



Article

제주분지 남부 근원암의 유기물 특성 및 석유생성 잠재력 평가

최지영

한국지질자원연구원 자원탐사개발연구본부 석유·미래에너지연구센터

Organic matter characteristics and petroleum generation potential of source rocks in the Southern Jeju Basin, Korea

Jiyoung Choi

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 24, 2025 / Revised: February 2, 2026 / Accepted: February 12, 2026

*Corresponding author: +82-42-868-3252 / E-mail: jychoi@kigam.re.kr

요약: 제주분지는 한반도 남부 해역에 위치한 신생대 열개성 퇴적분지로, 열개 작용이 활발하였던 에오세-올리고세 동안 육성 내지 연안 환경이 우세하게 발달하여 이암과 석탄층이 국지적으로 반복 산출되는 특징을 보인다. 본 연구에서는 제주분지 남부에 위치한 시추공 J4를 대상으로 HAWK-2 열분해 분석과 비트리나이트 반사도(VRo) 자료를 통합하여 올리고세 근원암의 유기물 특성, 열성숙도 구배, 생성잠재력을 재평가하였다. HAWK-2 분석 결과, 이암은 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC) 0.3~7.0 wt%(평균 약 1.6 wt%) 범위로 분포하며, 특히 후기 올리고세 이암에서는 일부 구간에서 높은 HI와 S₂ 값이 확인될 뿐 아니라 해당 심도가 석유생성단계(Oil Window)에 해당하여, 제주분지 남부에서 가장 유효한 근원암층으로 해석된다. 반면, 전기 올리고세 이암은 심부 고성숙 구간에 해당하여 HI와 S₂가 감소하는 경향을 보인다. 석탄층은 TOC 10~70 wt%에 달하는 매우 높은 유기물 함량을 보이나, 층서적으로 제한된 구간에서 산출되며 심부에서는 고성숙 가스형 특징을 나타낸다. VRo와 T_{max}는 심도 증가에 따라 전형적인 열성숙도 구배를 나타내며, 약 2.6~3.4 km 구간에서 석유생성구간, 그 하부에서는 가스생성구간으로 확인된다. 암상별 T_{max}-VRo 회귀 분석 결과, 이암과 석탄은 상이한 기온기를 보여 근원암 성숙도 해석 시 암상별 보정이 필요함을 시사한다. HAWK-2 분석을 통해 산출된 제주분지 남부 근원암의 현재 생성가능 유기탄소(Generative Organic Carbon, GOC) 비율은 대체로 20% 이하로 제한적이며, 심도 증가와 열성숙도의 진전에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그러나 HI의 심도별 변화와 열성숙도에 따른 변환율(Transformation Ratio, TR)을 함께 고려하여 Jarvie *et al.* (2012)의 방법으로 초기 생성가능 유기탄소(GOC₀) 비율을 보수적으로 복원한 결과, 미성숙 구간에서는 약 20% 수준, 심부 과성숙 구간에서는 58% 이상에 이르는 %GOC₀가 추정되었다. 이는 제주분지 남부 근원암이 현재는 제한적인 잔존 생성잠재력을 보이나, 열성숙 이전 단계에서는 훨씬 높은 생성가능 유기탄소 비중을 보유하고 있었음을 시사하며, 과거에 의미 있는 탄화수소 생성이 가능했을 잠재력을 지닌 근원암 시스템이 존재했음을 지지한다. 종합하면, 제주분지 남부 근원암 시스템은 혼합기원(Type II/III) 특성을 보이는 이암과, 높은 유기물 함량을 갖는 석탄이 공존하는 복합 근원암 체계로 해석되며, 특히 후기 올리고세 이암이 가장 유효한 석유생성 근원암층으로 평가된다. 본 연구 결과는 제주분지 근원암 특성에 대한 이해를 심화시키며, 향후 석유시스템 모델링과 가스 중심 탐사 전략 수립을 위한 기초 자료를 제공한다.

주요어: 제주분지, 근원암 평가, 총유기탄소, 열성숙도, 생성가능유기탄소

ABSTRACT: Jeju Basin is a Cenozoic rift-related sedimentary basin located in the southern offshore region of the Korean Peninsula, where terrestrial to marginal-marine environments prevailed during the Eocene-Oligocene rifting stage, resulting in the repeated occurrence of shale and coal layers. In this study, HAWK-2 pyrolysis data and vitrinite reflectance (VRo) measurements from borehole J4 in the southern Jeju Basin were integrated to reassess the organic matter characteristics, thermal maturity gradient, and petroleum generation potential of Oligocene source rocks. HAWK-2 results show that shales are widely distributed over a broad depth interval with TOC values ranging from 0.3 to 7.0 wt% (average ~1.6 wt%). In particular, some intervals within the Late Oligocene shales exhibit high HI and S₂ values and occur within the oil window, indicating that these strata represent the most effective source rock intervals in the southern Jeju Basin. In contrast, Early Oligocene shales occur in deeper, highly mature zones where HI and S₂ values are significantly reduced. Coal layers display very high TOC values (10~70 wt%) but are stratigraphically restricted and show gas-prone characteristics in deeper intervals. VRo and T_{max} increase systematically with

depth, defining a typical thermal maturity gradient with the oil window occurring at approximately 2.6–3.4 km, followed by transition to the gas generation zone at greater depths. Regression analysis of T_{max} versus VRo reveals different slopes for shale and coal, indicating that lithology-specific correction is required when interpreting source rock maturity. The present generative organic carbon (GOC) ratios derived from HAWK-2 data are generally below 20% and decrease with increasing depth. However, by combining depth-dependent HI variation with thermal maturity-based transformation ratios (TR) and applying the method of Jarvie *et al.* (2012), the initial generative organic carbon (GOC₀) was conservatively reconstructed. The estimated GOC₀ reaches ~20% in immature intervals and exceeds 58% in deeply overmature intervals. These results indicate that, although the current residual generation potential is limited, the source rocks originally contained a substantially higher fraction of generative organic carbon and were capable of significant hydrocarbon generation in the past. Overall, the southern Jeju Basin source rock system is interpreted as a composite system composed of mixed-origin (Type II/III) shales and organic-rich coals. Among them, the Late Oligocene shales are identified as the most effective petroleum source rock intervals. The results of this study provide an improved understanding of source rock characteristics in the Jeju Basin and offer fundamental constraints for future petroleum system modeling and gas-focused exploration strategies.

Key words: Jeju Basin, source rock evaluation, total organic carbon (TOC), thermal maturity, generative organic carbon (GOC)

1. 서론

제주분지는 한반도 남서부 해역에 위치한 신생대 열개성 퇴적분지로, 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin, ECSSB)를 구성하는 여러 열개분지 중 북동부에 해당한다. 제주분지는 구조적으로 시후분지(Xihu Basin)의 북쪽 연장부로 해석되며, 후기 백악기-팔레오세 이후 태평양판의 섭입과 연관된 배호 확장(back-arc extension)에 의해 에오세까지 지각 인장 및 열개 작용이 활발히 진행된 것으로 이해된다. 이후 에오세 말-올리고세 초에는 국지적인 용기와 침식이 발생하였으며, 올리고세 이후에는 열적 침강과 퇴적 작용이 지속되면서 현재의 분지 구조가 형성된 것으로 해석된다(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011). 분지는 신생대 전반에 걸친 지각 인장과 해양환경 변화의 영향을 받아 두꺼운 해양-연안성 퇴적층을 발달시켰으며 이러한 분지 진화 과정 동안, 팔레오세-올리고세 초의 지각 인장 환경과 이후의 열적 침강, 그리고 이에 수반된 육상-연안에서 점진적으로 해양화되는 퇴적환경 변화의 영향으로 두꺼운 쇄설성 퇴적층이 집적되었으며, 유기물을 함유하는 이암과 석탄층이 반복적으로 협재된다. 이러한 지질-퇴적학적 특성은 제주분지가 잠재적 근원암을 포함할 가능성을 시사하며, 국내 해역에서 석유시스템 평가가 가능한 유망 지역으로 일찍부터 주목받아 왔다(Lee *et al.*, 1998; Kim and Son, 2013).

제주분지 남부는 1980년대 이후 시추 및 탄성과 탐사가 집중적으로 이루어진 지역이며, 다수의 탐사 시추를 통해 플라이오세에서 올리고세에 이르는 두꺼운 신생대 퇴적층이 확인되었다(Cheong *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 1998). 기존 연구들은 당시 이용 가능한 Rock-Eval 지표와 커팅 기반 시료를 바탕으로 근원암의 기본 성격과 잠재력을 평가하며 국내 석유시스템 연구의 기초를 마련하였다(Lee *et al.*, 1998; Kim and Son, 2013). 당시 연구는 이용 가능한 기술과 자료를 토대로 근원암 평가의 중요한 출발점을 마련했으나, 세부 층위별 유기물 조성 변화나 열진화사의 정

량적 해석과 같은 고해상도 분석은 기술적 제약으로 인해 제한적이었다.

최근 들어 유기지화학 분석 기술의 발전은 기존 Rock-Eval 중심의 근원암 해석이 갖는 한계를 보완할 수 있는 새로운 기회를 제공하고 있다. 특히 비트리나이트 반사도(VRo)와 HAWK-2 열분해 분석을 통합한 접근법은 열성숙이 진행된 근원암에서 T_{max} 왜곡, 수소지수(Hydrogen Index, HI) 과대평가와 같은 기존 Rock-Eval 기반 해석의 불확실성을 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 보고되고 있다(Hackley and Cardott, 2016). HAWK-2 분석은 다단계 가열 프로그램과 케로젠 기여 성분의 분리를 통해, 열성숙 단계별 생성 잠재력(Generative Organic Carbon, GOC)과 비생성 유기탄소(Non-Generative Organic Carbon, NGOC)를 정량적으로 평가할 수 있다는 점에서 전통적인 Rock-Eval 분석보다 향상된 해석을 가능하게 한다. 이러한 HAWK-기반 열분해 자료를 VRo와 결합함으로써, 근원암의 열진화 이력과 생성 잠재력을 보다 정밀하게 평가할 수 있으며, 이는 고성숙 분지에서의 석유시스템 해석에 중요한 장점을 제공한다.

제주분지와 구조적으로 연속된 남부의 시후분지를 포함하는 동중국해 대륙붕 지역에서는, 올리고세-하부 마이오세에 해당하는 핑후층(Pinghu Formation)을 주요 저류층 및 근원암으로 하는 유가스전이 다수 발견된 바 있다. 핑후층의 근원암은 주로 Type III 케로젠 기반의 이암-석탄 계열로 구성되어 있으며, 이는 제주분지 올리고세 퇴적층에서 보고되는 유기물 특성과 유사한 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 1998; Zhu *et al.*, 2012; Kim and Son, 2013; Yang *et al.*, 2023). Western slope belt와 central fold belt를 따라 형성된 구조적 함정들은 제주분지 남부까지 연장되는 것으로 해석되며, 이는 제주분지 또한 유사한 매몰-열사 조건을 경험했을 가능성을 시사한다. 따라서 시후분지는 제주분지 근원암 시스템을 재평가하는 데 중요한 지역적 아날로그 역할을 한다.

이처럼 새로운 분석 기술의 도입과 지역 분지 간 비교 연

구의 확대는 제주분지 근원암의 유기물 특성과 열진화 과정을 다시 평가할 필요성을 더욱 강조한다. 특히 시추공 J4는 제주분지에서 가장 깊은 올리고세 퇴적층을 포함하고 있어 분지의 근원암 진화사를 복원하는 데 가장 신뢰도 높은 정보를 제공한다. 이에 본 연구에서는 시추공 J4에서 확보한 이암 및 석탄 시료를 대상으로 HAWK-2 열분석 및 VRo 분석 등을 수행하였다. 이를 바탕으로 제주분지 남부 근원암의 유기물 조성과 열적 성숙도를 정량적으로 규명하고 향후 제주분지 석유시스템 모델 정밀화를 위한 핵심 입력자료를 제시하고자 한다. 본 연구의 통합적 접근은 제주분지 근원암의 생성·변환·열진화를 높은 해상도로 재구성함으로써, 향후 탐사 전략 수립 및 국내 해양분지 자원평가에 중요한 기초자료를 제공한다.

2. 연구지역 및 지질 배경

제주분지는 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin)의 북동부에 위치한 신생대 열개성 퇴적분지로, 한반도 남서부 해역에서 대만 북부 해역까지 발달한 대규모 배호 확장(back-arc extension) 계열 분지 시스템의 일부를 이룬다. 동중국해 대륙붕 분지의 열개 작용은 후기 백악기-팔레오세 이후 태평양판의 유라시아판 하부 섭입과 연관된 배호 확장에 의해 개시되었으며, 에오세까지 지각 인장이 본격적으로 진행된 것으로 해석된다(Jolivet *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 1995). 이후 에오세 말-올리고세 전환기에 일부 지역에서 용기와 침식이 발생하였고, 올리고세에서 중기 마이오세 동안에는 필리핀판의 섭입과 함께 열개 및 침강 작용이 지속되었다(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011). 후기 마이오세에는 분지 전반에 압축 응력이 작용하여 국지적인 용기와 지층 변형이 발생하였으며, 플라이오세 이후부터는 광역적인 침강 환경이 우세해진 것으로 보고되고 있다.

제주분지는 이러한 동중국해 대륙붕 분지 열개 시스템 내에서 구조적으로 시추분지의 북쪽 연장부에 해당하는 단일 열개분지로 해석된다(Lee *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011). 초기 연구에서는 중국 측 분지 명명 체계를 바탕으로 시추분지의 북부와 후지양(Fujiang) 분지의 남부 해역을 포함하는 영역으로 인식되었으며, Hyun *et al.* (1980)에 의해 제주분지로 명명되었다. 이후 분지 범위와 구획에 대한 다양한 해석이 제시되었으나, 최근에는 제주분지를 동중국해 지역에 발달한 신생대 열개분지군 중 하나의 독립적인 열개분지로 보는 해석이 일반적으로 받아들여지고 있다.

제주분지는 후기 백악기 이전의 화강암 및 변성암류 기반암 위에 형성되었으며, 북동-남서 내지 동-서 방향의 인장성 정단층과 점원단층(listric fault)에 의해 제어되는 구조적 함몰지의 특성을 보인다. 이러한 단층계는 기반암 블

록의 회전과 함께 지구대(graben) 및 반지구대(half-graben)를 형성하였고, 그 결과 분지 내에는 두꺼운 신생대 쇄설성 퇴적층이 집적될 수 있는 공간이 제공되었다.

제주분지의 신생대 퇴적층은 Yun (2019)가 제시한 남해 대륙붕 공식 생층서 체계를 기준으로 해석될 수 있다. 이에 따르면, 남부 제주분지에 위치한 J4 시추공에서는 약 601 m에서 플라이오세 상한, 973 m에서 마이오세 상한, 2,647 m에서 올리고세 상한, 그리고 약 3,772 m에서 전기 올리고세 상한이 인지된다(Yun, 2019; Lee *et al.*, 2026). J4 시추공은 이들 주요 생층서 경계를 모두 관통하며, 플라이오세부터 전기 올리고세에 이르는 신생대 퇴적층을 연속적으로 포함하는 대표적인 기준 시추공으로 평가된다. 생층서적으로 볼 때, J4 시추공 하부의 전기 올리고세 퇴적층은 주로 사암과 이암이 교호하는 쇄설성 퇴적물로 구성되며, 국지적으로 갈탄층과 화산쇄설성 퇴적물이 협재된다. 이는 열개 작용이 활발하던 시기의 육성 내지 연안 환경에서의 퇴적과 반복적인 해침·해퇴 과정이 반영된 결과로 해석된다. 상부로 갈수록 퇴적환경은 점진적으로 해양화되어, 올리고세 이후에는 이질-실트질 퇴적물이 우세한 해양성 퇴적층이 발달하는 양상을 보인다. 이와 같이 J4 시추공은 제주분지 남부에서 신생대 퇴적 환경의 변화와 유기물 축적 조건의 진화를 비교적 연속적으로 기록하고 있어, 제주분지 근원암 시스템을 해석하기 위한 핵심 기준 자료로 활용될 수 있다.

3. 분석시료 및 연구방법

3.1. 분석 시료

본 연구에서는 제주분지 남동부에 위치한 시추공 J4를 대상으로 근원암의 유기물 특성 및 열적 성숙도를 평가하였다(그림 1; 표 1). 시추공 J4는 최종 시추 심도 4,486 m에 이르며, 제주분지 내 플라이오세-올리고세 퇴적층 구간을 연속적으로 관통하고 있어 심도에 따른 유기물 축적 특성과 열적 진화 과정을 해석하기에 충분한 지질학적 연속성과 대표성을 제공한다.

시추 과정에서 확보된 커팅 시료는 굴진 중 다양한 암상이 혼재될 수 있어, 원지층의 유기물 특성을 직접적으로 반영하지 못할 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 시추 과정에서 확보된 커팅 시료의 육안 암상 관찰과 시추 기록을 바탕으로, 이암 파편이 전체 시료 부피의 약 70% 이상을 차지하는 구간만을 선별하여 분석에 활용하였다. 일부 구간에서는 소량의 석탄 파편이 혼입되어 관찰되었으나, 해당 파편의 함량은 대체로 10% 미만으로 제한적이었으며, 분석 대상 구간의 지화학적 특성을 지배할 수준은 아닌 것으로 판단된다. 이러한 선별 기준은 사암 또는 석탄 파편에 의

사용하였다. 선별된 석탄편은 아게이트 몰탈을 이용해 미세 파쇄한 뒤, 체질 과정을 거쳐 710 μm 이하의 입도 구간만을 분석 시료로 선정하였다. 입도 분리된 시료는 직경 25 mm 몰드에 장입한 후 에폭시 수지와 경화제를 혼합하여 포매(pelletizing)하였다. 포매된 시편은 상온에서 24시간 이상 경화시킨 후 몰드에서 분리하였다. 경화가 완료된 펠렛은 반사도 측정에 적합한 평탄한 표면을 확보하기 위해 단계적 연마를 수행하였다. 연마는 SiC 연마지와 다이아몬드 서스펜션을 이용한 거친 연마부터 최종 미세 연마까지 순차적으로 진행하였으며, 최종 단계에서는 0.05 μm 연마제를 사용하여 거울면 수준으로 마감하였다.

비트리나이트 반사도 측정은 한국지질자원연구원이 보유한 반사광 현미경 시스템(Hilger Fossil Not-2)을 이용하여 수행하였다. 제작된 펠렛은 침지유를 사용한 유침 조건

(Oil Immersion)에서 관찰하였으며, 반사도 측정에 적합한 비트리나이트 입자를 선별하여 측정을 진행하였다. 각 시료당 약 100회의 무작위 반사도 측정을 수행하였고, 이들의 산술평균을 해당 시료의 대표 비트리나이트 반사도 값으로 사용하였다.

4. 연구 결과

4.1. HAWK-2 분석 결과

시추공 J4에서 획득된 시료는 층서적으로 플라이오세, 마이오세, 후기 및 전기 올리고세 퇴적층으로 구분되며, 암상은 주로 이암과 석탄으로 구성된다. 본 연구에서는 각 구간에 대해 TOC, 케로젠 함량, T_{max} , HI, OI 이용한 열분해 분석 결과를 정리하였다(그림 2).

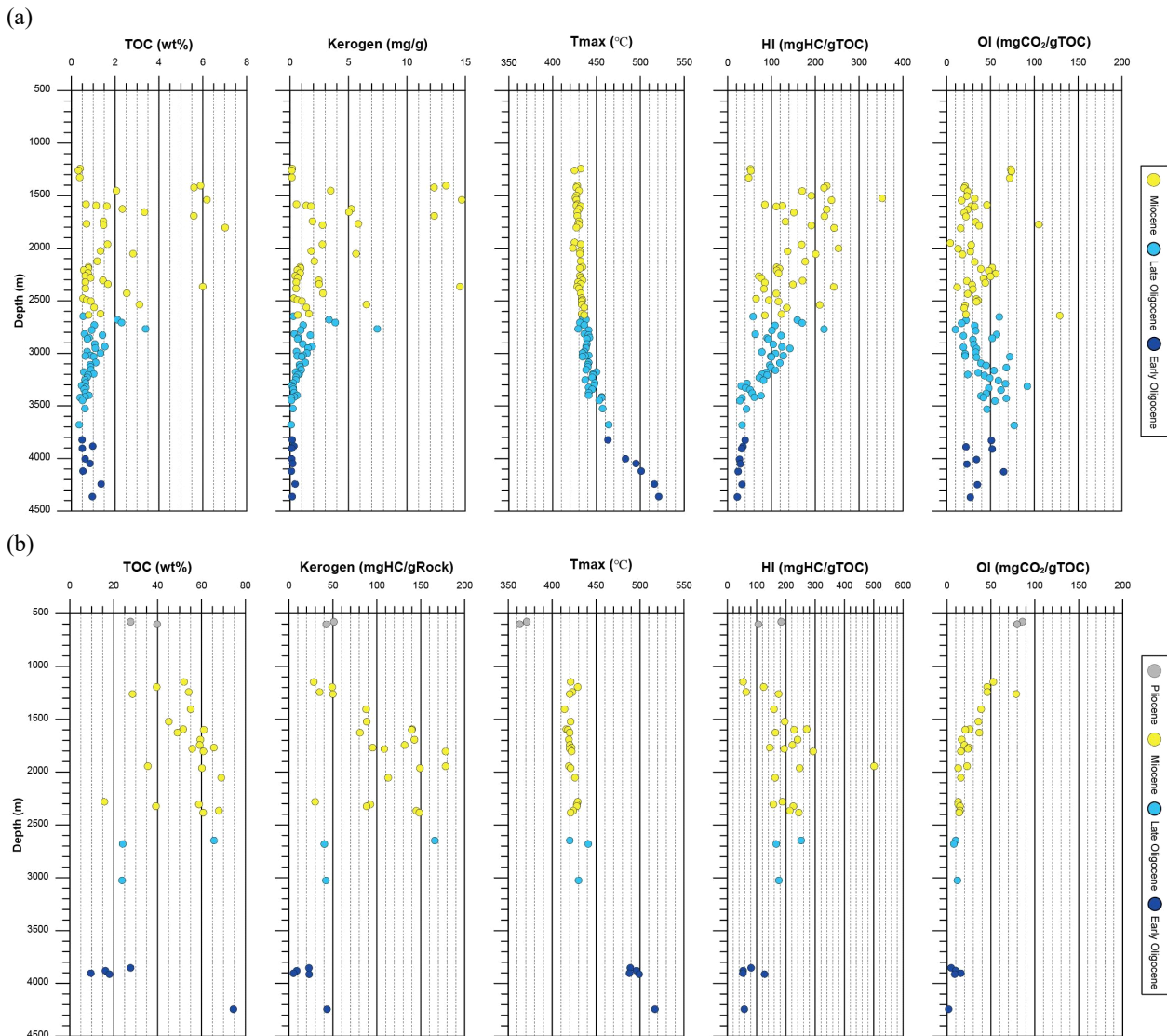


Fig. 2. Depth profiles of TOC (wt%), kerogen content (mg/g), and T_{max} ($^{\circ}\text{C}$) for (a) shale and (b) coal samples from the well J4.

마이오세 이암 시료의 TOC는 0.32~7.02 wt% 범위로 분포하며 평균값은 1.97 wt%이다. 상부 일부 구간에서는 TOC가 5 wt%를 초과하는 비교적 높은 값이 관찰되나, 이는 커팅 시료에 소량 포함된 석탄 파편의 영향이 부분적으로 반영되었을 가능성을 배제할 수 없다. 동일 시료의 케로젠 함량은 0.17~14.72 mgHC/gRock (평균 3.44 mgHC/gRock)로 나타난다. T_{max} 는 423~436°C (평균 430°C)로 측정되었으며, 시료 대부분은 미성숙 단계에 해당한다.

후기 올리고세 이암 시료의 TOC는 0.36~3.39 wt% (평균 0.94 wt%), 케로젠 함량은 평균 1.06 mgHC/gRock로 마이오세에 비해 상대적으로 낮은 범위를 보인다. T_{max} 는 429~464°C (평균 442°C)로 대부분 성숙 단계에 해당한다. 전기 올리고세 이암시료의 TOC는 0.49~1.36 wt% (평균 0.79 wt%), 케로젠 함량은 평균 0.24 mgHC/gRock로 시추공 전 구간에서 가장 낮은 범위를 보인다. T_{max} 는 463~521°C (평균 497°C)로 대부분 과성숙 단계에 해당한다.

석탄 시료는 이암과 구분되는 유기물 함량 분포를 보인다. 플라이오세-마이오세 석탄의 TOC는 15.74~69.02 wt% (평균 50.49 wt%)이며, 케로젠 함량은 평균 99.75 mgHC/gRock로 측정되었다. T_{max} 는 363~429°C (평균 417°C) 범위에 분포한다. 후기 올리고세 석탄의 TOC는 23.8~65.73 wt% (평균 37.87 wt%)이고, 케로젠 함량은 40.22~166.02 mgHC/gRock (평균 82.75 mgHC/gRock)로 나타난다. 이들 시료의 T_{max} 는 420~441°C (평균 430°C) 범위로 측정되었다. 전기 올리고세 석탄의 TOC는 9.6~74.54 wt% (평균 29.23 wt%)이고, 케로젠 함량은 5.11~43.24 mgHC/gRock (평균 20.56 mgHC/gRock)로 나타난다. 이들 시료의 T_{max} 는 488~517°C (평균 498°C) 범위로 측정되었다.

시추공 J4에서 확보된 이암과 석탄 시료의 HI와 OI 값은 층서 구간 및 암상에 따라 서로 다른 분포를 보인다. 마이오세 이암의 HI는 48~353 mgHC/gTOC, OI는 4~129 mgCO₂/gTOC 범위에 분포한다. 후기 올리고세 이암의 HI는 28~220 mgHC/gTOC, OI는 10~92 mgCO₂/gTOC 범위로 측정되었고, 전기 올리고세 이암의 HI는 22~40 mgHC/gTOC, OI는 22~65 mgCO₂/gTOC 범위에 분포한다. 석탄 시료의 HI는 이암에 비해 상대적으로 넓은 분포 범위를 보인다. 마이오세 석탄의 HI는 54~501 mgHC/gTOC, OI는 12~78 mgCO₂/gTOC 범위에 분포한다. 후기 올리고세 석탄의 경우 HI는 167~252 mgHC/gTOC, OI는 7~11 mgCO₂/gTOC 범위로 측정되었고, 전기 올리고세 석탄의 HI는 53~127 mgHC/gTOC, OI는 1~15 mgCO₂/gTOC 범위에 분포한다.

종합하면, 시추공 J4의 올리고세 퇴적층에서는 암상과 층서 위치에 따라 TOC, 케로젠 함량, T_{max} , HI-OI 분포가 구분되어 나타난다. 이암은 넓은 심도 구간에 걸쳐 연속적으로 분포하며 TOC와 HI 값의 변동폭이 크고, 석탄은 제한

된 층서 구간에서 높은 TOC와 다양한 HI 값을 보인다. T_{max} 는 이암과 석탄 모두에서 심도 증가에 따라 상승하는 경향을 보인다.

4.2. 비트리나이트 반사도 결과

시추공 J4에서 측정된 VRo는 약 0.20~1.80% 범위에 분포하며, 심도 증가에 따라 전반적으로 점진적인 상승 경향을 보인다(그림 3).

플라이오세 구간(약 577~703 m)에서는 VRo가 0.20~0.30% 범위로 매우 낮은 값을 나타낸다. 이 구간의 반사도 값은 시추공 전 구간 중 가장 낮으며, 심도 증가에 따른 변화 폭도 제한적이다. 마이오세 구간에서는 VRo가 0.43~0.73% 범위로 증가한다. 이 구간에서는 심도에 따른 VRo 증가가 비교적 연속적으로 나타나며, 약 2.6 km 전후에서 0.7% 이상의 값이 처음으로 확인된다. 심도 약 2.6 km 이후의 후기 올리고세 심부 구간에서는 VRo가 0.6~1.2% 범위까지 상승한다. 특히 3.7 km 이후인 전기 올리고세 구간에서는 1.3~1.8% 범위의 높은 반사도 값이 집중적으로 분포하며, 상부 구간에 비해 반사도 증가율이 더욱 뚜렷하다. 전체적으로 시추공 J4의 VRo 분포는 심도에 따라 낮은 값에서 높은 값으로 연속적인 증가 양상을 보이며, 상부에서

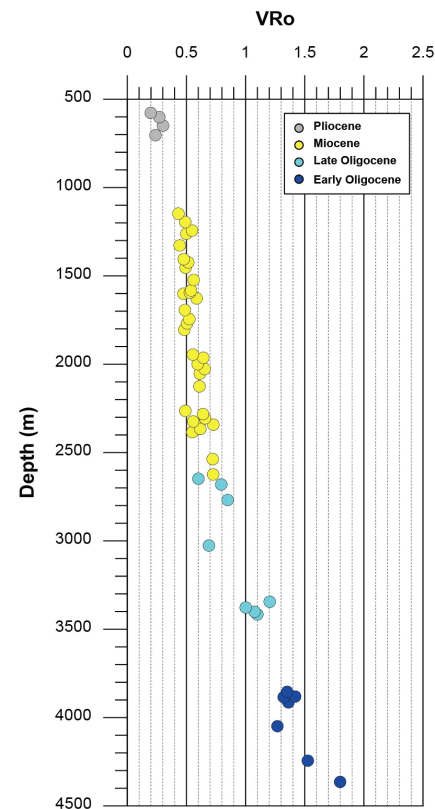


Fig. 3. Depth distribution of vitrinite reflectance (%VRo) for well J4.

하부로 갈수록 열적 성숙도가 단계적으로 변화하는 특징을 나타낸다.

5. 토 의

5.1. 전통적 근원암 평가

시추공 J4에서 측정된 HAWK-2 열분해 결과는 유기물 함량과 생성잠재력이 암상 및 지질시대에 따라 체계적으로 달라짐을 보여준다. 이암 시료의 TOC-S₂ 관계는 Poor ~ Very Good 등급까지 폭넓은 분포를 나타내며, 동일한 층서 구간 내에서도 유기물 집적이 상대적으로 우수한 시료와 빈약한 시료가 함께 산출된다. 시추공 J4의 이암은 TOC 0.3 ~ 7.0 wt%, S₂ 0.2 ~ 7.5 mgHC/gRock 범위로 측정되었으며(그림 4a; 표 2), 유기물 공급과 보존 조건이 공간적으로 불균질했음을 반영한다. 특히 후기 올리고세 이암 구간에서는 일부 시료에서 높은 TOC와 S₂ 값이 확인될 뿐만 아니라, 해당 심도 구간이 이미 석유생성구간에 진입한 열성숙 단계에 해당한다는 점에서, 유기물 분포의 불균질성에도 불구하고 실제 탄화수소 생성이 가능했던 의미 있는 근원암 구간으로 해석된다.

반면, 석탄층은 단위 시료 기준에서 이암보다 현저히 높

은 유기물 함량을 보인다. 시추공 J4 석탄의 TOC는 9.6 ~ 74.5 wt%, S₂는 5.1 ~ 178.3 mgHC/gRock 범위로 측정되었다(그림 4b; 표 2). 이러한 값은 육상 기원의 식물성 유기물이 집중적으로 축적·보존된 결과를 반영하며, 단위 두께당 생성잠재력 측면에서는 매우 높은 값을 나타낸다. 다만 석탄층은 층서적으로 제한된 구간에서만 산출되며, 이암과 같은 연속적인 분포를 보이지 않는다는 점에서 분지 규모의 기여도를 해석할 때에는 주의가 필요하다.

HI-OI 자료 역시 암상과 층서 위치에 따른 유기물 특성 차이를 명확히 보여준다(그림 5a; 표 3). 이암의 경우 마이오세-후기 올리고세에서 HI 값이 48 ~ 353 mgHC/gTOC로 매우 넓은 범위를 보이며, 일부 시료는 Type II/III 영역에 해당한다. 이 시기 동안 유기물의 기원과 보존 조건이 시·공간적으로 크게 변동했음을 시사한다. 반면 전기 올리고세 이암은 HI가 주로 22 ~ 40 mgHC/gTOC 범위에 분포하며 대부분 Type IV 영역에 해당하여, 열성숙도의 증가와 함께 예상 탄화수소 생성잠재력이 감소한 양상을 보인다.

석탄 시료의 HI 분포는 이암보다 더욱 넓은 범위를 나타낸다(그림 5b; 표 3). 마이오세-후기 올리고세 석탄에서는 HI 54 ~ 501 mgHC/gTOC로 일부 시료가 Type II/III 영역에 분포하지만, 전기 올리고세 석탄에서는 HI가 53 ~ 127

Table 2. TOC, kerogen content, and source-rock potential classification for shale and coal samples from Wells J4.

Well	Type	TOC (wt%)	Kerogen (mg/g)	Evaluation
J4	Shale	0.3 ~ 7.0	0.2 ~ 7.5	Poor ~ Very Good
	Coal	9.6 ~ 74.5	5.1 ~ 178.3	Good ~ Excellent

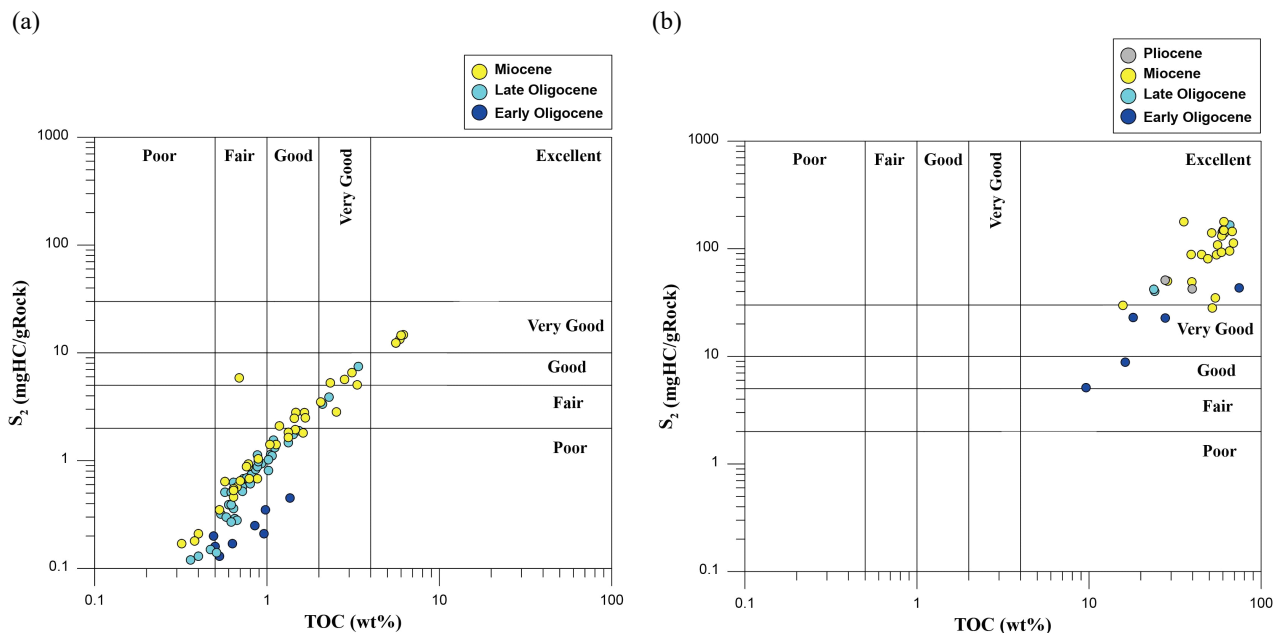
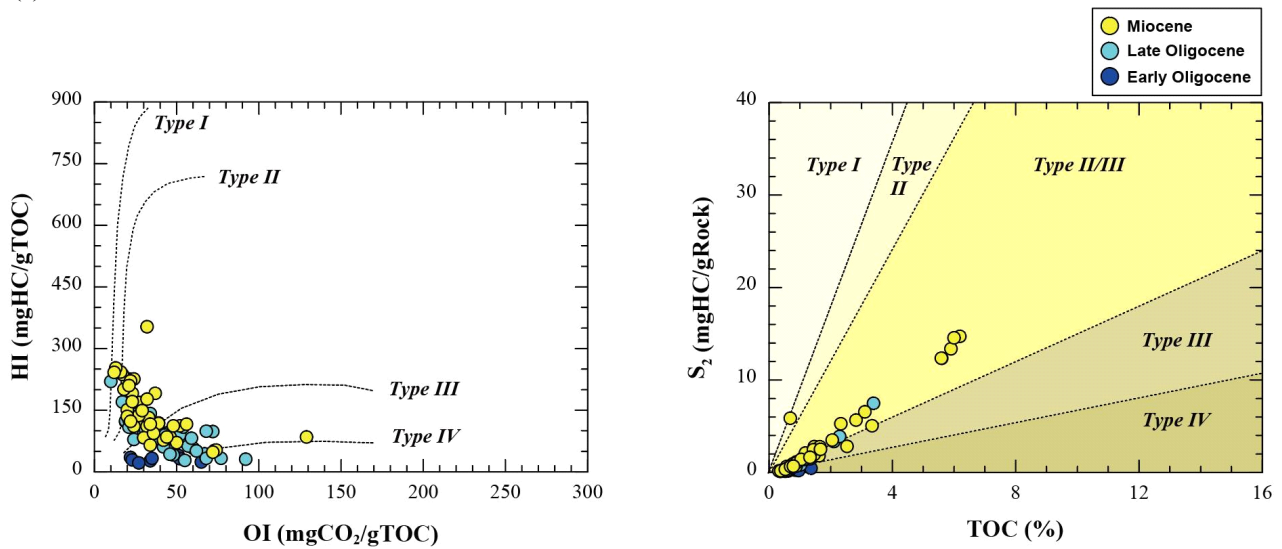


Fig. 4. TOC-S₂-based assessment of source-rock generative potential for Well J4.

Table 3. Ranges of HI-OI values and corresponding kerogen type classifications for shale and coal samples from Well J4 by geological interval.

Well	Geological	HI (mgHC/gTOC)	OI (mgCO ₂ /gTOC)	Evaluation	
Shale	J4	Miocene	48 ~ 353	4 ~ 129	Type II/III
		Late Olig.	28 ~ 220	10 ~ 92	Type II/III
		Early Olig.	22 ~ 40	22 ~ 65	Type IV
Coal	J4	Pliocene	106 ~ 157	79 ~ 85	Type II/III
		Miocene	54 ~ 501	12 ~ 78	Type II/III
		Late Olig.	167 ~ 252	7 ~ 11	Type II/III
	Early Olig.	53 ~ 127	1 ~ 15	Type III, IV	

(a)



(b)

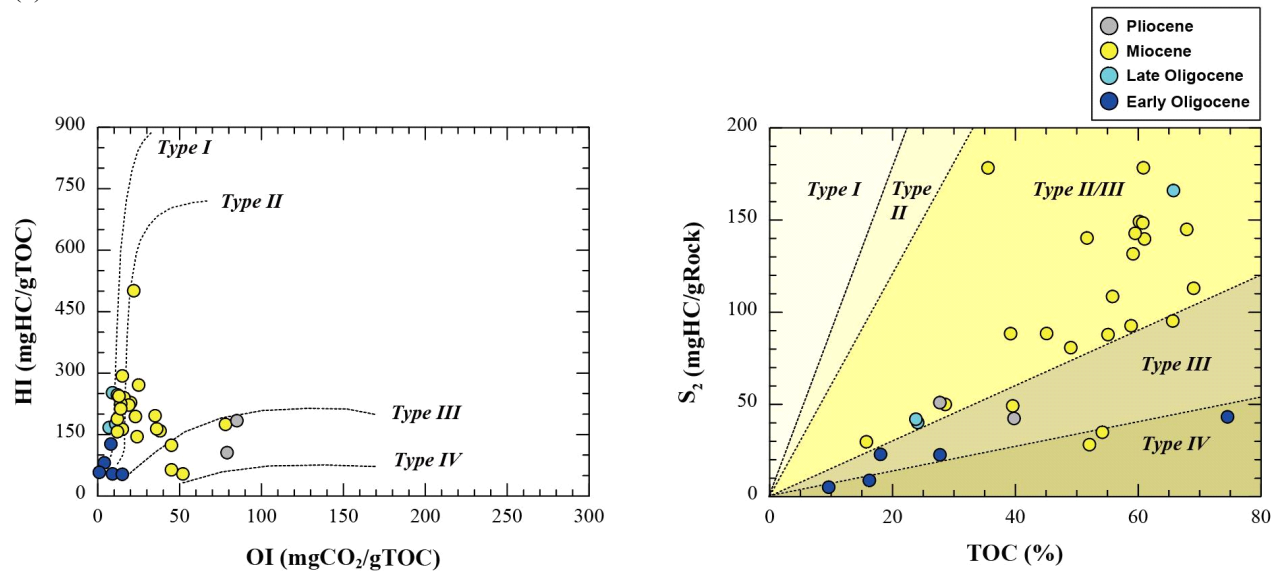


Fig. 5. Organic matter type and generative potential of (a) shale samples (b) coal samples from Well J4. Left panels show kerogen type classification based on HI-OI diagrams, and right panels illustrate hydrocarbon generative potential using S₂-TOC relationships.

mgHC/gTOC 범위로 감소하며 주로 Type III-IV 특성을 보인다. 이는 심부 매몰에 따른 열성숙의 진행과 함께, 유기물 조성 변화가 반영된 결과로 해석된다.

종합하면, HAWK-2 열분해 결과는 제주분지 남부 근원암 시스템이 암상, 층서 위치, 열진화 이력에 따라 뚜렷한 이질성을 지니는 복합적 구조임을 보여준다. 이암은 넓은 심도 구간에 걸쳐 연속적으로 분포하며 구간별로 상이한 생성잠재력을 나타내는 반면, 석탄은 제한된 층서 구간에서 매우 높은 유기물 농도와 단위 시료 기준의 높은 생성잠재력을 보인다. 이러한 특성은 제주분지 남부 근원암을 단일 암상 중심으로 해석하기보다는, 암상별 분포 특성과 함께 유기물 유형, 생성잠재력, 열성숙도 진화 양상의 차이를 종합적으로 고려한 석유시스템 해석이 필요함을 시사한다.

특히 후기 올리고세 이암 구간은 일부 시료에서 높은 TOC와 S₂ 값을 보일 뿐 아니라, 해당 심도 구간이 석유생성구간에 해당하는 열성숙 단계에 위치한다는 점에서 제주분지 남부에서 가장 유효한 근원암 구간으로 해석된다. 이는 유기물 분포의 불균질성에도 불구하고, 후기 올리고세 층서가 실제 탄화수소 생성이 가능했던 핵심 근원암층으로 기능했을 가능성이 높음을 의미한다.

한편 전기 올리고세 심부 구간의 이암 및 석탄 시료에서는 T_{max}가 460°C 이상으로 상승한 고성숙 조건임에도 불구하고, Classic 모드 기반 Rock-Eval 분석을 적용할 경우 잔류 비투멘 또는 열분해 산물이 S₂ 피크에 기여하여 HI가 실제 케로젠 기반 생성잠재력보다 과대평가될 가능성이 있는 것으로 알려져 있다(Hackley & Cardott, 2016). 본 연구에서는 PAM 모드를 적용함으로써 이러한 비케로젠 기여 성

분을 사전에 제거하였으며, 그 결과 전기 올리고세 시료의 HI는 주로 20~80 mgHC/gTOC 범위로 수렴하고, T_{max}-VRo 관계 또한 암상별로 보다 일관된 열성숙 경향을 나타낸다(그림 5, 6). 이러한 결과는 HAWK-2 기반 분석이 고성숙 근원암에서 HI 및 T_{max} 해석상의 왜곡을 완화하는 데 효과적일 수 있음을 보여준다.

5.2. 암상별 T_{max}-VRo 관계를 이용한 제주분지 열성숙도 해석

시추공 J4에서 획득된 HAWK-2 T_{max}와 비트리나이트 반사도는 심도 증가에 따라 일관된 열진화 구배를 보이며, 올리고세 퇴적층의 열성숙도 변화를 정량적으로 규명하는 데 중요한 기초자료를 제공한다. 약 2.6~3.4 km 구간에서는 T_{max} 435~455°C, VRo 0.7~1.0%가 동시에 나타나 국제적으로 정의되는 초기-중기 석유생성단계(Oil Window)에 해당한다(그림 2, 4). 이는 제주분지 남부에서 석유생성이 가장 활발하게 진행될 수 있는 주요 구간(kitchen)으로 해석된다. 3.4 km 이후의 심부에서는 T_{max}가 460°C 이상, VRo가 1.3% 이상으로 상승하여, 습성가스(wet gas)에서 건성가스(dry gas) 단계로 이행하는 전형적인 가스 생성대의 열성숙 특성이 명확히 나타난다.

퇴적분지의 열진화 지표인 T_{max}와 VRo는 서로 다른 물리·화학적 과정을 반영하므로, 두 지표의 상관성을 지역별로 검증하고 회귀식을 산정하는 과정이 필수적이다. 실제로 T_{max}-VRo 회귀식은 케로젠 조성, 암상, 열진화 이력에 따라 크게 달라지며(Jarvie *et al.*, 2001; Hackley and Cardott, 2016; Waliczek *et al.*, 2021), 외부 분지에서 제안된 단일 회귀식을 적용할 경우 성숙도가 체계적으로 왜곡될 수 있다. 시추공 J4 시료에 대해 암상별로 T_{max}-VRo 관계를 분석한 결과, 이암과 석탄 간의 특성이 명확히 구분되었다. 이암에서는 %VRo = 0.019 × T_{max} - 7.99의 회귀식이 도출되었다(그림 6). 다만 T_{max}-VRo 상관관계는 케로젠 조성뿐만 아니라 암상, 열진화 이력, Ro suppression 효과 등 다양한 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서 도출된 기울기(0.019)는 유기물 조성을 단정적으로 규정하기보다는, 제주분지 이암이 순수한 육상 기원(Type III) 케로젠만으로 설명되기에는 다소 높은 열반응성을 보인다는 점을 시사하는 보조적 지표로 해석하는 것이 타당하다. 이러한 해석은 HI-OI 분포와 TOC-S₂ 기반 생성잠재력 평가 결과와 함께 종합적으로 고려할 때 보다 합리적으로 뒷받침된다.

반면 석탄 시료에서는 %VRo = 0.012 × T_{max} - 4.29의 보다 완만한 회귀식이 도출되었다(그림 6). 본 자료에서 석탄과 이암의 T_{max} 분포는 상당 부분 중첩되며, 그림에도 불구하고 동일하거나 유사한 T_{max} 조건에서 석탄의 VRo가 이암보다 낮게 나타나는 경향이 관찰된다. 이러한 차이는

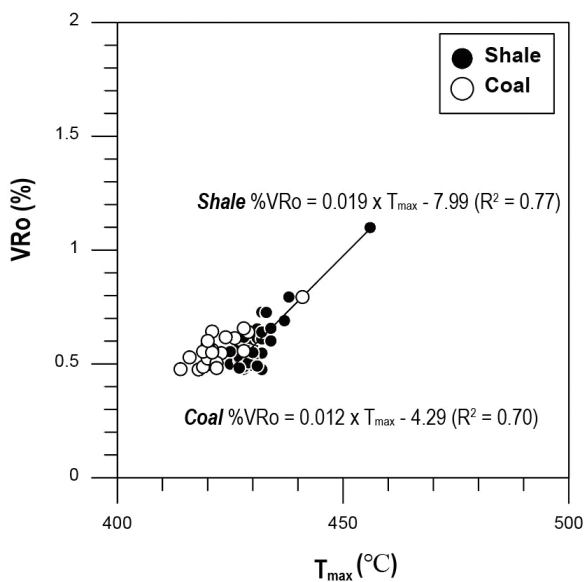


Fig. 6. Cross-plot of T_{max} versus vitrinite reflectance (%VRo) for samples from the Well J4.

Table 4. Comparison of published T_{max} -VRo calibration equations from various basins and regions.

Basin (Region)	Regression Equation	Range of Applicability	Reference
Barnett Shale (USA)	$\%VRo = 0.018 \times T_{max} - 7.16$	430-500°C 0.5-1.5%VRo	Jarvie <i>et al.</i> , 2001
Global multi-basin	$\%VRo = 0.013 \times T_{max} - 5.0$	440-500°C 0.7-1.5%VRo	Evenick, 2021
Duvernay (CANADA)	$\%VRo = 0.0149 \times T_{max} - 5.85$	430-480°C 0.6-1.4%VRo	WÜST <i>et al.</i> , 2013
Barnett/Woodford Shale (USA)	$\%VRo = 0.01867 \times T_{max} - 7.306$	430-480°C 0.6-1.3%VRo	Hackley and Cardott, 2016
Western Outer Carpathians (Poland)	$\%VRo = 0.0152 \times T_{max} - 5.9375$	421-485°C 0.47-1.49%VRo	Waliczek <i>et al.</i> , 2021
Western Outer Carpathians (Poland)	$\%VRo = 0.0135 \times T_{max} - 5.1855$	421-485°C 0.47-1.49%VRo	Waliczek <i>et al.</i> , 2021

석탄 내 립티나이트·이너티나이트·비투멘 등 광학적으로 어두운 성분의 공존으로 인해 비트리나이트 반사도가 상대적으로 낮게 측정될 수 있는 Ro suppression 효과와 관련될 가능성이 있다. 다만 T_{max} -VRo 관계는 케로젠 조성, 암상, 열진화 이력 등 다양한 요인의 영향을 받으므로, 본 회귀식 차이는 Ro suppression을 포함한 복합 요인의 결과로 해석하는 것이 타당하다.

국제적으로 보고된 T_{max} -VRo 회귀식과 비교하면(표 4), 시추공 J4 이암에서 도출된 기울기(0.019)는 Barnett-Woodford 셰일(Hackley and Cardott, 2016)의 회귀식($\%VRo = 0.01867 \times T_{max} - 7.306$)과 유사한 범위에 해당한다. 반면, Type III 케로젠이 우세한 폴란드 외카르파티아 지역에서는 상대적으로 완만한 기울기(0.0135-0.0152)가 보고된 바 있다(Waliczek *et al.*, 2021). 다만 T_{max} -VRo 상관관계식은 유기물 조성뿐만 아니라 암상, 열진화 이력, Ro suppression 효과 등 다양한 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 동일한 Type II 우세 분지들 간에도 회귀 기울기에서 차이가 보고되고 있다(표 4). 이러한 점을 고려할 때, 본 연구에서 관찰된 기울기는 제주분지 이암의 열반응성이 전형적인 Type III 근원암과는 구별되는 경향을 보인다는 점을 시사하는 하나의 비교 지표로 해석하는 것이 타당하며, 유기물 조성에 대한 해석은 HI-OI 분포, TOC-S₂ 관계 등 다른 지화학 지표와 함께 종합적으로 이루어져야 한다.

종합하면, 시추공 J4의 열성숙도 해석에서 확인된 암상별 T_{max} -VRo 관계는 지역 회귀식을 사용하는 것이 필수적임을 보여준다. 외부 회귀식을 그대로 적용할 경우, 이암의 성숙도는 과대평가되고 석탄은 과소평가되는 체계적 오류가 발생할 수 있다.

5.3. GOC 기반 근원암 생성잠재력의 정량적 재해석

근원암의 생성잠재력은 전통적으로 TOC, HI, T_{max} 등의

지표를 조합하여 평가되어 왔으나, 실제로 석유·가스도 전환될 수 있는 유기탄소의 양을 직접적으로 정량화하는 지표는 GOC이다. GOC는 전체 유기탄소 중 열분해를 통해 자유 탄화수소(S₁) 및 케로젠 분해 산물(S₂)로 전환 가능한 분획만을 분리하여 산출하므로, 근원암의 실질적인 탄화수소 생성 효율을 평가하는 데 핵심적인 지표로 활용된다. 특히 열성숙이 상당히 진행된 분지에서는 현재의 TOC나 HI 값만으로 초기 생성잠재력을 재구성하기 어렵기 때문에, TOC 중 실제로 탄화수소 생성에 기여하는 유기탄소의 비율을 의미하는 %GOC에 기반한 해석이 필수적이다.

시추공 J4에서 산출된 %GOC는 심도 및 열성숙 단계에 따라 뚜렷한 차이를 보인다(그림 7; 표 5). T_{max} 435°C를 기

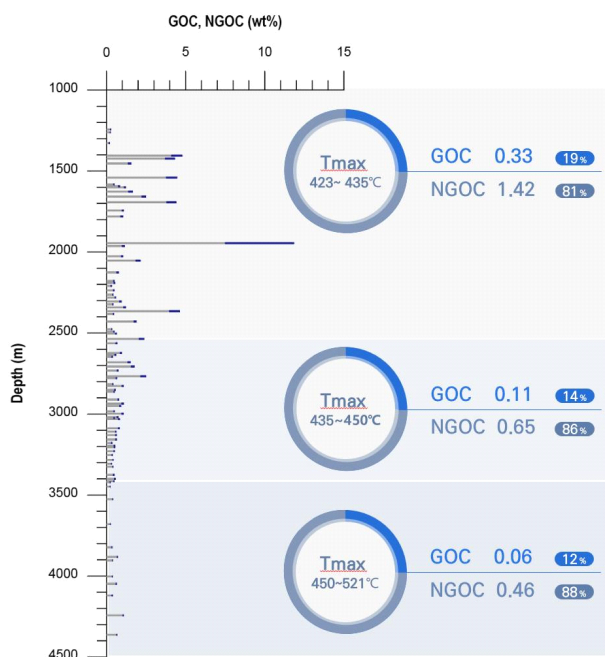
**Fig. 7.** Depth profiles of GOC and NGOC for Well J4.

Table 5. Depth-dependent thermal maturity stages showing measured parameters (T_{max} , HI, %GOC) and calculated parameters ($TR_{(z)}$ and %GOC₀) for the J4 well.

Stage	Depth (m)	T_{max} (°C)	Average HI (mgHC/gTOC)	$TR_{(z)}$ (%)	%GOC	%GOC ₀
Immature	1,243-2,536	423~435	150	0	~19	19
Mature	2,563-3,400	435~450	97	35	~14	21.5
Overmature	3,415-4,363	450~521	31	79	~12	58.1

Table 6. Comparison of source rock characteristics from Well J4 with global shale plays and Type III coal-derived basins.

Basin/Well	Kerogen Type	TOC (wt%)	HI (mgHC/gTOC)	GOC (%)	NGOC (%)	Remarks	REF
J4	Type II/III	0.3-7.0	22-353	12-19	81-88	Mixed Terrestrial-Marine	This study
Haynesville Shale (USA)	Type II	2-5	200-400	~60	~40	High-quality Gas Shale	Hammes <i>et al.</i> , 2011
Barnett Shale (USA)	Type II	4-8	200-600	40-55	45-60	Shale Source Rock	Jarvie <i>et al.</i> , 2007
Montney (Canada)	Type II/III	2-6	100-250	20-30	70-80	Mixed Origin (gas-prone)	Chalmers and Bustin, 2012
Type III (Coal-derived)	Type III	1-5	<200	<15	>85	Gas-prone Potential	Peters and Cassa, 1994

준으로 구분할 때, 열적으로 미성숙한 구간(1,243~2,536 m)에서는 %GOC의 최대값이 약 19%로 나타난다. 이 구간은 HI-OI 분포상 Type II/III 유기물이 우세하며, 열분해 이전 단계에서 생성 가능한 유기탄소가 상대적으로 보존된 상태를 반영한다. 반면, 성숙 단계(2,563~3,400 m)에서는 %GOC의 최대값이 약 14% 수준으로 감소하며, 이는 oil window 진입 이후 열성숙의 진행에 따라 생성가능 유기탄소의 일부가 이미 전환 소모되었음을 시사한다. 과성숙 단계(3,415~4,363 m)의 심부 구간에서는 %GOC의 최대값이 약 13% 수준으로 더 감소하는 경향을 보이며, 장기간의 열진화 과정 동안 생성가능 유기탄소의 상당 부분이 소모된 상태로 해석된다.

그러나 현재 관측된 %GOC 분포만으로는 열성숙 이전 단계에서 근원암이 보유했을 초기 생성가능 유기탄소(GOC₀)의 규모와, 열진화 과정에서의 소모 정도를 정량적으로 제약하기에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 Jarvie (2012)가 제시한 관계식을 적용하여, 변환율(Transformation ration, TR)을 매개로 현재 %GOC와 초기 %GOC₀의 관계를 정량적으로 해석하였다.

구체적으로, 열분해 영향이 제한적인 미성숙 구간에서 측정된 평균 HI 값(≈150 mgHC/gTOC)을 초기 유기물 조성을 가장 잘 보존한 현재 관측값, 즉 초기 수소지수의 보수적 대리값(HI_{O,proxy})으로 정의하였다. 이를 기준으로 성숙도 구간별 평균 HI를 이용하여 TR을 다음과 같이 역산하였다(표 5).

$$TR_{(z)} = 1 - \frac{HI_{(z)}}{HI_{O,proxy}} \quad (1)$$

그 결과, 미성숙 구간에서는 TR ≈ 0%로 정의되며, 성숙 구간의 평균 HI (≈97 mgHC/gTOC)는 TR ≈ 35%에 해당한다. 반면 과성숙 구간의 평균 HI (≈31 mgHC/gTOC)는 TR ≈ 79%로 계산되어, 심도 증가에 따라 생성가능 유기탄소의 소모가 누적적으로 진행되었음을 지시한다.

산정된 TR을 현재 관측된 %GOC에 적용하여 심도별 초기 생성가능 유기탄소 비율(%GOC₀)을 다음 식으로 역산하였다.

$$\%GOC_0 = \frac{\%GOC_{current,(z)}}{1 - TR_{(z)}} \quad (2)$$

그 결과, 미성숙 구간에서 평균 %GOC (≈19%)는 곧 보수적인 초기 %GOC₀로 해석된다. 성숙 구간에서는 평균 %GOC (≈14%)가 TR ≈ 35%를 고려할 경우 약 21% 수준의 %GOC₀에 해당하며, 과성숙 구간에서는 평균 %GOC (≈12%)가 TR ≈ 79%를 고려할 때 약 58% 수준의 %GOC₀로 환산된다(표 5). 특히 복원된 %GOC₀의 상위 범위는 북미 Montney 등 혼합기원(Type II/III) 가스 셰일에서 보고된 생성가능 유기탄소 비율의 하한부와 중첩되며(표 6), 이는 제주분지 남부 근원암이 열성숙 이전 단계에서는 국제적으로 알려진 주요 셰일 근원암과 비교 가능한 생성잠재

력을 보유했을 가능성이 있음을 시사한다. 이러한 심도별 %GOC₀ 값은 열분해 이전의 단일한 초기 상태를 정밀하게 재현한 결과라기보다는, 각 성숙도 구간에서 현재 관측되는 %GOC가 열성숙의 누적 효과에 의해 얼마나 감소했는지를 보수적으로 제약한 값으로 해석된다.

종합하면, J4 시추공에서 관측되는 %GOC의 심도별 감소는 단순한 유기물 함량 차이라기보다는, 열성숙의 진행에 따른 생성가능 유기탄소의 단계적 전환-소모에 의해 지배되고 있음을 시사한다. 본 연구의 보수적 %GOC₀ 복원 결과는 제주분지 남부 근원암이 현재는 제한적인 잔존 생성잠재력을 보이나, 열성숙 이전 단계에서는 현재보다 유의하게 높은 생성가능 유기탄소 비중을 보유했을 가능성이 있음을 정량적으로 뒷받침한다. 다만, 실제 탄화수소의 생성량, 배출 시기 및 포집 효율은 향후 석유시스템 모델링과 추가적인 지질-지화학적 제약을 통해 보다 정밀하게 평가될 필요가 있다.

6. 결론

본 연구에서는 시추공 J4의 HAWK-2 열분해 분석과 비트리나이트 반사도 자료를 통합하여, 제주분지 남부 근원암의 암상별 특성, 열성숙 진화 양상, 그리고 생성잠재력의 변화를 종합적으로 규명하였다. 분석 결과, 제주분지 남부 근원암 시스템은 암상에 따라 생성 특성과 열성숙 진화 양상이 뚜렷하게 구분되는 복합 근원암 체계로 해석된다. 특히 후기 올리고세 이암 구간은 일부 시료에서 높은 TOC와 HI 값을 보일 뿐 아니라, 해당 심도 구간이 oil window에 해당하는 열성숙 단계에 위치한다는 점에서 제주분지 남부에서 가장 유효한 근원암층으로 해석된다.

이암은 넓은 심도 구간에 걸쳐 연속적으로 분포하며, 전반적으로 Poor~Very Good 수준의 유기물 함량과 넓은 범위의 HI 값을 나타낸다. 이러한 HI의 큰 변동폭은 유기물 공급 조건과 열성숙도의 공간적·수직적 변화를 반영하며, 일부 구간에서는 실제 탄화수소 생성이 가능했던 생성잠재력을 지닌 근원암으로 기능했음을 보여준다. 반면 석탄층은 층서적으로 제한된 구간에서만 산출되지만, 매우 높은 TOC를 통해 단위 시료 기준으로는 가장 높은 생성잠재력을 보인다.

열성숙도 측면에서 시추공 J4는 심도 증가에 따라 oil window에서 가스 생성 구간으로 점진적으로 이행하는 전형적인 열성숙 구배를 보인다. 암상별 T_{max}-VR₀ 회귀 분석 결과, 이암과 석탄은 서로 다른 기울기를 나타내며, 이는 케로젠 조성과 Ro suppression 효과의 차이에 기인한 것으로 해석된다. 이러한 결과는 제주분지 근원암의 성숙도 평가 시 단일 회귀식 적용의 한계를 보여주며, 암상별 지역 회귀

식을 적용한 보정의 필요성을 명확히 제시한다.

GOC 기반 생성잠재력 해석 결과, J4 시추공에서 현재 관측되는 %GOC은 최대 약 19% 수준으로, 잔존 생성잠재력은 전반적으로 제한적인 것으로 나타난다. 반면, 심도별 열성숙도와 HI의 변화를 고려하여 TR을 매개로 보수적으로 복원한 %GOC₀는 약 19~58% 범위로 확대된다. 이는 올리고세 초기 단계에서 제주분지 남부 근원암이 현재보다 유의하게 높은 생성가능 유기탄소 비중을 보유했을 가능성을 시사하며, 열성숙 이전에는 상대적으로 우수한 생성잠재력을 지닌 근원암 시스템이 존재했음을 지지한다. 이러한 결과는 장기간의 열성숙 과정 동안 생성가능 유기탄소의 상당 부분이 이미 전환-소모되었음을 의미하며, 제주분지 남부 근원암이 과거에는 의미 있는 탄화수소 생성이 가능했을 잠재력을 지니고 있었음을 보여준다.

종합하면, 제주분지 남부 근원암 시스템은 분지 전반에 걸쳐 누적적인 생성 기여를 담당한 혼합기원 이암과, 국지적으로 매우 높은 생성잠재력과 심부 고성숙 특성을 보이는 석탄이 공존하는 복합 근원암 체계로 이해될 수 있다. 본 연구에서 제시한 암상별 T_{max}-VR₀ 회귀식과 GOC 기반 생성잠재력 해석은 향후 제주분지 석유시스템 모델링에서 근원암 입력값의 불확실성을 줄이고, charge timing, 생성-배출-이동 과정, 잔존 포집 가능성 평가를 포함한 3차원 석유시스템 모델의 정밀도를 향상시키는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국석유공사의 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상자원부 유전개발사업출자, 한국지질자원연구원(KIGAM)의 지원(GP2025-028)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cheong, T.J., Ryu, B.J., Park, K.S., Bong, P.Y., Seo, S.Y., Son, B.K., Son, J.D., Shin, W.C., Oh, J.H., Lee, H.Y., Chung, B.H., Huh, D.G., Kwon, Y.I., Kim, S.J., Kim, H.T., Sunwoo, D., Yoo, D.G., Lee, Y.J., Hwang, I.G., Kang, D.H., Kang, M.H., Kong, G.S., Koo, N.H., Kim, K.O., Kim, S.P., Kim, J.H., Kim, Y.G., Kim, H.J., Hwang, G.D., Seo, G.S. and Choi, J.K., 2002, Evaluation of petroleum potential in the southern part of Korean offshore, KR-02-12, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 140 (in Korean with English abstract).
- Chalmers, G.R.L. and Bustin, R.M., 2012, Geological evaluation of Halfway-Doig-Montney hybrid gas shale-tight gas reservoir, northeastern British Columbia: Marine and Petroleum Geology, 38, 53-72, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.08.004>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.01.002>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103946>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010>.
- Hammes, U., Hamlin, H.S. and Ewing, T.E., 2011, Geologic analysis of the Upper Jurassic Haynesville in east Texas and west Louisiana. *AAPG Bulletin*, 95, 1643-1666, <https://doi.org/10.1306/02141110128>.
- Hyun, B.G., Koo, J.H., Kwon, B.D., Kim, S.W., Min, S.S., Park, G.S., Park, G.P., Park, Y.S., Boo, K.J., Seo, S.Y., Shin, S.C., Shin, H.J., Yang, S.J., Yoon, H.S., Lee, D.H., Jung, S.H. and Cho, G.J., 1980, Petroleum resources potential in the continental shelf of Korea, KR-80-6, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 120 (in Korean with English abstract).
- Jarvie, D.M., 2012, Shale resource systems for oil and gas: Part2-shale-oil resource systems. Shale reservoirs-giant resources for the 21st century: AAPG memoir, 97, 89-119, <https://doi.org/10.1306/13321447M973489>.
- Jarvie, D.M., Claxton, B.L., Henk, B. and Breyer, J.A., 2001, Oil and shale gas from Barnett Shale, Ft. Worth Basin, Texas. In: AAPG Annual Meeting, Denver. AAPG Annual Meeting Program, p. A100.
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.R. 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, <https://doi.org/10.1306/1219060606068>.
- Jolivet, L., Huchon, P. and Rangin, C., 1989, Tectonic setting of Western Pacific marginal basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.
- 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).
- 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, <https://doi.org/10.1306/08010505020>.
- Lee, J., Lee, J., Je, Y., Yoon, S., Paik, S., Han, S., Woo, A., Jeon, J., Lim, D., Lim, S., Choi, J., Kim, E. and Kim, G., 2026, 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, 178-181 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.J., Yun, H.S., Cheong, T.J., Kwak, Y.H. and Oh, J.H., 1997, Geochemical characteristics of organic matter in the Tertiary sediments from the JDZ Blocks, offshore Korea. *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 6, 25-36 (in Korean with English abstract).
- Peters, K.E. and Cassa, M.R., 1994, Applied source rock geochemistry: Chapter 5: Part II. Essential elements, In: Magoon, L.B. and Dow, W.G. (eds.), *The petroleum system-From source to trap*: AAPG Memoir, 60, 93-120, <https://doi.org/10.1306/M60585C5>.
- Yang, Y.C., Xie, X.J., Li, Y.C., Guo, G., Xi, X. and Ding, W., 2023, Formation and distribution of coal measure source rocks in the Eocene Pinghu Formation in the Pinghu slope of the Xihu depression, east China Sea Shelf basin. *Acta Oceanologica Sinica*, 42, 254-269, <https://doi.org/10.1007/s13131-023-2176-8>.
- 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).
- Waliczek, M., Machowski, G., Poprawa, P., Świerczewska, A. and Więclaw, D., 2021, A novel VRo, T, 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, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103672>.
- Wang, G.M., Coward, M.P., Yuan, W., Liu, S. and Wang, W., 1995, Fold growth during basin inversion—Example from the East China Sea Basin. Geological Society, London, Special Publications, 88, 493-522.
- 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.
- Wüst, R.A., Hackley, P.C., Nassichuk, B.R., Willment, N. and Brezovski, R., 2013, Vitrinite reflectance versus pyrolysis Tmax data: Assessing thermal maturity in shale plays with special reference to the Duvernay shale play of the Western Canadian Sedimentary Basin, Alberta, Canada. Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific, Brisbane, Australia, November 2013, SPE- 167031-MS, <https://doi.org/10.2118/167031-MS>.
- Zhu, Y., Li, Y., Zhou, J. and Gu, S., 2012, Geochemical characteristics of Tertiary coal-bearing source rocks in Xihu depression, East China Sea basin. *Marine and Petroleum Geology*, 35, 154-165.