

동해 울릉분지 북동부지역의 지구물리학적 특성 및 지구조 연구

김창환^{1*} · 박찬홍²

¹한국해양연구원 동해연구소 독도전문연구센터, ²한국해양연구원 동해연구소

A Study on the Geophysical Characteristics and Geological Structure of the Northeastern Part of the Ulleung Basin in the East Sea

Chang Hwan Kim^{1*} and Chan Hong Park²

¹Dokdo research center, East Sea Research Institute, Korea Ocean Research and Development Institute, Uljin, Korea

²East Sea Research Institute, Korea Ocean Research and Development Institute, Uljin, Korea

The geophysical characteristics and geological structure of the northeastern part of the Ulleung Basin were investigated from interpretation of geophysical data including gravity, magnetic, bathymetry data, and seismic data. Relative correction was applied to reduce errors between sets of gravity and magnetic data, obtained at different times and by different equipments. The northeastern margin of the Ulleung Basin is characterized by complicated morphology consisting of volcanic islands (Ulleungdo and Dokdo), the Dokdo seamounts, and a deep pathway (Korea Gap) with the maximum depth of -2500 m. Free-air anomalies generally reflect the topography effect. There are high anomalies over the volcanic islands and the Dokdo seamounts. Except local anomalous zones of volcanic edifices, the gradual increasing of the Bouguer anomalies from the Oki Bank toward the Ulleung Basin and the Korea Gap is related to higher mantle level and denser crust in the central of the Ulleung Basin. Complicated magnetic anomalies in the study area occur over volcanic islands and seamounts. The power spectrum analysis of the Bouguer anomalies indicates that the depth to the averaged Moho discontinuity is -16.1 km. The inversion of the Bouguer anomaly shows that the Moho depth under the Korea Gap is about -16~-17 km and the Moho depths towards the Oki Bank and the northwestern part of Ulleung Island are gradually deeper. The inversion result suggests that the crust of the Ulleung Basin is thicker than normal oceanic crusts. The result of 2D gravity modeling is in good agreement with the results of the power spectrum analysis and the inversion of the Bouguer anomaly. Except the volcanic edifices, the main pattern of magnetization distribution shows lineation in NE-SW. The inversion results, the 2D gravity modeling, and the magnetization distribution support possible NE-SW spreading of the Ulleung Basin proposed by other papers.

Key words : Ulleung Basin, gravity, magnetic, Moho depth, 2D gravity modeling, magnetization distribution, spreading center

본 연구에서는 울릉분지 북동부지역에서 획득한 중력, 자력, 수심자료 등 지구물리자료를 이용하여 이 지역의 지구물리학적 특성 및 지구조를 고찰하고자 하였다. 각각의 자료는 조사기간 및 사용 장비의 차이로 인하여 자료간의 오차가 나타나는데 상대적인 보정을 실시한 후 통합하였다. 울릉분지 북동부에 위치한 연구지역은 울릉도와 독도해산들, 그리고 한국해저간곡으로 이루어져 있으며 최대수심은 약 -2500 m를 보인다. 후리에어이상은 지형의 영향을 잘 반영하며 전체적으로는 울릉도와 독도 및 해산들에서 높은 값을 보인다. 부계이상은 해산들에 의한 국지적인 이상치를 보이지만 한국해저간곡 및 울릉분지를 중심으로 고이상을 보이는데 이는 맨틀상승에 의한 영향이라 판단된다. 자기이상도를 살펴보면 화산체(섬과 해산들)들을 중심으로 복잡한 자기이상대를 나탄낸다. 연구지역 부계중력이상의 파워스펙트럼 분석으로부터 계산된 연구지역 모호면의 평균 깊이는 -16.1 km로 나타났다. 이 파워스펙트럼 분석을 이용하여 모호면 심도 역산을 수행하였다. 이 역산법으로 계산된 모호면의 심도는 한국해저간곡지역에서 -16~-17 km 정도이

*Corresponding author: kimch@kordi.re.kr

며 오키뱅크 및 울릉도의 북서부쪽으로 갈수록 심도가 깊어지는 결과가 나타났다. 이 역산결과는 울릉분지의 해양지각이 일반적인 해양지각에 비해 두껍다는 기존 결과와 일치한다. 2차원 중력 모델링 결과에서도 모호면의 심도가 해저면지진계 탐사측선이 지나가는 안용북해산과 독도 사이의 한국해저간극지역에서 얇은 것을 볼 수 있으며 오키뱅크 쪽으로 갈수록 깊어진다. 자화분포도에서는 울릉도와 독도 등 화산체에 의한 강한 자기이상대에 의해 나타나는 자화분포대를 제외하면 주로 북동-남서방향의 선형배열이 나타난다. 심도역산 결과, 2차원 중력모델링 및 자화분포 결과를 종합해보면 동해의 생성시 울릉분지의 가능성 있는 spreading center(해저면 확장중심) 위치가 한국해저간극에서부터 울릉분지까지 북동-남서 방향일 것이라는 기존 논문들의 주장과 부합된다고 판단된다.

주요어 : 울릉분지, 중력, 자력, 모호면 심도, 2차원 중력모델링, 자화분포, spreading center

1. 서론

서태평양 주변해(marginal sea) 중의 하나인 동해는 활발한 지각변형이 일어나고 있는 환태평양 화산 및 지진대에 접한 전형적인 후열도분지(back-arc basin)이다. 동해는 태평양판이 유라시아판과 접한 해구(trench)를 따라 하강 섭입(subduction)하면서 후열개 확장(back-arc spreading)이 일어나 유라시아 대륙의 동쪽 대륙지각 일부가 떨어져 나가면서 형성된 배호상분지로 해석된다(Uyeda and Miyashiro, 1974; Lallemand and Jolivet, 1986; Jolivet and Tamaki, 1992; Tamaki *et al.*, 1992). 동해는 대부분 수심이 -2,000 m 이상인 해역으로서 한국, 일본, 그리고 러시아로 둘러싸여 있으며 울릉분지, 일본분지, 그리고 야마토분지로 대분된다. 이들 분지는 해령(ridge)과 한국대지(Korea Plateau) 등의 해저대지들로 경계 분리 되면서 각각 독립적으로 발달해 있고, 한국대지나 해령들은 일본 열도가 유라시아 대륙으로부터 분리될 때 동해에 남아있는 대륙지각의 조각들이다(Jolivet *et al.*, 1991). 동해의 남서부에 위치하는 울릉분지는 한국대지에 의해 북쪽의 일본분지와 그리고 오키뱅크에 의해 북동쪽 야마토분지와 각각 분리된다. 학자들마다 조금씩 다르긴 하지만 동해 생성의 시작 시기는 초기 마이오세이고 종료 시기는 15 Ma에서 12 Ma정도이며, 울릉분지는 동해의 생성기 중 말기에 생성되었을 것으로 추정하고 있다(Hayashida *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1999). 그러나 Lee *et al.*(2001)과 Kim *et al.*(2007)은 울릉분지 열개의 시작시기를 초기마이오세로 해석하기도 하였다. 동해의 자기선형이상(magnetic lineation)은 서태평양의 다른 후열도분지에 비해 잘 나타나지 않는다. 그러나 일본분지의 동쪽에서는 자기선형이상이 나타난다. 이것은 일본분지의 초기 마이오세에 열개를 지시하는 증거로 제시되었으며, 이 자기선형이상 증거에서 나타난 확장중심축과 방향성이 같았고 열개의 진행방

향이 남서쪽이었다(Jolivet and Tamaki, 1992). 일본분지와 달리 울릉분지와 야마토분지에서는 높은 열류량에 의한 약한 자화 및 지각 하부에 맨틀 마그마 물질의 상승으로 인한 지각 재가열(reheating) 영향의 가능성 등으로 자기선형이상이 나타나지 않는다고 알려져 있다(Isezaki and Uyeda, 1973; Otofujii and Matsuda, 1983; Otofujii *et al.*, 1985; Kurashimo *et al.*, 1986; Tamaki, 1988; Jolivet and Tamaki, 1992). 일본분지는 전형적인 해양지각의 특성 및 두께를 보이지만 야마토 분지와 울릉분지 하부 지각은 일반적인 해양지각보다 2배 정도 두껍게 분포하고 있으며 OBS 탐사 결과 해양지각에 가까운 성질을 보이는 것으로 나타났다(Hirata *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 1994, 1998). 또한 해저면 지진계, 중력·자력 및 탄성과 결과들에서 울릉분지의 하부지각이 spreading center(해저면 확장중심)를 가진 두꺼운 해양지각일 가능성이 높다고 주장되고 있다(Kim *et al.*, 1994; Park, 1998; Lee *et al.*, 1999).

연구지역은 경도 130.50°~132.60°, 위도 37.00°~37.80°인 울릉도와 독도 사이 구역으로 한국대지와 오키뱅크 사이 즉 울릉분지의 북동부 경계부에 해당한다(Figs. 1 and 2). 독도와 울릉도는 제주도과 함께 플라이오세 - 플라이스토세 시기에 일어난 요린변동(Yolin Disturbance)과 관련된 알칼리 화산활동에 의해서 형성된 것으로 해석되고 있다(Kim *et al.*, 1987). 독도와 울릉도의 화산암류조성은 비슷하며 전암 화학조성을 갖는 알칼리 현무암, 조면 현무암, 조면 안산암 및 조면암으로 구성되어 있다(Won and Lee, 1984; Sohn and Park, 1994; Kim, 2000).

본 연구의 목적은 해저지형, 중력 및 자력자료 등의 지구물리 자료를 종합 분석하여 동해생성연구 및 해저자원개발의 기반자료가 되는 울릉분지 북동부 지역의 지구물리학적 특성 및 지각구조를 고찰하는 것이다. 이를 위하여 한국지질자원연구원, 국립해양조사원 및 한

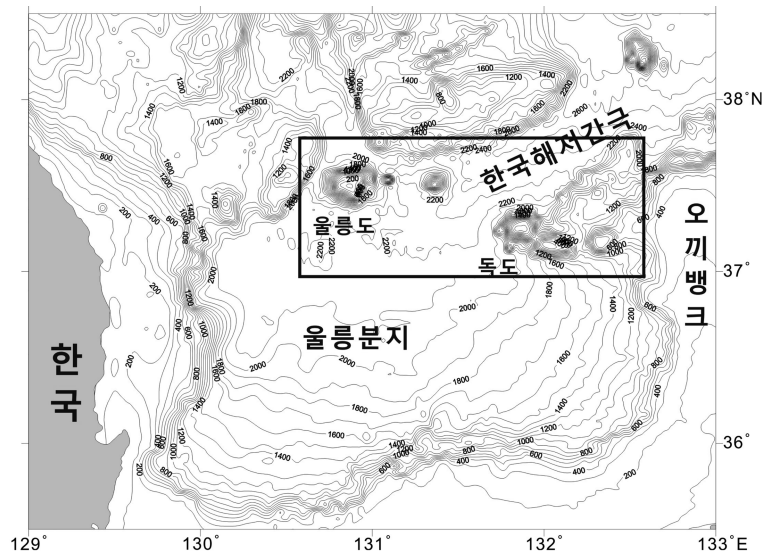


Fig. 1. Bathymetry map of the Ulleung Basin. Contour interval is 100 m. A rectangular box is the study area.

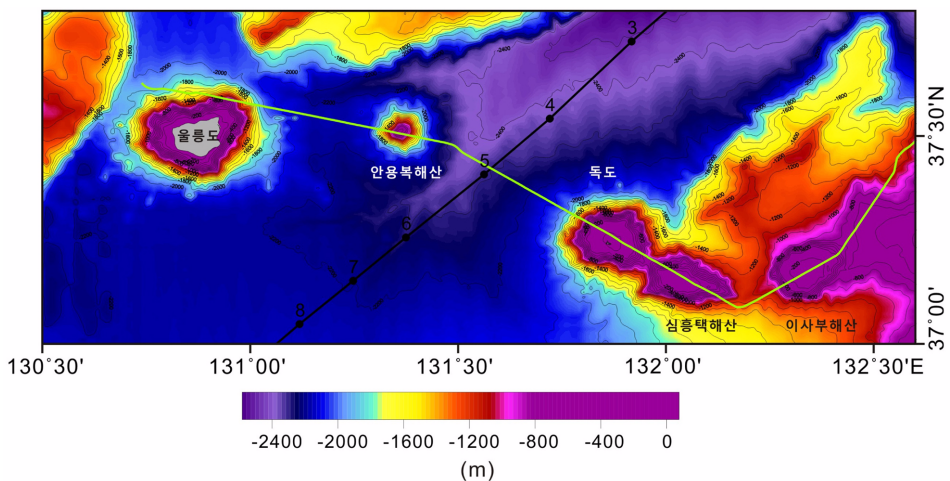


Fig. 2. Bathymetry map of the study area. Contour interval is 100 m. Thick green line is a seismic reflection survey track(Song *et al.*, 2000). Thick black line is a seismic refraction survey line. Numbers are OBS points(Kim *et al.*, 1994).

국해양연구원에서 획득한 수심과 중력, 자력자료를 통합처리하고 분석하였다.

2. 자료처리 및 분석

2.1. 중력 및 자력자료 처리

본 연구에서는 국립해양조사원('97), 한국지질자원연구원('97)과 한국해양연구원('00)의 자료를 사용하였는데, 각각의 자료는 조사기간 및 사용 장비의 차이로

인하여 자료들간의 오차가 나타난다. 이와 같은 오차는 자료량이 가장 많은 국립해양조사원 자료를 기준으로 하여 상대적인 보정을 실시한 후 통합하였다(Kim, 2006).

중력자료의 처리 및 보정은 중력탐사의 목적이 탐사 대상체와 주변암과의 밀도차에 의한 중력변화량을 구하고, 이로부터 지하 밀도 분포를 해석하는데 있으므로 야외에서 측정된 중력 자료는 시간에 따라 변하는 중력계의 계기변화와 기조력 변화에 의한 변화, 측정

간의 고도와 위도 및 주위 지형 등에 기인하는 중력효과를 포함하므로 이를 제거해야 하여야 한다(Min *et al.*, 1987). 후리어보정(Free-air Correction)을 할 때는, 측정점과 해수기준면과의 간격에는 물질이 없는 것으로 생각하고 보정을 한다. 그러나 실제로는 물질(암석 등)이 있기 때문에 그것에 의한 인력이 측정치에는 포함되어 있다. 측정점의 고도를 경계로 위쪽의 물질은 측정점에 대해서 위 방향의 인력을 미치고 있고 아래쪽 물질은 아래 방향의 인력이 미치고 있다. 따라서, 측정점에 미치는 주위 물질의 인력은 지형에 관계하고 있는 것이 된다. 측정치를 수준면의 값에 보정할 때는, 측정치로부터 측정점보다 밑에 있는 물질에 의한 인력을 빼고, 위쪽의 물질에 의한 인력을 더해줄 필요가 있다. 이 보정을 부계보정(Bouguer Correction)이라고 한다. 해양탐사에서는 해수면이 기준점(datum=0)이 되므로 해저면에 발달하고 있는 해저지형에 대한 것만 보정을 해주면 된다.

지자기 일변화는 지자기장이 24시간 주기로 변하는 것을 뜻하며 주요 원인은 태양에서 오는 플라즈마에 의해 상부 대기권이 이온화 되어 대기권 내에 전자기장이 유도되며 이것이 지자기장에 중첩되어 지자기장 변화를 유발한다. 따라서 이에 대한 영향을 제거하는 것을 일변화 보정이라 한다. 일변화 보정된 해상 지자기 자료로부터 국제표준지자장(IGRF : International Geomagnetic Reference Field)을 계산하여 소거함으로써 자기이상을 산출하였다.

자력탐사는 분지 연구에 유용하게 사용되는 방법으로, 특히 다른 지구물리 탐사보다 분지의 구조적 특성, 천부에 존재하는 화산암이나 기반암에 관한 정보를 제공한다. 그러나 자력탐사 자료는 자성암체의 대자율의 횡적인 변화가 심하고, 잔류자기의 크기나 자화방향에 따라 강도의 변화가 심하여 자료 해석시 세심한 주의를 요한다. 1970년대 이후 자력이상의 수평/수직 미분에 근거한 암체의 경계 및 심도를 효과적으로 결정하기 위한 여러 기법들이 개발되면서 이러한 해석상의 제약들이 많이 해소되었다(Nabighian, 1972, 1974; Roest *et al.*, 1992; Hsu *et al.*, 1996).

Nabighian(1972, 1974)은 아날리틱 신호를 이용한 자력이상의 해석 기법을 제안하였다. 이 기법의 가장 큰 장점은 잔류자기의 크기, 자화방향 또는 지자기장 요소에 대한 어떠한 가정없이 자성암체의 경계 및 심도를 구할 수 있다는 점이다(Thurston and Brown, 1994; Hsu *et al.*, 1996).

자력탐사를 통해 얻은 자기장 자료와 지형자료를 바

탕으로 자기이상의 푸리에 변환을 통한 자화의 역산을 실시하여 지각의 자화강도를 구할 수 있으며(Parker and Huestis, 1974), 이를 이용하여 울릉분지 북동부 연구지역의 지각 자화 분포특성을 연구하였다.

2.2. 스펙트럼 분석, 중력역산 및 2차원 중력 모델링

연구지역 맨틀의 평균 심도를 계산하기 위하여 부계 중력이상의 파워스펙트럼 분석을 실시하였다. 또한 부계 중력이상자료를 이용하여 모호면의 심도에 대한 역산을 실시하였다. 본 역산에서는 모호면의 심도를 구하기 위하여 부계 중력이상의 파워스펙트럼 분석을 이용하여 맨틀하부에 의한 중력이상값을 분리하고 역산 초기에 주어지는 지하구조모형을 밀도가 다른 두 개층(맨틀, 지각)으로 가정하였다(Jeon, 1995). 또한 맨틀과 지각의 밀도 값을 각각 3.3 g/cm^3 과 2.9 g/cm^3 로 가정하여 맨틀과 지각의 경계면인 모호면의 심도를 역산하였다. 연구지역 지각의 밀도는 기존 동해 지각구조 연구(Kim *et al.*, 1994; Park *et al.*, 1996; Park *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2009b)를 참고하여 해양지각의 밀도인 2.9 g/cm^3 로 가정하였다. 이 모호면 역산 심도를 OBS(Ocean Bottom Seismometer)의 맨틀심도 결과(Kim *et al.*, 1998)와 비교분석 하였다.

또한, 후리어중력이상, 해저지형자료, 멀티채널 탄성과 해석자료(Song *et al.*, 2000) 및 모호면 역산 심도를 이용하여 중력이상단면에 대한 2차원 순차 모델링을 실시하여 연구지역의 지각구조 단면을 비교분석 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 해저지형, 중력 및 자력 특성 분석

연구지역은 울릉분지 북동부에 위치하고 있으며 최대수심은 한국해저간극에서 약 -2,500 m이다. 이 한국해저간극은 독도와 안용복해산 사이를 가로지르며 북동 - 남서방향으로 형성되어있고 북동쪽으로는 일본분지와 남서쪽으로는 울릉분지와 연결되어있다(Figs. 1 and 2). 한국해저간극은 북동쪽 일본분지로 갈수록 점점 깊어지고 남서쪽 울릉분지로 갈수록 완만히 얕아진다. 이 해저수로는 울릉분지 해저평원으로 유입된 저탁류 퇴적물의 일부가 수로를 따라 일본분지로 운반되는 이동통로의 역할을 하였을 것으로 판단되며, 한국해저간극은 저탁류 해저수로(turbidite channel)일 것으로 간주된다(Song *et al.*, 2002).

울릉도는 $37^{\circ}30.4'N$, $130^{\circ}52.1'E$ 에 위치해 있고 안

용복해산은 37°30.8'N, 131°21.7'E에 위치한다. 규모면에서는 울릉도가 하부기저부의 폭이 약 31~35 km 정도로 가장 크며, 안용복해산이 약 11~14 km 정도로 가장 작다. 울릉도와 독도 등 화산체 주변 해역에서 화산체의 경사면을 따라 수심이 급격히 변화한다. 연구지역의 동쪽으로는 독도를 포함해서 3개의 화산체가 위치하고 오끼뱅크로 이어지며, 지형은 동쪽으로 가면서 전체적으로 점점 높아진다. 이 3개의 화산체는 독도(37°15'N, 131°52'E), 독도에서 남동쪽으로 약 15 km 떨어진 지역에 나타나는 심홍택해산(37°09'N, 132°02'E) 및 독도로부터 약 55 km 떨어진 오끼뱅크 서쪽 경계부에 위치하는 이사부해산(37°11'N, 132°20'E)으로 구성되어있다(Fig. 2). 독도, 심홍택해산 및 이사부해산은 모두 수심 -200 m부터 정상부가 평평한 기묘의 형태를 이루고 있으며 하부 기저부는 22~27 km의 장축을 가진다(Kang *et al.*, 2002; Kim, 2006). 독도의 기저부는 수심 약 -2,100 m 부근이며, 그 서쪽 외곽 부분은 울릉분지와 한국해저간극쪽으로 -2,400 m까지 완만하게 깊어진다. 독도 북쪽의 심해지역은 -2,400 m 이하로 깊어지며, 매우 평탄한 해저지형으로 발달하여 독도로부터의 많은 해저곡이 발달 연장되어 있다. 독도, 심홍택해산과 이사부해산은 제 4 기 해수면 변화로서 야기된 해침과 해퇴의 영향에 의한 침식으로 수심 약 -200 m 정도에서 평탄하고 완만한 경사를 보이는 기묘형태의 정상을 가진 해저지형을 나타낸다(Kang *et al.*, 2002; Kim, 2006).

연구지역의 후리어어중력 이상을 살펴보면 대체로 지형과 일치하는 모습을 보인다(Fig. 3). 전체적으로 울릉분지지역인 남서쪽은 0~10 mGal의 값이 넓게 나타나고 한국해저간극의 북동쪽으로는 0~20 mGal의 값을 보인다. 이 지역은 수심이 다른 지역에 비해 깊고 퇴적층이 두껍게 분포하는 것으로 사료되며, 두꺼운 퇴적층 때문에 완전한 저중력 이상이 나타나는 것으로 판

단된다. 울릉도 북쪽과 서쪽부의 한국대지 부분은 약 40 mGal 정도의 약한 고이상이 나타나며 지형의 형태와 일치하는 모습을 보인다. 울릉도는 110 mGal의 고이상을 보이고 안용복해산은 60 mGal의 고이상을 나타낸다. 동쪽의 3개 화산체 중 서쪽에서 동쪽으로 독도의 정상부에서는 130 mGal 이상으로서 가장 높은 후리어어이상이 나타나며, 그 동쪽으로 심홍택해산에서 110 mGal, 이사부해산에서 80 mGal로 동쪽의 해산으로 갈수록 단계적으로 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 상기와 같이 해산들의 지형적 크기에 비해 중력값이 작게 나타나는 것은 해산들이 어느 정도 지각평형을 이루고 있다는 것을 암시한다(Kim *et al.*, 2007, 2009a). 그리고 독도와 이사부해산을 비교하면 규모는 비슷하지만 독도가 약 50 mGal의 더 높은 이상치를 가지는데 두 해산의 밀도가 비슷하다면 보상정도의 차이가 있거나 지하 하부의 밀도가 다르다는 것을 암시한다(Kim *et al.*, 2009a). 울릉도와 독도를 비교해보면 울릉도의 규모가 더 크지만 후리어어이상이 작게 나타나는 데 이것은 울릉도 육지 중력자료의 부족에 따른 차이이다(Fig. 3). 연구지역의 부계이상은 약 60~180 mGal의 중력값 분포를 보인다. 한국해저간극과 울릉분지 쪽으로는 높게 나타나고 오끼뱅크쪽으로 가면서 낮은 이상을 보이며 울릉도, 안용복해산 및 한국대지 부분에서도 낮은 이상을 나타낸다(Fig. 4). 이는 울릉분지 중심부에서 맨틀 상승에 의한 영향으로 부계이상값이 높게 나타나고 오끼뱅크나 대륙쪽으로 갈수록 지각의 두께가 두꺼워짐에 따라 모호면의 깊이가 점점 깊어져 부계이상이 낮아지는 것으로 판단된다(Park *et al.*, 1996). 울릉도와 안용복해산에서 해산에 의한 국지적인 영향을 보이며, 동쪽 독도해산들에서도 이와 같은 국지적인 영향으로 복잡하게 나타나는 것으로 생각된다(Kim, 2006).

자기이상도를 살펴보면 연구지역의 북동쪽과 남서쪽

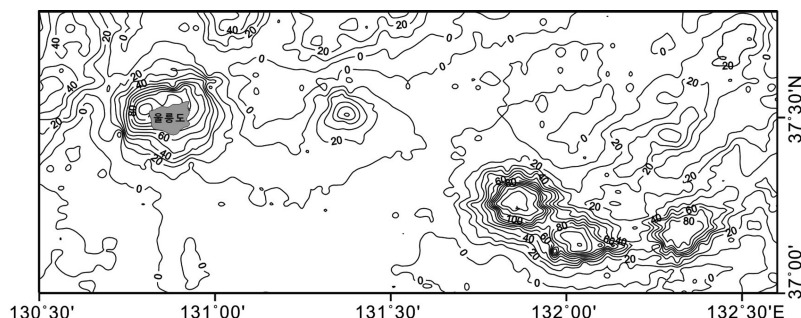


Fig. 3. Free-air anomaly map of the study area. Contour interval is 10 mGal.

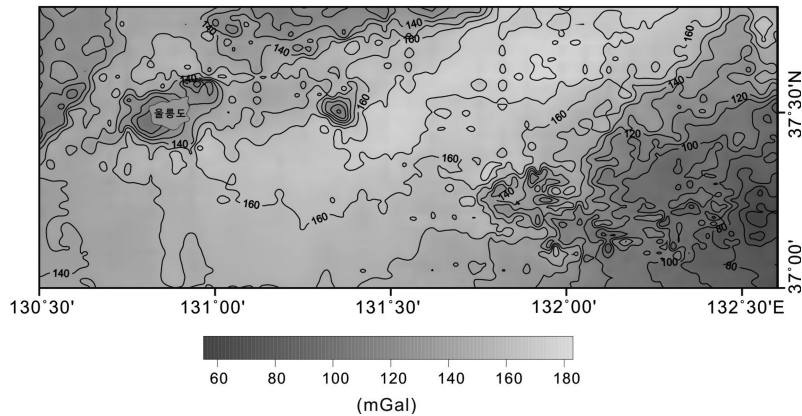


Fig. 4. Bouguer anomaly map of the study area. Contour interval is 10 mGal.

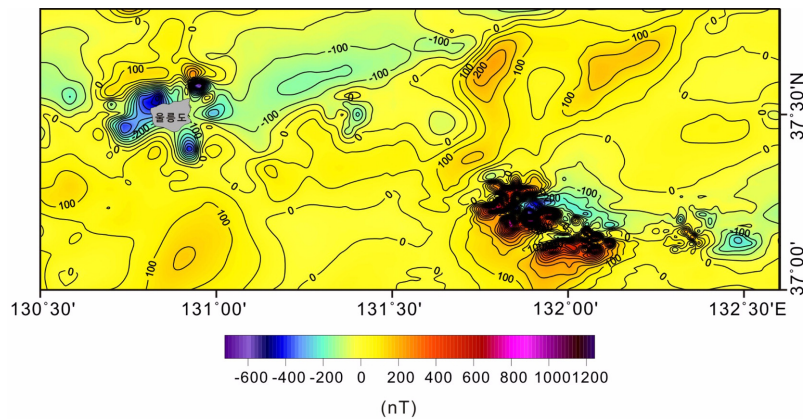


Fig. 5. Magnetic anomaly map of the study area. Contour interval is 50 nT.

에는 0~50 nT 정도의 값이 넓게 분포하는데 두꺼운 퇴적층의 아래 기반암의 값은 심도의 영향으로 판단된다(Fig. 5). 울릉도를 중심으로 낮은 이상치들이 전체적으로 감싸고 있는 모습이고 그 중 북서쪽의 이상치가 -450 nT의 가장 낮은 값을 갖는다. 안용북해산지역에서는 -200 nT의 낮은 이상치가 나타난다. 연구지역 동쪽의 독도해산을 주위에서는 세 개의 자기이상대가 나타나는데 모두 세 개의 해산을 중심으로 나타난다. 독도를 중심으로는 매우 복잡한 양상을 띄는 이상대가 나타나고 심홍택해산에서는 남서서에서 북동동의 선형배열형태의 이상대가 존재한다. 이사부해산을 중심으로는 두 화산체 지역에 비해서 작은 값의 양의 이상대와 음의 이상대가 나타난다. 독도의 자기이상은 한국해저 간극에서 독도로 가면서 700~800 nT 정도의 양의 이상값으로 증가했다가 독도 정상부에서 약 -600 nT 정도의 음의 이상값으로 갑자기 감소한다. 이 음의 이

상대는 길게 서쪽으로 뻗어서 심홍택해산의 음의 이상대와 연결되는 모습을 보인다. 또한 남쪽에도 양의 고 이상치가 나타나고 있다. 심홍택해산은 쌍극자의 자기 배열이 남서서에서 북동동의 긴 선형배열로 나타나는 것이 특징이며 정상부에는 남쪽으로는 약 600 nT의 양의 이상대와 그 북쪽으로는 약 -200 nT의 음의 이상대가 보이고 있다. 비교적 독도보다는 단순한 선형배열의 자기이상 형태가 나타나고 있다. 이 쌍극자 자기이상의 형태는 심홍택해산의 형성당시 지구자기장의 극성모양을 따른 것으로 추측되지만 주변화산체에 의한 영향의 가능성을 배제할 수는 없다. 이사부해산의 정상부는 약 200 nT 정도의 양의 이상대를 형성하고 있고 그 주변부는 약 -100 nT 정도의 음의 이상대가 분포하고 있다. 이사부해산에서 동쪽 오기뱅크로 갈수록 음의 이상대가 점점 감소한다. 이렇게 연구지역 동쪽의 화산체들은 규모와 위치가 비슷하지만 다른 자기

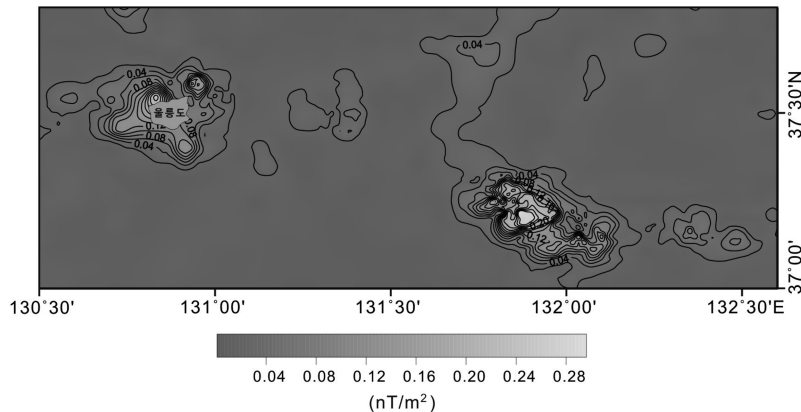


Fig. 6. Analytic signal map of the study area.

이상의 변화 양상을 보이는 것은 독도와 심홍택해산 및 이사부해산의 형성 시기 혹은 내부구조가 다를 수 있다는 것을 암시한다(Kim *et al.*, 2009b). 그리고 연구지역 북동쪽은 약 200 nT와 약 150 nT의 양의 이상대가 두 군데 나타나며 이사부해산 동쪽으로 약 -250 nT의 음의 이상대가 나타나는데 수심자료와 비교하여보면 수심은 큰 변화가 없는 지역이지만 이상치가 나타나는 것으로 보아 두꺼운 퇴적층 밑에 기반암 및 화성암의 관입 등에 의한 영향으로 판단된다(Fig. 5).

자기이상 자료의 분리 해석을 위하여 본 연구에서는 아날리틱 신호를 분석하였다. 아날리틱 신호는 0.00077~0.297 nT/m²의 범위를 가지며, 평균은 0.01897 nT/m², 표준편차는 0.0299 nT/m²이다(Fig. 6). 아날리틱 신호 분포에서는 독립적인 이상의 분리가 가능하다. 울릉도의 아날리틱 신호는 급경사면을 따라서 고이상들이 둘러싸며 분포하는데 그 고이상 중 중심부에 가까이 위치하는 이상대가 중심화구의 위치와 비슷할 것으로 사료된다. 독도와 심홍택해산에서는 급경사 연변부 및 정상부에서 독립된 고이상들이 배열되어 있다. 해산을 형성시킨 화산활동 이후 침식 작용 또는 함몰에 의해 해산의 상부는 편평해졌지만, 일부 화구륜의 subsidiary cone들의 영향으로 독립적인 고이상이 나타나는 것으로 해석된다(Kim, 2006). 이러한 단주기의 이상은 천부의 지질 특성을 반영하는 것이며, 아날리틱 신호 분포의 범위는 거의 해산의 지형 범위와 비슷한 규모를 보이며 나타나고 있다.

3.2. 파워스펙트럼, 중력역산, 2차원 중력모델링 및 자화분포 분석

연구지역의 모호면 심도를 연구하기 위하여 파워스

펙트럼 분석 및 역산법을 수행하여 기 연구된 해저면 지진계자료와 비교분석하였다.

연구지역 부계중력역산의 파워스펙트럼 분석으로부터 계산된 연구지역 모호면의 평균 깊이는 -16.1 km로 나타났다(Fig. 7). 이 파워스펙트럼 분석에서 부계중력역산에 저주파필터를 적용하여 맨틀하부에 의한 부계중력값을 구하고 모호면 평균심도를 이용하여 연구지역을 10 km×10 km 면적의 직사각주 집합체로 가정하고 단순화 시켜 모호면 역산법을 수행하였다. 이 역산법으로 계산된 모호면의 심도는 한국해저간극지역에서 -16~-17 km 정도이며 오끼뱅크 및 울릉도의 북서쪽으로 갈수록 심도가 깊어지는 결과가 나타났다(Fig. 8). 이 결과를 한국해저간극 및 울릉분지에서 실시된

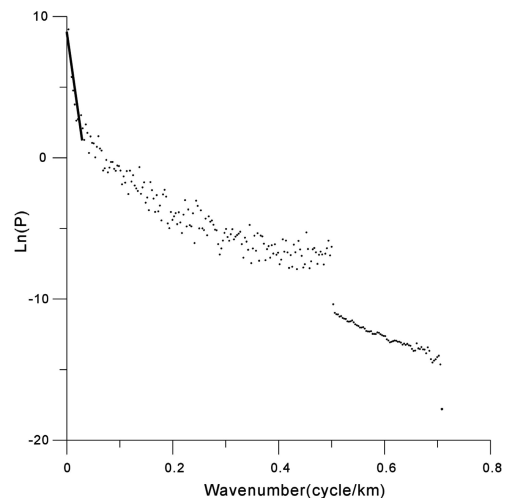


Fig. 7. Two-dimensional radially averaged power spectrum of the Bouguer gravity anomaly.

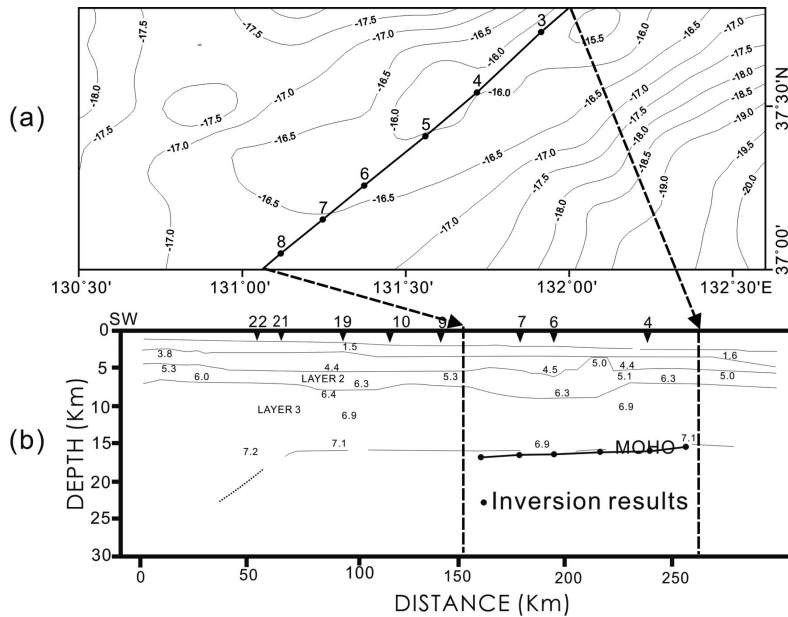


Fig. 8. (a) Inversion results of Moho undulation. Contour intervals are 0.5 km. Thick solid line is a seismic refraction survey line. Numbers are OBS points. (b) Seismic refraction section(Kim *et al.*, 1998). Numbers in the upper part of the figure are OBS points. Numbers shown within the crust are seismic velocities.

해저면지진계에 의한 탐사에서 얻어진 결과(kim *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1998)와 비교하였다(Fig. 8). 해저면 지진계 탐사측선 중 한국해저간극지역에서는 해저면지진계 탐사결과 모호면의 심도가 약 16 km 정도로 나타났다(kim *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1998). 이 결과와 중력을 이용한 모호면 역산결과를 비교하면 한국해저간극지역에서 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. 이 역산결과는 일반적인 해양지각보다 울릉분지의 하부지각이 두껍다는 결과와도 일치한다(Hirata *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1998).

Fig. 9는 반사법 탄성과 탐사 측선을 따라 후리에어 중력이상, 자기이상, 역산법을 통해 얻은 맨틀심도의 단면도 및 반사법탄성과 단면도(Song *et al.*, 2000)를 보여주고 있다. 후리에어중력이상과 자기이상을 살펴보면 울릉도와 안용북해산 사이 해저 및 한국해저간극에서는 낮고 변화가 완만한 값이 나타나는데 이는 깊은 수심과 탄성과 단면도에서 볼 수 있듯이 두꺼운 퇴적층의 영향일 것으로 사료된다. 또한 이사부해산 동쪽도 두꺼운 퇴적층 및 깊은 기반암 심도의 영향으로 후리에어중력이상 및 자기이상의 변화가 완만하고 낮은 이상치를 보인다. 울릉도 및 독도 등 화산체 지역에서는 후리에어중력이상 및 자기이상이 큰 폭의 변화를 보인다. 역산법으로부터 구한 맨틀심도는 맨틀의 상승

효과에 의해서 한국해저간극지역에서 얕은 깊이를 보이며 독도해산들을 지나 오기뱅크쪽으로 가면서 깊어짐을 알 수 있다.

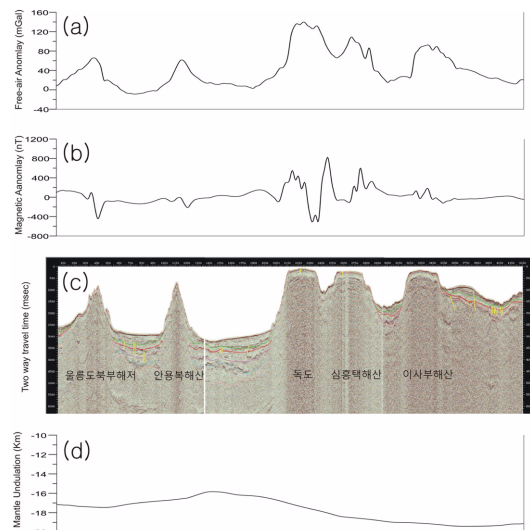


Fig. 9. (a) Free-air anomaly profile along a seismic survey line. (b) Magnetic anomaly profile along a seismic survey line. (c) Seismic reflection cross section(Song *et al.*, 2000). (d) Inversion result profile along a seismic survey line. See the seismic reflection survey track in Fig. 2.

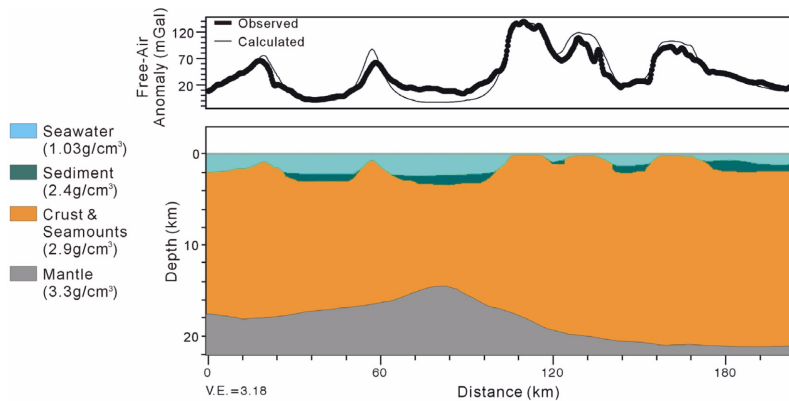


Fig. 10. 2D gravity modelling along a seismic survey line. See the seismic reflection survey track in Fig. 2.

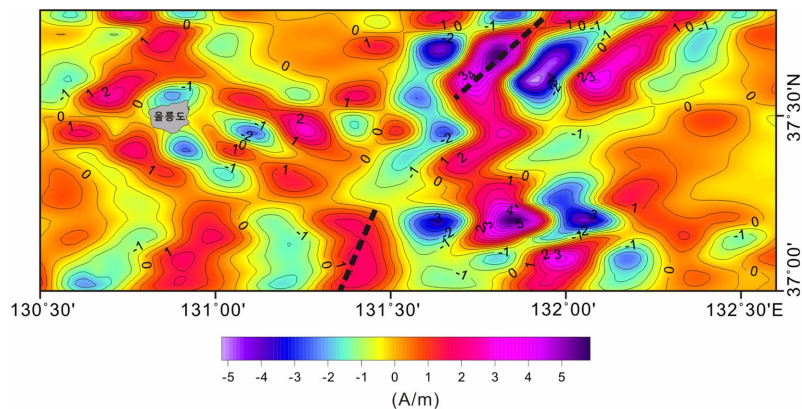


Fig. 11. Magnetization intensity map of the study area. Solid dashed lines shows the main pattern of high magnetization distribution in the Korea Gap.

이 맨틀심도 역산결과와 해저지형자료 및 반사법 탄성과 단면을 이용하여 탄성과 탐사 측선에 대하여 2차원 후리어중력 모델링을 실시하였다(Fig. 10). 해수의 밀도를 1.03 g/cm^3 , 퇴적층의 밀도를 2.4 g/cm^3 , 해산 및 지각의 밀도를 2.9 g/cm^3 , 맨틀의 밀도를 3.3 g/cm^3 로 가정하였다. 하와이안 현무암질 마그마의 경우 수심 1 km 보다 깊은 곳에서 분출되면 $2.9 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도를 가진 nonvesicular rock이 생성되는 경향이 있는데 이 밀도는 해양지각의 layer 3와 비슷한 것이다 (Watts, 1978). 또한 Kim *et al.* (2000)과 Kim *et al.* (2009a)의 기존 독도 모델링 결과에서도 독도 화산체의 밀도가 하와이섬들의 평균보다 높은 2.9 g/cm^3 로 가정하고 계산하여 관측치와 모델계산치가 잘 일치하는 결과를 얻었다. 따라서, 독도 화산체들의 대부분을 차지하는 해수면아래 해산의 밀도는 수면 위 독도하부에서 채취된 알칼리 현무암질역 및 기존 논문의 모델을

기준으로 2.9 g/cm^3 로 가정하였다. 그 결과로 나온 계산된 중력이상치와 관측된 중력이상치가 대체로 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다(Fig. 10). 이 2차원 중력 모델링 결과에서도 모호면의 심도가 해저면 지진계 탐사측선(Fig. 8)이 지나가는 안용북해산과 독도 사이의 한국해저간극지역에서 얇은 것을 볼 수 있으며 오키뱅크쪽으로 갈수록 깊어진다. 이 결과는 앞서 계산된 역산 결과 및 기존 해저면 지진계 탐사결과(Kim *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1998)에서 나타나는 두꺼운 해양지각의 구조와 경향성의 결과와 잘 일치하는 것이다.

Fig. 11은 자기이상을 이용하여 자화강도를 구하고, 이를 활용하여 제작한 자화분포도이다. 울릉도와 독도 등 화산체에 의한 강한 자기이상대에 의해 나타나는 자화분포대를 제외하면 주로 북동-남서방향의 선형배열이 나타난다. 해령의 열개축을 중심으로 Central Anomaly Magnetization High(CAMH)와 같은 높은

자화 이상대가 나타나는데 이는 젊은 배개용암(pillow lava)에서 초기에 강하게 자화된 자성광물의 존재(예: 함티탄자철석)에 기인한다(Schouten *et al.*, 1999). 또한 분출 후 자성광물은 시간이 지남에 따라 저온산화물을 받음으로써 배개용암의 잔류자화를 급격히 감소시켜, 해령의 주변은 열개축보다 상대적으로 낮은 잔류자화값을 나타내게 된다(Schouten *et al.*, 1999). 이 자화분포도에서 나타나는 한국해저간극의 북동-남서 방향의 고자화선형이상대와 그 주변에 나타나는 저자화선형이상대는 해령에서 나타나는 CAMH와 그 해령 주변의 저자화대와 유사한 경향을 보인다(Fig. 11). 또한 이 고자화선형이상대는 Kato *et al.* (2007)이 연구한 결과에서 제시된 울릉분지의 magnetic lineation과 유사한 방향성을 갖고 있다. 부게이상, 맨틀심도 역산, 2차원 중력모델링 및 자화분포도의 결과들은 기존 논문들에서 논의가 된 동해 생성시의 울릉분지의 가능성 있는 spreading center(Park, 1998; Lee *et al.*, 1999) 위치가 울릉도와 독도 사이의 한국해저간극으로부터 울릉분지까지 북동-남서의 방향성을 가질 것이라는 결과와 부합된다.

4. 결 론

울릉분지 북동부에 위치한 연구지역은 울릉도와 독도해산들, 그리고 한국해저간극으로 이루어져 있으며 최대수심은 약 -2500 m를 보인다. 후리에어이상은 지형의 영향을 잘 반영하며 전체적으로는 울릉도와 독도 및 해산들에서 높은 값을 보이며 울릉분지지역인 남서쪽 및 한국해저간극의 북동쪽은 수심이 다른 지역에 비해 깊고 퇴적층이 두껍게 분포하여 완만한 저중력이상이 나타나는 것으로 판단된다. 부게이상은 해산들에 의한 국지적인 이상치를 보이지만 한국해저간극 및 울릉분지를 중심으로 고이상을 보이는데 이는 맨틀상승에 의한 영향이라 판단된다. 자기이상도를 살펴보면 연구지역의 북동쪽과 남서쪽에는 0~50 nT 정도의 값이 넓게 분포하는데 두꺼운 퇴적층 하부의 깊은 기반암심도의 영향으로 판단된다. 천부지층인 화산체(섬과 해산들)들을 중심으로 복잡한 자기이상대를 나타낸다. 연구지역 부게중력이상의 파워스펙트럼 분석으로부터 계산된 연구지역 모호면의 평균 깊이는 -16.1 km로 나타났다. 이 파워스펙트럼 분석을 이용하여 모호면 심도 역산을 수행하였다. 이 역산법으로 계산된 모호면의 심도는 한국해저간극지역에서 -16~-17 km 정도이며 오끼뱅크 및 울릉도의 북서부쪽으로 갈수록 심도가

깊어지는 결과가 나타났다. 이 역산결과는 울릉분지의 해양지각이 일반적인 해양지각에 비해 두껍다는 기존 결과와 일치한다. 2차원 중력 모델링 결과에서도 모호면의 심도가 해저면지진계 탐사측선이 지나가는 안용복해산과 독도 사이의 한국해저간극지역에서 얕은 것을 볼 수 있으며 오끼뱅크쪽으로 갈수록 낮아진다. 자화분포도에서는 울릉도와 독도 등 화산체에 의한 강한 자기이상대에 의해 나타나는 자화분포대를 제외하면 주로 북동-남서방향의 선형배열이 나타난다. 심도역산 결과, 2차원 중력모델링 및 자화분포 결과를 종합해보면 동해의 생성시의 울릉분지의 가능성 있는 spreading center 위치가 한국해저간극에서부터 울릉분지까지 북동-남서 방향일 것이라는 기존 논문들의 주장과 부합된다고 판단된다.

향후 수면아래 화산체들의 암석 시추 등을 통한 암석학적 분석 및 생성연대 측정과 같은 정확한 지질학적인 연구가 추가적으로 실시된다면 동해의 생성/진화 및 해저자원개발에 관하여 많은 정보를 우리에게 제공하게 될 것이다.

사 사

본 연구는 2010년 국토해양부의 ‘독도의 지속가능한 이용연구(PM55861)’ 및 2010년 한국해양연구원의 ‘정밀해저면 영상탐사기를 이용한 천해해저면 조사(PE98553)’ 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이 연구를 수행할 수 있도록 도와주신 한국해양연구원 및 국토해양부 관계자분들께 깊은 감사를 드리며 귀중한 자료를 이용하도록 도와주신 한국지질자원연구원과 국립해양조사원의 여러분들께도 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문을 항상시킬 수 있도록 심사해주신 한현철박사님과 익명의 심사위원님께도 감사를 드립니다.

참고문헌

- Hayashida, A., Fukui, T. and Torii, M. (1991) Paleomagnetism of the Early Miocene Kani Group in Southwest Japan and its implication for the opening of the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, v.18, p.1095-1098.
- Hirata, N., Tokuyama, H. and Chung, T. (1989) An anomalously Thick Layering of the Crust of the Yamato Basin, Southeastern Sea of Japan : the Final Stage of Back-arc Spreading. In : G.G.R.Buchbinder, J. Ansorge & S. Crampin(Convenors), *Fine Structure and Anisotropy of the Lithosphere. Tectonophysics*, v.165, p.304-314.

- Hsu, S.K., Sibuet, J.C. and Shyu, C.T. (1996) High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. *Geophysics*, v.61, p.373-386.
- Isezaki, N. and Uyeda, S. (1973) Geomagnetic Anomaly Pattern of the Japan Sea. *Mar. Geophys. Res.*, v.2, p.51-59.
- Jeon, J.S. (1995) A geophysical study on the geological structure of the southern part of the Gyeongsang Basin. Ph. D. Thesis, Univ. Yonsei, p.1-139.
- Jolivet, L. and Tamaki, K. (1992) Neogene Kinematics in the Japan Sea Region & Volcanic Activity of the Northeast Japan Arc. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Result*, 127/128(part 2), p.1311-1331.
- Jolivet, L., Huchon, P., Lepichon, X., Chamot-Rooke, N. and Thomas, J.C. (1991) Arc Deformation and Marginal Basin Opening: Japan Sea as a Case Study. *J. Geophys. Res.*, v.96, p.4367-4384.
- Kang, M.H., Han, H.C., Yun, H.S. and Lee, C.W. (2002) Geophysical characteristics of seamounts around Dok Island. *The Sea*, v.7, p.267-285.
- Kato, H., Isezaki, N., Park, C.H., Kim, C.H. and Nakanishi, M. (2007) Characteristics of crustal magnetic structures in the Tsushima (Ulleung) and Japan Basins from vector magnetic anomalies. *Earth Planets and Space*, v.59, p.887-895.
- Kim, C.H. (2006) A study on Dokdo and adjacent seamounts in the northeastern part of the Ulleung Basin using geophysical data. Ph. D. Thesis, Univ. Yonsei, p.1-147.
- Kim, C.H., Park, C.H., Ko, Y.T., Jung, E.Y., Kwak, J.Y., Yoo, S.H. and Min, K.D. (2007) The Study of Formation for Dokdo Seamounts at the Northeastern Part of the Ulleung Basin Using Gravity and Magnetic Data. *Econ. Environ. Geol. Korea*, v.40, p.153-170.
- Kim, C.H., Park, C.H., Jeong, E.Y., Ko, Y.T., Hwang, J.S. and Shim, T.M. (2009a) Flexural isostasy and loading sequence of the Dokdo seamounts on the Ulleung Basin in the East Sea (Sea of Japan). *J. Asian Earth Sci.*, v.35, p.459-468.
- Kim, C.H., Park, C.H., Jeong, E.Y., Hwang, J.S. and Ko, Y.T. (2009b) Evolution of the Dok Do seamounts, Ulleung Basin, East Sea: constraints based on reconstruction of virtual geomagnetic poles using paleomagnetic data. *Geo-Mar. Lett.*, v.29, p.161-169.
- Kim, H.J., Han, S.J., Lee, G.H. and Huh, S. (1998) Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implication for the opening of the East Sea (Japan Sea). *Mar. Geophys. Res.*, v.20, p.219-237.
- Kim, H.J., Lee, G.H., Jou, H.T., Cho, H.M., Yoo, H.S., Park, G.T. and Kim, J.S. (2007) Evolution of the eastern margin of Korea: Constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea). *Tectonophysics*, v.436, p.37-55.
- Kim, H.J., Park, C.H., Hong, J.K., Jou, H.T., Chung, T.W., Zhigulef, V. and Anosov, G.I. (1994) A seismic experiment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwestern Japan Sea (East Sea of Korea). *Geophys. Res. Lett.*, v.21, p.1975-1978.
- Kim, K.H. (2000) K-Ar ages and Nd-Sr isotopes of Dokdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.36, p.313-324.
- Kim, W.K., Kim, C.H., Park, C.H., Han, H.C., Kwon, M.S., Min, K.D., Kim, B.S. and Choi, Y.S. (2000) Structural Implications of Gravity Anomalies around Dok Island and its Surrounding Seamounts in the East Sea. *Econ. Environ. Geol. Korea*, v.33, p.537-545.
- Kim, Y.K., Lee, D.S. and Lee, K.H. (1987) Fractional Crystallization of the Volcanic Rocks from Dog Island, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.23, p.67-82.
- Kurashimo, E., Shinohara, M., Suyehiro, K., Kasahara, J. and Hirata, N. (1996) Seismic evidence for stretched continental crust in the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, v.23, p.3067-3070.
- Lallemant, S. and Jolivet, L. (1986) Japan Sea: a pull-apart basin? *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.76, p.375-389.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Han, S.J. and Kim, D.C. (2001) Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin. *Mar. Petrol. Geol.*, v.18, p.615-634.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Suh, M.C. and Hong, J.K. (1999) Crustal Structure, Volcanism and Opening mode of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, v.308, p.503-525.
- Min, K.D., Seo, J.H. and Kwon, B.D. (1987) Applied Geophysics. *Usung Co.*, p.21-219.
- Nabighian, N.M. (1972) The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v.37, p.507-517.
- Nabighian, N.M. (1974) Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, v.39, p.85-92.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1983) Paleomagnetic Evidence for the Clockwise Rotation of Southwest Japan arc. *J. Geol. Soc. Japan*, v.93, p.91-105.
- Otofuji, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985) Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, v.317, p.603-604.
- Park, C.H., Kim, H.J., Yang, C.S., Suk, B.C. and Isezaki, N. (1996) Crustal structure of the Ulleung Basin, the East Sea (Japan Sea), from gravity and Ocean Bottom Seismometer data. *J. Geol. Soc. Korea*, v.32, p.276-290.
- 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. Thesis, Univ. Chiba, p.10-217.
- Park, C.H., Isezaki, N., Seama, N., Son, H.W. and Kim, J.W. (2002) Study on Deep Crustal Structure of the Ulleung Basin, the East Sea (Japan Sea), from Separating Shallow Components of Gravity Anomalies. *J. Geol. Soc. Korea*, v.38, p.519-535.
- Parker, R.L. and Huestis, S.P. (1974) The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography. *J. Geophys. Res.*, v.79, p.1587-1593.
- Roest, W.R., Verhoef, J. and Mark, P. (1992) Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, v.37, p.116-125.
- Schouten, H., Tivey, M.A., Fornari, D.J. and Cochran, J.R. (1999) Central anomaly magnetization high: constraints on the volcanic construction and architecture

- of seismic layer 2A at a fast-spreading mid-ocean ridge, the EPR at 9°30'-50'N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.169, p.37-50.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H. (1994) Geology and Evolution of Tok Island. *J. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.242-261.
- Song, W.O. *et al.* (2000) The study of environments and ecosystem on land and at marine surrounding Dokdo. Korea Ocean Research and Development Institute, p.385-600.
- Tamaki, K. (1988) Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v.39, p.269-365.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J.C. and Pisciotto, K.A. (1992) Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Result*, 127/128(part 2), p.1333-1348.
- Thurston, J.B. and Brown, R.J. (1994) Automated source-edge location with a new variable pass-band horizontal-gradient operator. *Geophysics*, v.59, p.546-554.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974) Plate tectonics and the Japanese island: a synthesis, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v.85, p.1159-1170.
- Watts, A.B. (1978) An Analysis of Isostasy in the world's ocean 1. Hawaiian-Emperor Seamount chain. *J. Geophys. Res.*, v.83, p.5989-6004.
- Won, J.K. and Lee, M.W. (1984) The Volcanism and Petrology of alkali Volcanic rocks, Ulrung Island. *J. Geol. Soc. Korea*, v.20, p.296-305.

2010년 9월 27일 원고접수, 2010년 12월 14일 게재승인