미얀마 북서부 보피뒀 크롬광화대의 자력 탐사자료 해석

박계순 · 허철호*

한국지질자원연구원 광물자원연구본부 광물자원연구실

Magnetic Data Analysis of the Chromium Mineralized Belt in Bophi Vum area, Northwestern Myanmar

Gyesoon Park and Chul-Ho Heo*

Mineral Resources Department, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약: 보피뒀 지역의 크롬철석 분포 특성 확인을 위해 자력 탐사를 수행하였다. 지표 암석 샘플 조사에서 크롬철석은 주변부에 분포하는 하즈버자이트와 더나이트에 비해 낮은 자기감수율 값을 나타내었다. 자력 탐사 결과, 낮은 자력 이상대 지역과 지표 지질 조사 결과를 통해 확인된 크롬철석 산출지 영역이 잘 부합하고 있으며, 3차원 역산 해석 결과의 저 자기감수율 모델과도 공간적으로 잘 부합하고 있다. 일부 지역에서 지표 조사를 통해 확인된 크롬철석 산출지에서 주변부로 확장되는 저 자력 이상대가 나타나는 것으로 확인되었으며, 이 지역의 자기감수율 분포 특성을 고려하면 이 지역에서 추가적인 광체 확보가 가능할 것으로 해석된다. 추후 이 지역에 대한 정밀 조사가 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 자력탐사, 크롬철석 광화대

Abstract: For analyzing the distribution of chromite, magnetic survey was carried out on the chromium mineralized belt in Bophi Vum area, northwestern Myanmar. As a result, the magnetic susceptibility of chromite is lower than those of dunite and harzburgite, which are background rocks of chromite. Also, the locations of low magnetic anomaly zone and low magnetic susceptibility models of 3D magnetic inversion result are spatially well matched with those of chromite occurrences confirmed by the surface geological survey and trench survey. Some of low magnetic effects are expanded to the periphery area of chromite occurrences. Considering the magnetic susceptibility characteristics of various rocks in this area, the expanded low magnetic anomaly zones are estimated as the high potential areas bearing chromite. For confirming the potential area of chromite pointed by coarse magnetic survey, the additional detail exploration need to be carried out in future.

Keywords: magnetic survey, chromite ore deposit

서 론

희유금속(稀有金屬, rare metal)은 지각 내에 존재량이 적거나 추출이 어려운 금속자원 중 현재 산업적 수요가 있고 향후 수요 신장이 예상되는 금속원소, 또는 극소수의 국가에 매장량과 생산이 편재되어 있거나 특정국에서 전량을 수입해 공급의 위험성이 있는 금속원소로 정의하며, 현재 35종의 금속원소가

정의되어 있다(Choi *et al.*, 2010). 우리나라의 경우 금속광물 자원의 99%를 수입에 의존하고 있어 국제 자원시장 변화에 매우 취약하며, 자원민족주의나 자원무기화시 심각한 경제적 타격을 피할 수 없어 안정적인 자원 확보가 국가 생존과 경제 운영에 직결되어 있다. 그래서 정부는 산업통상자원부를 중심으로 6대 전략광종 외에 10대 중점 확보 희유금속(Li, Cr, Mn, Mo, Co, W, In, REE, Mg, Ti)을 선정하여 자주개발을 제고에 박차를 가하고 있다(한국지질자원연구원, 2013).

미얀마 광물자원 조사사업은 2012년 3월 개최된 제1차 한-미얀마 광물위원회에서 한국지질자원연구원이 미얀마 광업부 산하의 지질조사광물탐사국(DGSE)과 공동으로 미얀마의 희유금속에 대한 공동탐사를 제안했다. 이에 미얀마 지질조사광물탐사국(DGSE)에서 북서부 깔레이에 부존하고 있는 무벨롯 Cr-Ni-PGM 광화대(약 800 km²)를 공동탐사지역으로 제시했고 2012년 2회에 걸쳐 해당 광화대에 대한 예비조사를 거쳐

2014년 7월 10일 접수; 2014년 8월 18일 수정; 2014년 8월 26일 채택

*Corresponding author

E-mail: chheo@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.

그중 보피뭉(Bophi Vum) 크롬철석 산출지를 2013년 ~ 2015년 공동탐사지역으로 설정했다(진광민 외, 2014).

보피뭉 크롬철석 산출지에는 10여 개의 크롬철석 광체가 소규모로 노출되어 있으며, 인근 주민들이 소규모 수작업으로 노천채굴을 하고 있다. 그러나 현재까지 크롬철석 광체에 대한 정밀 조사가 미비한 관계로 광체의 연장부 확인이 안 되어 있다. 따라서 보피뭉 크롬 광화대의 지질조사, 광상조사, 트렌치

탐사, 시추탐사를 통한 크롬철석의 자원량 평가로 향후 개발 가능성을 제시하고, 개발단계에 국내 기업이 선점할 수 있도록 기술지원을 제공하고자 한다. 이 연구논문의 목적은 미얀마 북서부 보피뭉 크롬철석 광화대에서 2013년 수행된 정밀지표지질조사, 지구화학탐사 및 트렌치 탐사 결과를 바탕으로 정밀 연구 지역을 설정한 후 자력탐사를 수행하여 보피뭉 지역에 부존하고 있는 크롬철석 광체의 지표 및 잠두 연장성을 종합

Fig. 1. Geological map and soil sample sites in the Bophi Vum Area, Kalay (KIGAM, 2013).

적으로 규명하는데 있다.

조사지역 개요

조사지역의 지질

지질 및 광상조사를 통하여 작성된 루트 맵(1:1,000 축척)을 이용 조사지역에 대한 정밀 지표 지질도를 작성하였다(Fig. 1). 기존 1:250,000 지질도에 의하면 보피봄 크롬철석 광화대에 분포된 오피올라이트대는 정밀지질조사 결과 하즈버자이트, 더나이트, 사문암으로 구성되어 있음이 새로 밝혀졌다(Heo *et al.*, in review).

이 지층들은 거의 남북 방향으로 층상을 이루고 있으며, 서쪽의 해발 400 ~ 500 m 고지형 동측 사면에 위치하는 단층절벽에 사문암과 하즈버자이트가 경계하고 있다. 하즈버자이트의 분포대 내에는 더나이트가 렌즈상 혹은 포켓상, 맥상 형으

로 분포하고 있으며, 크롬철석이 N50 ~ 70°W 방향으로 소규모의 맥상으로 분포하고 있다. 연구 지역의 대표적 암석인 하즈버자이트, 더나이트, 사문암의 배태 특성은 다음과 같다.

1) 하즈버자이트

주로 사방휘석과 감람석이 기질을 이루고 있으며, 보통 연녹색의 중립질 ~ 조립질(< 1 cm)로 입상조직을 보이나, 일부 지역에서는 연황색의 세립질~중립질 감람석의 기질에 세립~중립의 사방휘석이 산점상으로 산출되고 있다(Fig. 2(a)). 탐사 지역에서는 남북 방향의 주향을 보이며, 층상으로 분포하고 있으나 단층파쇄대나 각력대에서 후기 열수작용 및 지표 풍화작용에 의해 사문석화 작용을 받고 있다.

2) 더나이트

감람석이 90% 이상 차지하는 더나이트는 하즈버자이트 분

Fig. 2. Photographs of harzburgite (a), light yellowish dunite (b), and dark greenish serpentinite (c).

포대 내에 맥상형, 렌즈형 혹은 포켓형으로 배태되어 있으며, 연황색의 세립질암으로 입상조직을 보이고 있다. 일부 지역에서는 세립질 감람석으로 구성된 기질에 간혹 자형의 감람석 (<0.5 cm)이 산점되기도 한다(Fig. 2(b)). 조사지역에서는 적어도 8개 지점에서 소규모의 암맥상 내지 렌즈상의 더나이트가 지표에 노출되어 있으며, 연장성이 비교적 적고, 대체로 맥상의 크롬철석을 수반하고 있다. 일부지역에서는 하즈버자이트의 경계부에 접하고 있는 더나이트는 세립질 감람석 기질에 중립의 사방회석의 산출이 증가하면서 암회색을 띠고 있어 야외에서 이 두 암상 간의 구분이 어려운 경우도 있다.

3) 사문암

사문암은 조사지역 서부 일원의 고지대에 주로 분포하고 있으며, 고지대의 단층절벽에서 하즈버자이트와 접촉하고 있다. 사문암은 암녹색을 띠며, 주로 세립질 내지 중립질의 기질을 이루고 있으며, 심하게 각력화 되어 있다(Fig. 2(c)). 사문암의 기원암인 하즈버자이트와 더나이트로써 강한 각력화로 인하여 대부분 파쇄 되어 있으며, 후기 교대작용에 의해 거의 완전히 사문암화 되었으나, 일부 지역의 시료에서는 사문석으로 교대 중인 감람석이나 보통회석 입자들이 육안으로 관찰된다.

자력탐사

조사지역의 자기감수율 특성

보피봄 크롬철석의 분포 및 지하 연장성을 확인하기 위한

자력 탐사를 수행하였다. 이와 함께 현장 자력 탐사 자료 해석의 기초 자료로 활용하기 위하여 크롬철석과 함께 크롬철석 주변에 함께 배태되어 산출되는 더나이트와 하즈버자이트 암석 및 시료에 대한 간이 자기감수율 측정을 수행하였다. 측정에 사용된 장비는 KT-10 자기 감수율 측정기로 10^{-4} SI의 정밀도를 갖는다.

Fig. 3(a)에 나타낸 자기감수율 측정 실험은 조사지역에 분포하고 있는 다양한 크롬철석에 대한 자기감수율 측정 실험 모습을 보여주고 있다. 일반적으로 크롬철석은 상대적으로 높은 자기감수율을 값을 갖는 것으로 알려져 있다(민경덕 외, 1987). 이 조사지역에 나타나고 있는 크롬철석 역시 일반 퇴적암 보다 높은 자기감수율 값을 나타내고 있다. 수치적으로 확인해 보면, 전체적으로 $0.0005 \sim 0.002$ SI 정도의 값을 나타내고 있어 일반적인 크롬철석의 자기감수율 범위에 포함되고 있다. 이에 반하여 크롬철석의 주변부를 구성하고 있는 더나이트와 하즈버자이트의 경우 크롬철석에 비하여 상대적으로 높은 자기감수율 값을 나타내고 있다.

Fig. 3(b)에 보이고 있는 측정 결과를 보면, 상대적으로 높은 자철석 함량을 갖는 것으로 해석되는 더나이트와 하즈버자이트의 자기감수율 값은 $0.005 \sim 0.02$ SI의 범위를 나타내고 있는데 이는 크롬철석의 자기감수율 범위에 비하여 10배 정도 높은 수준의 자기감수율 값이다. 즉, 이 지역의 자기감수율 분포 특성을 고려하면, 자력 탐사 결과 저이상대로 해석되는 영역에서 크롬철석이 배태될 가능성이 높을 것으로 판단된다.

Fig. 3. Photographs of magnetic susceptibility measurement (Unit: 10^{-3} SI) of chromite (a) and background rocks (harzburgite and dunite).

Fig. 4. Site views of magnetic survey (a) and base station (b).

육상 자력 탐사 결과

1) 탐사 자료 획득

탐사 지역을 격자 형태로 나누어 육상 자력 탐사를 수행하는 것은 효율적인 자료 획득 및 해석에 효과적이며, 자력 탐사 결과를 해석함에 있어 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있는 효율적인 탐사 측선 설계 방법이다. 그러나 탐사 현장은 Fig. 4(a)에 보이는 것처럼 지형 및 고도의 변화가 심하고 경사가 급하여 격자 형태의 탐사를 수행하지 못하고 능선을 중심으로 측선을 설정하였다. 그러나 가능한 범위 내에서 최대한 넓은 영역을 포함하며 자료의 분포가 균등할 수 있도록 측선을 설계하여 탐사를 수행하였다. 육상 자력 탐사 자료의 획득을 위해서는 세슘 광펄핑 방식의 G-858 자력계를 사용하였다. 이 자력탐사 시스템은 0.01 nT의 정밀도와 20,000 ~ 100,000 nT의 측정 범위를 갖으며, GPS와 연동되는 방식으로 자력 측정 시 측정 위치가 총자력 값과 동기화 되어 저장된다.

또한, 자력 탐사 결과의 일변화 효과를 보정하기 위하여 자력 현장 기준점을 운영하여 일변화 값을 획득하였다. 이번 탐사에서 운영된 자력 현장 기준점은 탐사 현장에서 동쪽으로 2

km 정도 떨어진 위치이며, Fig. 4(b)와 같이 자력 잡음을 최대한 억제하여 안정적인 측정이 가능하도록 설치 하였다. 자력 현장 기준점에서 획득된 육상 자력 자료는 총자기 이상 값으로 Fig. 5에 제시하였다. 현장에서 획득된 모든 탐사 자료는 자력 현장 기준점에서 측정된 자력 탐사 자료를 이용하여 일변정 단계를 거쳐 해석에 사용되었다.

2) 탐사 자료의 격자화

이번 조사를 통해 획득된 자력 탐사 자료는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 표현한 점들의 위치는 자력 탐사가 이루어진 위치를 나타내며 각 측정점의 색은 측정된 총 자력 값을 나타낸다. 또한, 이번 탐사는 1초에 한 번씩 자동으로 총 자력 값을 획득하는 방식으로 이루어졌기 때문에 측정점들의 분포를 보면 탐사가 수행된 이동 경로를 확인할 수 있다.

능선 및 일부 이를 가로지르는 측선을 따라 획득된 자력 탐사 자료는 효과적인 3차원 역산 해석을 위하여 2차원 격자 형태의 자료로 변환 하였다. 자력 탐사의 경우 연속장의 특성을 갖기 때문에 공간적인 추정방법을 이용하여 격자 형태로 변환 하여도 그 자료를 통해 해석할 수 있는 지질 정보의 양에 큰

Fig. 5. Measured total magnetic fields on the base station.

Fig. 6. Measured total magnetic anomalies on 2D geological maps.

Fig. 7. Total magnetic anomaly maps on Area 1 (a) and Area 2 (b). The red dots indicate the locations of chromite ore deposits.

변화가 없어 격자 형태의 자료를 역산에 이용하여도 큰 오차가 발생하지 않으며, 역산 과정에서 안정적인 해석이 가능하다 (Almeida and Journel, 1994). 또한, 격자 자료의 생성 과정에서 현장에서 획득된 이상값 이외의 계산상에서 발생할 수 있는 이상 값을 억제하기 위하여 자료측정 자료의 범위 내에서 값을 추정하는 simple kriging 기법을 이용하였다. 격자 형태로 변환된 총자기 이상 값과 추정값을 Fig. 7에 나타내었다.

3) 탐사 자료 해석

추정된 총자력 이상도를 편의상 Area 1과 Area 2로 구분하여 도시하였다. Area 1의 경우 기존의 지표 지질조사를 통하여 정밀 지표 지질도가 구축되어 3차원 지질도 상에 탐사 자료를 표기하였다. Area 2의 경우 Area 1의 북쪽에 위치하고 있으며, 이번 조사에서 처음으로 탐사가 수행된 지역으로 정밀 지표 지질도를 보유하고 있지 않아 자력 탐사 자료만을 이용하여 도시하였다. 조사지역의 암석 시료 및 노두를 대상으로 수행된 자기감수율 측정 실험 결과를 고려하면, 크롬철석은 주변의 더나이트와 하즈버자이트에 비해 낮은 것으로 예상되며, Fig. 7의 저 자력 이상대에 크롬철석이 분포할 것으로 해석된다. 다만 크롬철석 주변에 존재할 수 있는 저 대자율체인 퇴적층과의 구분을 위하여 저 이상대에 대한 추가 조사가 필요할 것으로 판단된다.

보다 효과적인 자료 해석을 위하여 앞서 수행된 지표 지질 조사와 이번에 수행된 지표 트렌치 조사를 통해 확인된 크롬철석 노두의 위치를 자력 탐사 결과와 함께 도시하였다. Fig. 7의 붉은색 점은 지표 지질조사 및 트렌치 조사를 통해 확인된 크롬철석의 위치를 나타낸다. 비교 분석 결과 기 확인된 모든 크롬철석의 위치가 모두 저 자력 이상대에 위치하고 있음

을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 이 지역에 아직 확보되지 않은 크롬철석이 존재할 경우 저 자력이상대 지역에서 크롬철석이 배태되어 있을 가능성이 상대적으로 높을 것으로 해석된다. 특히 Area 1의 북동쪽 및 남쪽에 위치한 저 이상대는 노두에서 확인된 광체 지역에서 북동-남서 방향으로 확장되어 나타나는 것으로 보아 노두에서 확인된 광체가 지하 하부로 일정 규모 이상으로 연장되어 나타날 것으로 해석된다.

이번 연구 기간에 트렌치 탐사가 수행된 지역인 Area 2의 경우 동쪽에 위치한 두 광체 노두는 그 범위가 좁은 것으로 보아 연장성이 좋지 않을 것으로 판단되나, 서쪽에 위치한 노두의 경우 자력 탐사에서 나타난 저 이상대의 분포를 고려하면 그 연장성이 동-서 방향으로 강하게 나타날 것으로 판단된다. 다만 이 지역이 자기감수율이 낮은 퇴적암을 반영한 결과일 수도 있으므로 이 부분에 대한 추가 조사가 필요하다. Area 2 지역의 경우 아직 정식으로 조사되지 않은 광화대 지역임을 고려하여 2차원 평면도 상에서는 좌표를 기입하지 않았으며, 대략적인 위치는 Area 1과의 위치 관계를 고려하면 추정 가능하며, 3차원 모델링 결과에서는 상대적인 위치 관계를 확인 가능하도록 제시 하였다.

한편, 이번 연구에서는 조사지역의 광화대 분포 특성을 3차원으로 해석하기 위하여 자력 탐사 자료를 기반으로 3차원 역산을 수행하였다. 3차원 역산 해석은 3차원 지질모델링 소프트웨어인 Paradigm 사의 GoCAD Potential Field 모듈을 이용하였다(Fullagar et al., 2004). 역산 수행 시 필요한 IGRF 값은 교토 대학 웹사이트(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/>)를 통해 제공하는 자료를 이용하였으며, 연구지역의 2014년 예상치 값을 사용하였다. Total intensity: 46319 nT, Declination: -0.7° , Inclination: 34.827° . 해석된 3차원 자기감수율 모델은

Fig. 8. 3-D magnetic susceptibility inversion results. (a) shows the sections (a-1) and low magnetic susceptibility bodies (a-2) analyzed by 3-D inversion in Area 1. (b) shows the sections (b-1) and low magnetic susceptibility bodies (b-2) analyzed by 3-D inversion in Area 2.

아래의 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 그림은 Area 1과 Area 2의 역산 결과들로 교차하는 역산 단면과 함께 크롬철석을 지시할 가능성이 있는 저 자기감수율 모델을 3차원 영상화 하여 제시 하였다.

역산 결과와 기존의 탐사 결과를 비교하여 보면, 앞선 지표 지질 연구에서 확인된 크롬철석이 분포하는 영역에서는 지표 까지 연장되는 저 자기감수율체가 해석되고 있음을 확인 할 수 있었다. 특히 Area 1에서 수행된 역산 결과 연구지역의 북 쪽과 남쪽에 분포하는 저 자기감수율체가 주변에 비하여 그 규모가 클 것으로 판단되며, Area 2 영역의 경우 서쪽의 저 자기감수율체의 규모가 주변에 나타나는 저 자기감수율체에 비해 상대적으로 큰 규모로 나타나고 있는 것으로 해석되어 추 후 이 지역에 대한 정밀 조사가 필요할 것이라 판단된다.

결 론

이번 연구는 육상 자력탐사 자료 해석을 통해 보피붐 지역

크롬철석 산출 영역의 분포 특성을 파악하고 현재 발견되지 않은 크롬철석 산출지를 추가 확보하고자 수행 되었다.

크롬철석 광체는 일반적으로 높은 자기감수율 값을 갖는 것으로 알려져 있으나, 이 지역의 경우 주변 암석을 이루는 하즈버자이트와 더나이트에 자철석이 다량 함유되어 있는 것으로 해석되었으며, 이 영향으로 하즈버자이트와 더나이트가 크롬 철석에 비하여 높은 자기감수율 값을 갖는 것으로 나타났다.

육상 자력 탐사 결과, 낮은 자력 이상대 지역과 지표 지질 조사 결과를 통해 확인된 크롬철석 산출지 영역이 잘 부합하고 있음을 확인할 수 있었으며, 육상 자력탐사 자료를 이용한 역산 해석 결과인 3차원 자기감수율 모델의 저 자기감수율체 와도 잘 부합하고 있다. 이는 주변 암체가 자기감수율이 높은 자철석을 다량 함유하고 있어 높은 자기이상 반응을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 현재까지 알려진 크롬철석 산출지 중 일부 광화대 주변부에서 저 자력 이상대가 지하로 연장되어 나타나는 것으로 해석되어, 이러한 지역에 대한 추가 정밀 조사가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 이번 연구를 통해 해석

된 자기감수율 해석 결과는 연구지역에서 미확인된 크롬철석의 추가 확보 및 시추 조사지 선정에 효과적인 자료를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 부처임무형 사업인 “해외광물자원탐사 및 자원량평가(14-1121)” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Almeida, A. S. and Journel, A. G., 1994, Joint simulation of multiple variables with a Markov-type coregionalization model, *Mathematical Geology*, **26**(5), 565-588.
- Choi, H., Kim, Y., and Ji, Y., 2010, Overview on Rare Metal Industries and Their Recycling, *KIC News*, **13**, 20-29.
- Fullagar, P. K., Pears, G. A., Hutton, D., and Thompson, A., 2004, 3D gravity and aeromagnetic inversion, Pillara region, W.A., *Exploration Geophysics*, **35**, 142-146.
- Hanshin Choi, Yonghwan Kim, and Youlgwun Ji, 2010, Overview on Rare Metal Industries and Their Recycling, *Prospectives of Industrial Chemistry*, **13**, 20-29.
- Heo, C.-H., Chi, S.-J., Kang, I.-M., and Jin, K., in review, Occurrence characteristics of Bophi Vum chromite mineralized zone in the northwestern Myanmar. *Econ. Environ. Geol.*
- Kwangmin Jin, Chul-Ho Heo, Se-Jung Chi and Il-Mo Kang, 2014, Study on developing characteristics of Bophi Vum chromite mineralized zone in the northwestern Myanmar based on the trench survey. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 50, no. 2, p. 293-307.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2013, Resource estimation and Exploration of Overseas Mineral Resources, Ministry of Science, ICT and Future Planning, GP2013-007-2013(I).
- Min, K. D., Suh, J.H., Kwon, B. D., 1987, Applied Geophysics, pp142-145, Woo-Sung press.