

남해 대륙붕 제주분지의 석유시스템 모델링

김성희¹ · 손병국^{2,*}

¹과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

남해 대륙붕 제주분지에 대한 석유시스템 모델링을 수행하여 이 지역의 탄화수소 생성과 이동 그리고 집적 형태를 분석하였다. 1D 모델링 결과, 연구된 모든 시추공은 석유시스템의 필수 요소인 근원암, 저류암, 덮개암, 그리고 피복 하중암(overburden rock)을 갖추고 있으며, 시추 심도 내에 존재하는 잠재 근원암에서 탄화수소가 생성되었다. 그러나 생성된 탄화수소의 배출은 잠재 근원암이 가장 깊게 매몰된 시추공에서만 이루어졌다. 따라서 탄화수소를 배출한 유효 근원암은 4,000 m보다 깊은 곳에 존재하는 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위해, 가스 징후(gas show)가 확인된 시추공에 인접한 탄성과 단면에 대하여 2D 모델링을 수행하였으며, 그 결과 유효 근원암에서 탄화수소의 생성과 배출 그리고 이동이 관찰되었다. 탄화수소는 약 20 Ma를 전후하여 최대로 배출되었으나, 약 11 ~ 7 Ma에 발생한 대규모의 용기에 의해 지층에 포화되어 있는 가스의 대부분이 지표로 누출되었다. 이후 지속적인 퇴적작용으로 인해 근원암의 최하부에서는 탄화수소의 생성이 계속되며, 탄화수소는 더 이상 배출되어 이동하지 못하고 지하 심부에 그대로 존재한다. 또한 탄성과 단면에서 가장 깊은 심도에 가상의 시추공을 2공 설정하여 1D 모델링을 실시한 결과, 2D 모델링에서 계산된 탄화수소의 생성 및 배출 시기가 잘 일치하는 것이 확인된다. 이와 같이 소규모의 탄화수소 집적체가 지하 깊은 심도에 국한되어 나타나는 이유는 제주분지가 작은 소분지로 이루어져 있기 때문에 다량의 탄화수소가 생성되기 어렵고, 단층에 의해 탄화수소의 수평 이동이 제약을 받았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 탄화수소의 최대 배출은 연구지역 내에 구조트랩이 형성되기 이전에 일어났기 때문에, 현재 지하 심부에 남아있는 탄화수소는 층서트랩의 형태로 집적되어 있을 가능성이 높다.

주요어: 제주분지, 석유시스템, 모델링, 유효 근원암, 시추공

Seong-Hee Kim and Byeong-Kook Son, 2013, Petroleum system modeling of the Jeju basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 49, no. 4, p. 473-491

ABSTRACT: Petroleum system modeling was performed to analyze the history of hydrocarbon generation, migration, and accumulation of the Jeju basin, offshore southern Korea. 1D modeling indicates that all wells in this study have essential elements of the petroleum system, including source rock, reservoir rock, seal and overburden rocks. In addition, hydrocarbons are generated from potential source beds identified at depth intervals of wells. However, the expulsion of the hydrocarbons generated is shown only at the deeply drilled wells. Effective source rocks, which expelled hydrocarbons, would be presented in the deeper strata than 4,000 m. To verify the effective source rocks and hydrocarbons migration, 2D modeling was conducted on seismic sections across the wells in which gas show was identified. 2D modeling displays generation, expulsion, and migration of hydrocarbons from the effective source rocks. A large amount of hydrocarbons began to expel at early Miocene, although the hydrocarbons have been seeped out to the surface because an intense uplift occurred at late Miocene. Hydrocarbons are generated continuously from the bottom of source rocks, and the hydrocarbons stays at the deep strata. Additional 1D modeling was also conducted on two pseudo-wells that were drilled at two pods of the source strata. The results show that timing of generation and expulsion is coincident with each other between 1D and 2D models. Small-sized accumulations of hydrocarbons would exist locally at the deeply buried strata because the Jeju basin consists of many depressions or sags in which a large amount of hydrocarbons cannot be generated. Moreover, many faults prevent hydrocarbons from horizontal migration. Hydrocarbons would be trapped stratigraphically, rather than structurally because the expulsion of the hydrocarbon generated predates the formation of structural traps.

* Corresponding author: +82-42-868-3208, E-mail: sbk@kigam.re.kr

Key words: Jeju basin, petroleum system, modeling, effective source rock, well

(Seong-Hee Kim, Department of Petroleum Resources Technology, University of Science and Technology, 217 Gajung-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea; Byeong-Kook Son, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

1. 서론

최근의 석유탐사는 석유시스템의 개념을 적용하여 수행하는 것이 일반화되고 있다. 석유시스템은 성숙된 근원암을 중심으로 저류암, 덮개암, 피복 하중암(overburden rock)이 존재하는 가운데, 근원암에서 생성되고 배출된 석유가 저류암으로 이동되고 집적되는 전 과정의 영역으로 정의된다(Magoon and Dow, 1994).

석유시스템을 이해하는 것은 탄화수소를 함유하고 있는 저류층을 발견하거나 유효 근원암(effective source rock)의 위치를 규명하여 석유/가스전을 재조명하는데 있어서 필수적이다(Yahi *et al.*, 2001; Ye *et al.*, 2007). 또한, 유효 근원암의 위치는 최근 주목을 받고 있는 셰일가스(shale gas) 등과 같은 비전통 석유자원(unconventional petroleum resource)의 탐사에도 이용될 수 있기 때문에 석유시스템의 중요성은 근래에 들어 더욱 강조되고 있다(Jarvie *et al.*, 2007). 이러한 석유시스템을 포괄적이고 정량적으로 분석할 수 있는 방법이 석유시스템 모델링(petroleum system modeling)이다.

석유시스템 모델링은 기존에 정립된 수학 방정식과 물리화학적 법칙들로부터 석유의 생성 및 이동시기, 그리고 석유의 분포양상 등을 밝히는 종합 수치시뮬레이션(numerical simulation)이다. 이러한 석유시스템 모델링은 석유시스템 개념이 등장한 1990년대 초 이래로 탐사 리스크를 줄이고 석유의 유망지역을 예측하기 위해 현재 전 세계적으로 활용되고 있으며(Schwarzer and Littke, 2007; Underdown and Redfern, 2008), 국내에서도 석유시스템 모델링 방법에 의하여 석유/가스전을 재해석 및 분석한 바 있다(Lee and Son, 2007; Lee, B.R., 2008; Park, 2012).

본 연구는 남해 대륙붕의 제주분지에 대한 석유시스템 모델링에 관한 것으로, 제주분지 지역은 1970년대 초부터 석유탐사가 시작되어 많은 양의 물리탐사자료와 시추자료가 축적되어 왔으며, 총 9개의 탐

사공이 시추되었고 일부 시추공에서는 석유와 천연가스가 인지되었다(Yoon *et al.*, 2009). 이를 바탕으로 선행된 연구로는 지질구조, 층서 및 퇴적환경, 근원암 및 저류암 분석 등이 있으며, 이들 연구에 의하여 분지의 역사와 층서, 석유 유망구조와 유기물 투입 등이 규명되었다(Kwon, 1996; Yoon *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 1997; Lee, Y.J., 1997; Cheong *et al.*, 2002, 2007; Huh *et al.*, 2004). 그러나 이들 연구에서는 석유지질학적, 지화학적 관점에만 초점을 맞추었으며 전체적인 석유시스템에 관한 종합적이고 체계적인 연구는 이루어지지 못하였다.

이에 따라 본 연구에서는 지금까지 제주분지에서 취득된 물리탐사자료와 시추자료 등을 석유시스템 개념으로 재해석하여 석유시스템 모델링을 수행함으로써 이 지역의 석유시스템, 즉 석유의 생성-이동-집적 과정을 재현하고자 한다. 시추공에 대한 1D 모델링을 통해 매몰사 및 지열사를 복원하였으며, 탄성과 단면에 대한 2D 모델링을 통해 지질시대 동안 퇴적물의 매몰과정, 생성된 탄화수소가 이동하는 방향과 경로, 탄화수소가 집적된 위치를 모델링하였다. 또한 2D 모델의 단면상에서 가상 시추공을 선정하여 1D 모델링을 실시함으로써 유효 근원암에서의 탄화수소의 생성 및 배출시기를 계산하였다.

2. 연구방법 및 자료

석유시스템 모델링을 위해서는 해당 분지에 대한 암상과 층서 자료, 지화학 자료 그리고 탄성과 자료 등이 필요하다. 이러한 자료들은 실제 석유시스템 모델링의 입력 자료로 이용되어 지질학적 및 열적 진화과정을 재현하고 석유의 생성 및 이동, 그리고 집적 과정을 정량적으로 분석하는데 활용된다(Welte and Yalçin, 1987; Poelchau *et al.*, 1997). 본 연구에서는 석유시스템 모델링 입력 자료를 최대한 합리적으로 추출해내기 위하여 해당 지역에 대한 학술 및 학위 논문, 그리고 연구 보고서 등을 활용하였다.

모델링을 위해 우선적으로 총 7개의 시추공과 2

개의 탄성과 측선을 선정하였다(그림 1). 선정된 시추공들은 제 5광구에 위치한 거북-1, 옥돔-1공과 한일공동개발구역(Joint Development Zone; JDZ)에 위치한 JDZ V-1, JDZ V-2, JDZ V-3, JDZ VII-1, JDZ VII-2공이다. 선정된 시추공들은 총 심도가 주변의 다른 시추공보다 깊고, 석유시스템 모델링의 입력 자료로 이용할 수 있는 층서 및 지화학 자료가 비교적 충분한 시추공들이다. 탄성과 측선은 제주분지의 서부를 북서-남동 방향으로 가로지르며 JDZ V-2공을 포함하는 탄성과 측선과 제주분지의 남동부를 북동-남서 방향으로 가로지르며 JDZ V-1공과 인접한 탄성과 측선을 사용하였다.

석유시스템 모델링을 위해 사용된 소프트웨어는 Pratte River Associates사의 BasinMod[®]이며 1D 및 2D 모듈을 사용하였다. 먼저, 1D 모델링을 수행하여 분지 형성 시기의 매몰사 및 지열사를 복원하였으며, 이를 통해 근원암에서 생성된 탄화수소의 배출시기를 계산하였다. 1D 모델링은 각각의 시추공에 대해 수행되었으며, 층서, 암석 물성 등과 같은 지질학적 자료와 유기물 타입 등과 같은 지화학 자료는 기존 연구결과로부터 적정값을 추출해 수치로서 입력하였다. 또한, 고지열류량 값과 침식 두께 그

리고 열전도도 등은 모델링을 통해 계산된 값과 실제 분지에서 측정된 값을 보정(calibration)함으로써 최적의 값을 도출하였다. 1D 모델링이 완료된 후 2D 모델링을 통해 지질시대 동안 퇴적물의 매몰과정과 근원암에서 생성된 탄화수소가 배출되어 이동하는 방향과 경로 그리고 탄화수소가 집적된 위치 등을 모델링하였다. 2D 모델링을 위해 사용된 자료는 2개의 탄성과 자료와 주요 부정합면의 지질연대, 그리고 시추공 자료이다.

석유시스템 개념에서는 실제로 탄화수소를 생성하고 배출한 유효 근원암(effective source rock)을 석유배태의 가장 중요한 조건으로 간주한다(Magoon and Dow, 1994). 근원암의 성숙도는 열성숙도 모델링을 통하여 구현할 수 있으며, 유효 근원암에서의 탄화수소 생성량과 그 시기는 석유 생성 모델링으로, 생성된 탄화수소의 이동 양상은 석유가스 이동 모델링을 통해 구현할 수 있다. 열성숙도 모델링의 보정을 위해서는 유기물의 성숙도 지수(maturity index)의 실제 측정치인 비트리나이트 반사도(vitrinite reflectance; R_o)와 Rock-Eval T_{max} 값을 사용하였다. 비트리나이트 반사도의 모델링은 Sweeney and Burnham (1990)이 제시한 Easy% R_o 알고리즘을 사용하여 수행하였으며, 석유 생성 모델링

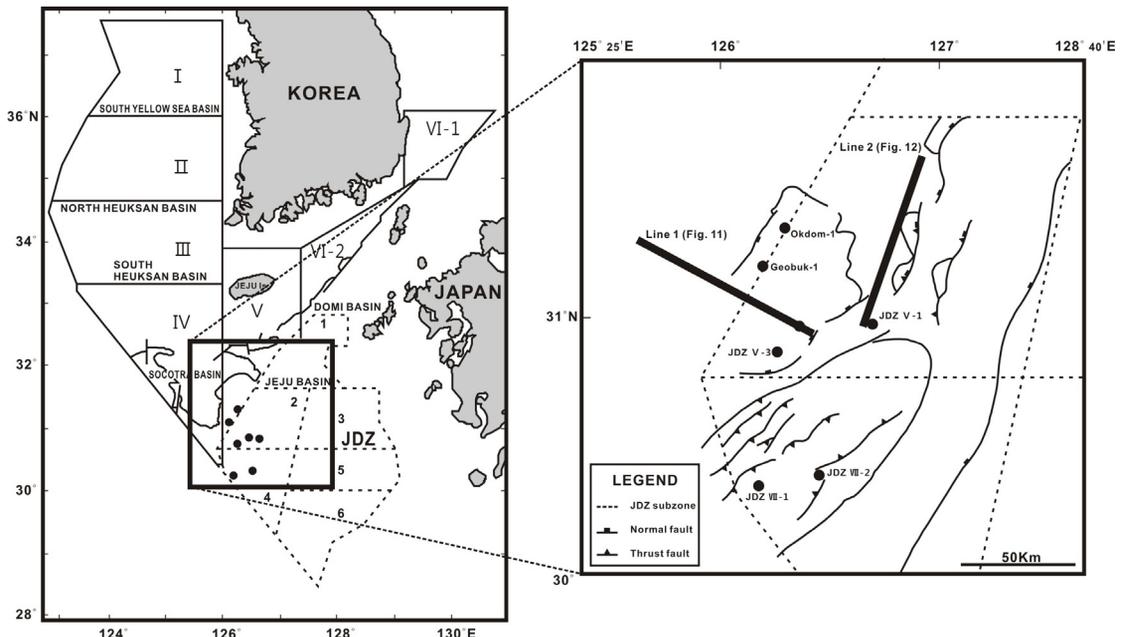


Fig. 1. Location map of the study area including wells (circle) and seismic lines (line).

은 케로젠의 반응속도 모델(kinetics model)식으로부터 계산하였다. 또한, 생성된 석유의 배출은 Saturation Method를 사용하여 계산하였는데, 이는 근원암에서 생성된 탄화수소가 근원암 내 미세공극의 일정량을 채웠을 때 배출이 일어난다는 이론이다. Saturation Method에서 석유 배출의 기본 역치(threshold) 값은 20%이다. 마지막으로, 석유가스 이동 모델링은 Darcy의 법칙을 근거로 한 다상유체 방정식(multi-phase flow equation)을 사용하였다.

3. 지질개요

동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin; ECSSB)의 북동쪽 끝부분에 해당하는 제주분지는 국내 대륙붕 5광구와 한일공동개발구역(JDZ)에 걸쳐 있다(그림 1). 제주분지의 수심은 70에서 150 m 내외로 비교적 얇은 편이며 남동쪽으로 갈수록 깊어지는

경향을 보인다(Kwon, 1996).

제주분지와 그 주변지역은 유라시아판과 태평양판 그리고 필리핀 해양판의 수렴대에 위치하며 이러한 판들의 상호작용에 의해 분지가 형성되어 진화하였다(그림 2). 분지의 형성은 태평양판이 유라시아판 밑으로 섭입하면서 발생한 인장력에 의해 시작되었으며, 에오세 말과 올리고세 사이에 인도와 유라시아판의 충돌로 인한 압축력이 분지에 작용하여 올리고세 이전의 퇴적물들은 용기 후 침식을 받게 되었다(Jolivet *et al.*, 1989; Lee, Y.J., 1997). 이 결과, 제주분지에서는 광역적인 부정합면이 형성되었다. 올리고세에서 중기 마이오세 사이에 제주분지에서는 필리핀판이 북쪽으로 섭입함에 따라 열개 및 침강이 계속되었으며, 후기 마이오세에는 강한 압축력이 분지에 작용함에 따라 배사구조와 역단층이 형성되었다. 또한, 용기된 지역으로부터 상당한 양의 퇴적물이 식박되어 분지 전체에는 광역적인 부정합이 형성

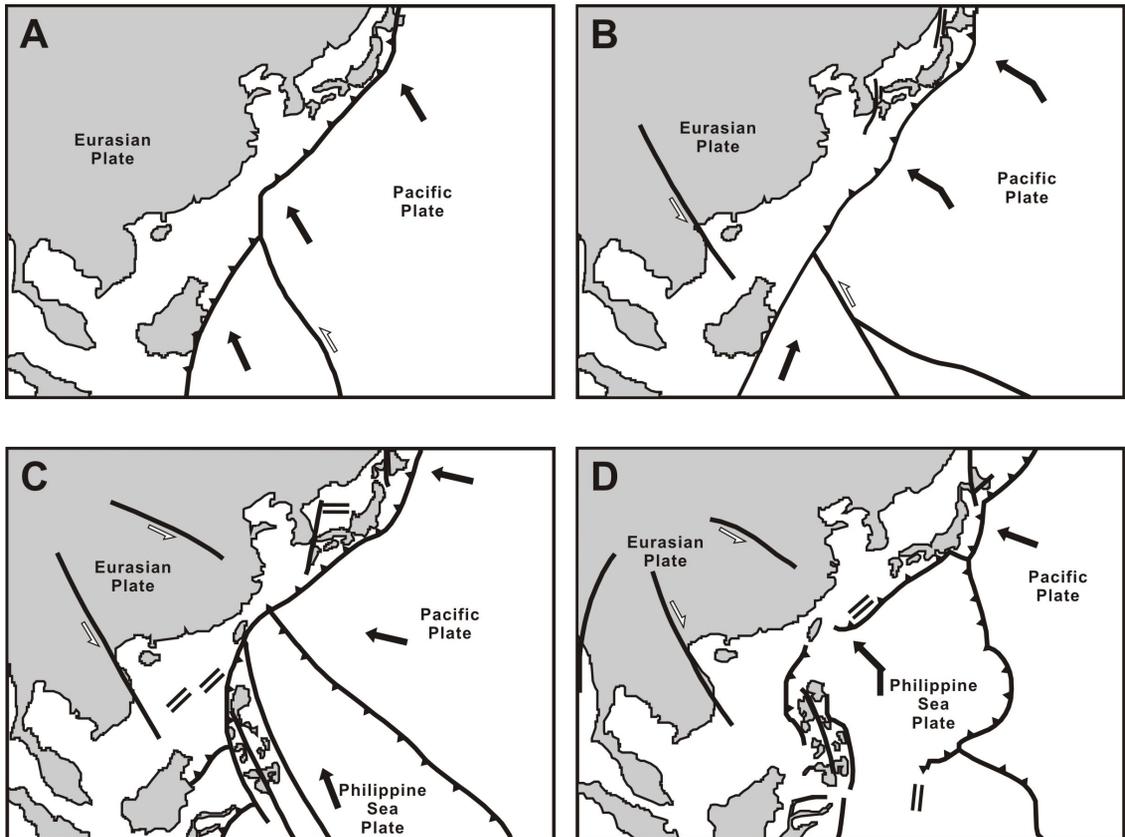


Fig. 2. Tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin. A: Paleocene, B: Late Eocene, C: Early Miocene, D: Late Miocene (modified from Lee, 1997).

되었다. 플라이오세 이후부터는 광역적인 침강이 시작되었으며, 이 침강작용은 현재까지 지속되고 있다 (Zhou *et al.*, 1989). 분지 내의 퇴적작용은 열개와 동시에 육성 기원 퇴적물의 집중적인 퇴적이 일어난 후기 에오세에 시작되었다. 열개 이후 올리고세에서 중기 마이오세까지 지속된 열 침강(thermal subsidence)은 광범위한 하성 및 호성 퇴적물의 퇴적을 가능하게 하였다. 후기 마이오세 말 발생한 구조 역전에 의해 마이오세 퇴적물의 대부분은 삭박되었으며, 플라이오세 이후에는 분지 전체에 걸쳐 해성 퇴적층이 퇴적되었다.

4. 1차원 모델링

4.1 자료 입력

1D 모델링은 해당 분지에 대한 매몰사 및 지열사를 복원하여 근원암으로부터 탄화수소가 생성되고 배출되는 시기와 양을 계산하는데 사용된다. 1D 모델링을 위해서는 각 시추공에 대한 층서 및 암상, 부정합, 침식 두께, 그리고 유기물의 타입과 성숙도 등의 자료가 필요하며, 이러한 자료들은 모델링 수행

시 수치로 입력된다. 이와 같은 지질학적, 지화학적 정보를 정량적인 수치로 입력하는 것은 모델링에 있어 중요한 과정 중 하나이다(Waples *et al.*, 1992a). 그림 3과 표 1, 2는 1D 모델링을 위해 사용된 입력 자료이다. 모델링을 위해 사용된 시추공들의 총 심도는 거북-1, 옥돔-1, JDZ V-1, JDZ V-2, JDZ V-3, JDZ VII-1, JDZ VII-2공에서 각각 2,722 m, 2,903 m, 3,317 m, 3,202 m, 3,221 m, 4,486 m, 4,190 m이다. 이 시추공들은 후기 에오세에서 플라이스토세까지의 퇴적물로 구성되어 있다(Yoon *et al.*, 1999; Lee, G.H. *et al.*, 2006; Cukur *et al.*, 2011).

제주분지의 층서는 기존의 시추자료와 탄성과 탐사자료를 재해석하고 분석하여 구분하였다(표 1, 그림 3). 그림 3에서 보는바와 같이 시추공 내의 지층은 총 4개의 광역 부정합에 의해 구분된다. 4개의 광역 부정합은 각각 후기 백악기의 음향 기반암 최상부, 후기 에오세에서 초기 올리고세, 초기 마이오세, 그리고 후기 마이오세로 대비할 수 있다(Cukur *et al.*, 2011). 석유시스템 모델링에서 기반암은 관심의 대상이 아니므로 후기 백악기 기반암인 옥돔-1공(2,822~2,903 m), JDZ V-1공(3,009~3,317 m) JDZ V-2공(3,160~

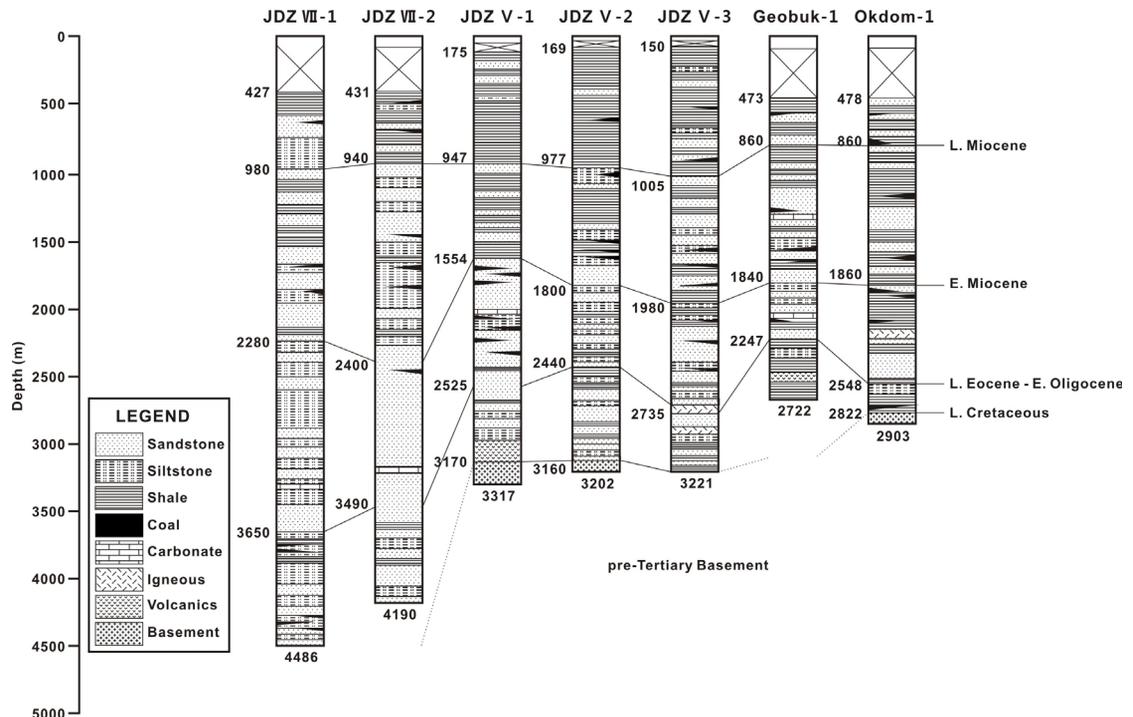


Fig. 3. Lithology of study wells (modified from Cukur *et al.*, 2011).

Table 1. Input parameters for 1D modeling.

| Well name | Rock unit | Begin age (Ma) | Top depth (m) | Lithology | Petroleum system elements |
|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------------------------|---------------------------|
| Geobuk -1 | Pliocene | 5.3 | 473 | Ss 30%, Sh 65%, Coal 10% | |
| | Erosion | 7 | -500 | - | |
| | U-Miocene | 15 | 860 | Ss 56%, Sh 36%, Ls 5%, Coal 3% | |
| | L-Miocene | 20 | 1480 | Ss 50%, St 10%, Sh 35%, Coal 5% | Seal |
| | Oligocene | 33.5 | 1840 | Ss 50%, St 20%, Sh 20%, Ls 10% | Res. |
| | pre-Oligocene | 45 | 2247 | Ss 15%, St 15%, Sh 70% | S/R |
| Okdom -1 | Pliocene | 5.3 | 478 | Ss 25%, Sh 70%, Coal 5% | |
| | Erosion | 7 | -100 | - | |
| | U-Miocene | 15 | 860 | Ss 40%, Sh 60% | Seal |
| | L-Miocene | 20 | 1480 | Ss 27.5%, Sh 67.5%, Coal 5% | Res. |
| | Oligocene | 33.5 | 1860 | Ss 30%, Sh 55%, Coal 5%, Ig 10% | Res. |
| | pre-Oligocene | 45 | 2548 | St 45%, Sh 50%, Coal 5% | S/R |
| JDZ V-1 | Pleistocene | 1.6 | 175 | Ss 30%, St 10%, Sh 60% | |
| | Pliocene | 5.3 | 500 | Sh 100% | |
| | Erosion | 7 | -1800 | - | |
| | L-Miocene | 20 | 947 | Ss 40%, Sh 60% | R/S |
| | Oligocene | 33.5 | 1554 | Ss 73%, Sh 15%, Ls 2%, Coal 10% | S/R |
| | pre-Oligocene | 45 | 2525 | Ss 30%, St 30%, Sh 25% | S/R |
| JDZ V-2 | Pleistocene | 1.6 | 169 | Ss 10%, Sh 90% | |
| | Pliocene | 5.3 | 590 | Sh 95%, Coal 5% | |
| | Erosion | 7 | -100 | - | |
| | U-Miocene | 15 | 970 | Ss 10%, St 85%, Coal 5% | |
| | M-Miocene | 16 | 980 | Sh 100% | Seal |
| | L-Miocene | 20 | 1170 | Ss 50%, St 25%, Sh 15%, Coal 10% | Res. |
| | Oligocene | 35 | 1580 | Ss 45%, St 45%, Sh 10% | S/R |
| | pre-Oligocene | 45 | 2210 | Ss 70%, St 15%, Sh 15% | S/R |
| JDZ V-3 | Pleistocene | 1.6 | 150 | Ss 15%, St 15%, Sh 70% | |
| | Pliocene | 5.3 | 500 | Ss 20%, St 5%, Sh 70%, Coal 5% | |
| | Erosion | 7 | -100 | - | |
| | U-Miocene | 15 | 1005 | Ss 40%, Sh 60% | Seal |
| | L-Miocene | 20 | 1205 | Ss 40%, St 20%, Sh 30%, Coal 10% | S/R |
| | Oligocene | 33.5 | 1980 | Ss 55%, St 15%, Sh 20%, Coal 10% | S/R |
| | pre-Oligocene | 45 | 2735 | Ss 40%, St 15%, Sh 20%, Ig 25% | Src. |
| JDZ VII-1 | Pleistocene | 1.6 | 427 | Sh 100% | Seal |
| | Pliocene | 5.3 | 555 | Ss 38%, St 60%, Coal 2% | Seal |
| | Erosion | 7 | -1000 | - | |
| | U-Miocene | 15 | 980 | Ss 55%, Sh 45%, Coal 5% | Seal |
| | L-Miocene | 20 | 1450 | Ss 70%, St 15%, Sh 10%, Coal 5% | Res. |
| | Oligocene | 33.5 | 2280 | Ss 42.5%, St 52.5%, Ls 5% | S/R |
| | pre-Oligocene | 45 | 3650 | Ss 40%, St 50%, Sh 10% | Src |
| JDZ VII-2 | Pleistocene | 1.6 | 431 | St 45%, Sh 50%, Coal 5% | Seal |
| | Pliocene | 5.3 | 550 | Ss 30%, Sh 70% | Seal |
| | Erosion | 7 | -1000 | - | |
| | U-Miocene | 15 | 940 | Ss 65%, St 30%, Coal 5% | R/S |
| | L-Miocene | 20 | 1500 | Ss 25%, St 60%, Sh 10%, Coal 5% | R/S |
| | Oligocene | 33.5 | 2500 | Ss 92.5%, Ls 5%, Coal 2.5% | S/R |
| | pre-Oligocene | 45 | 3490 | Ss 75%, St 15%, Sh 10% | S/R |

* Ss: Sandstone, St: Siltstone, Sh: Shale, Ls: Limestone, Ig: Igneous

3,202 m)의 특정 구간은 모델링에서 제외하였다.

시추공 자료를 바탕으로 분지 내 한 지점에서의 매물과정을 재현하는 1D 모델링에서는 분지에 대한 층서뿐만 아니라 각각의 시추공에 대한 암상 변화를 명확히 파악해야한다. 제주분지 내의 시추공들은 다음과 같은 암상 변화의 특징을 가진다(그림 3). 먼저, 거북-1공의 경우 이 공의 가장 깊은 구간에는 응회암이 실트암 및 이질암과 호층으로 나타난다. 또한 심도 약 1,000~2,000 m에서는 탄층이 협재된 사암이 우세하게 나타나며 이 층의 상부 구간에는 두꺼운 이질암층과 사암층이 교대로 나타난다. 옥돔-1공의 경우, 이 공의 하부 구간에는 실트암이 얇게 협재된 이질암층이 우세하게 나타나며 하부 구간을 제외한 전 구간에서는 사암과 이질암층이 교호하여 나타난다. JDZ V-1공의 경우, 심도 약 1,500~2,000 m에는 탄층이 협재된 두꺼운 사암층이 존재하며 상부 구간에는 사암이 얇게 협재된 이질암층이 우세하게 나타난다. JDZ V-2공의 경우, 심도 약 1,500 m 이하의 구간에는 얇은 이질암층을 협재한 사암 및 실트암이 발달하였으며, 그 상부에는 두꺼운 이질암층이 우세하게 나타난다. JDZ V-3공의 경우, 심도 약 2,000~2,500 m에는 역질 사암이 협재되어 있으며, 이 층의 상부 구간에는 탄층이 협재된 사암 및 이질암층이 존재한다. 또한, JDZ V-1공과 JDZ V-3공의 하부 구간 모두에서는 특징적으로 화산암 및 화성암이 나타나는데 이는 분지 생성 초기의 산물로 판단된다(Kim *et al.*, 1997). 연구지역의 최남단에 위치한 JDZ VII-1공은 제주분지 내에서 시추된 시추공들 가운데 가장 깊게 시추된 시추공이다. 이 공의 하부 구간은 탄층을 협재한 실트암으로 구성되어 있으며 이 공의 전 구간에서는 실트암, 사암, 이질암이 교호하여 나타난다. JDZ VII-2공의 하부에는 실트암과 이질암을 얇게 협재한 사암이 존재하며 심도 약 2,500~3,000 m에서는 역암 및 사암층이, 그 상부 구간에는 탄층을 협재한 실트암 및 사암층이, 그리고 최상부에는 사암과 이질암이 두껍게 호층을 이루며 발달되어 있다. 이와 같은 각 시추공 내 암상 변화의 특징을 BasinMod[®]에 입력하기 위해, 먼저 물리검층 자료, 시추코어 자료, 생층서 지질시대 및 환경에 대한 자료를 종합하여 암상층의 단위를 구분한 뒤 각각의 층에 대한 암상을 사암, 실트암, 셰일, 탄층 등의 혼합비로 입력하였다(표 1). 이와 같이 암상

을 혼합하여 입력하면 열전도와 석유생성에 영향을 주게 되는 암석의 기본 물성이 혼합비에 따라 자동으로 계산되어진다.

유기물의 타입과 성숙도 지표로는 비트리나이트 반사도와 Rock-Eval 열분해 자료를 사용하였다(표 2). 거북-1공과 옥돔-1공은 심도 약 2,100 m까지는 유기물의 함량이 낮아 거의 모든 시료가 석유생성 잠재력을 가진 근원암의 하한으로 알려진 0.5wt% 이하의 총유기탄소량(Total Organic Carbon; TOC) 값을 갖지만, 심도 약 2,100 m부터는 유기물의 함량이 증가하여 대부분의 시료가 1~3wt%의 높은 TOC 값을 가진다. 수소지수(Hydrogen Index; HI) 또한 2,100 m 하부 구간에서는 약 200~600 mgHC/gTOC로 매우 높은 값을 보인다. T_{max} 값은 두 시추공 모두 심도 약 2,200 m에서 석유생성상한(top of oil window) 온도인 435°C에 도달하였다. 두 시추공의 비트리나이트 반사도의 범위는 각각 0.14~0.42% R_o , 0.16~0.55% R_o 이며 대체적으로 심도에 따라 증가하는 양상을 보이나, 일부 시료에서는 이러한 경향성에서 벗어나 큰 차이를 보이기도 한다. JDZ V-1공과 JDZ V-3공의 TOC 값은 시추 구간 전반에 걸쳐 1wt% 이하로 매우 낮은 값을 갖는다. JDZ V-1공의 수소지수는 27~218 mgHC/gTOC이며 비트리나이트 반사도 범위는 0.16~0.98% R_o 이고 심도에 따라 증가하는 양상을 보인다. JDZ V-3공의 경우, 수소지수는 30~400 mgHC/gTOC이며 이 시추공의 비트리나이트 반사도 역시 심도에 따라 증가하고 그 범위는 0.3~0.68% R_o 이다. JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공의 TOC 값은 심도 및 암상에 따라 변화의 폭이 매우 크며 가장 큰 특징적인 사항은 마이오세에 퇴적된 퇴적물들의 TOC 값이 30wt% 이상으로 매우 높다는 점이다. 이와 같이 유기물의 함량이 두드러지게 높은 이유는 사암층에 얇게 협재된 탄층에 의한 것으로 판단된다. 또한, JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공은 석유생성상한에 도달하는 깊이가 약 1,000 m로 다른 시추공들에 비해 상대적으로 얇고 비트리나이트 반사도 또한 다른 시추공에 비해 높은데, 이는 높은 퇴적율과 빠른 침강속도로 인해 두꺼운 퇴적층이 상부에 쌓였었기 때문인 것으로 해석된다.

제주분지의 케로젠 타입은 시추공과 퇴적시기에 따라 약간의 차이를 보이나 전체적으로 타입 II와 III의 혼합형으로 나타난다(Cheong *et al.*, 2002). 케로젠

Table 2. Input data of total organic carbon, pyrolysis, and vitrinite reflectance of each well.

| Well Name | Sample Depth (m) | Age | TOC (wt%) | S ₂ | HI | T _{max} | R _o |
|-----------|------------------|---------------|------------|----------------|--------|------------------|----------------|
| Geobuk-1 | 473~860 | Pliocene | 0.1~0.59 | 0.07~0.71 | 36~262 | 351~435 | 0.14~0.14 |
| | 860~1480 | L. Miocene | 0.08~0.48 | 0.08~0.42 | 65~190 | 403~438 | 0.25~0.42 |
| | 1480~1840 | E. Miocene | 0.1~0.35 | 0.11~0.34 | 71~261 | 419~437 | 0.28~0.28 |
| | 1840~2247 | Oligocene | 0.12~2.69 | 0.1~9.35 | 44~460 | 421~439 | 0.32~0.37 |
| | 2247~2722 | pre-Oligocene | 0.1~2.61 | 0.06~8.78 | 60~450 | 430~439 | 0.36~0.36 |
| Okdom-1 | 860~1480 | L. Miocene | 0.1~0.77 | 0.11~0.59 | 52~150 | 397~435 | 0.16~0.35 |
| | 1480~1860 | E. Miocene | 0.1~0.37 | 0.04~0.35 | 40~114 | 423~436 | 0.38~0.38 |
| | 1860~2548 | Oligocene | 0.11~3.53 | 0.07~10 | 17~551 | 343~553 | 0.35~0.49 |
| JDZ V-1 | 2548~2903 | pre-Oligocene | 0.23~4.16 | 0.26~19.67 | 72~568 | 425~437 | 0.54~0.55 |
| | 550~947 | Pliocene | 0.1~0.29 | 0.04~0.1 | 27~40 | 415~430 | 0.16~0.16 |
| | 947~1554 | Miocene | 0.07~0.55 | 0.06~0.28 | 50~85 | 430~439 | - |
| JDZ V-2 | 1554~2525 | Oligocene | 0.08~1.05 | 0.07~1.08 | 57~218 | 432~447 | 0.50~0.98 |
| | 2525~3317 | pre-Oligocene | 0.38~1.32 | 0.25~1.32 | 54~103 | 443~465 | 0.85~0.98 |
| | 169~590 | Pleistocene | 0.13~0.42 | - | - | - | 0.2 |
| | 590~977 | Pliocene | 0.02~31.18 | - | 75~253 | - | 0.19~0.21 |
| | 977~1580 | Miocene | 0.03~33.35 | - | 38~384 | 392~443 | 0.23~0.44 |
| JDZ V-3 | 1580~2210 | Oligocene | 0.07~34.94 | - | 27~536 | 420~439 | 0.29~0.42 |
| | 2210~3160 | pre-Oligocene | 0.07~4.38 | - | 12~519 | 423~443 | 0.37~0.87 |
| | 555~1005 | Pliocene | 0.23~0.71 | 0.12~0.52 | 36~104 | 366~438 | - |
| | 1005~1205 | L. Miocene | 0.08~0.16 | 0.03~0.07 | 30~62 | 416~433 | 0.30~0.30 |
| | 1205~1980 | E. Miocene | 0.04~1.33 | 0.03~1.66 | 40~124 | 421~434 | 0.32~0.53 |
| JDZ VII-1 | 1980~2735 | Oligocene | 0.01~1.07 | 0.02~1.64 | 56~400 | 418~442 | 0.48~0.68 |
| | 2735~3221 | pre-Oligocene | 0.03~0.67 | 0.05~0.92 | 34~167 | 436~456 | - |
| | 555~980 | Pliocene | 0.15~0.57 | 0.05~0.24 | 33~46 | 412~464 | - |
| | 980~1450 | L. Miocene | 0.03~13.53 | 0.01~31.5 | 33~293 | 398~458 | 0.39~0.52 |
| | 1450~2280 | E. Miocene | 0.23~31.51 | 0.16~76.97 | 33~272 | 424~461 | 0.52~0.63 |
| | 2280~2900 | L. Oligocene | 0.21~7.73 | 0.11~11.86 | 52~643 | 432~448 | 0.76~0.76 |
| | 2900~3650 | E. Oligocene | 0.09~6.42 | 0.14~14.58 | 60~695 | 433~453 | 0.76~1.15 |
| JDZ VII-2 | 3650~4030 | Eocene | 0.02~1.88 | 0.03~1.26 | 33~150 | 462~510 | 1.86~2.13 |
| | 4030~4486 | Paleocene | 0.1~1.87 | 0.05~0.4 | 15~80 | 469~542 | - |
| | 550~940 | Pliocene | 0.04~20.51 | 0.05~47.07 | 66~246 | 391~441 | 0.46~0.46 |
| | 940~1490 | L. Miocene | 0.09~19.28 | 0.06~36.76 | 30~218 | 428~436 | 0.46~0.56 |
| | 1490~2400 | E. Miocene | 0.29~30.29 | 0.03~48 | 3~217 | 408~442 | 0.61~0.76 |
| JDZ VII-2 | 2400~3000 | L. Oligocene | 0.16~1.66 | 0.1~57.08 | 62~306 | 433~452 | 0.76~1.01 |
| | 3000~3490 | E. Oligocene | 0.18~0.92 | 0.09~1.42 | 25~204 | 415~536 | 1.00~1.57 |
| | 3490~4190 | pre-Oligocene | 0.15~0.99 | 0.03~0.51 | 16~104 | 424~542 | 1.46~1.70 |

타입 II는 거북-1공과 옥돔-1공의 심도 2,000 m 하위 구간에서 두드러지게 나타나며, 케로젠 타입 III는 이 공을 제외한 다른 시추공들에서 나타난다. 시추공들의 케로젠 타입은 Rock-Eval 열분해 측정값 중 S₂값과 TOC값을 축으로 한 도표에 도시하여 결정하였으며(Langford and Blanc-Valleron, 1990; 그림 4), 분지발달과정과 고환경을 고려하여 타입 III와 타입

II, III의 혼합비를 적절히 입력하였다.

4.2 열성속도 모델링

근원암 내 매몰되어 있는 유기물이 케로젠 및 탄화수소로 순차적으로 변환되기 위해서는 무엇보다도 적절한 온도와 매몰심도에 도달되어야 한다. 따라서 퇴적분지의 지열사를 복원시키는 것은 탄화수소를 평가

하는데 있어 매우 중요하다(Tissot and Welte, 1984).

일반적으로 퇴적분지의 지열사는 과거와 현재의 열류량 계산으로부터 유추가 가능하다. 본 연구에서 현재의 열류량(present heat flow)은 공저온도(Bottom Hole Temperature; BHT)로부터 계산하였으며, 제주분지의 평균 해저면 온도인 10°C를 적용하여 계산하였다. 고지열류량(paleoheat flow)의 복원 및 유추를 위해서는 유기물의 성숙도를 지시하는 인자 중 가장 신뢰도가 높은 비트라이트 반사도와 T_{max} 값을 사용하였다(Waples *et al.*, 1992a). 비트라이트 반사도의 계산은 Sweeney and Bumham (1990)이 제시한 반응속도 모델(kinetics model)을 사용하여 수행하였으며, 모델링을 통해 계산된 값과 실제 분지에서 측정된 값을 보정(calibration)하여 최적의

성숙도 모델을 도출하였다. 보정을 수행하는 과정에 있어서는 제주분지의 형성 과정을 고려하여 Jarvis

Table 3. Derived heat flow of each well.

| Well Name | Heat Flow (mW/m ²) | | Erosion (m) |
|-----------|--------------------------------|---------------|-------------|
| | Maximum value | Present value | |
| Geobuk-1 | 83 | 55 | 300 |
| Okdom-1 | 76 | 51 | 100 |
| JDZ V-1 | 81 | 54 | 1800 |
| JDZ V-2 | 76 | 51 | 100 |
| JDZ V-3 | 73 | 48 | 100 |
| JDZ VII-1 | 91 | 68 | 1000 |
| JDZ VII-2 | 97 | 68 | 1000 |

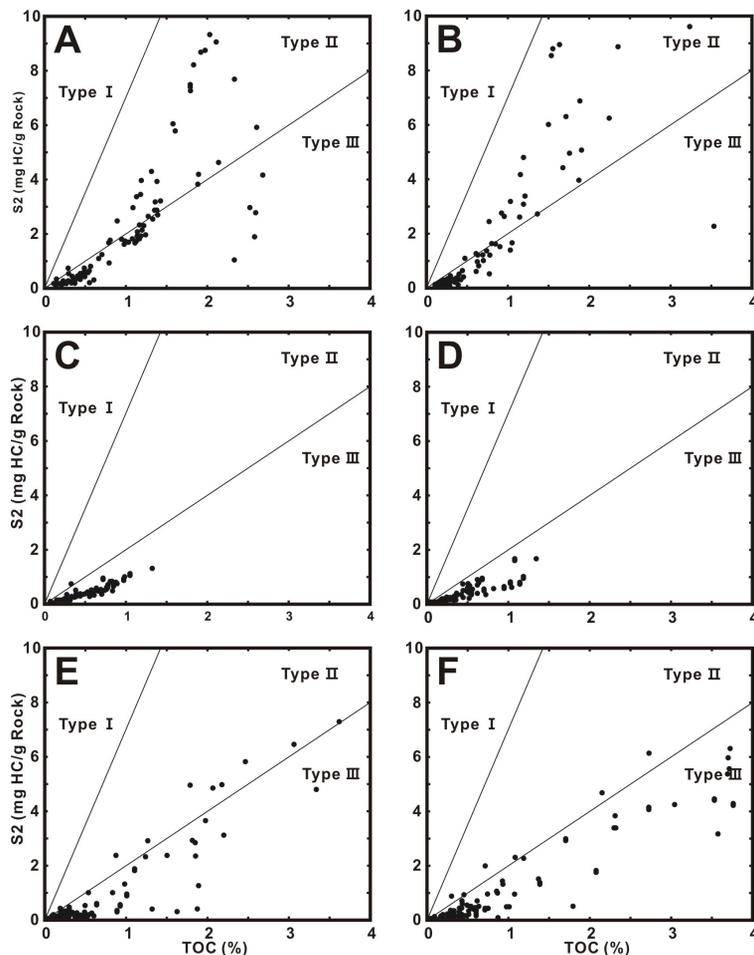


Fig. 4. S₂ vs. TOC diagrams for the determination of kerogen types. A: Geobuk-1, B: Okdom-1, C: JDZ V-1, D: JDZ V-3, E: JDZ VII-1, F: JDZ VII-2.

and McKenzie (1980)가 제시한 Rifting heal flow

model을 적용하였다.

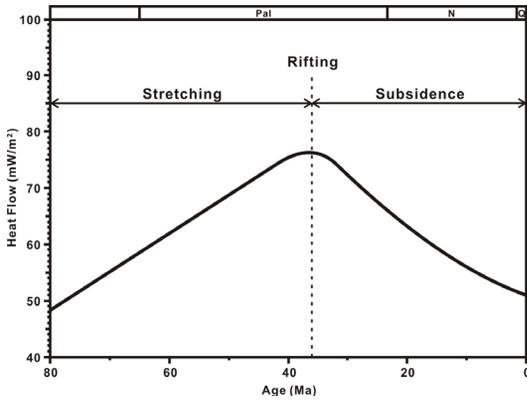


Fig. 5. Heat flow history model required to achieve the best fit of maturity in study wells.

그림 5는 전술한 방법에 의해 설정된 지질시대에 따른 고지열류량 변화를 나타낸 것이며, 표 3은 각 시추공들의 열개 당시 최대 지열류량과 현재의 지열류량, 그리고 침식량을 나타낸 것이다. 인장력에 의해 열개가 일어나기 이전에는 지열류량이 점점 증가하다가, 열개가 일어난 약 38 Ma에 최대 지열류량 값을 보여준다. 열개가 끝나는 시기부터 현재까지 열류량이 점점 감소하는 패턴으로 모델링 된다(그림 5). 그림 6에서 확인되듯이 제주분지 내 시추공의 열성속도는 대체로 심도에 따라 증가하는 경향을 보이며, 후기 마이오세에 발생한 광범위한 융기에 의해 특정 심도에서 열성속도 증가선이 이동(shifting)한 것을 확인할 수 있다. 이러한 열성속도의 이동으로

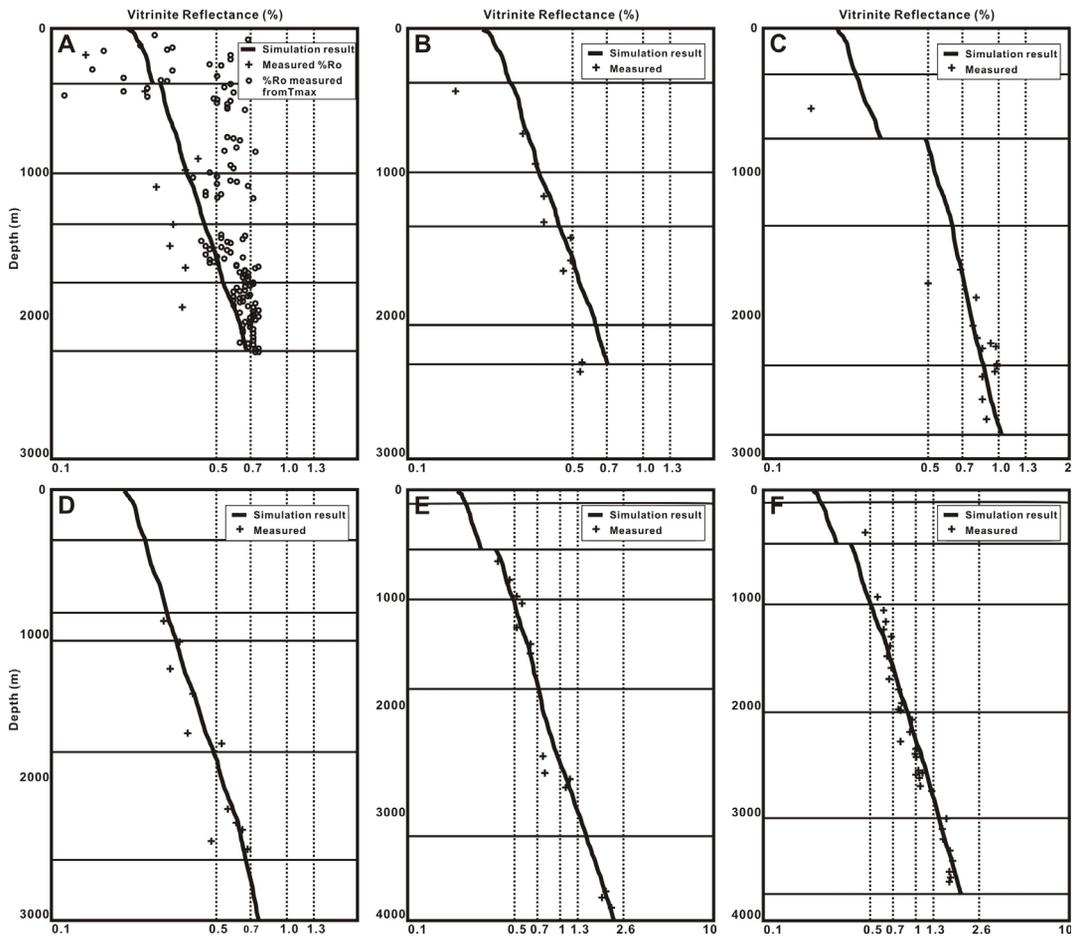


Fig. 6. Comparison of calculated (line) and measured R_o (vitrinite reflectance) values (cross). A: Geobuk-1, B: Okdom-1, C: JDZ V-1, D: JDZ V-3, E: JDZ VII-1, F: JDZ VII-2.

부터 침식량을 계산하였다.

제주분지의 가장 북부에 위치하는 거북-1공은 공내 봉락 또는 재동된 퇴적물의 영향으로 인해 비트리나이트 반사도 및 T_{max} 값이 불규칙하게 도시된다(그림 6A). 그러나 전체적으로 심도에 따라 증가하는 경향을 보이므로 비트리나이트 반사도와 T_{max} 값을 동시에 이용하여 열성속도 모델링을 수행하였다. 열성속도 모델링 결과 거북-1공과 옥돔-1공에서는 약 1,600 m 부근에서 석유생성상한인 0.5% R_o 에 도달하는 것으로 나타난다. JDZ V-1공과 JDZ V-3공의 경우는 각각 심도 약 980 m, 1,800 m에서 석유 생성 단계에 처음으로 도달하며, 두 시추공 모두는 총 심도에서 주 석유생성단계인 0.7~1.0% R_o 에 머물고 있다. JDZ V-3공의 비트리나이트 반사도의 분포는 거북-1공 및 옥돔-1공과 상당히 유사한데, 이는 이 시추공들이 동일한 소분지(depression) 내에 존재하기 때문인 것으로 판단된다(그림 1). JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공에서는 1,000 m에서 최초로 석유생성단계에 진입하며 약 1,800 m에서는 주 석유생성단계에 도달한다. 또한, 이 시추공들은 다른 시추공들과는 달리 심도 3,000m 부근에서 습성 가스의 생성 단계인 1.3% R_o 에 도달하며 중기 마이오세에 해당하는 1,000~2,000 m 구간의 유기물들이 석유생성단계인 0.5% R_o 에 도달하는데, 이러한 원인은 이 지역이 높은 퇴적율과 빠른 침강속도를 받았었기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 열성속도 모델링 결과는 보정을 수차례 반복 시행함으로써 도출된 것이며, 보정 수행 시 비트리나이트 반사도의 분포 경향에서 벗어난 값들은 제외하였다(Waples *et al.*, 1992b).

4.3 1차원 모델링 결과

그림 7~9는 각각의 시추공에 대한 석유시스템 1D 모델링 결과이다. 석유 시스템 1D 모델링은 매몰사 및 지열사, 석유시스템 이벤트 차트, 탄화수소 생성량 등을 계산하여 보여준다.

거북-1공, 옥돔-1공은 비교적 안정적으로 퇴적이 진행되었으며 약 11 Ma부터 7 Ma에 걸쳐 발생한 광범위한 융기 및 침식이 매몰사에 반영되었다. 거북-1공의 비트리나이트 반사도는 약 1,400 m 부근에서 최초로 석유생성 단계를 지시하는 0.5% R_o 에 도달하였다(그림 7A). 거북-1공의 잠재 근원암은 유기물이 비교적 풍부하고 석유생성에 유리한 케로젠 타입 II와 타입

III의 혼합 특성을 보이는 올리고세 이전의 호성 기원 퇴적층으로 판단되며, 저류암은 에오세 및 올리고세에 하성 및 삼각주 환경에서 퇴적된 사암층, 덮개암은 마이오세 층 내에 협재되어 있는 이질암층으로 판단된다. 탄화수소는 약 24 Ma부터 생성되기 시작하였으며 그 후 일정한 양으로 생성이 계속되고 있다. 옥돔-1공의 잠재 근원암의 특성은 전반적으로 거북-1공과 유사하나, 저류암의 형성 시기는 에오세 및 올리고세와 초기 마이오세로 거북-1공과 차이를 보인다(그림 7B). 특히 심도 1,439~1,584 m 구간에 발달된 사암의 공극률은 약 31%에 달하며, 입자 또한 중립질이고 분급 상태도 양호한 것으로 나타난다(Cheong

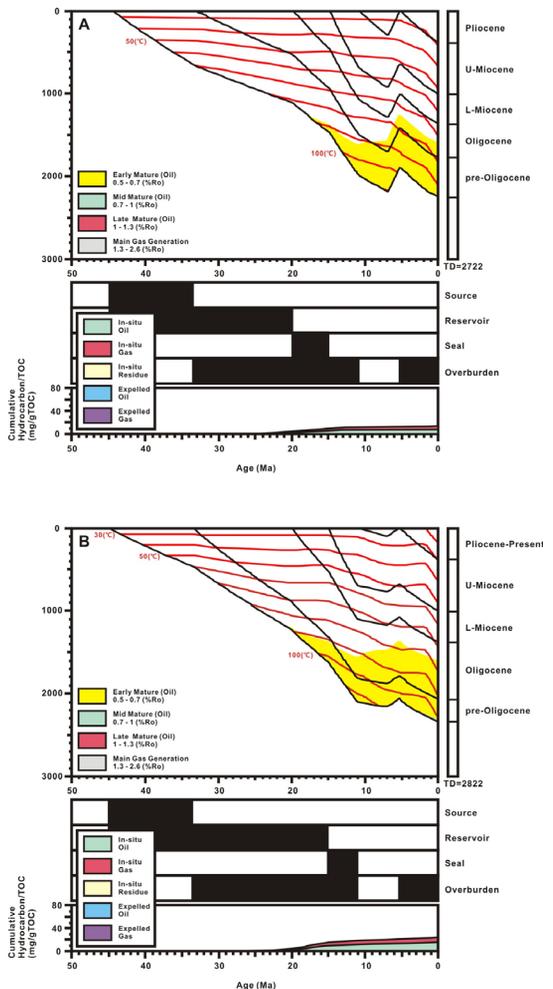


Fig. 7. 1D model of study wells including burial and thermal history, petroleum system chart, and hydrocarbons from a source rock. A: Geobuk-1, B: Okdom-1.

et al., 2002). 거북-1공과 옥돔-1공은 매몰심도가 얇아 다른 시추공에 비해 온도가 낮게 나타나고, 또한 석유생성상한에 도달한 2,000 m 하위 구간의 유기물이 케로젠 타입 II가 많이 나타나므로 이들 두 시추공에서 생성된 탄화수소는 석유가 우세하다(그림 7).

한일공동광구의 JDZ V-1공과 JDZ V-3공의 잠재 근원암 및 저류암은 에오세 및 올리고세 내지 마이오세 퇴적물로 판단되며 덮개암은 부정합 형성 이전인 마이오세의 세립질 지층으로 판단된다. JDZ V-3공은 거북-1공 및 옥돔-1공과 마찬가지로 지열류량이 낮기 때문에 이로 인해 생성된 탄화수소의 양도 매우 적게 나타난다(그림 8B). JDZ V-3공에서 탄화수

소는 약 20 Ma부터 심도 약 1,600 m에서 형성되기 시작하였다. JDZ V-1공은 용기 및 침식의 지질 변동이 가장 심해서 지열류량이 다른 공에 비해 상대적으로 높게 나타나며 유기물의 성숙도 또한 다른 공에 비해 높게 나타난다. JDZ V-1공의 시추공 하부에 위치한 에오세 및 올리고세 지층은 근원암 내의 유기물이 주 석유생성 단계에 도달하였다. JDZ V-1공의 탄화수소는 초기 마이오세부터 생성되기 시작하였으며, 마이오세 후기에는 지층이 용기를 받아 석유 생성구간이 지표 근처까지 상승하는 특징을 보인다(그림 8A). 그러나 전 지질시대에 걸쳐 많은 양의 탄화수소가 생성되었으나 근원암으로부터의 탄화수소 배출

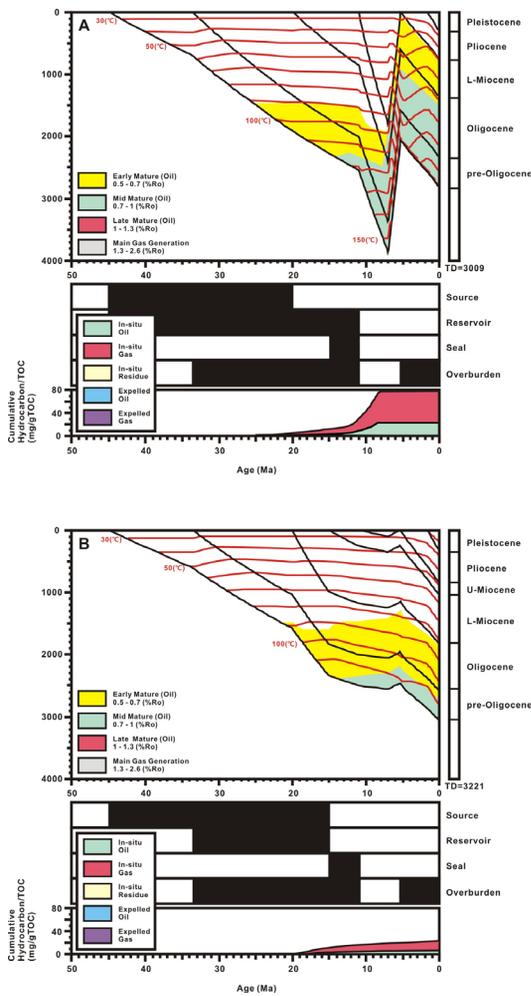


Fig. 8. 1D model of study wells including burial and thermal history, petroleum system chart, and hydrocarbons from a source rock. A: JDZ V-1, B: JDZ V-3.

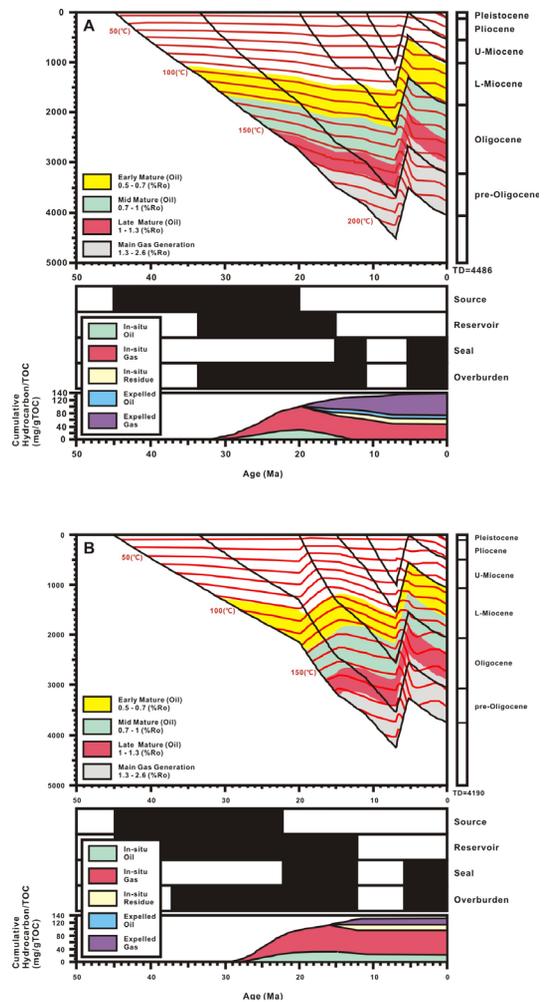


Fig. 9. 1D model of study wells including burial and thermal history, petroleum system chart, and hydrocarbons from a source rock. A: JDZ VII-1, B: JDZ VII-2.

Table 4. Input parameters of formations for 2D modeling.

| Line Name | Formation | Begin Age (Ma) | Chrono-stratigraphy |
|-----------|-----------|----------------|------------------------|
| Line 1 | G | 3.5 | Pleistocene |
| | F | 7 | Pliocene |
| | E | 15 | Early – Middle Miocene |
| | D | 16 | |
| | C | 20 | |
| | B | 33.5 | Oligocene |
| | A | 45 | pre-Oligocene |
| Line 2 | F | 3.5 | Pleistocene |
| | E | 7 | Pliocene |
| | D | 12 | Early – Middle Miocene |
| | C | 20 | |
| | B | 33.5 | |
| | A | 45 | pre-Oligocene |

(expulsion)은 발생하지 않고 있다.

JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공은 다른 시추공들 보다 높은 퇴적율과 빠른 침강으로 인해 지열류량이 높았으며 탄화수소의 생성뿐만 아니라 근원암으로부터의 가스 배출도 모델링되고 있다(그림 9). 그림 9의 탄화수소 누적 그래프에서 근원암으로부터의 석유와 가스의 배출을 확인할 수 있다. JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공에서 가스 징후가 나타난 것으로 미루어 볼 때, 이미 근원암에서 탄화수소의 배출이 일어났다는 것을 시사한다. JDZ VII-1공에서 탄화수소는 약 33 Ma부터 생성되기 시작했으며 석유의 생성은 약 12 Ma에 중단되었다. 탄화수소는 약 20 Ma부터 배출이 시작되었으며 현재까지도 지속되고 있다. JDZ VII-2공은 JDZ VII-1공과 동일한 양상의 매몰사를 보여주며 모델링에 의한 열역사 복원에서 알 수 있듯이 매몰심도 약 3,000 m부근에서 가스가 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 이 시추공의 석유 시스템 및 탄화수소 생성량은 JDZ VII-1공과 상당히 유사하다. 약 16 Ma에 탄화수소의 배출이 시작되었으며 현재까지도 생성 및 배출이 진행 중에 있다(그림 9).

5. 2차원 모델링

5.1 자료 입력

2D 모델링을 위해서는 탄성과 자료 및 시추공 자료가 필요하다. 해석된 탄성과 단면을 바탕으로 각각의 층준을 설정하고 주변 시추공과의 대비를 통해

층서, 암상 등과 같은 층에 대한 정보를 구체화하여 입력한다(Waples, 1994).

2D 모델링을 위해 사용된 단면은 연구지역의 서부 지역을 북서-남동 방향으로 가로지르며 JDZ V-2공을 포함하는 탄성과 단면 Line 1과 제주분지 남동부를 북동-남서 방향으로 가로지르며 JDZ V-1공과 인접한 Line 2이다(그림 1). 2개의 탄성과 단면은 Cukur (2010)에 의해 해석된 바 있으며, 본 연구에서는 그의 탄성과 단면 해석 결과를 2D 모델링을 위한 기초 자료로 활용하였다(그림 10). Cukur (2010)는 탄성과 단면의 지층을 총 4개의 메가 시퀀스(mega sequence)로 구분하였으나, 본 연구에서는 시추공 자료와의 대비를 통해 각 층에 대한 정보를 좀 더 구체화하여 각각 7개, 6개의 지층 단위로 세분하였다.

표 4는 탄성과 단면 Line 1과 Line 2에 입력된 각 지층 단위에 대한 연대 자료이다. 탄성과 단면 Line 1의 지층 단위에 대한 암상, 부정합, 유기물 타입, Rock-Eval 열분석 자료, 열류량 등의 자료는 JDZ V-2공의 자료를 이용하였다. 탄성과 단면 Line 2의 각 지층 단위에 대한 모든 자료는 JDZ V-1공의 자료를 통해 유추하여 입력하였다(표 1~3). 암상은 주로 사암, 실트암, 셰일이고 이들 세 암상이 반복되어 나타난다(그림 3).

앞서 7개의 시추공에 대해 실시한 1D 모델링 결과에 의하면, JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공을 제외한 나머지 시추공에서는 근원암이 탄화수소를 배출할 만큼의 충분한 양의 탄화수소가 생성되지 않았다. 시추공

구간 내의 저류층에서 발견된 가스를 생성한 유효 근원암층은 시추 심도보다 깊은 곳에 존재할 것이라고 판단하였으며 탄화수소를 배출한 유효 근원암을 분지 형성 초기인 에오세 및 올리고세에 형성된 A층 및 B층으로 입력하였다(Kwon, 1996; 그림 10). 그림의 탄성과 단면상에 표시된 UNC는 후기 마이오세의 광역 부정합을 나타내며(Cukur, 2010), 부정합에 의해 침식된 층의 양(두께)는 시추공의 위치를 고려하여 탄성과 단면 Line 1과 Line 2에 각각 1,000 m와 1,800 m로 입력하였다. 근원암 내의 유기물 타입은 Rock-Eval 열분해 측정값 중 S₂와 TOC값을 도표 상에 도시하여 결정하였으며 케로젠 타입 III로 입력하였다(Langford and Blanc-Valleron, 1990; Cheong *et al.*, 2002).

5.2 2차원 모델링 결과

2D 모델링은 지질시대 동안 퇴적물의 매몰과정과

근원암에서 생성된 탄화수소가 배출되어 이동하는 방향과 경로 그리고 지층에 부존하는 탄화수소의 분포 양상을 가시화할 수 있다. 2D 모델링을 위해 사용된 단면상에 위치하는 근원암 내의 유기물은 대부분 케로젠 타입 III에 해당하며 케로젠 타입 III는 석유의 생성량은 미미하기 때문에 가스 포화도 및 가스 이동에 집중하여 연구하였으며 이를 중심으로 기술한다. 그림 11와 12은 각각의 탄성과 단면 Line 1과 Line 2에 대한 2D 모델링 결과에 따른 가스 포화도(gas saturation)를 모델링한 것이며 그림에서 화살표는 가스가 이동하는 방향을 의미한다(그림 11, 12).

탄성과 단면 Line 1의 경우 가스는 매몰심도가 가장 깊은 약 2,200 m에서 약 33 Ma부터 생성되어 이동하기 시작한다(그림 11A). 생성된 탄화수소의 대부분은 부력에 의해 지표 근처까지 이동하는 양상을 보인다(그림 11B). 매몰심도가 증가함에 따라 A, B,

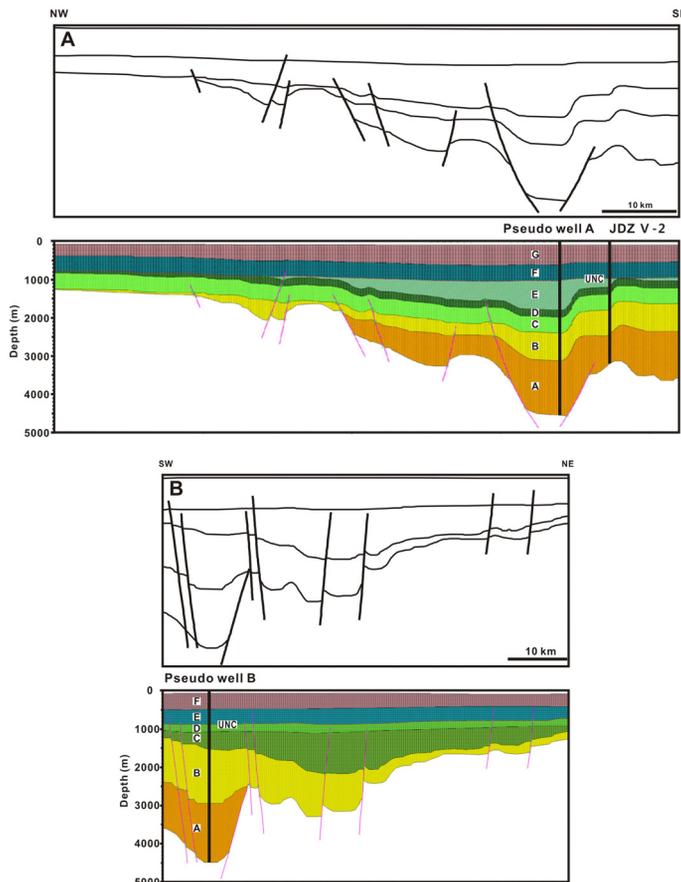


Fig. 10. Seismic interpretation (Cukur, 2010) and input diagram for 2D modeling. A: Line 1, B: Line 2.

C층의 가스 포화도가 계속해서 증가한다(그림 11C). 중기 마이오세에 약 100 m에 달하는 세립질 퇴적층 D층이 쌓이면서, 수직적으로 일어나던 가스의 이동은 중단된다. 후기 마이오세에 발생한 대규모의 용기에 의해 마이오세 상부 지층의 상당량이 침식되고, 이에 따라 생성된 가스의 대부분이 지표로 누출된다(그림

11D). 5 Ma 이후에는 침식면 위에 세립질 퇴적층의 퇴적이 시작된다(그림 11E). 또한 그림 11F에서 확인할 수 있듯이 탄화수소의 일부는 단층이나 부정합을 따라 유출되기도 한다. 그러나 근원암층 또는 근원암층 상부의 저류암층 내에 일부의 탄화수소가 그대로 저류되어 있는 것으로 확인된다.

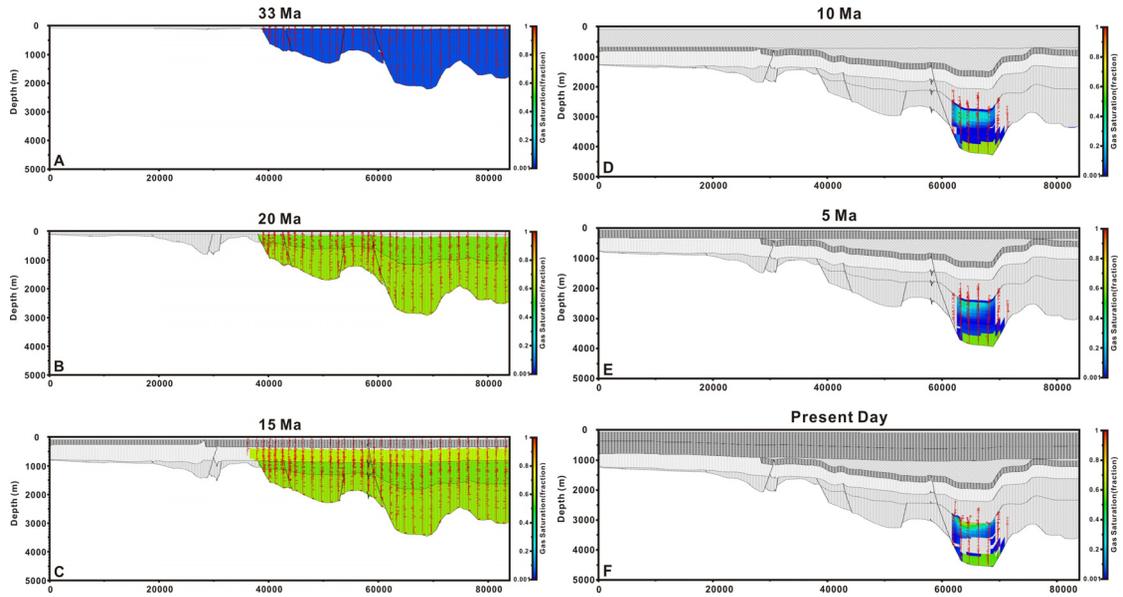


Fig. 11. 2D model of Line 1 showing gas saturation through geologic time.

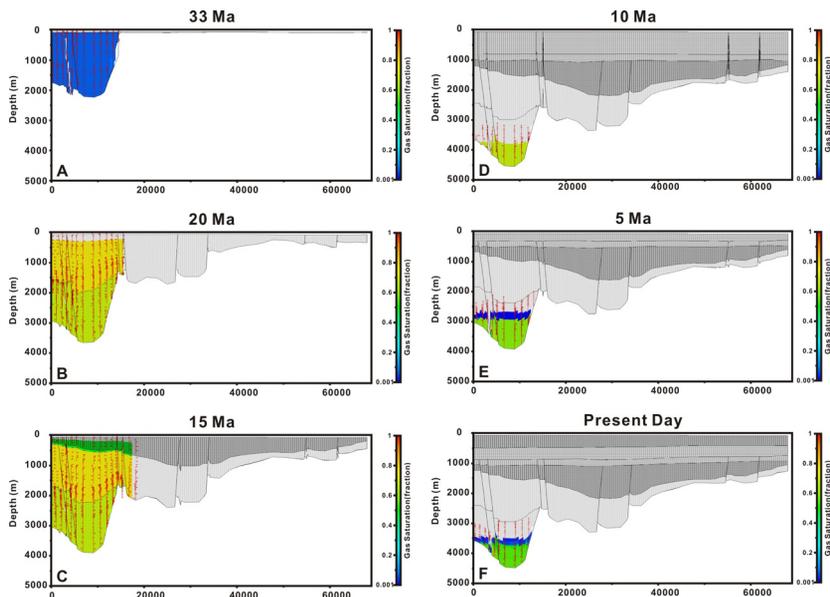


Fig. 12. 2D model of Line 2 showing gas saturation through geologic time.

탄성과 단면 Line 2에서 가스의 생성과 이동은 탄성과 단면 Line 1에서와 약간 다른 양상을 보인다. 두 단면의 가장 큰 차이점은 현재 가스가 집적되어 있는 심도이다. 탄성과 단면 Line 2에서 가스는 매몰심도가 가장 깊은 약 2,500 m에서 약 33 Ma부터 생성되기 시작한다(그림 12A). 매몰이 계속됨에 따라 C층의 하부까지 가스가 수직적으로 이동한다(그림 12B, C). 마이오세 말에 대규모의 용기 및 침식이 발생하면서 JDZ V-1공의 후기 마이오세 퇴적물은 대부분 삭박되게 된다(그림 12D). 부정합 형성 이후, 침식면 상부에 퇴적은 계속되고 가스의 유출은 중단된다(그림 12E). 현재 탄화수소는 3,500 m 이하의 심부에 그대로 집적되어 있는 것으로 확인되며(그림 12F), 이는 JDZ V-1공에서 가스의 징후(gas show)가 발견된 심도와도 잘 일치한다.

6. 토 의

6.1 유효 근원암의 위치

1D 및 2D 모델링 결과에 의하면, 생성된 가스를 배출한 유효 근원암은 시추공 구간 내에 존재하는 잠재 근원암보다 더 깊은 심도에 존재한다. 유효 근원암의 탄화수소 생성 및 배출시기를 명확히 하기 위하여, 2D 단면상의 최대 매몰 지역(pod area)에 가상 시추공을 설정하여 1D 모델링을 수행하였다

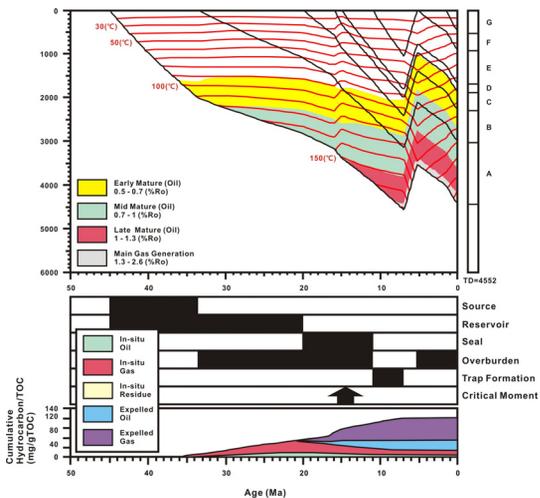


Fig. 13. 1D model of pseudo-well A, including burial and thermal history curves, petroleum system chart, and hydrocarbons from a source rock.

(그림 10). 그림 13은 탄성과 단면 Line 1에 설정한 가상시추공 A의 1D 모델링 결과를 나타낸다. 약 35 Ma부터 약 2,000 m 심도에서 석유생성상한에 도달하였고, 근원암층이 급격한 매몰을 받았을 때 석유 및 가스의 생성이 최고에 도달하였다. 약 20 Ma에 가스의 배출이 일어나기 시작한다. 구조 트랩은 약 11~7 Ma에 형성되는 것으로 보아, 마이오세에 근원암으로부터 배출된 가스는 대부분 지표로 유출된 것으로 판단된다. 탄성과 단면 Line 2 내에 설정한 가상 시추공 B의 1D 모델링 결과는 그림 14와 같다. 석유와 가스가 생성되기 시작하는 시기 및 심도는 약 35 Ma와 약 2,000 m로 가상 시추공 A와 비슷한 양상을 보인다. 석유 및 가스의 생성은 계속되었고 약 24 Ma에 이르러 가스의 배출이 일어났다. 이와 같이 가상 시추공 B의 1D 모델링 결과로 미루어 보았을 때, JDZ V-1공에서 나타나는 가스의 징후(gas show)는 시추공 내의 근원암이 아닌 약 4,000 m 이하의 심도에 있는 근원암에서 배출된 가스일 것으로 생각된다.

6.2 탄화수소의 생성 및 배출

모델링 결과를 종합적으로 분석하였을 때, 본 연구지역의 모든 시추공에서는 석유시스템의 필수 요소인 근원암, 저류암, 덮개암, 그리고 피복 하중암을 모두 갖추고 있으며, 또한 모든 시추공에서 석유와 가스가 생성되었음을 알 수 있다. 1D 모델링 결과에

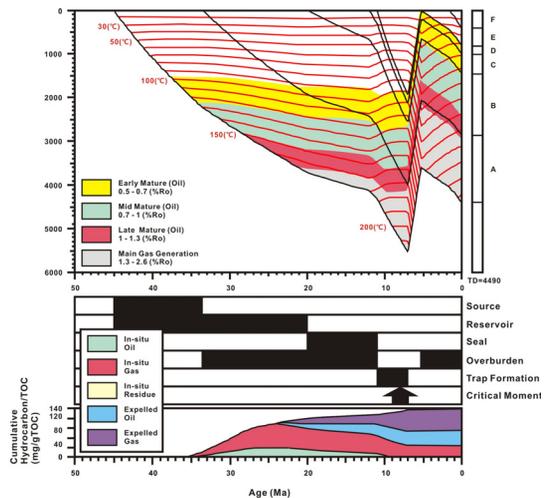


Fig. 14. 1D model of pseudo-well B, including burial and thermal history curves, petroleum system chart, and hydrocarbons from a source rock.

서 주목할 점은 JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공을 제외한 나머지 시추공에서는 근원암 내의 유기물이 가스 생성단계에 도달하지 못하였음에도 불구하고 가스 생성이 우세하다는 점인데, 이는 이 지역에 매몰된 유기물의 대부분이 케로젠 타입 III이기 때문이다. 케로젠 타입 III는 케로젠 타입 II 보다 수소 함량이 적기 때문에 가스 생성 잠재력이 높은 것으로 알려져 있으며, 석유시스템 모델링에서도 탄화수소의 생성은 유기물 종류에 상당히 민감하게 반응함을 알 수 있다(Lee and Son, 2007). 또한 그림 7, 8, 9의 1D 모델링 결과에서, 일부 시추공들의 탄화수소 생성 시기 및 심도가 상당히 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 거북-1공, 옥돔-1공, 그리고 JDZ V-3공은 비슷한 시기에 탄화수소의 생성이 시작되었고, JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공 역시 비슷한 시기에 탄화수소의 생성과 배출이 진행되었다. 이는 이들 시추공들이 비교적 유사한 매몰 및 지열사를 가지며 유기물 종류 역시 유사한 특성을 가지기 때문이라 판단된다. 이러한 결과로 미루어 보았을 때 제주분지는 매몰 및 지열사가 비슷한 몇 개의 소분지(sag)로 이루어져 있음을 추측할 수 있고, 각 소분지마다 탄화수소의 생성 및 배출, 그리고 구조 역전(inversion)에 의한 침식 두께 등의 양상이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 1D 모델링에서 탄화수소의 배출은 JDZ VII-1공과 JDZ VII-2공에서만 인지되는데, 이러한 원인은 중국 쪽으로 갈수록 분지 심도가 깊어져 근원암의 성숙도가 증가하였기 때문이라 판단된다.

6.3 탄화수소의 이동

2D 모델링의 결과에 따르면, 연구지역의 유효 근원암은 약 30 Ma에 탄화수소를 생성하기 시작하며 약 20 Ma에 탄화수소를 배출한다. 유효 근원암으로부터 배출된 탄화수소는 부력과 모세관압에 의해 상부로 이동하려는 특성과, 다공질의 사질층을 따라 이동하는 특성이 결합하여 상부 방향으로 이동하기 시작한다. 국지적으로 이질암층이 퇴적된 지역에서는 이질암층이 덮개암의 역할을 하여 탄화수소의 수직 이동을 제한하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 약 11~7 Ma 동안 발생한 대규모의 융기에 의해 덮개암의 기능을 잃게 되어 지층 내에 포화되어 있던 탄화수소의 대부분은 지표로 누출되게 된다. 이후, 분지 전체에 걸쳐 광역적인 침강이 일어나면서 비교적 안

정적으로 매몰이 진행됨에 따라 근원암의 하부에서는 탄화수소의 생성이 계속되나 거의 이동하지 않으며 3,000 m 이하 심부에 그대로 존재하는 것으로 모델링 된다. 제주분지는 수많은 단층과 융기대로 절단된 소분지(sag)로 구성되어 있기 때문에 주요 근원암층의 두께가 지역별로 차이가 크며 생성된 탄화수소의 수평 이동이 단층에 의해 제약을 받게 된다. 이러한 이유 때문에 다량의 탄화수소 생성 자체가 어려움이 있으며 탄화수소의 집적체가 분지의 심부에만 소규모로 존재하게 되는 것으로 생각된다.

7. 결 론

남해 대륙붕 제주분지에 대한 석유시스템 모델링을 수행한 결과 탄화수소 생성과 이동 그리고 집적 형태에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 제주분지에서 실제로 탄화수소를 생성하고 배출한 유효 근원암은 약 4,000 m 이상의 깊은 심도에 존재하는 에오세 및 올리고세 퇴적층이며, 이 근원암의 유기물은 케로젠 타입 III가 우세한 것으로 나타난다.

2. 탄화수소는 매몰심도가 가장 깊은 심도에서 약 30 Ma부터 생성되기 시작하며, 약 20 Ma를 전후로 배출되기 시작한다. 배출된 탄화수소는 부력에 의해 상위 지층으로 이동한다. 그러나 후기 마이오세에 발생한 대규모의 융기에 의해 마이오세 상부 지층의 상당량이 침식되고, 이에 따라 지층에 포화되어 있던 가스의 대부분이 지표로 누출된다. 이후 지속적인 퇴적작용으로 인해 근원암의 최하부에서는 탄화수소의 생성이 계속된다.

3. 구조트랩이 형성되기 전에 탄화수소의 최대 배출이 일어났기 때문에 현재 남아있는 탄화수소는 층서 트랩의 형태로 집적되어 있을 가능성이 높다. 또한 제주분지는 수많은 단층과 융기대로 절단된 소분지 형태이기 때문에 주요 근원암층의 두께가 지역별로 차이가 크므로 다량의 탄화수소 생성에 문제가 있고, 단층에 의해 탄화수소의 수평 이동이 제약을 받아 탄화수소의 집적 자체가 매우 소규모인 것으로 나타난다.

이상과 같이 석유시스템 모델링 해석 결과로부터 남해 대륙붕 제주분지의 탄화수소 생성 및 이동에 대한 모델을 제시하였다. 본 연구의 결과는 추후 추

가적인 정보가 얻어지고 이를 이용한 석유시스템 모델링을 수행할 때 유용한 비교자료로 사용할 수 있고, 나아가 향후 제주분지의 실제 석유시스템을 밝히는데 도움이 될 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “국내의 석유퇴적분지 분석 및 정보화(과제번호: 13-1133)”의 지원으로 수행되었습니다. 제주대학교 윤석훈 교수님과 익명의 심사자의 심사에 의해서 원고가 개선되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Cheong, T.J., Lee, Y.J., Kim, J.H., Oh, J.H., Park, M.H. and Song, H.Y., 2007, Stable Isotope and Biomarker Characteristics of Organic Matter from the Drilling Core Sediments, Jeju Basin. *Journal of the Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 40, 623-633 (in Korean with English abstract).
- 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, 140 p (in Korean with English abstract).
- Cukur, D., 2010, Structure, Stratigraphy and Petroleum Potential of the Northern East China Sea Shelf Basin. Ph.D. thesis, Pukyong National University, Pusan, Korea, 185 p.
- 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.
- Huh, S., Choi, D.L., Yoo, H.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 Korean Geophysical Society*, 7, 225-232 (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. *American Association of Petroleum Geologists*, 91, 475-499.
- Jarvis, G.T. and McKenzie, D.P., 1980, Sedimentary basin formation with finite extension rates. *Earth and Planetary Science Letters*, 48, 42-52.
- Jolivet, L., Huchon, L. and Claude, R., 1989, Tectonic setting of Western Pacific Marginal Basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.
- Kim, J.H., Yoo, C.S., Kim, S.S. and Park, D.B., 1997, Source rock characteristics of Yellow Sea and Jeju Basin. 4th The Korean Society of Petroleum Geology, 87 p (in Korean).
- Kwon, Y.I., 1996, Sequences Stratigraphy and Rift-related Sediment Characteristics in the Cheju Basin. Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, Korea, 302 p (in Korean with English abstract).
- Langford, F.F. and Blanc-Valleron, M.-M., 1990, Interpreting Rock-Eval Pyrolysis Data Using Graphs of Pyrolyzable Hydrocarbons vs. Total Organic Carbon. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 799-804.
- Lee, B.R., 2008, Petroleum systems modeling of continental shelf area, southwestern margin of the Ulleung basin, East Sea. M.S. thesis, University of Science and Technology, Daejeon, Koera, 75 p (in Korean with English abstract).
- Lee, B.R. and Son, B.K., 2007, Petroleum System Modeling of Continental Shelf Area, Southwestern Margin of the Ulleung Basin, East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 477-499 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., Kim, B.Y., Shin, K.S. and Sunwoo, D., 2006, Geologic evolution and aspects of the petroleum geology of the northern East China Sea shelf basin. *American Association of Petroleum Geologists*, 90, 237-260.
- 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.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994, The petroleum system from source to trap. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 60, 3-24.
- Park, M.S., 2012, Hydrocarbon Generation and Migration of the Southwestern Margin of the Ullung Basin, East Sea, Korea, Using Petroleum System Modeling. M.S. thesis, Kongju National University, Gongju, Korea, 70 p (in Korean with English abstract).

- Poelchau, H.S., Baker, D.R., Hantschel, T., Horsfield, B. and Wygrala, B., 1997, Basin simulation and the design of the conceptual basin model. In: Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R. (eds.), *Petroleum and basin evolution*. Berlin Springer-Verlag, 5-70.
- Schwarzer, D. and Littke, R., 2007, Petroleum generation and migration in the 'Tight Gas' area of the German Rotliegend natural gas play: a basin modelling study. *Petroleum Geoscience*, 13, 37-62.
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.K., 1990, Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 1559-1570.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1984, *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, Berlin, 699 p.
- Underdown, R. and Redfern, J., 2008, Petroleum generation and migration in the Ghadames Basin, north Africa: A two-dimensional basin-modeling study. *American Association of Petroleum Geologists*, 92, 53-76.
- Waples, D.W., 1994, Modeling of Sedimentary Basins and Petroleum Systems. In: Magoon, L.B. and W.G., W.G. (eds.), *The Petroleum System-From Source to Trap*, AAPG Memoir 60, 307-322.
- Waples, D.W., Kamata, H. and Suizu, M., 1992a, The art of maturity modeling. Part 1: Finding a satisfactory geologic model. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 31-46.
- Waples, D.W., Masahiro, S. and Hiromi, K., 1992b, The art of maturity modeling. Part 2: Alternative models and sensitivity analysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 1, 47-66.
- Welte, D.H. and Yalçin, M.N., 1987, Basin modelling-A new comprehensive method in petroleum geology. *Advances in Organic Chemistry*, 13, 141-151.
- Yahi, N., Schaefer, R.G. and Littke, R., 2001, Petroleum generation and accumulation in the Berkine basin, eastern Algeria. *American Association of Petroleum Geologists*, 85, 1439-1467.
- 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. *American Association of Petroleum Geologists*, 91, 1167-1188.
- Yoon, H.S., Lee, S.S., Lee, S.H., Kim, J.H., Byun, H.S., Kim, K.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).
- Yoon, S.H., Son, B.K. and Shinn, Y.J., 2009, Review on Geology and Potential Systems of Sedimentary Basins in the South Sea of Korea. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources Bulletin*, 13, 54-68 (in Korean with English abstract).
- Zhou, Z., Zzao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the east China Sea. In: Zhu, X. (ed.), *Chinese sedimentary basins*, Elsevier, 165-179.

투 고 일 : 2013년 6월 7일

심 사 일 : 2013년 6월 11일

심사완료일 : 2013년 7월 17일