자력자료를 이용한 몽골 우기누르 철-망간 분포 특성

박계순* · 이범한 · 김인준 · 허철호

한국지질자원연구원 광물자원연구본부, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

Distribution of Fe-Mn Ore in Ugii Nuur, Mongolia Using Magnetic Data

Gyesoon Park*, Bum-Han Lee, In-Joon Kim, and Chul-Ho Heo

Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

Abstract: Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) and Mineral Resources Authority of Mongolia (MRAM) performed a joint survey on Ugii Nuur Fe-Mn mineralized area. Following the survey, we carried out magnetic survey and 3D magnetic susceptibility inversion. Based on the inversion results, basic feasibility study and 3D imaging of Fe-Mn mineralized area were performed using 3D geological modeling technique. Using the distribution of total magnetic field data, we were confirmed for the possibility of horizontal extension of ore bodies from surface outcrops. The 3D magnetic susceptibility model, which is highly related with Fe content, analyzed by inversion shows that the ore bodies of Deposit 1 and Deposit 2 are extended to the underground and ore bodies that are not exposed on the surface are largely distributed in the underground. If we perform the integration analysis using this magnetic susceptibility model and the ore grade data analyzed by drilling survey, it is possible to carry out the effective potential evaluation of Ugii Nuur Fe-Mn ore deposit.

Keywords: Ugii Nuur Fe-Mn Ore mineralized area, magnetic survey, 3D imaging

요 약: 한국지질자원연구원은 몽골 광물자원청과 공동으로 우기누르 철-망간 광화대에 대한 공동 연구를 수행하였다. 이의 일환으로 수행된 육상 자력탐사에서 획득한 자료를 바탕으로 3차원 자력 역산을 수행하였으며, 3차원 지질모델링 기술을 이용하여 철-망간 광화대에 대한 3차원 영상화 및 광체 평가를 위한 연구를 수행하였다. 총자력 이상의 분포 특성을 통해 연구지역의 광상에서 지표 노두로부터 수평적으로 연장되는 광체의 부존 가능성을 확인하였다. 또한, Fe 함량과 상관성이 높은 자기감수율 역산 결과를 토대로 연구지역의 제 1광상 및 제 2광상 모두에서 지표에서 드러난 광체가 지하 하부로 연장되어 있는 것으로 해석되어, 지표에 드러나지 않은 광체의 부존 가능성이 높은 것으로 판단된다. 시추 조사를 통해 일부 대표 지역의 광체 품위 자료가 확보되고 이번 연구결과와의 복합 해석을 수행한다면 효과적인 개발 가능성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

주요어: 우기누르 철-망간 광화대, 자력탐사, 3차원 영상화

서 론

급격한 산업화가 진행되고 있는 요즘 국가의 지속

적 발전을 위해서는 자원의 안정적 공급이 어느 시대보다 중요시되고 있다. 특히 철강 자원은 현대 사회에서 대체재를 찾기 어려운 필수 원료이다. 따라서 국내 자원 개발량이 부족한 우리나라의 실정을 고려할 때, 해외 자원 개발의 활성화는 중요한 연구 목표라 할 수 있다. 몽골은 스카른형, 퇴적형, 호상철광층, 화산기원의 퇴적형 광상 등의 다양한 철광상을 보유하고 있어(Dejidmaa et al., 2001) 몽골과의 자원협력은 자원 개발 분야의 중요한 과제라 할 수 있다.

이러한 사회적 요구에 따라 한국지질자원연구원은 2010년 몽골 광물자원청과 ‘몽골 광물자원분야의 기

*Corresponding author: gyesoon@kigam.re.kr
Tel: +82-42-868-3142
Fax: +82-42-868-3418

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.

술협력'에 대한 양해각서를 체결한 후, 2011년 '몽골 중부 금속 광화대의 지질조사에 대한 기술협력'에 대한 RA를 체결하였다. 이 협약의 일환으로 두 연구기관은 몽골 우기누르 일대의 철-망간 광화대에 대한 공동 지표지질조사 및 지화학 조사를 수행하였다. 현지조사에서 채취한 광석 및 모암 시료에 대한 광물학적 분석 및 지구화학적 분석을 수행한 결과 조사 지역 내에서 다섯 개의 광상을 설정하였다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2012). 이후 2012년 2월에 두 기관은 연구 내용과 범위를 확대하여 '몽골 중부 항가이 남동부 지역 및 우기누르 철-망간 광화대 지질조사'에 대한 RA를 체결하였다.

이 협약과 관련하여 이번 연구에서는 2011년 조사 결과를 바탕으로 설정한 다섯 개의 광상 중 비교적 품위가 좋고 규모가 큰 두 광상에 대한 정밀 지표지질조사 및 육상 자력탐사를 수행하였다. 획득된 자료를 바탕으로 3차원 자력 역산을 수행하였으며, 3차원 지질모델링 기술을 이용하여 철-망간 광화대에 대한

3차원 영상화 및 광체 평가를 위한 기초 연구를 수행하였다.

연구지역의 지질 및 지형

우기누르 철-망간 광화대는 Fig. 1에 보이는 것처럼 수도인 울란바타르에서 서쪽으로 약 350 km 떨어져 있고 아르항가이주 우기누르섬과 하샤트섬에 속해 있는 지역이다. 위치는 위도 $N47^{\circ}30'00''$ - $N47^{\circ}40'00''$, 경도 $E102^{\circ}45'00''$ - $E103^{\circ}00'00''$ 에 해당된다. 2011년도 조사 결과 우기누르 지역의 지질은 하르호린 층군의 먼곤체지 층, 테분기 후른톨고이 층, 테분기 추겔 층, 백악기 아르항가이 층으로 구성되고, 이 지역의 철-망간은 주로 견운모질 편암과 규암으로 구성된 먼곤체지 층에서 렌즈상으로 협재되어 있음이 확인되었다. 철광석은 주로 자철석, 적철석으로 구성되고 기타 철 산화물이 수반되며, 망간 광석은 주로 스페사틴과 베네사이트로 구성되고 기타 망간 산화물이 수반되는 것이 확인되었다(Korea Institute of Geoscience and

Fig. 1. Location map of Ugii Nuur Fe-Mn survey area in Mongolia (left). Location map of study area (right) (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2012).

Fig. 2. Terrain maps of Deposit 1 and Deposit 2 using GPS data (left) and terrain map of study area using GPS and satellite DEM data (right).

Mineral Resources, 2012). 현지 지질조사와 화학분석 결과를 바탕으로 다섯 개의 광상을 설정하였으며, 이중 비교적 품위가 높고 규모가 큰 제 1광상과 제 2광상에 대한 정밀 지질조사를 수행하였다. 제 1광상과 제 2광상의 위치는 Fig. 1과 Fig. 2에 표기하였다.

제 1광상에 대한 정밀 지질조사 결과 지표에 드러난 광체는 대체로 N20-40°W의 방향성을 가지며, 40-80°NE 또는 70-80°SW의 경사를 갖는다. 지표에 드러난 광체는 대체로 규암을 모암으로 하며, 견운모질 편암에는 철-망간 광석이 협재되지 않거나 소량으로 협재된다. 제 2광상 역시 제 1광상과 유사한 지질 구조를 갖고 있으며, 지표에 드러난 광체의 범위가 넓고 연장성이 좋게 나타난다. 특히 연구지역 중 일부 영역에서는 현재 연구지역 부근에서 가행중인 타미르 골 광산의 최저 품위인 25%를 넘는 것으로 해석되어 추가 조사 결과에 따라서는 개발 가능성이 있을 것으로 생각되며, 이 지역의 철광상은 망간이 수반되어 나타나므로 망간과 함께 개발함으로써 경제성을 높일 수 있을 것으로 판단된다(Lee et al., 2012).

자력탐사 자료의 획득 및 처리

아르항가이주 우기누르섬과 하샤트섬에 속해있는 우기누르 일대의 철-망간 광화대에 대한 3차원 영상화 연구를 수행하였다. 이를 위하여 철광체 탐사에 효과적인 자력탐사(Min et al., 1987)를 비교적 품위가 좋고 규모가 큰 제 1광화대와 제 2광화대에서 수행하였다. 육상 자력탐사는 우기누르 지역 철-망간 다금속 광화대의 분포 특성 및 지하로의 광체 연장성을 파악하기 위하여 수행되었다.

자력탐사는 Fig. 3에 표기한 바와 같은 탐사 측선을 따라 수행하였다. 자력탐사에 수행된 G-858 자력계는 세습 광평법 방식의 자력탐사기로 0.01 nT의 정밀도와 20,000-100,000 nT의 측정 범위를 갖는다. 현장 탐사는 동일한 G-858 육상 자력계 두 대를 이용하여 수행되었다. 자력계 한 대는 일변화 효과를 제거하기 위한 일보정을 수행하기 위하여 베이스 측점에 설치하여 탐사가 이루어지는 동안 상시 측정을 하도록 설정하였으며, 나머지 한 대를 이용하여 광화

Fig. 3. Terrain maps and survey lines of Deposit 1 (left) and Deposit 2 (right).

Fig. 4. Total magnetic anomaly map (left) and magnetic vertical gradient anomaly map (right) of Deposit 1. Rectangles indicate the directions of estimated ore bodies.

Fig. 5. Total magnetic anomaly map (left) and magnetic vertical gradient anomaly map (right) of Deposit 2. Rectangles indicate the directions of estimated ore bodies.

대 현장 탐사를 수행하였다. 광화대 탐사를 위해서 자력센서 두 개를 수직으로 배열하여 두 센서로부터 측정되는 총자기 이상을 측정하였다. 수직으로 배열된 두 개의 센서에서 동시에 총자기 이상을 측정하게 되면 두 센서의 거리와 두 센서에서 측정된 값의 차를 이용하여 자기장의 수직 변화율 값을 측정할 수 있다. 수직 변화율 값은 총자기 이상 값에 비하여 지표 부근의 이상체에 보다 더 민감하기 때문에 이상체의 분포에 대한 정보를 보다 신뢰성 높게 평가할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에 자력탐사를 통해 획득된 총자기 이상과 수직 변화율 값을 나타내었다. 획득된 자료의 패턴을 살펴보면 철 광화대 노두가 나타나는 지역에서 높은 자기 이상이 나타나고 있어 주변 지질에 비하여 철광체 영역에서 높은 자기 이상을 확인할 수 있었으며, 높은 자기 이상이 나타나는 영역이 약 N30°W 방향으로 연속적인 패턴을 보여주고 있으며,

이는 지표지질 조사 결과와 상당부분 부합하고 있는 결과이다. 또한, 총자기 이상과 수직 변화율 이상도를 비교해 보면, 총자기 이상은 연속된 이상체를 넓은 지역에서 보여주고 있는데 반하여 수직 변화율 이상도의 경우 전반적인 분포는 유사하지만, 일부 지역에서 보다 뚜렷한 이상체가 탐지되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 이상체가 지표에 보다 가깝게 분포하고 있기 때문인 것으로 해석되며, 이러한 부분들에서는 지표 부근까지 광화대가 연장되어 있을 수 있다. 전체적인 광체 분포 특성을 살펴보면, 제 1광상과 제 2광상 지역에서 모두 동일한 방향성의 연장성이 나타나는 것으로 해석되며, 두 지역의 위치를 고려하면 제 1광상과 제 2광상의 광체 부분은 동일한 연장선상에 위치하는 것으로 해석된다.

일반적으로 자력탐사 결과는 저렴한 비용으로 수평적인 분해능이 뛰어난 해석 결과를 획득할 수 있지만, 수직 분해능이 낮기 때문에 광체의 심도나 규모

Fig. 6. 3D magnetic susceptibility inversion result at Deposit 1. Red region indicate high magnetic susceptibility bodies (>0.006 SI).

Fig. 7. 3D magnetic susceptibility inversion result at Deposit 2. Red region indicate high magnetic susceptibility bodies (>0.006 SI).

를 정확히 예측하기 어렵다. 그러나 자력탐사 결과 나타난 광체의 분포가 동일한 방향으로 연속적으로 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, 일부 지역에서는 수직 변화를 이상도에서도 강한 이상대가 나타나는 것으로 보아 지표 부근에 까지 연장된 광체도 상당부분 분포하는 것으로 해석된다.

3차원 자력 역산을 통한 광화대 분포 특성 해석

이번 연구에서는 연구지역의 광체 분포를 보다 효과적으로 해석하기 위하여 자력탐사 자료를 기반으로 3차원 역산을 수행하였다. 3차원 역산 해석은 3차원

Fig. 8. High magnetic susceptibility regions (>0.01 SI) of Deposit 1 (left up) and Deposit 2 (right down).

지질모델링 소프트웨어인 GoCAD의 Potential Fields 모듈을 이용하였다(Fullagar et al., 2004). 이를 위하여 연구지역 전체에 대한 지형도를 육상탐사 시 획득한 GPS 자료와 인공위성 DEM 자료를 이용하여 구성하였으며 구축된 3차원 지형 모델은 Fig. 2에 나타내었다.

자력탐사 자료의 역산 결과는 자기감수율 모델로 나타나게 되며 연구지역의 역산 결과는 Fig. 6에서 Fig. 8에 도시하였다. 일반적으로 철 함량이 매우 높은 자철석의 경우 자기감수율 값이 0.1SI 이상을 나타내기도 하지만, 철 함량과 자기감수율 값이 자연상에서 선형적인 관계를 갖지 않으며 유사한 철 함량을 갖는 자철석의 경우에도 그 값의 범위 편차가 크게 나타날 수 있다. 해당 연구 지역의 경우에도 철 광체가 나타내는 자기감수율 값의 범위가 0.005-0.1 SI로 상당히 넓게 분포하고 있다.

이번 연구에서는 광화대 분포를 해석하기 위해 자기감수율 값이 상대적으로 높은 것으로 판단되는 0.006 SI 이상인 지역을 Fig. 6과 Fig. 7에 0.01 SI 이상인 지역을 Fig. 8에 3차원으로 영상화 하였다. 역산 결과를 지표 지질조사 결과와 비교해 보면, 지표 지질조사 결과 광상 노두가 나타나는 곳에서 대부분 지표까지 연장되는 높은 자기감수율 영역이 나타나고 있어 효과적인 3차원 광화대 영상화가 수행되었음을 확인할 수 있다.

Fe 함량이 높을 것으로 예상되는 높은 자기감수율 영역의 특성을 살펴보면, 제 1광화대의 경우 자기감수율 값이 0.006 SI 이상인 영역의 부피는 $5.53807 \times 10^8 \text{ m}^3$, 자기감수율 값이 0.008 SI 이상인 영역의 부피는 $1.88508 \times 10^8 \text{ m}^3$, 자기감수율 값이 0.01 SI 이상인 영역의 부피는 $8.4672 \times 10^7 \text{ m}^3$ 로 해석되었다. 또한,

제 2광화대의 경우 자기감수율 값이 0.006 SI 이상인 영역의 부피는 $1.09062 \times 10^9 \text{ m}^3$, 자기감수율 값이 0.008 SI 이상인 영역의 부피는 $1.51961 \times 10^8 \text{ m}^3$, 자기감수율 값이 0.01 SI 이상인 영역의 부피는 $8.44638 \times 10^7 \text{ m}^3$ 으로 해석되었다.

전체적으로 살펴보면, 비교적 품위가 높을 것으로 예상되는 Fe 광화대는 제 1광화대 및 제 2광화대 모두에서 지표에서 드러난 노두에서 지하로 연장되어 있는 것으로 해석되었다. 또한, 두 광화대를 상대적으로 비교하면, 0.006 SI 이상의 영역은 연구지역이 넓은 제 2광화대에서보다 큰 부피를 갖는 것으로 해석되었으나, 높은 자기감수율 기준인 0.01 SI 영역에서는 제 1광화대에서 보다 큰 부피를 갖는 것으로 해석되어 제 2광화대에 비하여 상대적으로 제 1광화대의 전체적인 품위가 높을 것으로 예상된다. 이번 해석 결과를 향후 수행될 수 있는 시추 조사 결과와 함께 해석한다면 보다 자세한 광체 특성 및 지하로의 연장성 해석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

자원의 안정적 공급이 중요시 되고 있는 현대 사회의 요구에 따라 한국지질자원연구원은 몽골 광물자원청과 공동으로 우기누르 철-망간 광화대에 대한 공동 지질조사를 수행하였다. 이의 일환으로 수행된 육상 자력탐사에서는 획득된 자료를 바탕으로 3차원 자력 역산을 수행하였으며, 3차원 지질모델링 기술을 이용하여 철-망간 광화대에 대한 3차원 영상화 및 광체 평가를 위한 기초 연구를 수행하였다.

이를 위하여 지표 지질조사 결과 광상 개발의 가능성이 나타난 두 개의 광상에서 자력탐사를 수행하

여 광체의 연장성을 확인하였다. 또한, Fe 함량과 상관성이 높은 자기감수율 역산 결과를 토대로 이 지역의 철-망간 광화대 특성을 분석해 보면 비교적 품위가 높을 것으로 예상되는 Fe 광화대는 제 1광화대 및 제 2광화대 모두 지표에서 드러난 노두에서 지하로 연장되어 있는 것으로 해석되었다. 특히 지표지질 조사 결과 연구지역에서 약 40 km 떨어진 타미르골 광산은 연구지역의 광체 배태특성과 유사하며, 일부 연구지역에서는 타미르골 광산의 평균 품위보다 높은 광체가 노출되어 있어 시추 조사와 같은 추가적인 조사 결과에 따라 개발 가능성이 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

References

- Dejidmaa, G., Bujinlkhram, B., Eviihuu, A., Enkhtuya, B., Ganbaatar, T., Moenkh-Erdene, N., and Oyuntuya, N., 2001, Distribution map of deposits, and occurrences in Mongolia (at the scale 1:1,000,000). Mineral Resources Authority of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 280 p.
- Fullagar, P.K., Pears, G.A., Hutton, D., and Thompson, A., 2004, 3D gravity and aeromagnetic inversion, Pillara region. Western Australia Exploration Geophysics, 35, 142-146.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2012, Potential Evaluation and Exploration of Overseas Mineral Resources. Ministry of Knowledge Economy, GP2010-021-2012(3), 641 p. (in Korean)
- Lee, B.H., Park, G., Kim, I.J., Lee, G., Heo, C.H., and Koh, S.M., 2012, Characteristics of Fe-Mn mineralization in Ugii Nuur and Tamir Gol, Mongolia. Journal of Mineralogical Society of Korea, 25, 313-322. (in Korean)
- Min, K.D., Suh, J.H., and Kwon, B.D., 1987, Applied Geophysics. Woo-Sung press, Seoul, Korea, 772 p. (in Korean)

Manuscript received: September 15, 2014

Revised manuscript received: September 22, 2014

Manuscript accepted: September 24, 2014