Article

남부 필리핀해 Ayu Trough에서의 지형과 선상지구물리 관측:
지각 확장과 구조 고찰

정미숙* · 이상목

한국해양연구원 해양자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29Bathymetry and Marine Geophysical Observations of the Ayu Trough,
Southern Philippine Sea: Implications for Crustal Extension and Structure

Mee-Sook Jung* and Sang-Mook Lee

Marine Resources Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The Ayu Trough, located in the southern end of the Philippine Sea, represents a divergent boundary between the Philippine Sea and the Caroline plates. A detailed geophysical survey was carried out in the Ayu Trough by R/V *Onnuri*. Topographically, the Ayu Trough resembles an slow spreading ridge. The trough can be divided into three sections: the south (0° - $1^{\circ}30'N$), middle ($1^{\circ}30'$ - $4^{\circ}N$), and north (4° - $6^{\circ}30'N$). The seafloor in the middle section is characterized by features asymmetric with respect to the axis. These features were probably produced by NW-SE and NNW-SSE extensions and seem to support the argument that the opening of the Ayu Trough occurred in an oblique fashion. Farther south, a long transform fault but with a short offset defines the boundary between middle and southern sections. The axial depth increases a stepwise to the south of $1^{\circ}30'N$. A clear difference can be seen between the southern and middle sections with the latter exhibiting much higher mantle Bouguer anomaly values in the axial region. The anomaly indicates that the axial crust perhaps experienced a much higher degree of extension in the middle than in the southern section. The analyses of magnetic field data reveal that the region beyond 100 km exhibits considerable variations, whereas the magnetic anomalies within 100 km from the trough axis are very much subdued. This observation suggests that the opening of the Ayu Trough involved an initial stage of rifting of existing volcanic arcs, followed by production of new seafloor.

Key words : 확장속도가 느린 해령(slow-spreading ridge), 자기 적도(magnetic equator), oblique fashion.

1. 서 론

필리핀해 판(Philippine Sea plate)의 경계는 대부분 섭입대(subduction zone)와 해구(trench)로 구성되어 있다. Fig. 1은 필리핀해 주변에 나타나 있는 주요 지형 및 지각 구조를 나타낸 것이다. 필리핀해 판의 경계지역은 북으로

는 Nankai Trough, Ryukyu 해구가 자리잡고 있고, 서쪽으로는 마닐라 해구와 필리핀 해구가 위치해 있다. 동쪽으로는 Izu Bonin 해구, 마리아나 해구, 그리고 그 아래로 압해구와 팔라우 해구가 위치해 있다. 이번 연구가 수행된 Ayu Trough는 팔라우 해구 아래 약 $6^{\circ}30'N$ 부터 적도 부근까지 아래로 향해 부채꼴 모양으로 펼쳐져 있다.

필리핀 해양판은 지구조 역사면에서 볼 때 비교적 최근에 해당되는 약 5~6천만년을 전후해 형성된 것으로 추측

*Corresponding author. E-mail : msjung@kordi.re.kr

Fig. 1. Major seafloor and tectonic features of the Philippine Sea plate from Hall *et al.* (1995). The magnetic anomalies are shown with lines and corresponding anomaly numbers next to them. They are from various sources, including Hilde and Lee (1984), Chamot-Rooke *et al.* (1987), and Weissel and Anderson (1978). Solid squares represent sites that were drilled by DSDP and ODP.

된다(Hall *et al.* 1995). 필리핀 해양판 운동을 복원하는데 있어 가장 중요한 자료는 해양지각에 대한 지자기 탐사자료와 고지자기 자료이며, 특히 많은 고지자기 자료가 Deep Sea Drilling Project(DSDP)와 Ocean Drilling Program(ODP)에 의해 제공되었다. 필리핀 판의 움직임을 유추해보기 위한 목적으로 필리핀 판 상에 있는 여러 섬들에 대한 육상 지자기 연구가 수행되었다(Hirooka *et al.* 1985; Haston and Fuller 1991; Hall *et al.* 1995; Ali and Hall 1995). 그러나 이들 섬들이 시간적으로 일정한 간격을 두고 형성된 것이 아니며, 또 판 경계부분에 있어 그 자체가 지각 변동을 받았을 가능성이 크기 때문에 필리핀 판의 전반적인 움직임을 규명하는데는 한계가 있다.

필리핀해 판은 현재 West Philippine, Parece Vela, 그리고 Shokoku 분지등 3개의 비활성 후열도 분지(backarc basin)와 활성인 Mariana Trough로 이루어져 있으며 판의 형성은 이 분지들이 차례로 열리면서 이루어진 것으로 추정되고 있다. 필리핀해 판은 서쪽으로 유라시아 대륙판 및

Fig. 2. Multibeam bathymetric data of the Ayu Trough collected during our Daeyang cruise in 2000 and 2001 using SeaBeam 2000 aboard R/V *Onnuri*. The data are combined with classic SeaBeam data obtained by ORI, University of Tokyo onboard R/V *Hakuho-maru* in 1992 to the north of 3°25'N. A sharp break in the trend of trough axis occurs at 4°N, and the trough axis becomes suddenly shallow to the south of 1°30'N. The bathymetry of the off-axis general strike in the NNW-SSE direction, suggesting that this trough has been spreading obliquely. The black dashed lines are the axis of Ayu Trough. The red lines indicate the transform fault.

South China Sea 판 아래로 섭입하고 있고 동쪽으로는 태평양 판이 필리핀해 판 아래로 섭입하고 있다. 필리핀해 판 동남쪽으로는 캐롤라인 해양판이 자리잡고 있다. 캐롤라인 판은 현재 필리핀해 판을 기준으로 하였을 때 팔라우 섬 북쪽으로 팔라우 해구와 압 해구에 해당되는 부분에서는 섭입 내지 충돌이 일어나고 있고, 팔라우 섬 이남 Ayu Trough 부근에서는 해저 확장이 일어나는 것으로 추정되고 있다. Seno *et al.*(1993)은 현재 필리핀해 판과 캐롤라인 판간의 상대운동은 0.7 deg/my의 각 속도를 보이며, 판의 Euler Pole(회전축)은 6.24°N과 134.09°E에 위치한다고 주장하였다. 이러한 필리핀해 판의 운동이 지금까지는 정설로 받아들여지고 있지만 여기에는 몇 가지 문제점이 있다. NUVEL-1A 모델은 판과 판간의 상대운동을

Fig. 3. Composite bathymetric map produced by combining multibeam bathymetric data in Fig. 2 with satellite-derived seafloor topographic data where there is no multibeam bathymetric information. The white lines are tracklines of our survey in 2000 and 2001. The red lines indicate the location of gravity profiles shown in Fig. 5. The star symbols at the top represent Euler pole, the pole of rotation, between the Philippine Sea and Caroline plates as determined by Weissel and Anderson(1978), and Seno *et al.*(1993). The yellow dashed lines indicate the axis of Ayu Trough.

주로 중앙해령에서 나타난 지자기 이상대를 기본 자료로 이용하였지만, 필리핀해 판 주변에는 중앙해령이 없는 관계로 Seno *et al.*(1993)은 지진 자료를 통해 구한 slip vector를 기초로 하고 있는데 이는 비교적 큰 오차를 갖고 있다. 그 뿐 아니라 필리핀해 판과 캐롤라인 판의 상대운동을 정하는데 있어 실제 지진관측 자료가 아닌 이 단순히 전반적인 지형을 보고 추정한 것에 근거를 두고 있다. Weissel and Anderson(1978)은 DSDP site 62에서 유도된 퇴적물과 탄성파 탐사를 통해 관측된 퇴적층의 두께를 근거로 하여 mid-Miocene 시기에 Ayu Trough의 열림이 시작되었고, 약 6백만년 전부터 확장이 멈추었거나 그 속도

가 느려졌다고 주장하였다. 하지만 이들은 단순히 Ayu Trough가 전반적으로 삼각형 모양으로 생긴 것을 보고 팔라우 섬 부근에 Euler Pole이 존재할 것(Fig. 3)이라고 추측했기 때문에 정확한 것은 아니다.

Ayu Trough는 필리핀 해 남부 팔라우 섬과 인도네시아 사이에 위치한 지역으로 판구조론적으로 볼 때 필리핀해 판과 캐롤라인 판(Caroline Plate)의 남쪽 경계에 위치해 있다. Ayu Trough는 필리핀해 판에서 유일하게 섭입없이 확장하는 지역이다. 판의 상대적인 운동을 정확히 규명하기 위해서 흔히 사용하는 방법 중에 하나가 판과 판이 벌어지는 중앙해령을 중심으로 양쪽에 대칭적으로 나타나는 지자기 이상대를 밝히는 것인데 필리핀해 판의 경우 Ayu Trough를 제외한 대부분이 해구로 둘러싸여 있어 주변 판과의 움직임을 밝힐 수 있는 지자기 자료가 없다. 1978년 미국 조사선 R/V *Vema*가 Ayu Trough와 Sorol Trough에 대해 몇 개의 측선 조사와 암석 시료 채취를 했을 뿐 특별한 정밀조사가 진행되지 않았다. 암석 시료 분석 결과 Ayu Trough가 일반 중앙해령과 비슷한 암석상을 가졌다는 결론(Fornari *et al.* 1979)과 함께 축을 따라 멀어지면서 퇴적물이 두껍게 쌓여 있어 확장하는 지역이라는 결론을 얻었을 뿐 1980년대 이후에 광범위한 조사가 뒤따르지 않았다. Ayu Trough에 대한 최초의 지구물리 탐사는 1992년 일본 동경대 해양연구소가 조사선 R/V *Hakuho-mar*을 이용해 6°30'N과 3°30'N 사이 지역에 대해 다중빔 음향 탐사, 중력, 자력 및 탄성파 탐사와 함께 지열과 암석 시료를 채취한 것이다. 그러나 당시 탐사는 Ayu Trough 전반에 대한 조사를 수행하지 않고 북쪽에만 국한되었으며, 축을 중심으로 나타나는 지형 및 지각구조에 관심을 두고 조사되었다(Fujiwara *et al.* 1995). 또한, 다중빔 탐사는 측선간 간격이 넓어 정확한 지형에 대한 규명을 하는데는 제약이 있었다.

이번 연구에서는 남북으로 연장되어 있는 Ayu Trough의 해저 확장축을 중심으로 3°30'N과 적도 사이 지역에서 획득한 다중빔 정밀 해저 지형 자료, 해상 중력 및 층성분 지자기 자료를 이용하여 Ayu Trough의 보다 정밀한 지형 및 지각구조를 제시하고자 한다.

2. 자료획득 및 처리

2000년과 2001년 5월에 지구물리 종합 탐사선 온누리호를 이용하여 다중빔 지형 자료, 해상 중력, 층 성분 지자기 자료를 획득하였다. 탐사 기간동안 적도와 3°25'N 사이의 Ayu Trough 지역을 조사하였으며 확장축을 중심으로 약 300 km 폭의 지역을 포함하고 있다. 조사측선은 Ayu Trough 축의 주향에 수직인 E-W 방향으로 설정되었고, 측선간격은 대략 12.75 km이다.

지형자료

지형자료는 다중빔 음향측심기 SeaBeam 2000과 Sea-Logger 시스템을 이용하여 획득되었다. 수층 음속보정은 XBT(expendable bathothermograph)와 수층별 수온 염분 산소 측정기(CTD)를 운영하여 획득된 음속 자료를 이용하였다. 획득된 수심자료는 GMT(Generic Mapping Tools, Wessel and Smith 2000)를 응용한 MB-system(Caress and Chayes 2001)을 이용하여 자료처리 되었다. 자료편집 과정은 모든 ping 자료를 beam별 수심으로 도시하여 주변자료와 비교하여 수행되었다. 탐사기간 동안 SeaBeam을 이용하여 획득한 수심자료와 1992년 일본 동경대에서 획득한 수심자료를 결합하여 해저 지형도를 작성하였다(Fig. 2). 또한 ETOPO5 지형자료를 결합하여 Palau 섬 이남의 지형도를 완성하였다(Fig. 3).

중력자료

중력자료는 LaCoste-Romberg 선상중력계(Model S)를 이용하여 획득되었으며, 이때 항해자료인 선위, 항진방위, 선속 등을 동시에 기록하였다. LaCoste-Romberg 선상중력계는 항진 중에 연속적으로 중력을 측정할 수 있도록 설계되어 있고, 정밀도가 0.01 mgal로 매우 높다(한국해양연구소 1993). 중력계의 측정 범위는 0~120,000 mgal이며 측정오차는 ± 0.25 mgal이다. 획득된 중력자료는 중력값이 관측된 시간과 위치자료의 시간을 비교하여, 중력값과 선위, 항진방위, 선속 등을 하나의 자료로 결합한다. 이때 위치자료는 GPS 수신기로부터 WGS84 위치체계를 기준으로 획득된 위,경도 자료이다. 결합한 자료에 대해 위도 보정, Eotvos 보정을 통해 Free-air 중력 이상도를 작성하였다(Fig. 4a). Bouguer 보정값은 지각과 맨틀의 밀도가 각각 2.7과 3.3 g/cm^3 이며, 지각의 두께가 6 km로 일정하다고 가정하여 구하였다. Bouguer 보정을 위해 Parker (1972)가 제시한 Fourier Domain에서 지형자료의 Taylor Expansion을 이용한 방법을 사용하였으며, 이 방법은 수치적으로 계산이 매우 빠르며 안정화된 방법이다.

자력자료

지자기 탐사는 지자기장의 총성분을 측정하는 proton precision 자력계를 이용하였다. 이 자력계는 미국 Geometrics사의 G-886 모델로 배에서 200 m 정도 떨어진 해상에서 견인하며 측정하는 장비이다. 일초 간격으로 측정된 자력은 MagSea 프로그램을 이용하여 인공위성 DGPS 위치 정보와 함께 PC에 저장하였다. 일초 간격으로 측정된 지자기 자료는 신호 대 잡음비가 낮거나 나쁜 점들을 제거한 다음 일분 간격으로 평균을 내어 사용하였다.

자기 적도 주변 지역은 전리권의 변동으로 인해 잡음이

Fig. 4. (a) Free-air gravity and (b) mantle Bouguer anomaly maps of the region. Off-axis flanking areas, which have high topography, appear as regions of low mantle Bouguer anomaly. The asymmetric structure in topography due to oblique spreading is also evident in the mantle Bouguer anomaly. Along the axis, the mantle Bouguer gravity anomaly makes a sharp drop to the south of $1^{\circ}30'N$. The yellow dashed lines indicate the axis of Ayu Trough.

많이 발생하기 때문에 적절한 보정을 하여야 한다. 이 연구에서는 조사지역에서 가장 가까이 있는 육상지자기관측소(USGS에서 운영하고 있는 Guam station)에서 관측된 자기장 변화를 이용하였다. Fig. 6은 이 station에서 관측된 자기장의 일변화를 도시한 것으로 최고치와 최저치의 차이가 약 120 nT 정도로 나타난다. 일변화 보정은 Guam station에서 관측된 자기장 변화를 획득된 자료에서 제거함으로써 이루어졌으며, 2000년도 International Geomagnetic Reference Field(IGRF) 값을 빼줌으로써 지자기 이상치를 획득하였다.

3. 결과 및 토론

지형

Fig. 2는 2000년과 2001년 대양 탐사를 통해 획득된 다중빔 수심 자료와 1992년 일본 동경대에서 획득한 Sea-Beam 자료를 결합하여 작성한 해저 지형도이다. Trough

Fig. 5. Plots showing bathymetry(black) and mantle Bouguer gravity anomaly(gray) along profiles. The locations of the profiles are shown as red lines in Fig. 3. Profiles (a), (b) are taken in the E-W direction and profile (c) along the bathymetric axis. Note that in these figures bathymetry is plotted positive downward. In general there is substantial correlation between the topography and mantle Bouguer anomalies. Profile along the axis shows that the mantle Bouguer anomalies decrease largely to the south of 1°30'N associated with change in the axial depth at this location.

의 축은 1°30'N을 경계로 북쪽에서 5~6 km의 수심으로 뚜렷하게 나타나지만 1°30'N 이남에서는 축의 수심이 갑자기 낮아지면서 희미해진다. 축을 중심으로 나타나는 많은 해저 지형들이 축에 대해 대칭적이라기보다 NNW-SSE 방향으로 배열되어 있다. 이는 Ayu Trough가 이전의 모델에서 제안되었던 선상 모양(fan shaped)으로 확장하는 것이 아니라 축에 대해 비스듬하게 확장하고 있음을 보여준다.

Fig. 3은 위의 Fig. 2의 수심자료와 다중빔 자료가 없는 지역은 ETOPO5 자료를 채워 작성한 해저 지형도이다. 흰색 선은 2000, 2001년의 탐사 축선을 나타내며, 붉은 색 선은 Fig. 5에 제시된 중력 축선의 위치를 표시한 것이다. 별 표시는 Weissel and Anderson(1978)과 Seno *et al.* (1993)이 제시한 필리핀 판과 캐롤라인 판 사이의 회전축(Euler pole)을 나타낸 것이다. Fig. 3에 의해 Ayu Trough를 지형적인 특성을 기준으로 북부(6°30'~4°N, I), 중부(4°~1°30'N, II), 남부(1°30'~0°N, III) 세 구역으로 나눌 수 있다. 북부 지역의 축 주변은 지형이 높으며, 지형 특성상 마그마 활동이 세 구역 중 가장 활발했던 것으로 추측된다. Trough 축의 주향은 4°N을 기준으로 남쪽에서 N-S 방향으로, 북쪽에서는 NNE-SSW 방향으로 바뀐다. 중부 지역에서의 trough 축은 수심 5,000~6,000 m로 132°40'E와 133°00'E 사이에 나타난다. 축 주변 지역은 수심이 약 2,500~4,000 m로 나타나며, 수심 1,700~2,500 m의 고지대가 존재한다. 또한 25~35 km 간격으로 국부적으로 최대 수심이 나타나는 분지가 형성되어 있으며, 이들 분지는 pull-apart 또는 oblique 변형 작용의 결과로 형성된 것으로 해석된다. 중부 지역과 남부 지역사이에 변환단층이 나타나며, 이 변환단층은 축을 중심으로 양쪽을 모두 지나가지만 변위(displacement)는 매우 작은 것으로 관찰된다. 1°30'N 이남에서는 Fig. 2에서 확인한 바와 같이 축의 수심이 갑자기 낮아지며 축이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 중부 지역에 나타나는 많은 해저 지형들이 축을 중심으로 좌우의 지역이 비스듬하게 대칭성의 경향을 나타내며, 이러한 현상은 축을 중심으로 약 100 km 이내의 지역에서만 나타난다. 축으로부터 100 km 떨어져 있는 지역에서는 이전의 연구에서 확인한 Ayu Trough의 전체적인 모양인 부채꼴의 양면에 해당되는 커다란 구조선이 나타나는 것을 볼 수 있다.

중력

Free-air 이상은 일반적으로 해저면의 지형적인 변화와 유사하다. Free-air 이상도인 Fig. 4a에서 나타난 결과는 trough의 축을 따라 낮은 중력 이상값을 나타낸다. 확장축 양쪽 주변 지역과 지형적 고지대가 나타나는 곳에서는 축에 비해 200 mgal 정도의 높은 중력 이상값이 나타난다.

Fig. 6. Land-based magnetic records from Guam station in the Pacific Ocean.

이런 중력 이상 분포는 확장축을 따라 나타나는 수심 5,000 m가 넘는 깊은 계곡과 그 양쪽에 나타나는 높은 지형과 잘 대응된다. $1^{\circ}30'N$ 에서 관찰된 변환단층에서는 낮은 Free-air 이상값이 관찰된다. $1^{\circ}30'N$ 이남에서는 축이 선명하게 보이지 않으며, 축의 수심이 얕아진다.

Fig. 4b는 Bouguer 중력 이상을 나타낸 것이다. Fujiwara *et al.* (1995)에 의하면, 퇴적층의 두께는 축에서 멀어질수록 두꺼워지며, 그 범위는 약 50~500 m로 추정되었다. 따라서 퇴적층의 두께는 전체적인 구조 해석에 있어서 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각되어 이번 연구에서는 퇴적층의 두께는 고려하지 않았다. Bouguer 중력 이상은 주로 지각 두께를 나타내는 Moho 불연속면의 깊이 변화에 영향을 받는다(Blakely 1996). Bouguer 중력 이상도(Fig. 4b)에서 Ayu Trough의 축을 따라 양의 Bouguer 이상값이 나타난다. 이는 Moho 불연속면이 주변 지역에 비해 솟아 있기 때문인 것으로 여겨진다. 즉 축을 따라 나타나는 지각의 두께는 주변 지역에 비해 상대적으로 얇다는 것을 알 수 있다. 지형자료에서 나타난 것과 같이, $1^{\circ}30'N$ 이남에서 Bouguer 이상값이 갑자기 낮아진다. 또한 축 주변 지역과 지형적 고지대가 있는 곳에서는 Bouguer 이상값이 낮게 나타난다(Figs. 3 and 5). Fig. 3의 축선 DY00-09, DY01-07은 E-W 방향이며, 축선 DY00-03 & DY01-19는 trough의 축을 따라 도시한 것이다. Fig. 5에서 회색 선은 Bouguer 중력 이상값을, 검은 색 선은 수심을 나타낸다. 이 연구에서는 지형과 Bouguer 중력 이상값은 상당한 상관관계를 보인다. 축선 DY00-03 & DY01-19로부터, trough의 수심이 변하는 $1^{\circ}30'N$ 위치에서 Bouguer 중력 이상값이 갑자기 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는 중부와 남부 지역 사이의 변환단층이 표면에서만 나타

난 현상이 아니라 지각 깊이까지 구조적인 변화가 있음을 의미한다.

지금까지 연구 결과에 의하면 확장 속도가 느린 중앙해령일수록 마그마의 공급이 일정하지 않아 지각두께의 변화가 심하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Jones 1990). 이 연구에서 작성된 Bouguer 중력 이상도에 의하면 Ayu Trough 경우 지각의 두께 변화가 심하게 나타나며, 이를 통해 지각의 확장속도가 일정하지 않아 맨틀로부터 공급되는 마그마의 양의 변화가 많았음을 확인할 수 있다.

자력

Fig. 6은 USGS에서 운영하고 있는 Guam station에서 관측된 자기장의 일변화를 도시한 것으로 탐사자력 자료의 일변화 보정에 사용된 자료이다. Fig. 7은 일변화의 보정 전(a)과 보정 후(b) 자력값을 나타낸 자기 이상도이다. 보정 전 자료(Fig. 7a)에서 $3^{\circ}10'N$, $133^{\circ}E \sim 134^{\circ}E$ 에 나타나 있는 자력 이상값들이 보정 후의 자료에서는 나타나지 않았다. 보정 전의 교차점 오차의 표준편차는 50 nT 정도로 나타났으며, 보정 후는 20.6 nT로 대폭 감소하였다.

Ayu Trough가 자기 적도(magnetic equator)상에 놓여 있어 총성분 자기장으로는 판독이 불가능하다(Blakely 1996). 총성분 자기장은 현재 지구 자기장(Earth Field)에 평행한 값들만을 구할 수 있다. 즉 총성분 자력계를 이용할 경우 지구 자기 방향과 수직으로 자기 이상값이 나타나는 경우 총성분은 거의 0에 가까운 값을 나타낸다. Ayu Trough가 바로 이 경우에 해당된다. Ayu Trough가 자기 적도상에서 거의 동서 방향으로 확장이 이루어졌기 때문에 자기 이상대는 남북으로 배열한다고 볼 수 있다. 즉 자

Fig. 7. Magnetic field anomaly map of the study area (a) before the correction of diurnal effect, and (b) after the correction. In this study, we used Guam station's records to derived the diurnal component (Fig. 6). Evidently, there is a significant improvement in the magnetic field anomaly map as a result of diurnal correction with significant drop in crossover error of ship tracks. From (b), the region outside of 100 km from the axis shows high magnetic anomalies but subdue anomalies within 100 km. The yellow dashed lines indicate the axis of Ayu Trough.

기 이상대 경계를 중심으로 양의 이상대와 음의 이상대를 하나의 쌍극자로 본다면, 이 같은 쌍극자가 동서로 놓여져 있다고 볼 수 있으므로 지구 자기장의 남북 방향과 수직을 이루는 셈이다.

Fig. 7b에서 확장축을 중심으로 자기 이상의 변화가 적게 나타나지만, 경도 130°E와 132°E 사이의 지역에서 자

Fig. 8. Schematic model showing the difference in magnetic anomaly expected at the sea surface due to different mode of opening for a mid-ocean ridge spreading E-W located near the magnetic equator. The model explains how difference in the direction of magnetization on the seafloor causes large difference in the observed magnetic field. The spreading is assumed to be occurring almost perpendicular to the Earth field. In this model, the direction of magnetization within the interior region of the Ayu Trough is parallel to the Earth field, whereas in the exterior region it is not. The exterior regions of the Ayu Trough show large anomalies whereas the magnetic anomalies within the interior region are subdued. The high anomalies may represent areas where existing structure that perhaps formed at different magnetic latitude became rifted. On the other hand, the region with low variability may be due to seafloor spreading.

기 이상대가 나타난다. 즉 축을 중심으로 양쪽 약 100 km에 해당되는 구간에서만 자기 이상의 변화가 적게 나타나며, 100 km 이상의 지역에서는 상당히 큰 자기 이상이 나타난다.

Fig. 8은 자기 적도 근처에서 E-W 방향으로 확장하는 중앙해령의 확장단계에 따라 예상되는 자기 이상의 차이를 보여준다. 이 모델은 해저면의 자화 방향의 차이가 어떻게 자기 이상을 발생시키는가를 설명한다. 해저 확장은 지구자기장에 거의 수직으로 발생한다고 가정하였다. 이 모델에서 Ayu Trough의 내부 지역에서의 자화 방향은 지구 자기장에 평행한 반면, 외부 지역은 그렇지 않음을 보여준다. Ayu Trough의 외부 지역은 큰 자기 이상을 나타내는 반면 내부 지역은 자기 이상의 변화가 매우 작다. 고 이상대는 다른 자기 위도에서 형성된 기존의 구조가 갈라졌음을 의미하며, 자기 이상의 변화가 작은 지역은 해저 확장에 의해 생성된 것으로 해석할 수 있다. Ayu Trough의 생성은 기존의 volcanic arc의 초기 rifting 단계 후, 축

을 중심으로 확장이 일어난 것으로 해석된다.

4. 결 론

2000년과 2001년에 탐사선 온누리호를 이용하여 적도와 3°25'N 사이의 Ayu Trough에 대해 종합적인 지구물리 탐사를 실행하였다. 이 연구에서는 다중빔 수심, 중력, 자력 자료를 이용하였다.

1. Ayu Trough의 지형자료로부터 trough는 비스듬하게 저속으로 확장하는 (slow-spreading) 중앙해령의 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. Ayu Trough는 지형적 특성을 기준으로 북부(6°30'-4°N), 중부(4°-1°30'N), 남부(1°30'-0°N) 세 구역으로 나뉜다. 특히 중부 지역과 남부 지역 사이에 변환단층이 나타나 있으며, 1°30'N 이남에서는 축의 수심이 갑자기 얕아진다. 중부 지역의 해저 지형들은 WNW-ESE 방향으로 배열되어 있어 Ayu Trough의 열림이 복잡하고 비스듬한 방향으로 이루어진 것임을 보여준다. 하지만 이러한 현상은 축을 중심으로 약 100 km 이내의 지역에서만 나타난다.

2. 해상 중력 자료 분석으로 Ayu Trough의 맨틀 Bouguer 이상에서 큰 변화가 관찰되었다. 축에서의 맨틀 Bouguer 이상값이 주변 지역에 비해 크게 나타난 것은 지각이 확장축에서 늘어나면서 얕아졌음을 의미한다. 또한 지형도에서 변환단층이 나타난 1°30'N 위치에서 Bouguer 중력 이상값이 갑자기 낮아졌음을 확인할 수 있다. 이를 통해 중부와 남부 지역 사이의 변환단층이 표면에서만 나타난 현상이 아니라 지각 깊이까지 구조적인 변화가 있음을 추측할 수 있다.

3. 자기 이상에서 잡음은 가까운 육상 관측소에서의 일 변화 관측 자료를 이용하여 일변화 보정을 함으로써 제거하였다. 자기 이상도에서 축에서 100 km 내의 지역에서는 자기 변화가 상당히 적은 반면 100 km 이상 떨어진 지역에서는 자기 변화도가 더 크게 나타난다. 이는 Ayu Trough 내부만이 확장과 연관되었음을 의미한다. Ayu Trough의 생성은 기존의 volcanic arc이 갈라지고 지각의 신장(extension)이 발생한 후, 축을 중심으로 해저 확장으로 새로운 지각이 형성된 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원에서 지원한 '서태평양 종합 대양연구' 결과의 일부입니다. 자료 획득과 처리에 도움을 주신 연구원들께 고마움을 표합니다. 아울러 이 논문을 심사하면서 좋은 의견을 많이 주신 한국해양연구원의 진영근 박사님과 한국지질자원연구원의 김진호 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 한국해양연구소. 1993. 온누리호의 L&R 해상 중력계의 이용을 위한 예비연구, 58 p.
- Ali, J.R. and R. Hall. 1995. Evolution of the boundary between the Philippine Sea Plate and Australia: Paleomagnetic evidence from eastern Indonesia. *Tectonophysics*, 251, 251-275.
- Blakely, R.J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*. Cambridge University Press, 128-153.
- Cares, D.W. and D.N. Chayes. 2001. MB-System version 5.0
- Chamot-Rooke, N., V. Renard, and X. Le Pichon. 1987. Magnetic anomalies in the Shikoku Basin: A new interpretation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 214-228.
- Fornari, D.J., J.K. Weissel, M.R. Perfit, and R.N. Anderson. 1979. Petrochemistry of the Sorol and Ayu Troughs: Implications for crustal accretion at the northern and western boundaries of the Caroline plate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, 1-15.
- Fujiwara, T., K. Tamaki, H. Fujimoto, T. Ishii, H. Toh, K. Koizumi, C. Igarashi, J. Segawa, and K. Kobayashi. 1995. Morphological studies of the Ayu Trough, Philippine Sea-Caroline Plate boundary. *Geophysical Research Lett.*, 22, 109-112.
- Hall, R., J.R. Ali, C.D. Anderson, and S.J. Baker. 1995. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate. *Tectonophysics*, 251, 229-250.
- Hall, R., M. Fuller, J.R. Ali, and C.D. Anderson. 1995. The Philippine Sea Plate: Magnetism and Reconstruction. p. 371-404. In: *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*, eds. by B. Taylor and J. Natland. Geophysical Monograph, Ser.88, AGU, Washington, DC.
- Haston, R.B. and M. Fuller. 1991. Paleomagnetic data from the Philippine Sea Plate and their tectonic significance. *J. Geophys. Res.*, 96, 6073-6098.
- Hilde, T.W.C. and C.-S. Lee. 1984. Origin and evolution of the West Philippine Basin: A new interpretation. *Tectonophysics*, 102, 85-104.
- Hirooka, K., T. Takahashi, H. Sakai, and T. Nakajima. 1985. Paleomagnetic evidence of the northward drift of the Izu peninsula, central Japan. p. 775-787. In: *Formation of Active Ocean Margins*, ed. by N. Nasu. Terra Scientific, Tokyo.
- Jones, E.J.W. 1990. *Marine Geophysics*. John Wiley & Sons, 287-313.
- Parker, R.L. 1972. The rapid calculation of potential anomalies. *J. Geophys. Res.*, 31, 447-455.
- Seno, T., S. Stein, and A.E. Gripp. 1993. A model for the

-
- motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, 98, 17941-17948.
- Wessel, P. and W.H. Smith. 2000. The Generic Mapping Tools (GMT) version 3.3.4 Technical & Cookbook, SOEST/NOAA.
- Weissel, J.K. and R.N. Anderson. 1978. Is there Caroline plate?. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 41, 143-158.
-
- Received Mar. 10, 2002*
Revised Jun. 15, 2002
Accepted Sep. 30, 2002