

남해 제주분지 해역의 퇴적환경 및 지질구조 예비 해석

허 식 · 최동림 · 유혜수 · 민동주 · 홍중국 · 이광자
한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부

Preliminary Interpretation of Depositional Environment and Geological Structure of the Jeju Basin in the South Sea of Korea

Sik Huh · Dong-Lim Choi · Hai-Soo Yoo · Dong-Ju Min · Jong-Kuk Hong · Kwang-Ja Lee
Marine Geoenvironment and Resources Research Division, Korea Ocean R&D Institute (KORDI), Korea

요 약 남해 제주분지 해역의 퇴적층서 발달 양상과 지질구조를 밝히기 위하여 1,980 line-km의 54 채널 탄성파 자료를 취득하였다. 연구지역의 퇴적분지는 제3기 후열도 분지인 동중국해 북동 해역에 위치하고 있으며, 열개작용에 의해 지구 또는 반지구 구조를 형성하였다. 연구지역내 퇴적층의 구조는 열개분지내에 쌓인 열개 이전과 열개와 동시에 쌓인 퇴적층, 그리고 광역 부정합면을 경계로 후열개 퇴적층으로 크게 구분된다. 이 3개의 퇴적층은 하부에서 상부로 가면서 열개 이전에 쌓인 올리고세 층서, 열개와 동시에 쌓인 초기 및 중기 마이오세 층서로 구성된다. 반면에 후열개 퇴적층은 후기 마이오세와 플라이오세-플라이스토세 층서로 구성된다. 제주분지 주변의 탄성파 및 시추자료에 의하면 올리고세-마이오세 퇴적층은 충적층 또는 호수 환경에서 퇴적되었음을 보여준다. 후기 마이오세에 일어난 역전의 지구구조 활동 및 이에 연관된 상부층의 침식작용 이후, 제주분지는 플라이오세에 분지가 침강하기 시작하였으며, 결과적으로 천해 해양 환경하에서 퇴적층을 형성하게 되었다.

주요어 동중국해, 남해, 제주분지, 지질구조, 퇴적환경

ABSTRACT To investigate the depositional environment and the geological structure of the Jeju Basin in the South Sea of Korea, we acquired 54-channel seismic data of about 1,980 line-km. The study area lies at the northeastern part of the East China Sea Trough, a Tertiary back-arc basin. The sedimentary basin formed by rifted activities resulted in the formation of graben and/or half-graben structures. The basin is composed of pre-rift, syn-rift and post-rift sediments bounded by regional unconformity. The pre-rift and syn-rift sediments consist of Oligocene, Early and Middle Miocene sequence, whereas the post-rift sediments consist of Late Miocene and Plio-Pleistocene sequences. Seismic and well data from the Jeju Basin indicate that Oligocene-Miocene sediments were deposited under fluvial and lacustrine depositional conditions. Following compressional tectonic movements in the Late Miocene time and a subsequent period of erosion, regional subsidence during the Pliocene time brought the Jeju Basin under marine conditions, resulting in the deposition of dominantly marine sediments.

Key words East China Sea, South Sea of Korea, Jeju Basin, Geological Structure, Depositional Environment

1. 서 론

연구지역은 한반도 남해 동부 해역과 동중국해 북동 해역에 위치하고 있다(Fig. 1). 남해 동부 해역은 남해안과 쓰시마섬 사이에서부터 제주도 동쪽 해역을

포함하며 외대륙붕에서 대륙붕단까지의 해저지형 특성을 보이는 반면, 동중국해 해역은 제주도 남쪽 전 해역을 지시하며 외대륙붕 안에서 120 m 이내의 수심 분포를 보인다. 연구지역에서 심부 탄성파 측선은 우리나라 EEZ 측선을 따라 북동-남서 방향으로 설정하

Corresponding Author : 허식(sikhuh@kordi.re.kr)

원고접수일 : 2004년 6월 14일 게재승인일 : 2004년 8월 5일

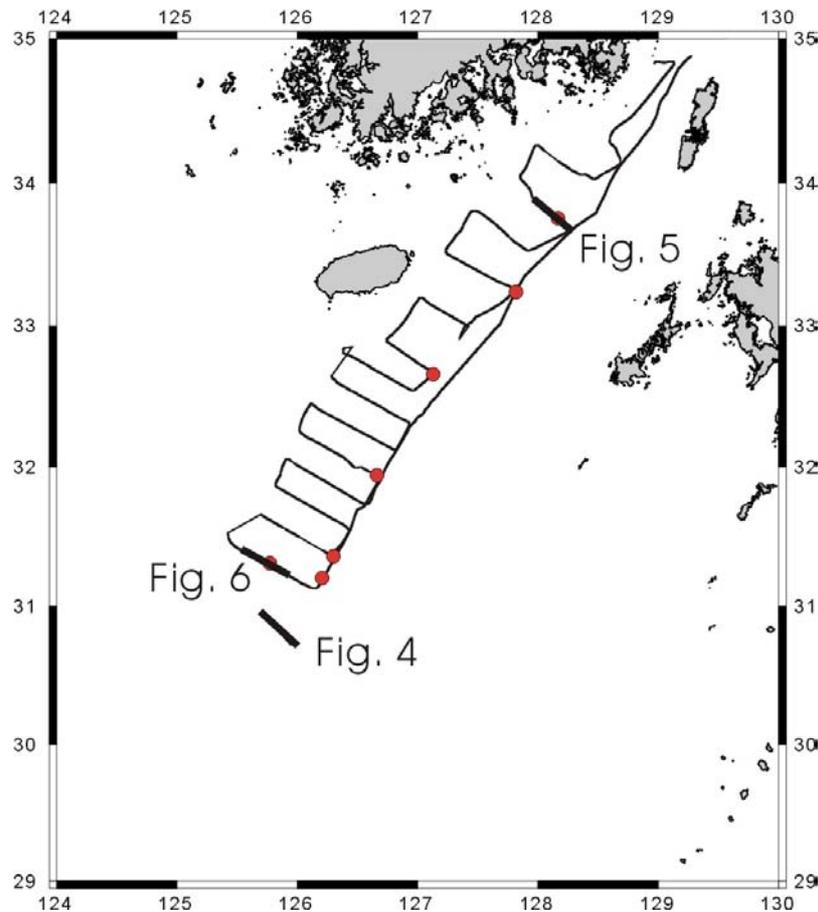


Fig. 1 Seismic survey tracks (lines) and exploratory wells (circles) from KNOC in the study area.

였다.

연구지역의 광역지질 및 구조적 특징을 살펴보면, 전체적으로 한반도 남쪽 지괴가 남해 해저까지 연장되는 체민 융기대(Zhemин Uplift)가 제주도를 포함하여 광역적으로 발달하였다(Fig. 2). 또한 동쪽을 향해 동중국해 분지(East China Sea Basin), 타이완-신지 습곡대(Taiwan-Sinzi Uplift Belt), 오키나와 트러프(Okinawa Trough), 그리고 류큐 습곡대(Ryukyu Folded Uplift)의 퇴적분지 및 융기대가 북동-남서 방향의 장축으로 나란히 배열하면서 발달한다. 이들은 북서에서 남동쪽으로 가면서 생성 시기와 퇴적층의 지질 연대가 점차 젊어지고 있다. 동중국해 분지는 몇 개의 고구조 융기대들로 구분된 소분지들로 구성되어 있으며, 특히 우리나라 남해 지역에는 도미분지와 제주분지가 위치하고 있다. 체민 융기대 및 동중국해 분지의 기반암은 원생대의 변성암류에서 백악기의 화성암

류로 구성된 것으로 알려졌다(곽영훈 외, 1989; Zhou *et al.*, 1989). 타이완-신지 습곡대는 동중국해 분지의 남동쪽 고구조대로서 고제3기에 형성되었으며, 그 하부 구조는 습곡작용을 받은 퇴적층과 화성암류로 구성되었다(Emery *et al.*, 1969; Wageman *et al.*, 1970). 오키나와 트러프는 마이오세 중기부터 후기에 필리핀해 판(Philippine Sea Plate)이 서쪽으로 섭입운동(subduction)을 시작함에 따라 열리기 시작하여 후열도 분지(back-arc basin)가 형성되었으며, 평균 수심이 약 500 m 이상이고 남서쪽으로 향하면서 깊어지는 양상을 보인다. 오키나와 트러프는 확장 지구조 운동에 의해 정단층 구조가 분지의 연변부에 생성되었으며, 기반암 및 퇴적층내에 블록 단층들에 의해 절단된 정단층 구조들이 잘 발달되어 있다. 또한 활발한 화산활동, 지진발생 그리고 분지내 높은 지열류량은 오키나와 트러프가 아직도 확장 지구조 운동을 받고 있음을 시사

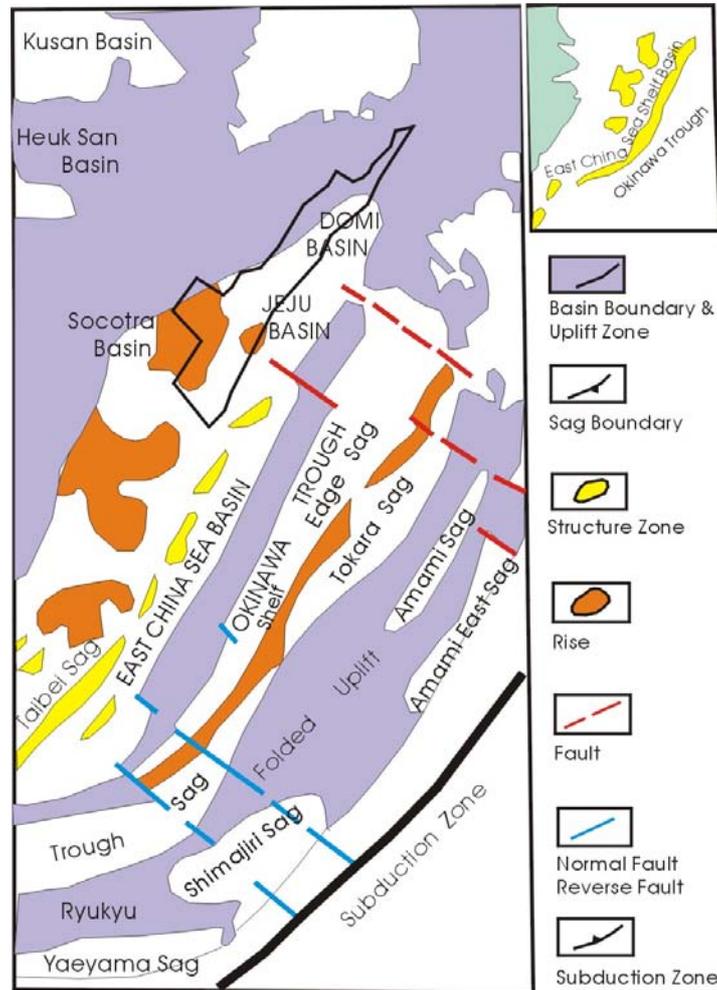


Fig. 2 Structural elements developed in the East China Sea (Zhou *et al.*, 1989). The Jeju Basin forms as the part of the northeastern East China Sea Shelf Basin, which extends along a NE-SW trend. Polygon represents the study area.

한다(Zhou *et al.*, 1989). 류큐 습곡대는 고생대와 중생대 화성암 및 변성암, 제3기 퇴적암류 및 화산암류로 구성되었으며, 이 구조는 서쪽의 오키나와 트러프와 동쪽의 필리핀해 판 사이의 경계 구조대이다. 필리핀해 판이 류큐 습곡대 하부로 하강 섭입되면서 형성된 류큐 섭입대(Ryukyu Subduction Zone)는 깊은 해저지형을 이루며 발달되어 있다.

연구지역은 지질구조적으로 북서쪽의 체민 융기대와 동중국해 분지의 소분지에 해당되는 도미분지와 제주분지로 구성된다. 이 해역은 한국석유공사에서 석유개발을 위해 탐사를 수행하였으나 남해 해양분지의 전반적인 형성 과정 및 발달 상황 등의 연구는 아직 미흡

하다. 따라서 이 연구에서는 다중채널 탄성과 단면도의 해석을 통해 남해 퇴적분지내 퇴적층서의 발달 양상과 지질구조를 밝히는데 그 목적이 있다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구에서는 다중채널 탄성과 단면도와 기존에 발표된 한국석유공사의 석유 시추자료들을 이용하였다. 탄성과 자료들은 한국해양연구원 소속의 종합 해양연구선인 온누리호를 이용하여 2002년 4월에 획득하였으며, 총 탄성과 자료 길이는 약 1,980 line-km

이다. 자료 획득시 연구선의 항속은 5 노트를 유지하였으며, 위치 측정은 GPS 시스템을 이용하였다. 탄성과 축선은 주로 북동-남서 방향의 EEZ 경계축선 1개와 북서-남동 방향의 15개 축선으로 구성되었으며 (Fig. 1), 북서-남동 방향 축선은 이들 축선들이 서로 연결되도록 보충 축선들을 설정하였다.

연구지역내 해양 퇴적분지의 암상, 퇴적환경 및 지질시대 등의 지질정보를 위해 7개 시추공 자료들(Sora-1, Domi-1, Dragon-1, KV-1, Okdom-1, Geobuk-1, PZ-1)을 이용하여 하였다(오재호 외, 1994; 한국석유공사, 1998). 퇴적층서의 층준을 탄성과 단면도와 시추공에서 분류한 퇴적단위를 서로 대비하여 이에 해당되는 탄성과 반사층리면을 각각 선정하였다. 퇴적단위는 하부의 음향 기반암에서부터 상부로 가면서 올리고세 층

(Oligocene Unit), 초기 마이오세 층(Early Miocene Unit), 중기 마이오세 층(Middle Miocene Unit), 후기 마이오세 층(Late Miocene Unit), 그리고 플라이오세-플라이스토세 층(Plio-Pleistocene Unit)으로 구성된다.

탄성과 단면 해석은 상기의 과정으로 퇴적단위를 구분한 후, 각 퇴적단위의 반사층리의 발달 특성, 즉 탄성과 퇴적상을 분석하였다. 탄성과 퇴적상의 분석은 반사층리의 발달형태, 진폭, 연속성 등을 통해 퇴적층내의 전반적인 암상, 층서, 퇴적환경을 파악하였다. 그리고 각 연대별 퇴적단위의 퇴적 층후도를 작성하여 각 퇴적단위의 두께분포 및 퇴적 중심부 등을 해석하였고, 탄성과 단면도상에 발달한 단층 등을 분석하여 지질구조 해석을 수행하였다(Fig. 3).

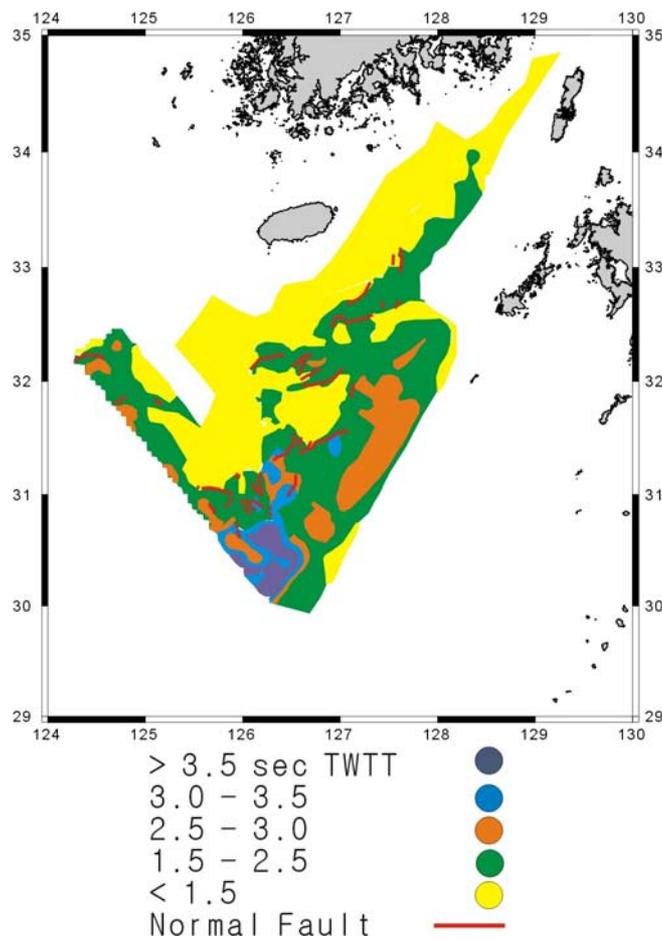


Fig. 3 Time structure map of top acoustic basement modified from KNOC (1998). More than 4 km of Tertiary strata are preserved in the southern part of the Jeju Basin. The strata thin to less than 1.5 km in the northern part of the basin, which are deformed by normal faults and volcanic activities. Contour intervals are 500 ms in two-way travel time.

3. 층서해석

가. 올리고세 층서

음향기반암 위에 놓여 있는 이 층서는 단층으로 경계된 퇴적분지내에 한정되어 나타난다(Figs. 3 and 4). 이 퇴적층은 주로 조사구역의 동쪽 연변부 및 남동쪽에 분포하며, 제주분지와 도미분지의 중심부에 일부 걸쳐있다. 탄성과 퇴적상(seismic facies)으로써 진폭은 다양하지만 지역적으로 강한 반사층리가 나타나며, 연속성은 불량하며 혼탁형(hummocky) 퇴적 형태도 나타난다. 음향 기반암 위에 바로 퇴적되어 분포하면서 단층 경계로 제한되어 분포하는 것으로 보아 초기 퇴적분지가 열리면서 쌓인 충적 퇴적층으로 해석된다. 불연속적이고 다양한 진폭의 반사층리와 썩기 형태의 외부형태도 충적층을 간접적으로 지시한다. 시추자료에서 보여주는 지질정보는 하상(fluvial) 또는 호수(lacustrine) 퇴적환경을 지시하나(오재호 외, 1994), 연구지역 북동부에 위치한 시추공에서는 상부 올리고세층에서 처음으로 shoreface가 나타나고 있다(Yin and Liu, 1990; 한국석유공사, 1998).

나. 초기 마이오세 층서

이 퇴적층의 분포범위는 올리고세 퇴적층서보다 비교적 넓게 분포하나, 역시 단층으로 경계된 퇴적분지내에 대부분 분포하여 주로 조사지역의 남동 연변부와 제주도 남쪽 해역에 주로 분포한다(Figs. 4 and 5). 탄성과 퇴적상은 지역에 따라 약간의 차이는 있으나 대체로 불연속 내지 보통의 반사층리 연속성을 보이며 진폭도 다양하다. 또한 부분적으로 혼탁형 퇴적상도 확인된다. 퇴적층의 두께는 최대 0.8초까지 나타난다. 탄성과 퇴적상으로부터 퇴적환경을 유추하기는 쉽지 않으나 시추자료의 분석 결과에 의하면 주로 호수 또는 하상 환경하에서 형성된 퇴적층으로 분석하였다(한국석유공사, 1998).

다. 중기 마이오세 층서

본 층서는 조사지역의 남쪽에 넓게 분포한다. 제주도 바로 남쪽 지역부터 단층으로 경계된 분지에 국한적으로 분포하다가 다시 북쪽으로 가면서 기반암 융기대가 발달한 지역에는 이 층이 나타나지 않는다. 본 퇴적층서가 집중적으로 발달한 남쪽 지역의 퇴적 층후도 양상을 보면 북서에서 남동쪽을 향해 서서히 두꺼

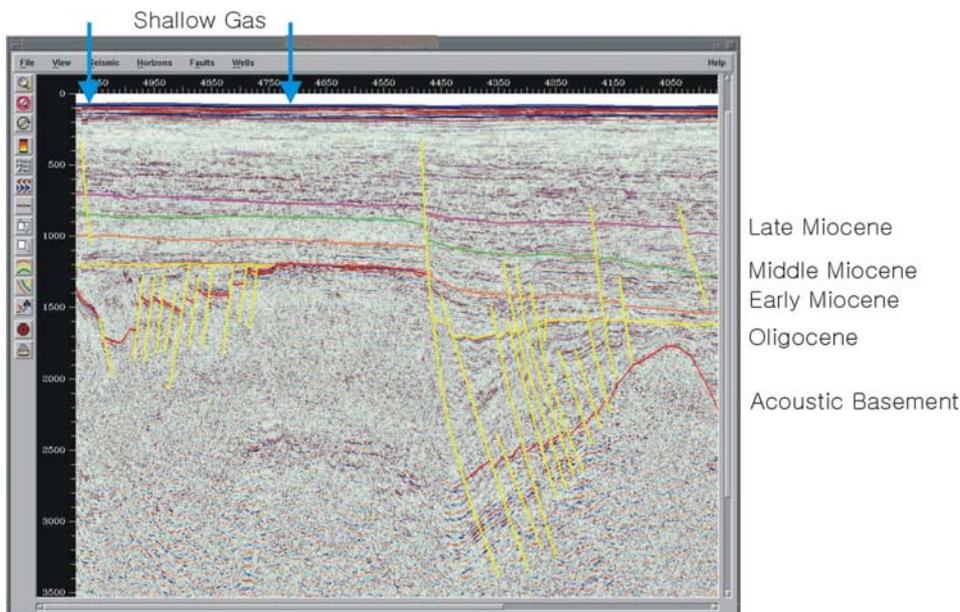


Fig. 4 Seismic section showing amplitude anomalies caused by shallow gas which was migrated along nearby normal faults after generated in the deeper part of the basin. Basal sequence representing an initial basin-filling deposit of the Oligocene age has fan-shaped morphology and is characterized by steep initial dips.

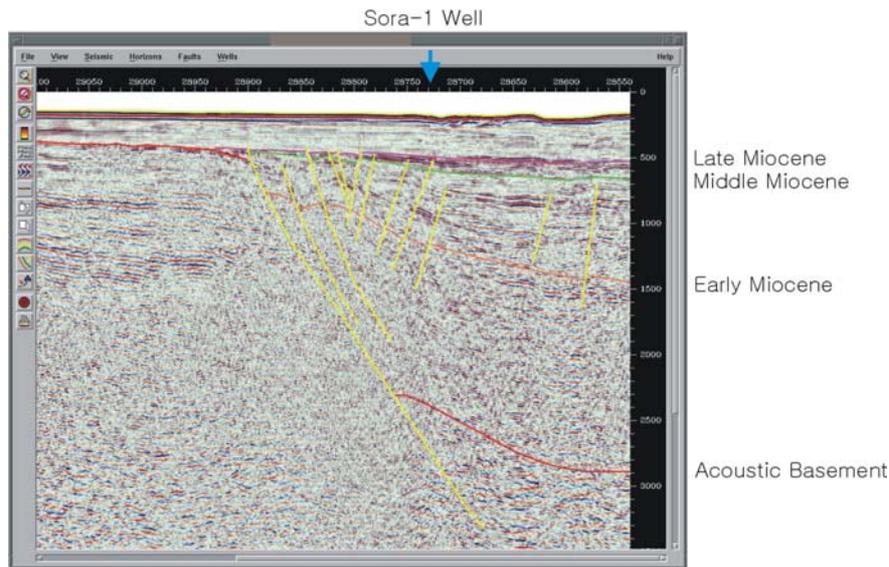


Fig. 5 Seismic section showing horizons correlated with Sora-1 well. High angle faults cut layers up to Miocene unit. In the Late Miocene the study area began to experience transpression. Subsequently, there was a regional erosion event that planed-off the inversion structures (16 m thickness of sediment remained between Middle and Late Miocene ages).

워지는 경향이 두드러지게 나타난다. 탄성과 퇴적상은 비교적 연속성이 좋고 진폭이 보통인 반사층리로 나타난다. 시추공 PZ-1 주변 지역에서 1초 깊이에 강한 진폭과 연속적인 이상 반사층리(reflection anomaly)가 발달하였는데, 이를 탄화수소의 존재를 지시하는 특성으로 여겨 시추하였으나 화산 분출암(volcanic flow)으로 판명되었다(Fig. 6). 시추자료에 의하면 초기 마이오세 퇴적층과 동일한 호수-하상 퇴적환경으로 해석되어(오재호 외, 1994), 마이오세 초기에서 중기까지 주로 내대륙 퇴적분지에 발달한 호수 또는 하상 환경 하에서 형성된 퇴적층서로 판단된다.

라. 후기 마이오세 층서

이 층서는 조사지역 북동쪽의 기반암이 얇은 지역을 제외하고 대부분 지역에 넓게 분포한다. 최대 퇴적층 두께는 0.5초 정도이며, 남동쪽을 향해 서서히 두꺼워진다. 탄성과 퇴적상은 반사층리의 연속성이 비교적 양호하며, 진폭이 작은 편이다. 후기 마이오세 퇴적층은 당시에 일어난 역전의 지구조 활동에 의해 상부층이 용기되었다가 삭박되어 16 m 두께의 퇴적층만 남긴 침식구조를 보여주고 있다(Fig. 5). 시추자료에 의하면 호수 및 하상 환경하에서 퇴적되었으며, 부

분적으로 해양환경의 영향을 받은 것으로 해석되었다(한국석유공사, 1998).

마. 플라이오-플라이스토세 층서

최상부에 해당되는 퇴적층으로 전 조사지역에 넓게 분포한다(Figs. 4, 5 and 6). 최대 퇴적층 두께는 0.9초 정도이며, 남쪽 또는 남동 방향을 향해 서서히 두꺼워진다. 탄성과 퇴적상은 연속성이 비교적 좋고 진폭이 작은 반사층리가 우세하게 나타난다. 시추자료 분석결과는 천해 해양 환경하에서 퇴적된 층서로 해석된다(오재호 외, 1994).

4. 지질구조 해석

탄성과 단면도상에는 평탄한 기반암이 단층들에 의해 절단되어 고기반암(basement high) 지대와 저기반암(basement low) 지대가 구분되어 나타난다(Figs. 4, 5 and 6). 고기반암이 발달한 지역은 주로 연구지역의 북서 지역이고, 저기반암 지역은 남동쪽에 분포함에 따라 퇴적층의 발달양상도 북서쪽은 얇게 분포하며, 남동 지역은 3초 정도까지 두껍게 쌓여 있다. 주

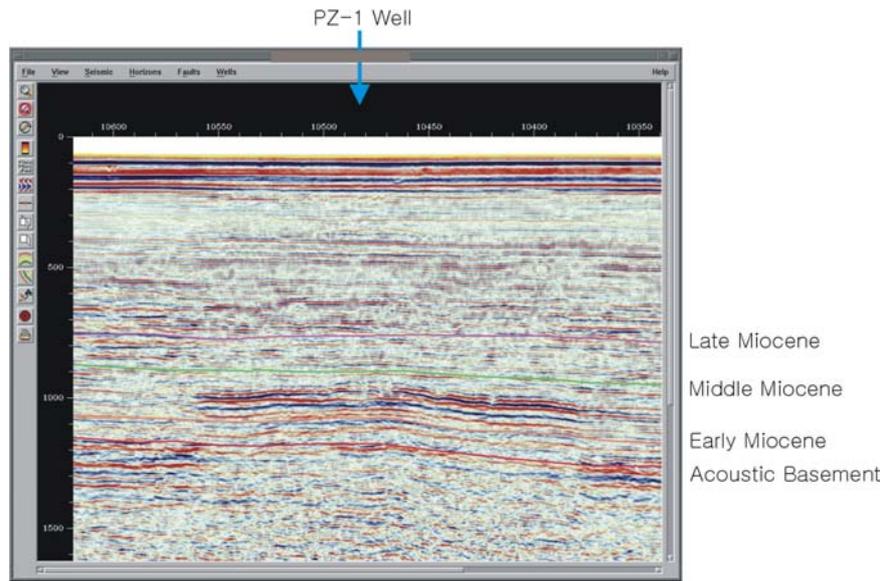


Fig. 6 Seismic section shows a strong amplitude anomaly caused by a volcanoclastic layer near the PZ-1 well. An evidence of effects of Miocene igneous intrusions known as diorite sills appears several wells in the study area.

단층대는 체민 용기대와 동중국해 분지를 구분하는 구조적 경계선이며, 북동-남서쪽의 방향성을 갖는다.

저지대의 분지 형태는 지구(graben) 또는 반지구(half graben) 구조를 이루며, 초기 분지형성 시기에 장력 지구조 운동(extensional tectonism)이 연구지역에 작용했음을 알 수 있다. 즉, 연구지역에는 분지를 경계하는 블록 단층(block fault) 및 리스트릭 단층(listric fault) 구조들로 특징되는 열개분지(rifted basin)가 형성된 것으로 해석된다. 특히, 주 단층대에서는 기반암 단층구조가 상부 퇴적층을 지나 거의 해저면 하부 지역까지 연장 발달하여 최근까지도 확장성 지구조 운동이 연구지역에 미치고 있음을 추정할 수 있다.

연구지역의 북동쪽 퇴적분지는 기존에 형성된 퇴적분지가 후기 마이오세에 일어난 역전의 지구조 활동에 의해 상부층이 융기되었다가 삭박된 퇴적구조를 보여주고 있다(Fig. 5). 이와 같이 마이오세에는 지구조적으로 상승운동에 연관된 기반암 상승부에 석유자원을 저류할 수 있는 조건의 구조들이 존재하고 있어 이 구조에 대한 시추가 수행되었다. 또한 연구지역 남서쪽의 올리고세 퇴적층은 지구내에서 두꺼운 퇴적층을 형성하고 있어(Fig. 5), 강한 반사파 진폭 이상, 경사진 면을 보이는 불연속면 하부의 퇴적층 및 단층에

의해 이루어진 구조 등의 석유지질학적 저류층 구조를 보여주고 있다. 특히 연구지역 남동쪽 해저면 하부에서 관찰되는 천부가스(shallow gas)에 의한 진폭 이상은 심부에서 생성된 탄화수소가 단층 등을 따라서 천부로 이동해 온 것일 수도 있으므로(Fig. 4), 추후 탄성과 진폭 이상대의 정확한 분포 범위와 양상, 저층 구조와의 관계 등을 규명해야 한다.

6. 토의 및 결론

연구지역에는 남해안에서 제주도 지역까지 기반암 용기대가 발달된 지질구조를 보이고 있다(Fig. 2). 용기대의 남동쪽으로는 북동-남서 방향의 단층선을 경계로 몇 개의 퇴적분지들이 분포하는데, 북동쪽의 도미분지와 남서쪽으로 가면서 제주분지가 발달되어 있다.

연구지역에서 획득한 대표적인 다층채널 탄성과 단면도면을 살펴보면, 기반암 용기대가 매우 평탄하고 강한 반사층리를 보이면서 넓게 분포한다. 그리고 평탄한 기반암은 단층작용에 의해 단층 블록으로 경계되는 열개분지가 발달하였는데, 이 분지는 지구 또는 반지구 열개작용에 의해 형성된 것으로 생각된다. 열개분지 기반암 경계 단층선은 후열개 퇴적층(post-rift

sediment) 상부까지 연장되어 발달되었으며, 이는 열개분지가 형성된 이후에도 주 단층선의 단층활동이 활발하게 작용하고 있음을 지시한다.

연구지역내 퇴적층의 구조는 열개분지내에 쌓인 열개 이전과 열개와 동시에 쌓인 퇴적층(pre-rift and syn-rift sediments), 그리고 광역 부정합면을 경계로 후열개 퇴적층으로 크게 구분된다. 이 3개의 퇴적층은 하부에서 상부로 가면서 올리고세, 초기 및 중기 마이오세 층서로 구성된다. 이들의 탄성과 퇴적상을 살펴보면 하부층이 불연속적이고 혼탁상(discontinuous and chaotic facies)의 특징을 보이는 썩기 형태로 분포하는 반면에, 상부층은 연속성이 비교적 양호한 혼탁형의 특징을 보인다. 후열개 퇴적층서는 후기 마이오세와 플라이오세-플라이스토세 층서로 구성된다. 이들의 퇴적상은 평탄하고 연속성이 좋은 반사층리가 광역적으로 분포하며, 하부에서 상부 퇴적층으로 가면서 평행한 반사층리로 변한다. 반사층리 진폭(reflection amplitude) 특징을 살펴보면 하부의 강한 반사 진폭에서 상부로 가면서 점차 약한 진폭으로 바뀐다. 더불어 반사 주기(reflection frequency)는 하부에서 상부로 가면서 저에서 고 반사주기(low to high frequency)의 특징을 보이는데, 이는 암상 및 퇴적환경의 변화가 시대적으로 변해 왔음을 시사한다.

사 사

본 연구는 “2002 배타적 경제수역 해양자원조사

(CRPM153-00-1483-5)” 사업 결과의 일부이다. 자료 처리와 정리에 힘써 주신 한국해양연구원 해저환경·자원연구본부 참여자들, 그리고 온누리호 선장의 전 승조원들에게 감사드립니다.

참고문헌

- 곽영훈 외, 1989. 대륙붕 한일공동구역 제7소구의 석유지질 및 지화학적 연구, 한국동력자원연구소, KR-88-3A-1, 51-106.
- 오재호 외, 1994. 석유자원연구(I), 한국자원연구소, KR-94(C)4-1, 431p.
- 유해수 외, 2002. 2002 배타적 경제수역 해양자원조사, 해양수산부, CRPM153-00-1483-5, 7771p.
- 한국석유공사, 1998. 국내 대륙붕 생층서 연구(제주분지), 한국석유공사, 380p.
- Emery, K.O., *et al.*, 1969. Geological structure and some water characteristics of the East China Sea and the Yellow Sea, U.N. ECAFE CCOP, Tech. Bull., 2, 3-43.
- Wageman, J.M. *et al.*, 1970. Structural framework of East China Sea and Yellow Sea, AAPG Bull., 54, 1611-1643.
- Yin, P.P. and Liu, S.S., 1990. Characteristics and hydrocarbon explanation of the East China Sea, In: Intl. Symp. on the tectonic evolution and petroleum potential of the East China Sea, Stanford Univ., 80-100.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P., 1989. Characteristics and tectonic evolution of the East China Sea, In X. Zhu ed., Chinese Sedimentary Basins: Sedimentary Basins of the World 1, Elsevier, 165-179.