

탄성과 및 중자력자료에 의한 울릉분지의 지각특성 및 구조 연구

박찬홍* · 허 식 · 김한준 · 유해수
한국해양연구소 해양지질연구단

Crustal Characteristics and Structure of the Ulleung Basin, the East Sea (Japan Sea), Inferred from Seismic, Gravity and Magnetic Data

CHAN HONG PARK*, SIK HUH, HAN JUN KIM AND HAI SOO YOO
Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul 425-600, Korea

울릉분지의 탄성과 단면에서 반사특성에 의해서 분류된 4개의 단위 퇴적층까지의 심도와 두께를 산출하고 분포도를 작성하였으며, 이를 중력 및 자기이상분포와 대비하여 울릉분지 심부구조의 특성을 해석하였다. 울릉분지 퇴적층은 중앙부에서 3,000–4,000 m이나 국지적으로 6,000 m까지 두꺼워 지며, 북동쪽에서 남서쪽으로 두꺼운 지역의 분포가 넓어지는 양상을 보인다. 음향기반은 분지 중앙부에서 5,000 m, 남서단 및 서단에서 최대 7,500 m까지 지역적으로 깊어지며 전체적으로 남서–북동 방향의 긴 저지대를 이루면서 음향기반 상부 퇴적층들의 구조에 직접적인 영향을 주고 있다. 울릉분지 서쪽 및 남쪽 가장자리의 저중력분포는 두꺼운 퇴적층을 갖는 기반암물대 및 대륙–해양의 전이지각의 존재를 반영하며, 특히 기반암물대는 탄성과 자료에 근거한 것과 같이 국지적이지 않고 북쪽의 한국대지 남단에서부터 울릉분지의 남단까지 주변부를 따라 연속적으로 발달하고 있다. 분지 중앙부에서 고중력이상분포는 북동단이 넓고 남서단쪽으로 좁아지는데, 이것은 고밀도 지각과 맨틀의 천부 존재를 지시한다. 울릉분지 중앙부의 북서부 및 남동부 가장자리를 따라 나타나는 한 쌍의 자기이상 선상분포는 탄성과 자료에서 밝혀진 분지내 기반암 저지대의 경계부와 대체적으로 일치한다. 이 자기선상 분포는 울릉분지가 해저확장하면서 형성된 대륙지각과 해양지각간 전이대의 열개된 지각특성을 따라 관입 혹은 분출된 일련의 화성암체와 관련이 있다. 탄성과 속도 분포가 울릉분지 중앙부에 해양지각이 존재할 가능성을 시사하는 것에 근거한다면 울릉분지내 해양지각은 이 한 쌍의 자기선구조를 경계로 그 안쪽인 남서부에서 좁고 북동쪽으로 가면서 120 km까지 넓어지는 한정된 지역에만 분포하는 것으로 해석된다. 분지지각의 남쪽경계가 휘어져 있는 것은 필리핀판 등 해양지각판이 일본열도에 충돌할 때 받은 압축력의 영향으로 울릉분지 지괴가 변형 받았다는 것을 지시한다.

Depths to four seismic sequence boundaries and the thickness of each sequence were estimated and mapped based on multi-channel seismic data in the Ulleung Basin. These depth-structure and isopach maps were incorporated into the interpretation of gravity and magnetic anomaly maps. The sediment thickness ranges from 3,000 m to 4,000 m in the central basin, while it reaches 6,000 m locally along the southwestern, western, and southeastern margins. The acoustic basement forms a northeast-southwest elongated depression deeper than 5000 m, and locally deepens up to 7,500 m in the southwestern and western margins. Low gravity anomalies along the western and southern margins are associated with basement depressions with thick sediment as well as the transitional crust between the continental and oceanic crusts. Higher gravity anomalies, dominant in the central Ulleung basin, broaden from southwest toward northeast, are likely due to the shallow mantle and a dense crust. A pair of magnetic elongations in the southeastern and northwestern margins appear to separate the central Ulleung basin from its margin. These magnetic elongations are largely dominated by intrusive or extrusive volcanics which occurred along the rifted margin of the Ulleung basin formed during the basin opening. The crust in the central Ulleung Basin, surrounded by the magnetic elongations, is possibly oceanic as inferred from the seismic velocity. The oceanic crust can be mapped in the central zone where it widens to 120 km from the southwest toward northeast. Bending of the crustal boundary in the southern part of the Ulleung Basin suggests that the Ulleung Basin has been deformed by a collision of the Phillipine plate into the Japan arc.

*Corresponding author: chpark@sari.kordi.re.kr

서 론

울릉분지의 탄성과 자료에 의한 기존 연구는 음파 반사특성에 따라 층을 분류하고 시간 구조도를 작성하여 이를 층서 구조적으로 해석하는 것이었다. Lee(1992)와 Chough and Lee(1992)는 울릉분지의 탄성과 단면으로부터 탄성과상 및 시대층서를 근거로 퇴적층을 시대가 젊은 순서로 unit I에서 unit III-2까지 4개 층으로 분류하고, 퇴적층내 화산암 산출에 관하여 논의하였으며 음향기반에 대한 시간구조도를 작성하였다. 서 등(1998)과 Lee *et al.*(1999)에서도 역시 음향기반의 탄성과적 특징과 시간구조도를 작성하여 제시한 바 있다. 그러나 이들 연구에서 사용한 탄성과 자료가 울릉분지 전체의 구조적 특성을 공간적으로 설명할 만큼 충분치 않고, 탄성과 자료에서 도출된 시간 구조도의 특성상 심부로 갈수록 실제 구조와 다르게 왜곡되어 표현될 수 있다. 뿐만 아니라, 울릉분지에는 퇴적층이 두껍고 화산체들이 산발적으로 관입 혹은 분출 협재되어 있다는 것(Chough and Lee, 1992; Lee, 1992)을 고려할 때 탄성과 자료와 함께 이를 공간적으로 해석하기 위한 중력 및 자력자료가 필요하다. 그러나 탄성과 및 중력, 자력자료를 결합하여 울릉분지 구조 해석한 결과(서 등, 1998; Lee *et al.*, 1999)는 그리 많지 않은 데다가, 이들 연구에서는 탄성과의 층서 및 시간구조 등이 중점적으로 다루어졌고, 사용된 중력 및 자력자료도 울릉분지 전체를 해석하기에는 공간적인 분포가 충분치 않았다. 한편, 90년대 들어 한국해양연구소가 동해의 지구물리조사를 본격화하면서 자료결핍 지역에 대하여 상당한 지구물리자료를 축적할 수 있게 되었다. 특히, 조사선 온누리호 다중채널 탄성과 탐사 시스템 및 선상중력계와 이 어도호의 선상 그래디오메터를 이용한 지구물리탐사는 조밀하지는 않지만 울릉분지 전역에 고른 자료분포를 제공하였다.

본 연구에서는 울릉분지내의 탄성과 자료에 의하여 기 분류된 퇴적층서를 기준으로 하여 탄성과 단면에서 각 층 단위를 구분하고 층별 두께 및 심도를 수치자료화 함으로서 중력 및 자력자료와 상관관계 분석을 통한 상호 보완적 해석을 시도하였다. 투과도의 한계가 있기는 하지만 탄성과 자료로부터 중천부의 해저지층 심도 및 두께를 알 수 있다면 중력 및 자력자료의 보완을 통한 이차적인 해석에 의해서 울릉분지의 심부구조에 접근할 수 있을 것이다. 본 연구는 인공위성 및 선상 관측 중력 및 자력자료의 활용을 통해서 탄성과 자료 해석의 신뢰성을 기하고 자료결핍지역에 대한 보완을 통해서 울릉분지의 퇴적구조와 음향기반구조를 보다 정확히 파악하고자 하였다. 두꺼운 퇴적층의 존재로 인하여 드러나지 않는 기반암내의 화성암체의 분포를 파악하기 위해서는 효과적인 방법으로서 자기이상에 의한 analytic signal 산출 기법을 활용하였다. 이와 같은 시도를 통하여 두꺼운 퇴적층과 많은 화성암의 분출 및 관입 때문에 해석이 난해한 울릉분지의 구조 및 지각특성을 파악하고, 울릉분지의 확장과 관련하여 논의하고자 한다.

자료 및 분석

연구지역은 Fig. 1과 같이 울릉분지를 중심으로 하며 본 연구에서 주로 사용된 자료는 수심, 자력, 중력 및 탄성과자료이다.

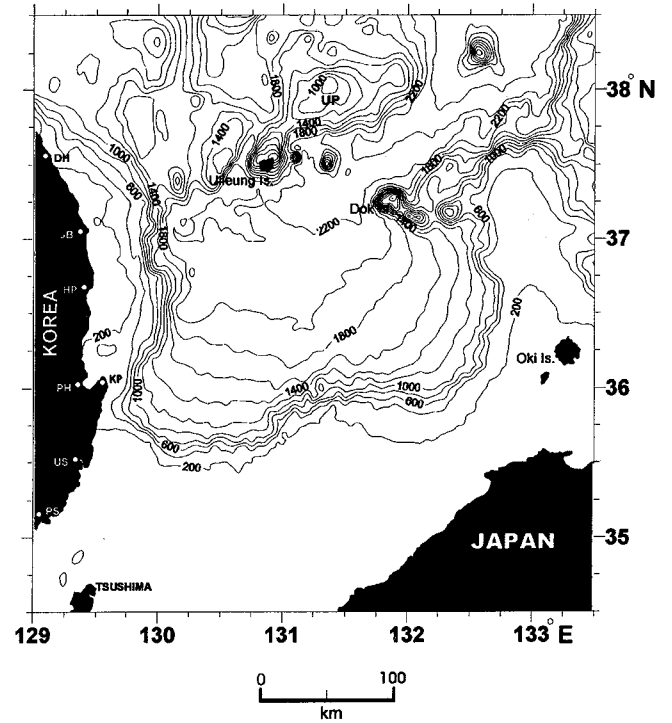


Fig. 1. Study area and topography of the Ulleung Basin. The contour interval is 100 m. DH=Donghae, JB=Jukbyeon, HP=Hupo, PH=Pohang, KP=Kuryong-po, US=Ullsan, and PS=Pusan.

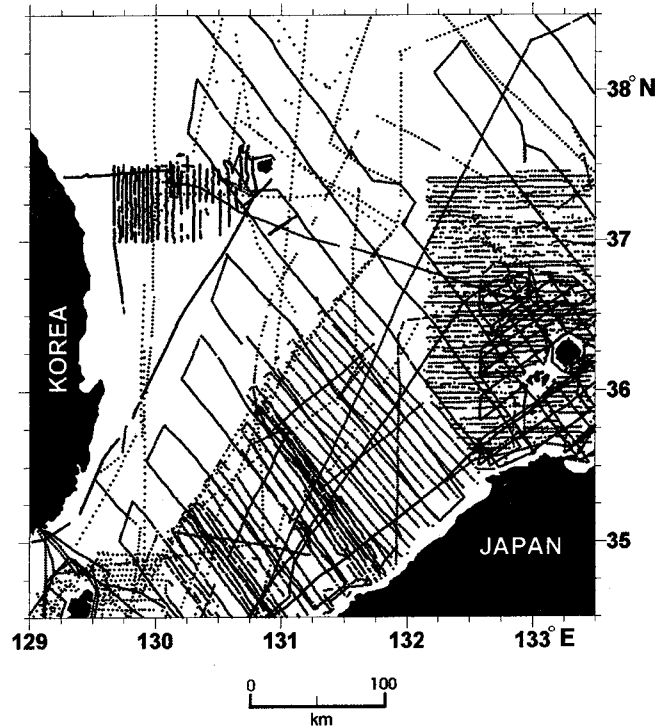


Fig. 2. Shipborne gravity data coverage.

수심, 중력 및 자력자료는 미국 NGDC(National Geophysical Data Center) 및 1990년 이후 한국해양연구소에서 획득한 자료를 최대한 확보하여 사용하였다. 중력자료는 선상중력자료에 인

공위성 해수면고도자료로부터 산출한 중력자료를 결합하여 사용하였다.

선상중력은 NGDC의 자료에 바탕을 두고 있으며, 최근 한국해양연구소가 울릉분지 북서 주변부에서 획득한 자료(석 등, 1993)도 포함한다(Fig. 2). 2' 간격의 격자로 구성된 위성중력자료는 ERS-1, Geosat ERM, Geosat-GM 위성의 해수면 고도측량으로부터 산출한 최신 자료(Sandwell and Smith, 1997; Smith and Sandwell, 1995)에 기초하고 있다. 선상중력에서 나타나는 측선간 혹은 조사시기 및 기간의 차이에 따른 오차는 Sandwell and Smith(1997)가 최근 공개한 정밀 위성 중력 자료에 대비하여 보정하고 결합하였다. 각 측선상의 선상중력을 안정된 위성중력분포에 대비하여 보정하고 결합하기 위하여 모든 가능한 선상중력 자료는 측선별로 분리한 후 위성중력 비교를 통해서 교차점과 오차 크기를 산출하고 최소자승법을 이용하여 보정하였다. 이 방식은 개별 측선을 따라서 상대적인 중력 이상을 보존하면서 교차오차를 감소시키는 이점을 갖기 때문에 선상중력-선상중력간의 교차점 오차 보정 기법에 비해서 훨씬 신뢰성이 높다. 결합된 후리어이상 분포는 위성중력의 광역적 성분과 선상중력의 상세한 성분을 모두 포함하고 있으며, 선상자료가 결합된 울릉분지의 서부 및 북부 해역을 포함하여 울릉분지 전체에 고른 중력분포를 제공한다(Fig. 3). 이와 같은 위성중력과 선상중력의

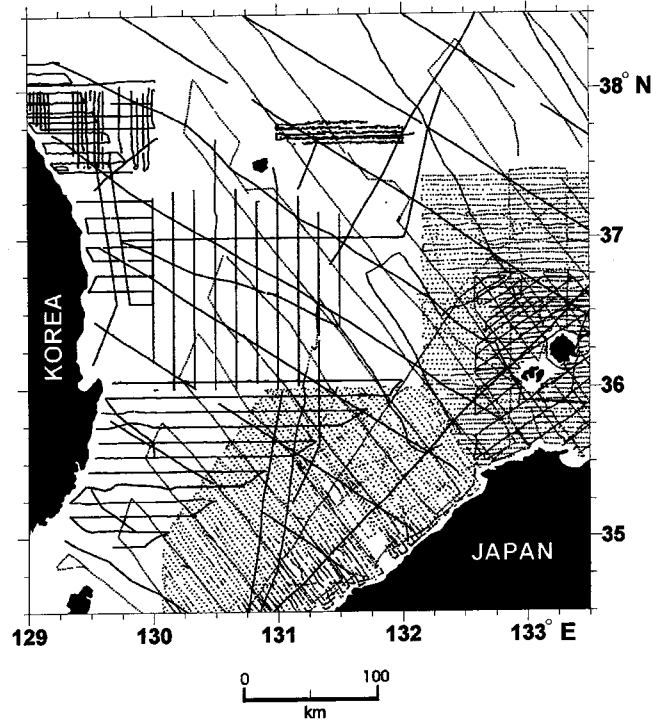


Fig. 4. Shipborne magnetic data coverage.

여된 지역과 광역적으로 연결시키기 때문에 해저지질구조 해석에 크게 기여할 수 있다.

자력자료는 NGDC 자료 및 한국해양연구소 자료를 포함하여 18개 항해자료로 되어 있다(Fig. 4). NGDC 데이터베이스에서 자료가 빈약한 울릉분지 중앙부 및 서부 해역에 대해서는 1987년 이후 획득된 한국해양연구소의 자료에 의해서 보충되었다. 특히, 1992년 한국해양연구소와 일본 치바대, 고베대, 동경대 해양연구소 등 공동연구팀은 자료가 거의 없었던 울릉분지 중앙부를 중심으로 자력자료를 획득하여 울릉분지 연구에 귀중한 자료를 추가하였다. 본 연구에서 사용한 총 자력자료는 약 49,000점에 이른다. 측선간 혹은 조사단위간에 존재하는 오차를 줄이기 위하여 Verhoef *et al.*(1991)에 의해서 제안된 교차점오차 최소화 기법을 적용하고 결과를 자기이상도로 나타내었다(Fig. 5). 자기이상에서 해저 자성체 분포를 보다 뚜렷이 파악하기 위해서 자기이상의 수평미분과 수직미분의 결합으로 이루어지는 analytic signal을 산출하였다. Analytic signal의 중요한 특징은 기존의 자구화 변환과는 다르게 자성체의 자화방향과 관계없이 자기이상을 단순화시킨다는 것이다(MacLeod *et al.*, 1993). Analytic signal의 진폭은 자성체 자화강도의 진폭과 관계가 있다. 자기이상의 analytic signal 진폭은 주변 자기장이나 자성체의 자화방향과 무관하게 자화특성차가 나타나는 경계를 따라 최대치를 이룬다(Nabighian, 1972; Atchuta *et al.*, 1981). 따라서 최대의 analytic signal은 대체로 자성체의 경계를 따라 나타난다(Roest *et al.*, 1992). 이러한 특성을 이용하면 analytic signal의 절대치로서 자성체의 자화방향에 대한 가정 없이 자성체의 경계를 파악할 수 있다. 이것은 특히 잔류자화가 크게 영향을 주는 자성체의 자기이상을 단순화하는데 매우 효과적인 방법이다. Analytic signal은 진폭함수를 이용하여

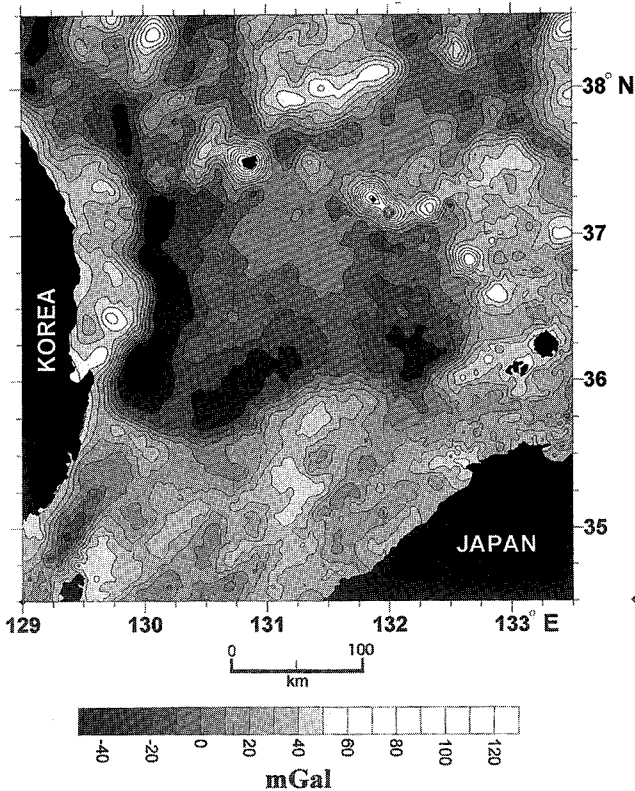


Fig. 3. Combined shipborne and satellite altimetry-derived free-air gravity anomalies after crossover adjustment.

결합은 선상중력 자료의 불균질성을 해소하고 단주기 성분을 포함한 고해상도의 중력 분포를 제공할 뿐 아니라 선상자료가 결합

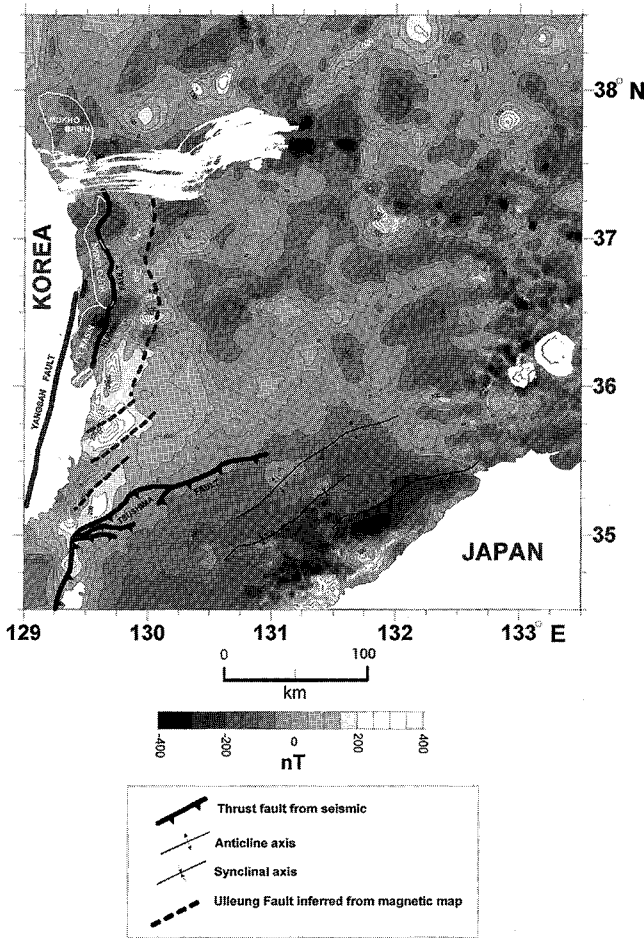


Fig. 5. Magnetic anomaly contour map produced from crossover error adjustments. Yangsan fault, Tsushima fault, folds off SW Japan, and Tertiary basins offshore the Korean Peninsula are mapped from Minami (1979), KIER(1982), Park(1990), and Choi (1995). The Hupo fault is after Yoon(1994).

서로 직교하는 3개의 미분치에 의해서 계산할 수 있다(Roest *et al.*, 1992). Analytic signal을 구하기 위하여 자기이상치를 3° 간격으로 격자화하고 각 방향에 대하여 미분치를 계산하였다. 자기 이상분포에서 북향, 동향에 대한 수평미분치와 수직미분치로부터 analytic signal의 진폭을 계산하여 작성한 analytic signal 분포는 Fig. 6과 같다.

탄성과 자료는 한국석유개발공사에서 1987년 획득한 11개 축선 및 한국해양연구소에서 1994년 획득한 4개의 축선 등 15개 축선 자료를 사용하였다(Fig. 7). 울릉분지내 15개의 탄성과 단면에서 5개 층 각각의 두께를 왕복주시로 수치화한 후 구간 속도자료를 이용하여 거리 단위의 층후와 심도를 산출하였다. 각 층의 구간속도는 동일 층내 속도(Lee, 1992)를 개략 평균한 값을 이용하였다.

결과 및 토의

탄성과 층서 및 층후분포

울릉분지 중앙부에서의 다중채널 탄성과 단면 해석결과에 따

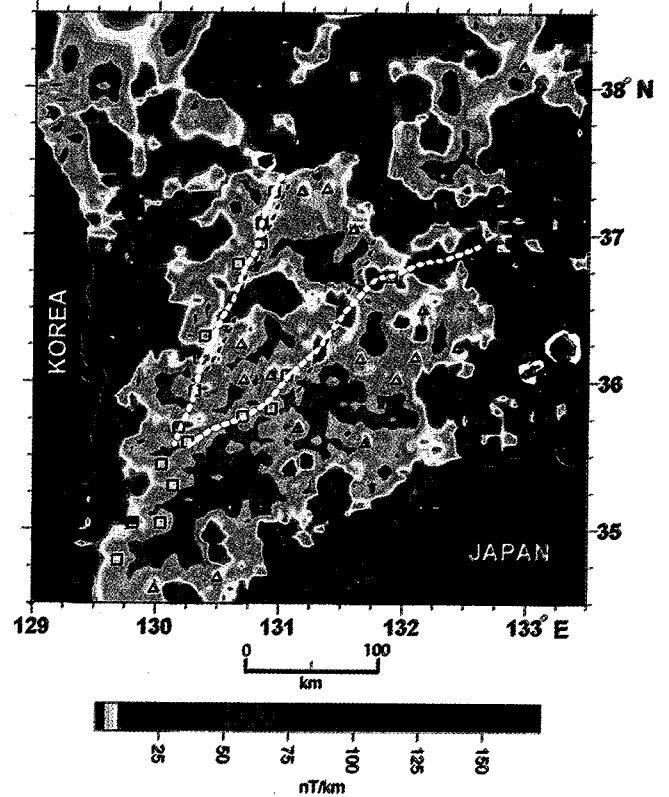


Fig. 6. The analytic signal map of magnetic anomalies. The analytic signal reveals scattered circular features due to volcanic bodies over the basin. Triangles denote possible magnetic sources. Rectangles are a series of inferred volcanic intrusions emplaced along the fractures at both margins of the central Ulleung Basin.

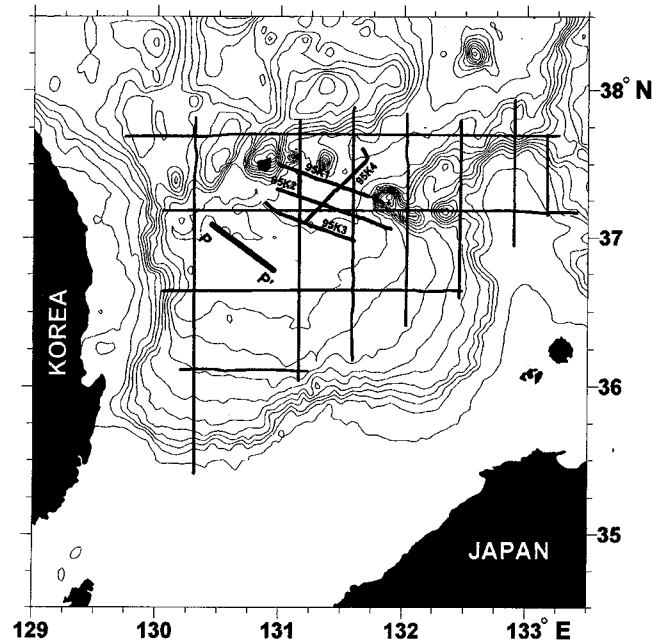


Fig. 7. Locations of seismic profiles used in this study.

르면 퇴적층서는 음파반사특성 및 시대층서를 고려할 때 unit I, II, III, IV(또는 III-1)로 분류되며(한 등, 1997; Lee, 1992;

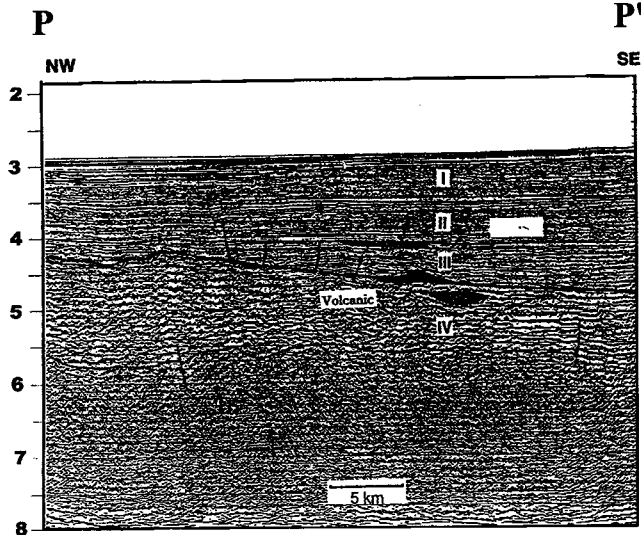


Fig. 8. A typical seismic profile showing four major sedimentary units in the Ulleung Basin(Park, 1998). Refer to Fig. 7 for the location.

Table 1. Range and average of seismic velocities in each unit

Velocity Unit	Range(km/sec)	Average(km/sec)
Unit I	1.52-1.69	1.60
Unit II	2.04-2.38	2.17
Unit III	2.40-3.80	3.03
Unit IV	3.82-4.67	4.20

Fig. 8), 돌고래-I 시추공에서 결정된 시대층서에 의한 이들 네 개의 층서 단위의 시대는 각각 마이오세 중기(16.6-11.2 Ma), 마이오세 말기(11.2-5.3 Ma), 플라이오세(5.3-1.6 Ma), 플라이스토세-홀로세(<1.6 Ma)에 대비된다(한 등, 1997). 본 연구에서는 사용된 전체 탄성과 단면에서 얻은 왕복주기를 이용하여 의한 각 단위층의 층후를 산출하였다. 각 단위층의 탄성과 속도분포 및 음파반사 특성은 Lee(1992)와 한 등(1997)을 참조하여 기술하였다.

Unit I은 1.52-1.69 km/s의 구간속도분포를 나타내고 있으며, 개략 평균 속도는 1.60 km/s이다(Table 1). 이 층은 울릉분지의 중앙부에서 0.7-1.0s의 두께로 분포하며 전체적으로 두께의 변화가 적고 북쪽 주변부와 오키뱅크쪽으로 급격히 얇아진다. 남부와 남동부에서는 1.7s 이상으로 두껍게 쌓여 있다. 이 층은 고주파, 고진폭을 갖는 수평적인 반사특성을 나타내고 있으며 화산재에 기인한 것으로 보이는 교란된 반사층리의 상부에 놓여 있다. 연속성이 좋은 수평 반사층리들은 반원양성 및 육성 퇴적물의 교호에 의해 나타나는 것으로 해석된다(Chough and Lee, 1992). Unit II는 2.05-2.38 km/s 범위의 구간 속도 분포를 보이며, 울릉분지의 남부 및 동부 주변지역에서 국지적으로 1.0s 이상의 두께를 보이는 반면에 북동쪽으로 가면서 얇아진다. 특히, 36°40'N과 132°00'E 부근은 국지적으로 1.2s 이상 두껍다. 이 층은 울릉분지간 평원에서 0.4s 이상의 두께를 가지며 북동-남서 방향으로 길게 발달하고 있다. 울릉분지의 중앙 북부는 두께가 0.6-0.8s 범위에서 대체로 일정하다. 분지의 서쪽인 동경 130°30'E를 따라서는 높은 기반암의 영향으로 남북방향의 얇은 퇴적층후가

나타나고 있다. 이 층은 간간이 고진폭이 나타나면서 분지 전체적으로는 저진폭을 갖는 수평반사층리가 특징이다(Lee, 1992). 울릉분지의 남동부에서 나타나는 교란된 반사파들은 미끄럼 사태 및 함몰사태 퇴적에 기인한다(Lee, 1992). Unit III는 울릉분지의 중앙부 남서쪽 기반암 융기부 및 중앙부 북동쪽 해저산 부근을 제외하면 대부분의 울릉분지 내부 지역에서 잘 발달하고 있는 층이다. 이 층은 화산돔에 의해 가장 많이 변형을 받아 기반암 상승부에서 멀어질수록 분산성상으로 바뀌면서 층의 두께가 두꺼워진다(한 등, 1996). 이 층은 울릉분지 내부에서 탄성과 속도가 2.8-3.0 km/s까지의 범위에서 나타나며(Lee, 1992), unit I 및 unit II에 비해서는 두께의 변화가 다소 크다. 이 층의 두께는 울릉분지 내에서는 0.2 s에서 1.0 s까지 나타나는데, 전체적으로 남서단쪽으로 점차 두꺼워지는 경향이 있다. 울릉분지의 남서단에서 가장 두꺼운 지역은 최고 1.7s까지 증가하며, 36°40'N, 132°30'E 부근에서는 국지적으로 1.0s 이상 두껍다. Unit IV는 무층리 반사면(reflection-free configuration), 가변 진폭 반사면(variable-amplitude reflections)과 저진폭 수평 반사면(low-amplitude parallel reflections)이 특징이며, 하부는 음향기반에 위걸침(on-lap)한다(Lee, 1992). 이 층은 울릉분지의 북부 및 서부지역의 구릉 구조(mound) 지역에서 무반사특성을 나타내는데, 이것은 화성 분출 혹은 관입체 때문인 것으로 해석된다(Lee, 1992). Volcanic flow나 sill로부터 기인한 것으로 해석되는 가변 진폭과 평행구조가 특징인 반사면들은 주로 울릉분지의 북서부에서 발견된다(Chough and Lee, 1992). 반면에, 퇴적층리에 의한 것으로 보이는 저진폭의 평행반사구조는 분지의 남동부 지역에서 현저하게 나타난다. 이 층의 구간속도는 3.6에서 4.8 km/s사이이며 두께는 분지 중앙부에서 0.4-0.7s로서 비교적 변화가 작은 반면 남서단, 남동단 혹은 서쪽 주변부 일부에서 1.0s이상으로 두꺼워진다. 분지 서쪽 대륙사면 기저부인 36°40'N, 130°20'E 부근에서는 지역적으로 2.0s이상 두꺼워진다. 울릉도와 독도사이에서 이 층의 두께는 0.2-0.8 s로서 변화의 폭이 비교적 크게 나타난다.

총 퇴적층후 분포

음향기반 상부의 4개의 퇴적층 각각에 대하여 구한 두께를 합하여 총 퇴적층 층후분포를 만들었다. 음향기반 상부의 퇴적층은 울릉분지 중앙부에서 지역적인 박층을 제외하고는 2.5-3.0s의 두께로 고르게 쌓여 있다(Fig. 9). 이와 같은 퇴적층의 두께는 아마토 분지의 1.6s(Tamaki et al., 1979)와 일본분지의 2.2s(Tamaki, 1988) 보다 훨씬 두꺼운 것이다. 퇴적층은 울릉분지 북동부에서부터 남서부쪽으로 점차 두꺼워지는 양상을 나타낸다. 울릉분지 중앙부에서 국부적으로 나타나는 얇은 퇴적층은 기반암 돌출부 상부에 놓인다. 퇴적층은 한국대지나 독도, 오키뱅크 부근 쪽으로 1.0s 이하로 얇아지나 울릉분지간평원 쪽으로는 1.5s 이상 두꺼운 퇴적층이 연장되어 발달하고 있다. 울릉분지 동남부인 오키뱅크에서 울릉분지쪽으로 이어지는 대륙사면의 기저에서는 3.5s 이상의 두께를 가진 퇴적층이 지역적으로 발달하고 있다. 울릉분지의 두꺼운 퇴적층은 분지가 확장되면서 빠르게 침강할 때 분지 주변에서 일어난 사태에 의해서 축적되었거나, 분지가 열리면서 일어난 외부로부터 급격한 퇴적물 유입에 의해서 형성된 것으로 보인다.

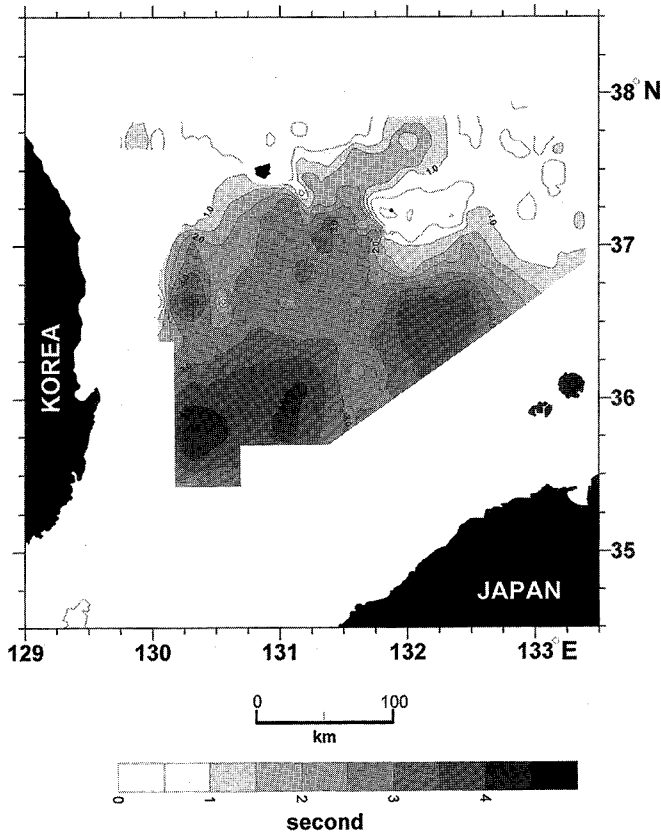


Fig. 9. The contour map of total sediment thickness in second. Contour interval is 0.2 s TWTT.

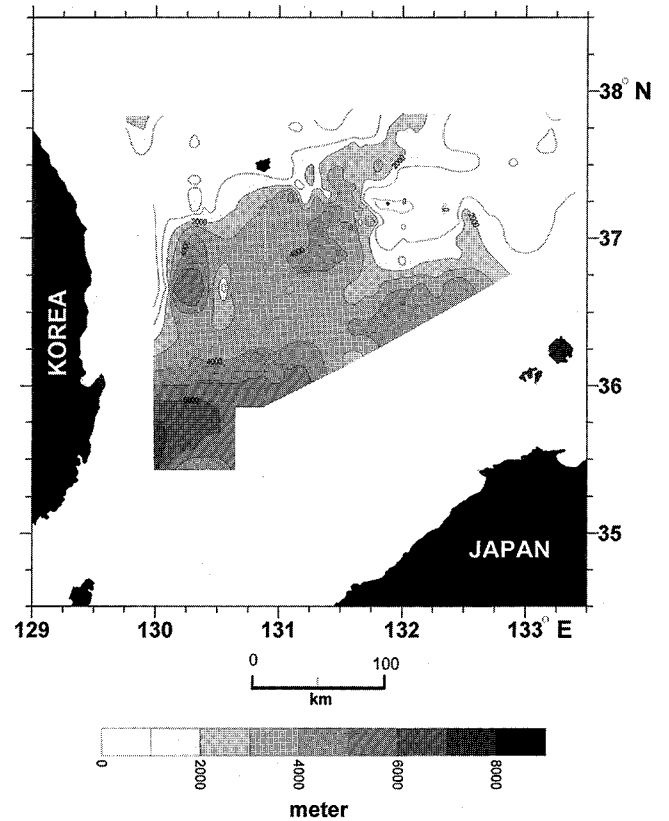


Fig. 10. The contour map of total sediment thickness in meters. Contour interval is 500 m.

각 단위층 unit I, II, III, IV내에서 구간속도를 평균한 값으로부터 각 층의 두께를 깊이단위로 산출하고 합산하여 총 퇴적층후를 구하였다. 4개 단위층 I, II, III, IV의 평균속도는 각각 1.60 km/s, 2.17 km/s, 3.03 km/s, 4.20 km/s이다. 깊이단위인 미터로 환산한 울릉분지의 퇴적층 층후 분포는 지역적인 차이를 제외하면 전체적으로 왕복주시에 의한 층후분포 양상과 유사하다. 울릉분지 중앙부에서 3,000-4,000 m의 두께를 보이는 이 두꺼운 퇴적대는 분포범위가 남서쪽으로 넓어지면서 북동-남서 방향성을 가지고 분포한다(Fig. 10). 퇴적층은 울릉분지의 중앙 북동부, 서북서 및 동남동과 남서 주변부에서 지역적으로 4,000 m 이상 두꺼워지는데, 특히 남서단에서는 6,000 m 이상으로 가장 두꺼운 퇴적대를 이룬다.

단위층 심도

수심에 각 퇴적단위의 두께를 누적하는 방식으로 각 단위층의 하부까지의 심도가 산출되었다. Unit I 하부까지 심도 분포는 울릉도-독도간 해역 쪽으로 약간 얕아지지만 울릉분지의 중앙부에서 2,500-2,800 m로서 거의 평탄한데 비해서 분지 경계부에서는 급격히 얕아진다(Fig. 11). 울릉분지 동쪽 36°30' N, 132°00' E 부근에는 주변에 비해서 400 m 이상 깊은 지역적인 함몰대가 형성되어 있다. Unit II 하부 구조는 울릉분지 내부에서 3,200 m 이상의 심도분포를 보이며 unit I에 비해서 보다 굴곡이 크다(Fig. 12). 울릉분지 중앙부를 가로지르는 저지대는 unit I에 비해서 북

동-남서 방향성이 뚜렷하다. 이 층은 분지의 남부 및 남동부 지역에서 4,000 m 이상의 심도를 보이며 국지적인 함몰대를 형성하고 있다. 이 층에서 울릉분지간 평원에 형성된 3,200 m 심도의 지역적인 함몰대는 울릉도-독도간 해역 부근에서 북서-남동 방향성을 갖는 구릉에 의해서 분지 중앙부의 함몰대와 분리된다. Unit III 하부는 울릉분지 내부에서 4,000 m 이상 깊어지며 북동-남서 방향으로 긴 함몰대를 형성하고 있다(Fig. 13). 이 층에는 여러 개의 함몰대와 구릉들이 분포한다. 상부층인 unit II에 비해서 심도가 4,800 m 이상 되는 울릉분지 남서단의 함몰대 분포 구역이 훨씬 확대되어 나타난다. 울릉분지 중앙부에서 4,200 m 이상 깊은 함몰대가 북동-남서 방향으로 길게 구획되어 분포하고 있는 것이 특징적이다.

음향기반심도 및 특성

음향기반은 한국대지, 오끼뱅크 및 한국동해 연안 등에서 1,000 m 이하까지 알아지는 반면에 울릉분지 내부에서는 4,000 m 이상으로 깊어진다(Fig. 14). 특히, 서쪽 가장자리 및 남서단에서 음향기반은 7,500 m 이상 깊기로 나타나며, 울릉분지 중앙 북동부와 동쪽 주변부에서는 국지적으로 6,000 m 이상 깊어진다. 음향기반은 울릉분지 중앙부에서는 북동-남서 방향으로 길게 저지대를 형성하고 있다. 이 저지대는 분지 중앙부에서 지역적으로 약간 솟아 있는 구릉 지역에 의해서 남서단과 북동단의 함몰대로 분리된다. 이와 같은 북동-남서 축의 분지 중앙부 저지대는 울릉

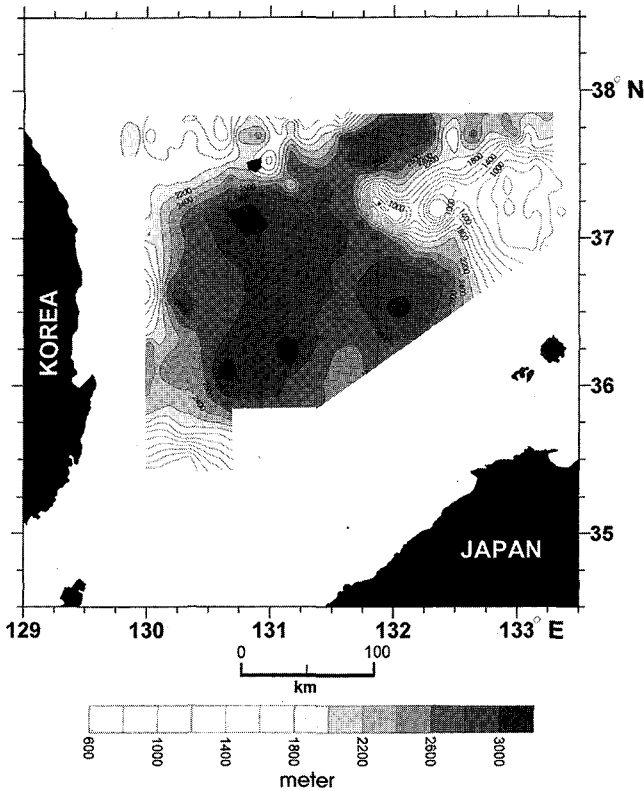


Fig. 11. The contour map of depth to the bottom of Unit I. Contour interval is 200 m.

분지의 확장시 분지의 함몰 및 새로운 지각의 형성과 관련이 있다. Ludwig *et al.*(1975)이 일본분지나 야마토분지의 분지 중앙부에서 퇴적기반은 대체로 평탄한 반면에 울릉분지의 퇴적기반이 전체적으로 약간 굴곡져 나타나는 것은 기반암 상부에 높은 탄성과 속도를 갖는 퇴적층이나 화산용암(volcanic flows)이 놓여 있기 때문으로 해석하였고, Lee *et al.*(1999)은 울릉분지 중앙부에서 퇴적기반이 비교적 평탄하고, 지구(graben)이나 반지구(half-graben) 구조가 나타나지 않는 것은 기반암이 연성적(ductile nature) 특성을 갖는다는 것을 지시하는 것으로서 해양지각일 가능성을 제시하였다. 울릉도-독도간 지역에서는 음향기반이 약간 높은 구릉을 형성하고 있어 울릉분지간 평원의 깊은 퇴적기반을 울릉분지 중앙부와 분리한다. 울릉분지 중앙부에서 unit III는 이와 같은 퇴적기반의 용기의 영향으로 주변에 비해 얇게 분포한다.

분지 지구조 해석

울릉분지에서 후리에어중력이상은 대체적으로 해저지형 변화와 상관성이 큰 것으로 나타나고 있다(Figs. 1, 3; 박 등, 1999). 그러나 밀도가 매우 낮고 두꺼운 퇴적층이 있거나 화성기반암이 돌출한 지역에서는 국지적인 이상대가 형성되기도 한다. 탄성과 자료에 의한 각 단위 퇴적층구조와 후리에어이상 분포는 부분적으로만 상관성을 갖는다. 탄성과 자료에 의한 각 지층까지의 심도 분포에 따르면 unit II, III 퇴적층 및 음향기반의 구조는 울릉분지의 중앙부에서 북동-남서 방향으로 길게 저지대를 형성하

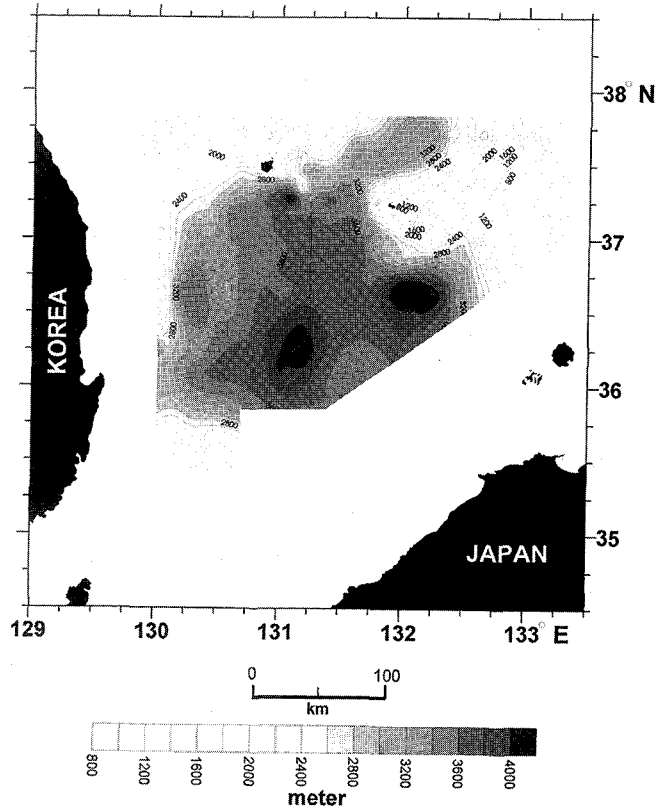


Fig. 12. The contour map of depth to the bottom of Unit II. Contour interval is 200 m.

고 있으며, 특히 남서단에서는 주변에 비해서 가장 깊은 지역적인 함몰대를 이루고 있는 것으로 나타났다(Figs. 12,13,14). 36°40' N, 130°E 및 36°35' N, 132°10' E에 중심을 둔 함몰대는 unit I-III와 음향기반 모두에서 발견되었다. 기반암이 드러나거나 얇은 퇴적층으로 피복되어 있는 독도-오끼뱅크 지역, 한반도 연안 및 한국대지 쪽으로는 후리에어이상 분포나 탄성과에 의한 지층 분포 모두에서 급구배를 이루면서 경계가 거의 일치한다. 울릉분지는 해저 천부 구조나 해저지형상 그 쪽에 있어서 남서단이 약 100 km로 좁고 북동쪽으로 가면서 최대 270 km로 넓어지는 형태의 구조를 갖는다. 울릉분지 서쪽 가장자리, 남서단 및 동남단을 따라 나타나는 국지적인 저이상대는 퇴적층의 두께가 상대적으로 두껍고 기반이 함몰되어 있는 기반 저지대의 존재를 지시한다. 그러나 후리에어이상 분포는 공간적으로 부족한 탄성과 자료에 의해서 얻어진 지층 구조도에서 볼 수 있는 것보다 훨씬 연속적이고 광범위한 퇴적 및 기반구조의 변화 양상을 보여준다. 후리에어이상 분포에 의하면 울릉분지 서쪽 가장자리에 나타나는 두꺼운 퇴적층을 갖는 함몰대는 탄성과 자료에서 보여주는 것과 같이 국지적이지 않고 북쪽의 한국대지 남단에서부터 울릉분지의 남단까지 연속적으로 발달하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 탄성과 자료가 울릉분지를 공간적으로 충분히 메울 만큼 충분치 않은 데에도 원인이 있지만 탄성과가 퇴적층내 협재되어 있는 volcanic sills이나 flow에 의해서 차단되어 기반암까지 투과하지 못한 데(Lec *et al.*, 1999)도 원인이 있다. 한편 울릉분지의 중앙부에서 unit III와 음향기반구조는 울릉분지의

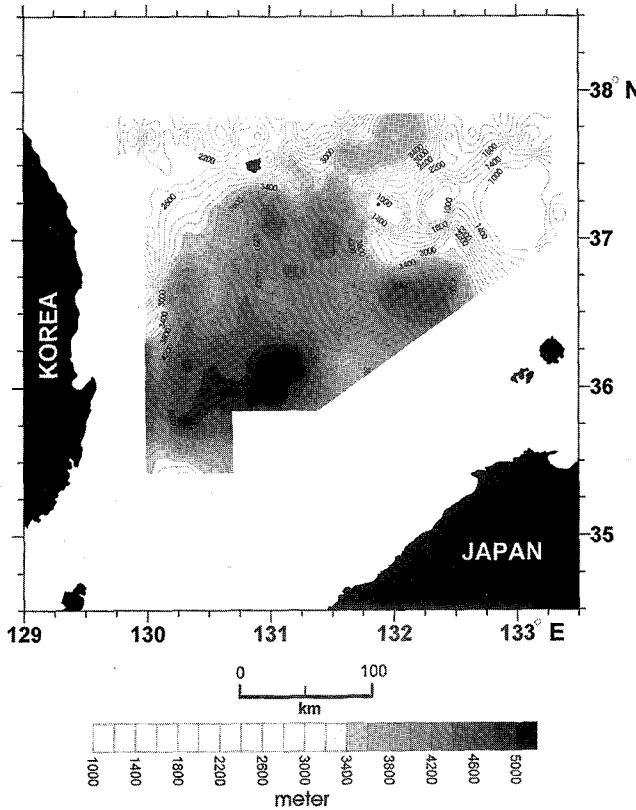


Fig. 13. The contour map of depth to the bottom of Unit III. Contour interval is 200 m.

남동단이 깊고, 중앙부가 부분적으로 높아지다가, 울릉도-독도 근처인 북동단에서 지역적으로 약간 깊어지는 형태에서 전체적인 분포 경향이 유사하다. 이에 반해 울릉분지 중앙부에서의 후리에어이상 분포는 전반적으로 이와 같은 구조와 다르게 나타난다. 남서단의 함몰대는 낮은 중력이상과 대체로 잘 일치한다. 그러나 울릉분지 중앙부 및 그 북동부에서 나타나는 고후리에어이상대는 음향기반이 지역적으로 깊은 것과 배치된다. 이와 같은 고훈력 이상은 기반 하부 심부 지각 구조나 지각의 밀도 변화가 존재함을 시사하는 것이다. 박 등(1996)이 해저지진계 자료와 반사법 탄성과 단면으로부터 얻은 탄성과 속도와 압축밀도간의 상관관계로부터 지층의 밀도를 산출하여 중력모델링을 실시한 결과에 따르면, 퇴적 기반암층의 밀도는 대륙쪽에서 2.58 g/cm^3 , 중앙부에서 2.63 g/cm^3 으로서 대륙쪽에서 분지 내부로 증가하고 있다. 밀도가 2.6 g/cm^3 에서 2.9 g/cm^3 까지의 범위내 있는 하부지각 역시 대륙쪽에서 분지 중앙부쪽으로 밀도의 횡적인 증가 경향을 나타내고 있는 데 이는 대륙지각이 분지쪽으로 가면서 그 물리적 특성이 변화함을 지시한다. 이러한 전이지각의 특징은 분지의 주변부를 따라서 분포하는 저중력이상대에 의해서도 나타난다. 한편 지각과 상부의 퇴적층을 합한 두께는 대륙쪽인 분지 남서쪽으로 27 km 이상 두껍고 분지 중앙쪽으로 13 km까지 급격히 얇아짐으로써 분지쪽에서의 뚜렷한 지각 박층화를 나타내는 것으로 밝혀졌다(박 등, 1996). 울릉분지의 후리에어이상 분포는 퇴적층 및 음향기반 구조가 북동-남서 방향으로 평행하게 긴 저지

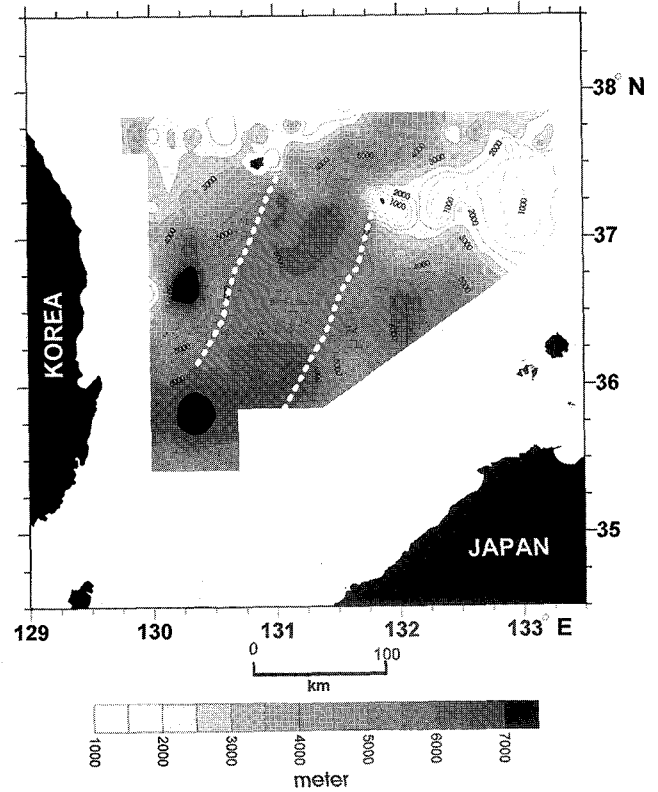


Fig. 14. The isobase map. Contour interval is 200 m. Thick dashed lines show boundaries of the central deep acoustic basement.

대를 형성하는 것과 다르게 북동단의 고이상대 분포가 넓고 남서단 쪽으로 고이상대가 좁아지는 분포로 나타나고 있다. 이것은 울릉분지내 박층의 고밀도 지각이 울릉분지 중앙부 전체에 존재하는 것이 아니라 분지 중앙부에서 나타나는 고훈력분포 범위와 같이 보다 좁고 제한된 지역에 한정되어 있다는 것을 지시한다. 이것은 해양지각의 존재 범위와 관련되며 서 등(1993)에서 제시한 마름모꼴 형태의 것과는 차이가 있다.

울릉분지에서의 자기이상 분포는 중력이상분포에 비해서 더욱 복잡한 양상을 나타낸다. 울릉분지의 자기이상은 한국대지, 울릉도, 독도, 울릉해산, 한국동해연안 등 해산이나 화산, 기반암 돌출에 의해서 해저지형이 뚜렷이 형성된 곳을 제외하면 전반적으로 해저지형과 대비하기 어려운 분포를 가지고 있다(Fig. 5). 이와 같은 자기이상 분포 특성은 두꺼운 퇴적층과 함께 관입 혹은 분출되어 존재하고 있는 화성암체와 관련지어 설명되어야 한다. 울릉분지의 자기이상은 분포 특성상 250 nT에서 -80 nT까지 완만하고 점진적 변화를 갖는 한국동남부 연안에서 남서일본의 북서연안 지역, 기반암의 돌출과 제3기 퇴적분지의 발달로 음-양 자기이상이 남-북 방향으로 배열되어 나타나고 있는 한국동해연안 지역, 30-50 km 파장과 30-100 nT의 저진폭을 가지면서 체계적이지 않은 분포형태를 보이는 울릉분지 중앙부 및 이들의 양쪽 경계를 이루고 있는 일련의 북동-남서 방향의 쌍극자기이상 분포대, 북동-남서 혹은 북북동-남남서 방향의 쌍극자기이상이 배열되어 나타나는 울릉대지 및 한국대지 지역, 단파장으로 변화가 복잡한 오키뱅크 및 일본 북서 연안 지역 등 5개 지역으로

구분된다.

자기이상의 analytic signal 분포에는 울릉분지의 곳곳에 화산암의 존재에 기인하는 선상 이상대 및 산발적인 원형의 독립 이상대가 잘 나타나고 있으며(Fig. 6), 그 분포 특성상 화산활동은 울릉분지를 둘러싼 외곽 지역 및 한반도 동해 연안과 일본 열도 연안에서 보다 활발하였다는 것을 지시한다. Analytic signal 분포에서 구룡포 근해를 포함하는 한반도 남동 해역의 북동-남서 방향성을 가진 선상 이상대는 울릉분지의 확장 초기에 구조선을 따라 일어난 화산활동의 결과로 형성된 염기성 관입암 혹은 분출암의 존재를 반영한다. 울릉분지 중앙부의 북서 및 남동쪽에서 나타나는 원형 자기이상들의 집단적인 선상 배열은 울릉분지의 확장시 분지의 경계부에서 일어난 지각의 균열을 따라 형성된 화산분출암 혹은 관입암들에 기인한다. 분지의 남단에서 울릉분지의 중앙부에서는 소수의 화성 관입체가 산발적으로 나타나고 있는 반면, 울릉분지의 북서와 남동 경계의 외곽에서는 다수의 화성 관입체가 집단적으로 선상 배열되어 나타나고 있다. 이것은 분지 중앙부와 그 외곽 지역의 지각 특성이나 진화 단계가 다르다는 것을 지시하는 것으로서 울릉분지 외곽에서 나타나는 집단적인 화산체 분포는 동해확장시 대륙지각이 열개되면서 형성된 구조선들과 관련되어 있는 반면에, 울릉분지의 중앙부는 지각의 탄성과 속도 구조에서도 제시된 바와 같이 해양지각의 특성을 나타낸다. 울릉분지내에 해양지각이 존재할 것이라는 주장은 탄성파속도분포(Kim et al., 1994, 1999; Lee et al., 1999), 중력이상분포의 정성적 해석(서 등, 1993), 중력 및 탄성과 속도 구조에 근거한 지각구조 모델링(박 등, 1996), 탄성과 단면의 해석(Lee et al., 1999) 등에서 제기된 바 있다. 그러나 기존 연구에서의 주장은 주로 축선에 한정되어 있어서 전체 분포를 보여주지 못하거나 추론적인 결과에 의존한 것이었다.

탄성파에 의해서 얻어진 음향기반은 울릉분지 중앙 북동에서 분지 경계로 보이는 일련의 화산암체들과 거의 비슷한 경계를 보이는 반면 남서쪽에서는 일치하지 않는다. 이것은 퇴적층이 두꺼운 울릉분지 남서부에서는 기반암까지 도달할 정도로 충분히 투과되지 않았음을 지시한다. 즉, 자기이상 및 analytic signal에서 보여주는 울릉분지 중앙부 양쪽의 선상분포는 울릉분지의 확장과 관련되어 형성된 화산암체의 배열에 기인한 것으로서, 울릉분지의 지각특성 경계를 시사한다. 이 경계의 안쪽은 탄성과 속도 분포나 지각의 두께에서 그 외곽과 구분된다. 분지내부 지각층내 약 1 km 구간에서 속도가 5.7 km/s에서 6.3 km/s로 증가하는 현상은 층단위 2C의 존재를 시사하는 것이며, 이는 해양지각의 존재 가능성을 보여준다(김, 1999). 분지의 지각은 주변부쪽으로 27 km 이상 두꺼운 반면에 중앙쪽으로 13 km까지 얇아져서 분지쪽으로의 뚜렷한 지각 박층화를 나타낸다(박 등, 1996). 분지내 한 조의 선상자기이상 중에 남쪽의 경계를 이루는 것은 북동-남서 방향으로 이어지다가 131°45' E 부근에서 서남서-동북동 방향으로 급하게 휘어진다. 이것은 울릉분지내 해양지각이 남서부에서 좁고 북동쪽으로 가면서 120 km까지 넓어지는 한정된 지역에만 분포한다는 것과 필리핀판 등 해양지각판이 일본열도에 충돌할 때 받은 압축력의 영향으로 울릉분지가 변형되었다는 것을 지시한다.

결 론

울릉분지의 탄성과, 중력 및 자력자료를 이용하여 지층구조 및 지각형성과 관련된 구조적 특성을 논의한 결과는 다음과 같다. 탄성과 자료로부터 얻은 울릉분지내 퇴적층은 중앙부에서 3000-4000 m, 국부적으로는 6000 m까지의 두께를 나타내기도 하며 북동에서 남서쪽으로 분포가 넓고 두꺼워지는 양상을 보인다. 음향기반은 울릉분지 중앙부에서 약 4000 m 정도의 깊이를 보이지만 남서단 및 서쪽 주변부에서 최대 7500 m까지 깊어진다. 중력 및 자력이상 분포는 자료가 제한적이고 두꺼운 퇴적층 및 화산암체에 의한 투과관계를 갖는 탄성과 자료 보다 심부구조의 경향을 잘 나타낸다. 울릉분지 서쪽 및 남쪽 가장자리의 저중력분포는 두꺼운 퇴적층을 갖는 기반암물대 및 대륙-해양간 전이지각의 존재를 반영하며, 특히 기반암물대는 탄성과 자료에 근거한 것과 같이 국지적이지 않고 북쪽의 한국대지 남단에서부터 울릉분지의 남단까지 주변부를 따라 연속적으로 발달하고 있다. 탄성과 자료에서 얻은 분지내부 기반구조는 해저지형분포나 천부 지층구조에서 나타나는 것에 비해서 좁고 긴 저지대를 형성하고 있으며 이 저지대는 분지 중앙부의 고중력이상대 분포지역과 거의 같다. 깊은 수심과 기반암 심도에도 불구하고 분지 중앙부에서 나타나는 고중력이상 분포는 울릉분지 지각의 상대적 고밀도와 맨틀의 천부 존재를 지시하는 것으로 해양지각의 존재를 시사한다. 분지 중앙부의 고중력 분포 및 깊은 기반지역 외곽 경계에서의 자기이상과 analytic signal 선상분포는 지각의 열곡대를 따라 형성된 일련의 화산암체 존재를 지시한다. 해양지각은 이 경계 안쪽에 분포하고 있는 것으로 보이는 데 그 분포범위는 남서단에서 좁고 북동부쪽으로 그 폭이 120 km 까지 넓어지는 제한된 지역이다. 지각의 남쪽 경계가 휘어져 있는 것은 필리핀판이 일본열도와 충돌할 때 울릉분지의 남쪽 지괴를 압축함으로써 변형된 것으로 해석된다.

사 사

본 연구에서는 한국해양연구소, 일본치바대학 및 한국석유공사의 자료가 사용되었으며, 자료활용에 기여하신 관계자 및 조사선 승조원 여러분께 감사드립니다. 인공위성중력자료 처리시 협조하여 주신 세종대학 김정우 교수와 자력자료 처리에 도움을 주신 캐나다 대서양 지질조사소 Verhoef 박사께도 심심한 감사를 드립니다. 자료처리 및 그림 작성시 도움을 주신 김창환 연구원께도 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구소에서 수행한 연구과제(PSPN 00213-625-5, BSPK 00020-951-5, BSPE 97605-00-1037-5)와 관련 있음을 밝혀둡니다.

참고문헌

- 김한준, 1999. 탐성과 탐사를 통해 본 울릉분지의 지각특성과 동해형성에 있어서의 의미. 지구물리, 2: 9-26.
- 박찬홍, 김한준, 양철수, 석봉출, N. Isezaki, 1996. 중력 및 해저면지진계탐사 자료에 의한 울릉분지의 지각구조 연구. 지질학회지, 32: 276-290.

- 박찬홍, 김정우, 허 식, 원중선, 석봉출, 유해수, 1999. 울릉분지에
서의 선상중력과 위성중력 통합에 의한 중력 해상도 향상 및
해석. *지구물리*, **32**: 27-38.
- 서만철, 이광훈, 손호웅, 1998. 동해울릉분지의 지구조 및 성인에
관한 지구물리화학적 연구. *한국해양학회지*, **3**: 34-44.
- 서만철, 이미경, 석봉출, 1993. 해상중력을 이용한 울릉분지의 지
질구조연구. *지질학회지*, **29**: 119-127.
- 석봉출, 김한준, 박찬홍, 박맹현, G. I. Anosov, 1993. 동해지역
국제공동 해양연구 (한국-러시아 공동연구). *한국해양연구소 보
고서*, BSPN 00213-625-5, 280 pp.
- 한상준 외, 1996. 한국 대수심 해석의 지구적 해저환경 연구. *한
국해양연구소 보고서*, BSPN 00321-950-5, 548 pp.
- 한상준 외, 1997. 동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화연구. *한
국해양연구소 보고서*, BSPE97605-00-1037-5, 657 pp.
- Atchuta, R.D., Babu, H.V.R. and Narayan, P.V.S., 1981. Interpreta-
tion of magnetic anomalies due to dikes: The complex gradient
method. *Geophysics*, **46**: 1572-1578.
- Chough, S.K. and K.E. Lee, 1992. Multi-stage volcanism in the Ulleung
back-arc Basin, East Sea (Sea of Japan). *Island Arc*, **1**: 32-39.
- Kim, H.J., C.H. Park, J.K. Hong and H.T. Jou, 1994. A seismic
experiment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwestern
Japan Sea (East Sea of Korea). *Geophys. Res. Lett.*, **21**: 1975-1978.
- Kim, H.J., S.J. Han, G.H. Lee and S. Huh, 1999. Seismic study of the
Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the
East Sea (Japan Sea). *Mar. Geophys. Res.*, **20**: 219-237.
- Lee, K.E., 1992. Geological structure of Ulleng back-arc basin, East
Sea. M. S. Thesis, Seoul National Univ., Seoul, 121pp.
- Lee, G.H., H.J. Kim, M.C. Suh and J.K. Hong, 1999. Crustal struc-
ture, volcanism, and opening mode of the Ulleung Basin, East
Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, **308**: 503-525.
- Ludwig, M.S., S. Murauchi and R.E. Houtz, 1975. Sediments and
structure of the Japan Sea, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**: 651-664.
- MacLeod, I.N., S. Vierra and A.C. Chavaes, 1993. Analytic signal
and reduction to the pole in the interpretation of total magnetic
field data at low magnetic latitudes. in *Proceedings of the Third
International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio
de Janeiro.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional mag-
netic bodies with polygonal cross-section: its properties and use
for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**: 507-517.
- Park, C.H., 1998. Crustal structure and evolution of the Ulleung
Basin in the East Sea of Korea (the Japan Sea) by deep pene-
trating seismic refraction, reflection and potential field data.
Ph.D. Thesis, Chiba Univ., Chiba, Japan, 245 pp.
- Roest, W.R., J. Verhoef and M. Pillington, 1992. Magnetic interpre-
tation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, **57**: 116-125.
- Sandwell, D.T. and W.H.F. Smith, 1997. Marine gravity anomalies
from Geosat and ERS-1 satellite altimetry. *J. Geophys. Res.*, **102**:
10,039-10,054.
- Smith, W.H.F. and D.T. Sandwell, 1995. Marine gravity field from
declassified Geosat and ERS-1 altimetry, EOS Trans., Amer.
Geophys. Un. 76, G42A-2.
- Tamaki, K., F. Murakami, K. Nishimura and E. Honza, 1979. Con-
tinuous seismic reflection profiling survey. In *Geological Inves-
tigation of the Japan Sea*, edited by E. Honza, Geol. Surv. Japan
Cruise Rept., **13**: 48-51.
- Verhoef, J., B.J. Collette, J.J. Danobeitia, H.A. Roeser and W.R.
Roest, 1991. Magnetic anomalies off West-Africa (20-38N). *Mar.
Geophys. Res.*, **13**: 81-103.

1999년 11월 17일 원고 접수

2000년 1월 26일 수정본 채택

담당편집위원: 김대철