

안강부근 양산단층 지역에서의 중력 및 지자기 연구

김기영 · 이광자
강원대학교 지구물리학과

요 약

양산단층이 통과하는 안강 부근에서 기반암 분포, 지표 근처 단층과 파쇄대 위치 및 규모 등을 밝히기 위하여 중력과 총지자기를 측정하였다. 예상되는 단층의 주향과 거의 직각이 되는 2개 축선을 따라 총 67개 지점에서 15 m 간격으로 중력을 정밀하게 측정하였으며, 총지자기는 동일 축선을 따라 3 m 간격으로 총 296 점에서 측정하였다. 스펙트럼 분석법으로 구한 자기 기반암의 평균 깊이는 형산강을 중심으로 서부와 동부 축선에서 각각 8.5, 10.0 m로 계산되며, 중력 측정값은 형산강 동부가 서부보다 평균 1.71 mGal 이상 크게 나타나서 서부가 동부보다 파쇄 정도가 더욱 심한 것으로 해석된다. 중력 순산모델 연구는 동부 축선의 동쪽 끝에서 210 m 떨어진 지점에 놓인 단층을 경계로 서쪽으로 밀도 2.44 g/cm³, 깊이 70 m의 파쇄대가 발달되어 있으며, 395 m 지점을 중심으로 기반암 상부면이 폭 190 m, 평균 3.5 m 깊이의 소규모 비대칭 지구가 존재할 가능성을 제시한다. 또한 이 지구 위치의 지표 고도는 주위보다 약 44 cm 꺼져 있어서, 이 지구가 그리 오래되지 않은 시기의 단층운동에 의해 형성되었을 가능성이 높은 것으로 해석된다.

주요어: 양산단층, 기반암, 파쇄대, 중력, 총지자기

Kim, Ki Young and Lee, Kwang-Ja, 1998, Gravimetric and magnetic studies in an Yangsan fault area near Angang, Journal of the Korean Geophysical Society, v. 1, n. 1, p. 31-40.

ABSTRACT: Gravimetric and magnetic surveys were conducted in order to reveal near-surface structures such as basements, faults, and fracture zones in an area near Angang, where the Yangsan fault is believed to pass through. Along two lines approximately perpendicular to the strike of the major fault, gravity and magnetic data were measured at 67 stations with a 15 m interval and at 296 stations with a 3 m interval, respectively. Average depth to the magnetic basement is estimated using the spectral analysis method to be 8.5 and 10.0 m along lines located to the east and the west of the Hyeongsan river, respectively. Average value of reduced gravity on the east line is higher than that on the west by the amount of 1.71 mGal, which indicates that the basement rocks are more severely fractured in the western part. Forward gravity modeling along the east line indicates that a fracture zone extends westward from a fault located 210 m west of the eastern end. Density and depth to the bottom of the fracture zone are estimated to be 2.44 g/cm³ and 70 m, respectively. The gravity model study also indicates presence of a small graben, 190 m wide and 3.5 m deep on an average, on the basement surface. The earth surface above the graben is approximately 44 cm lower than the nearby surface. This indicates that the graben might have been formed by recent fault movements.

Key words: Yangsan fault, basements, fracture zones, gravity, total intensity of magnetic field

(Kim, Ki Young and Lee, Kwang-Ja, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chunchon, 220-701, Korea. email: kykim@cc.kangwon.ac.kr)

1. 서 론

양산단층은 Lee · Na (1983)가 미소지진과 역사지

진 자료 분석을 통하여 지진 활동성을 처음 제기한 이후, 핵발전소 등 중요 시설물의 안전과 연관이 되어 사회적 관심을 집중시키고 있다. 또한 학술

적인 면에서도 국내 최대 육상퇴적분지인 경상분지 내의 특징적 지질구조로서, 동해의 기원(김인수, 1992) 및 나아가 동북아 지체구조(황재하, 1994)를 이해하는데 중요한 단서를 지니고 있어 주요 연구대상이 되어 왔다. Lee *et al.* (1984)은 역사 및 계기지진 자료를 분석하여 양산단층이 지진학적으로 활성단층이라 결론지은 바 있으며, Lee · Jim (1991)은 서기 2~1989년 사이의 126개 역사지진과 14개 계기지진 자료 분석을 통하여, 35.5°N~36.2°N 사이의 중앙구역에서 가장 높은 지진 활동성을 보인다고 하였다. Kyung (1997)은 양산단층계인 울산단층 중북부에서 실시한 트랜치 조사로부터 제4기 후기에 여러번 활동한 단층이라고 주장하였으며, Kim *et al.* (1997)은 고해상도 탄성과 반사법을 이용한 언양부근 양산단층이 속도 600 m/s 이내의 미고결층을 단절하고 있음을 영상화하고 이를 바탕으로 활성단층 가능성을 제시한 바 있다.

이렇게 지진 활동성이 여러 차례 보고된 양산단층은 대부분이 지표에 노출되지 않고, 골짜기를 채운 제4기 충적층 하부에 파쇄대 형태로 존재하는 것으로 이해된다. 이에 따라 지전기, 중력, 자력, 탄성과, 전자기, 방사능 등 여러 지구물리학적 조사방법이 적용되었으며, 단층 파쇄대의 폭 및 깊이는 지역에 따라 크게 변하는 것으로 알려져 있다. 김영화 외(1990)는 지전기 조사를 통하여 경주 북쪽 양산단층 구조를 연구한 바 있으며, 경주 남쪽보다 단층 파쇄대 규모가 작게 나타나는 것으로 분석하였다. 김인수 · 김종렬(1983)은 양산-언양 사이의 언양단층 지역에서 실시한 지전기 조사자료로부터 충적층 및 풍화대층의 두께가 최대 20 m 정도이며, 단층 파쇄대는 300~1000 m 정도의 폭을 갖고 있는 것으로 해석하였다. 양산단층 파쇄대 깊이는 지진구역 경계에서 약 20 m이나 경계부근에서 점차 멀어질수록 100 m 정도까지 증가하는 특성을 보이며(Lee · Lee, 1997), 안강 북부 지점에서는 자력측정 결과 30~85 m에 이르는 것으로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 1986). Lee *et al.* (1985)은 경주 남쪽 양산단층 지역의 단층 파쇄대에서 풍화암이 100 m 깊이까지 연장되었을 가능성을 중력모델 분석을 통하여 시사한 바 있으며, Kwon · Lee (1991)는 강동면 일대에서 실시한 자기측정 자료를 분석하여 기반암까지의 깊이를 50~650 m로 분석하였다. 김기영 외(1998)는 강동면 지역에서 측정한 탄성과 속도 이방성을 분석하

여, 균열밀도 0.284로 기반암이 남북방향으로 심하게 파쇄되어 있음을 밝혔다.

이 연구는 양산단층이 통과하는 것으로 알려진 경주 북부 안강 부근에서 이 단층의 위치 및 규모, 암상 경계 등을 정확히 규명할 목적으로 실시한 지구물리학적 조사연구의 일환으로, 세밀한 간격으로 중력과 지자기를 정밀하게 측정하고 이를 바탕으로 단층 및 천부 지질구조를 해석하기 위하여 수행하였다.

2. 주변 지질

조사지는 한반도 남동부에 위치한 경상퇴적분지 내에 위치하며, 이 분지의 특징적 지질구조로 북북동 방향의 5~6조 단층이 존재한다(이동영 외, 1996). 이들 단층중 가장 연장성이 좋은 양산단층이 통과하는 것으로 알려진, 경상북도 경주시 강동면 일대에서 중력 및 총지자기 측정이 이루어졌다(Fig. 1). 조사지 주변은 폭 1.6 km의 제4기 충적층으로 덮혀 있으며 동쪽과 서쪽에는 산이 거의 남북방향으로 뻗어 있다. 부근 암상은 동쪽 및 남서쪽에 중생대 백악기에 관입한 것으로 알려진 불국사 화강암류가 분포하고, 북서부 지역에는 경상누층군의 퇴적암류가 넓게 분포한다. 조사지 부근 1:50,000 지질도는 해방후 새로이 발간되지 않았으며, 1928년 일본인에 의해 발간된 경주 도폭만이 존재한다. 경주와 안강을 연결하는 7번 국도와 조사지 중앙을 흐르는 형산강도 산과 같이 거의 남북으로 놓여 있어서, 10 m 정도 두께의 충적층(김기영 외, 1998) 하부에 존재할 것으로 예상되는 양산단층도 이 부근에서는 이러한 방향의 주향을 갖고 있을 것으로 추정된다.

3. 현장 조사

3.1. 중력

중력은 0.01 mGal의 정밀성을 갖는 Worden 중력계 1대를 이용하여, Fig. 1에 표시된 측선 1과 2를 따라 15 m 간격으로 각각 20개와 47개 측정점에서 측정하였다. 조석 및 계기 보정을 위하여 기준점에서 약 30분 간격으로 반복 측정하였으며, 측선 기준점과 979,813.70 mGal의 절대중력값을 갖는 경주 박물관 중력기점을 오가며 2회 중복 측정하여 0.005 mGal 이내의 오차로 측선 기준점에서의 절대 중력값 979,835.206 mGal을 구하였다. 상

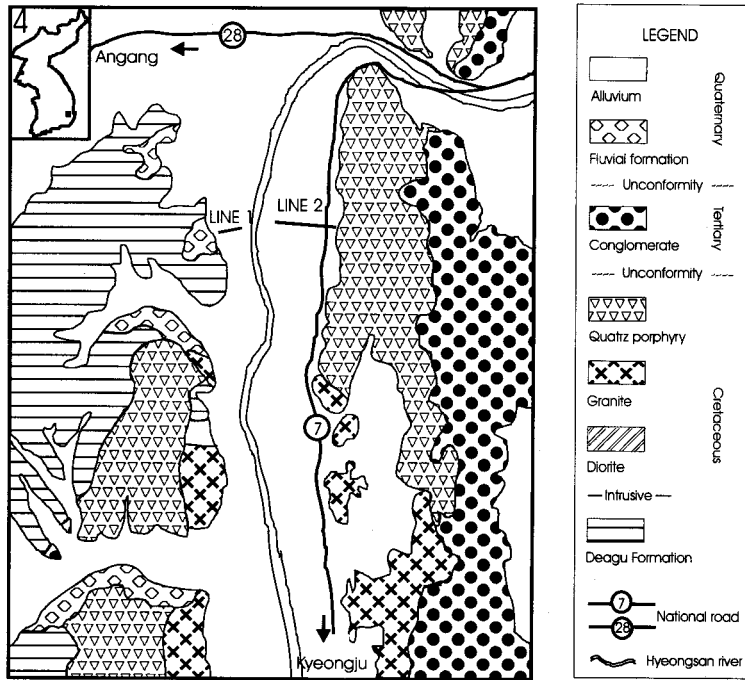


Fig. 1. Simplified geologic map showing two lines along which both gravimetric and magnetic surveys were conducted (modified from Kim *et al.*, 1998).

대 고도 및 측점 위치는 ± 3 mm/km의 정확성을 갖는 레이저 측량기(Geodolite 506)를 이용하여 측정하였다(Geotronics, 1996). 7번 국도의 교통량이 많아, 도로상에 위치한 측선 2의 1개 측점(측점 41)에서는 중력값을 측정하지 못하였으며, 이 점을 중심으로 2~3개 측점에서도 차량진동으로 정밀한 측정에 어려움이 있었다. 또한 이 도로의 동쪽에 위치한 측점들에서는 땅이 굳지 않아 측정 전에 다짐작업을 일부 실시하였으나, 잘 다져진 서쪽 측점에서의 측정값보다 정확성이 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

3.2. 지자기

총지자기 값은 1 nT의 정밀성을 갖는 핵자력계 1대를 이용하여 상기 2개 조사측선을 따라 3 m 간격으로 실시하였다(GEM, 1990). 일변화 보정을 위하여 약 10분 간격으로 기준점에서 반복 측정하였으며, 상대 고도 및 측점 위치는 중력자료 측정 시와 마찬가지로 ± 3 mm/km의 정확성을 갖는 레이저 측량기(Geodolite 506)를 이용하여 측정하였

다(Geotronics, 1996). 측선 2의 7번 국도 동쪽에 위치한 측점에서는 총지자기를 측정하지 않았으며, 측선 2의 서쪽 측점에서는 모터 등 농작물 관리 시설에서 발생하는 자기 잡음이 심하게 기록되었다.

4. 자료 보정

4.1. 중력 보정

측정된 중력값은 우선 절대 중력값으로 변환시킨 후, 잘 알려진 통상적인 중력 보정 방법을 따라 계기 및 조석, 위도, 고도, 지형 등에 의한 효과(Fig. 2)를 제거시켰다.

4.1.1. 계기 및 조석 보정

조사에 사용한 Worden 중력계 master 모델은 계기 변화량이 시간당 0.03 mGal 이내이며(Worden, 1992), 측선당 조사시간이 2시간 이내로 신속히 측정하였기 때문에 조석에 의한 효과도 매우 작은 편이다. 그러나 계기 및 조석에 의한 중력 효과는

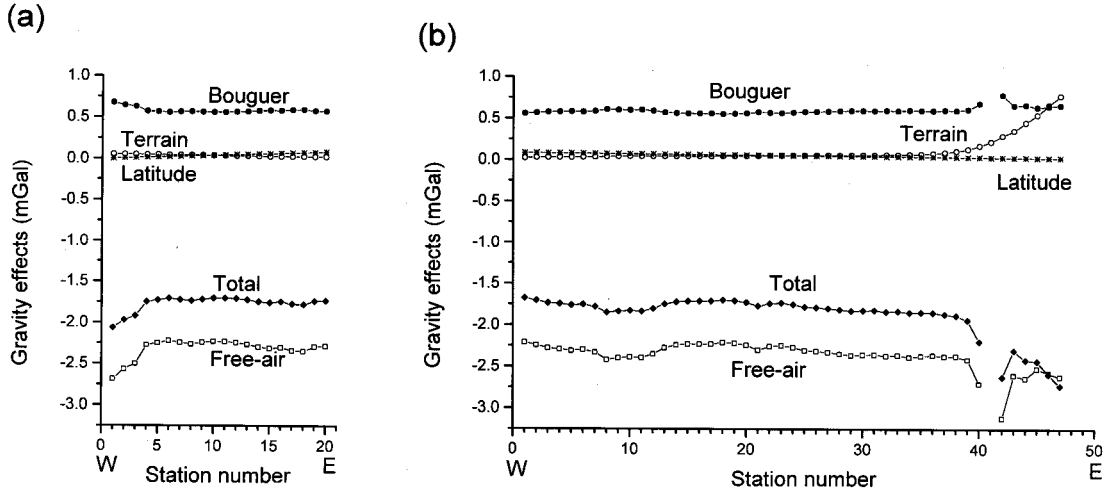


Fig. 2. Computed gravitational effects along lines (a) 1 and (b) 2, respectively. Absolute values for free-air effects (empty squares) are approximately four times greater than those for Bouguer effects (solid circles). Both terrain (empty circles) and latitude (asterisks) effects are negligible except where stations are located near the hill (station numbers greater than 40 of line 2).

기준점을 30분마다 재측정하는 방식으로 2회 이상 기록하였고, 선형 보간법을 이용하여 보정하였다.

4.1.2. 위도 보정

위도 효과는 지구타원체를 가정한 GRS67 (Geodetic Reference System 1967) 모델식으로부터의

$$\Delta g_{lat} = 0.00812 \sin 2\phi \text{ mgal}/m_{NS} \quad (1)$$

근사식 형태로 표시되며(서정희 외, 1987), 조사지 위도 $\phi = 35.97^\circ N$ 에서는 남북방향 1 m 당 약 $7.7199 \cdot 10^{-4}$ mGal의 중력 효과가 발생한다. 조사 측선이 거의 동서방향으로 놓임에 따라 측선 1과 2에서 위도 효과 평균값은 각각 0.041 mGal과 0.054 mGal로 계산되며, 최대 0.085 mGal로 위도 효과는 무시할 수 있을 정도로 매우 작다. 조석 및 계기 보정된 중력자료에 위도 변화에 의한 효과를 더하여 보정하였다.

4.1.3. 후리에어 보정

고도 변화에 의한 효과 중, 후리에어 효과는 대략

$$\Delta g_{F.A.} = 0.3086 \text{ mGal}/m \quad (2)$$

의 식으로 표시된다. 기준점을 관측점보다 높게

정함에 따라, 측선 1과 2에서 각각 $-2.223 \sim -2.688$ mGal과 $-2.210 \sim -3.116$ mGal로 계산되며, 측선의 고도 변화가 심하지 않으므로 그 변화 폭은 대체로 작은 편이다. 그러나 후리에어 효과는 위도 효과의 50배가 넘어 상대적으로 큰 영향을 미친다. 계산된 후리에어 효과를 위도 보정된 중력자료에서 빼 주었다.

4.1.4. 부우게 보정

기준면과 관측점 사이에 무한 평판(infinite slab)을 가정하고 이 무한 평판의 밀도에 의한 효과인 부우게 효과는 대략

$$\Delta g_{B.A.} = 0.04193\rho \text{ mGal}/m \quad (3)$$

의 식으로 표시된다. 부우게 평판 밀도를 보통 중력조사시 선택하는 2.67 g/cm^3 으로 정하지 않고, 기반암 상부 경계면을 구명하기 위한 이 연구에서는 제4기 퇴적물의 밀도로 예상되는 1.85 g/cm^3 으로 택하였다. 부우게 효과는 측선 1과 2에서 각각 $0.559 \sim 0.676$ mGal과 $0.556 \sim 0.783$ mGal로 계산되며, 부우게 밀도를 작게 정함에 따라 후리에어 효과의 약 1/4에 불과하다.

4.1.5. 지형 보정

지형 보정은 Hammer (1939)에 의해 소개된

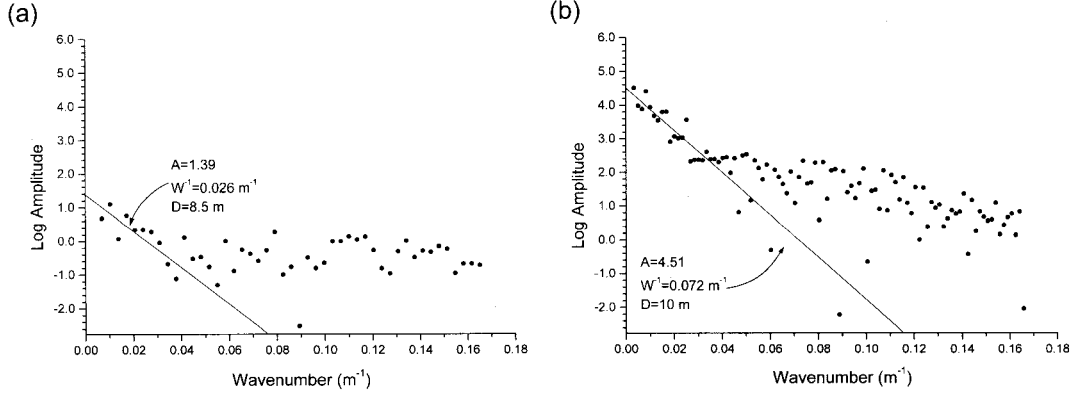


Fig. 3. Amplitude spectra computed using magnetic data of lines (a) 1 and (b) 2, respectively. The linearly regressed data are indicated with solid lines. Average depths are estimated to be (a) 8.5 m and (b) 10.0 m along lines located to the east and the west of the Hyeongsan river, respectively. Sampling interval is 3 m. The data were measured at 97 and 199 stations for lines 1 and 2, respectively.

$$\Delta g_{T.E.} = -G\rho\theta[(r_o - r_i) + \sqrt{r_i^2 + z^2} - \sqrt{r_o^2 + z^2}] \quad (4)$$

의 전형적인 식을 이용하였다. 여기서 G 는 만유인력 상수이며, 원통의 내반경인 r_i 는 0, 125, 250, 375, 500, 750, 1000, 1500 m, 외반경인 r_o 는 125, 250, 375, 500, 750, 1000, 1500, 2000 m로 정하였다. $\theta = \pi/6$ 즉, 모든 원통을 각각 12개로 등분하여 계산하였으며, 밀도차 ρ 는 주변암 밀도 2.67 g/cm³를 사용하였다. 측선 2의 동쪽 끝 부분은 지형적인 영향으로 0.0224~0.7711 mGal까지 크게 변하나, 비교적 지형변화가 심하지 않은 측선 1에서는 0.0226~0.0526 mGal까지 변한다.

4.2. 지자기 보정

1995년도에 발표된 국제표준 지자기장 계산식을 이용하여 구한 조사측선의 총지자기 변화폭은 최대 133 nT에 지나지 않으며, 계산치와 측정치 평균과의 차이는 측선 1, 2에서 각각 22, 155 nT이다. 이는 전체 지자기 값의 0.3%에 해당하는 작은 값이다. 측정된 총지자기 값은 측선 길이가 짧고, 고도 차이가 매우 작아서 위치에 따른 보정은 실시하지 않았다. 일변화 및 계기 보정은 측선의 중앙에 놓인 측선 1의 측정 9번과 측선 2의 측정 28번에서 약 10분 간격으로 반복 측정된 값들로부터 시간에 따라 변하는 함수를 구하여 보정하였다. 측선 1과 2의 총지자기 측정시간이 2 시간

이내로 짧아서 시간에 대한 보정량도 최대 7.85 nT로 매우 작은 편이다.

5. 스펙트럼 분석

밀도나 대자율 불연속면의 평균 깊이를 구하는데 자주 사용되는 스펙트럼 분석법(Tomoda, 1960)은 물성이나 불연속면 깊이에 대한 가정 없이 적용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이 방법은 중력 및 지자기자료를 대상으로 국내에서도 여러 차례 적용된 바 있으며(Kwon · Yang, 1985; 민경덕 · 정종대, 1985; 김성균 외, 1997), 이 연구에서는 Talwani 순산법(Talwani *et al.*, 1956)을 이용한 중력 모델시 기초자료로 활용할 목적으로 적용하였다. 중력측정이 15 m 간격으로 이루어진 반면에 자력은 3 m 간격으로 촘촘히 측정하였으므로, 스펙트럼 분석은 자력 측정값들을 이용하였다. 이러한 스펙트럼 분석을 위하여는 총자기 값이 아닌 수직성분 값을 이용하여야 하나, 조사 측선이 매우 짧기 때문에 자극화 변환을 시킨 후의 결과와 스펙트럼의 차이가 거의 없으므로 총자기 값을 그대로 사용하였다.

Baag · Baag (1989)은 이 방법을 이용하여 불연속면의 평균 깊이 D 를 구하는 식을 매우 간단한 형태, 즉

$$D = \frac{A \cdot W}{2\pi} \quad (5)$$

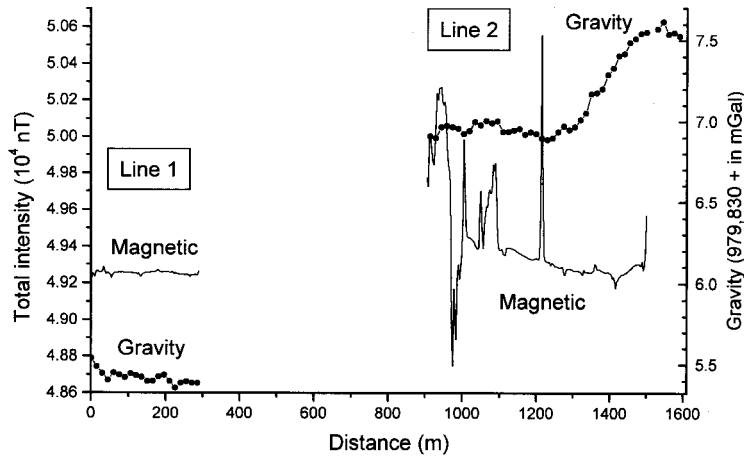


Fig. 4. Composition of reduced gravimetric and magnetic data along lines 1 and 2. Average value of reduced gravity on the east line is higher than that on the west by the amount of 1.71 mGal, which indicates that the basement rocks were more severely fractured in the western part.

으로 나타낸 바 있으며, 여기서 A는 진폭의 자연 대수축과 기울기선이 맞나는 절편, W는 기울기선의 파장축 절편을 각각 뜻한다.

일변화 보정후의 총지자기 자료를 이용하여 구한 진폭 스펙트럼을 Fig. 3에 도시하였다. 축선 1의 경우에 A=1.39, W=38.4 m, 축선 2의 경우에 A=4.51, W=13.9 m로 각각 구해지며, 식(5)를 이용하여 계산한 불연속면의 평균 깊이는 각각 8.5, 10.0 m로 구해진다. 이 값은 김기영 외(1998)가 조사지역 부근에서 기록한 위커웨이 자료를 분석하여 구한 10 m와 잘 일치한다.

6. 정성적 해석

Fig. 4는 축선 1과 2의 중력 및 총지자기 값들을 함께 보여주며, 전체 조사축선 길이가 매우 짧기 때문에 광역중력 및 자력값들이 일정하다고 가정하였다. 양축선 사이의 빈 공간은 형산강이 흐르고 있어 자료를 측정하지 못한 구간으로(Fig. 1), 수평축은 축선 1의 서쪽 끝에 위치한 측정점에서의 거리로 나타내고, 서쪽에 놓여 있는 축선 1의 중력값이 동쪽의 축선 2의 중력값보다 평균 1.71 mGal 이상 작게 나타난다. 두 축선간에 총지자기 값은 큰 차이를 보이지 않으며, 축선 2의 서부 측정점(기점거리 약 900~1100 m 구간)과 중앙부(기점

거리 1200 m) 부근에서는 모터 등 농작물 관리 시설과 콘크리트 교량에 의한 자기잡음이 심하게 기록되어 있는 모습을 보인다. 따라서 지자기 자료는 스펙트럼 분석을 통한 이상체 평균 깊이를 구하는 데만 활용하였다.

형산강이 위치한 공백 부분과 기점거리 1390 m 부분의 0.5 mGal/m와 0.6 mGal/m의 심한 중력구배는 퇴적분지 가장자리나 단층 등 암상 및 기반암 깊이가 급격히 변하는 지역에서 흔히 발견되는 특징적인 모습이다. 이 점들을 중심으로 각각 1.5 mGal과 0.6 mGal 정도의 중력 차이는 (1) 기반암의 밀도 차이, (2) 단층 낙차, (3) 파쇄대 존재 등을 주요 원인으로 고려할 수 있다. 기반암의 밀도 차이에 의한 중력구배는 양산단층이 주향이동단층임을 생각할 때 가장 설득력이 있으나, 축선 서쪽 기반암인 경상계 퇴적암의 밀도가 2.60 g/cm³으로 동쪽의 석영반암의 밀도 2.57 g/cm³보다(민정덕·정종대, 1985) 오히려 큰 점을 고려할 때, 단순히 기반암의 밀도 차이만으로 해석하기에는 다소 무리가 있다. 이러한 점들을 감안할 때, 두께 9~10 m의 충적층 하부에 놓여 있는 기반암은 축선 2상의 기점거리 1390 m 부분을 경계로 서쪽으로 많이 파쇄되어 있으며, 형산강이 흐르는 부분을 경계로 서쪽 부분에서 파쇄 정도가 더욱 심할 가능성이 있는 것으로 해석된다. 또한 파쇄대 깊이가 변

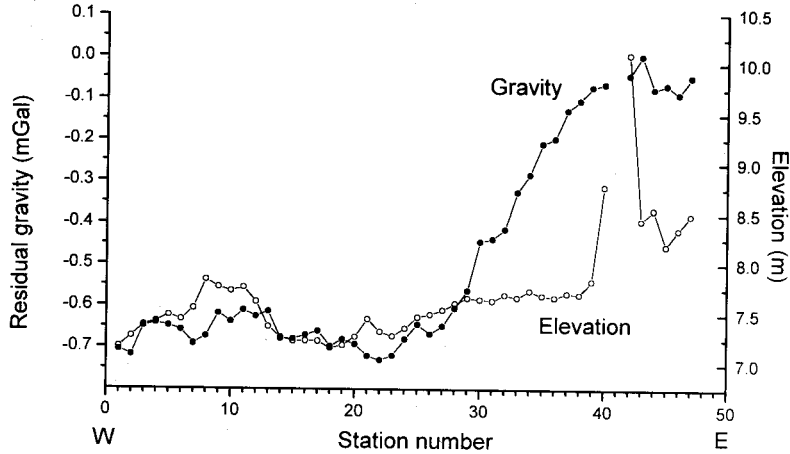


Fig. 5. Residual gravity and elevation data along line 2, which are modelled using the Talwani 2-D method. Steep gradient of gravity is noticed near station 33. Surface depression of approximately 240 m wide is recognized between stations 12 and 28.

화는 중력 변화 양상으로부터 단층과 밀접히 연관되어 있을 것으로 추측된다. 이는 형산강 부근에서 지자기 기반암면 깊이가 350 m 정도로 급격히 깊어지며, 대규모 단층 존재를 시사하고 있는 Kwon · Lee (1991)의 심부 자기조사 결과와도 일치한다.

7. 중력 순산모델

Fig. 4의 중력자료는 크게 3가지 성분, 즉 거의 일정한 값을 갖는 광역적, 단층이나 파쇄대에 의한 지역적, 기반암면의 기복변화나 구하상 등에 의한 국지적인 효과로 각각 분리하여 해석할 수 있다. 측선 길이가 짧은 중력자료의 경우, 광역적 중력 효과는 거의 일정하다고 가정할 수 있다.

측선 2의 경우, 동쪽 끝부분 중력자료들이 접근하는 값인 979,837.6 mGal을 광역 중력값으로 가정하고, 측정값에서 이 값을 빼준 잔여 중력값을 대상으로 중력모델을 시도하였다. Fig. 5는 측선 2의 잔여 중력값을 지표 고도와 함께 보여준다. 단층구조에 의한 전형적인 중력 변화양상을 보이는 잔여 중력은 측정 33번을 중심으로 거의 점대칭적인 모습을 보여서 이 부분에 단층 경계가 존재할 가능성을 제시한다.

Fig. 6a는 Talwani 순산법을 이용하여 구한 중력모델로서, 중력 이상체 상부 경계는 스펙트럼

분석을 통하여 구한 값인 10 m로 택하고 이상체 밀도 차이와 하부 경계는 여러 모델을 시험한 결과 -0.23 g/cm^3 와 70 m인 경우 Fig. 6b의 계산치와 측정치가 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 측정 14번과 29번 사이에는 측정치가 계산치보다 작게 나타나며, Fig. 5의 지표 고도도 이 부분에서 주위보다 약 44 cm 정도 낮게 측정되는 점을 고려하여 Fig. 7의 모델을 설정하였다. 이 모델은 측정 14번과 28번 사이 기반암 상부면에 폭 190 m, 평균 3.5 m 깊이의 비대칭 소규모 지구를 가정한 것으로, Fig. 6b보다 측정치와 더욱 잘 일치한다(Fig. 7b). 따라서 측선 2의 중력모델 연구로부터, 측정 33번을 경계로 동쪽보다 서쪽에서 기반암 파쇄 정도가 심할 가능성과, Fig. 5의 지표 고도상에 흔적이 남아 있는 측정 21번 중심의 소규모 지구는 시기가 오래되지 않은 단층에 의해 형성되었을 가능성이 높은 것으로 해석된다.

한편 측선 1의 경우에는 측선 2에서와 같이 중력 이상체의 밀도 -0.23 g/cm^3 , 상부 경계면 깊이 10 m를 가정하고 계산하면, 하부 경계면의 깊이가 약 300 m로 형산강 동쪽 부분보다 훨씬 깊게 구해지며 중력구배도 잘 일치하지 않는 문제가 있다. 따라서 측선 서쪽의 제4기 하성층 존재를 모델시 고려하여야 할 것이나, 조사측선의 길이가 짧아 더 이상의 모델 연구는 실시하지 않았다. 조사지 서쪽에 분포하는 기반암인 백악기 퇴적암류

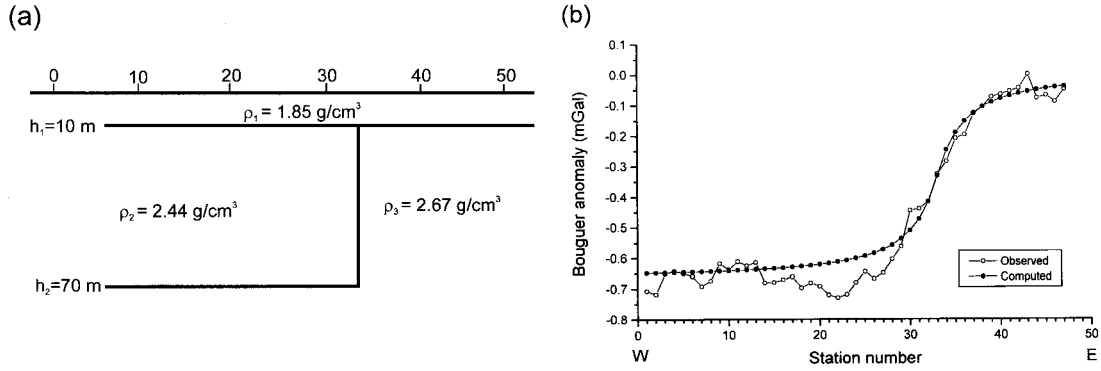


Fig. 6. (a) Primary 2-D gravity model and (b) observed (open circles) and computed (solid circles) gravity data for line 2. In this model, a vertical fault is located at station 33. Fractures laterally bounded by the fault are interpreted to be extended down to 80 m from the surface. Density values are assigned to be 1.85, 2.44, and 2.67 g/cm³ for soil, fractured, and fresh rocks, respectively.

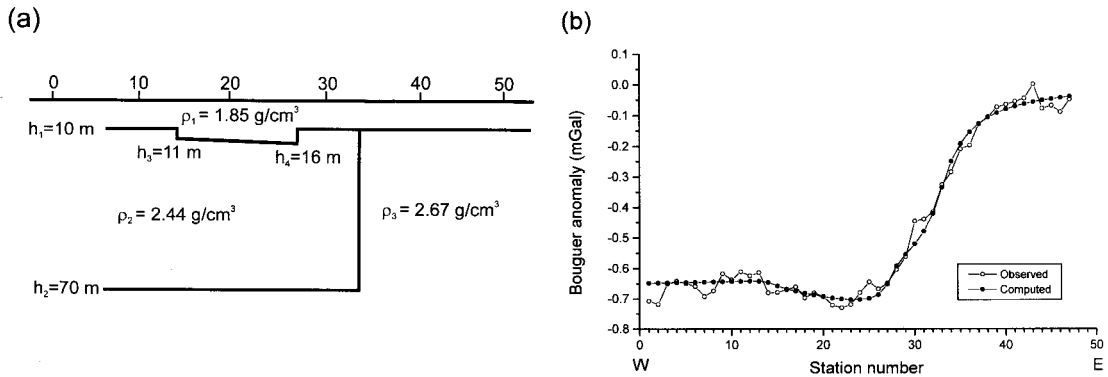


Fig. 7. (a) Refined 2-D gravity model and (b) observed (open circles) and computed (solid circles) gravity data for line 2. In this model, a small graben of 190 m wide and 3.5 m deep on an average exists under stations 14 through 28. Density values, fault location, and vertical extension of the fractures are the same as in Figure 6.

의 평균 밀도가 동쪽에 분포하는 화성암보다 오히려 큰 점을 감안하면, 형산강 서쪽의 파쇄대 깊이가 더 깊거나, 제4기 하성층이 두껍게 쌓여 있을 가능성이 있는 것으로 분석된다. 또한 형산강을 기준으로 이렇게 동쪽과 서쪽의 중력값이 다르게 나타나는 것은 이 부근에 존재할 단층을 경계로 양쪽 기반암의 물성이 다른데 기인할 것으로 해석된다.

8. 토 의

비교적 정밀한 지형 보정을 위하여는 수치 등고선 자료를 이용한 전산처리 방법이 바람직하나, 자료 이용의 어려움 등으로 이 연구에서는 전통적인 Hammer (1939) 방식을 사용하였다. Fig. 2의

지형 효과는 산에 인접한 동쪽 가장자리를 제외하면, 대부분 구간에서 비교적 서서히 변하는 특성을 보여서 Hammer 방식으로 구한 값들이 비교적 신빙성이 있는 것으로 판단된다.

한편 Fig. 5의 정밀 지표 고도는 기반암면이 파여 있는 것으로 해석되는 일부 구간(측선 2의 측점 14~28)에서 중력자료와 닮은 모습을 보여준다. 일반적으로 부우계 보정 및 지형 보정시 밀도를 잘못 선정할 경우 이러한 현상이 발생할 수 있으나(Nettleton, 1942), 부우계 및 지형 보정 밀도를 1.6~2.8 g/cm³ 구간에서 0.2 g/cm³ 간격으로 시험하여도 보정된 중력자료는 이 구간에서 지표 고도와 유사한 모습을 유지한다(Fig. 8). 따라서 이 구간의 지표 고도는 지하 구조와 연관된 것으로

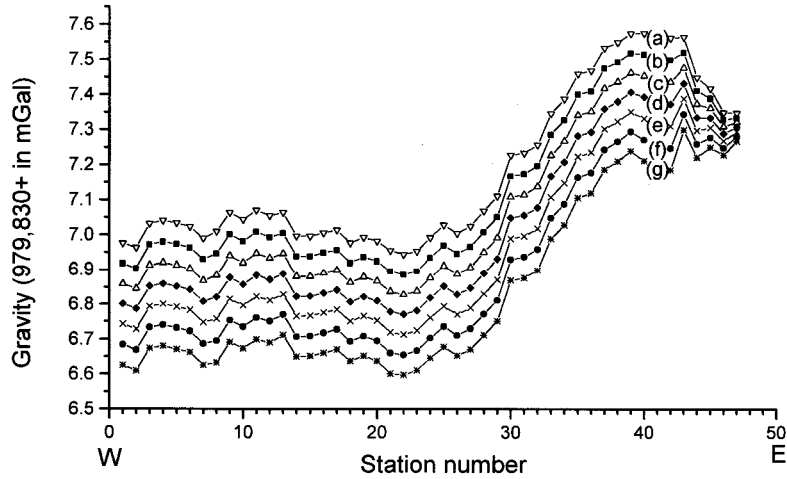


Fig. 8. Bouguer and terrain corrections for gravity data along line 2 with density values of (a) 2.8, (b) 2.6, (c) 2.4, (d) 2.2, (e) 2.0, (f) 1.8, and (g) 1.6 g/cm³, respectively. The depression of surface centered at station 22 remains unchanged even after both Bouguer and terrain corrections are applied with those different density values.

해석함이 타당하다.

스펙트럼 분석을 통하여 구한 자기 이상체의 평균 깊이 약 10 m는 Kwon · Lee (1991)가 안강 부근에서 실시한 지자기 자료 분석을 통하여 구한 기반암 심도 50~650 m보다 훨씬 얕으며, 이들이 강동면 측선(BB')에서 역산으로 구한 0~350 m보다도 매우 작게 나타난다. 이는 Kwon · Lee (1991)가 자력모델시 가정한 자화강도 차이가 실제와 차이가 있을 가능성도 있으나, 이보다는 이들의 측선 길이와 측정 간격에 비하여 지표 근처의 지질 구조를 구명할 목적으로 이 연구에서 적용한 측정 간격 및 측선 길이가 훨씬 작는데 주로 기인할 것으로 판단된다.

9. 결 론

경주 북부 안강 부근 양산단층 지역에서 실시한 중력 및 지자기 측정자료를 통상적인 방법으로 보정한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 총지자기 스펙트럼 분석을 통하여 구한 자기 이상체의 평균 깊이는 골짜기 서쪽 부분(측선 1)에서 8.5 m, 동쪽 부분(측선 2)에서 10.0 m로 구해진다.

(2) 측선 1의 중력값이 측선 2의 중력값보다 평균 1.71 mGal 이상 작게 나타나며, 이들 두 측선 사이에 형산강이 흐르는 구간과 기점거리 1390 m

부분에서 각각 0.5, 0.6 mGal/m의 심한 중력구배를 보인다.

(3) 기반암은 측선 2의 측정 33번을 경계로 서쪽으로 심하게 파쇄되어 있고, 형산강이 흐르는 부분을 경계로 서쪽 부분에서 파쇄대 깊이가 급격히 깊어지며, 이러한 파쇄대 깊이가 변화는 중력 변화 양상으로부터 단층과 밀접히 연관되어 있을 것으로 추측된다.

(4) 광역적 성분을 제거한 중력 측정치를 이용한 순산모델 연구는 측선 2의 측정 33번에 놓인 단층을 경계로 서쪽으로 밀도 2.44 g/cm³, 깊이 70 m의 파쇄대가 발달되어 있으며, 측정 21번을 중심으로 기반암 상부면이 폭 190 m, 평균 3.5 m 깊이의 소규모 비대칭 지구가 존재할 가능성을 제시한다.

(5) 중력모델 결과 소규모 지구가 존재할 것으로 예상되는 지점의 지표 고도는 주위보다 약 44 cm 꺼져 있어서, 이 지구가 오래되지 않은 시기의 단층 운동에 의해 형성되었을 가능성이 높은 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 '96 목적 기초 연구과제(96-0703-05-04-3) 연구결과의 일부

임을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 지원에 감사드립니다. 아울러 중력자료 획득 및 보정에 여러모로 도움을 주시고 논문을 심사하여 주신 부산대학교 최광선 교수님과 좋은 의견을 많이 주시고 심사하여 주신 공주대학교 서만철 교수님께 감사드립니다. 또한 측정들을 정밀하게 측량하여 준 강원대학교 우남철, 김교홍 대학원생에게 고마움을 표합니다.

참고문헌

- 김기영, 홍종국, 김교홍, 1998, 양산단층 지역에서의 수직균열에 의한 탄성과 이방성 측정, 지질학회지, 34, 73-80.
- 김성균, 안건상, 오진용, 1997, 중력탐사에 의한 옥천대 남서부의 지하지질구조 (I), 자원환경지질학회지, 30, 363-369.
- 김영화, 이기화, 성일경, 1990, 경주 북쪽에 있어서의 양산단층의 구조에 관한 지전기학적 연구, 지질학회지, 26, 393-403.
- 김인수, 김종렬, 1983, 경상분지 언양단층 지역 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질학회지, 16, 11-18.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동, 지질학회지, 28, 84-109.
- 민경덕, 정종대, 1985, 중력탐사에 의한 경상충군내 왜관-포항간의 지하구조 연구, 광산지질학회지, 18, 321-329.
- 서정희, 민경덕, 권병두, 1987, 응용지구물리학. 도서출판 우성, 서울.
- 이동영 외 16인, 1996, 한반도 지진활동 및 지각변형 연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-96(T)-12.
- 황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력장 복원, 지질학회지, 30, 27-34.
- Baag, C. and Baag, C.E., 1989, Spectral analysis technique applied to magnetic profile data for magnetic depth estimates, Journal of Korean Institute and Mining Geology, 22, 81-87.
- GEM, 1990, GSM-19 Overhauser Memory Magnetometer Instruction Manual, GEM Systems Inc.
- Geotronics, 1996, Geodolite 506 User Manual (Preliminary), Publication Number 571-701-081, Geotronics AB.
- Hammer, S., 1939, Terrain corrections for gravimeter stations, Geophysics, 4, 184-194.
- Kim, K.Y., Hong, J.K. and Kim, K.H., 1998, In-situ measurement of seismic anisotropy due to vertical fractures in the Yangsan fault area, Journal of the Geological Society of Korea, 34, 73-80.
- Kim, K.Y., Woo, N.C., Kim, H.K. and Jung, M.S., 1997, Seismic reflection studies near Eonyang in the Yangsan Fault System of Korea; in Lee Y. and Kim J.H. eds., Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent, GSK 50th Anniversary International Symposium, Geological Society of Korea, 28-32.
- Kwon, B.D. and Lee, K.W., 1991, Magnetic investigation of the Yangsan fault, Journal of Korean Institute of Mining Geology, 24, 421-434.
- Kwon, B.D. and Yang, S.Y., 1985, A study on the crustal structure of the southern Korean peninsula through gravity analysis, Journal of Korean Institute and Mining Geology, 18, 309-320.
- Kyung, J.B., 1997, Paleoseismological study on the mid-northern part of Ulsan fault by trench method. The Journal of Engineering Geology, 7, 81-90.
- Lee, K., Jeong, B., Kim, Y. and Yang, S.J., 1984, A geophysical study of the Yangsan fault area, Journal of the Geological Society of Korea, 20, 222-240.
- Lee, K., Jeong, B. and Kim, Y., 1985, A geophysical study of the Yangsan fault area (II), Journal of the Geological Society of Korea, 21, 79-89.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin, Journal of the Geological Society of Korea, 27, 434-449.
- Lee, K., Kim, K.H. and Chang, T.W., 1986, Seismicity of the Korean peninsula (II): Seismicity of the northern part of the Yangsan fault, Journal of the Geological Society of Korea, 22, 347-365.
- Lee, K. and Lee J., 1997, Geoelectric study on the probable seismic segment boundaries of Yangsan fault zone, Geoscience Journal, 1, 16-25.
- Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault, Journal of the Geological Society of Korea, 19, 127-135.
- Nettleton, L.L., 1942, Gravity and magnetics calculations, Geophysics, 7, 293-310.
- Talwani, M., Worzel, J.L. and Landisman, M., 1956, Rapid computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, Journal of Geophysical Research, 64, 49-59.
- Tomoda, Y., 1960, Thickness of the Earth's crust from Bouguer anomaly statics, Journal of Geological Society of Japan, 6, 47-55.
- Worden, 1992, Worden Gravity Meter Operating Instructions, WGM Part No, 081537-0011, Worden Gravity Meter Company.

1998년 9월 7일 원고접수
1998년 12월 3일 원고채택