

동해 울릉분지의 지구조 및 성인에 관한 지구물리학적 연구

서만철¹ · 이광훈² · 손호웅³

¹공주대학교 지질환경과학과, ²군산대학교 해양학과
³배재대학교 자원환경공학과

A Geophysical Study on the Geotectonics and Opening Mechanism of the Ulleung Basin, East Sea

MANCHEOL SUH¹, GWANG HOON LEE² AND HOWOONG SHON³

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

²Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea

³Department of Geotechnical and Environmental Engineering, Paichai University, Taejeon 302-735, Korea

동해 울릉분지의 지구조 및 성인에 관한 미해결의 근본적인 문제점은 분지 하부에 해양지각의 존재여부가 밝혀지지 않고 있기 때문이므로 해상중력, 자력 및 탄성파자료 해석을 통하여 해양지각의 존재여부에 관한 연구를 실시하였다. 울릉분지 및 그 인근지역의 후리-에어 이상은 전체적으로 매우 작은 변화를 보이는데, 한국대지(Korea plateau)와 오키뱅크(Oki bank) 주위에서 최대 40~60 mgal, 분지의 대부분의 지역은 분지 내에 존재하는 깊은 해수와 두꺼운 퇴적층으로 인하여 최대 -20 mgal 이내의 음(-)의 이상대를 갖는다. 부계 이상도는 분지 중앙부에 NE-SW 방향으로 발달된 약 150 mgal 이상의 양(+) 이상대를 보여 분지 하부에 고밀도의 지각이 존재함을 나타낸다. 후리-에어 이상 및 부계 이상의 변화 양상은 울릉분지 중앙부 양측에서 큰 변화를 보여 밀도불연속이 예상되며 이는 해양지각과 대륙지각의 경계에서의 밀도 변화에 기인된 것으로 해석된다. 울릉분지의 지자기이상의 분포는 대체적으로 -400 nT 이내의 음의 이상으로 자기이상값이 작으며 정상기와 역전기로 인한 줄무늬 현상은 발견되지 않는다. 그러나 자력이상 축선중 대칭성이 존재하는 축선이 발견되어 울릉분지 하부 지각이 과거 해저 확장에 의해 형성되었을 가능성을 나타낸다. 탄성파자료 해석 결과 울릉분지의 음향기반에는 단층, 지구대 및 지루 등의 구조들이 나타나지 않고 일반적으로 평탄한데, 이것은 울릉분지 기반암이 해양지각으로 이루어져 있거나 또는 두꺼운 화산암류 암석으로 덮여 있기 때문으로 해석된다. 또한 음향기반의 탄성파특징으로 보아 울릉분지의 북쪽으로 가면서 volcanic sill과 flow의 양이 증가하고 얇은 층에서 나타나고 있어 분지 남쪽보다 북쪽에서 해저 화산활동이 활발하였고 비교적 최근까지도 화산활동이 진행되었음을 알 수 있다. 결론적으로 중력, 자력, 탄성파자료 해석을 통하여 울릉분지의 지각에 관한 종합적 해석 결과 울릉분지 하부에는 밀도가 큰 지각이 존재하며 자기이상의 대칭성을 수반하는 사실로 미루어 해양지각이 존재할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 이는 동해 울릉분지의 형성이 해저확장에 의하여 형성되었음을 시사한다.

Analysis of gravity, magnetic, and seismic reflection data from the Ulleung Basin, East Sea has provided some insights into the opening mechanism and crustal type of the basin. Free-air gravity anomaly data show positive anomalies of about 40~60 mgal near the Korea Plateau and Oki Bank and of about -20~20 mgal in the central basin. Bouguer gravity anomaly data exhibit NE-SW trending positive anomalies of about 150 mgal in the central basin which is interpreted to be related to high-density crustal material. Abrupt changes in both Free-air and Bouguer gravity anomaly profiles across the basin margins may be due to transition between continental and oceanic crusts. Magnetic anomalies in the basin are generally less than -400 nT. No stripe pattern is evident in the magnetic anomaly map but a NW-SE trending symmetric pattern is seen in some magnetic profiles. The symmetric pattern is probably associated with the high-density crustal material in the central basin suggested by Bouguer gravity anomaly. The acoustic basement in the deep part of the basin has only a small amount of local relief. No graben or half-graben structures are seen in the acoustic basement from which mechanical extension might be inferred. The lack of high-relief structures in the acoustic basement may suggest that the basin is underlain by oceanic crust or that the basement is overlain by thick volcanic layer which obscures the structures and relief of the basement. High-density crust in the central basin inferred from gravity data, abrupt changes in gravity anomalies across the basin margins, symmetric pattern seen in some magnetic anomaly profiles, and lack of relief in the acoustic basement may suggest sea-floor spreading origin of the Ulleung Basin.

서론

동해는 크게 북동쪽의 일본(Japan) 분지, 남서쪽의 울릉분지 및 동쪽의 야마토(Yamato) 분지의 세계의 소규모 분지로 이루어지며, 후열도 해저확장에 의해 형성된 배호분지(back-arc basin)의 일종으로 간주되고 있으나 현재는 해저확장이 일어나지 않는 상태이다(Hilde and Wageman, 1973; Ludwig *et al.*, 1975; Chough and Barg, 1987; Suh, 1987).

동해의 생성을 이해하려면 동해에 분포하고 있는 울릉분지, 일본분지, 야마토분지 등의 지각구조 및 기원을 이해하는 것이 필수적이다. 동해가 배호분지인 것에는 이론의 여지가 거의 없으나 전반적으로 과연 어떠한 방법으로 지금의 형태를 갖추게 되었느냐는 아직도 여러 가지 설이 있다. Otofujii and Matsuda (1984, 1987)와 Otofujii *et al.*(1985)은 동해 주변부 육상의 고지자기 자료를 연구하여 일본 북동부는 시계 반대방향으로 남서부는 시계 방향으로 회전(double-door opening model)하면서 동해가 열린 것으로 추정하였다. 또한 Otofujii *et al.*(1985)은 일본 남서부와 북동부가 일본 열도 양단 근처의 축을 중심으로 약 천 오백만년 전에 빠른 속도로 회전하였다고 주장하였다. 반면에 Tosha and Hamano(1988)은 일본 북동부는 이천이백만년과 천 오백만년 전 사이에 느리게 회전하였다고 하였다. 여러 지자기 자료를 종합한 결과(Jolivet and Tamaki, 1992)에 따르면 일본 북동부는 비교적 점진적으로 회전하였으나 일본 남서부는 천오백만년 전에 급작스럽게 회전한 것으로 보인다. 그러나 최근의 Ocean Drilling Project(ODP) Legs 127/128의 결과는 동해가 이천만년 전에 이미 넓게 열린 바다였음을 밝혀 주고 있다(Shipboard Scientific Party, 1990).

한편, 일본 북부의 구조 변형을 연구한 Lallemand and Jolivet (1985)은 동해는 right-lateral pull apart에 의하여 열린 것이라고 제안하였다. Jolivet *et al.*(1991)은 동해의 tectonic과 고지자기 자료, small-scale sand-silicon 모델링, 동해의 지각구조와 수심도 등 보다 많은 자료를 바탕으로 right-lateral pull-apart 모델을 발전시켜서 동해 분지의 회전까지를 설명한 새로운 모델을 발표하였다. 이 모델에 따르면 right-lateral pull apart 변형이 동해 남부의 transtensional domain에서는 시계 방향의 회전을, 북동부의 transpressional domain에서는 시계 반대 방향의 회전을 동반하였는데 약 천이백만년 전에 일본 열도 동쪽 주변부에서 새로운 subduction 지역이 생기면서 extension이 compression으로 바뀌어 동해의 opening이 중단되었다.

Jolivet and Tamaki(1992)는 ODP Legs 127/128로부터 얻어진 자료와 육지 지형의 변형 자료, 화산활동의 시기 등을 바탕으로 동해의 열림작용을 우수전단지역(dextral shear zone)에서의 복합열개형(complex pull apart)로 설명하였다. 이 모델에 따르면 이천오백만년 전에 동해에서는 아직 해양지각의 생성은 시작되지 않았으나 많은 graben들이 발달한 반염수의 대륙내 호수가 존재했고 이천오백만년과 이천만년전사이에 일본분지에서 비로소 해양지각이 생성되기 시작했다. 약 이천만년전에는 해저확장이 가장 활발하게 일어나고 동부와 서부의 주된 단층(master fault)을 따라서 우수주향(dextral) 운동이 활발하게 일어나고 북에서 남으로 transpression이 transtension으로 변하며 진

행되었다. 약 천오백만년전에는 쓰시마 해협을 따라서 우수주향운동(dextral motion)이 활발하였고 포항분지와 울릉분지가 열개(pull-apart) 분지로서 형성되었다. 천이백만년전이 되면서 동해의 전체적인 형태는 현재와 거의 비슷하여졌고 더 이상의 opening은 없었다. 약 팔백만년에서 천만년 전 사이에 일본 북동부의 stress field가 transtensional에서 compressional로 바뀌면서 화산활동이 거의 중단되었고 압축(compression)의 시작으로 일본 열도와 Yamato Bank가 융기하였다.

이와 같은 동해 전체에 대한 여러 모델들 중 울릉분지에 대하여 비교적 자세히 언급하고 있는 것은 없다. 이는 울릉분지의 기존의 지질 및 지구물리학적 자료가 부족하기 때문이기도 하지만 무엇보다도 Deep Sea Drilling Project(DSDP)나 ODP 같은 심부 drilling이 없었기 때문에 더욱 그러하다.

Chough and Barg(1987)은 울릉분지 남쪽 주변부의 시추 자료를 이용하여 울릉분지의 tectonic history를 연구하였다. 이들은 울릉분지는 초기에서 중기 마이오세 사이에 배호상 확장과 퇴적물의 하중으로 빠르게 침강하다가 후기 마이오세에 오면서 판구조운동의 변화로 남쪽 주변부가 융기, 단층, 습곡과 같은 광역적인 변형을 받았다고 제안하였다.

가장 최근에 Yoon(1994)은 한반도 동쪽과 남동쪽 주변부의 층서학적 구조적 연구를 바탕으로 Jolivet and Tamaki(1992)의 모델과 비교적 잘 조화를 이루는 동해의 발달 모델을 제시하였다. 이 모델에 따르면 이천팔백만년전에 동해의 북동부에서 해저확장이 일어나고 동시에 Korea Plateau와 남서 일본 사이의 좁은 지역을 따라서 pull apart에 따른 지각의 신장이 일어나면서 울릉분지가 생성되기 시작하였고 이천삼백만년전에서 천팔백만년전 사이에는 일본의 남서부가 남쪽으로 이동하면서 울릉분지의 지각이 얇아졌다. 천이백만년전에 이르러 일본 남서부는 시계 방향의 회전을 시작하여 울릉분지가 남동쪽으로 보다 확장되었다. 중기 마이오세(약 천이백만년전)에 이르러 Bonin Arc가 중부 Honshu와 충돌하면서 울릉분지는 extensional regime에서 compressional regime으로 바뀌어 오늘에 이르고 있다.

Chough and Lee(1992)는 다중채널 탄성과 자료로부터 울릉분지의 음향기반의 음향학적 특징을 연구하여 음향기반이 주로 화산 물질로 이루어졌으며 이 화산 물질이 퇴적물과 함께 아주 두꺼운 층을 이룬다고 발표하였다. 또한 이들은 울릉분지내의 화산활동이 북쪽 방향으로 time-transgressive하여 음향기반에 북동-남서 방향의 zonation을 형성하였다고 하였다.

탄성과 굴절 자료에 따르면 울릉분지의 지각은 해양지각의 탄성과 속도를 갖고 있지만 하부지각(Layer 3)이 일본분지의 지각 같은 정상적인 해양지각보다 훨씬 두꺼운 양상을 보이고 있다(Kim *et al.*, 1994; Hirata *et al.*, 1989). 야마토분지의 지각도 울릉분지의 경우와 같이 해양지각의 탄성과 속도를 갖고 있지만 두께는 정상적인 해양지각의 두 배에 이르는데 야마토분지의 이러한 두꺼운 해양지각은 해저확장의 후기에 활발한 화산활동이 일어났기 때문이라고 제안하였다. 반면에 Tamaki *et al.*(1992)는 야마토분지의 지각열류량이 대륙지각의 신장으로 쉽게 설명되고 지각에서 자기이상 lineation이 나타나지 않으므로 야마토분지의 지각은 해저확장으로 생성된 것이 아니고 얇아진 대륙성 지각이라고 주장했다. 한편, 동해 지역 심해저 시추를

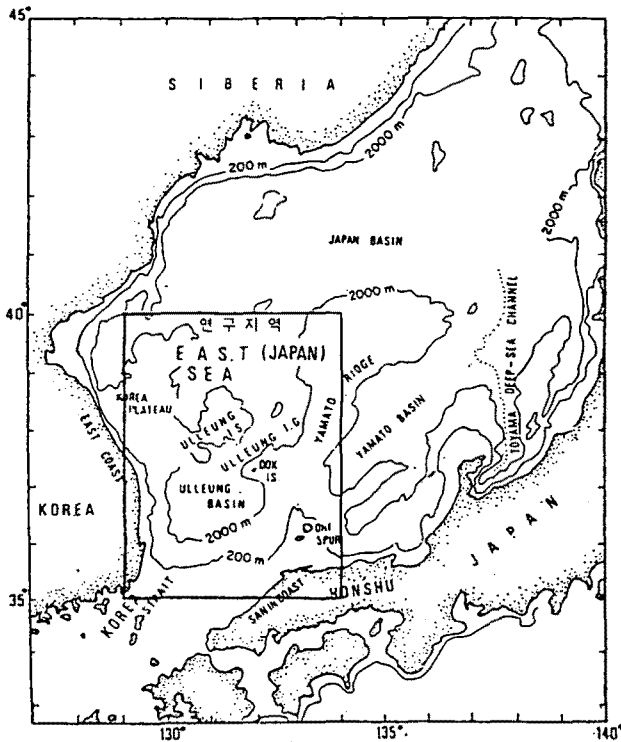


Fig. 1. Location map of the study area with simplified bathymetry contours.

위한 ODP(Ocean Drilling Program) Leg 127 및 Leg 128의 연구 결과는 일본 분지 및 야마토 분지에서 현무암층 또는 현무암맥과 사질 저탁류 퇴적암의 호층 및 각력 현무암질 용암으로 형성된 기저부를 발견하여 탄성과 속도로부터 예견된 해양지각의 존재를 뒷받침하고 있다(ODP Leg 127 and Leg 128 shipboard scientific parties, 1990). 이와같이 야마토분지의 지각 구성은 물

론 울릉분지의 지각 구성은 동해의 pull-apart opening 모델에 근거하여 얇아진 대륙성지각이라는 설과 해저확장과 함께 생성된 두꺼운 해양지각이라는 설 두 가지가 대조를 이루고 있다.

이 연구에서는 동해 울릉분지에서 측정된 중력자료, 자력이상자료, 및 다중채널 탄성과 자료를 이용하여 분지의 지각 구조와 특징을 해석하고 울릉분지 지각의 구성을 규명해 보고자 하였다. 연구해역은 위도 35°N~40°N, 경도 129°E~134°E 사이의 해역이다(Fig. 1).

지구물리자료 처리방법

울릉분지 해역의 전체적인 심부 지질구조와 분지내의 해양지각의 분포여부를 밝히기 위해서 수치화된 수심자료(ETOPO 5 data set), 중력자료, 자력자료 및 탄성과자료가 이용되었다. 이 연구에서 사용된 중력 및 자력자료는 미국 국립 지구물리 자료센터(NGDC)에 보관된 지구물리 자료 중의 일부로서 미국의 Lamont 지질연구소(LDGO), 미국 해군, Scripps 해양연구소, 소련, 일본, 프랑스 등에 의해 과거 20여년간 측정되었다. 연구지역은 경도 129°E~134°E, 위도 35°N~40°N 사이의 해역으로서 해상 중력 및 자력측정 축선의 총 길이는 17000여 km에 달한다(Fig. 2).

미국 국립지구물리자료센터(NGDC)와 일본 동경대 해양연구소에서 소장한 후리어 중력이상(free-air anomaly)으로부터 수심이 미치는 중력효과를 제거하여 부게이상(Bouguer anomaly)을 구하였다. 연구 해역을 5 km 간격의 격자구조로 나눈 후 3차원 계산을 통하여 수심효과의 제거를 시도하였다(서 등, 1993). 즉, 특정 격자점에서 일정한 거리내에 있는 해수를 미세한 입방체로 나눈 후 각 입방체가 해수면상의 각 격자점에 미치는 중력효과를 각각 계산하여 합산함으로써 해수에 의한 중력 효과를 계산하고 이를 후리어 이상에서 빼줌으로써 부게 이상을

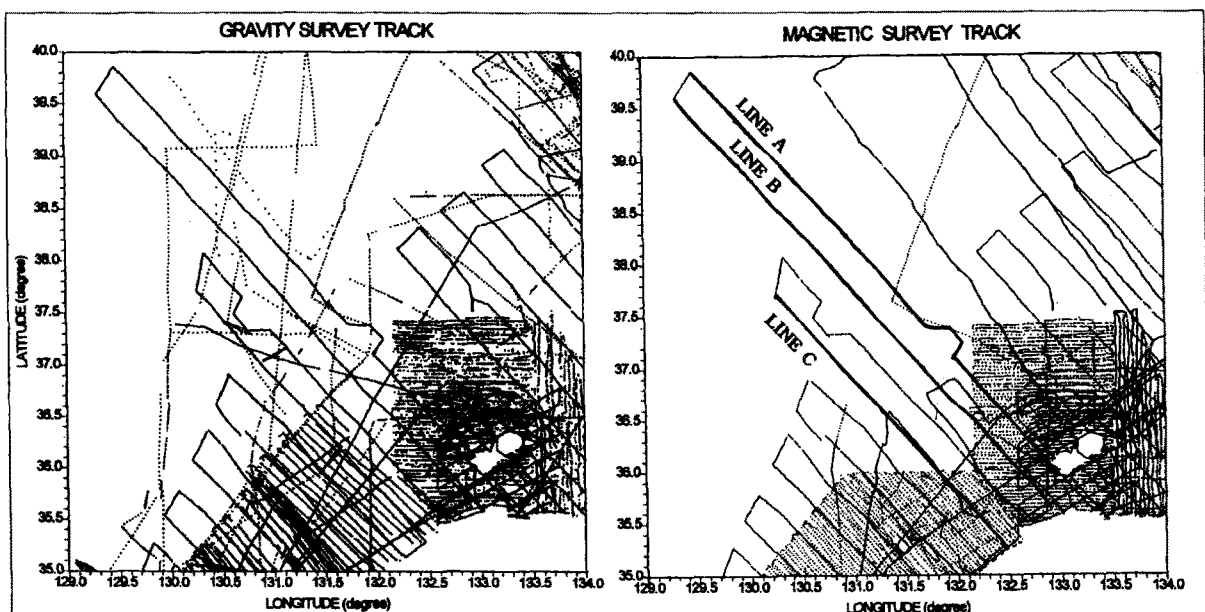


Fig. 2. Track-lines for gravity and magnetic measurements.

구하였다. 여기서 해수가 해양분지 주위의 지각과 비교해서 낮은 밀도를 갖게 되므로 밀도차를 -1.62 g/cm^3 로 가정하여 해수 전체가 갖는 중력효과를 3차원적으로 계산한 것이다. 이 방법은 불규칙한 해저지형으로 인한 중력효과를 3차원적으로 제거할 수 있어 종래의 2차원적 중력보정보다 효과적으로 수심의 효과를 제거할 수 있으며 지형보정도 포함하므로 여기서 얻어지는 부계 이상은 이론적으로 순수하게 해수면 하부의 밀도불균질에 의한 완전 부계 이상(Complete Bouguer anomaly)이다. 이러한 과정을 통하여 구한 해수의 중력효과와 분포는 수심도와 유사한 형태를 보이며 울릉분지내 최대 심도 부근에서 -140 mgal , 해안선 부근에서는 0 mgal 정도의 중력효과를 보인다.

자력자료의 처리는 각 측선들로부터 읽은 자력이상치를 이용하여 연구해역 전역에 대한 자력이상분포도를 작성하였다. 또한, 전체 자력 탐사측선중에서 울릉분지를 북서-남동방향으로 횡단한 7개의 측선을 선정하여 자력이상 프로파일을 작성하여 분석하였다. 측선별 지자기이상곡선에서 보여주는 동해 울릉분지의 자기이상치는 전체적으로 $0 \sim 400 \text{ nT}$ 사이의 음(-)의 이상을 보이기 때문에 각각의 그래프에서 지자기이상 곡선의 0선과 만나는 점을 기준으로 양(+)의 이상대인 正常期과 음(-)의 이상대인 逆轉期로 구별할 수가 없었다. 따라서 상기의 7개 측선에 대한 자기이상치를 대상으로 각 측선별로 1차함수 그래프로 최적맞춤(best fitting)시킨후 정상기와 역전기를 구분할 수 있도록 시도하였다.

다중채널 탄성파 자료(Fig. 3)는 한국석유개발공사에 의하여 취득된 자료로서 총 2100 km 에 이르며 투과 깊이는 two-way travel time으로 7초이다. 탄성파자료는 이미 전산처리가 수행된 중첩단면도(stacked seismic section) 및 구조보정탄성파도면(migrated seismic section)을 이용하였다. 스파커 자료(Fig. 3)는 약 260 km 에 이르며 1991년과 1993년에 한국해양연구소와 러시아

과학원 학자들로 구성된 한·러조사단이 획득한 자료로서 울릉분지 북쪽 주변부의 음향기반암 해석에 이용하였다. 탄성파도면으로부터 반사면의 반사특성차이를 면밀히 분석하여 음향기반암을 구분하고, 각각의 측선들로부터 구한 음향기반암의 왕복주기를 읽어 음향기반암에 대한 시간구조도를 작성하였다.

지구물리자료해석

중력이상자료

울릉분지를 포함한 인근지역의 후리-에어 이상도는 연구해역의 북서쪽에 위치한 한국대지(Korea plateau)와 남동쪽의 오키뱅크(Oki Bank) 주위에서 최대 $40 \sim 60 \text{ mgal}$ 의 重力異常을 보이며 울릉분지 중앙부의 수심 2200 m 이상의 해역에서도 20 mgal 미만의 양(+) 異常을 보인다(Fig. 4). 그러나 울릉분지의 대부분의 지역은 최대 -20 mgal 이내의 음(-)의 이상대를 갖는다. 한국대지와 오키뱅크(Oki Bank) 부근의 양 이상대는 이들 지체들과 주위 해수와의 큰 밀도차에 기인한다. 그러나 분지중앙부에서 보이는 약 20 mgal 이내의 양 이상대는 이 해역이 울릉분지내에서 2200 m 이상의 최대 수심을 갖는 해역인 점과 또 분지 중앙부에 존재하는 약 5 km 의 두꺼운 퇴적층을 감안할 때(Lee, 1992; Chough and Lee, 1992) 지질학적으로 의미있는 현상이다. 즉 분지중앙부의 깊은 수심 및 두꺼운 퇴적층이 갖는 저밀도로 인한 음(-)의 중력 효과에도 불구하고 나타나는 양의 중력 이상대는 퇴적층 하부에 상대적으로 큰 밀도를 갖는 암석이 존재함을 시사한다. 해양분지의 퇴적층 하부에서 주위보다 상대적으로 큰 밀도를 갖는 경우는 대부분의 경우 주위의 대륙지각과 밀도차이를 갖는 해양지각의 존재와 그 상부에 존재하는 해수 및 퇴적층의 저밀도를 보상하기 위하여 상승된 맨틀이다.

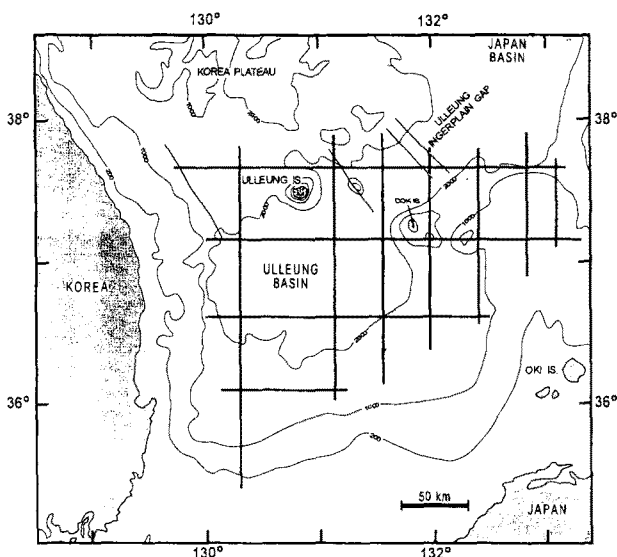


Fig. 3. Physiography of the Ulleung Basin and distribution of seismic data used in this study. Heavy lines indicate multi-channel seismic data and light lines indicate single-channel sparker data. Contour interval in meters.

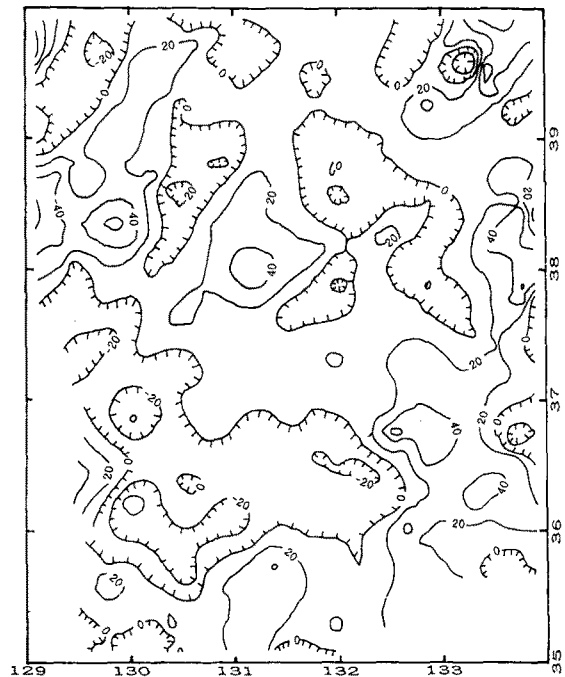


Fig. 4. Free-air anomaly map of the Ulleung basin.

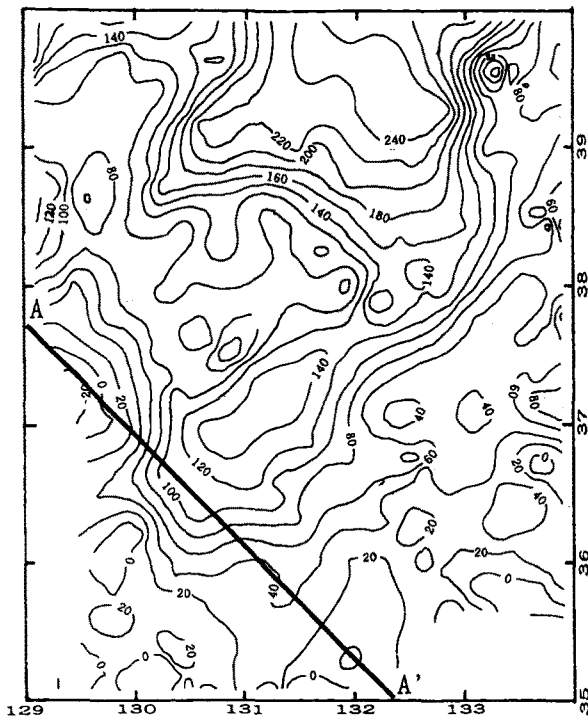


Fig. 5. Bouguer anomaly map of the Ulleung basin.

연구지역의 후리-에어 이상도는 전체적으로 해저지형의 요철에 의해 영향을 받고 있어 해저 지질구조를 연구하는 데는 부적당하다. 해저 지형의 요철이 중력 측정에 미치는 효과를 3차원적으로 계산하여 후리-에어 이상치에서 제거하여 줌으로써 해저의 지질구조를 나타낼 수 있게 한 부계(Bouguer) 重力異常을 구하였다. 부계 이상도는 지형보정효과까지 제거된 완전 부계 이상도로서 울릉분지 중앙부에서 최대 약 150 mgal의 양(+) 이상치를 보이며 분지 주변부에서는 0 mgal 내외의 낮은 이상치를 보여 분지 중앙부에 밀도가 높은 물질의 존재를 암시한다(Fig. 5). 분지 중앙부의 양의 부계 이상대는 북동-남서 방향으로의 연장성을 보이고 있다.

울릉분지의 높은 부계 重力 이상치는 분지내의 해수와 퇴적암층의 저밀도를 보상하기 위해 상승한 맨틀과 퇴적암층 하부에 존재하는 해양지각의 영향으로 해석된다. 지각의 구조를 연구하기 위해서는 상승한 맨틀에 의한 중력성분을 제거해야 하며, 이 맨틀의 중력성분을 분리하기 위해서는 모호면의 깊이를 알아야 한다. 울릉분지 해역에서 해저 지진기록계(OBS)를 이용한 심부 지질구조 연구 결과 울릉분지 중앙부에서 Moho면의 깊이가 약 16 km로 발표된 바 있으나(석 등, 1992) 3차원적인 모호면 깊이에 관한 자료의 결여로 인하여 본 연구에서 이용하지는 못하였다.

북동-남서 방향으로 존재하는 분지 중앙부를 통과하는 축선 A-A'를 설정하여 후리-에어 이상, 부계 이상 및 수심의 변화 양상을 살펴보고, 이들의 변화 구배도 비교해보았다(Fig. 6). A-A' 축선의 후리-에어 이상 곡선에서는 A점으로부터 약 135 km 부근(약 -43 mgal)과 약 259 km 부근(약 -34 mgal)에서 최소치를 보이며 A지점으로부터 약 191 km 지점과 약 205 km 지점에서 각각 -2.90 mgal과 13.80 mgal의 상대적으로 높은 이상치를 보

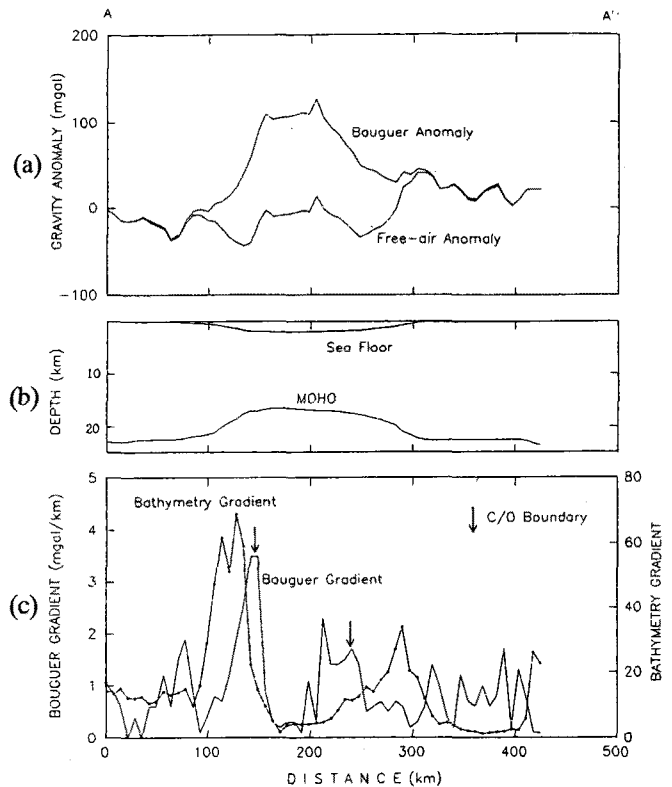


Fig. 6. Profiles of free-air anomaly and Bouguer anomaly (a), sea-floor and Moho depth (b), and gradient of bathymetry and Bouguer anomaly (c) along a NW-SE cross section A-A'.

인다. 동일한 지점에서 부계 이상치도 각각 111 mgal과 127 mgal의 큰 양(+) 이상치를 보인다(Fig. 6a). 이 두 지점 사이에서 보이는 양의 이상은 분지를 충전하는 저밀도의 두꺼운 퇴적층과 깊은 수심을 감안할 때 퇴적층 하부에 주위보다 밀도가 큰 해양지각과 상승된 상부 맨틀이 존재하는 것으로 해석할 수 있다.

Gradient 도표(Fig. 6c)를 보면 150 km 부근(FGAGNT: 3.81, BGAGNT: 3.50)과 230 km 부근(FGAGNT: 1.60, BGAGNT: 2.30)에서 비교적 큰 구배를 보인다. 울릉분지의 중앙부에 해당하는 150 km 부근과 240 km 부근의 gradient peak로써 해양지각의 양측 경계를 설정하면 후리-에어 이상이 最低値에서 비교적 큰 후리-에어 이상으로 변화하는 지점이며 부계 이상 역시 분지 중앙부를 향할수록 큰 양(+)의 부계 이상을 갖게 되는 지점이다. 특히 A지점으로부터 155 km 부근과 205 km 부근에서 보여주는 두 重力異常 曲線의 peak는 분지 중앙부를 중심으로 대칭성을 보여줌으로써 울릉분지의 해저확장을 뒷받침 해준다.

자력이상

전자력 이상분포는 울릉분지 전역에 걸쳐 -400 nT 이하의 음의 이상치를 보이고 있다. 그러나, 분지의 남쪽과 동쪽에서는 최대 200 nT 이하의 양의 자력 이상을 보여 울릉분지와 대조적인 양상을 보이고 있다(Fig. 7). 울릉분지 해역은 두꺼운 퇴적층의 존재로 인하여 자력 이상을 야기시킬 수 있는 기반암이 깊은 곳에 존재하기 때문에 음의 자력 이상이 대부분인 것으로 해석된다. 분지의 동쪽에 존재하는 양의 자력 이상치는 해저에 분포

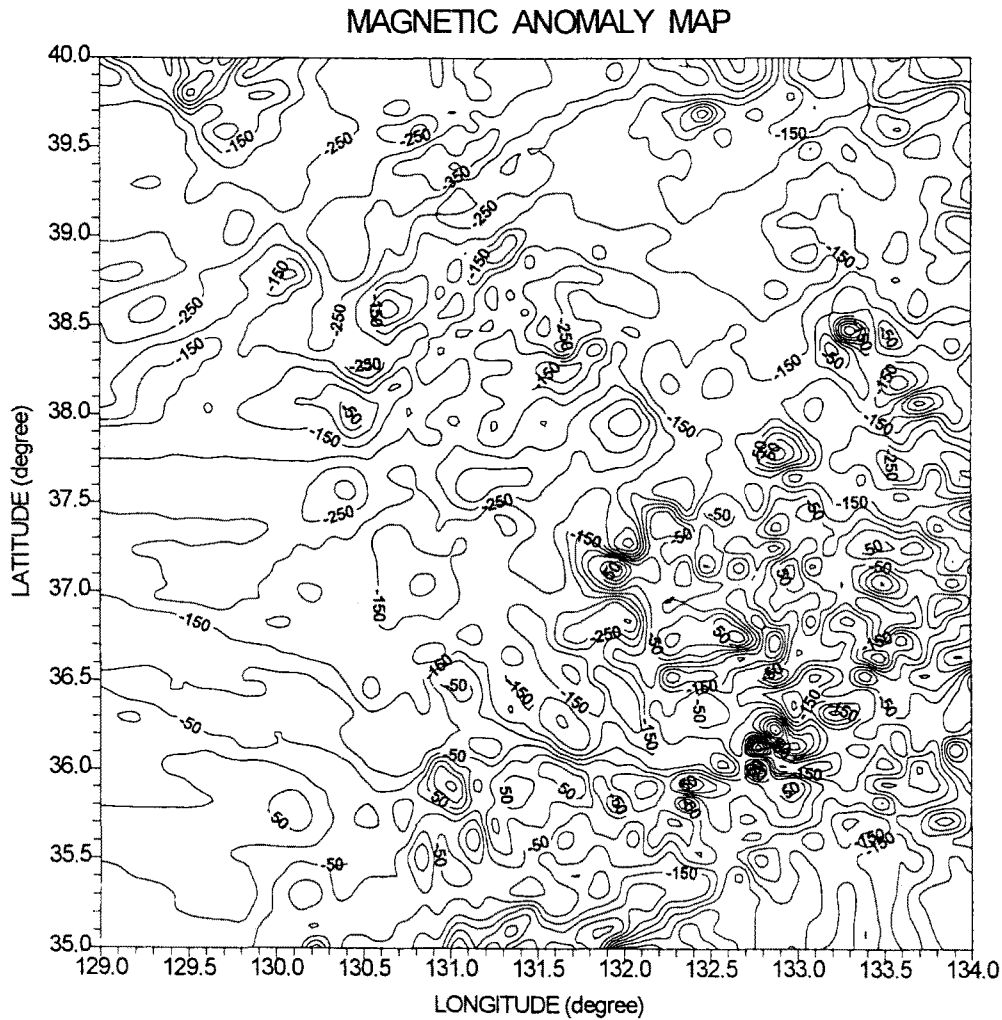


Fig. 7. Magnetic anomaly of the study area with contour interval of 75 nT.

하는 오키뱅크(Oki bank)의 존재를 나타내며, 분지의 남쪽에도 높은 자력이상 벨트가 형성된 것으로 보아 화성기원의 암석이 동서방향으로 분포하는 것으로 해석된다. 이러한 분지 및 분지 주변부의 기반암에 대한 존재는 분명하게 인식되지만, 울릉분지 내부에서 어떠한 종류의 자력이상벨트도 발견되지 않는다(Fig. 7).

이상에서 보여지는 울릉분지의 지자기이상의 분포는 대체적으로 음의 이상으로 자기이상값이 작다. 동해의 局所的 자기이상은 동태평양과 비교할 때 일반적으로 작다. 자기이상 곡선의 半振幅은 100 γ 이하이고 북태평양과 비교해도 절반, 북아메리카 서부의 자기 형태가 명료한 장소에 비하면 1/10에 가깝다. 동해의 해령에 대해서는 꽤 상세한 자기이상 분포의 측정이 되어 있지만 해령은 현무암질로 일률적으로 자화되어 있고 이는 수심이나 해령의 형태에서 예상되는 수치보다 상당히 적다. 이는 동해의 해저 암석이 태평양의 대부분의 암석과는 꽤 다르다는 것을 나타낸다. 일본의 지질조사소(Geological Survey) 자료에 바탕을 두어 동해에 광역적으로 나타나는 지자기 음이상(negative anomaly)에 대한 설명에서 Hansen *et al.*(1983)은 천부 큐리온도(curie temperature) 등온선의 관계가 중요하다고 설명하였다. 자성은 큐리온도 보다 낮은 온도 분포를 띠고 있는 해저

면으로부터 수십 km 내의 깊이에서만 나타난다. 따라서 자기이상을 나타내는 한계 깊이는 큐리온도의 등온면이며 이면은 지역적 지열 환경에 따라 다르다. 동해 울릉분지의 열류량은 비교적 높은 2.0 HFU 이상의 값으로 큐리온도의 등온면이 다른 대양분지보다 훨씬 얇게 존재할 것으로 생각되므로 자성을 띠 수 있는 지각이 얇을 것이며 이는 두꺼운 퇴적층의 존재와 함께 자기이상값이 작은 음의 이상을 갖는 현상과의 상관관계로 설명할 수 있다.

자력이상분포가 미약하여 해양지각의 존재가능성에 대한 어떠한 정보도 제공하지 못하는 것으로 판단되어 울릉분지를 북서-남동방향으로 횡단하는 대표적인 축선들에 대한 자기이상측선도를 작성하여 자기이상 특성에 대한 해석을 시도하였다. 지자기이상의 분포 축선 A는 경도 129.5°E~133.0°E 사이의 해역에서 측정된 축선들 중 자기이상치의 자료가 가장 많고 축선의 길이도 길다. 자기이상 최대치는 580 nT이고 최소치는 -484 nT로 최대치와 최소치의 상대적인 차가 가장 크고 대부분이 음의 이상으로 0~-300 nT 값으로 지자기이상 변화폭이 부분적으로 크게 나타난다(Fig. 8). 측정된 자력이상치를 이용하여 최적맞춤 직선식을 설정한 후 이를 이용한 정상기 역전기를 구분하여 보

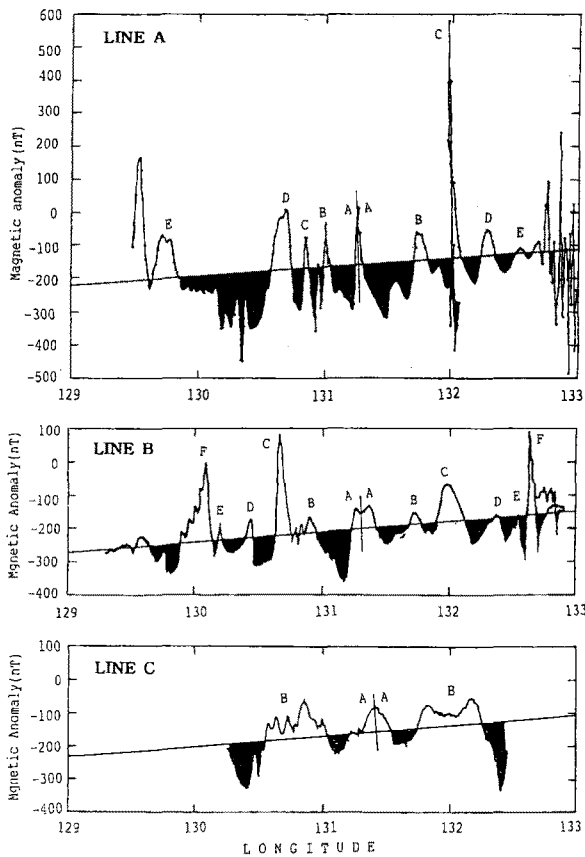


Fig. 8. Profiles of magnetic anomaly which show magnetic symmetry.

면 Fig. 8a에서 보는 바와 같이 경도 131.3°E를 경계로하여 어느 정도 대칭성을 인식할 수 있다. 지자기이상의 분포 축선 B의 경우 자기이상 최대치는 90 nT이고 최소치는 -362 nT으로서 지자기이상의 분포는 음의 이상과 양의 이상 값의 차가 다른 축선들에 비해 크지 않으나 대칭성이 비교적 잘 관찰되고 있다(Fig. 8b). 축선 C의 자기이상 최대치는 -55 nT, 최소치는 -335 nT, 대부분 -50~-250 nT사이의 변화치를 나타내며 대칭성을 잘 보여준다(Fig. 8c).

상기 축선들의 지자기이상 변화특성을 살펴보면 대칭축을 특정 지점을 중심으로 해서 양의 이상과(+), 음(-) 이상의 반복이 규칙적인 양상을 보여주고 있다. 이는 울릉분지 하부 지각이 과거 해저 확장에 의해 형성되었을 가능성을 시사한다. 한편 동해북부를 구성하는 일본분지(Japan basin)에서는 자기이상의 변화양상은 100~300 γ(nT)의 진폭이며 일본분지와 야마토분지 둘다에서 특정 축을 중심으로 대칭된 자기이상을 보이므로 중앙해령을 중심으로 일어난 해저확장을 지시하고 있다(Kobayashi, 1977).

음향기반의 특징과 분포

먼저 탄성과 자료를 해석하여 음향기반암의 시간 구조도(Fig. 9)를 작성하였다. 울릉분지내에서의 음향기반암의 깊이는 two-way travel time으로 최고 6.0초 이상에서 최저 0.5초 이하에 이르는데 6.0초 이상은 분지 남쪽 지역과 북동쪽 Ulleung Inter-plain Gap(UIG) 입구에서 나타난다. 0.5초 이하는 울릉도와 독도, 또 그 주변에서 나타난다. 분지 남쪽에서 북동-남서 방향으로 길게 나타나는 6.0초 이상의 지역 바로 남쪽으로는 역시 북동-남서

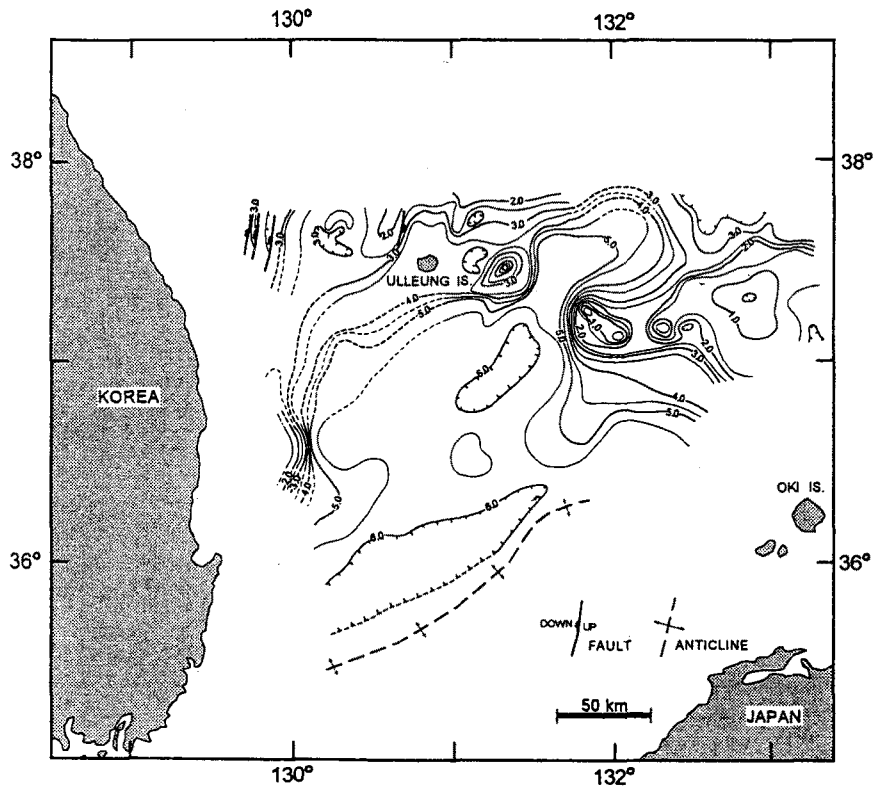


Fig. 9. Time structure of acoustic basement. Contour intervals 0.5 seconds in two-way travel time.

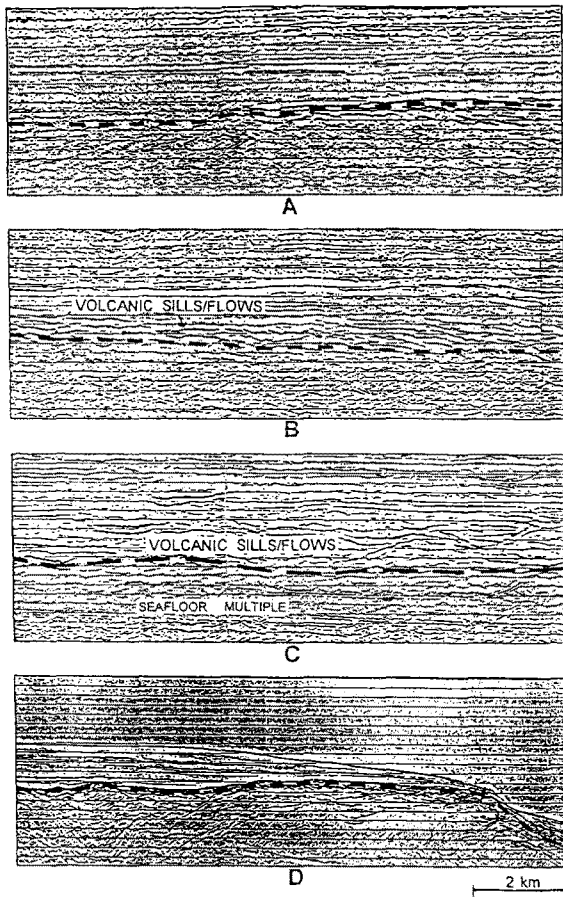


Fig. 10. Types of acoustic basement. (A) acoustic basement with continuous, low-frequency, moderate- to high-amplitude reflection. (B) acoustic basement overlain by relatively thin (less than 300 msec in two-way travel time) volcanic sill/flow-sediment complex. (C) acoustic basement overlain by thick (over than 500 msec in two-way travel time) volcanic sill/flow-sediment complex. (D) acoustic basement with continuous, high-amplitude reflection combined with reflection-free zone immediately below it.

방향으로 길게 발달한 배사구조가 나타나는데 이 구조는 북동쪽으로 가면서 점차 낮아지며 소멸되는 것으로 생각된다.

북서쪽에서 단층들이 확인되었으나 탄성과 자료의 간격이 커서 정확하게 mapping할 수 없었다. 울릉도 북서쪽의 단층은 단층면이 거의 수직으로 음향기반에서 escarpment를 보이고 있는데 Tsushima 단층의 연장선상에 있는 것으로 판단된다.

음향기반은 탄성파적 특징에 따라서 크게 네 가지(Fig. 10)로 나누었다. Fig. 11은 이들의 분포도이다. 울릉분지 남부의 음향기반은 비교적 continuity가 좋은 low-frequency, moderate- to high-amplitude의 특징을 보이는데 비슷한 양상의 탄성파적 특징이 음향기반의 아래에서도 계속 나타난다(Fig. 10A). 북쪽으로 가면서 분지 내의 음향기반은 volcanic sill/flow sediment complex로 해석되는 층으로 광범위하게 덮혀 있어서(Fig. 10B) 분지 남부의 음향기반과 같이 뚜렷하게 나타나지 않지만 volcanic sill/flow sediment complex가 비교적 얇은 두께로 확인되는 음향기반은 분지 남부의 음향기반과 유사한 특징을 보인

다. Korea Plateau의 남쪽에서 Ulleung Interplain Gap에 이르는 분지 내의 지역은 volcanic sill/flow가 two-way travel time으로 거의 500 msec에 이를 정도로 매우 두껍게 분포하고(Fig. 10C) 적어도 두개의 mapping이 가능한 volcanic sill을 발견하였다. 이 sill들은 해저면으로부터 two-way travel time으로 약 1.0초 정도 이거나 더 얇은 곳에서 나타나는 데 이는 분지 내의 북쪽에서 최근까지도 해저 화산활동이 활발했음을 나타내고 있다.

분지 북쪽 주변부의 음향기반은 continuous, high-amplitude의 특징을 보이고 내부적으로는 거의 반사가 없는(reflection-free) 양상(Fig. 10D)을 나타낸다. 이곳의 음향기반은 일부 지역을 제외하고는 chaotic, discontinuous한 특징을 갖고 있어 volcanoclastic 퇴적물로 해석되는 층으로 매우 광범위하게 덮혀 있다. 독도 주변과 Oki Bank지역의 음향기반은 volcanoclastic 퇴적물이 나타나지 않고 guyot라고 할 수 있을 정도로 아주 평평하여 wave action이나 subaerial erosion이 있었음(Fig. 12)을 시사하고 있다. 일부 지역에서는 음향기반이 거의 노출되어 있어서 최근에도 화산활동이 있었음을 짐작하게 해준다.

울릉분지 내 음향기반은 전반적으로 기복이 작고 단층 같은 구조가 거의 나타나지 않는다. 야마토분지의 음향기반도 울릉분지와 매우 비슷하여 기복이 작고 smooth한 특징을 보인다(Tokuyama *et al.*, 1987). 반면에 일본분지의 음향기반에서는 two-way travel time으로 최고 1초 정도의 displacement가 있는 horst와 graben이 관찰되어(Kuramoto, 1991) 분지의 지각 구성이 울릉분지나 야마토분지와 다를지도 모른다는 것을 시사한다. 울릉분지가 pull apart(Jolivet and Tamaki, 1992)와 이에 이은 회전(Yoon, 1994)에 의하여 생성되었다면 음향기반에서 정단층 같은 extension의 증거가 예상되는데 본 연구에서 이용된 자료에서는 울릉분지 내의 음향기반에서 단층 등이 확실하게 나타나지 않는다. 이에 대하여 두 가지 가능성을 보면 첫째, 퇴적물과 interlayered된 volcanic sill/flow 등이 하부의 음향기반 구조를 거의 덮어서 탄성과 자료상에 구조가 잘 나타나지 않는 것이거나 둘째, 고지자기 자료에서 보는 것처럼 일본 남서부가 시계 방향으로 아주 빠르게 회전했다면 울릉분지도 매우 빠르게 생성되었을 것이고 울릉분지의 생성이 야마토분지처럼 해양지각의 생성을 동반(Hirata *et al.*, 1989) 하였다면 다른 지역의 빠른 해저확장의 경우에서 보는 것처럼 기복이 매우 작을 수 있다. 울릉분지 남쪽에 나타나는 음향기반의 배사구조는 울릉분지의 stress regime 변화에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 탄성과 자료로부터 배사구조 형성 과정을 유추함으로써 울릉분지 발달 과정을 보다 명확하게 이해할 수 있을 것이다.

지체구조적 의미

이 연구는 울릉분지 중앙부에 북동-남서 방향으로 양의 부계 중력 이상대가 존재함을 보여주며 또한 같은 방향의 몇 개의 축선에서 특정 축을 중심으로 대칭적인 지자기이상 양상이 발견됨을 보여주고 있다. 이러한 현상은 분지하부에 고밀도의 지각 물질이 존재하며 이러한 물질이 해수의 질량결손을 보상하기 위하여 상승된 맨틀일 가능성을 배제할 수 없으나 중력이상의 급격한 변화와 탄성과 특성 등과 함께 분지중앙부 하부에 해양

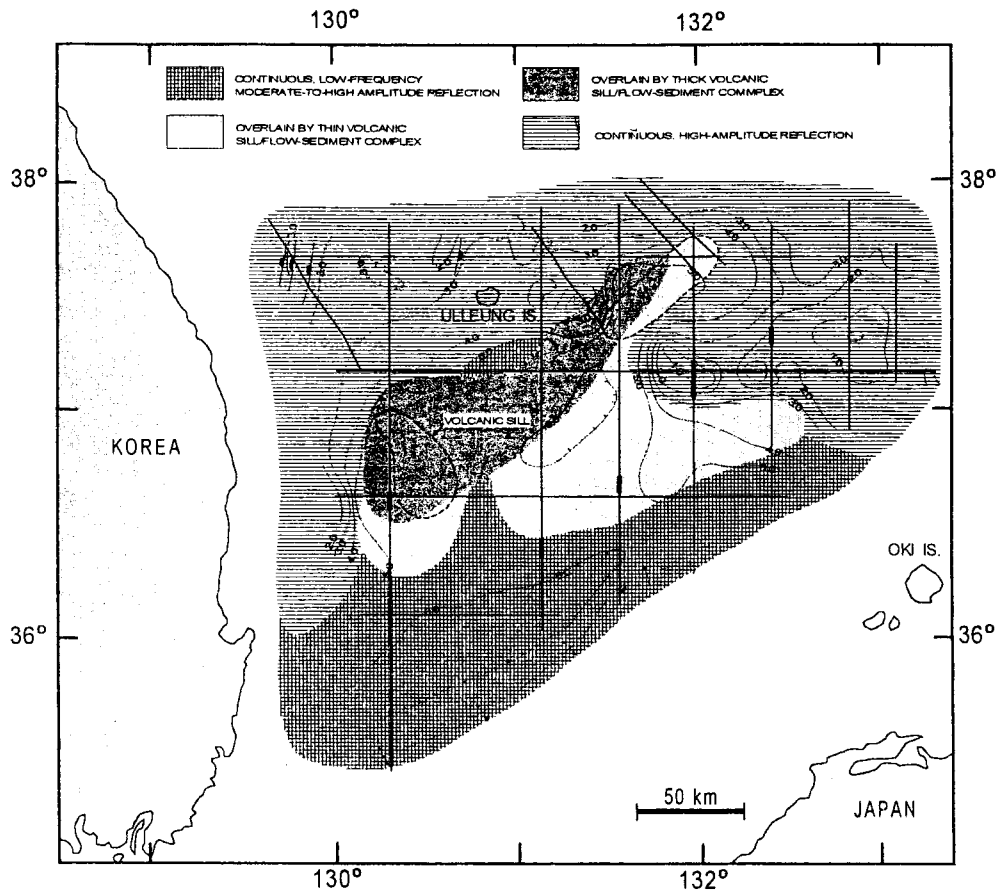


Fig. 11. Distribution of acoustic basement types shown in Figure 10.

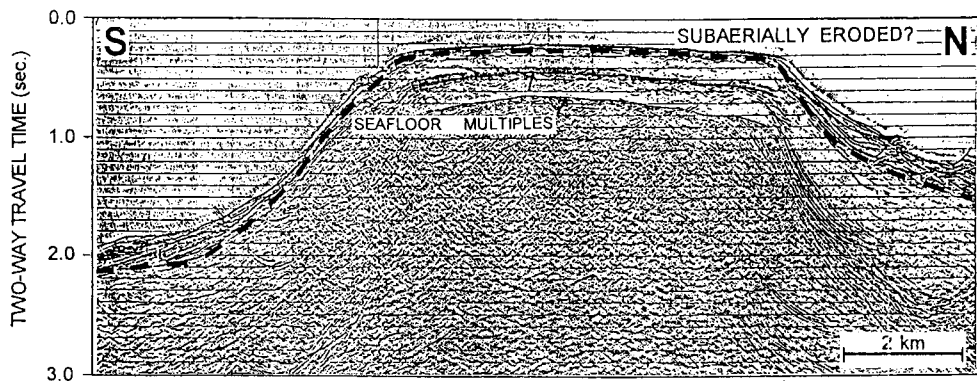


Fig. 12. Shallow flat acoustic basement suggesting subaerial erosion.

지각이 존재함을 시사한다. 이렇게 북동-남서로 나타나는 방향성은 탄성과 단면도의 기저부 탄성과상(seismic-facies) 분포에서도 입증되고 있다(Lee, 1992; Chough and Lee, 1992).

울릉분지의 자기이상의 분포는 대체적으로 -400 nT 이내의 음의 이상으로 자기이상값이 작다. 동해의 局所的 자기이상은 그 半振幅이 100 γ 이하로서 일반적으로 작으며 북태평양과 비교해도 절반, 북아메리카 서부의 자기 형태가 명료한 장소에 비하면 1/10에 가깝다. 동해의 일본분지(Japan basin)의 해령에 대한 상세한 자기이상 자료의 해석 결과 해령은 현무암질로 일률적으로 자화되어 있고 이는 수심이나 해령의 형태에서 예상되

는 수치보다 상당히 적은 경향을 보이고 있다. 이는 동해의 해저 암석이 태평양의 대부분의 암석과는 꽤 다르다는 것을 의미한다. 일본의 지질조사소 자료에 바탕을 두어 동해에 광역적으로 나타나는 자기음이상(negative anomaly)에 대한 설명에서 Hansen *et al.*(1983)은 천부 큐리온도(Curie temperature) 등온선과의 관계가 중요하다고 설명하였다. 동해 울릉분지의 열류량은 비교적 높은 2.0 HFU 이상의 값으로 큐리온도의 등온면이 다른 대양분지보다 훨씬 얇게 존재할 것으로 생각되므로 자성을 띌 수 있는 지각이 얇을 것이며 이는 자기이상값이 작은 음의 이상과의 상관 관계로 설명할 수 있다. 금번 연구를 통하여

7개의 자력이상 축선중 대칭성이 발견되는 축선이 3개축선에 불과하지만 이는 울릉분지 하부 지각이 과거 해저 확장에 의해 형성되었을 가능성을 나타낸다.

탄성파자료해석 결과 음향기반은 탄성파적 특징에 따라서 크게 네 가지로 나누어 지는데, 울릉분지 남부의 음향기반은 비교적 continuity가 좋은 low-frequency, moderate- to high-amplitude의 특징을 보이는데 비슷한 양상의 탄성파적 특징이 음향기반의 아래에서도 계속 나타난다. 북쪽으로 가면서 분지 내의 음향기반은 volcanic sill/flow로 해석되는 층으로 광범위하게 덮혀 있어서 분지 남부의 음향기반과 같이 뚜렷하게 나타나지 않지만 volcanic sill/flow가 비교적 얇은 곳에서 확인되는 음향기반은 분지 남부의 음향기반과 유사한 특징을 보인다. Korea Plateau의 남쪽에서 Ullung Interplain Gap에 이르는 분지 내의 지역은 volcanic sill/flow가 two-way travel time으로 거의 500 msec에 이를 정도로 매우 두껍게 분포하고 적어도 두개의 mapping이 가능한 volcanic sill이 발견된다. 이 sill들은 해저면으로부터 two-way travel time으로 약 1.0초 정도이거나 더 얇은 곳에서 나타나는 데 이는 분지내의 북쪽에서 최근까지도 해저 화산활동이 활발했음을 나타내고 있다.

부계 이상의 급격한 변화는 지하의 밀도 변화에 기인하며 주로 지체의 경계면에서 발생한다(McGrath, 1991). 부계 重力 이상치의 경사도 분포에 의하면 연구해역 서부에 거의 남-북 방향(북북동-남남서 방향)으로 발달된 높은 경사도를 보이는 선구조와 울릉분지 동측에 북동-남서 방향으로 존재하는 선구조를 추정할 수 있다(서 등, 1993). 즉 남-북 방향으로 존재하는 부계 중력 이상의 높은 경사벨트는 이 지역의 주된 단층대로 해석하는 것이 가능하며 이 단층이 배호 확장을 용이하게 하였을 것으로 사료된다.

위에서 언급된 남북 방향으로의 확장 가능성은 일본 남서부 및 한국 동남부에서의 고지자기학적 연구에 의해 제시된 시계 방향의 부채꼴 모양의 확장이론(Otofujii and Matsuda, 1983; Otofujii and Matsuda, 1984; Otofujii and Matsuda, 1987)과는 상이하다. 그러나 최근에 한국 동남부와 일본 남서 Honshu지역의 잔류자기 편기가 각각 56°와 55° 시계방향으로서 거의 같은 값을 지니는 사실이 밝혀져 울릉분지 형성이 잔류자기 방향에 영향을 미치지 않았음을 의미하며 이는 분지 확장이 남북 방향으로 일어났을 가능성을 뒷받침 해준다(김, 1992).

이러한 남북 방향의 운동은 울릉분지의 화산활동의 시기가 북쪽으로 갈수록 젊어진다는 사실로 부터 일본열도가 남쪽으로 이동되었다는 해석과 일치된다(Chough and Lee, 1992). 또 Yoon and Chough(1992)는 이러한 운동이 울릉분지의 서측 경계부에서 후포 단층으로 불리는 주이동대(principal displacement zone: PDZ)를 따라 일어났다고 해석하였다.

결 론

울릉분지 및 그 인근지역의 후리-에어 이상은 전체적으로 매우 작은 값을 보이는데, 연구해역의 북서쪽에 위치한 한국대지(Korea plateau)와 남동쪽의 오키 뱅크(Oki bank) 주위에서 최대 40~60 mgal, 울릉분지 중앙부에서 약 20 mgal 미만의 양(+) 이

상을 보인다. 그러나 울릉분지의 대부분의 지역은 분지내에 존재하는 깊은 해수와 두꺼운 퇴적층으로 인하여 최대 -20 mgal 이내의 음(-)의 이상대를 갖는다. 한편, 해수의 영향을 제거한 부계 이상도는 분지 중앙부에 NE-SW 방향으로 발달된 약 150 mgal 이상의 양(+) 이상대를 보여 약 -20 mgal의 음 이상대를 보이는 후리-에어 이상도와는 다른 양상을 보여주고 있다. 이는 울릉분지 하부에 상승한 맨틀과 해양지각의 존재에 기인된 것으로 해석된다. 특히 울릉분지를 북서-남동으로 횡단한 후리-에어 이상 및 부계 이상의 변화 양상은 울릉분지 중앙부 양측에서 큰 변화를 보여 해양 지각의 존재와 그 범위를 예측케 하여준다. 부계 이상치 및 후리-에어 이상치의 급구배는 해양지각의 양측 경계인 해양지각-대륙지각 경계에서의 밀도 변화에 기인된 것으로 해석된다.

울릉분지의 지자기이상의 분포는 대체적으로 -400 nT 이내의 음의 이상으로 자기이상값이 작다. 이러한 현상은 두꺼운 퇴적층과 자성을 띠지 않는 온도한계인 큐리등온선이 다른 해양분지와 비교할 때 상대적으로 얇게 존재하기 때문으로 해석된다. 자력이상 축선중 대칭성이 존재하는 축선이 발견되어 울릉분지 하부 지각이 과거 해저 확장에 의해 형성되었을 가능성을 나타낸다.

탄성파자료 해석 결과 울릉분지의 음향기반에는 단층, 지구대 및 지루 등의 구조들이 나타나지 않고 일반적으로 평탄한데, 이것은 울릉분지 기반암이 해양지각으로 이루어져 있거나 또는 두꺼운 화산암류 암석으로 덮여 있기 때문으로 해석된다. 또한 음향기반의 탄성파특징으로 보아 울릉분지의 북쪽으로 가면서 volcanic sill과 flow의 양이 증가하고 얇은 층에서 나타나고 있어 분지남쪽보다 북쪽에서 해저화산활동이 활발하였고 비교적 최근까지도 화산활동이 진행되었음을 알 수 있다.

결론적으로 중력, 자력, 탄성파자료 해석을 통하여 울릉분지의 지각에 관한 종합적 해석 결과 울릉분지 하부에는 밀도가 큰 지각이 존재하며 자기이상의 대칭성을 수반하는 사실로 미루어 해양지각이 존재할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 중력연구에 대한 한국과학재단의 핵심전문연구지원(941-0400-016-2), 탄성파자료연구에 대한 교육부 해양과학지원 및 지자기 연구에 대한 기초과학연구지원(BSRI-96-5419)에 의한 공동된 결과들을 종합하여 이루어졌음을 밝히며 재정적 지원에 감사를 드린다. 또한 이 논문을 세세히 읽고 질을 높여 준 익명의 심사자들에게도 감사를 드린다.

참고문헌

- 김인수, 1992. 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28: 84-109.
- 서만철, 이미경, 석봉출, 1993. 해상중력자료를 이용한 동해 울릉분지의 지질구조 연구. 지질학회지, 29(2): 119-127.
- 석봉출, 김한준, 한상준, 박찬홍, 김성렬, 김기영, 유해수, 양수영, 정태웅, 주형태, 최동립, 홍종국, 장재경, G.I. Anosov, H. S. Gnibidenko, V. Argentov, S. Bikkenia, E. Zhietsov, V.

- Zhigulef and V. Solovyev, 1992. 동해울릉분지의 지구물리학적 연구(한국-러시아 공동연구). 한국해양연구소, 149 pp.
- Chough, S.K. and E. Barg, 1987. Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, **15**: 45-48.
- Chough, S.K. and K.E. Lee, 1992. Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *The Island Arc*, **1**: 32-39.
- Hilde, T.W.C. and J.M. Wageman, 1973. Structure and origin of Japan Sea. In: *The Western Pacific: Island Arcs, Marginal Seas, Geochemistry*, edited by Coleman, P.J., University of Western Australia Press, Nelstand, 415-434 pp.
- Hirata, N., H. Tokuyama and T.W. Chung, 1989. An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Sea of Japan: the final stage of back-arc spreading. *Tectonophysics*, **165**: 303-314.
- Jolivet, L., P. Huchon, J.P. Brun, N. Chmot-Rooke, X. Le Pichon and J.C. Thomas, 1991. Arc deformation and marginal basin opening, Japan Sea as a case study. *J. Geophys. Res.*, **96**: 4367-4384.
- Jolivet L. and K. Tamaki, 1992. Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the Northeast Japan arc. In: *Proc. The Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **127/128**: 1311-1331.
- Kim, H.J., C.H. Park, J.K. Hong, H.T. Jou, T.W. Chung, V. Zhigulef and G.I. Anosov, 1994. A seismic experiment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwestern Japan Sea (East Sea of Korea). *Geoph. Res. Lett.*, **21**: 1975-1978.
- Kobayashi, K., 1977. Sea of Japan and Okinawa Trough. In: *The Pacific Ocean, The Ocean Basins and Margins*, **7A**: 419-458 pp.
- Kuramoto, S., 1991. Seismic stratigraphy, thermal structure and tectonic evolution of the Japan Sea. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 76 pp.
- Lee, K.E., 1992. Geological structure of Ulleung back-arc basin, East Sea, M.S. Thesis, Seoul National University, 121 pp.
- Lellemand, S. and L. Jolivet, 1985. Japan Sea: a pull apart basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **76**: 375-389.
- Ludwig, W.J., S. Murauchi and R.E. Houtz, 1975. Sediments and structure of the Japan sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**: 651-664.
- McGrath, P.H., 1991. Dip and depth extent of density boundaries using horizontal derivatives of upward-continued gravity data. *Geophysics*, **56**: 1533-1542.
- ODP Leg 127 and Leg 128 shipboard scientific parties, 1990. Evolution of the Japan Sea. *Nature*, **346**: 18-20.
- Otofujii, Y. and T. Matsuda, 1984. Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **70**: 373-382.
- Otofujii, Y., T. Matsuda and S. Nohda, 1985. Paleomagnetic evidences for the Miocene counter clockwise rotation of the Northeast Japan-rifting process of the Japan arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**: 265-277.
- Otofujii, Y. and T. Matsuda, 1987. Amount of clockwise rotation of Southwest Japan-fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **85**: 289-301.
- Shipboard Scientific Party, 1990. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, v. 127.
- Suh, M., 1987. Mechanism of the back-arc opening of the East Korea Sea. *EOS Transactions*, **68**: 1501 (Abstract).
- Tamaki, K., K. Suyehiro, J. Allan, Jr. Ingle, J.C. and K.A. Pisciotto, 1992. Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. In: *Proc. The Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **127/128**: 1333-1348.
- Tokuyama, H., M. Suyemasu, K. Tamaki, E. Nishiyama, S. Kuramoto, K. Suyehiro, H. Kinoshita and A. Taira, 1987. Report on DELP 1985 cruises in the Japan Sea part III: Seismic reflection studies in the Yamato Basin and the Yamato Rise area. *Bull. Earthquake Res. Ins.*, **62**: 367-390.
- Tosha, T. and Y. Hamano, 1988. Paleomagnetism of Tertiary rocks from the Oga peninsula and the rotation of northeast Japan. *Tectonics*, **7**: 653-662.
- Yoon, S.H., 1994. The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution. Unpublished Ph.D. Thesis, Seoul National University, 235 pp.
- Yoon, S.H. and S.K. Chough, 1992. Tectonic history of eastern continental margin, Korea. In: *Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Sea*, edited by Chough S.K., Special Publication of the Korean Sedimentology Research Group(KSRG), 22-39 pp.