

북부 오키나와트러프의 구조 발달

선우돈

한국지질자원연구원 석유해저자원연구부

Structural Evolution of the Northern Okinawa Trough

Don Sunwoo

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

Analysis of multi-channel seismic reflection and well data serves to detail the structural evolution of the northern Okinawa Trough, southern offshore Korea. The overall structural style of the area is characterized by a series of half grabens and tilted fault blocks bounded by basement-involved listric normal faults. Most half grabens and tilted fault blocks developed in the direction of NNE-SSW, parallel to the axis of the Okinawa Trough. Orientation and distribution of the listric faults also suggest the development of transfer faults in NW-SE direction. The rifting phase of the northern Okinawa Trough have been established on the basis of structural and stratigraphic analyses of depositional sequences and their seismic expressions. Major phase of rifting probably started in the Late Miocene and the most active rifting occurred during the Early Pliocene. The rifting produced a series of half grabens and tilted fault blocks bounded by listric normal faults. It appears that the rifting activity has become weaker since the Late Pliocene, but the Pleistocene sediments faulted by listric faults bounding tilted fault blocks suggest that the rifting activity is probably still in progress.

Key words : Okinawa Trough, rifting, listric fault, tilted fault block

다중 채널 탄성과 반사 자료 및 시추공 자료 분석을 통하여 북부 오키나와트러프의 구조 발달을 연구하였다. 전체적인 구조 발달 형태는 기반암 내부까지 발달한 리스트릭 단층과 리스트릭 단층으로 경계 지워지는 일련의 반지구 구조와 경사진 단층 블록으로 특징 지워진다. 대부분의 반지구 구조와 경사진 단층 블록은 오키나와트러프의 축 방향인 북북동-남남서 방향으로 발달하여 있으며 트랜스퍼 단층이 북서-남동 방향으로 발달하고 있다. 퇴적 시퀀스에 대한 구조 및 층서 분석을 통하여 북부 오키나와트러프의 열개 작용 발달 단계를 연구하였는데 그 결과 열개 작용은 후기 마이오세에 시작한 것으로 추정되며 전기 플라이오세 시기에 가장 활발한 것으로 해석된다. 단층 블록과 반지구 구조와 같은 대부분의 열개 구조들은 이 시기에 형성되었다. 후기 플라이오세부터 열개 작용이 약해지는 것으로 보이거나 경사진 단층 블록의 경계부에 발달한 리스트릭 단층이 플라이스토세 퇴적층까지 발달한 것을 보면 열개 작용이 최근까지 진행되고 있을 가능성이 있다.

주요어 : 오키나와트러프, 열개 작용, 리스트릭 단층, 경사진 단층블록

1. 서 론

오키나와트러프는 류큐 해구(Ryuky Trench)뒤에 위치한 후배호 분지(back-arc basin)로 북부 대만에서 일본 류슈 남서부까지 약 1000 km 이상 연장 발달하고

있다(Fig. 1). 트러프는 위치에 따라 남부, 중부 및 북부 오키나와트러프로 나뉘는데 폭은 남부에서 약 60-100 km이며 북쪽으로 가면서 점점 증가하여 최대 약 230 km에 이른다(Kimura, 1985; Sibuet *et al.*, 1987).

오키나와트러프는 열류량(heat flow)이 높고 화산 및

*Corresponding author: swd@kigam.re.kr

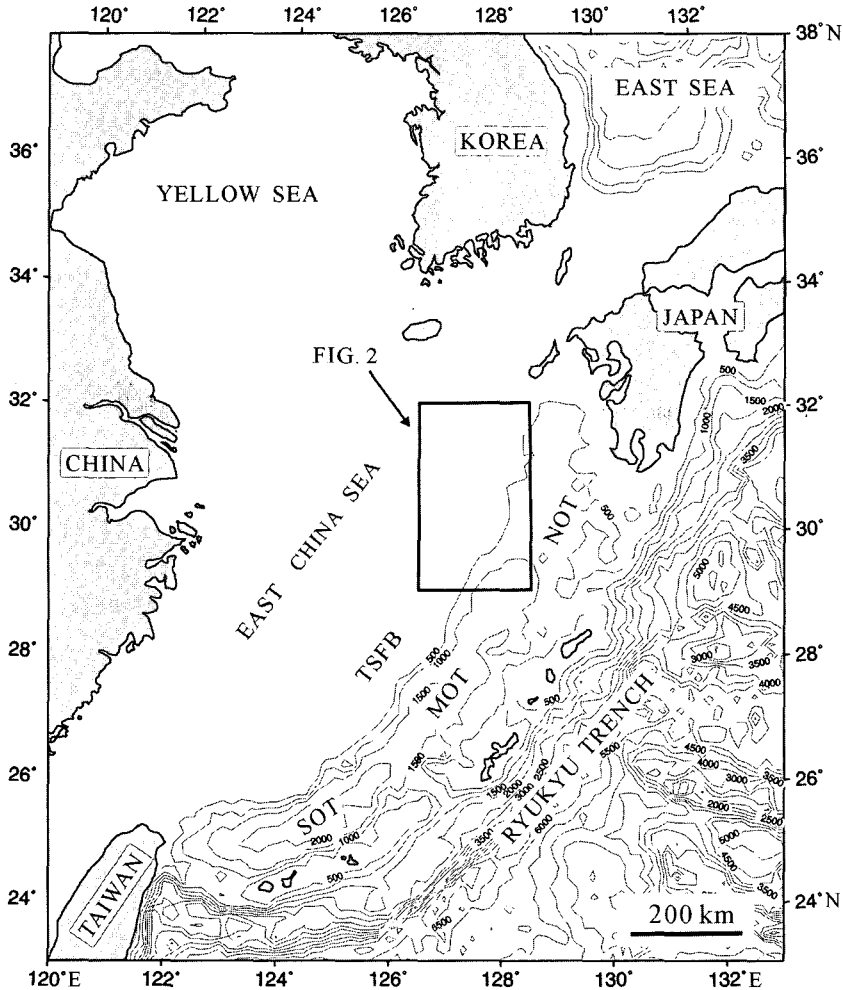


Fig. 1. Bathymetric map of the Okinawa Trough and its adjacent area based on the map by Sibuet *et al.* (1987). Area outlined by box is shown in detail in Fig. 2. Contour interval is in meters. TSFB = Taiwan Sinzi Fold Belt; SOT = Southern Okinawa Trough; MOT = Middle Okinawa Trough; NOT = Northern Okinawa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

지진 활동이 빈번하며 단층과 반지구 구조가 잘 발달하여 있기 때문에 열개 작용과 연관된 후배호 분지라는 의견이 지배적이며 비교적 최근의 열개 작용에 의해 형성된 분지라는 점에서 주목을 받고 있다 (Wageman *et al.*, 1970; Herman *et al.*, 1978; Lee *et al.*, 1980; Eguchi and Uyeda, 1983; Kimura, 1985; Letouzey and Kimura, 1986; Sibuet *et al.*, 1987; Kimura *et al.*, 1988; Yamano *et al.*, 1989; Park *et al.*, 1998). 그러나 트러프의 발달 과정 및 시기에 관하여는 아직 많은 논쟁이 있다. 일부 학자들은 (Herman *et al.*, 1978; Lee *et al.*, 1980; Sibuet *et al.*, 1987) 탄성과 자료 해석을 통하여 열개 작용이 후기 마이오세에 시작하였다고 제안하였으며 이에 반하

여 Kimura (1990)와 Furukawa *et al.* (1991)는 열개 작용이 약 2 Ma인 플라이오세와 플라이스토세의 경계 시기에 시작되었다고 주장하였다. Miki (1995)는 오키나와트러프가 2단계 열개 과정에 걸쳐 형성되었으며 첫 번째 단계는 10 Ma와 6 Ma 사이의 시기에 두 번째 단계는 약 1 Ma에 시작하였다고 제안하였다. 또한 Park *et al.* (1998)은 오키나와트러프의 발달은 3단계에 걸쳐 이루어 졌으며 1단계는 후기 마이오세에서 초기 플라이스토세, 2단계는 초기 플라이스토세 동안에 그리고 3단계는 후기 플라이스토세부터 지금까지 진행되고 있다고 주장하였다.

본 연구는 한반도 남부 해역에 위치한 북부 오키나와트러프의 북서 주변부에서 취득한 탄성과 및 시추공

자료를 해석하고 대비하여 북부 오키나와트러프의 구조 발달사를 연구하고 열개 작용 시기를 규명하고자 한다.

2. 연구지역 및 지질개관

연구 지역은 북부 오키나와트러프의 북서 주변부에

해당하며 위도 29°-32°N와 경도 126.5°-128.5°E 사이의 한반도 남부 해역에 위치한다(Fig. 1).

오키나와트러프의 북서쪽에는 타이완-신지 습곡대 (Taiwan-Sinzi Fold Belt)와 동중국해 분지 (East China Sea Shelf Basin)가, 남동쪽에는 류큐 해구 (Ryukyu Trench)가 발달하여 있다. 동중국해 분지는 후기 백악기에 유라시아 판 아래로 태평양 판이 섭입

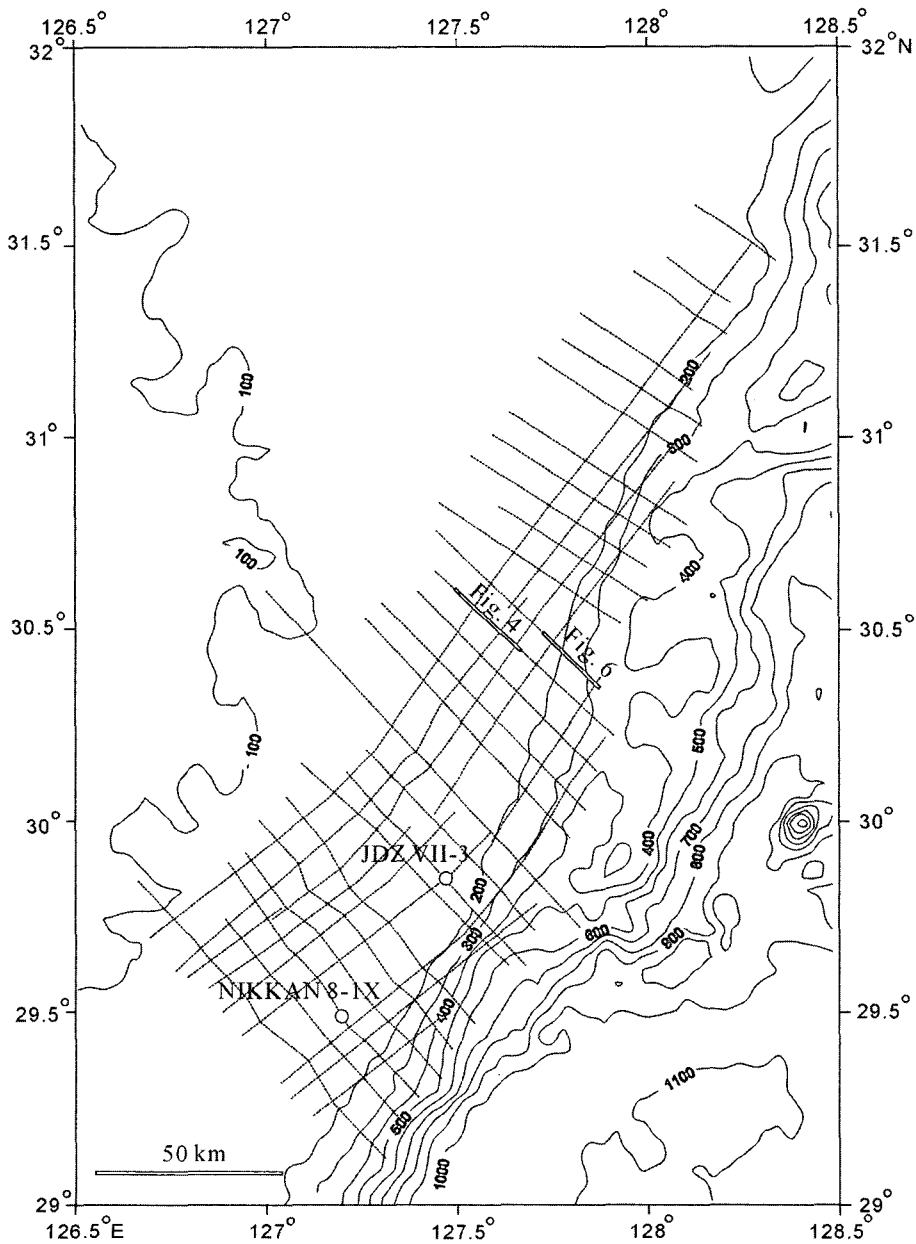


Fig. 2. Locations of seismic reflection and well data used in this study. Heavy lines and respective figure numbers indicate segments of seismic profiles shown in other figures. Contour interval in meters.

하여 기존에 있던 단층들이 재 활동함으로써 형성된 것으로 알려져 있으며(Ludwig, 1966; Karig, 1971; Li and Ruming, 1992) 타이완-신지 습곡대는 습곡 구조와 단층이 발달한 고제3기와 신제3기 퇴적층으로 구성되어 있으나 형성 시기가 정확하게 알려져 있지 않다(Wageman *et al.*, 1970).

오키나와트러프는 필리핀해 판(Philippine Sea Plate)이 유라시아 판(Eurasia Plate) 아래로 섭입 하여 유라시아 판의 대륙 암석권내에서 팽창력에 의하여 형성되었으며(Uyeda, 1977; Sibuet *et al.*, 1987) 아직까지 많은 논란이 있지만 여러 차례에 걸친 열개 작용에 의하여 발달된 것으로 알려져 있다. 열개 작용의 시작은 유라시아 판에 대한 필리핀 판의 상대 운동방향이 북서방향에서 서북서방향으로 바뀐 것과 밀접한 관계가 있으며 특히 비화산성 류큐 열도(Ryukyu arc) 및 타이완-신지 습곡대의 광역적인 용기와 정단층 운동과 관련이 된다(Letouzey and Kimura, 1986; Zhou *et al.*, 1989).

3. 연구자료

본 연구에서 사용된 자료는 탄성과 및 시추공 자료이다(Fig. 2). 탄성과 자료는 1973-1974년에 독일의 PRAKLA SEISMOS사의 M/V POLLUX 호에 의해 취득된 48채널 24중합 단면도로서 총 3,300여 line-km에 이른다. 탐사는 대부분의 지역에서는 8×8 km 간격으로, 일부 지역에서는 약 8×11 km 간격으로 주로 북동-남서 방향과 북서-남동 방향으로 실시되었다. 시추공 자료는 1985년도에 시추된 NIKKAN 8-1X와 JDZ VII-3 시추공이 이용되었는데 이들 2개의 시추공 사이의 거리는 북동-남서 방향으로 약 49 km이며 각각의 시추공은 지질시대를 규명하는 고생물 및 암상에 관한 자료를 포함하고 있다.

4. 광역부정합 및 층서구분

본 연구에서 탄성과 자료해석은 퇴적층에 대한 반사면에서 온랩(onlap), 다운랩(downlap)과 탑랩(toplap)등 반사면의 단절현상을 면밀하게 분석하여 3개의 부정합면을 선정하고 이들 부정합면을 탄성과 단면도에서 대비한 후 각각의 깊이를 왕복주시(two-way travel time)로 표시한 시간구조도를 작성하였다. 이들 부정합면들의 시기는 탄성과 자료와 NIKKAN 8-1X 시추공 및 JDZ VII-3 시추공 자료 대비를 통하여 알 수 있는

데 하부로부터 음향기반암 상부면, 하부 플라이오세 상부면 그리고 상부 플라이오세 상부면으로 나타났다(Fig. 3).

층서분대 및 시대결정은 봉필운 등(1989, 1990)에 의한 고생물 자료해석 결과를 인용하였다. 봉필운 등(1989, 1990)에 의하면 NIKKAN 8-1X 시추공 심도 2800 m 하부의 구간에서는 미화석 중 마이오세까지만 생존하고 플라이오세에서는 전멸한 것으로 알려진 *Hystriochosphaeropsis obscura*(심도 2930 m, 2960 m), *Spiniferites pseudofurcatus*(3050 m) 등이 산출되므로 이 구간의 지질시대는 후기 마이오세로 해석된다. NIKKAN 8-1X 시추공의 심도 1760-2800 m 구간과 JDZ VII-3 시추공의 3840-4258 m 구간에서 다양한 석회질 초미화석과 *Ammonia*를 비롯한 유공충 화석이 산출되는데 전기와 후기 플라이오세의 경계를 지시하는 *R. pseudumbilica* LAD(3.51 Ma)가 NIKKAN 8-1X 시추공의 1760 m 심도에서 인지되는 것으로 보아 이 구간은 초기 플라이오세에 해당된다. 또한 JDZ VII-3 시추공에서는 *R. pseudumbilica*가 4110 m에서 출현하나 석회질 초미화석의 산출이 희박한 상위의 심도 3840 m 직하위 층준까지 산출될 가능성이 많기 때문에 이를 전기 플라이오세의 상한으로 설정하였다. NIKKAN 8-1X 시추공의 심도 1070-1760 m 구간과 JDZ VII-3 시추공 심도 2340-3840 m 구간은 유공충 화석인 *Pseudorotalia yabei* Zone과 *Asterorotalia multispinosa* Zone 이 형성되고 있으며 석회질 초미화석은 *Discoaster surculus* Zone(NN16)부터 *Discoaster brouweri* Zone(NN18)까지의 생층서대를 형성하는데 이는 후기 플라이오세를 지시한다. NIKKAN 8-1X 시추공 심도 650-1070 m 구간과 JDZ VII-3 시추공의 480-2340 m 구간은 가장 다양한 해양 미화석 군집을 나타내는데 특히 플라이스토세를 지시하는 초미화석인 *Pseudoemiliana lacunosa* Zone (NN19)이 인지된다.

따라서 NIKKAN 8-1X 시추공 고생물 자료해석에 의하면 기반암은 3184 m, 마이오세 상부면은 2800 m, 하부플라이오세 상부면은 1760 m 그리고 상부 플라이오세 상부면은 1070 m에 위치한다. 속도 자료를 이용하여 이들 경계면에 대한 깊이를 탄성과자료에서 왕복주시로 변환할 수 있는데 변환된 왕복주시는 기반암은 2.42초, 마이오세 상부면은 2.2초, 하부 플라이오세의 상부면은 1.62초, 그리고 상부 플라이오세 상부면은 1.04초이다. 이에 반하여 각각의 상부면들의 깊이가 JDZ VII-3 시추공 위치에서는 다소 깊어지는 양상을 나타낸다. JDZ VII-3 시추공 고생물 자료해석에 의하

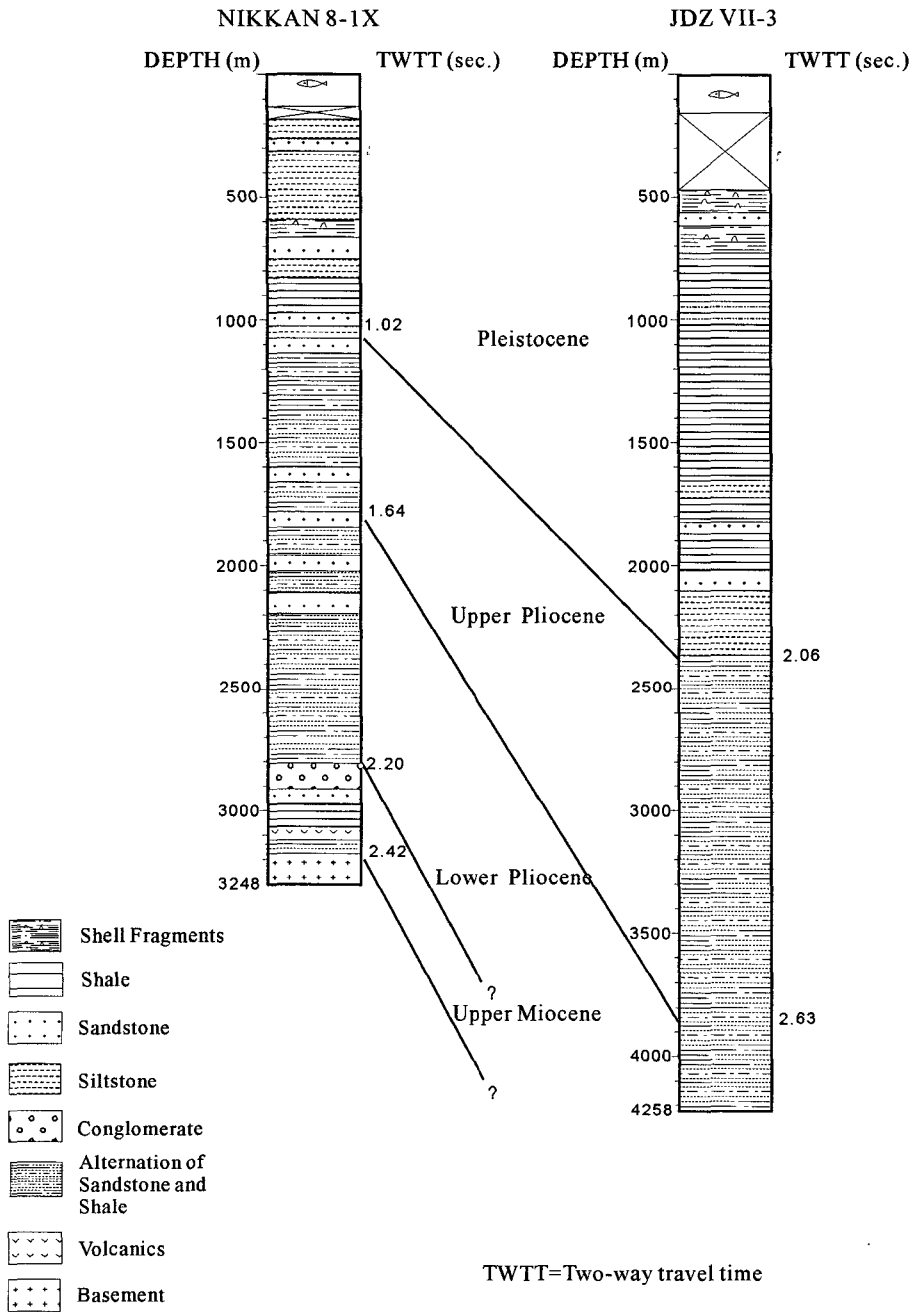


Fig. 3. NIKKAN8-1X and JDZ VII-3 wells with lithostratigraphic and biostratigraphic information. Adapted from Bong *et al.* (1989, 1990).

면 마이오세 퇴적층까지는 시추가 되지 않았으며 하부 플라이오세 상부면은 3840 m 그리고 상부 플라이오세 상부면은 2340 m에 위치한다. 속도 자료를 이용하여 변환한 왕복주시는 하부 플라이오세의 상부면은 2.63 초, 그리고 상부 플라이오세 상부면은 2.06초이다.

5. 지질구조 (광역부정합)

5.1. 음향기반암 상부면

음향기반암 상부면은 탄성과 자료에서 인지할 수 있는 부정합중 가장 하부에 놓여 있는 부정합으로 반사

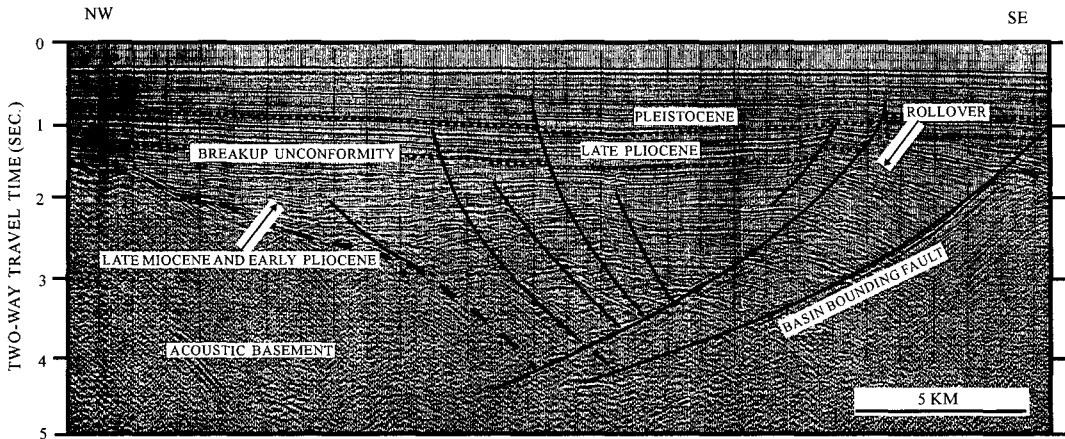


Fig. 4. Seismic reflection profile showing rifted structures, half grabens and tilted fault blocks bounded by listric faults. See Fig. 2 for location.

진폭이 매우 강하며 연속성이 뚜렷한 반사면으로 나타난다. 음향기반암 상부면 아래에서 나타나는 탄성과 반사면들은 뚜렷한 층을 이루지 않고 무반사(reflection-free)로 특징 지워지기 때문에 이 상부면을 경계로 상부에 놓여 있는 퇴적층과 하부에 놓여 있는 기반암을 쉽게 구분할 수 있다.

탄성과 단면도에 의하면 음향기반암 상부면의 구조는 경사진 단층 블록, 경사진 단층 블록들 사이에 발달한 반지구, 그리고 반지구의 경계부에 발달한 리스트릭(listric) 정단층으로 특징 지워지는데 이는 북부 오키나와트러프의 지하 지질구조가 열개 작용과 밀접한 관계가 있음을 시사 한다(Fig. 4). 그러나 왕복주시 4.0 초 이하의 깊이에서는 반사면의 진폭과 연속성이 다소 떨어지고 구조 보정(migration)이 적용되지 않은 관계로 인하여 많은 회절 현상이 나타나므로 음향기반암 상부면의 식별이 용이하지가 않다.

음향기반암의 상부면에 대한 시간 구조도에 의하면, 음향기반암의 상부면의 구조는 단층, 그리고 지역적으로 고기반암(basement high)들과 저기반암(basement low)들이 발달하여 다소 기복이 심하고 복잡하다. 음향기반암의 상부면은 대체적으로 북서에서 남동 방향, 즉 현재의 수심이 증가하는 방향으로 가면서 깊어지는 경향을 보인다. 음향기반암이 가장 얇은 곳은 왕복주시 0.5초 정도이며 가장 깊은 곳은 거의 4.5초를 초과한다(Fig. 5).

연구 지역에는 폐쇄 등심선(closed isodepth line)으로 표시되는 여러 개의 고기반암과 저기반암이 존재하는데 탄성과 단면도 해석에 의하면 대부분의 고기반암들은 인장력에 의해 형성된 경사진 정단층 블록 (tilted

normal fault block)을 나타내며, 이에 반하여 저기반암들은 경사진 단층 블록 주위에 발달한 반지구(half graben) 구조인 것으로 해석 된다(Fig. 4). 고기반암과 저기반암들은 대체적으로 북북동-남남서 방향으로 발달되어 있는데 이는 오키나와트러프의 발달방향과 거의 일치함을 보여준다. 고기반암으로 나타나는 경사진 단층 블록들은 리스트릭 단층들에 의해 경계 지워지는데 이 리스트릭 단층들은 반지구 구조의 발달 시기에 관한 중요한 자료를 제공 한다(Sunwoo, 2003). 연구 지역에서 대부분의 리스트릭 단층은 북동-남서 방향으로 발달하여 있으며 북서 방향으로 경사진 단층도 일부 존재하지만 대부분의 단층은 남동방향으로 경사를 이룬다. 리스트릭 단층들은 깊이가 깊어짐에 따라 단층의 경사가 완만해지는 특징을 보여주며 일부 지역에서는 단층 블록의 경계부에 나타나는 리스트릭 단층이 거의 해저면까지 발달하여 있다(Fig. 6). 이는 오키나와트러프의 형성과 관련되는 지구조 운동이 최근까지도 진행되고 있을 가능성이 있음을 시사한다.

반지구 구조들의 위치를 보면 북위 약 30.4°를 경계로 연구 지역 북동쪽에 위치한 3.0초 이상의 등심선(isodepth line)들로 표시되는 반지구 구조들은 남서쪽에 위치한 3.0초 이상의 등심선으로 표시되는 반지구 구조들에 비해 북서 방향으로 상당히 이동되었음을 알 수 있다. 이는 오키나와트러프 발달 시기에 인장력에 의해 형성된 반지구 구조들이 북서-남동 방향의 주향 운동에 의해 북서방향으로 상당한 변위(displacement)의 블록 이동이 있었음을 시사한다. 탄성과 자료에서 관찰되는 경사진 단층 블록들과 이들의 경계부를 따라 발달하여 있는 리스트릭 단층들의 주향 연장성을 비교

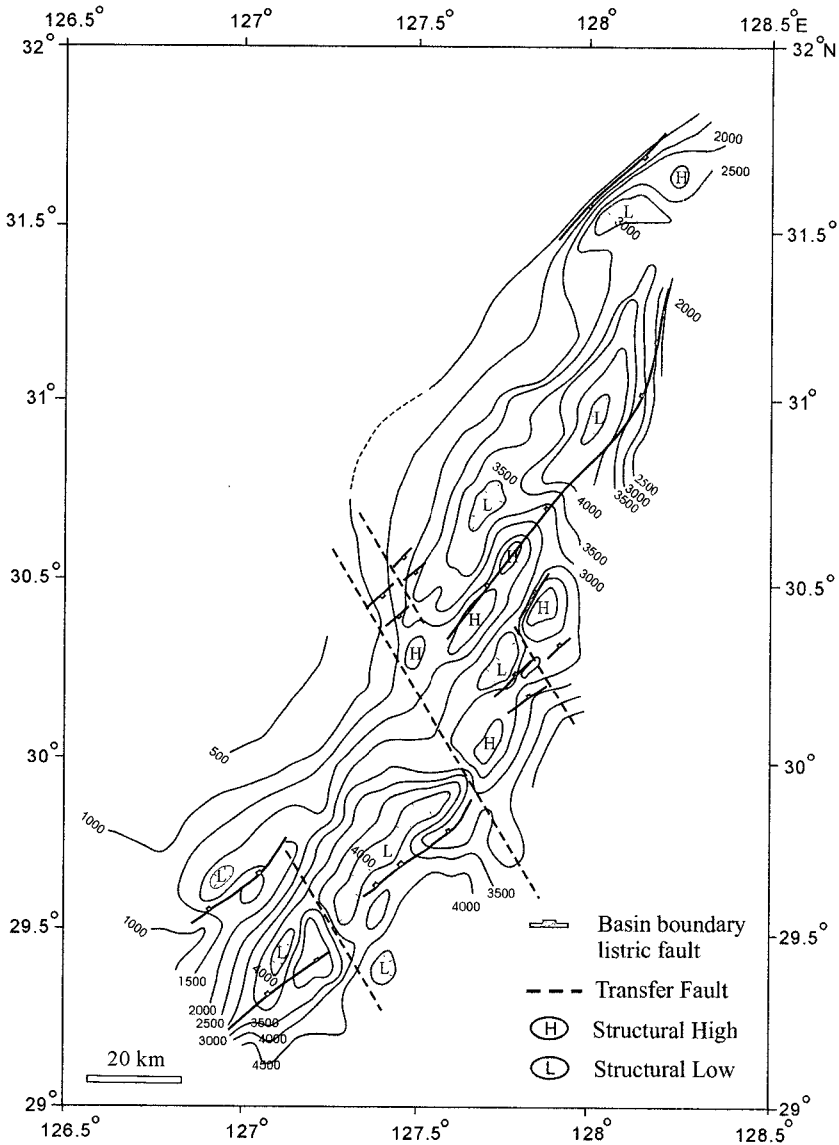


Fig. 5. Time-structure map of the top of acoustic basement. Note that transfer faults develop in the northwest-southeast direction. Contour interval 0.5 sec. in two-way travel time.

검토한 결과, 북동쪽과 남서쪽에서 나타나는 주요 리스트릭 단층들의 주향 연장성이 이들 영역의 경계면 근처에서 끝나는 점으로 미루어 보아 연구 지역의 중앙부 근처에 북서-남동 방향으로 발달한 주요한 주향 이동 단층이 존재하고 있을 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 반지구 구조의 위치, 단층의 연장성 그리고 등심선의 형태들을 고려하면 변위는 작으나 북서-남동 방향의 주 단층선과 유사한 방향성을 갖는 여러 개의 소규모의 주향 이동 단층들이 존재할 것으로 해석된다. 이러한 주향 이동 단층들은 열개 작용 시기에 정단층

운동이 활발한 시기에 정단층들의 경사 방향에서뿐만 아니라 주향 방향으로의 운동이 있을 때 형성되는 트랜스퍼 단층(transfer fault)일 것으로 사료된다.

5.2. 하부 플라이오세 상부면(하부-상부 플라이오세 경계면)

하부 플라이오세 상부면을 나타내는 반사면은 비교적 강한 진폭을 나타내며 연속성도 양호하다. 하부 플라이오세 상부면은 반지구 구조의 경계부에 나타나는 리스트릭 단층 부근에서는 하부의 퇴적층을 삭박하는

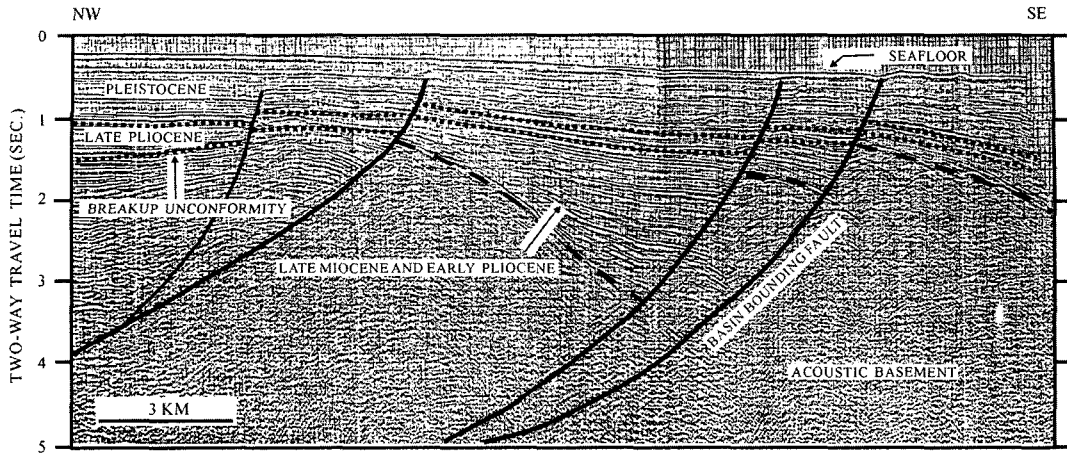


Fig. 6. Seismic reflection profile showing listric faults that develop up to the seafloor, cutting the Pleistocene sediments. See Fig. 2 for location.

침식절단(erosional truncation)의 특징을 나타낸다.

시간 구조도에 의하면 하부 플라이오세 상부면의 전체적인 구조는 음향기반암 상부면의 구조와 매우 유사하게 동쪽 및 남동쪽으로 가면서 점차적으로 깊어진다. 하부 플라이오세 상부면의 최저 심도는 왕복주시 1.0 초 이하이며 최대 심도는 3.5초에 이른다(Fig. 7). 그러나 음향기반암의 구조도에서 나타나는 폐쇄등심선으로 표시되는 반지구 구조들이 하부 플라이오세 상부면 구조도에서는 대부분 그 형태가 소멸하였는데 이는 반지구 구조의 발달이 전기 플라이오세말에 가까워지면서 거의 끝나고 반지구 구조들은 전기 플라이오세와 그 이전에 공급된 퇴적물들로 거의 채워졌다는 것을 시사한다.

탄성과 자료 해석에 의하면 반지구 구조내의 퇴적층에는 많은 정단층들이 발달하여 있다. 이 단층들은 퇴적분지에 퇴적이 일어나는 동안에 운동을 계속하여 단층으로 낙하되는 쪽에 퇴적층이 더 두껍게 쌓이는 성장단층(growth fault)의 형태를 띠며 대부분 해양 쪽으로 경사를 이룬다. 대부분의 성장단층들의 주향은 오키나와트러프의 축과 비교적 평행하다. 그러나 많은 단층들은 대부분 하부 플라이오세 상부면 근처에서 발달을 중단하게 되는데 이는 연구지역에서 단층 활동을 수반한 열개 작용이 전기 플라이오세에 가장 활발하였음을 시사한다(Fig. 4).

또한 북위 약 30.4° 를 경계로 연구지역, 남서쪽에서 하부 플라이오세 상부면의 구조는 음향기반암 상부면 구조와 마찬가지로 북서에서 남동 방향으로 가면서 깊어지며 동일한 깊이의 등심선들은 북동-남서방향의 방향성을 가진다. 그러나 북위 30.4° 부근에서 0.75초

에서 1.75초까지의 깊이를 나타내는 등심선들의 발달 방향이 북서-남동 방향으로 바뀌고 연구 지역의 북동쪽에서는 다시 연구지역의 남서쪽과 유사하게 북동-남서 방향성을 나타낸다. 이는 음향기반암 상부면의 구조도에서 뚜렷하게 나타나는 북서-남동 방향의 주향 운동이 전기 플라이오세말까지 지속된 것으로 해석된다.

5.3. 상부 플라이오세 상부면(상부 플라이오세-플라이스토세 경계면)

상부 플라이오세 상부면을 나타내는 반사면은 비교적 강한 진폭을 나타내며 연속성도 양호하다. 시간 구조도에 의하면 상부 플라이오세 상부면은 하부 플라이오세의 상부면과 마찬가지로 해양 쪽으로 가면서 점차적으로 깊어지나 최저 심도는 왕복주시 0.5초 이하이며 최대 심도는 왕복주시가 2.5초로 음향기반암 상부면과 하부 플라이오세 상부면의 깊이 변화에 비하여 비교적 완만하다(Fig. 8).

상부 플라이오세 상부면의 구조는 하부 플라이오세 상부면의 구조와 매우 유사하다. 그러나 하부 플라이오세 상부면을 자르는 일부 단층들은 상부 플라이오세 상부면까지 연장되어 발달하지만 단층의 수는 현저히 줄어들었다. 상부 플라이오세 상부면에서 나타나는 대규모의 단층들은 하부 플라이오세 상부면을 자르는 단층들이 연장되어 발달한 것으로 해석된다. 음향기반암 상부면과 하부 플라이오세 상부면의 시간구조도에서 나타나는 북위 약 30.4° 부근에서의 급격한 등심선 방향 전환이 상부 플라이오세 시간구조도에서는 매우 미약하게 나타난다.

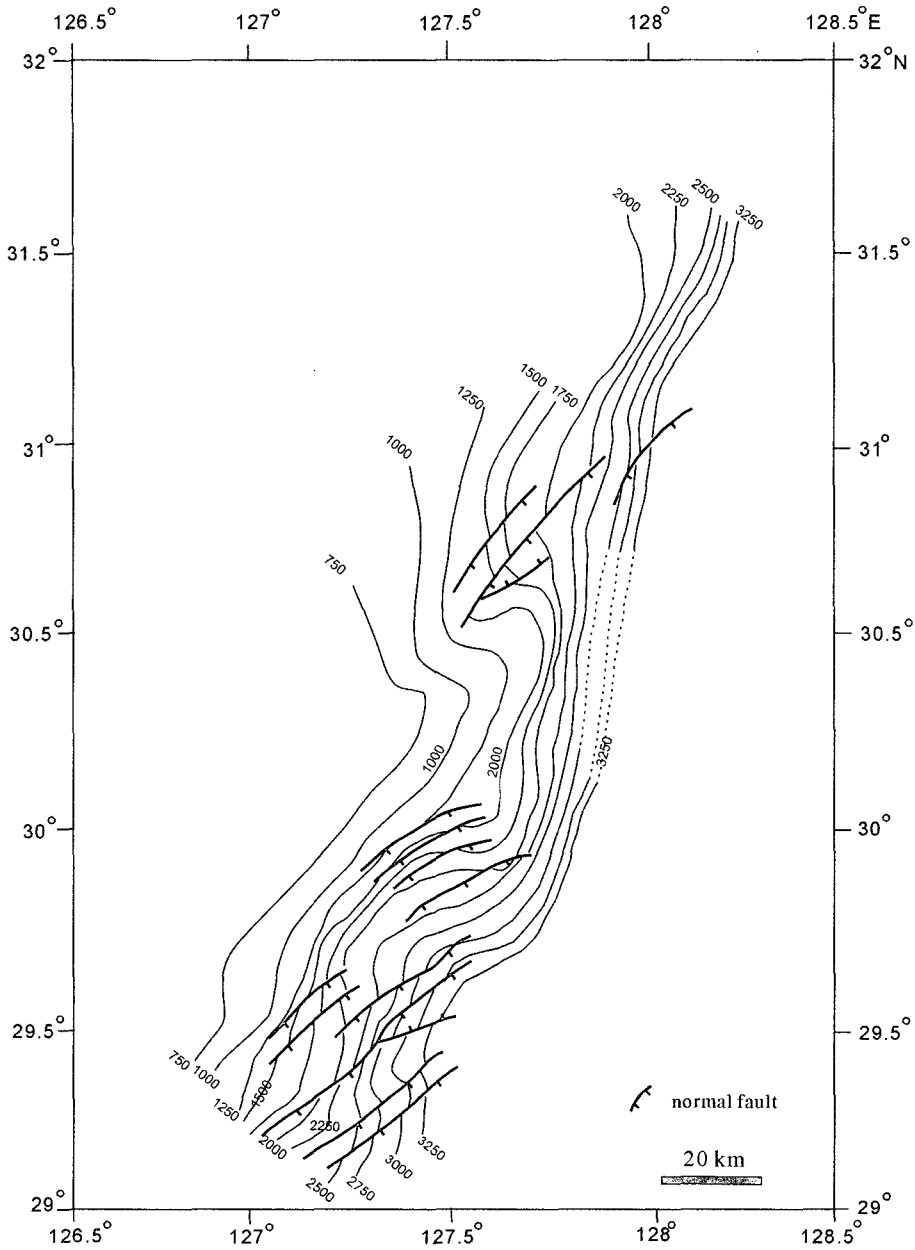


Fig. 7. Time-structure map of the top of the lower Pliocene. Contour interval 0.25 sec. in two-way travel time.

6. 구조 발달

북부 오키나와트러프의 서쪽 주변부에서의 지구조 발달사는 지하 지질구조 및 퇴적층의 퇴적 시기를 통하여 알 수 있다. 탄성파 자료와 시추공 자료를 대비한 결과 연구 지역에서 구조 발달과정은 시대에 따라 크게 4단계로 구분 된다(Fig. 9).

연구 지역은 경사진 단층 블록, 단층 블록들 사이에 위치한 반지구, 그리고 반지구의 경계부에는 리스트릭 단층들이 발달한 점으로 보아 전체적인 지구조는 인장력에 의한 열개작용과 밀접한 관계가 있는 것으로 해석된다.

연구 지역에서 시추된 시추공의 시추 심도가 비교적 얇아 마이오세 퇴적층과 하부 플라이오세 퇴적층 경계

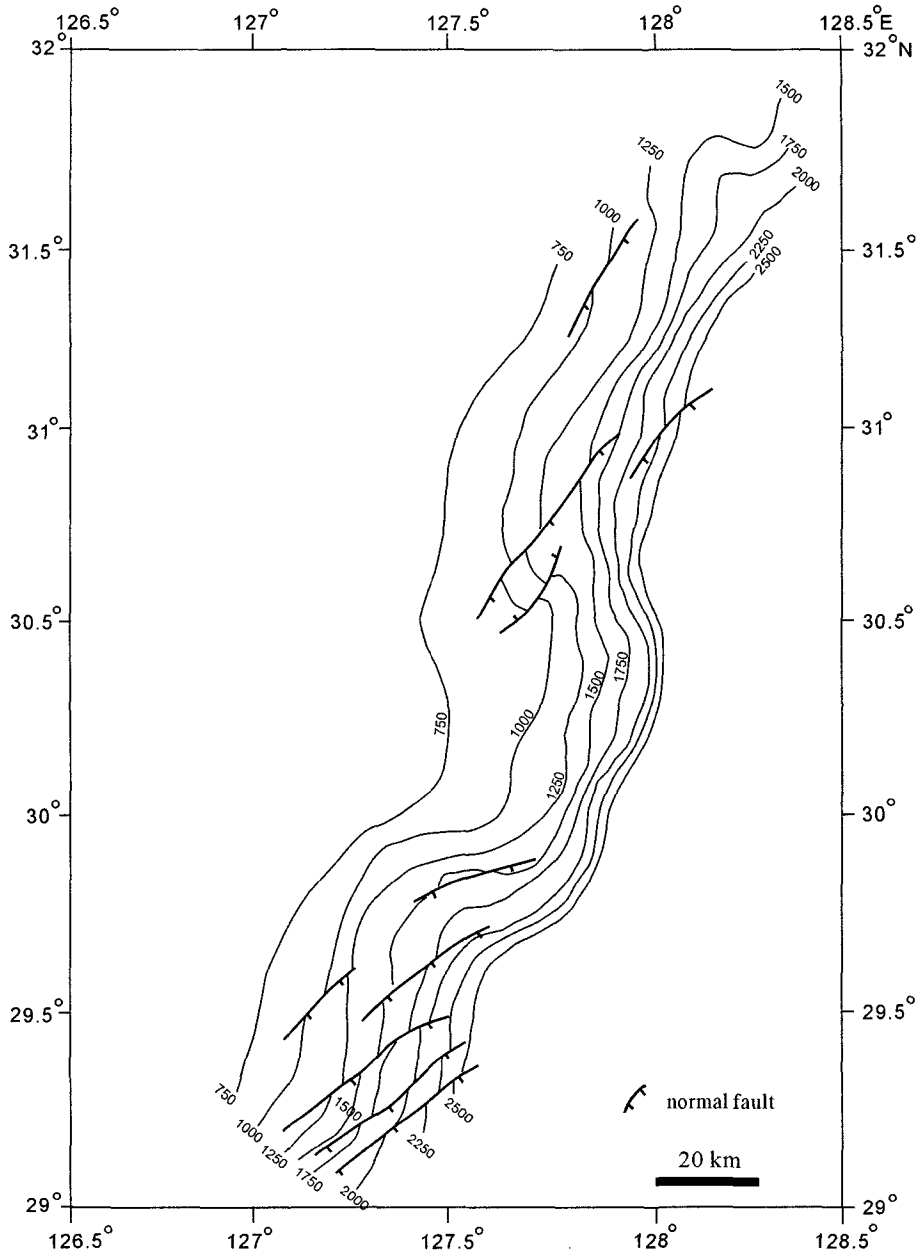


Fig. 8. Time-structure map of the top of the upper Pliocene. Contour interval 0.25 sec. in two-way travel time.

면에 대한 탄성과 층서 대비에 많은 어려움이 따르며 이로 인하여 연구 지역에서 열개 작용이 시작한 시기를 정확하게 결정하기는 어렵다. 그러나 열개 작용이 시작한 시기는 일반적으로 선열개 퇴적물(pre-rift sediment)과 동시열개 퇴적물(syn-rift sediment)의 경계부에서 나타나는 부정합면에 의해 알 수 있는데 탄성과 단면도에서 이 부정합이 뚜렷하게 확인 되지 않

았지만 시추공과 탄성과 자료 대비 결과 후기 마이오세 층에서 선열개 퇴적층의 특징을 갖는 탄성과 반사면의 존재가 확인되었다(Sunwoo, 2003). 뿐만 아니라 NIKKAN 8-1X 시추공 자료에서 상부 마이오세 층에서 화산 쇄설암(volcaniclastic rock)이 나타나는 점으로 보아 후기 마이오세에 화산활동이 있었고 이 화산활동이 열개 작용의 시작과 밀접한 관계가 있을 것으

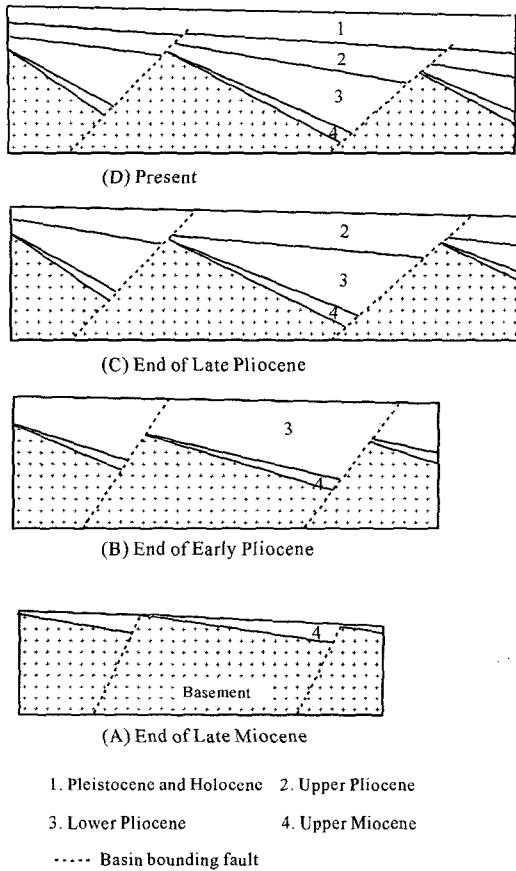


Fig. 9. Schematic illustration of structural evolution of the northern Okinawa Trough. (A) The basement fault blocks began to slip down. (B) The basement fault blocks continued slip down along faults. The fault blocks began to rotate as subsidence continued. The basins became larger and deeper. (C) Faulting, subsidence and tilting gradually decreased. (D) After the cessation of the major rifting, the area becomes structurally quiescent.

로 사료된다.

후기 마이오세에 인장력으로 인하여 기반암에 단층이 발달하고 계속된 인장력의 영향으로 기반암의 단층 블록은 주 단층면을 따라 미끄러져 내려가기 시작 한다 (Fig. 9A). 이 때에 형성된 분지는 그 규모가 매우 작으며 분지는 얇은 후기 마이오세 퇴적층으로 채워졌다.

전기 플라이오세 시기에 기반암의 단층 블록은 주 단층면을 따라 계속 미끄러져 내려가면서 주 단층 주위에서 침강과 기울어짐(tilting)이 나타난다(Fig. 9B). 시간이 지남에 따라 침강의 정도가 커지며 분지도 점점 확장된다. 본 연구 지역에서 경사진 단층 블록들 사이에 발달한 반지구에는 주로 하부 플라이오세 퇴적층이 퇴적되어 있다. 이 퇴적층은 리스트릭 단층에 의

해 경사진 단층 블록과 경계를 이루며, 리스트릭 단층의 상반에서 뚜렷한 톨오버 구조를 보이고, 경사진 단층 블록들에 의해 발달한 반지구에 퇴적된 점으로 미루어 보아 열개 작용이 활발한 시기에 퇴적된 층으로 해석 된다(Sunwoo, 2003).

후기 플라이오세 시기에는 인장력이 약해지면서 이와 연관된 단층 활동, 침강과 기울어짐이 매우 미약해진다. 따라서 기반암 단층 블록의 미끄러짐이 끝나게 되며 분지는 더 이상 확장하지 못한다(Fig. 9C). 탄성과 단면도에 의하면 반지구내의 상부 플라이오세 퇴적층 반사면은 국부적으로 경사를 이루며 톨오버 구조도 보이지만 마이오세 및 하부 플라이오세 층에 비해 미약한 편이며 대부분 경사진 단층 블록의 정상부를 덮고 있는 점으로 보아 상부 플라이오세 층은 마이오세 및 하부 플라이오세 층이 반지구를 거의 채운 이후에 퇴적된 것으로 해석된다.

플라이스토세에서 현재까지 퇴적된 퇴적층에 대한 탄성과 반사면은 거의 평행하게 나타나는데 이는 연구 지역이 이 시기에 지구조적으로 매우 안정하거나 퇴적층들이 지구조 활동의 영향을 거의 받지 않았음을 시사한다. 그러나 일부 지역에서는 경사진 단층 블록의 경계부에 발달한 리스트릭 단층들이 플라이스토세에서 현재에 이르는 시기에 퇴적된 퇴적층 내에서도 발달하고 이 단층들이 거의 해저면까지 연장 발달한 점으로 보아 현재까지도 인장력과 연관된 열개 작용이 진행되고 있을 가능성이 매우 높다(Fig. 9D).

7. 결 론

북부 오키나와트러프의 지하 지질구조는 북부 오키나와트러프의 형성이 열개 작용과 밀접한 관계가 있음을 보여준다. 음향 기반암 상부면은 열개 작용시 형성된 반지구 및 경사진 단층 블록들로 인하여 굴곡이 심하다. 반지구 및 경사진 단층 블록들은 오키나와트러프의 축 방향인 북북동-남남서 방향으로 발달하며 경사진 단층 블록들의 경계부에는 리스트릭 단층이 발달한다. 또한 본 연구 지역에는 북서-남동 방향의 주향 이동 단층이 발달하는데 이는 열개 작용에 의한 리스트릭 정 단층 발달시 단층 블록간의 변위(displacement)가 있었음을 시사한다.

북부 오키나와트러프에서 열개 작용의 시기는 열개 작용과 관계되는 구조적 특징을 통하여 알 수 있다. 열개 작용이 시작한 시기는 탄성과 자료 해석 및 시추공 자료 대비 결과 후기 마이오세일 것으로 추정되며

열개 작용은 전기 플라이오세 말까지 계속되었다. 이 시기는 인장력이 주 응력인 가운데 초기인 후기 마이오세에 화산 활동이 있었으며 전기 플라이오세에는 반지구 형태의 분지가 형성되고 기반암은 리스트릭 단층 활동의 영향을 받으며 단층 블록의 경사짐(tilting)이 나타난다. 또한 전기 플라이오세에 열개 작용과 동시에 퇴적 작용이 매우 활발하여 반지구에는 비교적 두터운 퇴적이 이루어 졌다. 전기 플라이오세 상부면이 뚜렷한 광역 부정합으로 나타나고 전기 플라이오세 이후에 퇴적된 퇴적층의 반사면은 구조 운동을 받지 않고 거의 평행하게 발달하고 있는 점으로 보아 열개 작용이 가장 활발한 시기는 전기 플라이오세 말까지 인 것으로 사료되며 열개 작용과 연관되는 대부분의 구조는 이 시기에 형성 된 것으로 해석된다.

그러나 한 가지 주목할 만한 사실은 열개 작용이 활발한 시기에 형성된 경사진 단층 블록의 경계부에 발달한 리스트릭 정단층이 지역에 따라 상부 플라이스토세 퇴적층까지 연장 발달하고 있다는 점이다. 이는 최근까지 인장력과 연관된 단층 활동이 진행되고 있음을 나타내며 이러한 단층 활동은 현재까지도 열개 작용이 진행되고 있을 가능성이 높음을 시사한다.

참고문헌

- 봉필윤, 이호영, 최성자, 전희영 (1989) 대륙붕 제7소구의 층서고생물학적 연구. 한국동력자원연구소, KR-88-3A-1, 167-208.
- 봉필윤, 이호영, 권영인, 전희영 (1990) 대륙붕 제8소구의 층서고생물학적 연구. 한국동력자원연구소, KR-89-3A-1, 33-71.
- 선우 돈 (2003) 오키나와트러프 북서 주변부의 탄성과 구조. *자원환경지질*, 36권, p. 491-499.
- Eguchi, T. and Uyeda, S. (1983) Seismotectonics of the Okinawa Trough and Ryukyu Arc. *Mam. Geol. Soc. China*, v. 5, p. 189-210.
- Furukawa, M., Tokuyama, H., Abe, S., Nishizawa A. and Kinoshita, H. (1991) Report on DELP 1988 cruises in the Okinawa Trough. Part II: Seismic reflection studies in the southwestern part of the Okinawa Trough. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, v. 66, p. 91-150.
- Herman, B.M., Anderson, R.N. and Truchan, M. (1978) Extensional tectonics in the Okinawa Trough. In: J.S. Watkins, L. Montadert and P.W. Dickinson (eds), *Geological and Geophysical Investigation of Continental Margins*. *Am. Assoc. Pet. Geol., Mem.* 29, p. 199-208.
- Karig, D.E. (1971) The original development of marginal basins in the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, v. 76, p. 2542-2561.
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Marine and Petroleum Geology*, v. 2, p. 222-240.
- Kimura, M., Uyeda, S., Kato, Y., Tanaka, T., Yamano, M., Gamo, T., Sakai, H., Kato, S., Izawa, E. and Oomori, T. (1988) Active hydrothermal mounds in the Okinawa Trough backarc basin, Japan. *Tectonophysics*, v. 145, p. 319-324.
- Kimura, M. (1990) Genesis and formation of the Okinawa Trough. *Japan Mem. Geol. Soc. Japan*, v. 34, p. 77-88.
- Lee, C. S., Shor, G. G., Bibee L.D., Lu R.S. and Hilde, T.W.C. (1980) Okinawa Trough: Origin of a Back-arc Basin. *Marine Geology*, v. 35, p. 219-241.
- 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.
- Li, D. and Ruiming, T. (1992) Petroleum Geological Characteristics of East China Sea Shelf Basin. *Indian Journal of Petroleum Geology*, v. 1, p. 1-19.
- Ludwig, W. J. (1966) Sediments and structure of the Japan trench. *Journal of Geophysical Research*, v. 71, p. 2121-2137.
- Miki, M. (1995) Two-phase opening model for the Okinawa Trough inferred from paleomagnetic study of the Ryukyu arc. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 8169-8184.
- Park, J. O., Tokuyama, H., Shinohara, M., Suyehiro, K. and Taira A. (1998) Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the southern Ryukyu island arc system. *Tectonophysics*, v. 294, p. 21-42.
- 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.
- Yamano, M., Uyeda, S., Foucher, J. P. and Sibuet, J. C. (1989) Heat flow anomaly in the middle Okinawa Trough. *Tectonophysics*, v. 159, p. 307-318.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P. (1989) Chinese Sedimentary Basins: Characteristics and Tectonic Evolution of the East China Sea. Elsevier, p. 165-179.