

중력 탐사에 의한 포항~공주~만리포간의 지각구조 연구

민정덕* · 이영재**

A study on the Crustal Structure Between Pohang, Kongju and Manripo by Gravity Method

Kyung Duck Min* and Young Jae Lee**

ABSTRACT: The gravity measurement has been carried out to study the deep geologic structure at 331 gravity stations with an interval of 1~1.5 km along the national road which crosses the southern part of the Korean peninsula from Pohang to Manripo. The Bouguer gravity anomalies were obtained from the observed gravity values, and interpreted by means of upward continuation using FFT (Fast Fourier Transform), Fourier-series method and nonlinear 2-D inversion method to determine the depths of Conrad and Moho discontinuities. The linear regression relations between elevations and gravity anomalies were also obtained to test isostasy in the study area. The depth of Conrad discontinuity is 13 km between Pohang and Daegu, 16.5 km between Kimchon and Okchon, 9.7 km between Okchon and Daejeon, and 16.3 km near Manripo. The depth of Moho discontinuity is 32 km between Pohang and Daegu, 35 km between Kimchon and Okchon, 28.7 km between Okchon and Daejeon, 40.5 km between Daejeon and Kongju, and 34.5 km between Kongju and Manripo. The result of testing isostasy indicates that the crust of this area seems to be not in perfect isostatic equilibrium but in a little undercompensated state.

서 언

본 연구에서는 포항~공주~만리포 (Fig. 1)간의 중력탐사 자료를 이용하여 콘라드면과 모호면의 심도변화를 구하고, 측정고도와 중력이상을 이용한 지각평형 정도를 규명하고자 하였다. 중력측정은 중력측정기 Lacoste & Romberg Land Gravimeter Model G를 이용하여 포항~공주~만리포간 국도 약 400 km를 대상으로 1~1.5 km의 간격으로 총 331개의 측정에서 수행되었으며, 이로부터 부계 중력이상치를 구하였다. 자료해석은 2차원 중력 비선형 역해법을 이용하였으며, 이 방법의 적용을 위한 변수 결정에서는 FFT (Fast Fourier Transform)을 이용한 부계 중력이상 상향연속법 (Upward continuation), Fourier급수를 이용한 평균심도 계산법등이 이용되었다.

중력자료에 대한 수치해석 연구는 임의의 형태를 갖는 2차원 다각형에 의한 중력치를 계산하는 방법 (Talwani *et al.*, 1959)으로부터 비롯되었으나, 이 방법은 계산된 중력치가 측정치와 근사해질 때까지 반복계산을 하여야 하므로 계산 시간과 노력이 많이 소모된다. 그러나, 그 후 L.S.M (Least square method)을 이용한 역해법 (Pederson, 1977; 신창수, 1980)으로 발전하였으며, 이 방법은 선형방정식의 해를 구하는 것으로서 지하의 구조를 변수화하기 위하여 지하를 깊이가 서로 다른 각주 모형으로 가정하고 각 각주의 깊이를 구하는 방법이다. 여기서, 측정치와 구조변수와의 관계에는 비선형성의 문제점이 있으므로 이를 해결하기 위하여 특이치 분해 (Singular value decomposition)에 의한 특이치 (Singular value)를 조절하는 방법이 사용되었다. 그 후 이 방법은 Marquardt방법에 의한 반복적 비선형 역해법 (Jupp & Vozoff, 1975; Lines & Treitel, 1984; 이호영, 1985)으로 개선되었다.

본 연구에서는 반복적 비선형 역해 계산법을 중력탐사자료 역해 계산에 응용하였다.

* 연세대학교 지구시스템학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea)
** Department of Geology, Kent State University, Kent, Ohio 44242, U.S.A

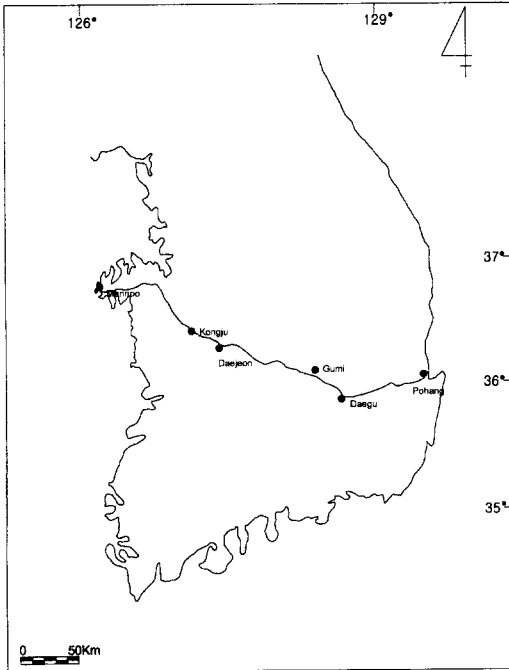


Fig. 1. Location map of the survey line.

한반도에서의 모호면의 평균심도는 쌍계사 지진의 주시자료 분석에 의해 35 km (Lee, 1979b)로, 또한 모호면과 콘라드면의 평균심도는 홍성지진, 쌍계사지

진, 포항지진, 울진지진을 이용한 지진파 연구에 의해서 각각 32 km와 15 km (김상조 와 김소구, 1983)로 보고되었으며, USAMSF (U.S. Army Map Service Far East, 1963) 중력자료 분석에 의한 모호면의 평균심도는 32 km (Kwon and Yang, 1985)로 보고된 바 있다. 또한, 이들 자료를 이용한 측정의 고도와 중력이상으로 살펴본 지각평형에 관해서는 국립지리원 (1977)에서 발행된 중력자료 분석을 수행한 Lee (1979a)에 의하면 지각평형이 이루어졌다고 보고된 바 있으며, Kwon 과 Yang (1985)에 의해서는 지각평형이 다소 덜 이루어진 것으로 보고된 바 있다.

지 질

연구지역은 중력측정을 위해 설정한 포항~공주~만리포를 잇는 국도변으로서, 남한에 분포하는 대부분의 지질이 포함된다. 따라서, 본 연구에서는 Geology of Korea (1987)에 첨부된 1:2,000,000의 지질도를 이용하여 지질도를 작성하였으며 (Fig. 2), 중력측정자료 해석에 도움이 되는 지질만을 간략하게 기술하면 아래와 같다.

연구지역의 북서부에는 원생대와 시생대의 서산층군, 경기 편마암 복합체 및 영남누층군이 북동~남서

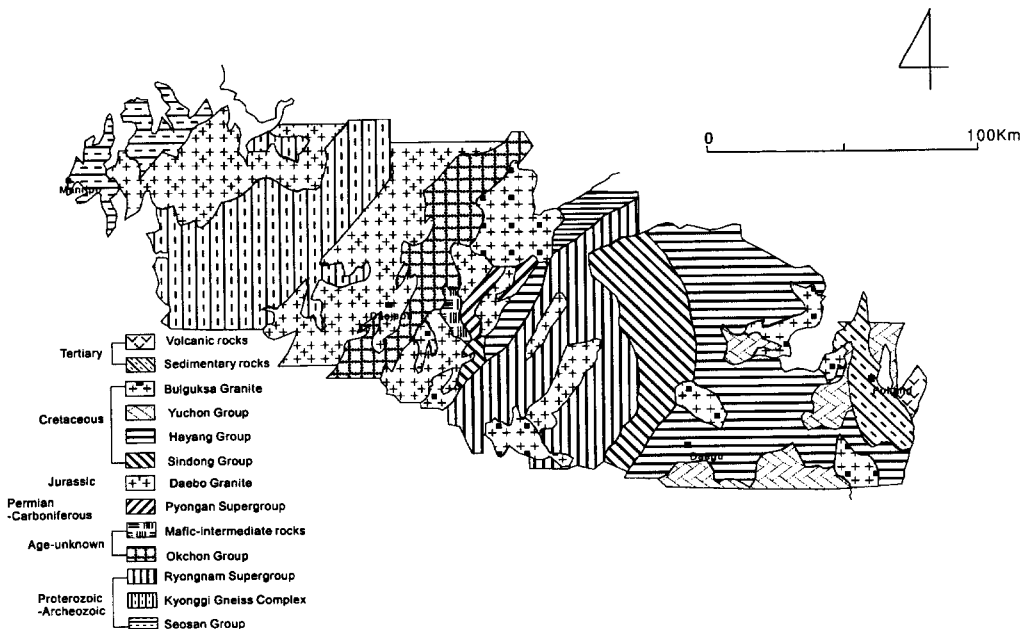


Fig. 2. Geologic map of the study area (Geology of Korea, 1987).

방향으로 폭넓게 분포하고 있다.

본 역의 중앙부에는 옥천누층군이 북동~남서 방향으로 길게 대상으로 분포하고 있으며, 쥬라기의 대보 화강암이 이들을 관입하여 넓게 분포하고 있다.

본 역의 남동부인 포항과 대구사이에는 호서성 퇴적암과 화산쇄설성 및 화산암류들로 이루어진 백악기의 경상누층군과 제3기의 퇴적암이 분포하고 있다.

서산층군

본 역의 북서부에 나타나는 가장 오래된 변성 퇴적암류로 알려져 있으며, 주로 흑운모 편암, 철을 함유한 규암, 규암질 편암 및 편마암으로 구성되어 있다.

경기 편마암 복합체

본 역에 분포하는 편마암 복합체는 흑운모 편마암과 화강암질 편마암이며 규암, 결정질 석회암들이 협재되어 있다.

영남누층군

본 역에 분포하는 영남누층군을 이루는 변성 퇴적암류는 경기편마암 복합체와 마찬가지로 편마암류와 편암류들로서, 대체로 고도의 변성을 받고 화강암화 작용을 받아 이루어진 변성 복합체로 구성되어 있다.

옥천누층군

변성 퇴적암류인 옥천누층군은 본 역의 중앙부에 북동~남서 방향으로 길게 대상으로 분포하고 있으며, 흑운모 편마암, 편암, 돌로마이트, 석회암, 규암, 슬레이트와 함께 천매암등으로 구성되어 있다.

평안누층군

본 역의 중앙부에서 소규모로 나타나는 평안누층군은 석회암, 사암과 셰일로 이루어져 있다.

대보화강암

경기 편마암 복합체와 옥천누층군을 관입하여 넓게 나타나는 쥬라기의 화강암류는 각섬석 화강섬록암과 흑운모 화강암이며, 본 연구에서는 이들 모두를 대보화강암이라 칭하였다.

경상누층군

본 역의 남동부에 분포하는 경상누층군은 신동층군, 하양층군, 유천층군, 불국사 화강암류로 이루어져 있다.

신동층군은 주로 사암, 셰일, 역암으로 구성되며, 간혹 석탄층이 협재하여 나타난다. 주향과 경사는 N42°~52°E, 5°~17°SE 이다. 하양층군은 주로 화강암, 화강편마암, 현무암, 규암, 안산암, 역암 등으로 구성되어 있다. 주향과 경사는 N42°~50°E, 8°~14°SE 이다. 유천층군은 하양층군을 부정합으로 덮고 있으며, 주로 화산암류와 퇴적암류로 구성되어 있다. 불국사 화강암류는 주로 화강섬록암과 화강암류이며 부분에 따라서는 섬록암질암이다. 경상분지내 전역에 걸쳐 분포한다.

제3기 암류

본 역의 최동단 포항지역일대에 분포하며, 퇴적암류와 화산암류로 이루어져 있다. 퇴적암류는 주로 사암, 셰일, 역암, 응회질 사암, 응회질 역암 및 다양한 성분의 응회암들이며, 화산암류는 주로 응회암과 이와 관련된 화산암류로 구성되어 있다.

중력탐사

본 연구에서는 포항~공주~만리포간의 국도를 따라 총 400 km의 측선을 설정하고 (Fig. 1), 1~1.5 km 간격으로 총 331개의 측정에서 Lacoste & Romberg Land Gravimeter Medel G 중력계를 이용하여 중력을 측정하였다.

측정된 상대 중력치는 경북대학교와 대전 표준연구소내에 설치된 중력기점의 표준중력치를 이용하여 절대중력치로 환산되었으며, 중력의 일 변화 및 계기 변화를 보정해주기 위하여 중력기점을 왕복 측정하였다.

또한, 측정점의 고도차에 따른 영향을 보정하기 위하여 본 연구의 측선을 따라 설치된 1등 또는 2등 수준점을 이용한 폐합방법에 의해 측정점의 고도를 수준측량으로 측정하였으며, 측정오차는 ±3 cm 이다. 중력 측정과 고도측량 자료로부터 필요한 중력보정을 실시하여 부계 중력이상치를 구하였으며, 본 연구에서 부계 보정시 사용된 부계판의 평균밀도는 2.67 g/cm³ (Kwon and Yang, 1985)이고, 표준중력식은 GRS 67 이다.

자료해석 및 결과

자료해석은 2차원 중력 비선형 역해법을 이용하였으며, 이 방법의 적용을 위한 변수 결정에서는 FFT를 이용한 부계 중력이상 상향연속법, Fourier 급수를 이

용한 평균심도 계산법등이 이용되었다. 이로부터 본 역에서의 콘라드면과 모호면의 심도의 변화양상과 평균심도를 구하고 지각구조 단면도를 작성하였으며, 측정점의 고도와 중력이상 사이의 선형 회귀방정식을 계산하여 지각평형 정도를 평가하였다.

FFT를 이용한 상향연속에 의한 부계 중력이상 곡선의 고찰 및 결과

측정 부계 중력이상치는 자료처리를 위하여 측정간격이 1 km가 되도록 내삽에 의해 재 설정되었다. 측정 부계 중력이상치 (Fig. 3)중 천부의 지질 및 지질구조

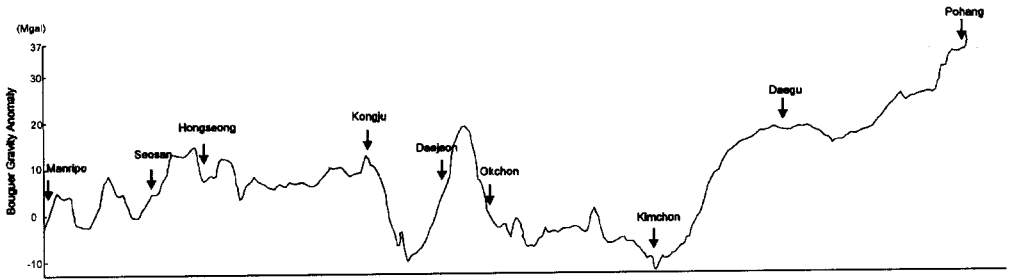


Fig. 3. Observed Bouguer gravity anomaly.

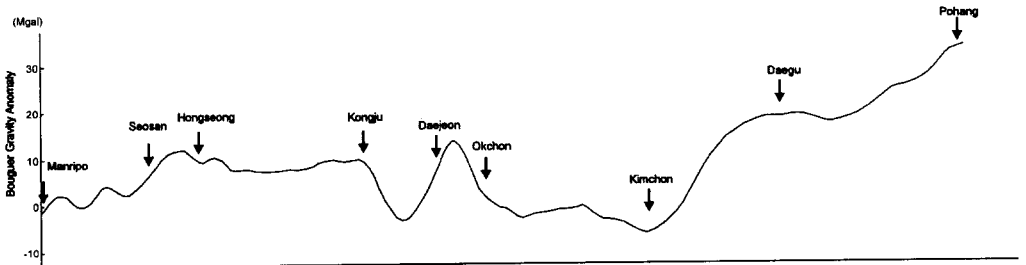


Fig. 4. Upward Continued Bouguer gravity anomaly (Z=3 km).

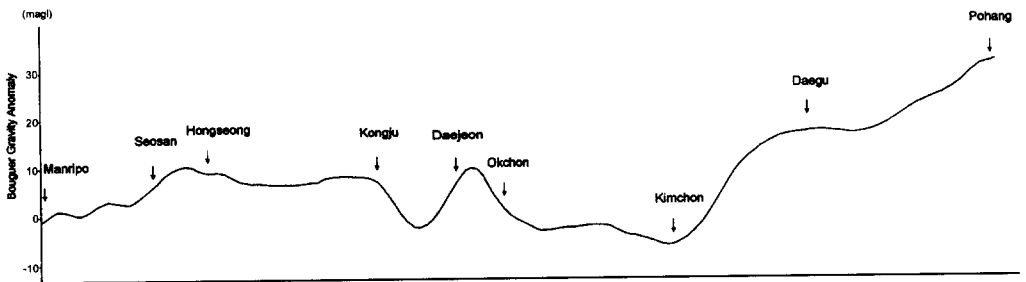


Fig. 5. Upward Continued Bouguer gravity anomaly (Z=5 km).

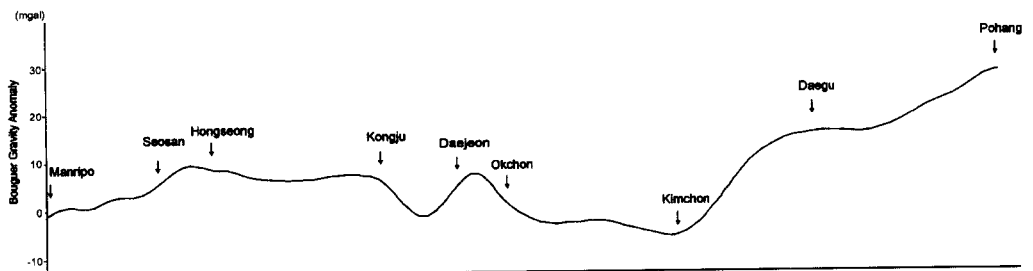


Fig. 6. Upward Continued Bouguer gravity anomaly (Z=7 km).

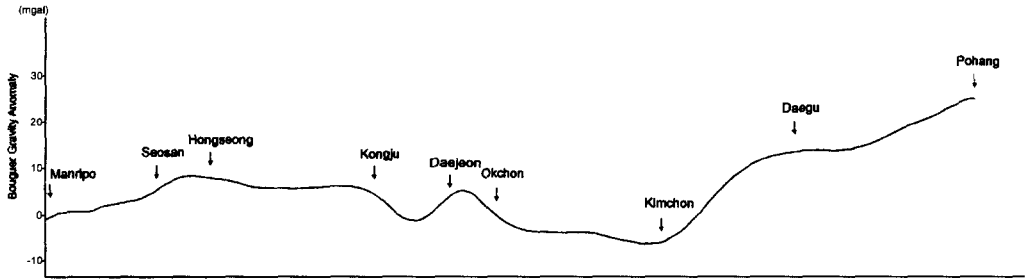


Fig. 7. Upward Contined Bouguer gravity anomaly (Z=-9 km).

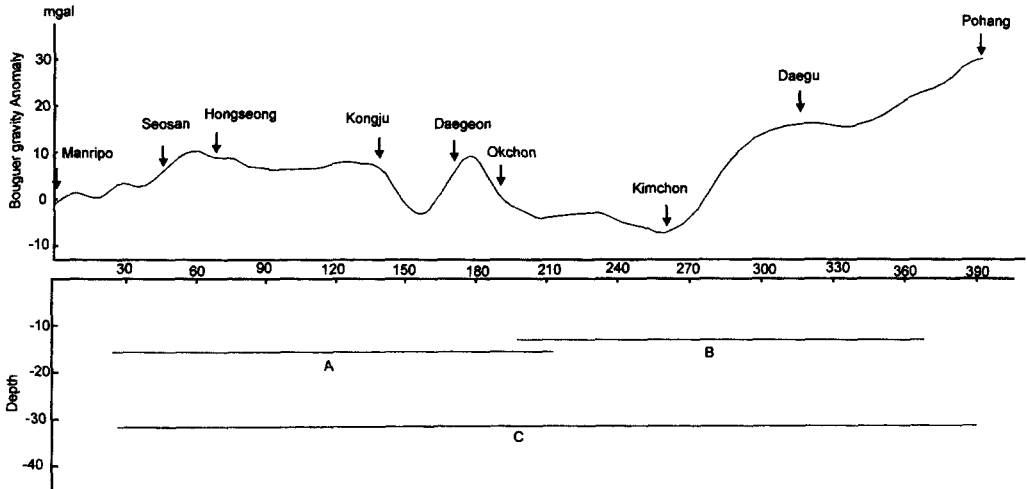


Fig. 8. Profile of Bouguer gravity anomaly and mean depth calculated by Fourier-series method along the intervals of A, B, and C.

에 기인된 고주파 성분 (high frequency component) 을 제거하기 위하여 상향연속을 측정간격의 3배, 5배, 7배, 9배로 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 4~Fig. 7과 같다.

측정간격의 3배를 상향연속 시킨 부계 중력이상 곡선에서는 고주파 성분이 대부분 제거되었으나 홍성, 서산, 만리포와 옥천과 김천 구간에서는 아직도 고주파 성분이 완전히 제거되지 않은 양상을 보인다.

측정간격의 5배를 상향연속 시킨 부계 중력이상 곡선에서는 고주파 성분이 완전히 제거됨을 알 수 있으며, 측정간격의 7배, 9배를 상향연속 시킨 부계 중력이상 곡선에서는 원래의 측정 부계 중력이상 곡선에서 심부구조의 변화양상을 나타내는 광역구조의 방향성이 변화됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서는 측정간격의 5배를 상향연속 시킨 부계 중력이상치를 이용하여 심부구조를 해석하였다.

Fourier급수방법에 의한 해석 및 결과

반복적 중력 비선형 역해법을 적용하기 위한 변수 결정에서 zero level은 Fig. 8에서와 같이 부계 중력이상 곡선중 Fourier급수 전개가 가능할 것으로 판단되는 측정구간 A, B, C에서 Logarithmic power spectrum을 구하고, 이에 의해 평균심도를 구하였다.

Fig. 9는 각 측정구간에 대한 Logarithmic power spectrum을 나타낸 그림으로서, r은 직선의 상관계수, b는 직선의 기울기이고, D는 구간의 평균심도이다.

측정구간 A와 B로부터 구한 콘라드면의 평균심도는 각각 16.6 km와 13.3 km이고, 측정구간 C로부터 구한 모호면의 평균심도는 32.4 km이며, 또한, 이들의 상관계수는 각각 -0.838, -0.991, -0.801이다.

반복적 중력 비선형 역해법에 의한 해석 및 결과

반복적 중력 비선형 역해법에 의한 상, 하 지층의 경계면의 심도를 구하기 위해서는 연구지역의 지질학

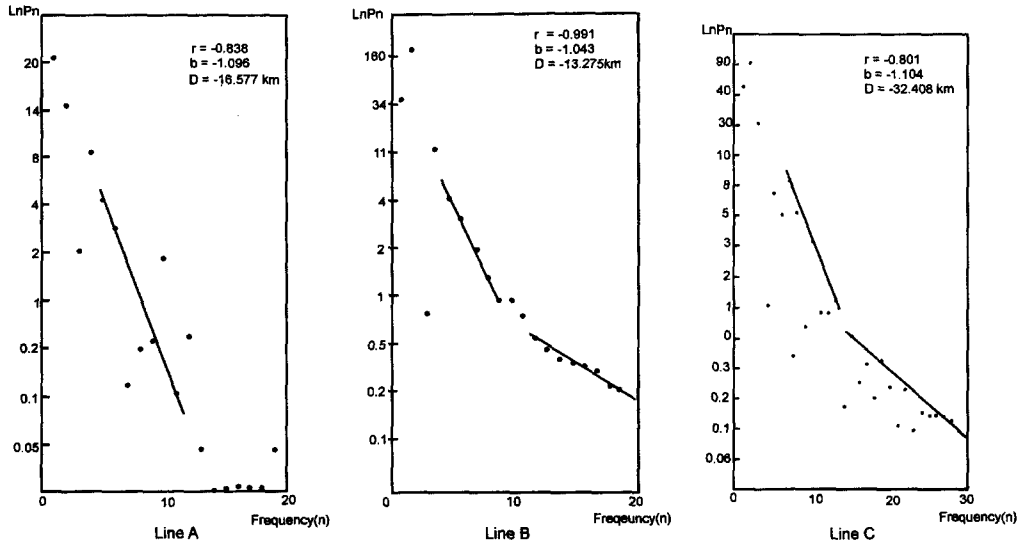


Fig. 9. Logarithmic power spectrum of line A, B and C.

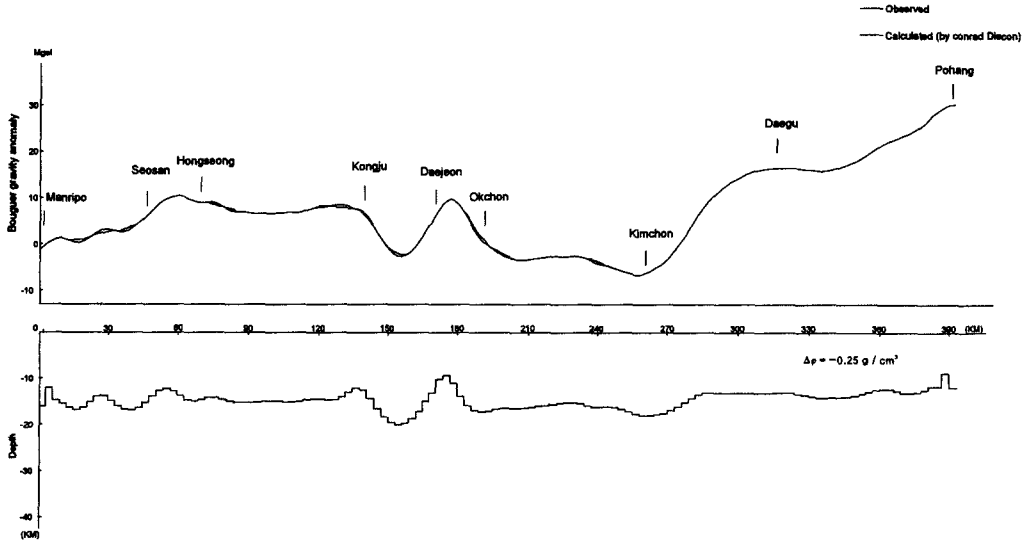


Fig. 10. Profile of upward ($z=5$ km) continued and calculated Bouguer gravity anomaly by nonlinear 2-D inversion method of gravity data (Conrad discontinuity).

적 정보와 축선의 길이, 반복에 따른 RMS오차의 감소 정도를 고려하여 상, 하 지층사이의 평균밀도차, 중력 측정치의 수, 각주의 수, 각주의 폭, 초기 깊이, 감쇠인 수 및 반복횟수 등을 결정하여야 한다.

본 연구에서는 상부지각과 하부지각 및 상부맨틀의 밀도를 각각 2.75 g/cm^3 , 3.0 g/cm^3 및 3.3 g/cm^3 (Woollard, 1963; Suh, 1989)으로 가정하고, 콘라드면의 심도를 계산하기 위해서 그 상부와 하부층의 밀도

차를 -0.25 g/cm^3 로, 모호면의 심도를 계산하기 위해서는 -0.43 g/cm^3 (Kwon and Yang, 1985)로 하였다.

각주의 폭은 좁게 할 수록 하부층의 세밀한 변화까지 계산할 수 있지만 측정중력치에는 많은 소음 및 측정시의 측정오차로 인하여 계산된 모형변수가 불규칙하게 진동하는 단점이 있다. 본 연구에서는 중력측정치의 갯수는 393개, 각주의 폭은 3 km, 각주의 수는 131로 하였으며, 축선의 양끝에 있는 각주는 각각 100

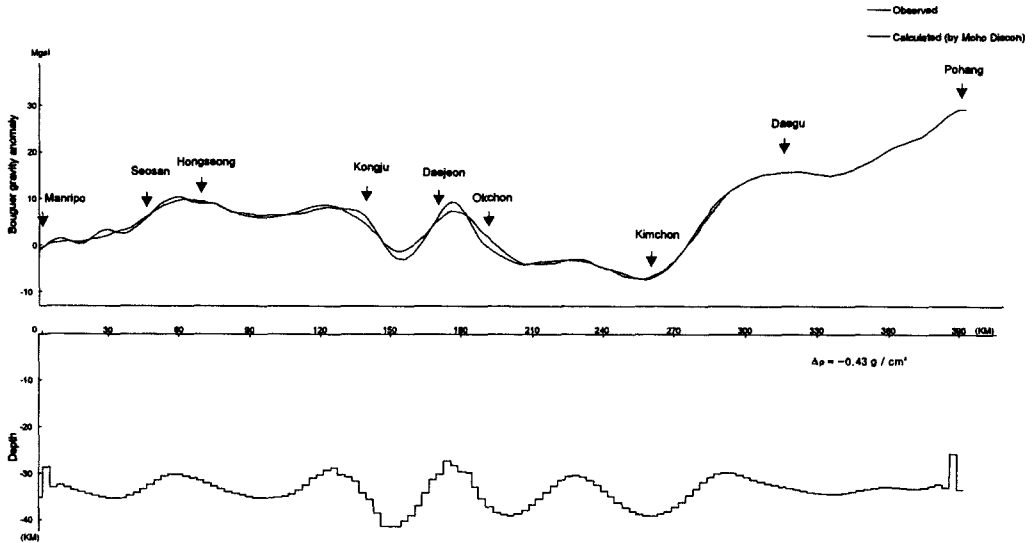


Fig. 11. Profile of upward ($z=5$ km) continued and calculated Bouguer gravity anomaly by nonlinear 2-D inversion method of gravity data (Moho discontinuity).

km를 연장하여 중력치의 연속성을 유지하였다.

콘라드면과 모호면의 심도 계산시 각각 초기 깊이는 3 km로 하였으며, 감쇠인수 $\mu=0.1$ 로 하고, RMS오차가 감소함에 따라 μ 에 0.5를 곱하였으며, 반복 횟수는 RMS 오차가 현저한 감소를 나타내는 횟수까지 하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 콘라드면과 모호면의 구조 단면도로서, 본 역에서 콘라드면의 평균심도는 약 15 km이며, 포항과 대구 사이에서는 13 km 이고, 김천과 옥천 사이에서는 다소 깊은 16.5 km이며, 옥천과 대전 사이에서는 9.7 km로서 가장 얇고, 만리포쪽으로 가면서 심도가 점점 증가하여 16.3 km가 된다.

모호면의 평균심도는 약 33 km이며, 포항과 대구 사이에서는 32 km이고, 김천과 옥천에서는 다소 깊은 35 km이며, 옥천과 대전 사이에서는 모호면이 급상승하여 심도는 약 28.7 km가 된다. 또한, 대전과 공주 사이에서는 심도 40.5 km로 가장 깊어지며, 공주와 만리포간에서는 34.5 km가 된다.

지각평형

지각평형이란 지각이 밀도가 높은 맨틀 위를 정역학적 평형을 이루며 떠있다는 이론으로서, 지구상의 대부분의 지각은 지각평형을 이루고 있다고 알려져 있다.

지각평형 정도의 판단은 측정점의 고도 (h)와 중력이상과의 관계를 통해 확인할 수 있다 (Garland, 1979; Lee, 1979a). 즉, Free-air 이상 (Δg_{FA})과 부계이상 (Δg_B)을 구하는 식은

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} + 0.3086h - g_{theo} \quad (1)$$

$$\Delta g_B = g_{obs} + 0.3086h - 2\pi G\rho h - g_{theo} = \Delta g_{FA} - 2\pi G\rho h \quad (2)$$

이며, 여기서 g_{obs} 는 관측된 중력이상치, g_{theo} 는 기준면에서의 이론중력치, G 는 만유인력상수, ρ 는 지각의 밀도이다. 만약, 넓은 지역에 걸쳐 지각평형이 유지되어 있다면, 기준면 (Geoid)위의 지형은 기준면 아래의 질량결손에 의해 보상된다. 그러므로 부계이상은 고도와 관련한 함수로 Free-air 이상은 무관하게 나타내게 되며, 부계보정치 h의 계수는 지각의 밀도 ρ 를 2.67 g/cm^3 로 두면 -0.1119 mgal/m 의 값을 갖게 된다.

본 역에서 지각평형 정도를 판단하기 위해 Fig. 12와 Fig. 13에서의 같이 측정점의 고도와 Free-air 이상

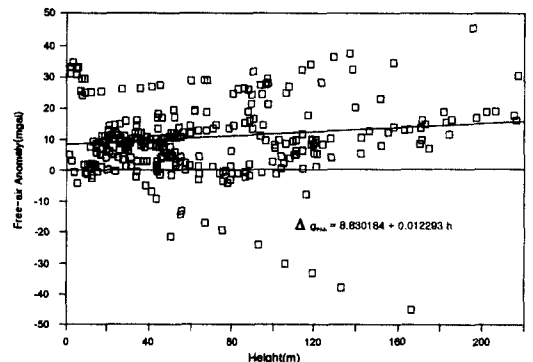


Fig. 12. Free-air anomaly versus height (elevation).

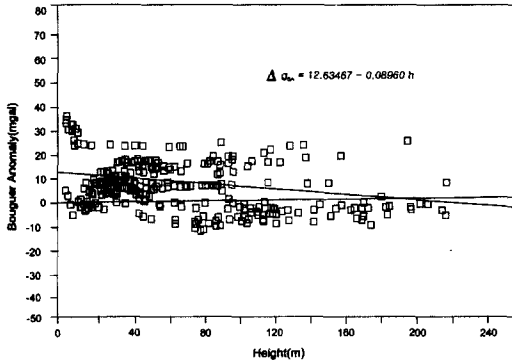


Fig. 13. Bouguer anomaly versus height (elevation).

및 부계 중력이상과의 관계를 도식한 후, 이로부터 선형 회귀방정식을 구하였으며, 이들은 다음과 같다.

$$\Delta g_F = 8.830184 + 0.012293h \quad (3)$$

$$\Delta g_B = 12.63467 - 0.08960h \quad (4)$$

식 (3)에서 Free-air 이상은 고도의 증가에 따라 증가하며, 부계보정치 h의 계수는 0.1119 보다 작은 값을 나타내므로 본 역에서는 지각이 다소 덜 보상되어 있다고 볼 수 있다.

그러나, 소규모의 산악지형은 지각 자체의 강도에 의해서도 지지 될 수 있으므로, 상기 결과만 가지고 본 역에서의 지각 보상여부를 단정하기는 어려울 것으로 사료된다.

결 론

한반도를 동에서 서로 가로지르는 포항~공주~만리포간의 국도 약 400 km를 축선으로 설정하고 1~1.5 km 간격으로 총 331개의 측정점에서 중력측정기 Lacoste & Romberg Land Gravimeter Model G를 이용하여 중력을 측정 한 후, 2차원 중력 비선형 역해법을 이용하여 심부구조를 해석한 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구지역에서의 콘라드면의 평균심도는 약 15 km이며, 축선의 남동쪽에 해당하는 포항과 대구 사이에서는 13 km이고, 김천과 옥천 사이에서는 다소 깊은 16.5 km이며, 옥천과 대전 사이에서는 9.7 km 로서 가장 얇고, 본 축선의 북서쪽인 만리포쪽으로 가면서 심도가 점점 증가하여 16.3 km가 된다.

2. 모호면의 평균심도는 약 33 km이며, 포항과 대구 사이에서는 32 km이고, 김천과 옥천에서는 다소 깊은

35 km이며, 옥천과 대전 사이에서는 모호면이 급상승하여 심도는 약 28.7 km가 된다. 또한, 대전과 공주 사이에서는 심도 40.5 km로 가장 깊어지며, 공주와 만리포간에서는 34.5 km가 된다.

3. 지각평형 정도를 지시해 주는 측점의 고도와 중력 이상 사이의 관계를 선형 회귀방정식을 이용하여 구해 본 결과, 본 지역의 지각은 다소 보상이 덜 되어 있는 것으로 나타났다. 그러나, 소규모의 산악지형은 지각 자체의 강도에 의해서도 지지될 수 있으므로, 본 지역의 지각 보상여부를 단정하기는 어려울 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 1997년도 연세대학교 교내 학술연구비와 한국과학재단의 97특정기초연구비 (과제번호 97-07-03-02-01-3)의 일부에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

국립지리원 (1977) Free-air anomalies in Korea, Bouguer anomalies in Korea
 김상조, 김소구 (1983) 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질, 제16권, 제1호, p. 51-61.
 이호영 (1985) 반복적 비선형 역해에 의한 중력 및 자력 탐사 자료의 해석과 그 응용, 서울대학교 공학석사 학위 논문.
 신창수 (1980) 일반적 선형역해법을 이용한 자력기반심도 계산법, 한양대학교 자원공학과 석사학위논문.
 Garland, G.D. (1979) Introduction to geophysics-mantle, core and crust, WB. Saunders Co. p. 134-212.
 Geology of Korea (1987) ed. Lee, D.S. Geol. Soc. Kor., 514p.
 Jupp, D.L.B. and Vozoff, K. (1975) Stable iterative methods for the inversion of geophysical data. Geophysics, J. R. Astr. Soc., v. 42, p. 957-976.
 Kwon, B.D. and Yang, S.Y. (1985) A study on the crustal structure of the southern Korean peninsula through gravity analysis, J. Korea. Inst. Min. Geol. v. 18, n. 4, p. 309-320.
 Lee, K. (1979a) On isostasy of the Korean peninsula, J. Geol. Soc. Korea, v. 15, n. 2, p. 134-140.
 ----- (1979b) On crustal structure of the Korean Peninsula, J. Geol. Soc. Korea, v. 15, n. 4, p. 253-257.
 Lines, L.R. and Treitel, S. (1984) Tutorial, review of least-squares in inversion and its application to geophysical problems, Geophysical Prospecting, v. 32, p. 159-186.
 Pedersen, L.B. (1977) Interpretation of potential field data a generalized inverse approach, Geophysical Prospecting, v. 25, p. 199-230.
 Suh, M.C. (1989) An integrated geophysical study of the northern gulf of Mexico: Deep seismic reflection profiling, seismic stratigraphy, gravity modeling, and crustal structure, p. 16-176.

Talwani, M., Worzel, J.L., & Landisman, M. (1969) Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zones, J. Geophys. Res, v. 64, p. 49-59.
USAMSFE (U.S. Army Map Service Far East) (1963)

Note on the South Korea land gravity survey.
Woollard, G.P and Rose, J.C. (1963) International gravity measurement. Sp. Pub. SEG, Tulsa, Oklahoma, 518p.

2000년 3월 16일 원고접수, 2000년 4월 14일 게재승인.