

# 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>, 이운수<sup>2</sup>, 박찬홍<sup>5</sup>, 황종선<sup>4</sup>

## 요 약

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 Kim et al. [2000a]에 의해 제안된 스펙트럼 대비법 및 후리에급수를 이용한 파워스펙트럼분석법을 이용하였다. 전자는 지각균형을 전제로, 지형에 의한 중력효과와 후리에어 중력이상을 파동수영역에서 대비하여 모호면의 심도를 계산하는 방법이고, 후자는 완전부우계 중력이상으로부터 푸리에변환을 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. 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 32.0km, 표준편차는 2.5km 이며, 최소, 최대 심도는 20.3, 36.6km으로 나타났다. 이 경우 지형에 의한 중력효과는 스펙트럼대비법에 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 있는가 하는 것에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 이에 앞서, 일정한 밀도차를 갖는 연속적인 밀도변화층이 존재한다는 가정이 반드시 필요하다.

**주요어:** 한반도 모호면, 중력이상, 스펙트럼대비법, 파워스펙트럼분석, 최소자승에 의한 통합

<sup>1</sup>세종대학교 지구정보공학과(jwkim@sejong.ac.kr)

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

<sup>3</sup>연세대학교 지구시스템학과, 현 쌍용정보통신 Mobile/GIS 기술팀

<sup>4</sup>연세대학교 지구시스템학과

<sup>5</sup>한국해양연구원 해양환경기후본부

## 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], Kwon and Yang[1985], 최광선[1986] 등의 연구가 대표적인 예이고, 근래 북한의 Pak[1996]에 의한 연구 결과가 발표된 바 있다(Fig. 1). 그러나 이들 중 일부의 연구만이 남북한 및 동해 일부를 포함하였고, 따라서 한반도 및 그 주변해역을 모두 포함한 정량적인 연구결과는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 전지구 중력이상 및 수치고도모델(DEM, digital elevation model)을 사용하여 한반도의 모호면의 기복을 추출하였다. 본 연구에 사용된 후리에어(free-air) 중력이상값은 Sandwell and Smith [1997]의 모델로부터 계산되었으며, 이는 Geosat, ERS1 등의 인공위성 레이더고도계(radar altimeter) 관측값 및 저고도 탐사자료를 사용하여 계산된 2분간격의 전지구 모델이다. 수치고도모델(DEM, Digital Elevation Model)은 Sandwell의 2'분간격자료를 이용하였다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 모호면의 기복을 계산하였다. 하나는 지각균형을 전제로, 지형으로부터의 중력이상값과의 스펙트럼 대비를 이용한 것이고, 다른 하나는 완전부우계(complete Bouguer) 중력이상으로부터 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용한 것이다. 전자는 지각균형(isostatical compensation)을 전제로 Kim et

al.[2002a]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.

## 2. 자료처리

### 2.1. 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 경우 동해처럼 상대적으로 판의 경계에 가까운 지역을 제외하고는 적용이 가능하다.

또한 본 연구에서는 기존의 파워스펙트럼을 이용한 방법의 장점을 살리며, 동시에 스펙트럼대비법의 문제점을 보완 할 수 있도록, 파워스펙트럼법을 이용한 모호면을 계산 한 후 이들을 통합하여 하나의 모호면을 추출하였다.

### 2.2. 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 부우계 보정을 실시하여 부우계 중력이상을 추출하였다. Fig. 2와 3은 본 연구에서 사용한 한반도 및 주변해역의 후리에어 및 부우계 중력이상도이다. 후리에어 이상의 경우 육상의 공간해상도가 해상에 비해 떨어지는데 이는 해상에서는 조밀하고 규칙적인 인공위성 레이다 고도측정에 의해 중력이상이 계산된 반면 육상은 인공위성 궤도 교란 등으로부터 유도된 최대 degree & order 360을 갖는 전지구 구면조화계수를 바탕으로 일부 저고도 탐사 자료가 추가되었기 때문이다.

지형에 의한 중력효과를 효율적으로 제거하기 위해서 Sandwell의 2분 간격 DEM을 사용하여 지형보정을 실시하였다. Fig. 4는 지형에 의한 중력효과이고, 이로부터 지형보정이 이루어진 완전부우계 중력이상을 구하였다(Fig. 5). 따라서 본 연구에서 스펙트럼대비법을 위해서는 Fig. 2의 후리에어 중력과 Fig. 4의 지형에 의한 중력을, 파워스펙트럼법을 위해서는 Fig. 5의 완전 부우계 중력값을 사용하였다. 즉, 불연속면의 평균심도를 구하기 위하여, 보정을 거친 중력을 주파수 영역에서 스펙트럼 분석에 의해 절단주파수를 결정하고, 결정된 파수를 이용한 파워스펙트럼분석을 실시하였다.

### 2.3. 스펙트럼대비법을 이용한 모호면 추출

Kim et al.[2002a]는 지형에 의한 중력과 후리에어 중력의 성분을 스펙트럼대비법[Kim, 1996; Kim et al., 2000b]에 의해서 후리에 변환(Fourier transform)의 파동수영역(wavenumber domain)에서 서로 대비하여 Airy-Heiskanen 지각균형을 전제로 모호면으로부터 파생된 중력을 추출하였다. 즉 파동수 영역에서 각 성분 사이의 상관계수를 이용하여 이들을 서로 양으로 대비되는 (positively correlated) 성분, 즉 지형과 연관성을 갖는 성분을 추출한 후 이들을 후리에어 중력에서 제거하여 지각 하부의 보상면, 즉 모호면으로부터 생성되었다고 가정되는 성분을 추출하고, 이를 Gaussian-Legendre 적분법을 이용하여 구면좌표계(spherical coordinate)에서 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. 6에 도시되어 있다. 추출된 모호면의 평균심도는 29.0km, 표준편차는 1.4km이며, 최소, 최대 심도는 24.1, 31.1km 이다.

### 2.4. 파워스펙트럼을 이용한 모호면 추출

Fig. 7은 대륙지각만을 고려한 경우의 파워 스펙트럼 및 이로부터 계산한 세 개의 선형

회귀방정식이다. 여기서  $Y_1$  과  $Y_2$  모호면 및 콘라드 불연속면을 나타내며,  $Y_3$ 는 이들보다 천부인 밀도 불연속면을 나타낸다. 세 개의 수식으로부터 모호면까지의 평균심도는 27.2km로, 콘라드면의 심도는 12.4km로 나타났고, 4.0 km 심부에 또 다른 밀도 변화층이 존재하는 것으로 나타났다.

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

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 초기에 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. 9에 도시하였으며, 모호면의 평균심도는 23.1km, 표준편차는 2.1km 이다.

#### 4. 모호면의 비교 및 통합

본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 모호면의 기복을 계산하였다. 하나는 지각균형을 전제로, 지형으로부터의 중력이상값과의 스펙트럼 대비를 이용한 것이고(Fig. 6), 다른 하나는 완전 부유계 중력이상으로부터 푸리에변환을 이용한 것이다(Fig. 8). 이 두 가지 모호면의 모델은 서로 장단점을 가지고 있다. 왜냐하면 Fig. 6의 경우는 지형에 의한 중력이상효과가 스펙트럼 대비법에 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. 8의 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 1에 요약되었다. 본 연구에서는 이 두 모호면으로부터 하나의 모호면을 산출하기 위해서 우선 두 모호면의 차이를 계산하여 이를 지역통과필터를 이용하여 평활화하고, 이를 이용하여 최소자승법을 적용, 두 모호면을 보정하였고, 이들의 공통성분을 추출하였다[Kim, 1996]. 이로부터 계산된 모호면의 모델이 Fig. 9에 도시되어 있고, 이 그림이 본 연구의 최종 결과이다. 통계적으로 살펴보면 모호면의 평균심도는 32.0km, 표준편차는 2.5km 이며, (최소, 최대) 심도는 (20.3, 36.6)km 이다.

#### 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 사용하여 계산된 2분 간격의 전지구 모델이다. 이를 이용함으로써 데이터 영역 뿐 만 아니라 주파수 영역에서도 자료의 공간적 균질성을 확보하였다. 수치고도모델은 Sandwell의 2분 간격 전지구 모델을 이용하였다.

모호면 추출은 Kim et al. [2000a]에 의해 제안된 스펙트럼 대비법 및 후리에급수를 이용한 파워스펙트럼분석법을 이용하였다. 전자는 지각균형을 전제로, 지형에 의한 중력효과와 후리에어 중력이상을 파동수영역에서 대비하여 모호면의 심도를 계산하는 방법이

고, 후자는 완전부우계 중력이상으로부터 푸리에변환을 이용하여 지하 밀도 변화층의 심도를 계산하는 방법이다. 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 32.0km, 표준편차는 2.5km 이며, (최소, 최대) 심도는 (20.3, 36.6)km으로 나타났다. 이 경우 지형에 의한 중력효과는 스펙트럼대비법에 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 있는가 하는 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.

## 참 고 문 헌

- 심운택, 1971, 중력이상에 의한 한국의 지각구조, 성균관대학교 논문집, v.16, p.21-40.  
최광선, 1986, 한반도 남부의 중력에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 서울대학교 대학원 지질과학과 110p.  
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., R.R.B. von Frese, and H.R. Kim, 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., W.K. Kim, and H.-Y. Kim, 2000b, Wavenumber correlation analysis of satellite geopotential anomalies, J. Korea Econ. Environ. Geol., 33(2), p.111-116.  
Kwon, B.D. and S.Y. Yang, 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.  
Pak, C.S., J.H. Kim, and I.T. O., 1996, Geophysical field and deep structure of crust, in Geology of Korea, Paek, R.J., H.G. Kang, and GP. Jon, (ed.), p.451-460.  
Sandwell, D.T. and W.H.F. Smith, 1997, Marine gravity anomalies from Geosat and ERS-1 satellite altimetry, J. Geophys. Res., 102, B5, 10,039-10,054.

Table 1. 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. 6	Fig. 8	Fig. 9
by Spectral Correlation Analysis (Fig. 6)	(28.5,38.7)	32.8	2.2	-	0.53	0.83
by Power Spectrum Analysis (Fig. 8)	(26.2,38.4)	31.2	2.7	0.53	-	0.76
integrated by Least-squares Adjustment (Fig. 9)	(20.3,36.6)	32.0	2.5	0.83	0.76	-

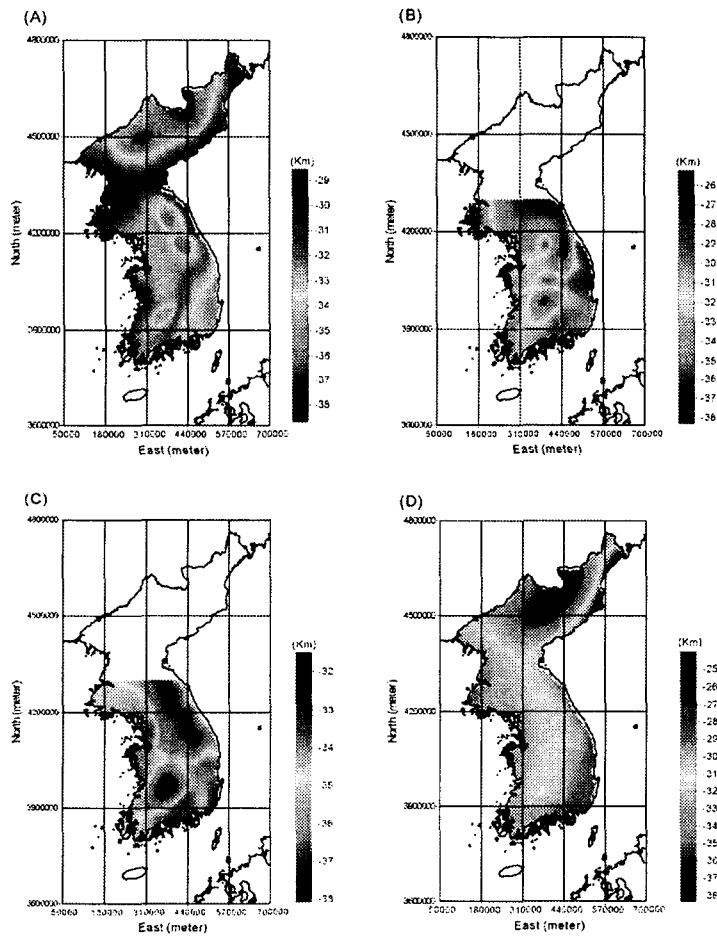


Fig. 1. Moho undulations of the Korean Peninsula estimated by (A) Sim [1971], (B) Kwon and Yang [1985], (C) Choi [1986], and (D) Pak et al. [1996].

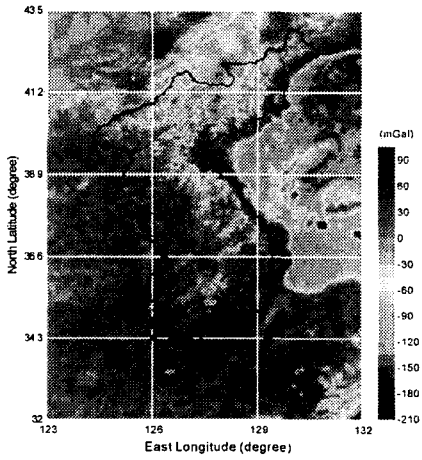


Fig. 2. Free-air gravity anomalies around the Korean Peninsula.

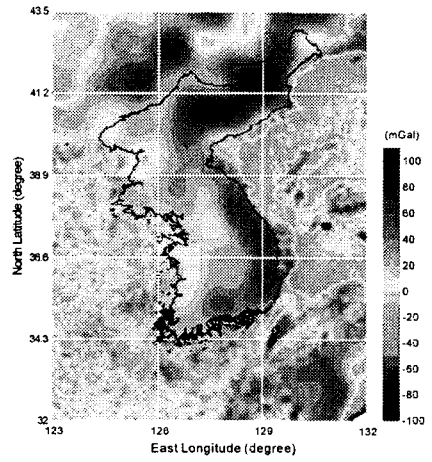


Fig. 3. Simple Bouguer gravity anomalies around the Korean Peninsula.

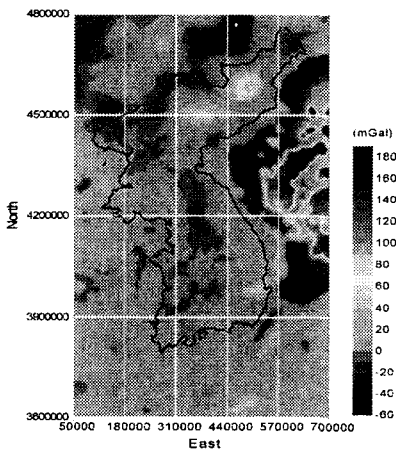


Fig. 4. Terrain gravity effects around the Korean Peninsula.

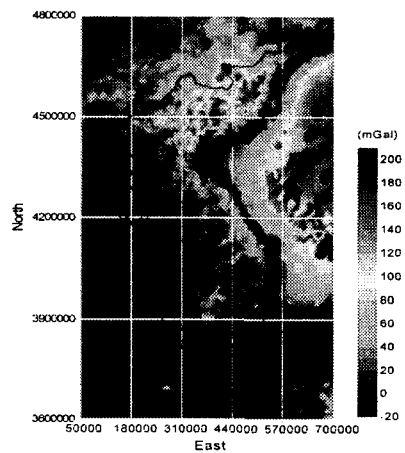


Fig. 5. Complete Bouguer gravity anomalies around the Korean Peninsula.

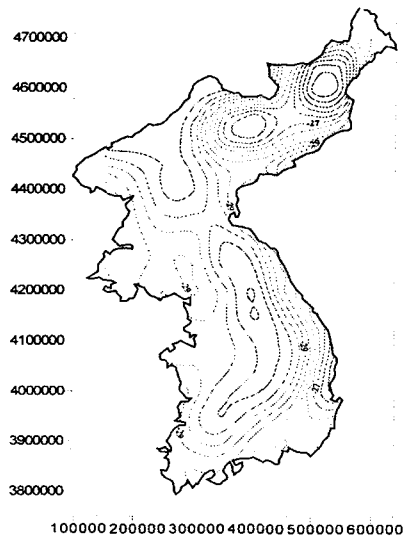


Fig. 6. Moho undulations estimated by spectral correlation analysis.

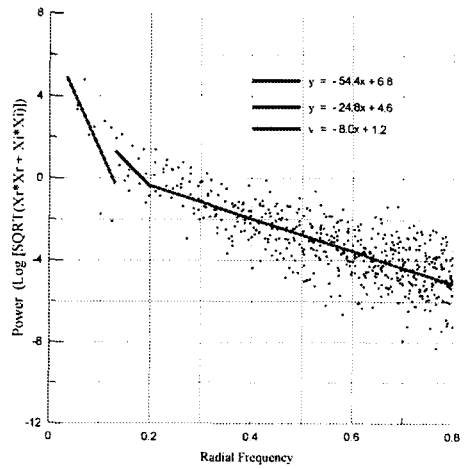


Fig. 7. Power spectrum of complete Bouguer gravity anomalies of continental crust only.

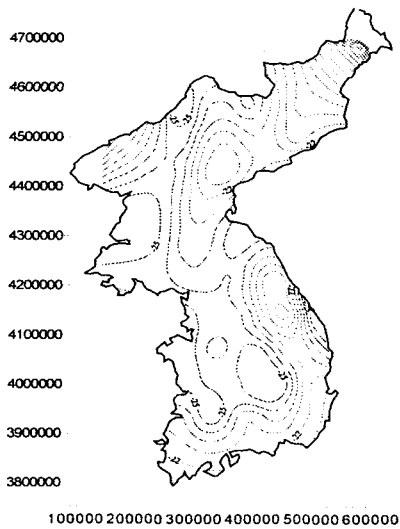


Fig. 8. Moho undulations estimated by power spectral analysis.

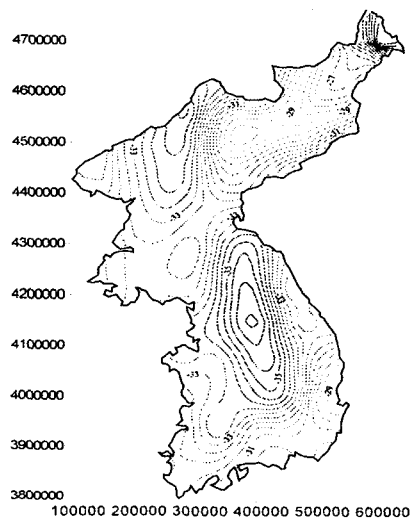


Fig. 9. Moho undulations estimated by both spectral correlation and power spectral analyses.