

부평 은광상 일대의 중력탐사

권 병 두* · 이 희 순*

Gravity Survey over the Bupyeong Silver Deposits

Byung-Doo Kwon* and Heui-Soon Lee*

ABSTRACT: Gravity study was carried out to investigate the structure and total mass of the Bupyeong silver deposits closely related to formation of the Bupyeong caldera. Survey region covers $3.3 \times 6.6 \text{ km}^2$ over silver deposits and is comprised of 334 gravity measurement stations. An apparent regional gravity trend parallel to the west coast line is mainly attributed to isostasy. A least square isostasy model was used for the regional correction. A Fortan subroutine was coded to calculate 3-dimensional subsurface model. The calculated gravity values from the 3-dimensional model of the caldera with silver deposits agree with observed anomalies relatively well. Gravity anomaly due to Bupyeong silver deposits reaches to $+3.5 \text{ mgal}$ from the background value and anomaly due to the caldera reaches to -4 mgal . But the maximum negative anomaly of the caldera would be much greater at its center. The total mass of silver deposits calculated from the subsurface model is 4.19×10^9 tons. Although the economic part of silver deposits depends on the grade of orebody, we expect that there are still large amount of silver reserves in Bupyeong area.

서 론

경기도 부평시에 위치하는 영풍광업주식회사의 부평광업소는 현재는 조업 중단 상태이지만, 1969년 생산을 개시한 이래 한때 연간 35ton을 상회하는 은을 생산한 국내 굴지의 은 광산이다(서규식, 1985). 은광상은 기존의 지질·광상학적 및 지구화학적 연구들(박노영, 정경식, 1968; 신명식, 1970; 전효택, 1972; 김선억, 1982; 서규식, 1985)에 의하여 부평지역의 칼데라 형성과 밀접한 관계를 가지는 것으로 알려져 있다. 즉, 은은 주라기-백악기초에 걸쳐 형성된 직경 약 10km의 칼데라 연변부의 화산쇄설암류와 관입 각력암을 모암으로 하여 주로 $N 5^\circ W \sim N 15^\circ E$ 주향의 단층 주변 및 기반암과 화산 쇄설암류와의 부정합면 상부를 따라 망상세맥으로 산출된다. 칼데라 연변부를 따라 부평 은광상 외에도 부평 은광상 남쪽의 경기 편마암복합체를 모암으로 한 철광상, 부평 은광상 동남쪽의 각섬석-흑운모

화강암을 모암으로 한 연·아연·은 망상세맥 광상등이 분포한다.

본 광상에 대한 기존의 연구는 주로 지표 및 갱내 지질조사, 기타 시추자료에 의한 조사 등으로 수행되었으며, 광산측의 필요에 따라 부분적으로 수행된 SP 및 전기비저항탐사 등을 제외하면 지구물리학적 조사연구는 보고된 바 없다. 본 연구에서는 지표중력탐사를 실시함으로써 부평 은광상의 규모를 비롯하여 주변 지역의 지질학적 특성을 조사하는데 그 목적이 있다.

지질개요

부평 지역의 지질은 선캄브리아 시대의 변성암류와 중생대 화성암류로 대별된다. 이 지역의 변성암류는 나기창(1978)이 경기 편마암 복합체로 칭하고 있으며, 중생대 화성암류는 화산 쇄설암류, 관입 각력암류, 화강암류, 규장질 반암류와 맥암류로 되어 있다. 화산 쇄설암류는 대부분 유문암질의 용결 응회암으로 구성되어 있다.

은광상 주변의 지형을 살펴보면 부평 시가지는 해발 10

* 서울대학교 지구과학교육과 (Dept. of Earth Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

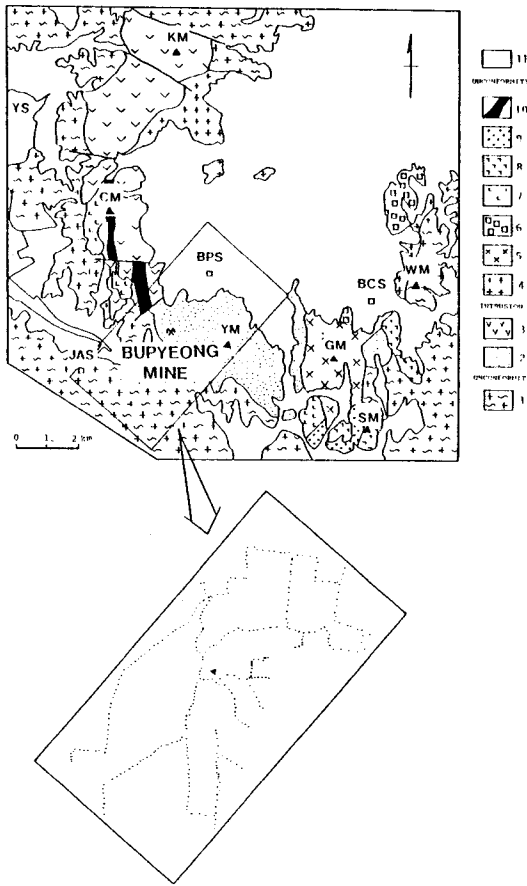


Fig. 1. Geologic map of the Bupyeong district(after Suh,1985) showing location of survey area with gravity stations. Triangle mark indicates the reference point used for leveling and gravity measurements. 1. Gyeonggi gneiss complex; 2. Yaksan welded tuffs; 3. Kyeyangs welded tuffs; 4. Medium-grained biotite granite; 5. Porphyritic biotite granite; 6. Hornblende-biotite granite; 7. Pink feldspar granite; 8. Leucocratic granite; 9. Feldspar porphyry; 10. Intrusive rhyolite; 11. Alluvium (KM: Kyeyang mt., CM: Cheolma mt., YM: Yak mt., GM: Geoma mt., SM: Sorae mt., WM: Wonmi mt., BPS: Bupyeong st., BCS: Bucheon st., JAS: Juan st., YS: Yellow sea).

~20m의 저지대에 위치하며 김포평야 방향의 동북쪽을 제외하고는 그 주위를 계양산(396m), 철마산(227m), 약산(185m), 성규산(217m), 거마산(209m), 소래산(299m) 등이 둘러싼 직경 약 10km의 원형에 가까운 환상 구조를 이루고 있다. 서규식(1985)에 의하면 이러한 지형학적 특징은 Smith와 Bailey(1968)의 재용기칼데라 (resurgent caldera) 모

델과 잘 부합한다고 한다. 즉, 부평지역 칼데라는 환상열하의 형성, 대규모 화산회류(ash flow) 화산 작용 및 침강, 중앙 화강암체의 관입과 이에 따른 재용기, 환상 화강암 복합체의 관입의 과정을 밟아 형성되었으며, 이러한 일련의 칼데라 형성과정에서 은 광상이 발달하였다.

Fig. 1은 부평 칼데라와 그 주변 지역의 지질도로 칼데라의 전반적인 구조가 잘 나타나 있으며, 중력탐사 지역은 부평 광산주위의 3.3×6.6km² 범위이다. 그림에서 보는 바와 같이 은 광상은 부평 칼데라 경계부에 위치하고 있으며 칼데라 주위에는 화산암이 둘러싸고 있다.

중력측정 및 중력이상

Fig. 1에 표시한 연구 지역은 중심부의 화산암체를 제외하면 거의가 시가지여서 중력측정은 주로 도로를 따라 실시하였으며, 2차원 자료를 얻기 위해서 연구 지역안에 측정점이 골고루 분포할 수 있도록 하였다. 중력측정에는 LaCoste-Romberg gravity meter를 이용하였으며 기기의 정확도는 0.01 mgal이다. 중력측점의 고도를 알기 위한 측량에는 Nikon tilting-level을 사용하였으며 보조 장비로는 Wild theodolite를 사용하였다. 총 중력측점은 334개이며 평균 측정 밀도는 15점/km²이다. 탐사 지역에서의 측량 원점은 부평광업소안의 측량 기점을 이용하였고, 이 점을 중력 보정을 위한 기점으로 사용하였다.

중력자료의 보정을 위해서는 고도보정, 지형보정, 대기 보정, 계기·조석보정 등이 필요한데 본 탐사지역의 고도차는 최고 약 80m정도로 대기보정 값은 매우 작다. 조석 보정을 위한 G-인자는 인천지역의 값인 1.31을 택하였다(김호련과 권병두, 1988). 고도 및 지형보정을 위한 본 지역의 평균 밀도는 부평광산과 그 주변 지표에서 채취한 암석의 밀도(Table 1)로부터 구한 2.76 g/cm³의 값을 이용하였다.

Table 1. Densities of rocks distributed in survey area.

Rock type	Density (g/cm ³)	
	mean	range
Tuff	2.63	2.56 ~ 2.85
Metamorphic rock	2.77	2.57 ~ 2.97
Ag containing rocks	2.96	2.65 ~ 3.62
Granite	2.69	2.59 ~ 2.85

중력자료 해석

광역이상과 잔여이상의 분리

중력 이상은 일반적으로 지하 심부에 존재하는 대규모 구조에 의한 광역 중력효과(regional gravity effect)와 지하 천부에 존재하는 소규모 구조나 광체에 의한 국지적인 중력

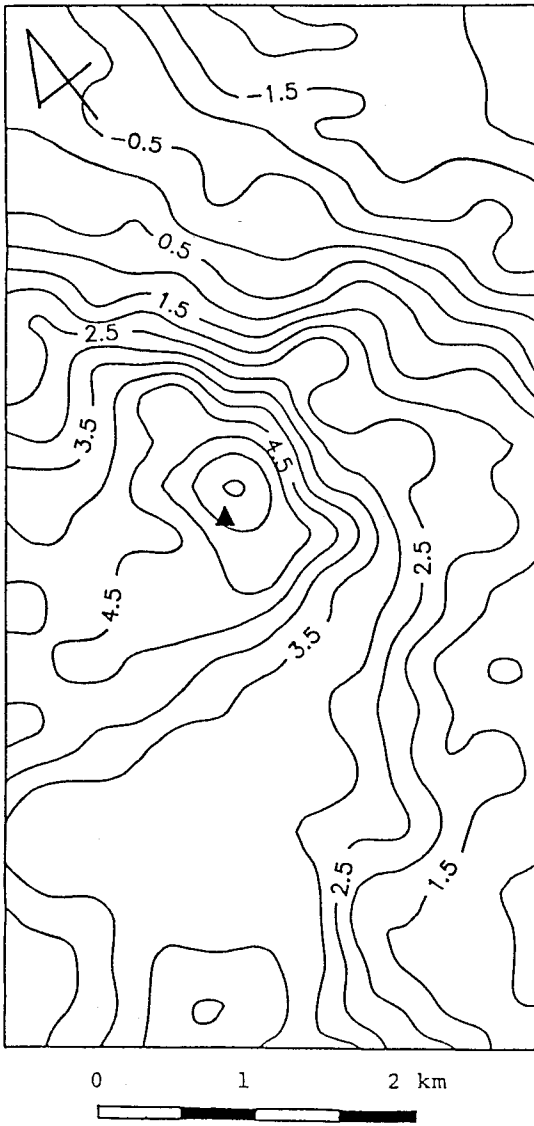


Fig. 2. Bouguer anomaly map. Contour interval is 0.5 mgal. Triangle mark indicates the reference point.

중력 이상은 측정치에 앞에서 설명한 여러가지 보정을 취한 후 측정점에서의 정규 중력값을 빼준 것으로 정의한다. Fig. 2는 부우계 이상도이다. 부우계 이상도에 나타난 중력 이상은 측정치에 고도(후리어어 및 부우계) 및 지형보정을 취한 후 계산한 것으로 이것으로부터 지하 구조를 유추하게 된다.

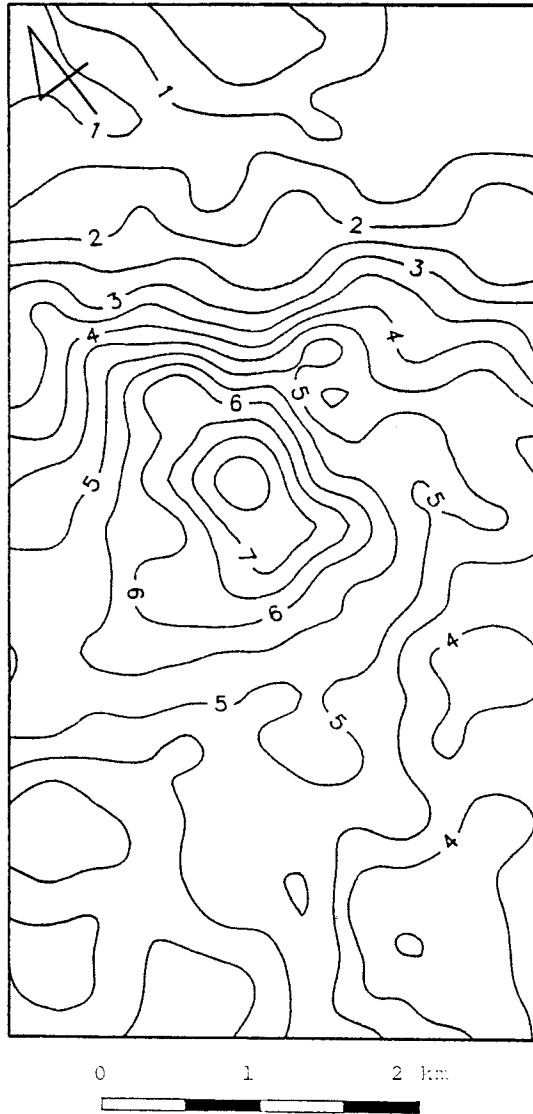


Fig. 3. Residual Bouguer anomaly map. Contour interval is 0.5 mgal.

효과(local gravity effect)가 합하여져 나타난다. 본 연구지역에 나타나는 광역 중력효과는 주로 지각평형(Isostasy)에 기인하는 것으로 이러한 지각 두께의 변화에 기인하는 중력효과는 본 연구에서 궁극적으로 해석하고자 하는 칼데라 구조나 은광상과는 거의 무관하므로 이러한 광역 중력효과를 제거하여야 한다.

Fig. 2의 부우계 이상도는 크게 3가지 종류의 중력효과가 합하여져 나타난 것이라 할 수 있는데, 지각평형에 의한 광역 중력이상과 칼데라 구조에 의한 중력이상 그리고 부평 은광상의 광체에 의한 중력효과가 그것이다.

최광선(1986)에 의하면 본 연구지역 일대에서 지각평형에 의하여 생기는 광역 중력효과는 해안선에 나란한 방향으로 약 0.3 mgal/km의 값으로 내륙 쪽으로 갈수록 떨어지는 것으로 나타난다. Fig. 2의 부우계 이상도에서도 동일한 방향으로 약 0.6 mgal/km의 광역 중력효과가 나타나고 있으며, 기울기의 값이 다소 차이를 나타내는 것은 지역성 때문인 것으로 보인다.

광역 중력효과를 제거한 Fig. 3의 잔여 중력이상은 칼데라와 은광상에 의한 중력효과라 볼 수 있으며, 짧은 파장을 가지는 소규모의 이상은 지표 부근의 작은 밀도 이상체나 구조에 의한 것으로 잡음성분으로 취급할 수 있다. 중력이상도에 나타나는 부평 은광상에 기인하는 중력이상은 +3.5 mgal 정도이고 칼데라에 의한 중력이상은 -4 mgal 정도이다.

초과질량의 계산

부평 은광상의 규모를 개략적으로 추정하기 위하여 초과질량 계산법(Grant and West, 1965)을 이용하였다. 즉, 중력탐사 범위가 x축을 따라서는 -X에서 X까지이고 y축에서도 -Y에서 Y까지라고 하면, 초과질량 M은

$$2\pi GM = I + \text{Re}(X, Y) \quad (1)$$

$$I = \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \Delta g(x, y) dx dy$$

의 식을 만족하며 이때 $\text{Re}(X, Y)$ 는 잉여항이다.

광상의 중심에 전체 초과질량이 밀집되어 있다고 가정하면

$$\text{Re}(X, Y) = 2\pi GM - 4GM \tan^{-1} \left\{ \frac{XY}{\bar{z}(x^2 + y^2)^{1/2}} \right\} \quad (2)$$

가 되고, \bar{z} 는 M의 중심까지의 깊이가 된다. 식(2)를 식(1)에 대입하면

$$4GM = \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{XY}{\bar{z}R} \right) \right\}^{-1} \cdot I \quad (3)$$

$$R = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

이 된다. 따라서 식(3)으로부터 초과질량을 계산하기 위해서는 M의 중심 깊이(\bar{z})를 적당히 추정하여야 한다. 중력측선상에서 $W_{1/2}$ 를 중력값이 최대치의 1/2되는 거리라 하면, 구인 경우에는 $\bar{z} = 0.65W_{1/2}$, 무한히 긴 원통은 $0.5W_{1/2}$ 가 되므로 여기서는 두 값의 중간정도인 $0.6W_{1/2}$ 를 취하였다. 식(3)으로부터 구한 부평 은광상의 초과질량 M은 약 6.7×10^6 tons가 나온다. 광상의 총질량은 초과질량에 광상과 모암과의 밀도차의 비 즉, (광상의 밀도/광상의 밀도 - 모암의 밀도)의 값을 곱한 것으로 정의 되며 그 값은 1.05×10^6 tons이다. 그러나 Fig. 3의 중력이상도에서 나타나는 은광상에 의한 '+' 중력이상은 모암인 화강암과 칼데라 내부에 있는 화강암의 낮은 밀도 때문에 실제의 값보다 작게 왜곡되어 나타난 것이다. 즉, 실제 총질량은 위에서 구한 값보다 클 것이며 1.05×10^6 ton은 실제 총질량이 가질 수 있는 하한값이 될 것이다.

삼차원 물체의 중력효과의 계산과 지하구조 해석

Fig. 3의 이상도에서 은광상에 의한 중력이상은 거의 원형에 가까운 모습으로 나타나며, 따라서 광상의 개략적인 형태도 기준축에 대해 대칭 구조를 가지는 것으로 가정할 수 있다.

은광상을 포함하는 칼데라의 지하구조를 해석하기 위하여 본 연구에서는 3차원 구조의 중력효과 계산을 위한 컴퓨터 프로그램을 작성하여 사용하였다. Talwani et al.(1960)은 3차원 구조에 의한 중력효과를 디지털 컴퓨터를 이용하여 구하는 방법을 제시하였다. Fig. 4에서 처럼 지하 하부에 있는 이상 물체를 가정하면 깊이 z_1 에서의 이상 물체의 단면은 근사적으로 다각형으로 나타낼 수 있고, 그 꼭지점을 각각 A ~ H까지 정한다. 이 때 면 ABCDEFGH에 의한 점 P에서의 중력효과 Δg 는

$$\Delta g = V_1 dz \quad (4)$$

가 되고 이때 V_1 은 단위 두께당 면 ABCDEFGH에 의해

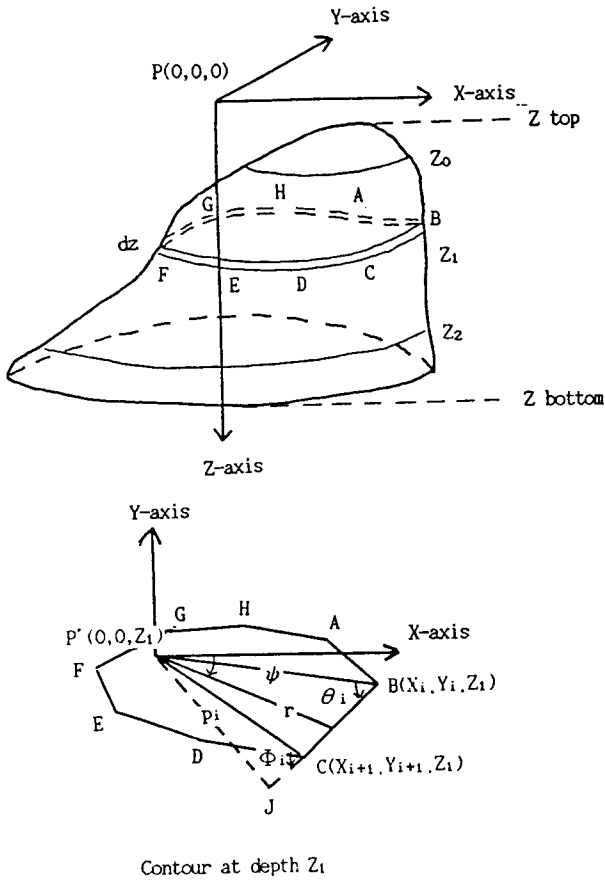


Fig. 4. Geometrical elements involved in the computation of the gravity anomaly caused by a three dimensional body (after Talwani et al., 1960).

생기는 중력이상이다. V_1 은 면 적분이나 두개의 선적분으로 표시될 수 있다. 즉,

$$V_1 = G\rho \left\{ \int d\psi - \int z_1 / (r^2 + z_1^2)^{3/2} d\psi \right\} \quad (5)$$

몇 단계의 간단한 수학적 조작을 거치면 선 BC에 대한 적분의 값은

$$G\rho \left[\phi_{1+1} - \phi_1 - \arcsin\{z_1 \cos\theta_1 / (p_1^2 + z_1^2)^{1/2}\} + \arcsin\{z_1 \cos\phi_1 / (p_1^2 + z_1^2)^{1/2}\} \right] \quad (6)$$

가 되고, 전체 둘레에 대하여서는

$$V_1 = G\rho \sum_{i=1}^n \left[\phi_{1+1} - \phi_1 - \arcsin\{z_1 \cos\theta_1 / (p_1^2 + z_1^2)^{1/2}\} + \arcsin\{z_1 \cos\phi_1 / (p_1^2 + z_1^2)^{1/2}\} \right] \quad (7)$$

가 된다. 식(7)을 컴퓨터 프로그램으로 옮길 수 있게 고치면

$$V_1 = G\rho \sum_{i=1}^n \left[\text{Warccos}\{(x_i / r_i)(x_{i+1} / r_{i+1}) + (y_i / r_i)(y_{i+1} / r_{i+1})\} - \arcsin\{z_1 q_i S / (p_i^2 + z_1^2)^{1/2}\} + \arcsin\{z_1 f_i S / (p_i^2 + z_1^2)^{1/2}\} \right] \quad (8)$$

여기서

$$S = 1 \quad (p_i \geq 0)$$

$$= -1 \quad (p_i < 0)$$

$$W = 1 \quad (m_i \geq 0)$$

$$= -1 \quad (m_i < 0)$$

$$p_i = (y_i - y_{i+1})x_i / r_{i+1} - (x_i - x_{i+1})y_i / r_{i+1}$$

$$q_i = (x_i - x_{i+1})x_i / (r_i \cdot r_{i+1}) + (y_i - y_{i+1})y_i / (r_i \cdot r_{i+1})$$

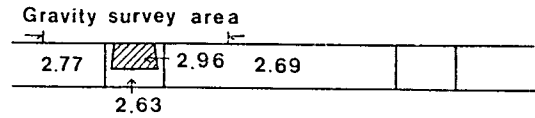
$$f_i = (x_i - x_{i+1})x_{i+1} / (r_{i+1} \cdot r_{i+1}) + (y_i - y_{i+1})y_{i+1} / (r_{i+1} \cdot r_{i+1})$$

$$m_i = (y_i / r_i)(x_{i+1} / r_{i+1}) - (y_{i+1} / r_{i+1})(x_i / r_i)$$

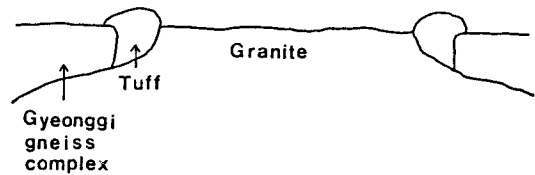
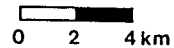
$$r_i = (x_i^2 + y_i^2)^{1/2}$$

$$r_{i+1} = (x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2)^{1/2}$$

$$r_{i,i+1} = \{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2\}^{1/2}$$



(a)



(b)

Fig. 5. Simplified caldera model for gravity calculation(a), and proposed resurgent caldera model(b). Densities in g/cm^3 .

가 된다.

식 (8)로부터 깊이 z_1 에 있는 두께 dz 인 판에 의한 중력 효과를 구하고, 각 판에 대하여 식 (8)의 적분을 수행하여 더하면 전체 체적에 의한 중력효과를 계산할 수 있다. 위의 방법은 계산시간은 다소 느리지만, 다음의 두 조건 즉 첫째, 개개의 판에 의한 2차원 적분이 정확하고, 둘째, 판의 두께(dz)는 얇게 정해야 한다는 조건이 만족되면 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 만일 이상 물체의 겉 모양이 굴곡이 심하지 않은 완만한 곡면으로 되어 있다면 변화양상이 비슷한 부분에 대하여서는 Simpson's rule을 이용해 보다 빠르게 계산할 수 있다. 즉, 깊이 z_0, z_1, z_2 에서의 식 (8)에 의한 중력 효과를 각각 V_0, V_1, V_2 라 하면 깊이 z_0 에서 z_2 까지의 체적에 의한 중력 효과는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\int_{z_0}^{z_2} V dz = [V_0(z_0 - z_2)(3z_1 - z_2 - 2z_0) / (z_0 - z_1) + v_1(z_0 - z_2)^3 / \{(z_1 - z_2)(z_1 - z_0)\} + v_2(z_0 - z_2)(3z_1 - z_0 - 2z_2) / (z_2 - z_1)] / 6 \quad (9)$$

이상과 같은 방법을 이용하여 3차원 모델의 중력효과를 계산하고, 그 값을 측정치와 비교하는 과정을 몇 차례 반복 수정한 끝에 구한 칼데라의 지하 모형이 Fig. 5에 나와있다. Fig. 5(a)는 중력효과를 계산하기 위해 단순화시킨 지하의 3차원 모델의 단면도이고, Fig. 5(b)는 이를 바탕으로 스케치한 실제의 지하구조 모형도이다. 그림에서 제시한 예상 지하구조는 본 연구에서 수행한 중력탐사 범위를 훨씬 넘기 때문에 탐사범위 바깥쪽의 지하구조는 칼데라구조가 대칭성을 가진다는 가정하에 개략적으로 추정한 것이다. 미국 캘리포니아주 Long valley 칼데라의 대한 Kane et al.(1976)의 연구보고서를 보면 중력이상으로부터 구한 칼데라의 모형에 화산암체를 도입하지 않았지만, 본 연구에서는 화산암체의 규모가 상대적으로 크고 탐사범위가 칼데라 경계부에 국한되므로 이를 도입하였다.

각 암석의 밀도는 Fig. 5(a)에 표시한 바와 같으며, 왼쪽 화산암체내의 밀도 2.96 g/cm^3 의 고밀도암체는 은광상을 단순화시킨 모형이다. 이것은 앞에서 구한 초과질량치를 고려하여 가정한 초기 모형을 여러번 수정하여 얻어진 것으로 상부 반지름 700m , 하부 반지름 800m ,

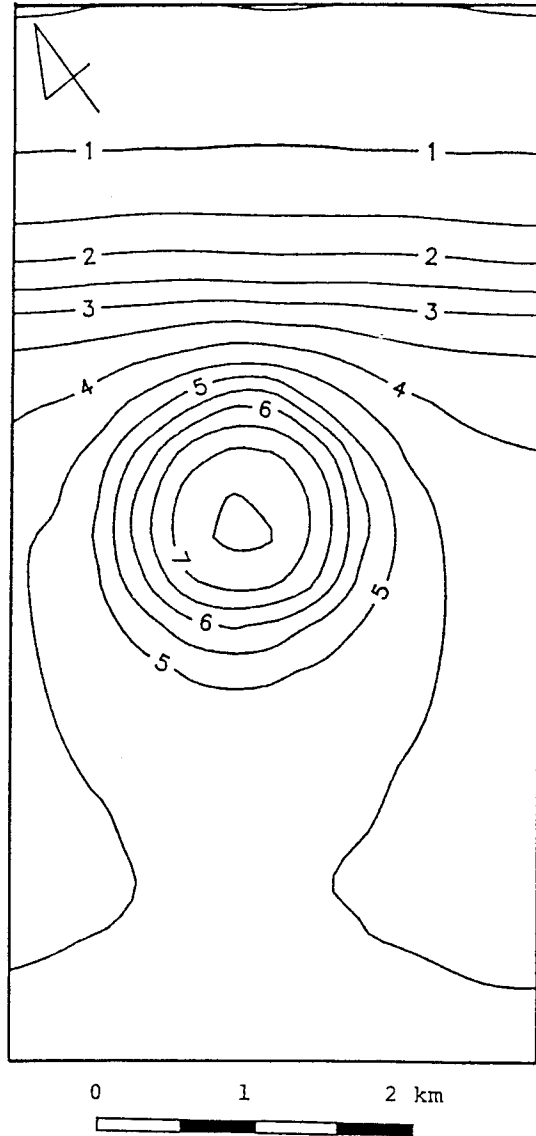


Fig. 6. Bouguer anomaly calculated from the model of Fig. 5(a). Contour interval is 0.5 mgal.

두께 800m 의 윗 부분이 잘린 원뿔의 형태를 가정한 것이다. 이렇게 단순화시킨 형태는 광상의 실제 모습과는 차이가 있겠지만, 부평 광산에서 볼 수 있는 바와같은 광석이 넓게 분포한다는 사실과 Fig. 3에 나타나는 중력이상도의 형태에 비추어 보아 별 무리가 없는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5(a)의 지하모형으로부터 계산한 이론중력값을 탐사범위 부분에 대하여만 제시한 것이다. 이 그림은 매우 단순한 모습을 하고 있지만 전체적인 양상은 Fig. 3의 중력이상도와 유사하다.

Fig. 5의 은광상 모형의 부피에 밀도를 곱하면 은광상의 총 질량은 4.19×10^9 ton으로 나타나며 이값은 앞의 Fig. 3의 중력이상도에서 초과질량 계산법을 이용하여 구한 총질량인 1.05×10^9 ton보다 큰 값이다. 물론 이 값만으로는 부평 은광상의 은 함량을 구체적으로 예측하기는 어려우나, 본 지역에는 아직도 상당량의 은이 매장되어 있을 것으로 추정된다.

결 론

부평 은광상은 칼데라 형성과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 연간 35ton의 은을 생산한 바 있는 국내 굴지의 은광상이다.

본 연구에서는 부평 은광상을 포함하는 $3.3 \times 6.6 \text{ km}^2$ 지역에 대하여 총 334점(평균 15점/ km^2)의 측정에서 중력을 측정하였으며, 암석 시료는 부평광산 갱내와 이 일대의 지표에서 채취하였다. 부우계 이상도에는 은광상에 의한 '+'의 중력이상이 뚜렷이 보이며, 칼데라 구조에 의한 중력이상도 함께 나타난다. 은광상에 의한 중력이상은 배경치로부터 최대 +3.5mgal 정도이며, 칼데라에 의한 중력이상은 본 연구지역에서는 -4mgal 정도로 나타나나 측정범위를 칼데라 전체로 넓히면 그 중심부에서는 이보다 훨씬 낮은 값이 나오리라 예상된다.

본 지역의 지하 지질구조를 해석하기 위하여 3차원 구조를 가지는 물체에 의한 중력효과를 계산할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 만들어 사용하였다. 본 연구에서 제시한 지하 지질구조 모델로부터 계산한 은광상의 총 질량은 4.19×10^9 ton으로 나타났다. 이 값은 단지 은 광상의 규모를 추정케 해주는 값으로, 은 광맥의 정확한 분포나 광석의 품위가 문제가 되겠지만 이 지역에는 아직도 상당한 양의 은이 매장 되어 있을 것으로 추정된다.

사 사

본 연구를 위하여 여러가지로 도움을 주신 영풍광업주식회사 여러분들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김선익(1982) "부평광산" : "한국의 지질과 광물자원" 제 10장 1절. 김옥준 교수 정년퇴임기념지 편찬위원회, p. 262-266.
- 김호련, 권병두(1988) 중력자료의 조석 보정을 위한 G인자 및 위상지연에 대한 연구. 한국지구과학회지, 9권, p. 133-142.
- 나기창(1978) 경기 육괴에서의 변성작용 및 연천변성대와 옥천변성대와의 비교(II). 지질학회지, 15권, p.67-88.
- 박노영, 정경식(1968) 부평은·연광상의 지질 및 광상. 지질광상조사 연구보고, 10권, p. 5-32.
- 서규식(1985) 부평 은광상의 성인에 관한 연구. 서울대 박사 학위 논문, 143p.
- 신명식(1970) 부평은·철 광산의 지질과 광상. 광상지질, 3권, p. 177-186.
- 전효택(1973) 부평은·철 광산의 광화작용과 모암변질. 대한광산학회지, 10권, p. 72-82.
- 최광선(1986) 한반도 남부의 중력에 대한 연구, 서울대 박사학위 논문, 110p.
- Grant, F. S. and West, G. F.(1965) Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill Book Co., 584p.
- Kane, M. F., Mabey, D. R. and Brace, R.(1976) A gravity and magnetic investigation of the Long Valley Caldera, Mono County, California. J. Geophys. Res., v. 81, p. 754-762.
- Smith, R. L. and Bailey, R. A.(1968) Resurgent cauldrons : in Studies in volcanology(Coats, R. R., et al. ed.). Geol. Soc. Am. Memoir, v. 116, p. 613-662.
- Talwani, M. and Ewing, M.(1960) Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shapes. Geophysics, v. 25, p. 203-225.