



Article

남해대륙붕 제주분지 북부 고진기 퇴적층의 탄성파상 분석을 통한 퇴적시스템 복원

이재혁¹, 윤우석², 박채슬³, 이재호⁴, 제윤희⁴, 김기범⁵, 백세익⁶, 윤석훈^{2,*}

¹부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단

²제주대학교 지구해양학과

³제주대학교 지하수학협동과정

⁴부산대학교 지구환경시스템학부

⁵부산대학교 지질환경과학과

⁶한국석유공사 국내사업개발처

Reconstruction of depositional system based on seismic facies analysis of the Paleogene sedimentary deposits in the northern Jeju Basin, the Korean South Sea

Jae-Hyuk Lee¹, Woo-Seok Yoon², Chae Sul Park³, Jae-Ho Lee⁴, Yun-Hui Je⁴, Gi-Bom Kim⁵, Seik Paik⁶, Seok-Hoon Yoon^{2,*}

¹BK21 School of Earth and Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

²Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

³Interdisciplinary Graduate Program in Groundwater Studies, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

⁴Division of Earth and Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

⁵Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

⁶Domestic Business Development Department, Korea National Oil Corporation, Ulsan 44538, Republic of Korea

Received: December 29, 2025 / Revised: February 12, 2026 / Accepted: February 14, 2026

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

요약: 본 연구에서는 동중국해 제주분지 북부에 분포하는 에오세 및 올리고세 퇴적층을 대상으로 3D 및 2D 탄성파 자료에 대한 탄성파상 분석을 수행하고, 이를 시추공 암상 및 고생물 분석 결과와 대비하여 퇴적환경과 퇴적시스템의 시공간적 진화를 복원하였다. 최근 재정립된 3rd-order 층서체계를 기준으로 에오세 및 올리고세 퇴적층 내에서 반사 진폭, 연속성, 배열 양상 및 지층 외형을 종합하여 6개의 탄성파상 유형을 구분하고, 이들의 공간적 분포를 맵핑하였다. 각 탄성파상 유형은 시추공 자료와의 대비를 통해 퇴적작용과 퇴적환경의 관점에서 해석되었다. 탄성파상 분석 결과, 제주분지 북부에서는 에오세 동안 열개작용에 의해 분절된 소규모 분지 내에서 충적선상지와 하천, 국지적 호수 환경이 우세하게 발달하였으며, 후기 에오세 이후 해안평원 환경이 점진적으로 확대된 것으로 해석된다. 전기 올리고세에는 분지 충진에 따른 배수계(drainage system) 확장과 함께 상부 해안평원을 중심으로 한 전이적 퇴적환경이 형성되었고, 후기 올리고세에는 연안 및 천해 환경이 분지 전반에 걸쳐 우세하게 분포하였다. 이러한 결과는 제주분지가 초기 육성 퇴적시스템에서 해양 퇴적시스템으로 전이되는 과정을 보여주며, 분지 내 퇴적환경 변화의 시기성과 공간적 특성을 이해하는 데 중요한 지질학적 근거를 제공한다.

주요어: 탄성파상, 퇴적환경, 고진기, 제주분지, 남해대륙붕

ABSTRACT: This study applies seismic facies analysis to the Eocene and Oligocene sedimentary successions in the northern Jeju Basin of the Korean South Sea, using 3D and 2D seismic reflection data integrated with lithological and paleontological information from exploration wells. Within a recently established 3rd-order sequence stratigraphic framework, six seismic facies types were identified and mapped based on their reflection characteristics. Interpretation of these facies indicates that during the Eocene, deposition occurred mainly in structurally segmented rift sub-basins, where an alluvial setting was well developed, including alluvial fan, channel, and localized lacustrine environments. From the Late Eocene, a gradual environmental shift from fluvial to coastal settings occurred as a consequence of relative sea-level rise. During the Oligocene, basin infilling promoted the transition of the depositional environments from the upper coastal plain to the lower coastal plain and shallow marine settings. Our study results have revealed that the Jeju Basin has gradually experienced an environmental change

from non-marine in the early rifting stage to marine settings, and provided important constraints on the timing and spatial distribution of depositional environments.

Key words: seismic facies, depositional environment, Paleogene, Jeju Basin, Korean South Sea continental shelf

1. 서론

우리나라 남해대륙붕과 남서쪽의 동중국해 대륙붕에는 동중국해 대륙붕 퇴적분지(East China Sea Shelf Basin)와 남해대륙붕 퇴적분지(Korean South Sea Shelf Basin)로 불리는 다수의 신생대 분지들이 발달하고 있으며, 분지층진물 내에는 대륙-해양 전이환경에서 형성된 다수의 탄화수소 잠재/유망 구조들이 존재할 것으로 평가되고 있다. 특히, 대한민국 남해대륙붕에 인접한 중국해역의 시후(Xihu) 분지에서는 에오세층(평후층; Pinghu Formation)과 올리고세층(후야강층; Huagang Formation)에서 상업적 규모의 가스전이 발견되어 생산단계에 있다(그림 1). 시후분지의 연장으로 보이는 제주분지에서도 유징이 발견되어 1970년대부터 탐사가 이루어져 왔는데(KIGAM, 1997), 최근 양질의 3D 탄성파 탐사자료의 취득, 자료 처리 및 분석 기법

의 개선, 시추공 생층서의 재정립 등 지속적인 탐사와 기술 개발 성과가 쌓이면서 퇴적분지와 구성 지층의 지질학적 특성을 반영한 새로운 석유시스템 모델 구축의 필요성이 대두되고 있다.

탄성파상이탄 탄성파단면에서 인지되는 퇴적 층단위(sedimentary unit)의 반사패턴(seismic reflections)이나 층형(strata geometry)을 종합한 특성으로서, 지층의 암상이나 퇴적작용, 퇴적환경의 지시자이다(Mitchum *et al.*, 1977a; Sangree and Widmier, 1977; Roksandic, 1978). 석유시스템 모델링에서는 지층의 퇴적환경 특성과 공간적 분포에 대한 기초정보를 확보하기 위한 주요 수단의 하나로 활용되고 있다(Metwalli *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2021). 특히 3D 탄성파 자료의 보급 이후 탄성파상 분석은 개별 시추공 자료의 한계를 보완하고, 퇴적체의 시공간적 분포와 퇴적시스템의

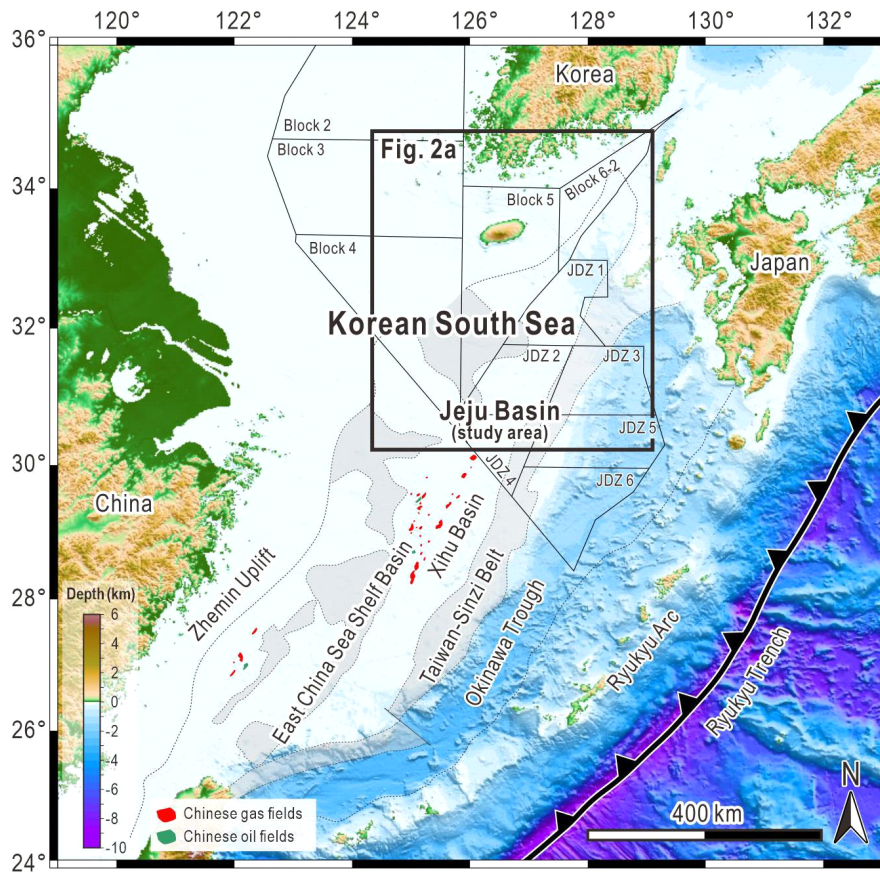


Fig. 1. Map showing location of the Korean South Sea. Background image for the map was created by Generic Mapping Tools version 6 (Wessel *et al.*, 2019) with the source data (Tozer *et al.*, 2019). Information for the locations of the Chinese hydrocarbon fields are collected from Wang *et al.* (2019 and 2020).

진화를 복원하는 데 필수적인 방법으로 자리 잡았다. 최근에는 정량적 탄성파 속성 분석과의 결합을 통해 해석의 객관성을 높이려는 시도도 이루어지고 있으나, 시추공 자료와의 직접적인 대비를 통한 전통적인 탄성파상 해석 역시 여전히 높은 신뢰성을 지닌 접근법으로 평가된다(e.g., Nordfjord *et al.*, 2006; Koh *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2019, 2021).

제주분지에 대해서도 다수의 탄성파 기반 구조-층서 연구가 수행되어 왔으나(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011), 대부분은 분지 규모의 구조 발달사 또는 광역 층서 구분에 초점을 두었으며, 3D 탄성파 자료와 시추공 암상·고생물 자료를 통합하여 3rd-order 층서 단위에서 퇴적시스템의 시공간적 변화를 체계적으로 복원한 연구는 상대적으로 제한적이었다. 또한 최근 재정립된 제주분지의 3rd-order 층서 체계를 기반으로 탄성파상을 분류하고, 이를 퇴적환경 및 퇴적시스템 진화와 직접적으로 연계한 연구는 충분히 이루어지지 않았다.

본 연구의 목적은 제주분지 북부에 분포하는 고진기(에오세-올리고세) 퇴적층을 대상으로, 최신 3D 및 2D 탄성파 자료에 대한 탄성파상 분석을 수행하고, 이를 시추공의 암상 및 고생물 분석 결과와 대비함으로써 퇴적환경과 퇴적시스템의 시공간적 진화를 복원하는 데 있다. 특히 본 연구는 (1) 최근 정립된 3rd-order 층서체계를 기준으로 탄성파

상을 체계적으로 분류하고, (2) 각 탄성파상의 공간적 분포를 3차원적으로 맵핑하며, (3) 시추공 기반 지질 자료와의 교차 검증을 통해 탄성파상-퇴적환경 대응 관계의 신뢰성을 제고하는 것을 주요 목표로 한다. 이를 통해 제주 열개분지의 초기 육성 퇴적 환경에서 해양 지배 퇴적 환경으로의 전이 과정을 규명하고, 나아가 근원암 및 저류암 발달 가능성과 같은 석유시스템 요소의 시공간적 분포를 이해하기 위한 지질학적 틀을 제시하고자 한다.

2. 연구지역

동중국해는 유라시아판 동측 연변부에 위치한 주변해(marginal sea)로, 태평양판 및 필리핀해판과의 상호작용에 의해 형성된 복합적인 지구조적 특성을 지닌다. 이 지역은 서쪽에서 동쪽으로 체민 융기대(Zhemin Uplift), 동중국해 대륙붕분지 및 남해대륙붕 분지, 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi Uplift Belt), 오키나와 해곡(Okinawa Trough), 류큐 열도(Ryukyu Arc)로 구분되며, 각 구조대는 북동-남서 방향으로 평행하게 배열되어 있다(그림 1). 이 중 동중국해의 북동부에 해당하는 대한민국 남해대륙붕 분지는 북북동-남남서 및 북서-남동 방향의 단층군과 기반암 고지대에 의해 제주분지, 이어도분지, 거문분지, 한라분지, 한산분지 등 다수의 소규모 분지들로 분절된 채 나타난다(Oh *et al.*, 1997;

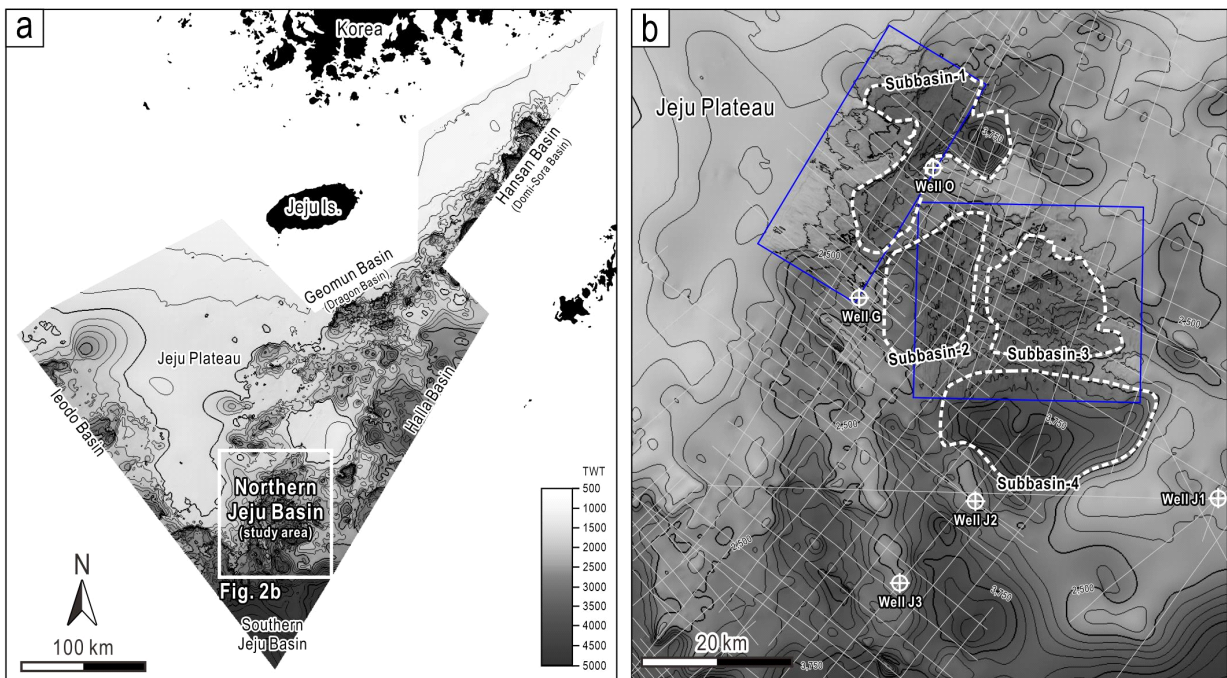


Fig. 2. (a) Time-structural map of the acoustic basement showing the locations of the rift basins of the Korean South Sea. (b) Enlarged map showing basement topography of the northern Jeju Basin and the locations of the data set, including 2D and 3D seismic reflection data and exploratory wells, analyzed in this study. Contours in ms TWT (Two Way Travel Time) denote the depth of the acoustic basement top.

Lee *et al.*, 2026a, 2026b). 제주분지의 범위에 대해서는 논란이 있으나(Oh *et al.*, 1997), 중국 시후분지의 북부 연장으로서 좁은 의미에서는 북동쪽의 거문분지 및 한산분지와 서측의 이어도분지와는 기반암 고지대에 의해 구분된다(Kwon *et al.*, 1995; Yun *et al.*, 1999)(그림 2a).

제주분지는 후기 백악기 또는 그 이전에 형성된 화강암과 편마암 지대에서 일어난 두 차례의 고진기 열개작용으로 형성되었으며(Lee *et al.*, 2006), 주로 북동-남서 혹은 동-서 방향의 점원단층(listric fault) 및 블록 정단층들에 의해 경계 지어진 다양한 규모의 지구대(graben) 및 반지구대(half-graben) 내에 두께 5.5 km 이상의 퇴적층이 분포한다(Cukur *et al.*, 2011). 이 지역에서는 총 9공의 탐사 시추가 진행되었으며, 기저부인 고진기층 및 상위 초기 마이오세층은 호성 및 하성 환경에서 퇴적된 것으로 주로 사암, 실트암, 이암의 호층 구조를 보인다(KIGAM, 1997). 국지적으로 산성 응회암 또는 화산기원의 역암도 확인된다(GSK, 2023). 중기-후기 마이오세에 형성된 중간 퇴적 구간 역시 탄층 및 역암이 협재된 사암, 실트암, 이암으로 구성되며, 후기 마이오세말 대규모 화성암체 관입·분출에 의한 구조적 용기와 국지적 변형으로 인해 지층의 두께 변화가 크게 나타난다. 최상부에는 플라이오세~플라이스토세에 집적된 미고결 천해 퇴적물(모래, 점토)이 분포한다. 퇴적층의 연대는 일부 연구들(Kwon *et al.*, 1995; KIGAM, 1997)에서 최하부 지층을 올리고세로 해석하였지만, 그 이후의 미화석 연구들

(Bong *et al.*, 1993; Yun *et al.*, 1999)은 에오세로 제시하였으며, 최근에는 중국 시후분지와는 층서대비를 통해서 팔레오세의 가능성도 제기되고 있다(GSK, 2024; Lee *et al.*, 2026a).

3. 자료 및 방법

본 연구를 위해 연구진은 한국석유공사가 2002년, 2022년에 획득한 약 1,000 km²의 3D 탄성파 자료, 1971년부터 2005년에 걸쳐 획득한 약 10,000 line-km의 다중채널 2D 탄성파 자료를 활용하였다(그림 2b). 이러한 탄성파 반사법 자료를 통해 구분된 에오세 및 올리고세 3rd-order 층단위(unit) 내 나타나는 반사면들의 특성 요소, 즉 개별 반사면의 진폭(amplitude), 연속성(continuity)과 상호 배열태(internal configuration), 그리고 유사 반사면으로 이루어지는 지층의 외형(external form) 등을 기준으로 탄성파상 유형이 구분되었다. 각 탄성파상 유형들을 만든 퇴적작용 및 퇴적환경의 해석을 위해 시추공 G 및 시추공 O의 암상, 물리검층상 그리고 고생물분석 결과와의 비교 분석이 추가적으로 수행되었다. 그런 다음 제주분지의 3D와 2D 탄성파자료들을 통해 각 3rd-order 층서 단위들을 구성하는 탄성파상들의 공간 분포도가 제작되었으며, 이러한 결과들에 기반하여 제주분지의 시대별 퇴적환경 모델을 제작하였다.

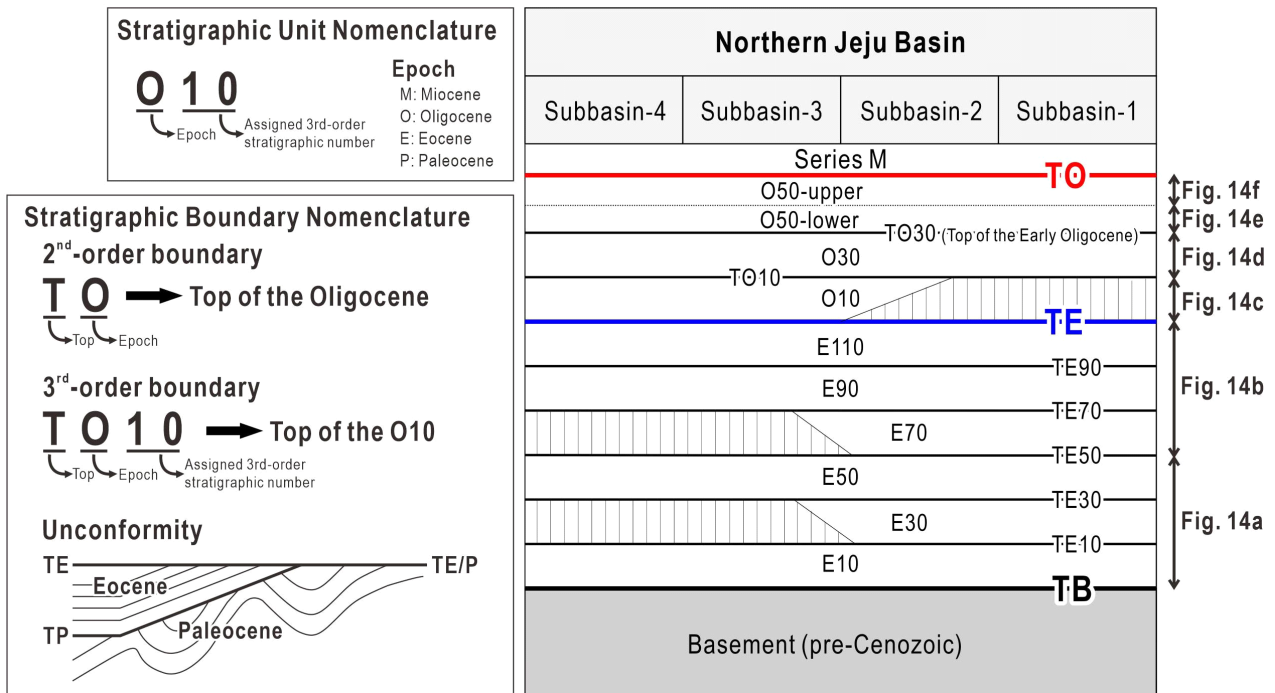


Fig. 3. Paleogene 2nd and 3rd-order stratigraphic chart of the northern Jeju Basin (modified after Lee *et al.*, 2026a). TB: Top of the basement, TE: Top of the Eocene, TO: Top of the Oligocene.

4. 제주분지 북부 고진기 3rd-order 층서체계

시후분지 내 석유시스템은 주로 에오세 호성세일 근원암과 올리고세 사암 저류층으로 구성된다(Wang *et al.*, 2019). 시후분지의 북부 연장으로 여겨지는 제주분지에서의 과거

연구결과는 에오세 및 올리고세 시기에 형성된 퇴적층이 각각 근원암과 저류층의 유망성을 갖는 것으로 평가한 바 있다(GSK, 2014; KNOC, 2020). 해당 퇴적층들에 대한 정교한 석유시스템 모델링을 위해 고해상도 3D 탄성파 반사자

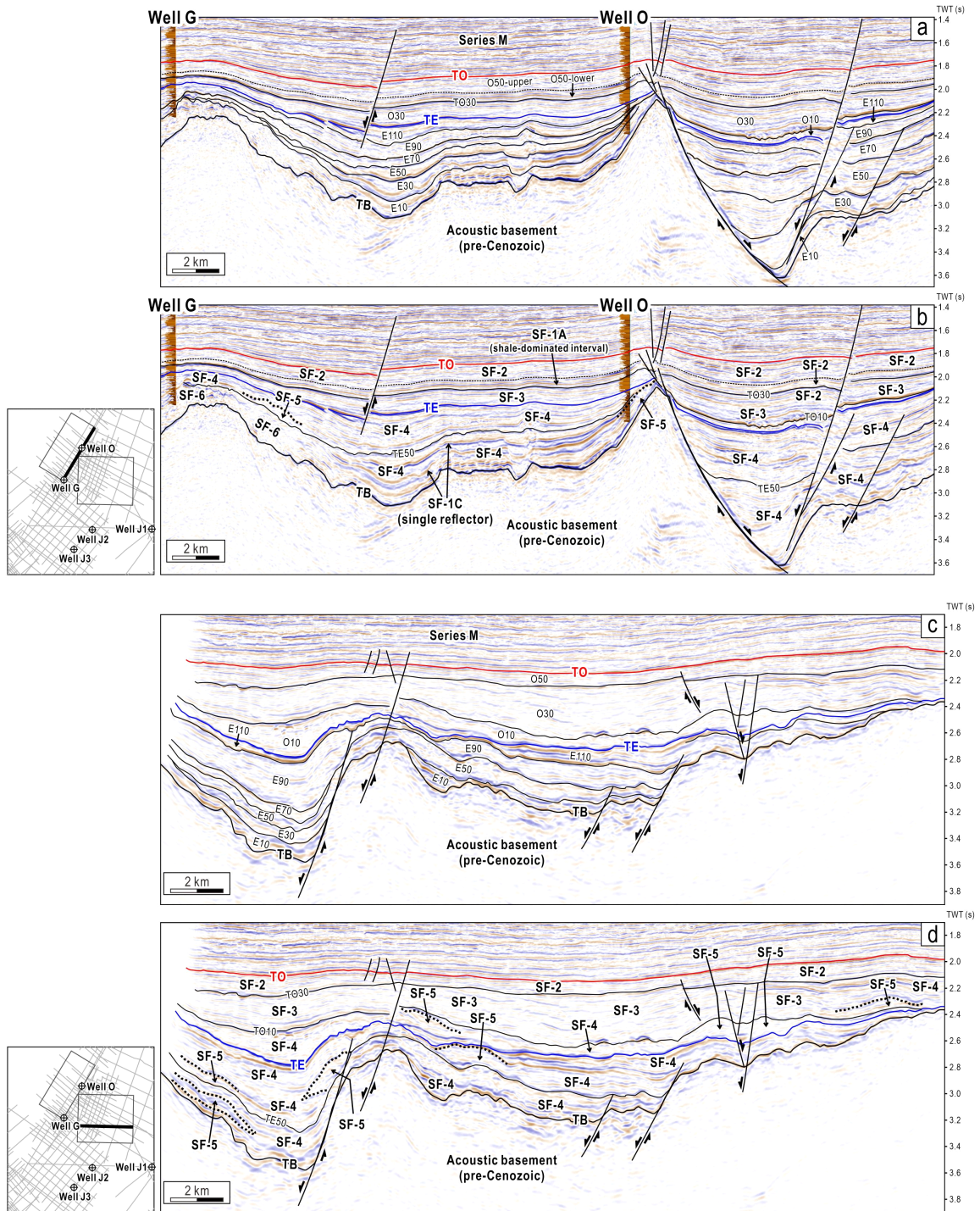
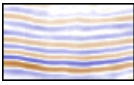
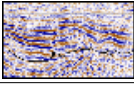
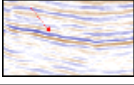
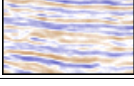
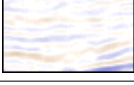
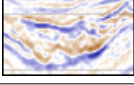
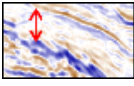
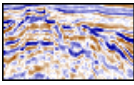


Fig. 4. Seismic reflection profiles selected from 3D volume. Note that (a) and (c) present the Paleogene 2nd and 3rd-order stratigraphy of the northern Jeju Basin, and (b) and (d) show seismic facies interpretation. For the locations of the seismic reflection profiles, see the black bold lines in the insets. TB: Top of the basement, TE: Top of the Eocene, TO: Top of the Oligocene.

Table 1. A classification scheme of the seismic facies commonly recognized in the Jeju Basin. Descriptive terminology for seismic facies was adopted from Mitchum et al. (1977a) and Xu and Haq (2022). Each facies was interpreted through integration of the dataset, including seismic reflection characteristics cutting samples, and gamma ray logs. The interpretations were cross-validated with the existing paleo-environmental reconstruction model based on palynological analysis (Yun, 2019).

Facies code	Seismic section	External form	Internal configuration	Amplitude	Continuity	Interpretation
SF-1A		Sheet drape; trough fill	Parallel to subparallel	High to moderate	High	Marine bay; lake (large-scale)
SF-1B		Lens; pond; wedge	Parallel; fill; progradational	High to moderate	High	Lake (small-scale); marsh
SF-1C		Single or double reflector (s)	Parallel	High to moderate	High	Thin marine incursion beds; unconformity
SF-2		Sheet; wedge	Subparallel	Moderate to weak	Moderate	Lower coastal plain; shoreface
SF-3		Sheet; wedge	Chaotic to stratiform	Moderate to weak	Poor to moderate	Upper coastal plain (channel, flood plain, swamp, lake, etc.)
SF-4		Wedge; lens; mound	Chaotic to stratiform	Variable	Poor	Rift basin floor; valley; distal alluvial fan
SF-5		Wedge; bank; mound	Chaotic to stratiform	Weak	Poor	Proximal alluvial fan
SF-6		Irregular	Chaotic to stratiform	Variable	Poor to moderate	Interbeds of volcanics & sediments

로 영역 내에서 고진기 3rd-order 층서체계가 새롭게 정립되었다(GSK, 2023, 2024, 2025). 새로운 제주분지 고진기 3rd-order 층서체계는 6개의 예오세 3rd-order 층단위(E10, E30, E50, E70, E90, E110)와 3개의 올리고세 3rd-order 층단위(O10, O30, O50)로 구성된다(그림 3).

예오세부터 초기 올리고세에 걸쳐 퇴적된 3rd-order 층단위는 단층에 구획된 소분지를 충전하는 형태로 관찰되나, 후기 올리고세 동안 퇴적된 3rd-order 층단위는 큰 두께변화 없이 분지 전역을 피복하는 형태로 나타난다(그림 4). 이러한 층단위 특징은 제주분지 북부의 경계 단층운동이 예오세에 시작되었으며, 초기 올리고세 말 종료되어 열적 침강작용으로 변화하였음을 지시한다(GSK, 2025).

5. 탄성파상의 유형 분류

이 연구에서 탄성파상 분석은 제주분지 석유시스템의 유망구간에 해당하는 예오세 및 올리고세 층준 내에서 세분된 3rd-order 층단위들을 대상으로 수행되었다. 각 층단위의 내부에 나타나는 반사면들의 특성 요소, 즉 개별 반사

면의 진폭, 연속성과 상호 배열형태, 그리고 인접한 다수의 반사면이 모여 나타나는 외형 등을 기준으로 하여 6개의 서로 다른 탄성파상 유형이 구분되었다(표 1).

5.1. 탄성파상 SF-1

탄성파상 SF-1은 탄성파 유형 중에서 가장 양호한 연속성의 반사면으로 이루어지는데 반사면의 진폭도 대체로 높고 개별 반사면들이 서로 평행하게 배열된 층상 배열(stratiform)의 특징을 보인다(그림 5). 이들이 나타나는 지층들은 대체로 두께가 비교적 일정한 판상(sheet drape)의 외형을 보이거나(SF-1A, 그림 5a) 소규모 분지나 저지대를 채우는 렌즈(lens) 혹은 썩기(wedge) 형태로 나타나기도 한다(SF-1B, 그림 5b). 한편, 연속성과 진폭이 양호한 1-2개의 반사면이 상대적으로 연속성과 진폭이 불량한 다른 탄성파상의 지층들 사이에 협재되어 나타나는 경우도 자주 인지된다(SF-1C, 그림 5c).

5.2. 탄성파상 SF-2

탄성파상 SF-2는 중간 내지 약한 진폭의 반사면들이 평행하거나 거의 평행하게(subparallel) 배열된 특징을 보이

는데, 개별 반사면의 측방 연속성은 양호하다(그림 6). 이러한 탄성파상이 나타나는 지층들의 외형은 대체로 판상이나 썩기형으로 탄성파상 SF-1과 유사한 외형적 특징을 가지나, 내부의 진폭과 연속성은 SF-1에 비해 불량하게 나타나는 차이가 있다.

5.3. 탄성파상 SF-3

탄성파상 SF-3에서는 연속성이 대체로 불량하고 진폭이 약한 반사면들과 상대적으로 양호한 연속성을 가진 반사면들이 부분적으로 층상배열을 이루고 있다(그림 7). 특히 개별 반사면이 측방으로 급격히 단절되거나 두께가 급격히

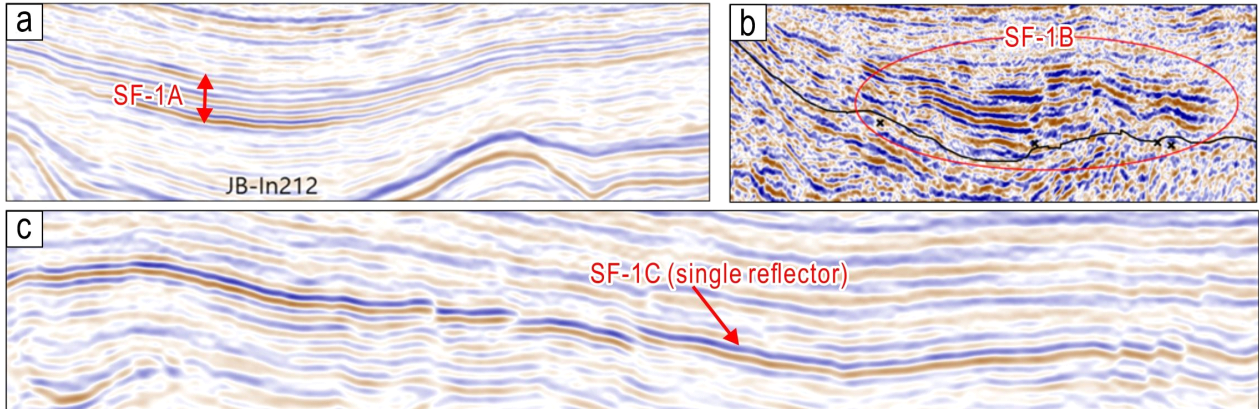


Fig. 5. Parts of the seismic sections showing sub-types of (a) SF-1A (sheet drape), (b) SF-1B (lens or wedge), and (c) SF-1C (thin drape). For detailed description of the facies, see Table 1.

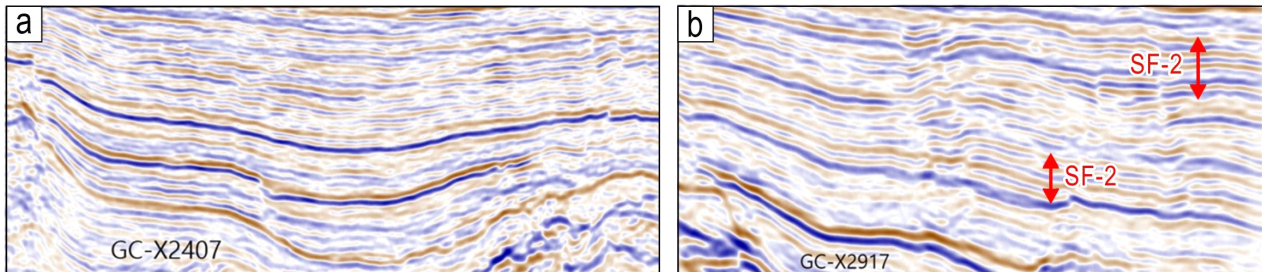


Fig 6. Parts of seismic sections showing SF-2 facies. For detailed description of the facies, see Table 1.

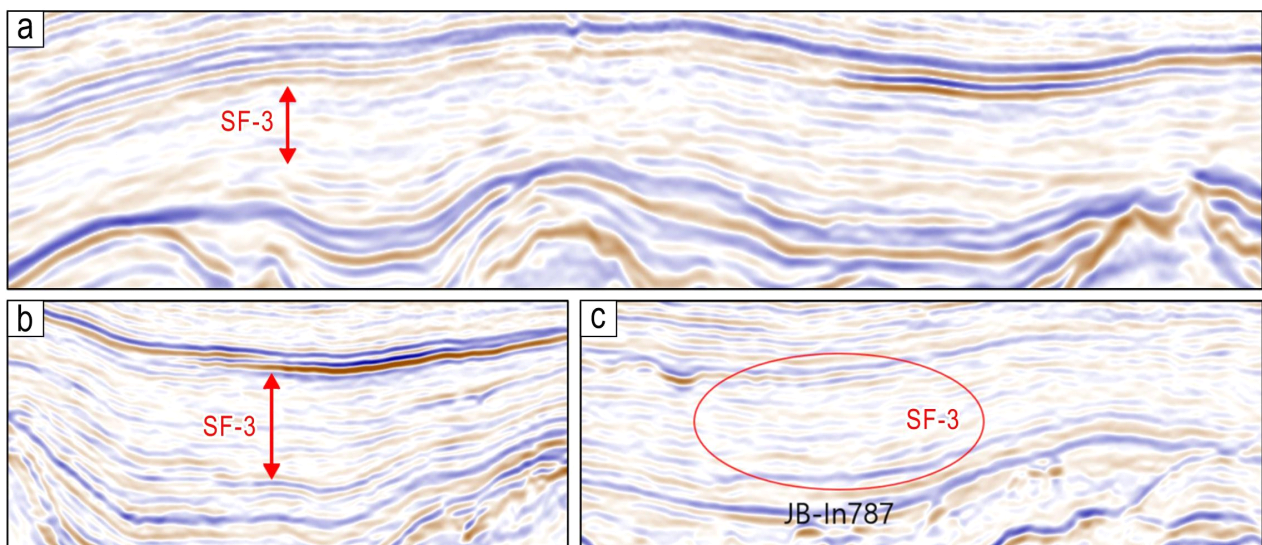


Fig. 7. Parts of seismic sections showing SF-3 facies. For detailed description of the facies, see Table 1.

변화되는 경우가 많아서 반사면 배열이 무질서하게(chaotic) 보이는 부분도 있으며, 일부에서는 반사면이 V자 형태로 굴곡져 나타나기도 한다. 한편, 지층들의 외형은 대체로 판상이나 썩기형으로서 탄성파상 SF-1이나 SF-2와 유사하다. 탄성파 단면에서 지층들은 내부 반사면의 진폭과 측방 연속성이 높을수록 명확하고 뚜렷하게 인지되는 경향이 있는데, 이러한 관점에서 SF-3에서 SF-1으로 갈수록 인지도가 양호해진다.

5.4. 탄성파상 SF-4

탄성파상 SF-4는 주로 기반암 저지대에 발달하는 소분지 중심부에서 나타나는데, 내부 반사면은 연속성이 대체로 불량하여 무질서하거나 부분적으로 층상 배열을 보이며 썩기, 렌즈 혹은 마운드 형태로 저지대를 채우는 특징을 보인다(그림 8). 다만 반사면의 진폭 특성은 강함에서 약함까지 다양하게 나타난다. 일부 지층에서는 V자 혹은 U자형

으로 오목하거나 마운드형으로 볼록하게 굴곡된 반사면이 다수 인지되기도 한다.

5.5. 탄성파상 SF-5

탄성파상 SF-5는 주로 소분지의 가장자리 사면을 따라 분포하는 썩기, 뱅크 혹은 마운드 형태의 지층에서 인지되는 탄성파상으로서, 개별 반사면은 진폭이 대체로 약하고 연속성이 불량하며 무질서하거나 부분적인 층상 배열을 보인다(그림 9). 하지만 일부 지층에서는 전진(progradation) 퇴적체의 전면층(foreset)에서와 유사한 경사 배열이 인지되기도 한다.

5.6. 탄성파상 SF-6

탄성파상 SF-6는 주로 음향기저(acoustic basement)나 기반암에서 확인되며, 특히 기반암 고지대의 가장자리 부근에서 우세하게 나타난다. 탄성파적 특징은 음향기저면에서는

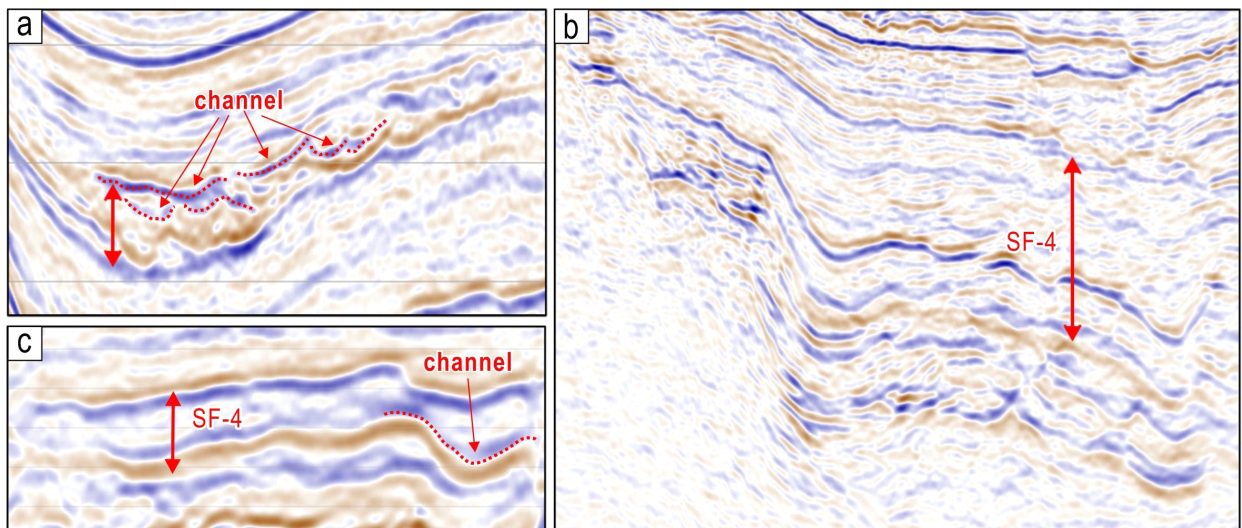


Fig. 8. Parts of seismic sections showing SF-4 facies. For detailed description of the facies, see Table 1.

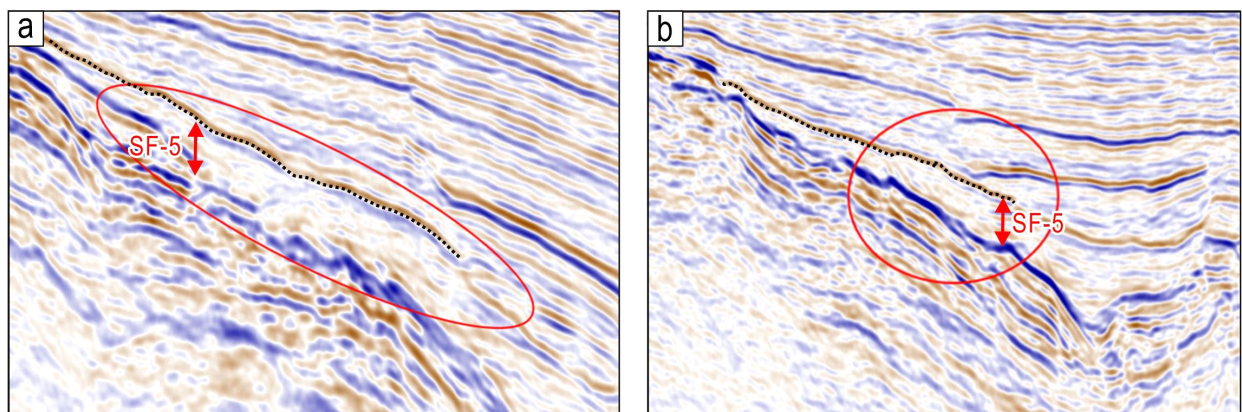


Fig. 9. Parts of seismic sections showing SF-5 facies. For detailed description of the facies, see Table 1.

진폭이 강하고 연속성이 상대적으로 양호한 반사면이 위치하고 그 아래에는 고진폭의 연속성이 불량하며 무질서하거나 주름진 형태를 갖는 반사면들이 불규칙적으로 배열되어 있다(그림 10).

및 O와 그 주변 탄성파단면에서 인지되는 탄성파상 유형 간의 대비가 수행되었다(그림 11). 그리고 이에 기초하여 시추공 구간의 암상과 고생물 분석에 기초한 고환경 해석 결과와의 비교 분석이 수행되었다.

6. 탄성파상과 시추공 자료의 대비

탄성파상의 지질학적 의미를 해석하기 위하여 시추공 G

6.1. 탄성파상과 암상

6.1.1. 시추공 G

전기 에오세 층준(E10, E30, E50)에 해당하는 시추공 G

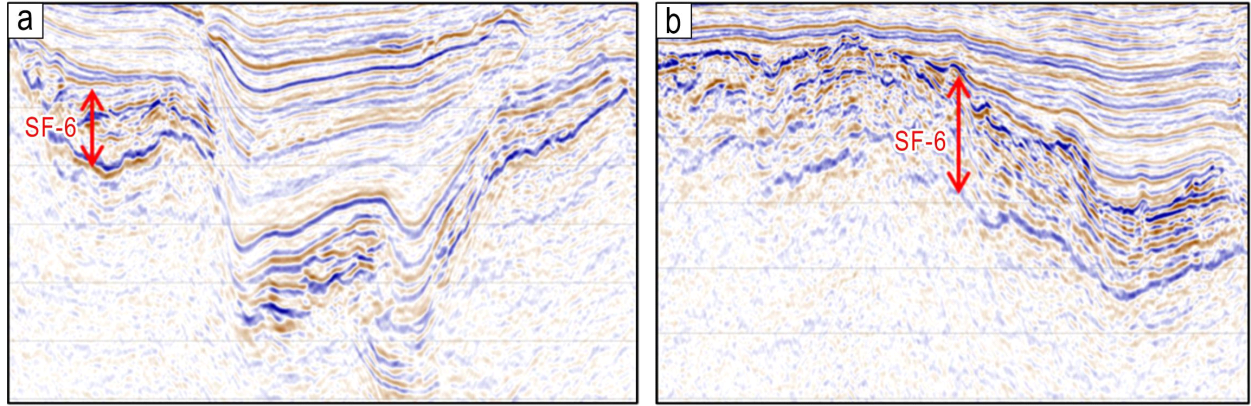


Fig. 10. Parts of seismic sections showing SF-6 facies. For detailed description of the facies, see Table 1.

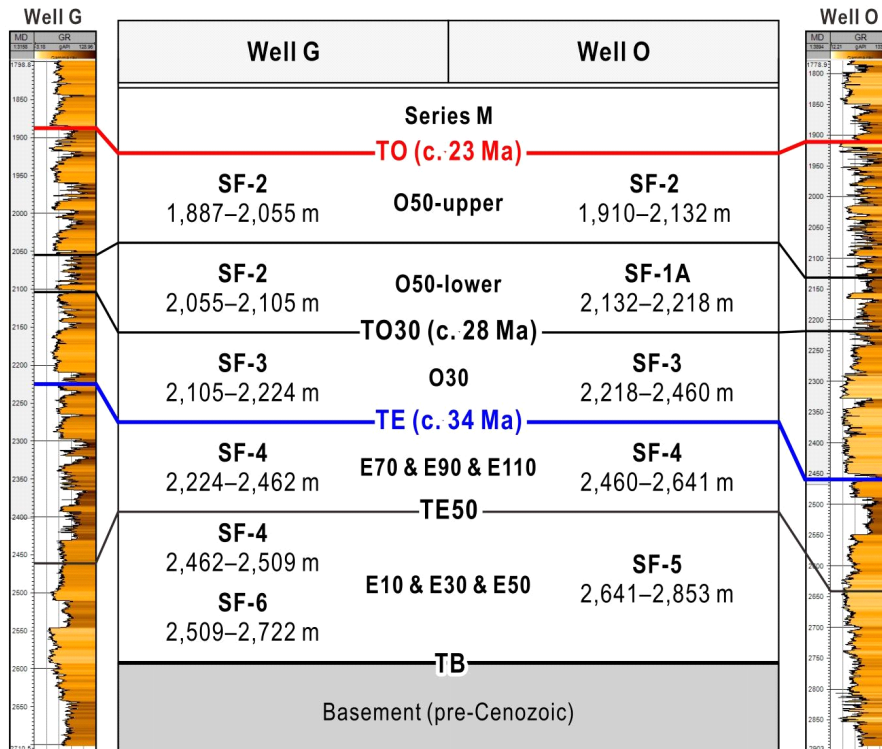


Fig. 11. Depth (measured depth) correlation of seismic facies and seismic sequences between Well G and Well O. Note that depth conversion of each 2nd and 3rd-order stratigraphic boundaries was performed using the time-depth relationship established during well-to-seismic tie. Ages of the stratigraphic boundaries were constrained from the biostratigraphic formation tops of the Well G and Well O, previously suggested in Yun (2019).

의 최하부 구간(2,509-2,722 m)은 탄성파상 SF-6과 대비된다(그림 12). 커팅시료를 이용한 암상기재를 통해 이 구간의 상위 약 15 m는 화산암층, 그 하부에는 화산 기원의 이암, 역암 및 박층의 사암이 나타나는 것으로 확인된다. 이암은 녹색, 회색 및 담회색 등의 암색을 띠는 화산암의 풍화 산물이며 역암은 기질이 풍부하고 주로 화강암 또는 현무암 암편으로 이루어져 있다(그림 12). 이 구간에서의 감마선 검층 곡선은 깔때기형(funnel-shaped)의 특징을 보이나, 2,509 m 구간에서 급격히 증가한다(그림 12).

탄성파상 SF-4가 우세한 전기 에오세 층준(E10, E30, E50)

의 상부 및 후기 에오세 층준(E70, E90, E110)에 대비되는 심도 2,224-2,509 m 구간은 주로 사암, 실트암 및 이암이 교호하여 나타나는데 상부에서 사암층의 두께가 다소 증가한다(그림 12). 이암은 갈색, 녹회색, 청회색, 회색 등의 다양한 암색을 띠며, 간혹 실트암으로 접이하기도 한다. 사암은 구간별로 다양한 암색, 입도, 원마도 및 분급 상태를 보이며, 방해석 교질물로 약하게 교결되어 있다. 감마선 검층 곡선은 2,300-2,509 m 구간에서는 톱날형(serrated)이나, 2,224-2,300 m 구간에서는 종형(bell-shaped)의 곡선이 2회 반복된다(그림 12).

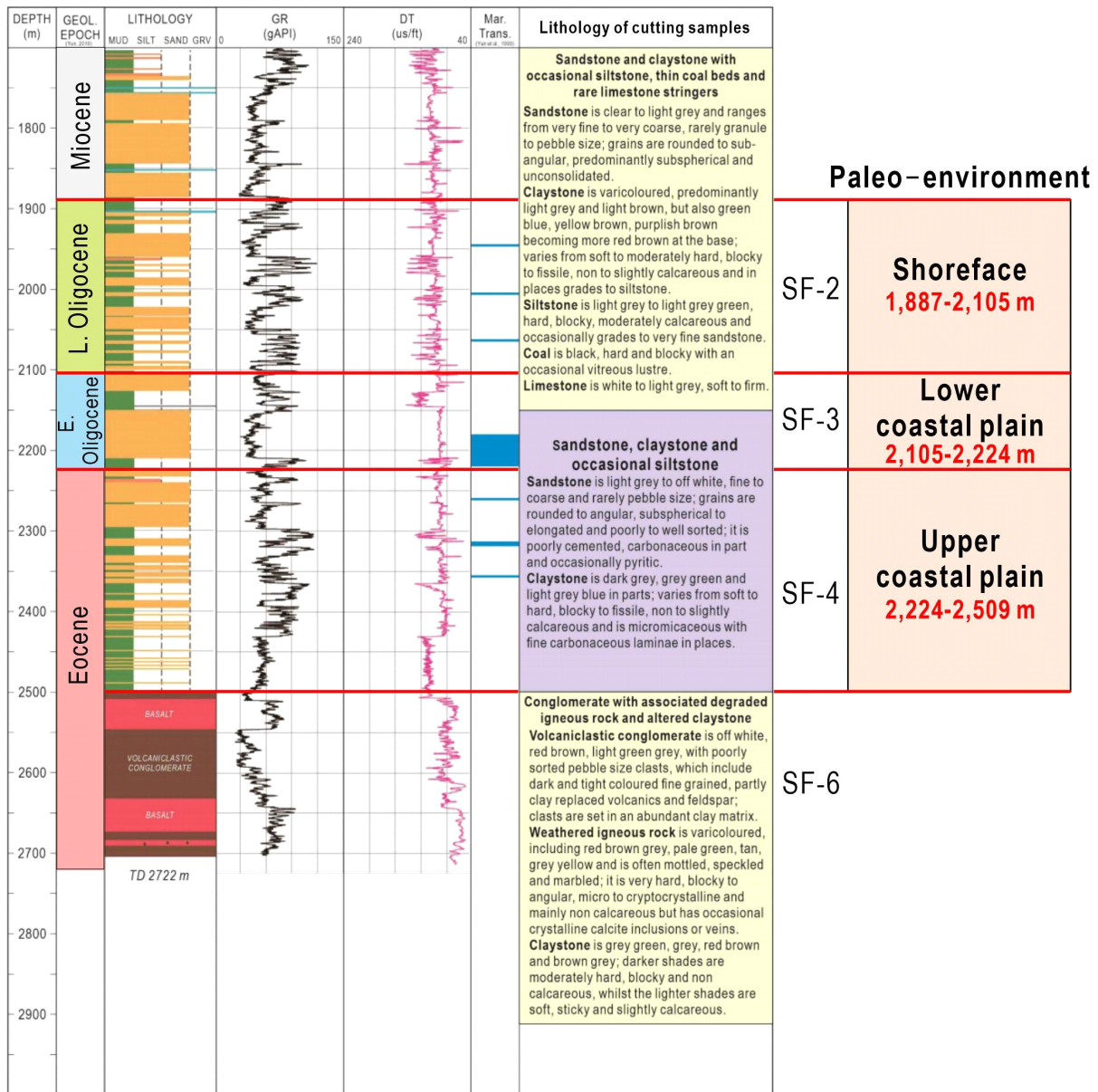


Fig. 12. Data integration of the well lithology, petrophysical logs, seismic facies interpretation, and microfossil-based paleo-environmental interpretation from the Well G. Lithological and log data were modified from the KNOC (1991), and paleo-environmental interpretation were referred to Yun (2019).

탄성파상 SF-3에 대비되는 심도 2,105-2,224 m 구간에서는 이암층 상부에 두께 50 m 이상의 두꺼운 사암층이 나타나며 사암의 암상은 하부 구간과 유사한 것으로 기재되어 있다(그림 12). 감마선 검층 곡선은 하부 구간(2,150-2,224 m)에서 실린더형(cylindrical), 상부에서는 깔때기형을 보인다(그림 12).

시추공 구간 2,055-2,105 m는 탄성파상 SF-2에 대비되는데, 주로 사암, 실트암과 이암의 호층으로 구성되어 있으며 얇은 탄층이 협재한다(그림 12). 사암은 주로 극세립질이며, 분급도는 양호한 편이다. 이암은 주로 회색 내지 암회

색을 띠나, 부분적으로 갈색 내지 적색의 이암도 협재된다. 이 구간의 감마선 검층 곡선은 하부(2,055-2,105 m)에서 톱날형이나, 상부(1,887-2,055 m)에서는 4회 반복되는 중형을 보인다(그림 12).

6.1.2. 시추공 O

시추공 O의 에오세 층준 구간(심도 2,460-2,853 m)은 하부에 탄성파상 SF-5, 상부에 SF-4와 대비되는데, 암상은 특별한 차이 없이 전 구간에 걸쳐 사암과 이암이 교호하여 나타나는 것이 특징이다(그림 13). 사암은 담회색의 세립

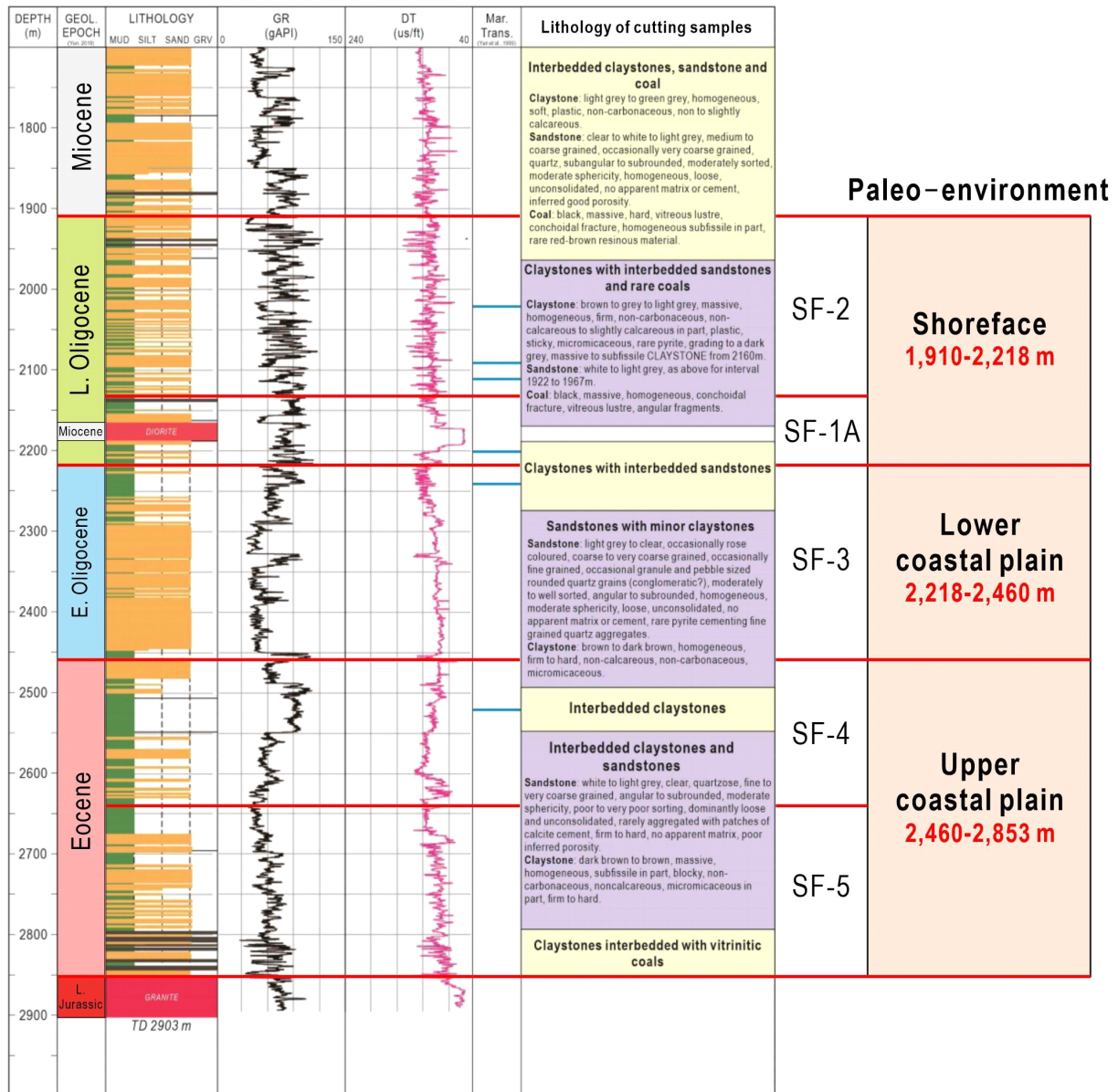


Fig. 13. Data integration of the well lithology, petrophysical logs, seismic facies interpretation, and microfossil-based paleo-environmental interpretation from the Well O. Lithological and log data were modified from the KNOC (1990), and paleo-environmental interpretation were referred to Yun (2019).

내지 조립질 조직과 괴상의 구조를 보이며 개별 사암층의 두께는 중간 부분에서 제일 두껍게 나타난다. 이에 협재하는 이암은 주로 점토질로서 암갈색 내지 갈색을 띠며 석회질 성분을 거의 포함하지 않는다. 시추공 O의 최하부 구간(2,805-2,853 m)에는 점토암과 함께 암회색의 높은 고화도를 보이는 비트리나이트질 석탄층이 수매 나타난다(그림 13). SF-5가 출현하는 심도(2,641-2,853 m)에서 감마선 검층 곡선은 깔때기형, SF-4가 출현하는 심도(2,460-2,641 m)에서는 실린더형으로 나타난다(그림 13).

탄성파상 SF-3에 대비되는 심도 2,218-2,460 m 구간에서는 수 십 미터 두께의 조립질 사암층이 우세하게 나타나며 간간히 암갈색의 비석회질 점토층이 얇게 협재하는 것으로 기재되어 있다. 해당 구간에서의 감마선 검층 곡선은 실린더형으로 나타난다(그림 13).

탄성파상 SF-1A에 대비되는 심도 2,132-2,218 m 구간은 점토층이 우세하게 산출되며, 이와 함께 얇은 세립 내지 중립 사암층이 드물게 협재된다(그림 13). 한편 탄성파상 SF-2에 대비되는 그 상부의 1,910-2,132 m 구간에서도 사암층과 이암층이 교호하며 호층을 이루는데, SF-1A 구간에 비해 사암층의 출현 빈도가 더 증가하며 석탄층이 협재하는 것으로 기재되어 있다. 해당 구간에서의 감마선 검층 곡선은 툽날형의 특징을 갖는다(그림 13).

6.2. 탄성파상과 고생물 기반 고환경

시추공 G와 O에서 수행한 고생물 동정에 따른 고환경 해석 결과(Yun, 2019), 에오세 층준에 해당하는 3rd-order 층단위들(E10, E30, E50, E70, E90, E110)은 주로 상부 해안평원(upper coastal plain)에서 집적된 것으로 해석되었다. 이에 대비되는 탄성파상은 시추공 G에서 SF-4, 시추공 O에서는 SF-4와 SF-5이다(그림 12, 13). 전기 올리고세 층준에 해당하는 3rd-order 층단위들(O10, O30)은 담수종의 화석이 우세하나, 해수종의 화석이 드물게 산출된다는 점을 근거로 담수유입이 풍부하고 간헐적으로 해수의 영역에 포함되기도 하는 하부 해안평원(lower coastal plain) 환경이 우세하였던 것으로 보인다. 특히 시추공 G와 시추공 O에서 모두 한번의 해침을 겪었음이 확인된다. 이 시기에 해당하는 시추공 G와 O 지층과 대비되는 탄성파상은 SF-3이다(그림 12, 13). 후기 올리고세 층단위(O50) 내에는 천해에서 외해에 이르는 다양한 해역에 서식하는 와편모조류가 풍부하게 산출된다(Yun, 2019). 특히, 천해종의 화석이 우세하게 산출되며, 시추공 G에서 3번, 시추공 O에서 4번의 해침구간이 확인된다. 이를 근거로 후기 올리고세 동안 연 구지역은 연안역(shoreface/nearshore) 환경이 우세하였던 것으로 해석되었다(Yun, 2019). 이러한 후기 올리고세 지층과 대비되는 탄성파상은 시추공 G에서 SF-2, 시추공 O

에서 SF-1A 및 SF-2이다(그림 12, 13).

7. 탄성파상의 해석

탄성파상의 해석은 기본적으로 반사면의 진폭, 연속성, 내부 배열 및 지층 외형과 같은 탄성파 반사 특성의 지질학적 의미를 분석하는 전통적인 방법에 따라 수행하였다(Mitchum *et al.*, 1977a, 1977b; Sangree and Widmier, 1977; Badley, 1985). 아울러 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 각 탄성파상은 앞서 기술한 바와 같이 시추공에서 확인된 암상 및 고생물 기반 고환경 자료와 직접 대비·검증되었으며, 이를 통해 탄성파 반사 특성과 퇴적환경 간의 연관성을 종합적으로 해석하였다.

7.1. 탄성파상 SF-1

탄성파상 SF-1은 반사면의 연속성이 매우 양호하고, 반사 진폭이 중간 내지 중간 이상 수준을 보이며, 개별 반사면들이 서로 평행하게 배열된 층상형 내부 구성을 특징으로 한다(그림 5). 이러한 탄성파 반사 특성의 조합은 수평적으로 균질하고 구조적 교란이 거의 없는 안정적인 퇴적 환경을 지시하는 전형적인 탄성파상으로 해석된다(Mitchum *et al.*, 1977a, 1977b; Xu and Haq, 2022).

SF-1A 유형에서 확인되는 판상의 외부 형상과 우수한 측방 연속성은 지층 두께의 측방 변화가 제한적이며, 넓은 범위에 걸쳐 비교적 균질한 퇴적이 지속되었음을 시사한다. 특히 중간 이상 강도의 반사 진폭은 사암과 세일이 호층을 이루는 암상 조합을 반영하며(Xu and Haq, 2022), 이는 사암 및 드물게 석탄층과 호층을 이루는 이암층으로 분석된 시추공 암상과도 대비되는 특성이다(그림 13). 아울러 시추공 산출 화석들은 연안환경이나 하부 해안평원을 반영하는 것으로 해석된다. 따라서 이 탄성파상은 연안역의 만(bay)이나 석호, 혹은 대규모 육성 호수와 같은 정체수 환경에서의 광역적 침강 퇴적과 세립질 퇴적물이 우세한 퇴적상을 반영한다(Posamentier and Kolla, 2003).

SF-1B 유형은 소규모 분지나 저지대를 충전하는 렌즈형 또는 썰기형 외부 형상을 보이나, 내부 반사 구조는 여전히 층상형을 유지한다. 이는 퇴적 환경의 공간적 분포가 제한된 조건에서도 퇴적 물질의 조성과 퇴적 양상이 비교적 안정적으로 유지되었음을 의미하며, 고에너지 수로 퇴적이나 침식 우세 환경보다는 소규모 호수, 만, 또는 습지(marsh)와 관련된 저에너지 충전형 퇴적 과정으로 해석된다(Mitchum *et al.*, 1977a; Catuneanu *et al.*, 2009).

한편, SF-1C 유형과 같이 연속성과 진폭이 양호한 1-2개의 반사면이 다른 탄성파상 사이에 협재되어 나타나는 경우는, 퇴적계 전반의 퇴적 조건이 변동적인 가운데서도 특

정 시기에 퇴적 환경이 일시적으로 안정화되었음을 시사한다. 이러한 반사면은 상대적으로 짧은 기간 동안 진행된 해침에 의해 형성된 해성층이거나, 순차층서적으로 최대해침면(maximum flooding surface)에 해당할 가능성이 높다.

7.2. 탄성파상 SF-2

탄성파상 SF-2는 반사진폭이 중간 내지 약한 수준을 보이며, 개별 반사면들이 평행 또는 거의 평행한(subparallel) 배열을 이루는 내부 구성을 가진다. 반사면의 측방 연속성은 중간 정도로, SF-1에 비해 연속성이 다소 저하된 양상을 보인다. 이러한 탄성파 반사 특성의 조합은 Xu and Haq (2022)가 제시한 탄성파상 해석 체계에서, 퇴적 환경은 전반적으로 안정적이나, 퇴적 조건의 균질성이 완전하지 않은 경우를 대표하는 유형으로 해석된다. SF-2가 분포하는 지층의 외부 형상은 판상 또는 썩기형으로, 외형적으로는 SF-1과 유사한 기하를 보인다. 그러나 내부 반사면의 진폭이 상대적으로 약하고, 측방 연속성이 불량하다는 점은, 퇴적 환경이 장기간 완전히 정제된 조건을 유지하지 못하고 미약한 에너지 변동, 퇴적물 공급 변화를 통해 수직 및 측방 암상 변화가 야기되었음을 시사한다. Xu and Haq (2022)에 따르면, 중간-약한 진폭과 준평행 내부 구성의 결합은 음향 임피던스 대비가 완만하며, 세립질 퇴적물이 우세해져 사질 성분이 국지적으로 혼입되거나, 이암-실트암-미세 사암이 교호하는 경우에 흔히 나타난다. 이 탄성파상은 시추공에서도 사암과 이암, 그리고 얇은 석탄층이 호층을 이루는 암상과 관련된 것으로 확인된다(그림 12, 13). 따라서 SF-2는 SF-1과 같이 완전히 균질한 침강 퇴적보다는, 퇴적 공급과 에너지 조건이 약하게 변동하는 저에너지 환경을 반영하는 것으로 해석된다. 또한, 반사면의 연속성이 중간 정도에 그친다는 점은, 침식이 지배적인 환경보다는 미약한 재동 작용(reworking) 또는 소규모 지형 기복의 발달이 동반된 퇴적 환경을 지시한다. 한편 시추공 산출 화석들은 연안환경이나 하부 해안평원을 반영하는 것으로 해석된다(그림 12, 13). 종합하면, 이 탄성파상은 연안-천해 환경에서의 내만(inner bay), 석호(lagoon) 등의 해양환경이나 조간대, 염습지, 하천 하류 등을 포함하는 하부 해안평원의 저에너지 구간, 또는 분지 내 완만한 사면부에서의 점진적 퇴적과 연관성이 높은 것으로 해석된다(Vail *et al.*, 1991; Catuneanu, 2019).

7.3. 탄성파상 SF-3

탄성파상 SF-3는 연속성이 대체로 불량하고 진폭이 약하거나 중간 정도의 반사면들이 부분적으로 층상배열이나 무질서하게 나타나는 특징을 보인다. 일반적으로 약한 진폭을 보이는 탄성파 반사특성은 두꺼운 단일암상의 층과

관련되는 것으로 알려져 있는데(Xu and Haq, 2022), 이 탄성파상은 시추공에서 두꺼운 사암층과 대비되어 나타난다(그림 12, 13). 본 탄성파상의 외형은 판상이나 썩기모양이 우세하여 넓은 평지나 평원에서 퇴적작용을 지시하지만, 반사면의 불량한 측면 연속성은 제한된 공간 분포를 갖는 다양한 퇴적환경이 상호작용 하였을 가능성을 지시한다. 한편 시추공 산출 화석들은 하부 해안평원을 반영하는 것으로 제시되었다(그림 12, 13). 따라서 탄성파상 SF-3는 사질 퇴적물을 활발하게 공급하는 하도, 그 주변의 범람원, 습지 등 다양한 환경이 공존하는 평원지형과 관련된 것으로 볼 수 있다. 이 경우, 일부 단면의 SF-3 유형에서 인지되는 V자 형태의 반사면은 하도침식에 의한 것으로 해석될 수 있다. 이러한 탄성파상의 해석은 탄성파상 SF-2에 비해 퇴적 환경의 변동성이 크고, 해안선으로부터 상대적으로 더 내륙 쪽에 위치한 환경을 반영하는 것으로 볼 수 있다. 즉, SF-3은 SF-1과 SF-2가 대표하는 비교적 안정적인 연안 또는 준해성 환경과는 대조적으로, 육성 영향이 우세한 평원성 퇴적 환경을 지시하는 탄성파상으로 해석된다.

7.4. 탄성파상 SF-4

탄성파상 SF-4는 주로 소규모 분지 중심부를 채우는 썩기, 렌즈 혹은 마운드 형태의 지층에서 나타나는 탄성파상으로서, 내부 반사면은 연속성이 대체로 불량하여 무질서하거나 부분적으로 층상 배열을 보인다. 이 탄성파상의 외형은 구조운동에 의해 발달한 소규모 열개분지나 침식으로 형성된 하천계곡을 지시한다(Catuneanu *et al.*, 2009). 한편, 이 탄성파상과 대비되는 시추공의 커팅시료들은 분급이 불량하고 비석회질 조성을 갖는 사암과 점토암의 호층을 지시하며, 산출 화석들은 주로 상부 해안평원과 일부 하부 해안평원을 반영하는 것으로 제시되었다(그림 12, 13). 따라서 탄성파상 SF-4는 주변 고지대로부터 공급된 쇄설물이 선상지 말단부 및 이에 연속되는 하천 수로를 통해 집적되는 열개분지 중심부 또는 간헐적으로 해침의 영향을 받는 하천계곡 내에서 형성된 퇴적체를 반영하는 것으로 해석된다.

7.5. 탄성파상 SF-5

탄성파상 SF-5는 분지 가장자리 사면을 따라 국지적으로 발달하며, 썩기·뱅크·마운드형의 외부 형상과 함께 약한 진폭, 불량한 연속성, 무질서 내지 부분 층상 반사가 혼재된 내부 반사 특성을 보인다. 이러한 특징은 퇴적 환경이 공간적으로 제한되고 퇴적 에너지와 공급 조건이 시·공간적으로 크게 변동하였음을 지시한다(Mitchum *et al.*, 1977a; Sangree and Widmier, 1977; Xu and Haq, 2022). 특히 분지 경계부 사면을 따라 나타나는 썩기형 기하와 국지적인 경사 배열

반사는, 분지 인접 고지대로부터 유입된 쇄설물이 중력 작용에 의해 사면을 따라 전진적으로 축적되는 퇴적 과정을 반영하는 것으로 해석된다(Catuneanu *et al.*, 2009; Xu and Haq, 2022). 이 구간에 대비되는 시추공 O에서는 괴상의 세립-조립질 사암과 실트암이 교호하는 암상이 특징이며 육상환경에 해당하는 상부 해안평원을 지시하는 화분 미화석이 보고되었다(그림 13). 따라서 이 탄성파상은 열개분지 또는 단층 경계부에서 흔히 발달하는 충적 선상지(alluvial fan) 또는 이에 준하는 사면성 쇄설 퇴적체로 해석된다. 특히, SF-5는 분지 경계부의 퇴적물 공급원을, SF-4는 그 하류 또는 저부에 해당하는 집적 환경을 각각 지시하며, 두 탄성파상은 쇄설물 공급-이동-집적이라는 연속적인 퇴적계 내 과정의 상하류 관계를 반영하는 상호 연계된 퇴적 환경으로 이해될 수 있다.

7.6. 탄성파상 SF-6

주로 음향기저나 기반암에서 확인되는 탄성파상 SF-6는 고진폭의 반사특성을 보이는 음향기저면과 그 하부에 고진

폭의 연속성이 불량하며 무질서하거나 주름진 형태를 갖는 반사면들이 불규칙하게 배열된 특징을 보인다. 이 탄성파상과 대비되는 시추공 G의 최하부 구간에서는 화산쇄설성 역암(volcaniclastic conglomerate)이 사암, 실트암, 점토암과 교호하는 것이 확인된다(그림 12). 또한 이와 유사한 유형의 탄성파상이 동해 한국대지나 그 주변 지역의 탄성파탐사자료에서도 보고되었는데, 해당 탄성파상은 열개분지 형성 초기에 일어난 화산활동의 틈새분출로 인하여 집적된 화산암과 휴지기의 퇴적층의 교호로 형성된 화산암-퇴적물 복합체(volcanic-sedimentary complex)로 해석된 바 있었다(Kwon *et al.*, 2009).

8. 탄성파상의 시공간적 분포

북부 제주분지에서 취득된 2개의 3D 탄성파 볼륨 및 다수의 2D 탄성파 자료들을 이용하여 탄성파상 분포에 대한 맵핑(mapping)을 수행하였다. 수직적인 맵핑 단위는 기본적으로 3rd-order 층단위이다(그림 3). 다만 예오세 3rd-or-

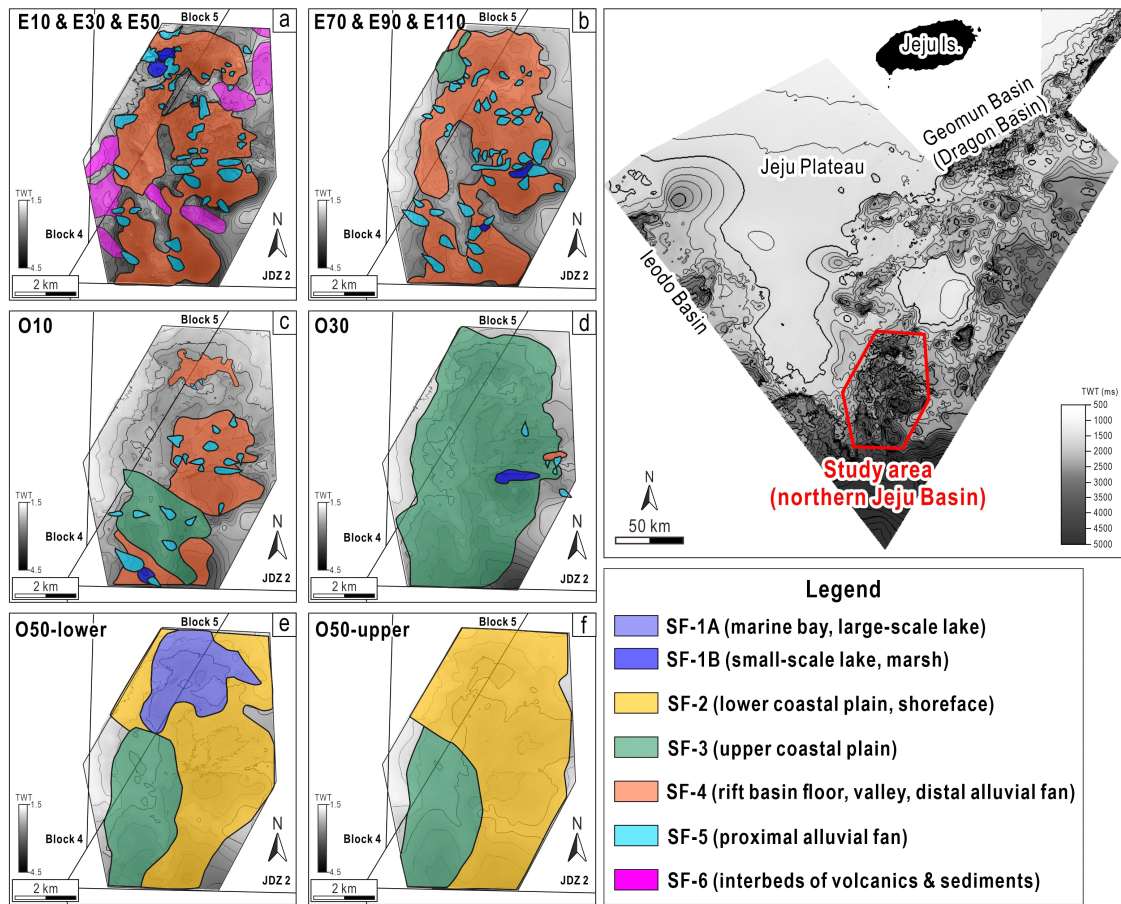


Fig. 14. Distribution of seismic facies, showing the spatio-temporal evolution of sedimentary environments. Note that the background of the facies distribution maps represents topographic undulations of lower boundary of each 3rd-order units. The location of the study area is indicated in the inset on the right side of this figure.

der 층단위들은 개별 층단위들의 두께가 얇고 유사한 구간이 많기 때문에, 에오세 하부 층준(E10, E30, E50)과 상부 층준(E70, E90, E110)으로 나누어 분포도를 작성하였다. 또한, 층단위의 상부와 하부가 뚜렷한 탄성파상 차이를 보이는 후기 올리고세의 O50은 하부 층준(O50-lower)과 상부 층준(O50-upper)으로 세분되어 상분포도 제작이 수행되었다(그림 3).

8.1. 전기 에오세 E10 & E30 & E50

북부 제주분지 전기 에오세 층준(E10, E30, E50)은 SF-1B, SF-4, SF-5 및 SF-6 유형의 탄성파상들이 다양한 규모의 패치 형태로 산재하여 나타나는데(그림 14a). 이는 분지의 구조적 기복과 퇴적 중심의 위치를 잘 반영한다. 열개분지 중심부나 저지대를 지시하는 탄성파상 SF-4는 연구지역 전반에서 가장 넓은 분포 범위를 차지하는데, 기반암 기복에 의해 분리된 소분지들의 중심부 저지대를 충전하는 형태로 나타나며, 북부보다는 중·남부 지역에서 상대적으로 두껍고 연속적인 분포를 보인다. 이러한 분포 양상은 분지 내부로 유입된 쇄설물이 분지의 중심 지역에 집중적으로 퇴적되었음을 지시한다. 상부 선상지(proximal alluvial fan)를 지시하는 탄성파상 SF-5는 분지 중심부로 유입된 쇄설물 공급 경로 상의 퇴적체로서, 주로 SF-4가 우세한 영역 가장자리에 산발적으로 분포하며(그림 14a), 개별적으로는 소규모 렌즈형 또는 마운드형의 형태를 이룬다(그림 4). 특히 SF-5가 북부 및 남부 분지 경계부에서 국지적으로 나타나는 점은, 선상지 퇴적이 단층 인접부를 따라 제한적으로 발달했음을 반영한다. 탄성파상 SF-6은 주로 분지 가장자리, 특히 북서부 및 남서부 경계부를 따라 국지적으로 분포한다(그림 14a). 이 탄성파상은 소분지의 경계가 되는 기반암 고지대에 집중되어 나타나며, 분지 경계 단층 인접부 또는 기반암 노출과 밀접한 공간적 연관성을 보인다. 이러한 분포는 SF-6이 분지 형성 초기의 기반암 또는 화산-퇴적 복합체와 관련된 탄성파상임을 뒷받침한다. 탄성파상 SF-1B는 연구지역 북서부의 제한된 지역 내 내에 소규모 패치 형태로 나타난다(그림 14a). 이는 분지 내부의 저지대에서 일시적으로 형성된 정체수 또는 소규모 호성 환경을 반영하는 것으로 보인다.

8.2. 후기 에오세 E70 & E90 & E110

북부 제주분지 후기 에오세 층준(E70, E90, E110)에서는 전기 에오세부터 출현한 SF-1B, SF-4, SF-5 유형의 탄성파상들이 계속해서 우세하게 나타난다(그림 14b). 말단 선상지(distal alluvial fan)나 분지 저지대의 평지 환경을 지시하는 SF-4 유형의 탄성파상은 북부 제주분지를 구성하는 열개소분지의 퇴적중심지부터 말단부에 이르는 광범

위한 분포를 보이며(그림 14b), 썩기의 외형적 특징을 갖는다(그림 4). 또한, 소분지와 기반암 고지대 간의 경계를 따라 SF-5 유형의 탄성파상이 산발적으로 분포하며, 분지의 중심부로 향하며 이들은 SF-4 유형의 탄성파상으로 변화한다. 소규모(<1 km)의 SF-1B 탄성파상이 남동부지역 SF-5 탄성파상 분포지 주변에서 관찰된다. 전기 에오세 층준의 북서부 퇴적중심지를 따라 관찰되었던 SF-1B 및 SF-5 유형의 탄성파상은 후기 에오세 층준에서 남서쪽으로 두꺼워지는 썩기형의 SF-3 탄성파상으로 변화한다. 이와 같이, 후기 에오세에는 이전 시기에 분절되어 있었던 SF-4 탄성파상의 분포구역이 합쳐지고 넓어지는 양상과 함께 소규모이지만 상부 해안평원을 지시하는 SF-3 유형의 탄성파상이 연구지역 북서부에 새롭게 나타난다(그림 14b). 이와 같은 탄성파상 분포 양상의 변화는 열개분지 주변부로부터 공급된 쇄설성 퇴적물이 점차 분지 내부에 집적되면서 지형 기복이 점차 완화되고, 소분지 간 연결성이 증가되었음을 반영한다.

8.3. 전기 올리고세 O10

전기 올리고세 O10 층준은 후기 에오세 층준을 구성하는 탄성파상 유형과 동일한 탄성파상 유형들(i.e., SF-1B, SF-3, SF-4, SF-5)로 구성된다. 그러나, 후기 에오세 층준에 비해 SF-4 유형이 차지하는 영역은 대폭 축소되어 남부와 북부로 단절되고, 그 사이에는 SF-3 탄성파상이 이전 시기보다 좀더 대규모로 발달하는 등 분포양상이 크게 다르게 나타난다(그림 14c). 이는 장기간의 쇄설물 공급으로 소규모 열개분지들이 상당 부분 충전되었고, 분지 내부의 배수계가 보다 통합된 형태로 진화했음을 반영한다. 이 시기에 SF-5는 기반암 고지대를 따라 국지적으로 잔존하여 주요 쇄설물 공급원의 위치를 지시하지만, 그 공간적 영향 범위는 제한적이다. SF-1B 유형의 탄성파상도 분포 범위가 축소되어 연구지역 남단에서 SF-5 유형과 함께 소규모(<1 km)로 나타난다(그림 14c).

8.4. 전기 올리고세 O30

전기 올리고세 O30 층준에서는 상부 해안평원을 지시하는 SF-3 탄성파상이 이전 시기 대비 북쪽으로 현저히 확장되어 연구지역 거의 전역을 점유하는 양상을 보인다(그림 14d). 이 탄성파상은 남쪽으로 갈수록 점진적으로 두꺼워지는 대규모 썩기의 외형을 보이며, 이는 남쪽으로는 퇴적물 공급과 퇴적중심지 이동을 지시한다. 이에 반해, 에오세 및 전기 올리고세 O10 층준까지 지배적으로 분포하였던, 선상지 퇴적체와 관련된 SF-4와 SF-5 탄성파상은 O30 층준에서는 연구지역 동부의 매우 제한된 구간에 국지적으로만 산출된다(그림 14d). 한편, 소규모 호수 또는 염습지(marsh)

환경을 반영하는 SF-1B 유형은 이전 시기와 마찬가지로 드물게 인지되는데, O30 층준에서는 분지 동부 경계부에 길이 약 1-2 km 규모로 제한적으로 분포한다(그림 14d). 이러한 분포 특성은 이 시기의 북부 제주분지가 구조적으로 분절된 열개분지 단계에서 벗어나, 지속적인 퇴적작용에 의해 지형 기록이 완료된 광역적 퇴적 공간으로 변화되었음을 지시한다.

8.5. 후기 올리고세 O50-lower

후기 올리고세 O50-lower 층준은 SF-1A, SF-2 및 SF-3 유형의 탄성파상으로 구성된다(그림 14e). 전기 올리고세 O30 층준과 비교할 때, 이 층준에서는 연구지역 북부와 남동부에서 SF-1A와 SF-2 탄성파상이 새롭게 광역적으로 분포하는 것이 특징적이다. 반면, 이전 시기에 우세하게 발달 하였던 SF-3 탄성파상은 연구지역 남서부에 국한되어 분포 범위가 현저히 축소된다(그림 14e). 해양 환경을 지시하는 SF-1A 탄성파상은 연구지역 최북단에서 약 2 km의 폭으로 나타나며, 남쪽으로 갈수록 점차 확장되어 최대 약 3.5 km에 이른다. 한편, 연안 또는 하부 해안평원 환경을 반영하는 SF-2 탄성파상은 북부에서 SF-1A 분포 영역을 둘러싸는 형태로 나타나며 남쪽으로 확장되어 연구지역 남동부 대부분을 점유하는 분포를 보인다(그림 14e). 이는 연안 전이 환경이 분지 내부로 확산되었음을 시사한다. O50-lower 층준 내에서 인지되는 모든 탄성파상은 연구지역 전반에 걸쳐 비교적 평탄한 판상(sheet) 을 보이거나(그림 4, 14e), 남부 지역에서는 일부 지층이 남향으로 두꺼워지는 썸기형(wedge-shaped)으로 나타난다. 이러한 외형적 특성은 육상 기원의 쇄설물 공급이 지속적으로 남부에 집중되었음을 반영하는 것으로 해석된다. 이와 같은 O50-lower 층준의 탄성파상 분포는 기존의 육성 평원 환경 위에 해침에 따른 해수 영향이 점차 증대되면서, 분지 전반이 연안-육성 전이 환경으로 재편되고 있음을 지시한다.

8.6. 후기 올리고세 O50-upper

후기 올리고세 O50-upper 층준은 SF-2와 SF-3 유형의 탄성파상으로 구성된다(그림 14f). 이전 시기와 비교할 때, 상부 해안평원을 지시하는 SF-3 탄성파상의 분포는 큰 변화가 없으나, SF-1 유형 대신에 SF-2 탄성파상이 그 자리를 점유하면서 연안 혹은 하부 해안평원이 연구지역 북부와 남동부에 광역적으로 발달하게 되었다. SF-1과 SF-2 탄성파상은 모두 연구지역 내에서 전반적으로 판상의 외형을 나타내며(그림 4), 이는 비교적 안정적이고 광역적인 퇴적 공간이 유지되었음을 시사한다. 이러한 탄성파상의 분포 특성은 후기 올리고세말에 이르러 연구지역이 연안 지배 퇴적 시스템으로 전이되었음을 반영하는 것으로 해석된다.

9. 퇴적시스템

앞서 제시한 탄성파상 유형의 지질학적 해석과 각 탄성파상의 공간적 분포 특성, 시추공 암상 및 고생물 자료를 종합해보면, 에오세부터 올리고세에 이르는 분지 발달 과정을 열개분지 단계의 육성-호성 퇴적계에서 연안 및 천해 해양 퇴적계로의 점진적 전이 과정으로 재구성해 볼 수 있다.

전기 에오세에 제주분지는 기본적으로 상대적으로 융기된 하반 지괴의 급경사 단층면과 침강된 상반 지괴의 완만

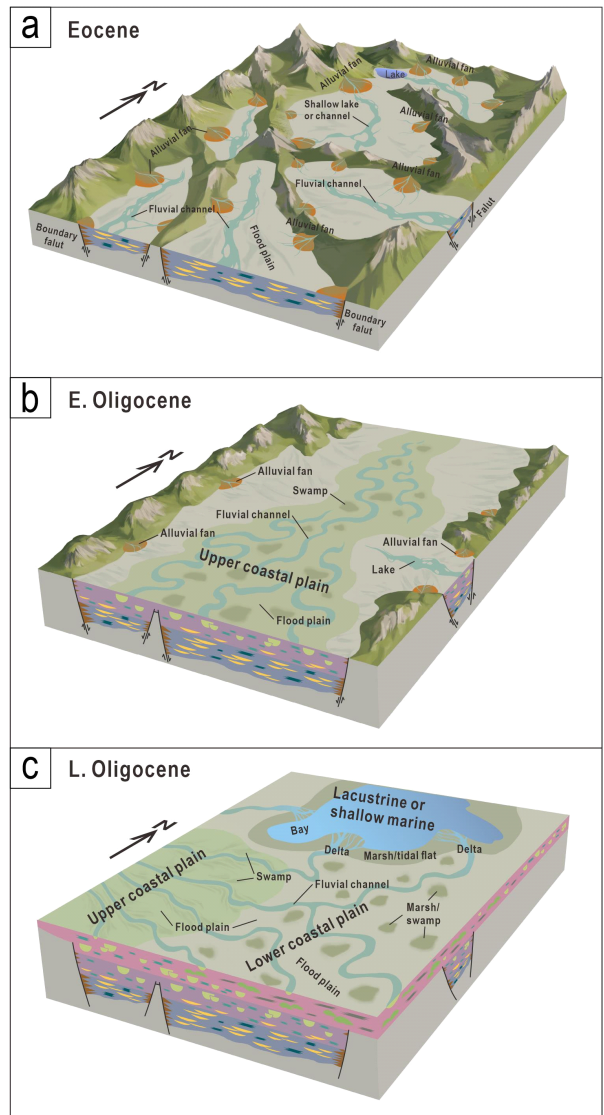


Fig. 15. Schematic depositional model of the northern Jeju Basin during the (a) Eocene, (b) Early Oligocene, and (c) Late Oligocene. The Eocene was characterized by a rift-basin fluvial system dominated by axial channels, floodplains, and alluvial fans. Progressive basin filling led to the predominance of upper coastal plain environments in the Early Oligocene, followed by lower coastal plain and marine bay (or large-scale lacustrine) settings during the Late Oligocene transgression.

한 상부면으로 구성된 열개분지의 특성을 갖는다. 이 시기에 열개가 일어나는 지역에서는 복잡한 단층선 발달로 인해 소규모로 분절되어 고립된 다수의 소분지들이 발달하며, 이들은 이웃 분지와 단절된 자체 배수계를 갖게 된다(그림 15a). 탄성파상 분석 결과, 이 시기에 북부 제주분지 중심부에는 하천시스템이나 충적선상지의 발달부를 지시하는 탄성파상 SF-4가 우세하게 나타나며, 그 주변으로 충적선상지를 지시하는 SF-5와 일부 지역에 소규모 호수를 지시하는 SF-1B가 분포한다(그림 14a). 탄성파상 특징, 암상 및 고생물 연구 결과, 후기 에오세에 북부 제주분지는 열개작용이 막바지 단계로 들어서면서 하천을 포함한 광범위한 범람원 및 소택지가 발달하였다. 또한, 시추공 G와 O에서 관찰되는 간헐적인 해침의 증거로 비추어 볼 때, 북부 제주분지의 후기 에오세 퇴적환경은 전기 에오세에 비해 해안선에 근접하였던 것으로 여겨진다.

초기 올리고세에는 소규모 분지가 점차 퇴적물로 채워지면서 배수계가 확장되었으며, 이로 인해 남쪽에서부터 드넓은 상부 해안평원 환경이 발달하기 시작하였다(그림 15b). 해성종과 담수종의 화석이 함께 산출되는 것으로 비추어 볼 때(Yun, 2019), 이러한 상부 해안평원 환경은 담수와 해수의 지속적인 상호작용 및 해침을 겪었을 것으로 해석된다(그림 15b).

후기 올리고세 동안의 점진적 해수면 상승에 따라 북부 제주분지는 연안 및 천해 환경으로 변화하였다(그림 15c). 고생물학 연구결과(Yun, 2019), 이 시기 외편모조류의 출현 빈도가 점차적으로 증가하는 것으로 볼 때, 후기 올리고세의 북부 제주분지는 육성환경에서 해성환경으로 변화하는 전이적 단계에 있던 것으로 보인다.

10. 결론

제주분지의 탄성파 자료에서 구분된 탄성파상은 분지 기저의 화산암-퇴적층 복합체와 그 상부의 선상지, 하천, 해안평원 및 천해/연안역 등 다양한 육상 및 해양 퇴적환경을 지시하는 것으로 해석된다. 탄성파상의 시공간적 분석 결과, 제주분지는 에오세 동안의 활발한 열개작용에 의해 소규모로 분절된 열개분지로 시작되었으며, 이 시기에는 단층 활동에 의해 지배되는 육성 퇴적시스템이 우세하였다. 분지 경계부에는 충적선상지가, 중심부에는 하천 또는 국지적 호수 환경이 발달하는 전형적인 열개분지 퇴적 양상이 형성되었다. 후기 에오세에는 열개작용이 약화되면서 분지 내 지형 기록이 완화되고, 해수면 상승으로 해안평원 환경이 점진적으로 확대되었다. 전기 올리고세에는 소규모 분지들이 퇴적물로 충전되면서 분지 간 연결성이 증가하고, 배수계가 확장됨에 따라 상부 해안평원 환경이 광역적으로 발달하였다. 후기 올리고세에는 점진적인 해수면 상승으로 하

부 해안평원 및 천해 환경이 발달하였다. 이러한 퇴적환경 변화 양상은 제주분지 퇴적시스템이 육성 우세 환경에서 점차적으로 해성 우세 환경으로 전이되었음을 보여준다. 본 연구결과의 퇴적시스템 진화는 제주분지 내 근원암 및 저류암의 발달 가능성과 석유시스템 요소의 시공간적 분포를 이해하는 데 중요한 지질학적 틀(framework)을 제공할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상부 유전개발사업 출자, 그리고 한국연구재단(RS-2024-00446363, RS-2024-00392909)의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 주신 두 분의 심사위원과 편집위원, 편집위원장께 감사드립니다.

REFERENCES

- Badley, M.E., 1985, Practical Seismic Interpretation. International Human Resources Development Corporation (IHRDC) Press, Boston, 266 p.
- 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.
- Catuneanu, O., 2019, Principles of Sequence Stratigraphy (2nd ed.). Elsevier, Amsterdam.
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.L., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C.G.St.C., Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nummedal, D., Pomar, L., Posamentier, H.W., Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel, R.J., Strasser, A., Tucker, M.E. and Winker, C., 2009, Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92, 1-33.
- 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.
- Geological Society of Korea, 2014, Technical evaluation of hydrocarbon resource potential in the Gunsan and Jeju basins, offshore western and southern Korea: GSK Report for Korea National Oil Corporation, 3, 322 p (in Korean).
- Geological Society of Korea, 2023, Report on Assessment of Petroleum Reserve Environment in the Continental Shelf of South Sea, 170 p (in Korean).
- Geological Society of Korea, 2024, Report on Assessment of Petroleum Reserve Environment in the Continental Shelf of South Sea, 218 p (in Korean).
- Geological Society of Korea, 2025, Report on Assessment of Petroleum Reserve Environment in the Continental Shelf of South Sea, 326 p (in Korean).
- Koh, C., Yoon, S., Lee, D. and Yoo, H., 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*, 52, 355-371 (in Korean with English abstract).
- 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 National Oil Corporation, 1990, Final geological report of the Well O, Korea National Oil Corporation report, p 70 (in English).
- Korea National Oil Corporation, 1991, Final geological report of the Well G, Korea National Oil Corporation report, 28 p (in English).
- Korea National Oil Corporation, 2020, Report for hydrocarbon potential assessment in Korean South Sea. Korea National Oil Corporation report, 172 p (in Korean).
- 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, B., Shin, K.S. and Sunwoo, D., 2006, Geologic evolution and aspects of the petroleum geology of the northern East china Sea shelf basin. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 237-260.
- Lee, J.H., Lee, J.H., Je, Y.H., Yoon, S.H., Paik, S., Han, S.R., Woo, A., Jeon, J.H., Lim, D., Lim, S., Choi, J., Kim, E. and Kim, G.B., 2026a, 2025 Stratigraphic manual of the Korean South Sea. *Geosciences Journal* in review.
- Lee, J.H., Lee, J.H., Je, Y.H., Yoon, S.H., Paik, S., Han, S.R., Woo, A., Jeon, J.H., Lim, D., Lim, S., Choi, J., Kim, E. and Kim, G.B., 2026b, Industry-Academia Collaborative Research for Establishing Integrated Stratigraphy of the Korean South Sea: An Introduction for Theoretical and Technical Issues. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 171-181 (Korean with English abstract).
- Metwalli, F.I., Shendi, E.H. and Fagelnour, M.S., 2019, Seismic facies analysis of thin sandstone reservoirs, North Western Desert, Egypt. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 793-808.
- Mitchum Jr, R.M., Vail, P.R., Sangree, J.B., 1977a, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, In: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir, 26, 117-135.
- Mitchum Jr, R.M., Vail, P.R., Thompson III, S., 1977b, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis, In: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir, 26, 53-62.
- Nordfjord, S., Goff, J.A., Austin Jr, J.A. and Gulick, S.P.S., 2006, Seismic facies of incised-valley fills, New Jersey continental shelf: implications for erosion and preservation processes acting during latest Pleistocene-Holocene transgression. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 1284-1303.
- 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, 148-159 (in Korean with English abstract).
- Park, Y., Yoo, D., Kang, N. and Yi, B., 2019, Origin and evolution of stacked cut-and-fill structures on the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Journal of Sedimentary Research*, 89, 679-700.
- Park, Y., Yoo, D., Kang, N., Yi, B. and Kim, B., 2021, Tectonic control on mass-transport deposit and canyon-fed fan system in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Basin Research*, 33, 991-1016.
- Posamentier, H.W. and Kolla, V., 2003, Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73, 367-388.
- Roksandić, M.M., 1978, Seismic facies analysis concepts. *Geophysical Prospecting*, 26, 383-398.
- Sangree, J.B. and Widmier, J.M., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 9: seismic interpretation of clastic depositional facies, In: Payton, C.E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir, 26, 165-185.
- Tozer, B., Sandwell, D.T., Smith, W.H., Olson, C., Beale, J.R. and Wessel, P., 2019, Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6, 1847-1864.
- Vail, P.R., Audemard, F., Bowman, S.A., Eisner, P.N. and Perez-Cruz, G., 1991, The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology - an overview. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer, 617-659.
- Wang, B., Doust, H. and Liu, J., 2019, Geology and petroleum systems of the East China Sea Basin. *Energies*, 12, 4088.
- Wang, W., Lin, C., Zhang, X., Dong, C., Ren, L. and Lin, J., 2020, Effect of burial history on diagenetic and reservoir-forming process of the Oligocene sandstone in Xihu sag, East China Sea Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 112, 104034.
- Wessel, P., Luis, J.F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D., 2019, The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564.
- Xu, G. and Haq, B.U., 2022, Seismic facies analysis: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 224, 103876.
- Xu, G., Zhang, L., Pang, X., Chen, M., Xu, S., Liu, B., Zuo, Y., Luo, S., Hu, L., Chen, H., Li, X., Wang, X., Wu, C., Han, J., Wu, S., Yan, Y., Wang, J., Chen, J., Liu, K., Hua, C., He, J., Xian, W., Hong, C., Wang, Y., Guo, W., Wang, L., Chen, G., Han, P., Luo, W., Yuan, C. and Li, Y., 2021, New method for the reconstruction of sedimentary systems including lithofacies, environments, and flow paths: a case study of the Xisha Trough Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 133, 105268.
- Yun, H., 2019, Biostratigraphy of the JDZ V-3 and Okdom-1 wells with comparison to neighboring areas. KIGAM Research Report, 46 p (in Korean).
- 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).