

울릉분지와 동해 해산의 기원과 발달과정에 대한 해양지구물리학적 연구

김진호^{1*} · 박수철² · 강무희¹ · 김경오¹ · 한현철¹

¹한국지질자원연구원, ²충남대학교 해양학과

Marine Geophysical Constraints on the Origin and Evolution of Ulleung Basin and the Seamounts in the East Sea

Jinho Kim^{1*}, Soo-chul Park², Moo-hee Kang¹, Kyong-O Kim¹ and Hyun-chul Han¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Oceanography, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

The East Sea, a marginal sea or back-arc basin, consists of Japan Basin, Yamato Basin, and Ulleung Basin and is surrounded by the Pacific Plate and Philippine Sea Plate. Ulleung Basin locates in the southwestern part of the East Sea and shows the depth of 1,500 m in average and 2,500 m in maximum, connecting to the Japan Basin along 2,000 m contour. The slope of the seafloor is greater in the western side of the basin than in the southern and the eastern side. The crustal thickness of the Ulleung Basin from the OBS tends to get thicker toward the north and the west side and the sediment thickness of the Ulleung Basin is getting thicker toward the southeast side and reaches up to 12 km. The crustal type of the Ulleung Basin was variously suggested as like as a rifted continental crust, an extended continental crust, and an incipient oceanic crust. The origin of the crustal formation and the Ulleung Basin, however, is still controversial. Based on the bathymetry and gravity anomaly data for this study, the axis of the Ulleung Basin shows that the basin develops along the axis trending NW-SE direction and reveals a general symmetry of the bathymetry. And also the free-air gravity anomalies show a very similar pattern to the bathymetry of the basin. The sediment thickness is relatively thicker in the southeastern side of the basin than in the northwestern side. Although the crustal age of the Ulleung Basin is supposed to be younger than them of the Japan Basin and the Yamato Basin, the free-air gravity anomalies of the Ulleung Basin ranging -40 to 50 mGals are lower than the other basins, which suggests that the densities of crust and sediment of the Ulleung Basin are lower than the Japan Basin and the Yamato Basin.

Key words : Ulleung basin, Bathymetry, Free-air gravity anomaly, Crustal density, Origin of the basin

동해는 일본분지, 야마토 분지, 울릉분지 등 큰 3개의 해양분지와 크고 작은 고지대(topographic highs) 등으로 구성 되어 있고, 주변해(marginal sea) 또는 후배호 분지(back-arc basin)로 분류되며 태평양판, 필리핀판 등이 주변해 위치하고 있다. 동해의 남서쪽에 위치한 울릉분지는 평균수심 약 1500 미터, 최대수심 약 2500 미터를 보이며, 2000 미터 등심선을 따라 동해의 일본 분지와 연결되어 있다. 분지 내에서 해저면 경사는 대체적으로 서쪽이 크게 나타나며, 남쪽과 동쪽의 경사는 이에 비하여 상대적으로 작게 나타난다. 지진계(OBS) 자료와 탄성파 자료 등에 의해 밝혀진 울릉분지의 지각 두께는 북쪽으로 그리고, 한국 연안 쪽으로 갈수록 두꺼워지는 경향을 보이며, 퇴적물의 두께는 울릉분지 남서쪽으로 갈수록 점차 두꺼워져 최대 약 12 km에 이른다. 울릉분지의 지각은 열개된 대륙지각(rifted continental crust), 신장된 대륙지각, 해저확장 초기단계에 형성된 해양지각 등 다양하게 제시되고 있으나 현재까지 구체적 증거는 없다. 수심 및 중력자료에 의하면, 울릉분지의 축은 북서-남동 방향으로 발달하고 있다. 또한, 후리에어-이상의 분포도 수심 자료와 유사하게 북서-남동 방향의 축을 중심으로 대칭성을 보이고 있으며, 퇴적물의 두께 분포 역시 북서쪽에서 남동 방향으로 진행하면서 일반적으로 두꺼워지는 양상을 보이고 있다. 울릉분지가 상대적으로 젊은 연령에 해당하는 지각임에도 불구하고, 전체적으로는 후리에어-이상 값이 -40~50 mGal 정도의 낮은 특징을 보이는데 이것은 울릉분지를 구성하는 지각과 퇴적물의 밀도가 일본분지와 야마토 분지를 구성하는 물질에 비하여 상대적으로 낮다는 것을 의미한다.

주요어 : 울릉분지, 수심, 후리에어-이상, 지각의 밀도, 울릉분지 형성 원인

*Corresponding author: jhskim@kigam.re.kr

1. 서 론

동해는 주변해(marginal sea) 또는 후배호 분지(back-arc basin)로 분류되며, 판구조론의 관점에서 유라시아판, 태평양판, 필리핀판 등으로 경계 지어지고 있다. 또한, 일본 열도에 의해 태평양과 분리되어 유라시아 판내에 위치한 반 폐쇄해이다. 동해는 크게 3개의 분지인 일본분지, 야마토 분지, 울릉분지로 구성되어 있다. DSDP와 ODP의 시추(Fig. 1)에 의해 일본분지와 야마토분지에 대한 지질학적 연구는 꾸준히 수행되어 왔으며, 이러한 분지 형성과정의 해석을 통하여 동해의 성인에 대한 연구는 진행되었으나, 아직까지 형성 원인과 과정에 대한 근거는 부족하다.

동해의 남서쪽에 위치한 울릉분지는 서쪽으로 한국, 동쪽으로 일본의 혼슈, 북쪽과 남쪽은 각각 한국대지 및 야마토 라이스, 대한해협 등에 의해 경계 지어진다.

울릉분지는 평균수심 약 1500미터, 최대수심 약 2500미터를 보이는 분지이며, 2000미터 등심선을 따라 일본 분지와 연결되어 있다. 연구지역은 가로 약 450 Km 세로 약 360 Km의 길이로 발달하고 있고, 연구지역 중심에 위치한 울릉분지의 해저 지형 중심축은 북서-남동 방향으로 발달해 있으며 다수의 해산이 울릉도와 독도인근에 분포하고 있는 지형적 특징을 보이고 있다(Fig. 1). 분지내의 해저면 경사는 대체적으로 서쪽이 크게 나타나며, 남쪽과 동쪽의 경사는 이에 비하여 상대적으로 작게 나타난다. 일본분지와 야마토분지에 대한 지질학적 연구는 DSDP, ODP 시추 자료와 미국, 일본, 러시아 등에 의하여 비교적 활발히 진행되었으나, 울릉분지에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다. 그러나, 최근 들어 울릉분지에 대한 퇴적학, 층서학, 해양지구물리학 등의 관점에서 비교적 활발한 연구 활동에 의해 울릉분지는 반원양성 퇴적물과 다양한 중력류

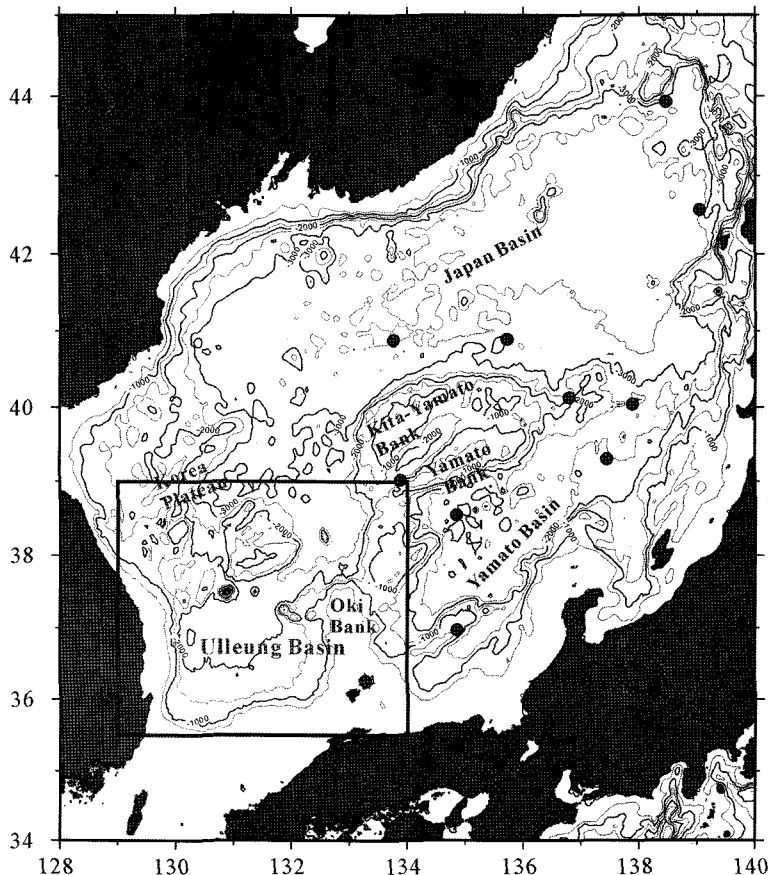


Fig. 1. The physiography and bathymetry map of the East Sea. The red dots denote DSDP and ODP drill sites. The blue box represents the study area (Ulleung Basin). The contour interval is 500 m in depth.

퇴적물 등이 비교적 두껍게 퇴적되어있고, 이러한 퇴적물과 중기 마이오세의 활발한 화성활동에 의한 현무암질 암석이 교호하고 있는 것으로 알려져 있다(Chough *et al.*, 1989; Lee, 1992). 해저면 지진계(OBS) 자료와 탄성과 자료 등에 의해 밝혀진 울릉분지의 지각 두께는 북쪽으로 그리고, 한국 연안쪽으로 갈수록 두꺼워지는 경향을 보이며, 퇴적물의 두께(Lee *et al.*, 2001)는 울릉분지의 주변부 특히 남동쪽으로 갈수록 점차 두꺼워져 최대 약 12 km에 이른다(Fig. 2). 울릉분지의 지각구조는 제시된 다양한 동해 형성 모델과 해저면 지진계 자료에 의하면 열개된 대륙지각(rifted continental crust), 신장된 대륙지각(extended continental crust), 해저확장 초기단계에 형성된 해양지각(incipient oceanic crust) 등 다양하게 제시되고 있으나 아직 구체적인 증거는 거의 없는 실정이다. 울릉분지 중심부의 하부지각

은 일반적인 대륙지각보다는 얇고 해양지각보다는 다소 두껍게 나타나고 있다.

본 연구의 목적은 지구물리 자료, 특히 수심 자료와 중력자료를 이용하여 울릉분지의 지각구조를 포함한 지구구조를 고찰하고, 형성 기원 및 발달과정을 조명하고자 한다. 따라서, 취득 가능한 지구물리학적 자료를 기초로 하여, 다양한 연구로부터 얻어진 여러 가지 해석 및 결과를 비교함으로써, 울릉분지의 지각구조와 특성 및 인근 해산의 기원과 발달과정을 제시하여 향후 광역적 또는 지역적 지질학·지구물리학 등의 연구에 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 기존 연구

동해의 형성 기원과 발달과정에 대한 연구는 주로

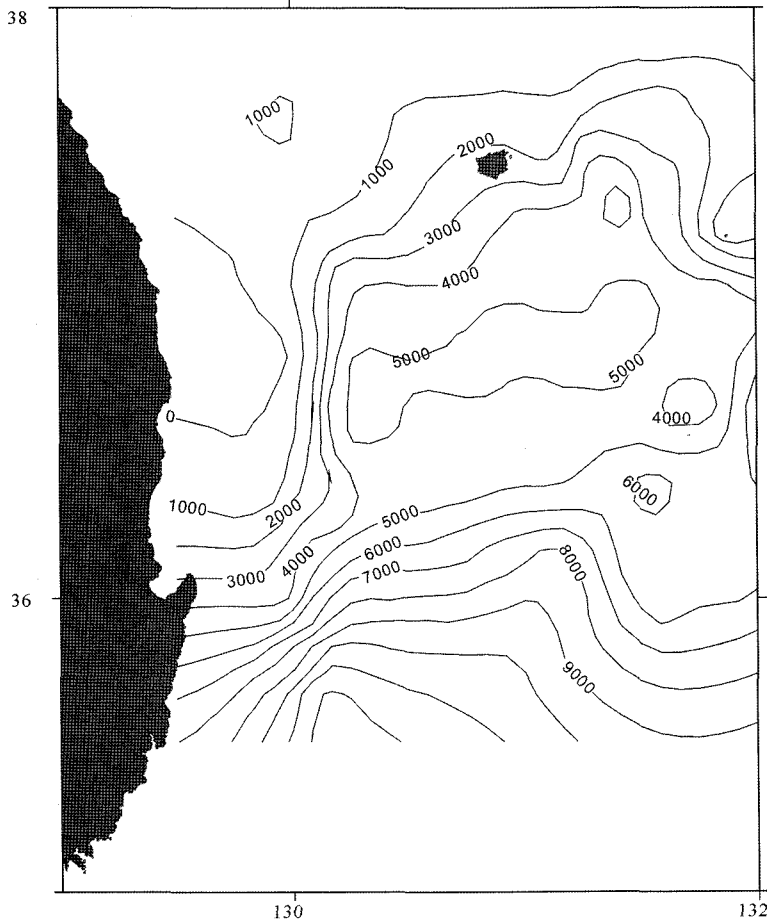


Fig. 2. Total Isopach map of the Ulleung Basin. The contour interval is 1,000 meters. The isopach is digitized and redrawn from Lee *et al.* (2001).

고지자기 자료, DSDP (Deep Sea Drilling Project) 4개(Site 299, 300, 301, 302)와 ODP (Ocean Drilling Program) 6개(Site 794, 795, 796, 797, 798, 799)의 시추지점(Fig. 1)에서 진행된 시추자료, 그 외의 지질학적, 지구물리학적 자료에 의해 진행되어 왔다. 1980년대 중반부터 1990년대 중반까지 약 10여년에 걸쳐 고지자기 자료와 지구물리 자료에 근거한 동해 형성기원의 연구가 수행되어 대체로 Fan-shape model 또는 Bar-door model(Otofujii and Matsuda, 1983, 1984, 1987; Otofujii *et al.*, 1985, 1991, 1994)과 pull-apart model (Ingle, 1992; Lallemand and Jolivet, 1985; Jolivet and Tamaki, 1992; Jolivet *et al.*, 1989, 1991, 1995; Tamaki, 1986, 1988; Tamaki *et al.*, 1992) 등 2개의 범주로 제시되었다. 그러나, 최근 들어 해저지형의 형성과 지구조는 밀접한 상관성을 갖고 있다는 경향이 대두함에 따라, 이에 대한 연구가 활발히 진행되게 되었다.

울릉분지를 포함하여 동해에 대한 국내의 연구는 주로 석유개발의 목적으로 탄성과 자료를 이용한 지질구조의 해석을 목적으로 진행되었으며, 1990년대에 접어들어 형성 기원과 발달과정에 대한 연구(Lee, 1992; Yoon, 1994)가 비교적 활발히 시작되었다. 또한, 독도 인근의 지질학 및 지구물리학적 탐사를 통하여, 이 지역에 3개의 해산이 존재함을 발견하였고, 이를 각각 East high, Middle high, West high (이치원 외, 1997)와 동해, 탐해, 독도해산(강무희, 2000; 강무희 등, 2002)으로 명명하였다. Chough and Barg (1987)은 동해에서 시추된 퇴적물로부터 울릉분지 발달 과정을 단계적으로 제시하였고, Chough and Lee (1992)는 다중 채널 탄성과 자료에 나타난 화성기원 음향기반암 특성의 해석을 통하여, 울릉분지의 발달은 남쪽으로 이동한 일본열도에 의해 북동-남서 방향의 화산활동과 관련이 있음을 제시하였으며, Yoon (1994)과 Yoon and Chough (1995)는 탄성과 층서 연구를 통하여, 울릉분지가 후기 울리고세 이후 주향이동단층 등과 같은 여러번의 지구조 운동을 통한 수정 분리 모델(modified pull-apart model)의 열림-회전-단층의 과정에 의해 발달되어왔음을 제시하였다. Lee and Suk (1998)은 단일 채널 탄성과 반사 단면도에 나타난 2개의 특징적인 퇴적상을 분류·해석하여 울릉분지의 퇴적모형을 제시하였다. Kim *et al.* (1998)과 김한준(1999)은 해저면 지진계(Ocean Bottom Seismometer)로부터 수집된 탄성과 반사 및 굴절 자료의 속도 분석을 통하여 지각의 두께 등을 포함하는 지각구조를 제시하였고, 맨틀 플

름(mantle plume)과 해저 확장에 의해 초기 해양 지각이 생성되면서 울릉분지가 형성되었음을 제시하였다. 또한, Lee *et al.* (1999)은 울릉분지의 지각구조와 화산활동에 대한 해석을 통하여 울릉분지가 분리모델(pull-apart model)에 의하여 해저확장의 초기단계 동안 형성되었음을 제시하였다. 박찬홍 등(1999a)은 동해와 울릉분지의 중력자료를 이용하여 북동-남서방향의 선형분포를 보이는 중력이상의 특성을 제시하였고, 이것은 동해의 열개과정에서 생성된 지각의 균열을 따라 발생한 마그마의 분출 또는 관입과 같은 화산활동의 결과로 해석하였다. 박찬홍 등(2000)은 울릉도와 독도 주변의 해산에 대한 중력모델링을 실시하여, 이 지역의 지각이 울릉분지의 지각에 비하여 상대적으로 다소 얇고 15-16 km 정도의 모호면 깊이를 갖는 Airy 형태의 지각평형을 이루고 있는데, 이는 하부의 맨틀 상승에 의한 것으로 해석하였다. 이러한 결과로부터 박찬홍 등(1999a)과 김원근 등(2000)은 울릉분지의 형성과 발달은 맨틀과 관련이 있으며, 울릉분지를 형성하는 지각은 해양지각과 대륙지각의 특성을 보여주는 전이지각임을 제시하였다. 또, 박찬홍 등(1999b)은 자기이상 자료의 분석을 통하여, 울릉분지 내에 해양지각의 존재 가능성을 시사하였으며, 해저확장과 관련된 지구조 운동에 의하여, 해양지각의 존재 가능 범위가 울릉분지의 북동쪽으로 확대되었음을 제시하였다. 독도와 한국대지에서 채취한 암석의 지화학적 조성에 대한 연구를 통하여, 김규한(2000)은 독도는 해양섬 현무암(oceanic island basalts)의 경향과 울릉도 화산암과 유사성을 보이는 특성을 제시하였고, 독도 형성의 기원이 울릉도와 유사한 환경에서 비롯되었음을 시사하였다. 또한, 인근 지역인 한국대지는 화강암으로 구성된 대륙지각에서 기원한 것으로 해석되지만, 한반도에 분포하는 여러 화강암과는 다소 차이가 있는 것으로 알려져 있다(이종익 등, 2000). 따라서, 울릉분지와 한국대지는 지리적 인접성에도 불구하고, 그 형성 기원은 뚜렷이 대비되는 것으로 알려져 있다.

3. 동해 성인 모델

후배호 분지(back-arc basin)는 크게 마리아나 트러프(Mariana Trough)와 라우분지(Lau Basin)과 같이 해양기원 화산섬(oceanic island arc)의 후면(back-arc side)에 형성되는 해양형 후배호 분지(oceanic type back-arc basin)와 동해와 남중국해와 같이 대륙기원 화산섬(continent arc)의 후면(back-arc side)에서 발

달하는 대륙형 후배호 분지(continental type back-arc basin)로 분류할 수 있다(Tamaki, 1995). 후배호 분지의 성인에 대한 원인은 명확히 밝혀지지 않았으나, 지질학 및 지구물리학적 자료에 기초하면 팽창(extension)에 의해 생성된다는 것이 대체적인 견해이다. 일반적으로 서태평양에 발달하고 있는 많은 후배호분지와 같이 전형적인 후배호 분지의 한 예로 제시 될 수 있는 동해의 성인에 대한 연구는 탄성과 자료에 의한 퇴적-층서학적 관점과 고지자기 자료의 해석을 통한 지구조적 관점에서 진행되어왔으며, 이러한 연구에 의하여 다양한 동해 생성 모델이 제시되었다.

3.1. Fan-Shape Model (Bar-door Model)

Otofuji *et al.* (1994)에 의하여 제시된 모델로 일본열도의 고지자기 연구를 통하여 동해의 생성을 제시하였다. 일본 북동부는 반시계방향으로 일본 남서부는 시계방향으로 빠르게 회전하여 동해가 생성되었다는 가설인데, 이와 같이 양 끝에서 다른 방향으로 회전하기 위하여 동해에서는 빠르게 확장이 일어났다는 것이다. 이러한 회전에 입각하여 북동부는 점진적으로 회전하였고, 남서부는 매우 빠른 회전을 하였을 것이라는 모델이 제시되었다.

3.2 Right-lateral pull apart model

이 모델은 Lallemand와 Jolivet (1985)에 의하여 제시된 모델로, 동해는 2단계의 확장을 거쳐 생성된 것이라는 주장이다. 1단계로 남-북 방향으로 일본분지가 확장하였고, 그 이후 북서-남동 방향으로 야마토분지와 울릉분지가 확장되었다는 가설이다. 이 후 Jolivet *et*

al. (1991)은 지구조자료, 고지자기자료, 수심자료 등을 종합하여 이러한 right-lateral pull apart model에 회전의 설명을 덧붙여 새로운 모델을 제시하였는데, right-lateral pull apart의 변형에 의해 동해 남부에서는 transtension에 의해 시계방향으로 회전하였고, 북동부에서는 transpressional에 의해 반시계 방향으로 회전하여 동해가 형성되기 시작하였고, 이후 일본열도 동쪽주변부에서 새로운 섭입대가 형성되어 동해의 확장이 중지되었다는 모델이다.

3.3 Complex pull apart model

Jolivet와 Tamaki (1992) 등에 의해 제시된 모델로 위의 pull apart model보다 복잡한 설명을 필요로 하는 모델이다. 과거 2500 만년 전부터 현재까지의 지구조를 해석하면서 제시한 모델로 동해는 과거 반염수의 호수로부터 해양지각이 일본 분지에서 생성되어 해저 확장에 의해 대규모 단층이 생성되었으며, 이 단층을 따라 우수 주향이동(dextral strike-slip motion)에 의해 현재의 동해가 생성되었음을 제시하였다. 양산단층 및 쓰시마 단층과 동해의 관련성으로부터 신생대 제 3기 분지의 형성과 성인을 추적하고 한반도와 동해의 지구조 연결성 가능성을 제시하였다.

4. 자 료

연구지역에 대한 탐사는 1960년대부터 1990년대 초 반까지 일본, 미국, 러시아 등을 중심으로 활발히 진행 (Table 1)되어 왔으며, 수심, 중력, 자력, 탄성파자료 등 지구물리자료를 획득하였다. 이 연구에 이용된 자료는

Table 1. NGDC Data set of the East Sea used in this study.

Nation	Source	Number of Cruise	Survey Distance (N.M.)		
			Bathymetry	Magnetics	Gravity
U.S.A.	LAMONT (LDEO)	2	1145	1145	1133
	US NAVY)	4	2137	64	0
	SCRIPPS INST.OC	2	188	194	0
	TEXAS A&M UNIV.(ODP)	2	631	343	0
	DEFENSE MAP. AGEN.	4	1422	0	0
	INT. GRAV. BUR	3	828	0	828
Russia (USSR)	N/A	10	1984	1569	1273
France	N/A	1	39	0	45
China	N/A	1	219	219	219
Japan	HYDR DEPT JAPAN	6	5673	7716	7147
	GEOL SRVY JAPAN	2	4095	3749	4102
	UNIV TOKYO	6	920	271	926
	KOBE UNIV	2	851	851	0
Total		44	19913	15900	3510

NGDC의 GEODAS로부터 도출된 자료를 이용하였으며, 주로 수심자료와 중력자료를 중심으로 구성되었으며, GEODAS 자료의 공백을 최소화하기 위하여 2분격자 간격의 인공위성 고도로부터 도출된 수심과 중력자료를 병합하여 이용하였다.

수심자료는 미국립 지구물리자료센터(National Geophysical Data Center)로부터 44회의 항측자료를 취득하였으나, 수심자료 획득을 시행한 탐사측선(Fig. 3)은 일본의 연안과 아모토분지 일원을 중심으로 실시된 반면, 울릉분지 중심부의 서쪽 해역에서는 탐사측선간격이 상대적으로 넓은 양상을 보이고 있어 자료의 공백에 따른 수심 오차를 최소화하기 위하여 인공위성 고도자

료로부터 도출된 2분간격의 수심자료(Smith and Sandwell, 1997), 그리고 국립해양조사원의 다중빔음향측심자료의 수심도(1:500,000)를 수치화한 자료로 구성되었다. 탐사에 의해 취득된 NGDC 수심자료는 Carter table (1980)로 보정된 자료만 사용하였다.

중력자료는 미국립 지구물리자료센터(NGDC; National Geophysical Date Center)로부터 도출된 30회의 항측자료를 취득하였으나, 수심자료와 마찬가지로 탐사측선간의 공백이 커 공백에 의한 중력이상 자료의 오차를 줄이기 위하여 인공위성 고도자료로부터 도출된 2분간격의 중력자료와 함께 취합되었다. 또한 각 탐사의 자료의 보정방법도 서로 상이한 지구타원체(reference datum)를

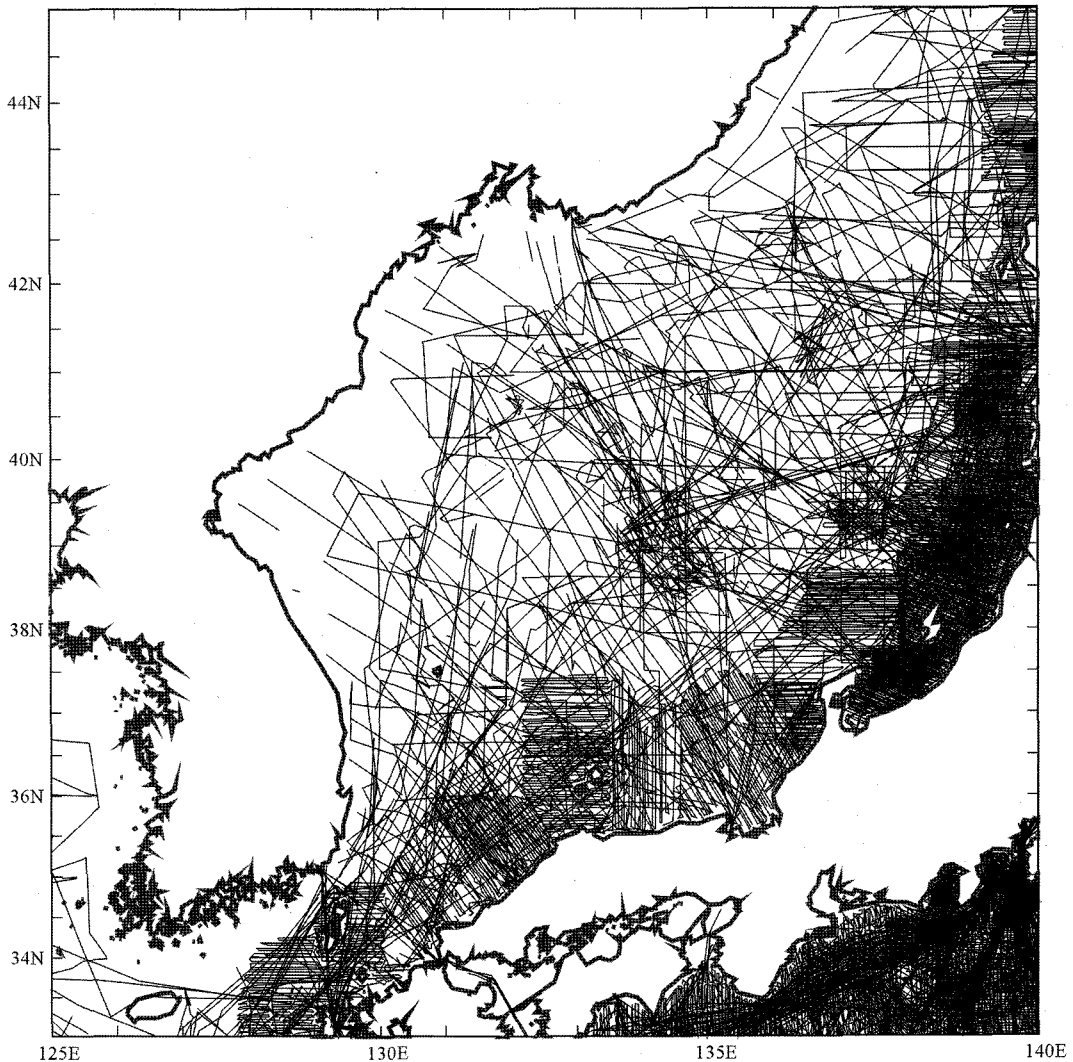


Fig. 3. Survey tracklines extracted from NGDC. Most of the surveys focused on the Japan Basin and Yamato Basin.

사용하였으므로, 오차의 원인을 포함하고 있다. 따라서, 모든 탐사 중력자료는 WGS84를 근거로 단일화한 중력 이상 값을 구하여, 오차의 발생 가능성을 줄였다.

자력자료는 미국립 지구물리자료센터의 항측자료로부터 도출된 36회의 항측자료를 취득하였으나, 연구지역에서 수행된 자력자료는 자기이상도를 작성하기에는 탐사측선간의 공백이 너무 크고, 또한 취득된 각 탐사의 자료의 보정방법도 서로 상이한 구면조화상수를 사용하였으므로, 오차의 원인을 포함하고 있다. 따라서, NGDC로부터 취득된 자력자료는 연구지역의 지구조를 해석하기에 불충분한 자료로 사료되어 중력자료를 통한 해석의 보조자료로 이용하고자 하였다.

미국립 지구물리자료센터(NGDC)의 항측자료(GEODAS) CD에 탄성파자료는 포함되어있지 않다. Lee *et al.* (2001)은 한국석유공사, 한국해양연구원 등이 수행

한 탄성파자료를 바탕으로 연구지역의 퇴적층을 모두 5개의 소 퇴적층으로 분류하였고, 각 퇴적층과 총 퇴적층의 두께를 계산하여 도시하였는데 연구지역 퇴적층의 두께는 이로부터 도출된 총 퇴적층의 등층후도를 수치화(digitizing)하여 사용하였다. 그러나, 지역적인 특성을 대표하기에는 탄성파 탐사 측선간의 간격이 너무 넓어 수심, 후리에어-이상, 퇴적물 두께, 기반암 깊이 등의 2차원 단면도를 나타내는 등 자료의 해석에서 제한적으로 사용되었다.

5. 결 과

5.1. 수심

동해는 전체적으로 북동-남서 방향의 축을 따라 최대 약 3800m에 이르는 수심을 보이는(Fig. 4) 마름모

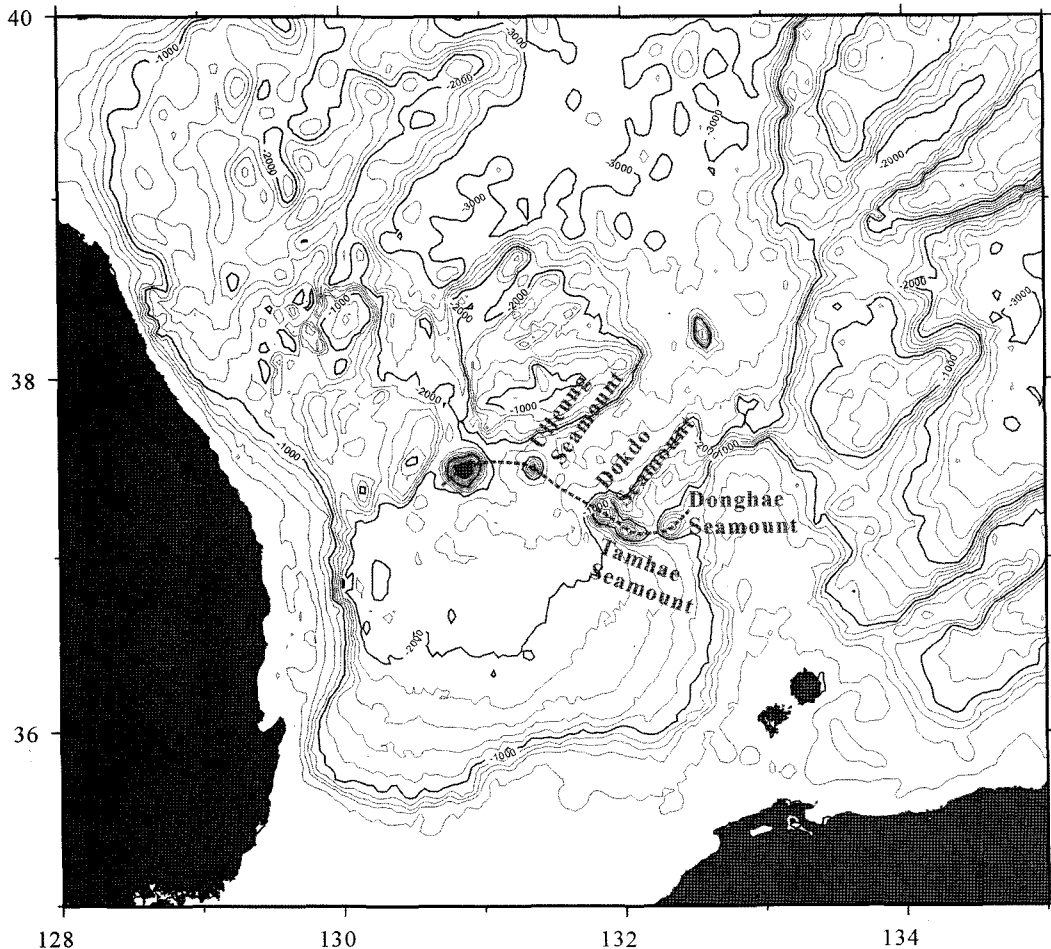


Fig. 4. Bathymetry map of the study area, Ulleung Basin. The seamounts are named after Kang *et al.* (2002). The dotted line connects the center of each seamount. Bathymetric contour interval is 200 meters.

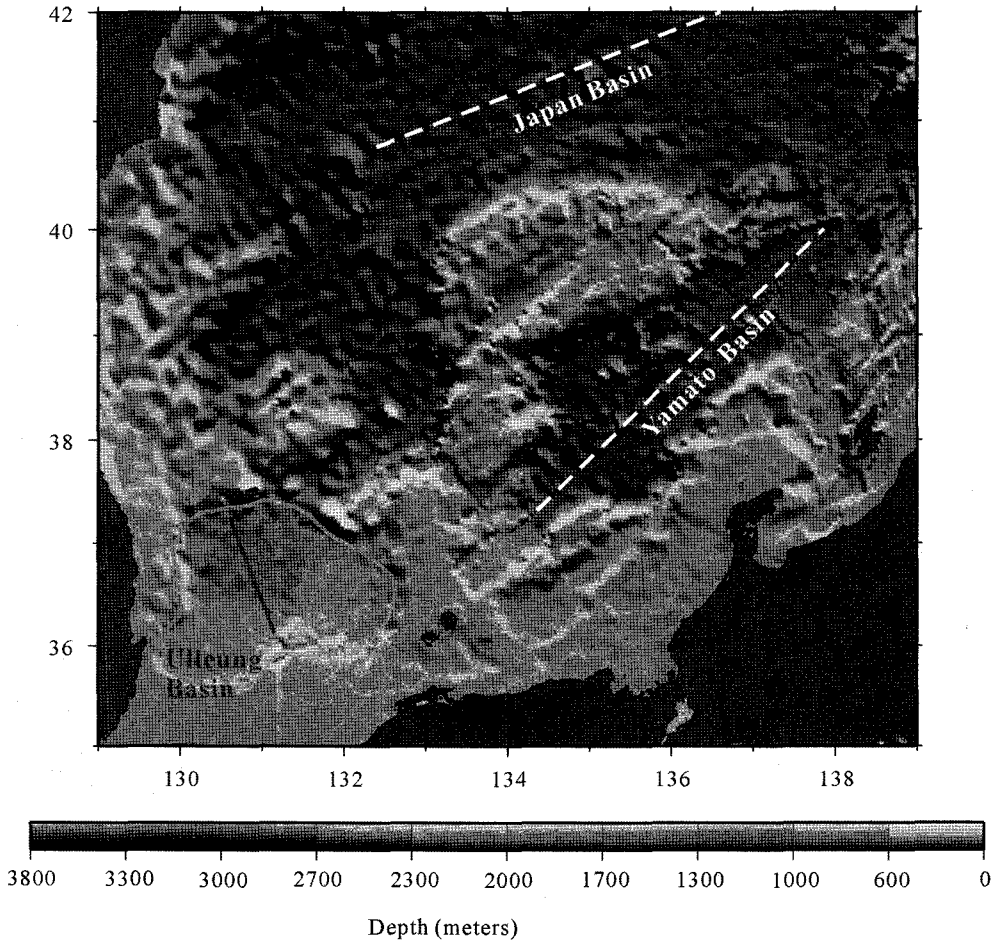


Fig. 5. Color shaded relief map of bathymetry of the East Sea. Bathymetries of the Ulleung Basin are generally symmetrical along the axis in the white lines. The bathymetries of Japan Basin and Yamato Basin show symmetry along the dotted white lines. The thick solid line denotes an outline of the Ulleung Basin. Bathymetries of the Ulleung Basin are almost symmetrical with respect to a basin axis representing 115 to 120 degree in azimuth.

모양의 바다이고, 남서쪽에 위치한 울릉분지는 최대 약 2000 m에 이르는 수심을 보이고 있으며, 동쪽보다 서쪽연안에서 상대적으로 다소 큰 수심 경사도를 보이고 있다. 또한, 동해와는 다소 다른 북서-남동의 해저지형의 축을 나타내고 있으며, 이 축을 중심으로 대칭적인 수심의 분포를 보이고 있다(Fig. 4 and 5). 즉, 일반적으로 일본 분지와 야마토 분지의 해저지형은 각각 동북동-서남서 방향과 북동-남서 방향의 해저지형 축을 중심으로 대체적인 대칭 분포이나, 울릉분지의 해저지형 축은 두 분지의 해저지형 축 방향에 대하여 약 70-80° 왼쪽 방향에 존재하고 있다.

울릉분지 북동쪽 주변부에 위치한 3개의 해산을 강무희(2000)와 강무희 등(2002)은 동쪽으로부터 서쪽으

로 각각 동해 해산, 탐해 해산, 독도 해산으로 명명하였는데, 이들 해산이 위치한 형태는 일정한 방향성을 제시하는 것처럼 나타나고 있다. 또한, 이러한 모양은 울릉분지의 남서쪽과 남동쪽의 사면(200-1000 m 등심선)에서도 나타나고 있다. 특히 해산의 중심을 연결한 곡선은 분지 남서쪽 사면의 등심선들과 매우 유사한 모양으로 나타나고 있다. 이러한 수심 분포의 양상은 울릉분지가 형성될 때, 단순한 확장에 의한 것이라기 보다, 분지의 열개 및 확장과 아울러 분지의 회전도 함께 진행된 것으로 추측된다. 즉, 해산의 위치와 모양은 분지의 형성과 이동에 간접적인 증거를 제시하는 것으로 사료된다.

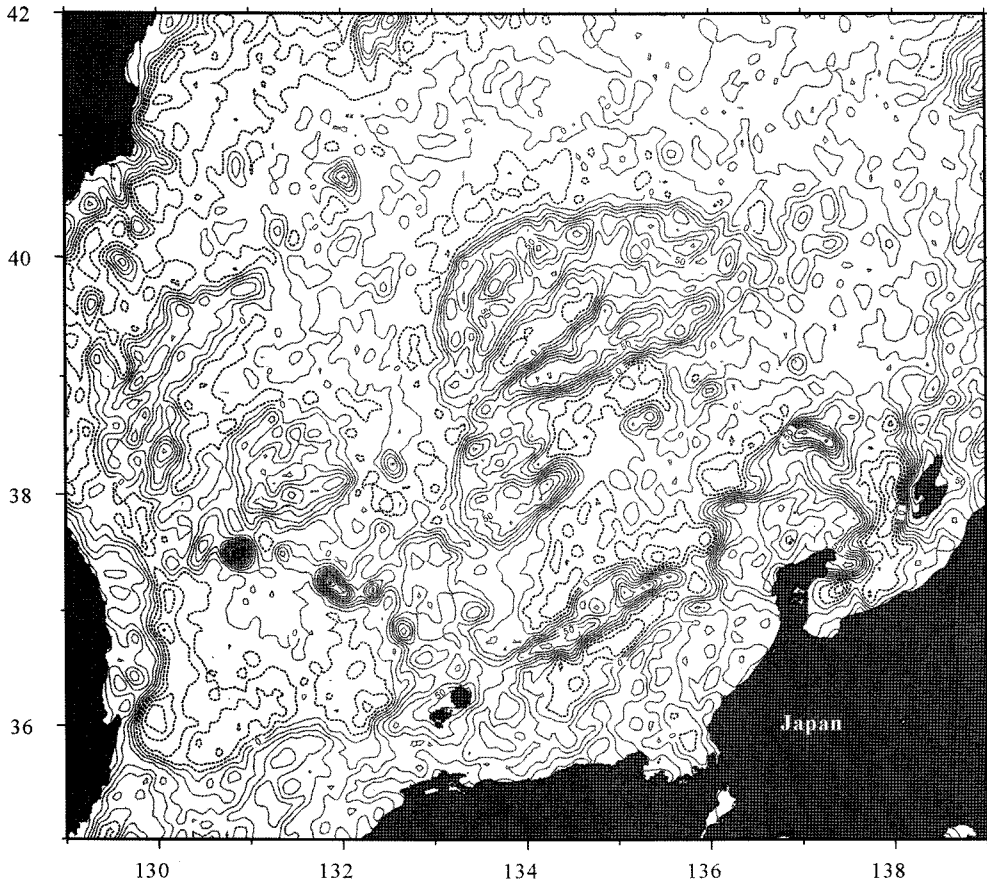


Fig. 6. Free-Air anomaly map of the East Sea. The solid contours denote positive anomalies and the dashed contours denote negative contours. Contour interval is 10 mGal.

5.2. 후리에어-이상

일반적으로 후리에어-이상은 해저지형의 변화를 보여주는 간접자료인데, 동해의 후리에어-이상 자료는 수심자료와 매우 잘 일치하고 있다. 동해의 후리에어-이상(Fig. 6)은 야마토 융기대와 한국대지, 울릉도 인근에서 양의 이상대(positive anomalies)를 보이고 있으며, 이들 지역을 제외한 분지 지역에서는 작은 음과 양의 이상 값이 함께 나타나고 있음을 보여주고 있다. 해양 지각으로 알려지고 있는 일본분지 중심부에서는 전체적으로 약 0-10 mGal 정도의 양의 이상 값을 보이고 있고, 야마토 분지 역시 일본 분지와 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러나, 울릉분지 중심부는 일본분지와 야마토 분지의 경우와는 다른 분포 양상을 보이는데, 분지 중심부에서 -10 mGal 정도의 상대적으로 작은 음의 이상 값(Fig. 7)을 보이고 있고, 분지의 북동쪽에서 0 mGal의 분포를 나타내고 있다. 동해 전체의 후리에어-이상의 특징은 상대적 수심이 더 깊은 일본분지와

야마토 분지에서의 후리에어 이상 값이 수심이 낮은 울릉분지보다 상대적으로 다소 높은 후리에어-이상 값을 보이고 있다는 점이다. 그리고, 울릉분지 내에서 후리에어-이상 값의 분포 특징은 해저 지형의 축과 유사한 북서-남동 방향의 축을 따라 오른쪽에 상대적으로 다소 높은 후리에어-이상 값이 존재하고 분지 주변부의 동, 서양 방향으로 음의 이상 값이 존재하는 양상을 보이는 점, 그리고 0 mGal 등이상선(0 mGal contour)의 분포 역시 해저지형 대칭축과 유사한 축을 중심으로 좌우 대칭의 양상을 보이고 있다는 점인데, 이는 수심분포의 경우와 매우 유사하게 나타나고 있다.

5.3. 퇴적물 두께와 후리에어-이상

울릉분지의 퇴적물 두께(Fig. 2)는 기반암이 노출되어 퇴적물이 쌓이지 않은 곳(울릉분지 북서부 지역)에서부터 울릉분지 남서부의 약 12km에 이르기까지 매우 큰 변화를 보이고 있다(Lee *et al.*, 2001). 울릉분지

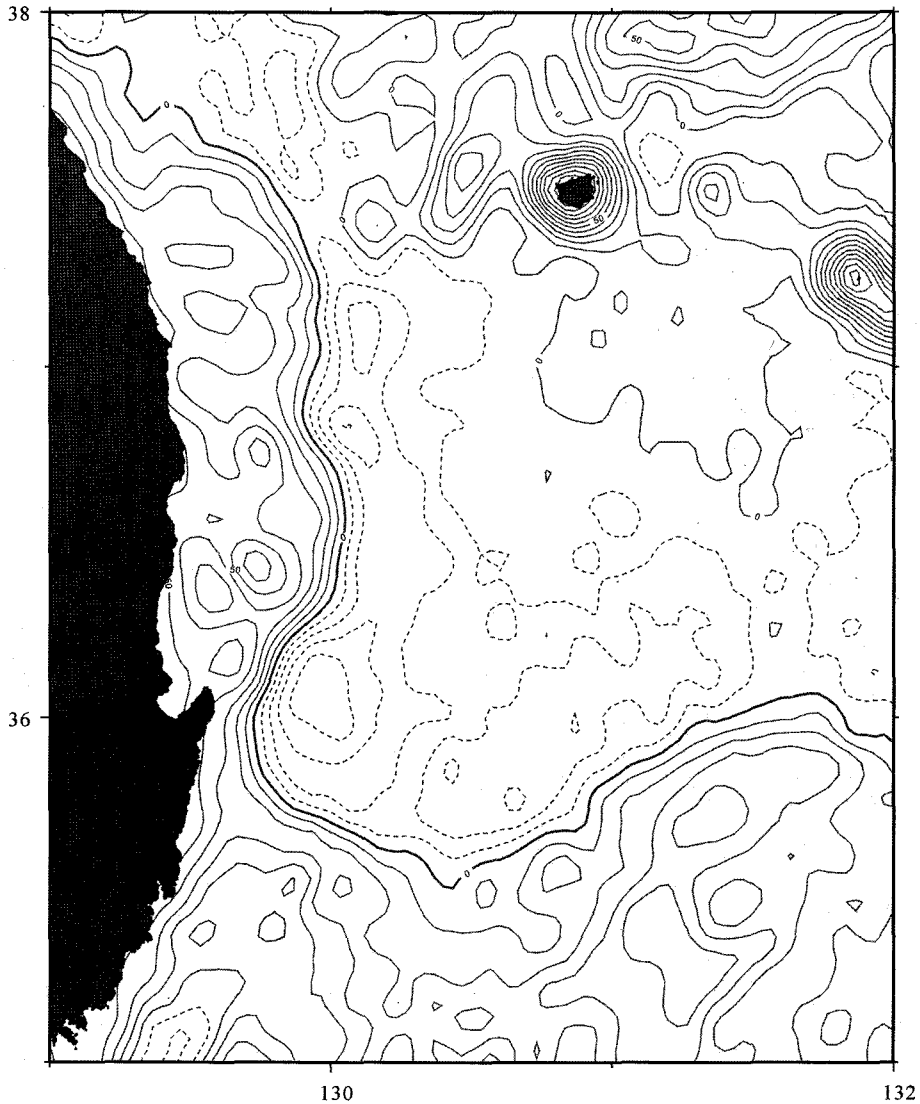


Fig. 7. Free-Air anomaly map of the Ulleung Basin. The solid contours denote positive anomalies and the dashed contours denote negative anomalies. Contour interval is 10 mGal.

퇴적물 두께의 일반적 분포는 대체로 남부지역이 북부 지역에 비하여 약 2배 이상 두꺼운 양상을 보이며, 남쪽에서 북쪽으로 진행하면서 점차 얇아지고 있다. 특징적으로, 울릉분지 중앙에 약 5 km 두께의 퇴적물이 다소 넓게 분포하고 있다. 즉, 북위 약 37° 부근에서 약 5 km에 이르는 퇴적물이 동서 방향으로 넓고 길게 분포하고 있는데, 이 지역을 중심으로 퇴적물의 두께가 북쪽으로 갈수록 점차 감소하고 남쪽과 남서쪽으로 점차 증가하는 양상을 나타내고 있다. 즉, 분지 주변부에서 퇴적물의 두께가 두껍게 나타나고 있고, 분지 중앙부에서는 상대적으로 얇은 퇴적물이 존재하고 있다. 이

러한 퇴적물 두께와 수심 및 중력 자료와의 비교를 위하여 2개(Fig. 8)의 축선을 선정하여 비교하였다. 축선 1(Fig. 9)은 남서쪽에서 북동 방향으로 퇴적물의 두께가 점차 감소하며, 수심은 점차 증가하고, 후리어어-이상은 남서쪽에서 약 25 mGal로 가장 크게 나타나고, 전체적으로 수심과 같은 양상임을 보이고 있다. 그러나, 약 230 km 지점에서 주변에 비하여 수심의 큰 변화가 없으나, 후리어어-이상은 급격히 변화함을 볼 수 있는데, 이는 퇴적물의 두께가 급격히 감소하여 수평적으로 상대적인 저밀도 층이 존재함을 암시한다. 축선 2(Fig. 10)는 북서에서 남동방향으로 퇴적물의 두께

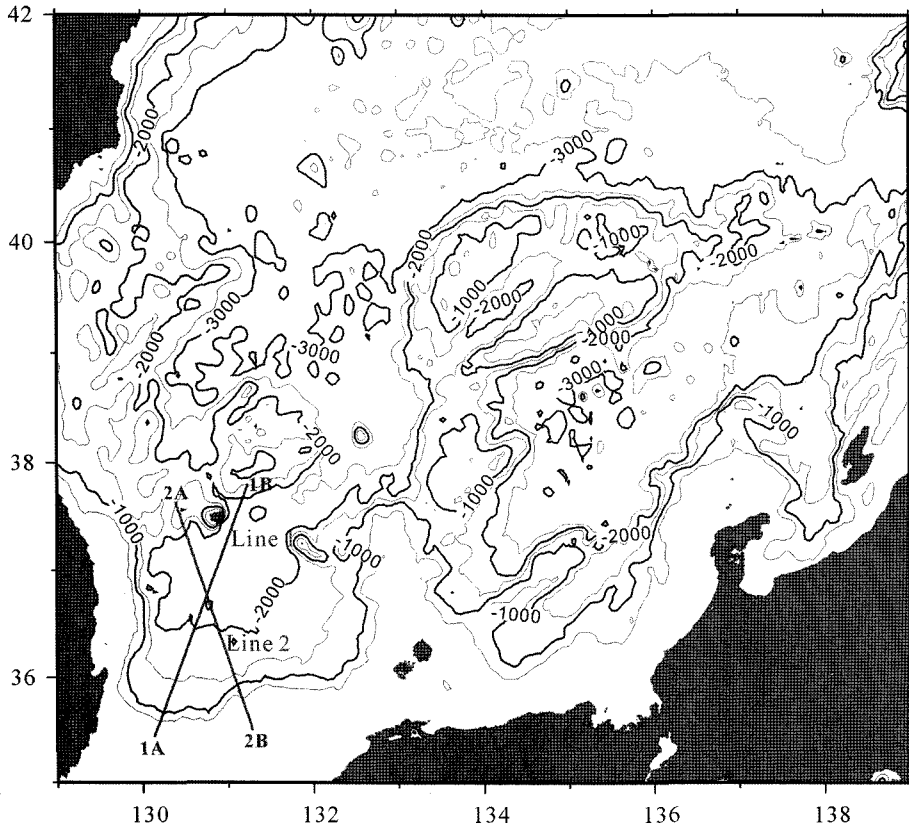


Fig. 8. Lines for the cross profiles of figure 9 to 10.

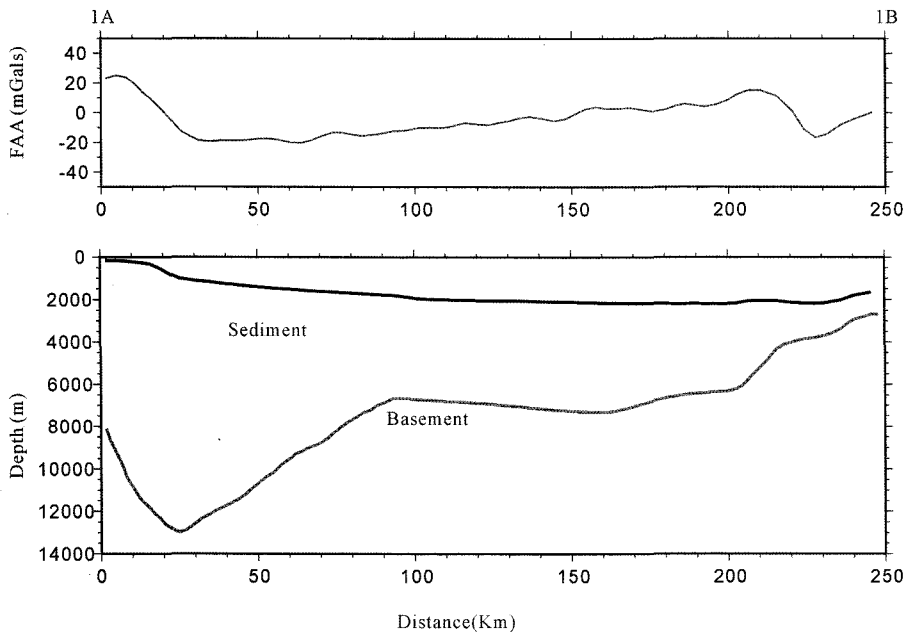


Fig. 9. Cross profiles along line 1. Cross profile of Free-Air anomalies (FAA) are shown on the upper box and profiles of bathymetry and depth of basement (sediment thickness) are shown on the lower box.

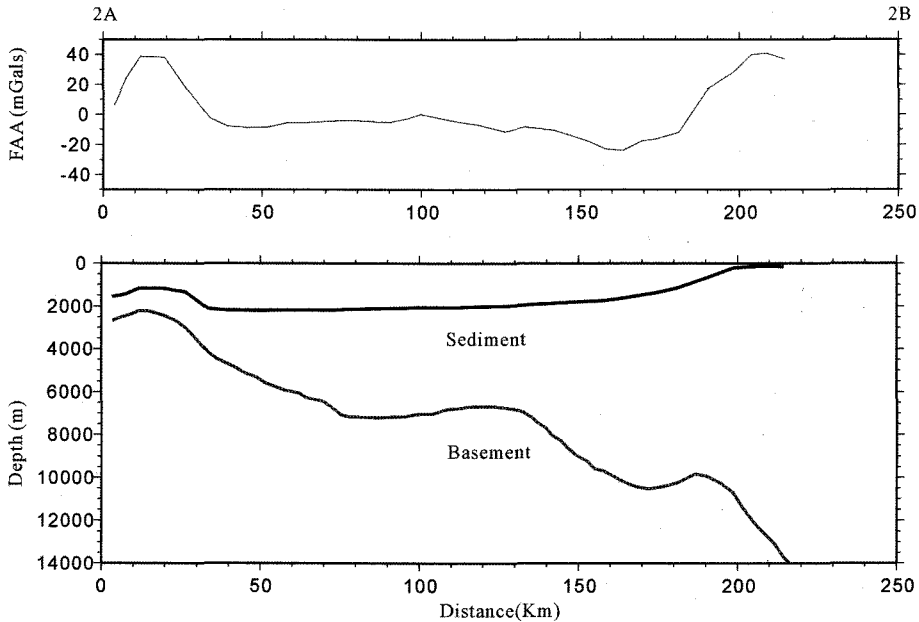


Fig. 10. Cross profiles along line 2. Cross profile of Free-Air anomalies (FAA) are shown on the upper box and profiles of bathymetry and depth of basement (sediment thickness) are shown on the lower box.

가 점차 증가하고, 수심은 남동쪽으로 감소 한 후 다시 증가하고 있으며, 후리에어-이상도 수심과 같은 양상을 보이고 있음을 나타내고 있다. 그러나, 150 km 지점에서 후리에어-이상은 수심을 따라 증가하고 퇴적물의 두께도 급격히 증가하고 있음을 나타낸다. 따라서, 이 지역의 후리에어-이상은 수평적인 밀도 변화보다는 두께가 쌓인 퇴적물의 영향에 의해 수심이 감소하면서 나타나는 것을 암시한다.

6. 토의 및 결론

울릉분지의 형성은 pull-apart model에 근거하여 설명되는 것이 현재의 일반적인 경향이다. 그러나, 분지의 인장 축은 북동-남서 방향으로 동해의 확장 축과 유사한 방향을 갖는 것으로 알려지고 있지만, 수심 자료에 의한 울릉분지 해저지형의 축은 이와는 약 70-80° 정도 왼쪽으로 발달하고 있다. 이러한 해저지형의 축의 방향과 분지 북동쪽 주변부에서 나타나는 해산의 모양과 위치는 분지의 열개 및 확장은 일본분지와 야마토 분지의 확장과 같은 방향으로 시작되었지만, 형성과정에서 분지의 확장과 함께 회전도 일어났음을 제시할 수 있다.

국지적으로 울릉분지의 해저지형과 다소 차이가 있는 지역이 나타나고 있으나, 후리에어-이상의 분포도

수심 자료와 거의 유사하게 북서-남동 방향의 축을 중심으로 대칭성을 보이고 있다. 그리고, 울릉분지가 상대적으로 젊은 연령에 해당하는 지각임에도 불구하고, 울릉도 주변과 한국대지와 같은 고지대를 제외하고는, 울릉분지 전체적으로는 후리에어-이상 값이 -30 또는 -40 mGal 정도의 낮은 특징을 보이고 있다. 울릉분지의 후리에어-이상 값이 수심이 더욱 깊은 일본 분지와 야마토 분지에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보이는데 이것은 울릉분지를 구성하는 지각과 퇴적물의 밀도가 일본분지와 야마토 분지를 구성하는 물질에 비하여 상대적으로 낮다는 것을 의미한다. 지각의 속도 자료에 기초하여, 울릉분지의 구성 지각은 해양지각임을 제시한 결과(Kim *et al.*, 1998)도 있으나, 후리에어-이상 값에 국한되어 중력자료를 해석하면, 일본분지와 야마토분지를 구성하는 지각은 상대적 고밀도인 해양지각인데 비하여, 울릉분지는 분지의 확장과 회전이라는 과정을 통하여 두꺼운 퇴적물이 상대적으로 저밀도인 대륙지각위에 쌓여 형성되었을 가능성이 큰 것으로 추측된다.

그러나, 수심과 중력자료에만 의존하여 울릉분지의 구성 지각의 근원을 밝히기에 어려움이 있으므로, 분지의 구성지각과 밀도 구조를 제시하기 위하여 향후 보다 자세한 탄성과 자료와 수심 및 밀도자료에 기초한 3차원 중력 모델링이 시행되어야 하며, 분지의 형

성과정과 이동 방향에 대하여 자력자료에 기초한 연구가 시행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원(KRF-2001-037-HA0004)과 한국지질자원연구원이 수행하는 해양수산부 연안지질위험요소 사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

강무희 (2000) 동해 독도주변 해산의 지질학적 및 지구물리학적 특성과 그 시사학적 의미. *충남대학교 지질학과 석사학위 논문*, 105p.

강무희, 한현철, 윤희수, 이치원 (2002) 동해 독도주변 해산의 지구물리학적 특성. *해양학회*, 7권, p. 267-285.

김원균, 김창환, 박찬홍, 한현철, 권문상, 민경덕, 김백수, 최영섭 (2000) 독도 및 그 주변 해산 중력 이상의 지구조적 해석. *자연환경지질*, 33권, p. 537-545.

김한준 (1999) 탄성과 탐사를 통해 본 울릉분지의 지각특성과 동해형성에 있어서의 의미. *지구물리학회*, 2권, p. 9-26.

박찬홍, 김정우, 허식, 원중선, 석봉출, 윤희수 (1999a) 울릉분지에서의 선상중력과 위성중력 통합에 의한 중력해상도 향상 및 해석. *지구물리학회*, 2권, p. 27-38.

박찬홍, N. Isezaki, N. Seama, 김성렬 (1999b) 자기이상의 analytic signal 및 자극화 변환에 의한 울릉분지의 구조 해석. *지질학회*, 35권, p. 297-308.

이종익, 허순도, 허식, 천중화, 한상준 (2000) 동해 한국대지에서 채취된 화강암편의 지구화학 및 Sr-Nd 동위원소 조성. *지질학회*, 36권, p. 279-294.

이치원 외 20인 (1997) 한반도 주변해역 조사 및 해저지질도 작성 연구(독도 해역). *한국자원연구소*, KR-97(C)-21, 222p.

Carter, D. J. T. (1980) Echo-sounding correction tables: Formerly Matthews Tables. 3rd(ed.), Hydrographic Dept., Ministry of Defense, Taunton, Somerset, UK, 139p.

Chough, S. K. and Barg, E. (1987) Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea(Sea of Japan). *Geology*, v. 15, p. 45-48.

Chough, S. K., Lee, K. E. Chun, S. S. and Han, J. H. (1989) The Ulleung back-arc basin: geological outline and petroleum potential. *Acta Oceanographica Taiwanica*, v. 24, p. 1-22.

Ingle, C. J. (1992) Subsidence of the Japan Sea: stratigraphic evidence from ODP sites and onshore sections. *Proceedings ODP, Sci. Results*, v. 127/128, Pt. 2, p. 1197-1218.

Jolivet, L. and Tamaki, K. (1992) Neogene kinematics in the Japan Sea region and the volcanic activity of the Northeast Japan arc. *Proceedings ODP, Sci. Results*, v. 127/128, Pt. 2, p. 1311-1331.

Jolivet, L., Huchon, Ph. and Rangin, C. (1989) Tectonic setting of Western Pacific marginal basins. *Tectonophysics*, v. 160, p. 23-47.

Jolivet, L., Huchon, Ph., Brun, J. P., Chamot-Rooke, N., LePichon, X. 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.

Jolivet, L., Shibuya, H. and Fournier, M. (1995) Paleomagnetic rotations and the Japan Sea opening. In Taylor, B. and Natland, J.(ed.) *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*. *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 88, AGU, Washington, D.C., p. 355-369.

Kim, H. J., Han, S. J., Lee, G. H. and Huh, S. (1998) Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea(Japan Sea). *Mar. Geophys. Res.*, v. 20, p. 219-237.

Lallemant, S. and Jolivet, L. (1985) Japan Sea: a pull apart basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 76, p. 375-389.

Lee, G. H. and Suk, B. C. (1998) Latest Neogene-Quaternary seismic stratigraphy of the Ulleung Basin, East Sea(Sea of Japan). *Mar. Geol.*, v. 146, p. 205-224.

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.

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, K. E., (1992) Geological structure of Ulleung back-arc basin East Sea. MS thesis, Seoul National University, Seoul, 121 p.

Otofujii, Y. and Matsuda, T. (1983) Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 62, p. 349-359.

Otofujii, Y. and Matsuda, T. (1984) Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 70, p. 373-382.

Otofujii, Y. and Matsuda, T. and Nohda, S. (1985) Paleomagnetic evidences for the Miocene counterclockwise rotation of northeast Japan-rifting process of the Japan arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 75, p. 265-277.

Otofujii, Y. and Matsuda, T. (1987) Amount of clockwise rotation of Southwest Japan-fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 85, p. 289-301.

Otofujii, Y., Itaya, T. and Matsuda, T. (1991) Rapid rotation of southwest Japan-paleomagnetism and K-Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. *Geophys. J. Int.*, v. 105, p. 397-405.

Otofujii, Y., Kambara, A. Matsuda, T. and Nohda, S. (1994) Counterclockwise rotation of northeast Japan: paleomagnetic evidence for regional extent and timing of rotation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 121, p. 503-518.

Smith, W. H. F. and Sandwell, T. (1997) Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Sci.*, v. 277, p. 1956-1962.

Tamaki, K. (1986) Age estimation of the Japan Sea on the basis of stratigraphy, basement depth and heat flow data. *J. Geomagn. Geoelectr.*, v. 38, p. 427-446.

Tamaki, K. (1988) Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bull. Geol. Surv. Jpn.*, v. 39, p. 269-365.

Tamaki, K. (1995) Opening tectonics of the Japan Sea. In

- Taylor, B.(ed.) Backarc Basins: Tectonics and magmatism. Plenum Press, New York, p. 407-420.
- Tamaki, K., Suyehiro, K. Allan, J. Ingle, J. C. and Pisciotto, K. (1992) Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. Proceedings ODP, Sci. Results, v. 127/128, Pt. 2, p. 1333-1350.
- Yoon, S. H. (1994) The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution, unpublished Ph. D. thesis. Seoul

- National University, Seoul, 235 p.
- Yoon, S. H. and Chough, S. K. (1995) Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea(Sea of Japan). Geol. Soc. Bull. Am., v. 107, p. 83-97.

2005년 10월 4일 원고접수, 2005년 11월 16일 게재승인.