

포텐셜 자료를 이용한 울릉분지와 독도 주변 지체구조 연구

박계순¹ · 박준석^{2,*} · 권병두² · 김창환³ · 박찬홍³

¹한국지질자원연구원 자원탐사개발연구실, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92

²서울대학교 지구과학교육과, 151-742, 서울시 관악구 신림동 관악로 599

³한국해양연구원 동해연구소, 426-744, 경기도 안산시 상록구 사2동 1270

Tectonic Structure Modeling around the Ulleung Basin and Dokdo Using Potential Data

Gyeseon Park¹, Junsuk Park^{2,*}, Byung-Doo Kwon², and Chan-Hong Park³

¹Exploration Geophysics and Mining Engineering Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

³Korea Ocean Research and Development Institute, Gyeonggi 426-744, Korea

Abstract: The East Sea including the area of this study is identified as a typical back-arc sea located in the backside of the Circum-Pacific volcanic and earthquake belt. Previous studies reported that the East Sea has begun to open by tensile force and formed its current shape. In this study, we investigate the regional tectonic structure of the East Sea using ship-borne gravity, magnetic, and satellite gravity data. The result of three-dimensional depth inversion shows that Moho depth of the study area is approximately 13-25 km and inversely proportional to the thickness of the crust. In addition, as approaching to the center of the Ulleung Basin (UB), the thickness of the crust of the UB becomes thinner due to the extension caused by tensile force which had opened the East Sea.

Keywords: Ulleung Basin, Potential data, Moho discontinuity

요약: 연구지역을 포함하는 동해는 환태평양 화산 및 지진대 뒤쪽에 형성된 전형적인 후열도해이다. 기존 연구에 의하면 동해는 인장력을 받아 열리기 시작하여 현재 동해의 모습을 갖추었다고 알려져 있다. 이번 연구에서는 이러한 동해의 지체구조 특성을 연구하기 위하여 선상에서 측정된 중·자력 자료 및 인공위성 중력 자료를 이용하여 울릉분지와 독도 주변 동해 지역의 지체구조 연구를 수행하였다. 3차원 심도역산 결과, 연구지역의 모호면은 13-25 km 정도의 심도를 갖으며 지각의 두께와 반비례하는 경향을 보여주었다. 또한, 동해의 확장과 함께 생성된 울릉분지는 인장력으로 인해 그 중심으로 갈수록 지각 두께가 감소하는 특성을 확인할 수 있었다.

주요어: 울릉분지, 포텐셜, 모호면

서론

동해는 지리적으로 한국, 일본, 러시아에 의해 둘러싸인 반폐쇄형 바다로서 중심 지역의 수심이 2000 m가 넘는 대양의 성격을 갖는다. 판구조론의 관점에서서는 유라시아판, 태평양판, 필리핀판 등으로 경계

지어지고, 일본 열도에 의해 태평양과 분리되어 유라시아 판내에 위치한다. 동해는 울릉분지, 일본분지, 그리고 야마토분지를 포함하고 있으며, 이들 분지는 해령과 해저대지들로 구분되어 독립적으로 발달해 있다(Jolivet et al., 1991). 이러한 분지들의 형성 과정을 이해하기 위하여 동해 성인에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 동해 성인에 관하여 학자들마다 다소 상이한 견해를 보이고 있는데, 울릉분지를 포함한 동해의 분지들은 후열도분지(back-arc basin)이고, 이 중 울릉분지와 야마토분지가 대륙지각인지 해양지

*Corresponding author: poohjs03@hotmail.com
Tel: 82-2-880-4069
Fax: 82-2-874-3289

각인지에 대한 부분은 현재까지 논의되고 있다 (Jolivet et al., 1991; Kim et al., 1994; Park, 1998).

이번 연구에서는 동해 성인 연구의 일환으로 울릉 분지와 독도 부근 지역의 지각 구조와 모호면의 깊이를 해석하고자 한다. 하부지각과 맨틀의 경계 부분인 모호면은 지각의 구조를 해석하는 기본 자료이며, 동해의 성인 연구에 중요한 단서를 제공할 수 있다. 특히 독도와 울릉분지 지역은 일본과의 영해 분쟁 및 가스개발과 관련하여 관심이 높은 지역이기도 하다. 현재 수행되고 있는 많은 물리탐사 기법 중에서 모호면 심도까지의 정보를 제공해 줄 수 있는 것은 해저지진기록계(Ocean Bottom Seismometer; OBS), 포텐셜 탐사, 자기지전류탐사 등이 있으나 해양의 특성상 그 접근성이 용이하지 않다. 연구 지역의 모호면에 대한 연구 자료를 살펴보면, OBS를 이용한 울릉분지 중앙부에서의 모호면의 깊이가 약 16 km로 해석된 바 있으며(석봉출 외, 1992; Kim et al., 1994), 서만철과 이원국(1998)은 미국 국립지구물리 자료센터(National Geophysical Data Center; NGDC)의 수심자료와 아시아 지질자원 위원회(Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia; CCOP)의 퇴적층 두께 자료를 Airy 설을 바탕으로 한 Airy-Heiskanen 지각균형설(Dehlinger, 1978)에 적용하여 울릉분지 지역의 모호면 깊이를 계산하였다.

이번 연구에서는 해양이라는 연구 특성상 많은 정보를 획득하기 어렵기 때문에 자료 획득이 상대적으로 용이한 포텐셜 자료를 이용한 연구를 수행하였다. 이번 연구에서는 독도 부근의 선상 중·자력 자료와 Scripps Institution of Oceanography(University of California, San Diego)에서 제공하는 인공위성 중력 자료 및 NGDC에서 제공하는 퇴적기반암의 심도 자료를 이용하였다. 중·자력 탐사기술은 다른 지구물리학 탐사 기법에 비하여 신속, 저렴하며 분해능이 낮지만, 가탐심도가 깊어 광역 탐사에 적합하게 사용될 수 있다. 우리나라에서도 광역 중력 탐사나 광역 항공 자력 탐사는 오래 전부터 수행되어 기술적으로 성숙 단계에 이르고 있다. 그러나 해양에서의 포텐셜 자료 해석은 해수와 해저 지형이라는 특이성 때문에 해상도 및 감도가 육상에 비해 현저히 낮은 단점이 있다. 이번 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 연구 지역의 선형 연구 자료인 NGDC의 퇴적기반암 자료 정보와 중력 자료의 정밀한 해석을 위해

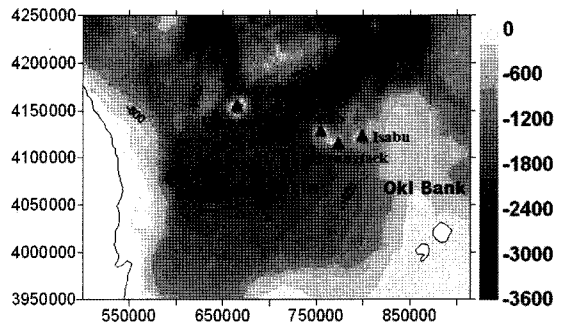


Fig. 1. Topography map and major sea mounts (triangles) of the study area.

개발된 3차원 지형 역산 기법(박계순 외, 2005)을 응용하여 해저 지형에 의한 중력 효과를 보정하고 정밀한 3차원 지각 및 모호면 등의 지체구조 해석을 수행하고자 한다.

연구지역의 지질 및 지형

Fig. 1에 보여지고 있는 대상 연구지역을 울릉도와 독도가 위치한 울릉분지를 중심으로 살펴보면 동해의 남서쪽에 위치한 울릉분지는 서쪽으로 한국, 동쪽으로 일본의 혼슈, 북쪽과 남쪽은 각각 한국대지 및 야마토 라이스, 대한해협 등에 의해 경계 지어진다. 수심 약 2,000 m를 경계로, 퇴적층이 두껍게 쌓여있는 평탄한 해저면 위에 서쪽부터 울릉도, 안용복 해산, 독도 해산, 심홍택 해산, 이사부 해산의 화산체와 북서쪽의 한국대지, 남동쪽의 오키뱅크의 해저고원이 솟아 있다. 한국대지와 독도해산을 포함한 동쪽의 해저대지는 한국해저간곡으로 인해 갈라져있고 울릉도와 한국대지도 울릉 동해저간곡으로 나뉘어져 있다. 동쪽의 세 해산은 상단부가 평평한(flat-topped) 해저 화산 형태이며, 평평한 부분은 해수면 아래 깊이가 200 m에 존재한다.

울릉분지의 기반암에는 주로 울릉분지 형성시기에 생성된 정단층이 우세하게 나타나는 반면, 기반암 상부의 퇴적층 내에는 화산활동에 의한 정단층, 화산돛 및 화산수평맥 등이 우세하게 관찰된다. 또한 화성암을 포함하는 퇴적 기반암은 울릉도-독도간 해역에서 천부에 있는 반면 울릉도-독도간 해역 남쪽의 울릉분지 중심부로 가면서 급격히 깊어짐과 동시에 그 상부가 두꺼운 퇴적층으로 피복되어 있다(한상준 외, 1997).

동해의 남서쪽 해역이자 울릉분지의 북쪽 경계부분에 위치하고 있는 독도는 해수면 위로 약 100 m 정도 솟아있는 두 개의 작은 화산섬으로 이루어져 있다. 주로 알칼리 현무암의 분원 마그마로부터 분화된 조면암(trachyte) 및 조면안산암(trachyandesite)으로 이루어져 있고 현재 해수면 위에 나타나는 독도는 화산의 남서쪽 화구륜(crater rim)에 해당하는 것이며 독도를 생성시킨 화도는 독도로부터 북동쪽으로 수백 m 떨어진 곳에 위치한다고 보고되었다(손영관과 박기화, 1994; Sohn, 1995). 학자들마다 다소의 차이는 있지만 독도는 대체로 신생대 제3기의 초기 마이오세에서 후기 플라이오세에 걸친 여러 번의 화산분출에 의해 생겨났다고 보고되고 있다. 그리고 독도의 동쪽에 위치한 두 개의 해산 즉, 심홍택 해산, 이사부 해산은 독도보다 먼저 생겨났으며, 그 중에서도 더 동쪽에 위치한 이사부해산이 가장 먼저 생겨났다는 점에서는 학자들 간에 의견의 일치를 보고 있다. 그러나 독도의 정확한 생성시기에 대해서는 학자들마다 의견이 분분하며, 특히 독도의 동쪽에 위치한 두 개 해산의 정확한 생성시기에 대해서는 더욱 다양한 의견들이 존재한다.

자료의 획득

이번 연구에 이용된 자료는 현재까지 한국해양연구원에서 실시한 동해 해양지구물리탐사로부터 획득되었다. 이는 독도와 울릉도 부근 해역으로 동경 130.5-132.6°, 북위 37-37.8°에 해당되며, 중력 및 자력 자료를 모두 사용하였다. 또한, 이를 검증하고 광역적인 중력 이상을 확인하기 위해 동경 129.7-132.8°, 북위 35.6-38.5°의 인공위성 중력 자료를 사용하였다. 인공위성 중력 자료는 UCSD(University of California San Diego)의 Scripps Institution of Oceanography에서 ERS-1, Geosat ERM과 Geosat-GM 인공위성 해수면 고도계 자료로부터 산출한 중력 자료를 사용하였다. 이 자료는 해수면 상의 후리어어(free-air) 이상이며, 0.1 mgal 단위로 약 1.5 km의 간격을 가지는 격자 형태의 자료로 제공된다.

중력 자료 처리 및 해석

후리어어 이상

울릉도, 독도 부근의 자료는 선상 중력 자료로 계

기보정, 위도보정, Eötvös 보정을 거쳐 Fig. 2a에 도시된 후리어어 중력 이상을 획득 하였다. 이 지역은 퇴적층이 두껍게 분포하고 있으며, 퇴적층은 중력 이상에 큰 영향을 끼치지 못하기 때문에 대체적으로 완만한 저중력 이상대를 나타내고 있다. 반면, 울릉도, 안용복 해산, 독도 해산, 심홍택 해산, 이사부 해산과 같은 화성기반암이 돌출한 지역에서는 고이상대가 나타나고 있다. 20 mgal을 기준으로 저이상대는 평균 수심 약 2,000 m 이하의 해저면 기저부를 잘 나타내고, 고이상대는 그 보다 지형이 높은 한국대지나 독도 동쪽 오키뱅크 인근의 해저고원을 나타내는 등, 후리어어 이상은 해저지형의 형태를 비교적 잘 반영하고 있다. 특히 독도 해산, 심홍택 해산, 이사부 해산들은 3차원 지형도에서 볼 수 있는 해산 사면의 골 모양이 후리어어 중력 이상도에 나타날 만큼 지형효과를 잘 반영하고 있다.

부계(bouguer) 이상

해양에서의 중력 자료는 해수와 해저 지형이라는 특이성 때문에 해상도 면에서 육상에 비해 현격히 낮은 제한점이 있다. 그래서 해양에서의 중력 자료 해석은 높은 해상도를 요구하는 블록 역산법 보다는 지각, 모호면 등의 두께를 구하는 층상 해석의 비중이 높은 것이 현실이다(최광선 외, 2000).

이번 연구에서는 이러한 해양 중력자료의 단점을 극복하기 위해서 3차원 중력 지형역산 기법(박계순, 2005)을 응용하여 해수를 블록 모델로 구성하여 중력 효과 보정하였다. 즉, 해양 중력 탐사자료 해석에서 해수의 영향을 계산하기 위하여 해저지형을 다중평면 방정식(multiquadric equation)(권병두 외, 1990)을 이용 모델화하고 이를 부계 보정에 활용하였다. 부계 보정 처리 시 사용한 지각의 암석 평균 밀도는 2.8 g/cm³, 해수의 밀도는 1.03 g/cm³이다. 이 수치는 울릉 분지에서 수행된 단성과 굴절법 탐사결과 얻은 속도자료로부터 산출하였다(박찬홍 외, 2002).

위 처리 과정을 거쳐 Fig. 2b의 부계 이상이 획득되었다. 이는 후리어어 이상에서 해저 지형에 의한 중력 효과를 보정한 값이다. 전체적으로 보면, 두꺼운 퇴적층이 존재하는 분지 중심과 울릉도와 독도 사이의 한국 해저 간극에서 높은 이상을 나타낸다. 이는 저밀도체인 두꺼운 퇴적층에 의한 질량 결손의 효과보다는 상승된 맨틀에 의한 고밀도체 효과가 보다 크게 나타나기 때문이다. 한국대지와 오키뱅크

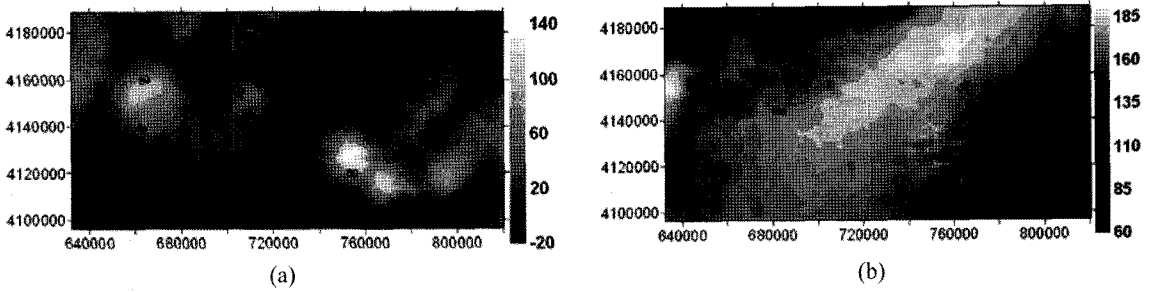


Fig. 2. Ship-borne free-air (a) and bouguer (b) anomaly maps of the study area.

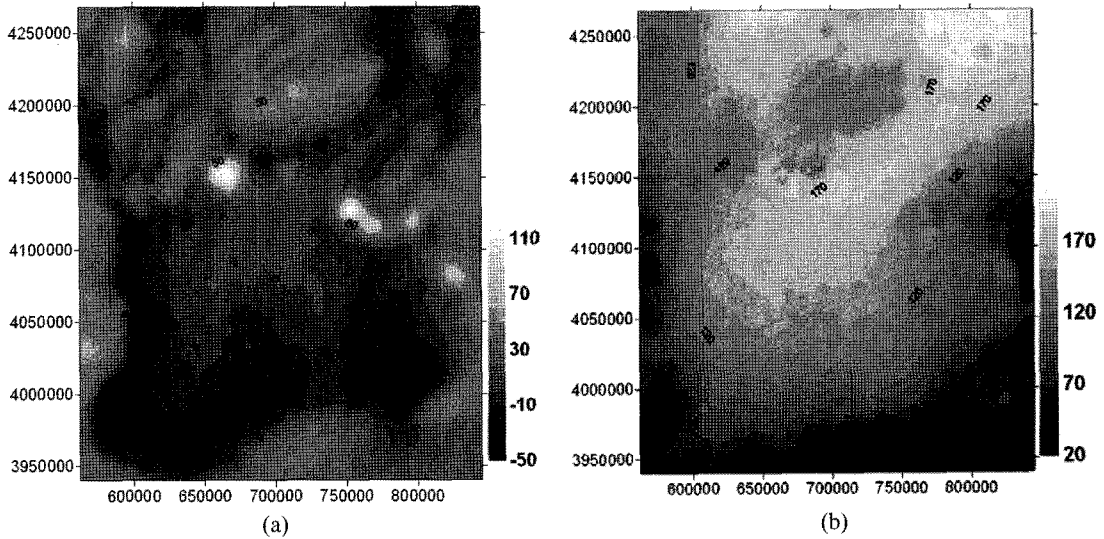


Fig. 3. Free-air (a) and bouguer anomaly (b) maps of the satellite gravity data of the Ulleung Basin.

쪽으로 갈수록 지각이 두꺼워져 낮은 이상을 나타내고 울릉도의 범위가 확인되며 동쪽에 존재하는 3개의 해산 근처는 복잡한 구조를 나타내고 있다. 이는 중력 측정 위치가 해산의 외곽부에 한정되어 해산위치에서의 중력값을 획득하지 못하였기 때문이다.

Fig. 3b의 인공위성 중력 자료를 이용한 광역 부계 이상을 보면 분지 중앙부에서 고이상값을 나타내고 전체적으로는 분지 북쪽으로 갈수록 중력이상값이 증가하는 패턴을 보이고 있다. 이는 과거 인접해 있던 대륙지각의 조각으로 해석되고 있는 한국대지와 오키뱅크 사이로 맨틀이 상승한 효과로 추정된다. 또한, 분지중앙부에서 퇴적층이 두꺼움에도 불구하고 높은 중력이상을 갖는 특성을 고려하면 울릉 분지의 생성 과정도 이와 유사한 기작으로 설명 가능하다.

자력 자료 처리 및 해석

총자력도 및 자기 이상도

이번 연구에서는 선상 자력탐사를 통해 획득된 자료인 Fig. 4a의 총자력값을 일변화 보정, 고도 보정, 수평위치 보정을 거친 후, 전 지구적인 자력 패턴을 계산한 IGRF값을 통해 Fig. 4b의 자기 이상 분포를 획득하였다. 자기 이상도를 보면 해산이 위치한 지역에서 큰 이상값을 보여주고 있으며, 이들을 제외한 지역은 낮은 이상분포를 가지며 넓게 분포되어 있다. 이는 후리아어 중력 이상도의 경우와 마찬가지로 이 지역에 넓게 분포하고 있는 두꺼운 퇴적층의 영향으로 해석할 수 있다.

각 해산들을 살펴보면, 울릉도 지역에서는 음의 이

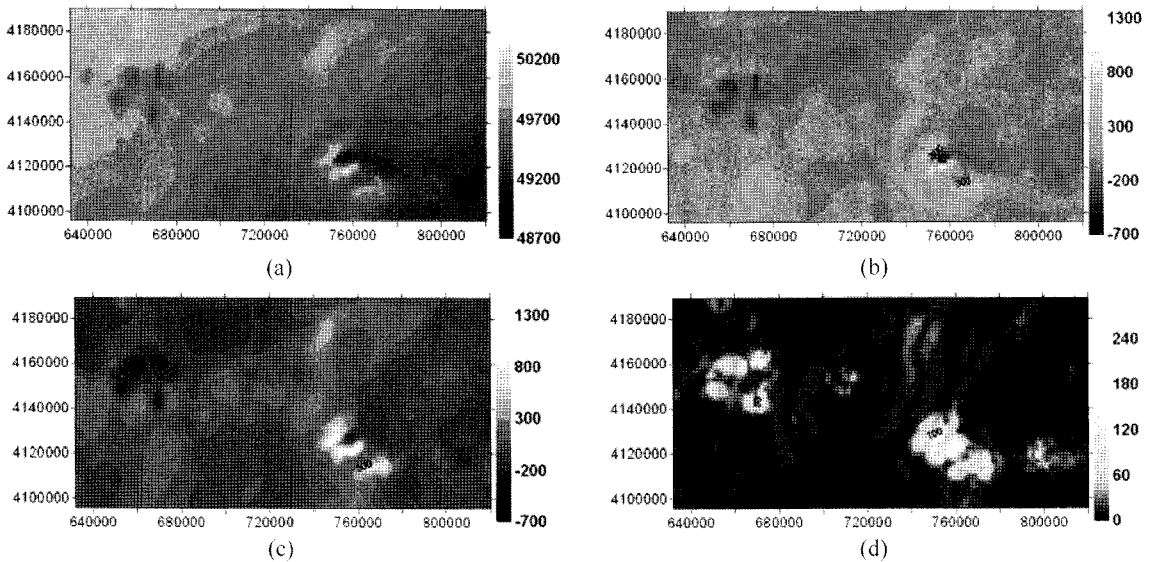


Fig. 4. Total magnetic intensity map (a), IGRF magnetic anomaly map (b), RTP magnetic anomaly map (c), and analytic signal map of magnetic anomaly (d).

상이 크게 나타나고 있으며, 독도해산은 해산의 남서쪽을 고 이상대가 감싸고 있으며, 동쪽에서는 음의 이상대가 선형으로 들어오고 있는 복잡한 양상을 나타낸다. 이는 독도가 남서쪽 화구륜의 일부이며 독도를 만든 화도(volcanic vent)는 독도에서 북동쪽으로 수백 m 떨어진 곳에 위치할 것이라고 추정된 기존 연구(Sohn, 1995) 결과와 일치하고 있다. 또한 독도 지역 근처에서 음, 양의 이상이 동시에 나타나는 것은 독도 해산이 한 번에 분출하여 생성된 것이 아니라 여러 시기에 걸쳐 여러 번 분출했을 가능성을 보여준다. 독도 해산의 음의 이상대는 선형으로 동쪽으로 이어지며 심홍택 해산의 북쪽에 나타난다. 반면 남쪽에는 양의 이상대가 나타나며 두 쌍극자는 거의 동서 방향으로 선형의 형태를 하고 있다. 더 동쪽으로 가면 자기 이상 값이 작아지며, 중력 해석과 마찬가지로 이사부 해산 쪽으로 갈수록 생성시기가 오래되었고 풍화나 2차 변형의 결과로 인해 저자기 이상대가 미약하게 나타나고 있는 것으로 추정된다.

자극화 변환 (Reduction to the pole)

중력 이상과 달리 자력 이상의 경우에는 자력이상 값의 분포가 이상체의 자화방향과 위치뿐만 아니라 지자기장의 자화방향에 따라 달라질 수 있다. 따라서 보다 효과적인 해석을 위해 편각이 0°이고 북각이 90°인 자극에서 측정된 값으로 환산하는 보정을 수행

하게 된다. 이와 같이 수직자화에 의한 이상으로 변화시키는 과정을 자극화변환(Reduction to the pole; RTP)이라고 한다(Blakely, 1995). 이번 연구지역의 자료는 독도를 기준으로 편각 -7.9°와 북각 52.5°를 적용하여 자력 이상에 대한 자극화변환을 수행하였다. Fig. 4c에 보여지는 자극화 변환된 이상도를 살펴보면, 울릉도의 경우 둘러싸고 있던 음의 이상치 외에 양의 이상치가 나타나고 저자기 이상으로 잘 구분되지 않았던 안용복해산과 이사부 해산의 위치가 잘 구분되고 있다. 안용복 해산은 울릉도 동쪽의 음의 이상대로 나타나고 있으며, 해산 양쪽에 양의 이상대가 발달되어 있고, 이사부 해산은 최정상부가 양의 이상대이고 동쪽으로 음의 이상대가 발달되어 나타나고 있다.

아날리틱 신호(analytic signal) 분석

자력탐사 자료는 지자기장의 방향 및 자성체의 자화 방향에 따라 자료의 변화가 나타나기 때문에 자료 해석 시 세심한 주의가 필요하다. 이러한 이유로 자력이상의 수평, 수직 미분에 근거한 암체의 경계 및 심도를 효과적으로 결정하기 위한 여러 기법들이 개발되었는데, 보편적으로 이용되는 방법이 아날리틱 신호를 이용한 자력이상 해석 기법이다. 구조의 경계 위치를 파악하는데 있어서 아날리틱 신호 분석이 가지는 가장 큰 장점은 지구 자기장 요소와 자성체의

자화방향 등에 관계없이 결과를 도출할 수 있다는데 있다. 아날리틱 신호의 절대값은 수평 방향의 기울기와 수직 방향의 기울기로 표현될 수 있고, 구조의 경계에서 종 모양 형태의 양상을 띠게 된다.

아날리틱 신호는 M 을 자력이상, \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} 방향의 단위벡터를 라고 할 때 식 (1)과 같이 정의된다 (Roest et al., 1992; Nabighian, 1974).

$$A(x,y) = \left(\frac{\partial M}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial M}{\partial y} \hat{y} + i \frac{\partial M}{\partial z} \hat{z} \right) \quad (1)$$

아날리틱 신호의 절대값은 signal의 Energy envelope 이라고도 불리며 하나의 수직 미분과 두 개의 수평 미분 값을 각각 제곱 시킨 후 더한 값의 합의 제곱근으로 식 (2)와 같이 정의된다.

$$|A(x,y)| = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right)^2 \right)} \quad (2)$$

이상 값이 수직경계면에 의한 것일 경우, 즉 직사각주 모양의 이상체가 지하에 존재할 때, 자화방향이 나 잔류자기에 관계없이 이상체의 경계에 해당하는 곳에서 최대값을 갖는다. 이때 측정되는 자력 값은 자화방향에 따라 차이를 보이지만 각 방향의 미분치를 구해 제곱한 후 더하면 이상체의 경계에서 최대 값을 갖고 이 최대치를 이용하여 자력 이상체의 위치를 알아낼 수 있다.

이번 연구 지역에 아날리틱 신호 기법을 적용한 결과는 Fig. 4d에 나타내었다. 연구지역의 천부는 두꺼운 퇴적층과 화산체로 구분되며 화산 분출로 생성된 울릉도, 안용복해산, 독도해산, 심홍택해산, 이사부 해산의 경계가 잘 나타나고 있다. 또한, 독도 해산 북쪽의 남북 방향 신호는 판의 신장에 따라 신장 방향의 수직하게 상승한 마그마 운동에 따라 생성된 화성암체에 의한 효과로 추정된다.

모호면 역산과 3차원 모델 구현

퇴적층 보정

이번 연구 지역은 퇴적층의 두껍게 발달한 분지 지형으로 퇴적층에 의한 패턴을 분리 하는 것이 중요하기 때문에 퇴적층을 분리 보정하고자 하였고 이를 위하여 미국의 국립 해양 대기청(NOAA)의 NGDC (National Geophysical Data Center)에서 제공하는 퇴적층 심도 자료를 사용하였다. 연구에 이용된 자료는

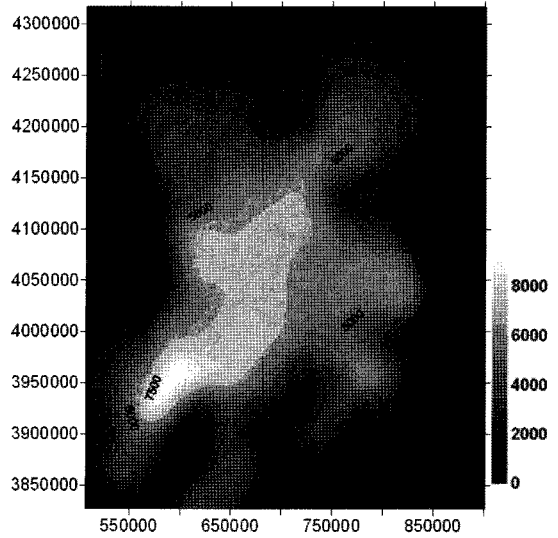


Fig. 5. Total sediment thickness map of the Ullung Basin edited from NGDC data sets.

Fig. 5에 나타내었다. 이 퇴적층 두께 자료는 5' 간격으로 격자화 되어있고, 이 자료들은 여러 프로젝트를 통해 측정된 탄성과 탐사 자료와 Ocean Drilling Program(ODP), Deep Sea Drilling Project (DSDP)의 결과들과 그 동안 발간된 등층후선도(isopach maps)들이 통합되어 만들어진 것이다.

중력 자료 처리 및 해석에서 해수층에 의한 중력 효과를 보정하여 부계 이상 값을 구하였으므로 각 층 내부의 수평 밀도변화보다 층간의 수직밀도 차이가 크다는 점을 고려할 때 중력 이상의 주원인은 퇴적층 및 지각과 모호면 경계의 심도변화로 생각할 수 있다. 따라서 퇴적층에 대한 분리 보정을 실시하고자 하였으며, 이번 연구 지역의 수심 자료로부터 NGDC의 퇴적층 두께자료를 빼 줌으로써 퇴적 기반 심도를 구하였다. 수심을 블록 상부 깊이, 퇴적 기반 심도를 블록 하부 깊이로 설정하고 3차원 지형 역산 방법을 응용하여 퇴적층 효과를 보정하였다. 퇴적층의 효과를 제거한 부계 이상값은 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 도시하였다. 이에 사용된 밀도값은 퇴적층의 평균 밀도와 탄성과 자료로부터 추정된 하부 지각의 밀도 값(박찬홍 외, 2002)의 차이 값으로 설정하였다. 또한 각 화산체들 상부에는 퇴적층이 거의 존재하지 않기 때문에 자력 경계와 수심을 고려하여 블록 모델을 설정하였다.

퇴적층 보정 후의 중력 이상은 분지 중심부에서

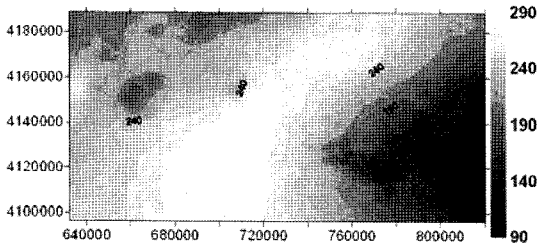


Fig. 6. Bouguer anomaly map after eliminating the gravity effects of sediments using the ship-borne data. The sediment layer (2.365 g/cm^3) is replaced with the crust (2.8 g/cm^3).

더 높게 나타난다. 이는 두꺼운 퇴적층 지역의 지각이 주변부에 비하여 더 많이 신장되어 모호면이 높게 형성되어 있기 때문에 나타나는 특성으로 해석할 수 있다.

모호면 심도 역산

해수와 퇴적층을 3차원 모델로 구성하여 퇴적층의 영향을 보정하였고, 그 결과 중력 이상도는 지각과 맨틀에 의한 영향을 잘 보여주고 있다. 다음으로 보정된 자료를 이용하여 3차원 심도 역산을 수행하였다. 이때 초기 값은 파워스펙트럼(power spectrum)을 통해 구한 평균 심도를 기준으로 사용하였다.

파워스펙트럼 분석: 포텐셜 자료의 파워스펙트럼 분석은 지하 구조의 두께를 결정하는데 유용한 방법이다. Tomoda(1960)는 지하 물질의 밀도나 지각평형 등 지하에 존재하는 물성의 차이에 대한 가정 없이 지하 불연속면의 평균 깊이를 산출해 낼 수 있는 파워스펙트럼 분석법을 개발하였다. 측선을 따라 획득된 M개의 지표면 중력 이상 자료는 Fourier 급수로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta g(x) = \sum_{n=0}^{M-1} \left(A_n \cos \frac{2n\pi}{L} x + B_n \sin \frac{2n\pi}{L} x \right) \quad (3)$$

여기서 A_n 과 B_n 은 Fourier 상수이고 n은 주파수 단위이다. L은 측선의 길이가 된다.

이렇게 구해진 $\Delta g(x)$ 의 파워스펙트럼은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_n = A_n^2 + B_n^2 = (2\pi G \Delta \rho)^2 \cdot e^{-4n\pi D/L} g(C_n^2 + D_n^2) \quad (4)$$

여기서, 불연속 경계면의 기복 $h(x')$ 가 매우 불규칙(random)하다고 가정하면, $h(x')$ 는 모든 주파수에 대

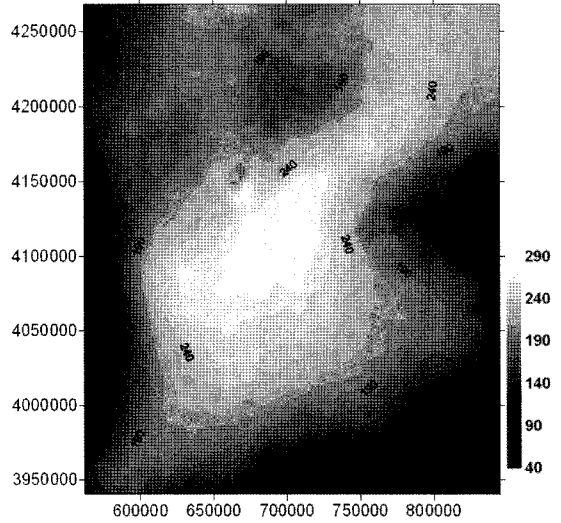


Fig. 7. Bouguer anomaly map after eliminating the gravity effects of sediments in the Ulleung Basin using the satellite data.

해 일정한 파워를 갖게 되므로 $h(x')$ 의 파워스펙트럼 $C_n^2 + D_n^2$ 은 상수 값을 갖게 된다. 따라서 위 식에 자연대수를 취하면, 다음의 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\ln P_n = C - 4\pi D/L \cdot n \quad (5)$$

식 (5)로 부터 종축을 $\ln P_n$ 으로 횡축을 주파수 n으로 하면 주파수 스펙트럼을 구할 수 있으며, 최소자승법에 의하여 직선을 구하면 이 직선의 기울기 값이 $-4\pi D/L$ 이므로 이로부터 경계면의 평균깊이 D를 구할 수 있다. 지하의 경계면이 하나이고 이상적이라면 하나의 직선이지만 실제로 심도가 다른 경계면의 영향으로 주파수에 대한 파워의 변화율이 심한 부분을 스펙트럼에서 관찰할 수 있게 된다. 저주파에서 나타나는 직선의 기울기는 지하 심부에 존재하는 경계면을 지시하며, 고주파에서 나타나는 직선의 기울기는 천부에서 나타나는 불연속 경계면의 평균심도를 나타낸다. 주파수에 대한 스펙트럼 변화가 크게 나타나는 절단 파수를 구하는 방법은 일정한 간격의 주파수에 대한 여러 개의 직선을 만들고 각 파수영역의 심도를 구하여 변화가 급변하는 지점을 절단파수로 결정할 수 있다(권병두와 양수영, 1985). 파워스펙트럼 분석 결과는 Fig. 8에 도시하였다. 후리에어 중력값, 해수층 효과를 보정한 부계 중력값, 퇴적층 효과를 보정한 부계 중력값을 각각 이용하여 파워스펙트럼 분석을 시도하였다. 최하부층의 깊이는 모호면

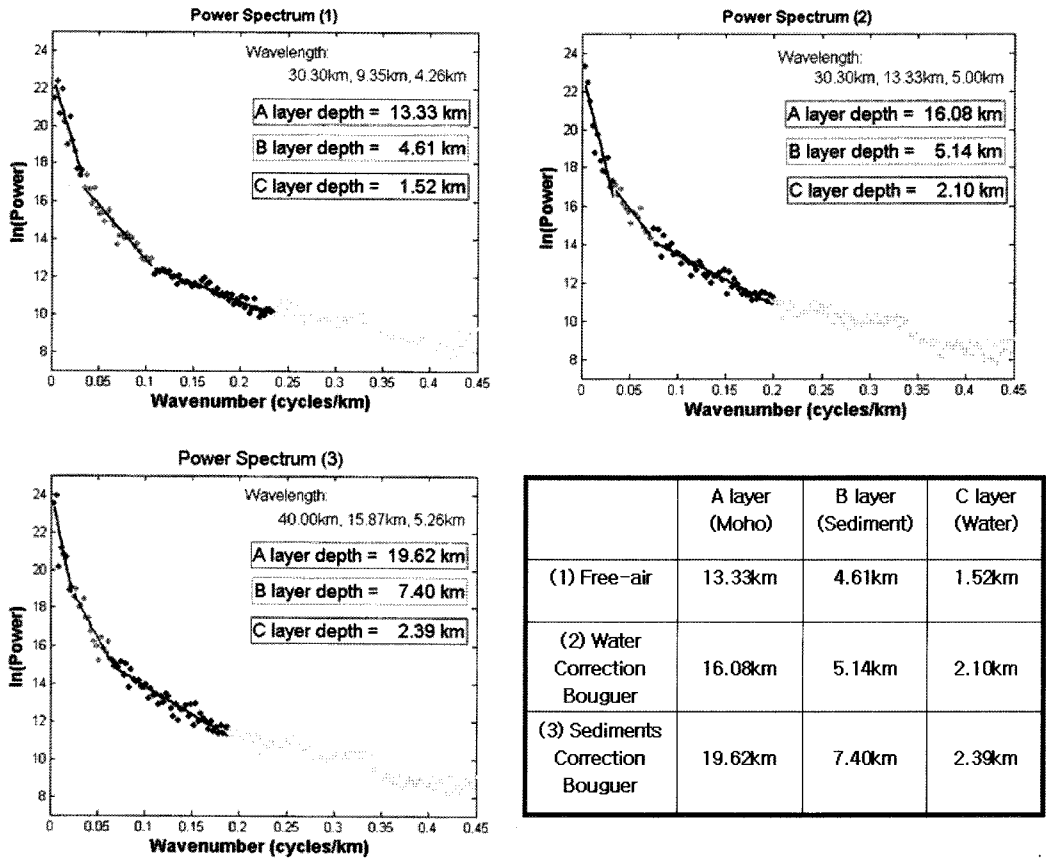


Fig. 8. (1) 2-D power spectrum of the free-air gravity anomaly. (2) 2-D power spectrum of the bouguer gravity anomaly after eliminating the effect of water. (3) 2-D power spectrum of the bouguer anomaly after eliminating the effect of sediments. The table shows results of power spectrum.

으로 추정되며 약 13.3-19.6 km로 나타나고 있으나, 상부 구조에 의한 중력효과가 보정될수록 그 심도가 깊게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이번 연구지역은 중심부에 맨틀 상승 가능성이 존재하며 모호면 심도에서 연구지역의 수심을 고려했을 때, 평균지각의 두께는 약 12-17 km로 일반적인 해양지각 보다 두껍고 대륙지각보다는 얇다는 것을 확인할 수 있다.

심도 역산: 연구 지역의 밀도 구조가 수평적인 변화 양상보다는 층상 형태를 띠고 있기 때문에 3차원 심도 역산을 수행하였다. 역산은 선상 중력값과 인공위성 중력값을 이용하여 각각 수행하였다. 중력 자료의 낮은 해상도 문제를 보완하기 위하여 해수의 심도와 퇴적층의 두께 등 알려진 구조에 대한 보정을 수행하였다. 또한, 이렇게 지질학 및 지구물리학적 근거를 바탕으로 처리된 자료를 사용하면 역산에 사용할

모형을 최대한 단순화 시킬 수 있어 효과적인 역산이 가능하다. 보정 후의 중력 이상 값은 해저 지형과 퇴적층의 영향이 보정되어 지각의 두께와 모호면의 깊이에 의한 중력 효과만을 고려하면 된다. 역산에 사용된 밀도는 상부층 지각과 하부층 맨틀의 평균 밀도를 이용한 차이 -0.5 g/cm^3 를 적용하였다. 매개 변수를 모호면 심도로 설정한 후, 선형 연구 자료와 파워스펙트럼 결과를 고려하여 13-25 km 사이 값에서 변화하도록 설정하였다.

Fig. 9에 도시한 선상 중력 자료를 이용한 심도 역산의 결과를 보면, 연구 지역 맨틀의 상승 범위를 확인할 수 있다. 모호면의 분포를 보면, 퇴적층이 두껍게 쌓인 해저면에서 완만하게 높아지고 있으며, 북서쪽 한국대지와 남동쪽 오키뱅크 부근으로 가면서 급격히 깊어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 해양지각에서 대륙지각으로 전이되는 과정을 보여주며, 울

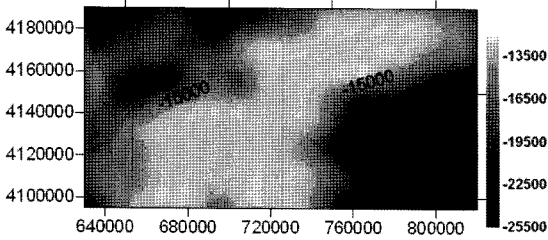


Fig. 9. 3-D depth inversion result showing the depth of Moho discontinuity using the ship-borne data.

릉도와 안용복해산, 화산체 부근에서는 지각 보상 효과로 깊어짐을 알 수 있다. 인공위성 자료를 이용한 광역 지역 심도 역산 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 그 결과는 3차원적 밀도 경계면 중력 산출방법을 이용한 기존 연구(박찬홍 외, 2002)에서 나타나는 맨틀에 의한 중력 분포 양상과 잘 부합하고 나타나고 있으나, 기존 연구보다 상승한 맨틀의 폭은 더 좁으며, 최대 약 13 km까지 맨틀이 상승하며 북동-남서 방향성을 가지고 있다. 최대 상승 범위는 한국 해저 간극의 울릉도 독도 사이에서 나타난다.

3차원 모델

동해지역의 모호면 심도 분포를 영상화하기 위하여 수심 분석 자료와 퇴적 기반암 자료, 화산체 경계자료, 심도 역산 결과 획득한 모호면의 심도 자료를 종합하여 3차원 모델을 Fig. 11과 같이 구현하였다.

Fig. 11a는 지역 전체 구성 매질 중 해수부분을 제거하고 도시한 것이다. 남쪽에서 바라본 모습이며 상층부는 수심의 분포를 반영하고 있다. Fig. 11b는 지각만을 도시한 것으로 울릉도와 안용복 해산, 오키뱅크 쪽에서 뿌리가 내려와 있으며 이는 지각평형의 보상작용으로 인한 것으로 추정할 수 있다. 위로 솟아온 규모는 울릉도가 더 크지만 아래로 내려간 뿌리는 독도 해산을 포함한 오키뱅크 쪽이 더 크게 나타나고 있다. 이는 먼저 생성된 것으로 추정된 동쪽 해산들이 더 보상을 많이 받았기 때문에 추정되며 광역적인 평형에 의해 오키뱅크의 영향을 받아 전체적으로 깊어졌을 수 있다. 또한, 동쪽 해산들의 지각두께가 더 두꺼우며, 안용복 해산과 독도 사이의 퇴적층이 두껍고 맨틀이 가장 높게 상승해 있음을 확인할 수 있고, 북동 남서 방향으로 상승된 맨틀의 형태를 확인할 수 있다.

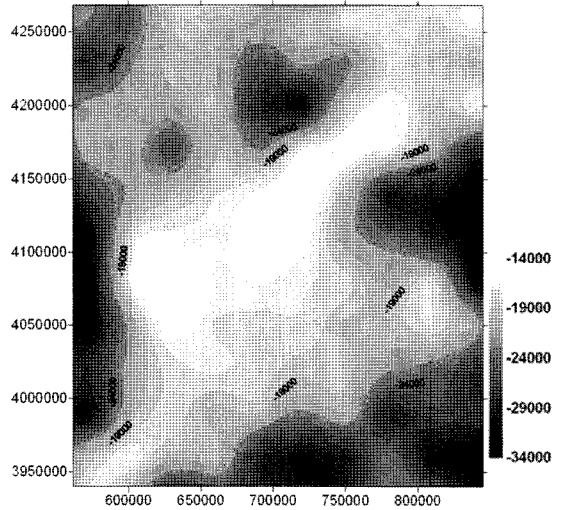


Fig. 10. 3-D depth inversion result showing the depth of Moho discontinuity using the satellite data.

결론

이번 연구의 대상지역은 울릉분지와 독도 부근 해역에 위치한다. 선행연구에 의하면 동해가 열리고 확장되면서 생성된 배호 분지인 울릉 분지는 맨틀의 상승에 의한 생성과 확장을 이룬 것으로 알려져 있다. 이번 연구에서는 선상 포텐셜 자료와 인공위성 중력자료 및 퇴적층 두께 자료를 이용하여 2차원적인 해석이나 지각평형의 가정 하에서 이루어졌던 선행 연구의 제한점을 극복하는 3차원 구조 해석을 수행하였다. 지질학적 성인과 해석된 포텐셜 자료를 고려하면, 울릉분지 중심에서 울릉도와 독도 사이에 맨틀의 상승 현상이 추정되고 이로 인한 해양지각의 생성이나 대륙지각의 신장 현상이 나타나고 있다. 파위스펙트럼 분석 및 심도 역산 결과, 연구지역의 지각 두께는 해양지각보다는 두껍고 대륙지각보다 얇으며 해양지각에서 대륙지각으로 전이되는 형태임을 알 수 있다. 또한, 심도 역산 결과 해석된 모호면의 심도와 지각평형의 가정 하에 이루어진 연구 결과가 상당부분 부합하고 있어 이 지역의 지각평형은 안정 단계에 있는 것으로 해석된다.

이번 연구에서 이용된 인공위성 중력 자료는 전세계 모든 해양의 값을 제공하는 자료로 접근성이 제한적인 해양과 같은 광범위한 지역에 대한 기초 자료로 효과적으로 적용이 가능할 뿐만 아니라 구조

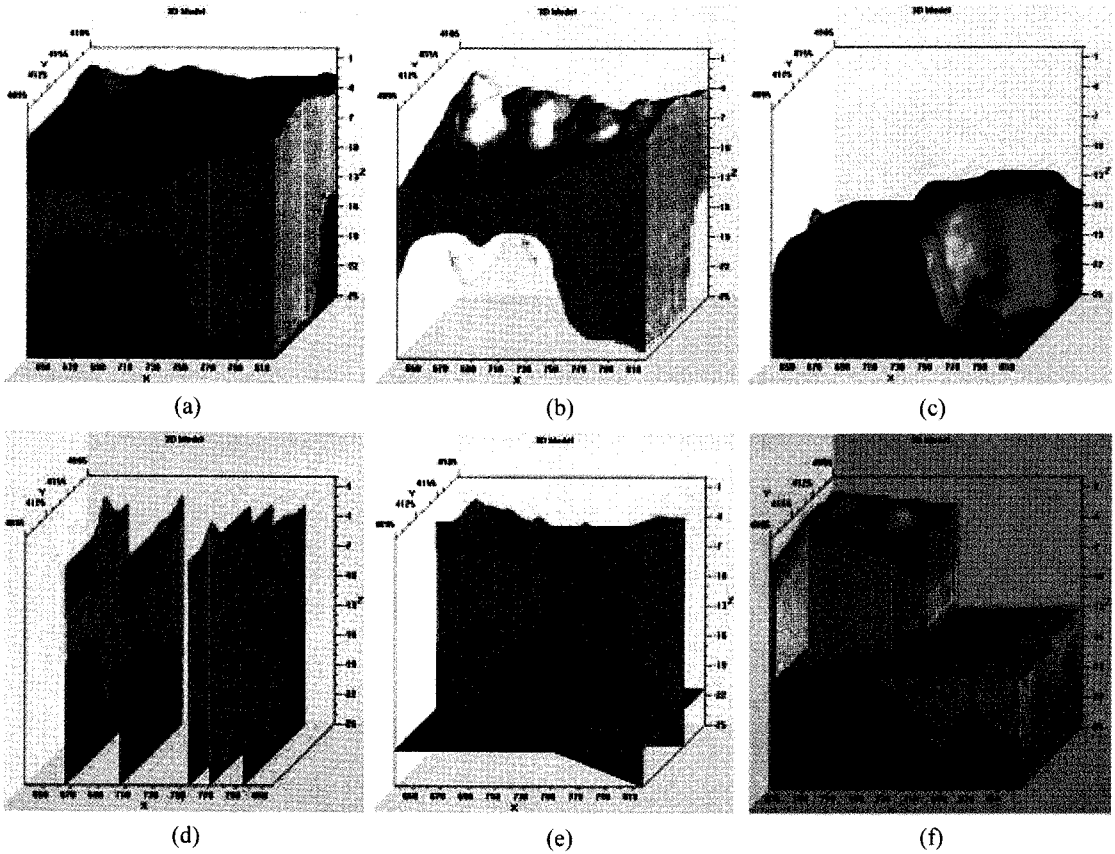


Fig. 11. 3-D model of the study area. The green, yellow and red sections denote the sedimentary layer, crust and mantle, respectively. (a) is all layer viewed from the south. (b) is crust and (c) is mantle only. (d) shows N-S direction 2-D sections of the volcanic bodies. (e) represents 2D profile along the seismic track line. (f) is all layer viewed from the north.

해석에도 상당한 적용 가능성을 갖고 있음을 확인하였다. 또한, 이번 연구의 결과물은 울릉분지 및 독도 부근의 지질 구조 뿐만 아니라 동해의 광역적인 해양 지질 구조 해석의 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 국토해양부가 지원하는 ‘독도의 지속가능한 이용연구(PM53900)’와 2009년도 한국지질자원 연구원의 기본사업인 ‘광상 맞춤형 자원탐사·채광 최적기술개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

권병두, 양수영, 1985, 중력자료 분석을 통한 한반도 지각

구조에 관한 연구. 광산지질, 18, 309-320.

권병두, 권재일, 이희순, 1990, 다중 이차곡면 방정식을 이용한 중력자료의 지형보정. 한국지구과학회지, 11, 156-165.

박계순, 이희순, 권병두, 2005, 고정밀 중력 탐사를 위한 3차원 중력 지형 역산 기법. 한국지구과학회지, 26, 691-697.

박찬홍, Isezaki, N., Seama, N., 손호용, 김정우, 2002, 중력이상의 천부성분 분리방법을 이용한 울릉분지 심부지각구조 연구. 지질학회지, 38, 519-535.

서만철, 이원국, 1998, 동해 울릉분지의 Moho면 깊이 분포. 한국지구과학회지, 19, 302-309.

석봉출, 김한준, 한상준, 박찬홍, 김성렬, 김기영, 유해수, 양수영, 정태용, 주형태, 최동립, 홍종국, 장재경, Anosov, G.I., Gnibidenko, K.S., Argentov, V., Bikkenia, S., Zhietsov, E., Zhigulef, V., and Solovyev, V., 1992, 동해 울릉분지의 지구물리학적 연구(한국-러시아 공동연구). 한국해양연구소, 149 p.

손영관, 박기화, 1994, 독도의 지질과 진화. 지질학회지, 30, 242-261.

- 최광선, 옥수석, 서만철, 최영섭, 김백수, 2000, 서해남부에서
의 선상중력 자료 획득 및 처리에 관한 고찰. 지구물리, 3, 291-310.
- 한상준, 김한준, 허식, 박찬홍, 김성렬, 이용국, 유혜수, 최
동립, 박병권, 1997, 동해 울릉분지 북동부(울릉도와 독
도 주변) 해역의 분지구조. 지질학회지, 33, 127-138.
- Blakely, R.J., 1995, *Potential Theory in Gravity and Mag-
netic Applications*. Cambridge university press, Cam-
bridge, UK, 441 p.
- Dehlinger, P., 1978, *Marine gravity*. Elsevier Science Pub-
lishing Company, Netherlands, 152 p.
- Jolivet, L., Huchon, P., Lepichon, X., Chamot-Rooke, N.,
and Thomas, J.C., 1991, Arc Deformation and Mar-
ginal Basin Opening: Japan Sea as a Case Study. *Journal
of Geophysical Research*, 96, 4367-4384.
- Kim, H.J., Park, C.H., Hong, J.K., Jou, H.T., Chung, T.W.,
Zhigulef, V., and Anosov, G.I., 1994, A seismic experi-
ment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwest-
ern Japan Sea (East Sea of Korea). *Geophysical
Research Letters*, 21, 1975-1978.
- Nabighian, M.N., 1974, Additional comments on the ana-
lytic signal of two-dimensional magnetic bodies with
polygonal cross-section. *Geophysics*, 39, 85-92.
- Park, C.H., 1998, Crustal structure and evolution of the
Ulleung Basin in the east sea of Korea (Japan Sea) by
deep penetrating seismic refraction, reflection, and
potential field data. Ph. D. Dissertation, China Univer-
sity, Beijing, China, 217 p.
- Roest, W.R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Mag-
netic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geo-
physics*, 57, 116-125.
- Sohn Y.K., 1995, Geology of Tok Island, Korea: Eruptive
and depositional processes of a shoaling to emergent
island volcano. *Bulletin of Volcanology*, 56, 660-674.
- Tomoda, Y., 1960, Thickness of the earth's crust from
Bouguer anomaly statistics. *Journal of the Geodetic Soci-
ety of Japan*, 6, 47-56.

2008년 8월 29일 접수
2009년 3월 16일 수정원고 접수
2009년 3월 24일 채택