

## 통도사부근 양산단층대에서의 미소중력탐사 연구

이소영, 홍명호, 김기영

강원대학교 지구물리학과 (white@kwnu.kangwon.ac.kr)

### 1. 서론

양산단층은 백악기 경상분지내의 주요 구조대로서 Lee·Na (1983)가 미소지진과 역사지진 자료 분석을 통하여 지진 활동성을 처음 제기한 이후, 핵발전소 등 중요 시설물의 안전과 관련하여 사회적 관심이 집중되어 왔다. 양산단층의 구조운동은 마이오세 후기에 가장 활발하였으며 에오세 이후 최소한 3회의 주향이동단층운동과 2회의 경사단층운동을 받았음이 제시되었다(채병근·장태우, 1994; 장천중·장태우, 1998). 양산단층은 주로 우수주향이동의 특성을 보이며 중부와 북부에서 각각 25 km와 35 km 변위를 나타낸다고 보고한 바 있다(최현일 외, 1990; 장기홍 외, 1990).

지진 활동성이 여러 차례 보고된 양산단층은 대부분 지표에 노출되지 않고 골짜기를 채운 제4기 충적층 하부에 파쇄대 형태로 존재하기 때문에, 여러 지구물리학적 조사방법이 활발히 적용되고 있다. 이 중에서 Lee et al. (1985)은 경주 남쪽 양산단층 지역의 단층 파쇄대에서 풍화암이 100 m 깊이까지 연장되었을 가능성을 중력모델 분석을 통하여 시사하였고, Kwon·Lee (1991)는 강동면 일대에서 실시한 자기측정 자료를 분석하여 기반암까지의 깊이가 50~650 m임을 제시하였다. 또한 김기영·이광자(1998)는 안강부근에서 실시한 중력연구로 단층운동에 의해 형성된 소규모 비대칭 지구의 존재를 밝혔다. 최근 통도사 부근에서 인공지진파를 이용하여 고해상도 반사파 및 굴절파(김동훈, 2004), 표면파(조수제·김기영, 2004) 방법으로 이 지역의 단층운동이 제4기까지도 계속되었을 가능성을 제시하였다.

이 연구는 양산단층이 잘 발달된 통도사 부근 지하지질구조를 규명하기 위해 실시된 종합적인 지구물리조사의 일환으로, 굴절된 P파, 굴절된 S파, 반사 P파, 반사 S파 조사, 표면파 조사, 그리고 변환 S파 연구와 함께 실시되었다. 동일 축선에서 이미 얻어진 굴절파 조사(김동훈, 2004)의 경우에 제한된 투과심도로 인하여 기반암 분포양상 및 기반암 내의 구조를 규명하는데 한계가 있으므로, 이를 보완하기 위하여 미소중력을 사용하여 주 단층의 경계를 규명코자 실시하였다.

### 2. 일반 지질

양산단층이 존재하는 경상분지는 한반도 동남부에 위치하며 중생대 백악기 퇴적암층과 화

산암류, 심성암으로 이루어진 퇴적분지이다. 경상분지는 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천군으로 나뉜다. 경상누층군의 하나인 하양층군은 다양한 주향방향을 보이며 지역적으로 분포가 다양하다. 불국사 관입암류가 관입하고 있는 유천군층은 하부의 하양층군과 부정합 관계를 나타내며 상부층은 유문암질의 지경동 화산암층이 위치하고 있다(채병곤·장태우, 1994).

연구지역은 경상분지 내에 위치하고 있으며 주로 불국사 화강암류로 알려진 심성암이 관입한 지역이다(민경덕 외, 1982). 양산천 주변으로 설정된 측선이 자갈, 모래, 점토로 이루어진 제4기 충적층 내에 존재하며 이 충적층을 따라 약 N15°E 주향의 단층대(양산단층)가 발달되어 있다(Fig. 1). 이 단층대를 중심으로 동쪽과 서쪽에는 경상계 불국사통 흑운모화강암이 넓게 분포한다. 측선의 북동 방향으로 주산안산암질암과 안산암으로 구성된 신라통 주산안산암질암이 국부적으로 자리 잡고 있는데 이는 후기에 관입한 화강암류에 의한 것으로 여겨진다(최위찬 외, 1998).

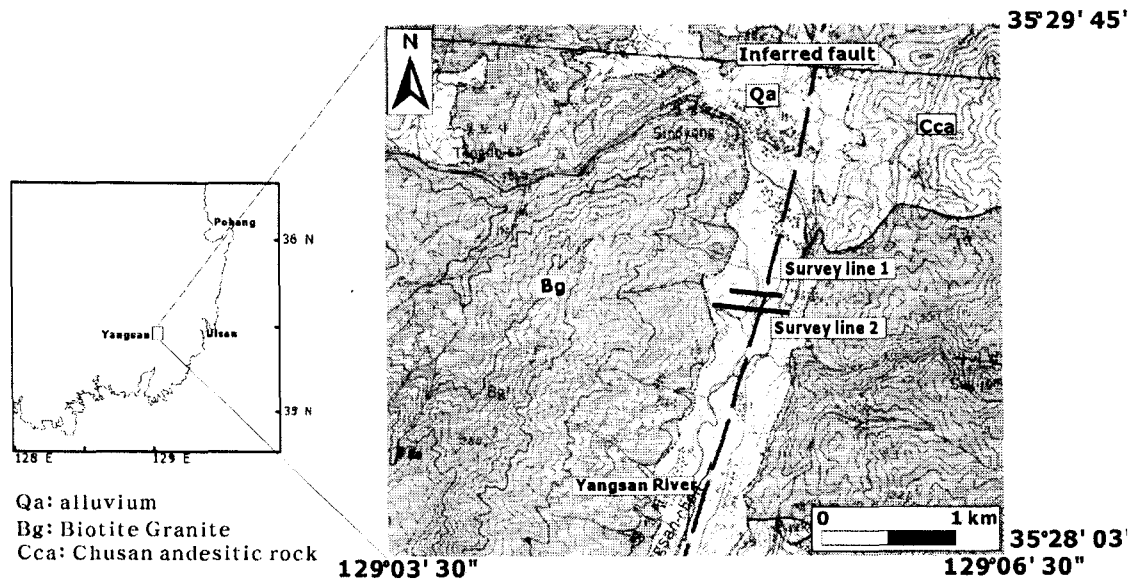


Fig. 1. Geologic map of the study area.

### 3. 자료 획득

측선은 모두 거의 동서방향이며, 길이 360 m의 측선 1과 이로부터 남쪽으로 약 150 m 거리에 위치한 600 m 길이의 측선 2를 설정하였다. 측점 간격은 10 m로 정하고 레이저 측량기를 사용하여 각각의 상대고도를 정밀하게 측정하였다. GPS로 첫 번째와 마지막 측점의 위치를 측정하고, 내삽을 이용하여 각 측점에서의 위도 및 경도 값을 얻었다. 사용한 장비는 0.01 mGal의 정확도를 갖는 WORDEN사의 Worden 중력계로서 장비 특성상 눈금 하나당 0.1005 mGal을 적용하도록 설계되어 있다. 다이얼 범위는 0~2100로서, 원점조정 없이 한번에 측정 가능한 최대범위는 211.1 mGal이다.

## 4. 자료처리

측정된 중력값은 잘 알려진 통상적인 중력 보정 방법을 따라 조석, 계기, 위도, 고도, 지형 등에 의한 효과를 제거시켰다.

### 4.1. 자료 변환

자료획득시 각 측정점에서 읽는 중력계의 눈금을 보정상수를 이용하여 환산하는 과정이 필요하다. 이 연구에 사용된 중력계의 보정상수 0.1005를 사용하여 mGal 단위의 상대중력값으로 환산하였다.

### 4.2. 조석보정

지표면상의 임의의 지점에서 달과 태양에 의한 조석효과가 위치와 시간에 따라 변하므로, 각각의 효과를 계산하여 더해 줌으로써 전체적인 효과를 구한다.

임의의 P점에서 태양과 달에 기인한 조석 효과의 수직요소  $g_0$ 는 달에 의한 수직요소  $g_m$ 과 태양에 의한 수직요소  $g_s$ 의 합으로 표현된다(Longman, 1959).

$$g_m = \frac{\mu M r}{d^3} (3 \cos^2 \theta - 1) + \frac{3}{2} \frac{\mu M r^2}{d^4} (5 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta)$$

$$g_s = \frac{\mu S r}{D^3} (3 \cos^2 \varphi - 1)$$

$$g_0 = g_m + g_s$$

위 식에서  $\mu$ 은 만유인력 상수, M과 S는 달과 태양의 질량을 나타내며, r은 지구 중심에서 지표상의 임의의 점 P까지의 거리, d는 지구 중심과 달 사이의 거리, D는 지구 중심과 태양 사이의 거리를 의미한다. 또한  $\theta$ 와  $\varphi$ 는 달과 태양의 천정각(zenith angle)이다. 이 연구에서는 각 측정에서의 조석효과를 계산하기 위해서 Longman 방정식(Longman, 1959)에 기초하여 작성한 포트란 프로그램을 이용하였다. 계산된 조석효과는 측선 1에서 -0.08346~-0.033915 mGal, 측선 2에서는 -0.05621957~-0.02823804 mGal 범위이다.

### 4.3. 계기 보정

시간에 따른 계기 변화량을 알기 위해 각 측선상의 한 기준점(base station)을 정하고 30분마다 기준점의 중력을 다시 측정하는 방식의 되돌이 측정을 수행하였다. 측선 1은 37개 측정점을 약 3시간에 걸쳐 측정하였으며 기준점에서 7번 반복 측정하였고, 측선 2는 61개 측정점을 8시간 30분에 걸쳐 측정하였으며, 기준점 측정은 13번 실시하였다. 측선 2의 측정도중 발생한 중력계의 장비이상으로 측정 10과 11 사이에 약 3시간의 공백이 존재한다. 계기 변화를 시간에 따른 선형 변화로 가정하여 선형 보간법에 적용시키면 측선 1의 경우 최대 0.15176 mGal, 측선 2는 최대 0.35658 mGal의 보정값이 계산되며, 측선 1에 비해 측정시간이 길었던 측선 2가 비교적 크게 계산된다.

### 4.4. 위도 보정

정확히 계산된 남북방향을 GRS67 (Geodetic Reference System) 모델식에 적용하여 위도 효과를 구하였으며, 그 결과 측선 1과 측선 2의 위도효과는 각각 0.00076754~-0.0577 mGal,

0.00076753~0.0877 mGal로 계산된다. 이는 다른 중력보정 효과에 비해 상대적으로 작다.

#### 4.5. 프리에어 보정

두 측선상의 각 측점을 동일한 기준면의 상대고도로 환산한 후, 이를 적용하여 구한 프리에어 효과는 측선 1에 대해 최대 2.57311 mGal, 측선 2는 최대 6.10257 mGal이다. 측선내의 지형기복이 심하기 때문에 다른 보정값에 비해 매우 큰 편이다.

#### 4.6. 부계 보정

부계보정 시, 밀도는 김기영·이광자(1999)가 양산단층 주변에서 사용한 1.5 g/cm<sup>3</sup>를 적용하여 계산하였다. 측선 1과 측선 2에 대해 각각 -0.88575 ~ -0.36133 mGal, -1.38231~-0.13856 mGal의 범위를 갖는 부계효과가 발생하였으며, 이 효과만큼을 프리에어 중력값으로부터 빼주었다.

#### 4.7. 지형 보정

과거에는 지형보정시 원통고리의 개념을 도입한 Hammer (1939) 방법을 많이 사용하였지만, 정확도가 떨어지고 자료처리과정에 있어 많은 시간이 걸리기 때문에 개인용 컴퓨터를 이용하는 수치지형보정을 사용하였다. 이 연구에서는 측선 주변 22600 m x 27600 m의 대상지역을 100 m x 100 m 크기의 격자 62376개로 나누고, 각 격자의 평균고도를 높이로 갖는 직육면체로 근사적으로 표시하였다. 각 직육면체에 의한 중력효과를 계산하는 식 (Talwani, 1973)을 수정하여, 각각의 직육면체 중앙부의 선질량으로 변환한 후, 각각의 선질량에 대한 중력효과를 더하여 각 측점에서의 지형보정 효과를 구하였다. 지형보정 효과는 측선 1의 경우 0.3255~0.3983 mGal, 측선 2의 경우 0.3986~0.6004 mGal의 범위로 계산된다. Fig. 2는 수치지형보정까지 마친 완전부계중력을 나타낸 것이다. 측선 1 중력값들이 측선 2와 비교적 잘 일치하도록 측선 1의 원점을 동쪽으로 150 m 이동하여 도시하였다.

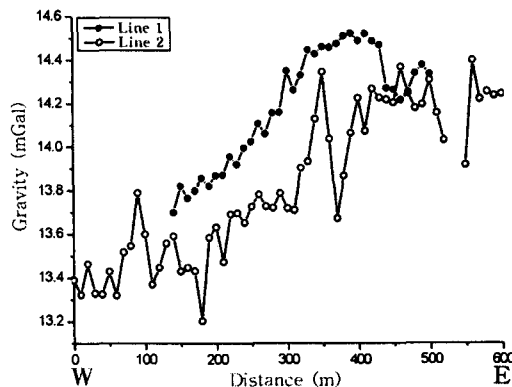


Fig. 2. Completed Bourguer anomalies of Lines 1 and 2.

#### 4.8. 모델링

Talwani (1959)의 알고리즘에 기초한 Geotool사의 GravModeler를 사용하여 모델링을 실시하였다. 중력측정을 실시한 동일한 측선에서 구한 탄성과 굴절 P파 속도토모그램(김동훈, 2004; 조수제·김기영, 2004)을 바탕으로 3개층으로 단순화시켜 각 층의 속도를 추출한 후, 아래의 Gardner의 관계식(Gardner et al., 1974)을 이용하여 모델링에 필요한 초기 밀도값을 결정하였다.

$$r = c V_p^{.25}$$

여기서 r은 단위 g/cm<sup>3</sup>를 갖는 체적밀도이고, V<sub>p</sub>는 종파 속도, c는 상수로 종파속도가 m/s단위일 때 0.31을 갖는다. 관측된 중력값과 모델링으로 얻은 중력값이 거의 일치하는 모델이 나올 때까지 밀도와 깊이를 변화시키는 과정을 반복하였다. 이 때 조사지의 단층들이 거의 수직의 경사를 갖는 주향이동단층임을 감안하여, 단층의 주향이 거의 수직이 되는 제한조건을 가하였다. Fig. 3은 그 결과 얻어진 두 측선의 모델링 단면이다.

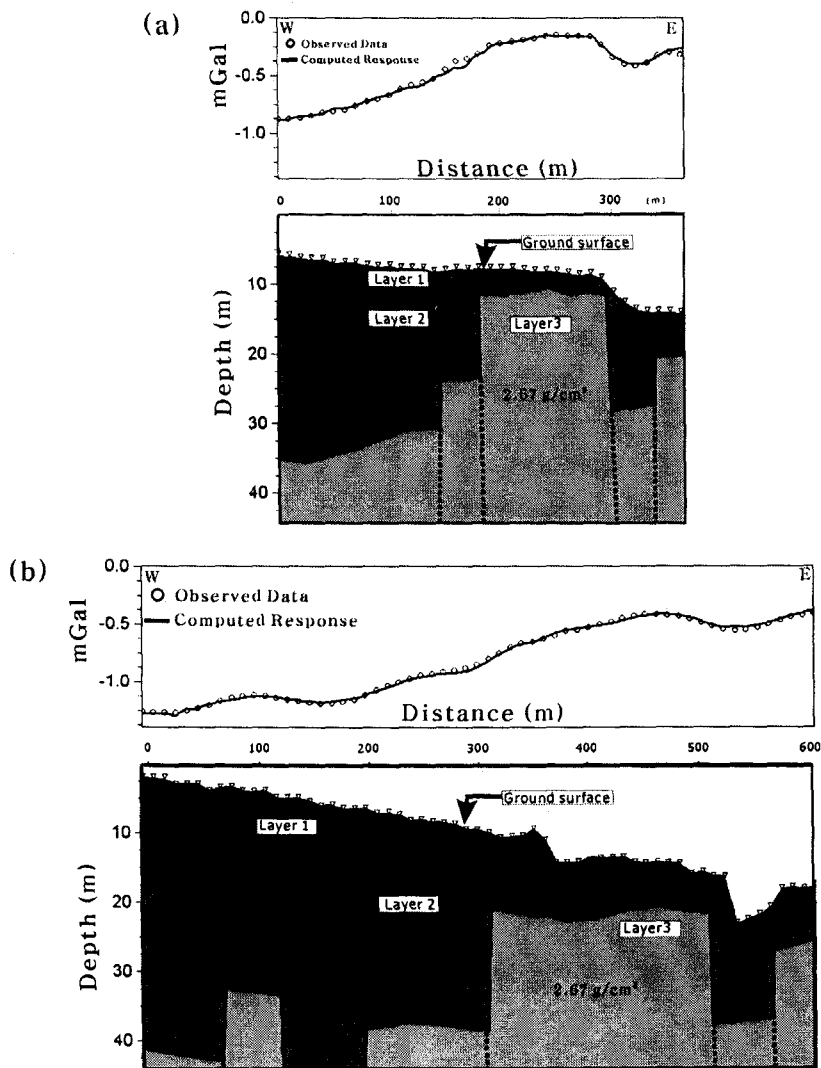


Fig. 3. Interpretation of the gravity models for (a) Lines 1 and (b) 2.

## 5. 결론

통도사 부근 양산단층 지역에서 실시한 중력 측정자료를 통상적인 방법으로 보정한 후, 모델링하여 Fig. 3의 결과를 얻었다. Fig. 3a와 3b는 각각 측선 1과 측선 2의 결과로, 보정된 중력값(측정값)과 모델로부터 계산한 중력값(계산값)을 모델링 결과 단면과 함께 도시하였다. 원으로 표시한 측정값과 선으로 나타낸 계산값이 비교적 서로 잘 일치하며, 동쪽으로 갈수록 중력값이 증가하는 일반적인 경향을 보인다.

두 측선 모두 중력모델은 상부로부터 충적층, 풍화암층, 신선한 기반암의 3개층으로 구분하였으며, 각 층들의 굴절과 속도를 참조하여 구한 밀도는 각각 1.50 g/cm<sup>3</sup>, 2.07 g/cm<sup>3</sup>, 2.67 g/cm<sup>3</sup>이다. 기반암 깊이는 일반적으로 동쪽으로 갈수록 얕아지며, 특히 측선 1의 180~290 m와 측선 2의 310~510 m 구간은 기반암이 주위보다 약 12~18 m 가량 상승한 형태를 보여준다. 기반암의 굴곡은 측선 1의 140, 180, 290, 300 m 부근과, 측선 2의 70, 120, 200, 310, 510, 560 m 부근에서 심하며, 김동훈(2004)의 반사파 단면과 조수제·김기영(2004)의 굴절과, 표면파 단면, 주변지질 등을 참고하여 수직에 가까운 단층이 존재하는 것으로 해석하였다. 특히 수직변위가 비교적 큰 측선 1의 180 m와 측선 2의 310 m, 그리고 측선 1의 330 m와 측선 2의 510 m 부근은 동일 연장선상에 있는 양산단층의 주단층대로, 각각 N21°E와 N16°E, 평균 N18.5°E의 주향을 갖는다.

중력 모델은 동일 측선에서 실시한 굴절과 및 반사파 자료의 결과와 비슷한 형태를 띠며, 특히 천부에 있어서는 굴절과 자료와 거의 일치하는 것으로 보인다. 또한 중력탐사는 파선이 통과하지 않는 심부구조 즉 기반암 분포양상 및 기반암 구조를 규명하는데 어려움이 있는 굴절과 조사법을 보완하는데 효과적인 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 김기영, 이광자, 1998, 안강부근 양산단층 지역에서의 중력 및 지자기 연구, 지구물리, 1, 31-40.
- 김동훈, 2004, 통도사부근 양산단층대에서의 고해상도 탄성과 조사 연구. 강원대학교 석사학위논문.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환, 1982, 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(I), 광산지질, 15, 123-154.
- 염상호, 양승진, 전명순, 김정호, 1983, 한반도의 지진위험도, 한국동력 자원연구소 연구보고서, p. 295
- 장기홍, 우병걸, 이진형, 박옥순, Yao, A., 1990, 결상분지 동부의 백악기 및 전기 신생대 층서 및 지사, 지질학회지, 26, 471-487.
- 장천중, 장태우, 1998, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조 운동사, 지질공학, 8, 32-49.
- 조수제, 김기영, 2004, 통도사 부근 양산단층의 지하 지질구조 영상화를 위한 표면파 조사 연구, 대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회(초록), 춘천 강원대학교, 249-255.
- 채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열발달 상태, 지질학회지, 30, 379-394.

- 최위찬, 류충렬, 기원서, 이봉주, 이병주, 황재하, 박기화, 최영섭, 최성자, 최범영, 조등룡, 김복철, 송교영, 채병곤, 김원영, 김중렬, 이상규, 조성준, 황세호, 황학수, 김유성, 현혜자, 박인화, 이회일, 이동영, 이창범, 김주용, 양동윤, 박덕원, 신성천, 김유숙, 김인준, 류장한, 진명식, 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, 강익범, 신현모, 권무창, 오수정, 김상곤, 임무수, 김순길, 정항영, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가가 최종보고서(1권), 한국자원연구소, 대전.
- 최현일, 오재호, 신성천, 양문렬, 1980, 울산지역 경상계지층의 지질 및 지화학적 연구, 자원개발연구소 연구특보, 20, 5-33.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R., 1974, Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics*, 39, 770-780.
- Hammer, S., 1939, Terrain correction for gravimeter stations, *Geophysics*, 4, 184-194.
- Kwon, B.D. and Lee, K.W., 1991, Magnetic investigation of the Yangsan fault, *Journal of Korean Institute and Mining Geology*, 19, 309-320.
- 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.
- 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.
- Longman, I.M., 1959, Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun, *Journal of Geophysics Research*, 64, 2351-2355.
- Talwani, M., Worzel, J.L., and Landisman, M., 1959, Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone, *Journal of Geophysical Research*, 64, 49-59.
- Talwani, M., 1973, Computer usage in the computation of gravity anomalies, in Bolt, B., Ed., *Methods in computational physics*, Academic press.