



Article

## 남해대륙붕 제주분지의 3차원 석유시스템 모델링

염나영<sup>1,\*</sup>, 백세익<sup>2</sup>, 윤석훈<sup>3</sup>, 김기범<sup>4</sup>, 홍성경<sup>5</sup>, 최지영<sup>6</sup>

<sup>1</sup>한국석유공사 글로벌기술센터

<sup>2</sup>한국석유공사 국내사업개발처

<sup>3</sup>제주대학교 지구해양학과

<sup>4</sup>부산대학교 지질환경과학과

<sup>5</sup>강원대학교 지질학과

<sup>6</sup>한국지질자원연구원 자원탐사개발연구본부 석유·미래에너지연구센터

### 3D petroleum system modeling in Jeju Basin of the South Sea Shelf of Korea

Nayoung Yeom<sup>1,\*</sup>, Seik Paik<sup>2</sup>, Seok-Hoon Yoon<sup>3</sup>, Gi-Bom Kim<sup>4</sup>, Sung Kyung Hong<sup>5</sup>, Jiyoung Choi<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Global E&P Technology Center, Korea National Oil Corporation, Ulsan 44538, Republic of Korea

<sup>2</sup>Domestic Business Development Department, Korea National Oil Corporation, Ulsan 44538, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

<sup>4</sup>Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

<sup>5</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

<sup>6</sup>Petroleum and Future Energy Research Center, Resource Exploration and Development Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: December 29, 2025 / Revised: February 6, 2026 / Accepted: February 14, 2026

\*Corresponding author: +82-52-216-3638 / E-mail: nayoung.yeom@knoc.co.kr

**요약:** 본 연구는 제주분지를 대상으로 3차원 석유시스템 모델링을 수행하여, 인접한 시후분지(Xihu Basin)에서 증명된 석유시스템이 제주분지에도 적용 가능한지를 평가하는 데 목적이 있다. 이를 위해 최신 3D 탄성과 자료와 정밀 지화학 분석 기법으로 분석된 근원암 지화학 자료를 활용하여 연구의 신뢰도를 제고하였다. 특히 근원암의 암상을 구분하여 지화학 재분석을 수행한 결과, 에오세와 올리고세 시기에 양질의 셰일과 석탄층 퇴적이 확인되었고 이는 동 지역의 석유 부존 가능성을 높이는 중요한 근거가 된다. 모델링 결과에 따르면 제주분지에는 에오세 및 올리고세의 석유시스템이 존재하며 에오세 석유시스템은 주로 서쪽경사대에서 유효하고, 올리고세 석유시스템은 중앙습곡대에서 유효함을 확인하였다. 또한, 후기 마이오세 통징운동의 영향을 크게 받았음에도 불구하고 구조운동 이후에도 탄화수소 생성 및 배출이 가능한 것으로 분석된다. 탄화수소의 생성, 이동, 집적과정을 3차원적으로 시각화하고 지역별로 유효한 석유시스템을 분석했다는 점에서 학술적인 의미를 갖는다. 본 연구 결과, 시후분지에서 검증된 석유시스템이 제주분지에도 적용 가능할 것으로 사료되며 이러한 결과는 제주분지 미탐사 지역의 향후 탐사 전략 수립과 탐사 리스크 저감을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

**주요어:** 제주분지, 석유시스템 모델링, 에오세 석유시스템, 올리고세 석유시스템, 시후분지

**ABSTRACT:** This study conducts a 3D petroleum system modeling of the Jeju Basin to evaluate whether the proven petroleum systems of the adjacent Xihu Basin can also be effective in the Jeju Basin. To enhance the reliability of the study, the latest 3D seismic data and geochemical datasets analyzed by advanced and high-resolution geochemical analytical techniques were integrated. In particular, geochemical re-analyses based on detailed lithofacies classification of source rocks indicate that high-quality shale and coal-bearing strata were deposited during the Eocene and Oligocene, providing critical evidence for petroleum potential in the study area. Modeling results suggest that Eocene and Oligocene petroleum systems are working in the Jeju Basin: The Eocene petroleum system is mainly effective in the western slope belt, whereas the Oligocene petroleum system is evaluated to be effective in the central anticline inversion belt. Despite significant tectonic movements during the Late Miocene, hydrocarbon generation and expulsion are interpreted to have continued after major structural deformation events. This study has academic significance in that it visualizes the timing of hydrocarbon generation, migration, and accumulation in 3-dimensions and evaluates regionally effective petroleum systems. Overall, the petroleum system proven in the Xihu Basin is considered applicable to the Jeju Basin. The results of this study are expected to contribute to establishment of future exploration strategies and to the reduction of exploration risk in the Jeju Basin.

**Key words:** Jeju Basin, petroleum system modeling, eocene petroleum system, oligocene petroleum system, Xihu Basin

## 1. 서론

시후분지(Xihu Basin)는 1974년부터 석유·가스 탐사가 본격적으로 수행되었으며(Ye *et al.*, 2007), 1980년대 이후 다수의 유·가스 발견이 보고되고 있다(Xiaolan, 2007). 현재 분지의 대부분 지역에 3D 탄성파 자료가 취득되었고, 약 70공 이상의 시추가 이루어졌다(Feng *et al.*, 2019). 그 결과 약 17개 이상의 유·가스전 및 발견구조가 확인되어(Wang *et al.*, 2019), 분지 내 석유시스템의 존재가 입증되었다.

제주분지 역시 시후분지와 유사한 시기인 1970년대부터 2D 탄성파 자료 취득을 통해 탐사활동을 시작하였고, 2002년과 2022년에 각각 3D 탄성파 자료를 취득하였다. 시추는 1980년에 J1공 시추를 시작으로 총 7공을 시추하였으나, 1991년 G공 시추 이후 추가적인 시추작업이 이루어지지 않았다.

두 분지는 유사한 시기에 탐사를 시작하였음에도 불구하고, 지난 약 50년간 수행된 탐사작업량과 자료 축적 규모에는 분지 간 현저한 차이가 존재한다. 이는 제주분지 대부분이 한일공동개발구역(Joint Development Zone, JDZ)에 포함되어 장기간 탐사활동이 제한되었기 때문이다. 그 결과 시후분지는 지속적인 탐사자료 축적과 유가스 발견을 통해 석유시스템이 정립되었고, 다수의 석유시스템 모델링 연구가 수행되었다(Jiang *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2024). 반면, 제주분지를 대상으로 수행된 기존의 석유시스템 모델링 연구(Kim and Son, 2013; Son and Lee, 2018)는 가용 자료의 제한성으로 인해 한계가 존재한다. 특히, 과거에 분석된 근원암 지화학 자료는 대부분 암상 구분없이 혼합 분석함에 따라 이암과 석탄 근원암 특성의 구분이 모호하여 제주분지의 근원암을 규명하는데 저해 요인으로 작용해왔다. 이번 연구에서는 이러한 기존 연구의 한계를 극복하고자 최신 분석기기를 사용하고 암상을 구분하여 재분석한 지화학 결과를 활용하여(Hwang *et al.*, 2026), 제주분지 내 고품질의 이암과 석탄 근원암을 규명하였다. 또한, 2022년 신규 취득된 3D 탄성파 자료를 이용하여 재정립된 층서와 퇴적상 자료 등을 종합하여 3차원 석유모델링 모델링 연구를 진행하였다. 이를 통해 시후분지에서 검증된 석유시스템이 제주분지 내에서의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

## 2. 분지발달사 및 층서

제주분지를 포함하는 동중국해 지역은 대륙판인 유라시아판 동쪽 가장자리에 위치하며, 지구조적으로는 서쪽에서 동쪽으로 체민 융기대(Zhemin uplift), 동중국해대륙붕분지(ECSSB: East China Sea Shelf Basin), 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi uplift belt), 오키나와 해곡(Okinawa trough), 류큐열도(Ryuku islands) 등이 북동-남서 방향의 구조대를

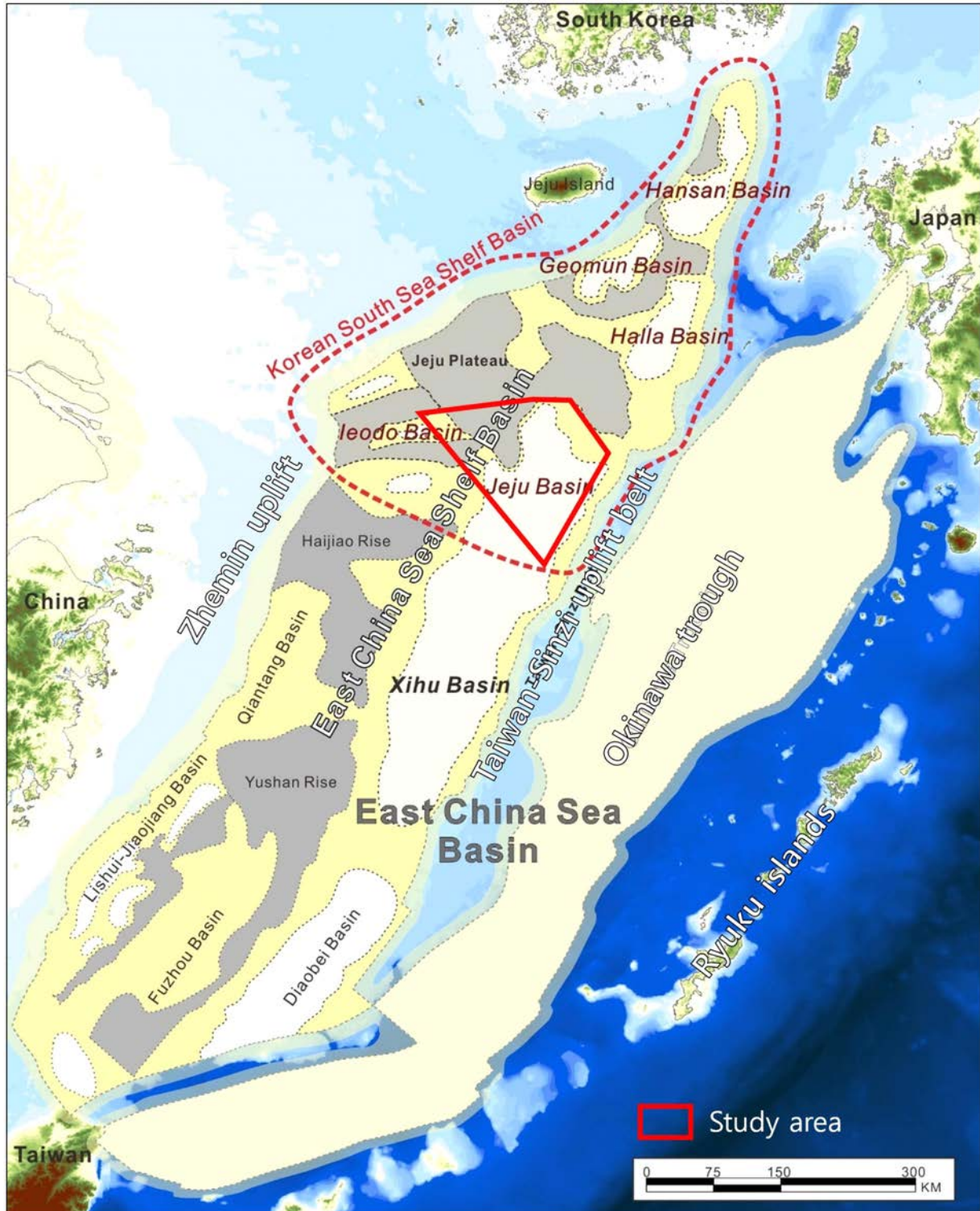
따라 발달한다(그림 1). 이 가운데 동중국해대륙붕분지는 기반암 고지대를 경계로 이어도분지, 제주분지, 한산분지 등 다수의 퇴적분지들을 포함한다.

동중국해의 지구조 진화와 층서에 대해서는 다수의 선행 연구가 보고되어 있으나, 본 연구에서는 Lee *et al.* (2026b)와 Lee *et al.* (2026c)에서 제시된 분지발달사와 층서 체계를 활용하였다. 동중국해대륙붕분지의 형성 기작에 대해서는 크게 2가지 해석이 제시되고 있다. 첫째는 고태평양판과 유라시아판의 경계부에서 발생한 판 섭입에 따른 후열도 확장(back-arc spreading)에 의해 분지가 형성되었다는 견해이며(Ren *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2009), 둘째는 북동-남서 방향으로 발달한 거대단층대를 따라 반복적인 단층운동에 의한 당겨열림(pull-apart opening) 형태로 분지가 형성되었다는 해석이다(Xu *et al.*, 2014; Suo *et al.*, 2015).

백악기 말에서 팔레오세 말까지 고태평양판(Izanagi plate)의 섭입으로 인해 유라시아판 전면에는 대륙호(Diaoyu uplift)가 발달하고, 후열도 지역에서는 반지구 형태(half-graben)의 확장에 의해 열개분지가 형성된다(Weilin *et al.*, 2019). 전기 에오세에는 인도판과 유라시아판의 충돌이 시작되고, 필리핀 해판이 태평양판과 인도판 사이에서 새롭게 형성되면서 태평양판의 섭입 방향이 북서쪽으로 변화한다(Weilin *et al.*, 2019). 이러한 판 운동의 변화로 인해 팔레오세 말에서 전기 에오세에 오우장운동(Oujiang movement)이 발생하고, 이 시기 분지는 전반적으로 압축 응력의 영향을 받은 것으로 해석된다(Weilin *et al.*, 2019). 중기 에오세 이후 태평양판이 다시 유라시아판 하부로 섭입하기 시작하면서, 화산호에 인접한 동중국해 동부 지역에 열개작용이 시작되고(Li *et al.*, 2009), 그 이후 분지 전반에 걸쳐 침강이 진행된다. 후기 에오세에서 전기 올리고세에는 필리핀해판이 유라시아판 하부로 섭입하기 시작함과 동시에 태평양판의 섭입 방향이 서북서로 변하면서 유권운동(Yuquan movement)이 발생하고 이로 인해 분지는 다시 압축 변형을 받는다(Zhou *et al.*, 1989; Yang and Lin, 1992; Weilin *et al.*, 2019). 중기 올리고세에는 대륙호(Diaoyu uplift)와 필리핀해판 상부에 위치한 고류큐열도(paleo-Ryuky Island)가 충돌하면서 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi Uplift Belt)가 형성되기 시작한다(Sun 1985; Huang *et al.*, 1992; Hsu and Sibuet, 1995; Sibuet and Hsu, 1997). 후기 올리고세에는 필리핀해판의 섭입방향이 북북서에서 서북서쪽으로 변화함에 따라 동중국해 지역에는 좌수향 압축성 전단(sinistral transpression)을 받아 후아강운동(Huagang movement)이 발생한다(Suo *et al.*, 2015). 이후 중기 마이오세까지 분지 전반에 걸쳐 광역적인 침강이 지속되나 중기 마이오세 후기에 일본열도, 류큐열도 및 이즈-보닌 화산호(Izu-Bonin Arc)의 충돌로 롱징운동(Longjing movement)이 발생하면서

강한 습곡작용과 역단층 발달에 따른 구조 역전이 발생한다(Wang *et al.*, 1995; Kong *et al.*, 2000). 후기 마이오세에서 후기 플라이오세에는 필리핀해판의 섭입으로 후열도 지

역의 확장이 진행되고, 그 결과 류큐열도 뒤편에 오키나와 해곡(Okinawa trough)가 형성되기 시작한다(Kong *et al.*, 2000). 플라이오세 이후 현재까지 광역적인 침강 하에서



**Fig. 1.** Regional map of the East China Sea Basin including Zhenmin uplift, East China Sea Shelf Basin, Taiwan-Sinzi uplift belt, Okinawa trough, Ryukyu islands (modified after Paik *et al.*, 2026).

해성 퇴적물이 동중국해 전반에 걸쳐 퇴적된다.

한편, 국내에서 수행된 제주분지 층서 연구에서는 팔레오세와 에오세 층의 명확한 구분이 이루어지지 않았거나(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011), 이어도 분지의 열개작용이 팔레오세에 선행하여 시작된 것으로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2019). 그러나 최근 발표된 중국 연구(Xu *et al.*, 2024)에 따르면, 이어도 분지 내 시추공의 미화석 연대측정 결과를 통해 기반암 상부에 팔레오세 퇴적층이 존재함을 확인하였고, 이를 시후분지 에오세 하부에도 팔레오세 층이 존재하는 것으로 층서 해석을 수행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 시후분지에서 인지되는 팔레오세와 에오세 경계부에서 층리 종결 및 구조변형 양상이 제주분지에서도 유사하게 나타남을 확인하여 팔레오세 층을 추가하였고, 그 외 상부는 선행 연구와 동일한 층서 체계를 사용하였다(Lee *et al.*, 2026b).

### 3. 3차원 석유시스템 모델 구축

#### 3.1. 입력자료 및 분석방법

본 연구의 평가지역은 제주분지 북부지역과 이어도 분지 일부를 포함하는 지역으로 제 4광구, 제 5광구, JDZ 2소구 및 4소구에 걸쳐있으며, 총 면적은 약 14,821 km<sup>2</sup>이다(그림 2). 구조적으로 북부에는 소규모의 소분지들이 발달하고, 남쪽으로 갈수록 분지의 심도와 규모가 점차 증가하면서 중앙습곡대(central anticline inversion belt)가 발달한다. 또한 중앙습곡대와 이어도 분지 사이에는 서쪽경사대(western slope belt)가 형성되어 있다.

3차원 석유시스템 모델을 구축하기 위해 층서 및 지질연대, 심구조도, 퇴적상(depositional facies), 암상, 근원암 지화학 자료, 침식두께, 고지열류량 등의 자료가 필요하다. 이중 층서 및 지질연대, 탄성과 해석자료, 퇴적상, 근원암 지

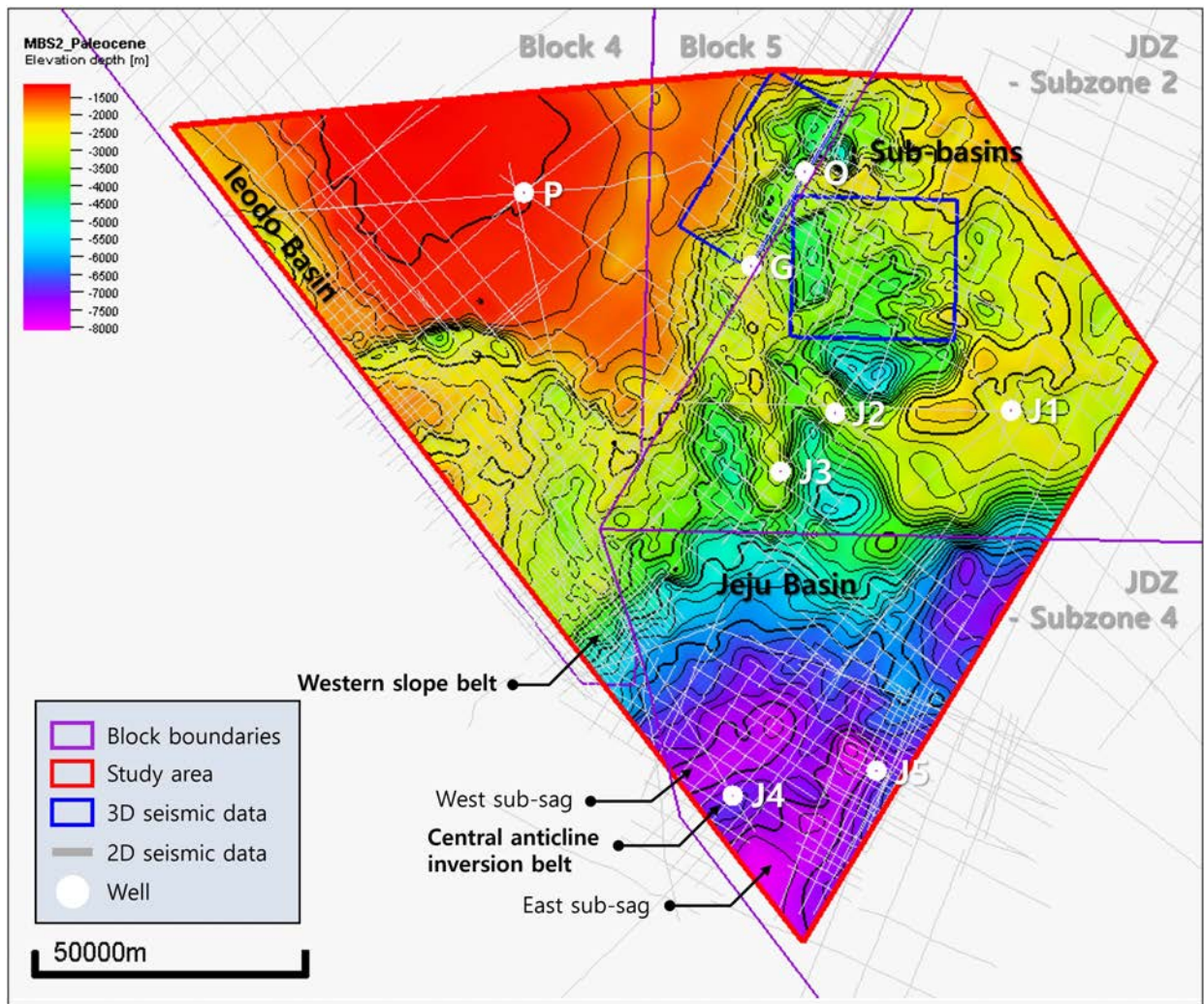


Fig. 2. Depth structure map of Paleocene in study area including blocks, coverage of 3D seismic surveys, 2D seismic lines and well locations.

**Table 1.** Input parameters for 3-D petroleum system. The facies maps are in Fig. 3.

Epoch	End Age	2nd or 3rd-order sequence boundaries	Layer	Lithology or facies map	Petroleum system elements			
Pliocene~	0	Seabed	PLI10	Ss50%, Sh50%	Seal			
			M90	Ss100%	Reservoir			
Miocene	5.3	TM	M80	Ss40%, Sh60%	Shale source/Seal			
			M70	Ss40%, Sh60%	Seal			
			M60	Ss66%, Sh20%, Coal14%	Coal source/Seal			
			M50	Ss80%, Sh20%	Reservoir			
			M40	Ss60%, Sh33%, Coal7%	Coal source/Seal			
			M30	Ss60%, Sh40%	Seal			
			M20	Ss80%, Sh20%	Shale source/Reservoir			
			M10	Ss80%, Sh20%	Reservoir			
			Late Oligocene	23.0	TO	O70	*Facies map 8	Coal & Shale source
						O50	Ss50%, Sh50%	Seal
Early Oligocene	28.0	TO30	O30	Ss70%, Sh20%, Coal10%	Coal source/Reservoir			
			O25	Ss20%, Sh80%	Seal			
			O20	Ss80%, Sh20%	Reservoir			
			O15	*Facies map 7	Shale source			
			O10	*Facies map 6	Reservoir			
Eocene	33.9	TE	E90	*Facies map 5	Seal			
			E70	*Facies map 4	Reservoir			
			E50	*Facies map 3	Shale source			
			E30	*Facies map 2	Reservoir			
			E10	*Facies map 1	Coal source			
Paleocene	56.0	TP	P10	Ss50%, Sh50%	Seal			
Late Cretaceous	66.0	TB	BSMT	Granite100%				

※ TB: Top of the Basement, TP: Top of the Paleocene, TE: Top of the Eocene, TO: Top of the Oligocene, TM: Top of the Miocene, Ss: Sandstone, Sh: Shale.

화학 자료는 한국석유공사와 대한지질학회가 3년간 공동으로 수행한 남해대륙붕 석유부존 환경 평가 연구의 결과물들을 활용하였다(Choi, 2026; Hwang *et al.*, 2026; Lee *et al.*, 2026b, 2026c, 2026d).

탄성파 해석자료의 연구 결과물은 2D 및 3D 탄성파 자료를 기반으로 수행된 5개의 2차 시층서 경계면(2<sup>nd</sup>-order sequence boundaries)과 5개의 3차 시층서 경계면(3<sup>rd</sup>-order sequence boundaries)을 포함한다. 2차 시층서 경계면은 TB (Top of basement), TP (Top of Paleocene), TE (Top of Eocene), TO (Top of Oligocene), TM (Top of Miocene)이며, 3차 시층서 경계면은 TP10, TE10, TE30, TO10, TO30이다. 이 중 연구지역 전반을 포괄하는 해석이 존재하고 미화석 연대측정 자료(Yun *et al.*, 1999)를 통해 시기를 명확히 특정할 수 있는 2차 시층서 경계면인 TB, TP, TE, TO,

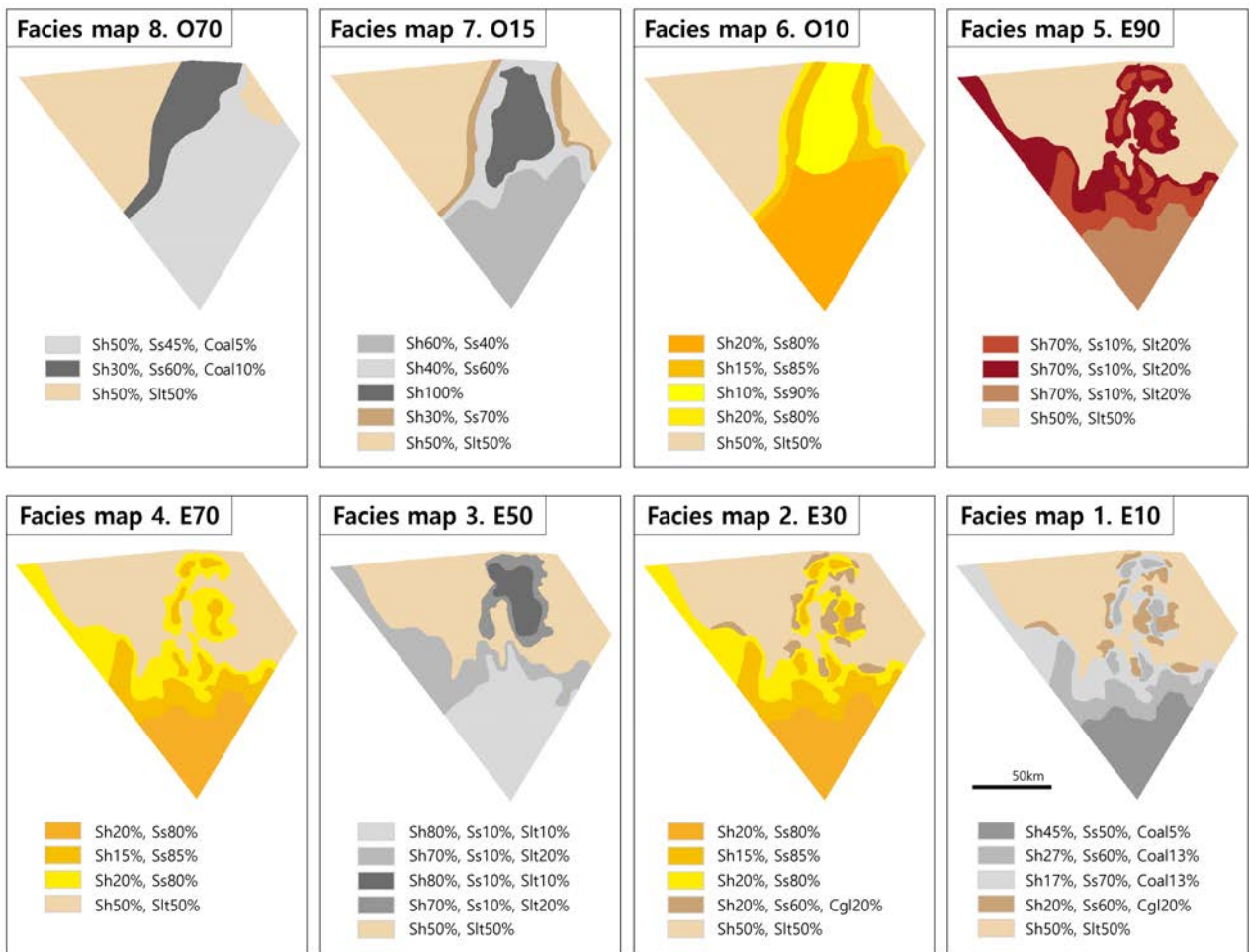
TM과 3차 시층서 경계면인 TO30 (Top of Early Oligocene) 및 해저면을 기본 층서체계로 활용하였다(표 1). 총 6공(G, O, J1, J2, J3, J5공)의 시간-심도 관계 자료를 기반으로 선형 회귀분석을 통해 최적의 속도 함수를 도출하였으며, 변환된 심구조도를 이용하여 기본 구조모델을 구축하였다.

모델링 지역의 퇴적상 도면을 작성하기 위해 탄성파 역산(inversion) 분석 결과와 탄성파상 해석 결과를 통합하여 주요 퇴적환경을 정의하였다. E층 하부에서는 북부 지역을 중심으로 충적선상지와 소규모 호수로 구성된 육성 소분지들이 우세하게 발달하며, 단절된 배수계를 가지는 환경으로 해석된다. 이 시기에는 간헐적인 해침의 영향이 있었던 것으로 판단된다. 남부 지역은 상대적으로 해성 영향이 컸으며 상부로 갈수록 그 분포 범위가 점진적으로 확대된다. O층 하부에 이르면 소규모 분지들이 점차 연결되면서 북북

동-남남서 방향의 축상 하천(axial channel) 시스템이 발달한다. 이후 상부로 갈수록 후기 올리고세에는 해안평원 및 연안 해양환경을 지시하는 탄성파상과 미화석 증거가 나타나며, 전반적으로 해성 영향이 지배적인 환경으로 전이된다. 이러한 퇴적환경 변화 양상을 반영하여 시기별로 퇴적 시스템 모델을 구축하고 각 퇴적상 단위별로 암상 구성을 정의하였다(그림 3).

근원암 지화학 자료는 탄화수소의 종류와 생성 잠재량을 결정하는 핵심 입력자료이다. 연구지역에는 과거 여러 기관에서 지화학 분석이 수행된 바 있으나 대부분 암상을 구분하지 않고 혼합 분석을 수행하여 이암과 석탄 근원암 특성의 구분이 모호하거나 석탄 근원암의 존재가 명확히 확인되지 않는다. 이에 G, O, J4 및 J5공을 대상으로 이암과 석탄을 구분하여 지화학 재분석을 수행한 결과를 활용하였고(Choi, 2026; Hwang *et al.*, 2026), 그 결과 이암과 석탄 근원암 특성이 명확하게 구분되며 전 층준에 걸쳐 양

질의 석탄 근원암 존재가 확인된다. 재분석을 수행한 총 4개 시추공 중 G와 O공은 연구지역 북부 소분지에 위치하며, J4공과 J5공은 중앙습곡대에 위치한다. 소분지에 위치하는 G와 O공은 총 시추심도가 3,000 m 이하이며, 비트리나이트 반사도(vitrinite reflectance; Ro)의 최대값이 0.6 이하로 미성숙 단계에 해당한다. 따라서 해당 분석자료는 퇴적 당시의 초기 근원암 특성을 반영하는 것으로 판단된다. 다만 G공은 에오세 하부에서 화산암류 및 응회암이 우세하게 발달하여 전체 에오세 퇴적층을 대표하기 어렵기 때문에 소분지의 근원암 특성은 O공의 지화학 자료를 활용하였다. O공의 근원암 구간 선정에 물리검층 자료, 지화학 자료, 암상정보를 종합적으로 검토하였다(그림 4). 물리검층 자료에서 E층 내 약 2,800~2,850 m 구간에 다수의 석탄이 인지되며, 지화학 분석 결과 TOC (total organic carbon)와 S2(remaining hydrocarbon potential)가 매우 높고, HI (hydrogen index)는 대부분 200 mgHC/gTOC 이하로



※ Sh: Shale, Ss: Sandstone, Slt: Siltstone, Cgl: Conglomerate

Fig. 3. Facies map of major petroleum system elements. E10: Eocene seal, E30: Eocene reservoir, E50: Eocene source, E70: Eocene reservoir, E90: Eocene seal, O10: Early Oligocene Reservoir, O15: Early Oligocene source, O70: Late Oligocene source.

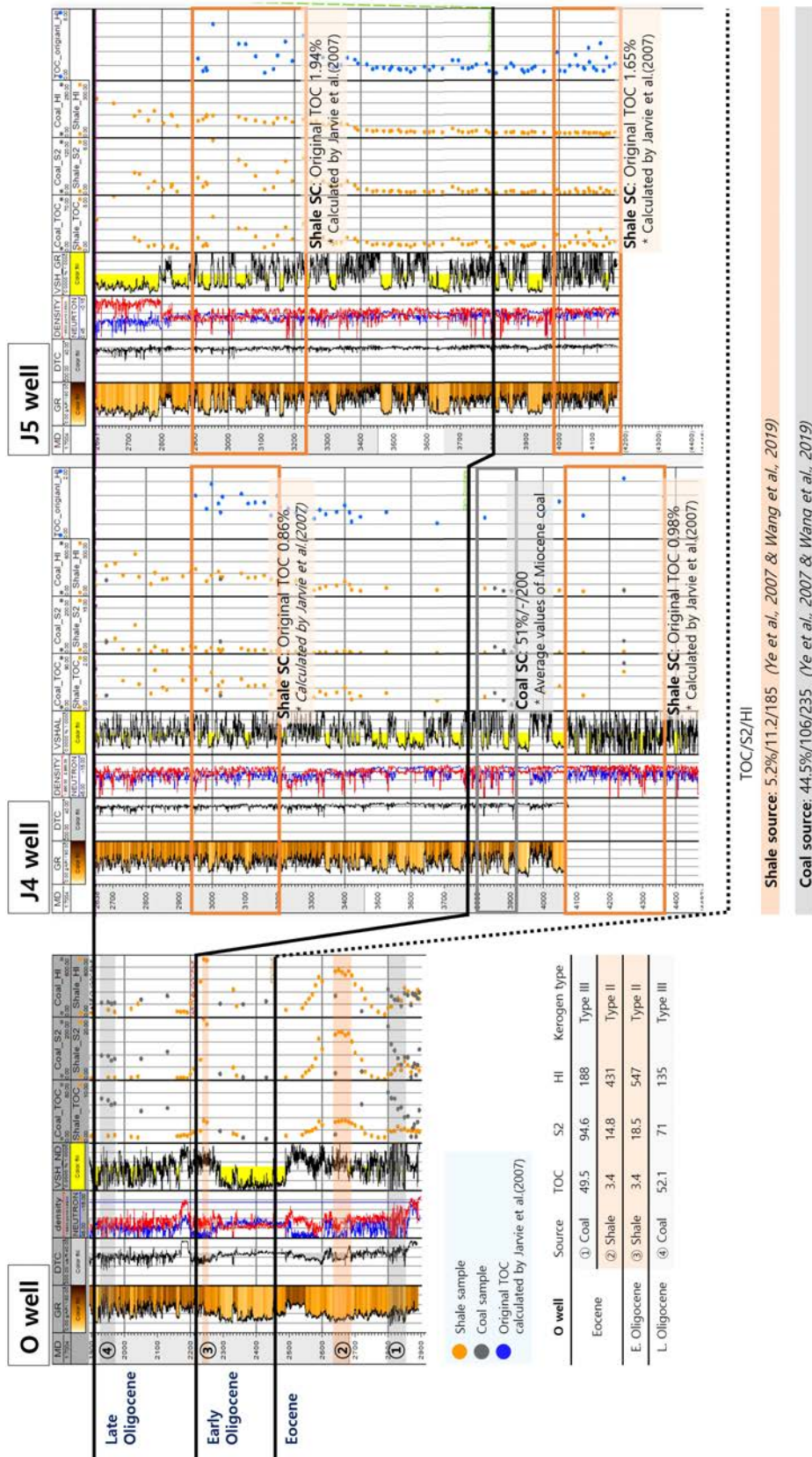


Fig. 4. Source rock correlation of O, J4 and J5 wells (after Choi, 2026; Hwang et al., 2026; Kim et al., 2026). Eocene and Oligocene source rock intervals analyzed by wireline log and geochemical data.

나타나 gas-prone의 석탄 근원암 구간으로 해석된다. 이 구간에서 상부로 갈수록 이암의 TOC, S2, HI값이 동일한 경향으로 증가하며 약 2,660 m 부근에서 최대값을 보인다. 해당 구간은 물리검층 자료에서도 두꺼운 이암이 인지되며 HI값이 약 400 mgHC/gTOC 이상으로 oil-prone의 이암 근원암 구간으로 선정하였다. O공의 O층 내 약 2,350 m 상부에서도 에오세 이암 근원암과 유사하게 TOC, S2, HI가 증가하는 경향을 보이며, 가장 고품질의 이암 근원암이 퇴적된 구간이다. 또한 약 1,950 m 부근에서는 다수의 석탄이 인지되며 TOC, S2가 매우 높고, HI는 200 mgHC/gTOC 이하로 gas-prone의 석탄 근원암 구간이 존재한다. 이와 같이 연구지역 북부 소분지에는 에오세 석탄 및 이암 근원암, 올리고세 이암 및 석탄 근원암으로 총 4개의 구간의 근원암을 선정하였다.

반면, 중앙습곡대에 위치하는 J4와 J5공은 O층 하부로 갈수록 TOC, S2, HI값이 일관되게 감소하며(그림 4), Tmax (temperature of maximum pyrolysis)는 원유생성 단계(oil window)에서 급격히 증가하여 후성숙 단계(post-mature)에 도달한다(그림 5). 따라서 해당 구간의 지화학 자료는 초기 근원암 특성을 반영하지 못하는 것으로 판단되며 Jarvie *et al.* (2007) 방법을 적용하여 이암 분석자료에 대해 초기 TOC 복원을 수행하였다. 두 시추공의 복원된 초기 TOC 값은 절대 값에는 차이가 있으나, 초기 올리고세 하부와 후기 올리고세 상부에서 공통적으로 초기 TOC 값이 증가하는 경향

을 보이며, 해당 두 구간을 올리고세 이암 근원암 구간으로 선정하였다. J4공의 초기 올리고세 상부에 물리검층 자료 및 지화학 분석자료를 통해 석탄 근원암 구간이 인지되나, 높은 성숙도로 인해 초기 근원암 특성을 반영하지 못하므로 J4공 마이오세 석탄층의 평균 지화학 값을 적용하였다. 또한, J4공과 J5공은 O층까지만 시추되어 E층에 대한 정보가 부재하므로 O공에서 확인된 에오세 석탄 및 이암 근원암 구간이 동일하게 분포한다고 가정하였다. 해당 구간의 지화학 값은 E층의 퇴적 시기에 유사한 퇴적환경으로 판단되는 시후분지의 에오세 핑후층(Pinghu Formation)의 석탄 및 이암의 지화학 자료(Ye *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2019)의 평균값을 활용하였다.

침식두께는 3차원 석유시스템 모델링에서 킨의 최대 매몰심도를 규명하는 핵심 요소로 근원암의 열성숙도에 중대한 영향을 미친다. 침식두께를 구하는 방법으로는 비트리나이트 반사도 분석, 음파검층(sonic log) 분석, 최대 퇴적두께 활용법, 침식 이전 지층 해석 방법 등이 있으며, 본 연구지역은 음향기반암 고지대에서 중앙습곡대에 이르는 복잡한 지구구조를 가지므로 침식 이전 지층 해석 방법을 적용하였다. 제주분지는 후기 마이오세에 발생한 룡징운동의 영향을 가장 크게 받았으며, 2D 탄성파 단면에서 경사부정합이 뚜렷하게 인지되므로 후기 마이오세 부정합에 대한 침식 두께도만 산정하였다. 연구지역 내 최대 퇴적두께를 가지는 지점을 기준으로 하부 마이오세층의 구조 형태와

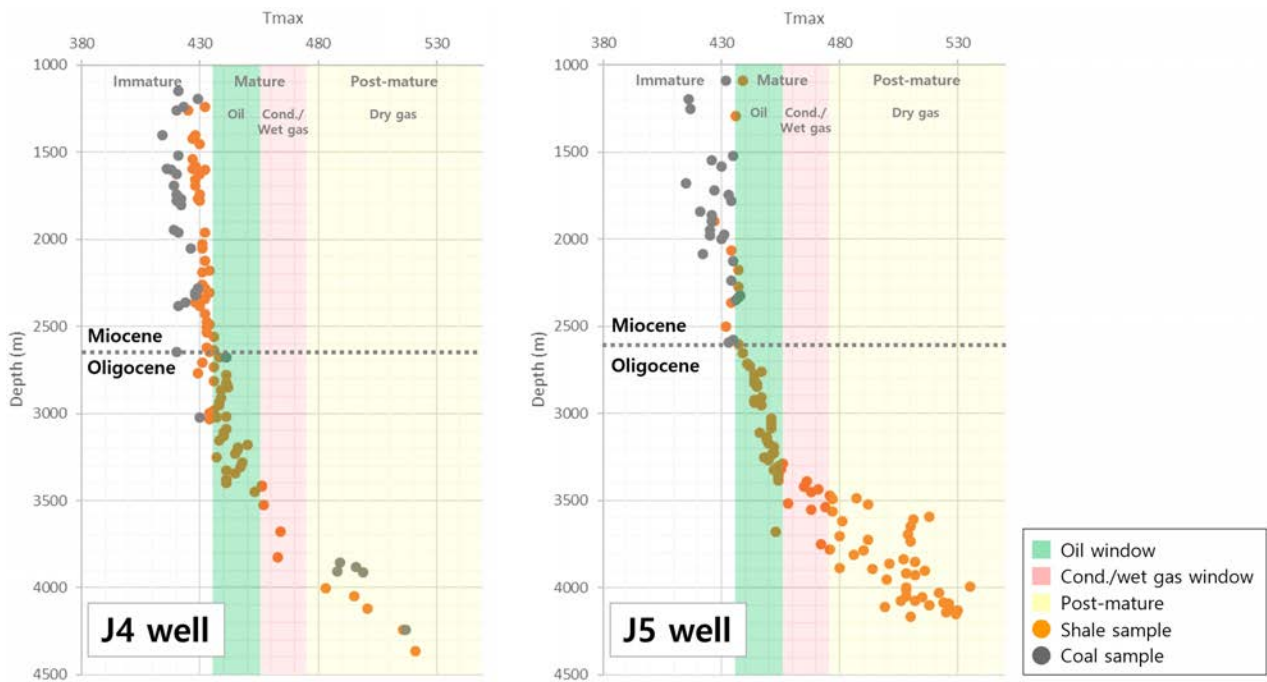


Fig. 5. Plot of Tmax vs. depth for J4 and J5 wells, showing onset of oil window near top of the Oligocene (after Choi, 2026; Kim *et al.*, 2026).

음향기반암 고지대 또는 중앙습곡대에 따라 퇴적가능공간을 고려하여 침식 이전 지층 해석을 수행하였다. 이후 마이오세 부정합면과의 심도 차이를 계산하여 침식 두께도를 작성하였다(그림 6). 압축력이 집중되어 구조가 발달한 지역에서 침식두께가 두껍게 나타나며, 중앙습곡대 소분지에는 상대적으로 얇은 침식두께를 보이는데 이는 중앙습곡대 소분지가 룡징운동에 의해 상대적으로 덜 융기되었음을 시사한다. 침식두께는 구조가 발달한 지역에서 북동쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 이는 해당 방향으로 더 강한 압축력을 받은 결과로 해석된다.

3.2 열성속도 및 온도 모델

입력자료를 바탕으로 3차원 석유시스템 모델을 구축한 후, 모델의 신뢰성을 제고하기 위해 열성속도 및 온도 모델에 대한 보정을 수행하였다(그림 7, 8). 열성속도 및 온도 모델에 영향을 미치는 주요 인자 중 하나인 지열류량을 설

정하기 위해 연구지역 내 시추공들의 지온구배율과 비트리나이트 반사도 자료를 분석하였다.

지온구배율은 시후분지 내에서도 구조대별로 차이를 보이며, 중앙습곡대가 서쪽경사대에 비해 상대적으로 높은 값을 가진다. 연구지역 내 시추공들의 지온구배율을 높은 순서대로 배열하면 J5>J4>J1>J3>J2>O공 순으로 나타나며, 전반적으로 북동쪽으로 갈수록 지온구배율이 감소하는 경향을 보인다.

심도에 따른 비트리나이트 반사도를 비교하면 동일한 심도에서 중앙습곡대에 위치한 시추공들이 서쪽경사대에 위치한 시추공들에 비해 상대적으로 높은 반사도 값을 나타낸다. 연구지역 내 시추공들의 비트리나이트 반사도를 높은 순서대로 배열하면 J1>J4≈J5>J2>J3>O,G공 순으로 지온구배율과 마찬가지로 북동쪽으로 갈수록 감소하는 경향이 확인된다.

이와 같이 연구지역 내 시추공별로 지온구배율과 비트

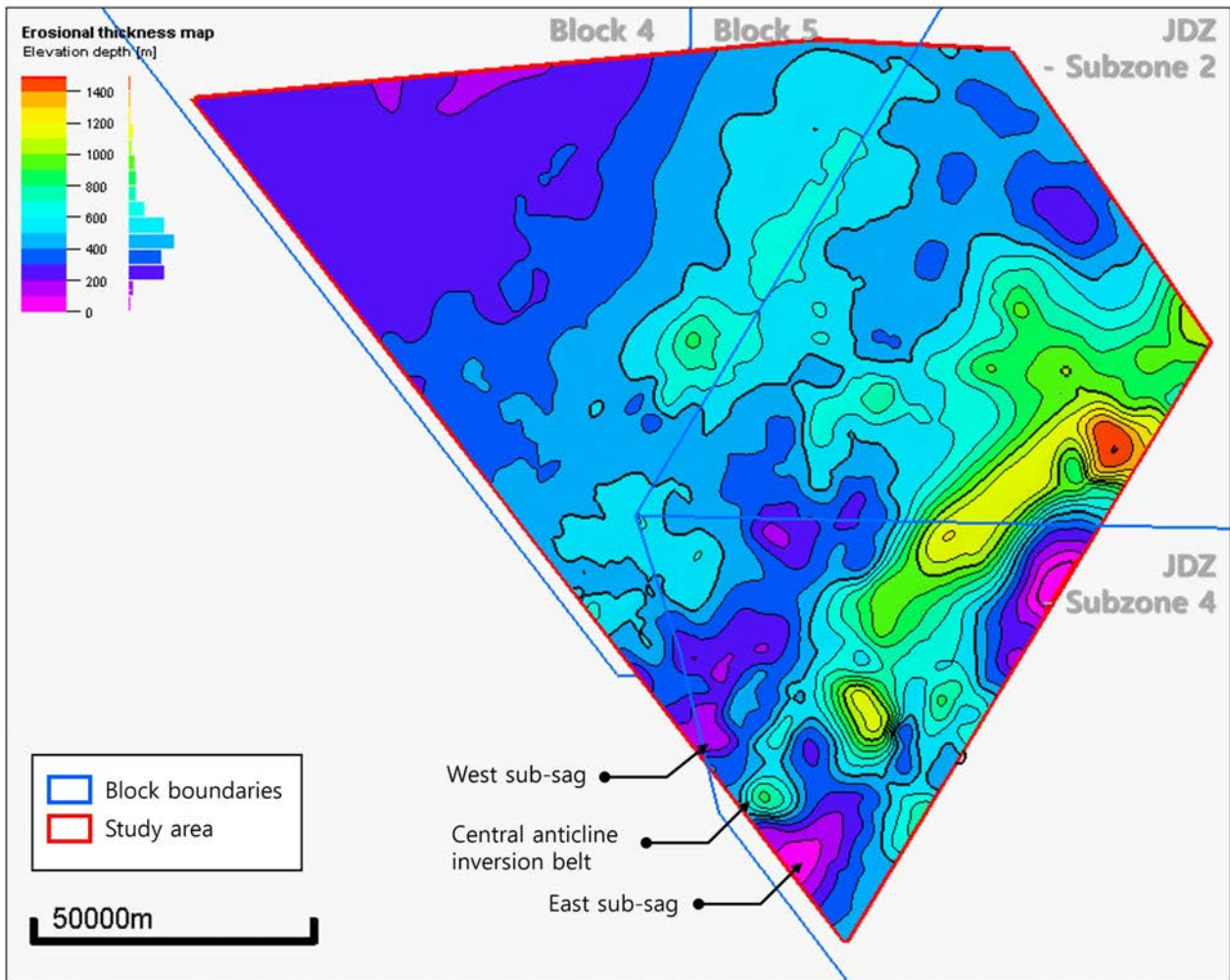


Fig. 6. Erosional thickness map in Late Miocene unconformity showing more thicker in the Central anticline inversion belt and relatively thinner in West and East sub-sags.

리나이트 반사도에 차이가 존재하므로 전 지역에 동일한 지열류량을 적용하는 것은 타당하지 않다. 이에 본 연구에서는 유사한 열적 특성을 보이는 지역을 구분하여 지열류량을 다르게 적용하였다. 여러 차례 보정 과정을 통해 시추공에서 측정된 비트리나이트 반사도 및 온도 자료와 열성속도 및 온도 모델의 결과가 가장 잘 일치하는 지열류량 값을 도출하였으며, 이를 최종 모델에 적용하였다.

### 4. 3차원 석유시스템 모델링 결과

#### 4.1. 탄화수소 생성

그림 9는 모델에 입력된 각 근원암의 현재 열성속도를 나타낸 것으로, Petromod 소프트웨어에 내재된 Sweeney and Burnham (1990)의 성숙도 기준을 적용하여 도시한 결과이다. 에오세 석탄 및 이암 근원암은 중앙습곡대에서 과성숙 단계(overmature)에 도달하였으며, 서쪽경사대에서

는 심도에 따라 초기 원유 생성단계(early oil window)에서 건성가스 생성단계(dry gas window)에 이른다. 올리고세 이암 및 석탄 근원암은 중앙습곡대에서 심도에 따라 주요 원유 생성단계(main oil window)에서 건성가스 생성단계에 해당하며, 서쪽경사대에서는 초기에서 주요 원유 생성 단계에 해당한다. 서쪽경사대에서 중앙습곡대를 가로지르는 축선 단면에서 원유생성 시작심도는 약 2,100~2,400 m이며, 가스생성 시작심도는 약 3,800~4,200 m로 나타난다 (그림 10).

그림 11은 동일한 축선에서 현재 변환율(transformation ratio; TR)을 도시한 결과로 변환율은 케로젠(kerogen)이 탄화수소로 전환된 비율을 의미한다. 모델링에서 변환율이 50%에 도달하는 시점을 최대 원유 생성시기(peak oil generation)로 정의하며, 이 시기에 케로젠에서 탄화수소로의 전환이 가장 활발하게 진행된다. 에오세 석탄 및 이암 근원암은 중앙습곡대에서 변환율이 100%에 도달하여 모든 케

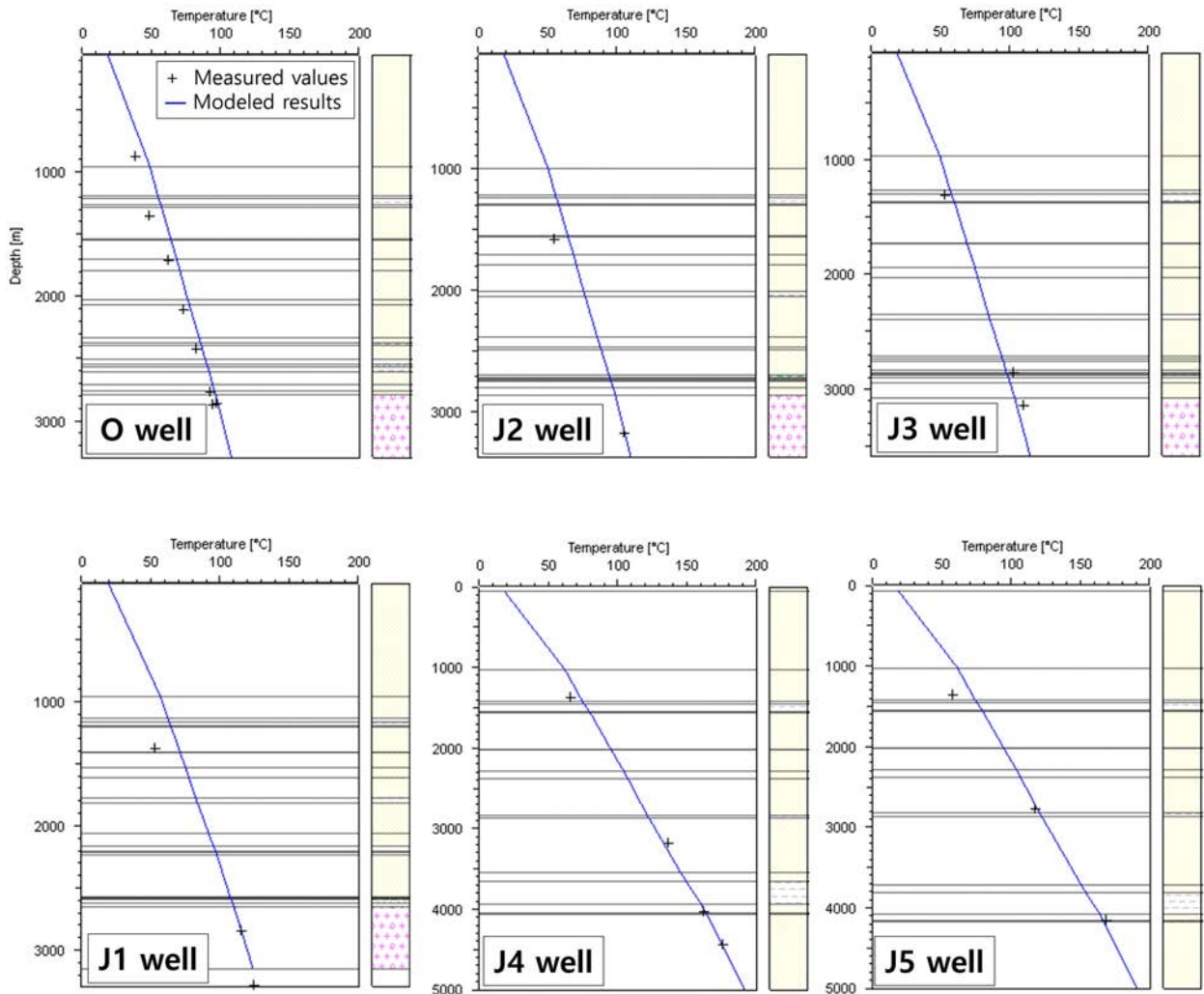


Fig. 7. Calibration result of measured and modeled temperature for O, J2, J3, J1, J4 and J5 wells.

로젠이 이미 탄화수소로 전환된 상태로 현재 추가적인 탄화수소 생성 잠재력은 없는 것으로 해석된다. 반면, 서쪽경사대에서는 심도에 따라 일부 지역에서 변환율이 50% 이상으로 최대 원유 생성시기에 도달하여 다량의 탄화수소가 생성되는 시기로 판단된다. 올리고세 이암 및 석탄 근원암은 중앙습곡대에서 변환율이 50% 이상으로 다량의 탄화수

소가 생성되는 시기로 해석되며, 서쪽경사대는 변환율이 50% 미만으로 아직 최대 원유 생성시기에 도달하지 않은 상태이다.

모델에 입력된 전체 근원암 중 제주분지의 주요 근원암을 규명하기 위해 생성 및 배출된 탄화수소의 기원을 분석하였다(그림 12). 분지 형성 시기부터 현재까지 생성 및 배

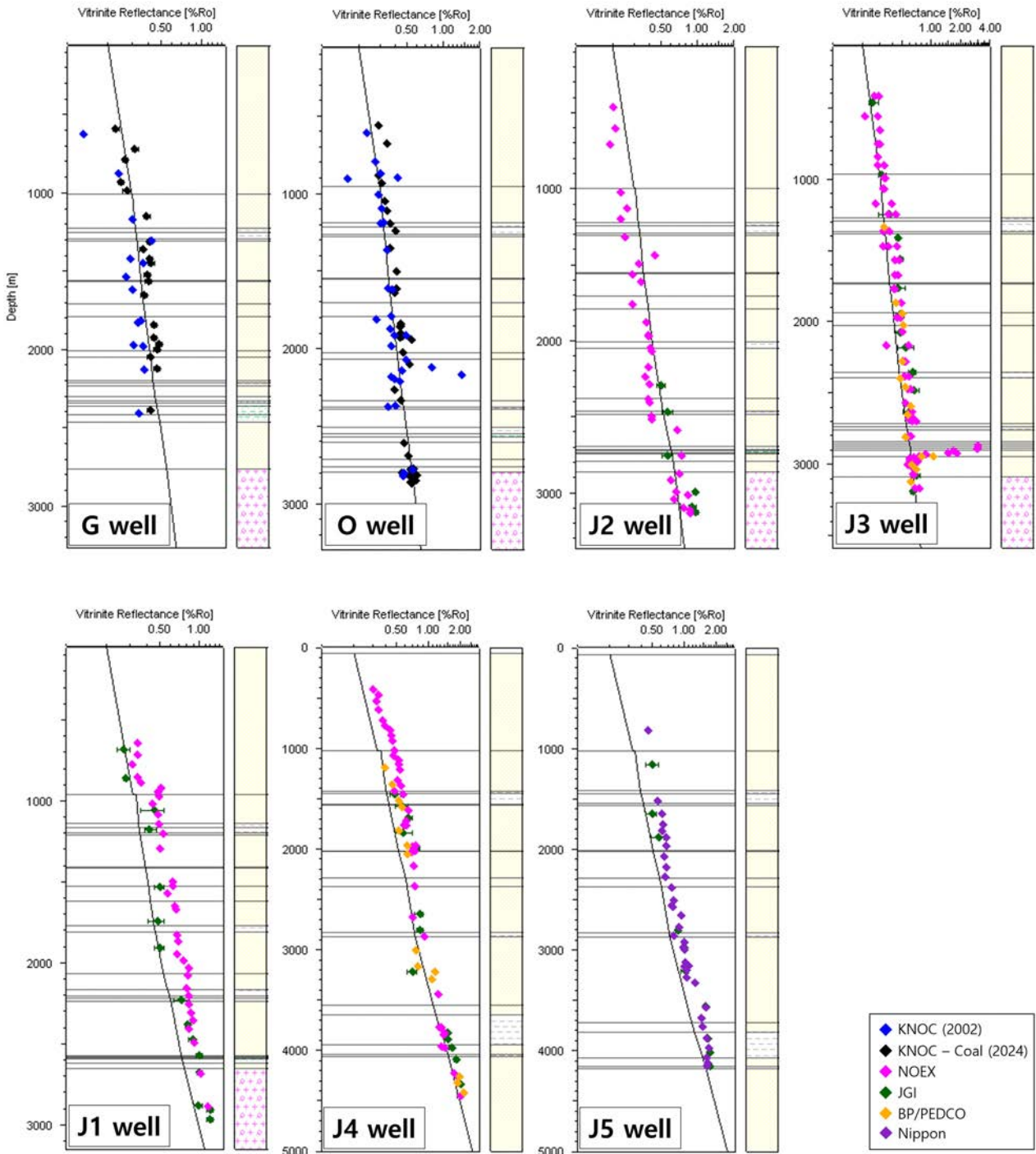


Fig. 8. Calibration result of measured and modeled vitrinite reflectance for O, J2, J3, J1, J4 and J5 wells.

출된 탄화수소의 약 80% 이상은 에오세 근원암에서 기원한 것으로 나타난다. 반면, 분지의 주요 구조 형성 시기인 후기 마이오세 이후부터 현재까지 생성 및 배출된 탄화수

소의 약 90% 이상은 올리고세 근원암에서 기원한다. 전체 누적 탄화수소의 양만을 고려할 경우 에오세 근원암이 주요 근원암으로 해석되나, 구조 형성 시기를 고려하면 올리

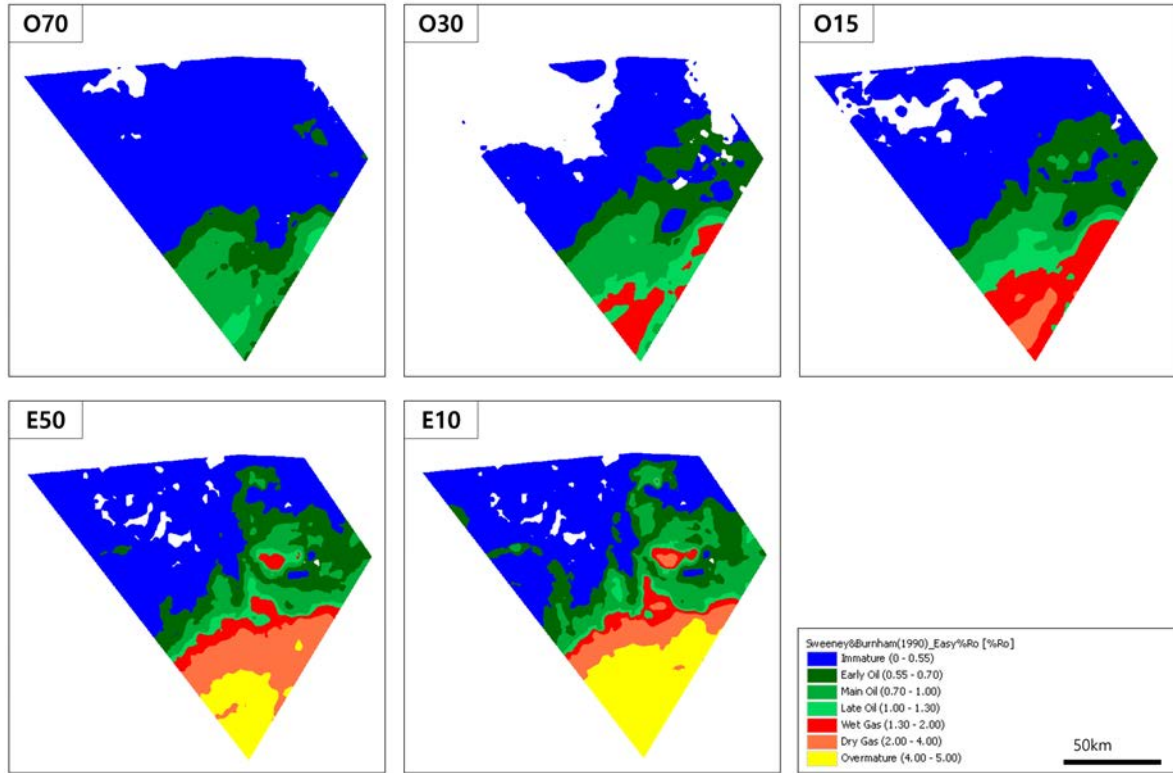


Fig. 9. Maturity map for Eocene and Oligocene source rocks. E10: Eocene Coal source, E50: Eocene Shale source, O15: Early Oligocene Shale source, O30: Early Oligocene Coal source, O70: Late Oligocene Coal & Shale source.

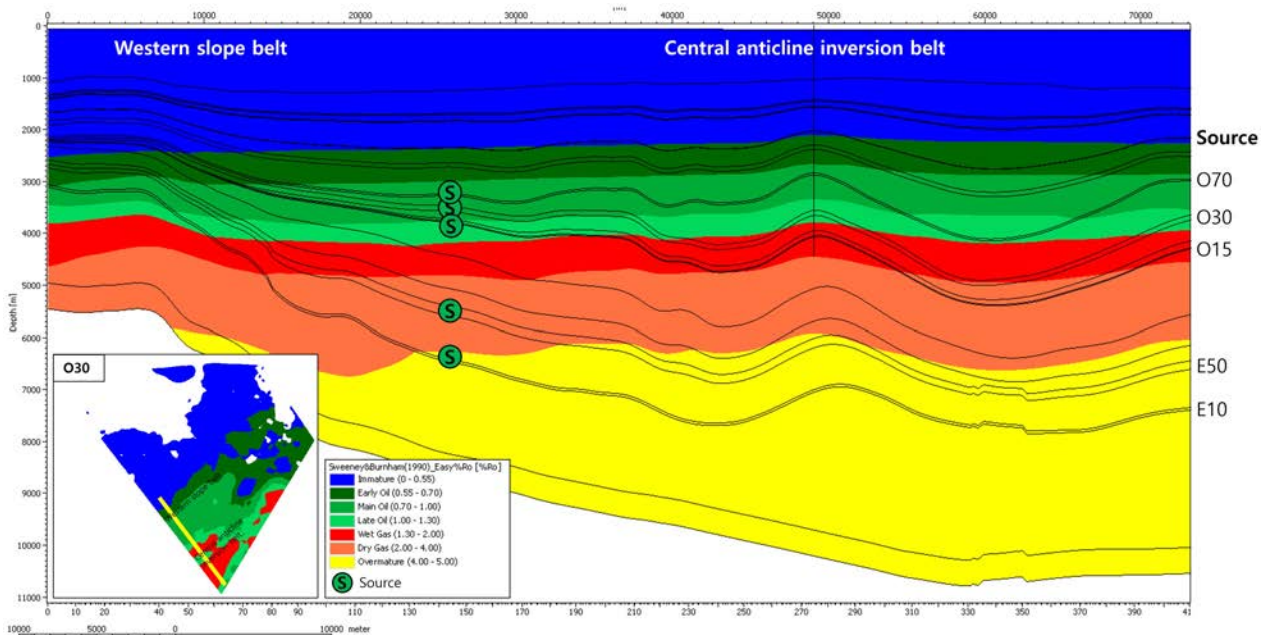


Fig. 10. Present maturity from western slope belt to central anticline inversion belt.

고세 근원암 또한 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

에오세 및 올리고세 근원암 중 각 시기별로 가장 하부에 존재하는 근원암을 대상으로 열성속도 및 변환율의 변화사

를 분석하였다. 에오세 석탄 근원암(E10)은 후기 에오세부터 탄화수소 생성이 시작되며, 이 시기 중앙습곡대와 서쪽 경사대 대부분 지역은 초기에서 주요 원유 생성단계에 해

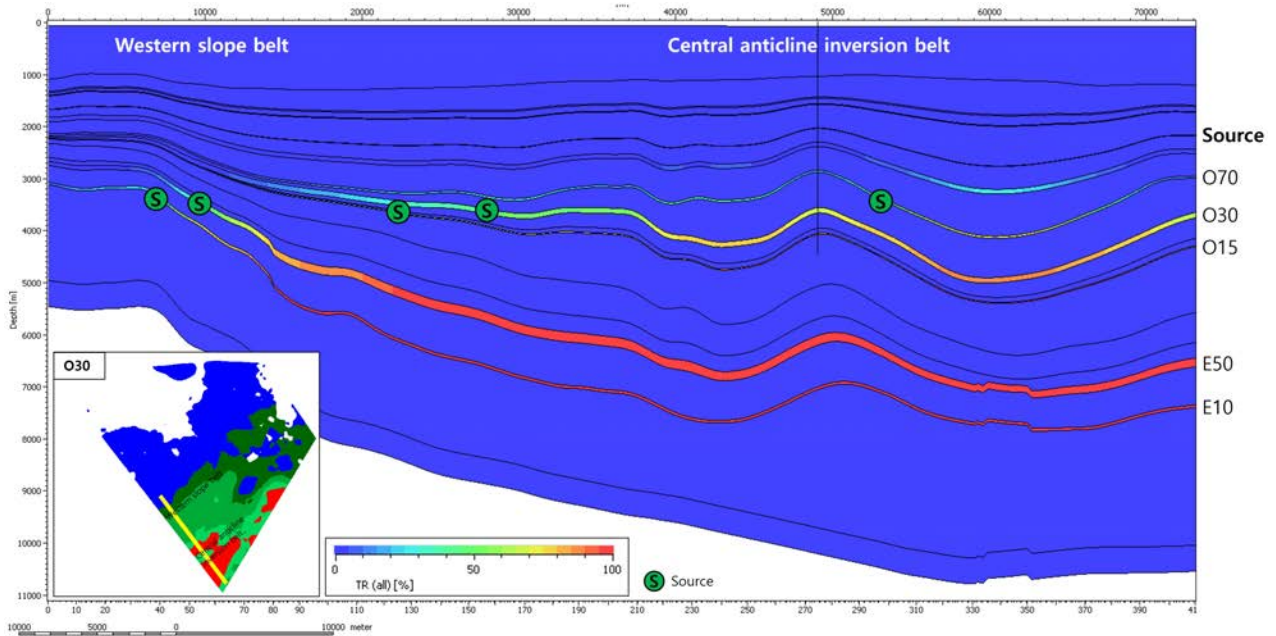


Fig. 11. Present transformation ratio from western slope belt to central anticline inversion belt.

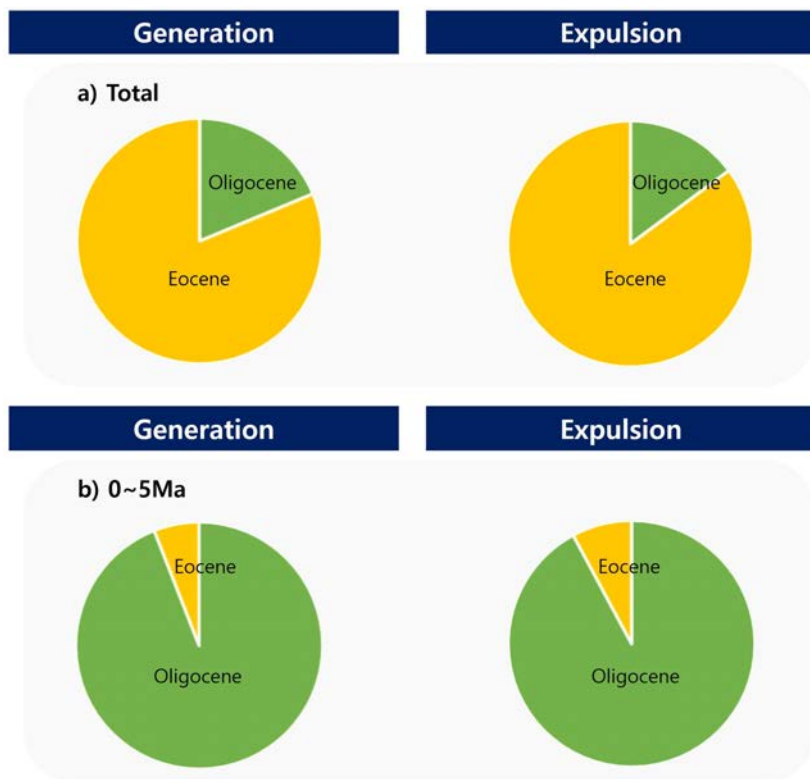


Fig. 12. Hydrocarbon amount of generation and expulsion. a) total accumulated amount, b) accumulated amount from 5 Ma to present.

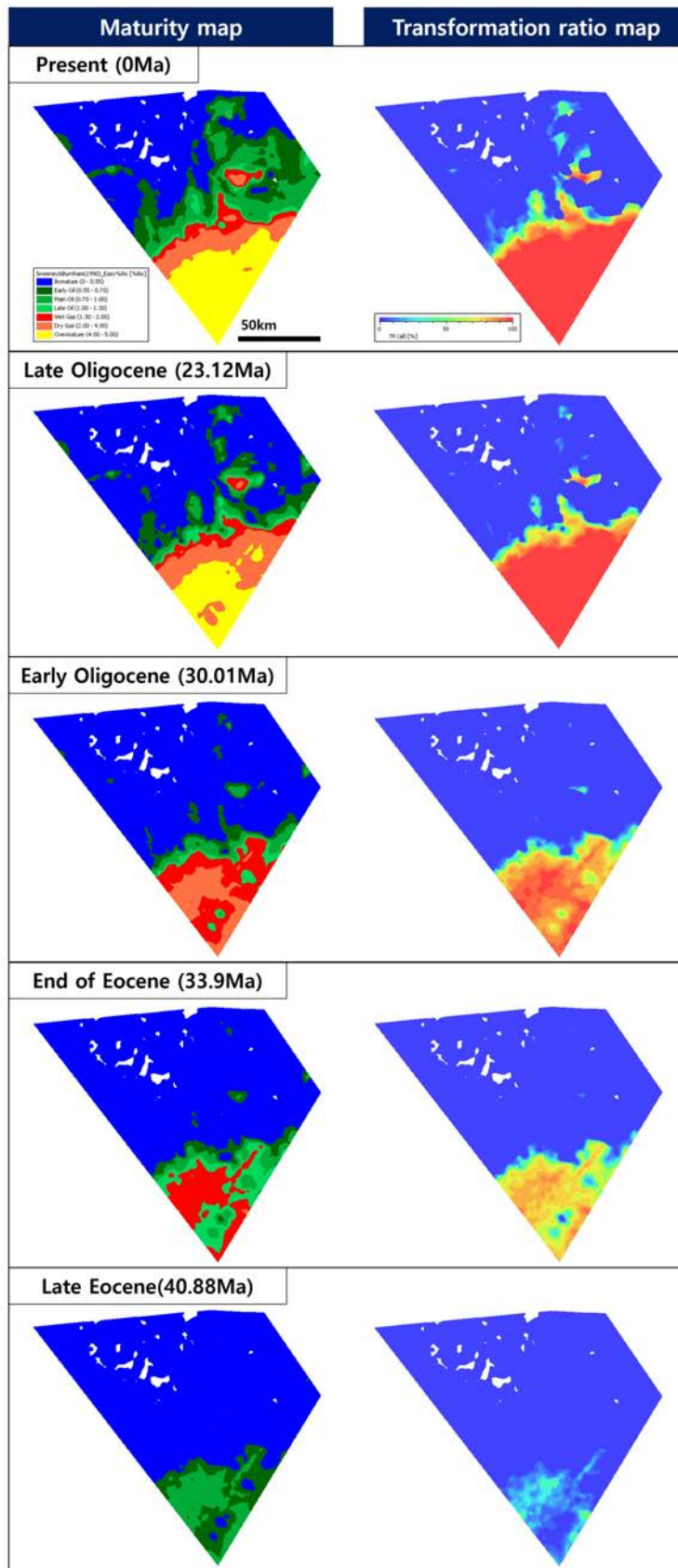


Fig. 13. History of maturity and transformation ratio for Eocene source rock (E10). left: maturity map, right: transformation ratio map.

당하고 변환율은 50% 미만이다(그림 13). 에오세 말 중앙 습곡대에는 습성가스 생성단계에 도달하며, 중앙습곡대와 서쪽경사대에서 변환율은 50% 이상으로 탄화수소 생성량이 급격히 증가한다. 초기 올리고세에는 중앙습곡대의 성숙도가 건성가스 생성단계에 도달하고, 중앙습곡대와 서쪽

경사대 대부분 지역에서 변환율이 70% 이상이다. 올리고세 말에는 중앙습곡대가 과성숙 단계 및 변환율 100%에 도달하여 탄화수소 생성이 종료되는 반면, 서쪽경사대는 초기 오일에서 건성가스 생성단계에 해당하며 변환율이 50% 이상으로 마이오세 이후 생성된 탄화수소는 주로 서쪽경사

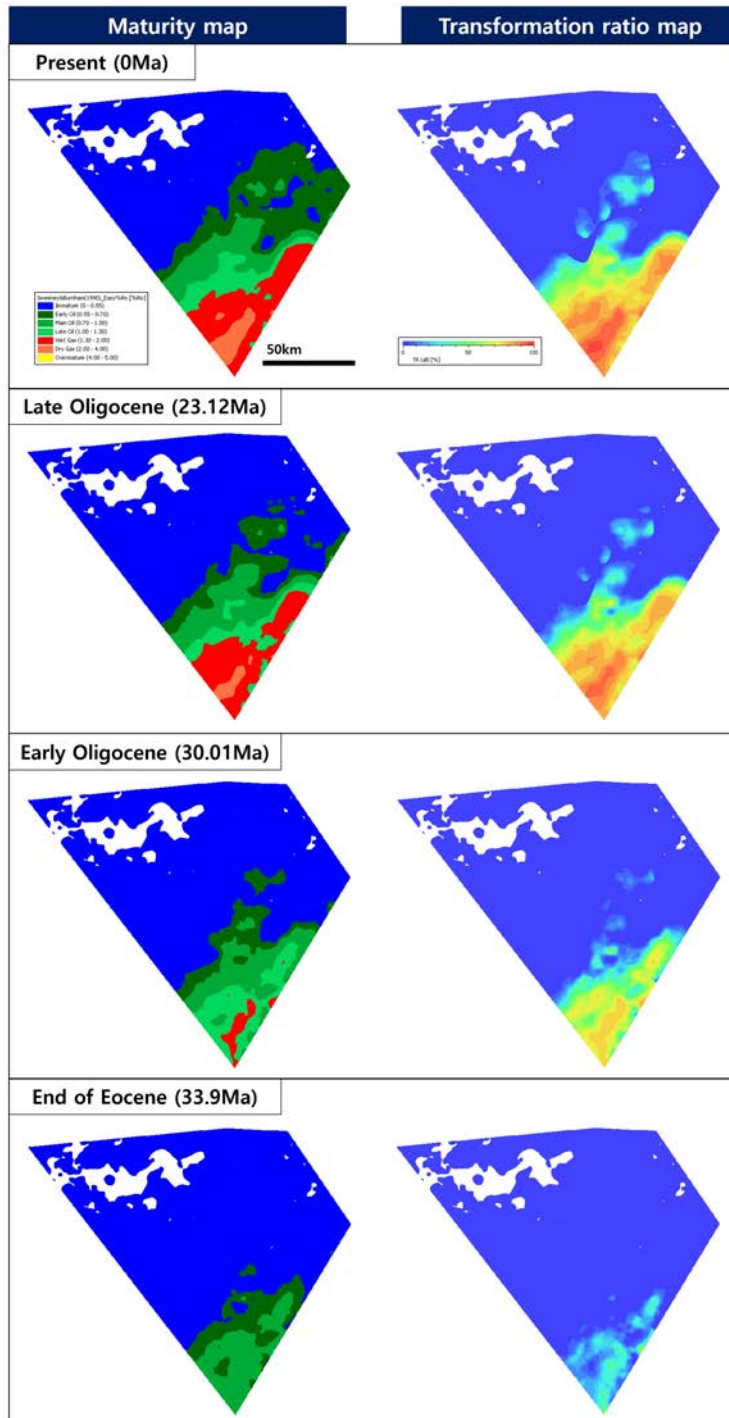


Fig. 14. History of maturity and transformation ratio for Oligocene source rock (O15). left: maturity map, right: transformation ratio map.

대 기원일 것으로 판단된다. 마이오세 이후 현재까지 주변부 지역에서 성숙도 및 변환율이 점진적으로 증가하면서 현재와 같은 모습을 갖췄다. 올리고세 이암 근원암(O15)은 올리고세 말부터 탄화수소 생성이 시작되며, 이 시기 중앙습곡대는 초기에서 주요 원유 생성단계에 해당하고 변환율은 50% 미만이다(그림 14). 초기 올리고세에는 중앙습곡대 일부 지역이 습성가스 생성단계에 도달하고, 변환율은 50% 이상이다. 후기 마이오세에 중앙습곡대는 대부분 지역이 습성가스 생성단계에 해당하며 일부 지역은 건성가스 생성단계까지 도달하고 변환율 50% 이상인 지역이 점차 확대된다. 이 시기에 서쪽경사대는 초기에서 주요 원유 생성단계에 해당한다. 주변부를 따라서 성숙도 및 변환율이 증가하면서 현재와 같은 모습을 갖췄다.

그림 15는 3차원 모델링 결과에서 추출한 J4공의 1차원 매몰사 및 석유시스템 이벤트 차트 분석 결과로 에오세층은 현재 건성가스 생성단계에서 과성숙 단계에 진입하였고, 올리고세층은 원유 생성단계에서 건성가스 생성단계에 걸쳐 분포한다. 팔레오세부터 마이오세까지 매우 두꺼운 퇴

적층을 형성하였으나, 후기 마이오세에 발생한 롱징운동으로 인해 대규모 융기 및 침식이 발생한다. 이후 다시 침강되며 퇴적이 재개되었으나, 침식량과 퇴적량이 유사하여 구조 운동 이후 추가적으로 성숙도 증가는 나타나지 않는다.

### 4.2. 탄화수소의 이동 및 집적

Petromod 소프트웨어에는 다양한 탄화수소 이동 모델이 내재되어 있으나, 본 연구에서는 탄화수소 이동경로를 직관적으로 확인할 수 있는 Flowpath (Ray Tracing) 방법을 적용하였다.

제주분지는 현재까지 원유 및 가스 징후만 보고되었을 뿐 상업적 발견이 확인되지 않았기 때문에 탄화수소 이동 모델 결과의 타당성을 구조적으로 연장선에 위치한 중국 시후분지의 사례와 비교하여 모델의 신뢰도를 제고하였다. 탄화수소 이동 모델 결과, 근원암에서 생성된 탄화수소가 주로 직상부로 1차 이동한 후, 다공질인 저류층 내에서 측방을 따라 상부로 이동하는 양상을 보인다. 제주분지 서쪽 경사대에서는 가스생성 단계에 도달한 에오세 근원암에서

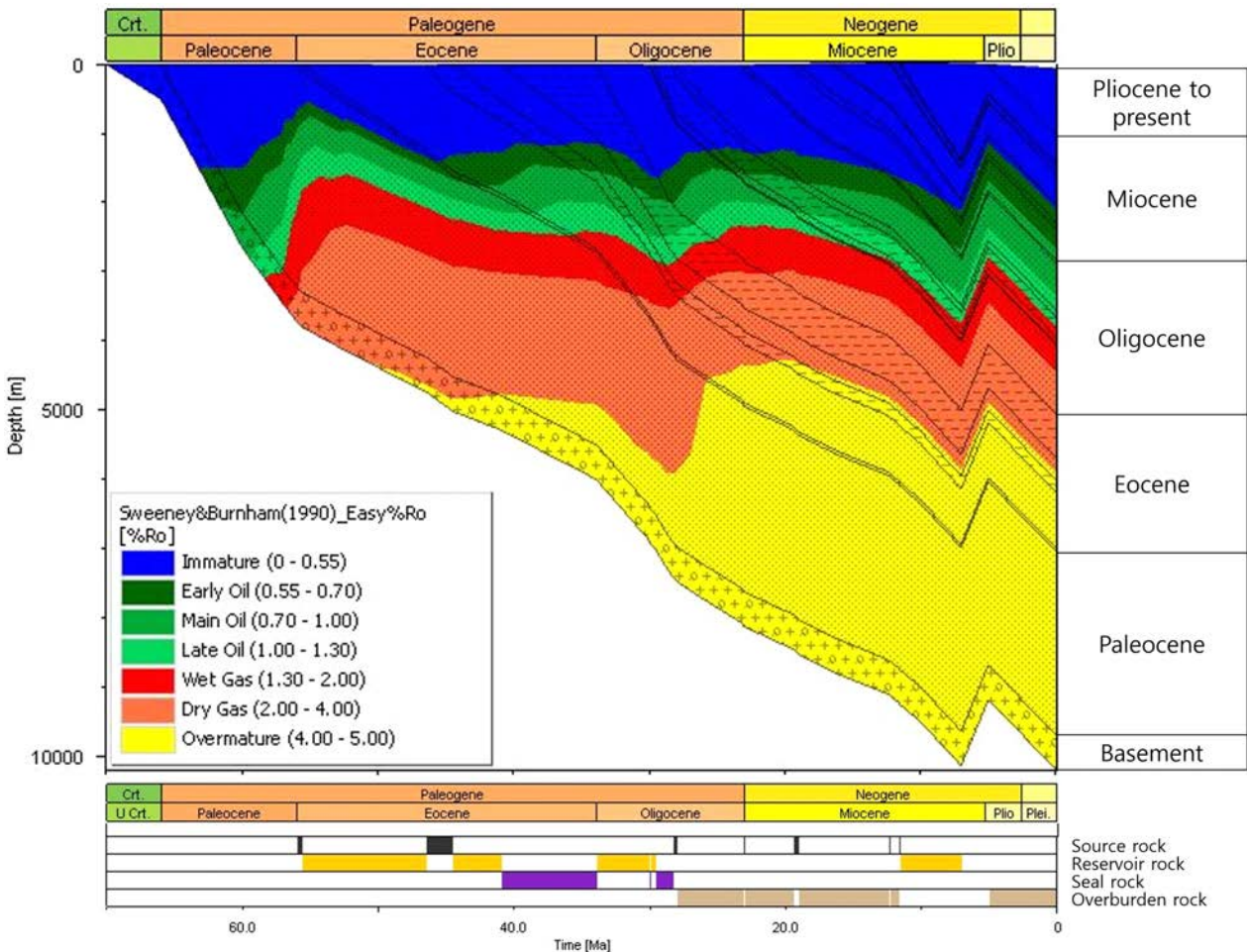


Fig. 15. 1D model result extracted from 3D model of J4 well including burial and thermal history, petroleum system chart.

생성된 탄화수소가 올리고세부터 배출되기 시작하여 경사대를 따라 상부로 근거리 및 장거리 이동하여 에오세 저류층에 집적되는 것이 확인된다(그림 16). 이러한 이동 및 집적 양상은 시후분지 서쪽경사대의 발견사례와 유사하다. 시후분지 서쪽경사대에서 발견된 유·가스전의 주요 저류층은 에오세 핑후층(Pinghu Formation)이며(Zheng *et al.*, 2022), 경사대 내부의 국지적인 키친이나 깊은 소분지에서 생성된 탄화수소가 경사대를 따라 측면 이동 및 단층을 따라 수직 이동한 것으로 분석하였다(Yan *et al.*, 2024).

한편, 제주분지 중앙습곡대에서는 올리고세 근원암에서 생성된 탄화수소가 주로 올리고세 저류층으로 이동하여 집적되는 것으로 확인된다(그림 17). Chang *et al.* (2024)에 따르면 중앙습곡대의 구조적 특성에 따라 두 가지 집적 모델을 제시하였으며, 그 중 하나는 룡징운동에 따른 구조 형성 이후 탄화수소가 올리고세 후아강층으로 이동하여 집적되는 모델이다. 주요 근원암이 에오세 핑후층이라는 점에서 본 연구와 차이를 보이지만, 룡징운동 이후 하부에서 생성된 탄화수소가 이동 및 집적될 수 있다는 점에서 시후분지의 발견사례를 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 토 의

### 5.1. 에오세 석유시스템

3차원 석유시스템 모델링 결과와 중국 시후분지에 대한 문헌자료를 종합하면, 제주분지에는 에오세 및 올리고세 석유시스템이 모두 유효하게 작동 가능하며, 각 시스템마다 유효한 지역이 다르게 나타난다.

에오세 석유시스템은 서쪽경사대에서 유효하며, 중앙습곡대에서는 구조 형성 시기에 따라 조건부로 유효할 것으로 판단된다(그림 18). 서쪽경사대에서 에오세 근원암은 후기 에오세부터 탄화수소가 생성되며, 올리고세부터 배출이 시작된다. 초기 마이오세에는 탄화수소 생성 및 배출량이 급격하게 증가하며, 중기 마이오세 이후 증가 폭은 감소하지만, 현재까지도 원유에서 가스 생성단계에 해당한다. 또한 이 지역의 변환율은 심도에 따라 40~100% 범위로 나타나, 현재에도 탄화수소 생성 및 배출이 가능한 것으로 사료된다. 서쪽경사대의 구조형성은 후기 마이오세 룡징운동보다는 올리고세 이전 구조운동의 영향을 더 크게 받은 것으로 해석되기 때문에 시기상 탄화수소 집적에 유리한 지역

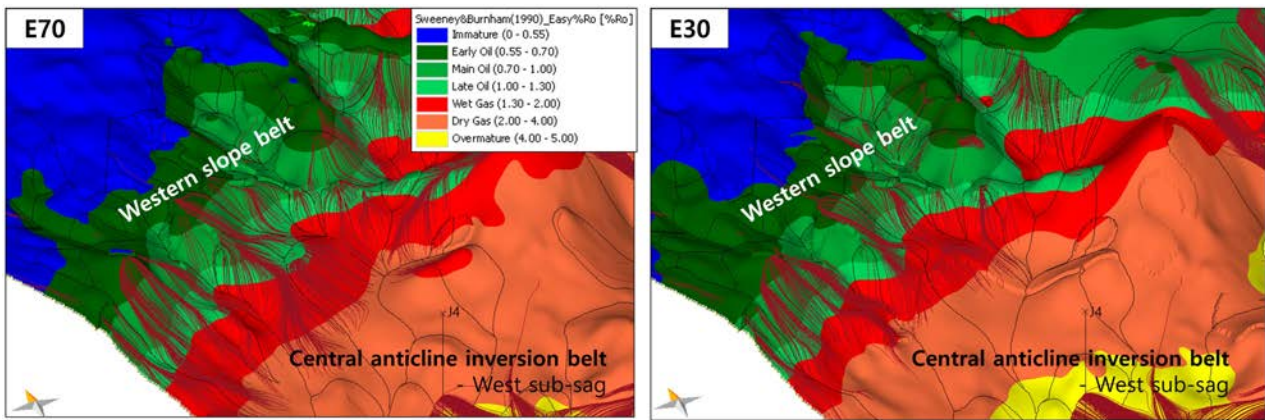


Fig. 16. Hydrocarbon migration path and drainage area in Eocene reservoirs. E30, E70: Eocene reservoir.

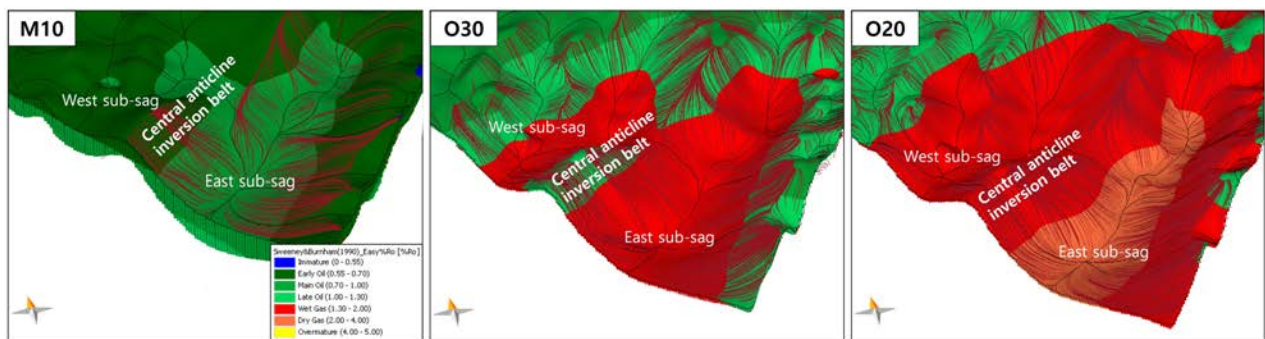


Fig. 17. Hydrocarbon migration path and drainage area in Oligocene and Miocene reservoirs. O20, O30: Oligocene reservoir, M10: Miocene reservoir.

으로 판단된다. Yan *et al.* (2024)에 따르면 제주분지의 서쪽경사대에 해당하는 시후분지 평후경사대의 주요 근원암은 에오세 평후층이며, 마이오세부터 현재까지 근거리뿐만 아니라 장거리 탄화수소 이동에 의해 집적되는 것으로 분석하였다.

중앙습곡대는 습곡대를 기준으로 서쪽에 위치하는 서부 소분지(West sub-sag)와 동쪽에 위치하는 동부 소분지(East sub-sag)로 구분된다(그림 2). 에오세 근원암은 두 소분지에서 후기 에오세부터 탄화수소 생성 및 배출이 시작되며 중기 올리고세까지 생성 및 배출량이 급격하게 증가한다. 후기 올리고세 이후에 증가 폭이 감소하고, 마이오세 이후 현재까지 생성 및 배출량이 거의 없는 것으로 나타난다. 따라서 중앙습곡대에서는 후기 올리고세 이전에 형성된 구조에 한해서 에오세 석유시스템이 유효할 것으로 판단된다. Ye *et al.* (2007)에 따르면 제주분지의 서부 소분지에 해당하는 시후 분지의 산탄 소분지(Santan sag)에서 1D 모델링 결과, 에오세 평후층은 초기 마이오세에 원유 생성 단계, 초기 플라이오세에 습성가스 생성단계에 진입하였으며 현재에도 가스 생성단계이다. 탄화수소 방출시기는 초기 올리고세(28 Ma)에서 후기 마이오세(8 Ma)이며 주요 방출시기는 초기 마이오세(18 Ma)이다. 두 연구간에는 에오세 근원암의 성숙도 및 탄화수소 방출시기에 있어 상당한 차

이가 나타난다. 이는 제주분지의 서부 및 동부 소분지 중심부에 시추공이 부재하고 인근 시추공(J4, J5)에서 올리고세 층까지 시추되었고, Ye *et al.* (2007)도 가상 시추공 위치에서 1D 모델링을 수행하였기 때문이다. 따라서 중앙습곡대 소분지에서 에오세 근원암의 심도 및 성숙도에 대한 불확실성이 매우 높을 것으로 판단된다.

### 5.2. 올리고세 석유시스템

올리고세 석유시스템은 서쪽경사대에서는 유효하지 않으나, 중앙습곡대에서는 유효한 석유시스템으로 판단된다(그림 19). 서쪽경사대에서 올리고세 근원암은 현재 초기에서 주요 원유 생성단계에 해당되나 변환율이 30% 미만으로 탄화수소 생성 및 배출량이 극히 제한적이므로 석유시스템이 작동하기는 어려울 것으로 판단된다.

중앙습곡대의 두 소분지에서는 올리고세 근원암이 마이오세부터 탄화수소 생성 및 배출되기 시작하고 중기 마이오세까지 생성 및 배출량이 급격히 증가한다. 후기 마이오세 이후 증가 폭은 감소하나 현재에도 원유에서 가스 생성 단계에 해당하며, 변환율이 50~90% 범위로 탄화수소 생성 및 배출이 가능하다. 탄성과 해석 결과, 중앙습곡대 내 서부 소분지는 구조 운동의 영향을 크게 받아 다수의 단층과 복잡한 구조가 발달한 반면, 동부 소분지는 상대적으로 구조

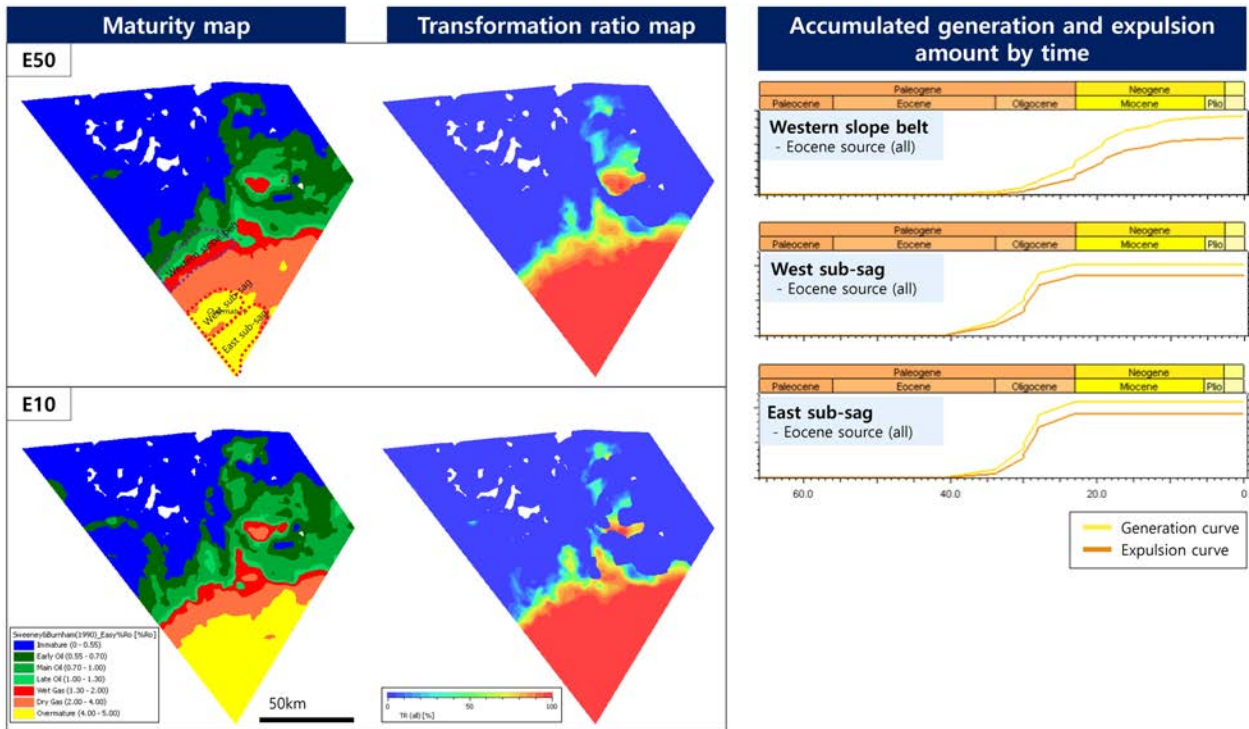


Fig. 18. Effective area for Eocene petroleum system using maturity, transformation ratio and accumulated generation and expulsion amount.

운동의 영향이 적은 것으로 해석된다. 따라서 동부 소분지가 서부 소분지에 비해 석유시스템 측면에서는 유리할 것으로 판단된다. Ye *et al.* (2007)의 산탄 소분지 내 1D 모델링 결과에 따르면 올리고세 후아강 근원암은 마이오세부터 원유 생성단계에 진입하였고, 현재에도 원유 생성단계이다. 탄화수소 방출시기는 초기 마이오세(18 Ma)부터 시작되어 현재까지 지속되며, 주요 방출시기는 중기 마이오세(12 Ma)이다. 두 연구에서 올리고세 석유시스템의 분석 결과는 유사하며, 에오세층과 달리 J4와 J5공에서 올리고세 층에 대한 정보가 가용하며, 상대적으로 심도가 얇기 때문에 사료된다.

5.3. 한계점

본 연구에서 구축한 3차원 석유시스템 모델은 가용한 자료를 최대한 활용하여 제주분지의 탄화수소 생성, 이동, 집적 과정을 종합적으로 해석하고자 하였으나 몇 가지 한계점을 포함하고 있다.

첫째, 중앙습곡대 내 시추공(J4, J5)은 올리고세 층까지만 시추되어 에오세 층에 대한 실제 지화학 분석 자료가 부재하다. 이에 따라 본 연구에서는 북부 소분지(O공) 및 시추분지 에오세 핑후층의 지화학 자료를 활용하여 중앙습곡대 에오세 근원암의 구간과 품질을 가정하였다. 따라서 중

양습곡대 내 에오세 근원암의 존재, 생성 잠재력 등에 대한 불확실성이 존재한다.

둘째, 본 연구의 3차원 모델은 단층을 반영하지 않았다. 서쪽경사대는 다수의 단층이 발달한 지역으로 단층은 탄화수소의 측방 및 수직 이동 경로로 작용할 뿐만 아니라 단층 트랩을 형성하는 중요한 요소이다. 따라서 단층을 고려하지 않은 본 연구의 탄화수소 이동 모델 결과는 서쪽경사대에서의 실제 탄화수소 이동 경로 및 집적 양상을 단순화하였을 가능성이 있다. 특히 단층을 따라 발생하는 측면 이동과 단층 트랩에 의한 집적 가능성에 대해 상당한 불확실성이 존재한다.

셋째, 본 연구에서는 시추공의 속도자료를 활용하여 심도 변환을 수행하였으나, 분지 내 가장 깊은 중앙습곡대 소분지의 경우 가용한 시간-심도 관계 자료가 부재하다. 따라서 하부에 위치한 에오세층의 경우 심도에 대한 불확실성이 가중되며, 해당 근원암의 최대 매몰 심도, 열성속도 및 탄화수소 생성 시기 등 분석 결과에 대한 높은 불확실성이 존재한다.

본 연구의 3차원 석유시스템 모델은 제주분지 전반의 석유시스템 특성을 이해하는데 도움이 되지만, 중앙습곡대 내 에오세 근원암의 지화학 자료 및 시간-심도 관계 부재와 단층 미반영 등으로 인한 불확실성으로 분석 결과에 대해

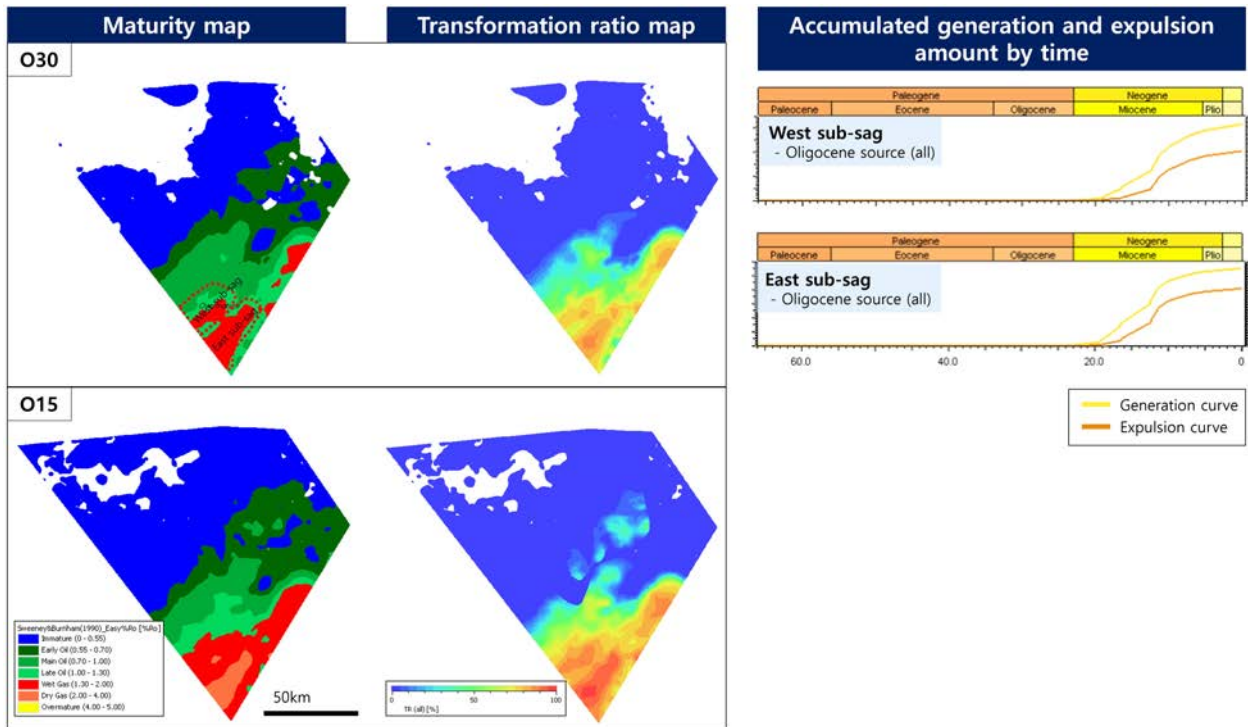


Fig. 19. Effective area for Oligocene petroleum system using maturity, transformation ratio and accumulated generation and expulsion amount.

일부 한계가 존재한다. 향후 중앙습곡대 내 에오세 근원암의 지화학 자료 확보와 단층을 포함한 정밀 구조 모델링이 수행된다면, 제주분지 석유시스템에 대한 보다 정량적이고 신뢰도 높은 평가가 가능할 것으로 기대된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 제주분지 3차원 석유시스템 모델을 구축하여, 제주분지의 탄화수소 이동, 생성 및 집적과정을 분석하였고 주요 결론은 아래와 같다.

첫째, 기존 연구에서 명확히 구분되지 않았던 근원암 특성을 규명하기 위해 이암과 석탄을 구분하여 지화학 재분석을 수행한 결과를 활용하였다. 그 결과 에오세와 올리고세 층에서 양질의 이암과 석탄 근원암 구간이 확인되며, 특히 석탄 근원암은 전 층준에 걸쳐서 분포하는 것으로 나타난다. 이는 제주분지 내에 충분한 양의 탄화수소를 생성할 수 있는 다수의 잠재 근원암이 존재함을 시사하며, 동 지역의 석유부존 가능성을 제고하는 중요한 근거로 활용될 수 있다.

둘째, 에오세 근원암은 중앙습곡대에서 과성숙 단계에 도달하였으며, 서쪽경사대에서는 심도에 따라 초기 원유 생성단계에서 건성가스 생성단계에 이른다. 올리고세 근원암은 중앙습곡대에서 심도에 따라 주요 원유 생성단계에서 건성가스 생성단계에 해당하며, 서쪽경사대에서는 초기에서 주요 원유 생성단계에 해당한다. 그리고, 원유생성 시작 심도는 약 2,100~2,400 m 범위이며, 가스생성 시작심도는 약 3,800~4,200 m로 나타난다.

셋째, 탄화수소 이동 모델 결과, 근원암에서 생성된 탄화수소는 직상부로 1차 이동한 후 다공질 층에서 측방을 따라 상부로 이동·집적되는 것이 확인된다. 서쪽경사대에는 가스생성 단계에 도달한 에오세 근원암에서 생성된 탄화수소가 경사대를 따라 근거리 및 장거리 이동하여 에오세 저류층에 집적되는 것이 확인되며, 이는 시후분지 서쪽경사대에서 발견된 사례와 유사하다. 중앙습곡대에는 올리고세 근원암에서 생성된 탄화수소가 올리고세 저류층에 집적되는 것이 확인되며 이는 시후분지 중앙습곡대에서 룡징운동 이후 집적된 사례를 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

넷째, 제주분지는 에오세 및 올리고세 석유시스템이 모두 유효할 것으로 해석되며, 각 시스템별 유효한 지역이 다르게 나타난다. 에오세 석유시스템은 서쪽경사대에서 유효하며, 중앙습곡대는 후기 올리고세 이전에 형성된 구조에 한해서 제한적으로 유효할 것으로 평가된다. 반면, 올리고세 석유시스템은 중앙습곡대에서 유효하며, 서쪽경사대에서는 작동하지 않을 것으로 판단된다.

본 연구는 제주분지 내 서쪽경사대에서 중앙습곡대에 이르는 광범위한 지역에 대해 탄화수소 생성, 이동, 집적과

정을 3차원적으로 시각화하고 지역별로 유효한 석유시스템을 분석했다는 점에서 학술적인 의미를 갖지만, 중앙습곡대 내 에오세 근원암의 지화학 자료 및 시간-심도 관계 부재와 단층 미반영 등으로 인한 불확실성으로 분석 결과에 대해 일부 한계가 존재한다. 하지만 제주분지 전반의 석유시스템 특성을 이해하는데 도움을 주고, 향후 제주분지 탐사 전략을 수립하는데 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상부 유전개발사업출자의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Chang, Y., Jiang, Y., Qin, J., Chang, W., Xiong, Z., Ji, F., Zhang, R. and Zeng, Z., 2024, Natural Gas Enrichment Processes and Differential Accumulation Models in the Central Anticline Belt of the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Applied sciences* 14, 10242.
- Choi, J., 2026, Organic matter characteristics and petroleum generation potential of source rocks in the Southern Jeju Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 109-121 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Feng, L., Lu, Y.-C., Wellner, J.S., Liu, J.-S., Liu, X.-F., Li, X.-Q., Zhang, J.-Y., 2019, Fluvial morphology and reservoir sand-body architecture in lacustrine rift basins with axial and lateral sediment supplies: Oligocene fluvial-lacustrine succession in the Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. *Australian Journal of Earth Sciences*, 67, 279-304.
- Huang, S.-T., Ting, H.-H., Chen, R.-C., Chi, W.-R., Hu, C.-C. and Shen, H.-C., 1992, Basinal framework and tectonic evolution of offshore northern Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, 27, 47-42.
- Hsu, S.-K. and Sibuet, J.-C., 1995, Is Taiwan the result of arc-continent or arc-arc collision?. *Earth and Planetary Science Letters*, 136, 315-324.
- Hwang, Y.S., Hong, S.K. and Paik, S., 2026, Evaluation of hydrocarbon potential of source rocks in the northern Jeju Basin based on lithology and organic matter characteristics. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 95-108 (in Korean with English abstract).
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E. and Pollastro, R.M., 2007, Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91, 475-499.
- Jiang, S., Li, S., Chen, X., Zhang, H. and Wang, G., 2016,

- Simulation of oil-gas migration and accumulation in the East China Sea Continental Shelf Basin: a case study from the Xihu Depression. *Geological Journal*, 51, 229-243.
- Kim, D., Hong, S.K., Choi, J. and Lee, H.S., 2026, Thermal maturity and paleogeotemperature reconstruction of organic matter in the Jeju Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 81-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.H. and Son, B.K., 2013, Petroleum system modeling of the Jeju basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 473-491 (in Korean with English abstract).
- Kong, F., Lawver, L.A. and Lee, T.-Y., 2000, Evolution of the southern Taiwan-Sinzi folded zone and opening of the southern Okinawa trough. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 325-341.
- Lee, C., Shinn, Y.J., Han, H.C. and Ryu, I.C., 2019, Structural evolution of two-stage rifting in the northern East China Sea Shelf Basin. *Geological Journal*, 54, 2229-2240.
- 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. *AAPG bulletin*, 90, 237-260.
- Lee, J.H., Lee, J.H., Je, Y.H., Yoon, S.H., Paik, S., Han, S.R., Woo, A.R., Jeon, J.H., Lim, D., Lim, S., Choi, J., Kim, E. and Kim, G.B., 2026b, 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.R., Jeon, J.H., Lim, D., Lim, S., Choi, J., Kim, E. and Kim, G.B., 2026c, Industry-Academia Collaborative Research for the Establishment of Integrated Stratigraphy of the Korean South Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 171-181 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., Yoon, W.S., Park, C.S., Lee, J.H., Je, Y.H., Kim, G.B., Paik, S. and Yoon, S.H., 2026d, Reconstruction of depositional system based on seismic facies analysis of the Paleogene sedimentary deposits in the northern Jeju Basin, the East China Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 23-40 (in Korean with English abstract).
- Li, C., Zhou, Z., Ge, H. and Mao, Y., 2009, Rifting process of the Xihu Depression, East China Sea Basin. *Tectonophysics*, 472, 135-479.
- Paik, S., Jeon, J.H., Han, S.R., Woo, A., Lim, D., Yoon, S.H., Kim, G.B., Kim, W., Choi, T., Hong, S.K., Cho, Y., Lee, D.S., Lee, K., Choi, J., Lee, J.H., Yeom, N. and Lim, H.S., 2026, Exploration History and Petroleum Systems of the South Sea of Korea: Recent Advances and Perspectives. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62, 5-22 (in Korean with English abstract).
- Ren, J.Y., Tamaki, K., Li, S. and Junxia, Z., 2002, Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344, 175-205.
- Sibuet, J.-C. and Hsu, S.-K., 1997, Geodynamics of the Taiwan arc-arc collision. *Tectonophysics*, 274, 221-251.
- Son, B.K. and Lee, H.Y., 2018, 3D-petroleum system modeling of the Jeju Basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 587-603 (in Korean with English abstract).
- Sun, S.-C., 1985, The Cenozoic tectonic evolution of offshore Taiwan. *Energy*, 10, 421-432.
- Suo, Y.H., Li, S.Z., Zhao, S.J., Somerville, I.D., Yu, S., Dai, L.M., Xu, L.Q., Cao, X.Z. and Wang, P.C., 2015, Continental margin basins in East Asia: tectonic implications of the Meso-Cenozoic East China Sea pull-apart basins. *Geological Journal*, 50, 139-156.
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.K., 1990, Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *AAPG bulletin*, 74, 1559-1570.
- Wang, B., Doust, H. and Liu, J., 2019, Geology and Petroleum Systems of the East China Sea Basin. *Energies*, 12, 4088.
- Wang, G.M., Coward, M.P., Liu, W.Y.S. and Wang, W., 1995, Fold growth during basin inversion-example from the East China Sea Basin. *Geological Society*, 88, 493-522.
- Wang, Y., Qin, Y., Yang, Li., Liu, S., Elsworth, D. and Zhang, R., 2019, Organic Geochemical and Petrographic Characteristics of the Coal Measure Source Rocks of Pinghu Formation in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin: Implications for Coal Measure Gas Potential. *Acta Geologica Sinica*, 94, 364-375.
- Weilin, Z., Kai, Z., Xiaowei, F., Chunfeng, C., Minqiang, Z. and Shunli, G., 2019, The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view. *Earth-Science Reviews*, 190, 89-111.
- Yan, B., Yuan, H.-Q., Li, N., Zou, W., Sun, P., Li, M., Zhao, Y.-Y. and Zhao, Q., 2024, Differences in hydrocarbon accumulation and controlling factors of slope belt in graben basin: A case study of Pinghu Slope Belt in the Xihu sag of the east China Sea Shelf basin (ESCCB). *Petroleum Science*, 21, 2901-2926.
- Yang, C.-Y. and Lin, H.-C., 1992, Lead-210 and Polonium-210 Across the frontal Region Between the Kuroshio and the East China Sea, Northeast of Taiwan. *TAO*, 3, 379-394.
- Yang, Y., Huang, Z., Pan, Y., Liu, C., Qu, T. and Li, Z., 2024, Hydrocarbon accumulation process and reservoir-forming models of structure A in the central inversion tectonic belt of the Xihu Depression, East China Sea Basin. *Natural Gas Industry B*, 11, 341-356.
- Ye, J., Qing, H., Bend, S.L. and Gu, H., 2007, Petroleum systems in the offshore Xihu Basin on the continental shelf of the East China Sea. *AAPG Bulletin*, 91, 1167-1188.
- Yun, H.S., Yi, S.S., Yi, S.H., Kim, J.H., Byun, H.S., Kim, G.H. and Park, D.B., 1999, Biostratigraphy and Paleoenvironment of the Cheju Sedimentary Basin. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 15, 43-94 (in Korean with English abstract).
- Xiaolan, L., 2007, Discovery course of oil and gas in Xihu Trough, the East China Sea Shelf Basin. *Offshore oil*, 14-17.
- Xu, H., Shen, W., Qin, D., Liu, Y., Zhang, B., Lin, C. and Wang, X., 2024, Age dating of Paleocene Meirenfeng Formation and its significance for the hydrocarbon source rocks in the East China Sea basin. *Marine and Petroleum Geology*, 160, 106663.
- 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.
- Zheng, W., Yin, G., Sun, L., Wei, S., Wei, X. and Niu, B., 2022, Sedimentary systems of the Oligocene Huagang Formation in the central anticline zone of the Xihu Depression. *East China Sea Shelf Basin. Energy Geoscience*, 5, 100150.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the East China Sea. *Chinese Sedimentary Basin*, 165-179.