

오키나와트러프 북서 주변부의 탄성파 구조

선우돈

한국 지질자원연구원 석유해저자원연구부

Seismic Structure in the Northwestern Margin of the Okinawa Trough

Don Sunwoo

Petroleum and Marine Resource Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The Okinawa Trough is a rift basin formed by extension. Analysis of multichannel seismic reflection profiles from the northwestern margin of the northern Okinawa Trough reveal that the trough is characterized by a series of tilted fault blocks bounded by listric normal faults and half-grabens developed between blocks, showing typical rifted structures. The trough display three kinds of sedimentary sequences with different seismic reflection characteristics: prerift, synrift and postrift sediments. The prerift sequence develops parallel to the dip direction of tilted fault blocks. The synrift sediments, mostly deposited in the half-grabens between tilted fault blocks, are generally well characterized by divergence of the reflectors towards the blocks indicating contemporaneous deposition during tilting. The postrift sediments are featured by continuous and parallel reflectors. The width of the half-graben and the throw-displacement rate of the basin bounding fault are closely connected. The throw-displacement rate is the maximum when the rifting event is the most active and the width of the half-graben is proportional to the rate.

Key words : Okinawa Trough, rift basin, tilted fault block, Half-graben, throw-displacement rate

오키나와트러프는 인장력에 의해 형성된 열개 분지이다. 한반도 남부해역에 위치하는 북부 오키나와트러프의 북서 주변부에서 취득한 다중 채널 탄성파 자료 해석에 의하면 오키나와트러프의 지하 지질 구조는 전형적인 열개 분지에서 나타나는 경사진 단층 블록, 단층 블록들 사이에 발달한 반지구, 그리고 반지구의 경계부에 발달한 점완단층으로 특징 지워진다. 오키나와트러프에 퇴적된 퇴적층은 퇴적 시기에 따라 선열개, 동시열개 및 후열개 퇴적층으로 나뉘며 이들은 서로 다른 탄성파 반사 특성을 나타낸다. 선열개 퇴적층은 경사진 단층 블록의 경사 방향에 평행하게 발달한다. 동시열개 퇴적층은 주로 경사진 단층 블록 사이에 발달한 반지구에 퇴적되며 경사진 단층 블록을 향하여 반사면들이 경사를 이루며 발산(divergence)하는 특징을 나타낸다. 이는 동시열개 퇴적층이 단층 블록의 기울어짐(tilting)과 동시에 퇴적이 이루어졌음을 시사한다. 후열개 퇴적층은 반사면의 연속성이 양호하며 평행하게 발달한다. 열개 분지에서 반지구의 폭과 분지 경계 단층의 낙차 변위율은 밀접한 관계가 있다. 낙차 변위율은 열개 작용이 가장 활발한 시기에 최대이며 반지구의 폭은 분지 경계 단층의 낙차 변위율에 비례한다.

주요어 : 오키나와트러프, 열개 분지, 경사진 단층블록, 반지구, 낙차 변위율

1. 서 론

열개 분지(rift basin)는 대륙 암석권(continental lithosphere)의 인장(extension)에 의해 발달하고 정단층에 의하여 경계 지워진 분지로 정의된다(Lambiase & Bosworth, 1995). 1980년대부터 세계에 분포하는

여러 열개 분지에서 상당한 양의 지구물리 자료가 취득되어 지하 지질구조가 밝혀지면서(e.g. Rosendahl *et al.*, 1986; Cheadle *et al.*, 1987; Ebinger *et al.*, 1987) 열개 분지는 지질학자와 지구물리학자들의 끊임 없는 연구의 대상이 되고 있다. 그 이유는 열개 분지에는 다양한 지각 구조가 존재하여 열개 분지의 성인

*Corresponding author: swd@kigam.re.kr

및 지구조 발달에 관한 연구는 암석권의 변형에 관한 정보를 제공하고 또한 세계에서 많은 양의 석유가 열개 분지에서 생산되기 때문이다.

한반도 남부 해역에 위치하고 있는 오키나와트러프(Okinawa Trough)는 대륙 암석권내에서 인장력에 의해 형성된 열개 분지이다(Uyeda, 1977; Kimura, 1985; Letouzey and Kimura, 1986; Sibuet *et al.*, 1987). Wageman *et al.*(1970)이 처음으로 오키나와트러프의 경사면(slope)들이 일련의 점완 단층(listric fault) 또는 정단층들에 의해 형성되었으며, 오키나와트러프가 최근의 지구조 운동에 의해 형성된 새로운 열개 분지라는 연구 결과를 발표한 이후 이 지역에서 많은 지구 물리학적 연구가 수행되었다. 그 결과 오키나와트러프는 마이오세에 시작한 열개 운동(rifting)에 의하여 형성되었음을 알게 되었으며 대만 북부 해역에서 일본 큐슈 남

서부 해역까지 연장되어 발달하고 있음이 밝혀졌다(Uyeda, 1977; Sibuet *et al.*, 1987).

오키나와트러프는 지역에 따라 남부, 중부 및 북부 오키나와트러프로 나뉘는데(Sibuet *et al.*, 1987) 본 연구 지역은 한반도 남부 해역에 위치한 북부 오키나와트러프의 북서 주변부로 수심은 북서 동중국해 대륙붕에서 약 100m이며 남동쪽 분지 중심부로 가면서 점차 증가하여 최대 약 1200m에 이른다(Fig. 1). 본 연구에 사용된 자료는 심부 탄성과 자료와 시추공 자료로 탄성과 자료는 2개 축선의 독일의 PRAKLA SEISMOS 회사에 의해 취득된 48채널 24 중합 단면도이며 탐사 방향은 북서-남동 방향이다(Fig. 2). 시추공 자료는 1985년에 시추된 NIKKAN 8-1X 시추공 자료로 지질 시대를 규명하는 고생물 자료를 포함한다. 본 연구에서는 탄성과 자료를 해석하여 한반도 남부 해역에 발달한 오키나와트

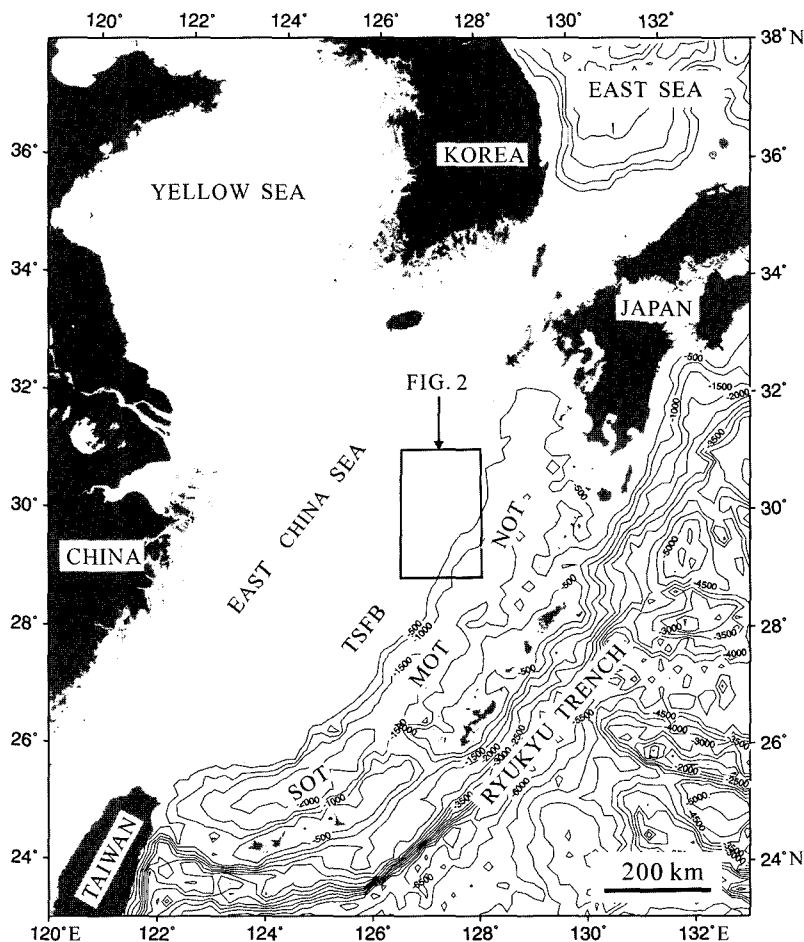


Fig. 1. Bathymetric map of the Okinawa Trough and its adjacent area based on the map by Sibuet *et al.* (1987). Area outlined by box is shown in detail in Fig. 2. Contour interval is in meters. TSFB=Taiwan Sinze Folded Belt; SOT=Southern Okinawa Trough; MOT=Middle Okinawa Trough; NOT=Northern Okinawa Trough.

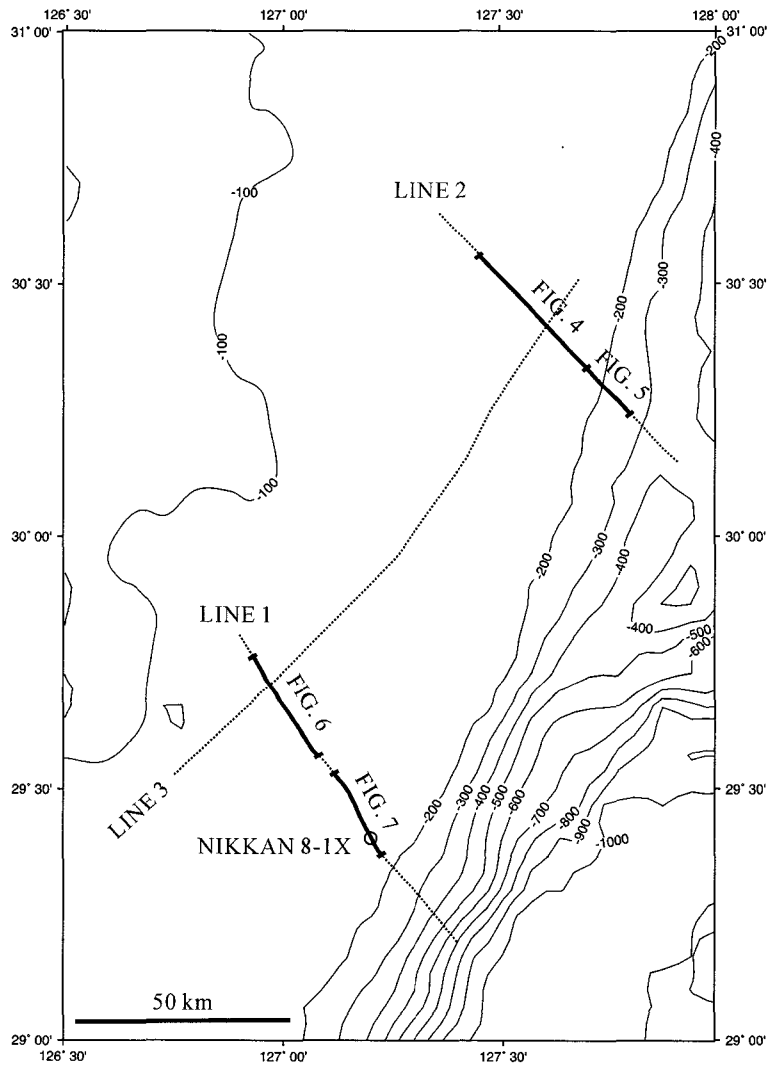


Fig. 2. Locations of seismic reflection and well data used in this study. Heavy lines and respective figure numbers indicate segments of seismic profiles shown in other figures. Contour interval is in meters.

러프 북서 주변 지역에서의 지하 지질구조 및 퇴적층의 특징을 규명하고 분지의 경계부에 발달한 분지 경계 단층과 분지 발달과의 상호 관계를 연구하였다.

2. 열개 분지의 특징

열개 분지는 크게 두 단계로 나뉘어 형성된다. 첫째는 열개 단계로, 이는 확장성 지구조 운동(extensional tectonics), 화산활동, 용기 및 침강작용이 활발한 단계이며, 둘째는 후열개(postrift) 또는 드리프팅(drifting) 단계로 이는 새로운 해양지각이 형성되는 단계이며, 열냉각(thermal cooling)과 퇴적물 하중(sediment loading)

에 의해 열개 분지 주변부가 침강하는 특징이 있다 (Montadert, 1979). Salveson(1976)은 여러 열개 분지를 연구한 결과 지각은 경성(brittle)이므로 쉽게 파쇄되고 지각 하부의 암석권은 연성(plastic)이므로 깨어지지 않는다고 가정하고 열개 분지 형성시 지각이 확장되면 지각 불균형(isostatic disequilibrium)이 야기되며 이 지각 불균형을 보상하기 위한 연약권의 상승이 일어나고 그 결과 암석권이 융기하게 된다고 제안하였다.

열개 분지에서 퇴적층은 퇴적 시기에 따라 크게 세 가지의 퇴적 시퀀스(sedimentary sequences)로 나뉜다 (Fig. 3): (1) 열개가 시작되기 이전에 퇴적된 “선열개 퇴적층(pre rift sediments)”, (2) 열개가 활발한 시기에

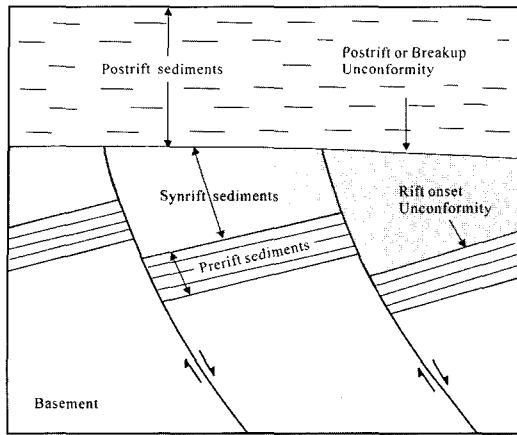


Fig. 3. Schematic diagram of extensional half-graben containing prerift, synrift and postrift sediments.

퇴적된 “동시열개 퇴적층(synrift sediments)”, (3) 열개가 끝난 이후에 퇴적된 “후열개 퇴적층(postrift sediments)” 각 유형의 퇴적층들의 층후는 지질구조, 지각인장(crustal extension)의 지속기간 및 정도, 그리고 퇴적공급의 양, 그리고 기후 변화 등에 따라 다르다. 선열개 퇴적층과 동시열개 퇴적층이 함께 존재하는 곳에서 이들은 보통 “열개 개시 부정합(rift onset unconformity)”에 의해 분리된다(Falvey, 1974). 전형적인 인장형 지구(extensional graben)에서 동시열개 퇴적층은 리스트릭 정단층쪽으로 새기 모양의 형태로 경사를 이룬다(Bally *et al.*, 1981). 열개활동이 갑자기 종결되면 후열개 퇴적층은 동시열개 퇴적층위에 부정합적으로 놓이게 된다. 그러한 부정합을 “후열개 부정합(postrift unconformity)”(Grow and Sheridan, 1988; Klitgord *et al.*, 1988) 또는 “브레이크업 부정합(breakup unconformity)”(Falvey, 1974)라고 하며 이는 동시열개 퇴적층과 후열개

퇴적층의 경계가 된다.

3. 분지의 구조

본 연구 지역에서 열개 작용에 의해 형성된 구조적 특징은 북서-남동 방향으로 취득된 탄성과 축선 1에서 가장 잘 나타난다. 탄성과 축선 1에 의하면 오키나와 트러프 지역에서 나타나는 지하 지질구조는 일련의 경사진 단층 블록(tilted fault block), 경사진 단층 블록들 사이에 발달한 반지구(half-graben) 구조 및 반지구의 경계부에 발달한 리스트릭 정단층(listric normal fault)들로 특징 지워진다. 축선 1에는 2개의 반지구가 발달한 것이 나타난다. 본 연구에서는 편의상 탄성과 축선1의 북서쪽에 위치한 반지구를 반지구 A, 남동쪽에 위치한 반지구를 반지구 B라고 명명한다(Fig. 4 and Fig. 5). 반지구 A와 B는 고기반암(basement high)에 의해 구분되며 각각의 반지구 남동 방향에서는 반지구의 경계를 나타내는 분지 경계 단층(basin bounding fault)이 발달하고 있는데 경계 단층은 단층면이 곡면으로 특징 지워지는 리스트릭(listric) 정단층 형태이다. 탄성과 자료에서 나타나는 것처럼 단층 블록이 경사를 이루는 이유는 열개 시기에 단층 블록이 단층면이 곡면인 리스트릭 단층면을 향하여 미끄러져 내려 회전하기 때문인 것으로 해석된다(Montadert, 1979). 경사진 단층 블록들의 경계부에 발달하고 있는 리스트릭 단층들의 경사각은 해저면 부근에서는 경사가 비교적 급하나 깊이가 깊어짐에 따라 경사가 감소하는 특징을 보여 준다. 이 리스트릭 정단층들은 또한 퇴적과 동시에 지속적으로 단층 운동을 하여 단층으로 낙하되는 쪽, 즉 하반쪽보다 상반쪽에서 퇴적층이 더 두껍게 쌓이는 성장단층(growth fault)의 특징을 나타

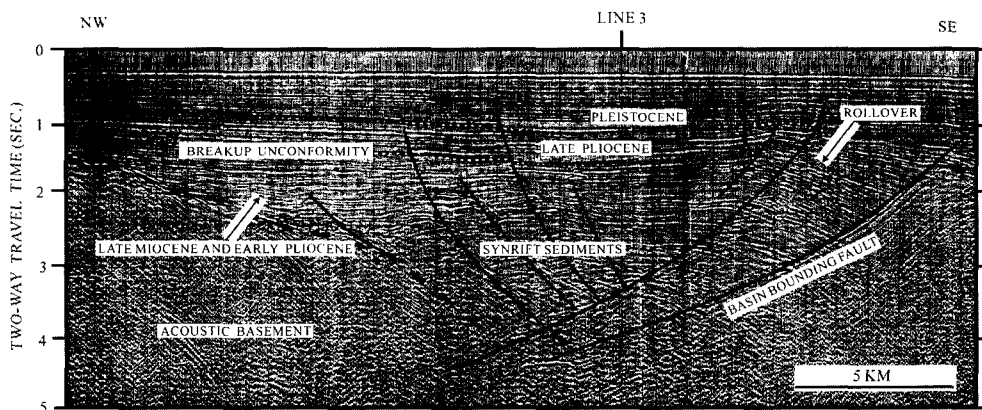


Fig. 4. Seismic reflection profile showing tilted fault blocks and listric faults in the half-graben A. See Fig. 2 for location.

낸다. 분지 경계 단층의 상반에 퇴적된 퇴적층들은 분지 경계 단층의 단층면을 향하여 경사를 이루는 롤오버(rollover) 특징을 나타낸다(Fig. 4).

반지구 A와 B는 반지구의 폭 및 반지구내의 단층 발달 형태는 서로 다르게 나타난다. 탄성과 축선 1에서 반지구 A는 폭이 약 30 km에 이르며 경사진 단층 블록의 최정상부는 왕복주시 약 1.5초에 놓여 있다. 이에 반하여 반지구 B의 폭은 약 12 km 이며 단층 블록의 정상부는 각각 약 1.3초에 위치한다. 반지구 A에 퇴적된 퇴적층은 많은 단층 운동의 영향을 받았는데

경계 단층 주위에서는 단층의 경사 방향이 경계 단층의 경사 방향과 같은 신세틱(synthetic) 단층이 발달하여 있고 이에 반하여 경계 단층 위치의 반대 방향 즉 반지구의 북서쪽에서 단층은 주로 경사 방향이 경계 단층과 반대 방향인 앤티세틱(antithetic) 단층이 발달하여 있다. 신세틱 단층은 경계 단층과 거의 동일한 시기까지 발달한 양상을 나타내나 대부분의 앤티세틱 단층은 경계 단층의 발달이 끝나기 이전에 이미 단층 운동이 끝났음을 알 수 있다. 이것은 반지구 발달 초기에 형성된 앤티세틱 단층들에 작용하였던 스트레스

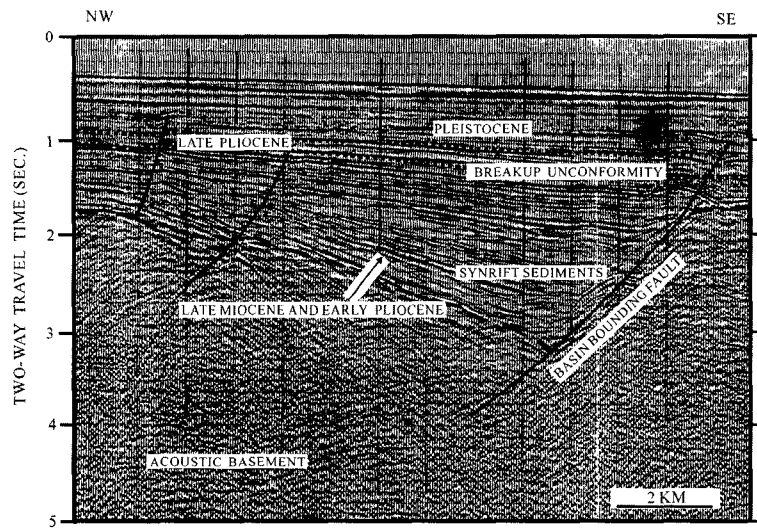


Fig. 5. Seismic reflection profile showing tilted fault blocks and listric faults in the half-graben B. See Fig. 2 for location.

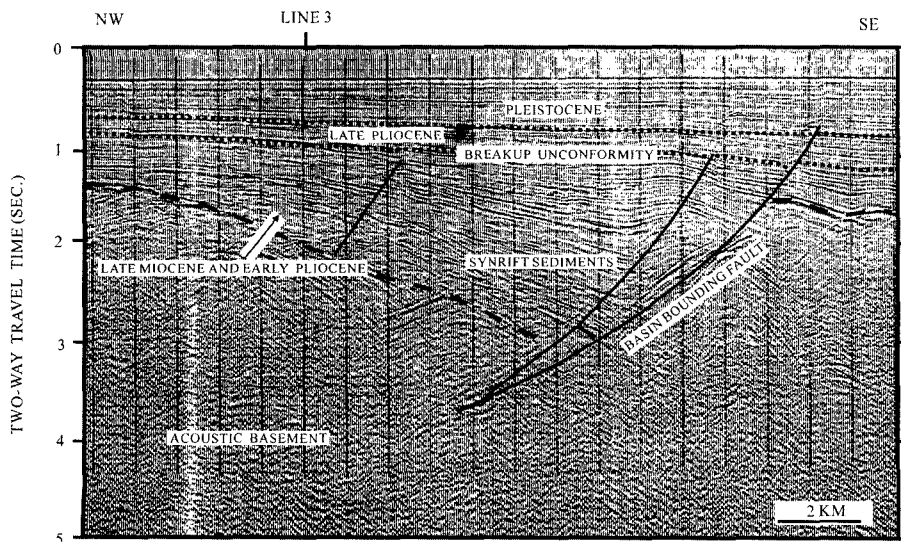


Fig. 6. Seismic reflection profile showing tilted fault blocks and listric faults in the half-graben C. The dip of the listric faults decreases with depth. See Fig. 2 for location.

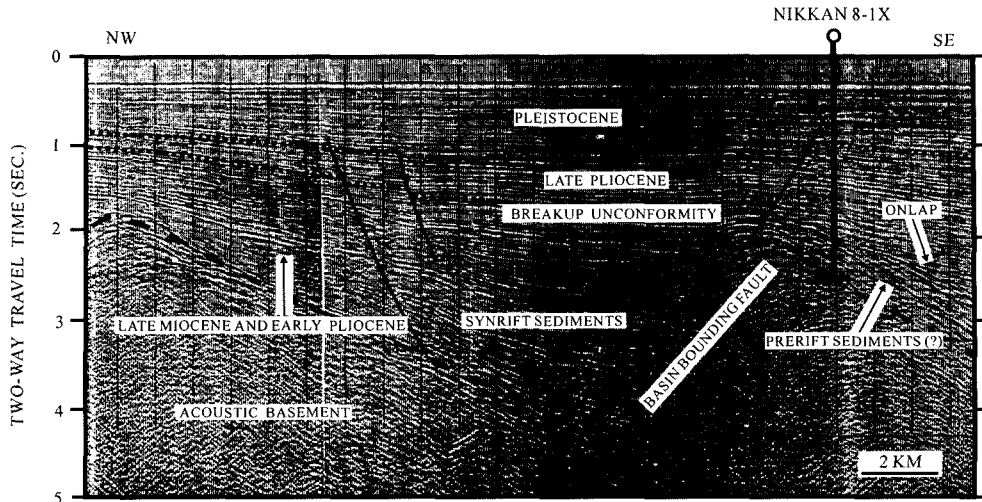


Fig. 7. Seismic reflection profile showing tilted fault blocks and listric faults in the half-graben D. Note prerift reflectors parallel to the tilting direction of the tilted fault block adjacent to the NIKKAN8-1X well. See Fig. 2 for location.

(stress)가 시간이 지남에 따라 약화되어 엔티세틱 단층의 발달이 둔화되었음을 시사한다. 즉 반지구 구조의 발달 후기에는 주 단층이 아닌 부수적인 단층(secondary fault)의 발달은 점점 둔화되고 인장력은 분지 경계 단층에 집중되었음을 나타낸다. 반지구 B에는 반지구 A와 달리 퇴적층내에 발달한 단층이 거의 없는데 이는 인장력이 반지구 B보다 반지구 A에 상대적으로 크게 작용하였음을 시사한다.

탄성과 축선 2도 탄성과 축선 1에서 나타나는 것처럼 열개 작용에 의하여 형성된 분지의 구조적 특징인 경사진 단층 블록과 이들의 경계부에는 리스트릭 단층이 발달하는 것을 보여 준다. 축선 2는 북서에서 남동 방향으로 가면서 서로 다른 규모로 2개의 반지구가 존재함을 나타내는데 편의상 탄성과 축선 2의 북서쪽에 위치한 반지구를 반지구 C, 남동쪽에 위치한 반지구를 반지구 D라고 명명한다(Fig. 6 and Fig. 7). 탄성과 축선 2에서 반지구 C는 폭이 약 14.5 km이며 단층 블록의 정상부는 왕복주시 약 1.5초에 위치한다. 이에 반하여 반지구 D는 폭이 약 16 km이고 단층 블록의 정상부는 약 2.0초에 위치하여 북서에서 남동쪽으로 가면서 단층 블록 정상부의 심도가 깊어진다. 반지구 C에서 단층 활동은 분지 경계부외에서는 비교적 미약하며, 엔티세틱 단층이 나타나지 않는다. 반지구 D에서는 신세틱 단층과 엔티세틱 단층들이 발달하여 있는데 이들의 발달 형태는 반지구 A와 유사하다. 반지구 A와 D는 반지구의 규모, 퇴적층 및 퇴적층 내에 발달한 단층의 발달 형태가 서로 매우 유사함을 알 수 있다.

4. 퇴적 시퀀스

4.1. 선열개 퇴적층

선열개 퇴적층은 경사진 단층 블록 내에 발달하기 때문에 경사진 단층 블록과 선열개 퇴적층사이의 음향 임피던스(acoustic impedance) 차이가 충분히 크지 않으면 일반적으로 탄성과 자료에서 선열개 퇴적층의 인지가 쉽지 않다. 그러나 시추공 자료가 있을 경우 시추공 자료와 탄성과 자료를 대비하면 선열개 퇴적층의 인지가 비교적 용이하다. 탄성과 자료에서 선열개 퇴적층은 음향기반암의 경사 방향에 거의 평행하게 발달한다(Grow *et al.*, 1994). 연구 지역에서는 NIKKAN 8-1X 시추공 자료와 탄성과 축선 1의 대비를 통하여 선열개 퇴적층을 확인하는 것이 가능하다(Fig. 7). NIKKAN 8-1X 시추공의 고생물 자료 해석을 통하여 기반암, 전기 플라이오세 상부면과 후기 플라이오세 상부면이 확인되었다(봉필윤 등, 1990). NIKKAN 8-1X 시추공에 의하면 시추지점에서 음향기반암 상부면, 전기 플라이오세 상부면, 후기 플라이오세 상부면은 각각 왕복주시 2.42초, 1.64초 그리고 1.02초에 위치한다. NIKKAN 8-1X 시추 지점에서 탄성과 자료를 보면 음향기반암 상부면은 왕복주시 약 2.0초에 존재하는 것처럼 보이나 NIKKAN 8-1X 시추공 자료에 의하면 실제 기반암의 상부면은 왕복주시 2.42초이다(Fig. 7). 따라서 왕복주시 약 2.0초와 2.42초 사이의 구간은 퇴적층인 것으로 판명되었으며 이 퇴적층에서 탄성과 반사면은 경사진 단층 블록의 경사 방향에 평행하게 발달하고 경

사진 단층 블록의 남동 측면에서는 상부에 놓여 있는 퇴적층이 경사진 단층 블록에 평행하게 발달한 퇴적층에 온랩(onlap)한다. 탄성과 반사면 특성에 의하면 이 구간이 선열개 퇴적층일 가능성이 높은 것으로 사료된다. 시추공 자료에 의하면 이 퇴적층의 퇴적 시기는 후기 마이오세에 해당하며 따라서 연구 지역에서 열개는 후기 마이오세에 시작한 것으로 추정된다. 그러나 반지구 D를 제외한 다른 반지구들에서는 시추공 자료가 없고 반지구 D에서 나타나는 선열개 퇴적층으로 사료되는 층과의 탄성과 자료 대비가 불가능하여 선열개 퇴적층을 확인하는 것은 불가능하다.

4.2. 동시열개 퇴적층

일반적으로 열개 작용은 기반암의 단층 운동 및 용기로 시작이 된다. 인장력과 함께 계속되는 단층 운동으로 인하여 단층 블록은 경사를 이루고 단층 블록들 사이에는 지구 또는 반지구가 형성되어 여기에 주로 동시열개 퇴적물이 퇴적된다(Montadert, 1979).

동시열개 퇴적층에서 나타나는 탄성과 반사면은 경사진 단층 블록을 향하여 반사면들이 경사를 이루며 발산(divergence)하는 특징을 나타낸다(Fig. 4, 5, 6 and 7). 이러한 특징은 동시열개 퇴적층이 단층 블록의 기울어짐(tilting)과 동시에 퇴적이 이루어졌음을 시사한다. 동시열개 퇴적층의 층후는 경사진 단층 블록의 정상부 부근에서는 매우 얇으며 반지구 구조의 중심으로 가면서 매우 두껍다. 연구 지역에서 동시열개 퇴적층은 분지 경계 단층들에 의해 경계 지워지는 반지구 내에 퇴적되어 있으며 반지구 A, B, C, 그리고 D에서 나타나는 동시열개 퇴적층의 최대 두께는 왕복주시로 각각 약 2.2초, 1.2초, 2.0초 그리고 1.8초이다(Figs. 4, 5, 6 and 7).

동시열개 퇴적층의 반사면은 하부에서 상부로 가면서 경사가 완만해지며 상부에서는 단층 블록의 기울어짐과 동시에 이루어진 퇴적 형태를 보여 주지 않는다. 다만 기존에 존재하였던 함몰대(depression)에 퇴적된 것 같은 모습을 나타내는데 이와 같이 상부로 가면서 반사면이 거의 평행하게 나타나는 것은 단층 블록의 회전(rotation)이 약화된 것을 시사한다. 동시열개 퇴적층의 반사면의 경사도는 지역에 따라 다르게 나타나는데 반사면이 경사를 이루다가 거의 편평해지는 경우가 대부분이다. 이는 열개 활동시 지역에 따라 단층 블록의 회전과 연관된 지구조 활동 정도가 다를 수 있음을 시사한다.

동시열개 퇴적층과 후열개 퇴적층의 경계면은 브레이크업 부정합에 의해 구분된다. 연구 지역의 탄성과

자료에서 이 부정합이 비교적 잘 나타난다. 연구 지역에서 브레이크업 부정합은 탄성과 축선 1과 2의 교차 축선인 탄성과 축선 3을 통하여 이 부정합의 축선 대비를 하였으며 탄성과 축선 1과 시추공 자료를 대비한 결과 브레이크업 부정합의 시기는 하부 플라이오세와 상부 플라이오세 경계면인 것으로 해석된다. 따라서 동시열개 퇴적층은 후기 마이오세 층과 전기플라이오세 층으로 구성된다. 그러나 시추공 자료에 의하면 후기 마이오세 층의 층후는 비교적 얇고 전기 플라이오세층이 동시열개 퇴적층의 주를 이룬다. 브레이크업 부정합 위에 놓여 있는 후기 플라이오세 층과 그 이후에 퇴적된 퇴적층들은 후열개 퇴적층으로 해석된다.

퇴적층에서 나타나는 반사면의 특징, 부정합의 존재 및 시기 그리고 퇴적층의 시기를 통하여 연구 지역에서 열개 활동은 아마도 후기 마이오세에 시작하였으며 열개 활동이 가장 활발한 열개 단계는 전기 플라이오세 말까지 지속된 것으로 해석된다.

4.3. 후열개 퇴적층

연구 지역에서 후열개 퇴적층은 경사진 단층 블록이 발달한 깊이보다 더 얇은 곳에서만 퇴적되어 있다(Fig. 4, 5, 6 and 7). 따라서 후열개 퇴적층은 단층 블록의 회전 또는 경사짐이 끝난 후에 퇴적된 것으로 해석된다. 지역에 따라 경계 단층이 후열개 퇴적층까지 연장 발달하여 있는 곳도 있지만 대체적으로 후열개 퇴적층이 퇴적되었던 시기에 단층 운동은 거의 없었던 것으로 추정된다. 또한 후열개 퇴적층에 대한 반사면은 비교적 연속성이 양호하며 평행하게 나타나고 퇴적층내에서는 특이할 만한 구조가 존재하지 않는다. 이는 후열개 퇴적층이 퇴적될 당시 혹은 퇴적된 후에 연구 지역이 구조적으로 비교적 안정하였음을 시사한다.

5. 경계 단층과 반지구 발달

탄성과 축선 1과 2에서 나타나는 반지구들의 규모를 비교 검토한 결과 반지구의 경계부에 발달한 경계 단층의 발달은 퇴적층의 두께와 밀접한 관계가 있으며 또한 반지구의 규모와 모양에도 영향을 미칠 수 있다. 경계 단층의 발달과 반지구 규모의 상호 관계를 규명하기 위하여 탄성과 축선에서 나타나는 4개의 반지구 A, B, C, D를 대상으로 경계 단층 운동이 지속된 기간 동안 퇴적된 퇴적층의 두께를 나타내는 경계 단층의 낙차 변위율(throw-displacement rate)을 구하였다.

동시열개 퇴적층의 두께는 반지구 A, B, C, D 에서 퇴적층이 가장 두터운 반지구의 중심축이 위치하는 곳의 두께를 이용하였다. 여기에는 후기 마이오세 선열개 퇴적층도 일부 포함될 가능성이 있지만 NIKKAN 8-1X 시추공에서 확인된 바와 같이 후기 마이오세 퇴적층은 층수가 비교적 얇으므로 반지구 A, B, C와 D에 동일한 두께로 퇴적된 것으로 가정하였다. 경계 단층의 낙차 변위율을 구하기 위하여 탄성과 축선에서 왕복주시(two-way travel time)로 표시된 두께를 실제 깊이 단위로 환산하여야 한다. 이를 위하여 탄성과 단면도에서 중합속도는 알엠프 속도(RMS velocity)와 거의 같다는 가정 하에 Dix공식(1956)을 이용하여 계산한 구간속도로부터 실제 두께 단위로 환산하였다. 탄성과 단면도에서의 중합 속도는 축선의 여러 지점을 임의로 선택하여 깊이로 환산하여 왕복주시에 대한 깊이를 도출하였다. 그리고 이들에 대한 근사식을 구하여 왕복주시와 깊이 사이의 관계식을 유도하였다.

Table 1. The estimation of throw-displacement rate of the basin bounding fault for each half-graben during the early and the late Pliocene.

Half-graben	Throw-displacement rate (mm/yr)		Half-graben width (km)
	early Pliocene	late Pliocene	
A	2.4	0.41	30
B	1.2	0.12	12
C	1.89	0.17	14.5
D	1.96	0.48	16

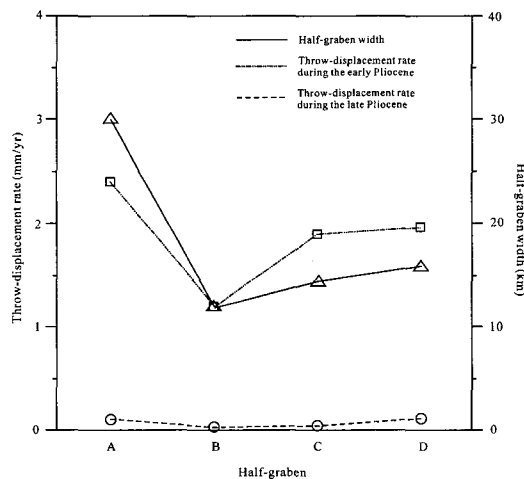


Fig. 8. Comparison between the throw-displacement rate of the basin bounding fault and half-graben width based on the estimation shown in table 1. The throw-displacement rate during the early Pliocene is proportional to the half-graben width.

각각의 반지구에서 전기 플라이오세(1.7 m.y)에 퇴적된 동시열개 퇴적층과 후기 플라이오세 (1.8 m.y)에 퇴적된 후열개 퇴적층의 두께를 구하여 계산된 낙차 변위율, 그리고 탄성과 축선에서 측정된 반지구의 폭은 Table 1과 같으며 이를 도면화한 결과는 Fig. 8에서 보여 준다.

연구 지역에서 동시열개 퇴적층이 퇴적되는 동안의 경계 단층의 낙차 변위율은 반지구 A에서 2.4 mm/yr로 가장 높은 것으로 나타나며 이에 반하여 반지구 B에서 1.2 mm/yr로 낮다. 반지구의 폭은 반지구 A에서 30 km로 가장 큰 반면 반지구 B에서는 12 km로 가장 낮다. 따라서 동시열개 퇴적층이 퇴적되는 동안 경계 단층의 낙차 변위율이 크면 클수록 반지구의 폭이 증가하는 경향을 나타낸다. 반지구들에서 발달한 경계 단층의 평균 낙차 변위율은 1.86 mm/yr로 나타난다. 따라서 동시열개 퇴적층이 퇴적되는 동안 반지구 A와 D에 발달한 경계 단층은 평균 이상으로 단층 운동이 활발하였음을 알 수 있다.

후기 플라이오세에 후열개 퇴적층이 퇴적되는 동안의 경계 단층의 낙차 변위율은 최대 0.48 mm/yr(반지구 D), 최소 0.12 mm/yr(반지구 B)로 동시열개 퇴적층이 퇴적된 시기에 비하여 현저히 낮다. 이는 후열개 퇴적층이 퇴적되는 동안 경계 단층 운동은 매우 미미하였고 결과적으로 반지구 발달도 매우 미약하다는 것을 시사한다.

6. 결 론

오키나와트러프의 지하 지질구조는 경사진 단층 블록, 경사진 단층 블록들 사이에 발달한 반지구, 그리고 반지구의 경계부에 발달한 리스틱 정단층으로 특징 지워지며 이들은 오키나와트러프가 인장력에 의한 열개에 의해 형성되었음을 시사한다.

퇴적층은 열개 시기를 기준으로 퇴적 시기가 서로 다른 선열개 퇴적층, 동시열개 퇴적층 및 후열개 퇴적층으로 구성되며 이들은 서로 다른 탄성과 반사면의 형태를 나타낸다. 선열개 퇴적층은 경사진 단층 블록 내에서 단층 블록의 경사 방향에 평행하게 나타난다. 상위의 동시열개 퇴적층은 선열개 퇴적층에 온랩한다. 동시열개 퇴적층은 주로 경사진 단층 블록 사이에 발달한 반지구에 퇴적되며 경사진 단층 블록과 경사를 이루면서 반사면이 발산하는 형태를 나타낸다. 이는 동시열개 퇴적층이 단층 블록의 기울어짐(tilting)과 동시에 퇴적이 이루어졌음을 시사한다. 그러나 동시열개 퇴적

층은 상부로 가면서 단층 블록을 향한 경사도는 완만해진다. 후열개 퇴적층은 대체적으로 연속성이 양호하며 평행하게 층을 이루는 반사면의 특징을 보여 준다.

연구 지역에 발달한 여러 반지구의 규모와 반지구 구조의 경계부에 발달한 분지 경계 단층의 낙차 변위율은 서로 밀접한 관계가 있다. 분지 경계 단층 운동은 대부분 동시열개 퇴적층이 퇴적되는 시기에 가장 활발하였으며 반지구의 폭은 동시열개 퇴적층이 퇴적되는 시기의 경계 단층의 낙차 변위율에 비례한다. 후열개 퇴적층이 퇴적되는 동안 분지 경계 단층 운동은 매우 약하며 결과적으로 반지구 발달에 거의 영향을 미치지 않는다.

참고문헌

- 봉필윤, 이호영, 권영인, 전희영 (1990) 대륙붕 제8소구의 층서고생물학적 연구. 한국동력자원연구소, KR-89-3A-1, p. 33-71.
- Bally, A. W., Bernoulli, D., Davis, G. A. and Montadert, L. (1981) Listric normal faults. Proceedings of 26th International Geological Congress, Geology of Continental Margins Symposium, Paris, July 7-17, 1980, *Oceanologica Acta*, p. 1-10.
- Cheadle, M. J., McGeary, S., Warner, R. M. and Matthews, D. H. (1987) Extensional structures on the western UK continental shelf: a review of evidence from deep seismic profiling. In: Coward, M. P., Dewey, J. F. and Hancock, P. L. (eds) *Continental Extensional Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication, v. 28, p. 445-465.
- Dix, C. H. (1955) Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, v. 20, p. 68-86.
- Ebinger, C. J., Rosendahl, B. R. and Reynolds, D. J. (1987) tectonic model of the Malawi rift, Africa. In: Ben-Avraham, Z. (eds) *Sedimentary Basins within the Dead Sea and Other Rift Zones*. *Tectonophysics*, v. 141, p. 215-235.
- Falvey, D. A. (1974) The development of continental margins in plate tectonic theory. *Journal of Australian Petroleum Exploration Association*, v. 14, p. 95-106.
- Grow, J. A. and Sheridan, R. E. (1988) U. S. Atlantic continental margin: A typical Atlantic-type or passive continental margin. In: Sheridan, R. E. and Grow, J. A. (eds), *The Atlantic continental margin*, U. S., *Geol. Soc. Amer.*, v. 1-2, p. 1-7.
- Grow, J. A., Mattick, R. E., Berczi-Makk, A., Pero, C., Hajdu, D., Pogacsas, G., Varnai P. and Varga, E. (1994) Structure of the Bekes Basin inferred from seismic reflection, well and gravity data. In: Teleki P. G., Mattick, R. E. and Kokai J. (eds), *Basin Analysis in petroleum exploration*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p. 1-38.
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Marine and Petroleum Geology*, v. 2, p. 222-240.
- Klitgord, K. D., Hutchinson, D. R., and Schouten, H. (1988) U. S. Atlantic continental margin: A typical Atlantic-type or passive continental margin. In: Sheridan, R. E. and Grow, J. A. (eds), *The Atlantic continental margin*, U. S., *Geol. Soc. Amer.*, v. 1-2, p. 19-55.
- Lambiase, J. J. and Bosworth, W. (1995) Structural controls on sedimentation in continental rifts. In: Lambiase, J. J. (eds.), *Hydrocarbon Habitat in Rift Basins*. Geological Society Special Publication, v. 80, p. 117-144.
- Letouzey, J. and Kimura, M. (1986) The Okinawa Trough: genesis of a back-arc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics*, v. 125, p. 209-230.
- Montadert, L. (1979) Rifting and subsidence of the northern continental margin of the Bay of Biscay, In: initial reports of deep sea drilling project, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, v. 48, p. 1025-1060.
- Rosendahl, B. R., Reynolds, D. J., Lorber, P. M., Burgess, C. F., McGill, J., Scott, D., Lambiase, J. J. and Derksen, S. J. (1986) Structural expressions of rifting: lessons from Lake Tanganyika, Africa. In: Frostick, L. E., Renaut, R. W., Reid, I. and Tiercelin, J.J. (eds) *Sedimentation in the East African Rifts*. Geological Society, London, Special Publication, v. 25, p. 29-43.
- Salveson, J. O. (1976) Variations in the oil and gas geology of rift basins. *Egyptian General Petroleum Corp., 5th Exploration Seminar*, Cairo, Egypt, Nov., p. 15-17.
- Sibuet, J. C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J. P., Hilde, T. W. C., Kimura, M., Chiao, L. Y., Marset, B., Muller, C. and Stephan, J. F. (1987) Back arc extension in the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research*, v. 92, p. 14041-14063.
- Uyeda, S. (1977) Some basic problems on trench-arc-back-arc-system. In: *Island Arcs, Deep Sea Trenched and Back-Arc Basins*. In: Talwani, M. and Pitman III, W. C. (eds) *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins*. American Geophysical Union, Washington, D. C., p. 1-14.
- Wageman, J. M., Hilde, T. W. C. and Emery, K. O. (1970) Structural framework of East china Sea and Yellow Sea. *Bulletin of American Association Petroleum Geologists*, v. 54, p. 1611-1643.

2003년 8월 19일 원고접수, 2003년 12월 5일 게재승인.