충북 제천 NMC 몰랜드 광산의 관계 화성암에 대한 중력탐사

신영홍* · 유봉철 · 임무택 · 박영수 · 고인세

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

Gravity Exploration Inferring the Source Granite of the NMC Moland Mine, Jecheon, Chungbuk

Young Hong Shin*, Bong Chul Yoo, Mutaek Lim, Yeong-Sue Park and In Se Ko

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

NMC Moland mine, which is classified as a contact replacement or skarn deposit, has been interpreted to have been formed by Daebo igneous activity which intruded into the Joseon Supergroup, because it is quite closely located to Jecheon granite. However, an alternative interpretation was recently suggested that the mine could be related with the hydrothermal fluid originated from Cretaceous granitic rocks, bringing about skarnization and Mo mineralization. Here we present an interpretation on the source granite of the mine based on the gravity exploration: the gravity anomaly, unlike the surface geology, shows that the Muamsa granite could be the related granite of the mine, because its hidden subsurface structure is expected to be more widely extended to surrounding area of the mine and deeper than the Jecheon granite.

Key words : gravity exploration, source granite, Jecheon granite, Muamsa granite, NMC Moland mine

NMC 몰랜드 광산은 고생대 조선누층군을 관입한 화성암류에 의해 형성된 접촉교대 또는 스카른 광상으로 공간적으로 제천화강암과 인접해 있어 이 화강암을 관계 화성암으로 간주하여 대보 화성 활동과 관련하여 형성된 광상으로 해석하였으나, 최근에는 백악기 천부 반화강암질 암체에서 기원된 광화유체로부터 스카른화작용과 더불어 Mo 광화작용이 진행된 것이라는 해석이 제시되었다. 본 연구에서는 광산 일원에 대한 중력탐사를 통해 지하구조를 해석함으로써, 지표 지질에서 제천화강암이 광산에 훨씬 인접한 것과는 달리 지하에서는 남쪽의 백악기 무암사화강암이 광산 하부와 주변으로까지 뻗어있을 것으로 여겨지며, 결과적으로 광상 형성의 관계 화성암으로 작용하였을 것임을 제시한다.

주요어 : 중력탐사, 관계 화성암, 제천화강암, 무암사화강암, NMC 몰랜드 광산

1. 서 론

제천 NMC 몰랜드 광산 주변의 지질은 시생대의 편마암복합체, 고생대의 옥천누층군과 조선누층군, 고생대내지 트라이아스기의 평안누층군 그리고 후기에 관입한 쥐라기 대보화강암 및 백악기 불국사화강암으로

구성된다(Fig. 1). 이 광산은 석회암 지대를 관입한 화성암류에 의해 형성된 접촉교대 또는 스카른 광상으로 유라기 제천화강암과 인접해 있기 때문에 이를 관계 화성암으로 해석하였으나, 남쪽으로 다소 동떨어져 있는 백악기 무암사화강암을 관계 화성암일 것이라는 주장이 최근에 제시되었다(Choi *et al.*, 2007).

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 original work is properly cited.

*Corresponding author: yhshin@kigam.re.kr

Fig. 1. Study area and simplified geological map of the Hwanggangri metallogenic district, showing the distribution of Jurassic and Cretaceous granitoids (A), and the locations of the W-Mo- and Cu-Pb-Zn±(Au±Ag) metallic (B) and non-metallic (C) deposits (modified from Yoo *et al.*, 2011).

이러한 상이한 해석에 있어서 직관적으로 장애가 되고 있는 공간적인 원인에 대한 문제는 지표 지질도에 근거한 것이기 때문에 지하 구조에 대한 정보가 제한되어있다. 보이지도 않고 직접적인 접근이 어려운 지하구조를 알아내고자 하여 다양한 물리 탐사 기법이 개발되었는데, 이 방법들은 비록 지표면이나 공중에서 탐사를 하더라도 지하의 물성을 반영하는 물리량을 측정하기 때문에 지하구조에 대한 추정이 가능하고, 지

표지질에 더하여서 매우 유용한 정보를 제공하게 되는 것이다. 따라서 이들 기법을 통해 작성된 지구물리 이상도를 지표지질도나 지화학분포도와 함께 해석함으로써 자원탐사를 위한 핵심 정보를 제공하고 효율성을 높일 수 있게 된다. 특히 시추로도 접근하기 힘든 깊이에 대한 연구에 있어서 중력이나 자력을 비롯한 다양한 물리 탐사 자료의 중요성이 훨씬 커지게 된다.

여러 물리탐사 기법 중에서도 화강암의 공간적 분포

규모와 관련된 지하 구조에 대한 연구에 있어서는 중력탐사가 매우 유용하게 활용될 수 있는데(Shin, 2006a), 이는 일반적으로 화강암의 밀도가 낮은 편이어서 주위보다 낮은 중력 이상을 보여주기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 광산 형성에 대한 지화학적/광상학적인 상기의 논의들과는 달리 지구물리학적 측면에서 광산 일원에서 중력탐사를 실시하고, 이를 지표 지질과 비교 해석함으로써 제천화강암과 무암사화강암이 NMC 몰랜드 광산의 형성 과정에서 관계 화성암으로 작용하였을 가능성에 대해 살펴보고자 한다. 이는 지화학적/광상학적인 연구만으로는 해결할 수 없는 관계화성암의 직접적인 접촉에 대한 공간적인 의문점을 물리 탐사를 통해 해소하는데 기여하게 될 것이다.

2. 주변 지질

NMC 몰랜드 광산을 포함한 황강리 광화대는 최소 60여개 이상의 W-Mo 및 Cu-Pb-Zn-Au-Ag 다금속 광상들과 30여개의 형석 및 활석 광상들이 분포한다(Fig. 1). 이 광산을 포함한 주변지질에 대하여 많은 보고(Park, 1982; So and Yun, 1992; 1994; Shin and Lee, 2006; Choi *et al.*, 2007; Yoo *et al.*, 2011)가 되어 있어 여기에서는 간략하게 기술하면 다음과 같다. 이 광산일대의 주변지질은 시생대의 편마암복합체, 고생대의 옥천누층군과 조선누층군, 고생대내지 트라이아스기의 평안누층군 그리고 후기에 관입한 쥐라기 대보화강암 및 백악기 불국사화강암으로 구성된다(Fig. 1). 시생대의 편마암복합체는 경기육괴에 해당되며 이 광산의 북서측 및 남동측에서 북동방향으로 분포하며 호상편마암, 흑운모편마암 및 편암으로 구성된다. 고생대 옥천누층군은 광산의 남서측에서 북동방향으로 분포하며 흑색 슬레이트, 천매암, 석영-운모 녹니석 편암, 규암 및 대리암으로 구성된다. 고생대의 조선누층군은 광산일대 및 남측에서 북동방향으로 분포하며 석회암, 백운석질 석회암, 석회규산염암, 이질 판상석회암 및 혼펠스화된 이암으로 구성된다(Cho *et al.*, 2007). 고생대내지 트라이아스기의 평안누층군은 광산의 남동측에서 북동방향으로 분포하며 적색~녹회색 사암, 셰일 및 실트암으로 구성된다. 쥐라기의 대보화강암은 광산의 북측 및 서측에서 제천화강암과 충주화강암으로 분포한다. 제천화강암은 거정질 반상조석을 갖는 조립질 흑운모 화강암과 조립질 흑운모 화강섬록암으로 구성되며 자철석계열 I형 아다카이트질 암석에 해당한다고 보고하였다(Jin *et al.*, 1992; Ishihara *et al.*, 2005; Choi

et al., 2007). 이 화강암의 생성연대는 179~169 Ma (K-Ar 연령)과 203 Ma(Rb-Sr 연령)으로 트라이아스기 내지 쥐라기 화성활동으로 해석되며 각섬석 압력계로 추정된 정치심도는 3.8 kbar로 비교적 심부환경에서 고결된 암체로 보고하였다(Shibata *et al.*, 1983; Jin *et al.*, 1992; Cho and Kwon, 1994; Choi *et al.*, 2007). 충주화강암은 중립질 각섬석-흑운모 화강암으로 구성되며 자철석계열 암석에 해당하고 생성연대는 159 Ma로써 쥐라기 화성활동에 의해 형성된 것으로 해석된다고 보고하였다(Cho and Kwon, 1994). 백악기 불국사화강암은 광산의 남측에서 무암사화강암, 수산화강암 및 월악화강암으로 분포한다. 무암사화강암은 암주상으로 조선누층군을 NW방향으로 관입분포하며 중립질 흑운모화강암과 반상화강암으로 구성된다. 이 화강암은 주변부로 감에 따라 입도가 세립질이고 장석반정이 관찰되는 미르메키틱(myrmekitic)과 퍼사이틱(perthitic) 연정조직이 관찰되고 생성연대는 87~90 Ma로써 후기 백악기 화성활동에 의해 형성된 것으로 해석된다(So and Yun, 1992). 수산화강암은 작은 암주상으로 산출되며 반상조직이 관찰되지 않으며 생성연대는 89~91 Ma로써 후기 백악기 화성활동에 의해 형성된 것으로 해석된다(So and Yun, 1992). 월악화강암은 중립질내지 조립질로 산출되나 주변부로 감에 따라 반상조직이 관찰되는 흑운모-각섬석 화강암으로 구성된다. 이 암석의 생성연대는 87~92 Ma로써 후기 백악기 화성활동에 의해 형성된 것으로 해석된다(So and Yun, 1992).

3. 광산개요

NMC 몰랜드 광산의 현황을 살펴보면, 이 광산은 처음으로 1966년 11월 광업권이 등록(금, 은, 동, 연, 몰리브덴, 중석)되었으며 그 후 1973년 1월에 항도(서통갱, 구진갱)를 개설 채광굴진(1,400 m)하였으며 1977년 장치봉에 의해 본격 개발되어 1979년 5월 휘수연 정광 MoS₂ 65% 850톤 생산 수출하였다. 또한 이 광산은 1980년 7월 일처리 500톤 선광장 준공후 휘수연 정광 MoS₂ 85% 51톤 생산하였으며 1981년 5월 휘수연 정광 MoS₂ 85% 150톤 생산 수출하였다. 이 광산은 1988년 휴광신고를 내기까지 1978년부터 1988년까지 원광 500,000톤을 생산하였다. 2004년 11월 (주)동원 이 금성광산 2개 광구(제천 16호, 제천 26호)를 매입하고 새로이 1개 광구(제천 17호)를 신규 등록하였다. 이후 2005년 3월 제천시에서 채광계획인가를 취득하여 새로이 금실갱을 개설하였다. 2006년 대한광업진흥공

사에 의하면 이 광산의 총매장량은 3,800천톤(MoS_2 0.4%)이며 2008년 채광용 주운반갱도 굴진이 완료되었으며 광산명을 NMC 몰랜드로 변경하였다. 그리고 2008년 7월 1,000톤/일 처리 선광장을 착공하였으며 2010년 3월 선광장 시운전을 가동하였으며 그 해 6월 본격적으로 생산 활동을 실시하여 현재에도 가동중에 있는 광산이다. 이 광산은 과거 광체를 채굴하기 위하여 구진갱, 서통갱 및 사갱을 개설하여 채굴하였다. 구진갱은 해발고도 310 m에 개설된 갱도로써 N16W방향으로 142 m 정도 크로스 굴진되어 있으며, 갱도에서 42 m 지점에서 서측으로 112 m 탐광굴진하였고 갱도에서 84 m 지점에선 동측으로 155 m 드리프트 탐광되어 있다. 서통갱은 해발고도 260 m에 개설된 갱도로서 동측으로 드리프트 450 m와 갱내에서 7~8개 크로스 굴진하여 탐광하였다. 사갱은 해발고도 270 m 지점인 선광장부근에서 갱도를 개설 N55E방향으로 15° 경사로 230 m 굴하 스카른대를 착맥한 후 하1갱(214 mL)을 개설 동서 50 m 정도 굴진하였다.

NMC 몰랜드 광산은 고생대 조선누층군을 관입한 화성암류에 의해 형성된 접촉교대 또는 스카른 광상으로 스카른대내 부분적으로 휘수연석이 광염되어 있다. 스카른대는 녹회색, 적갈색 및 함흑색을 띠며 주로 석류석, 녹염석, 녹니석, 투철회석, 규회석 및 석영 등의 스카른 광물과 휘수연석, 회중석, 황철석 및 자류철석 등의 광석광물이 산출된다. 이 스카른대는 폭이

80~100 m 정도이고 연장성은 동서측에서 각각 동부단층 및 금성단층에 의해 규제되어 800 m 정도 확인된다. 스카른대내 휘수연 광화대의 규모는 장경 640 m, 단경 4~112 m, 높이 400 m(300 mL~-100 mL)정도이며 그 형태는 사각추 모양으로 유추되며 광체규모는 심부로 갈수록 축소되는 것으로 해석된다. 이 광산은 공간적으로 제천화강암과 인접해 있어 이 화강암을 관계 화성암으로 간주하여 대보화성활동과 관련하여 형성된 광상으로 해석하였으나(Shibata *et al.*, 1983; Jin *et al.*, 1992; Ishihara *et al.*, 2005) 최근에는 백악기 천부 반화강암질 암체에서 유리된 광화유체(97 Ma)로부터 스카른화작용과 더불어 Mo 광화작용이 진행된 것이라는 해석이 제시되었다(Choi *et al.*, 2007).

4. 중력탐사

4.1. 중력탐사 계획

광산의 주위에는 관계 화성암으로 의심될 수 있는 두 개의 화강암이 있는데, 북쪽의 제천화강암은 공간적으로는 거의 붙어 있으며, 남쪽의 무암사화강암은 다소 떨어져 있다. 중력탐사는 주위의 지질구조와의 밀도차를 근거로 상대적인 중력의 차이를 통해 규모를 산출하므로 이들 두 화강암체를 어느 정도 충분히 포함되도록 추정 계획을 세운다. 그리고 관심의 대상이 되는 광산에 가까운 곳은 측정 밀도를 높게 하고 주위

Fig. 2. Distribution of gravity survey points. See Fig. 1 for the legend of surface geology.

로 갈수록 점차 등성하게 측정하도록 한다. 또한 중력탐사의 임시 기준점들을 선정하게 되는데, 이는 전체 탐사 기간 동안 유지되어야 한다. 이때 국토지리정보원의 측지 기준점들을 활용하는 것이 여러 가지 유익이 있다. 탐사 지역 인근으로 국토지리정보원의 통합 기준점 3지점 (U0317, U0324, U0400)이 있고, 또한 2등 수준점 2개 라인(BM 07-00-40-xx, BM 07-03-07-xx)이 있기 때문에 이들을 활용하기로 하였다.

먼저, 광산의 바로 위는 산악이기 때문에 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)으로 측량을 할 수 없는 지역이다. 따라서 토탈스테이션(Total Station)을 이용한 고전적인 측량 방식으로 좌표를 결정하여야 하고, 가능한 촘촘한 측량을 계획하였다. 또한 등산로가 없는 지역이라도 접근이 가능한 대로 최대한 측량을 실시하여 중력 관측점이 고르게 분포하도록 하여야 한다(Fig. 2에서 오른쪽 그림). 그리고 광산의 주변 5 km × 5 km 지역에서는 500 m × 500 m 에 한 측점이 분포하도록 하고, 그 바깥으로 9 km × 10 km 지역에서는 1 km × 1 km 에 한 측점이 분포하도록 설계하였다(Fig. 2에서 왼쪽 그림의 격자망). 그러나 주위의 지형과 군사 보호 구역으로 인해 측정이 어려운 지역에서는 그 빈 공간을 최대한으로 좁히기 위해 접근 가능한 가장 안쪽까지 측정하는 것으로 하였다. 결과적으로 통합기준점 3점과 수준점 11점외에 전체 129점에 대하여 위성항법시스템을 이용한 측위 측량과 중력 측정을 계획하였고, 갯도의 직상부 지역 (0.5 km × 1 km)은 고전적인 토탈스테이션의 측량을 통해 약 40 m 간격으로 측정하기로 하였다.

4.2. 중력탐사

중력탐사는 몇 차례에 나누어서 실시하였는데, 첫 번째 탐사는 2013년 4월 1일부터 5일까지 두 팀으로 나누어 실시하였다. 한 팀은 갯도 바로 위 지역에서 토탈스테이션 측량과 함께 중력 측정을 실시하여 90 측점을 획득하였다. 다른 한 팀은 광산 주변 지역에 대해 Choi *et al.* (1998)의 방법과 같이 정밀한 측지용 위성항법시스템 수신기를 이용한 측위와 중력측정을 실시하여 70 측점을 획득하였다. 두 번째 탐사는 2013년 7월 21일 ~ 8월 3일간 실시하여 광산 주변 지역으로 총 103점을 획득하였다. NMC 물랜드 광산의 여름휴가 기간인 2013년 7월 29~31일 동안은 갯도 내의 중력탐사를 실시하여 51 측점의 자료를 얻었는데, 갯도 내의 측정 자료는 이번 연구에는 포함되지 않는다. Fig. 3은 광산 바로 위의 산지에서의 측량(왼쪽)과 중력 측정(아래), 그리고 갯도 입구가 보이는 중력 기준점에서 위성항법시스템 측량과 중력측정(오른쪽)을 하고 있는 모습이다.

Fig. 2에서 오른쪽 그림은 광산 갯도 바로 위 산지에서의 측점 분포를 보여주는데, 2012년에 갯도 내에서 시추하여 큐폴라 구조를 확인한 시추공을 포함하여 2개의 시추공 주위로 측점이 둘러싸이도록 분포되고 있다는 점이 향후 자료 해석을 위한 신뢰성에 도움이 될 것임을 시사한다. 한편 Fig. 2에서 왼쪽 그림의 탐사 계획 지역(격자망)을 따라 측정한 자료를 예비 처리하여 부계이상도를 그렸을 때, 화강암 지역에서 전형적으로 나타나는 경향과는 다른 결과가 나타났다. 남쪽과 북쪽의 화강암 지역에서 낮은 부계이상이 나오고,

Fig. 3. Gravity measurement and GNSS/total station survey.

[illegible]

측량의 오류인지를 알 수 있는 여지는 별로 없으나, 관측한 위성항법시스템 신호는 멀티패스나 사이클슬립 등이 없이 양호한 것으로 나타나고 있다. 이 점을 제외 하면 높이차의 평균은 10 cm 정도로 나타났다. 그리고 통합기준점에서도 오차의 평균은 16 cm 정도로 나타나고 있다(Table 2). 이 값은 통합기준점에서 국토지리정보원의 지오이드 모델과 본 연구에서 사용한 지오이드 모델과의 차이라고 할 수도 있을 것이다. EGM2008 모델이 전지구중력장과 지형의 5'×5' 자료를 바탕으로 결정한 것인데, 광역적인 지오이드 모델로서 이전의 여러 중력장 모델보다 정확도가 크게 향상된 모델이다. 한편, 국토지리정보원의 지오이드 모델은 각 수준점과 통합기준점에서의 수준측량과 GPS/Levelling 지오이드를 반영한 하이브리드형 모델일 것으로 추정된다. 오늘날의 위성항법시스템 수신기나 자료처리 소프트웨어에서는 몇 가지 지오이드 모델을 선택하여 표고를 바로 계산 할 수 있도록 하는 편의 기능을 제공하고 있다.

5.2. 중력이상 계산

순높이(고도)이상은 위에서 결정된 관측중력에서 측정점의 높이 차이에 의한 중력효과를 보정한 후의 중력 이상을 의미한다. 즉, 대기질량보정과 순높이(고도)보정을 한 후에 그 지점에서의 표준중력과의 차이를 말한다. 순높이보정은 높이의 제공항까지 고려하여 수행되었고, 표준중력의 계산은 GRS1980계를 따랐다. 계산된 순높이이상은 -8.94에서 35.45 mGal 사이에 분포하며, 평균 14.32 mGal, 표준편차 8.68 mGal로 나타났다(Table 3). 측정점의 평균 높이는 272.7 m 인데, Shin (2006b)는 한반도 남부 지역의 중력측점의 평균 높이는 150.4 m, 지형의 평균 높이는 249.4 m 라고 하였다.

부게이상과 지각평형이상을 계산하기 위해서는 지형자료가 필요하다. 육상의 지형자료는 미국 NGA

(National Geospatial-Intelligence Agency)와 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에 의해 주도된 국제프로젝트의 결과로 얻어진 SRTM3 (Digital topography data from three arc-seconds Suttle Radar Topography Mission) (Farr *et al*, 2007)를 이용하였는데, 이는 남위 56도에서 북위 60도에 이르는 전세계 육상지역에 대한 3초(arc-second) 해상도의 자료이다. SRTM은 대부분의 지역에서 오차가 10 m 이내로 매우 우수한 데이터이며, 여기서 이용한 SRTM3는 1초 해상도의 자료를 바탕으로 계산한 평균 고도 자료가 된다. 해양지역에 대해서는 SRTM30_plus (Becker *et al*, 2009)를 이용하였는데, 이는 SRTM3와 기존의 해양지역 중심자료를 이용하여 작성한 전세계에 대한 30초 해상도의 디지털지형자료이다. 연구 지역 일원의 SRTM3 자료에 의한 지형과 중력 측정점의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 중력측점에서 SRTM3의 높이와 위성항법시스템 및 토달스테이션 측량으로 결정된 높이와의 차이는 -26.35 에서 28.39 m 사이에 분포하며, 평균 5.19 m, 표준편차 11.19 m로 나타났다 (Table 3). 이는 SRTM3의 높이가 3"×3" 격자의 평균 높이이기 때문에 보통 계곡 같이 움푹 내려간 지역에서는 양의 값을 보이고, 능선을 따라서는 음의 값을 가지게 된다. 그리고 주로 계곡을 따라 발달하는 도로에서 중력 측정을 많이 하기 때문에 평균값은 약간의 양의 값으로 치우쳐서 나타나기 마련이며, 계곡이 깊을수록 더 큰 양의 값이 된다. 이러한 경향은 Fig. 4를 보면 뚜렷이 나타난다.

부게이상은 순높이이상에서 지형에 의한 중력효과를 더 보정하여 준 것으로서 순높이이상이 측지학적인 의미가 큰 데 비하여 부게이상은 지하의 밀도 분포에 대한 연구에 유용하다. 한편, 지각평형이상은 지각평형을 가정하여 지각의 뿌리 혹은 반뿌리에 의한 중력효과까지 보정한 것으로서 지각평형 상태를 평가하는데 도움

Table 3. Statistics of gravity correction and anomaly (mGal)

	Average	Standard Deviation	Maximum	Minimum
Height (m)	272.7	79.7	526.0	143.9
Heght Difference (SRTM3-GNSS/Survey)	5.19	11.19	28.39	-26.35
Free-air Anomaly	14.32	8.68	35.45	-8.94
Bouguer Anomaly	-13.54	2.37	-6.53	-23.28
Isostatic Anomaly	15.64	2.53	21.70	5.33
Terrain Correction (Total)	3.04	1.54	8.88	0.61
(above MSL)	2.94	1.54	8.77	0.49
(below MSL)	0.10	0.01	0.14	0.06
Isostatic Correction	29.18	0.44	30.69	27.12

Fig. 4. Topography of the study area based on 3-arcseconds data of SRTM3 and height difference of SRTM3 from GNSS/total station survey.

이 되며, 모호면에 의한 광역적인 중력변화까지 제거되었기 때문에 지각내부의 밀도 변화를 보다 잘 반영하게 된다. 때문에 Shin (2006a)은 한반도 남부의 화강암의 분포에 대한 연구에서 부계이상 대신 지각평형이상을 이용한 바 있다. 그러나 지각평형이상까지 계산하기 위한 까다로운 과정에 비하여 탐사범위가 좁거나 모호면의 변화가 큰 지역이 아니면 부계이상과 거의 유사한 경향을 보이기 때문에 천부지각의 탐사에서는 많이 활용되지는 않았다.

지형과 지각의 뿌리/반뿌리에 의한 중력효과를 계산하기 위하여 Shin *et al.* (2011)에 의한 프로그램을

이용하였으며, 지형자료는 전술한 자료들을 사용하였다. 이는 SRTM3와 SRTM_30plus를 이용하여 전세계 중력측정자료에 대한 보정과 중력이상 간의 환산을 쉽고 정확하게 해결할 수 있는 컴퓨터 프로그램인데, 입력하게 될 중력자료는 육상중력탐사, 선상중력탐사, 인공위성고도계 중력자료, 인공위성 중력자료, 혹은 등격자 중력자료 등 다양한 형태를 처리할 수 있도록 한 것이다. 선택사항에 따라 수심/고도 자료에 대한 측정값을 입력하여 사용하거나 지형자료에서 결정된 값을 사용할 수 있다. 또한 관측중력, 고도이상, 부우계이상, 지각평형이상 중의 어느 하나만 있으면 나머지 중력이상

Fig. 5. Isostatic correction.

은 자동으로 계산된다. 지형의 인력효과를 계산하기 위해 지구의 구면 효과를 고려하였으며, 지형보정을 계산하기 위해서는 적분 반경은 166.735 km (Bullard B surface radius)로 하였고, 지각평형보정을 계산하기 위해서는 이의 두 배를 적분 반경으로 하였다. 지각의 뿌리/반뿌리를 계산하기 위해 Airy-Heiskanen의 지각평형가설을 채택하였고, 보상면에서의 등질량을 가정하였다. 지각의 뿌리/반뿌리의 깊이 공식은 3차항 이후의 고차항의 작은 값을 무시한 Heiskanen and Vening Meinesz (1958)에 의한 공식을 이용하였다. 지각의 밀도는 2670 kg/m^3 로, 해수의 밀도는 1030 kg/m^3 로, 지각과 맨틀의 밀도차는 500 kg/m^3 로 두었으며, 표준지각두께 (normal crustal thickness)는 30 km로 두었다. 한편 Choi *et al.* (2002)는 한반도 남부 일원의 평균지각두께가 30 km 정도라고 하였다.

이렇게 계산된 부계이상은 -23.28에서 -6.53 mGal 사이에 분포하며, 평균 -13.54 mGal, 표준편차 2.37 mGal로 나타났고, 지각평형이상은 5.33에서 21.70 mGal 사이에 분포하며, 평균 15.64 mGal, 표준편차 2.53 mGal로

나타났다(Table 3). 일반적으로 순높이이상, 부계이상, 지각평형이상으로 가면서 중력이상의 분포폭, 즉 표준편차가 작아지게 된다. 본 연구지역에서 표준편차는 표에서 보는 바와 같이 각각 8.68, 2.37, 2.53 mGal로 나타났는데, 부계이상과 지각평형이상의 차이가 거의 없다. 이는 연구지역의 범위가 좁고 모호면의 기복이 크지 않기 때문에 지각평형보정의 영향이 두드러지지 않게 나타난 것이다. 지각평형보정은 광역적인 심부 지각(모호면)의 효과를 보정해 주기 때문에 Fig. 5에서 보는 바와 같이 완전한 변화를 보이며, 연구지역에서는 남서에서 북동으로 보정량이 커지고 있다. 이는 북동쪽으로 산맥의 영향에 의해 지각의 뿌리가 깊어지는 것을 반영한 것이다. 연구지역에서 결정된 부계이상도와 지각평형이상을 Fig. 6에 나타내었다.

6. 중력이상도 해석

연구지역은 북쪽으로 제천화강암이 넓게 자리하고 있으며, 남쪽으로 작은 규모의 무암사화강암이 있고,

Fig. 6. Bouguer (left) and isostatic (right) anomalies.

이들 주변으로 넓은 지역은 석회암으로 대표되는 퇴적암들로 되어있다. NMC 몰랜드 광산은 연구지역 중심에 위치하는데, 지표지질도에서 제천화강암과 인접하고 무암사화강암에서는 3~4 km 정도 떨어져 있다. 일반적으로 화강암의 분포는 낮은 중력이상과 좋은 상관관계를 보여주며, 지표 지질에서 드러나지 않는 깊이 규모를 추정하는데 유용하기 때문에(Shin, 2006a), 본 연구에서는 이들 화강암이 NMC 몰랜드 광산의 형성에 어떤 영향을 미쳤을지 중력 이상을 통해 살펴보았다. 해석에 사용한 중력 이상은 고도와 지형 및 지각뿌리의 효과까지 보정하고 난 후에 얻어진 최종적인 결과인 지각평형 이상을 이용하였다 (Fig. 7).

우리나라 유라기 화강암은 암주상으로 나타나는 트라이아스기 화강암 및 백악기 화강암과는 달리 아주 넓은 저반상으로 나타나는 특징을 보이며, 전반적으로 북동-남서 방향의 분포를 보인다(Jwa, 2008). 유라기 화강암에 대한 스위트/슈퍼스위트의 구분에서 Jwa (2008)는 경기 육괴의 유라기 저반은 '경기 슈퍼스 스위트', 영남 육괴는 '영남 슈퍼스 스위트'와 '안동 스위트' 및 '대강 스위트'로 구분하였는데, 제천화강암은 '영남 슈퍼스 스위트'에 해당한다. Shin (2006a)의 지각평형 이상도에 의하면 유라기 화강암은 백악기 화강암보다 규모가 크게 나타나는데, 특히 중부와 서부에서 그 심도가 깊을 것이라 하였다. 그러나 동경 128도보다 동쪽에 위치하는 유라기 화강암은 깊지 않을 것으로 예상되는데, 제천 화강암이 이 지역에 위치한 화강암이며, 지하 분포 규모가 매우 작을 것으로 예상되는 지역이다. 이러한 중

력이상에 의한 깊이 규모의 특징은 앞의 스위트/슈퍼 스위트의 구분이나 시대적인 구분과는 달리 동고서저의 지형 특징처럼 동-서의 위치 차이로 나타나는 것으로 보인다. 한편 무암사화강암을 비롯하여 이 주변의 옥천대에 분포하는 백악기 화강암들은 지각평형 이상도에서 깊이 규모가 다소 클 것으로 나타났다.

본 연구에서 만들어진 지각평형 이상도(Fig. 7)는 기존의 Shin (2006a)에 의한 한반도 남부 전체에 대한 광역적인 것보다 훨씬 향상된 결과이다. 연구 지역은 약 17 km × 15 km 지역에서 263 개의 측점이 있어서 1 km² 당 1 개 정도의 측점을 확보하여 측점 밀도가 높은 편이며, 망조정 결과로 살펴본 중력 이상도의 신뢰도도 높다.

이 그림에서 나타난 가장 큰 특징은 남쪽의 무암사화강암을 중심으로 낮은 중력 이상이 뚜렷이 분포하지만, 북쪽의 제천화강암에서는 이런 경향이 약하다는 점이다. 이는 위에서 언급한 Shin (2006a)의 지각평형 이상도와 화강암의 분포에 대한 토의에서 제천화강암과 이보다 동쪽으로 분포하는 유라기 화강암은 규모가 작을 것이며, 이보다 남쪽의 옥천대에 분포하는 백악기 화강암은 다소 규모가 클 것이라는 해석과 일치하는 결과이다.

그러나, 다른 한편으로 제천화강암과 무암사화강암의 중력 이상의 특징이 지하의 규모의 차이가 아니라 밀도의 차이라고 해석할 수 있는 여지도 있는데, 제천 화강암이 무암사화강암에 비해서 밀도가 뚜렷이 높다면 이런 중력 이상 특징이 나타날 수도 있기 때문이다.

Fig. 7. Interpretation of the isostatic anomaly in the viewpoint of related granite, showing the influence of the Muamsa granite to the NMC Moland mine.

그럼에도 불구하고 본 연구에서는 제천화강암의 밀도가 무암사화강암을 비롯한 백악기 화강암은 제외하더라도 낮은 중력이상과 좋은 상관관계를 보여주고 있는 같은 주라기 화강암들과도 달리 높을 것이라는 근거를 찾을 수 없기 때문에 일반적으로 받아들여지는 바와 같이 낮은 밀도를 가진 평균적인 화강암으로 간주하여 해석하였다. 또한 한국지질자원연구원에서 NMC 몰랜드 광산 갱도 내에서 2012년 시추한 자료에서는 석회암의 평균 밀도가 2750 kg/m^3 , 쿠파라 구조로 관입된 반화강암이 $2660 \sim 2700 \text{ kg/m}^3$ 정도로 나타났는데, 이는 이 광산의 관계화성암이 일반적인 화강암의 밀도와 다르지 않다는 것을 보여준다.

따라서 Fig. 7에 나타난 두 화강암체의 밀도는 서로 비슷하고, 주변 퇴적암류보다는 낮다는 전제하에 중력 이상을 해석할 때, 북쪽의 제천화강암은 지표에 드러난 규모는 무암사화강암보다 넓지만, 반대로 깊이 규모는 매우 작을 것이고 해석할 수 있다. 이 화강암은

지표보다도 심부로 갈수록 폭이 줄어들면서 중심은 각각평형이상의 17 mGal 선으로 둘러싸인 동쪽과 북서쪽으로 향하는 것으로 보인다. 반면 무암사화강암은 깊어질수록 폭이 넓어지면서 제법 깊은 곳까지 화강암이 분포하는 것으로 해석할 수 있다. NMC 몰랜드 광산과 주위를 살펴보면, 광산은 제천화강암의 지질경계에서 거의 접하고 있으나, 낮은 중력이상의 분포는 차라리 무암사화강암의 연장으로 해석되는 것이 더 타당해 보인다. 이는 16 mGal 과 15.5 mGal 등치선을 보면 쉽게 확인이 된다. 즉 지표에서는 광산이 제천화강암과 상호작용이 어느 정도 있었을지라도 심부로 갈수록 무암사화강암이 광산의 북쪽까지 영향을 미치면서 주변 석회암과의 접촉 변성과 광화작용에 훨씬 더 큰 영향을 미쳤을 것이라는 것을 보여주는 것이다. 그림에서 보라색 화살표는 무암사화강암이 북쪽으로 영향을 미치는 것을 나타낸 것이다.

그러므로 본 연구결과는 이 광산이 비록 지표에서는

제천화강암에 가까울지라도 지하구조에서는 남쪽의 무암사화강암이 가까울 수 있음을 보여줌으로써 백악기 무암사화강암이 관계화성암으로 작용하였을 것이라는 Choi *et al.*(2007)의 최근 연구에서 남아 있던 공간적인 접촉의 의문을 푸는데 중요한 역할을 할 수 있는 것이다. 즉 지표 지질도 상에서 인접한 제천화강암을 관계 화성암으로 간주하였던 해석(Shibata *et al.*, 1983; Jin *et al.*, 1992; Ishihara *et al.*, 2005)보다는 백악기 천부 반화강암질 암체에서 유리된 광화유체로부터 스카르화작용과 더불어 Mo 광화작용이 진행된 것이라는 해석(Choi *et al.*, 2007)이 더 가능성이 높음을 제시하는 것이다.

7. 결 론

제천에 있는 NMC 몰랜드 광산 일원에 대해 중력탐사를 실시하여 정밀한 중력이상도를 작성하고, 이를 해석함으로써 광산의 형성에 영향을 미친 관계 화성암에 대해 제천화강암과 무암사화강암을 비교하여 살펴보았다. 해석에 사용한 중력이상은 고도와 지형 및 지각뿌리의 효과까지 보정하고 난 후에 얻어진 최종적인 결과인 지각평형이상이다. 중력 측점은 1 km² 당 1 점 정도로서 측정 밀도가 높은 편이며, 망조정 결과로 살펴본 중력이상도의 신뢰도도 높다.

지표 지질에서는 북쪽으로 제천화강암이 넓게 자리하고 있으며, 남쪽으로 작은 규모의 무암사화강암이 있고, 이들 주변으로 넓은 지역은 석회암으로 대표되는 퇴적암들로 되어있다. 광산은 이 석회암층이 주변의 화강암의 관입의 영향을 받아 형성된 것인데, 광산이 북쪽 제천화강암에 거의 접하는 지역에 위치하고 있기 때문에 이것이 주요 관계 화성암으로 작용했을 것으로 생각되어왔다. 그러나 최근에는 남쪽의 무암사화강암이 광산의 관계 화성암으로 작용했을 것이라는 주장이 제기되기 시작하였다 (Choi *et al.*, 2007).

본 연구의 중력이상은 제천화강암은 지표에 드러난 것과는 달리 지하의 분포 규모는 매우 빈약할 것이라는 것을 보여준다. 반대로 남쪽의 무암사화강암은 지표에 드러난 것과는 달리 넓고 깊게 분포하면서 광산의 북쪽으로까지 뻗어있어서 제천화강암보다 훨씬 주된 역할을 한 관계 화성암이었을 것임을 드러내었다. 여기에서 제시한 중력 자료의 정성적 해석에 이어서 앞으로 더 많은 자료를 보강하고, 다양한 분석 방법을 적용함과 더불어 정량적인 지하구조 모델을 개발하는 등 더 향상된 연구로 발전시켜나갈 계획이다.

사 사

NMC 몰랜드 광산의 서만근 팀장을 비롯하여 탐사에 도움을 주신 광산 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다. 힘든 탐사과정에서도 즐거운 마음으로 성실하게 일해 준 김성일, 이정우, 김재우 학생들에게 감사의 마음을 전합니다. 꼼꼼하게 논문을 다듬어주신 심사위원께 감사드립니다. 본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 '심부 금속광체 정밀 물리탐사 및 채광기술 개발(14-3112)'과제로 수행되었습니다.

참고문헌

- Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F. Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G. and Weatherall, P. (2009), Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30 Plus, Mar. Geol., v.32, n.4, 355-371.
- Cho, D.L. and Kwon, S.T. (1994) Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of crustal thickness. Jour. Geol. Soc. Korea, v.30, p.41-61.
- Choi, K.S., Kim, J.H. and Shin, Y.H. (2002) On the isostasy and effective elastic thickness of the lithosphere in southern part of the Korean Peninsula. Jour. Korean Geophys. Soc., v.5, n.4, p.293-303.
- Choi, K.S., Park, P.H. and Shin, Y.H. (1998) Gravity Surveying with GPS. Jour. Korean Earth Sci. Soc., v.19, n.2, p.120-126.
- Choi, K.S., Yang, C.S., Shin, Y.H. and Ok, S.S., (2003) On the improvement of precision in gravity surveying and correction, and a dense Bouguer anomaly in and around the Korean Peninsula. The Jour. Korean Earth Sci. Soc., v.24, n.3, p.205-215.
- Choi, S.G., Park, J.W., Seo, J., Kim, C.S., Shin, J.K., Kim, N.H., Yoo, I.K., Lee, J.Y. and Ahn, Y.H. (2007) Hidden porphyry-related ore potential of the Geumseong Mo deposit and its genetic environment. Econ. Environ. Geol., v.40, p.1-14.
- Farr, T.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, R. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf (2007) The shuttle radar topography mission, Rev. Geophys., 45, doi:10.1029/2005RG000183.
- Heiskanen, W.A. and Vening Meinesz, F.A. (1958) The Earth and its gravity field, McGraw-Hill Book Co. Inc.
- Ishihara, S., Jin, M. and Terashima, S. (2005) Mo-related adakitic granitoids from non-island-arc setting: Jecheon pluton of South Korea. Resource Geol., v.55, p.385-396.
- Jwa, Y.J. (2008) A Preliminary Study on Granite Suite and Supersuite for the Jurassic Granite in South Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.17, p.222-230.
- Jin, M., Kim, S.J., Shin, S.C., Choo, S.H. and Chi, S.J.

- (1992) Thermal history of the Jecheon granite pluton in the Ogcheon fold belt, South Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.1, p.49-57.
- KORES (2006) Detailed geological survey report (molybdenite: Jaechon area). Korea Resource Corporation, 100p.
- Park, N.Y. (1982) Molybdenum mineralization, exploration and exploitation of the ore deposits at the Keumseong mine, Republic of Korea. Unpub. Ph.D. thesis. Japan, Waseda Univ., 188p.
- Shibata, K., Park, N.Y., Uchiumi, S. and Ishihara, S. (1983) K-Ar ages of the Jecheon granitic complex and related molybdenite deposits, South Korea. *Mining Geol.*, v.33, p.193-197.
- Shin, D.B. and Lee, I.S. (2006) Fluid inclusions and their stable isotope geochemistry of the carbonate-hosted talc deposits near the Cretaceous Muamsa granite, South Korea. *Geochem. Jour.*, v.40, p.69-85.
- Shin, Y.H. (2006a) Gravity anomaly and the distribution of granitoids in the southern part of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.42, n.3, p.383-396.
- Shin, Y.H. (2006b) Implications of gravity anomalies in the tectonic provinces of the southern part of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.42, n.3, p.397-411.
- Shin, Y.H., Choi, K.S., Kim, K.O. and Na, S.H. (2011) Development and application of a FORTRAN program for gravity corrections, a paper presented at 2013 Korea Society of Earth and Exploration Geophysicist Conference, p.97-98.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1992) Geochemistry and genesis of hydrothermal Au-Ag-Pb-Zn deposits in the Hwanggangri mineralized district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v.87, p.2056-2084.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1994) Origin and evolution of W-Mo-producing fluids in a granitic hydrothermal system: geochemical studies of quartz vein deposits around the Susan granite, Hwanggangri district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v.89, p.246-267.
- Tamura, Y. (1982) A computer program for calculating the tide generating force. The publications of the international latitude observatory of Mizusawa, v.16, p.1-19.
- Yoo, B.C., Brown, P.E. and White, N.C. (2011) Hydrothermal fluid characteristics and genesis of Cu quartz veins in the Hwanggangri metallogenic district, Republic of Korea: Mineralogy, fluid inclusion and stable isotope studies. *Jour. Geochem. Explo.*, v.110, p.245-259.

2014년 2월 20일 원고접수, 2014년 4월 3일 1차수정,
2014년 4월 23일 게재승인