



## Article

# 인회석 핵분열비적 분석을 통한 제주분지 퇴적물의 지열사

최태진<sup>1,\*</sup>, Paul O'Sullivan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국교원대학교 지구과학교육과

<sup>2</sup>Geosep Services

## Geothermal history of Jeju Basin sediment using apatite fission track analysis

Taejin Choi<sup>1,\*</sup>, Paul O'Sullivan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Cheongju 28173, Republic of Korea

<sup>2</sup>Geosep Services, 83843 Idaho, United States of America

Received: January 17, 2026 / Revised: February 21, 2026 / Accepted: February 23, 2026

\*Corresponding author: +82-43-230-3659 / E-mail: tchoi@knue.ac.kr

**요약:** 동중국해대륙붕분지의 북동부에 해당하는 남해대륙붕 제주분지의 지열사를 규명하기 위하여 분지 중앙부 J3와 분지 가장자리 O 시추공에서 채취한 올리고세-마이오세 시기 시추암편 시료에 대해 인회석 핵분열비적(FT) 연대측정, 비적 길이 분포 측정 및 시간-온도 모델링을 수행하였다. J3 시추공 시료의 중앙 연령은 28.4 Ma와 19.2 Ma, O 시추공의 네 시료는 59.0 ~ 48.0 Ma로 나타났다. 모두 퇴적 시기보다 오래된 연령을 보여 기원지 암석의 냉각 시기가 보존되어 있음을 지시한다. 시간-온도 모델링 결과, J3 시추공은 마이오세 중기-후기(13-7 Ma) 동안 약 30-40°C의 냉각과 약 1.2-1.6 km의 삭박을 경험한 반면, O 시추공에서는 퇴적 이후 뚜렷한 냉각 시기가 나타나지 않았다. 이는 동중국해대륙붕분지의 롱징(Longjing) 구조운동이 제주분지 내에서 공간적으로 불균질하게 작용하였음을 의미하며, 제주분지 중앙부에서는 마이오세 중기부터 구조운동의 영향이 나타난 반면 북부에서는 그 영향이 미미하였다. 이 연구 결과는 제주분지를 비롯한 남해대륙붕 퇴적분지들의 구조운동사가 이들이 포함된 전체 동중국해대륙붕분지와는 상이할 수 있음을 시사하며, 분지별 독립적인 지구조 연구의 필요성을 제시한다.

**주요어:** 핵분열비적 분석, 인회석, 제주분지, 지열사

**ABSTRACT:** Apatite fission track (AFT) analysis, track length distribution measurements, and time-temperature modeling were performed on Oligocene-Miocene cutting samples from wells J3 and O to reconstruct the geothermal history of the Jeju Basin in the South Sea Shelf. The central ages of J3 samples are 28.4 and 19.2 Ma, while O1 samples show ages of 59.0 to 48.0 Ma, which are older than their depositional ages, indicating preservation of the cooling history of source rocks. Time-temperature modeling reveals that J3 experienced cooling of approximately 30-40°C during the middle to late Miocene (13-7 Ma), corresponding to erosion of approximately 1.2-1.6 km thickness, whereas well O shows no distinct cooling event. This spatial variation indicates that the Longjing tectonic movement of the East China Sea Shelf Basin (ECSSB) affected the Jeju Basin heterogeneously, with the central part of the Jeju Basin experiencing tectonic influence from the middle Miocene while the northern part was minimally affected. These results suggest that the tectonic history of the sedimentary basins in the South Sea Shelf, including the Jeju Basin, may differ from the regional ECSSB framework, highlighting the necessity for basin-specific independent tectonic studies.

**Key words:** fission track analysis, apatite, South Sea Shelf, Jeju Basin, geothermal history

## 1. 서론

남해대륙붕에 위치한 제주분지는 신생대 퇴적분지로서 동중국해대륙붕분지(East China Sea Shelf Basin; ECSSB)의 북동부에 해당한다(그림 1). ECSSB에서 인접한 시후분지(Xihu Basin)에서 상업적 규모의 유전이 발견됨에 따라 제주분지 또한 탄화수소 부존 가능성이 높은 탐사 유망 지역으로 평가받아 왔다. 제주분지의 발달에 대해서는 다양한 선행연구들(Yun *et al.*, 1999; Huh *et al.*, 2004; Cheong *et al.*, 2007; Cukur *et al.*, 2011; Lee, G.H. *et al.*, 2012, 2014; Aboaba, 2015; Koh *et al.*, 2016; Son and Lee, 2018; Lee,

C. *et al.*, 2019; Woo *et al.*, 2021 등)이 있음에도 불구하고, 석유시스템에 관한 연구결과는 주로 모델링에 기반한 소수(Cukur *et al.*, 2012; Kim and Son, 2013; Son and Lee, 2018 등)에 그치는 실정이다. 퇴적분지의 석유 시스템을 종합적으로 평가하기 위해서는 탄화수소의 생성, 이동, 집적 및 보존에 이르는 전 과정을 이해해야 하며, 지열사는 이를 밝힐 수 있는 가장 핵심적인 역할을 하는 요소 중 하나이다.

퇴적분지의 지열사를 밝히는 데에 가장 적절한 연구방법으로는 일반적인 방사성 연대측정 방법 보다 폐쇄온도(방사성 붕괴에 의하여 생성된 자원소가 광물 외부로 빠져 나가지 못하게 되는 온도)가 낮은 저온 열연대학(low tem-



Fig. 1. Topographic map of the East China Sea Basin (ECSB) and East China Sea Shelf Basin (ECSSB)(Paik *et al.*, 2026).

perature thermochronology)이 있다. 이 중 대표적인 분석방법으로 핵분열비적 연대측정(fission track dating)을 들 수 있으며, 이는 저어콘이나 인회석과 같이  $^{238}\text{U}$ 을 함유한 광물 내에서  $^{238}\text{U}$ 원자의 핵분열이 발생하였을 때 나타나는 흔적인 핵분열비적(fission track)을 활용한다. 핵분열비적은 온도에 민감하게 반응하여 광물종에 따라 서로 다른 온도에서 길이가 짧아지거나(풀림, annealing) 사라지므로, 핵분열비적의 연령과 길이 분포를 분석하면 퇴적물이 최고 매몰 온도에 도달한 후 폐쇄온도를 거쳐(예: 용기 및 삭박)된 과정을 추적할 수 있다. 특히 인회석은 핵분열비적 연대측정을 통해 퇴적암이 경험한 저온 열이력(약 60~110°C; Gleadow *et al.*, 1986; Donelick *et al.*, 2005)을 복원하는 데 매우 효과적인 광물이며 광물의 화학조성, 온도, 시간에 따른 핵분열비적 길이 변화간의 관계가 실험적으로 알려져 있어(Ketcham, 2005) 측정된 연령과 길이분포를 활용하여 시료의 시간-온도 모델링이 가능하다. 따라서 이 연구에서는 제주분지의 중앙부에 위치한 J3 시추공과 분지 가장자리에 위치한 O 시추공 퇴적물 내에 함유된 인회석의 핵분열비적 분석을 통하여 제주분지 퇴적물이 겪은 지열사를 복원하고, 제주분지의 지구조환경과 석유 부존 잠재성 평가에 기여할 수 있는 지질학적 정보를 제공하고자 한다.

2. 지질학적 배경

ECSSB는 유라시아판의 동쪽 경계부에 위치한 백악기-신생대 열개분지 시스템으로, 서쪽의 체민 융기대(Zhemin Uplift)와 동쪽의 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi Uplift Belt) 사이에 놓여 있다(그림 1). ECSSB는 기반암 융기대들(제주대지, Haijiao 융기대 등)을 경계로 다수의 소분지들로 나뉘며, 크게 서부와 동부 분지군으로 구분된다(Yang, 1992). ECSSB는 일반적으로 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 분지 형성 시기가 점차 젊어지는 경향을 보이는 것으로 알려져 있으며(Zhou *et al.*, 1989), 이들이 배호 확장(back-arc spreading)에 의하여 형성되었다는 가설(Zhou *et al.*, 1989)과 변환단층들 사이에서 인리형(pull-apart opening)으로 형성되었다는 가설(Jolivet *et al.*, 1990)이 존재한다.

ECSSB는 후기 백악기에 고태평양판의 섭입에 의해 분지가 열린 이후 크게 네 차례의 구조운동(Oujiang, Yuquan, Huangang, Longjing)을 겪은 것으로 알려져 있다(Zhou *et al.*, 1989; Yang, 1992; Zhu *et al.*, 2019; 그림 2). 이들 연구에 따르면 오우지앙(Oujiang) 구조운동은 팔레오세 말-에오세 초 동안에 발생한 서부 분지군의 열개 종료 및 수축과 관련되어 있으며, 에오세 말-올리고세 초 동안 발생한 유관(Yuquan) 구조운동은 동부 분지군의 열개 종료 및 융기와 관련된다. 마이오세 전기와 후기에 각각 발달한 후아강

(Huangang)과 롱징(Longjing) 구조운동은 각각 지구조역전 이후 이어진 침강과 역단층, 습곡 등의 변형구조를 동반한 융기와 삭박에 관련된다(Zhang *et al.*, 2016).

ECSSB의 시후분지로부터 북동부로 연장되는 위치한 제주분지는 화강암과 편마암을 기반암으로 하며, 에오세부터 퇴적이 시작된 것으로 알려져 있다(Yun, 2019). 에오세에 열개가 시작된 후 육상퇴적환경에서 퇴적이 이루어졌으며, 올리고세에는 해침에 의하여 해양퇴적환경으로 전이되었다(Koh *et al.*, 2016). 마이오세 전기에 지구조작용에 의하여 다시 육상퇴적환경으로 변화한 뒤 마이오세 후기에는 강한 수축에 의하여 습곡과 역단층이 형성되고 삭박에 의한 광역적인 부정합이 생성되었으며(Lee, 1997), 플라이오세에 다시 현재의 해양퇴적환경이 되었다(KNOC, 1998; Koh *et al.*, 2016).

3. 연구 방법

제주분지에 위치한 J3와 O 시추공의 인회석 핵분열비적 연대측정을 위하여 각 시추공의 시추암편(cutting) 시료(J3 시추공 2 시료; O 시추공 4 시료)를 채취하였다(그림 1). 시료 채취 구간은 사암에 해당하는 입도이며 기존 생층서 대비자료(Yun, 2019)를 기준으로 올리고세와 마이오세 퇴적

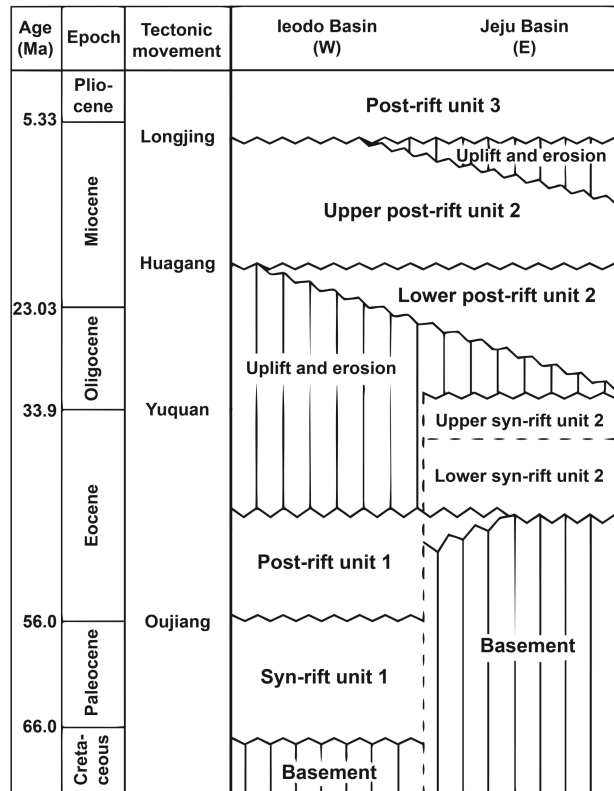


Fig. 2. Stratigraphic correlations of the northern ECSSB including the Jeju Basin (Lee *et al.*, 2019).

**Table 1.** Depth and depositional period of the samples from the well J3 and O in the Jeju Basin. The depositional periods of the samples are from Yun (2019).

Site	Sample code	Depth (m)	Depositional period
J3	J3-2	2500-2730	Late Oligocene
	J3-3	2735-2870	Late Oligocene
O	O1-1	1200-1370	Middle Miocene
	O1-2	1700-1900	Early Miocene
	O1-3	1910-2000	Late Oligocene
	O1-4	2300-2450	Early Oligocene

**Table 2.** Apatite fission track analytical results of the Jeju Basin sediments. ps: track density ( $10^5$  tracks/cm<sup>2</sup>), Ns: number of tracks, n: number of grains,  $P(\chi^2)$ : chi-square value, lm: mean track length ( $\mu$ m), nl: number of estimated track lengths. Dpar: parallel etch rate ( $\mu$ m).

Well name	Sample code	ps ( $10^5$ tracks/cm <sup>2</sup> )	Ns	n	<sup>238</sup> U (ppm)	Pooled age (Ma)	95%-CI (Ma)	95%+CI (Ma)	$P(\chi^2)$	lm	Std. error ( $\mu$ m)	std. dev ( $\mu$ m)	nl	Mean Dpar ( $\mu$ m)
J3	J3-2	11.9	471	40	14.57	32.6	3.09	3.41	0	13.11	0.15	1.54	112	2.85
	J3-3	11.1	235	40	21.21	17.47	2.25	2.59	0.0001	12.52	0.14	1.42	104	2.85
O1	O1-1	14.8	856	40	43.08	47.67	3.65	3.95	0	13.66	0.13	1.29	105	2.14
	O1-2	16.2	1118	40	38.13	56.87	4	4.3	0	13.24	0.17	1.83	112	2.22
	O1-3	15.9	1030	40	35.78	53.38	4.17	4.52	0	13.45	0.14	1.51	112	2.25
	O1-4	20.4	1298	40	44.27	52.38	3.68	3.95	0	11.81	0.15	1.52	105	2.29

시기에 해당하는 심도 구간을 선정하였다(표 1). 채취한 시료에 대해 미국 아이다호주에 위치한 Geosep Services에서 중광물 분리 후 인회석 핵분열비적 연대측정이 수행되었으며, 실험과정을 간략히 설명하면 다음과 같다. 전통적인 중광물 분리 방법에 따라 시료 분쇄 후 수력학적 분리와 자력 분리를 거쳐 중액인 요오드화메틸렌(methylene iodide)을 이용하여 중광물이 추출되었다. 이후 인회석 핵분열비적 연대측정 및 저어콘 U-Pb 연대측정을 위하여 각 중광물들이 실험현미경 하에서 수집되었고, 연마 과정을 거쳐 중광물 입자들의 단면이 노출되었다.

인회석의 핵분열비적 연대측정을 위하여 각 시료에서 40개의 인회석 입자들의 단면에서 에칭을 통하여 핵분열비적이 노출되었고, 노출된 핵분열비적의 수가 측정되었다. 연령 계산을 위하여 필요한 입자별 U 농도는 핵분열비적 측정 후 LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)를 통하여 획득되었다(Donelick *et al.*, 2005). 또한, 시료별로 전체 길이를 알 수 있는 핵분열비적(confined track) 104~170개의 길이분포가 측정되었다. 획득된 시료별 핵분열비적 연대분포는 IsoplotR 소프트웨어(Vermeesch, 2018)를 사용하여 radial plot의 형태로 도시되었다. 이후 HeFTy 프로그램(Ketcham, 2005)을 이용하여 인회석 핵분열비적 연령과 길이분포를 통한 시간-온도 모델링을 수행하였다.

## 4. 연구 결과 및 해석

제주분지 2개 시추공에서 채취한 6개 시료의 인회석 FT 연대 측정 결과는 표 2로 나타내었으며, 시료별 핵분열비적 연대분포의 특징은 다음과 같다.

### 4.1. J3 시추공

J3 시추공의 J3-2, J3-3 시료의 핵분열비적 연령분포는 표 2와 그림 3에 나타냈다. 두 시료는 각각 28.4 Ma와 19.2 Ma의 중앙 연령(central age)을 보인다(그림 3). 두 시료는 모두 올리고세 후기에 퇴적된 시료인데 반하여, 이들의 중앙 연령은 올리고세 후기와 마이오세 전기에 해당하여 J3-3 시료의 연령은 퇴적시기 보다 젊다. 이는 J3-3 시료가 퇴적 이후 매몰 과정에서 인회석 핵분열비적의 풀림(annealing)이 발생할 수 있는 60°C 이상 가열되었다는 점을 의미한다. 그러나 이들의  $P(\chi^2)$  값은 0.05 보다 낮으며, 이는 이 시료들의 핵분열비적 연령들이 하나의 표본으로부터 비롯되지 못했다는 의미이다. 따라서 J3 시추공 시료들에 함유된 인회석의 핵분열비적은 가열에 의하여 완전히 풀림이 일어나지 못하였고, 이 시료들은 부분적 풀림(partial annealing) 구간에 해당하는 온도 구간인 60~110°C 사이에 해당하는 온도까지만 가열되었다고 해석된다.

평균 비적 길이는 J3-2 시료가 13.11  $\mu$ m, J3-3 시료가 12.52  $\mu$ m로 나타났다. J3-2의 비적 길이가 상대적으로 긴 것은

부분 풀림 구간 이하로 냉각된 지 더 오랜 시간이 지났다는 점을 시사하며, 이는 해당 시료의 더 오래된 연령(28.4 Ma) 과도 부합한다. 반면 J3-3 시료는 더 짧은 비적 길이와 더 젊은 연령(19.2 Ma)를 보여, J3-3 시료가 J3-2 시료보다 더 깊은 심도에 위치한 J3-3 시료가 더 나중에 부분 풀림 구간 이하로 냉각되었다고 여겨진다.

4.2.0 시추공

O 시추공 시료(O1-1 ~ O1-4)의 연령 분포는 표 2와 그림 3에 도시되어 있다. 이들의 중앙 연령은 O1-1이 48.0 Ma, O1-2가 59.0 Ma, O1-3이 52.6 Ma, O1-4가 54.0 Ma로, 팔레오세에서 에오세에 해당하는 연대를 보인다. 이는 퇴적 시기(마이오세 - 올리고세)보다 현저히 오래된 연대이며 개별 인회석 입자들의 연령 또한 대부분 시료의 퇴적시기 보다 젊지 않아서 J3 시료 보다 전반적으로 매몰 이후 가열된 정도가 덜하였다고 볼 수 있다. 이는 모든 시료의  $P(\chi^2)$  값이 0.05 미만으로 나타난다는 점으로도 뒷받침된다. 따라서, 이들 핵분열비적 연령은 매몰 이후의 지열사가 기원지에서 퇴적물을 공급한 모암의 지열사를 충분히 덧씌우지 못한 것으로 여겨진다.

평균 비적 길이는 O1-1이 13.66  $\mu\text{m}$ , O1-2가 13.24  $\mu\text{m}$ ,

O1-3이 13.45  $\mu\text{m}$ 로 비교적 긴 편이나, O1-4는 11.81  $\mu\text{m}$ 로 상대적으로 짧다. O1-4의 짧은 비적 길이는 가장 깊은 심도에 위치하여 매몰 이후 부분 풀림 구간 내에서 더 오랜 기간 체류하였음을 지시한다.

5. 토 의

남해대륙붕 퇴적물 시료의 인회석 FT 분석결과를 기반으로 HeFTy 프로그램(Ketcham, 2005)을 통하여 각 시료의 매몰 이후 시간-온도 모델링을 수행하였다. 몬테카를로 기법으로 10,000번 반복하는 조건을 적용하였으며, Yun (2019)에서 제안된 시료별 퇴적시기와 시추공보고서에 기반한 현재 온도를 사용하였다. Ro값은 입력값에 넣었을 때 모델링이 잘 구현되지 않았기 때문에 제외하였으며, 이는 대부분의 시료가 부분적 풀림 구간까지 가열되어 기원지의 지열사가 보존되어 있기 때문에 Ro 값과 일치되는 모델링 결과가 나타나지 않는 것으로 생각된다. 이를 반영하여 퇴적 이후의 지열사만으로 개연성 있는 모델링 결과를 얻지 못한 경우에는 기원지의 모암이 백악기 후기부터 냉각되었다는 가정을 더하여 모델링을 시도하였다(J3-2와 모든 O1 시료). 이러한 가정은 동아시아 일대가 백악기 후기에 광역적

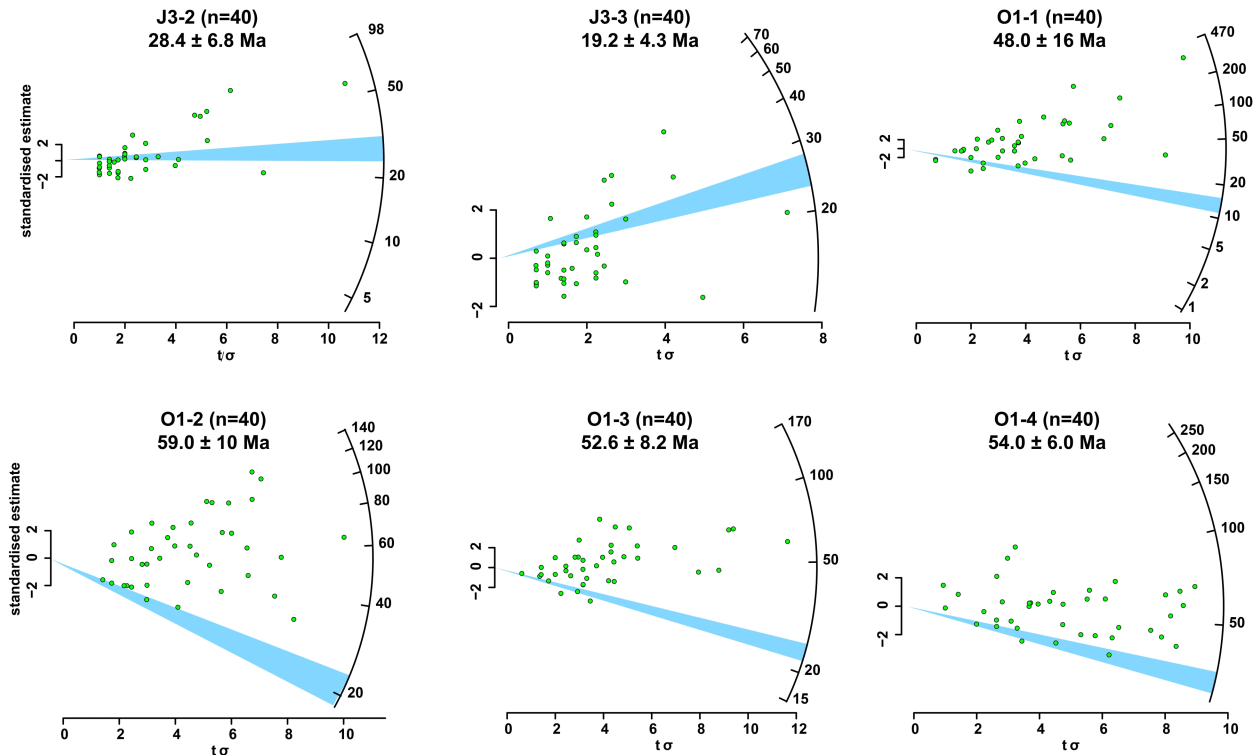


Fig. 3. Radial plot (Vermeesch, 2018) showing the fission-track age distribution of the Jeju Basin sediment samples. The horizontal axis represents precision, the vertical axis on the left represents error, and the arc on the right represents fission track age. The age of an analysis point is the intersection point on the right-hand arc of the line connecting the analysis point to the origin of the left vertical axis. Light blue shades indicate the depositional ages of the samples by Yun (2019).

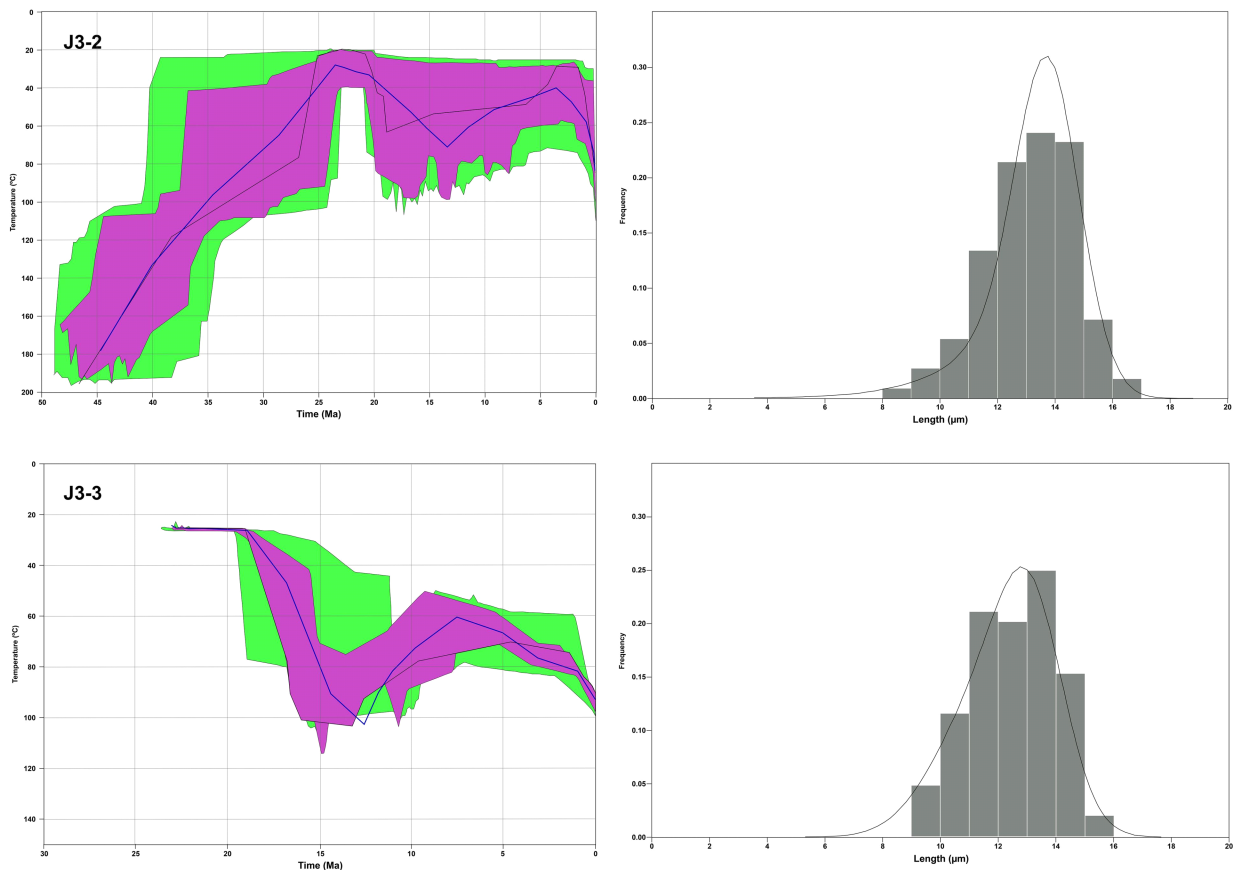
인 용기와 삭박을 겪었다는 기존 연구결과(Choi and Lee, 2011)를 적용한 것이며, 성공적인 모델링 결과를 얻었으나 추후 퇴적물 기원지 연구와 같은 추가 연구를 통하여 이 가정의 개연성을 확인할 필요가 있다.

### 5.1. J3 시추공

J3 시료의 시간-온도 모델링 결과는 그림 4에 나타났다. 이 시료들은 인회석 FT 연령의 부분적 풀림 구간까지 가열된 것으로 추정되었고, 기원지의 지열사가 상당 부분 보존되었다고 여겨진다. J3-2 시료(심도 2500-2730 m)는 퇴적 시기부터의 지열사만을 고려하였을 때는 적절한 모델링 결과가 구현되지 않았으나, 후기 백악기에 기원지 암석이 가열되었던 온도가 인회석 FT의 완전 풀림 구간( $\sim 110^{\circ}\text{C}$  이상) 이상에 도달했다는 전제하에서는 성공적인 모델링 결과를 얻을 수 있었다. 반면, 그보다 깊은 심도(2735-2870 m)인 J3-3 시료는 기원지 암석의 지열사가 보존되었다는 가정 없이도 개연성 있는 모델링 결과를 얻을 수 있었으며, 매몰 이후의 가열 정도가 더 크기 때문에 기원지의 지열사가

충분히 지워진 것으로 해석할 수 있다.

모델링 결과에 따르면 두 시료 모두 퇴적 이후 인회석 FT의 완전 풀림 구간을 넘어서 가열되지는 않았으며, 두 시료 모두 마이오세 중기에 해당하는 약 13 Ma부터 냉각되는 경향을 나타낸다. 냉각이 멈추는 시기는 J3-2 시료는 플라이오세 전기인 약 4 Ma, J3-3 시료는 마이오세 후기인 약 7 Ma로 나타나서 서로 다른 시기를 나타낸다. 이 중, J3-3 시료가 더 깊은 심도에 위치하여 더 높은 온도까지 가열되었고 기원지의 지열사가 더 효과적으로 지워졌으므로, 매몰 이후의 지열사를 더 잘 기록하고 있다고 판단된다. 따라서 J3 지역 퇴적물의 냉각이 종료된 시기는 마이오세 후기(약 7 Ma)일 가능성이 더 높다. 냉각 시기 동안 하강한 온도는 약  $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ 로 보이며, 냉각이 삭박에 의하여 일어났다고 가정하면 당시 지온구배가  $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 일 때 약 1.2-1.6 km 두께의 삭박으로 계산된다. 이는 제주분지 퇴적물의 지온구배가 평균적인 지온구배에 해당한다고 가정한 것이며, 향후 추가 연구를 통하여 제주분지 퇴적물의 퇴적 이후 지온구배를 알게 된다면 더 정확한 값을 얻을 수 있다.



**Fig. 4.** (Left) Time-Temperature modeling results (Ketcham, 2005) using apatite FT data from the J3 well samples. The thick solid line represents the mean thermal history, the thin solid line represents the best fit, the purple field represents the good fit region, and the green field represents the acceptable fit region. (Right) Fission-track length distribution histogram and the modeled curve used in the modeling process.

## 5.2. O 시추공

O 시추공의 시간-온도 모델링 결과는 그림 5와 같다. 앞서 기술하였던 바와 같이 이 시료들은 J3 시료 보다 전반적으로 매몰 이후 가열 정도가 덜한 것으로 여겨지며, 모델링을 위하여 모든 시료가 후기 백악기에 기원지 암석이 가열되었던 온도가 인회석 FT의 완전 풀림 구간( $\sim 110^{\circ}\text{C}$  이상) 이상이었던 전제가 필요하였다.

O1-1 시료는 적합도가 높은 부분(good fit; 자주색)에 해당하는 시간-온도 영역이 넓게 나타나나, 모암의 냉각 이후 퇴적물이 인회석 FT의 부분 풀림 구간으로 가열되지 않았다는 점을 나타낸다. 나머지 O1-2~4 시료들의 시간-온도 그래프에서 나타나는 공통적인 특징은 퇴적 이후 뚜렷한 냉각시기 없이 침강에 의한 가열만을 겪은 것으로 나타난다는 점이다. 다른 시료와 달리 O1-2 시료에서는 퇴적 이전 시기에 두 차례의 빠른 냉각이 나타나나, 이는 기원지 암석의 지열사에 해당하며 모델링을 위한 가정(후기 백악기 이후 냉각)에 크게 의존하므로, 제주분지의 매몰 이후 지열사를 논의하는 이 연구의 범위를 벗어난다.

## 5.3. 제주분지 퇴적물의 지열사 비교

인회석 FT 연령, 길이 분포, 이들 결과를 바탕으로 한 시간-온도 모델링 결과 모두 공통적으로 제주분지 퇴적물의 지열사는 균일하지 않았으며, 시간-공간적인 차이를 보일 것으로 예상된다. 제주분지의 석유시스템 모델링을 수행한 Son and Lee (2018)에 따르면, 제주분지 남서부와 북동부 모두 마이오세 후기인 7-5 Ma 동안 삭박을 겪었으며, 이는 ECSSB에서 정의된 롱징운동의 시기에 해당한다(Liu *et al.*, 2020; 그림 2).

이 연구의 인회석 FT 분석 결과는 기존 연구와 부분적으로 일치하면서도 중요한 차이를 보인다. J3 시추공에서는 마이오세 중기-후기(13-7 Ma) 동안 약  $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ 의 냉각이 확인되며, 냉각이 종료되는 시기(약 7 Ma)는 Son and Lee (2018)에서 제시한 삭박 시작 시기와 일치한다. 그러나 이 연구에서는 냉각의 시작이 약 13 Ma로 나타나 기존 연구보다 약 6 Ma 이른 시기부터 융기와 삭박이 시작되었음을 지시한다. 냉각 종료 이후 J3는 다시 침강과 매몰에 의한 가열 단계로 전환된 것으로 해석된다. 반면, O 시추공에서는 뚜렷한 냉각 시기가 나타나지 않아 J3와 대조를 이룬다. 이러한 공간적 차이는 제주분지 중앙부에 위치한 J3에서 마이오세 중기-후기에 융기에 의한 퇴적물 삭박이 일어나는 동안, 보다 북부에 위치한 O 시추공에서는 삭박이 일어나지 않았거나 인회석 핵분열비적으로 기록되지 않을 정도로 미미하였음을 의미한다.

한편, J3 시료의 FT 시간-온도 모델링 결과에서 나타나는 삭박 시기인 마이오세 중기-후기 동안은 ECSSB에서 정의

된 롱징운동의 시작 시기에 해당한다. 롱징운동은 중기 마이오세 후기(약 15 Ma)에 일본열도 남서부와 류큐열도 북부, 이즈-보닌 화산호가 서로 충돌하며 발생한 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 1995; Kong *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2016). J3 시료에서 확인된 냉각의 시작 시기(약 13 Ma)는 이 구조운동의 초기 단계와 시간적으로 근접하며, 제주분지가 롱징운동의 영향을 마이오세 중기부터 받기 시작했을 가능성을 제시한다. 이는 롱징운동의 영향이 ECSSB 전역에 동시적으로 나타나지 않고, 지역에 따라 시작 시기와 지속 기간에 차이가 있었음을 시사한다.

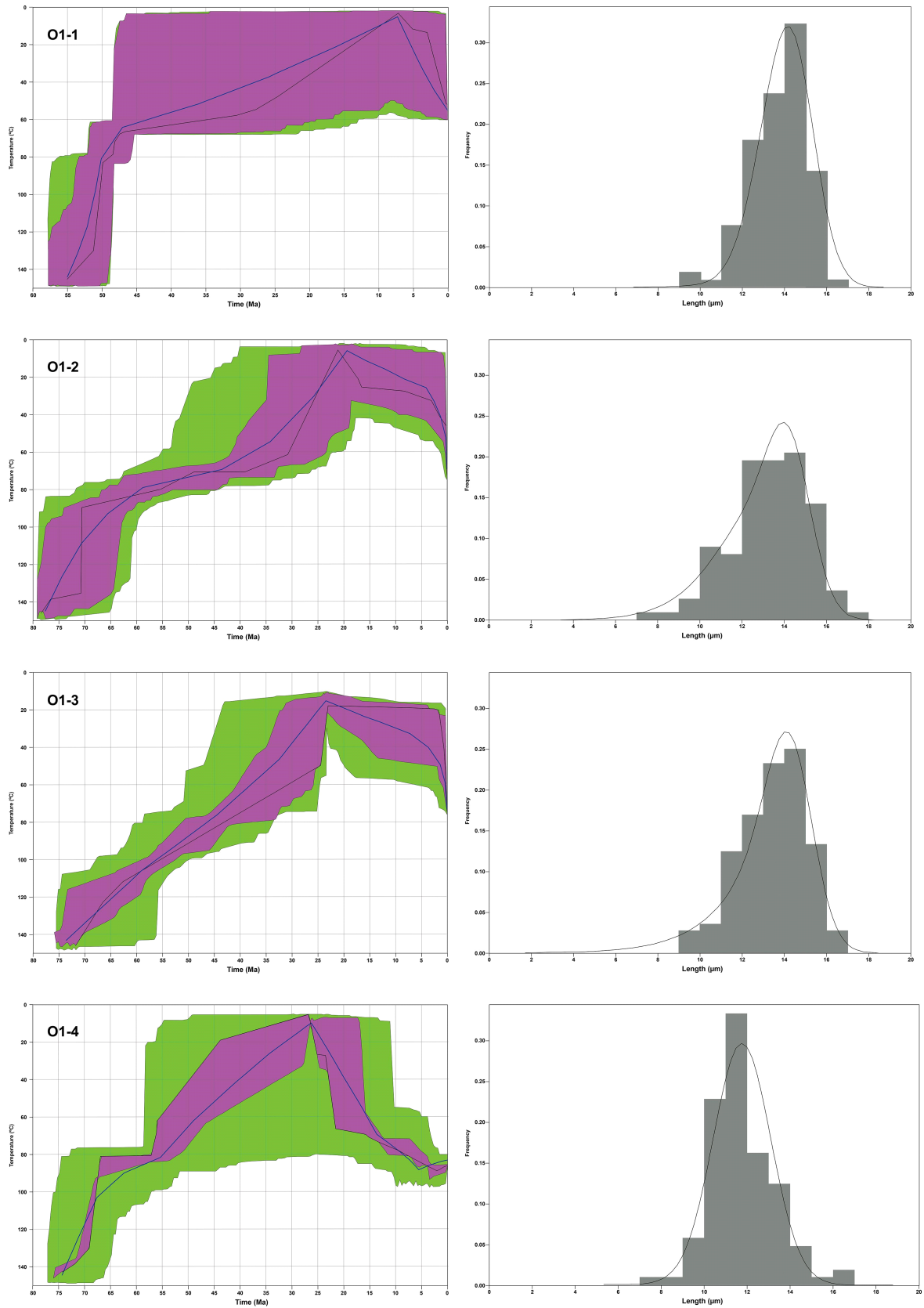
제주분지 중앙부에 위치한 J3 시추공과 가장자리에 위치한 O 시추공 간의 지열사 차이는 제주분지 내에서도 롱징운동의 영향이 공간적으로 불균질했음을 보여준다. 이와 같이 ECSSB의 광역적 구조운동이 제주분지 내에서도 위치에 따라 차별적으로 작용한다면, 제주분지보다 더 북동부에 위치한 한산분지와 거문분지 또한 제주분지와도 상이한 지열사 및 구조운동을 가질 가능성이 높다. 따라서 남해대륙붕 분지들의 구조운동을 ECSSB와 단순 대비하기 보다는, 각 분지별로 독립적인 지열사 및 구조운동 연구를 수행할 필요가 있다. 이는 석유시스템 평가나 CO<sub>2</sub> 저장소 개발과 같은 자원탐사 측면에서도 분지별 맞춤형 접근 전략이 요구됨을 의미한다.

## 6. 결론

남해대륙붕에 위치한 신생대 제주분지의 지열사를 규명하기 위하여 분지 중앙부 J3와 분지 가장자리 O 시추공에서 채취한 올리고세-마이오세 시기 시추암편 시료에 대하여 인회석 핵분열비적(FT) 연대측정과 비적 길이 분포 측정, 그리고 이를 기반으로 한 시간-온도 모델링이 수행되었다.

분석 결과 두 시추공의 핵분열비적 중앙 연령은 J3 시추공의 경우 28.4와 19.2 Ma, O 시추공의 경우 59.0~48.0 Ma의 범위로 나타나며, 인회석 입자의 핵분열비적 연령이 전반적으로 퇴적 시기보다 오래된 연령을 보존하고 있어 기원지 암석의 냉각 시기가 기록되어 있음을 지시한다. J3 시추공 시료들은 부분적 풀림 구간까지 가열되었으나, O 시추공 시료들은 상대적으로 가열 정도가 낮아 기원지의 지열사가 더 잘 보존된 것으로 여겨진다.

시간-온도 모델링 결과, 제주분지 퇴적물은 공간적으로 서로 다른 지열사를 가지는 것이 확인되었다. J3 시추공은 마이오세 중기-후기(13-7 Ma) 동안 약  $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ 의 냉각을 경험하였으며, 이는 약 1.2-1.6 km 두께의 삭박에 해당한다. 냉각이 종료된 시기는 마이오세 후기(약 7 Ma)로 추정된다. 반면, O 시추공에서는 퇴적 이후 뚜렷한 냉각 시기가 나타나지 않으며, 침강에 의한 가열만을 겪은 것으로 해석된다.



**Fig. 5.** (Left) Time-Temperature modeling results using apatite FT data from the O well samples. (Right) Fission-track length distribution histogram and the modeled curve used in the modeling process.

이러한 공간적 차이는 동중국해대륙붕분지(ECSSB)에서 정의된 룡징운동이 제주분지 내에서 불균질하게 작용하였음을 의미한다. J3 시추공에서 확인된 삭박 시기는 중기 마이오세 후기(약 15 Ma)에 일본열도 남서부와 류큐열도 북부, 이즈-보닌 화산호의 충돌로 시작된 룡징운동의 초기 시기와 일치한다. 반면, 보다 북부에 위치한 O 시추공에서는 이러한 구조운동의 영향이 미미했거나 기록되지 않았다. 이는 제주분지가 ECSSB의 북동부 말단에 위치하여 분지 전체에 영향을 미친 광역적 구조운동이 제주분지 내에서 시간적, 공간적으로 차별적인 영향을 미쳤음을 시사하며 남해대륙붕의 분지별로 별도의 탐사 전략이 요구됨을 시사한다.

## 감사의 글

이 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상부 유전개발사업출자의 지원을 받아 수행되었습니다. 본문을 세심하게 검토해주시고, 유용한 조언을 주신 두 심사위원과 편집위원께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Aboaba, O.A., 2015, Prestack and Poststack Attribute Analysis of the Jeju Basin, Korea. M.S. Thesis, University of Oklahoma, Oklahoma, USA, 79 p.
- Cheong, T.-J., Lee, Y.-J., Kim, J.-H., Oh, J.-H., Park, M. and Song, H.Y., 2007, Stable isotope and biomarker characteristics of organic matter from the drilling core sediments, Jeju Basin. *Economic and Environmental Geology*, 40, 623-633.
- Choi, T. and Lee, Y.I., 2011, Thermal histories of Cretaceous basins in Korea: Implications for response of the East Asian continental margin to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Island Arc*, 20, 371-385.
- 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, 154-163.
- 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.
- Donelick, R., O'Sullivan, P. and Ketcham, R., 2005, Apatite fission-track analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58, 49-94.
- Gleadow, A.J., Duddy, I.R., Green, P.F. and Hegarty, K.A., 1986, Fission track lengths in the apatite annealing zone and the interpretation of mixed ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 78, 245-254.
- Huh, S., Min, D.-J., Hong, J.-K. and Lee, K.-J., 2004, Preliminary interpretation of depositional environment and geological structure of the Jeju Basin in the South Sea of Korea. *Journal of the Geophysical Society of Korea*, 7, 225-232.
- Jolivet, L., Davy, P. and Cobbold, P., 1990, Right-lateral shear along the northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 9, 1409-1419.
- Ketcham, R., 2005, Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58, 273-314.
- 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).
- Koh, C.-S., Yoon, S.-H., Lee, D.-K. and Yoo, H.-S., 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).
- 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.
- Korea National Oil Corporation (KNOC), 1998, Biostratigraphy of continental shelf of Korea (Cheju Basin). Research Report (KOR009000002), 135 p (in Korean).
- 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., Lee, B., Kim, H.-J., Lee, K. and Park, M., 2014, The geological CO<sub>2</sub> storage capacity of the Jeju Basin, offshore southern Korea, estimated using the storage efficiency. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 23, 22-29.
- Lee, G.H., Lee, B., Yi, B.-Y., Lee, K., Park, M., Kim, H.-J. and Yoo, H.-S., 2012, Estimation of the CO<sub>2</sub> storage capacity of the structural traps in the southern Jeju Basin, offshore southern Korea, northern East China Sea. *Geosciences Journal*, 16, 313-326.
- Lee, Y.J., 1997, Petroleum Geochemistry of Organic Matter from the Cheju Basin, northeastern part of the East China Sea. Ph.D. thesis, Chungnam National University, Daejeon, 328 p.
- Liu, J.S., Xu, H.Z., Jiang, Y.M., Wang, J. and He, X.J., 2020, Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94, 675-691.
- 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).
- Son, B.-K. and Lee, H.-Y., 2018, 3-D 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).
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9, 1479-1493.
- 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, London, 88, 493-522.
- Woo, J., Rhee, C.W., Kim, J.S. and Lim, B., 2021, Improvement of fault interpretation with seismic attribute analysis of Jeju Basin, offshore southern Korea, East China Sea. *Episodes*, 45, 133-146.
- Yang, Q.L., 1992, Geotectonic framework of the East China Sea. *AAPG Memoir*, 53, 17-26.
- Yun, H., 2019, Biostratigraphy of the JDZ V-3 and Okdom-1 wells with comparison to neighboring areas. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 46 p.
- 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 exploration wells, Geobuk-1 and Okdom-1. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 15, 43-94 (in Korean with English abstract).
- Zhang, J., Li, S. and Suo, Y., 2016, Formation, tectonic evolution and dynamics of the East China Sea Basin. *Geological Journal*, 51, 162-175.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the East China Sea. In: Zhu, X. (ed.), *Chinese Sedimentary Basins*. Elsevier, Amsterdam, p. 165-179.
- Zhu, W., Zhong, K., Fu, X., Chen, C., Zhang, M. and Gao, S., 2019, The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view. *Earth-Science Reviews*, 190, 89-111.