

중력자료를 이용한 한반도 중부 대륙-해양 지역의 지각구조 연구

유상훈^{1*} · 민경덕¹ · 박찬홍² · 원중선¹

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국해양연구원 지질자원연구부

Crustal Structure of the Continent-Ocean Zone around the Middle Eastern Part of Korean Peninsula Using Gravity Data

Sang-Hoon You^{1*}, Kyung-Duck Min¹, Chan-Hong Park² and Joong-Sun Won¹

¹Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University

²Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute

There have been few geophysical studies on the crustal structure of the continent-ocean zone around the middle eastern part of Korean peninsula, because of the lack of database in both land and ocean. The area for the study on the internal crustal structure using gravity data is bounded by the latitude of 37°~38°N and longitude of 128°~132°E. WCA correction is applied to shipborne gravity data to integrate with gravity anomalies obtained on land. The high frequency components of the shipborne gravity data which are considered as the noise on survey track are effectively removed by means of correlating with satellite gravity data. The corrected shipborne free-air gravity anomaly is integrated with the Bouguer gravity anomaly on land under the same condition. The integrated gravity anomaly is divided into four areas for power spectrum analysis. The depths of Moho discontinuity increases gradually from inland to Ulleung basin. As the result of modeling based on power spectrum analysis, Moho discontinuity depth is about 33~35 km in the continental zone of Korea and 18~28 km at the continental margin. Such structural character is well elucidated in changing gravity data around Ulleung basin. The depths of Moho discontinuity in the southern ocean of Ulleung-island is 16~17 km, which is much lower than in the land. The result of crustal structure modeling in this study is similar to that computed by prior seismic exploration around this area.

Key words : continental margin, gravity data, WCA correction, Moho discontinuity, crustal structure modeling

자료의 부족 및 육·해양을 동시에 감안해야 하는 상황으로 인하여 아직까지 한반도 중부 대륙에서 해양지역으로 이어지는 대륙연변부에서의 심부지각구조에 관한 심층적인 지구물리학적 연구는 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 중력자료를 이용하여 대륙과 해양을 잇는 대륙연변부 북위37°~38°, 동경128°~132°지역에 대한 심부지각구조를 해석하였다. WCA 보정을 이용하여 해상지역의 선상중력자료에 나타나는 탐사측선상의 잡음으로 판단되는 고주파성분을 제거하고, 보정된 해상지역의 free-air 중력이상을 동일한 고도 기준면을 갖는 육상지역의 부계 중력이상과 결합하였다. 연구지역의 중력이상을 4개 지역으로 나누고, 각각의 지역에 대한 파워스펙트럼 분석에 의해 산출한 모호면으로 판단되는 밀도 경계면은 한반도 내륙 부에서 대륙주변부를 지나 동해 울릉분지 쪽으로 갈수록 심도가 점점 알아지는 양상을 보인다. 파워스펙트럼 결과에 의해 기초 모델로 설정하고 모델링을 실시한 결과, 모호면의 심도는 한반도 내륙지역에서는 약 33~35 km로 나타나고, 대륙주변부에서의 모호면의 심도는 18~28 km로서 한반도 내륙지역에 비해 알아진다. 이와 같은 구조적 특성은 울릉분지의 주변부를 따라 나타나고 있는 중력변화에서도 잘 나타나고 있다. 울릉도 남쪽 해역에서의 모호면은 약 16~17 km로 대륙 쪽의 모호면 깊이보다 훨씬 얕다. 이와 같이 중력자료로부터 구한 지각모델의 결과는 인근 지역에서 이루어진 탄성파탐사를 통한 지각모델링 결과와 매우 유사하게 나타났다.

주요어 : 대륙연변부, 중력자료, WCA 보정, 모호면, 지각모델링

*Corresponding author: ysh@yonsei.ac.kr

1. 서 론

중력이상을 이용한 한반도에서의 국지적인 심부 지각구조에 관한 연구는 1970년대 이후 지금까지 꾸준히 이루어지고 있으나, 광역적인 한반도 전체의 모호면에 대한 정량적인 연구는 많이 이루어지지 못하였다. 중력이상을 이용한 한반도 모호면에 관해서는 심운택(1971), Kim(1979), Tsuboi(1983), Kwon and Yang(1985), 최광선(1986) 등의 연구가 대표적인 예이고, 최근에는 북한의 Pak *et al.*(1996)에 의한 연구결과가 발표되었다. 최근 들어 동해의 해양지역은 Kim *et al.*(1994), 박찬홍 등(1996), Park(1998), 서만철 등(1998) 등에 의하여 연구된 바 있다. 그러나, 이들 연구들은 남북한 및 동해 일부를 다루었고, 한반도 및 그 주변해역을 모두 포함한 연구결과는 아직 미진한 실정이다. 특히, 지형적인 특징과 성인에 관한 논란으로 말미암아 한반도 중부 대륙에서 동쪽 해양지역으로 이어지는 대륙연변부(continental-margin)에서의 심부 지각구조에 관한 지구물리학적 연구는 전무한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 북위 $37^{\circ}\sim 38^{\circ}$, 동경 $128^{\circ}\sim 132^{\circ}$ 연구지역을 설정하고, 육·해상 및 위성 중력자료와 수심자료 등 다양한 자료들을 사용하여, 한반도 중부 대륙에서 동해로 이어지는 지역에서의 지구조적 특징을 연구하였다.

WCA(wavenumber correlation analysis)보정을 통하여 선상중력자료와 위성중력자료간의 상관관계를 분석하고, 선상중력 추정시 발생할 수 있는 탐사측선상의 잡음을 효과적으로 제거하였다. 육상지역의 부계 중력이상과 해상지역에서의 보정된 free-air 중력이상을 결합하고, 일정한 간격으로 재 추출하여 분포도를 작성하고, 지질 구조적 특징들을 해석하였다. 대륙연변부에서의 광역적인 심부 지각구조에 초점을 맞추어 보다 정량적 해석을 위하여 지하 밀도 구조 모델링을 실시하였고, 기존에 인근 해역에서 이루어진 탄성파탐사 연구결과와 비교, 검토하였다.

2. 지형 및 지질

2.1. 해양지역

동해는 울릉분지, 일본분지, 그리고 아마토 분지의 세 분지로 구성되며, 동해의 남부에 위치하는 울릉분지는 한국대지에 의해 북쪽의 일본 분지와 오키뱅크에 의해 북동쪽 아마토분지와 각 분리되며, 최대 수심이 2,200 m 정도이며, 퇴적층의 두께는 약 6 km 이상이다(국립해양조사원, 1998).

한반도 동해연안은 북동-남서 방향으로 길고, 북서-남동 방향으로 볼록한 형태를 이루고 있는 울릉분지를 중심으로 한국연안의 대륙붕 및 대륙사면과 북쪽의 한

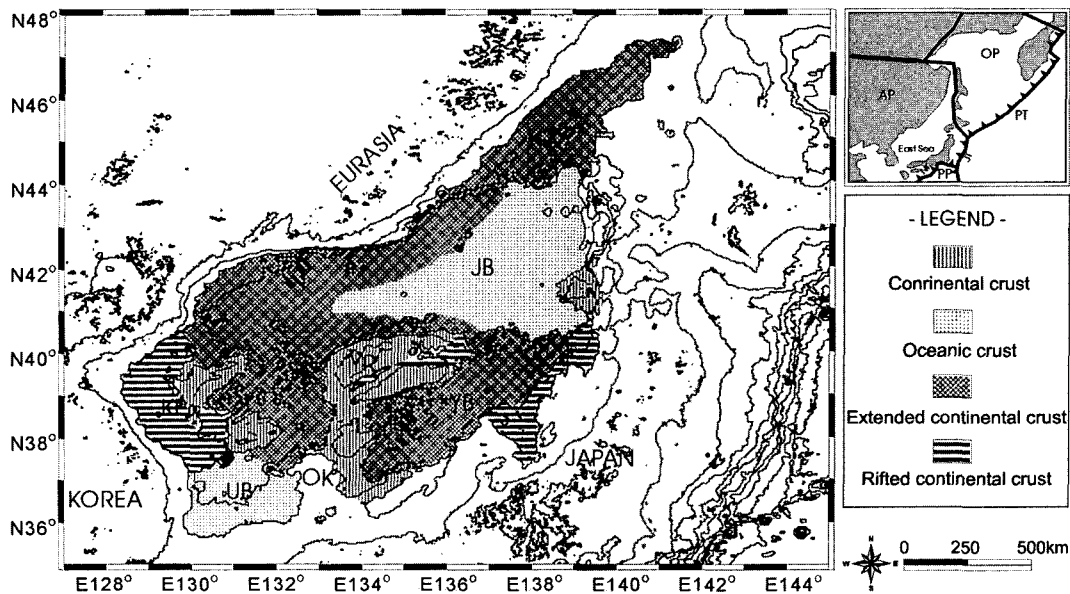


Fig. 1. Physiographic map of the East Sea (Japan Sea) showing the discrimination of crustal type (Tamaki *et al.*, 1992). Small map shows the plate configuration: OP, PT, PP, and AP are Okhotsk, Pacific, Philippine, and Amurian Plates respectively. NT and JT are Nankai and Japan Trenches.

국대지를 포함한다(Fig. 1). 울릉분지의 한반도 연안 및 북쪽의 한국대지 주변은 급한 사면을 이루고 있는 반면에, 남쪽 주변 및 일본 북서 연안 쪽으로는 완만하게 경사져 있는데, 동해 연안에서의 대륙봉은 울산에서 북쪽으로 가면서 좁게 발달하고 있다. 이와 같이 좁은 대륙봉은 경사가 급한 대륙사면으로 이어지며, 울릉분지와 연결되어 있다.

2.2. 육상지역

연구지역 내 육상부분에는 옥천 신지향사대를 포함하는 선캠브리아계부터 현세에 이르는 다양한 지질 분포를 보이고 있다(Fig. 2). 대부분의 북부 지역은 중생대 쥬라기에 관한 대보화강암이 점유하고 있다. 여타 옥천 신지향사대를 포함해서 이 지역은 캄브리아기에서부터 쥬라기 말기까지 지속적인 퇴적작용이 있었다(Schluter and Chun, 1974). 부분적으로 쥬라기 및 백악기 육성 퇴적물이 퇴적되어 있으며, 고생대 초기 및 말기로 부터 트라이아스기까지는 해성층과 육성층을 포함하고 있다. 옥천 신지향사대에서 지향사 분지의 주방향은 조선누층군이나 평양누층군에서 나타나는 바와 같이 거의 동-서 방향이다(Lee, 1987).

3. 자 료

육상지역의 중력자료로는 한국지질자원연구원에서

공개한 한반도 남부의 부계 중력이상도(강필중, 1996)를 디지털화(digitizing)하여 사용하였고, 해상지역의 중력자료로는 선상에서 측정된 국립해양조사원의 동해 중부 free-air 중력이상(국립해양조사원, 1998)과 Geosat과 ERS-1 등의 인공위성 고도레이더 관측값을 주로 사용하여 계산된 1'×1'의 free-air 중력(Sandwell & Smith, 1997)을 이용, WCA 보정 후, 해상지역의 중력자료로 사용하였다.

또한, 연구지역내 지형적인 영향을 고려하기 위하여, 육상지역의 30"×30"의 GTOPO 30의 육상지형자료와 해상지역의 2'×2'간격의 Sandwell의 수치고도모델(Smith & Sandwell, 1997)을 병합하여 사용하였다.

4. 연구방법 및 결과

4.1. 해상중력자료의 WCA 보정

최근 들어 위성으로부터 관측한 정밀도가 크게 향상된 해수면 고도자료로부터 산출된 중력자료가 공개되면서 선상중력자료가 빈약한 지역을 채울 수 있게 되었다. 그러나, 위성으로부터 도출된 중력자료는 자료분포의 연속성 및 균질성은 뛰어나지만 위성의 제한적인 측정영역과 측정범위의 한계 때문에 선상중력에 비해서 해상도에서는 기본적인 한계를 가질 수밖에 없다(Campbell, 1995). 항해시스템, 측량시스템 및 해상조건은 개별적인 항해에 따라 달라지기 때문에 선상중력

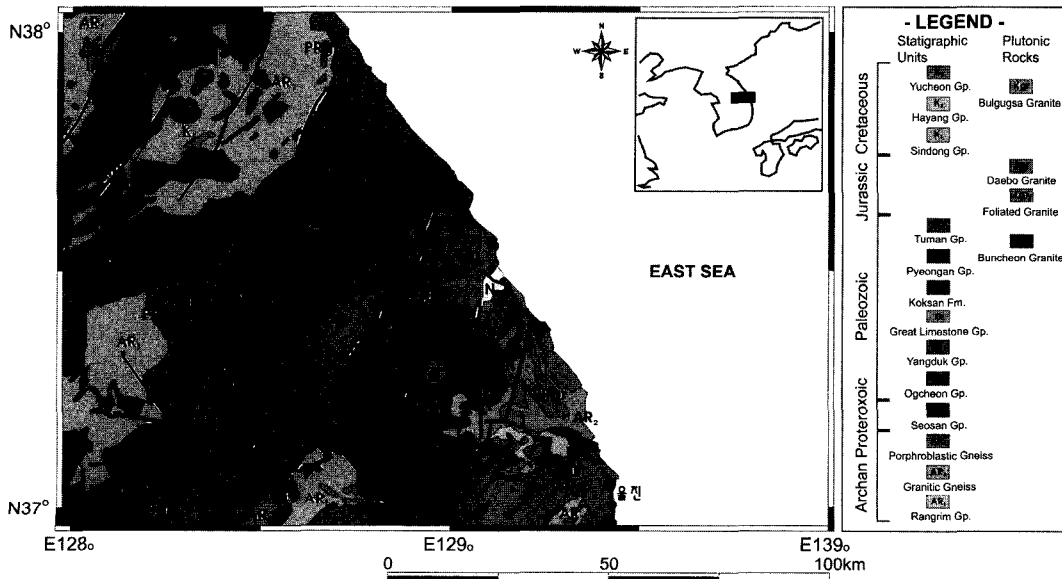


Fig. 2. Geologic map of continental zone in the study area (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 1995).

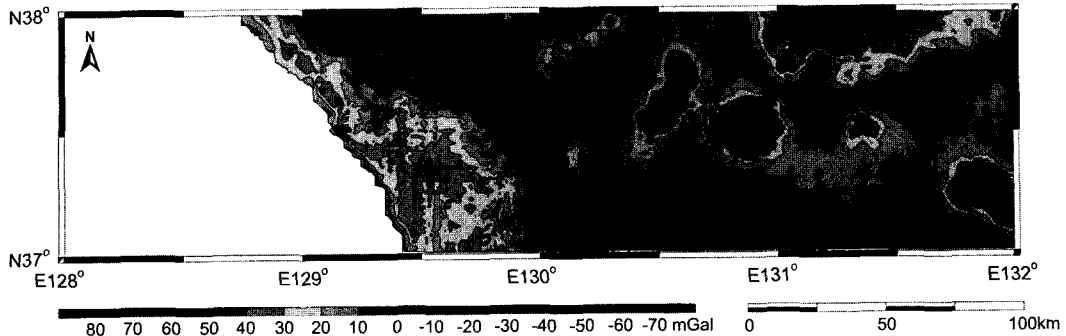


Fig. 3. Shipborne gravity anomaly in the study area.

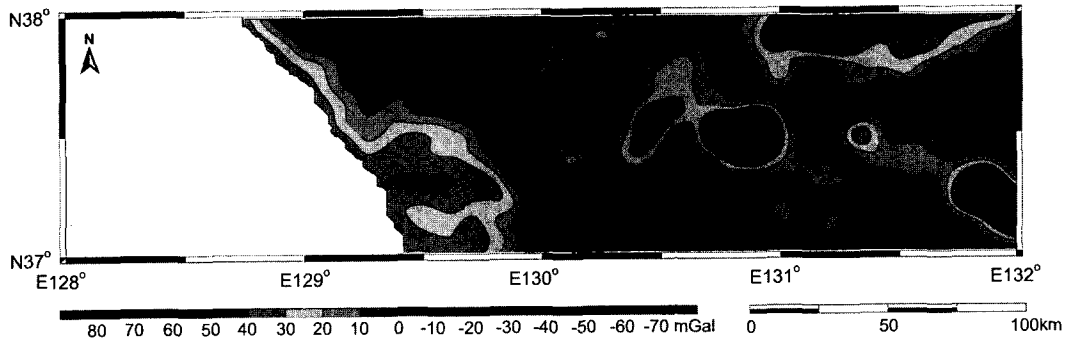


Fig. 4. Free-air gravity anomaly derived from satellite altimetry in the study area.

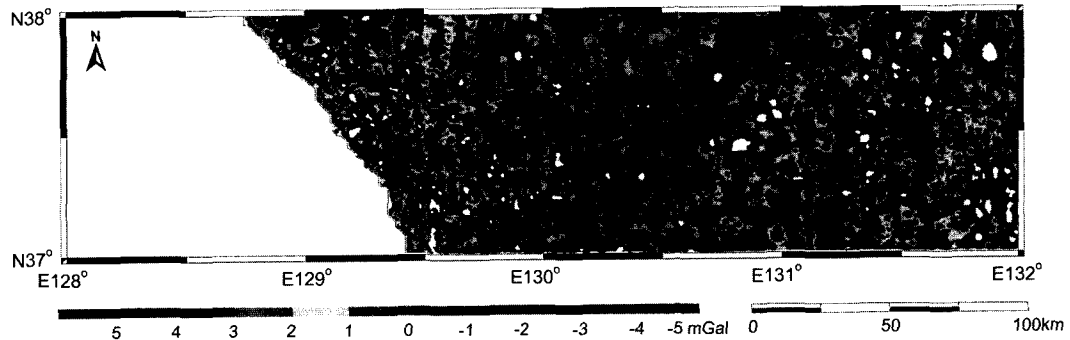


Fig. 5. Components removed by WCA operation.

의 정확도를 계량화하는 것은 어려울 수도 있으나 (Wessel, 1988), 일반적인 조건과 과정 속에서 획득된 선상중력은 본질적으로 위성중력과 비교할 때, 단주기 성분에서 훨씬 좋은 해상도를 갖는다. 따라서, 선상중력과 위성중력의 장점을 결합할 수 있다면 해상중력의 불균질성을 보완하고, 해상 중력 이상의 해상도를 훨씬 높일 수 있을 것이다.

WCA는 두 개 이상의 디지털자료를 파수영역에서 효과적으로 대비하기 위해 개발된 방법으로서, 자료들의 공통된 성분의 추출과 성분의 분석이 가능하다(Von

Frese *et al.*, 1997). 본 연구에서는 선상중력자료에서 나타나는 고주파 잡음 성분을 효과적으로 제거하기 위하여 위성중력자료와의 파수영역에서의 상관관계를 분석하였다. 그리고, WCA보정을 통하여 선상중력자료에서 보이던 왜곡을 제거하였다.

Fig. 3은 국립해양조사원의 중력자료로부터 얻은 중력분포도로서, 선형적인 탐사측선에서 기인되는 자료의 왜곡이 선상중력자료에 반영되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 자료의 왜곡을 효과적으로 제거하고자, 동일한 연구지역에서 측정된 위성중력자료(Fig. 4)와 파

수영역에서 푸리에(Fourier) 변환 후 각 파수별 상관관계가 0 이하인 성분을 제거하였다. Fig. 5는 WCA보정을 통하여 선상중력자료에서 제거된 성분만을 도시한 것이다. 선상중력자료와 위성중력자료간의 상관관계가 전혀 없거나 낮은 성분들이 Fig. 3의 선상중력자료에서 고주파 잡음 성분상에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 성분들을 선상중력자료에서 제거하여 자료분포의 연속성 및 균질성을 향상시킬 수 있었다.

선상중력자료와 위성중력자료 그리고 보정된 선상중력자료의 표준편차는 각각 20.726, 20.728, 20.531로 나타났으며, WCA보정을 통하여 선상중력자료와 위성중력자료의 RMS 오차(Root Mean Square Error)는 보정전의 7.8에서 보정 후 6.6으로 감소하였고, 상관계수는 보정전의 0.003에서 보정 후 0.015로 증가하였다. 또한, 보정 전·후 선상중력자료와 위성중력자료의 총 113,948개의 동일한 위치를 가진 점에서 ± 5 mGal 이내의 차이 값을 보이는 곳이 보정 전 약 56%인 반면, 보정 후에는 약 62%로 상승하였다(Table 1). WCA보정을 통하여 얻어진 free-air 중력이상은 기존의 선상중력에서 보이던 왜곡된 모습은 나타나지 않고 안정된 분포를 보여준다(Fig. 6).

4.2. 육·해상중력자료의 병합

서로 분리되어 각기 다른 조건하에서 측정된 육상중

력이상과 해상중력이상을 병합하는데 있어서 두 측정 위치의 차이로 인한 조건을 만족시켜 주어야 한다. 즉, 육지에서 중력을 측정하는 측정위치 또는 측정고도와 해수면에서 측정하는 해상중력측정과는 같은 측정기준 고도를 가지고 있다고 할 수 없다. 이러한 차이점을 조정하기 위하여 육상지역의 경우 부계보정과 지형보정을 거친다. 따라서, 본 연구에서도 이러한 조건을 만족하는 육상지역의 중력자료와 해상지역의 중력자료를 접합하였다. 또한, 두 자료를 접합하는데 있어서 경계면의 결정이 중요한데, 이는 GTOPO30과 해양지형 자료를 이용하여 연구지역내 해안선을 추출하고, 해안선을 따라 육상 중력자료와 해상 중력자료를 재 추출하는 방법으로 경계면을 결정하였다(Fig. 7(a)).

5. 중력이상 해석

5.1. 파워스펙트럼(Power Spectrum) 분석

심부 지각구조를 규명하기 위하여 연구지역의 중력 이상을 4개 지역으로 나누고, 파워스펙트럼 분석을 실시하였다. 파워스펙트럼 분석을 통하여 계산된 밀도경계면의 평균심도는 Table 2와 같다. 중력자료를 이용한 한반도의 지각구조에 대한 기존의 연구에서 심운택(1971)은 한반도 전체에서 모호면의 심도를 연구하였다. 기 연구결과에 따르면 한반도에서 모호면까지의 평균 깊이는 32.8 km이고, 최대 및 최소 심도는 각각 38.7과 28.5 km, 표준편차는 2.2 km이다. Kwon and Yang(1985)은 한반도 남부의 지각구조 및 지각균형에 대해 연구하였고, 이에 따르면, 남한에서 지각의 평균 심도는 32.3 km이고, 최대 및 최소 심도는 각각 39.3과 26.7 km, 표준편차는 2.8 km이다. 최광선(1986)은 한반도 남부의 중력이상을 연구하였고, 그 결과 모호면의 평균 심도는 35.2 km, 최대 및 최소 심도는 각

Table 1. Quantitative analysis between before and after WCA adjustments.

	shipborne & satellite	after WCA
CC	0.003	0.015
RMS error	7.8	6.6
± 5 mgal	56%	62%

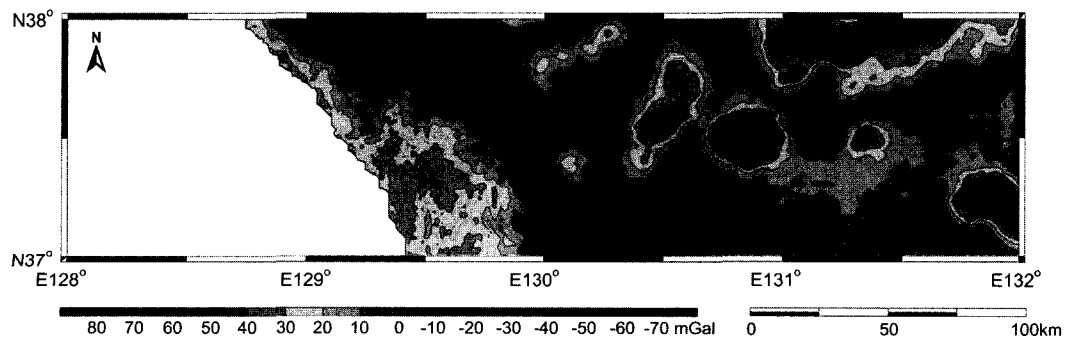


Fig. 6. Shipborne gravity anomalies corrected by WCA.

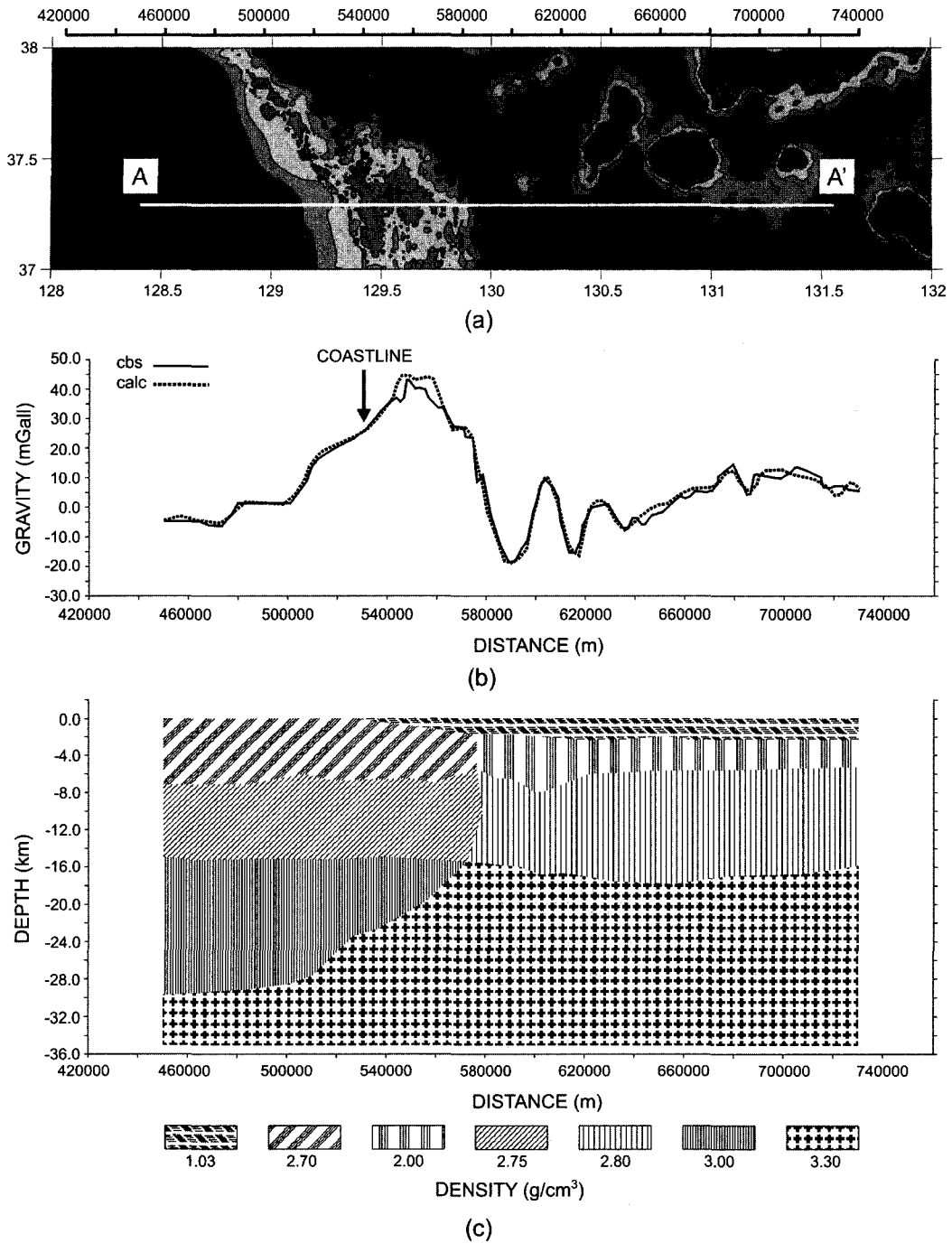


Fig. 7. 2-dimensional modelling along the profile A-A'. (a) is Gravity anomaly map. contour interval is 10 *mGal*. Profile A-A' is selected for 2-dimensional modelling. Solid line in (b) is the observed gravity anomaly and dash line is calculated anomaly from the subsurface density model of (c).

각 38.1과 32.6 km, 표준편차는 1.2 km이다. 최근 북한의 Pak *et al.*(1996)이 중력 이상을 분석하여 얻은

한반도 지각의 평균 심도는 31.2 km이고, 최대 및 최소 심도는 각각 38.4와 26.2 km, 표준편차는 2.7 km

Table 2. Power spectrum results.

Mean depth Region	Depth 1	Depth 2	Depth 3
A	-31.39 km	-12.03 km	-3.5 3km
B	-25.01 km	-8.13 km	-2.51 km
C	-19.01 km	-3.91 km	.
D	-17.59 km	-4.20 km	.

이다. 이밖에 한반도 남부 및 남해안 일부의 중력자료를 측지학적으로 분석한 Kim(1979)은 지각의 평균두께를 26 km로 해석하였다. Kim *et al.*(1994), 박찬홍 등(1996) 및 서만철(1998)은 한반도 동해에서 모호면의 깊이는 울릉분지 중앙부에서 약 16 km로 알고, 한반도 동해안 부근에서는 약 27 km정도로 깊어진다고 하였다. 결과적으로 기존 연구에 의하면, 중력이상에 의한 한반도 지각의 평균두께는 31~35 km 정도이고, 최대 38, 최소 26 km 정도이다.

이상과 같은 연구 결과로 볼 때, 본 연구에서 중력자료의 파워스펙트럼분석으로 얻어진 A, B, C, D지역의 31.39 km, 25.01 km, 19.10 km와 17.59 km의 심도는 대륙과 해양에서의 지각과 맨틀의 경계인 모호면으로 판단되고, A, B지역의 12.03 km와 8.13 km는 대륙지각내 밀도 경계인 콘라드 불연속면으로 판단된다.

연구지역내 모호면으로 판단되는 밀도경계면은 한반도 내륙부에서 전이지역을 지나 동해 울릉분지 쪽으로 갈수록 심도가 점점 얕아지는 양상을 보인다.

5.2. 중력이상의 해석과 2차원 중력모델링

해상 중력이상의 광역적인 변화양상은 해저면의 지형 변화와 유사하다(Park, 1999). 연구지역 내 중력이상은 수심이 2,000 m 이상으로 깊어지는 울릉분지 내부 쪽에서 낮고, 주변의 고해저지형을 따라 높게 나타난다. 또한, 울릉분지의 서측 주변부를 따라 중력이상의 급구배의 변화가 특징적으로 나타나고 있다. 이와 같이 대륙에서 해양쪽을 가로지르면서 특징적으로 나타나는 급구배의 중력변화는 Dehlinger(1978)에 의해 제안된 대로 대륙 주변부에서 알려진 전형적인 지각 가장자리 효과로 판단된다. 대륙사면의 최하부 지역에서 나타나는 낮은 중력이상은 기반 함몰대와 기반암 상부의 두꺼운 퇴적층과도 관련이 있다. 이와 같은 현상들은 Kim *et al.*(1994), 박찬홍 등(1996), 서만철 등(1998)이 기존의 연구를 통해 제안한 지각 두께가 얇아지고, 모호면이 현격하게 높아지는 것과

관련이 있다.

파워스펙트럼 분석에 의해 구한 심도는 밀도경계면까지의 평균 심도이므로 좀 더 정량적인 해석을 위해 한반도 동해 연변부를 중심으로 동-서 방향의 임의의 축선 A-A'을 설정하고, 3차원을 2차원으로 가정하여 모델링을 실시하였다. Fig. 7은 UTM좌표 450,000E~730,000E, 4,130,000N에서의 모델링 결과이다. 결과에 의하면, 모호면의 심도는 한반도 내륙지역에서는 약 33 km~35 km이며, 동해 연변부에서는 18 m~28 km로 폭넓게 나타날 뿐만 아니라 이 지역에서의 중력이상은 지각 가장자리 효과로 인한 급구배의 중력변화가 보이고, 모호면의 심도도 현격히 높아지고 있다. 울릉도 남부 해양에서의 모호면은 약 16 km~17 km로 한반도 내륙지역과 대륙주변부와는 수치상으로 많은 차이를 보인다.

6. 결 론

광역적인 중력자료를 이용하여 한반도 중부 대륙 및 해양이 접하는 지역에서의 지구구조적 특징을 연구하였다. 연구지역인 대륙 연변부에서의 심부 지각구조를 파악하기 위하여 육·해상 및 위성 중력자료와 수심자료를 사용하였다.

육상 중력이상과 해상 중력이상을 병합하기 위한 전처리 과정으로 WCA 보정을 실시하였다. WCA보정을 통하여 선상중력이 갖는 높은 해상도의 단주기 성분을 손실하지 않고서, 연속적이고 균질한 자료분포의 장점을 갖는 위성중력의 성향을 효과적으로 반영한 것으로 판단된다. 안정적인 장주기의 위성중력자료를 이용하여 축선간 혹은 조사단위간 나타날 수 있는 해상지역의 선상 중력자료를 보정함으로써 중력분포의 해상도를 향상시킬 수 있었다.

육상 부계 중력이상과 보정된 해상 free-air 중력이상을 측정위치에 따른 지형적인 차이를 만족 시켜주는 상태에서 병합하고, 병합된 중력이상에서 대륙주변부에서 특징적으로 나타나는 지각 가장자리 효과로 판단되는 급구배의 중력변화를 확인할 수 있었으며, 대륙사면의 최하부에서 기반 함몰대와 두꺼운 퇴적층에 기인하는 낮은 중력이상이 관찰된다. 또한, 울릉분지 내부쪽에서의 중력이상의 증가는 지각두께가 얇아지고 모호면이 현격하게 높아지는 것과 관련이 있다고 판단된다.

지형적인 특징을 반영하여 분리된 4개 지역에서의 각각의 파워스펙트럼 분석을 통하여, 모호면까지의 심도로 판단되는 -39.39 km, -25.01 km, -19.01 km,

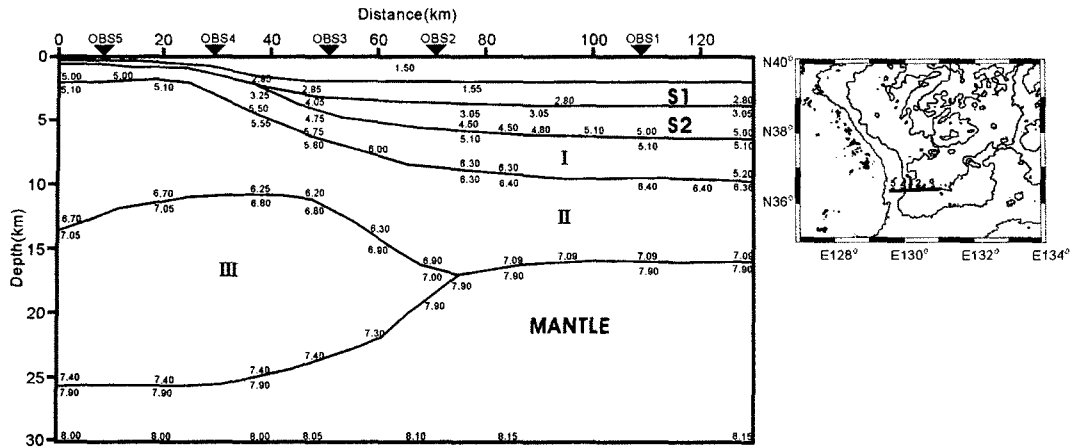


Fig. 8. Crustal velocity model and location of deep seismic sounding line(Kordi, 2000). Numbers in model are seismic P wave velocities (km/s). Numbers in map indicate ocean bottom seismometer positions.

-17.59 km의 밀도 경계면의 평균심도를 산출하고, 육상 지역에서 콘라드 불연속면으로 판단되는 -12.03 km와 -8.13 km의 평균심도를 산출하였다. 파워스펙트럼 분석 결과에 따르면, 모호면으로 판단되는 밀도 경계면은 한반도 내륙부에서 대륙주변부를 지나 동해 울릉분지 쪽으로 갈수록 심도가 점점 높아지는 양상을 보인다.

보다 정량적 해석을 위하여 수행된 지하 밀도 구조 모델링으로 부터 계산된 모호면의 심도는 한반도 내륙 지역에서는 약 33~35 km이고, 대륙주변부에서는 18~28 km로서 한반도 내륙지역에 비해 낮아진다. 이와 같은 구조적 특성은 울릉분지의 주변부를 따라 나타나고 있는 중력변화에서 잘 설명되어 진다. 울릉도 남쪽 해역에서의 모호면은 약 16~17 km로 대륙쪽의 모호면 깊이보다 훨씬 낮아진다. 중력자료로부터 구한 지각모델의 결과는 인근 지역에서 이루어진 탄성파탐사를 통한 지각모델링 결과와 매우 유사하게 나타났으며(Fig. 8), ODP와 같은 조사가 추가로 이루어지면 이 지역에 대한 좀 더 정확한 구조가 밝혀질 수 있을 것이다.

사 사

이 연구에 사용된 해상지역에서의 선상중력자료는 국립해양조사원에서 제공하였음을 명기하며 이에 감사한다.

참고문헌

강필중 (1996) 한반도 남부의 부계 중력 이상도

- (1:1,000,000). 한국자원연구소.
 국립해양조사원 (1998) 한국 중부 중력이상도 (1:500,000).
 박찬홍, 김한준, 양철수, 석봉출, N. Isezaki (1996) 중력 및 해저면진진계탐사 자료에 의한 울릉분지의 지각구조 연구. 지질학회지, v. 32, p. 276-290.
 서만철, 이광훈, 손호웅 (1998) 동해울릉분지의 지구조 및 성인에 관한 지구물리학적 연구. 바다, v. 3, p. 34-44.
 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 지질학과.
 한국해양연구원 (2000) 동해 기후변동 예측과 진화 연구. 한국해양연구원 보고서.
 Campbell, S. (1995) Southeast Asia Gravity Project. Technical Rept., GETECH (Geophys. Expl. Tech.), Department of Earth Sciences, University of Leeds.
 Dehlinger, P. (1978) Marine gravity. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
 Kim, H.J., H.T. Jou, C.H. Park, J.K. Hong, and T.W. Chung (1994) The Crustal Structure of the Ulleung Basin by Tau-sum Inversion of Ocean bottom Seismometer data. Korean Jour. of Petrol. Geol., v. 2(1), p. 39-42.
 Kim, S.K. (1979) Geodetic and geophysical analysis of gravity data in Korea. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 12, p. 17-28.
 Kwon, B.D. and Yang, S.Y. (1985) A study on the crustal structure of type southern Korean peninsula through gravity analysis. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 18, p. 309-320.
 Lee, D.S. (1987) Geology of Korea. Geological Society of Korea, Kyohak-sa, Seoul, p. 514.
 Pak, C.S., Kim, J.H., and O, I.T. (1996) Geophysical field and deep structure of crust. In Paek, R.J., Kang H.G. and Jon, G.P.(eds.) Geology of Korea, p. 451-460.
 Park, C.H. (1998) Crustal structure and evolution of the Ulleung Basin in the east sea of Korea(the Japan Sea) by deep penetrating seismic refraction, reflection, and

- potential field data. Ph. D. Dissertation, Chiba University, p. 10-217.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F. (1997) Marine gravity anomalies from Geosat and ERS-1 satellite altimetry. *J. Geophys. Res.*, v. 102(B5), p. 10,039-10,054.
- Schluter, H.U. and Chun, W.C. (1974) Seismic surveys off the east coast of Korea. *CCOP Technical Bulletin*, v. 8, p. 1-16.
- Smith, W.H.F., and D.T. Sandwell (1997) Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, v. 277, p. 1957-1962.
- Tsuboi, C. (1983) *Gravity*. George Allen & Unwin Ltd.
- 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.
- Wessel, P. and A.B., Watts (1988) On the accuracy of marine gravity measurements. *Jour. Geophys. Res.*, v. 93, p. 393-413.
-

2002년 8월 5일 원고접수, 2002년 10월 24일 게재승인.