

## 중력이상을 이용한 한반도 모호면 추출에 관한 연구

김정우<sup>1\*</sup> · 조진동<sup>2</sup> · 김원균<sup>3</sup> · 민경덕<sup>4</sup> · 황재하<sup>2</sup> · 이윤수<sup>2</sup> · 박찬홍<sup>5</sup> · 권재현<sup>1</sup> · 황종선<sup>4</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 지구정보공학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원, <sup>3</sup>쌍용정보통신 Mobile/GIS 기술팀

<sup>4</sup>연세대학교 지구시스템학과, <sup>5</sup>한국해양연구원 해양환경기후본부

## Extraction of Moho Undulation of the Korean Peninsula from Gravity Anomalies

Jeong Woo Kim<sup>1\*</sup>, Jin Dong Cho<sup>2</sup>, Won Kyun Kim<sup>3</sup>, Kyung Duck Min<sup>4</sup>, Jae Ha Hwang<sup>2</sup>,  
Youn Soo Lee<sup>2</sup>, Chan Hong Park<sup>5</sup>, Jay Hyoun Kwon<sup>1</sup> and Jong Sun Hwang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University, <sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

<sup>3</sup>Mobile/GIS Technology Support Team, Ssangyong Information & Communications Corp.

<sup>4</sup>Dept. of Earth System Science, Yonsei University

<sup>5</sup>Global Environment Lab., Korea Ocean Research & Development Institute

We estimated the Moho depth of Korean Peninsula from gravity anomalies and digital elevation model. The satellite radar altimetry-derived global free-air gravity model was used to ensure the homogeneity in both data and frequency domains of the original data. Two different methods were implemented to calculate the Moho depth; the wavenumber correlation analysis (Kim *et al.*, 2000a) and the power spectrum analysis. The former method calculates depth-to-the-Moho by correlating topographic gravity effect with free-air gravity anomaly in the wavenumber domain under the assumption that the study area is not isostatically compensated. The latter one, on the other hand, considers the different density layers (i.e., Conrad and Moho), using complete Bouguer gravity anomaly in the Frequency domain of the Fourier transform. The correlation coefficient of the two Moho model is 0.53, and methodology and numerical error are mainly responsible for any mismatch between the two models. In order to integrate the two independently-estimated models, we applied least-squares adjustment using the differenced depth. The resultant model has mean and standard deviation Moho depths of 32.0 km and 2.5 km with (min, max) depths of (20.3, 36.6) kms. Although this result does not include any topographic gravity effect, however, the validity of isostasy and the role of local stress field in the study area should be further studied.

**Key words** : Moho, Korean Peninsula, gravity anomalies, wavenumber correlation analysis, power spectrum analysis, Moho integration by least-squares method

중력이상 및 수치고도모델을 이용하여 한반도 모호면 심도를 추출하였다. 중력이상값은 인공위성고도레이더 관측값을 주로 이용한 전지구 모델을 이용하여 데이터영역 뿐 만 아니라 주파수영역에서도 자료의 균질성을 확보하였다. 모호면 추출은 파동수대비법 및 후리에급수를 이용한 파워스펙트럼분석법을 이용하였다. 전자는 지각균형을 전제로, 지형에 의한 중력효과와 후리에어 중력이상을 파동수영역에서 대비하여 모호면의 심도를 계산하는 방법이고, 후자는 완전부우계 중력이상으로부터 후리에변환을 이용하여 지하 밀도 변화층의 심도를 계산하는 방법이다. 이 두 모호면은 서로 0.53의 비교적 낮은 상관관계를 갖고 있으며, 이는 모호면 산출의 방법론적인 차이 및 계산상의 오차인 것으로 사료된다. 이렇게 두 가지 독립적인 방법으로 추출된 모호면을 하나로 통합하기 위한 한 방법으로, 두 모호면의 차이를 계산한 후, 이를 최소자승법을 이용, 두 모호면을 보정하였다. 추출된 한반도의 최종 모호면의 평균심도는 32.0 km, 표준편차는 2.5 km이며, 최소 및 최대 심도는 각각 20.3, 36.6 km로 나타났다. 이 경우 지형에 의한 중력효과는 파동수대비법에 의해 제거된 결과이나, 한반도의 지각이 완전한 지각판 내에 놓여 있어서 지각균형설의 가정이 얼마나 타당성이 있는가, 혹은 국부적인 응력장에 의해 한반도의 지각이 과연 얼마나 지지되고 있는가 하는 것에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

**주요어** : 한반도 모호면, 중력이상, 파동수대비법, 파워스펙트럼분석, 최소자승에 의한 모호면통합

\*Corresponding author: jwkim@sejong.ac.kr

## 1. 서 언

중력이상을 이용한 한반도의 심부 지각구조에 관한 연구는 1970년대 이후 지금까지 꾸준히 이루어지고 있으나, 한반도 전체의 모호면에 대한 정량적인 연구결과가 많이 발표되지는 않았다. 그 이유 중의 하나는 탄성과 굴절법에 의한 심부지각구조 연구가 거의 전무한 상태에서 모호면을 포함한 한반도의 지각구조 연구는 중력이상을 이용한 연구에 주로 의존해 왔고, 연구에 사용된 중력이상 자료의 분포 및 파장 성분에 따른 제한을 극복 할 수 없었기 때문이다. 중력이상을 이용한 한반도 모호면에 관해서는 심운택(1971), Kim(1979), Tsuboi(1983), Kwon and Yang(1985), 최광선(1986) 등의 연구가 대표적인 예이고, 근래 북한의 Pak(1996)에 의한 연구 결과가 발표된 바 있다. 그러나 이들 중 일부의 연구만이 남북한 및 동해 일부를 포함하였고, 따라서 한반도 및 그 주변해역을 모두 포함한 정량적인 연구결과는 미진한 실정이다.

전술했듯이 중력이상을 이용한 심부 지각구조 연구에 있어서 가장 중요한 점은 중력자료의 신빙성이다. 우선 지하 심부 구조를 다루는 만큼 연구지역 및 주변을 포함하는 광범위한 면적의 중력이상값을 이용하여야 하고, 특히 이들 중력이상값들이 서로 다른 탐사결과에 의한 조합일 경우 이들의 파장성분 및 공간 분포가 일정하여야 한다. 다시 말해, 자료 취득 시기, 조사의 목적 및 이에 따른 탐사방법이 서로 다른 결과를 모자이크식으로 합성할 때 흔히 나타나는 탐사 경계면의 에너지 차이나 파장의 차이라든지, 육해상 탐사 측선 방향 및 측선을 따른 자료처리에 의한 측선 잡음(track-line noise) 등이 최소화되어야 이로부터 올바른 심부 구조의 해석이 가능하다(Kim, 1996; Kim *et al.*, 1998).

본 연구에서는 이러한 문제를 고려하여 전지구 중력이상 및 수치고도모델(DEM, Digital Elevation Model)을 사용하여 한반도의 모호면의 기복을 추출하였다(Fig. 2 참조). 본 연구에 사용된 후리어어(free-air) 중력이상값은 Sandwell and Smith(1997)의 모델로부터 계산되었으며, 이는 Geosat, ERS1 등의 인공위성 레이더고도계(radar altimeter) 관측값 및 저고도 탐사자료를 사용하여 계산된 2분 간격의 전지구 모델이다. 수치고도모델은 Sandwell의 2분 간격자료를 이용하였다([http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_data.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi)).

본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 모호면의 기복을 계산하였다. 하나는 지각균형을 전제로 지형으

로부터의 중력이상값과의 스펙트럼 대비를 이용한 것이고, 다른 하나는 완전부우계(complete Bouguer) 중력이상으로부터 후리에 변환(Fourier transform)을 이용한 것이다. 전자는 지각균형(isostatical compensation)을 전제로 Kim *et al.*(2000a)에 의해 제안된 방법이며 후자는 지하 밀도변화층의 심도를 계산하는 일반적인 방법이다. 따라서, 본 연구에서는 두 가지 독립적인 방법으로 추출된 모호면으로부터 하나의 모호면을 산출하기 위한 하나의 방법으로, 우선 두 모호면의 차이를 계산한 후, 최소자승법(least-squares method)을 적용하여 두 모호면을 보정하여 한반도의 모호면을 추출하였다. 보정에 따른 에너지 손실로 인한 차이는 기존 연구의 통계값을 이용하여 조정하였다.

## 2. 기존 연구 결과

지금까지 모호면을 포함하는 한반도 지각의 심부구조에 관한 연구는 주로 중력이상을 이용하여 이루어졌고, 1970년대에 들어서야 본격적인 연구결과가 발표되었다. 이 가운데 본 연구와 관계가 깊은 네 개의 연구결과를 간략히 고찰하고자 한다.

심운택(1971)은 Woolard(per. coom.) 및 Kumagai(1953)의 자료를 이용하여 한반도 전체의 모호면의 심도를 연구하였다. 본 연구에서는 그 결과를 GIS 기술을 적용 수치화 하였으며 그 결과는 Fig. 1A와 같다. 우선 한반도에서 모호면까지의 평균 깊이는 32.8 km 이고, 최대 및 최소 심도는 각각 38.7과 28.5 km, 표준편차는 2.2 km이다. 전반적으로 이 결과는 한반도의 지표지형과 매우 잘 일치하는 결과를 보이는데, 이는 연구에 사용한 중력이상에서 지표지형에 의한 효과가 충분히 제거되지 못하였기 때문인 것으로 사료된다.

Kwon and Yang(1985)은 USAMSFE(1963) 자료를 이용하여 한반도 남부(남한)의 지각구조 및 지각균형에 대해 연구하였고, 그 결과는 Fig. 1B에 도시되어있다. 이에 따르면 남한에서 지각의 평균 심도는 32.3 km 이고, 최대 및 최소 심도는 각각 39.3와 26.7 km, 표준편차는 2.8 km이다. 전체적인 모호면의 양상은 심운택(1971)과 유사함을 보인다.

한편 최광선(1986)은 한반도 남부의 중력이상을 연구하였고 결과의 하나로서 모호면의 심도를 제시하였다. Fig. 1C는 그 결과로 지각의 평균 심도는 35.2 km, 최대 및 최소 심도는 각각 38.1과 32.6 km, 표준편차는 1.2 km이다. 이를 Kwon and Yang(1985)의 결과와 비교해 보면, 모호면의 평균심도가 약 3 km 정도

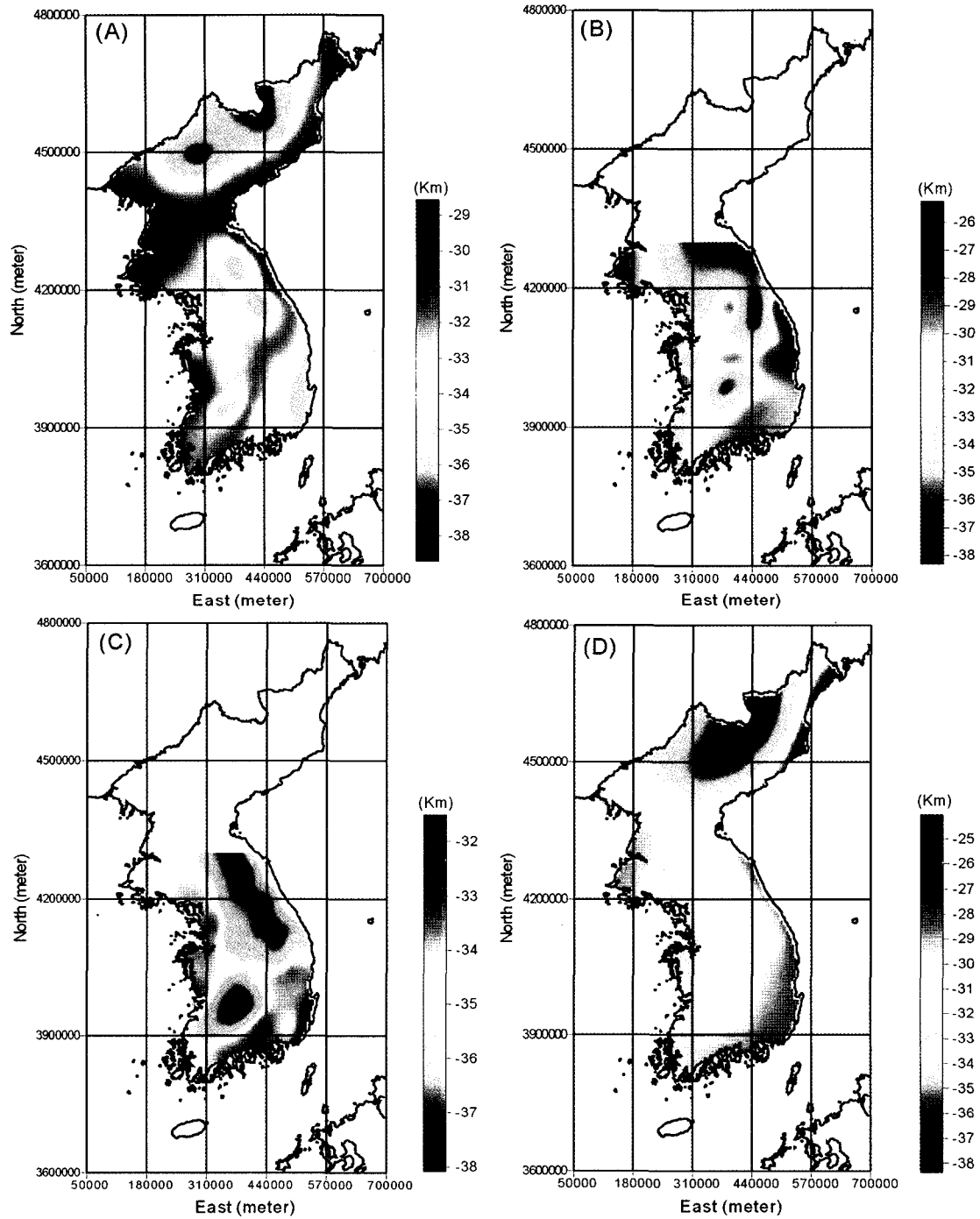


Fig. 1. Moho undulations of the Korean Peninsula estimated by (A) Sim(1971), (B) Kwon and Yang(1985), (C) Choi(1986), and (D) Pak *et al.*(1996).

깊게 나타난다.

북한의 Pak *et al.*(1996) 등은 중력이상을 분석하여 한반도 전역 및 동해 일부를 포함하는 지역에 대해 지

각의 두께를 계산하였고, 그 결과는 Fig. 1D에 도시되어 있다. 이에 따르면 한반도 지각의 평균 심도는 31.2 km이고, 최대 및 최소 심도는 각각 38.4와

26.2 km, 표준편차는 2.7 km이다. 주변해역을 제외한 육상의 결과를 심운택(1971)의 결과와 비교해보면 모호면의 평균심도가 약 1.7 km 정도 깊게 나타나고, 표준편차는 약 23% 높게 나타난다.

이밖에 한반도 남부 및 남해안 일부의 중력자료를 측지학적으로 분석한 Kim(1979)은 지각의 평균두께를 26 km로 해석하였고, 지각균형을 연구한 Lee(1979), 그리고 지각두께를 30 km로 발표한 Tsuboi(1983) 등의 연구가 있으나 본 연구에서는 자세한 고찰을 생략하였다.

결과적으로 기존 연구에 의하면, 중력이상에 의한 한반도 지각의 평균두께는 31~35 km 정도이고, 최대 38 km, 최소 26 km 정도를 보이고 있고, 한반도의 지형에 의한 특성이 지각에 잘 반영되고 있음을 알 수 있다. 다시 말해 기존 연구에서 모호면의 모델에 사용한 중력이상 값에 지표지형에 의한 중력 값이 포함되어 있을 가능성을 시사하고, 후리에변환의 파워스펙트럼법의 방법론적 문제점을 보여준다. 이들의 통계는 Table 1에 요약되어 있으며, 본 연구에서는 이들의 통계와 본 연구의 중간 결과를 참조로 하여 최종모델을 구하였다.

### 3. 자료처리

#### 3.1. 한반도 모호면 추출

일반적으로 중력이상을 이용한 모호면추출에 관한 연구는 후리에 변환의 파워스펙트럼을 이용한 방법을 이용한다. 그러나 Kim *et al.*(2000a)은 중력이상과 지형의 상관관계를 이용하여 모호면을 계산하는 연구 결과를 발표하였는데, 이는 지각균형적으로 완전한 평형을 이루지 못한 현재 상태의 지각을 Airy-Heiskanen 가설에 근거하여 평형을 이룬다는 가정을 바탕으로 파동수영역(wavenumber domain)에서 후리에어 중력이상과 지형을 분석하여 모호면을 추출한 연구결과이다. 따라서 이 방법은 지구조적으로 안정된 판의 내부에 속하는 지역에서 적용할 때 바람직하며, 한반도의 경

우 동해처럼 상대적으로 판의 경계에 가까운 지역을 제외하고는 적용이 가능하다.

우선 연구지역이 지각균형을 이루고 있다면 후리에어 중력이상과 지형으로부터 계산된 중력이상은 zero에 가까워야 하는데, 본 연구의 경우는 이들의 상관계수는 0.305이므로, 이는 본 연구지역이 지각균형적으로 완전히 평형을 이루지 않고 있다는 증거가 될 수 있다. 또한, Kwon and Yang(1985)은 USAMSFE(1963)을 이용하여 한반도에서의 지각균형을 연구하였는데, 그 결과 후리에어와 부우계이상을 중력 측정의 고도와 선형 회귀 분석한 결과, 보상이 다소 덜 이루어진 것으로 밝혀진 것도 하나의 증거이다(민경덕 등, 1987). 따라서, 지형으로부터 중력이상을 계산한 후, 이를 후리에어 중력이상과 스펙트럼대비를 실시하였다(Kim *et al.*, 2000a). Airy-Heiskanen 지각균형을 전제로, 이들로부터 모호면으로부터의 경계로부터 파생된 중력이상을 계산한 후 이로부터 역산법을 이용, 모호면의 기복을 추출하였다.

또한, 본 연구에서는 기존의 파워스펙트럼을 이용한 방법의 장점을 살리며, 동시에 파동수대비법의 문제점을 보완 할 수 있도록, 파워스펙트럼법을 이용한 모호면을 계산 한 후 이들을 통합하여 하나의 모호면을 추출하였다. 본 연구에서는 불연속면의 평균심도를 구하기 위하여, 보정된 중력 이상을 주파수 영역에서 스펙트럼 분석에 의해 절단주파수를 결정하고, 결정된 파수를 이용한 파워스펙트럼분석을 실시하였다. 한편, 모호면의 평균심도를 계산하기 위한 절단파수를 결정하기 위하여, 후리에 급수 전개를 통해 전개된 진폭스펙트럼의 크기 비교 및 각 공간주파수의 파워와 전체 파워의 비를 계산하였으며, 또한 최저 파수에서 시작하는 창을 만들어 창의 범위를 0.01씩 증가시키면서 최소자승법으로 각 창에서의 평균심도를 계산하고, 각 창에서 기울기와 파워간의 표준편차를 계산하는 두 가지 방법을 병행하여 실시한 후 절단파수를 결정하였다. 즉, 파워의 감소 폭이 크며, 감소되는 변화율이 큰 차이를 보이며, 각 창에서 계산된 기울기와 표준편차의 변화가 큰 공

**Table 1.** Statistical comparison between different Moho models(unit: km).

Model (year)	(Min, Max)	Mean	Standard deviation	Area
Sim (1971)	28.5, 38.7	32.8	2.2	남북한
Kwon & Yang (1985)	26.7, 39.3	32.3	2.8	남한
최광선 (1986)	32.6, 38.1	35.2	1.2	남한
Pak <i>et al.</i> (1996)	26.2, 38.4	31.2	2.7	남북한

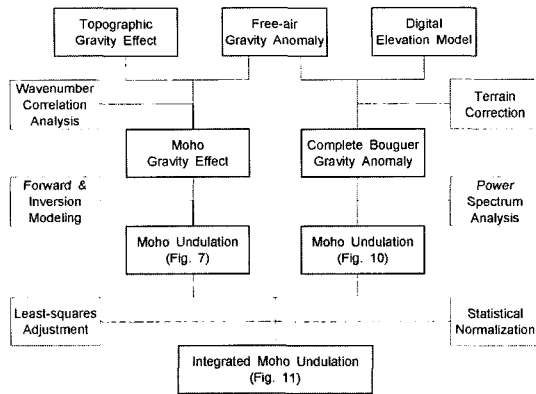


Fig. 2. Workstream of Moho extraction of the Korean Peninsula.

간주파수를 절단파수로 결정하여, 각 해당 파수에 대한 심도를 계산하였다. Fig. 2는 본 연구에서 모호면을 추출한 과정을 요약한 것이다.

### 3.2. 중력이상의 산출

본 연구에서는 주로 Sandwell and Smith(1997)의 2분 간격 중력이상모델을 이용하였다. 후리에어 중력이상은 지각의 평균밀도를  $2.74 \text{ g/cm}^3$ , 해수의 평균밀도를  $1.03 \text{ g/cm}^3$ 으로 가정하여 부우게 보정을 실시하여 부우게 중력이상을 추출하였다. Fig. 3과 4는 본 연구에서 사용한 한반도 및 주변해역의 후리에어 및 부우게 중력이상도이다. 후리에어 이상의 경우 육상의 공간해상도가 해상에 비해 떨어지는데, 이는 해상에서는 조밀하고 규칙적인 인공위성 레이더 고도측정에 의해 중력이상이 계산된 반면 육상은 인공위성 궤도 교란 등으로부터 유도된 최대 degree & order 360을 갖는 전지구 구면조화계수를 바탕으로 일부 저고도 탐사자료가 추가되었기 때문이다.

지형에 의한 중력효과를 효율적으로 제거하기 위해서 Sandwell의 2분 간격 DEM을 사용하여 지형보정을 실시하였다. 지형에 의한 중력효과는 41418개의 기준점에서 Ma and Watts(1994)의 알고리즘을 이용하여 계산하였고, 격자의 간격은 2 km로 하였다. Fig. 5는 지형에 의한 중력효과이고, 이로부터 지형보정이 이루어진 완전부우게 중력이상을 구하였다(Fig. 6). 이렇게 계산된 완전부우게 중력이상을 이용, 모호면의 심도를 계산하였다. Fig. 5와 6은 지형에 의한 중력값 보정을 위하여 UTM 좌표로 변환되었다.

따라서, 본 연구에서 스펙트럼대비법을 위해서는 Fig. 3의 후리에어 중력이상과 Fig. 5의 지형에 의한 중력이

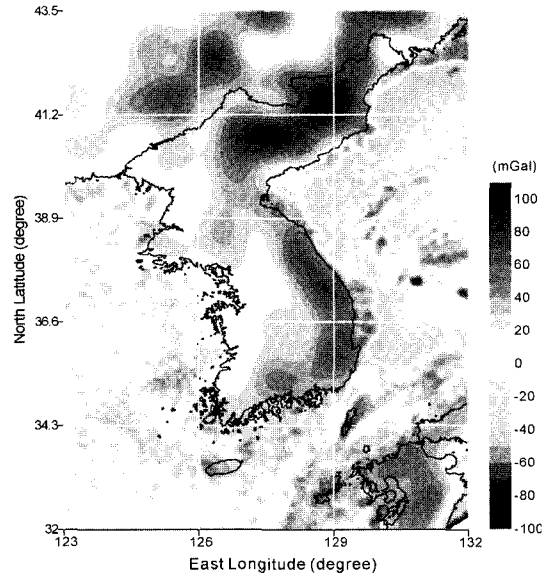


Fig. 3. Free-air gravity anomalies around the Korean Peninsula.

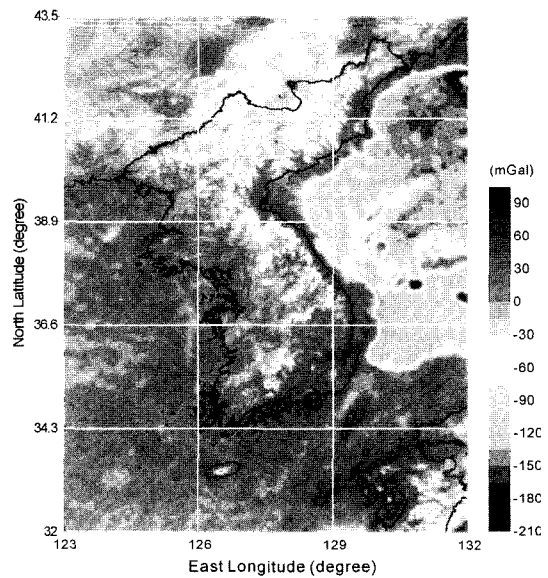
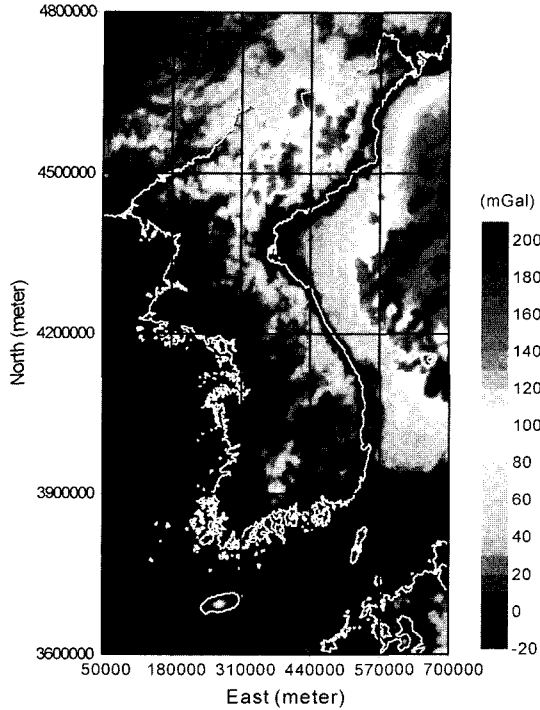
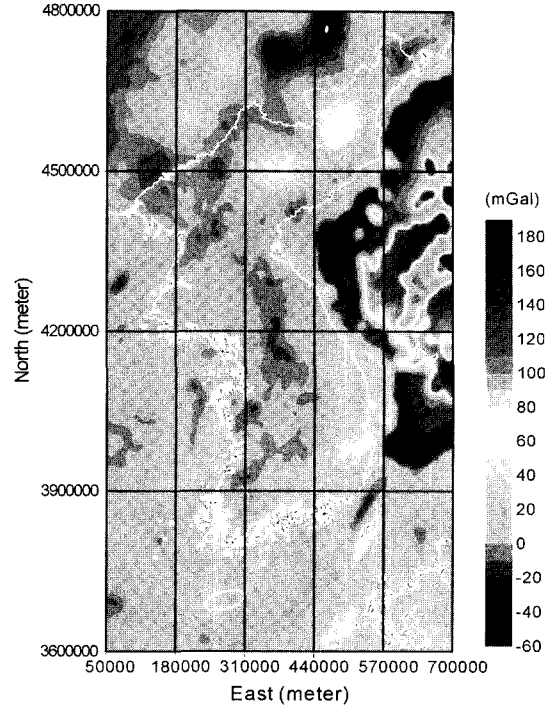


Fig. 4. Simple Bouguer gravity anomalies around the Korean Peninsula.

상을, 파워스펙트럼법을 위해서는 Fig. 6의 완전 부우게 중력이상값을 사용하였다. 즉, 불연속면의 평균심도를 구하기 위하여, 보정을 거친 중력이상을 주파수 영역에서 스펙트럼 분석에 의해 절단주파수를 결정하고, 결정된 파수를 이용한 파워스펙트럼분석을 실시하였다. 입력자료의 후리에 급수 전개는 연구지역범위를 주기로 무한히 반복되는 주기 함수로 가정하므로, 경계



**Fig. 5.** Terrain gravity effects around the Korean Peninsula. The effects were estimated at 41418 reference points with 2x2 km grids.



**Fig. 6.** Complete Bouguer gravity anomalies around the Korean Peninsula.

값에서의 불규칙한 값의 차이로 발생하는 Gibbs현상에 의한 오차가 발생할 수 있으며, 이러한 2차원 이산(discrete)자료의 경계효과는 입력자료의 상하, 좌우 가장자리 값의 차이가 없을 때 그 효과가 감소된다. 따라서, 파워스펙트럼을 통한 평균심도 계산 및 이상 분리를 위한 절단파수의 결정을 위해서는 경계 효과를 가능한 한 줄여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 미리링법을 사용하였다.

**3.3. 파동수대비법을 이용한 모호면 추출**

Kim *et al.*(2002a)는 지형에 의한 중력이상과 후리에어 중력이상의 성분을 파동수대비법(Kim, 1996; Kim *et al.*, 2000b)에 의해서 후리에 변환의 파동수영역에서 서로 대비하여 Airy-Heiskanen 지각균형을 전제로 모호면으로부터 파생된 중력이상을 추출하였다. 파동수영역에서의 스펙트럼대비법(spectral correlation analysis, 혹은 wavenumber correlation analysis)은 두 개 이상의 디지털데이터 사이의 상관관계를 파동수 각각에 대한 상관계수로 표시함으로써 두 데이터, 즉, 지형에 의한 중력이상과 후리에어 중력이상 사이의 상관관계를 보다 더 정량, 정성적으로 연구할 수 있는 방법이다

(von Frese *et al.*, 1997). 독립적으로 계산된 이 두 성분을 파동수 영역에서 대비하려면 이들 성분의 각 파동수 k 사이의 상관계수 CC, 즉 CC<sub>k</sub>를 우선 고려하여야 한다. 이들 wavevector들은 극좌표계에서

$$\bar{X}(k) = |\bar{X}(k)|e^{-j\theta\bar{X}(k)}, \quad \bar{Y}(k) = |\bar{Y}(k)|e^{-j\theta\bar{Y}(k)} \tag{1}$$

로 표현되며, 여기서 성분 X와 Y는 각각 지형에 의한 중력이상 및 후리에어 중력이상을 나타내며  $|\bar{X}(k)|$ ,  $|\bar{Y}(k)|$ 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 CC는

$$CC_k = \cos(\Delta\theta_k) = \frac{\bar{X}(k) \cdot \bar{Y}(k)}{|\bar{X}(k)| |\bar{Y}(k)|} \tag{2}$$

가 된다.

결국 두 성분 사이의 CC<sub>k</sub>를 이용하여 이들을 서로 양으로 대비되는 성분, 즉 지형과 연관성을 갖는 성분을 추출한 후 이들을 후리에어 중력이상에서 제거하여 지각 하부의 보상면, 즉 모호면으로부터 생성되었다고 가정되는 성분을 추출하고, 이를 Gaussian-Legendre 적분법을 이용하여 구면좌표계(spherical coordinate)에

서 정산(forward) 및 역산(inverse) 모델링을 반복하여 모호면의 기복을 추출하였다. 이때 하부지각과 상부 맨틀의 밀도차는  $0.4 \text{ g/cm}^3$ 로 가정하였다. 이로부터 추출된 모호면의 기복은 Fig. 7에 도시되어 있다. 추출된 모호면의 평균심도는 29.0 km, 표준편차는 1.4 km이며, (최소, 최대) 심도는 (24.1, 31.1) km이다.

**3.4. 파워스펙트럼을 이용한 모호면 추출**

Fig. 8은 절단파수를 결정하기 위한 완전 부우계 중력이상의 파수에 대한 진폭스펙트럼을 표시한 것으로 가로축은 공간주파수이고, 세로축은 부우계 중력이상의 진폭이다. 본 연구지역은 대륙 지각 외에 해양지각을 일부 포함하며, 따라서 진폭스펙트럼 계산시 대륙지각과 해양지각을 모두 포함한 경우와 대륙지각만을 포함하는 경우의 두 가지로 나누어서 계산하였다.

그림에서 전체적으로 주파수가 증가함에 따라 진폭이 로그함수 형태의 감소함을 보이며, 대륙지각만 고

려한 경우 동일한 진폭을 갖기 위한 공간주파수가 더 작게 나타난다. 이 경우 변곡점이 공간주파수 0.13 및 0.2부근에서 나타나고, 이를 이용하여 대륙지각만을 고려한 파워스펙트럼을 이용하여 평균 밀도변화 심도 계산을 실시하였다. 대륙과 해양지각을 모두 포함한 경우의 밀도 불연속면을 결정하기 위한 절단주파수로 이용될 변곡점은 공간주파수 0.22부근에서 나타나며, 이로부터 해양에서의 모호면이 대륙에서의 모호면보다 낮은 심도에 위치한다는 일반적인 사실을 확인 할 수 있었으나, 실제 평균심도 계산에는 이용하지 않았다. 그 이유는 두 개의 서로 다른 지각의 평균심도를 하나의 스펙트럼을 이용하여 심도를 계산하는 것이 불합리하기 때문이다.

Fig. 9는 Fig. 8 중 대륙지각만을 고려한 경우의 파워 스펙트럼 및 이로부터 계산한 세 개의 선형회귀방정식이다. 여기서  $Y_1$ 과  $Y_2$  모호면 및 콘라드 불연속면을 나타내며,  $Y_3$ 는 이들보다 천부인 밀도 불연속면을 나타낸다. 세 개의 수식으로부터 모호면까지의 평균심도는 27.2 km로, 콘라드면의 심도는 12.4 km로 나타났고, 4.0 km 심부에 또 다른 밀도 변화층이 존재하는 것으로 나타났다.

중력자료를 이용한 한반도의 지각구조에 대한 기존의 연구에서 최광선(1986)은 콘라드면의 깊이는 평균 11 km이고, 조진동 등(1996)은 한반도 남부에는 12.0 km 및 27.7~34.7 km 깊이에 밀도불연속면이 존

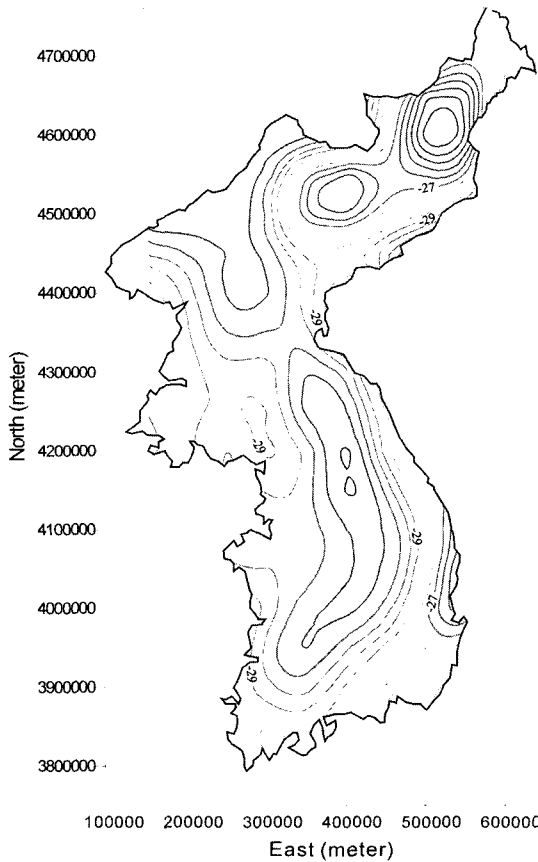


Fig. 7. Moho undulation estimated by spectral correlation analysis.

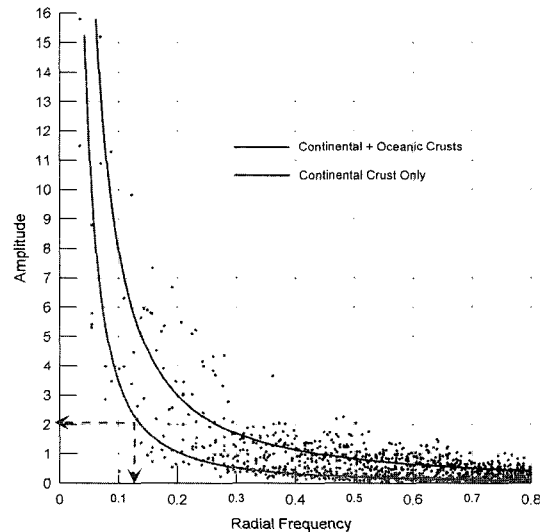


Fig. 8. Amplitude spectra of complete Bouguer gravity anomalies. Blue color denotes the spectrum for both continental and oceanic crusts, while red color denotes for continental crust only.

재하며, 전정수(1995)는 밀양분지에서 중·자력자료의 파워스펙트럼분석으로 31.3 km, 14.3~14.4 km에 밀도경계면이 존재함을 밝혔다. 또한, 김성균과 정부홍(1985)은 한반도 남부의 지각구조를 밝히기 위한 미소지진 관측을 통한 지진파 분석에서 한반도 남부가 15 km 깊이에 콘라드면이, 29 km 깊이에 모호면이 있음을 제시하였으며, 김성균(1995)은 중력·지진자료를 연계하여 32.6 km에 밀도불연속면이 존재한다고 하였다. 이상의 기존 연구결과로 볼 때 본 연구에서 중력자료의 후리에 분석으로 얻어진 12.4 km의 심도는 화강암질 지각과 현무암질 지각의 밀도경계인 콘라드 불연속면으로, 27.2 km는 모호면으로 해석된다. 기존의 연구에 비해 모호면의 심도가 다소 낮은 이유는 본 연구에서는 동해의 일부 지역을 대륙지각으로 간주되었기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구에서는 모호면의 심도계산을 위하여 지표에서의 중력이상과 두 층의 밀도차, 각 직사각주의 초기 심도를 역산의 초기 입력값으로 사용하였다. 상부층과 하부층이 일정한 밀도차를 갖는 동일한 넓이의 직사각주 모델을 설정하였으며, 연구지역 전체를 대상으로 50 km×50km의 넓이의 각주로 연구지역을 322개로 격자화 하였다. 역산에 사용된 밀도는 모호면의 심도를 계산하기 위해서는  $0.4 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도차를 이용하였다. 또한, 본 연구에서는 해의 안정화와 각주간의 변화량을 조절할 수 있는 제한조건의 크기를 변화시켜 계산하는 평활화 제한법을 사용하여 모호면의 기복도를 작성하였다.

한편, 중력이상의 파워스펙트럼에 의해 불연속면의 평균심도가 27.2 km이나 동해를 제외한 한반도의 지각의 심도는 기존연구를 참조하여 32 km로 결정하였고, 이로부터 중력이상을 분리하였으며, 그 심도 사이에는 균일한 밀도의 암석이 존재하는 것으로 가정하였다. 즉, 중력 이상으로부터 모호면으로부터 생성된 주역이상효과를 파워스펙트럼 분석시 결정된 절단파수를 기준으로 주파수 영역에서 저역통과필터(low-pass filter)를 적용하였는데, 필터링을 적용할 시 모호면의 영향 이외의 영향에 의한 이상을 제거하기 위해 파수가 0.13이상에 해당하는 부분을 저역통과필터를 적용하여 제거함으로써 중력이상을 분리하였다.

역산 결과에서 깊은 심도를 보이는 지역은 밀도불연속면의 심도가 깊음을 지시한다. 심도 역산은 불연속면의 평균 깊이 상·하부에 존재하는 암체의 밀도는 균일하다고 가정하고, 상부에 존재하는 암체의 중력효과를 계산하여 불연속면의 심도를 계산한다. 따라서, 초

기에 설정한 평균밀도보다 낮은 밀도의 암체가 상부에 대규모로 존재하는 경우 그 질량을 보상하기 위하여 고 심도를 보인다. 즉, 이러한 과정을 통하여 나타나는 고 심도는 저밀도의 암체가 불연속면 위에 존재할 가능성이 있으나 불연속면의 심도가 실제로 깊을 가능성도 있기 때문에 최종적인 해석은 지질학적 구조의 관점에서 실시되어야 한다.

본 연구에서는 전술한 후리에 변환을 이용, 중력이상값을 파장별로 분리하여 필터링 한 후 3차원 역산법을 이용하여 모호면을 구하여 Fig. 10에 도시하였으며, 모호면의 평균심도는 23.1 km, 표준편차는 2.1 km이다.

#### 4. 모호면의 비교 및 통합

본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 모호면의 기복을 계산하였다. 하나는 지각균형을 전제로, 지형으로부터의 중력이상값과의 파동수대비를 이용한 것이고 (Fig. 7), 다른 하나는 완전 부우게 중력이상으로부터 후리에 변환을 이용한 것이다(Fig. 10). 이 두 가지 모호면의 모델은 서로 장단점을 가지고 있다. 왜냐하면 Fig. 7의 경우는 지형에 의한 중력이상효과가 파동수대 비법에 의해 완전히 제거된 결과이나, 한반도의 지각이 완전한 지각판 내에 놓여 있는가, 혹은 국부적인 응력장(local stress field)에 의해 한반도의 지각이 과연 얼마나 지지되고 있는가 하는 것이 문제이기 때문이다. 반면에 후리에 변환을 이용한 Fig. 10의 경우는 자료의 수학적 처리과정은 비교적 단순하나 일정한 밀도차를 갖는 연속적인 밀도변화층의 존재 여부에 대한 불확실성은 물론 지각균형에 의한 중력이상의 상쇄가 반영될 수 없는 이론상의 모순으로 인해 여전히 지형에 의한 효과가 심부구조에 지나치게 반영되는 문제점이 있다. 두 모델의 통계적인 비교는 Table 2에 요약되었다. 이에 따르면 이 두 모델의 상관관계는 0.53으로 주로 모호면 산출의 방법론적인 차이에서 오는 오차에다 반복되는 계산상의 오차가 일부 포함되어 두 모델이 차이가 나는 것으로 사료된다. 특히, 한반도 동북부에서 나타나는 고심도 지역은 기존의 연구와는 다소 차이를 보이며, 이는 많은 수학적인 자료처리 과정을 통한 오차일 수도 있다고 사료된다.

본 연구에서는 이 두 모호면으로부터 하나의 모호면을 산출하기 위해서 우선 두 모호면의 차이를 계산하여 이를 저역통과필터를 이용하여 평활화하고, 이를 이용하여 최소자승법을 적용, 두 모호면을 보정하였고, 이들의 공통성분을 추출하였다(Kim, 1996). 또한 데이터



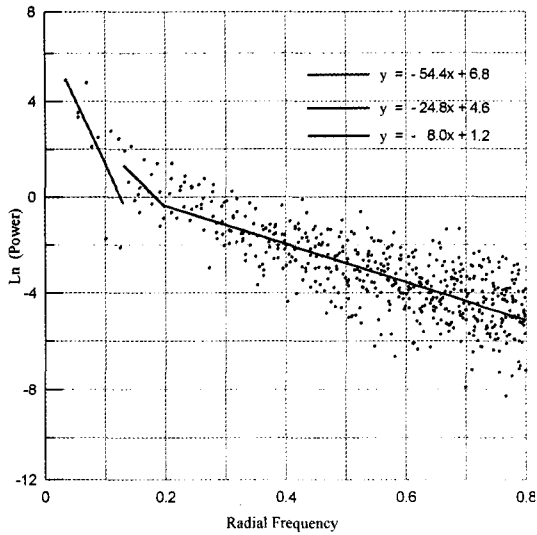


Fig. 9. Power spectrum of complete Bouguer gravity anomalies of continental crust only.  $y_1$ ,  $y_2$ , and  $y_3$  in the three linear equations are for Moho, Conrad, and other density discontinuities, respectively.

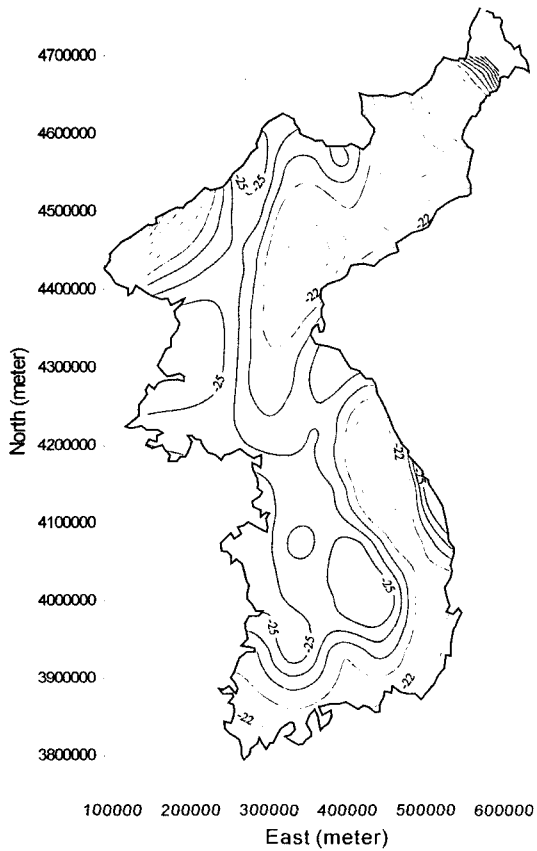


Fig. 10. Moho undulation estimated by power spectral analysis.

처리과정에서 손실된 에너지는 Fig. 1A와 D, 7 및 11의 통계값을 참조로 하여 최종모델을 구하였다.

통계적으로 살펴보면 모호면의 평균심도는 32.0 km, 표준편차는 2.5 km이며, (최소, 최대) 심도는 (20.3, 36.6) km이다. Fig. 7 및 10의 모델과의 상관관계를 포함한 통계는 Table 2에 요약되어 있다. Fig. 11의 최종 모델은 파동수대비법과 파워스펙트럼법에 의한 모델과 각각 0.83 및 0.76의 상관관계를 가지며, 평균 심도 및 표준편차는 두 모델의 중간값을 갖는다.

### 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 중력이상 및 수치고도모델을 사용하여 한반도의 심부지각구조, 즉 모호면의 심도를 추출하였다. 본 연구에 사용된 중력이상값은 Sandwell and Smith(1997)의 모델로부터 계산되었다. 이는 Geosat과 ERS1 등의 인공위성고도레이더 관측값을 주로 사용하

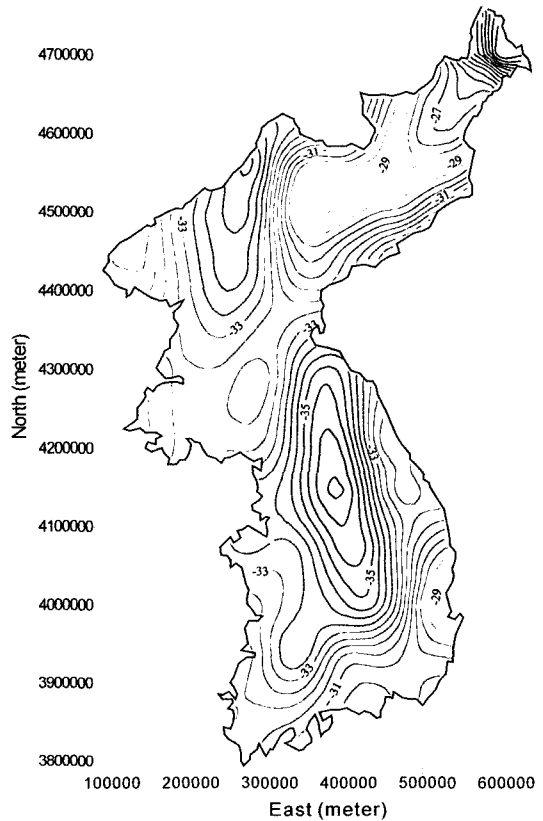


Fig. 11. Moho undulation estimated by both spectral correlation and power spectral analyses. The results of the two different analyses were combined by using least-squares adjustment and statistical normalization.

**Table 2.** Statistical comparison between the three different Moho models estimated by spectral correlation analysis, power spectrum analysis, and least-squares adjustment(unit: km).

Moho Undulations	min, max	mean	standard deviation	correlation coefficient		
				Fig. 7	Fig. 10	Fig. 11
by Spectral Correlation Analysis (Fig. 7)	28.5, 38.7	32.8	2.2	-	0.53	0.83
by Power Spectrum Analysis (Fig. 10)	26.2, 38.4	31.2	2.8	0.53	-	0.76
integrated by Least-squares Adjustment (Fig. 11)	20.3, 36.6	32.0	2.5	0.83	0.76	-

여 계산된 2분 간격의 전지구 모델이다. 이를 이용함으로써 데이터 영역 뿐만 아니라 주파수 영역에서도 자료의 공간적 균질성을 확보하였다. 수치고도모델은 Sandwell의 2분 간격 전지구 모델을 이용하였다.

모호면 추출은 Kim *et al.*(2000a)에 의해 제안된 파동수대비법 및 후리에급수를 이용한 파워스펙트럼분석법을 이용하였다. 전자는 지각균형을 전제로, 지형에 의한 중력효과와 후리에어 중력이상을 파동수영역에서 대비하여 모호면의 심도를 계산하는 방법이고, 후자는 완전부우계 중력이상으로부터 후리에 변환을 이용하여 지하 밀도 변화층의 심도를 계산하는 방법이다. 이 두 모호면은 서로 0.53의 상관관계를 갖고 있으며, 이는 모호면 산출의 방법론적인 차이 및 계산상의 오차인 것으로 사료된다. 특히, 한반도 동북부에서 나타나는 고심도 지역은 기존의 연구와는 다소 차이를 보이며, 이는 많은 수학적인 자료처리 과정을 통한 오차일 수도 있다고 사료된다.

이렇게 두 가지 독립적인 방법으로 추출된 모호면을 하나로 통합하기 위한 한 방법으로, 두 모호면의 차이를 계산한 후, 이를 최소자승법을 이용, 두 모호면을 보정하였다. 결과적으로 한반도의 최종 모호면의 평균심도는 32.0 km, 표준편차는 2.5 km이며, (최소, 최대) 심도는 (20.3, 36.6) km으로 나타났다. 이 경우 지형에 의한 중력효과는 파동수대비법에 의해 제거된 결과이나, 한반도의 지각이 완전한 지각판 내에 놓여 있어서 Airy-Heiskanin 지각균형설의 가정이 타당성이 있는가, 혹은 국부적인 응력장에 의해 한반도의 지각이 과연 얼마나 지지되고 있는가하는 것에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 이에 앞서 일정한 밀도차를 갖는 연속적인 밀도변화층이 존재한다는 가정이 반드시 필요하다.

본 연구에서 제시된 세 가지 모호면 심도는, 심부 탄성과 탐사자료가 거의 전무한 시점에서, 모두 인공위성 자료로부터 유도된 중력이상자료 및 지형을 이용하여 계산되어졌으며, 또한 후리에 변환을 이용하여 데이터 영역과 주파수(혹은 파동수) 영역 모두에서 수학적으로 계산된 결과이다. 전술한 바와 같이 이들은 각각 장점

및 단점을 갖고 있으며, 이들을 통합하여 구축한 모델 역시 이들의 단점을 완전히 보완하지 못하였다. 더구나 이들의 통합 과정 역시 수학적 계산에 의존된 바, 이로부터 기인한 오차 또한 감안하여야 한다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 2000년도 고응력장 변화와 지각변형사 연구의 일부임을 밝힌다.

## 참고문헌

- 김성균 (1995) 한반도의 지각구조에 관한 연구. 지질학회지, 31권, p. 393-400.
- 김성균, 정부홍 (1985) 한반도 남부지역의 지각구조. 광산지질, 18권, p. 151-157
- 민경덕, 서정희, 권병두 (1987) 응용지구물리학. 우성문화사, p. 15-227.
- 심운택 (1971) 중력이상에 의한 한국의 지각구조. 성균관대학교 논문집, 16권, p. 21-40.
- 전정수 (1995) 경상분지 남부지역(밀양소분지)의 지질구조에 관한 지구물리학적 연구. 연세대학교 지질학과 박사학위논문.
- 최광선 (1986) 한반도 남부의 중력에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문. 서울대학교 대학원 지질과학과, 110p.
- 조진동, 최중호, 박인화, 고인세 (1996) 광역중력탐사연구(한반도 남부). 한국자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-5.
- Kim, S.K. (1979) Geodetic and geophysical analyses of gravity data in Korea. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 12, p. 17-28.
- Kim, J.W. (1996) Spectral correlation of satellite and airborne geopotential field measurements for lithospheric analysis. Ph.D. Dissertation (unpubl.), Dept. of Geological Sciences, The Ohio State University, 171p.
- Kim, J.W., von Frese, R.R.B. and Kim, H.R. (2000a) Crustal modeling from spectrally correlated free-air and terrain gravity data-A case study of Ohio. Geophysics, v. 65, p. 1057-1069.
- Kim, J.W., Kim, W.K. and Kim, H.-Y. (2000b) Wave-number correlation analysis of satellite geopotential anomalies. J. Korea Econ. Environ. Geol., v. 33, p. 111-116.
- Kim, J.W., Kim, J.-H. von Frese, R.R.B. Roman, D.R. and

- Jezek, K.C. (1998) Spectral attenuation of track-line noise. *Geophys. Res. Lett.*, v. 25, p. 187-190.
- Kumagai, N. (1953) Results of measurements of gravity in Japan and her vicinity. Kyoto University.
- Kwon, B.D. and Yang, S.Y. (1985) A study on the crustal structure of tyhe southern Korean peninsula through gravity analysis. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 18, p. 309-320.
- Lee, K. (1979) On isostasy of Korean Peninsula. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 15, p. 134-140.
- Ma, X.Q. and Watts, D.R. (1994) Terrain correction program for regional gravity surveys. *Computer and Geosciences*, v. 20, p. 961-972.
- Pak, C.S., Kim, J.H. and O, I.T. (1996) Geophysical field and deep structure of crust. In Paek, R.J. H.G. Kang, and Jon, G.P. (ed.), *Geology of Korea*, p. 451-460.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F. (1997) Marine gravity anomalies from Geosat and ERS-1 satellite altimetry. *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 10,039-10,054.
- Tsuboi, C. (1983) Gravity. George Allen & Unwin Ltd.
- USAMSFE, (1963) Note on the South Korea land gravity. U.S. Army Map Service Far East.
- von Frese, R.R.B. Jones, M.B. Kim, J.W. and Kim, J.-H. (1997) Analysis of anomaly correlations. *Geophysics*, v. 62, p. 342-351.

---

2003년 3월 27일 원고접수, 2003년 4월 30일 게재승인.