^3$ 의 값을 가지고 있으며 섬장암과 편마암, 광화대 등으로 구성되어 있다. B군은 10 - $10^3 \Omega m$, 3.20 - $4.25 g cm^3$ 값을 가지며 자철광체로 이루어져 있다. 대부분이 A군에 집중되어 있는데 이는 시험에 사용된 코어가 자철광체보다는 섬장암과 편마암 등이 더 많기 때문으로 파악되며 밀도가 증가할수록 비저항 수치도 증가하고 있다. B군의 경우 자철광체로 이루어져 있으며 비저항이 낮아질수록 밀도값이 증가하는 양상을 보이고 있다. 이러한 반비례적인 경향으로 미루어 볼 때 자철광체는 비자철광체에 비해 밀도가 크며 비저항이 낮다는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 2b는 공극률과 밀도의 상관관계 그래프로써 A군은 대부분의 코어의 공극률이 1% 이하로 존재하고 있으며 극히 일부만 1%를 상회하고 있다. 이 A군은 미세하지만 밀도가 증가할수록 공극률이 낮아지는 모습을 보여준다. B군은 A군과 반대로 밀도가 증가할수록 공극률이 증가하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 2c는 비저항과 공극률의 상관관계 그래프이다. A군과 B군 모두 비저항대역에서 큰 차이를 가지지만 밀도가 증가할수록 전기비저항이 낮아지는 경향을 보이며 특히, 자철광체인 B군의 경우 그 정도가 더 크게 나타나고 있다. Fig. 2d는 밀도와 비중의 상관관계이며 두 물성이 일정하게 비례하는 모습을 보여줌으로써 물성 측정이 정상적으로 이루어짐을 확인 할 수 있다. Fig. 2e는 밀도와 P파 속도의 상관관계 그래프이다. 이론상으로 밀도와 P파 속도 간에는 상관관계가 좋아야 하지만 실제 시험 결과에서는 특별한 상관관계를 발견하지는 못하였다. 이러한 이유로는 밀도와 P파 속도의 상관관계를 분석하기에는 표본의 수가 적었기 때문으로 추측해 볼 수 있다. 추가적으로 물성 시험에 사용한 시추 코어의 경우 제작된지 상당 기

간이 지났기 때문에 초기의 코어 물성과 현재의 물성에 차이가 있을 것으로 판단된다.

연구지역의 코어 물성 시험 결과, 자철광체는 비자철광체와 비교하였을 시에 전기비저항 특성에 대해서 매우 민감한 반응을 보여주는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 전기비저항과 밀도가 반비례하는 성향을 보여주고 있다. 하지만 P파 속도 분석에서는 자철광체와 비자철광체의 구분 없이 각기 다른 양상을 보여주었다. 물성 시험 결과들을 종합해 볼 때, 연구지역에서는 전기적, 자기적 반응과 밀도에 대해 고려할 수 있는 기법을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 탐사기법에는 전기, 전자탐사 기법과 중력 탐사 기법이 있다. 이 연구에서는 국내에서 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 전기, 전자탐사 기법을 적용토록 하였으며, 그중에서도 전기비저항 반응을 이용하는 전기비저항탐사와 MT 탐사를 수행하였다.

물리탐사 자료 획득

전기비저항탐사

전기비저항탐사에는 스웨덴 ABEM사의 Terrameter LS 장비를 사용하였으며, 쌍극자 배열(Dipole-Dipole Array)을 적용하였다. 국내에서의 전기비저항탐사는 지하 매질의 전기비저항이 외국에 비해 매우 높기 때문에 전기비저항 측정 시 전위차가 매우 크게 나타난다. 이러한 이유로 인해 국내에서는 전기비저항탐사를 수행할 때 주로 쌍극자 배열을 이용한다. 쌍극자 배열은 널리 알려진 웨너 배열, 슬럼버저 배열 등에 비해 분해능이 더욱 뛰어나며 수평 및 수직 방향의 2차원 탐사에 유용히 사용된다. 다만, 신호 대 잡음비가 상대적으로 낮기 때문에 주변에서 발생하는 잡음의 영향을 받기 쉬우므로 탐사 중에 염두에 두어야 한다. 연구지역에서 수행한 전기비저항탐사의 측선은 총 9측선으로써 세부사항은 Table 1과 같다.

Fig. 3은 연구지역내 설계한 각 측선의 위치를 보여주고 있다. 가장 먼저, a-a', b-b' 측선은 과거의 채굴적으로 인해 지반 붕락이 발생한 곳으로써 10m 간격의 두 측선을 교차시킴으로써 천부의 전기비저항 양상을 파악하고자 하였으며, 특이사항으로는 지표에 광미가 얇게 깔려있어 천부의 전기비저항은 다소 낮을 것으로 예상된다. b-b' 측선은 붕락지역을 측정한 a-a', d-d' 측선을 가로질러서 설정하였다. 이 측선과의

Table 1. Details of DC resistivity survey

Line	Spacing (m)	Length (m)	Line	Spacing (m)	Length (m)
a-a'	10	200	f-f'	20	400
b-b'	10	200	g-g'	10	200
c-c'	10	200	h-h'	5	100
d-d'	20	400	i-i'	5	100
e-e'	20	400

Fig. 3. Satellite map of study area. Grey lines indicate the DC resistivity survey lines, Blue dots and lines indicate boreholes and their directions.

비교를 통해서 봉락지역에 대해 더욱 정밀한 지하구조를 추측할 수 있다. c-c' 측선은 a-a' 측선의 끝에서 연장되어 10-3공과 10-4공, 11-4공의 진행방향과 동일 선상으로 진행함으로써 전기비저항탐사 결과를 시추 결과와 비교할 수 있도록 하였다. d-d' 측선은 사실상 a-a' 측선과 c-c' 측선을 합친 것으로써 단일 측선으로는 얇은 심도의 자료만을 얻기 때문에, 그 이상의 심도 구조를 파악하기 위해서 400 m의 장거리 측선을 설정하였다. e-e' 측선은 다른 측선들이 115광구에 위치해 있는 것과 다르게 116광구에 위치해 있다. 이유는 과거 70-80년대에는 116광구에서도 많은 시추가 이루어졌으며 이곳으로 갱도 굴착이 이루어졌다. 따라서 이곳의 현재 잔존 광체가 남아있는지 확인하기 위한 측선 설계이다. f-f', h-h', i-i' 측선은 과거부터 현재까지 시추공이 존재하지 않는 곳으로써, 지질탐

사를 통해서 노두의 위치는 확인된 상태이다. 따라서 이곳에서 탐사를 수행하여 지하구조에 대한 정보를 획득하고 향후, 시추 시 물리탐사 자료와 실제 시추 자료와 비교 분석이 가능할 것으로 판단된다. g-g' 측선은 f-f' 측선을 가로지르는 측선으로써 진행방향 하부에는 과거 생성된 갱도가 연장되어 있어, 잔존 광체에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

MT 탐사

MT (MagnetoTelluric) 탐사는 광대역에 걸친 지하구조의 주파수영역 전자반응을 얻을 수 있는 지구물리탐사법의 일종으로 자연 전자기장의 변동을 송신원으로 하여, 지열, 석유 등 심부자원 탐사 및 지각구조 연구 등에 이용되는 방법이다(Vozoff, 1991). MT 탐사 수행에 앞서 전기비저항탐사를 실시하였지만, 전기비저항탐사만으로는 얻을 수 있는 심부자료에 한계가 있기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위해 MT 탐사를 수행하였다.

MT 탐사에는 0.1 Hz-100 kHz의 주파수대역을 측정할 수 있는 한국 Sekogeo사의 CONEM 장비를 사용하였으며, 가청주파수(audio-frequency) 대역에서 측정이 이루어졌다. 일반적인 MT 탐사의 주파수 대역은 0.001 Hz-1,000 Hz이며 탐사 심도는 10,000 m 이상이다. MT 탐사보다 높은 주파수 대역을 가지는 AMT 탐사는 0.1 Hz-10 kHz의 주파수 범위를 가진다. 이 경우에는 탐사 심도가 약 1,000 m 정도이다. MT 탐사와 AMT 탐사는 모두 자연장을 송신원으로 하기 때문에 측정 장비 이외의 별도 장비는 필요로 하지 않는다. 하지만 자연송신원 같은 경우는 매우 미약하므로, 특히 고주파수대 영역인 천부에서의 탐사 시에는 어려움을 겪기도 한다. 이러한 단점을 개선하기 위해 사용하는 것이 인공송신원(Controlled Source)이다. CS는 인위적으로 강한 전자기파를 흘려보내면 이를 이용하여 MT 탐사나 AMT 탐사를 수행하여 자연송신원보다 안정적인 천부 자료를 측정할 수 있다. 이러한 것을 CSMT (Controlled Source MagnetoTelluric

method) 탐사 또는 CSMT (Controlled Source Audio-frequency MagnetoTelluric method) 탐사라고 한다(Vozoff, 1991; Zonge and Hughes, 1991). 국내의 지질조건은 다양한 잡음 요인 및 높은 전기비저항으로 인하여 잡음에 의한 영향을 많이 받는 MT 탐사의 특성상 적용성이 상대적으로 낮은 것으로 알려져 왔으나 Song et al. (1992)에 의해 잡음이 약한 제주도에서 양질의 자료가 획득된 바 있다. 또한, 최근에는 인공송신원을 이용하는 CSMT 탐사법이 개발됨에 따라 대지의 전기비저항이 북미나 유럽지역에 비해 매우 높은 국내의 경우에도 적용회수가 점차 증가하는 추세이다(Song et al., 2002).

일반적으로 인공송신원은 전기양극자가 사용되지만 최근에는 루프 송신원을 적용한 CSMT법이 사용되고 있다. 이 방법은 전기양극자 대신에 루프 송신원을 사용하기 때문에 송신원이 평면파라는 가정을 만족하므로, 완벽하지는 않지만 근거리장 효과(near field effect)가 완화된다는 장점이 있다. 이번 연구에서는 루프 송신원을 이용한 CSMT와 MT 모두 측정된 후 이 두 자료를 복합 사용하였다.

연구지역에서의 MT 탐사의 측점은 총 37 측점이며, 기본적으로 시추공 자료가 있는 곳으로 선정하였으며 시추공 진행방향에 맞추어서 설정하였다(Fig. 3). 이 연구지역은 과거에 생산을 하다 폐광 후 다시 재개발에 들어가는 곳이기 때문에 기존의 시추공과 최근 다시 재개발을 위해 시공한 시추공이 상당히 많이 존재한다. 따라서 시추공에서 얻은 광화대와 광체 자료를 MT 탐사 자료와의 비교를 통해 그 정확도를 가늠해볼 수 있다. 또한, 최근에 시공한 시추공 같은 경우에는 대부분이 경사시추이기 때문에 시추공 시작 지점과 끝나는 지점의 거리가 상당하다. 이러한 이유로 실제 광화대 및 광체가 발견된 지점은 시추공 시작 지점과의 수평거리로 최소 25 m, 최대 195 m에 이른다. 따라서 경사시추 부분에서는 측점이 아닌 측선을 설정하여 공 시작 지점과 광화대나 광체가 발견된 부분의 수직 상부 부분에서 MT 탐사를 수행하였다. 측선 진행방향에 사용된 시추공은 모두 경사시추공으로써 2010년 이후 시공된 10-3공, 10-4공, 10-6공, 11-1공, 11-2공, 11-3공, 11-4공 등 총 7개의 측선을 설정하였으며, 나머지는 모두 각 측점 자료이다. 각 측점 자료는 인근의 시추 자료를 고려함은 물론 과거 광산 운용시 작성된 채광기록을 참고 하였다.

물리탐사 자료 처리

전기비저항탐사

연구지역에서 총 9개의 탐사 자료를 획득하였으며, 지질자원연구원에서 개발된 전기비저항탐사 해석 프로그램인 DIPRO 프로그램을 이용하여 역산을 수행하였다. 기존에 사용되던 역산법은 평활화 제한을 가한 최소자승 비선형 역산(Nonlinear least-square inversion with smoothness constraint)에 기초하였으나, 기존 역산법보다 더 높은 분해능을 보여주는 새로운 최소자승 역산법인 ACB(Active Constraint Balancing Method) 기법(Yi and Kim, 1998)이 사용되었다. 이와 함께 지형적 요소를 고려 할 수 있는 유한요소법을 함께 적용하였다.

전기비저항탐사 결과를 살펴보면 각 측선이 교차되도록 설계된 부분에서는 비저항 분포가 거의 일치하는 것으로 나타나며, 이러한 결과를 통해 정상적인 탐사결과를 얻었다고 할 수 있다. 양양 115광구와 116광구의 경계면에서 측정된 a-a', b-b', c-c', d-d' 측선들을 비롯하여 나머지 모든 측선들에서 저비저항대역이 나타나지만, g-g' 측선(Fig. 4)을 제외하고는 모두가 광체의 영향이라고 판단하기에는 무리가 있으며 대체로 고비저항대역이 나타난다. 따라서 추가적인 광체 탐사를 위해서는 보다 깊은 심도의 탐사가 요구되기 때문에 전기비저항탐사와 마찬가지로 전기비저항을 측정하며 보다 깊은 탐사 심도를 가지는 MT 탐사를 수행하기로 하였다.

MT 탐사

Lee et al. (2006)은 연구에서 주파수 대역대가 다른 MT 탐사와 AMT 탐사의 측정 결과를 결합하여 보다 넓은 주파수 대역 및 자연스러운 전기비저항·위상의 수직탐사 곡선을 타내었다. 본 연구에서는 Lee et al. (2006)의 방법을 응용하여 MT 탐사와 CSMT 탐사의 측정 결과 중 신뢰도 높은 부분만을 이용하여 하나의 곡선으로 결합하였다. 이는 기본적으로 측점, 전극간격 등의 측정조건이 동일하기 때문에 가능하다.

Fig. 5는 연구지역의 지질도에 MT 탐사 측점을 나타낸 것이다. 지질도상에서 측점이 가장 많이 위치한 녹색 부분은 변성퇴적암/변성화산암류이며, 분홍색 부분은 섬강암, 좌측 외곽의 갈색 부분은 편마암을 나타낸다. 탐사 측점은 각 구역별 특성에 맞추어 Zone

Fig. 4. Subsurface structure along g-g' line imaged by DC electrical survey.

Fig. 5. MT survey stations on geologic map. The pink area indicates the syenite, brown area indicates the gneiss, green area indicates metasediments and metavolcanic rocks.

A, Zone B, Zone C 의 3 구역으로 나누었다.

MT 탐사의 자료처리는 각 측점에서의 깊이에 따른 전기비저항 양상을 파악하기 위하여 기본적으로

1차원 역산을 수행하였다. 이에 적용된 역산 방법은 평활화 제약을 가한 Occam 역산 방법(Constable et al., 1987; deGroot-Hedlin and Constable, 1990)이다.

Fig. 6. 1-D MT inversion results in Zone A.

Occam 역산은 지하의 물성변화가 매우 부드럽게 변한다는 가정을 토대로 하고 있으며, 가장 부드러운 모델을 사용하여 관측 자료를 해석하는 방법이다. 하지만 이런 일반적인 역산 알고리즘은 수행 과정에서 매우 큰 행렬의 계산을 필요로 하기 때문에 많은 시간이 소요된다(Kwon et al, 2003). 이 연구에서는 Occam 역산 방법 중에서도 creeping 기법을 적용하였으며, iteration 횟수는 15회로 모두 동일하게 설정하였다.

Zone A (Fig. 6)는 과거 채광기록이 없는 곳으로써 새로운 광체 탐사를 위해 2011년도에 경사 시추공을 시공한 곳이다. 이곳에 속해 있는 탐사 측정점의 개수는 총 11개로써 모두 시추공의 진행방향에 맞추어 측정을 하였으며 탐사 측정점 및 역산결과는 Fig. 6과 같이 나타났다. Telford et al. (1990)이 정리한 광물과 암석의 전기비저항 표에 의하면 자철석의 비저항 범위는 $5 \times 10^{-5} \sim 5.7 \times 10^3 \Omega\text{m}$ 이다. 하지만 물성 시험에서 얻은 결과에서는 순수 자철광체의 경우 비저항이 $100 \Omega\text{m}$ 미만으로 매우 낮게 나타났으며 편마암과 혼재된 자철광체의 경우에는 비저항이 약 $700 \Omega\text{m}$ 가량으로 나타난다. 따라서 이 연구에서는 자철광체의

기준으로 $700 \Omega\text{m}$ 을 설정하였다. 각 측정점은 노란색, 초록색, 회색, 검은 색으로 표시되어져 있으며 이는 1D역산 결과 분석을 통해 분류해 놓은 것이다. 지질도에서 노란색 측정점(YA_03, YA_06, YA_07, YA_08, YA_09, YA_10, YA_11)은 $700 \Omega\text{m}$ 이하의 저비저항대가 해발고도 기준으로 지하 300 m 이내에 위치할 경우, 초록색 측정점(YA_02, YA_05)은 $700 \Omega\text{m}$ 이하의 저비저항대가 해발고도 기준으로 지하 300 m 이상 심부일 경우, 검은색 측정점(YA_04)은 $700 \Omega\text{m}$ 이하의 저비저항대가 300 m 이내와 이후에서 골고루 나타나는 경우를 말한다. 다만, 회색 측정점(YA_01)의 경우 심도가 깊어질수록 비저항이 증가하여 $1,000 \Omega\text{m}$ 이상의 고비저항을 가진다. 고도 기준을 해발고도 기준 지하 300 m로 나눈 것은 과거 철광산을 개발함에 있어 발견되었던 광체들은 대부분이 해발고도 지하 300 m 이내에 위치해 있기 때문이다. 현재에는 과거 개발이후에 남은 잔존광체를 생산하고 있는 중이지만 이후에도 지속적인 생산을 위해서는 더 깊은 심부광체의 탐사 및 개발이 매우 중요하기 때문에 MT 탐사를 수행하게 되었다.

Zone A의 지질은 주로 섬장암으로 이루어져 있

며, 가운데를 변성퇴적암/변성화산암류가 관입한 형태이다. Telford et al. (1990)에 의하면 섬장암은 10^2 - $10^6 \Omega m$ 의 비저항대역을 가지며 연구지역에서 획득한 코어의 물성 시험에서도 10^2 - $10^4 \Omega m$ 대역의 비저항을 보여준다. Zone A의 시추결과에 따르면 이 지역에서는 고품위의 광체가 발견되지는 않았지만 천부에서 저품위의 광화대가 일부 발견되었다. 광화대 코어의 비저항 측정결과가 섬장암과 비슷한 $10^3 \Omega m$ 정도로 나타나기 때문에 광체와의 비저항 차이는 명확하다. 따라서 광화대와 섬장암간의 구분은 어렵지만 광체와의 구분은 확실히 할 수 있다.

11-1공 입구에서 측정한 YA_01 측정점의 역산 결과에서는 $700 \Omega m$ 이하의 저비저항대는 존재하지 않는 것으로 나타났다. 하지만 시추공 진행방향인 YA_02 측정점에서는 지하 300 m 이상 고심도에서 반응이 나타난 반면 YA_03 측정점에서는 지하 300 m 이내에서 반응이 나타났다. 11-2공에 위치한 YA_04 측정점과 YA_06 측정점에서는 300 m 이내, YA_05 측정점에서는 500 m 이상의 심부에서 저비저항이 나타났다. 11-3공 진행방향에서 측정한 YA_07, YA_08, YA_09 측정점에서 모두 300 m 이내의 얕은 심도에서 저비저항대역이 나타났다. YA_10 측정점과 YA_11 측정점은 기존의 시추기록이 전혀 없는 곳으로써 2011년도에 새로 시추공을 시공한 지역과 과거의 기록이 많이 남아있으며 현재에도 지속적인 개발이 이루어지고 있는 Zone B 사이에 위치하고 있다. 11-3공의 진행방향에 연장선상으로 위치하고 있는 YA_10 측정점과 YA_11 측정점에서는 지하 300 m 이내에서 저비저항대역이 나타났지만 이러한 저비저항이 심부까지 계속 이어지고 있다. 다만, 저비저항대역이 다른 측정점에 비해서 매우 얇은 부분에서 나타나는데 이는 측정점의 위치가 산골짜기 깊숙한 곳에 위치하여 지난 겨울의 낙엽이 그대로 쌓여 있고 오랜 장마로 인해 매우 습하였다. 또한, 측정 인근에서 실시한 전기비저항탐사 i-i' 측선, h-h' 측선의 역산결과와 지질도 상의 위치를 종합해 보았을 때 이 지역 천부의 반응은 비저항이 다소 낮은 섬장암의 영향으로 판단해 볼 수 있다.

지질정보와 역산 결과를 종합해보면 Zone A 지역은 아직까지 직접적인 개발이 이루어진 적이 없는 곳으로써 대부분의 측정점에서 지하 300 m 이내의 심도에서 저비저항대가 나타났다. 또한, YA_07, YA_10, YA_11 측정점에서는 천부뿐만이 아니라 심부에서도 저비저항대가 나타나는 것을 확인하였다. 이

러한 결과를 볼 때, Zone A 지역은 천부에 광체의 부존가능성이 있다고 추측해볼 수 있다. 다만, 시추결과와 탐사 결과에 어느 정도 차이가 발생하는데 이는 2011년도에 시공한 시추공은 모두 경사 시추이며 그 심도가 MT 탐사에 비해 낮기 때문이라고 판단해볼 수 있다. 따라서 정확한 부존여부를 판단하기 위해서는 추가적인 조사가 필요하다.

Zone B에서는 모두 15개의 측정점에서 탐사를 수행하였으며 모두 변성퇴적암/변성화산암류 지질 위에 위치해있다. 양양 지역의 지질 조사 결과, 이 변성퇴적암/변성화산암류에 철광체가 주로 배태되는 만큼 과거 이 지역에서 고품위 철광석이 생산되었다. 70-80년대 시추 기록을 보면 지하 300 m 이내의 깊이 않은 심도에서 고품위의 광체가 상당량 발견되었다. 이러한 결과를 토대로 폐광이전 광산 개발 시에는 Zone B에서 철광의 생산이 이루어졌으며, 재개발중인 현재에도 이 지역에서는 남아 있는 잔광체를 생산하고 있다. 하지만 얕은 심도에 위치한 철광체가 점점 줄어들고 있으므로, 지속적인 개발을 위해서는 보다 깊은 심도에 위치하는 철광체를 개발해야만 한다. 따라서 Zone B에서는 과거 광체가 가장 많이 발견된 4개의 시추공을 중심으로 하여 고심도에서의 광체탐사를 목표로 측정점을 설계하였다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 모두 Zone B에서의 탐사측점과 역산결과를 도시한 것으로서, 저비저항대의 위치에 따라서 나누었다. 먼저 Fig. 7(a)의 경우 9개의 측정점과 1D역산 그래프를 나타내고 있으며 이 측정점들은 모두 해발고도 기준 지하 300 m 이상의 심부에서 저비저항 반응을 보여주고 있다. Fig. 7(b)에는 나머지 6측점이 나타나 있다. 이중 YA_19, YA_20 측정점은 저비저항대의 시작 부분이 해발고도 지하 250 m 부근이기 때문에 천부반응으로 볼 수도 있겠지만 저비저항대는 그 이후에도 계속되므로 실제로는 심부반응이라고 판단하였다. YA_34 측정점은 매우 얇은 곳에서 반응이 나타난 경우로서 해발고도 170-210 m에서 저비저항대역이 나타난다. YA_26, YA_28 측정점에서는 얇은 심도와 깊은 심도에서 모두 저비저항대역이 나타난다. 모든 측정점에서 저비저항대역이 나타났지만 YA_35 측정점에서는 $1,000 \Omega m$ 이상의 고비저항대가 나타났다.

종합해보면 Zone B에서는 거의 모든 측정점에서 저비저항대역이 나타났지만 대부분이 해발고도 기준 지하 300 m 이상의 심부에서 나타났다. 이러한 결과를

Fig. 7(a). 1-D MT inversion results in Zone B.

Fig. 7(b). 1-D MT inversion results in Zone B.

볼 때, 현재 얕은 심도에 위치한 광체는 거의 남아 있지 않으며 탐사 결과로 보아 깊은 심도에는 광체

가 존재할 가능성이 충분히 높다고 할 수 있다. Zone C (Fig. 8)는 Zone B의 하부에 위치해 있으

Fig. 8. 1-D MT inversion results in Zone C.

며 변성퇴적암/변성화산암류와 섬장암이 고루 분포해 있는 지질이다. 이곳에는 2010년도 시추공 10-3공, 10-4공, 10-6공. 그리고 2011년도 시추공 11-4공이 존재한다. 이 시추공들은 모두 경사시추공으로써 심도는 250-440 m 등으로 다양하며 모든 시추공에서 광체 및 광화대가 나타났다. 변성퇴적암/변성화산암류로 이루어진 곳은 과거 노천채굴 이후에 지하 갱내 채굴이 이루어진 곳으로써, 이후 대규모 붕락이 발생했던 지역이므로 얇은 심도 보다는 깊은 심도에서 저비저항대역이 나올 것이라 예측해 볼 수 있다. 하지만 광산 개발이 이루어지지 않았던 섬장암 지역과 변성퇴적암/변성화산암류 외곽부분에서는 여전히 얇은 심도에서 저비저항대가 나타났다. YA_36, YA_37 측점은 섬장암 지역에 위치해 있으며, 10-6공 진행방향 인근에 위치해 있다. 두 측점은 비저항이 계속 증가하는 형태를 보이다 중간에 해발고도 30m 부근에서 저비저항대를 보이고는 다시 심부까지 계속해서 증가하는 양상을 보여준다. YA_16, YA_17, YA_23 측점은 모두 섬장암 지역에 위치해 있지만 얇은 심도에서는 반응이 없고 심부에서 저비저항대역이 나타나는 것으로 보아 지하 깊은 곳에서 변성퇴적암/변성화산암류가 연결되어 있음을 짐작해볼 수 있다. YA_30, YA_39 측점의 경우 변성퇴적암/변성화산암

류 지역에 있지만 얇은 심도에서 저비저항대역이 나타나고 있다. 이 지역이 집중적으로 광산이 개발된 곳이라고 생각해보는 때 이러한 반응은 아직 남아 있는 잔광체 또는 공동일 가능성이 높다. 하지만 광체 생산 후 공동은 붕괴방지를 위해 폐석 등을 이용하여 뒤채움하게 되어 있기 때문에 잔광체쪽으로 생각해 볼 수 있다. YA_14와 YA_29 측점은 모두 얇은 심도와 깊은 심도 2번씩 저비저항대역이 나타난다. YA_32 측점의 경우에는 변성퇴적암/변성화산암류와 섬장암 지역의 경계에 위치해 있으며, 얇은 심도에서는 반응이 없지만 심부에서 저비저항대가 나타난다. YA_13과 YA_15의 경우 역산 그래프상에서는 비저항이 급격히 떨어지는 현상이 나타나지만 기본적인 비저항이 매우 높게 나와서 가장 낮을 때의 비저항대역이 $10^3 \Omega m$ 이므로 광체가 아닐 것으로 판단할 수 있다. 다만, 두 측점 모두 변성퇴적암/변성화산암류 지질상이거나 인근에 위치해 있기 때문에 광화대가 존재할 가능성은 배제할 수 없다.

Zone C에서는 과거 광산이 집중적으로 개발되었던 지역이었던 만큼 얇은 심도에서의 전기비저항 반응이 상대적으로 적었다. 그러나 YA_30, YA_39 측점의 경우는 얇은 심도에서도 저비저항대역이 나타났는데 이는 잔광체의 영향일 것으로 판단 할 수 있다.

복합해석

전기비저항탐사와 MT 탐사는 기본적으로 탐사 매질의 전기비저항을 측정하는 것으로서 그 결과는 서로 일치해야 한다. 하지만 지전류를 이용하는 MT 탐사와 인공송신원을 통해 원거리 전파를 이용하는 CSMT 탐사의 특성상, 직접적으로 전류를 흘려주는 전기비저항탐사에 비해서는 극천부에서의 탐사 결과 정확도가 떨어진다고 할 수 있다.

본 연구에서 수행한 탐사의 측선 및 측정 설정은 시추공을 기준으로 하여 설정하였으며, 전기비저항탐사의 측선과 MT 탐사의 측점이 일치되는 부분도 상당수 존재하여 두 자료의 비교를 통한 해석이 가능하게끔 하였다(Fig. 3). Zone A에는 11년도 시추공이 4공 존재하고 있으며 그중 11-1공과 11-2, 11-3공의 진행방향을 기준으로 MT 탐사를 수행하였다. 근방의 전기비저항탐사 측선으로는 h-h' 측선과 i-i' 측선이 있으며, 골짜기 쪽에 위치한 MT 탐사 측정점과 비교를 해 볼 수 있다. 이 지역에서는 대부분의 측점이 얇은 심도에서 저비저항 반응이 나타났으나, 골짜기 부근에서는 고비저항대가 나타나는 경향을 보였다. 하지만 심부에서는 저비저항대가 나타나난다. Zone B에서는 과거 철광산을 폐광 시까지 생산 중이던 지역으로써 현재 재개광 이후에도 이곳에서 남은 잔광체를 생산하고 있다. 따라서 얇은 심도에는 철광이 이미 존재하지 않을 것으로 판단하였으며, 실제로 대부분의 측정점에서도 깊은 심도에서 전기비저항 반응이 나타났다. 다만, YA_26과 YA_28 측정점에서는 심부뿐만 아니라 천부에서도 저비저항대 반응이 나타났는데 이는 가까이 있는 전기비저항탐사 g-g' 측선(Fig. 4)을 확인해도 동일한 반응이 나타난다. 이러한 결과를 토대로 하여 Zone B에서는 해발고도 기준 300 m 이상의 고심도에는 철광체가 부존할 가능성이 높으며 얇은 심도에는 잔광체가 일부 남아 있는 것으로 판단할 수 있다. Zone C에서 전기비저항탐사 d-d' 측선에서는 과거 붕락이 일어난 지점에서 천부의 일부에서 저비저항대역이 나타나기도 하지만 대부분이 고비저항대역을 보여주었다. 마찬가지로 주변의 MT 측정점과 비교해보면 이는 더욱 명확해진다. d-d' 측선 주변의 MT 측정 역산결과를 보면 대부분 해발고도 기준 지하 300 m 이상의 고심도에서나 저비저항 반응이 나타났지만 얇은 심도에서는 전기비저항값이 높게 나타난다. YA_13과 YA_15의 경우에는 저비저항대역이 없

이 고비저항대역만을 보여준다.

결과들을 통합해보면 연구지역에서는 극히 일부 지역에서만 얇은 심도에서 저비저항대가 나타날 뿐 거의 대부분의 결과가 심부에서 저비저항대역이 나타났다. 이러한 결과는 연구지역의 심부에 철광체가 부존할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 다만, MT 탐사는 전기적 잡음에 취약하기 때문에 주변의 송전탑이나 광산 시설물 등의 영향으로 인해 측정 자료에 다소 잡음이 섞여 있을 수도 있으며 심부로 갈수록 해상도가 떨어지기 때문에 이점 고려해 주어야 한다.

결론

본 연구에서는 재개발중인 철광산에서 현재 잔존하는 광체의 위치 및 부존량에 대한 정보를 얻기 위해 물리탐사를 수행하였다.

연구지역에 적합한 물리탐사법을 알아내기 위해 시추 코어 및 노두 코어를 제작하여 물성 시험을 실시하였으며 그 결과로 자철광체가 전기적 성질에 잘 반응한다는 결론을 내었다. 이러한 결론을 토대로 연구지역에서 전기비저항탐사와 MT 탐사를 수행하도록 하였다.

탐사의 측선 및 측정점은 70-80년대 시공된 시추공과 2010년, 2011년 시공된 시추공을 기준으로 하여 설계하였다. 탐사 결과, 일부 지역에서만 천부의 전기비저항이 낮게 나왔을 뿐, 광산 개발이 가장 활발히 이루어졌던 변성퇴적암/변성화산암류 지질과 주변의 섭장암 지질에서는 거의 대부분 고심도 부분에서 저비저항대가 나타났다. 이러한 탐사 결과는 얇은 심도에 일부 잔광체가 남아 있지만 거의 대부분의 광체는 이미 생산되었다고 할 수 있으며, 깊은 심도 부분의 저비저항 반응으로 보아 깊은 심도에서의 광체의 부존 가능성이 높은 것으로 판단할 수 있다. 하지만 물리탐사 자료의 특성상 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 추가적인 조사가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에 사용된 전기비저항탐사는 가장 많이 사용되는 전기탐사법의 일종으로 지하수, 지열, 광물자원 탐사 등의 많은 연구가 발표되었다. 반면, MT 탐사의 경우 지질학적, 지구물리학적인 연구를 목적으로 수행한 사례는 있지만 철광 등의 광물자원탐사를 목적으로 연구가 이루어진 사례는 전무한 실정이다. 따라서 이 연구에서 MT 탐사를 광산 지역에서 수행

함으로써 차후 MT 탐사를 이용한 광물자원탐사에
유용한 참고자료로 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 기상기술개발원의 연구비 지원(CATER
2012-8020)을 통해 이루어졌으며, 연구비 지원에 감
사를 포함합니다.

References

- Choi, S.G. et al., 2010, Genesis study report of Daehan
iron mine, KORES.
- Constable, S.C., Parker, R.L., and Constable, C.G., 1987,
Occam's inversion: A practical algorithm for generating
smooth models from electromagnetic sounding data.
Geophysics, 52, 289-300.
- deGroot-Hedlin, C., Constable, S., 1990, Occam's inversion
to generate smooth, two-dimensional models from
magnetotelluric data. Geophysics, 55, 1613-1624.
- Kwon, B.D., Lee, H.S., Lee, C.K., Park, G.S., and Oh,
S.H., 2003, Electric and electromagnetic surveys of the
Hongseong fault Zone. Jour. Korean Earth Science
Society, 24, 361-368.
- Lee, S.H., 1979, Ore Petrological Studies on the Genesis
of the Metamorphic Iron Deposits in Southern Korea.
The Journal of the Geological Society. Korea, 15, 210-
229.
- Lee, T.J., Lee, S.K., Song, Y.H., and Uchida, T., 2006, Use
of audio-band on the interpretation of magnetotelluric
data, Mulli-Tamsa, 9, 261-270.
- Song, S.H., Yong, H.H., Kim, J.H., Song, S.Y., and Chung,
H.J., 2002, Hydrogeologic structure derived from
electrical and CSMT surveys in the Chojung area.
Mulli-Tamsa, 5, 118-125.
- Song, Y.H., Cho, I.K., Kim, J.H., Chung, S.H., and Jeon,
J.S., 1992, A magnetotelluric survey in Jeju island-
Electrical and electromagnetic exploration method,
Korea Institute of Geology, Mining&Materials, KR-92-
1G-5, 33-69.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A.,
1990, Applied Geophysics, 2nd edn. Cambridge
University Press, Cambridge, UK.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian,
M.N., (Ed), Electromagnetic method in applied geophysics-
applications, Society of Exploration Geophysics, 2, 641-
711.
- Yi, M.J., Kim, J.H., 1998, Enhancing resolving power of
the least-squares inversion with active constraint
balancing: 68th SEG Annual meeting (USA)
- Zonge, K. L., Hughes, L. J., 1991, Controlled source
audio-frequency magnetotellurics. In Nabighian, M. N.,
(ed), Electromagnetic methods in applied geophysics-
applications, Society of Exploration Geophysics, 2, 713-
809.

2013년 7월 24일 접수
2013년 9월 12일 수정원고 접수
2013년 9월 25일 채택