

남해 대륙붕 최남단 제주분지 및 소코트라분지의 지구조 진화와 퇴적환경

고창성¹ · 윤석훈^{1,*} · 이동권² · 유해수²

¹제주대학교 지구해양학과

²한국해양과학기술원

요 약

우리나라 남해 대륙붕 최남단 해역의 제주분지와 소코트라분지에서 지구조 발달과정과 이에 수반된 퇴적환경의 변화를 해석하기 위하여 약 3,150 L-km의 다중채널 탄성파탐사 자료에 대해 탄성파층서, 지질구조 및 탄성파상 분석을 실시하였다. 탄성파탐사단면 상에서 퇴적분지들은 주로 기반암 돌출대 사이의 저지대(basement lows)에 분포하며, 분지 내 퇴적층들은 광역부정합면을 경계로 하여 4개의 메가시퀀스(megasequence)로 구분된다. 이들 층단위들은 기존 석유탐사 시추공에서 분석된 미화석 생층서와 대비해보면, 각각 에오세(MS1), 올리고세(MS2), 마이오세(MS3), 플라이오-플라이스토세(MS4)의 층으로 해석된다. 지질구조로는 주로 소코트라분지에서 열개작용을 지시하는 기반암의 블록회전과 이와 연관된 정단층들이 에오세층까지 발달하며, 상위 층준에서는 습곡구조와 정단층들이 올리고세층에 국지적으로 나타난다. 반면에, 제주분지에서는 정단층이 거의 확인되지 않고 주로 큰 규모의 역단층들과 습곡구조들이 마이오세층까지 발달되어 있으며 상위 층준에서는 뚜렷한 지질구조가 없는 것으로 보인다. 탄성파상분석에서는 반사면들의 반사특성과 형태를 기준으로 6개의 탄성파상이 분류되었는데, 각각 지질학적 기반암(B1), 화산암-퇴적물 복합체(B2), 내대륙붕 해성퇴적층(S1), 하-호성 육성퇴적층(S2), 해안퇴적층(S3), 화산암맥 또는 화산체(S4) 등으로 해석된다. 이와 같은 층서, 지질구조 및 탄성파상 분석결과를 종합하여 제주분지와 소코트라분지에 대한 지구조적 발달과정과 이에 연계된 퇴적환경의 변화를 재구성하여 제시하였다.

주요어: 남해, 탄성파층서, 소코트라분지, 제주분지, 퇴적환경

Chang-Seong Koh, Seok-Hoon Yoon, Dong-Kweon Lee and Hai-Soo Yoo, 2016, Tectonic evolution and depositional environments of Jeju and Socotra basins in the southernmost continental shelf of the South Sea, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 355-371

ABSTRACT: This study focuses on the tectonic evolution and depositional environment change of the Jeju and Socotra basins in the southernmost continental shelf of the South Sea, Korea, based on the analyses of seismic stratigraphy, geologic structures, and seismic facies on the multi-channel seismic profiles acquired by KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). The Jeju and Socotra basins commonly occur as the local basement lows surrounded by large-scale basement highs. The basin-filling sedimentary sequences are divided into 4 megasequences (MS1-MS4) by regional unconformities and their correlated conformities. The chronostratigraphy of megasequences from Eocene to Plio-Pleistocene is established based on published biostratigraphic data from the existing hydrocarbon exploration wells. Geologic structures in the Socotra Basin are characterized by rift-stage normal faults involved with basement rotation, and subsequent folds and local normal faults in Oligocene sequence interval. The Jeju Basin, by contrast, shows predominant occurrence of reverse faults and folds within Eocene to Miocene sequences. Based on the acoustic characters and reflection geometries, 6 types of seismic facies are classified, and interpreted as geologic basements (B1), volcanic-sedimentary complexes (B2), inner-shelf deposits (S1), fluvio-lacustrine deposits (S2), coastal deposits (S3), and volcanic sills or volcanic edifices (S4), respectively. By integrating all these results, we present the reconstructions of tectonic evolution and depositional environment change in Jeju and Socotra basins.

Key words: South Sea, seismic stratigraphy, Socotra Basin, Jeju Basin, depositional environment

* Corresponding author: +82-64-754-3436, E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

(Chang-Seong Koh and Seok-Hoon Yoon, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, 102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province 63243, Republic of Korea; Dong-Kweon Lee and Hai-Soo Yoo, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 787 Haean-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 15627, Republic of Korea)

1. 서 언

우리나라 남해 배타적 경제수역(EEZ: Exclusive Economic Zone)은 수심이 60~150 m 내외인 전형적인 대륙붕 천해역으로서, 이곳에는 중생대 백악기 말에서 신생대 제삼기초에 형성되기 시작한 것으로 알려진 4개의 퇴적분지(제주, 소코트라, 소라, 도미 분지)를 중심으로 최대 4 km 이상의 신생대 육성 및 해성층이 분포한다(Oh *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2006) (그림 1). 남해대륙붕 신생대 퇴적분지들은 1970년 대부터 석유나 천연가스의 부존가능성이 높은 것으로 평가되면서, 분지 내 제삼기층을 대상으로 총 12개의 탐사공이 시추되었고, 30,000 L-km 이상의 탄성파탐사 자료가 취득된 것으로 알려져 있다(Yoon *et al.*, 2009). 그동안 석유자원 탐사과정에서 취득된 지질 및 지구물리 자료들은 한국석유공사와 한국지질자원연구원 등을 통해 층서(탄성파 및 고생물), 구조지질, 석유지질 분야에서의 분석이 이루어져 탐사 보고서가 출간됨으로써(Yoon *et al.*, 2009 참고), 이 지역 에너지자원 평가뿐만 아니라, 한반도 남부해역의 신생대 지질진화사 정립에 초석이 되었다.

그러나 아쉽게도 이러한 자료의 대부분은 비공개로 자원탐사 및 평가를 위한 연구사업에 이용되었기 때문에, 그동안 일반 연구자들이 이들 기초자료나 분석결과를 활용하여 학술적 연구를 수행할 기회는 그다지 많지 않았다. 다만, 소수의 자료나 분석결과만이 학술지 논문을 통해 발표되었는데, 이 논문들의 대부분은 석유탐사의 연장선상에서 이루어졌기 때문에 특정 유망구역(특히, 한일공동광구)을 중심으로 분석결과가 제시되거나(Yun *et al.*, 1999; Kwon and Boggs, 2002; Park *et al.*, 2008; Cukur *et al.*, 2012), 다수의 남해대륙붕 소분지들을 포괄하는 광역적 측면에서 분지해석이 다루어졌다(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011). 따라서 남해 신생대 퇴적분지에 대한 지질학적 정보는 아직까지도 황해나 동해에 비해서 양과 질에 있어서 충분치 못하다고 할 수 있다.

최근 한일공동광구 및 이어도 수역 등에서의 한중

일 간의 관할수역 획정문제와 관련하여 국가적인 관심이 고조되면서, 2011년 한국해양과학기술원(KIOST)에서는 국내대륙붕 제4, 5광구를 포함하는 남해 EEZ에 대한 해저정보 수집을 위하여 종합적인 해양탐사를 수행하였다(KIOST, 2009). 특히, 이 탐사에서는 그동안 석유유망 지역에서 배제되어 왔던 소코트라분지와 제주분지의 북부 경계부로부터 약 3,150 L-km의 다중채널 심부탄성파탐사 자료도 함께 취득되었다(그림 2). 이 연구에서는 이들 탄성파탐사 자료를 이용하여 우리나라 최남단 EEZ에 속하는 소코트라분지와 제주분지 북부지역을 중심으로 탄성파층서와 함께 지질구조 및 탄성파상 분석을 통하여 지구조 진화 및 퇴적환경 모델을 제시하고자 한다.

2. 지역 개요

2.1 지구조대

우리나라 남해 대륙붕을 포함하는 동중국해(East China Sea)는 지구조적으로 유라시아판(Eurasian Plate), 태평양판(Pacific Plate), 그리고 필리핀해판(Philippine Sea Plate)이 서로 접하는 지역이다. 태평양판은 후기 백악기부터 서북서 방향으로 이동하면서 유라시아판 하부로 섭입되었고(Cukur *et al.*, 2011), 이후 중기 마이오세부터는 필리핀해판이 북쪽으로 섭입되었다(Hall *et al.*, 1995). 그 결과, 이 지역에서는 지판들의 섭입 경계부와 평행하게 북동-남서 방향으로 지구조대(tectonic province)들이 발달하게 되었다(Cukur *et al.*, 2012; 그림 1). 지구조대들의 형성시기는 동쪽으로 갈수록 젊어지는데(Zhou *et al.*, 1989), 주요 지구조대의 특징을 요약하면 다음과 같다.

가장 서쪽에 위치하는 체민 용기대(Zhemin Ridge)는 중국대륙에 인접한 기반암 고지대(basement high)로서(Gerdes *et al.*, 1988), 기반암 저지대인 동중국해 대륙붕분지(East China Sea Shelf Basin)의 서쪽 경계를 이루고 있다. 동중국해 대륙붕분지의 면적은 약 460,000 km²에 달하고(Harrison, 2003), 선캠브리아기 결정질 기반암(Precambrian crystalline base-

ment)으로 구성된 용기대에 의해 다수의 중생대-신생대 소분지(subbasin)들로 분리되어 있다(Zhou *et al.*, 1989; Yang, 1992). 동중국해 대륙붕분지의 형성기원에 관해서는 유라시아판 하부로 섭입하는 태평양판의 지판당김(slab-pull)에서 비롯된 구조침강 및 구조역전에 의한 것(Zhou *et al.*, 1989)이라는 가설과 전기 에오세(50 Ma)에 인도판이 유라시아판 남서부에 충돌하면서 형성된 변환단층들 사이에서 인리형 분지(pull-apart basin)로 형성되었다는 가설(Jolivet *et al.*, 1990; Xu *et al.*, 2014)이 제시되었다. 분지의 동쪽에는 주로 백악기 변성암으로 이루어진 타이완-신지 용기대(Taiwan-Sinzi Belt, Daiyudao Uplift 또는 Taiwan-Sinzi Folded Zone)가 타이완 북동부에서부터 일본 큐슈 인근까지 발달해 있다(Wageman *et al.*, 1970; Kong, 1998; Hsu *et al.*, 2001; Sibuet and Hsu, 2004). 용기대의 동편에는 필리핀해판이 섭입함에 따라 형성된 오키나와 해곡(Okinawa Trough)과 류큐 해구-열도 시스템(Ryukyu Trench-Arc system)이 위치한다. 오키나와 해곡은 중기 마이오세부터 시작된 열개작용으로 형성된 후열도분지(back-arc basin)이며(Letouzey and Kimura, 1984), 류큐 호상열도

(Ryukyu Arc)는 제사기 화산체인 내호(inner arc)와 후기 마이오세 이전 기반암으로 이루어진 외호(outer arc)로 구성된다(Kizaki, 1978; Iwasaki *et al.*, 1990; Shinjo, 1999). 또한 유라시아판의 하부로 필리핀해판이 서향 섭입하는 경계에 류큐 해구가 발달해 있으며 최대 수심이 7,500 m에 달한다(Iwasaki *et al.*, 1990).

2.2 남해대륙붕 퇴적분지

남해대륙붕 퇴적분지는 광역적으로 볼 때 동중국해 대륙붕분지의 북동부에 해당되며, 이는 국내 대륙붕 제 4, 5, 그리고 6-2광구와 한일공동개발구역(JDZ: Korea-Japan Joint Development Zone)의 서부를 포함한다(그림 1). 그러나 세부적으로는 분지 내에 발달해 있는 북북동-남남서 및 북서-남동 방향의 단층군과 기반암 고지대에 의해 제주분지, 소코트라분지, 도미분지 등 다수의 소분지들로 분리되어 나타난다(Oh *et al.*, 1994; Yoon *et al.*, 2009; 그림 1). 각 소분지들의 면적은 10,000~13,000 km²이며, 퇴적중심부(depocenter)에서의 퇴적층 두께는 제주분지에서 5.5 km 이상으로 가장 두껍고, 소코트라분지는 4.5 km 이상, 그리고 도미분지는 4.0 km 미만의 층후를 보이는 것으로 보고되었다(Cukur *et al.*, 2011). 퇴적층의 연대는 일부 연구들(Kwon *et al.*, 1995; KIGAM, 1997)에서 최하부 지층을 올리고세로 해석하였지만, 미화석 분석을 수행한 최근의 연구들(Bong *et al.*, 1993; Yun *et al.*, 1999; JGI, 2009)은 에오세로 제시하고 있다(Yoon *et al.*, 2009). 아울러, 제주분지에서는 분지 기반암에 점완단층(listric fault)이 우세하고 후기 마이오세 퇴적층에서는 심한 습곡과 역전 재활성된 단층들이 주로 나타난다. 도미분지는 북부 지역에서만 습곡구조가 발달되어 있고 남부는 정단층들과 이들을 가로지르는 변환단층들이 대표적이다. 소코트라분지에서는 분지 경계부를 따르는 대규모 정단층들이 발달하고 습곡구조는 하부층(에오세-올리고세)에서만 나타나는 것으로 보고되었다(Yoon *et al.*, 2009). 한편, KNOC (1998)에서는 석회질 초미화석 분석을 통해 남해대륙붕 지역의 전반적인 퇴적환경 변화를 추정하였다. 에오세 시기에는 육상환경, 이후 올리고세부터 북쪽 또는 북동쪽에서 남쪽, 그리고 남서쪽에서 북쪽으로 진행된 해침을 통해 해양환경으로 전이되었다. 또한 초기 마이오세는 용기작용으로 인해 다시 육상환경이 발달하였고 이후 북서쪽과 남서

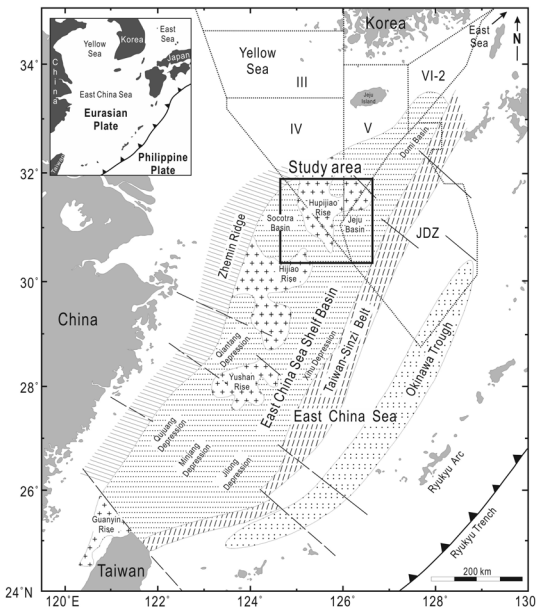


Fig. 1. Map showing tectonic provinces of the East China Sea region. Modified from Lee *et al.* (2006) and Cukur *et al.* (2012). The box denotes the study area shown in Figure 2.

쪽에서 진행된 해침을 통해 후기 플라이오세에는 완전히 해양환경으로 바뀌었다고 해석하고 있다.

3. 연구자료 및 분석 방법

이 연구에서 분석된 탄성파자료는 총 길이 약 3,150 Line-km에 이르는 2D 다중채널 탄성파단면으로서 (그림 2), 2011년 한국해양과학기술원에 의해 취득되었다. 탄성파단면 분석을 통해 음향기반암 상부면(MB1)과 4개의 퇴적층 내 부정합면(MB2, 3, 4) 및 해저면(MB5)을 구분하였으며, 이를 층서의 주요 경계

면으로하여 총 4개의 층단위(하부로부터 MS1, MS2, MS3, MS4)로 구성된 층서 체계를 설정하였다(그림 3). 이처럼 구분된 층서를 전체 탄성파탐사 자료에 대해 적용하여 층단위별로 시간구조도(time structure map)와 등층후도(isochron map)를 작성하였다. 또한 탄성파단면상에서 식별할 수 있는 반사면의 진폭, 수평연장성, 내부배열, 외형 등의 탄성파적 특징에 따라 음향기반암에 대한 2개의 탄성파상(B1, B2)과 퇴적층내 4개의 탄성파상(S1, S2, S3, S4) 유형을 구분하였다. 탄성파자료 분석에는 Schlumberger사의 Petrel 2013을 사용하였다.

연구지역에 시추공은 제4광구에 PZ-1공, 제5광구의 동쪽 경계부를 따라 한국석유공사의 옥돔-1공, 거북-1공이 위치한다(그림 2). 이들 시추공에서 기존 보고된 암상, 연대 등의 분석자료(KIGAM, 1997; Yun *et al.*, 1999)를 이용하여 탄성파자료의 연대와 퇴적환경 해석을 실시하였다(그림 4). 특히, 연대설정은 기반암 저지대까지 시추가 이루어진 옥돔-1공과 거북-1공의 생층서 분석결과(Yun *et al.*, 1999)를 기반으로 하였다.

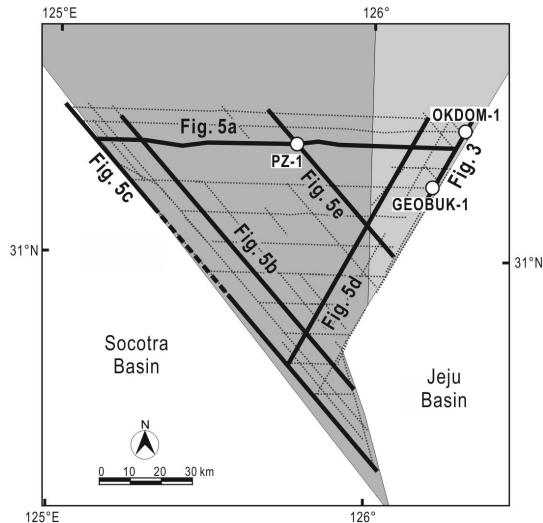


Fig. 2. Locations of 2D seismic data set (solid and dotted lines) and drilling wells (white circles). Bold solid lines indicate the locations of selected seismic profiles shown in Figures 3 and 5.

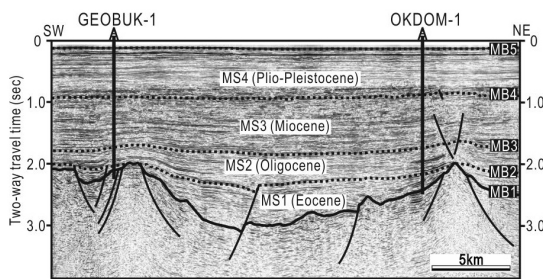


Fig. 3. Interpreted seismic section showing major stratigraphic units (MS1-MS4) and their boundaries (MB1-MB5). The chronostratigraphy is based on the correlation with two drilling wells (Fig. 4). For location of the seismic profile, see Figure 2.

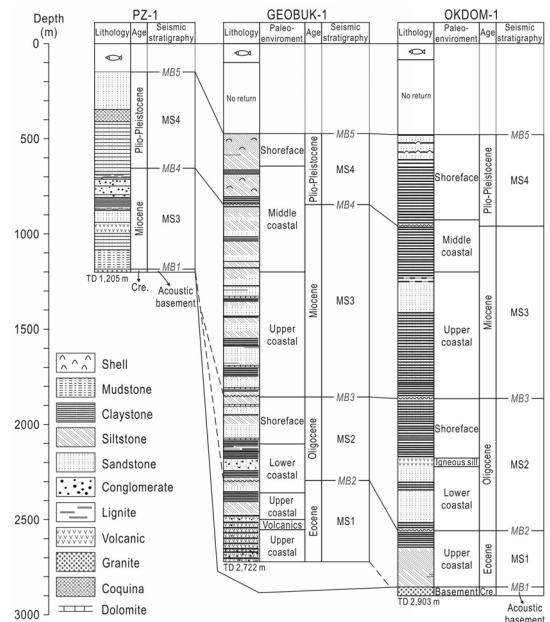


Fig. 4. Lithology and stratigraphic correlation of 3 drilling wells modified from KIGAM (1997). Paleoenvironmental interpretation of the Geobuk and Okdom wells are based on the Yun *et al.* (1999). For well locations, see Figure 2.

4. 연구결과

4.1 탄성파층서

탄성파층서는 탄성파탐사단면 상에서 인지되는 주요 부정합면을 기준으로 구분되었다. 또한 층단위들의 연대는 Yun *et al.* (1999)에서 제시된 고생물 기반 연대분석 결과와 대비하여 적용되었는데(그림 3), 층서 경계면(부정합면)들의 주기는 약 1,000~2,000만년으로 확인된다(KIGAM, 1997). 이와 같은 경계면들의 주기는 Vail *et al.* (1977)에서 제시된 범세계적인 해수면변동에 의한 연안침식 부정합면(3rd order)이 갖는 100~1,000만년 간격보다 대체로 크다. 따라서 층단위들은 주로 지구조적인 지각변동의 영향 하에서 이루어진 메가시퀀스(Hubbard *et al.*, 1985)에 해당되는 것으로 해석할 수 있다.

4.1.1 음향기저(acoustic basement)

음향기저는 탄성파단면 상에서 대비와 도면화(mapping)가 가능한 가장 깊은 곳에서 관찰되는 반사면으로서 그 하부는 반사면들이 무질서하게 나타나거나, 반사면이 없는 무반사의 특징을 보인다(Neuendorf *et al.*, 2005). 이 연구에서는 음향기저의 상부 반사면을 MB1 층서경계면으로 설정하였다. 또한 음향기저의 연대와 암상은 기존 연구의 시추공 분석결과에 따르면 원생대-중생대 변성암류(Zhou *et al.*, 1989)나 백악기 화산암류 또는 화강암류로 구성되어 있는 것으로 추정된다(Oh *et al.*, 1994). 연구지역 음향기저는 MB1의 발달깊이와 지형특징에 따라 크게 기반암 고지대와 이를 경계로 하는 다수의 기반암 저지대로 구분된다(그림 5a~c, 6a). 기반암 고지대에서 MB1은 대체로 1.5 sec 이하의 깊이로 관찰되며, 그 형태가 비교적 평탄하고 기복이 작은 지형을 보인다. 반면, 기반암 저지대는 1.5~4.5 sec까지 깊게 위치하고 있는데, 다소 경사져 있고 지역에 따라서 다양한 기복을 보이며 깊은 곳에서는 그 위치가 불명확한 특징을 갖는다. 기반암 고지대는 대체로 연구지역의 북부에 광역적으로 분포하는데(그림 6a), 기존 연구들(Zhou *et al.*, 1989; Lee *et al.*, 2006)에서는 후피지아오 융기대(Hupijiao Rise)로 명명되어 있다. 한편, 기반암 저지대는 연구지역의 북서부-중부, 북동부, 남부지역에 걸쳐 나타나는데(그림 6a), 이들은 기존 연구들(Oh *et al.*, 1994; Yoon *et al.*, 2009)에서 보고

된 소코트라분지(북서부-중부)와 제주분지(북동부, 남부)에 해당된다. 각 분지에서의 MB1의 발달 깊이는 소코트라분지에서 2.0~3.7 sec, 제주분지는 2.0~3.0 sec (북동부), 2.0~4.3 sec (남부)로 나타난다(그림 6a). 그러나, 연구지역의 남부와 동부에서 화산체와 유사한 외형을 갖는 반사면이 약 1.0 sec 깊이로 관찰된다(그림 5b, 5c). 이 같은 반사면의 하부에는 내부 반사면들이 무질서하게(chaotic) 나타나거나 반사면이 나타나지 않는 탄성파 암영대(seismic shadow zone)가 발달하여 MB1의 위치가 식별되지 않는다. 기반암 저지대에 쌓여 있는 퇴적층의 전체 두께는 소코트라분지와 제주분지 지역에서 3.0 sec 이상으로 두껍게 나타나며 후피지아오 융기대에서는 약 1.0 sec로 얇게 관찰된다(그림 6b).

4.1.2 MS1 (에오세)

층단위 MS1은 음향기저면 MB1의 직상부에 놓인 최하부 퇴적층으로서 상부경계를 이루는 MB2는 북서쪽 일부지역에서 경사부정합면으로 나타나며(그림 5c) 그 외의 지역에서는 이에 대비되는 정합면 내지 평행부정합면으로 발달되어 있다(그림 5d). 연구지역에서 MB2의 깊이는 대체로 0.6~3.3 sec 범위를 보인다(그림 7a). 연구지역에서 층단위 MS1은 대체로 기반암 저지대들의 심부를 중심으로 분리되어 분포하는데, 지층의 두께는 소코트라분지에서 최대 1.1 sec, 제주분지에서 최대 1.8 sec까지 확인된다(그림 7b). 탄성파적으로 층단위 MS1은 진폭이 일정하지 않고 측면연속성이 다소 불량한 반사면으로 구성되어 있다(그림 5a~c). 특히, 분지 경계단층의 측면을 기준으로 내부 반사면들이 바깥쪽으로 수렴(convergent)하며 그 외형이 썩기형태로 나타나고(그림 5b, 5c), 내부적으로는 온랩(onlap)을 보이기도 한다.

4.1.3 MS2 (올리고세)

층단위 MS2는 MS1과 마찬가지로 소코트라분지와 제주분지를 중심으로 최대 1.0 sec의 두께로 기반암 저지대를 채우는 형태로 분포한다(그림 5b, 8b). 상부경계인 MB3는 후피지아오 융기대에 인접한 곳에서는 경사부정합의 관계를 보이지만 남쪽 분지중심부로 가면서 평행부정합의 양상으로 전이된다(그림 5a~c). 또한 연구지역 남부에서는 2.5 sec

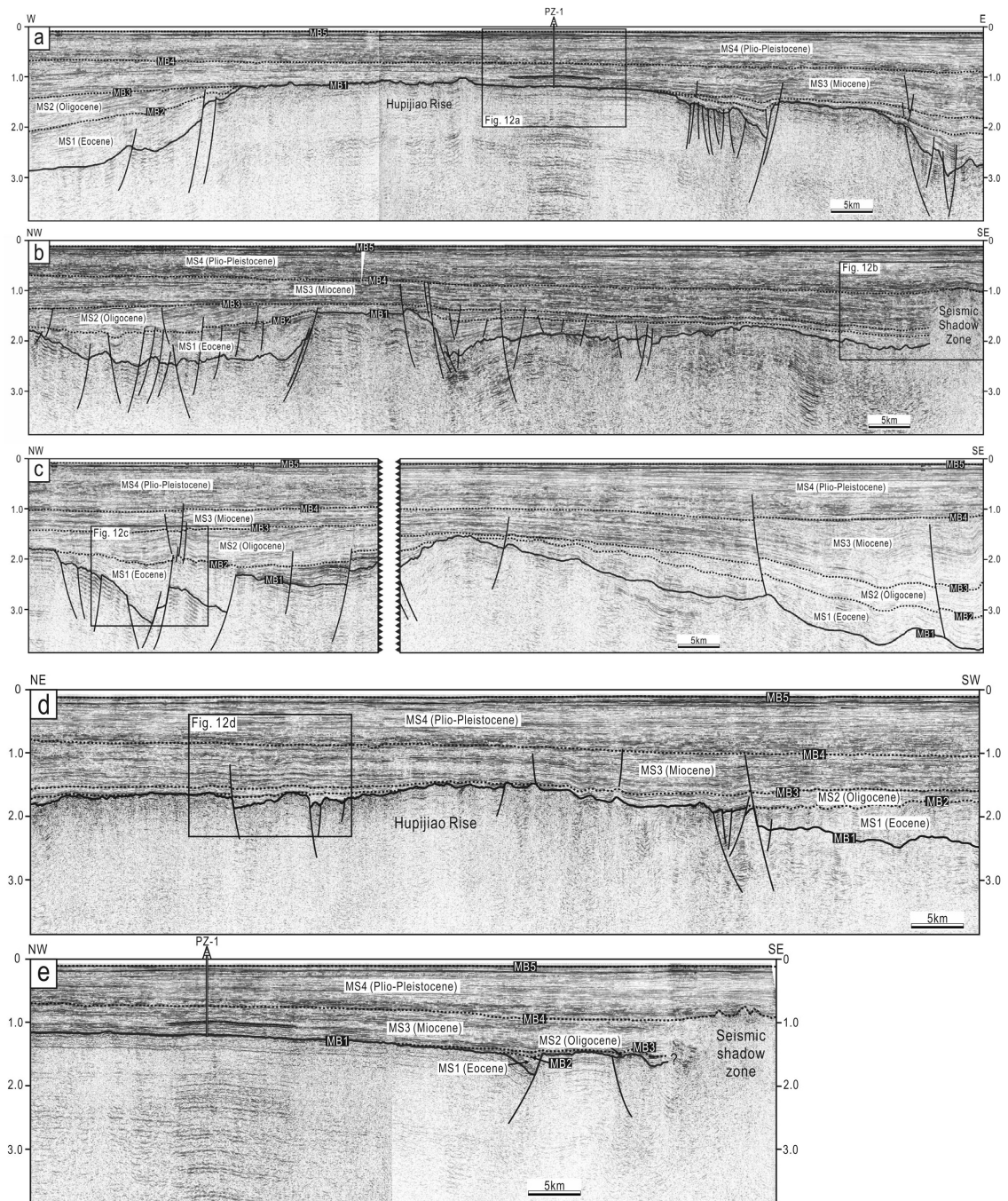


Fig. 5. Interpreted seismic sections. (a) MS1 and MS2 mainly occur within half-grabens of basement lows, whereas MS3 completely covers the underlying Hupijiao Rise. (b) The large-scale basement faults are recognized along the margins of basement high. (c) A series of basement faults occur in Socotra and Jeju basins, and the large-scale reverse faults mostly occur in Jeju Basin. Angular unconformities are recognized along MB2 and MB3 in the Socotra Basin and MB4 in Jeju Basin. (d) While MS1 gradually thickens away from the Hupijiao Rise, MS2, MS3, and MS4 commonly have fairly uniform thickness showing a sheet geometry. (e) The seismic shadow zone is recognized in southeastern part (Jeju Basin), where the sequence boundaries are uncertain. For locations of the seismic profiles, see Figure 2.

이상으로 최대 깊이를 보이며 북쪽으로 갈수록 서서히 얕아지는 경향이 나타난다(그림 8a). 탄성파적으로 층단위 MS2는 대체로 중간-고진폭의 측면 연속성이 다소 양호한 반사면들로 구성되어 있다(그림 5a).

4.1.4 MS3 (마이오세)

층단위 MS3는 하부의 층단위들과는 달리 후피리아오 용기대를 포함한 전 연구지역에 걸쳐 분포하며, 특히 연구지역 남부에서 1.8 sec의 두께로 가장 두껍게 나타난다(그림 5c, 9a, 9b). 상부경계인

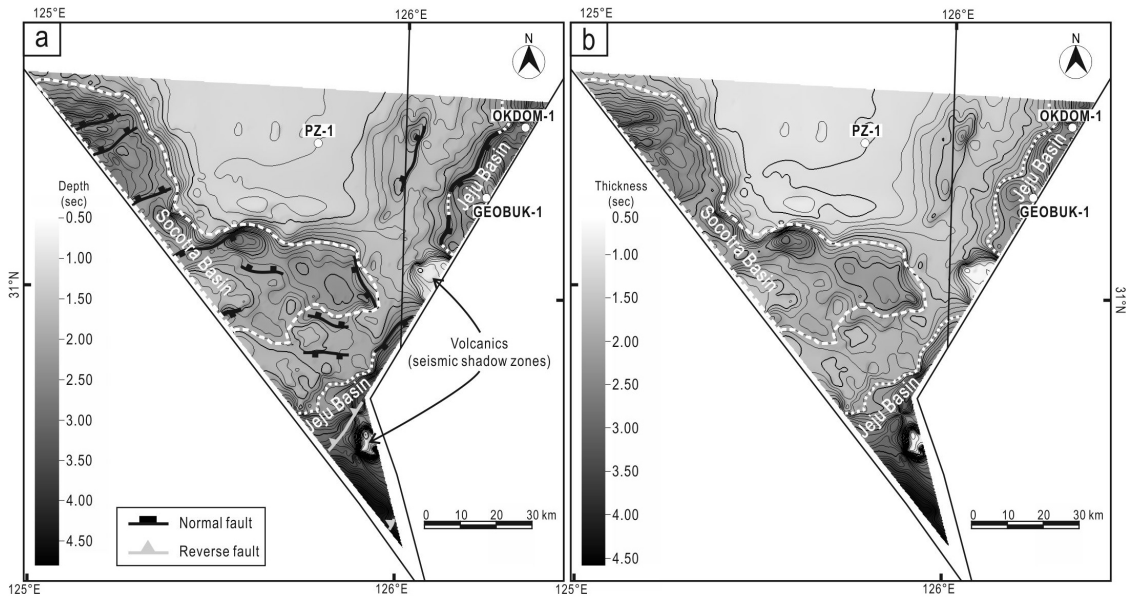


Fig. 6. Time structure map of MB1 (a) and isochron map of whole sedimentary sequences (b) Contours in sec (two-way travel time).

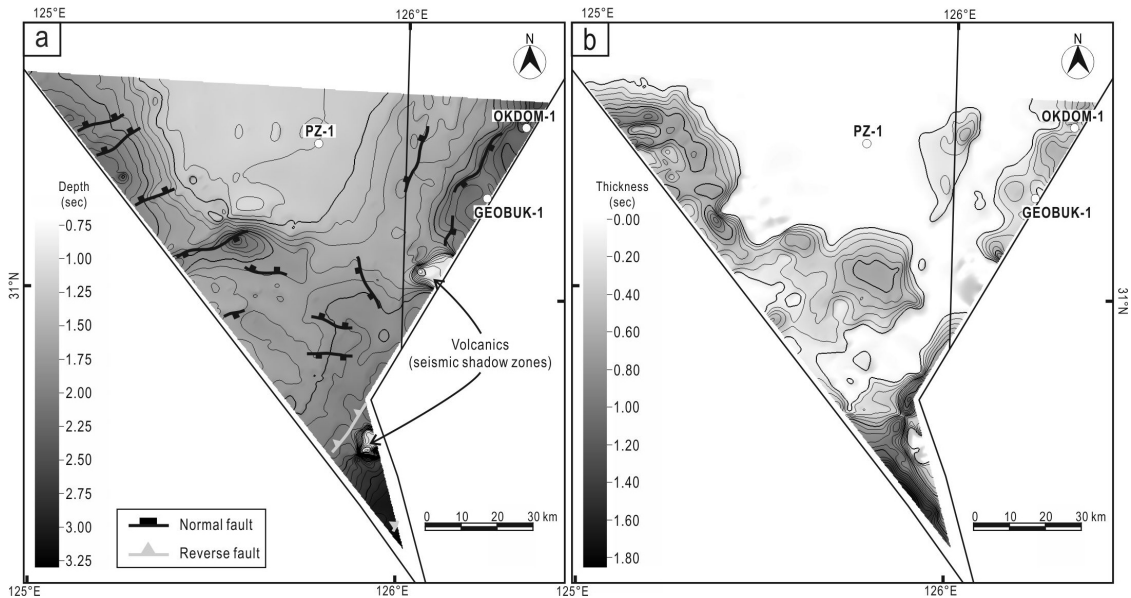


Fig. 7. Time structure map of MB2 (a) and isochron map of MS1 (b). Contours in sec (two-way travel time).

MB4는 탄성파단면에서 대체로 평행부정합면(혹은 정합면)의 형태로 나타나지만 남부지역에서는 뚜렷한 경사부정합의 관계를 보인다(그림 5c). MB4의 분포깊이는 남동부 가장자리에서 1.0 sec 이상으로 가장 깊고 북부로 갈수록 얕아지는 경향을 보인다(그림 9a). 탄성파적으로 층단위 MS3는 진폭이 크고

연속성이 양호한 반사면들로 이루어진 구간과 진폭이 작고 연속성이 불량한 반사면들로 이루어진 구간이 교호하여 나타나는 특징을 우세하게 보인다(그림 5a~e). 하지만 국지적으로는 침식된 형태로 다소의 기복을 보이는 반사면들이 나타나기도 한다.

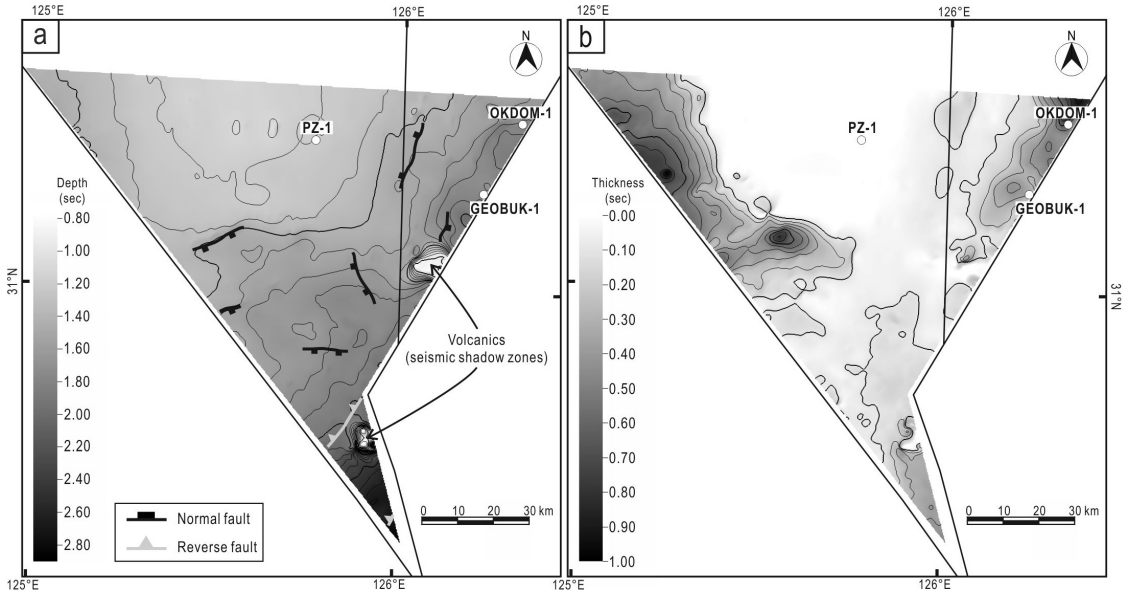


Fig. 8. Time structure map of MB3 (a) and isochron map of MS2 (b). Contours in sec (two-way travel time).

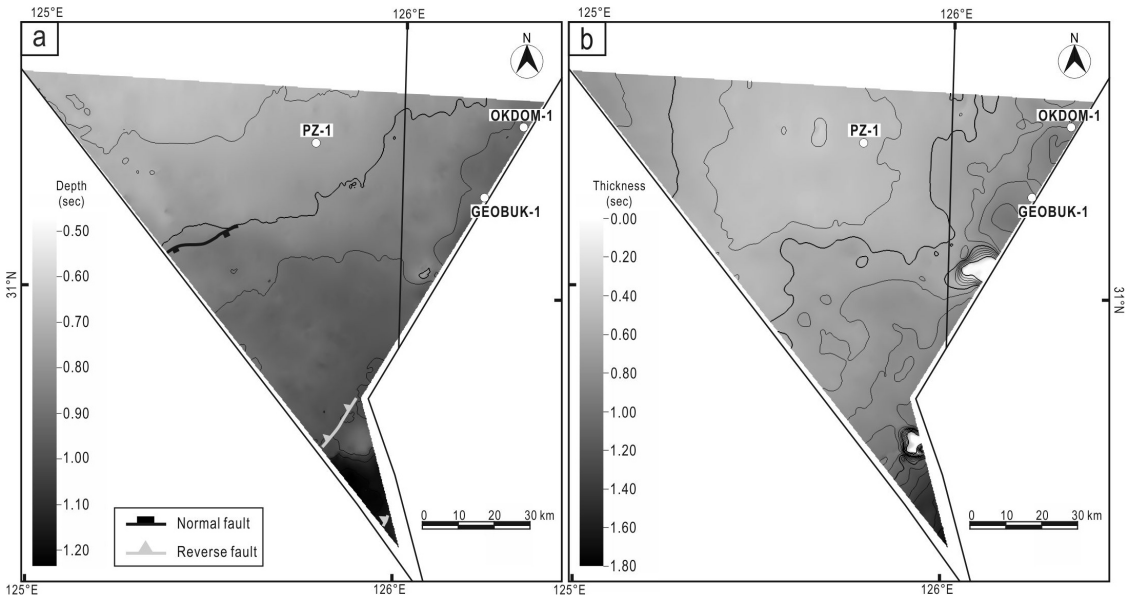


Fig. 9. Time structure map of MB4 (a) and isochron map of MS3 (b). Contours in sec (two-way travel time).

4.1.5 MS4 (플라이오세-플라이스토세)

층단위 MS4는 연구지역 최상위 층단위로서, 상부 경계면인 MB5(해저면)는 전반적으로 큰 기복 없이 평탄하게 0.08~0.14 sec 깊이에 분포한다(그림 10a). MS4는 북서부에서 남동부로 갈수록 점진적으로 두꺼워지는 경향을 보이며 0.5~1.2 sec의 두께 범위를 갖는다(그림 10b). MS4를 이루고 있는 반사면들의 특징은 하부와 상부구간이 상이하게 나타난다. 하부구간의 두께는 약 0.2 sec 이하로 MS3와 유사한 탄성파적 특징을 보이고, 상부구간은 약 0.4 sec 이상의 두께로 고진폭에 연속성이 양호한 반사면들 사이에 낮은 진폭을 갖는 반사면들이 준평행하게 나타난다(그림 5a~e).

4.2 지질구조

4.2.1 기반암 지질구조

탄성파탐사 단면에 나타나는 주요 기반암 지질구조로는 주로 대규모의 인장성 점완단층과 기반암의 블록회전(block rotation)에 연계된 정단층들이 나타난다. 소코트라분지에서는 제4광구의 서쪽 가장 자리를 따라 동-서, 북동-남서 주향의 정단층들이 발달되어 있으며 연장길이는 약 15~20 km로 측정된다(그림 6a). 특히, 분지 경계부에서는 약 1.0 sec의 수직낙차를 갖는 대규모의 점완단층이 관찰되고, 분

지 내부에는 대체로 0.3 sec 이하의 낙차를 갖는 소규모 정단층들이 주로 점완단층과 동일한 방향으로 경사지거나 일부는 반향으로 경사진 것이 관찰된다(그림 5b, 5c). 따라서 대규모의 점완단층은 소코트라분지 형성에 있어서 주단층(master fault)으로 분지의 경계를 이루었고, 소규모 정단층들은 이때 발생한 기반암 블록회전에 따른 동향단층(synthetic fault) 및 반향단층(antithetic fault)으로 보인다. 위와 같은 구조들은 열 개분지(rift basin)에서 대표적으로 관찰되는 특징으로 알려져 있다(Prosser, 1993).

제주분지에서는 소코트라분지와는 달리 거의 정단층들이 관찰되지 않는다(그림 5b). 일부 나타나는 정단층들은 제주분지의 경계부에서 북동-남서 또는 북북동-남남서 주향으로 발달해 있으며 20 km 이상의 길이를 갖는다(그림 6a). 그러나, 단층작용에 의한 수직적 낙차는 0.2 sec 이하로 작으며 이에 따른 기반암 블록형성 및 블록회전의 형태도 뚜렷하지 않다. 이처럼 제주분지는 대규모의 경계단층을 따라 큰 수직낙차를 보이는 기반암 블록들로 구성된 소코트라분지와는 구조적으로 다소 다른 특징을 보인다(그림 5a). 종합적으로 볼 때, 제주분지는 분지의 기저를 구성하는데 있어서 단층작용이 제한적이면서도 지구대 또는 반지구대와 유사한 형태를 이루고 있다. 이는 구조운동보다는 누적된 퇴적물의 하중으로 인해

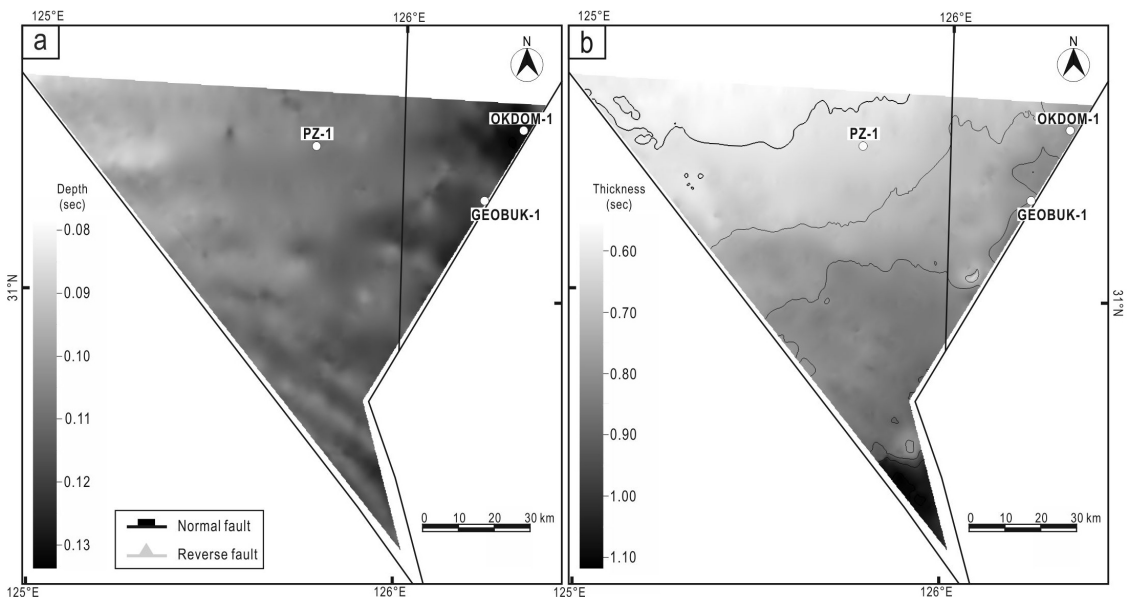


Fig. 10. Time structure map of MB5 (a) and isochron map of MS4 (b). Contours in sec (two-way travel time).

지각침강이 우세하게 일어나면서 퇴적층 수용공간(분지)이 형성되었음을 지시하는 것으로 해석된다. 이러한 분지의 대표적 예로서 침하분지(sag)를 들 수 있다(Kingston *et al.*, 1983). 탄성파자료의 제한으로 제주분지 전역에 대해 이와 같은 해석을 적용시킬 수는 없지만 최소한 연구지역에 속하는 제주분지에서는 단층운동을 동반한 열개작용보다는 지각침강으로 인한 분지발달이 우세하게 일어났던 것으로 보인다.

4.2.2 퇴적층 지질구조

음향기반암 상부의 퇴적층 내에서는 기반암에서 연장된 점완단층, 일부 역단층들과 이에 연관된 습곡구조들이 관찰된다. 소코트라분지 지역에서는 기반암에서 연장된 동-서 그리고 북동-남서 방향의 정단층의 대부분이 층단위 MS1까지 연장되지만 MS2에서는 주로 층단위 구간에만 국한되어 발달된 정단층들이 확인된다(그림 5b, 5c). 대규모의 경계단층이 발달된 곳에서 MS1의 퇴적층은 내부가 습곡된 썩기 형태로 나타난다. 이와 같은 퇴적층의 형태는 열개동시성 퇴적층에서 일반적으로 관찰되며, 단층에 의해 기반암의 블록회전 및 침하로 비대칭적인 퇴적공

간이 만들어 짐에 따라 형성된다(Prosser, 1993). 반면, 층단위 MS2는 측면 두께변화 없이 대체로 판상의 형태로 나타난다. 이는, MS2가 형성될 당시에는 기반암 단층작용으로 인한 비대칭적인 퇴적공간의 형성이 이루어지지 않았음을 지시한다. 한편, MS2에서 나타나는 정단층들은 주로 습곡구조가 뚜렷하게 나타나는 곳에서 식별되는데, 단층면은 습곡구조의 측면(axial plane)과 방향이 유사하게 나타난다(그림 5c). 이는 습곡작용 동안 형성된 단열들이 하부 퇴적층의 차별압밀(differential compaction)에 의하여 단층으로 전이되면서 형성된 것으로 해석된다(Schlische, 1995; Xu *et al.*, 2015).

제주분지에서는 주로 규모가 큰 역단층들이 퇴적층 내에 나타난다. 역단층들은 하부로 기반암까지 연장되는 것으로 보이나, 자료 해상도의 문제로 인해 식별하는데 다소 무리가 있다. 또한 역단층들과 연관된 습곡구조가 식별되며(그림 5c), 습곡구조는 층단위 MS1~MS3까지 광역적으로 발달되어 있다. 습곡축의 방향은 북동-남서 방향으로 추정되나, 이러한 습곡구조가 관찰되는 위치가 제4광구 최남단이기 때문에 자료범위의 한계로 정확한 발달방향은 불확실하다.

Type	Facies code	Seismic example	Characteristics	Interpretation	Stratigraphic occurrence
Acoustic basement	B1		High-amplitude, continuous top reflection; internally reflection-free with sub-surface reverberations	Geologic basement	—
	B2		High-amplitude, continuous top reflection; discontinuous, chaotic or winkled internal reflectors; ambiguous real basement down below	Volcanic-sedimentary complex, volcanics	—
Sequence	S1		Parallel, low-amplitude, semi-continuous reflectors interlayered with high- to moderate-amplitude, continuous reflectors	Shallow marine (inner shelf)	Upper parts of MS4 and MS2
	S2		Dipping/divergent, sub-parallel reflectors showing high to moderate amplitude; wedge-shaped external form	Lacustrine, alluvial fan, fan delta, alluvial cone, talus cone	MS1
	S3		High-amplitude, continuous reflectors interlayered with intervals comprising discontinuous, low-amplitude reflectors; locally V-shaped truncational reflections	Fluvial channel and flood plain, delta, estuary, tidal flat	Lower parts of MS4 and MS2, MS3
	S4		Low-angle dome-shaped, high-amplitude reflectors with overlying pinnacle e-shaped reflection between the sequences; seismic shadow zone below the reflection	Volcanic sill, volcanic edifice	MS1, MS2, MS3

Fig. 11. Seismic facies of acoustic basement and sedimentary sequences in the study area.

4.3 탄성파상

탄성파상(seismic facies)이란 탄성파단면에서 식별되는 퇴적층의 특정 부분을 인접한 다른 부분과 구분되게 하는 모든 반사파적 특성요소(즉, 반사면의 진폭, 주기, 연속성, 반사면의 배열형태, 지층의 외형 등)를 종합한 탄성파적 특성을 말한다(Mitchum *et al.*, 1977). 각각의 특성요소들의 형태 또는 수치들은 지하 지층의 지질에 대한 정보를 직·간접적으로 지시하고 있어서 탄성파 자료로부터 암상과 퇴적환경을 추정하는 주요수단으로 활용된다(Mitchum *et al.*, 1977).

이 연구에서는 탄성파층서 분석에서 구분된 메가시퀀스에 대해 지층 내부에 나타나는 반사면들의 특성요소를 기준으로 하여 음향기저의 탄성파상 B1, B2와 퇴적층 내의 탄성파상 S1, S2, S3, S4를 분류하였다.

4.3.1 탄성파상 B1

음향기저의 탄성파상 B1(그림 11)은 높은 진폭과 양호한 측면 연속성을 갖는 반사면이 최상부에 위치하고 있고, 하부에는 반사면들이 나타나지 않는 무반사의 특징이나 다중반사파의 영향으로 반사면들이 음향기반암의 지형과 동일한 잔향(reverberation)을 보이기도 한다(그림 12a, 12c). 이와 같은 탄성파적 특징은 고화된 암석으로 이루어진 분지 기반암과 미고화 혹은 반고화 상태의 퇴적층 간의 음향임피던스 차이로 인해 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Eberli *et al.*, 2004). 탄성파상 B1에 대비되는 옥돔-1공의 암상은 화강암으로 지질학적 기반암에 해당된다(그림 4). 따라서 탄성파상 B1은 분지기저를 이루고 있는 지질학적 기반암이자 음향기반암을 반영하는 것으로 해석된다.

4.3.2 탄성파상 B2

탄성파상 B2(그림 11)는 탄성파상 B1과 같이 음향기저에서 확인되며, 특히 후피지아오 용기대의 가장자리 부근에서 주로 나타난다. 탄성파상 B2의 탄성파적 특징은 탄성파상 B1과 다소 차이가 있다. 음향기반암 상부에는 진폭이 높고 연속성이 중간정도인 반사면이 위치하고 그 아래 고진폭의 연속성이 불량하며 혼탁하거나 주름진(winkled) 형태를 갖는 반사면들이 불규칙적으로 배열되어 있다(그림 12b, 12d). 그 하부에서는 탄성파상 B1에서 나타나는 것과 유사한 무반사의 특징을 보인다. 동해 한국대지 및 그 주변지역 탄성파탐사 자료에서는 이와 유사한 형태

의 탄성파상을 분지의 초기 열개작용 동안 일어난 틈새분출(fissure eruption)에 의하여 형성된 화산암과 휴지기의 퇴적층이 교호한 화산암-퇴적물 복합체(volcanic-sedimentary complex)로 해석하였다(Lee *et al.*, 2001; Kwon *et al.*, 2009). 거북-1공의 최하부 구간은 탄성파상 B2에 대비되는데, 화산쇄설성역암(volcaniclastic conglomerate)이 사암, 실트암, 점토암과 교호하는 것이 확인된다(그림 4). 그러나 탄성파단면 상에서 이러한 화산암-퇴적물 복합체와 그 하부에 발달되어 있는 지질학적 기반암과의 경계는 뚜렷하게 나타나지 않는다(그림 12d). 이는 상부에 발달된 화산암-퇴적물 복합체의 높은 음향임피던스로 인하여 전달되는 탄성파 에너지가 감소되어 식별되지 않는 것으로 해석된다(Coffin *et al.*, 1990; Herzer, 1995). 이와 같은 현상은 PZ-1공에서 나타나는 화산암체와 이 구간에 대비되는 탄성파탐사 단면에서 관찰된다. 화산암체에 해당되는 고진폭의 연속성이 좋은 반사면이 국부적으로 발달되어 있고 이를 기준으로 하부 반사면들의 구명도가 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다(그림 12a).

4.3.3 탄성파상 S1

탄성파상 S1은 중간 내지 높은 진폭의 연속성이 양호한 반사면들 사이에 낮은 진폭과 중간 정도의 연속성을 보이는 평탄한 반사면들이 평행상태로 배열된 탄성파 특성을 갖는다(그림 11). 일반적으로, 이러한 탄성파적 특징은 구조적으로 안정된 대륙붕 또는 분지면(basin plain) 환경에서 균일한 퇴적물로 쌓인 퇴적층에서 나타날 수 있다(Mitchum *et al.*, 1977). 이와 유사한 탄성파 특성은 우리나라 남동해역의 내대륙붕(inner shelf)에 발달해 있는 세립퇴적층에서도 보고되어 있다(Yoo *et al.*, 2004). 탄성파상 S1은 주로 층단위 MS2와 MS4의 상부구간에서 확인되는데(그림 12b~d), 이 구간은 시추공자료에서 주로 괴상(massive)의 점토암과 실트암으로 구성되며, 드물게 패각편과 세립-중립질의 석회질 사암이 협재되어 있다(그림 4). 또한 Yun *et al.* (1999)과 KIGAM (1997)에서는 시추공에서 와편모조류(*Phthanoperidinium*, *Cordosphaeridium* 등)와 유공충(*Asterorotalia concinna*, *A. multispinosa* 등) 미화석을 확인하였으며, 이들의 서식환경을 수심 약 10~100 m에 해당하는 내대륙붕의 천해환경에 해당하는 것으로 해석하였다. 이와 같은 환경은 주로 육상하천을 통해서 연안으로 공급

된 퇴적물이 파도, 조류, 해류를 따라 운반되어 집적되는 곳으로 알려져 있다(Reading, 1986). KIGAM (1997)에서는 시추공에서 나타나는 패각편과 유공층들이 마식작용(abrasion)을 받은 것을 통해 파도의 영향이 우세했던 것으로 추정하였다.

4.3.4 탄성파상 S2

탄성파상 S2는 중간 내지 높은 진폭과 중간정도의 연속성을 갖는 반사면들이 발달하는 형태로 준평행하게 배열되어 있는 특징을 보인다(그림 11). 아울러 발달형태가 전진퇴적(progradation)하는 단사형 퇴적체(clinoform)와 유사하게 나타난다. 주로 지구대의 중심부나 반지구대 가장자리에 인접한 층단위 MS1에서 국지적으로 관찰된다(그림 12c). 이 구간에 대비되는 옥돔-1공에서 상부는 괴상의 세립 내지 조립질 사암과 실트암이 교호하고 하부는 점토암이 주로 나타난다(그림 4). 또한 이 시추공 구간에서 Yun et al. (1999)은 소택지와 같은 육상환경을 지시하는

화분 미화석(*Ulmipollentites undulosus*, *I. hiatus* 등)를 보고하였다. 분지 진화과정에서 지구대 또는 반지구대 형태의 초기 육상 퇴적분지에서는 일반적으로 호수환경(lacustrine)이 발달되는 것으로 알려져 있다(Leeder and Gawthorpe, 1987). 따라서 탄성파상 S2와 대비되는 옥돔-1공의 점토층 우세 구간은 이러한 호수환경에서 형성되었을 가능성이 높으므로 추정된다. 그리고 분지 경계부에 인접하여 발달하는 전진 퇴적체는 단층면 또는 하천으로부터 유입된 퇴적물에 의하여 형성된 충적 선상지(alluvial fan)/충적 추(alluvial cone), 암설원추(talus cone), 그리고/또는 삼각주(delta)/선상지 삼각주(fan delta)가 형성되어 성장하는 과정에 의한 것으로 해석된다(Gawthorpe and Leder, 2000).

4.3.5 탄성파상 S3

탄성파상 S3는 고진폭의 연속성이 좋은 반사면과 연속성이 불량한 중간 내지 낮은 진폭의 반사면들이

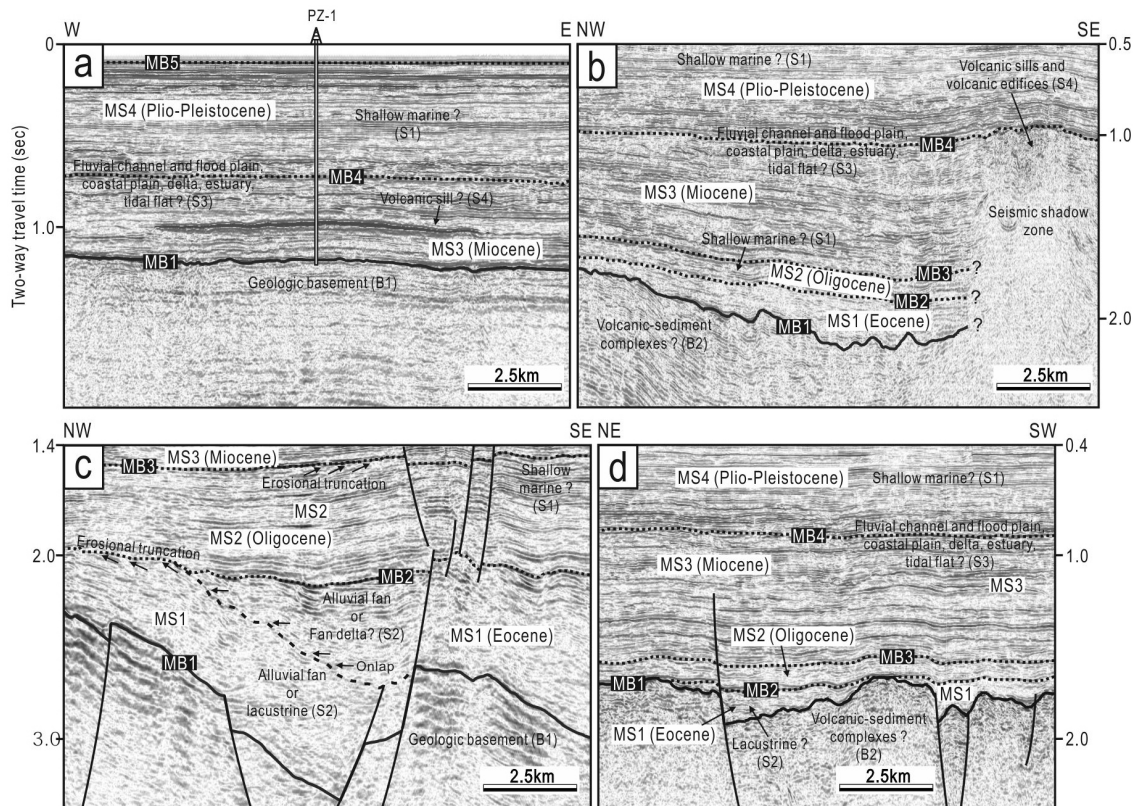


Fig. 12. Interpreted seismic sections showing seismic facies. For locations of the seismic profiles, see Figure 5.

서로 교호하는 특징을 보인다(그림 11). 낮은 진폭을 갖는 반사면들은 일부 구간에서 하도로 추정되는 V 형태의 침식구조가 나타나기도 한다. 탄성파상 S3는 주로 층단위 MS3에서 나타나지만 MS2와 MS4의 하부구간에서도 관찰된다(그림 12b~d). 이 구간에 대비되는 시추공자료에서는 주로 조립질 사암이 나타나고 일부 실트암과 점토암이 협재된 양상을 보인다(그림 4). 고생물로는 간헐적인 해수의 영향을 받는 해안환경을 지시하는 외편모조류 미화석들(*Spiniferites ramosus ramosus*, *Cribroperidinium sp.* 등)이 확인된다(Yun *et al.*, 1999). 따라서 고진폭에 연속성이 좋은 반사면들은 주로 해안환경에서 집적된 조립질(사질) 퇴적층을 반영하는 것으로 해석되며, 이에 협재된 형태로 나타나는 낮은 진폭의 연속성이 다소 떨어지는 반사면들은 해안에 인접한 평원 지역의 범람원이나 습지에 쌓인 세립질 퇴적층을 지시하는 것으로 해석된다.

4.3.6 탄성파상 S4

탄성파상 S4에서는 주변부보다 상대적으로 고진폭의 연속성이 좋은 반사면이 낮은 각도의 돔(dome) 형태로 나타나며 상부에 작은 규모의 돌기(pinacle)들이 나타나는 특징을 보인다(그림 11). 대조적으로 표면의 강한 반사면 하부에는 반사면들이 나타나지 않는 탄성파 암영대가 나타난다(그림 12b). 탄성파상 S4는 층단위 MS1, MS2, MS3에 국부적으로 발달하지만, 연구지역 북부와 동부에서는 비교적 광범위한 분포로 나타난다. Cukur *et al.* (2010)은 연구지역에 나타나는 이와 같은 반사면의 특징을 마그마 관입에 의하여 형성된 화산암맥(volcanic sill) 또는 화산체(volcanic edifice)로 해석하였다. 일반적으로 마그마 관입체들은 높은 음향임피던스로 인해 그 표면이 고진폭의 연속성이 좋은 반사면으로 나타난다(Planke *et al.*, 2000; Tomson and Hutton, 2004). 이러한 반사면 하부에 나타나는 탄성파 암영대는 하부로 전달되는 탄성파 에너지의 감쇠로 인한 것으로 해석된다.

5. 토 의

연구지역에 발달되어 있는 퇴적분지의 층서분석을 통해 주요 부정합면에 대비되는 건층면을 경계로

하는 총 4개의 메가시퀀스(MS1~MS4)가 구분된다. 특히, MS1과 MS2는 소코트라분지에서 나타나는 부정합면을 기준으로 하였으며, MS3와 MS4는 제주분지에서 층서경계면이 부정합면으로 확인된다(그림 5c). 광역부정합면들은 주로 습곡작용 후 상부가 삭박된 경사부정합의 형태로 나타나는데, 이는 부정합면 형성에 있어 지구조운동이 직접적인 영향을 미쳤음을 지시한다. 각각의 메가시퀀스의 연대는 Yun *et al.* (1999)과 KIGAM (1997)에서 수행된 미화석 생층서 분석결과와의 대비를 통해 에오세(MS1), 올리고세(MS2), 마이오세(MS3), 플라이오-플라이스토세(MS4)로 설정되었다(그림 3). 이러한 층서분석결과는 일부 연구들과는 상이함을 보이는데, Bong *et al.* (1993)과 Kwon *et al.* (1995)에서는 탄성파 자료로부터 나타나는 부정합면을 통해 마이오세 층을 전기-중기와 후기 마이오세로 구분하였다. 그러나 Bong *et al.* (1993)에서는 분지가 아닌 주변지역에서 나타나는 부정합면을 대비하였고, Kwon *et al.* (1995)은 자료의 분석범위가 연구지역의 남동쪽에 위치한 한일공동개발구역에 해당된다. 반면, 이 연구와 분석범위가 유사한 연구들(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2012)에서는 탄성파탐사자료 상에서 마이오세 퇴적층 내부에 뚜렷한 부정합면이 나타나지 않는 것으로 보고 있다.

기존 연구들(Zhou *et al.*, 1989; Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011, 2012)에서 제주분지와 소코트라분지는 모두 열개작용에 의해 형성된 것으로 해석되고 있다. 이 연구에서 층단위 MS1은 육상환경에 발달된 호수, 충적선상지, 선상지삼각주, 충적추, 암설원추를 지시하는 탄성파상 S2가 우세하게 나타난다(그림 11). 분포형태는 주로 분지 기저에 발달된 단층면과 밀접한 관계를 보이는데(그림 12c), 이는 초기 열개분지에서 나타나는 열개동시성퇴적층의 특징과 잘 부합한다. 이러한 형태는 소코트라분지에서 뚜렷하게 나타나지만 제주분지에서는 거의 관찰되지 않는다. 이를 종합해보면 초기 열개작용이 일어난 백악기 후기-전기 올리고세에 제주분지 지역은 열개작용보다 침강작용이 우세하여 분지의 침하가 발생한 것으로 해석된다(그림 13a, 14a). 한편, 단층구조가 발달된 분지 기저의 일부구간에서 화산암-퇴적물 복합체로 해석되는 탄성파상 B2가 관찰되는데(그림 12d), 이는 초기 열개작용 당시 틈새분출이 동반되었음을 지시한다(그림 13a).

MS2의 하부에는 해안환경을 지시하는 탄성파상 S3가 나타나고 상부에는 천해환경을 대표하는 탄성파상 S1이 나타난다(그림 11, 12c). 그리고 기존 연구들(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011, 2012)에서는 기반암 단층이 MS2까지 연장되고 MS2의 형성 당시에도 열개작용이 우세한 것으로 보고 있다. 그러나

이 연구의 탄성파자료를 보면, 기반암으로부터 연장되는 단층들이 MS2까지 영향을 미치지 않는 않으며 퇴적층의 형태 또한 큰 두께변화 없이 주로 판상으로 나타난다(그림 5a~e). 특히, MS2의 상부 경계면은 후피지아오 융기대의 상부와 그 깊이가 일치하는데(그림 5a), 이는 MS2의 지층구조가 습곡된 형태인

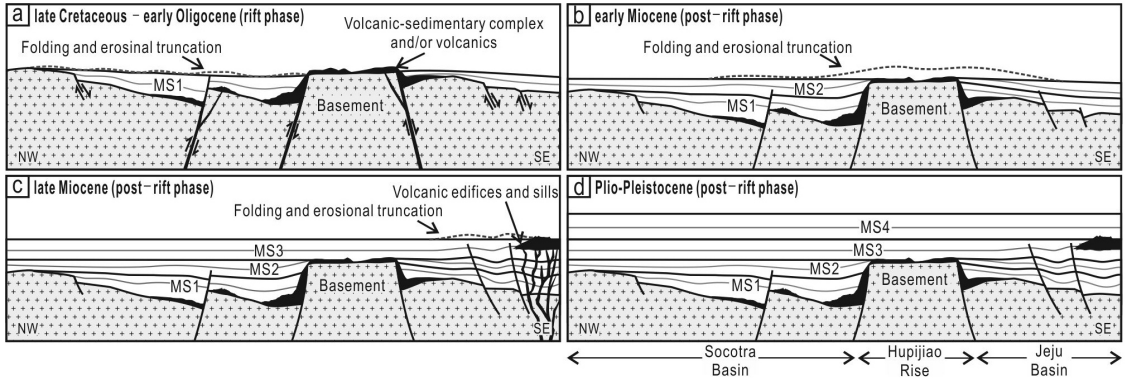


Fig. 13. Schematic illustration for the tectonic and stratigraphic evolution of the Socotra and Jeju basins.

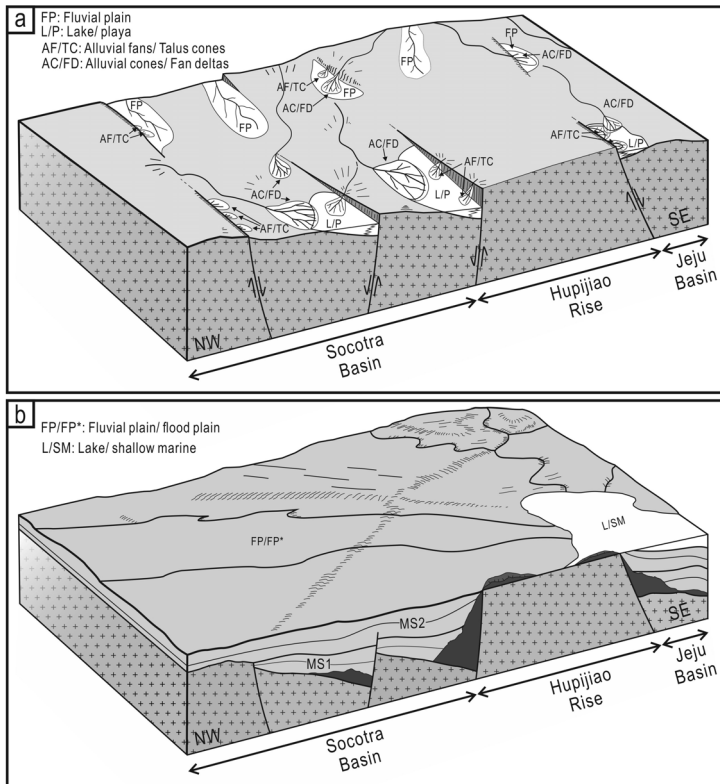


Fig. 14. Regional-scale depositional models of the rift stage (late Cretaceous-early Oligocene) (a), and post-rift stage (early Miocene-Pliocene) (b). Modified from Gawthorpe and Leeder (2000).

것을 감안하면 MS2의 상부가 삭박되기 이전에는 후 피지아오 융기대의 상부를 덮고 있었던 것으로 판단된다. 즉, MS2가 형성된 올리고세 시기에는 열개작용이 거의 일어나지 않았고 퇴적물의 하중에 의한 분지의 침하작용이 지배적인 열개후 단계인 것으로 해석된다(그림 13b).

MS2의 집적 이후 퇴적분지들을 비롯한 연구지역의 전반적인 지형 기복이 평탄하게 된 것으로 확인된다(그림 14b). 또한 MS3에서 연안환경을 대표하는 탄성파상 S3가 주로 나타난다(그림 11, 12a, 12b, 12d). 제주분지의 MS3에서 관찰되는 주요 지질구조는 대규모의 습곡과 역단층들이지만 소코트라분지 지역에서는 뚜렷한 지질구조가 관찰되지 않는다(그림 5c). 따라서 MS2 형성 이후에 발생한 압축운동은 제주분지에 국한되어 일어난 것으로 해석된다(그림 13c). 이러한 내용은 기존연구들(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011, 2012)에서도 언급되고 있다. 추가적으로, 제주분지 지역과 후피지아오 융기대에 발달된 MS3에서는 화산활동을 지시하는 탄성파상 S4가 다수 확인된다(그림 11, 12b). Cukur *et al.* (2010)은 남해대륙붕에 발달되어 있는 화산형성물들의 현황 및 형성기구를 분석하여 MS3가 형성되는 시기에는 제주분지와 후피지아오 융기대 뿐만 아니라 남해대륙붕 지역 전반에 걸쳐 화산활동이 활발히 일어난 것으로 제시하였다.

MS4는 하부 구간은 해안환경, 상부 구간은 해양환경 하에 형성된 것으로 알려져 있다(Yun *et al.*, 1999; Cukur *et al.*, 2011). 이는 MS4의 하부에서는 해안환경을 지시하는 탄성파상 S3가 관찰되지만 상부에서는 천해환경인 탄성파상 S1이 나타나는 것을 통해 확인된다. 또한 눈에 띄는 지질구조는 관찰되지 않고 전반적으로 평탄한 퇴적층이 매적(aggradation)되는 층형을 보인다. 따라서 플라이오-플라이스토세 시기에 이 지역은 지구조적으로 안정되어 있었던 것으로 해석되며, 점진적이고 광역적인 지각의 침강과 압밀작용으로 인해 비교적 일정한 수심이 유지되면서 천해퇴적층이 광범위하게 집적된 것으로 추정된다(그림 13d).

6. 결 론

남해 대륙붕(제4, 5광구)에 발달되어 있는 제주분지와 소코트라분지는 대규모의 기반암 고지대에 의

하여 경계 지어지는 국지적인 기반암저지대로 인지된다. 이와 같은 분지들은 후기 백악기부터 형성된 것으로 보이나 구조적 성인은 서로 차이가 있다. 소코트라분지는 열개작용을 통해서 초기분지의 형태를 이루었지만, 제주분지는 지각침강에 의하여 분지가 형성된 것으로 해석된다. 초기 분지형성 이후에 오세 시기에는 하천과 호수환경을 통해서 열개동시성퇴적층인 MS1(에오세)이 형성되었다. 전기 올리고세에는 압축성 지구조운동이 발생하여 분지의 열개작용은 중단되었으며 습곡된 MS1의 상부는 삭박되어 경사부정합면(MB2)이 발달되었다. 이후 분지들은 후열개 단계로 접어들었으며, 지속적인 분지의 침강으로 퇴적환경은 해안환경을 거쳐 천해환경으로 전이되었고 MS2(올리고세)가 연구지역 전반에 걸쳐 집적되었다. 전기 마이오세에는 또 다시 압축성 지구조운동이 일어나 MS2 또한 습곡작용을 받은 뒤 상부가 삭박되어 경사부정합(MB3)이 형성되었다. 이때 대다수의 소규모 분지들은 퇴적층으로 채워지면서 전반적으로 평탄한 지형을 이루었다. 이후 연구지역은 해안환경이 우세한 조건에서 MS3(마이오세)가 광범위하게 집적되었다. 후기 마이오세에는 제주분지 지역에 국한되어 발생한 압축성 지구조운동으로 MS3가 국지적으로 습곡작용을 받았으며, 크고 작은 다수의 화산활동이 국지적으로 일어났다. 플라이오-플라이스토세에는 구조적으로 안정된 상태에서 초기에는 해안환경이, 후기에는 지역 전반에 걸쳐 해침이 일어나면서 천해환경이 발달하면서 MS4가 연구지역의 전반에 걸쳐 평탄하게 형성되었다.

사 사

이 논문은 한국해양과학기술원에 수행한 ‘심해침몰선 정밀탐사 기획연구(P155700)’에 의해 지원되었습니다. 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 주신 한국지질자원연구원의 유동근 박사님과 익명의 심사위원분께 감사드립니다.

REFERENCES

- Bong, P.Y., Lee, H.Y., Kwon, Y.I. and Son, J.D., 1993, Petroleum Resources Assessment of Sokotra Basin. Assessment of Petroleum Resources (I), KIGAM Research Report (KR-93-4A-1), 3-234 (in Korean with

- English abstract).
- Coffin, M.F., Munschy, M., Colwell, J.B., Schlich, R., Davies, H.L. and Li, Z.G., 1990, Seismic stratigraphy of the Raggatt Basin, southern Kerguelen Plateau: tectonic and paleoceanographic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 5, 563-579.
- Cukur, D., Horozal, S., Kim, D.C. and Han, H.C., 2011, Seismic stratigraphy and structural analysis of the northern East China Sea Shelf Basin interpreted from multi-channel seismic reflection data and cross-section restoration. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1003-1022.
- Cukur, D., Horozal, S., Kim, D.C., Lee, G.H., Han, H.C. and Kang, M.H., 2010, The distribution and characteristics of the igneous complexes in the northern East China Sea Shelf Basin and their implications for hydrocarbon potential. *Marine Geophysical Researches*, 31, 4, 299-313.
- Cukur, D., Horozal, S., Lee, G.H., Kim, D.C. and Han, H.C., 2012, Timing of trap formation and petroleum generation in the northern East China Sea Shelf Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 36, 1, 154-163.
- Eberli, G.P., Masferro, J.L. and Sarg, J.F. (Eds.), 2004, *Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and Systems*. AAPG Memoir, 81, 1-9.
- Gawthorpe, R.L. and Leeder, M.R., 2000, Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12, 195-218.
- Gerdes, K., Labarbarie, M. and Tveiten, B., 1988, *Basin Analysis and Prospectivity of the East China Sea Area*. British Petroleum (BP) Report, London, 75 p.
- Hall, R., Ali, J.R., Anderson, C.D. and Baker, S.J., 1995, Origin and motion history of the Philippine Sea Plate. *Tectonophysics*, 251, 1, 229-250.
- Harrison, P.T. and Heap, A.D., 2003, Environmental management of clastic coastal depositional environments: inferences from an Australian geomorphic database. *Ocean and coastal management*, 46, 5, 457-478.
- Herzer, R.H., 1995, Seismic stratigraphy of a buried volcanic arc, Northland, New Zealand and implications for Neogene subduction. *Marine and petroleum geology*, 12, 5, 511-531.
- Hsu, S.K., Sibuet, J.C. and Shyu, C.T., 2001, Magnetic inversion in the East China Sea and Okinawa Trough: tectonic implications. *Tectonophysics*, 333, 1, 111-122.
- Hubbard, R.J., Pape, J. and Roberts, D.G., 1985, Depositional sequence mapping as a technique to establish tectonic and stratigraphic framework and evaluate hydrocarbon potential on a passive continental margin, in O.R. Berg and D. Wooverton, eds., *Seismic Stratigraphy II*. AAPG Memoir 39, 79-91.
- Iwasaki, T., Hirata, N., Kanazawa, T., Melles, J., Suyehiro, K., Urabe, T. and Shimamura, H., 1990, Crustal and upper mantle structure in the Ryukyu Island Arc deduced from deep seismic sounding. *Geophysical journal international*, 102, 3, 631-651.
- JGI, 2009, *Sequence Stratigraphic Study in Xihu Trough, Korea-Japan Joint Development Zone*. 343 p.
- Jolivet, L., Davy, P. and Cobbold, P., 1990, Right-lateral shear along the Northwest Pacific Margin and the India-Eurasia Collision. *Tectonics*, 9, 6, 1409-1419.
- Kingston, D.R., Dishroon, C.P. and Williams, P.A., 1983, Global basin classification system. *AAPG bulletin*, 67, 12, 2175-2193.
- Kizaki, K., 1978, Tectonics of the Ryukyu island arc. *Journal of Physics of the Earth*, 26 (Supplement), S301-S307.
- Kong, F., 1998, *Continental margin deformation analysis and reconstruction - evolution of the East China Sea Basin and adjacent plate interaction*. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 1997, *Report on assessment of integrated technology in continental shelf of Korea (East China Sea Shelf Basin I)*. KIGAM Research Report (KOR009000153), 338 p (in Korean).
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 2009, *Detailed Exploration of Marine Resources in the Korean Exclusive Economic Zone (EEZ)*. KIOST Research Report (R&D 2009-0192) (in Korean).
- Korea National Oil Corporation (KNOC), 1998, *Biostratigraphy of continental shelf of Korea (Cheju Basin)*. Research Report (KOR009000002), 135 p (in Korean).
- Kwon, Y.I. and Boggs, S., 2002, Provenance interpretation of Tertiary sandstones from the Cheju Basin (NE East China Sea): a comparison of conventional petrographic and scanning cathodoluminescence techniques. *Sedimentary Geology*, 152, 1, 29-43.
- Kwon, Y.I., Park, K.S., Yu, K.M. and Son, J.D., 1995, Stratigraphy and provenance of Non-marine sediments in the Tertiary Cheju Basin. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 3, 1, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.K., Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2009, Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea: implications for tectonic history and sequence development during back-arc evolution. *Geo-Marine Letters*, 29, 181-189.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Han, S.J. and Kim, D.C., 2001, Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 5, 615-634.
- Lee, G.H., Kim, B., Shin, K.S. and Sunwoo, D., 2006, Geologic evolution and aspects of the petroleum geol-

- ogy of the northern East China Sea shelf basin. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 237-260.
- Leeder, M.R. and Gawthorpe, R.L., 1987, Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 28, 1, 139-152.
- Letouzey, J. and Kimura, M., 1984, Okinawa Trough genesis: structure and evolution of a backarc basin developed in a continent. *Marine and Petroleum Geology*, 2, 2, 111-130.
- Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R. and Sangree, J.B., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. 117-133.
- Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P. and Jackson Jr., J.A., 2005, *Glossary of Geology*. American Geological Institute, Alexandria, Virginia.
- Oh, J.H., Kwak, Y.H., Cheong, T.J., Ryu, B.J., Son, B.K., Hwang, I.G., Lee, Y.J. and Kim, H.J., 1994, Petroleum Resources Assessment of the Cheju Basin. *Petroleum Resources Assessment (I)*, KIGAM Research Report (KR-94(C)4-1), 3-343 (in Korean with English abstract).
- Oh, J., Park, K.S. and Park, K.P., 1997, The Name of the Sedimentary Basins in the Continental Margin of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 3, 148-159 (in Korean with English abstract).
- Park, Y.S., Lee, J.D., Yun, H., Yi, S. and Lee, B.S., 2008, Diatom assemblages in core sediments from the JDZ subduction 6 block, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 24, 1, 11-19 (in Korean with English abstract).
- Planke, S., Symonds, P.A., Alvestad, E. and Skogseid, J., 2000, Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *Journal of Geophysical Research*, 105, B8, 19335-19351.
- Prosser, S., 1993, Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. *Geological Society, London, Special Publications*, 71, 1, 35-66.
- Reading, H.G. (Ed.), 1986, *Sedimentary environments and facies*. Elsevier, New York, 557 p.
- Schlische, R.W., 1995, Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings. *AAPG bulletin*, 79, 11, 1661-1678.
- Shinjo, R., 1999, Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system. *Chemical Geology*, 157, 1, 69-88.
- Sibuet, J.C. and Hsu, S.K., 2004, How was Taiwan created?. *Tectonophysics*, 379, 1, 159-181.
- Thomson, K. and Hutton, D., 2004, Geometry and growth of sill complexes: insights using 3D seismic from the North Rockall Trough. *Bulletin of Volcanology*, 66, 4, 364-375.
- Vail, P.R., Mitchum Jr, R.M. and Thompson III, S., 1977, *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level: Part 4. Global Cycles of Relative Changes of Sea Level: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation*. AAPG Memoir, 26, 83-97.
- Wageman, J.M., Hilde, T.W.C. and Emery, K.O., 1970, Structural framework of East China Sea and Yellow Sea, American. *Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 1611-1643.
- Xu, J., Ben-Avraham, Z., Kelty, T. and Yu, H.S., 2014, Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions. *Earth-Science Reviews*, 130, 154-196.
- Xu, S., Hao, F., Xu, C., Wang, Y., Zou, H. and Gong, C., 2015, Differential compaction faults and their implications for fluid expulsion in the northern Bozhong Subbasin, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 63, 1-16.
- Yang, Q.L., 1992, Geotectonic framework of the East China Sea, In: Watkins, J.S., Zhiqiang, F. and McMillen, K.J. (eds.), *Geology and Geophysics of Continental Margins*. AAPG Memoir, 53, 17-25.
- Yoo, D.G., Kim, G.Y., Lee, H.Y., Seo, Y.K., Park, S.C. and Kim, D.C., 2004, Sedimentation and distribution pattern of the fine-grained sediments in the Southeastern inner shelf of Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 2, 159-169 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.H., Son, B.K. and Shinn, Y.J., 2009, Review on Geology and Potential Petroleum Systems of Sedimentary Basins in the South Sea of Korea. *KIGAM Bulletin*, 13, 1, 54-68 (in Korean with English abstract).
- Yun, H., Yi, S., Yi, S., Kim, J.H., Byun, H.S., Kim, G.H. and Park, D.B., 1999, Biostratigraphy and paleoenvironment of the Cheju sedimentary basin-based on materials from explorations, Geobuk-1 and Okdom-1. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 15, 43-94 (in Korean with English abstract).
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and Tectonic Evolution of the East China Sea, *Chinese Sedimentary Basins*. Elsevier, 165-179.

Received : March 18, 2016

Revised : April 29, 2016

Accepted : May 4, 2016