지질학회지 제 55권 제 4호, p. 403-413, (2019년 8월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 55, no. 4, p. 403-413, (August 2019)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2019.55.4.403

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

태백산광화대에서의 중력이상

신영홍‡ · **고인세**
한국지질자원연구원

요 약

태백산광화대는 우리나라에서 가장 중요한 광화대임에도 불구하고 이 지역에서의 중력 탐사는 2015년이 되어서야 시작되었다. 석회암 지대를 화강암질 마그마가 관입하면서 스카른과 열수광상을 많이 형성하게 되므로 광상을 효율적으로 개발하기 위해서는 화강암질암의 공간적 분포를 파악하는 것이 필요하다. 화강암질암은 석회암에 비해 밀도가 뚜렷하게 낮기 때문에 중력 탐사를 통해 넓은 지역의 공간적 분포를 빠르고 쉽게 파악할 수 있다. 태백산광화대의 광산들은 열수 혹은 마그마의 온도가 비슷한 조건에서의 화강암체와 석회암의 경계로 해석될 수 있는 낮은 중력이상의 가장자리를 따라 분포하는 특징을 보여주고 있음을 주목할 만하다. 상동광산은 비록 관계화강암이 지표에 드러나지는 않았지만 낮은 중력이상을 통해서 지하에 큰 규모로 분포하고 있는 것으로 볼 수 있는데, 이는 인근의 거도광산 주변에 드러난 어평화강암보다 훨씬 더 큰 규모일 것으로 추정된다. 이와 같이 지표에 화강암체가 드러나지 않는 지역에 발달한 다른 광상들도 낮은 중력이상을 보여줌으로써 지하에 화강암체가 있음을 나타내며, 또한 소규모의 산성암맥이 드러난 곳도 낮은 중력이상으로 이어져 있는 것으로 나타나서 지하에서는 더 큰 규모의 화강암체로 연결되어 있을 것으로 해석할 수 있다.

주요어: 태백산광화대, 중력, 관계화성암, 상동광산, 거도광산

Young Hong Shin and In Se Ko, 2019, Gravity anomaly in the Taebaeksan mineralized zone. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 403-413

ABSTRACT: Gravity survey in Taebaeksan mineralized zone began in 2015, although it is the most important mineralized zone in Korea. It is necessary to estimate the spatial distribution of granitic rocks in order to develop ore deposits effectively, since granitic magma penetrates the limestone zone and forms a lot of scarn and hydrothermal deposits. Gravity survey provides a quick and easy way to estimate such spatial distribution of granitic rocks at large areas, because granitic rocks are distinctly less dense than limestone. It is notable that the mines of the Taebaeksan mineralized zone are distributed along the edges of low gravity anomaly, which can be interpreted as the boundary between granitic body and limestone of similar temperature condition of hydrothermal or granitic magma. The Sangdong mine, although its source granite is not exposed on the surface, can be thought to have a underground granitic body by its low gravity anomaly, which is estimated to be much larger than the nearby Eopyeong granite of Geodo mine. Likewise, other ore deposits developed in the area where the granitic body is not exposed show low gravity anomalies indicating that there is a granitic body underground. In addition, the areas where small scale acid dyke is revealed are connected with low gravity, which may imply that they are connected to a larger granitic body underground.

Key words: Taebaeksan mineralized zone, gravity, source granite, Sangdong mine, Geodo mine

(Young Hong Shin and In Se Ko, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

우리나라 금속광상의 주요 관련암인 백악기 화강암류는 대부분 경상분지 내에 분포하나 태백산분지 내에도 일부 지역에 분포하는데, 이들의 규모는 작지만 모암이 주로 석회암질암이기 때문에 상동, 연화광상과 같은 규모가 큰 접촉교대 내지 열수교대광상이 발달한다(Lee *et al.*, 1996). 태백산광화대는 Zn,

‡ Corresponding author: +82-42-868-3104, E-mail: yhshin@kigam.re.kr

Pb, W, Fe, Cu, Mo, Ag, Au와 같은 금속이 다량 수반되는 국내에서 가장 중요한 광화대로서 광상 유형은 스카른 광상, 열수교대 광상, 중열수맥상광상, 칼린광상으로 시공간적 측면에서 반암형광화작용과 밀접한 연관성을 보이고 있으며, 이러한 광상 유형의 금속비는 관계화강암체의 근원물질로부터 온도 하강에 따라 중간형 황 조건에서 저황 조건으로 변화하는 정출 환경과 다금속광화작용시 각 광산별 공간적 근접성에 기인한 유체의 진화 단계 차이를 반영하고 있다(Choi *et al*., 2009).

석회암 지대를 관입하는 화성활동에 의해 형성된 광상의 연구에 있어서 관계화성암의 공간적 분포를 파악하는 것은 가장 기본적이면서도 광산 개발을 효과적으로 할 수 있도록 도와주는 주요한 역할을 할 수 있다. 이를 위해 지질도와 지화학분포도를 기반으로 지표 지질을 분석하고 대상 지역에 대한 정밀한 지질조사가 더해지겠지만, 지하의 공간적 분포는 지표 지질로 파악하기에는 제한적이기 때문에 물리탐사를 활용하게 되며 최종적으로 시추를 통해 직접적인 확인을 하게 된다. 여러 가지 물리탐사 중에서 중력탐사는 지하의 밀도 분포를 파악하는 가장 유용한 방법인데, 특히 화강암의 경우 밀도가 낮은 광물들로 구성되어 낮은 중력이상과 좋은 상관관계를 보여주고 있어서 이의 지하 분포를 파악하는데 매우 유용하다(Shin, 2006a; Shin *et al*., 2014). 또한 직접적인 시추로는 접근할 수 없는 모호면까지의 심부 구조에 대한 정보도 제공함으로써 광상 형성과 관련하여 지체구조적인 해석을 하는 데에도 도움이 될 수 있다(e.g. Shin, 2006b; Shin *et al*., 2006b). 한 예로 제천 NMC 몰랜드 광산에서의 중력 탐사를 들 수 있다. 이 광산은 본 연구지역보다 서쪽에 위치하며, 석회암 지대를 관입한 화성암류에 의해 형성된 접촉교대 또는 스카른 광상이다. 이 광산은 쥐라기 제천화강암과 인접해 있기 때문에 이를 관계화성암으로 해석하였으나, 남쪽으로 다소 동떨어져 있는 백악기 무암사화강암을 관계화성암일 것이라는 주장이 지화학적인 측면에서 제시된 바 있다(Choi *et al*., 2007). 이후 중력탐사를 바탕으로 해석한 지하구조는 지표에서 관찰되는 지질과는 달리 지하에서는 무암사화강암이 광산의 형성에 직접적으로 영향을 미쳤을 가능성을 제시함으로써 관계화성암의 분포를 파악하는 도구로서 중력탐사의 유효성을 입증하였다(Shin *et al*., 2014).

본 연구에서는 태백산광화대에서 2015년부터 2018년까지 탐사한 중력 자료를 통해 광화대 지하의 기반암 혹은 화강암의 분포에 대한 정보를 제공한다. 또한 중력탐사 이전에 이미 개발된 스카른이나 열수형 맥상광상의 분포와 비교함으로써 관계화성암으로 작용하였을 가능성에 대해서도 살펴보았다. 이 중력이상 자료는 한국지질자원연구원의 홈페이지를 통해 배포할 예정인데(www.kigam.re.kr의 정보광산/간행물구매), 이 지역의 탐사 측점 밀도를 고려하여 한반도 남부 전체를 대상으로 저해상도로 제공되는 광역 디지털 중력이상 자료보다는 높은 해상도로 제공될 것이다. 이를 통해 관계화성암의 3차원적인 분포를 파악하고 광상의 개발과 연구에 활용되기를 기대한다.

2. 중력탐사

태백산광화대에서의 중력 측점은 매우 부족하였기 때문에 본 연구를 위하여 거의 새로운 탐사가 이루어졌다. 처음 탐사 대상 지역은 1/5만 지질도 기준으로 예미, 호평, 고사리, 옥동리, 서벽리, 장성의 6개 도폭(북위 37도 ~ 37도 20분, 동경 128도 30분 ~ 129도 15분)이었는데, 이 논문의 연구 지역은 이보다 북쪽으로 북위 37도 24분까지 이르도록 넓게 설정하였다(그림 1). 중력 연구의 특성상 주변 지역까지 자료를 확보하도록 탐사를 계획하였는데, 대상 지역보다 서쪽과 남쪽 지역은 기존의 광역 탐사 자료가 있었으나 북쪽과 동쪽으로는 추가적인 탐사가 필요하였다. 2015년과 2016년 동안은 연구지역 전체를 대상으로 자료를 확보하기 위해 약 2 km 간격으로 빠르게 탐사를 하였으며, 주변으로도 광역 탐사 자료가 없는 지역은 약 4 km 간격으로 보강 탐사하였다. 이어서 2017년과 2018년은 거도 광산이나 상동 광산을 포함하여 특정 광상 주변으로 조밀하게 탐사가 이루어졌다. 따라서 연구지역 내에서 지형이나 군사시설 등의 이유로 접근하지 못한 곳은 측점을 확보하지 못해 측점 사이의 간격이 크게 벌어진 곳이 있으나, 전체적으로는 2 km 이내의 간격으로 측점이 확보되었고, 몇몇 광상 주변으로는 등산로를 따라서 탐사하여 측점 간격을 수 백 m 이내로 좁힐 수 있었다. 연구지역의 측점은 2018년까지 1,187점에 이르는데, 측점의 높이가 4.0 m에서 1563.2 m까지 분포하고, 평균은 714.9 m, 표준편차는 290.1 m로 매우

험한 지역이다.

중력탐사는 정확한 위치가 중요하기 때문에 측량을 하게 된다. 대부분의 측점에 대해서 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)으로 측량을 하였고, 일부 산악 지역에서 위성신호를 받기 어려운 경우 토탈스테이션(Total Station)을

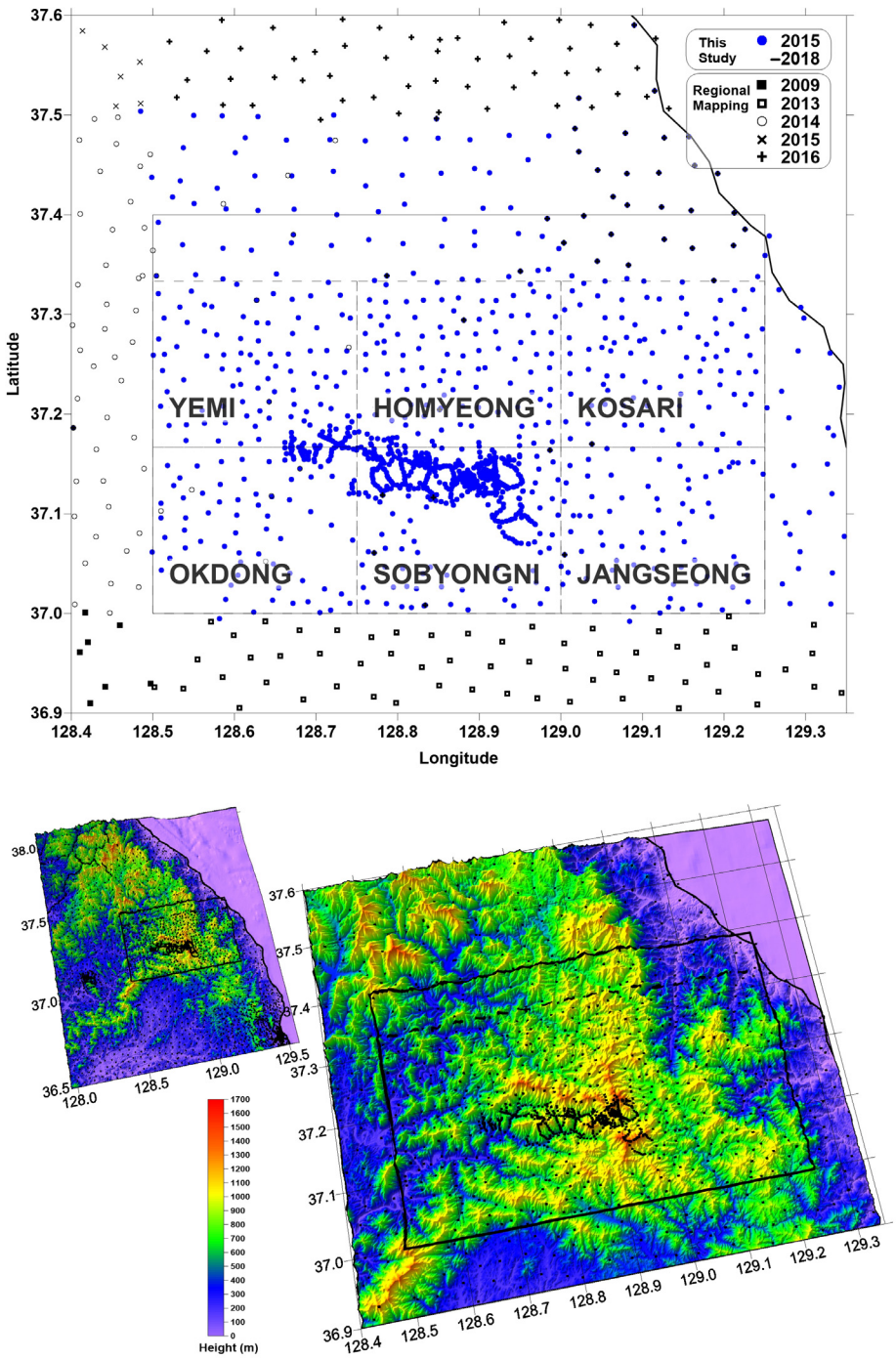

Fig. 1. Gravity point distribution and topography in and around the study area.

이용한 고전적인 측량 방식으로 좌표를 결정하였다 (그림 2). 좌표계는 GNSS 측량에서 일반적으로 사용되는 World Geodetic System 1984 (WGS84)를 적용하였다. GNSS 측정에서 바로 얻어지는 높이는 기준타원체로부터의 높이이기 때문에 지오이드면으로부터의 높이인 표고로 환산하기 위해서 지오이드모델이 필요하다. 여기서는 대표적인 지구중력장 모델인 EGM (Earth Gravitational Model) 2008 모델(Pavlis *et al*., 2012)을 이용하였다. 고전적인 측량으로 좌표를 결정한 경우에도 측량의 출발점이 되는 기준점의 좌표를 GNSS 측량으로 결정하였으며, 높이 결정을 위해 EGM2008 모델을 사용하였다.

3. 중력보정과 중력이상

중력이상을 구하기 위해서는 먼저 각 측점의 관측중력을 결정하고, 이후 연구 목적에 따라 순높이(고도)이상, 부게이상, 지각평형이상 등을 계산하게 된다. 탐사에 이용한 중력계는 상대중력계이므로 관측중력을 결정하기 위해서는 중력기준점이 필요한데, 태백시 강원관광대학 테니스장 부속건물 내에 위치한 절대중력기준점(979,767.977 mGal)을 사용하였고, 중력 측정의 편의를 위해서 탐사 지역의 넓이와 도로망 및 기간을 고려하여 기준점을 몇 개 더 설치하여 사용하였다. 관측중력을 결정하기 위한 첫 보정 단계는 중력의 시간 변화 성분을 제거하는 조석보정이며, 기존의 데이터 처리에서 사용하였던 Tamura (1982)의 프로그램을 이용하여 계산하였다. 한편, 이 프로그램에 오류를 수정하고 기능을 향상시킨 프로그램인 K-Tide (Na *et al*., 2011)와 K2-Tide (Na *et al*., 2016)이 발표되었는데, 이들 프로그램에서의 중력 차이가 약 2 μGal 이내이므로 야외 중력탐사에서는 실질적인 의미는 없으나 정밀한 연속 중력 측정에서는 새로 개발된 프로그램을 사용하는 것이 바람직하다. 다음으로 기계높이보정을 하여야 한다. 이는 측정 상황에 따라 지표면으로부터 중력계의 높이가 일정하지 않기 때문에 이 높이 차이만큼 보정하는 것으로서 중력의 수직변화율을 이용하여 간단히 보정할 수 있다. 이어서 상대중력계의 스프링의 변이를 다루는 계기보정과 망조정을 함으로써 관측중력을 결정하게 된다. 계기보정은 같은 지점을 반복 측정하여 선형적인 변이를 가정하여 보정하고, 관측중력을 결정하는 과정에서 마지막으로 남은 임의의 오차는 최소자승법을 이용한 망조정을 통해 제거하게 되는데, 여기서는 계기보정까지도 망조정에서 같이 처리되도록 하였다. 망조정은 최소자승법을 이용하는 Choi *et al*. (2003)에 의한 방식을 적용하였으며, 망조정 결과로 추정되는 오차는 그림 3에 나타내었다.

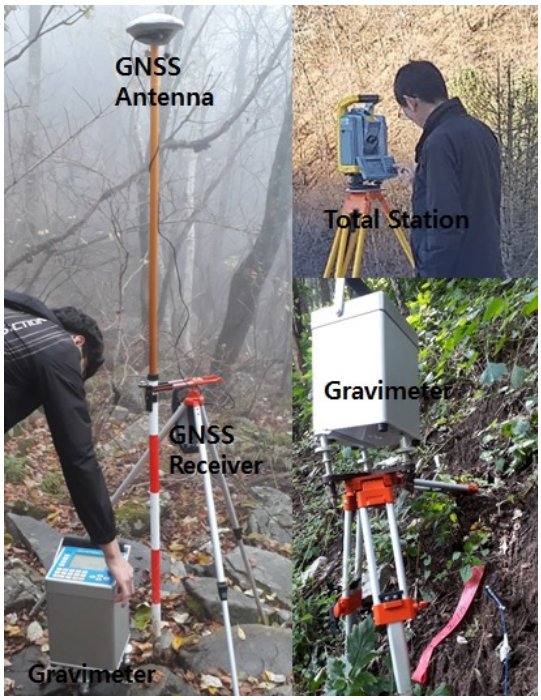

Fig. 2. Gravity measurement and point positioning with GNSS and total station.

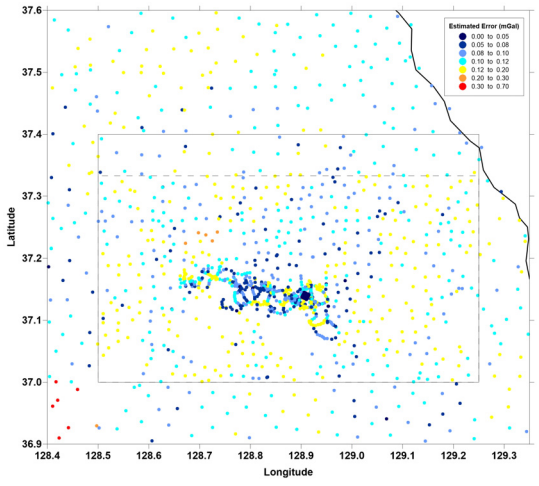

Fig. 3. Estimated error of the observed gravity.

순높이이상은 위에서 결정된 관측중력에서 측정점의 높이에 의한 중력효과를 보정한 것인데, 이를 위해 인공위성 궤도로 결정한 지심인력상수에 포함된 대기의 질량 효과를 보정하는 대기질량보정과 지구질량중심에서 멀어지면서 작아지는 효과를 보정하는 순높이(고도)보정을 한 후 표준중력과의 차이를 계산한다. 순높이보정은 높이의 제곱항까지 고려하여 수행되었고, 표준중력의 계산은 GRS1980계를 따랐다. 연구지역의 순높이이상은 1.5 mGal ~ 153.7 mGal 사이에 분포하며, 평균은 66.9 mGal, 표준편차는 33.4 mGal 이다.

순높이이상은 지형에 의한 중력효과를 포함하고 있으므로 지하의 밀도 분포에 대한 정보를 얻기 위해서는 부게이상을 계산하여야 한다. 지형에 의한 중력효과를 계산하기 위해서는 지형자료가 필요한데, 육상지역은 SRTM (Suttle Radar Topography Mission) 자료(Farr *et al.*, 2007)를 사용하고, 해양지역은 SRTM30_plus 자료(Becker *et al.*, 2009)를 같이 사용하여 육상과 해상의 지형을 모두 보정하도록 하였다. 각각의 중력 측점에서 측량을 통해 결정된 높이는 SRTM3 자료에서 추출한 높이와 차이가 나게 되는데, 이는 SRTM3가 해상도 3″×3″의 평균 고도 자료이기 때문이다. 이는 위도 37도에서 동서 방향으로 74.2 m, 남북 방향으로 92.5 m 정도에 해당한다. 따라서 계곡 같이 움푹 내려간 곳에서는 측점이 평균 지형보다 낮고, 능선 같은 곳에서는 측점이 평균 지형보다는 높다. 연구지역의 경우 인가나 도로가 계곡을 따라 많이 형성되므로 전체적으로 중력 측점의 높이는 평균 지형보다는 낮게 나타나는 편이다. 그림 4에 나타낸 2015년부터 2018년까지 탐사한 연구지역과 주변에 대해서 측점의 평균 지형과의 높이 차는 -43.8 m에서 56.2 m 사이에 분포하고, 평균이 10.9 m 이고 표준편차가 10.7 m 로서 측점이 SRTM3에 비해서 평균적으로 더 낮은 곳에 있음을 확인할 수 있다. 한편, 2015년부터 2017년까지의 측점에 대해서 평균은 10.4 m 이고 표준편차가 9.8 m 이였던 것에 비해서 2018년 탐사 측점의 평균은 13.0 m 이고 표준편차는 13.5 m 로서 탐사 지역이 더 험하였음을 반영하여 준다.

부게보정을 위하여 각 측점을 기준으로 반경 166.7 km 범위 내의 지형에 의한 효과를 계산하였으며, 이때 지각의 밀도는 2670 kg/m^3 로, 해수의 밀도는 1030 kg/m^3 로 가정하였다. 연구지역의 지형보정량은 2.0 mGal ~ 29.8 mGal 사이에 분포하며, 평균은 8.6 mGal, 표준편차는 3.0 mGal 로서 험한 지형을 반영하여 비교적 큰 범위를 가진다. 부게보정과 지형보정을 거쳐 계산된 부게이상은 -18.5 mGal ~ 30.9 mGal 사이에 분포하며, 평균은 -5.3 mGal, 표준편차는 8.6 mGal 이다.

지각평형이상은 부게이상에서 모호면에 의한 중력효과를 걷어내는 지각평형보정을 더하였기 때문에 지각내부의 밀도변화를 더 잘 반영한다. 여기서는 Airy-Heiskanen의 지각평형설을 채택하고 보상면에서의 등질량을 가정하였으며, Heiskanen and Vening Meinesz (1958)에 의한 공식으로 지각의 뿌리/반뿌리를 계산하였다. 적분반경은 지형보정의 2배로 하였고, 지각과 맨틀의 밀도차는 500 kg/m^{3}로, 표준지각두께(normal crustal thickness)는 30 km 로 가정하였다. 계산된 지각평형이상은 13.0 mGal ~ 36.2 mGal 사이에 분포하며, 평균은 22.8 mGal, 표준편차는 4.4 mGal 이다.

순높이이상과 부게이상 및 지각평형이상의 표준편차가 각각 33.4, 8.6, 4.4 mGal 로 줄어들고 있는

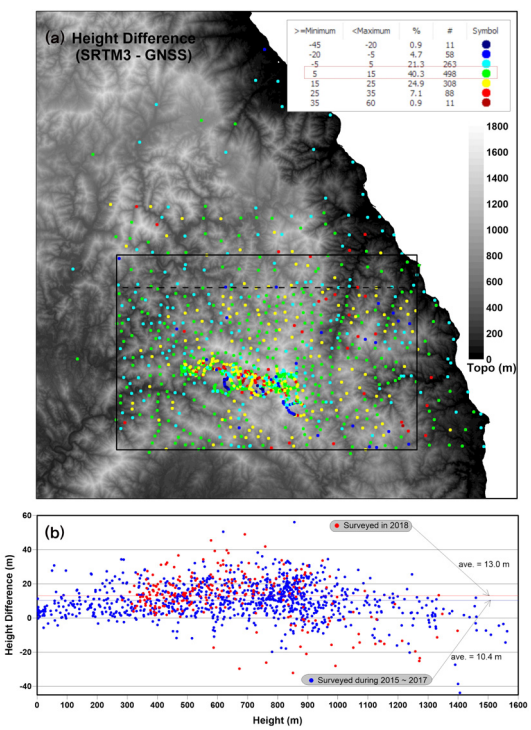

Fig. 4. Height difference between digital elevation data (SRTM3) and field survey with GNSS and total station.

데, 이는 보정이 더해지면서 편차가 줄어드는 전형적인 양상을 보여주는 것이다. 특히 지각평형이상의 표준편차가 부게이상의 표준편차에 비해 51% 로 작아진 것을 통해 이 지역에서 태백산맥과 동해에 의한 모호면의 변화가 작지 않다는 것을 확인할 수 있고, 따라서 이 지역의 천부 지각에 대한 연구에서는 부게이상보다는 지각평형이상을 사용하는 것이 더 좋을 것임을 보여준다. 위 자료처리를 통해서 결정된 연구지역의 부게이상과 지각평형이상을 1/25만 지질도(mgeo.kigam.re.kr)와 같이 그림 5에 나타내었다. 그림에서 흰 점들은 중력 측점의 분포를 표시하고, 기호들은 한국지질자원연구원의 1/25만과 1/5만 축척의 지질도를 따랐는데, 파란색은 밀도가 낮은 화성암체들에 사용하였고, 빨간색은 석회암을 비롯하여 대체로 밀도가 높은 퇴적암에 사용하였다. 광상의 분포는 Chi *et al*. (2012)와 Shin *et al*. (2007)을 이용하였다.

4. 중력이상도 해석

중력이상은 지하의 밀도 분포를 반영하기 때문에 낮은 밀도의 암석이 분포하는 곳에서는 상대적으로 낮은 중력이상이 나타난다. 그러므로 비중이 낮은 광물이 많은 화강암이나 화강편마암 지역에서는 보통 낮은 중력이상을 관찰할 수 있다. 우리나라의 중력이상도를 보면 이런 특징이 잘 나타나 있는데, 모호면의 밀도 분포가 포함된 부게이상도보다는 이의 효과를 보정한 지각평형이상도가 지질도와 더 비슷한 분포를 보여준다(Shin, 2006a; Lim *et al*., 2019). 그림 5에서 보는 바와 같이 태백산광화대의 부게이상은 서쪽에서 낮은 이상을 보이고 동해쪽으로 가면서 커지는 경향이 잘 나타나고 있는데, 동해안에 인접해서는 아주 뚜렷하게 나타난다. 따라서 이 지역의 광상형성과 관련해서는 부게이상보다는 심부 모호면의 중력효과를 보정한 지각평형이상을 사용하

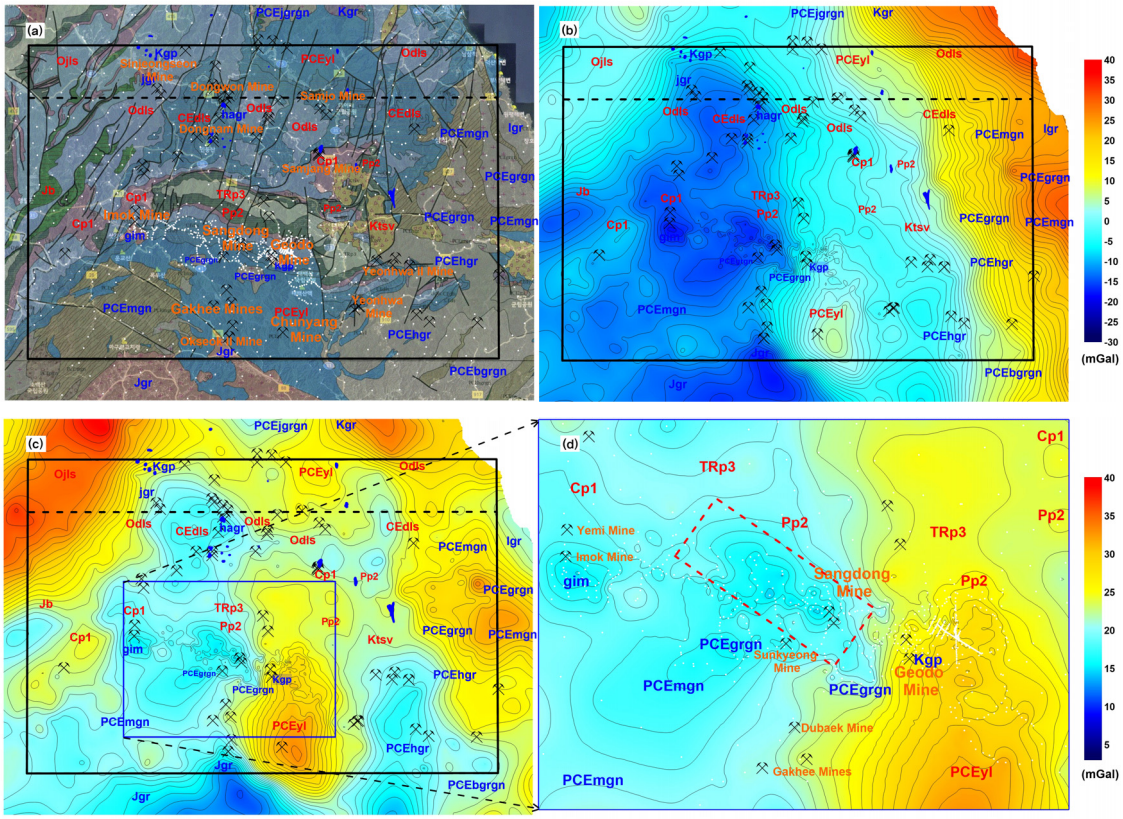

Fig. 5. Maps of geological features (a), Bouguer gravity anomaly (b), isostatic gravity anomaly (c), and isostatic anomaly enlarged for Imok-Sanngdong-Geodo mines (d).

여야 한다. 그러나 심부 모호면의 효과를 제거하였음에도 불구하고 연구지역에서는 지질도와 중력이상의 상관관계가 다른 지역에 비해 낮은데, 이는 지하의 밀도분포가 지표 지질과는 상당히 차이가 있을 가능성을 제시한다.

연구지역의 지질도에서 남서쪽으로는 선캄브리아기의 미그마타이트질편마암(PCEmgn)과 화강편마암(PCEgrgn)이 넓게 분포하고, 쥐라기와 백악기의 어평화강암체(Kgp)와 이목화강암체(gim)가 작은 규모로 분포하고 있다. 그리고 연구지역 남쪽 끝에서 그 이남으로 춘양과 풍기 지역에 화강암체(Jgr)가 넓게 분포한다. 따라서 이들 지역에서는 예상대로 낮은 중력이상이 넓게 나타난다. 그러나 여기서 그치는 것이 아니라 이러한 낮은 이상대가 민둥산과 화암리를 거쳐 북쪽으로도 넓게 나타나있는데, 이 지역은 주로 석회암을 비롯하여 밀도가 높은 퇴적암인 선캄브리아기 율리층군(PCEyl), 고생대 캠브리아기 하부대석회암층군(CEdls), 오르도비스기 상부대석회암층군(Odls), 정선형 조선누층군암층군(Ojls), 석탄기 하부평안층군(Cp1), 페름기 중부평안층군(Pp2), 중생대 트라이아스기 상부평안층군(TRp3), 쥐라기 반송층군(Jb) 등이 분포하는 지역이기 때문에 중력이상이 높을 것이라는 예상과는 다른 결과이다. 그럼에도 이들 지역에는 백악기의 정선화강암(jgr)과 약간 북쪽으로 여산리, 애산리, 덕송리 등으로 백악기 화강반암(Kgp)이 산발적으로 분포하며, 그리고 화암면 몰운리의 한시화강암(hagr)이나 민둥산 주변으로 산성암맥(그림에서 별도의 기호 없이 파란색 영역으로 표시함)이 다수 발견되어 있어서 이들 지역 하부에 화강암질의 기반암이 넓게 분포하고 있음을 추정할 수 있고, 그 구체적인 분포 양상은 중력이상이 보여주는 것과 같다고 볼 수 있다.

연구지역의 동쪽으로 홍제사화강암(PCEhgr)과 분천화강편마암(PCEbgrgn) 및 삼척시 원덕읍에 분포하는 우백질화강암(Igr)에서는 낮은 중력이상이 나타나서 전형적인 유형을 보여주지만, 선캄브리아기의 미그마타이트질편마암(PCEmgn)과 화강편마암(PCEgrgn)이 분포하는 지역에서는 서남쪽과 달리 높은 중력이상을 나타내고 있어서 추가적인 분석이 필요하다. 즉, 우리나라 전체의 중력이상도(Shin, 2006a; Lim *et al*., 2019)를 고려하면 동해안을 따라서 높은 중력이상대가 북쪽으로 강릉까지 길게 이어지고 있기 때문에 본 연구지역의 지엽적인 해석보다는 대륙연변부에서 대륙열개과정의 흔적일 가능성을 배제할 수 없으며 지각평형에 대한 분석을 포함하여 지체구조 운동과 관련하여 해석이 필요할 것으로 여겨진다. 홍제사화강암에서 북북서 방향으로는 지표에 중생대 백악기 퇴적암 및 화산암(Ktsv)을 비롯해서 밀도가 높은 퇴적암들이 분포함에도 낮은 중력이상이 나타나는 것으로 보아 지하에는 화강암체가 분포할 것으로 추측할 수 있는데, 이 지역에서도 지표에 소규모의 화강암체(그림에서 별도의 기호 없이 파란색 영역으로 표시함)가 발견되어서 이를 뒷받침하고 있다. 연구지역 밖으로 북쪽 끝부분의 선캄브리아기 중봉산화강편마암(PCEjgrgn)에도 낮은 중력이상이 나타난다. 그 동쪽의 중생대 백악기 화강암(Kgr)은 중력 측점이 없다.

한편, 높은 중력이상을 보이는 연구지역 북서쪽의 정선형 조선누층군암층군(Ojls) 주변과 남쪽 끝부분의 율리층군(PCEyl), 그리고 북쪽 끝부분의 율리층군(PCEyl) 지역에는 퇴적층이 두꺼울 것으로 예상된다. 북동쪽 끝부분과 거기에서 연구지역 바깥 북서쪽으로 이어지는 상부대석회암층군(Odls)에서도 중력이상이 높게 나타나지만, 이 지역은 앞에서 언급한 것처럼 동해안을 따라 강릉까지 이어지는 높은 중력이상대가 지나는 곳이기 때문에 이와의 관련성에 대한 분석 없이 곧바로 퇴적층이 두꺼울 것이라고 해석하기는 어려울 것이다.

그림 5(D)는 연구지역 중에서도 2017년과 2018년에 중력 탐사가 집중적으로 이루어진 지역으로 동쪽 태백시 혈동의 어평화강암체 주변부터 서쪽으로 상동광산을 거쳐 영월읍의 이목리화강암체에 이르는 지역이다. 일반도로가 없는 지역에서 측점의 밀도를 높이기 위해서 임도나 등산로를 따라서 측정을 많이 하였고, 혈동 지역에서는 토탈스테이션을 이용한 고전적인 측량 방식으로 직선 탐사 구간이 만들어진 곳으로 중력을 측정하기도 하였다. 이곳 중심에 상동광산이 위치하며 그 남서쪽으로 3 km 정도 거리에 순경광산, 그리고 더 남쪽으로 봉화군 춘양면에 두백광산, 제1각희광산, 제2각희광산이 있다. 또한 그림 5(D)보다 더 남쪽에 위치한 국도광산, 제2옥석 및 금당광산이 있고 이의 동쪽으로 율리층군의 중심부에 가까이 춘양광산이 있다. 그리고 상동광산에서 남동쪽으로 5 km 정도 거리에 어평화강암과 거도광산이 가까

이 위치하고 있으며, 서쪽으로는 17 km 정도 거리에 이목화강암체와 이목광산, 예미광산이 있다.

거도광산은 지표에 드러난 어평화강암체의 관입과 관련지어 광화작용을 설명할 수 있다. 그러나 상동광산의 형성에 영향을 미쳤을 것으로 보이는 화성암체는 지표에는 드러나지 않는데, 1983 ~ 1986년 사이에 실시된 갱내 시추에서 광체 하부 약 600 ~ 900 m에서 확인되었다(Lee *et al.*, 1996). 주변의 중력이상에서는 지표에까지 관입암체가 드러난 어평화강암에 의한 영향은 매우 작은 반면에 오히려 심부에서 발견된 상동화강암체에 의한 중력 효과는 훨씬 크게 나타나고 있다. 따라서 어평화강암체는 매우 작은 규모에 그칠 것으로 추정할 수 있고, 상동화강암체는 훨씬 큰 규모로 존재하며, 광산의 바로 아래와 (이보다 약간 더 큰 규모로) 북서쪽으로 3 km 정도 떨어진 곳을 중심으로 관입해 올라오면서 주위로 열수를 공급하여 광화작용을 일으켰을 것으로 추측할 수 있을 것이다. 빨간 파선으로 표시한 영역은 모암이 되는 퇴적암(조선계 대석회암층군-풍촌석회암층,화절층,두무동층,막동석회암층)이나 이에 관입한 화성암체의 규모와 깊이(중력이상으로 나타나는), 온도나 화학성분(하나의 마그마에서 이동하여 비슷한 깊이에서 정치, 냉각 과정을 거친 것으로 보이기 때문에)이 상동광상과 비슷하였을 것으로 추측할 수 있는 지역이다. 순경광산은 중력이상의 공간적 분포만을 고려하면 상동화강암체와 연관될 가능성이 있으며, 이 화성암체는 상동광산으로부터 남동쪽으로 더 뻗어나가는 것이 관찰되지만 거도광산보다는 남서쪽으로 지나가기 때문에 거도광산의 형성과는 관련이 적을 것으로 보인다. 중력이상을 통해서 추정할 수 있는 화성암의 지하 분포와 규모만을 단순하게 고려하면 춘양면에 있는 두백광산, 제1각희광산, 제2각희광산은 상동화강암체와 춘양화강암체의 중간쯤에 위치하여 어느 쪽으로 연관되는지 판단하기 어려운 반면, 이보다 더 남쪽에 위치한 국도광산, 제2옥석 및 금당광산은 춘양화강암의 영향을 받았을 가능성이 높은 것으로 보인다.

연구지역의 광상들은 스카른 혹은 열수형맥상광상으로 대체적으로 중력이상도에서 화성암의 규모가 크고 지표에 노출되거나 혹은 가까운 깊이까지 관입해 올라왔을 것으로 추정되는 지역(파란색 영역)의 가장자리를 따라서 분포하는 경향이 관찰되고 있다. 위에서 살펴본 상동광산과 거도광산, 그리고 그 남쪽의 광산들뿐만 아니라, 이에서 서쪽으로 이목광산이나 북쪽으로 동남광산, 동원광산, 신정선광산 등으로도 이러한 경향이 뚜렷하고, 연구지역 남동쪽 연화광산이나 제2연화광산, 그리고 이에서 더 북쪽으로 삼장광산이나 삼조광산 등도 같은 경향을 잘 보여준다. 그러나 독특하게도 춘양광산의 경우는 율리층이 두꺼울 것으로 예상되는 곳에 위치하고 있는데, 이는 화성암의 본체에서 다소 떨어졌을지라도 맥상이나 병반 등의 형태로 생긴 소규모의 관입이 춘양광산의 광체 형성에 도움을 주었을 것으로 추정해 볼 수 있다. 그렇다고 하더라도 춘양광산 일대는 중력 측점이 매우 적기 때문에 광상 형성과 관련된 작은 규모의 화성암체가 중력이상으로 나타날 수는 없었을 것이다. 앞에서 언급하였던 거도광산의 경우, 관계화성암으로 작용하였을 것으로 생각되는 어평화강암체가 비록 지표에까지 드러나 있음에도 이에 의한 중력이상은 미미해서 주변 퇴적층에 의한 높은 중력이상에 묻혀있는 것처럼 보이지만, 이 지역은 측점이 많기 때문에 앞으로 이 지역에 맞는 심층 분석을 통해 어평화강암체의 지하 분포에 대한 추정이 가능할 것이다.

마지막으로 화강암질 기반암의 공간적 분포를 직관적으로 이해할 수 있도록 중력역산을 하였다. 평균 밀도를 각각 2,790 kg/m^3 와 2,670 kg/m^3 으로 하는 석회암질 퇴적층과 화강암질의 기반암으로 된 단순한 구조를 가정하고 푸리에변환식으로 표현된

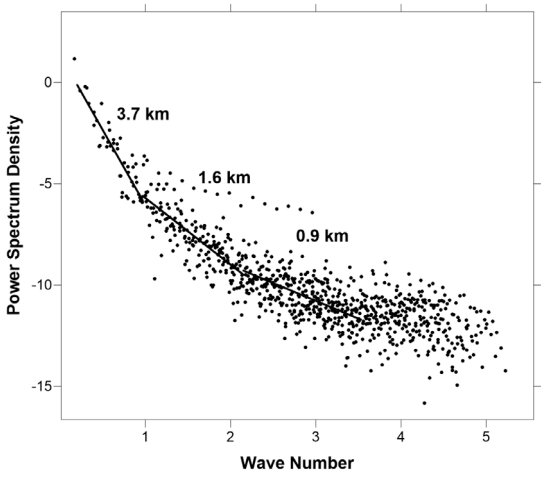

Fig. 6. Power spectral analysis for mean depth estimation.

역산법(Parker, 1972; Oldenburg, 1974)을 이용하였다. 밀도를 가정하지 않더라도 중력이상의 스펙트럼 분석(Spector and Grant, 1970)을 활용하여 연구지역에서 3.7 km, 1.6 km, 0.9 km의 세 밀도불연속면을 검출하였다(그림 6). 여기서는 1.6 km 를 연구지역 전체의 평균 깊이로 두고, 위에 가정된 밀도로부터 밀도차를 120 kg/m^3 로 하여 고속푸리에변환을 이용하는 Shin *et al*. (2006b)의 프로그램으로 역산을 하였다. 역산된 기반암의 깊이가 1 ~ 2 km 사이인 영역이 가장 넓고, 그 다음으로 1 km 이하인 영역이 넓다(그림 7). 3 km 보다 깊은 곳은 태백산보다 남쪽으로 봉화군 소천면 일대의 율리층군 지역과 북서쪽의 정선형 조선누층군 일대에서 볼 수 있다. 동쪽 끝부분에도 3 km 정도의 깊은 곳이 나타나지만, 위에서 언급한 것처럼 이 지역의 높은 중력이상이 얕은 곳의 퇴적암과 화강암질 기반암의 분포가 아닌 다른 원인에 의한 것일 수도 있기 때문에 역산 결과를 그대로 받아들이기 보다는 앞으로 풀어야할 과제로 남겨두는 것이 좋을 것이다. 그리고 이 역산 모델은 연구지역 전체에 대해 단순한 구조를 가정하였기 때문에 지역에 따라서 지표 지질과는 다소 차이가 있을 것이라는 한계가 있지만, 태백산광화대의 넓은 영역에 대한 대략적인 화강암질 기반암의 분포 양상을 파악하기에는 유용하다.

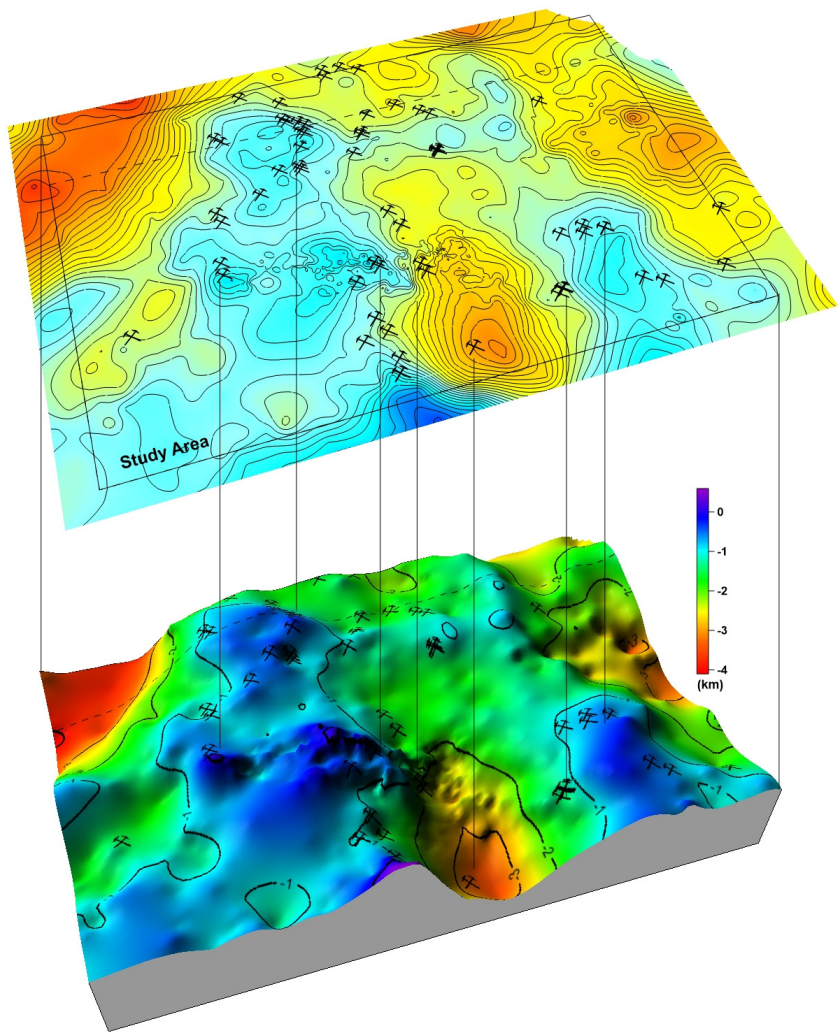

Fig. 7. Subsurface distribution model of granitic bedrock or intrusive rock by gravity inversion.

5. 결 론

태백산광화대는 넓은 석회암 지대에 화성암의 관입으로 인해 접촉교대 내지 열수교대광상이 발달하는 우리나라의 대표적인 광화대이다. 우리나라 금속광상의 주요 관련암인 백악기 화강암류는 태백산분지의 일부 지역에서 작은 규모로 발견된다. 그러나 중력탐사를 통해서 추정할 수 있는 화성암질 관입암체와 기반암의 지하 분포는 비록 지표 지질에는 드러나지 않았더라도 지하에 넓게 분포하고 있다는 것이다. 그러므로 이처럼 넓은 범위의 부광대가 형성되기에 필요한 관계화성암의 공간적인 분포를 중력탐사를 통해 잘 설명할 수 있을 것으로 보인다.

지표 지질의 암상 분포는 거시적으로는 동서 방향이 우세하고 단층은 남북 방향이 주를 이루고 있는데, 중력이상의 분포 방향은 남북 방향에서 우세하게 나타난다. 그러나 낮은 중력이상으로 표현되는 화강암체의 지하분포는 지표에 소규모로 드러난 관입암체들을 연결하고 있으며, 특히 이미 개발되었던 스카른이나 열수형맥상 광상들의 분포와 비교하면, 이들 광상이 낮은 중력이상의 가장자리 혹은 낮은 이상과 높은 이상의 경계 부근에 분포한다는 특징을 보인다는 점이 주목할 만하다.

상동광상은 비록 지표에 드러난 관계화성암은 없을지라도 갱도 시추에서 상동화강암체가 발견되었는데, 이곳의 중력이상은 광산 아래에 화강암체가 넓게 분포하는 것을 보여준다. 또한 상동광산의 서북서 방향으로 3 km 떨어진 곳의 하부에는 이보다 약간 더 큰 규모로 연속된 화강암체가 있는 것으로 추정되고, 광산에서 남동쪽 방향으로도 뻗어나간 것이 관찰된다. 지표지질이나 중력이상을 단순하게 고려하면 상동광산에서 서북서-동남동 방향으로는 광상형성 환경도 비슷하였을 것으로 보인다.

이 연구에 사용한 중력 자료는 2015년부터 2018년 말까지 측정한 것을 이용하였다. 그 이전에는 데이터가 거의 없었고, 또한 2019년 이후의 자료는 향후 처리하게 될 것이지만, 좁은 지역에서 측정이 이루어졌기 때문에 이 연구의 결론에 미치는 영향은 미미할 것으로 생각된다. 이 중력 자료를 관계화성암의 3차원적인 분포를 파악하고 광상 개발과 연구에 활용할 수 있도록 한국지질자원연구원의 홈페이지를 통해 제공할 계획이다.

감사의 글

연구에 사용된 광산에 대한 자료를 제공해주신 지세정 박사님과 염승준 박사님께 감사드립니다. 꼼꼼하게 논문을 심사해주시고 조언해주시고 다듬어 주신 두 분 심사위원께 깊이 감사드립니다. 본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 '3D 지질모델링 플랫폼 기반 광물자원 예측 및 채광효율 향상기술 개발(19-3211-1)'과제와 '텐서 초고출력 스마트 전자기탐사 시스템 개발 및 심부 광물탐사 현장실증(19-3216)'과제에서 지원되었습니다.

REFERENCES

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. Marine Geodesy, 32, 355-371.

Chi, S.J. *et al*., 2012, Evaluation of development possibility for the security of the industrial mineral resources (Cu, Pb, Zn, Au etc) on the domestic mines. Report of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2010-024-2012(3).

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 Journal of the Korean Earth Science Society, 24, 205-215.

Choi, S.G., Choi, B.K., Ahn, Y.H. and Kim, T.H., 2009, Re-evaluation of Genetic Environments of Zinc-lead Deposits to Predict Hidden Skarn Orebody. Economic and environmental geology, 42, 301-314 (in Korean with English abstract).

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. Economic and environmental geology, 40, 1-14 (in Korean with English abstract).

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, R., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D., 2007, The shuttle radar topography mission. Review of Geophysics, 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.

Lee, J.Y., Lee, I.H. and Hwang, D.H., 1996, Chemical Composition of the Cretaceous Granitoids and Related Ore Deposits in the Taebaegsan Basin, Korea. Economic and environmental geology, 29, 247-256 (in Korean with English abstract).

Lim, M., Shin, Y., Park, Y., Rim, H., Ko, I.S. and Park, C., 2019, Digital Gravity Anomaly Map of KIGAM. Geophysics and Geophysical Exploration, 22, 37-43 (in Korean with English abstract).

Na, S., Kim, T.-H. and Shin, Y.H., 2016, Advance in prediction of body tide and ocean tidal loading. Geosciences Journal, 20, 865-875.

Na, S., Shin, Y.H. and Baek, J., 2011, Some Theoretical Consideration in Body Tide Calculation. Journal of the Korean Earth and Exploration Geophysics, 14, 133-139.

Oldenburg, D.W., 1974, The Inversion and Interpretation of Gravity Anomalies. Geophysics, 39, 526-536.

Parker, R.L., 1972, The Rapid Calculation of Potential Anomalies. Geophysical Journal of the Royal Astromonical Society, 31, 447-455.

Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. and Factor, J.K., 2012, The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research, 117, B04406, doi:10.1029/2011 JB008916.

Shin, S.-C. *et al*., 2007, Geochemical Atlas of Gangwon-do, Korea: Geochemical Atlas of Korea (1:700,000), Series 8. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

Shin, Y.H., 2006a, Gravity anomaly and the distribution of granitoids in the southern part of the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 383-396 (in Korean with English abstract).

Shin, Y.H., 2006b, Implications of gravity anomalies in the tectonic provinces of the southern part of the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 397-411 (in Korean with English abstract).

Shin, Y.H., Choi, K.S. and Xu, H., 2006a, Three-dimensional Forward and Inverse Models for Gravity Fields Based on the Fast Fourier Transform. Computers & Geosciences 32, 727-738.

Shin, Y.H., Park, J.U. and Park, P.H., 2006b, Deformation of Moho in the Southern Part of the Korean Peninsula. The Journal of the Korean Earth Science Society, 27, 620-642 (in Korean with English abstract).

Shin, Y.H., Yoo, B.C., Lim,M., Park, Y.S. and Ko, I.S., 2014, Gravity Exploration Inferring the Source Granite of the NMC Moland Mine, Jecheon, Chungbuk. Economic and environmental geology, 47, 107-119 (in Korean with English abstract).

Spector, A. and Grant, F.S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data. Geophysics, 35, 293-302.

Tamura, Y., 1982, A computer program for calculating the tide generating force. The publications of the international latitude observatory of Mizusawa, 16, 1-19.

Received : June 13, 2019
Revised : July 15, 2019
Accepted : July 17, 2019