다양한 지구물리 자료를 통해 얻은 한반도의 지각두께 예측과 지열류량과의 비교

최순영¹ · 김형래^{2*} · 김창환¹ · 박찬홍³ · 서만철²

¹한국해양연구원 동해분원 독도전문연구센터, ²공주대학교 지질환경과학과, ³한국해양연구원 동해분원

Estimate on the Crustal Thickness from Using Multi-geophysical Data Sets and Its Comparison to Heat Flow Distribution of Korean Peninsula

Soon Young Choi¹, Hyung Rae Kim^{2*}, Chang Hwan Kim¹, Chan Hong Park³ and Man Chul Suh²

¹Dept. of Geoenvironment Sciences, Kongju National University

²Dokdo Research center, East Sea Branch, Korea Ocean Research and Development Institute, Uljin, Korea

³East Sea Branch, Korea Ocean Research and Development Institute, Uljin, Korea

We study the deep structure of Korean Peninsula by estimating Moho depth and crustal thickness from using land and oceanic topography and free-air gravity anomaly data. Based on Airy-Heiskanen isostatic hypothesis, the correlated components between the terrain gravity effects and free-air gravity anomalies by wavenumber correlation analysis(WCA) are extracted to estimate the gravity effects that will be resulted from isostatic compensation for the area. With the resulting compensated gravity estimates, Moho depth that is a subsurface between the crust and mantle is estimated by the inversion in an iterative method with the constraints of 20 seismic depth estimates by the receiver function analysis, to minimize the uncertainty of non-uniqueness. Consequently, the average of the resulting crustal thickness estimate of Korean Peninsula is 32.15 km and the standard deviation is 3.12 km. Moho depth of South Korea estimated from this study is compared with the ones from the previous studies, showing they are approximately consistent. And the aspects of Moho undulation from the respective study are in common deep along Taebaek Mountains and Sobaek Mountains and low depth in Gyeongsang Basin relatively. Also, it is discussed that the terrain decorrelated free-air gravity anomalies inferring from the intracrustal characteristics of the crust are compared to the heat flow distributions of South Korea. The low-frequency components of terrain decorrelated Free-air gravity anomalies are highly correlated with the heat flow data, especially in the area of Gyeongsang basin where high heat flow causes to decrease the density of the rocks in the lower crust resulting in lowering the Moho depth by compensation. This result confirms that the high heat sources in this area coming from the upper mantle by Kim *et al.* (2008).

Key words : crustal thickness, gravity, topography, seismic depth, heat flow distribution

본 연구는 지형자료와 Free-air 중력이상을 이용하여 한반도의 모호면 심도 및 지각두께를 계산하였다. Airy-Heiskanen 지각평형 가설에 근거한 Free-air 중력이상에 포함된 지형중력과 연관성 있는 성분들을 파동수상관분석으로 추출하고 이로부터 보상이 이루어진 상태의 중력효과를 계산하였다. 계산된 결과로부터 반복법을 통한 역산을 이용하여 지각과 맨틀의 경계면인 모호면 심도를 도출하였고 역산 시 기준에 연구된 지진파에 의한 20개의 모호면 심도를 활용하여 포텐셜 필드에서 나타날 수 있는 비유일성의 가능성을 최소화하였다. 최종적으로 모호면 심도와 고도 자료를 더하여 한반도 지각두께를 도출하였으며 한반도 평균지각두께는 32.15 km, 표준편차 3.12 km를 나타내었다. 이 연구에서 구한 남한지역의 모호면과 같은 지역의 타 논문결과들과 비교하였을 때 평균 모호면 심도는 각각 31.08 km, 31.96 km, 33.02 km를 나타내고 표준편차는 1.94 km, 1.62 km, 1.77 km를 나타냄으로 각 연구결과의 통계치는 거의 일치하는 것으로 나타났고 모호면 굴곡 역시 공통적으로 태백산맥과 소백산맥을 따라 모호면이 깊어지고 경상 분지는 얕아짐을 확인하였다. 또한 지각 내 중력 이상체의 분포에 대한 정보를 포함하고 있는 지형과 비상관된 Free-air 중력이상을 가지고 지열류량분포와 비교하였다. 저주파성분의 지형과 비상관된 Free-air 중력이상과 지열류량분포

*Corresponding author: kimhr@kongju.ac.kr

를 상관 비교한 결과 높은 양의 상관관계를 나타냈고, 특히, 경상분지지역은 높은 지열류량분포가 암석의 밀도보상으로 인해 모호면의 상승을 가져다 준 것으로 보인다. 이러한 결과는 최근 Kim *et al.*(2008)에서 언급한 경상분지의 높은 지열류량이 맨틀로부터 야기되는 모델과 부합된다는 사실을 뒷받침해주고 있다.

주요어 : 지각두께, 중력, 지형, 지진파 심도, 지열류량분포

1. 서 론

심부 지각구조에 대한 연구는 여러 지구물리학 연구 방법 중 크게 중력자료를 이용한 연구와 지진파자료를 이용한 것으로 구분할 수 있다. 최근에는 자기지전류(magnetotelluric)를 이용한 탐사로도 지하 수 백 m에서 수 백 km까지의 구조를 알 수 있어(Lee *et al.*, 2007) 지각 심부 연구에 적합하다고 할 수 있다. 이 중 우리나라에서 중력이상을 이용한 한반도의 국지적인 심부 지각구조 연구는 1970년대부터 꾸준히 이루어지고 있다. 여러 심부 지각구조 연구방법 중 지각구조 연구 시 많이 쓰이는 방법인 무게이상으로부터 파워스펙트럼 분석을 이용한 연구는 Kwon and Yang(1985), Choi(1986), Kim(1995) 등에 의해 연구되었고 Airy-Heiskanen 가설에 입각하여 지형에 의한 중력이상과 Free-air 중력이상의 성분을 파동수상관분석을 통한 연구는 You *et al.*(2002), Kim *et al.*(2003)에 의해 연구되었으며 탄성판 모델에 입각하여 중력이상으로부터 FFT를 이용한 3차원 중력 순산 및 역산 모델링을 통해 휨강성 필터를 적용한 연구는 Shin *et al.*(2006)에 의해 연구되었다. 위에 언급된 여러 학자들에 의해 심부 지각구조 연구로부터 한반도 지각의 평균두께는 다소 차이는 있지만 대체적으로 31~35 km의 범위를 보인다.

지진파자료를 이용한 한반도 심부 지각구조 초기연구는 Lee(1979), Kim and Kim(1983), Kim and Jeong(1985), Kim(1995)에 의해 지진파 주시자료의 분석으로부터 연구가 시작되어 Park *et al.*(2003), Chang and Baag(2005, 2007), Cho *et al.*(2006)에 의해 더욱 심화 연구되었으며 Chang and Baag(2007)은 광대역 수신함수 분석으로부터 28~32 km의 모호면 깊이를 구하였다.

이렇게 각기 다른 자료로부터 구하여진 심부지각구조 연구에 있어 중력 자료를 이용한 해석의 경우 밀도차에 관한 연구지역의 정밀한 정보 결핍과 중력해석 자체의 약점인 비유일성으로 인해 단일한 해를 얻기 곤란하다. 또한 지진파자료를 이용한 해석의 경우 연구결과가 1차원적인 점원이나 그 점들을 연장한 선형

자료로 도출 할 수밖에 없기 때문에 연구지역에 대한 결과를 2차원적으로 표현하는데 한계가 있고 이에 따른 해석의 제한이 있을 수 있다. 이 연구에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 지진파자료를 이용한 결과를 가지고 중력 자료를 이용한 모델링에 적용하여 도출된 결과의 신뢰성과 해석의 정확성을 향상시키고자 한다.

본 연구에서는 지형자료와 수심자료로부터 산출한 지형중력효과(terrain gravity effects: TGE)와 구면조화함수 모델로부터 산출한 Free-air 중력이상을 파동수상관분석(wavenumber correlation analysis: WCA)하여 보상되어진 지형중력효과(compensated TGE: CTGE)를 구하고 반복법을 통해 한반도 모호면 심도를 도출하였다. 그리고 반복법을 통해 계산할 때 기존 지진파에 의해 수신함수로부터 구한 모호면 심도를 이용하여 모델을 제한시켜(constrained) 한반도 지각두께모델을 제작하였다. 한편 도출한 한반도 지각두께를 타 논문결과(Shin *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2003)와 비교하고 남한의 모호면 심도 및 지형과 비상관된 Free-air 중력이상과 지열류량분포와의 연관성에 대해 고찰해보고자 하였다.

2. 자료획득 및 연구방법

2.1. 자료획득

본 연구에서는 한반도를 포함하는 지형자료와 중력자료를 위해 NGDC와 NOAA에서 개발한 ETOPO1 모델과 NGA에서 개발한 EGM2008을 획득하여 사용하였다. ETOPO1 모델은 현재 전 지구상의 표고자료 및 해저지형자료를 극좌표의 단위인 1분 간격의 해상도의 DEM(digital elevation model)이다. 한편 EGM2008은 기존에 쓰이던 EGM96보다 더 정밀하게 표현하여 구면조화차수를 2,160차수까지 해석 가능한 전지구중력장모델이다. 연구범위는 북위 32°~44°, 동경 121°~133°의 한반도를 포함하는 지역으로서 ETOPO1 모델과 EGM2008로부터 연구범위에 맞춰 고도 20 km에서의 광대역 육상지형 및 해저지형자료와 Free-air 중력이상값을 추출하였다(Fig. 1, Fig. 2). Fig. 1과 Fig. 2을 비교하였을 시 전체적으로 지형자료와 중력자료의 유사성이 확인되었다.

Fig. 1. Topography and bathymetry of extended study area from ETOPO1 (Amante & Eakins, 2008).

Fig. 2. Free-air gravity at the surface from Earth Gravity Model 2008 (Pavlis *et al.*, 2008).

2.2. 연구방법

중력자료는 측정할 때 영향을 미치는 여러 변수들이 있지만 크게는 관측지점에서의 위도, 고도, 질량분포 이 3가지 성분을 보정함으로써 지하 구조를 파악할 수 있는 중력이상값을 얻을 수 있다. 일반적으로 중력자료 보정 시 지형을 고려하지 않은 밀도가 균일한 무한수평판을 가정한 부계보정, 그리고 지형을 고려하여 따로 보정하는 지형보정 이 두 가지를 시행함으로써 인해 실제 지형을 고려하여 보정을 두 번 해야 하는 번거로움과 보정 시 여러 계산에 따른 오차가 있었다. 이 연구에서는 부계보정 및 지형보정에서 오는 여러 계산에 따른 오차발생확률을 최소화하고 정밀한 중력측정을 위해 수치고도모델(DEM)을 10 km 간격으로 재격자화(Regidding)한 후, 각 격자에 따른 단위면적에 대한

Fig. 3. Total Terrain Gravity Effects at 20 km altitude. The unit is mGal.

수치고도값을 사각기둥 형태(prism)로 가정하고 계산하였다. 계산되는 측점의 점위치와 사각기둥의 크기에서 오는 오차는 체적을 적분할 때 사용되는 적분점(node)의 수를 증가(최대 32점)시켜 최소화하였다. 이때 해수면을 기점으로 수치고도의 높이에 따라 육상자료와 해양자료를 나누어 육상자료는 $2,670 \text{ kg/m}^3$ 의 지각 밀도 값을, 해양자료는 $1,027 \text{ kg/m}^3$ 의 해양 밀도 값을 적용하였다. 이렇게 수치화된 prism형태의 지형 및 해저지형정보를 Gauss-Legendre 적분법을 이용하여 각각 육상과 해상에 해당하는 지형에 의한 중력효과를 산출하고, 최종적으로 두 자료를 합하여 연구지역의 지형에 의한 중력효과를 나타내었다(Fig. 3).

한편 통상적으로 Free-air 중력 이상은 지형의 고도를 반영하여 그 차이를 보정한 값으로써 연구에 널리 사용되고 있다. 만약, Airy-Heiskanen 가설에 의해 어떤 지역이 지각평형으로 완전히 보상되어 있는 지역이라면 이러한 Free-air 중력 이상은 지형과 지각의 밑뿌리(root)와의 보상효과로 인해 거의 변화가 없이 나타날 것이며(약간의 경계효과를 제외한) 결국 Free-air 중력 이상의 변화는 광역적으로 지각평형과 연관되어 있을 것이라 생각할 수 있다. 따라서, Free-air 중력 이상값에서 이러한 지각평형이상 효과를 제외한 성분을 이용하여 지각과 맨틀의 경계면의 변화를 유추할 수 있다. 즉 기준면으로부터 어느 정도 깊이까지 밀도가 균일한 지각 판의 상태일 때 기준면을 기점으로 그 위에 존재하는 지형에 의한 중력효과(terrain gravity effect:

TGE)와 그 지각 밑에 존재하는 일종의 뿌리에 의한 중력효과(root gravity effect: RGE)의 합이 Free-air 이상값으로 표출되며 평형상태를 이루지 못한 경우 이에 대한 특징이 Free-air 이상값에 포함되어 있다고 할 수 있다. Airy-Heiskanen 가설에 의해 지각 평형이 이루어 질 경우 지질학적 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$FAGA = TGE + RGE \quad (1)$$

Airy-Heiskanen 가설에 따라 지각평형적으로 보상되어진 지각 또는 보상이 덜 이루어진 지각들의 경우에만 중력이상값과 이와 함께 고도차에 따른 중력효과를 이상적으로 모델화한 결과(Hernandez, 2006) 공통적으로 대륙과 해양과의 경계에서 중력이상값의 경계효과(Edge effect)가 나타남을 제외하고는 지각평형이 완전히 이루어졌다는 가정 하에서 Free-air 중력이상(free-air gravity anomaly: FAGA)과 지각평형이상(isostatic anomaly)이 거의 동일하게 나타났다. 즉, TGE와 FAGA의 자료에서 상관계수값은 거의 0에 가까우며 그렇지 않을 경우 지각평형에 대한 보상의 정도가 남아있거나(undercompensated) 과하게 보상이 되어졌다고(overcompensated) 예상할 수 있다. 특히, 경계효과는 고도가 20 km에서 완전 보상된 지각 평형의 모델인 경우 FAGA와 TGE에서의 상관계수가 0에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있어서 이번 연구에서도 이 두 중력효과를 계산할 때 고도를 20 km로 설정하였다.

위에 언급한 TGE와 FAGA의 상관관계를 분석하기 위해 본 연구에서는 푸리에 고속 변환(Fast Fourier Transform: FFT)를 이용한 파동수상관분석(wavenumber correlation analysis: WCA, von Frese *et al.*, 1997)을 실시하였다. WCA는 다른 두 개의 자료를 파동수영역에서 서로 상관시켜 분석하는 방법이다. 상호 관련된 특징을 추출하기 위해 각각의 신호를 파동수 합수로 변환시키면 다음과 같이

$$\begin{aligned} \bar{X}(k) &= \bar{X}(k) \exp(-j\theta_{\bar{X}(k)}) \\ \bar{Y}(k) &= \bar{Y}(k) \exp(-j\theta_{\bar{Y}(k)}) \end{aligned} \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 성분 $\bar{X}$ 와 $\bar{Y}$ 는 각각 TGE와 FAGA의 FFT 변환값을 나타낸다. $|\bar{X}(k)|$, $|\bar{Y}(k)|$ 는 두 성분의 진폭을, $|\theta_{\bar{X}(k)}|$ 와 $|\theta_{\bar{Y}(k)}|$ 는 위상각을 나타낸다. 이로부터 $\Delta\theta_k = (\theta_{\bar{Y}(k)} - \theta_{\bar{X}(k)})$ 는 위상차이고, 이때 $j = \sqrt{-1}$ 이다. 여기서 두 벡터 사이의 상관계수(correlation coefficient, CC)는 다음과 같이 표현된다

(von Frese *et al.*, 1997).

$$CC_k = \cos(\Delta\theta_k) = \frac{\bar{X}(k) \cdot \bar{Y}(k)}{|\bar{X}(k)| |\bar{Y}(k)|} \quad (3)$$

즉, 두 성분의 파동수영역에서의 $\cos(\Delta\theta_k)$ 가 각 파동수에서의 CC값이 된다. 이를 이용해 TGE와 FAGA과의 서로 상관된 특징의 자료들인 지형과 상관된 Free-air 중력이상(terrain correlated free-air gravity anomaly, TCFAGA)을 추출하였다. 이 때 단순히 두 자료를 양 또는 음으로 상관되는 모든 범위를 추출하지 않고 두 자료의 각각 파워스펙트럼으로부터 상관계수 범위를 정하여 필터링한 후 TCFAGA를 추출하였다(Fig. 4). 그 이유는 어떤 두 자료의 상관계수를 이용하여 필터링 할 때 단순히 상관계수가 높은 신호들만 선택할 경우, CC값이 큰 이유는 진폭이 작은 신호만을 취하여 필터링한 후 진폭이 거의 없는 오차신호들만이 결과로 나올 수 있기 때문이다. 단순히 상관계수가 높은 신호들만 상관분석 했을 때에는 원하지 않는 오차와 같은 성분들까지 같이 상관되어 결과 값으로 도출되기 때문에 이번 연구에서는 이를 방지하기 위해 파워스펙트럼의 곡선에서 임의적으로 Critical Point로 상관계수의 범위를 선정하였다.

이렇게 추출한 TCFAGA는 지형에 의해 지각평형이 이루어지지 않은 정보를 나타낸다. 본 연구에서는 TGE에서 지각평형적으로 보상이 이루어지지 않은 성분을 제거하여 보상을 가정한 상태의 지형에 의한 중

Fig. 4. Terrain correlated Free-air Gravity Anomaly Map of from Korean peninsula. The unit is mGal.

Fig. 5. Compensated Terrain Gravity Effects of Korean peninsula. The unit is mGal.

력효과(compensated TGE: CTGE)을 구하고 이를 통해 밀뿌리(root)의 지각과 맨틀의 경계인 모호면까지의 심도를 계산하기 위한 모델링을 실시하였다. CTGE는 Fig. 5와 같이 나타나며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$CTGE = TGE - TCFAGA \quad (4)$$

본 연구에서는 입력값인 CTGE를 음화시킨 후 지형과 뿌리를 제외한 평균지각 두께 30 km를 지정하여 처음 연산한 중력값과 측정값의 오차를 줄이는 반복법 역산을 이용해 모호면 심도를 도출하였다. 이 때 하부지각의 밀도는 $2,700 \text{ kg/m}^3$, 맨틀은 $3,200 \text{ kg/m}^3$, 맨틀과 하부지각의 밀도차를 500 kg/m^3 으로 가정하였다. 한편 반복법을 이용하여 모호면 심도를 계산하는데 있어서 중력자료 뿐 아니라 지진파에 의해 기존에 계산되어진 남한의 지각두께를 20개의 점원(point source)으로 이용하였다. 이에 따라 역산 시 지진파에 의해 계산된 모호면 심도로부터 중력 자료에 의해 계산되는 모호면 심도를 오차범위 내로 제한하여 중력 자료만으로 계산되어 나타날 수 있는 비유일성을 최소화하였다. 반복법을 통해 구하여진 모호면 깊이에 지형자료(DEM)를 더하여 최종적으로 한반도 지각두께를 산출하였다.

연구로부터 산출한 결과를 분석하기 위해 Shin *et al.*(2006)과 Kim *et al.*(2003)에서 구한 각각의 남한지역의 평균 모호면 심도와 이 연구에서의 동일한 지역의 모호면 심도를 비교하여 이번 연구에 사용한 모델이 잘 적용되었는지 확인하였다. 그리고 FAGA으로

부터 연구에 사용된 모델 제작 과정 중 산출한 TCFAGA를 제거하여 지형과 비상관된 Free-air 중력 이상(terrain decorrelated free-air gravity anomaly: TDFAGA)을 통해 모호면 심도, 지열류량분포와 비교함으로써 남한에서의 중력과 지구물리자료와의 연관성을 고찰하였다.

3. 결과 및 토의

반복법을 이용하여 역산으로 구한 한반도의 평균 지각두께는 32.15 km, 표준편차는 3.12 km를 나타냄으로 기존의 한반도 심부지각 연구의 결과와 유사함을 확인하였다. 또한 측정값과 반복법을 시행한 계산값의 상관계수는 0.99, 오차의 표준편차는 5.41 mgal을 나타내어 모델링의 오차가 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이렇게 구한 한반도 모호면 심도 및 지각두께를 Shin *et al.*(2006) 및 Kim *et al.*(2003)의 연구결과와 비교하였다. Shin *et al.*(2006)가 도출한 연구지역의 모호면 심도는 탄성판 가설에 입각하여 지각평형이상으로부터 FFT를 이용한 3차원 중력 정산 및 역산 프로그램에 의해 도출되었으며 최종적인 평균 모호면 심도는 31.96 km, 표준편차는 1.62 km를 나타내었다. Kim *et al.*(2003)가 도출한 연구지역의 모호면 심도는 두 가지 방법으로 모호면의 기복을 계산하여 전지는 지각균형을 전제로 지형으로부터 중력이상값과의 스펙트럼 대비를 이용한 것이고, 다른 하나는 완전부계 중력이상으로부터 푸리에변환을 이용하여 구하여 두 모호면의 차이를 계산한 후, 최소자승법(least-squares method)으로부터 두 모호면의 보정하여 한반도의 모호면을 추출한 방법이다. 이를 남한지역만 따로 분리하였을 때 Kim *et al.*(2003)가 도출한 남한의 평균 모호면 심도는 33.02 km, 표준편차는 1.77 km를 나타내었다. Shin *et al.*(2006), Kim *et al.*(2003)의 연구결과와 비교하기 위해 본 연구에서 남한지역을 한정하여 모호면을 추출한 결과 평균 모호면 심도 31.08 km, 표준편차 1.94 km를 나타냈으며, Shin *et al.*(2006)과 Kim *et al.*(2003) 제안한 모호면 심도와와의 상관계수는 각각 약 0.43, 약 0.48이다. 더불어 각 자료에서 가시적인 모호면의 유사성을 확인하기 위하여 Fig. 7을 도시한 결과, 각각 모호면 굴곡이 전체적으로 비슷한 양상을 보여주며 특히 태백산맥과 소백산맥을 따라 모호면이 깊게 분포하며 경상분지의 경우 낮은 모호면 심도를 나타내었다. 한편 각각의 모호면 심도와 지진파로 구한 모호면 심도 중 한반도 내륙지역에서 공

Fig. 6. (a) Crustal Thickness Map of Korean peninsula from this study. The unit is km. Red star point mark is seismic data location(20point). (b) Error residuals from the Moho model. The unit is mGal.

Fig. 7. (a) Moho depth from this study of South Korea. The unit is km. (b) Moho depth map from Shin *et al.*(2006) study. The unit is km. (c) Moho depth map from Kim *et al.*(2003) study. The unit is km. Common black star point mark is seismic data location(14point).

Table 1. Statistical comparison of Moho depth among this study, Shin *et al.*(2006) and Kim *et al.*(2003).

	Moho Average (km)	Moho STD (km)	Error STD w/ seismic depth (km)	C.C.		
				Fig. 7.A.	Fig. 7.B	Fig. 7.C
This study	31.08	1.94	1.10	1	0.48	0.43
Shin <i>et al.</i> (Fig. 7. B)	31.96	1.62	1.95		1	0.36
Kim <i>et al.</i> (Fig. 7. C)	33.02	1.77	2.09			1

통적으로 적용되는 14개 점원에서의 모호면 심도를 함께 비교하기 위해 Table 1과 Fig. 8로 나타내었다. 그 결과, Table 1에서 이번 연구결과는 -1.93~2.21 km, Shin *et al.*(2006) 연구결과는 약 -2.10~4.24 km, Kim

et al.(2003)의 연구결과는 -0.57~5.75 km의 차이를 보이며, 이에 따른 오차의 표준편차는 각각 1.10 km, 1.95 km, 2.09 km을 나타내었다. Fig. 8에서도 이번 연구에서 시행한 모델 제작 시 지진파에 의한 모호면

Fig. 8. Seismic depth and standard deviation of data points in each box plot and comparison of this study, Shin *et al.*(2006) and Kim *et al.*(2003).

Table 2. Comparison of Moho depth information between seismic depth(Chang and Baag, 2007), this study, Shin *et al.*(2006) and Kim *et al.*(2003).

longitude	latitude	seismic depth	seismic depth std	this study	this study difference	Shin <i>et al.</i> (2006)	Shin <i>et al.</i> (2006) difference	Kim <i>et al.</i> (2003)	Kim <i>et al.</i> (2003) difference
127.81	37.78	30.80	±3.70	32.23	1.43	33.79	2.99	36.18	5.38
127.97	36.87	32.30	±2.10	31.90	-0.40	32.33	0.03	35.90	3.60
128.90	35.77	30.70	±3.00	30.64	-0.06	30.54	-0.16	30.59	-0.11
128.67	37.69	31.20	±4.80	30.35	-0.85	34.65	3.45	31.87	0.67
128.61	35.87	32.50	±2.50	31.10	-1.40	30.40	-2.10	32.16	-0.34
128.10	35.15	31.00	±4.10	30.80	-0.20	30.02	-0.98	30.43	-0.57
129.40	35.73	25.90	±4.20	25.90	0.00	30.00	4.10	29.79	3.89
127.36	36.61	31.40	±2.40	30.17	-1.23	31.75	0.35	33.68	2.28
126.64	36.55	30.00	±3.10	28.42	-1.58	30.54	0.54	33.09	3.09
126.99	35.16	32.30	±2.60	31.84	-0.46	32.34	0.04	32.60	0.30
126.45	36.80	29.90	±2.00	30.23	0.33	30.80	0.90	33.65	3.75
126.96	37.45	28.30	±3.10	30.51	2.21	31.06	2.76	34.05	5.75
127.36	36.38	30.40	±1.10	29.77	-0.63	32.12	1.72	33.59	3.19
129.41	36.70	26.40	±2.30	26.55	0.15	30.64	4.24	29.48	3.08

심도를 제한시켰기 때문에 역산을 통해 얻어진 값들은 지진파를 통해 얻어진 모호 깊이의 오차범위에 위치하는 것을 볼 수 있다.

지형과 비상관된 Free-air 중력이상(TDFAGA)을 통해 모호면 심도 및 지열류량분포를 비교함으로써 남한에서의 중력과 지구물리자료와의 연관성을 고찰하였다. TDFAGA는 FAGA에서 TCFAGA를 제외함으로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$TDFAGA = FAGA - TCFAGA \quad (5)$$

TDFAGA는 FAGA에서 지형과 상관된 지각성분을 제거함으로 지형과는 또 다른 주로 단파장의 지각내부의 이상체 분포 및 중력과 연관된 지각물성분포의 특

징을 나타낸다고 할 수 있다. 이에 따라 TDFAGA를 통해 여러 지각물성정보를 비교하여 이에 대한 연관성을 찾아 볼 수 있다. 본 연구에서는 TDFAGA에서 파장대 별로 구별하여 50 km파장을 기점으로 각각 고주파통과필터와 저주파통과필터를 사용하고 한반도지역의 지열류량과 같은 지각물성과 비교하였다.

지열류량분포는 Kim and Lee(2007)의 353개 지열류량자료를 사용하였다. 두 자료의 비교방법은 앞서 사용한 파동수상관필터(wavenumber correlation filter: WCF)를 적용하여 각각 자료의 양의 상관계수를 가지는 성분들을 추출하고 이를 식(6)과 같이 평균값(μ)과 표준편차값(σ)으로 정규화(nomarlized)한 후 서로 더하는 양(+)의 선호영역지수(SLFI; summed local favorability

Fig. 9. (a) Terrain decorrelated Free-air Gravity Anomaly Map of South Korea (low-pass filtered over 50 km wavelengths). (b) Heat flow distribution of South Korea. The unit is mW/m². The data were given by KIGAM. (c) SLFI between TDFAGA and heat flow data after WCF with all positive CC passed.

indies)방법을 이용하였다(von Frese *et al.*, 1997).

$$X_z = \frac{X_f - \mu_x}{\sigma_x}, \quad Y_z = \frac{Y_f - \mu_y}{\sigma_y} \quad (6)$$

여기서 X_f , Y_f 는 각각 자료의 양의 상관계수로 필터링하여 추출한 성분들이며, X_z , Y_z 는 정규화시킨 각각의 자료 성분이다.

이를 통해 두 자료에서 추출한 양의 상관계수의 파동수 특징들을 공간 위치에서 표현 가능케 할 수 있다. Fig. 9는 저주파통과필터한 TDFAGA, 지열류량분포, 그리고 그 두 자료의 SLFI를 각각 나타낸 그림이다. 높은 (+) SLFI값을 나타낸 지역은 두 자료의 서로 양의 성분들로 상관성이 높은 지역을 표시하며 (-) SLFI값을 나타낸 지역은 서로 음의 성분들이 높은 상관성을 보이는 지역을 표시한 것이다.

일반적으로 암석이 외부에서 열을 받으면 밀도가 감소하며 이런 경향이 모호면 근처 하부지각 또는 상부 맨틀에서 국지적으로 나타날 가능성이 있다. 상부 맨틀에서 오는 국지적인 온도 증가는 상부맨틀물질의 밀도를 감소시키며 이는 하부지각과 상부맨틀과의 밀도차가 감소시키는 효과로 나타난다. 이는 지각평형에서 야기된 중력이상이 아닌 국지적인 지각물성에 따른 중력이상이 할 수 있으며 이러한 특징들이 어느 정도 지각 심부에서 볼 수 있는 장파장(>50 km)대의 TDFAGA에서 관찰할 수 있다는 것은 이를 통한 심부지역의 지각물성의 정보를 파악하는 도구로 사용할 수 있는 가능성을 보여준다.

지역적으로는 경상분지와 오대산 주변이 높은 (+)의 SLFI값을 나타내며 경상분지인 경우 또한 모호면 역시 낮은 심도를 보여 지열류량을 통한 모호면 상승효과를

나타낸다고 할 수 있다. 이는 Kim and Song(2003), Shin *et al.*(2006)의 논문에서 언급한 심부지각의 열과 낮은 모호면의 관계와도 유사한 결과를 지닌다. 오대산 주변의 편마암대는 주변의 열전도도가 낮은 화강암 지대에 둘러싸여 있는 구조로(Park *et al.*, 2007) 상대적으로 높은 지열류량을 보이며 이에 대한 밀도 역시 주변의 화강암보다 높게 나타나고 있다.

이 밖에도 단파장대의 TDFAGA의 성분에서 중력변화를 일으키는 지열류량분포와 달리 지각 내부에 원인을 갖는 중력이상체와의 연관성을 연구하여 지표면상의 암석 분포와의 비교 연구로 TDFAGA에 대한 추가 연구도 필요할 것이라 사료된다.

최종적으로 본 연구결과는 높은 지열류량과 낮은 모호면 심도의 연관성, TDFAGA와 지열류량분포와의 높은 (+)의 SLFI값을 통해 지열류량에 의한 심부지각 변화 연구의 대략적인 지표가 될 수 있을 것이라 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한반도를 포함하는 북위 32°~44°, 동경 121°~133° 지역의 지형 및 수심자료와 중력모델로부터 얻은 Free-air 중력자료를 이용해 파동수상관분석으로부터 보상되어진 지형에 의한 중력효과(CTGE)를 추출하여 반복법을 통한 역산 모델링을 시행하여 한반도의 모호면 심도를 계산하였다. 역산 시 기준에 지진파로부터 얻어진 20개의 한반도 지역의 모호면 심도를 모델에 제한시켜 중력모델에서 나타날 수 있는 비유일성을 고려하였다. 모델링으로 계산한 모호면심도에 고도자료를 더하여 산출된 한반도 평균지각두께는 32.15 km, 표준편차는 3.12 km로 밝혀졌다. 이번 연구결과와

기존 결과 (Shin *et al.*, 2006 and Kim *et al.*, 2003) 와 비교한 결과, 각각 남한의 평균 모호면 심도는 31.08 km, 31.96 km, 33.02 km를 나타내었고 표준편차는 1.94 km, 1.62 km, 1.77 km를 나타냄으로 이전 연구 결과의 통계값들과 전체적으로 유사한 것으로 나타났다. 하지만, 지진파로부터 구한 지역에서의 모호면 심도를 두 연구결과와 비교하였을 때 이번 연구에서 얻은 모델과의 오차가 가장 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 각 연구의 모호면 굴곡을 비교하였을 때 태백산맥과 소백산맥은 모호면 심도가 깊고 상대적으로 경상분지는 낮은 것으로 확인되었다.

또한 모델링에서 산출한 지형과 비상관된 Free-air 중력이상(TDFAGA)으로부터 다른 지구물리학적 자료와 비교하여 고찰하였다. 저주파통과필터링한 TDFAGA와 지열류량분포의 SLFI 결과 높은 (+)의 SLFI값이 나타나는 지역은 높은 지열류량으로부터 밀도보상에 의해 국지적인 지각평형을 위한 보상작용이 예상되며 지역적으로 경상분지와 오대산 주변이 이에 해당할 것으로 예측하였다. 남한의 모호면 심도와 지열류량분포를 비교하였을 때 전체적으로 높은 지열류량을 보이는 지역에서 낮은 모호면 심도를 나타내었다. 이러한 결과는 맨틀에서의 높은 지열류가 지각압석의 밀도를 상대적으로 낮추고 이를 보상하기 위한 모호면 상승으로 해석할 수 있다. 최근 Kim *et al.*(2008)는 한반도의 경상분지를 포함한 지열류량자료를 이용한 4가지 가설을 바탕으로 한 지열모델링에서 맨틀의 지열류량의 변화로 인한 가설이 자료와 가장 잘 부합된다는 것을 보였다. 이러한 결과는 이번 연구의 결과와 일치하는 것을 알 수 있으며 경상분지의 높은 모호면과 높은 지열류량의 관계를 정립시킬 수 있겠다.

아울러 TDFAGA의 성분에서 이러한 지각평형이상 성분 및 지열류량과는 다른 지각 내부에 원인을 갖는 중력이상과의 관계성을 파악하기 위해 지표면상의 기반암의 분포의 비교 연구도 추후 연구제목으로 적합할 것이라 사료된다.

사 사

본 연구에 쓰인 지열류량(heat flow) 자료를 제공해주신 한국지질자원연구원 지열연구실에 계신 이영민 박사님과 김형찬 박사님, 남한의 모호면 심도자료를 주시고 조언해주신 한국지질자원연구원에 계신 신영홍 박사님께 진심으로 감사드립니다. 이 연구는 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한

국학술진흥재단의 지원(KRF-20080430KJ) 과 한국해양연구원 “동해 해양환경 및 생태계 변동감시체제구축(PE98564)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 더불어 두분의 심사위원의 노력으로 논문의 질적 향상을 가져다 주신 것에 대해 감사드립니다.

참고문헌

- Amante, C. and Eakins, B.W. (2008) ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA, U.S. Department of Commerce, Boulder, CO., August.
- Chang, S.J. and Baag, C.E. (2005) Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Teleseismic Receiver Functions and Surface-Wave Dispersion. Bulletin of the Seismological Society of America, v.95(4), p.1516-1534.
- Chang, S.J. and Baag, C.E. (2007) Moho Depth and Crustal Vp/Vs Variation in Southern Korea from Teleseismic Receiver Function: Implication for Tectonic Affinity between the Korean Peninsula and China. Bulletin of the Seismological Society of America, v.97(5), p.1621-1631.
- Cho, H.M., Baag, C.E., Lee, J.M., Moon, W.M., Jung, H., Kim, K.Y. and Asudeh, I. (2006) Crustal velocity structure across the southern Korean Peninsula from seismic refraction survey. Geophy. Res. Lett., 33, L06307.
- Choi, K.S. (1986) A Study on the gravity in the southern part of the Korean peninsula. Ph. D. Thesis, Univ. Seoul State, p.110.
- Choi, K.S. and Shin, Y.H. (1996) Isostasy in and around the Korean Peninsula by analysing gravity and topography data. Jour. Geol. Soc. Korea, v.32(4), p.407-420.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H. and Choi, D.K. (2000) Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula. Earth-Science Reviews., v.52, p.175-235.
- Heiskanen, W.A. and Vening Meinesz, F.A. (1958) The earth and its gravity field. McGraw-Hill Book Co, Inc.
- Hernandez, O. (2006) Tectonic analysis of northwestern South America from integrated satellite, airborne and surface potential field anomalies. Ph. D. Thesis, Univ. Ohio State, p.14-17.
- Huang, H., Yun, H.S., Lee, D.H. and Jeong, T.J. (2009) Accuracy Analysis of Ultra-high degree Earth Gravitational Model EGM2008 in South Korea. Korea Society of Civil Engineers, v.29(1D), p.161-166.
- International Centre for Global Earth Models, <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>
- Kim, H.C. and Song M.Y. (2003) Relation of lithology, geologic time and Moho depth to heat flow of South Korea. Jour. Korean Earth Science Society, Sept. 26, p.52-56.
- Kim, H.C. and Lee, Y.M. (2007) Heat flow in the Republic of Korea, Journal of Geophysical Research, 112, B05413.
- Kim, H.R., Hwang, J.S., Suh, M.C. and von Frese, R.R.B. (2008) Crustal thickness of Korean Peninsula and neighboring seas from the free-air gravity and topog-

- raphy. American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract #GP43B-0804.
- Kim, J.C., Lee, Y.M. and Koo, M.H. (2008) Heat flow and geothermal modeling for the Gyeongsang basin and the Ulleung basin in Korea. *Proc. Geol. Soc. Korea*, p.51.
- Kim, J.W., von Frese, R.R.B. and Kim, H.R. (2000) Crustal modeling from spectrally correlated free-air and terrain gravity data - A case study of Ohio. *Geophysics*, v.65(4), p.1057-1069.
- Kim, J.W., Cho, J.D., Kim, W.K., Min, K.D., Hwang, J.H., Lee, Y.S., Park, C.H., Kwon, J.H. and Hwang, J.S. (2003) Extraction of Moho Undulation of the Korean Peninsula from Gravity Anomalies. *Econ. Environ. Geol.*, v.36(3), p.213-223.
- Kim, S.J. and Kim, S.G. (1983) A study on the Crustal Structure of South Korea by using Seismic Waves. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v.16(1), p.51-61.
- Kim, S.K. and Jung, B.H. (1985) Crustal Structure of the Southern Part of Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v.18(2), p.151-157.
- Kim, S.K. (1995) A Study on the Crustal Structure of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.31(4), p.393-403.
- Kwon, B.D. and Yang, S.Y. (1985) A Study on the crustal structure of the southern Korean peninsula through gravity analysis. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v.18(4), p.309-320.
- Lee, C.K., Kwon, B.D., Lee, H.S., Cho, I.K., Oh, S.H., Song, Y.H. and Lee, T.J. (2007) Study on the Geoelectrical Structure of the Upper Crust Using the Magnetotelluric Data Along a Transect Across the Korean Peninsula. *Jour. Korean Earth Science Soc.* v.28(2), p.187-201.
- Lee, K. (1979) On crustal structure of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.15(4), p.253-258.
- Leftwich, T.E., von Frese, R.R.B., Potts, L.V., Kim, H.R., Roman, D.R., Taylor, P.T. and Barton, M. (2005) Crustal modeling of the North Atlantic from spectrally correlated free-air and terrain gravity. *Journal of Geodynamics*, v.40(1), p.23-50.
- National Geophysical Data Center, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
- National Geospatial-Intelligence Agency, <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>
- Park, J.C., Ham, I.K., Kim, W. and Choi, K.S. (2003) A study on crustal thickness of the southern Korean Peninsula using travel times of PmP phase. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.39(2), p.225-234.
- Park, J.M., Kim, H.C., Lee Y.M. and Song, M.Y. (2007) A Study on Thermal Properties of Rocks from Gyeonggi-do Gangwon-do, Chungchung-do, Korea., *Econ. Environ. Geol.*, v.40(6), p.761-769.
- Park, S.H. (2008) Geothermal Resource Assessment in Korea. M. S, Univ. Kongju, p.34-36.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. and Factor, J.K. (2008) An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18.
- Shin, Y.H., Park, J.U. and Park, P.H. (2006) Deformation of Moho in the Southern Part of the Korean Peninsula. *Jour. Korean Earth Science Society*, v.27(6), p.620-642.
- Shin, Y.H. (2006) Implications of gravity anomalies in the tectonic provinces of the southern part of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.42(3), p.397-411.
- von Frese, R.R.B., Jones, M.B., Kim, J.W. and Kim, J.H., (1997) Analysis of anomaly correlations. *Geophysic*, v.62(1), p.342-351.
- You, S.Y., Min, K.D., Park, C.H. and Won, J.S., (2002) Crustal Structure of the Continent-Ocean Zone around the Middle Eastern Part of Korean Peninsula Using Gravity data. *Econ. Environ. Geol.*, v.35(5), p.455-463.

2011년 8월 23일 원고접수, 2011년 12월 20일 게재승인

Appendix. Collection for abbreviations written on paper.

축약어	영문표기	한글표기
TGE	Terrain Gravity Effect	지형에 의한 중력효과
RGE	Root Gravity Effect	뿌리에 의한 중력효과
FAGA	Free-Air Gravity Anomaly	Free-air 중력이상
WCA	Wavenumber Correlation Analysis	파동수상관분석
WCF	Wavenumber Correlation Filter	파동수상관필터
CC	Correlation Coefficient	상관분석
TCFAGA	terrain correlated Free-Air Gravity Anomaly (terrain correlated FAGA)	지형과 상관된 Free-air 중력이상
TDFAGA	Terrain Decorrelated Free-Air Gravity Anomaly (terrain decorrelated FAGA)	지형과 비상관된 Free-air 중력이상
CTGE	Compensated Terrain Gravity Effect (compensated TGE)	보상되어진 지형에 의한 중력효과
SLFI	Summed Local Favorability Indies	양(+)의 선호영역지수