

경기도 연천지역에 분포하는 화산암류에 대한 중력 및 자력 탐사 연구

박혁진* · 민경덕** · 이윤수** · 이영훈** · 원중선**

Gravity and Magnetic Surveys for Volcanic Rocks in Yeoncheon Area, Kyonggi-do

Hyuck Jin Park*, Kyung Duck Min**, Yoon Soo Lee**,
Young Hoon Lee** and Joong Sun Won**

ABSTRACT: The gravity and magnetic measurements have been obtained from 34 stations with 50m intervals along the survey line positioned between Jangtanri and Sindapri for studying subsurface geology and structures of the volcanic rocks in Yeoncheon area. The Bouguer gravity and magnetic anomaly values were evaluated from the reduction of the field observation, and then interpreted by Nettleton's method, maximum-depth rules, and Talwani method, respectively. In this study, the depths of boundary between Precambrian basement and Jangtangri basalt, which is calculated by Nettleton's method and maximum-depth rules, are approximately 160m based on magnetic data and 135m based on gravity data. High Bouguer gravity anomaly zone between 0m in Jangtanri and 900m along the survey line, is caused by thick and high density, older dasalt which is positioned beneath Jijangbong tuff breccia, and this result corresponds to the interpretation result based on magnetic anomaly. Lower gravity and magnetic anomaly zones around 900m are caused by vertical fault whose vertical displacement is approximately 100m. High gravity and magnetic anomaly zones between 1300m and 1550m are caused by high density of Quarternary basalt exposed in the surface, and lower gravity and magnetic anomalies at 200m and 1250m are caused by faults.

서 언

본 연구지역은 서울-원산을 연결하는 북북동-남남서 방향의 소위 추가령지구대의 일부분으로서 小藤 (1903)이 지형적인 특징에 의해 추가령지구대 (graben) 또는 추가령열곡대 (rift valley)로 명명한 이래로 많은 학자들에 의해 지구조적인 성인과 진화에 관하여 논란의 대상이 되어온 곳이다. 木野崎 (1937)는 평강 서남부의 오리산에서 지구대 (graben)형성과 함께 발달된 북북동-남남서의 정단층을 통로로 하여 용암이 분출하였다고 주장하였으며, 高橋 (1962)는 차별침식에 의해 형성된 화강암의 분지가 연속된 것으로 주장하였다. 김옥준 (1971)은 백악기말에서 제 3기 사이에 형성된 단층

대로 다수의 정단층이 현무암의 통로가 되었다고 해석하였다. 이대성 등 (1983)는 고지자기학적으로 같은 역전자극을 나타내는 고기의 통현현무암과 장탄리현무암의 대칭성은 장탄리단층을 축으로 하여 확장되어 형성된 열곡으로 해석하였다. 그리고, 이와 평행하는 여러 단층에 의해 서울-원산간에 직선적인 협곡대가 형성되었다고 제안하였다. 김규한 등 (1984)는 원산-연천 서울을 잇는 소위 추가령지구대는 백악기 혹은 제 3기 초에 형성된 우수주향이동단층 (right lateral strike slip fault)와 그 후에 회생된 수직단층에 의해 형성된 단층선곡으로 해석하였다.

특히, 본 연구지역에 분포하는 고기현무암은 그 노도가 매우 극부적으로 소량 분포하고 있지만, 화산분출의 초기 활동의 산물로서, 본 구조선의 활성운동과 화산작용과 밀접한 관련성을 가지고 있어 (이대성 등, 1983; 김규한 등, 1984), 본 구조선의 진화과정을 규명하는데 중요한 열쇠가 된다. 또한, 고기현무암의 대부분

* 한국건설기술연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-712, Korea)

** 연세대학교 지구시스템과학과 (Departement of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea)

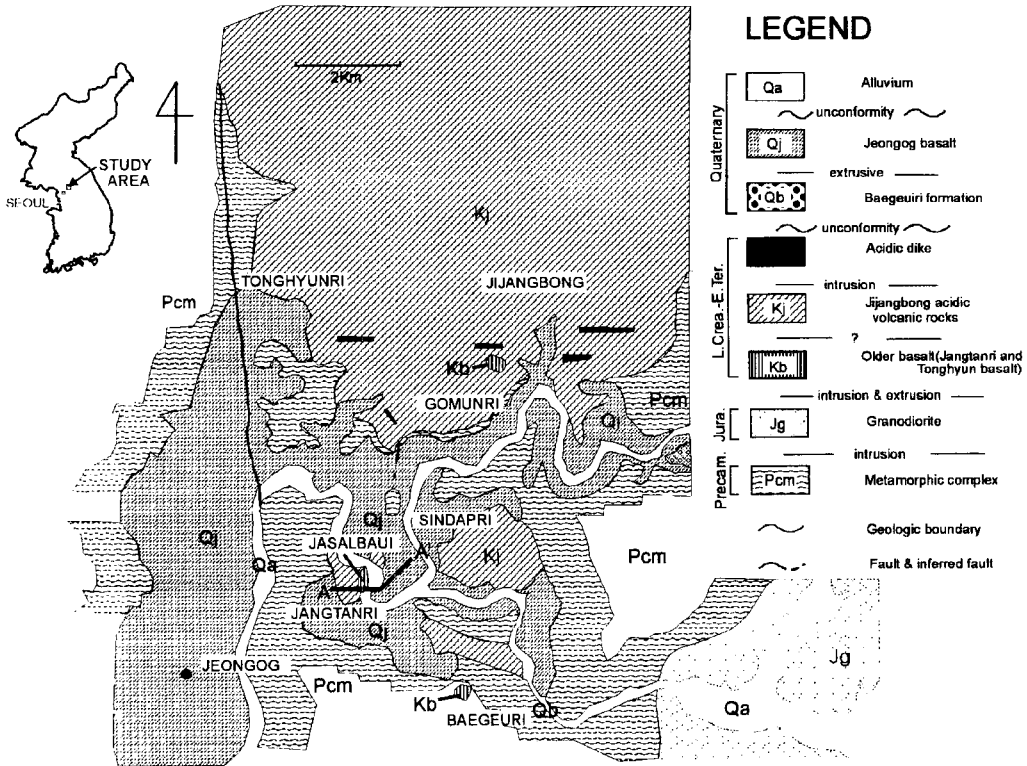


Fig. 1. Geological map of the study area (Revised based on Lee *et al.*, 1983; Kim *et al.*, 1984).

분은 후기에 분출한 응회암류에 의해 피복되어 있어 고기현무암이 분포하는 지역을 중심으로 한 지하지질 및 지하지질구조에 대한 의문들이 제기되어 왔다. 이러한 의문에 대하여 본 연구에서는 자살바위를 중심으로 한 고기현무암 분포지역에 대한 중력 및 지력 탐사를 통해 지하지질 및 지질구조를 해석하고 고기현무암의 분포양상을 밝히고자 하였다.

지질개요

본 지역의 기반암인 선캠브리아기의 경기변성암복합체 (Pcm)는 본 지역의 동부와 서부에 널리 분포하고 있으며 (Fig. 1), 이를 관입노출하고 있는 주라기의 화강섬록암 (Jg)은 사장석 (An22)이 우세한 흑운모 화강섬록암으로 연구지역의 동남부에 분포하고 있다 (김규한 등, 1984). 또한, 본 연구의 주요대상 암체인 고기현무암 (Kb)은 통현리, 장탄리, 백의리 및 고문리부근에 소규모로 분포하며, 기공이 방해석으로 대부분 충전되어 신기현무암 (Q)과 구분이 용이하다. 김규한 등 (1984)에 의하여 고기현무암은 편광현미경 관찰에 의해

통현현무암과 장탄리현무암으로 구분되는데, 통현현무암은 치밀한 암상을 갖고 trachytic texture를 보이는 사장석이 석기를 이루며 경계부가 상당히 opacite되어 있는 많은 가상을 포함하고, 2차 광물로는 휘석과 방해석이 주종을 이루고 있다. 장탄리현무암은 장탄리, 백의리삼거리에 분포하며, 다공질이고 그 기공내를 주로 방해석이 충전한 행인상조직을 갖고 있다. 2차 광물은 주로 석영과 방해석으로 구성되어 있다. 본 역의 북부인 지장봉지역과 장탄리지역에는 백악기의 지장봉 산성화산암류 (Kj)가 분포하며, 이는 주로 응회각력암과 산성 용암으로 구성되어 있다. 응회각력암은 변성암복합체, 화강섬록암, 산성 응회암, 고기현무암의 역 및 암편을 포함하고 있으며, 본 응회암에 대해서는 일본 경도대학에서 FT (fission track)법으로 측정된 저어콘연령은 52 ± 2 M.y로서 적어도 하부 에오세 (eocene)이전의 것임을 시사한다 (김규한 등, 1984). 또한, 역의 편광현미경 관찰에 의하면 응회암에 포함되어있는 응회암질 역 자체도 또 다른 응회암의 암편을 갖는 것으로 보아 3회 이상에 걸쳐 화산활동이 있었음을 시사한다. 한편, 지장봉 산성화산암류의 후기분출물로 생각되는 산성암맥이 지

장봉주변에 집중 분포되고 있으며, 제 4기 알카리 현무암 (Q)의 하부에 미고결상태로 노출된다. 제 4기 알카리 현무암인 전곡 현무암은 평강 서남부의 오리산에서 분출하여 저지대인 구한탄강 유로를 따라 문산까지 약 100 km를 흘러 분포하고 있다. 원종관 (1983)은 한탄강 상류지역에서 11매의 용암층을 보고하고 최소한 11회 이상의 분출이 있었음을 지적한 바 있다.

자료 획득 및 처리

중력 측정 및 보정

본 연구에서는 장탄리에서 자살바위를 거쳐 신담리에 이르는 1.65 Km의 측선을 설정하고, 측점 간격을 50m로 하여 35개 측점에서 중력을 측정하였다 (Fig. 1의 A-A'측선). 중력 측정기는 Lacoste & Romberg Land Gravimeter를 이용하였으며, 기기의 정확도는 0.01 mgal이다. 중력의 시간에 따른 변화를 보정해 주기 위해 중력기점을 왕복하면서 측정하였고 측점간의 고도차에 따른 영향을 보정하기 위하여 고도계를 이용하여 측점의 고도를 측정하였다. 한편, 각 측점에서의 측정 중력치를 비교, 분석하여 광체나 지질구조를 탐사하는 중력탐사에서는 탐사대상체와 주변 암과의 밀도 차에 의한 중력의 변화량만이 필요하므로 측점의 고도와 위도 및 주위지형의 차이, 기조력 등에 기인하는 중력 변화량을 제거하는 중력보정을 실시하며, 본 연구에서는 계기보정, 조석보정, 고도보정 및 지형보정을 수행하였다. 이러한 보정을 수행하여 부유계 중력이상을 구하였으며 본 연구지역의 부계 중력이상 값은 Fig. 2와 같다.

자력 측정 및 보정

자력탐사를 위하여 중력탐사와 동일한 측선과 측점

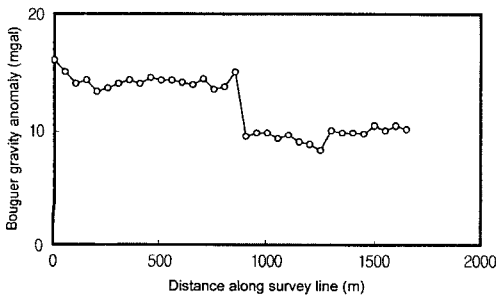


Fig. 2. Profile of Bouguer gravity anomaly.

에서 MP-2 proton Precession magnetometer를 사용하였고, 자력 측정시 고압선이나 전선 같은 자력장을 유발하는 지역은 피하여 자력을 측정하였다 (Fig. 1의 A-A'측선). 그리고, 자력탐사 자료의 해석에 필요한 암석의 대자율을 야외시료로부터 MS-3 bridge를 사용하여 측정하였다. 한편, 자력계를 이용하여 측정되는 총자기력은 현재의 지자기장에 의해 암석 내에 획득되는 유도자기 및 암석이 생성된 당시의 지자기장에 의해 자화된 잔류자기의 벡터합에 의해 형성된 값이다. 그러므로 각 암석의 잔류자기의 방향과 크기에 대한 측정이 있어야하며, 본 연구에서는 저자에 의해 본 연구와 동시에 수행되었던 고지자기의 측정에서 얻은 결과를 이용하였다 (박혁진, 1993). 또한, 자력탐사 자료를 이용하여 지하 지질구조를 해석하기 위해서는 지하 구조 이외의 원인에 의한 자력 효과는 제거되어야하며, 이를 위해 본 연구에서는 일변화보정과 정규보정을 실시하였다.

일변화 보정을 위해서는 처음의 측점으로 돌아가 반복 측정함으로써 시간에 따른 변화량을 선형적 내삽방법으로 하여 보정하였다. 정규 보정은 자력측정치에서 국제표준자력값 (IGRF, International geomagnetic reference field)을 제거하는 과정으로서, IGRF revision 1990의 계수들을 사용하여 구한 총자기력은 50930.8 gamma이고, 편각은 -7.6°, 북각은 54.3°이며, 본 연구에서는 이를 이용하여 정규보정을 실시하였다. 일변화 보정과 정규보정을 통해 얻은 측정별 자력이상 값은 Fig. 3과 같다.

해석 및 결과

중력 해석 및 결과

밀도 변화 면의 평균심도를 구하기 위해 Smith의 최대심도 결정방법 (Smith, 1959)과 Nettleton의 모형

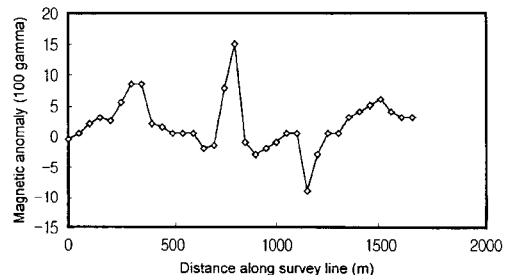


Fig. 3. Profile of magnetic anomaly.

에 의한 해석 (Nettleton, 1942)을 이용하였다.

최대심도 결정법은 지하에 있는 질량체가 주변의 암석과 밀도 차를 보인다는 가정 하에서 밀도 변화면이 존재할 수 있는 최대 심도를 계산하는 방법이다. 또한, Nettleton의 모형에 의한 해석은 초기 모형을 설정하고 이에 의해 중력이상을 구한 후, 측정된 중력이상과 비교하면서 모형의 크기나 깊이를 수정, 결정하는 방법이다. 이 지역에서는 반무한 수평판에 의한 수직단층의 모형을 이용하여 경기변암성복합체와 고기현무암의 경계의 평균심도를 구하였다. 이로부터 구한 밀도 변화면의 평균심도 및 야외지질조사 자료를 이용하여 초기 지하모형을 설정하고 이 모델에 의한 부우계 중력이상치를 계산하여 구한 후, 실제로 측정된 부우계 중력이상치와 비교하여 이들 두 값이 일치하도록 모델을 변화시키면서 지하의 지질 및 지질구조를 해석하였다. 본 연구에서는 Talwani방법 (Talwani *et al*, 1969)의 알고리즘을 채택한 GRAVMAG program을 이용하였으며, 이때 Talwani방법에서 사용되어지는 각 암석의 밀도는 야외에서 시료를 채취하여 비중병을 이용하여 직접 측정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

부우계 중력이상곡선을 기초로 하여 Smith의 최대심도 결정방법에 의한 최대 심도는 부우계 이상값과 부우계 이상의 최대수평변화량을 대입하여 175m를 얻었으며, 반무한 수평판에 의한 수직단층의 모형을 이용하여 모형의 심도와 두께를 변화시켜가면서 계산되어진 중력효과와 야외로부터 측정된 중력효과를 비교

Table 1. Density of rocks in study area.

Rock Name	Density Range (g/cm ³)	Mean Density (g/cm ³)
Gneiss Complex (Pcm)	2.32~2.60	2.55
Jangtanri Basalt (Kb)	2.73~2.82	2.78
Jijangbong Tuff Breccia (Kj)	2.20~2.37	2.31
Quart. Basalt (Qj)	2.68~2.84	2.72

하여 모형의 크기와 깊이를 결정하였다. 두께를 100m로 설정했을 때 고기 현무암 하한의 평균 심도는 161m이다. 이들 값과 지표지질 및 병행하여 실시한 자력탐사의 해석결과를 토대로 지하지질 모델을 설정한 후 이 모델에 의한 부우계 중력이상치와 야외로부터 측정된 부우계 중력 이상값을 비교하면서 이 두 값의 최대 차이가 1 mgal이하가 될 때까지 모델을 수정하면서 반복 계산하였다. Fig. 4는 Talwani방법에 의해 얻은 본 연구지역의 축선 A-A'에 관한 지하지질 및 지질구조 해석 결과도이다. 축점 A로부터 900m의 축점까지 나타나는 고이상대는 지표에 분포하고 있는 응회각력암 (Kj)아래에 상대적으로 밀도가 큰 고기현무암(Kb)이 지하 120m까지 평균 100m의 두께로 존재하고 있기 때문인 것으로 200m지점의 V자형의 저이상대는 지표를 덮고 있는 지장봉 응회각력암 (Kj)내의 미확인된 단층 때문인 것으로 해석된다. 900m지점에서 부우계 중력이상이 갑자기 감소하는 것은 노두에서 관찰되는 장탄리 단층의 영향으로 해석되며, 단층의 경시는 거의 수직에 가깝고 변이량이 약 100m이다. 1250m지

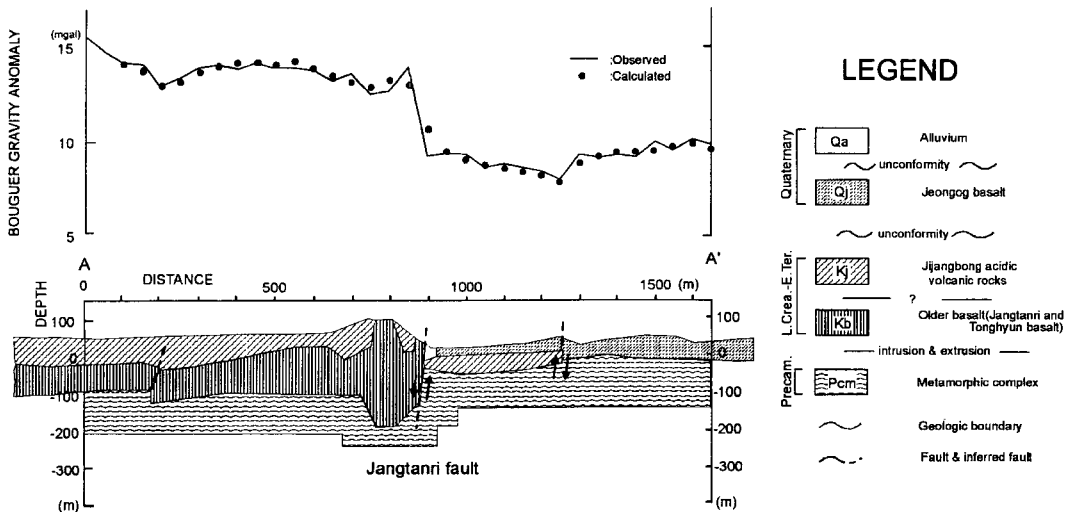


Fig. 4. Profile of observed and calculated Bouguer gravity anomalies, and cross-sectional subsurface model.

Table 2. Magnetic properties of rocks in study area.

Rock Name	Susceptibility (10^{-6} cgs emu)	Remanent Magnetization (A/m)	Remanent Declination (degree)	Remanent Inclination (degree)
Gneiss Complex (Pcm)	31.4	0.005	81.2	21.0
Older Basalt (Kb)	1702	3.44	228.3	50.0
Jijangbong Tuff Breccia (Kj)	69.1	0.04	25.0	53.0
Quart. Basalt (Qj)	1300	1.78	12.0	61.5

며, 1300 m에서 끝측점까지의 고이상대는 지표에 약 40m 두께로 쌓인 고밀도의 제 4기 현무암 (Qj)의 영향으로 해석된다.

자력 해석과 결과

중력해석에서 Nettleton의 모형 중 반무한 수평판에 의한 수직 단층 모형을 이용하여 평균심도를 구하였으며, 자력해석에서도 동일한 모형을 이용하여 계산하였다 (Nettleton, 1942). 수평판의 두께를 100m로 가정하여 얻은 경기변성암 복합체와 고기현무암의 경계의 평균심도는 135m이다. 이미 설명한 바와 같이 자화된 암석의 총자기는 현재 지자기장의 방향과 크기에 의해 결정되어지는 유도자기와 암석 생성 당시의 지자기장의 방향과 크기에 영향을 받는 잔류자기의 벡터합이다. 육지의 변성암시대 중 많은 부분을 차지하는 선캠브리아기의 암석은 유도자기가 잔류자기보다 우세하며, 이 때문에 자기이상은 주로 유도자기에 기인한다 (민정덕 등, 1987). 그러나, 대자율이 큰 화산암체나 해양의 현무암

의 경우 잔류자기가 우세하게 나타난다. 암석이 생성될 당시에 얻은 원래의 자연 잔류자기는 시간이 경과함에 따라 점차 약화되므로 같은 종류의 암석일지라도 오래된 암석이 젊은 암석보다 일반적으로 자연 잔류자기와 현재의 자기장에 의한 유도자기의 비인 Koenigsberger비 (Q)값이 적으며, 유도자기가 우세한 퇴적암이나 변성암은 Q값이 1보다 작고, 잔류자기가 우세한 화산암은 Q값이 평균 1~10 정도이며, 물 속에서 급랭한 해양현무암은 약 30~50 정도이다 (Nagata, 1961). 본 연구지역의 암석들의 자기특성을 알아내기 위해 본 지역 암석들의 자연 잔류자기값 (박혁진, 1993)과 현재의 자기장에 의한 유도자기값을 비교, Koenigsberger비 (Q)를 계산하였다. 이를 위하여 연구지역에 분포하는 각 암석들의 정향시료를 채취하여 각 암석들이 보존하고 있는 잔류자기의 방향과 크기를 측정하였으며, 이를 Q 값 계산에 사용하였다 (박혁진, 1993). 본 연구지역의 암석들의 Q값은 각각 고기현무암 (Kb)이 3.16, 4기 현무암 (Qj)이 2.14, 지장봉 응회각력암 (Kj)이 0.78, 경기 변성암복합체 (Pcm)가 0.25이다. 계산한 바와 같이 본

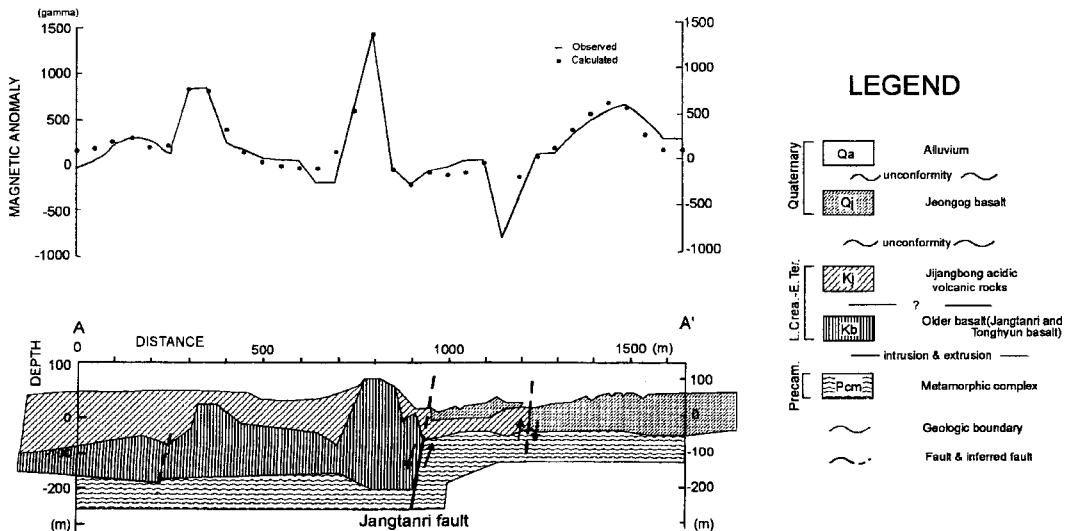


Fig. 5. Profile of observed and calculated magnetic anomaly, and cross sectional subsurface model.

연구지역의 현무암류는 잔류자기 값이 매우 커서 자기 이상에 미치는 영향이 유도자기에 의한 영향보다 크다. 따라서, 본 연구에서는 고지자기 측정을 통하여 얻은 잔류자기의 방향과 크기를 고려할 수 있는 장점을 가진 GRAVMAG program을 이용하였다. Table 2는 본 연구 지역에 나타나는 암석들의 대자율과 잔류자기의 강도와 편각, 복각을 나타내고 있다.

중력 모델링에 의한 결과와 평균심도, 야외지질조사 자료 및 각 암석의 대자율과 잔류자기 측정자료를 이용하여 모델을 설정한 후, 이 모델에 의한 자기이상과 야외에서 측정된 자기이상을 비교하면서 이들 두 값이 일치하도록 모델을 수정시키면서 반복 계산하였다.

이러한 과정을 통해 얻은 지하지질 및 지질구조 해석 결과는 Fig. 5와 같다. 처음 측정으로부터 900m지점까지는 지표에 덮고 있는 응회각력암 (Kj) 아래에는 대자율이 크고 잔류자기의 자화강도가 높은 고기현무암 (Kb)이 평균두께 약 100m로 분포하고 있으며, 300~400m에서의 국부적인 고이상대는 이 현무암이 두께 200m로 지표 가까이 까지 두텁게 분포하고 있기 때문인 것으로 해석된다.

측선 A-A' 에 있어서, 측점 A로부터 900m지점의 연천군 장탄리지역에서 나타나는 \wedge 자형의 매우 높은 고이상대는 소위 자살바위라고 불리는 고기현무암 (Kb) 노두의 영향으로 생각된다. 250m지점과 950m지점 및 1150m지점의 \vee 자형의 저이상대는 단층으로 해석되며, 1300m에서 1550m지점사이의 고이상대는 지표에 덮혀 있는 약 80m두께의 제 4기 전곡현무암 (Qj)의 영향으로 해석된다.

토 론

중력과 자력 모델링의 결과 자살바위 주변의 지장봉 응회각력암 (Kj) 분포지역 하부에 약 100m정도의 두께를 가진 고기현무암 (Kb)의 분포를 밝혀냈다. 이 연구 결과와 고기현무암의 분포가 지장봉 응회각력암 분포지역내 또는 주변에 노출되어 나타나며 (이대성 등, 1983), 그리고 지장봉 응회각력암은 단층을 경계로 소규모의 지구대구조를 보인다는 연구 결과 (김규한 등, 1984)를 고려해 볼 때, 본 연구지역의 북부에 대규모로 분포하고 있는 지장봉 응회각력암 분포지역에 대한 지구물리학적 탐사가 수행되어진다면 고기현무암의 지하 분포양상을 밝히는데 커다란 도움이 될 것이라 생각된다. 본 연구 결과에서와 같이 암석의 서로 다른

물리적 성질을 이용한 중력 모델과 자력 모델은 일부 지역 (자력 측선의 1150m지점과 중력 측선의 1250m 지점의 저이상대)을 제외하면 잘 일치되고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 이러한 저이상대의 위치 차이는 각 모델링이 서로 상관 관계가 없는 두 물리적 성질을 기초로 하였으므로 발생한 결과로 파악되어진다. 결론적으로, 이 두 탐사를 병행할 경우 각 탐사가 가진 한계성을 극복할 수 있고 서로의 해석을 보완함으로써 결과의 신뢰성을 높이는 데도 도움이 될 수 있을 것이라 생각된다.

결 과

1. 중력 탐사 결과 처음 측정으로부터 900m지점까지에 나타나는 높은 부우게 중력이상치는 지표에 노출되어 있는 응회각력암 (Kj)하부에 밀도가 높은 고기현무암 (Kb)이 두께 약 100m정도로 분포하고 있기 때문인 것으로 해석된다. 또한, 200m지점에서 나타나는 \vee 자형의 저이상대는 응회각력암이 퇴적되기 전에 생성된 단층의 영향으로 사료되며, 900m지점 과 1250m지점의 저이상대 역시 단층의 영향으로 생각된다.

2. 본 연구지역에서 Koenigsberger비는 고기현무암 (Kb)이 3.16이고 제 4기 전곡현무암 (Qj)은 2.14이며, 이는 잔류자기가 자기이상에 미치는 영향이 유도자기보다 큼을 의미한다.

3. 자력탐사 결과 처음 측정으로부터 900m지점까지 지표에 노출된 응회각력암 (Kj)하부에 약 100m두께의 고기현무암 (Kb)이 분포하고 있으며, 250m지점과 950m지점 그리고 1150m지점의 저이상대는 단층으로 해석되며, 이들은 중력탐사 결과와 잘 일치한다. 또한, 1300m지점에서 1550m지점까지의 이상곡선의 상승은 지표에 약 80m 두께로 덮여 있는 제 4기 전곡현무암 (Qj)의 영향으로 해석된다.

사 사

본 논문은 한국학술진흥재단 학술연구비(과제번호 98-015-D00273)에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 高橋英太郎 (1962) 추가령열곡 (日文). Science Reports of Yamaguchi University, 13, p. 33-36.
김규한, 김옥준, 민경덕, 이윤수 (1984) 추가령지구대의 지질구조, 고지자기 및 암석학적 연구. 광산지질, 17권

- 3호, p. 197-214.
- 김옥준 (1971) 남한의 신기화강암류의 관입시기와 지각 변동. 광산지질, 4권 1호, p. 1-9.
- 木野崎吉郎 (1937) 朝鮮의 第四紀火山에 關하여 (日文), 朝鮮博物館會誌 22號 p. 3-8.
- 민경덕, 서정희, 권병두 (1987) 응용 지구물리학, 우성문화출판사.
- 박혁진 (1993) 경기도 연천지역에 분포하는 화산암류에 대한 고지자기, 중력 및 자력 탐사연구. 연세대학교 대학원 석사학위 논문.
- 小藤文次郎 (1903) An orographic sketch of Korea, Jour. Coll. Sci. Imp. Univ. Tpkyo, v. 19.
- 원종관 (1983) 한반도내에서의 제 4기 화산활동에 관한 연구; 추가령얼곡내에서. 지질학회, 19권 3호, p. 159-168.
- 이대성, 유권주, 김광호 (1983) 추가령얼곡의 지구조적 해석. 지질학회, 19권 1호, p. 19-38.
- Nagata, T. (1961) Rock magnetism. Maruzen compny.
- Nettleton, L.L. (1942) Gravity and magnetic calculation. Geophysics, v.7, p. 1-22.
- Smith, R.A. (1959) Some depth formulae for local gravity and magnetic anomalies, Geophys. Prospe. v.7, p. 55-63.
- Talwani, M., Worzel, J.L. and Landisman, M. (1969) Rapid computations for two dimensional bodies, Geophysical Research, v.64, p. 49-59.

1999년 8월 9일 원고접수, 1999년 10월 10일 게재승인.