



Article

제주분지의 유기물 열적 성숙도 및 고지온 복원

김다희¹, 홍성경^{1,*}, 최지영², 이현석³

¹강원대학교 지질학과

²한국지질자원연구원 자원탐사개발연구본부 석유·미래에너지연구센터

³한국지질자원연구원 기획정책본부

Thermal maturity and paleogeotemperature reconstruction of organic matter in the Jeju Basin, Korea

Dahee Kim¹, Sung Kyung Hong^{1,*}, Jiyoung Choi², Hyun Suk Lee³

¹Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

²Petroleum and Future Energy Research Center, Resource Exploration and Development Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

³Planning and Policy Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: January 1, 2026 / Revised: February 5, 2026 / Accepted: February 6, 2026

*Corresponding author: +82-33-250-8556 / E-mail: skhong22@kangwon.ac.kr

요약: 본 연구에서는 제주분지에 위치하는 J5 시추공의 이암 및 석탄 파편 시료를 대상으로 유기물의 열적 성숙도(T_{max}, 비트리나이트 반사도(Ro))를 측정하였다. J5 시추공의 T_{max}와 Ro는 430-535°C와 0.5-1.8%의 범위를 보인다. 유기물의 열적 성숙도를 고려하면 약 2,500 m 심도에서 원유 생성 단계에 진입하며, 약 3,400 m 지점부터 가스 생성 구간에 도달하는 것으로 평가되었다. J5 시추공의 T_{max}와 Ro를 기반으로 제주분지에 최적화된 상관관계식($Ro = 0.0123 \times T_{max} - 4.5769$)을 도출하였다. 이를 이용하여 복원한 시기별 고지온은 초기 올리고세에서 주로 170°C 이상으로 평가되며, 후기 올리고세에서는 대부분 120-170°C 범위에 속하는 한편, 마이오세에서는 지속적으로 감소하여 108-120°C 범위를 보인다. 고지온을 바탕으로 평가된 지온구배는 올리고세에서 마이오세로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 이는 열개분지 발달 과정과 밀접한 연관성을 시사한다. 또한, 선행 연구들에서 제시된 T_{max}와 Ro의 상관관계식들의 차이를 과성숙한 시료의 부족에 기인한 것으로 판단하여, 본 연구에서는 과성숙 시료를 포함하는 제주분지와 이전 연구 자료를 종합하여 국제적으로 적용 가능한 개선된 T_{max}와 Ro의 상관관계식($Ro = 0.01 \times T_{max} - 3.5854$)을 제시하였다.

주요어: 제주분지, 유기물, 비트리나이트, 열적 성숙도, 고지온

ABSTRACT: This study investigated the thermal maturity of organic matter (T_{max} and vitrinite reflectance, Ro) in mudstone and coal fragments from the J5 well in the Jeju Basin. T_{max} and Ro ranged from 430 to 535°C and 0.5-1.8%, respectively. Considering the thermal maturity of organic matter, the oil window is estimated to begin at a depth of approximately 2,500 m, while the gas window is reached at around 3,400 m. Based on T_{max} and Ro measurements, a Jeju Basin optimized correlation equation ($Ro = 0.0123 \times T_{max} - 4.5769$) was established. Using this equation, the reconstructed paleogeotemperatures indicate values predominantly above 170°C in the early Oligocene interval, mostly within 120-170°C in the late Oligocene interval, and gradually decreasing to 108-120°C in the Miocene interval. Geothermal gradients derived from these paleogeotemperatures show a decreasing trend from the Oligocene to the Miocene, which is consistent with the progressive evolution of the rift basin. Discrepancies among previously published T_{max}-Ro correlations were attributed to the lack of overmature samples. By incorporating overmature samples from the Jeju Basin with previous data, this study proposes an improved, internationally applicable T_{max}-Ro correlation ($Ro = 0.01 \times T_{max} - 3.5854$).

Key words: Jeju Basin, organic matter, vitrinite, thermal maturity, paleogeotemperature

1. 서론

유기물의 열적 성숙도(thermal maturity)는 유기물이 가열에 의하여 변질된 정도를 의미한다. 유기물은 가열되어 원유 및 천연가스과 같은 탄화수소로 변형되기 때문에(Peters & Cassa, 1994), 유기물의 열적 성숙도는 탄화수소의 생성 시점 및 심도, 생성 구간(oil window, gas window) 등을 평가하는 데에 있어 매우 중요한 요소이다(Curtis *et al.*, 2011). 또한 열적 성숙도는 유기물이 경험한 최대 온도로 변환될 수 있으므로, 고지온 복원이 가능하며 지열사와 매몰사 분석의 기초 자료로 활용되고 있다(Bostick and Foster, 1975; Scheidt and Littke, 1989; Grobe *et al.*, 2015).

유기물의 열적 성숙도를 평가하기 위하여 다양한 방법들이 개발되었으나, 주로 열분석을 통해 도출된 Tmax와 비트리나이트 반사도(Ro)가 주요 지표로 사용된다. 열분석 기법은 암석 분말 시료를 일정한 온도 상승 속도로 가열하며 검출되는 탄화수소를 측정하는 분석법이다(Jarvie *et al.*, 2007). 이때 탄화수소 생성 가능성이 있는 케로젠(kerogen)의 양(S2)이 최대에 도달하는 온도를 Tmax라고 하는데, 유기물이 열을 받을수록 Tmax가 일정하게 증가하기 때문에 이를 이용하여 유기물의 성숙도를 평가할 수 있다(Espitalié *et al.*, 1985; Peters and Cassa, 1994). Ro는 석탄의 목질 부분에서 기원된 마세랄(maceral) 중 하나인 비트리나이트(vitrinite)의 반사도를 측정하여 유기물의 열적 성숙도를 평가하는 방법으로, 열적 성숙도가 증가할수록 반사도가 일정하게 증가하는 특성을 보인다(Bostic, 1979). 특히, Ro는 유기물이 경험한 최대 온도로 변환될 수 있으므로, 고지온 복원을 위한 연구에 사용되어 왔다(Waliczek *et al.*, 2021).

그러나 두 지표 모두 열적 성숙도 평가에 한계를 가지고 있다. Tmax는 유기물의 조성에 영향을 받으며(Peters *et al.*, 2005), 시료가 높은 온도에 변질 받거나, 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)의 함량이 매우 낮은 경우에 오류가 발생할 수 있다(Peters, 1986; Evenick, 2021). Ro 분석법은 Tmax에 비해서 정확도는 높지만 비트리나이트를 포함한 구간에서만 사용할 수 있다는 제한이 있다(Kenrick and Crane, 1997; Hong *et al.*, 2018). 비트리나이트는 육상 식물의 유입이 한정된 해양 기원의 시료나 식물이 출현하기 전인 테분기 이전의 시료에서는 적용에 제한이 있다(Kenrick and Crane, 1997; Cheshire *et al.*, 2017; Hong *et al.*, 2018).

이와 같은 한계를 보완하고 고해상도 열적 성숙도 자료를 통해 고지온을 복원하기 위해 두 지표를 복합적으로 사용해야 한다. Tmax와 Ro는 상관관계를 보이므로 이들 상관관계식을 적용하면 고해상도의 Ro 자료를 확보할 수 있다. 따라서 Tmax-Ro 상관관계식을 제시하는 다양한 연구들이 수행되었다(Jarvie *et al.*, 2001; Lewan and Kotarba,

2014; Hackley and Cardott, 2016; Waliczek *et al.*, 2021). 그러나 이전 연구에서 제시된 Tmax-Ro 상관관계식은 유기물의 특성 및 퇴적 환경의 차이로 인해 지역마다 차이를 보인다. 따라서 신뢰성 높은 Ro 자료 확보를 위해 연구 지역에 적합한 Tmax-Ro 상관관계식을 도출하는 것이 바람직하다. Tmax-Ro 상관관계식 도출이 어려운 경우를 위해 Lewan and Kotarba (2014)는 다양한 지역의 자료를 종합하여 Tmax-Ro 상관관계식을 제시하였으나, 일부 구간의 열적 성숙도에 해당하는 자료가 부족한 한계를 가진다. 향후 추가 자료를 확보하여 국제적으로 통용될 수 있는 향상된 Tmax-Ro 상관관계식 도출이 필요한 상황이다.

제주분지는 남해 대륙붕에 위치한 퇴적분지로, 석유 및 가스의 탐사와 개발을 위한 연구가 1970년대 초반부터 진행되어 왔다(Yoon *et al.*, 2009). 제주분지에서 시추공, 물리검층, 물리탐사 등의 각종 자료들을 기반으로 분지의 층서, 지구조 진화사 및 석유시스템 등 연구가 수행되어 왔다(Kwon *et al.*, 1995; Lee, 1997; Kim and Son, 2013; Son and Lee, 2018; Lee *et al.*, 2019). 유기물의 열적 성숙도 평가 연구도 일부 수행되었으나, 정량적인 고지온 복원보다는 전반적인 근원암 잠재성 평가에 중점을 두고 있다(Lee, 1997; Lee *et al.*, 1998).

제주분지에서는 석유 및 천연가스 탐사를 위해 총 8개의 시추공이 시추되었다. 제주분지 동남쪽에 위치하는 J5 시추공은 최종 시추 심도가 깊고, 시추 심도 전반에 걸쳐 유기물을 포함하는 이암 및 석탄 파편을 다량 함유하고 있어, J5 시추공은 열적 성숙도 평가를 통해 고해상도 고지온 복원에 적합하다. 따라서 본 연구에서는 J5 시추공에서 유기물 함량이 높은 이암과 석탄 파편을 추출하여 시추공 전반에 걸친 Tmax와 Ro를 측정하였다. 이를 바탕으로 제주분지의 석유 시스템 평가에 필수적인 탄화수소 형성 가능 심도를 제시하였다. 또한 지열사 및 매몰사 분석의 기초 자료 확보를 위해 제주분지에 최적화된 Tmax-Ro 상관관계식을 도출하여 고해상도 Ro 자료를 확보하고 고지온을 복원하였다. 이를 통해 시기별 고지온의 변동을 분석하여 지온구배를 파악하였으며, 시기별 지온구배 변동 원인을 규명하였다. 나아가, 넓은 범위의 열적 성숙도 변동을 보이는 제주분지의 Tmax와 Ro 자료를 이전 연구 자료와 종합하여 국제적으로 통용될 수 있는 Tmax-Ro 상관관계식을 향상시켰다.

2. 지질개요

제주분지는 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin; ECSSB) 북동부에 위치하는 소분지이다. 제주분지는 남서-북동 방향으로 발달한 열개 분지로서, 북서쪽으로

는 제주대지(Jeju Plateau)와 남동쪽으로는 타이완-신지 습곡대(Taiwan-Sinzi Belt)와 접하고 있다(Lee *et al.*, 2006, 2019). 동중국해 대륙붕 분지는 후기 백악기에서 팔레오세에 이르는 시기에 유라시아판, 태평양판, 필리핀판 간의 상호 구조운동에 의해 발생한 열개작용에 의해 형성되었다(Meng and Chou, 1976; Li, 1984; Jolivet *et al.*, 1989; Lee and Son, 2016; Son and Lee, 2018). 동중국해 대륙붕 분지의 지구조 발달은 3개의 단계로 구분된다. 후기 백악기에서 에오세에 이르는 시기에는 열개가 본격적으로 발생하였고, 올리고세에서 마이오세까지의 시기에는 전반적으로 침강이 우세하나, 융기와 침강이 반복적으로 일어나는 것으로 알려져 있다. 플라이오세부터 현재까지는 광역적인 침강이 일어났다(Yun *et al.*, 1999).

제주분지는 신생대에 형성된 육성 및 해성 퇴적층으로 구성되어 있다. 제주분지는 에오세 동안 육성 환경이 우세하였으나, 올리고세에는 해침에 의해 해양 환경으로 전이된 지역도 일부 나타난다(Yun *et al.*, 1999; Koh *et al.*, 2016). 초기 마이오세에는 융기 작용으로 인해 육성 환경이 발달

하였으며(Koh *et al.*, 2016), 후기 마이오세에는 구조적 역전으로 인해 마이오세 퇴적물의 상당 부분이 삭박됨에 따라 분지에 광역적인 부정합면이 형성되었다. 이후 플라이오세부터는 해침으로 인하여 분지 전반에 걸쳐 해성 퇴적층이 퇴적되었다(Lee, 1997; Lee *et al.*, 2006; Kim and Son, 2013; Lee and Son, 2016).

연구 대상인 J5 시추공은 제주분지 4소구에 위치하며(그림 1), 심도에 따라 1,000 m 이하는 플라이오-플라이스토세, 1,000-2,600 m는 마이오세, 2,600-3,800 m는 후기 올리고세, 3,800-4,190 m는 초기 올리고세로 구분된다(Yun, 2019).

3. 연구방법

3.1. 암석 파편 분포 파악 및 이암 및 석탄 시료 선별

본 연구에 사용된 J5 시추공의 총 심도는 431-4,190 m이다. 그러나 시추공의 상부 구간인 431-1,495 m는 시료 상태가 불량하여, 본 연구에서는 1,495-4,190 m 구간을 대상

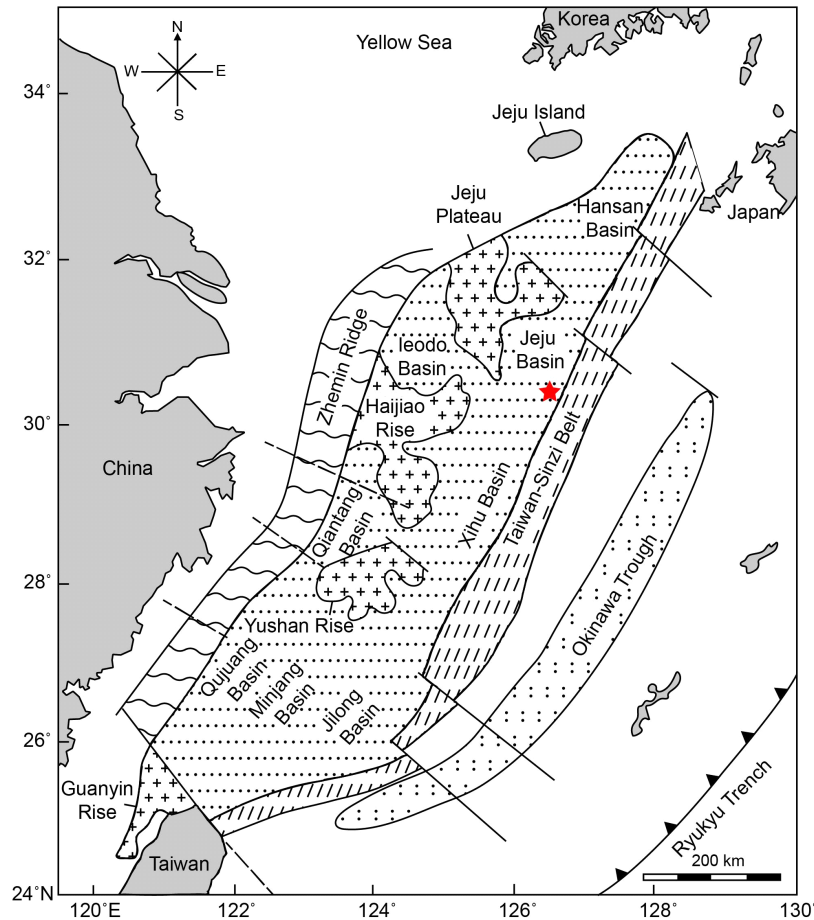


Fig. 1. Map illustrating the tectonic provinces of the East China Sea Basin (ECSB) and location of the J5 well (red star) (modified from Koh *et al.*, 2016).

으로 분석을 진행하였다. 암석 파편 분포는 시추 과정에서 회수된 컷팅 시료를 대상으로 육안 관찰을 통해 파악하였다. 시추공에서 총 687개 구간의 암편 시료를 심도별로 구분하여 관찰하였다. 암편의 입도 및 조성을 분석하였으며, 이암 파편 함량에 따라 3개의 그룹(Dominant, Moderate, Rare)으로 분류하였다. 이암 파편 함량이 우세한 경우 'Dominant', 이암과 사암이 혼합된 경우 'Moderate', 사암 파편이 우세한 경우 'Rare'로 구분하였다(그림 2). J5 시추공의 시료는 사암과 이암 파편이 혼합된 상태로 열분석 결과 총유기탄소(TOC) 함량이 낮게 측정되어 신뢰성 있는 Tmax 측정이 어려울 수 있다. 따라서 본 연구에서는 J5 시추공에서 유기물 함량이 높은 이암과 석탄 파편을 추출하여 시추공 전반에 걸쳐 Tmax와 Ro를 측정하였다. 687개 구간의 암편 시료 중 이암 파편이 우세한(Dominant) 102개의 구간을 선별하

여 각 시료에서 열분석을 수행하기 위해 이암 파편을 채취하였다(그림 2). J5 시추공에서 석탄 파편은 올리고세 구간을 제외하고 시추공 전반에 걸쳐 분포하며, 하부에서 상부로 갈수록 석탄 파편의 비율이 증가하는 경향을 보였다(그림 2). 석탄 파편 비율이 높은 25개 구간을 선정하여 Ro 측정을 위한 석탄 파편을 채취하였다.

3.2. 이암 파편의 HAWK 열분석

유기물의 특성 분석 및 열적 성숙도 판별을 위하여 한국 지질자원연구원이 보유하고 있는 Wildcat 사의 HAWK 장비를 사용하여 열분석을 수행하였다. 열분석을 위해 추출한 이암 파편 시료는 아게이트를 이용하여 60 mesh 이하 크기로 분쇄하였다.

HAWK Petroleum Assessment Method™ (HAWK-PAM)

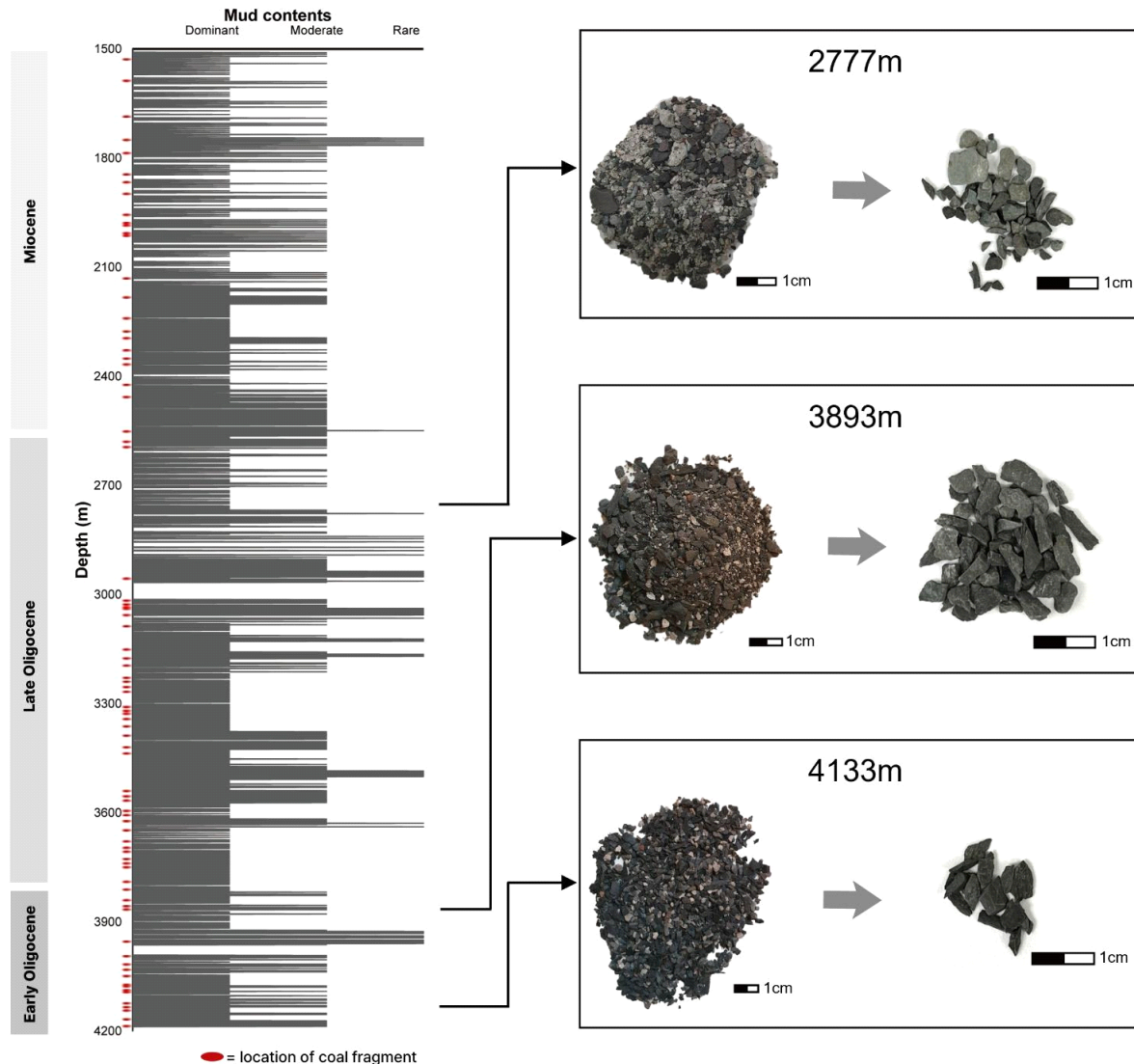


Fig. 2. Vertical variation of mudstone fragment proportions and location indicating coal fragments in the J5 well.

Table 1. Summary of TOC, HI, S2, Tmax, and Ro for the Miocene and Oligocene intervals in the J5 well.

Interval	TOC (wt.%)	HI (mgHC/gTOC)	S2 (mgHC/gRock)	Tmax (°C)	Ro (%)
Miocene	0.38-8.41 (av. 2.36)	21-166 (av. 77)	0.19-13.92 (av. 2.24)	430-439 (av. 435)	0.50-0.68 (av. 0.57)
Late Oligocene	0.24-5.26 (av. 1.54)	23-139 (av. 66)	0.08-5.68 (av. 1.15)	441-518 (av. 462)	0.91-1.54 (av. 1.18)
Early Oligocene	0.64-3.12 (av. 1.32)	13-30 (av. 24)	0.11-0.68 (av. 0.31)	480-535 (av. 512)	1.70-1.85 (av. 1.77)

는 전통적 및 비전통적 탄화수소의 근원암과 저류암에 대한 분석을 수행하기 위해 개발된 방법으로(Maende, 2016; Maende *et al.*, 2017; Beti and Ring, 2019), 암석 분말 시료를 오븐에 넣고 가열하면서 유기물의 함량 및 조성, 열적 성숙도 등을 평가하는 기법이다. HAWK-PAM는 열분해 과정과 산화 과정으로 구성된다. 열분해 과정에서는 5개의 열적 반응 구간이 구분된다. Oil-1(50°C에서 기록), Oil-2(100°C에서 기록), Oil-3(100°C와 180°C 사이에서 기록), Oil-4(180°C와 350°C 사이에서 기록)는 이미 생성된 탄화수소에 해당하며, S2(K-1, 350°C와 650°C 사이에서 25°C/분의 속도로 상승시키며 기록)는 탄화수소의 생성 가능성이 있는 케로젠의 양을 의미한다(Beti and Ring, 2019). S2가 최대값에 도달하는 온도를 Tmax라고 하는데, 이는 열적 성숙도 평가에 활용될 수 있다. 총유기탄소는 열분해 과정에서 방출된 탄화수소에서 탄소와 산화 과정에서 방출된 산화 생성물에서 탄소의 양을 통합하여 측정된다.

3.3. 석탄 파편의 Ro 분석

Ro 측정을 위하여 선별한 25개의 석탄 시료를 0.71 mm - 1 mm 크기로 분쇄한 후, 예폭시 레진과 하드너를 2:1 비율로 혼합하여 경화시킨 펠렛(pellet)을 제작하였다. 시료의 특성에 맞는 폴리싱 기법을 고안하여 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 Buehler 사의 AutoMet 250 장비를 이용하여 연마하였다. 연마된 펠렛을 이용하여 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 Hilger Fossil MOT-2 system을 활용하여 유침(oil immersion) 상태로 오일렌즈를 통해 Ro를 측정하였다. 한 시료 당 200개의 Ro 값을 측정하였으며, 그 평균값을 해당 시료의 대푯값으로 사용하였다. J5 시추공의 Ro는 후기 올리고세에서 4개, 초기 올리고세 구간에서 13개, 마이오세 구간에서 8개의 시료를 대상으로 측정하였다.

4. 결과

4.1. 이암 파편의 유기물 특성

HAWK 열분석 결과, J5 시추공의 심도별 TOC, S2, HI

및 Tmax 값들은 심도 및 시기에 따라 변화를 보였다(표 1).

TOC 함량은 초기 올리고세 구간에서 0.64-3.12(평균: 1.32) wt.%, 후기 올리고세 구간에서 0.24-5.26(평균: 1.54) wt.%, 마이오세 구간에서 0.38-8.41(평균: 2.36) wt.%의 범위를 보인다(그림 3a). 일부 시료에서 5 wt.% 이상의 높은 TOC 함량이 관찰되는데, 석탄 파편이 빈번하게 협재하는 특성을 고려할 때, 이러한 이암 파편 시료에 석탄 파편의 혼입되었을 가능성을 배제할 수 없다.

Tmax는 초기 올리고세 구간에서 480-535(평균: 512)°C, 후기 올리고세 구간에서 441-518(평균: 462)°C, 마이오세 구간에서 430-439(평균: 435)°C의 범위를 가졌다(그림 3b). Tmax는 심도가 증가함에 따라 뚜렷하게 상승하는 경향을 보였으며, 450°C 이상의 Tmax를 보이는 구간에서 넓은 범위로 변동한다(그림 3b).

HI은 초기 올리고세 구간에서 13-30(평균: 24) mgHC/gTOC, 후기 올리고세 구간에서 23-139(평균: 66) mgHC/gTOC, 마이오세 구간에서 21-166(평균: 77) mgHC/gTOC으로 평가되었다(그림 3c). S2의 함량은 초기 올리고세 구간에서 0.11-0.68(평균: 0.31) mgHC/gRock, 후기 올리고세 구간에서 0.08-5.68(평균: 1.15) mgHC/gRock, 마이오세 구간에서 0.19-13.92(평균: 2.24) mgHC/gRock의 범위를 보인다(그림 3d). HI와 S2는 심도가 증가할수록 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.

4.2. 석탄 파편의 Ro 변동

마세랄 관찰 결과, 심도가 깊어질수록 비트리나이트 입자가 점차 밝게 관찰되는 경향이 확인되었다(그림 4). 또한, 심도가 낮은 구간에 해당하는 시료들에서는 비트리나이트 입자 내에 다양한 내부 구조가 종종 관찰되었는데, 심도가 깊어질수록 이러한 구조들이 사라지고 입자들이 더 균질하고 깨끗하게 관찰되는 경향이 나타났다(그림 4).

Ro는 0.5-1.85% 범위에서 변동하였다(표 1). 초기 올리고세 구간에서는 1.70-1.85%(평균 1.77%)의 범위를 보였고, 후기 올리고세 구간에서는 0.91-1.54%(평균 1.18%)로 초기 올리고세에 비해 더 넓은 범위에서 변동하였다. 마이오세 구간에서는 지속적으로 감소하여 0.50-0.68%(평균

0.57%)로 낮게 평가된다. Ro는 심도가 증가함에 따라 전반적으로 상승하는 경향을 보인다(그림 5a).

5. 토 의

5.1. 탄화수소 생성 구간 도출

유기물의 열적 성숙도는 일반적으로 미성숙(immature),

성숙(mature), 과성숙(overmature) 단계로 구분되며, 열적 성숙도의 정도에 따라 생성되는 탄화수소의 유형이 결정된다(Tissot and Welte, 1984; Peters *et al.*, 2005). 미성숙 단계에서는 유기물이 충분한 열을 받지 못해 상업적으로 의미 있는 탄화수소가 거의 생성되지 않는다. 성숙 단계는 유기물이 열분해를 겪으며 액체 탄화수소가 주로 생성되는 구간으로, 일반적으로 원유 생성 단계(oil window)로 정의

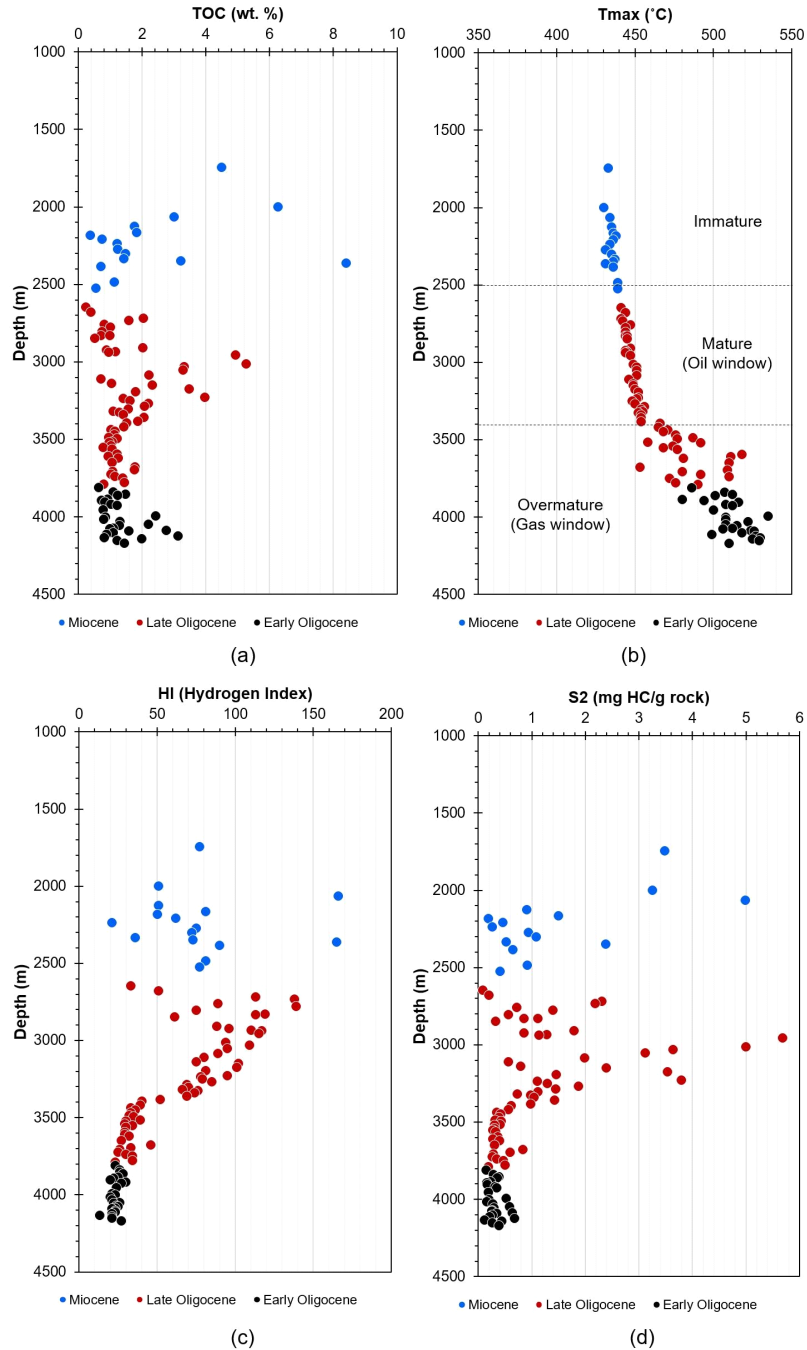


Fig. 3. Vertical variation of TOC (a), Tmax (b), HI (c) and S2 (d) in the the J5 well. Blue, red, and black circles represent the Miocene, Late Oligocene, and Early Oligocene samples, respectively.

된다. 이후 열적 성숙도가 더욱 증가하면 액체 탄화수소가 추가적인 열분해를 받아 가스 성분으로 전환되며, 이 단계는 과성숙 단계, 즉 가스 생성 단계(gas window)로 구분된다. 따라서 열적 성숙도를 통해 근원암의 원유 및 가스 생성 잠재성을 파악할 수 있다.

J5 시추공에서 측정된 Tmax는 430-535°C로 넓은 범위에서 변동한다(그림 3b). 시기별로 살펴보면, 마이오세 구간에 Tmax는 430-440°C로 미성숙 단계에서 원유 생성 단계의 초기에 해당하는 것으로 판단된다. 후기 올리고세 구간의 Tmax는 441-518°C로 원유 생성 단계를 넘어 가스 생

성 단계까지 포함하는 넓은 범위의 열적 성숙도를 보인다. 한편 초기 올리고세 구간의 Tmax는 대부분 500°C 이상으로 가스 생성 단계로 평가된다.

한편, Ro는 열적 성숙도를 평가하는 대표적인 독립 지표로, 일반적으로 Ro 0.6% 이하에서는 미성숙 단계, 0.6-1.2%는 성숙 단계, 그리고 1.2% 이상은 과성숙 단계로 분류된다(Tissot and Welte, 1984; Peters *et al.*, 2005). 마이오세 구간의 Ro는 0.50-0.68%로 미성숙 단계에서 원유 생성 단계 초입에 해당한다. 후기 올리고세 구간의 Ro는 0.91-1.54%로 원유 생성 구간에서 가스 생성 구간에 이르는 넓은 범위

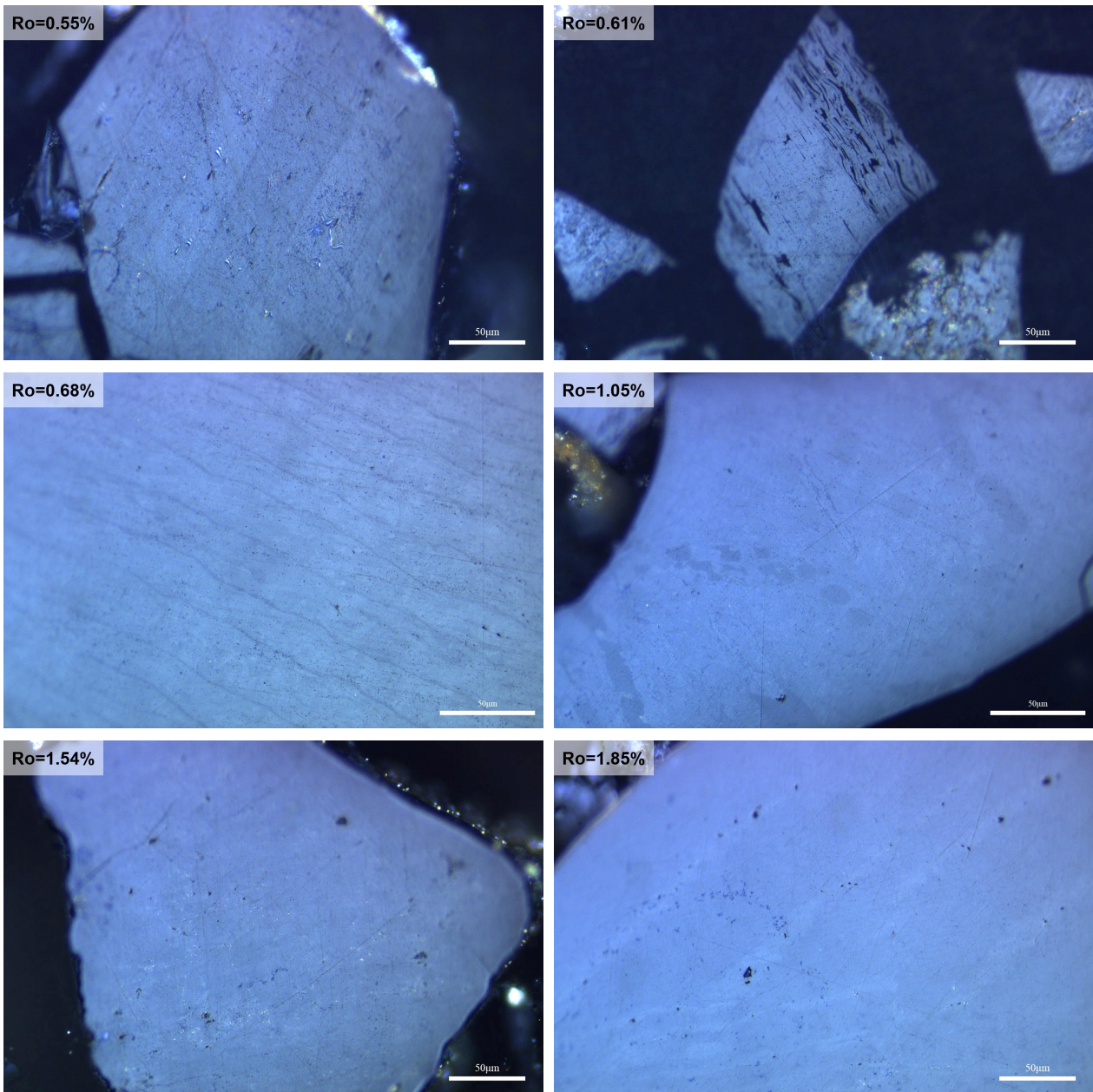


Fig. 4. Reflected white-light photomicrographs of vitrinite from the J5 well, used for Ro measurements.

의 열적 성숙도를 보인다. 초기 올리고세 구간의 Ro는 1.7% 이상으로 전형적인 가스 생성 단계에 위치하는 것으로 판단된다. 가스 생성 단계에 진입한 비트리나이트 입자는 내부 구조들이 사라지고 더욱 균질하고 깨끗하게 관찰되었는

데(그림 4), 이는 비트리나이트 입자가 높은 온도를 경험하면서 화학적, 물리적인 변화가 진행되었음을 의미한다(Bostick, 1979).

Tmax와 Ro을 종합적으로 고려한 결과, 두 지표는 전반

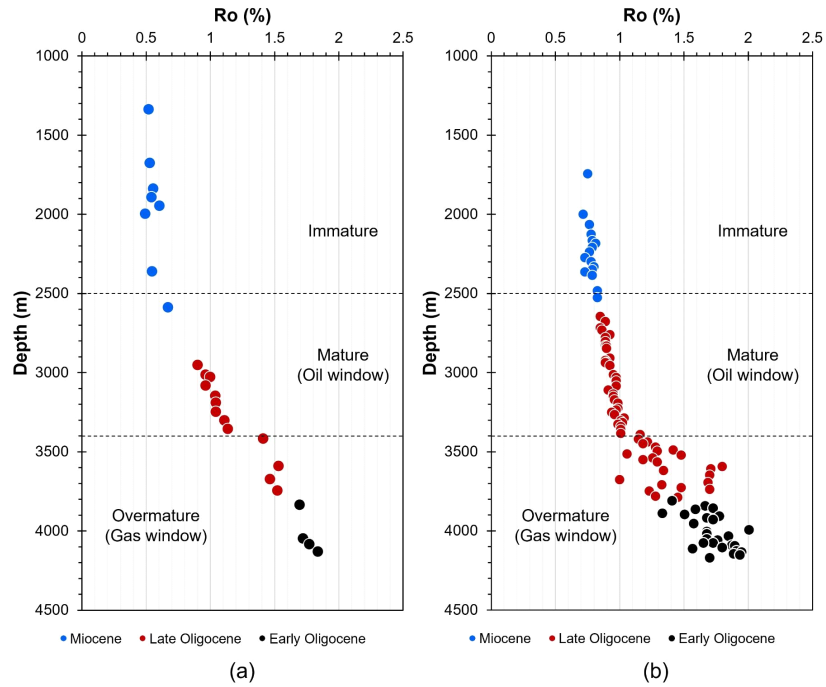


Fig. 5. Comparison of measured Ro (a) and Ro (b) calculated from the Tmax-Ro correlation equation in the J5 well.

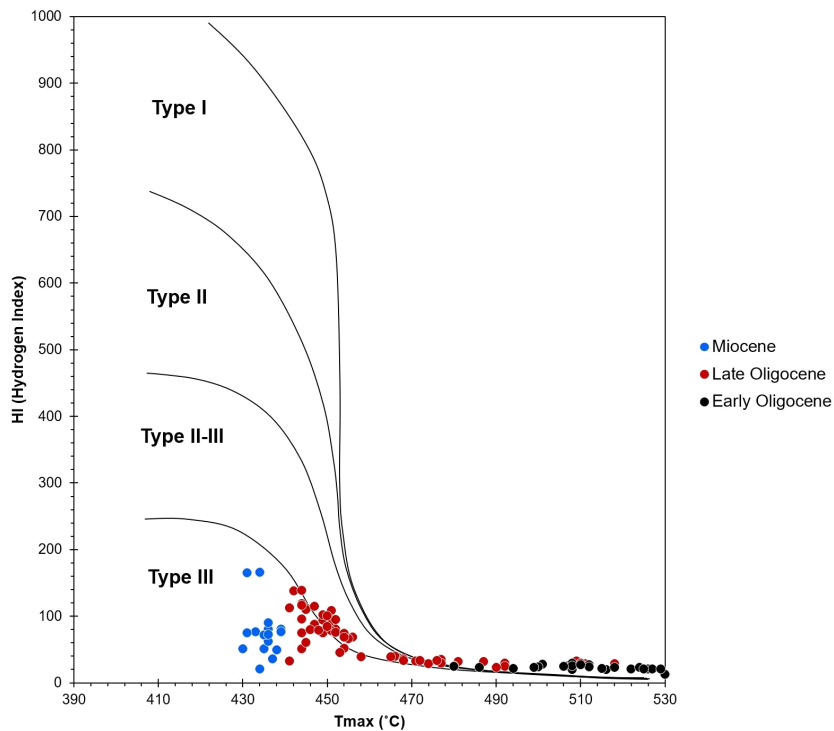


Fig. 6. Distribution of HI versus Tmax showing kerogen type in the J5 well.

적으로 일치하는 열적 성숙도를 보인다. 마이오세 약 2,500 m 심도 이후부터 원유 생성이 시작된 것으로 평가되며, 후기 올리고세 하부에 해당하는 약 3,400 m 이후부터는 과성숙 단계에 진입하여 가스 생성이 이루어진 것으로 판단된다.

5.2. 열적 성숙도 증가에 따른 유기물 특성 변동

J5 시추공에서 관찰되는 유기물 특성의 변화는 심도 증가에 따른 열적 성숙도의 변동과 밀접하게 연관되어 있다. 약 3,400 m 심도 이후에서 S2와 HI 값이 급격히 감소하는 경향이 관찰된다(그림 3c, 3d). S2는 잔존 케로젠으로부터 생성 가능한 탄화수소의 양을 직접적으로 반영하는 지표이며, HI는 S2와 TOC로부터 계산되는 유기물의 수소 풍부도를 나타내는 지표이다. 심도가 증가함에 따라 S2와 HI가 지속적으로 감소하는 것은 열적 성숙도의 증가에 따라 케로젠 내 수소가 액체 및 기체 탄화수소로 전환되며 케로젠이 점진적으로 소모되었음을 의미한다.

시기별 케로젠 유형 분석 결과, 마이오세 및 후기 올리고세 상부 구간에서는 주로 Type III 케로젠이 우세하며, 후기 올리고세 상부 구간에 소량의 Type II 케로젠 유입 가능성이 제시된다(그림 6). 그러나 열적 성숙도가 과성숙 단계에 도달한 후기 올리고세 하부와 초기 올리고세 구간에서는 더 이상 원유나 가스를 생성할 수 없는 Type IV 케로젠으로 분류된다. 이는 열변질 과정 동안 유기물의 상당 부분이 이미 탄화수소로 전환되었음을 반영한다. 이러한 케로젠 유형의 변화는 유기물 기원의 차이뿐 아니라, 열적 성숙도 증가에 따른 유기물의 변화 과정이 반영된 결과로 해석된다.

TOC 함량 또한 열적 성숙도에 영향을 받을 수 있다. 마이오세 구간에서 TOC 함량은 열적 성숙도가 낮아 유기물이 아직 탄화수소로 변환되지 않은 초기 유기물의 TOC 함량을 지시하는 것으로 판단된다. 반면, 올리고세 구간에 측정된 TOC 함량은 열적 성숙도의 증가로 인해 유기물이 탄화수소를 생성하는 과정에서 소모된 후 잔류하는 TOC 함량을 나타낸다. 특히, 과성숙 단계에 해당하는 후기 올리고세 하부와 초기 올리고세 구간에서는 유기물의 대부분이 이미 열변질을 거쳐 탄화수소를 생성하였으므로, 현재 측정된 TOC에 비하여 퇴적 당시의 초기 TOC 함량은 더 높았을 것으로 추정된다.

종합적으로, J5 시추공에서 관찰되는 S2 및 HI의 감소, 케로젠 유형의 Type III-II에서 Type IV로의 전이, 그리고 TOC 함량의 변화 양상은 모두 심도 증가에 따른 열적 성숙도의 변동 과정과 연관된다. 이러한 유기물 특성을 고려하면, 후기 올리고세 하부 및 초기 올리고세 구간은 과성숙 단계에 도달하여 현재 잔존하는 탄화수소 생성 잠재력은 제한적이지만, 분지 형성 초기에는 적절한 열적 성숙도에 진

입하여 효율적으로 탄화수소를 생성한 양호한 근원암으로 해석된다.

5.3. 제주분지의 Tmax-Ro 상관관계식 도출

Ro는 유기물이 경험한 최대 온도로 변환될 수 있으므로, 고지온 복원의 주요 지표로 사용된다(Waliczek *et al.*, 2021). 그러나 Ro는 비트리나이트가 포함된 구간에서만 측정할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 따라서 Ro와 이암 파편에서 측정된 Tmax를 활용함으로써 석탄 파편이 포함되어 있지 않은 구간의 Ro 값을 유추할 수 있다. 따라서 Tmax-Ro 상관관계식은 고해상도 고지온 복원에 중요한 도구로 활용된다.

J5 시추공의 경우, 이암 파편의 Tmax는 102개가 측정되었으나, Ro를 직접 측정할 수 있는 시료가 25개로 제한적이었으므로, 제주분지에 최적화된 Tmax-Ro 상관관계식을 도출하여 고해상도 Ro 자료를 확보하였다. 일반적으로, 시료가 과성숙한 경우, 열분석 과정에서 S2 최대값의 식별이 어려워 정확한 Tmax 값을 산출하는 데에 문제가 있을 수 있다. 하지만 본 시추공의 과성숙 구간(3,400 m 이상)에 해당하는 시료에서는 Tmax 값이 비교적 일정하게 증가하는 경향이 관찰되었다(그림 3b). 또한 Tmax와 Ro는 강한 양의 상관관계(R²=0.8505)를 보인다(그림 7). 이러한 특징을 통해 이 연구결과로부터 얻은 Tmax는 상관관계식 도출에 적합한 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 25개의 시료를 대상으로 아래와 같이 Tmax-Ro 상관관계식을 도출하였다(그림 7).

$$Ro (\%) = 0.0123 \times Tmax (^{\circ}C) - 4.5769 \tag{1}$$

위에서 제시된 관계식에 기반하여 Tmax에서 변환된 Ro 값은 초기 올리고세 구간에서 1.33-2.00(평균: 1.73)%, 후

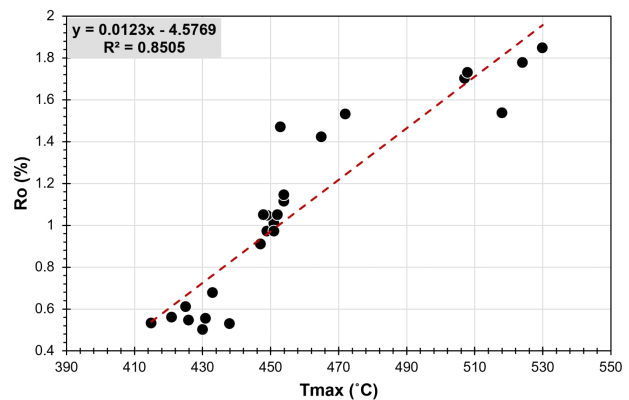


Fig. 7. Correlation equation between Tmax and Ro in the J5 well.

기 올리고세 구간에서 0.85-1.79(평균: 1.11)%, 마이오세 구간에서 0.71-0.82(평균: 0.77)%의 범위를 나타냈다(그림 5b).

5.4. 제주분지 고지온 및 지온구배 복원

고지온은 유기물이 경험한 최대 온도를 의미하며, 이를 복원하기 위해 다양한 변환식이 제안되어 왔다(Vetó and Dövényi, 1986; Barker and Pawlewicz, 1994; Ohmori *et al.*, 1997; Kostić, 2010). Barker and Pawlewicz (1994)는 선행 연구에서 보고된 다양한 퇴적분지에서의 Ro와 고지온을 바탕으로 Ro를 이용한 고지온 환산 경험식을 제시하였다. 해당 변환식은 자연계에서 관측된 넓은 열성속도 범위를 포괄하는 자료를 기반으로 도출되었기에 퇴적분지의 고지온 복원에 널리 활용된다. 본 연구에서 고지온 복원에 사용된 변환식은 아래와 같다.

$$Paleogeotemperature = \frac{\ln(Ro) + 1.68}{0.0124} \quad (2)$$

앞서 제시한 제주분지의 상관관계식을 활용하여 산출된 Ro 값을 기반으로 심도별 고지온 값을 복원하였다. 초기 올리고세 구간에서 고지온은 158-192°C의 범위를 보이나, 대부분 170°C 이상으로 평가된다. 후기 올리고세 구간에서 고지온은 122-183°C 범위를 보이나, 대부분 170°C 이하로 평가된다. 마이오세 구간에서는 108-120°C의 범위를 나타냈다(그림 8).

심도별로 복원된 고지온 값을 기반으로 회귀분석을 통해서 심도에 따른 지구 내부 온도 증가율인 지온구배(geothermal gradient)를 계산하였다. 초기 올리고세 구간의 고지온 자료는 상부 일부에 국한되어 있어 지온구배 평가에서 제외하였다. 지온구배는 후기 올리고세 구간에서 6°C/100 m로 평가되며, 마이오세 구간에서는 4°C/100 m로 감소하는 경향을 보인다(그림 8).

J5 시추공의 지온구배 변동 양상은 열개분지의 단계적 진화와 과정과 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. Lee *et al.* (2006)에 따르면 에오세에서 초기 올리고세는 열개작용이 활발히 진행되던 시기로, 지각 신장과 맨틀 물질의 상대적 상승에 의해 열 유입이 증가하였다. 반면에 후기 올리고세에는 주요 열개작용이 약화 또는 종료되면서 분지가 열적 이완 및 냉각 단계로 진입하였다. 이후 마이오세에 들어서면서 분지는 전반적인 열개 후 열적 침강(post-rift thermal subsidence) 단계에 접어들어 지각의 점진적인 냉각과 안정화가 진행된 것으로 해석하였다. 이러한 시기별 열개분지의 단계적 발달 과정은 J5 시추공의 지온구배가 올리고세에서 마이오세로 가면서 감소하는 경향성과 잘 부합한

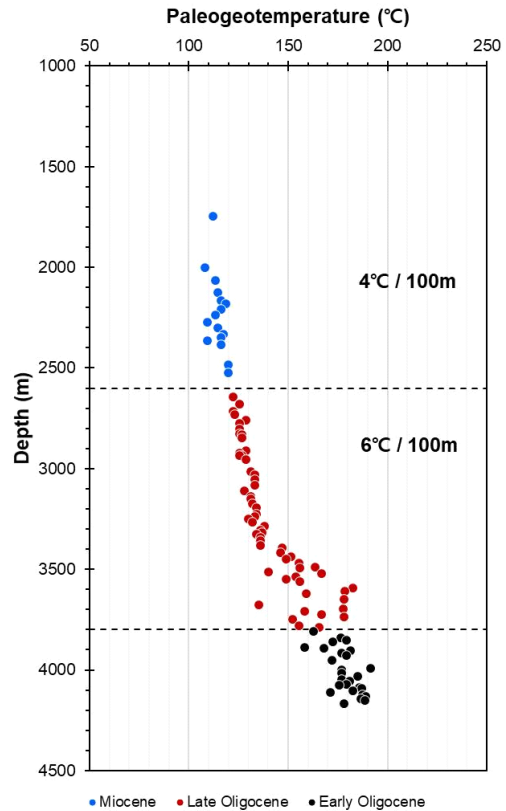


Fig. 8. Vertical variation of paleogeotemperature estimated from Ro in the J5 well.

다. 이는 J5 시추공의 지온구배 변동이 제주분지의 열개 후 열적 진화 특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

5.5. 국제적 Tmax-Ro 상관관계식 도출

Tmax의 Ro 변환을 위한 상관관계식은 유기물 조성 및 열적 성숙도 범위의 차이에 따라 지역별로 다양하게 제시되어 왔다(표 2). Jarvie *et al.* (2001)은 미국의 Barnett shale (Type II/III kerogen)을 대상으로 Tmax-Ro 상관관계식을 제시하였으나, 적용된 Tmax와 Ro 범위는 제시하지 않았다. Hackley and Cardott (2016)는 미국의 Woodford shale과 Barnett shale (kerogen type II)시료를 기반으로 Tmax 430-510°C, Ro 0.55-2.1%의 범위의 상관관계식을 제시하였다. Waliczek *et al.* (2021)은 폴란드의 Outer Carpathians의 시료를 대상으로 유기물 조성을 고려하여 Type II/III 케로젠과 Type III 케로젠 우세 시료에 대해 각 상관관계식을 제시하였다. 이들 관계식은 Tmax 421-485°C, Ro 0.47-1.25%의 범위를 가진다. Lewan and Kotarba (2014)은 미국, 독일, 폴란드, 우크라이나에서 수집된 53개 석탄 시료를 대상으로 Tmax 373-685°C, Ro 0.28-5.33% 범위의 상관관계식을 제시하였다.

제주분지를 포함한 Tmax-Ro 상관관계식들을 비교해 보

면, 미성숙에서 성숙단계에 이르는 구간에서는 상관관계식에 차이가 크지 않으나, 과성숙한 구간에 진입하면서부터 상관관계식 간 차이가 두드러지는 것으로 나타났다(그림 9). Tmax-Ro 상관관계식에 사용된 데이터 범위를 비교해보면, Lewawn and Kotarba (2014)가 제시한 Tmax-Ro 상관관계식을 제외한 대부분의 연구에서 Tmax 값이 510°C 이상을 갖는 과성숙한 시료가 거의 포함하지 않은 상태에서 상관관계식이 도출되었음을 확인할 수 있었다(그림 10). 이는 과성숙 구간에서 기존 Tmax-Ro 상관관계식을 적용할 경우, 열적 성숙도의 과대 또는 과소 평가가 발생할 가능성을 시사하며, 해당 구간에 대한 Tmax 기반 Ro 변환의 불확실성이 증가할 수 있음을 의미한다. 따라서 과성숙 단계

에 대한 신뢰성 있는 열적 성숙도 평가를 위해서는 충분한 과성숙 시료를 포함한 상관관계식의 적용이 필요하다.

Lewan and Kotarba (2014)는 다국적 석탄 시료(미국: 13개, 독일: 15개, 폴란드: 21개, 우크라이나: 4개)를 포함하고, 과성숙 자료 비중이 높아 국제적인 Tmax-Ro 상관관계식 도출에 적합하다. 그러나 해당 연구 자료에는 Tmax 약 500-550°C 부근에서 자료 공백이 존재한다. 제주분지 J5 시추공의 Tmax 자료는 430-535°C 범위에 분포하므로 자료 공백을 효과적으로 보완할 수 있다. 게다가 제주분지의 성숙 단계의 열적 성숙도 자료는 기존 자료와 높은 일치성을 보인다(그림 10). 이에 본 연구에서는 Lewan and Kotarba (2014)의 기존 자료에 제주분지 시추공 자료를 결

Table 2. Correlation equations between Tmax and Ro proposed in previous studies.

Equation	Author
Eq. 1 $Ro = 0.018 \times Tmax - 7.16$	Jarvie <i>et al.</i> , 2001
Eq. 2 $Ro = 0.0103 \times Tmax - 3.785$	Lewan and Kotarba, 2014
Eq. 3 $Ro = 0.01867 \times Tmax - 7.306$	Hackley and Cardott, 2016
Eq. 4 $Ro = 0.0152 \times Tmax - 5.938$	Waliczek <i>et al.</i> , 2021 (For Kerogen Type II/III)
Eq. 5 $Ro = 0.0135 \times Tmax - 5.1855$	Waliczek <i>et al.</i> , 2021 (For Kerogen Type III)

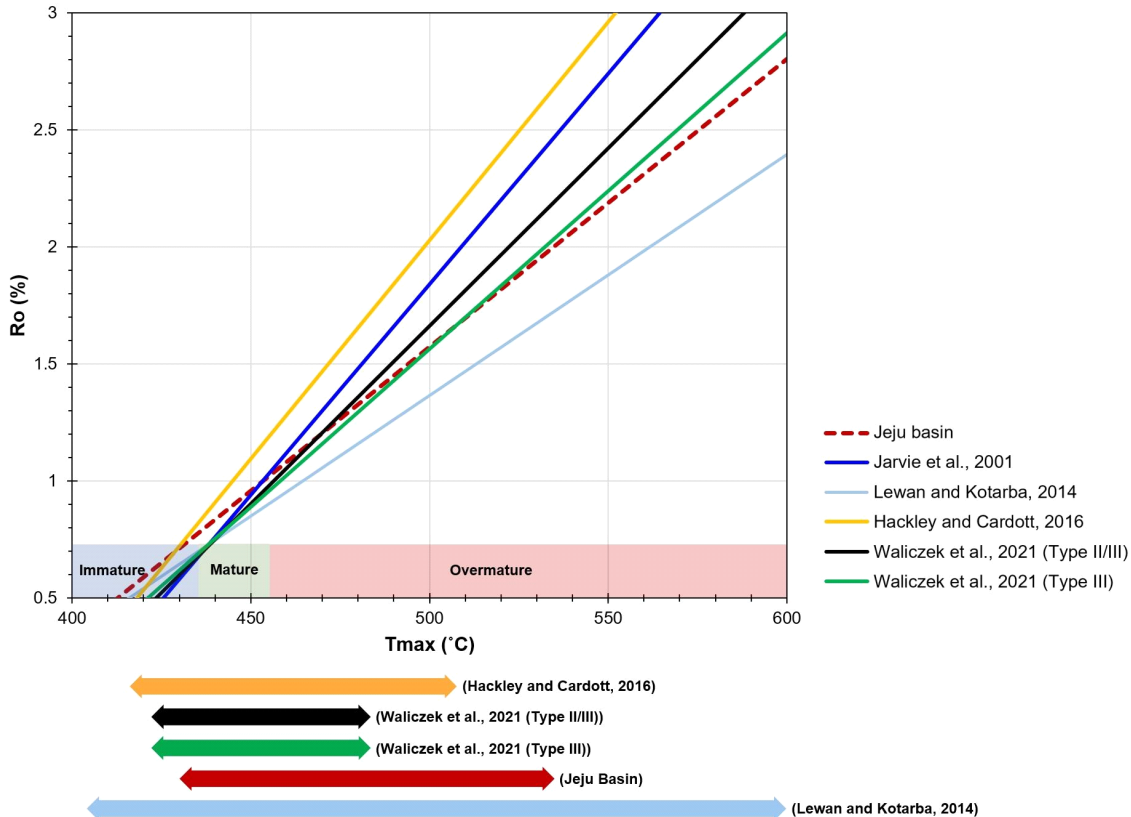


Fig. 9. Tmax-Ro correlation equations proposed in Table 1, shown on a Tmax versus Ro plot.

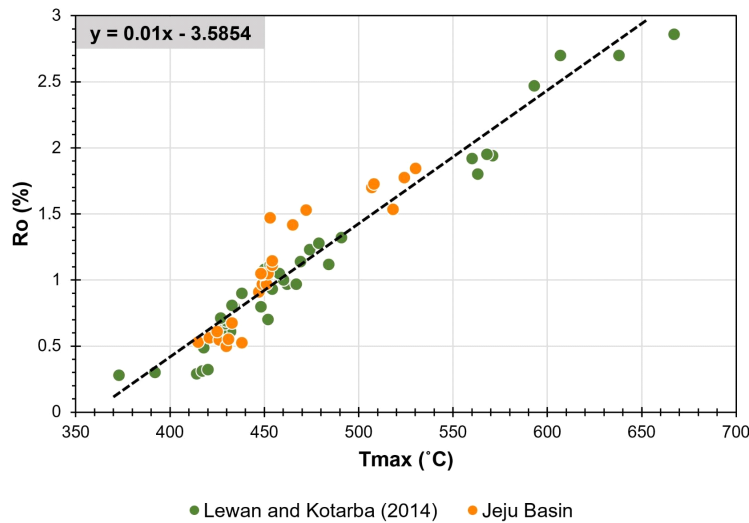


Fig. 10. Correlation between Tmax and Ro based on data from the Lewan and Kotarba (2014) and this study(Jeju Basin). The dashed line represents the linear regression ($Ro = 0.01 \times Tmax - 3.5854$), indicating a strong positive correlation between Tmax and Ro.

합함으로써, 과성숙 구간에서도 보다 안정적인 변환이 가능한 Tmax-Ro 상관관계식을 제시하였다(그림 10). 도출된 상관관계식은 다음과 같다.

$$Ro(\%) = 0.01 \times Tmax(^{\circ}C) - 3.5854 \quad (3)$$

도출된 상관관계식을 통해 평가된 Ro는 제주분지에서 제시된 상관관계식으로 평가된 Ro에 비해 미약하게 저평가되는 경향을 나타낸다. 따라서 Tmax와 Ro 측정이 모두 가능한 연구 지역에서는 해당 지역에 자료를 기반으로 도출된 상관관계식을 사용하는 것이 적합하다. 그러나 석탄이 부재한 과성숙 유기물의 특성을 분석하거나 고지온을 복원할 경우, 본 연구에서 제시한 Tmax-Ro 상관관계식이 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 제주분지 J5 시추공의 이암 및 석탄 파편 시료를 대상으로 유기물 열분석과 비트리나이트 반사도 (Ro) 분석을 수행하여 열적 성숙도와 탄화수소 생성 구간을 평가하였다. 이암 파편 시료의 Tmax와 석탄 파편 시료의 Ro 값은 모두 심도 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이를 기반으로 약 2,500 m 심도에서 원유 생성 단계, 약 3,400 m 이상에서 가스 생성 단계에 진입하는 것으로 평가되었다. 3,400 m 이상의 구간은 과성숙 단계로, 유기물의 대부분이 탄화수소로 전환된 것으로 해석되었다. J5 시추공의 Tmax와 Ro 자료를 이용하여 제주분지에 특화된 Tmax-Ro 상관관계식($Ro = 0.0123 \times Tmax - 4.5769$)을

제안하였으며, 이를 통해 고해상도 Ro 자료를 확보하였다. 복원된 고지온은 초기 올리고세 구간에서 주로 170°C 이상으로 나타나며, 후기 올리고세 구간에서는 대부분 120-170°C 범위에 분포한다. 마이오세 구간에서는 120°C 이하로 낮게 평가된다. 이러한 고지온 기반으로 평가된 지온구배는 올리고세에서 마이오세 구간으로 가면서 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 제주분지가 열개작용 이후 분지가 냉각과 안정화 단계를 거쳤음을 시사한다. 이러한 고지온의 변동 양상은 열개분지 발달이 제주분지 내 탄화수소 생성에 중요한 제어 요인임을 시사한다. 또한 기존 Tmax-Ro 상관관계식이 과성숙 구간에서 한계를 가지는 점을 확인하고, Lewan and Kotarba (2014)의 자료와 본 연구 자료를 종합하여 과성숙 구간에서도 적용 가능한 국제적 Tmax-Ro 상관관계식($Ro = 0.01 \times Tmax - 3.5854$)을 도출하였다. 본 연구 결과는 제주분지의 탄화수소 생성 잠재성 평가뿐만 아니라 분지의 열사 및 매몰사 복원 연구에 기초 자료로 활용될 수 있으며, 제안된 Tmax-Ro 상관관계식은 석탄 시료가 부재한 과성숙 지역에서도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 제주분지 전반에 걸친 열적 성숙도 자료가 확보된다면, 제주분지 특성을 보다 정밀하게 반영한 Tmax-Ro 상관관계식의 도출과 더불어 시공간적 열사 및 매몰사 진화 양상에 대한 보다 정밀한 복원이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상부 유전개발사업출자의 지원과 한국지질자원연구원 (KIGAM)의 지원(GP2025-028)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barker, C.E. and Pawlewicz, M.J., 1994, Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures: A comparison of methods. In: Mukhopadhyay, P.K. and Dow, W.G. (eds.), *Vitrinite Reflectance as a Maturity Parameter*. American Chemical Society, Washington, D.C., 216-229.
- Beti, D.R. and Ring, T.A., 2019, Programmed temperature pyrolysis: Alterations to the standard method. In: Dayananda, P. (ed.), *Encyclopedia of Petroleum Geoscience*. Springer, Cham, 1-12.
- Bostick, N.H. and Foster, J.N., 1975, Comparison of vitrinite reflectance in coal seams and in kerogen of sandstones, shales, and limestones in the same part of a sedimentary section. *Fuel*, 54, 123-132.
- Bostick, N.H., 1979, Microscopic measurement of the level of catagenesis of solid organic matter in sedimentary rocks to aid exploration for petroleum and to determine former burial temperatures- a review. In: Scholle, P.A. and Schluger, P.R. (eds), *Aspects of Diagenesis*. Society for Sedimentary Geology, Houston, TX, 17-43.
- Cheshire, S., Craddock, R.R., Xu, G., Sauerer, B., Pomerantz, A.E., McCormick, D. and Abdallah, W., 2017, Assessing thermal maturity beyond the reaches of vitrinite reflectance and Rock-Eval pyrolysis: A case study from the Silurian Qusaiba Formation. *International Journal of Coal Geology*, 180, 29-45.
- Curtis, M.E., Ambrose, R.J., Sondergeld, C.H. and Rai, C.S., 2011, Investigation of the relationship between organic porosity and thermal maturity in the Marcellus Shale. SPE Unconventional Resources Conference/Gas Technology Symposium, The Woodlands, Texas, USA, SPE-144370.
- Espitalié, J., Deroo, G. and Marquis, F., 1985, La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 40, 755-784.
- Evenick, J.C., 2021, Examining the relationship between Tmax and vitrinite reflectance: An empirical comparison between thermal maturity indicators. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 91, 103946.
- Grobe, A., Littke, R., Sachse, V. and Leythaeuser, D., 2015, Burial history and thermal maturity of Mesozoic rocks of the Dolomites, Northern Italy. *Swiss Journal of Geosciences*, 108, 253-271.
- Hackley, P.C. and Cardott, B.J., 2016, Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review. *International Journal of Coal Geology*, 163, 8-51.
- Hong, S.K., Choi, J.Y., Lee, H.S. and Shin, Y.J., 2018, Methods for thermal maturity estimation in shale gas source/reservoir rocks : A case study of a Devonian shale in Western Canadian Sedimentary Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 61-74 (in Korean with English abstract).
- Jarvie, D.M., Claxton, B.L., Henk, F. and Breyer, J.T., 2001, Oil and shale gas from the Barnett Shale. In: Ft. Worth Basin, Texas (abs), AAPG Annual Meeting Program with Abstracts, 10, p. A100.
- 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. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91, 475-499.
- Jolivet, L., Huchon, P. and Claude, R., 1989, Tectonic setting of Western Pacific Marginal Basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.
- Kenrick, P. and Crane, P.R., 1997, The origin and early evolution of plants on land. *Nature*, 389, 33-39.
- 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).
- 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, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Kostić, A., 2010, Petroleum generation in the southeastern part of the Pannonian Basin (Serbia). *Tehnika-Rudarstvo, geologija i metalurgija*, 61, 1-5.
- 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, Geological 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, S.A. and Son, B.-K., 2016, Petroleum system modeling of the Sora basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 333-353 (in Korean with English abstract).
- 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, Korea, 328 p.
- Lee, Y.J., Yun, H.S., Cheong, T.J., Kwak, Y.H. and Oh, J.H., 1998, Geochemical characteristics of organic matter in the Tertiary sediments from the JDZ Blocks, offshore Korea. *Journal of the Korean Society of Petroleum Geology*, 6, 25-36 (in Korean with English abstract).
- Lewan, M.D. and Kotarba, M.J., 2014, Thermal-maturity limit for primary thermogenic-gas generation from humic coals as determined by hydrous pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 98, 2581-2610.
- Li, D., 1984, Geologic evolution of petroliferous basins on continental shelf of China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68, 993-1003.
- Maende, A., 2016, Wildcat compositional analysis for conventional and unconventional reservoir assessments: HAWK petroleum assessment method (H-PAM)TM. Application Note, 052016-1.
- Maende, A., Pepper, A.S., Jarvie, D.M. and Weldon, W.D., 2017, Advanced Pyrolysis Data and Interpretation Methods to Identify Unconventional Reservoir Sweet Spots in Fluid Phase Saturation and Fluid Properties (API Gravity) from Drill Cuttings and

- Cores. *Petroleum Geology*, 12, 417-452.
- Meng, C.Y. and Chou, J.T., 1976, Petroliferous Taiwan basins in framework of Western Pacific Ocean. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 25, 256-260.
- Ohmori, K., Taira, A., Tokuyama, H., Sakaguchi, A., Okamura, M. and Aihara, A., 1997, Paleothermal structure of the Shimanto accretionary prism, Shikoku, Japan. *Geology*, 25, 327-330.
- Peters, K.E., 1986, Guideline for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG Bulletin*, 70, 318-329.
- Peters, K.E. and Cassa, M.R., 1994, Applied source rock geochemistry. In: Magoon, L.B. and Dow, W.G., *The Petroleum System-From Source*, AAPG Memoir, 60, 93-117.
- Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M., 2005, *The biomarker guide volume 1. Biomarkers and isotopes in the environment and human history*. Cambridge, New York, Melbourne, Cambridge University Press, 1132 p.
- Scheidt, G. and Littke, R., 1989, Comparative organic petrology of interlayered sandstones, siltstones, mudstones and coals in the Upper Carboniferous Ruhr basin, Northwest Germany, and their thermal history and methane generation. *Geologische Rundschau*, 78, 375-390.
- 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).
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1984, *Petroleum Formation and Occurrence*, 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin, 699 p.
- Vetó, I. and Dövényi, P., 1986, Methods for paleotemperature estimation using vitrinite reflectance data: A critical evaluation. In: Buntebarth, G. and Stegena, L. (eds.), *Paleogeothermics: Evaluation of Geothermal Conditions in the Geological Past*. Springer, Berlin, 105-118.
- Waliczek, M., Machowski, G., Poprawa, P., Świerczewska, A. and Więclaw, D., 2021, A novel Ro, Tmax, and S indices conversion formulae on data from the fold-and-thrust belt of the Western Outer Carpathians (Poland). *International Journal of Coal Geology*, 234, 103672.
- Yoon, S.H., Son, B.K. and Shinn, Y.J., 2009, Review on geology and potential petroleum systems of sedimentary basins in the South Sea of Korea. *KIGAM Bulletin*, 13, 54-69 (in Korean with English abstract).
- Yun, H., 2019, Biostratigraphy of the JDZ V-3 and Okdom-1 wells with comparison to neighboring areas. Chungnam National University Report for Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 151 p (in Korean).
- Yun, H., 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 Paleontological Society of Korea*, 15, 43-94 (in Korean with English abstract).