

남해 대륙붕 소라분지의 석유시스템 모델링

이슬아¹ · 손병국^{2,*}

¹과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

남해 대륙붕 제주분지의 북동쪽 말단부에 위치하는 소라분지에 대해 석유시스템 모델링을 수행하여 탄화수소의 생성, 이동, 집적 과정을 규명하였다. 소라분지는 석유시스템의 필수적인 지질학적 구성요소인 근원암, 저류암, 덮개암, 그리고 피복하중암을 갖추고 있는 것으로 확인된다. 1-D 모델링 결과, 시추공 최하부의 에오세 근원암에서 탄화수소가 생성되었으며, 탄화수소의 배출은 매몰심도가 깊은 분지 중심부에서만 발생한다. 3-D 모델링 결과, 저류암 내의 탄화수소는 북서방향과 동쪽 방향의 분지 가장자리로 이동하는 것이 관찰된다. 이러한 결과를 바탕으로 분지 전체를 가로지르는 탄성파 단면에 대한 2-D 모델링을 수행하여 탄화수소의 생성, 이동, 집적을 규명하였다. 그 결과, 탄화수소는 약 28 Ma에 배출되어 상위지층으로 활발하게 이동하는 것이 관찰된다. 탄화수소는 주로 분지 내에 발달한 단층을 통해 이동하였으며, 일부는 지층경계를 따라 이동하였다. 퇴적층의 매몰이 지속됨에 따라 근원암에서 탄화수소의 생성은 계속되었으나, 생성된 탄화수소가 배출되지 못하고 심부 근원암내에 남아있는 것이 관찰된다. 또한 2-D 단면상의 최대매물 지역에 가상시추공을 설정하여 탄화수소의 생성과 배출 시기를 확인하였으며, 2-D 모델링 결과와 잘 일치하는 것이 확인된다. 이와 같이 모델링을 통해 탄화수소의 생성, 이동, 집적과정이 잘 관찰되어 석유시스템이 인지되며, 이는 시추공에서 확인된 유징과 가스징의 존재로 실증된다. 한편, 소라분지는 분지규모가 작고 매몰심도가 깊지 않았기 때문에 근원암에서 많은 양의 탄화수소가 생성되기 어려웠을 것이며, 이에 따라 탄화수소 집적체의 규모도 비교적 작을 것으로 판단된다.

주요어: 남해대륙붕, 소라분지, 석유시스템, 모델링, 석유, 가스, 탄화수소

Seul A Lee and Byeong-Kook Son, 2016, Petroleum system modeling of the Sora basin, offshore southern Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 333-353

ABSTRACT: Petroleum system modeling was performed on the Sora Basin located in the northeastern tip of the Jeju Basin, offshore southern Korea to understand generation, migration, and accumulation of hydrocarbon. The Sora Basin has geologically essential elements of petroleum system, including source rock, reservoir rock, seal rock, and overburden rocks. 1-D modeling indicates that hydrocarbons are generated from the lowermost Eocene source rock, and expelled actively from the source rock that is situated within the depocenter of the basin. 3-D modeling shows that hydrocarbon migrates northwest and east toward the margin of the basin. 2-D modeling was carried out on a seismic section across the entire basin to clarify generation, migration, and accumulation of hydrocarbon in the Sora Basin. The result of 2-D modeling indicates that hydrocarbon begins to be expelled from the source rock and migrates actively upward at 28 Ma. The migration mainly occurred along the faults developed within the basin. In addition, the formation boundaries also act as lateral migration paths. A significant amount of hydrocarbon, which failed to be expelled, still remains in the deep source rock although hydrocarbon generation continued as burial depth increased. Additional 1-D model was also made on a pseudo-well drilled at a pod of the source strata. The result shows that timing of generation and expulsion of hydrocarbon is well coincident with the 2-D modeling result. All the modeling results in this study could be validated by the oil and gas shows observed during the drilling work. A huge amount of hydrocarbon, however, may not be possible to be generated from the source rock due to small size of basin and low degree of burial. Consequently, the hydrocarbon accumulations would be relatively the small-sized in the basin.

Key words: offshore southern Korea, Sora Basin, petroleum system, modeling, oil, gas, hydrocarbon

* Corresponding author: +82-42-868-3028, E-mail: sbk@kigam.re.kr

(Seul A Lee, Department of Petroleum and Resources Technology, University of Science and Technology, 217 Gajung-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea; Byeong-Kook Son, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서론

석유탐사에서 탐사 실패율을 줄이고 유망지역을 예측하기 위해서는 석유시스템의 개념을 이해하여 적용하는 것이 매우 중요하다(Underdown and Redfern, 2008). 석유시스템은 석유를 생성할 수 있는 성숙된 근원암과 생성된 석유가 근원암으로부터 배출되고 이동되어 집적되는데 필요한 지질학적 요소와 그 과정을 시공간적으로 생각하는 자연계 시스템으로 정의될 수 있다(Magoon and Dow, 1994; Han *et al.*, 2013).

석유시스템 분석은 시간과 공간에 따른 탄화수소의 생성과 배출 그리고 이동에 관한 정보를 얻어 석유유망성을 규명할 수 있기 때문에 그 중요성은 더욱 강조되고 있다(Underdown and Redfern, 2008). 최근에는 석유가스 자원의 매장량 평가에서 석유시스템이 기본단위로 사용되고 있다(Ahlbrandt *et al.*, 2005; Gautier *et al.*, 2009). 또한 셰일가스 탐사와 같은 비전통 석유자원(unconventional petroleum resource)의 탐사에도 석유시스템의 영역이 확대되고 있다(Jarvie *et al.*, 2007).

이러한 석유시스템을 구성하는 지질학적 구성요소와 그 구성요소에서 발생하는 물리, 화학적 작용을 이해하고 가시화하기 위해서는 석유시스템 모델링이 매우 효과적이다. 석유시스템 모델링은 열성속도, 석유 생성, 석유 이동에 대하여 비선형 방정식의 해를 수치적으로 계산하고, 석유의 집적과정을 컴퓨터상에서 가시화하는 시뮬레이션이기 때문에 탄화수소 유망지역을 예측하는데 매우 효과적인 방법이다.

석유시스템 모델링은 국내 대륙붕 지역의 지속적인 석유탐사와 발견에 큰 기여를 하고 있으며 많은 연구 논문이 발표되어 왔다(Lee and Son, 2007; Park, E.J., 2011; Park, M.S., 2012; Kim and Son, 2013). 최근 Lee and Son (2007)은 동해 울릉분지에 대한 석유시스템 모델링을 수행하여 탄화수소의 집적 위치를 확인하였고, Kim and Son (2013)은 제주 분지에 대한 석유시스템 분석을 통해 탄화수소의 유효 근원암과 집적 위치를 규명한 바 있다.

한반도 주변 해역에는 석유의 발견 가능성이 기대되는 여러 퇴적분지가 존재한다(그림 1). 남해 대륙붕에는 규모가 큰 제주분지가 위치하며 제주분지의 북동쪽 말단부에는 제주분지의 형성과 관련된 소분지들이 위치한다. 소분지 지역은 남동부로 갈수록 퇴적층의 두께가 두꺼워져 일본 측 해역으로 이어지는 특징을 가지며(Kim *et al.*, 2008), 석유탐사 결과 유징과 가스징이 확인된 바 있다(Lee *et al.*, 2008). 그 동안 연구지역에 대한 선행 연구에는 층서 및 고환경 해석 연구, 탄성과 단면 해석 및 전산처리 연구 등이 있었다(Kim *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Yun *et al.*, 2012). 그러나 유징과 가스징과 같은 석유시스템의 직접적인 증거가 존재함에도 불구하고 아직까지 이 지역의 석유시스템에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않았다.

이 연구에서는 이들 소분지 중 소라분지에 대한 1-D, 2-D, 3-D 석유시스템 모델링을 수행하여 소라분지의 탄화수소 생성, 배출, 이동 그리고 집적 형태를 규명하고자 한다. 소라분지의 전 지역을 포함하는 탄성과 및 구조 단면과 시추공 자료를 바탕으로 석유시스템 분석 및 모델링을 수행하여 소라분지의 석유시스템을 확인하고, 분지 내 석유의 생성, 이동, 집적 과정을 재현하였다. 이러한 석유시스템 모델링 분석 결과는 연구지역 내 유망지역을 예측하고, 추후 석유자원 탐사 지역을 추정하는 데에 유용하다. 따라서 소라분지의 지속적인 석유탐사와 발견에 기여하고자 이 연구를 수행하였다.

2. 연구방법 및 자료

석유시스템 모델링을 수행하기 위해서는 충분한 자료의 수집이 요구되며, 수집된 자료를 철저히 분석하여 모델링에 적합한 입력 값을 추출하는 과정이 필요하다(Welte and Yalçın, 1987; Poelchau *et al.*, 1997; Welte *et al.*, 2012). 모델링에 필수적인 자료에는 층서 및 지층 연대, 암상, 유기물 함량 및 특성, 그리고 탄성파로부터 추출된 각 퇴적층의 심도 자료 등이 있다. 이들 자료는 선행된 학위논문, 학술논문, 그

리고 한국지질자원연구원 보고서 등으로부터 정량적으로 추출하였다(Kwon, 1996; Lee, 1997; Cheong *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Kim and Son, 2013). 또한 문헌에 수치가 없는 경우는 그림으로부터 근사치를 추출하여 입력하였다.

추출된 입력자료를 바탕으로 소라분지에 대한 1-D, 2-D, 3-D 석유시스템 모델링을 수행하였다. 1-D 모델링을 통해 소라분지의 매몰사 및 지열사를 복원하여 탄화수소의 생성 시기 및 생성량을 계산하였고, 3-D 모델링을 수행하여 저류층(운반층, carrier bed) 내에서의 탄화수소 이동 및 집적 양상을 확인하였다. 또한 2-D 모델링을 통해 단면상에서 탄화수소의 이동 방향과 경로, 그리고 집적 위치를 정밀하게 가시화하였다. 한편, 분지 중심부에 가상시추공(pseudo-well)을 설정하여 소라분지를 대표하는 유효 근원암의 특성을 규명하였다.

모델링을 수행하기 위해 Platte River Associates (PRA)사의 BasinMod[®]와 Schlumberger사의 PetroMod[®] 소프트웨어를 사용하였다. 1-D 및 3-D 모델링은 BasinMod[®]를 사용하였으며, 2-D 모델링은 PetroMod[®]

를 사용하였다. 1-D 모델링과 3-D 모델링 계산은 같은 속성을 갖는다. 즉, 3-D 모델링은 수많은 1-D 모델을 계산하는 개념이다. 또한 3-D 이동모델의 계산은 부력과 지층형태를 기반으로 한 간단한 계산이지만, 2-D 이동모델의 계산은 훨씬 복잡하고 정교한 계산이 수행되어야한다. PetroMod[®] 소프트웨어의 2-D 모듈은 BasinMod[®] 소프트웨어의 2-D 모듈에 비하여 다양한 탄화수소 이동 계산방법을 적용할 수 있는 장점이 있다. 따라서 2-D 모델링을 위해서는 PetroMod[®] 소프트웨어를 사용하였다.

1-D 모델링은 소라분지에서 시추된 2개 시추공에 대해 수행하였다. 필요한 지질학적, 지화학적 자료를 입력하였으며, 이를 바탕으로 열성속도 모델링, 매몰사 및 지열사 모델링을 실시하였다. 그 중, 열성속도 모델을 도출하기 위해 Easy%R_o 알고리즘을 사용하여 비트리나이트 반사도를 계산하였다(Sweeney and Burnham, 1990). 이때, 계산된 열성속도 모델을 최적의 모델로 보정하기 위하여 비트리나이트 반사도(vitrinite reflectance; R_o)와 록에발(rock-eval) 열분해 온도(T_{max})를 사용하였다.

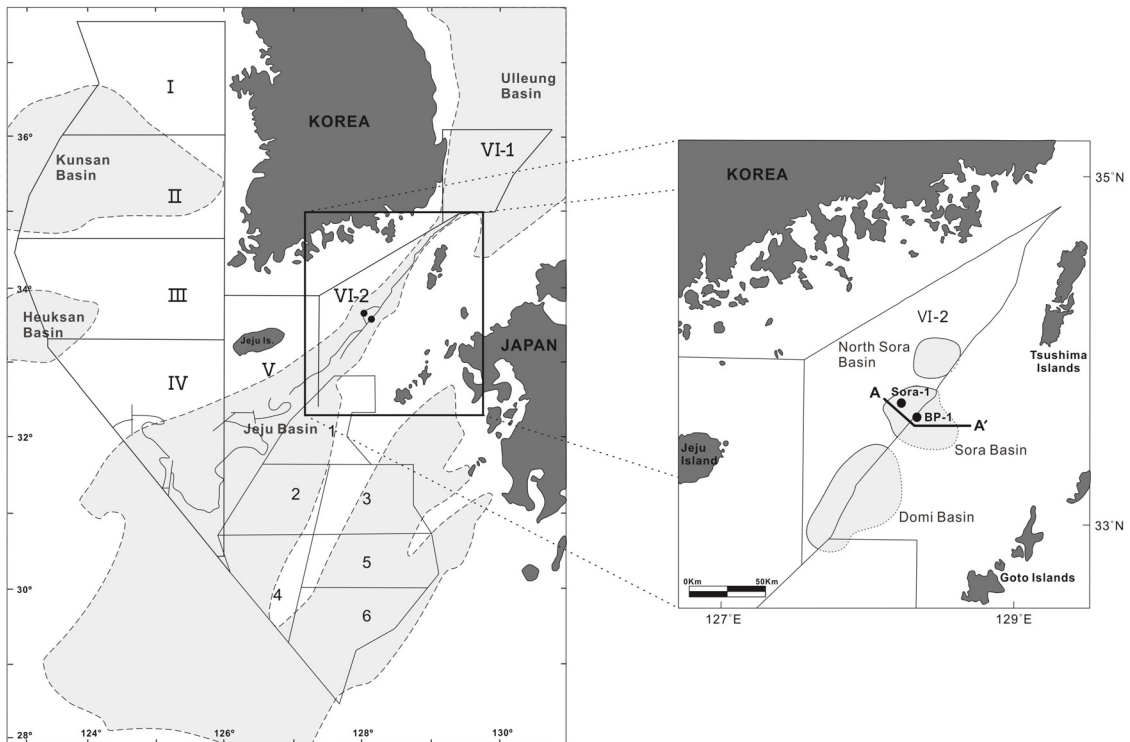


Fig. 1. Location map of the Sora Basin including studied wells and seismic line.

열성속도 모델을 제어하는 과정에서 고지열류량 모델도 완성하였으며, 고지열류량 모델은 2-D, 3-D 모델에 동일하게 적용하였다. 열성속도 모델과 유기물 입력자료로부터 탄화수소의 생성량과 배출량을 지질시대에 따라 계산하였다. 이때, 탄화수소의 생성은 반응속도(kinetics) 모델을 사용하여 계산하였다(Ungerer *et al.*, 1990; Welte *et al.*, 1996). 또한 근원암에서 탄화수소의 배출시기와 양은 탄화수소가 근원암 내 공극의 일정비율을 채웠을 때 배출이 일어난다는 역치법(threshold method)을 사용하여 계산하였으며, 기본 역치 값은 20%로 설정하였다(Bordenave, 1993; Welte *et al.*, 1996; Okui *et al.*, 1998).

1-D 모델링 결과는 2-D와 3-D 모델링의 입력자료로 사용되었다. 또한 소라분지에서 취득된 탄성과 자료를 해석하여 각 층준에 대한 심도구조도(elevation map)를 작성하고, 3-D 모델링을 수행하였다. 그러나 3-D 모델은 부력과 지층형태에만 지배되며, 단층의 영향이 배제된 조건에서 계산한 단순한 결과만을 보여주게 된다. 따라서 2-D 모델링을 통해 탄화수소의 이동형태에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 2-D 모델링을 수행하기 위해서 소라분지 전체를 동서로 가로지르는 탄성과 자료를 선택하여 탄화수소가 생성되고 배출되어 이동, 집적되는 과정과 그 위치를 구체적으로 가시화하였다. 이때, 석유가스의 이동모델은 다시의 법칙(Darcy's law)을 적용한 다상유체 방정식(multi-phase flow equation)을 사용하여 계산해주었다.

3. 지질 개요

남해 대륙붕에는 도미분지, 소라분지, 북소라분지의 3개 소분지가 존재하며, 각 소분지는 기반암 용기부에 의해서 구분된다. 이들 3개 소분지는 남해 대륙붕의 대부분을 차지하는 제주분지의 북동쪽 말단부에 존재하는 작은 소분지들이다(그림 1). 또한 제주분지는 광역적으로 동중국해 대륙붕 분지의 북동부에 해당하며, 동중국해 분지는 후기 백악기에서 팔레오세 사이에 발생한 열개작용에 의해 형성된 열개 분지이다(Meng and Chou, 1976; Li, 1984). 따라서 소라분지의 발달사 역시 제주분지의 발달과정과 연관이 있는 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2008).

제주분지는 남쪽으로 갈수록 기반암의 심도가 깊

어지는 특징을 가지며, 유라시아판과 태평양판, 필리핀판 사이의 구조작용으로 발달한 분지로서 팔레오세에서 에오세 시기의 열개작용에 의해 지구대 및 반지구대가 형성되었다(Li, 1984; Jolivet *et al.*, 1989; Zhou *et al.*, 1989; Lee, 1997). 후기 올리고세에서 전기 마이오세 동안에 침강이 계속되었으며 지구 및 반지구대 지역에 퇴적물이 충전되었다. 후기 마이오세에는 구조역전의 발생으로 분지전체에 침식부정합면(angular unconformity)과 습곡구조가 발달하였다. 전기 플라이오세 이후부터 현재까지 제주분지는 광역적인 침강단계에 들어갔으며, 해침으로 현재와 같은 대륙붕 환경이 형성되었다(Zhou *et al.*, 1989; Lee, 1997).

북동쪽 소분지에도 제주분지와 같이 후기 백악기 말에서 팔레오세에 발생한 인장력에 의해 지구 또는 반지구 구조가 형성되었다(Zhou *et al.*, 1989). 전기 마이오세 이후에 광역적인 침강단계에 들어갔고, 북서-남동방향의 신장이 일어나 북동-남서 주향의 단층계가 발달하고 분지가 확장되었다(Kim *et al.*, 2008). 후기 마이오세에는 구조운동 및 용기가 일어나 침식작용이 발생했으며, 플라이오세로 들어가면서 광역적인 해침작용을 받아 현재와 같은 대륙붕 환경으로 변이하였다(Kim *et al.*, 2008; Yun *et al.*, 2012).

소라분지가 속한 제주분지의 북동쪽 말단부는 남동방향으로 갈수록 매몰심도가 깊어지며 일본해역까지 연장된다(Hirayama, 1991; Kim *et al.*, 2008; Yun *et al.*, 2012). 소라분지 최하부 지층의 연대에 대해 국내 측(HADSON, 1989)에서는 올리고세 또는 전기 마이오세로 해석한 바 있고, 일본 측(Itoh and Nagasaki, 1995, 1996)에서는 전기 에오세 또는 팔레오세라고 해석하여 시대 해석상의 불일치가 있었다. 그러나 최근 연구에서 제주분지의 북동쪽 소분지들과 대비되는 일본의 후쿠에-1공의 분석결과를 바탕으로, 일본 북서부 큐슈지역의 제3기 분지 자료와 대비하여 분지 최하부층의 연대를 재설정하였는데(Kim *et al.*, 2008; Yun *et al.*, 2012), 소라분지 최하부 지층의 연대는 에오세로 제시되었다(Lee *et al.*, 2008).

4. 시추공 1-D 모델링

4.1 입력 개념 및 조건

이 연구에서는 소라분지에 시추된 2개의 시추공

(Sora-1공, BP-1공)에 대하여 1-D 모델링을 수행하였다. Sora-1공과 BP-1공의 총 심도는 3,167 m와 4,060 m이다(그림 2). Sora-1공은 소라분지의 가장 자리에서 시추되었고, BP-1공은 소라분지의 중심부에서 시추되었다. 최근 연구는 이들 시추공을 에오세에서 플라이스토세에 이르는 퇴적층으로 설정하고 있다(Kim *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Yun *et al.*, 2012).

1-D 모델링을 수행하기 위해서는 시추공에 대한 지질학적, 지화학적 지질정보를 정량화하여 소프트웨어에 입력하는 과정이 필요하다. 즉, 층서, 암상, 지층 연대, 침식 두께, 총 유기탄소함량(total organic carbon; TOC), 유기물의 종류 등을 각 시추공마다 추출하여 정량화된 수치로 입력해주어야 한다. 이처럼 시추공에 대한 지질학적, 지화학적 자료를 수치상으로 입력하는 일은 모델링에서 가장 필수적인 과정이다(Waples *et al.*, 1992).

각 퇴적층의 층서 및 연대 정보는 시추공 자료, 탄

성파탐사 자료 등 기존의 연구 자료를 재해석하고 정량화하여 입력해 주었으며(표 1), 최근 연구와 일본 측의 통합된 연대 설정 결과를 바탕으로 소라분지의 층서를 설정하였다. 층서 경계는 4개의 광역적인 탄성과 반사면을 기준으로 구분하였고, 반사면을 경계로 4개의 Megasequence로 구분하였으며 각각을 아래에서부터 에오세, 중기 올리고세, 초기 마이오세, 후기 마이오세~플라이오세에 해당하는 것으로 설정했다(Lee *et al.*, 2008).

1-D 모델링에서 시추공에 대한 암상은 학위논문과 한국지질자원연구원 보고서에 실린 Sora-1공과 BP-1공의 분석 자료를 참고하였다(Cheong *et al.*, 2001; Lee, 2011; Park, 2011). 2개 시추공의 암상은 그림 2와 같다. Sora-1공은 시추공 하부에서 상향조립의 두꺼운 퇴적층이 나타나며, 시추공 상부에는 얇은 탄층이 협재되어 나타난다(KIER, 1982). 시추공 하부의 에오세층에서는 셰일 및 실트암, 그리고 조립의 사암이 관찰되

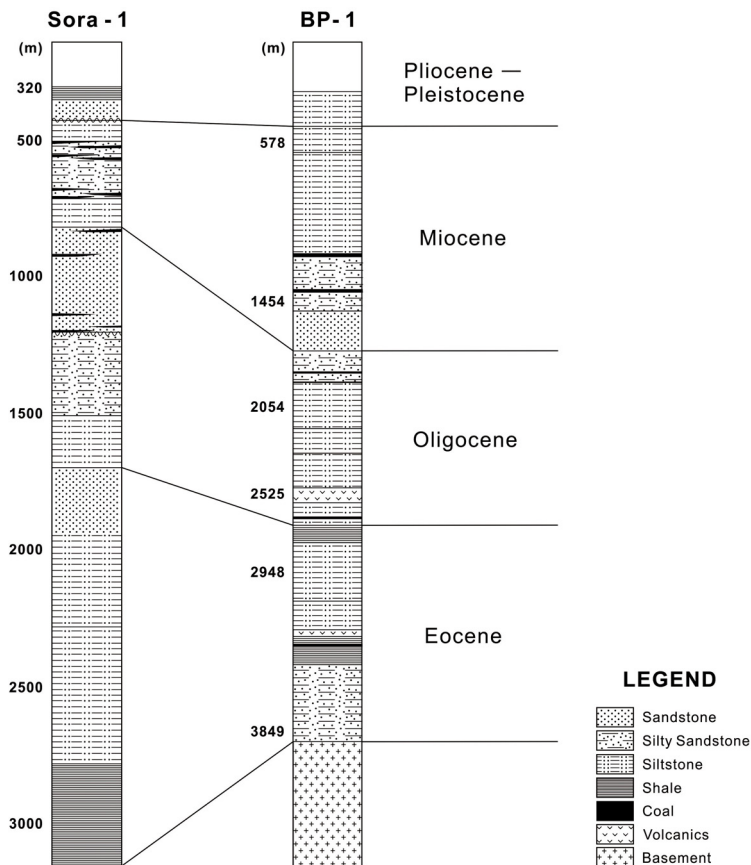


Fig. 2. Stratigraphy and lithology of study wells (modified from Cheong *et al.*, 2001 and Park, 2011).

Table 1. Input parameters for 1-D modeling.

Well Name	Rock Unit	Begin Age (Ma)	Top Depth (m)	Lithology	Petroleum System Elements
Sora-1	Plio-Pleistocene 2	2.1	320	Ss 25%, Sh 75%	Seal
	Plio-Pleistocene 1	5.3	405	Ss 90%, Sh 10%	Seal
	L. Miocene	7.5	440	Ss 25%, St 15%, Sh 60%	
	E. Miocene 2	17.4	512	Ss 40%, St 30%, Sh 20%, K 10%	
	E. Miocene 1	21.5	715	Ss 35%, St 5%, Sh 55%, K 5%	
	L. Oligocene	27	850	Ss 70%, Sh 25%, K 5%	Reservoir+Seal
	E. Oligocene 2	29.3	1217	Ss 27%, St 45%, Sh 28%	Reservoir
	E. Oligocene 1	31.4	1513	Ss 25%, St 10%, Sh 65%	Reservoir
	L. Eocene	34.6	1700	Ss 30%, St 30%, Sh 40%	Source
	E. Eocene	50	2300	Ss 20%, Sh 80%	Source
BP-1	Plio-Pleistocene	5.3	138	St 40%, Sh 60%	Seal
	Erosion	5.4	-25		
	L. Miocene	11.2	439	St 50%, Sh 50%	Seal
	E. Miocene 4	20	578	St 36%, Sh 64%	
	E. Miocene 3	21	940	Ss 20%, St 58%, Sh 22%	Reservoir
	E. Miocene 2	22	1160	Ss 17%, St 58%, Sh 25%	
	E. Miocene 1	23	1480	Ss 40%, St 27%, Sh 33%	Reservoir
	L. Oligocene 2	27	1690	Ss 20%, St 60%, Sh 20%	Reservoir
	L. Oligocene 1	28	2080	Ss 15%, St 55%, Sh 30%	
	E. Oligocene 2	31	2210	St 56%, Sh 44%	Reservoir
	Igneous 2	32	2480	Igneous 100%	
	E. Oligocene 1	33	2550	St 55%, Sh 45%	Source
	L. Eocene 2	35	2610	St 42%, Sh 53%, K 5%	Source+Seal
	L. Eocene 1	40	2750	Ss 20%, St 48%, Sh 32%	Reservoir
	E. Eocene 3	44	3100	St 66%, Sh 34%	Reservoir+Seal
	Igneous 1	45	3240	Igneous 100%	
E. Eocene 2	50	3290	Ss 17%, St 30%, Sh 53%	Source	
E. Eocene 1	52	3770	St 80%, Sh 20%	Source+Reservoir	

고, 상부로 가면서 올리고세층과 마이오세층에서는 사암과 실트암이 교호하며 나타나는 것을 확인할 수 있다. 시추공 상부에 퇴적된 플라이오세~플라이스토세층은 사암과 이암이 호층으로 나타나는 것이 관찰된다. BP-1공은 하부의 에오세층에서 실트암(또는 이암)이 우세하며, 상위에 퇴적된 올리고세층과 마이오세층에서는 사암 및 실트암이 우세하다. 또한 약 2,500 m와 3,200 m 부근의 심도에서 화산암층이 관찰된다. 1-D 모델링에서는 이와 같은 시추공 암상을 기초로 하여 각 퇴적층 단위의 암상을 사암(sandstone), 실트암

(siltstone), 셰일(shale), 탄층(coal), 화산암(volcanics) 등의 혼합비로 입력하였으며, 이를 토대로 소프트웨어 내에서 암석의 물성을 계산하였다.

1-D 모델링에서는 직접 측정된 값의 입력이 필요하며 그 중, TOC (total organic carbon)값은 근원암의 석유생성 잠재력을 평가하는데 가장 중요한 기준이 된다. 일반적으로 TOC값이 0.5wt% 이상인 근원암은 석유생성 잠재력을 갖는 것으로 알려져 있다. Sora-1공은 시추구간 내 대부분의 시료에서 매우 높은 TOC값이 측정된다(Cheong *et al.*, 2001). Sora-1

공은 분지 가장자리의 연안환경에 위치하고 간간히 늪지환경으로 변화하여 탄질물의 발달과 유입 가능성이 높았다. 따라서 매우 높게 나타나는 TOC값은 탄질물의 영향이 크게 반영된 것으로 생각된다. BP-1공은 시추구간 내 시료의 TOC값이 0.3wt%~18wt%의 넓은 범위로 나타난다. 그러나 근원암 구간의 시료에서는 대부분 3~5wt%의 TOC값을 가지며, BP-1공에서도 탄질물이 발견되는 점으로 보아 높게 측정되는 TOC값들은 탄질물 유입의 영향으로 생각된다. 이 연구에서는 시추공 암상과 TOC값, 록에발(rock-eval) 열분해 분석 자료, 그리고 분지발달 과정을 고려하여 분지발달 초기에 형성된 세일층인 에오세층을 근원암층으로 설정하였다. 소라분지 근원암층의 암상은 세일, 실트암, 사암이 반복적으로 나타나므로 TOC 함량의 변화가 크다. 석유시스템 모델링에서는 근원암층에 대하여 초기(initial) TOC값을 입력해주어야 한다. 그러나 유기물의 성숙이 진행되면서 유기물 함량은 감소하기 때문에 초기 TOC 함량은 현재 측정된 TOC값보다 높았을 것을 고려해야 한다(Daly and Edman, 1987). 따라서 탄질물의 영향을 받지 않은 시료에서 측정된 TOC 함량을 고려하여, 근원암의 초기 TOC값을 5wt%로 입력하였다.

케로젠 타입은 근원암에서 석유와 가스가 생성되고 배출되는데 결정적인 역할을 한다. 소라분지가 속한 제주분지의 케로젠은 시추공과 퇴적시기에 따라 약간의 차이를 보이지만 전체적으로 타입 II와 타입 III의 혼합형으로 나타난다(Cheong *et al.*, 2002).

소라분지에 위치한 2개 시추공에서 타입 II와 타입 III의 우세 정도는 다르게 나타났으며(그림 3), Sora-1공은 타입 II 10%와 타입 III 90%, BP-1공은 타입 II 80%와 타입 III 20%로 혼합된 값을 입력하여 키네틱스를 계산하였다.

1-D 모델링은 이와 같은 입력 조건하에서 계산을 수행하여 열성숙도(thermal maturity), 매몰사(burial history), 지열사(thermal history)를 복원하고, 근원암으로부터 석유와 가스가 생성되고 배출되는 시기 및 양을 계산하였다.

4.2 열성숙도 및 고지열류량 모델

열성숙도는 시간경과와 지온변화에 기인하여 변화하며, 비트리나이트 반사도에 의해 정량적으로 표시된다. 열성숙도를 계산하여 모델링하기 위해서는 과거와 현재의 지열류량(heat flow)값이 필요하다. 고지열류량을 복원하기 위해 열성숙도 지시자인 비트리나이트 반사도를 사용하였다(Waples *et al.*, 1992). 비트리나이트 반사도 계산은 Sweeney and Burnham (1990)의 반응속도(kinetics) 모델을 사용했으며, 실제 측정된 비트리나이트 반사도 값과 모델링으로 계산한 값을 일치시키는 교정과정(calibration)을 반복하여 최적의 성숙도 곡선을 갖는 모델을 도출하였다(그림 4).

그림 4는 소라분지에 위치한 2개 시추공에 대한 열성숙도 모델링 결과이며, 대체로 Sora-1공과 BP-1공의 열성숙도는 심도가 깊어짐에 따라서 증가하는

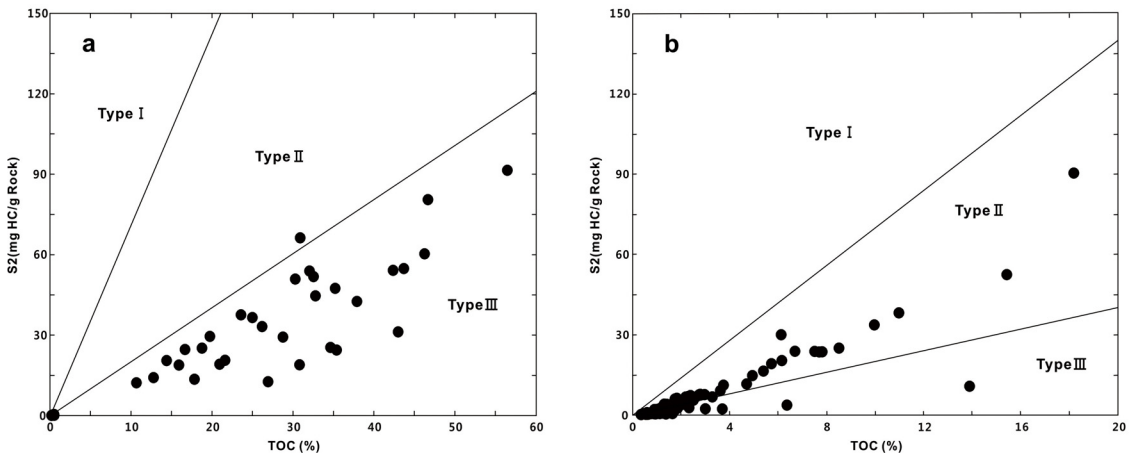


Fig. 3. S2 vs. TOC diagrams for kerogen type. a: Sora-1, b: BP-1. Data comes from Cheong *et al.*, 2001 and Lee, 2011.

모습을 보인다. 그림 4a는 Sora-1공의 비트리나이트 반사도와 성숙도 모델을 보여준다. Sora-1공은 실제 측정된 비트리나이트 반사도의 개수가 BP-1공에 비해 훨씬 적다. 1,000 m~1,300 m의 구간에서 비트리나이트 반사도가 일정하게 나타나는데 이는 시추공 붕락(caving)의 영향으로 보인다. 시추공 하부 구간에서는 심도가 깊어짐에 따라 비트리나이트 반사도가 증가하는 경향을 갖는다. 따라서 정밀교정과정(calibration)에서는 붕락 구간의 값들을 제외하고 하부 구간의 값들을 이용하여 최적의 성숙도 모델을 도출하였다. 이렇게 얻어진 성숙도 모델은 실제 측정된 비트리나이트 반사도를 고려하여 최적화하였다. 이에 따라 Sora-1공은 약 1,900 m 부근에서 석유생성단계에 도달한 것으로 모델링된다(그림 4a).

BP-1공은 매몰심도가 깊은 분지의 중심부에 위치하며 높은 성숙도가 기대된다. 그러나 실제 측정된 비트리나이트 반사도는 키네틱 계산에 의한 값보다 전체적으로 매우 낮은 값을 보여준다(그림 4b). 석유생성단계의 기준인 0.6%Ro에 도달하는 심도는 약 2,000 m 부근이지만, 실제 이 깊이에서 측정된 비트

리나이트 반사도는 0.15~0.3%Ro의 범위로 매우 낮게 나타나고 있다.

이처럼 측정된 비트리나이트 반사도가 낮게 나타나는 것은 성숙도 억제현상(suppression)에 의한 것으로 판단된다(Lo, 1993; Carr, 2000; Jarvie *et al.*, 2001; Ujii *et al.*, 2004; Peters *et al.*, 2005). 성숙도 억제현상은 비트리나이트 반사도가 심하게 낮게 측정되는 현상으로 수소함량이 높은 케로젠 타입 II가 우세한 퇴적 환경에서 주로 나타난다. BP-1공은 케로젠 타입 II가 우세하며(그림 3), 수소함량이 높게 나타나는 것으로 보아 억제현상을 받았을 가능성이 높다. 이와 같은 이유로, 성숙도 모델링을 수행하기 위해 록에발(rock-eval) 열분해 온도 T_{max} 를 비트리나이트 반사도로 변환하여 사용하였다(Jarvie *et al.*, 2001). T_{max} 값은 435°C 이상일 경우에 유기물이 열적성숙단계에 도달한 것으로 판단한다. 케로젠 타입 II일 경우에는 T_{max} 를 비트리나이트 반사도로 변환할 때 0.6%Ro 이상을 석유생성단계에 도달하는 것으로 간주한다. 이때, 변환식은 $R_o = (0.0180)(T_{max}) - 7.16$ 을 사용하였다(Bordenave, 1993; Miukhopadhyay *et al.*, 1995; Jarvie *et al.*, 2001; Peters

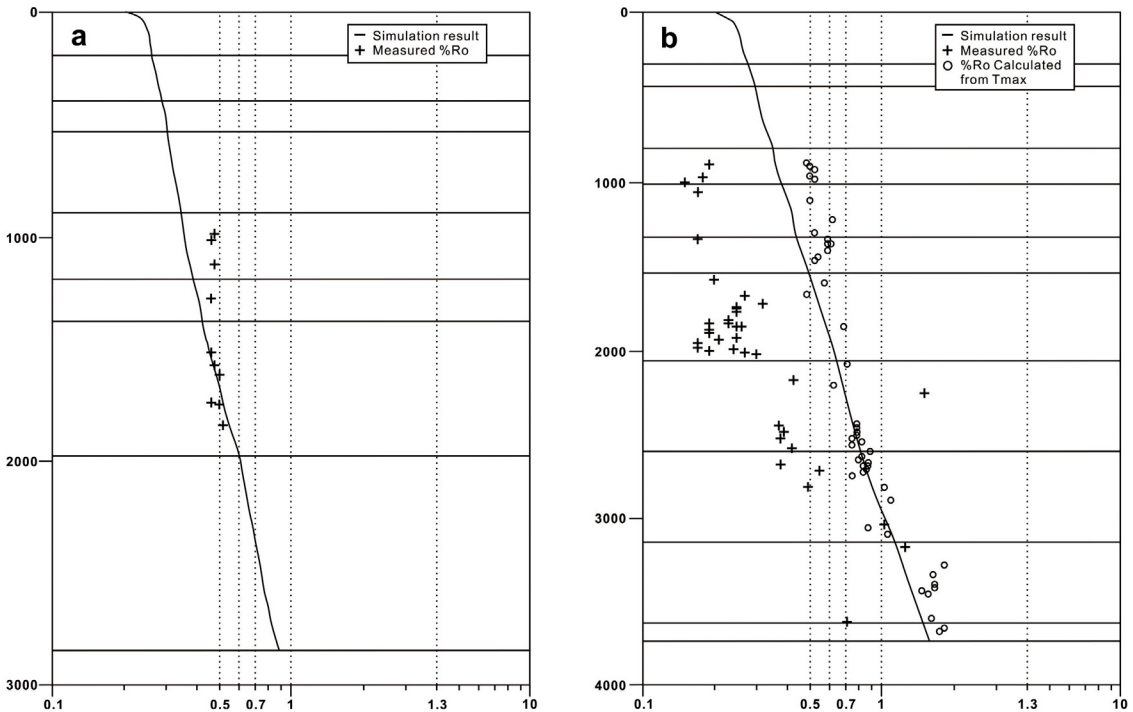


Fig. 4. Maturity models calculated by comparing with R_o and T_{max} . Note that BP-1 has very low values of R_o . a: Sora-1, b: BP-1.

Table 2. Organic and maturity data of wells.

Well Name	Sample Depth (m)	Age	TOC (wt%)	S2 (mgHC/gRock)	HI	T _{max} (°C)	R _o (%)
Sora-1	320-440	Plio-Pleistocene					
	440-850	Miocene	25.02-46.7	24.4-80.48	68.88-172.33	407-423	
	850-1700	Oligocene	17.87-43.02	12.62-66.23	46.81-214.12	419-429	0.46-0.48
	1700-3167	Eocene	0.23-56.5	0.02-91.4	8.69-161.76	420-446	0.46-0.52
BP-1	138-439	Plio-Pleistocene					
	439-578	L. Miocene					
	578-1690	E. Miocene	0.37-15.41	0.29-52.51	69-491	424-432	0.15-0.19
	1690-2210	L. Oligocene	1.23-18.17	1.96-90.39	142-497	424-436	0.17-0.32
	2210-2610	E. Oligocene	1.72-4.7	4.68-11.71	249-345	434-442	0.37-1.51
	2610-3100	L. Eocene	0.5-2.79	0.66-7.8	73-291	439-458	0.38-0.55
	3100-4060	E. Eocene	0.35-13.88	0.27-10.82	36-221	447-500	0.72-1.26

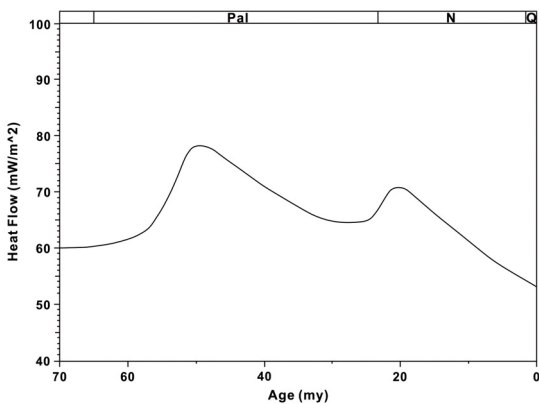


Fig. 5. Heat flow history model.

et al., 2005). BP-1공의 T_{max} 값은 시추공의 578~1,690 m 구간에서 424~432°C, 1,690~2,210 m 구간에서 424~436°C, 2,210~3,100 m 구간에서 434~458°C의 범위를 보인다. 또한 3,100 m 이상의 구간에서는 447°C 이상의 T_{max} 값을 보인다(표 2). BP-1공은 전체적으로 매몰심도가 깊어짐에 따라 T_{max} 값도 증가하는 것이 관찰된다. T_{max} 값에 대한 정밀교정과정(calibration)을 통해 BP-1공의 성숙도 모델을 도출하였으며, 약 2,000 m 부근에서 석유생성단계에 들어간 것이 확인된다(그림 4b).

비트리나이트 반사도 및 T_{max}와 일치되는 열성속도 모델링을 수행하는 과정에서 그림 5와 같은 고지열류량 변화곡선이 완성되었다. 이는 분지 발달사를 고려하여 열성속도 모델을 검증하는 과정에서 결정

된 지열류량 모델이다. 즉, 열개(rifting)가 발생하기 전까지 지열류량은 점점 증가하여 분지가 열개될 때에 최대값을 가지며, 열개 이후에 점차 감소하는 모양을 갖는다(Mckenzie, 1978). 소라분지가 열개되기 시작한 시기에 고지열류량이 80 mW/m²까지 증가되었다. 그 후 감소하던 지열류량은 분지 내에 화산암이 관입한 전기 마이오세에 다시 약 70 mW/m² 정도를 보인다(Lee, 2011). 그 후, 고지열류량은 현재까지 계속해서 감소하는 것으로 모델링되며, 이와 같은 결과는 2-D, 3-D 모델링 과정에도 동일하게 적용하였다.

4.3 1-D 모델링 결과

그림 6과 7은 Sora-1공과 BP-1공에 대한 1-D 모델링 결과로서 매몰사 및 지열사, 탄화수소의 생성 및 배출 시기와 그 양, 그리고 석유시스템 구성요소의 발달시기를 보여준다.

Sora-1공은 에오세~올리고세 동안 퇴적물과 지열류량이 높았으며, 이로 인해 최하부 퇴적층이 약 32 Ma에 1,700 m 부근에서 석유생성단계에 도달하였다(그림 6). 이후, 매몰심도가 증가함에 따라 석유와 가스의 생성이 약 15 Ma까지 급격하게 증가한다. 그러나 현재까지 생성은 계속되고 있으나 배출은 일어나지 않고 있다. 이는 Sora-1공이 분지 가장자리에 위치해 퇴적층의 매몰정도가 크지 않아 열성속도가 낮았기 때문에 근원암에서 석유 및 가스가 생성은 되었지만 근원암으로부터 배출은 발생하지 않은

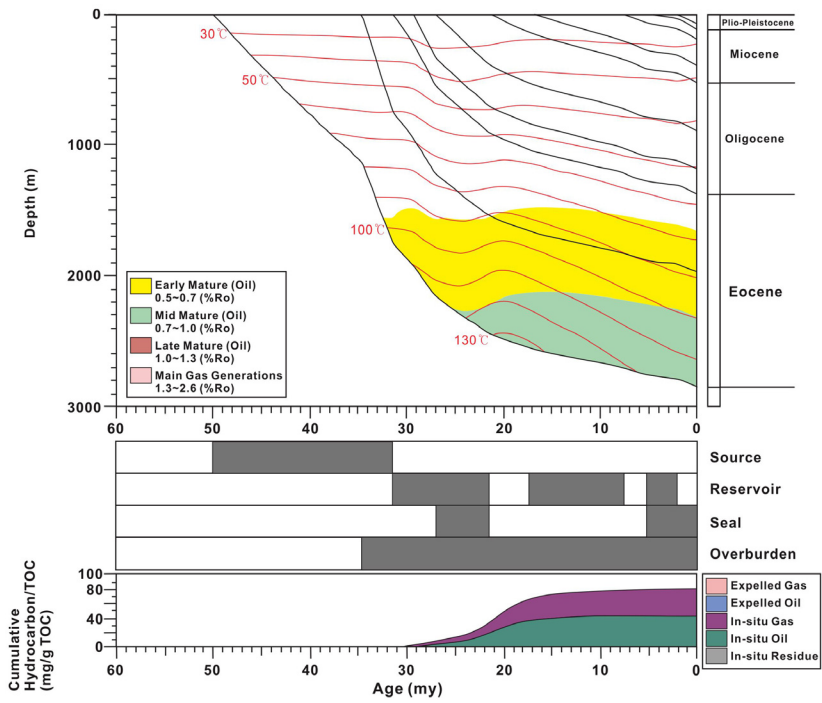


Fig. 6. 1-D petroleum system model of the Sora-1 well including burial and thermal history, petroleum system chart, and cumulative hydrocarbons through geologic time.

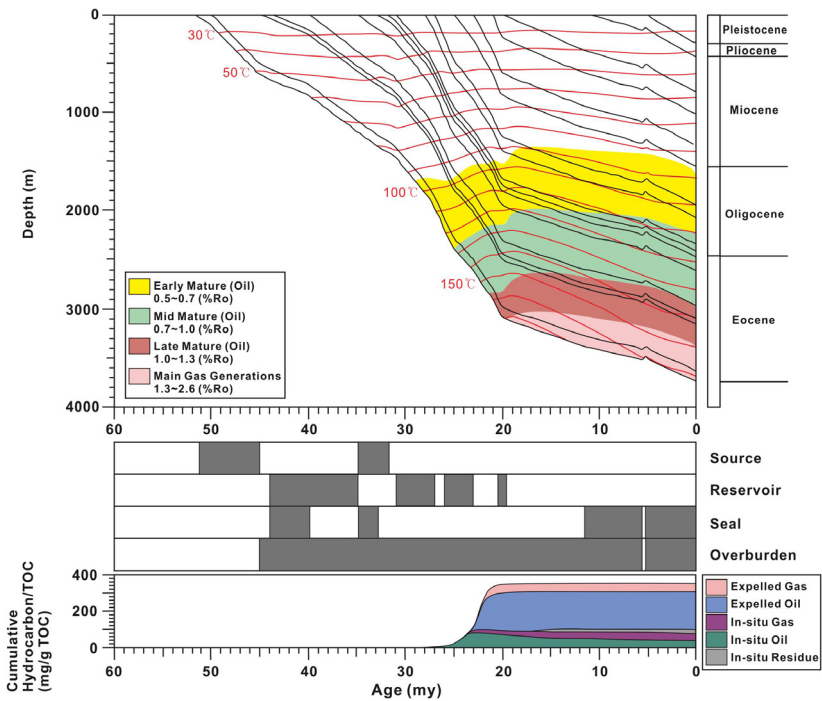


Fig. 7. 1-D petroleum system model of the BP-1 well including burial and thermal history, petroleum system chart, and cumulative hydrocarbons through geologic time.

Table 3. Input parameters of stratigraphy for 3-D modeling.

Unit of Event	Type	End Age (Ma)	Petroleum System Elements
<sediment surface>		0	
Plio-Pleistocene Formation	F/D	0	Seal
Miocene Formation	F/D	5.3	
Oligocene Formation	F/D	21.5	Reservoir
Eocene Formation	F/D	31.4	Source
BST	F/D	50	
<model bottom>		51	

것으로 생각된다.

BP-1공은 에오세~올리고세 시기에 높은 퇴적율을 보였으며, 이후에는 비교적 안정적으로 퇴적층의 매몰이 진행되었다. 후기 마이오세~플라이오세에 약간의 용기 및 침식작용을 받았으며, 플라이오세 및 플라이스토세 시기에 퇴적층이 계속 퇴적되었다. 에오세~올리고세 시기에 퇴적율과 지열류량이 높았으며, 그 영향으로 약 28 Ma에 최하부층이 2,000 m 부근에서 석유생성단계에 들어간다(그림 7). 이는 BP-1공의 성숙도 모델에서 약 2,000 m 부근에서 석유생성단계를 나타내는 0.6% R_o 에 도달한 결과와 잘 일치한다(그림 4).

BP-1공의 근원암은 시추공 하부의 에오세 퇴적층으로 타입 II와 타입 III 케로젠이 혼합된 퇴적층이다. 근원암층의 상위에 퇴적된 올리고세 및 마이오세의 사질암층이 BP-1공의 저류암층일 가능성이 높으며, 퇴적층 내에 협재된 이질암층들이 덮개암 역할을 하였을 것으로 보인다. 근원암층은 매몰초기에 퇴적속도가 빠르고 퇴적율이 높아 28 Ma에 석유생성단계에 도달해 석유와 가스를 생성하기 시작했으며, 이후 24 Ma에 근원암으로부터 석유와 가스가 배출되기 시작했다(그림 7). BP-1공은 매몰심도와 온도가 높아 근원암 내에 다량의 석유와 가스가 생성되어 배출이 일어난 것으로 생각된다.

5. 3-D 공간 이동 모델링

5.1 입력 개념 및 조건

3-D 모델링은 근원암에서 석유와 가스가 생성되고 배출되어 저류층을 따라 이동되는 양상을 시공간적으로 보여준다. 이에 따라 실제 석유와 가스가 저류층 내에서 어느 시기에 어느 방향으로 이동되고, 어느 위치에

유망구조를 형성하는지를 예측할 수 있게 한다. 따라서 3-D 모델링은 석유탐사에서 유망구조를 찾는 데 유용하게 사용되고 있다(Johannesen *et al.*, 2002; Huvaz *et al.*, 2007; Kuhlmann *et al.*, 2011; Kuhn *et al.*, 2012).

3-D 모델링을 수행하기 위해서는 각 지층에 대한 심도구조도(elevation map)가 필요하다. 이 연구에서는 한국 측의 시간구조도와 일본 측의 시간구조도를 대비하고 연결하여 디지털지도를 작성하였고, 이를 심도구조도로 변환하여 3-D 입력자료로 사용하였다. 심도구조도의 작성을 위해 기존 맵을 디지털화하고, 격자 기반의 디지털 심도지도를 작성하였다. 디지털화된 심도지도를 BasinMod[®] 소프트웨어 3-D 모듈에 입력해 주었으며, 입력한 각 심도지도에 의해서 각 지층이 할당되었다. 각 지층의 두께는 BP-1공의 층서를 기준으로 입력했으며, 1-D와 3-D 모델 사이의 층서기준을 동일하게 설정하였다. 이외에도 각 지층들에 대한 지층 타입, 연대, 심도, 암상 등을 입력하였다. 이 때, 입력한 지화학 자료, 암상 등 각 지층의 암석학적 특성은 1-D 모델링에서 사용한 값들을 각 층준의 구조도로 연장하여 입력해 주었다.

3-D 모듈에 입력된 지층 유형, 암상, 지질시대, 유기물 타입 및 함량에 따른 각 퇴적층의 물성변화가 시간단위(지질시대)별로 계산되고, 계산결과는 3-D로 가시화된다. 즉, 계산된 3-D 모델은 시간에 따른 지층의 매몰과정과 석유 및 가스의 이동, 집적과정을 입체적으로 보여주게 된다.

표 3은 3-D 모델링의 각 퇴적 단위층에 입력한 기본 층서 정보이다. 해저면을 포함하여 총 5개의 심도지도를 입력했으며, 각 지층의 두께계산을 위해 지표면지도(sediment surface)와 바탕지도(model bottom)를 추가로 입력하였다. 기반암 위의 에오세 시기 퇴적층을 연구 지역의 주 근원암층으로 설정하였

고, 근원암층 위에 퇴적된 올리고세 퇴적층을 저류암층으로 지정하여 계산하였다. 근원암층에 입력한 최대 유기물 함량은 1-D 모델링에서 설정한 값과 동일하게 적용해주었다.

5.2 3-D 석유 이동 모델

3-D 모델을 통해 석유 및 가스의 이동방향과 경로를 각 지질시대별로 확인할 수 있다. 그림 8은 근원암층에서 생성되어 배출된 석유와 가스가 올리고세 저류암층 내에서 시간변화에 따라 이동하고 집적되는 모습을 보여주고 있다. 녹색 선은 석유의 이동 경

로를 나타내며, 빨간색 선은 가스의 이동 경로를 나타낸다. 또한 석유와 가스의 집적위치는 각각 녹색과 빨간색의 둥근 영역으로 보인다.

그림 8에서 21.5 Ma에는 근원암층에서 배출된 탄화수소가 올리고세 저류암층에서 활발하게 이동하고 있는 것이 확인된다. 그 결과 저류암층 북서쪽에 가스트랩(gas traps)이 크게 형성되었고, 남서쪽에는 석유트랩(oil traps)이 형성된 것이 잘 관찰된다.

퇴적층의 매몰이 계속되면서 근원암층의 매몰심도 역시 깊어졌으며, 저류암층 내에서 현재(0 Ma)까지 석유 및 가스의 이동이 관찰된다. 이에 따라 현재

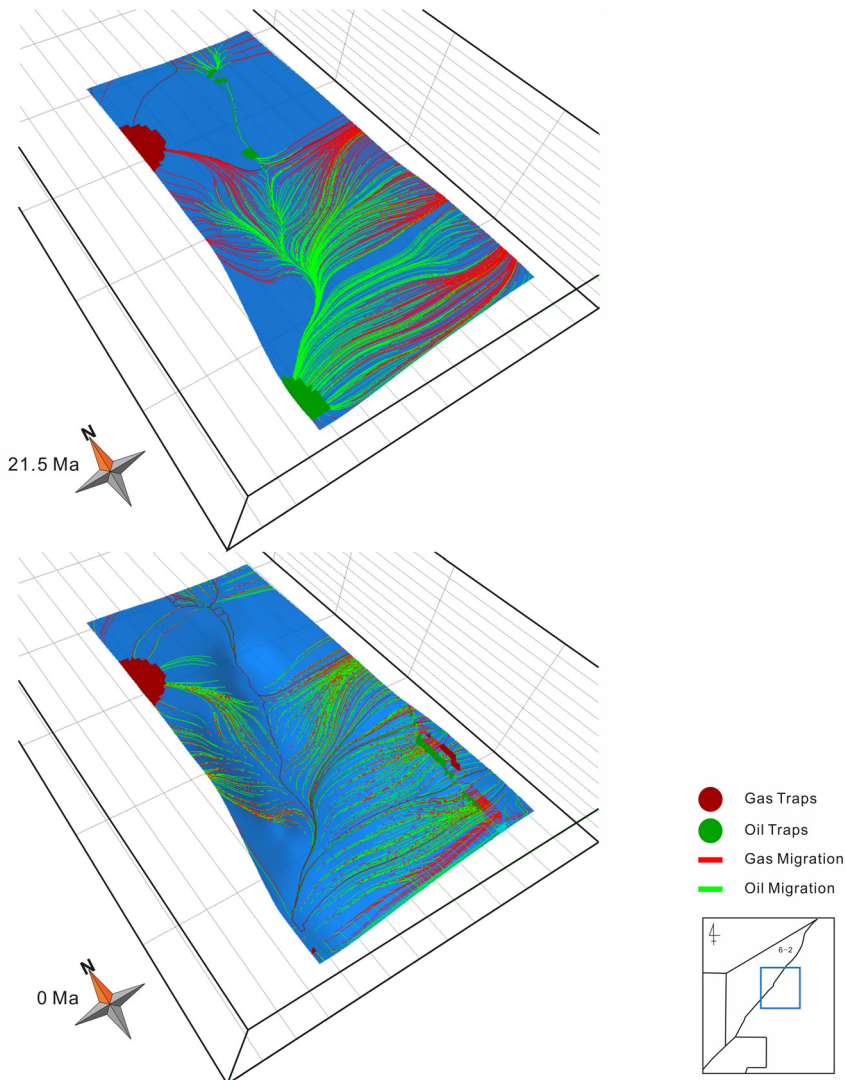


Fig. 8. 3-D migration and accumulation model. Reservoir strata are shown by the blue surface.

(0 Ma)에는 분지의 북서방향과 동쪽 가장자리에 소규모의 석유 및 가스 트랩이 형성되었음을 잘 볼 수 있다.

3-D 모델링 결과, 석유와 가스가 주로 분지의 중심부에서 분지 가장자리로 이동되어 유망구조를 형성하고 있음을 알 수 있다. 3-D 모델링은 석유와 가스가 이동되는 방향과 집적 위치를 확인할 수 있다는 장점이 있지만, 부력과 지층의 형태를 기반으로 하는 간단한 계산결과에 근거하기 때문에 석유의 이동 및 집적과정을 정확하게 모델링할 수는 없다. 그러나 2-D 단면상에서 수행하는 2-D 모델링은 다시의 법칙(Darcy's law)을 기반으로 한 정밀한 이동형태를 계산한다(Waples, 1994). 따라서 이 연구에서는 3-D 모델링 결과를 바탕으로, 분지 전체를 가로지르는 탄성과 단면을 사용하여 2-D 모델링을 수행하고, 석유 및 가스의 이동과 집적에 대해 좀 더 자세

하게 분석하고자 한다.

6. 2-D 이동 모델링

6.1 입력 개념 및 조건

2-D 모델링은 탄화수소가 생성되고 이동되어 집적되는 모습을 시간별로 계산하여 2차원 단면상에 가시화한다. 이 연구에서는 소라분지 전체의 석유시스템을 잘 보여줄 수 있는 탄성과 단면을 선택하여 2-D 모델링을 수행하였다. 소라분지는 국내 6-2 광구에 해당되는 해역과 일본 측 해역에 걸쳐서 위치하고 있다(그림 1). 따라서 소라분지 전 지역에 대한 석유시스템을 확인하기 위해서는 한국 측 해역과 일본 측 해역을 연결하는 단면이 필요하다. 최근에 소라분지의 지층대비를 위해 일본 측 소라분지 해역에서 해석된 탄성과 단면과 국내 측 소라분지 해역에서

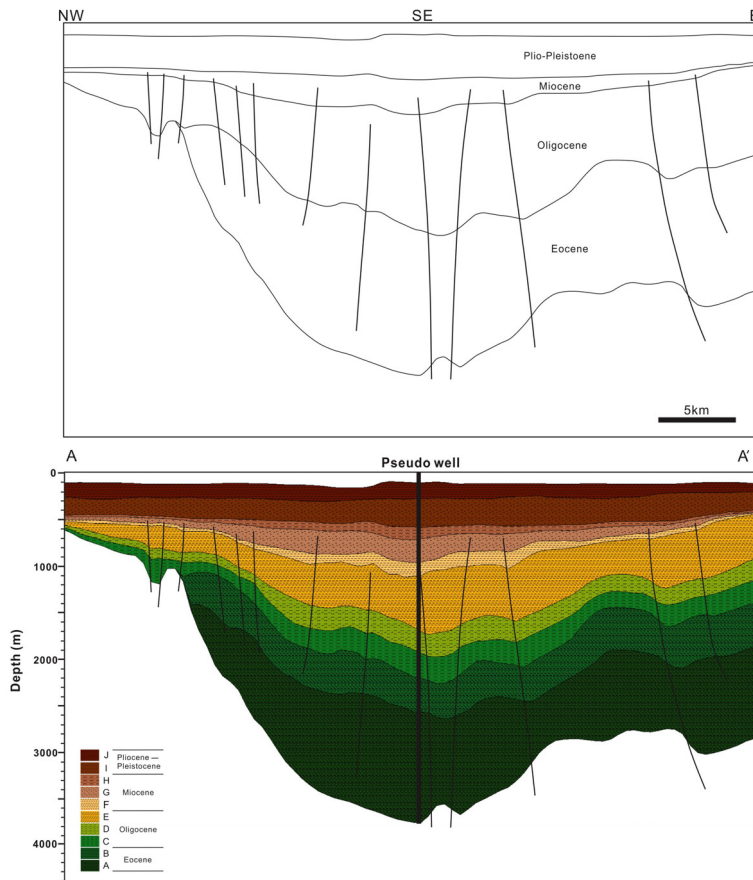


Fig. 9. Seismic interpretation and input diagram for 2-D modeling.

Table 4. Input parameters of stratigraphy for 2-D modeling.

Line Name	Formation	Begin Age (Ma)	Chrono-stratigraphy
Line AA'	K	2.1	Pleistocene
	J	5.2	Pliocene
	I	5.4	Erosion
	H	7.5	
	G	17.4	Miocene
	F	21.5	
	E	27	
	D	29.3	Oligocene
	C	31.4	
	B	34.6	
	A	50	Eocene

해석된 탄성과 단면을 연결하여 비교된 바 있다(Itoh and Nagasaki, 1995, 1996; Lee *et al.*, 2008). 이 연구에서는 이 연결단면을 사용하여 2-D 석유시스템 모델링을 수행하였다.

연결단면에서 일본 측과 한국 측이 연결되는 탐사측선을 기준으로 하여, Itoh and Nagasaki (1995, 1996)의 해석을 바탕으로 4개의 층준과 지층구간이 결정되었다. 연결단면에서는 4개의 광역적인 지층단위만을 구분하고 있으나 이 연구에서는 Sora-1공과 BP-1공의 분석 자료와 비교하여 세분하였고, 최종적으로 총 10개의 지층단위로 분대하였다(그림 9).

표 4는 세분한 각 지층단위에 입력한 지질연대를 보여준다. 기존의 소라분지 최하부층의 지질연대에 대하여 한국 측과 일본 측 해석이 달랐으나 최근 일본 측 탐사자료를 해석한 결과, 소라분지는 일본 측 해석으로 연장되는 분지로서 최하부층의 연대는 에오세로 설정되었다(Lee *et al.*, 2008). 이에 따라 단면상의 최하부 층의 연대를 50 Ma로 입력해 주었으며 각 지층의 연대는 BP-1공의 시추공 분석 자료를 반영하여 입력하였다(표 1, 2).

각 지층단위에 대한 암상(lithology), 총 유기탄소 함량(TOC), 키네틱스(kinetics), 수소지수(hydrogen index; HI), 온도조건 등의 입력 값 역시 시추공 분석 자료로부터 추출하였다(Cheong *et al.*, 2001; Lee, 2011; Park, 2011). 소라분지에서 탄화수소를 생성한 주요 근원암층은 분지 발달 초기에 형성된 에오세 퇴적층(A층, B층)으로 설정하였으며(그림 9), 설정된 근원암층에 대한 초기 TOC값은 현재 측정된

TOC값의 최대값보다 높았을 것을 고려하여 1-D 모델과 동일하게 5wt%를 입력해 주었다(Daly and Edman, 1987). 또한 HI값은 근원암에 가까운 BP-1공의 분석 자료에서 578~2,610 m 구간에서 69~497 mgHC/gTOC가 측정되었고, 2,610~4,060 m 구간에서는 36~291 mgHC/gTOC로 측정되었기 때문에(표 2), 이들의 평균 HI값인 200 mgHC/gTOC를 입력해 주었다. 암상은 주로 사암, 실트암, 셰일로 구성된다(그림 2). 근원암의 석유생성 계산은 타입 II 케로젠의 키네틱스 변수를 사용해 계산하였다(Pepper and Corvi, 1995). 또한 모델링에 사용한 탄성과 단면에는 다수의 단층이 존재하므로 이를 반영하여 단층을 입력하였으며(그림 9), 부정합에 의해 침식된 퇴적층의 양(두께)은 탄성과 자료 해석결과를 반영하여 입력하였다(Lee, 2011).

탄화수소의 이동은 단면상의 수많은 셀에 대해 다시의 법칙(Darcy's law)에 기초한 계산식을 사용하여 계산해야 하지만, 이 방법은 오랜 시간의 계산을 필요로 한다. 따라서 이 연구에서는 부력과 저류암 지층의 형태를 기본으로 계산하는 방법(flow path method)과 다시(Darcy)의 식을 계산하는 방법을 병용한 하이브리드 방법(hybrid migration method)을 사용하여 탄화수소의 이동을 모델링하였다(Hantschel and Kauerauf, 2009).

6.2 2-D 석유 이동 모델

석유시스템 2-D 모델링 결과는 분지 내 퇴적물이 퇴적되고 매몰되는 과정과 용기되는 과정을 보여줄

뿐만 아니라, 근원암에서 탄화수소의 생성과 배출, 탄화수소의 이동 경로, 이동된 탄화수소의 집적 위치 등을 지질시대에 따라 단면상에 보여준다.

그림 10은 2-D 모델링 계산으로 얻어진 탄화수소 포화도(saturation)이다. 포화도 그림은 탄화수소가 포화된 지역을 지질시대별로 보여줌으로써 석유와

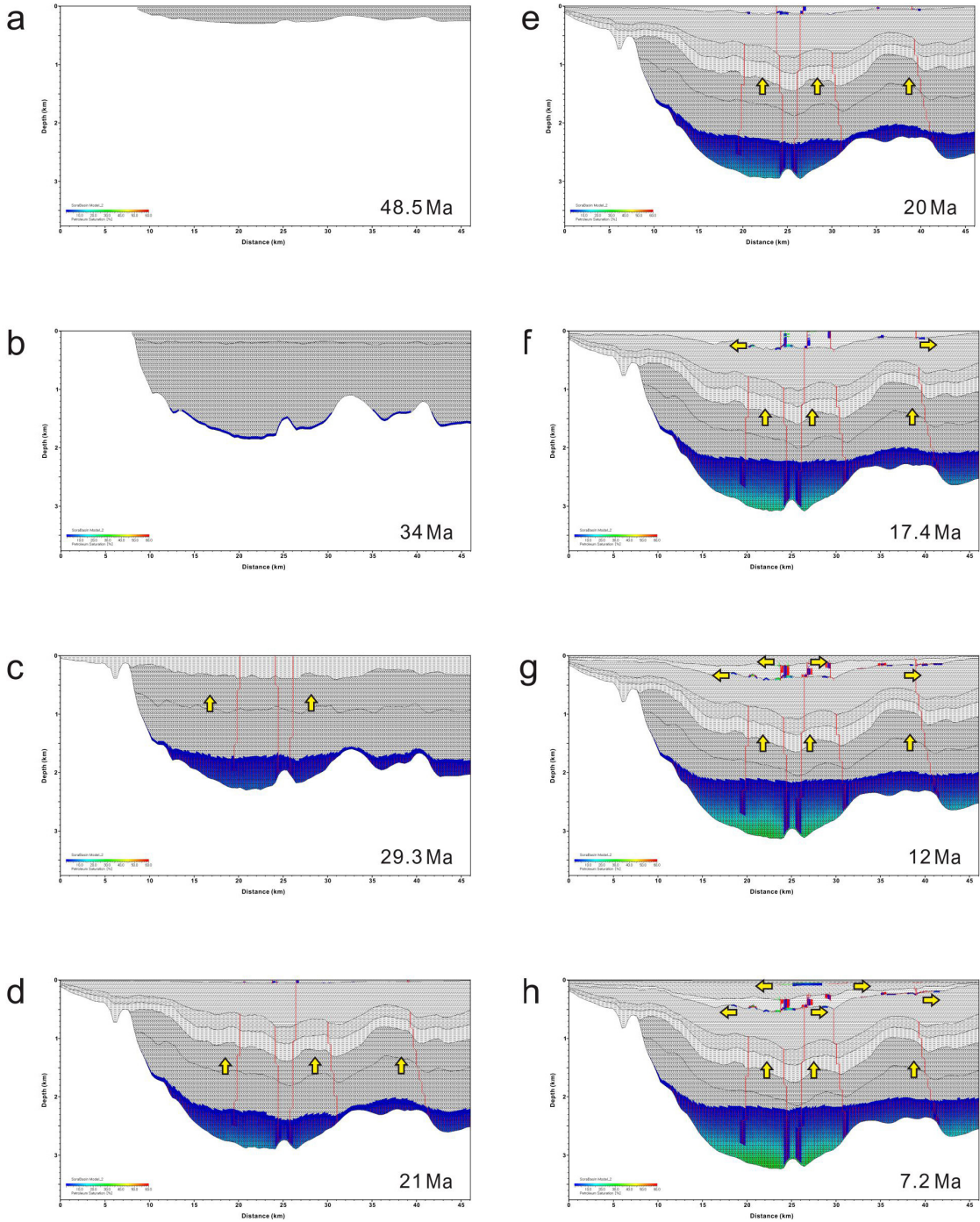


Fig. 10. 2-D petroleum system of Line AA' showing petroleum saturation through time.

가스의 생성, 이동, 집적을 관찰할 수 있다. 그림에 보이는 화살표는 석유와 가스의 이동방향을 나타낸다.

분지의 최하부에 존재하는 에오세 근원암층은 약 2,000 m에 도달한 약 34 Ma부터 석유 및 가스가 생성되기 시작한다(그림 10b). 매몰심도가 깊어지면서 근원암층의 포화도가 증가하였으며, 약 29.3 Ma에는 근원암층으로부터 석유와 가스가 배출되기 시작한다(그림 10c). 이후, 근원암층 상위에 올리고세 및 마이오세 퇴적층들이 퇴적되어 분지의 매몰심도는 약 3,000 m까지 깊어졌고, 근원암층에서 배출된 석유와 가스가 올리고세층으로 이동하여 집적되는 모습이 나타난다(그림 10d). 또한 근원암층에서 상부 지층으로 이동되어 온 석유와 가스는 단층을 따라 수직방향으로 이동할 뿐만 아니라 지층경계를 따라 수평방향으로 이동하는 모습도 관찰된다(그림 10e, f). 즉, 상위에 퇴적층들이 쌓이면서 석유와 가스가 지층경계면을 통해 수평적으로도 이동했으며 분지가장자리에 집적된 것을 볼 수 있다(그림 10g). 이후, 올리고세층으로 이동되었던 석유와 가스는 약 7.2 Ma에 단층과 지층경계를 통해 상위 퇴적층인 마이오세층으로 재이동하는 것이 관찰된다(그림 10h). 퇴적층의 매몰이 계속됨에 따라 석유와 가스는 계속 이

동하며, 후기 마이오세~플라이오세에 발생한 융기가 석유와 가스의 이동에 영향을 주는 것으로 보인다. 2-D 모델링 결과, 현재 석유와 가스는 올리고세 및 마이오세층과 2,500 m 이상의 분지 심부의 에오세 근원암층에 일부 남아있는 것으로 확인된다(그림 10i). 또한 근원암층에서 배출된 탄화수소는 주로 분지 내 발달한 다수의 단층과 지층경계면을 따라 상위지층으로 이동하여 집적된 것을 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 탄화수소는 주로 수직방향으로 이동하였으며, 단층이 주요한 이동통로 역할을 하는 것으로 보인다.

7. 토 의

7.1 탄화수소의 생성

소라분지의 Sora-1공과 BP-1공은 시추 구간에서 소량의 유정과 가스징이 확인된 바 있다. 또한 소라분지의 동쪽 연장부인 일본해역에 위치한 후쿠에-1공과 츠쿠-1공에서도 유정과 가스징이 발견되었다 (Lee *et al.*, 2008). 유정과 가스징의 확인은 소라분지가 석유시스템의 틀을 갖추고 있음을 지지하며 수행된 석유시스템 모델링은 이를 확인시켜 준다.

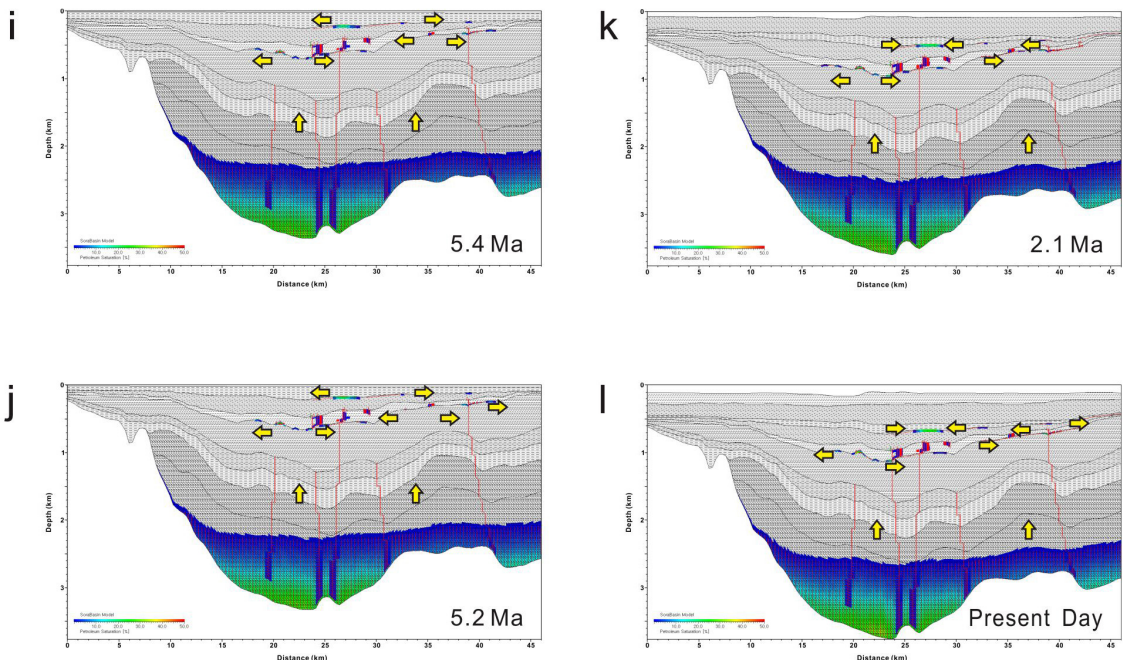


Fig. 10. continued.

그림 6과 7은 소라분지에 위치한 Sora-1공과 BP-1공의 석유 및 가스 생성량과 지질시대에 따른 변화 양상을 보여준다. 이들 시추공의 암상, 층서, 유기물 함량 등을 고려할 때 시추공들은 석유시스템의 필수적인 지질학적 구성요소인 근원암, 저류암, 덮개암, 피복하중암을 모두 갖추고 있다. 또한 반응속도 모델을 사용하여 탄화수소 생성을 계산한 결과, 두 시추공은 석유생성단계에 도달하여 석유와 가스가 생성되었다.

그러나 Sora-1공에서는 시추공 최하부의 에오세 근원암층이 석유생성단계에 들어가 탄화수소는 생성됐지만, 근원암층에서 탄화수소의 배출은 발생하지 않았다(그림 6). 즉, Sora-1공에서는 근원암에서 배출될 만큼 충분한 양의 탄화수소가 생성되지 못하였고, 이에 따라 생성된 탄화수소는 근원암 공극의 일정량을 채우지 못하여 배출이 발생하지 않은 것으로 모델링된다. 반면, BP-1공은 시추공 최하부의 에오세 근원암층이 석유생성단계에 도달하여 석유와 가스를 생성하였으며, 생성된 석유와 가스가 근원암층으로부터 배출되었다(그림 7).

두 시추공의 탄화수소 생성 및 배출양상은 다르게 나타나는데 이는 소라분지의 매몰심도가 남동부로 갈수록 깊어지면서 분지 중심부에 위치한 BP-1공의 근원암 성숙도가 분지 가장자리에 위치한 Sora-1공에 비해 높았기 때문인 것으로 보인다(그림 1). 또한 분지의 가장자리에 위치한 Sora-1공의 퇴적물은 육성환경이 대체로 우세하였고, 타입 III 케로젠이 많았기 때문에 다량의 탄화수소가 생성되기 어려웠을 것으로 보인다. 반면에, BP-1공은 케로젠 타입 II가 우세할 뿐만 아니라 유기물 함량도 높아 두 시추공의 생성, 배출결과가 다르게 나타난 것으로 생각된다.

2-D 모델링 결과에 의하면, 소라분지 최하부의 에오세 근원암층에서 생성된 석유와 가스가 배출되어 단층을 따라 상위 지층들로 이동되는 것이 확인된다(그림 10). 이러한 2-D 모델링 결과를 토대로, 소라분지의 유효 근원암에서 탄화수소가 생성되고 배출된 시기를 명확하게 확인하기 위해 2-D 단면상의 최대매몰 지역에 가상시추공을 설정하였다(그림 9). 그리고 이 가상시추공에 대하여 1-D 모델링을 수행하였다. 그림 11은 가상시추공의 1-D 모델링 결과를 보여

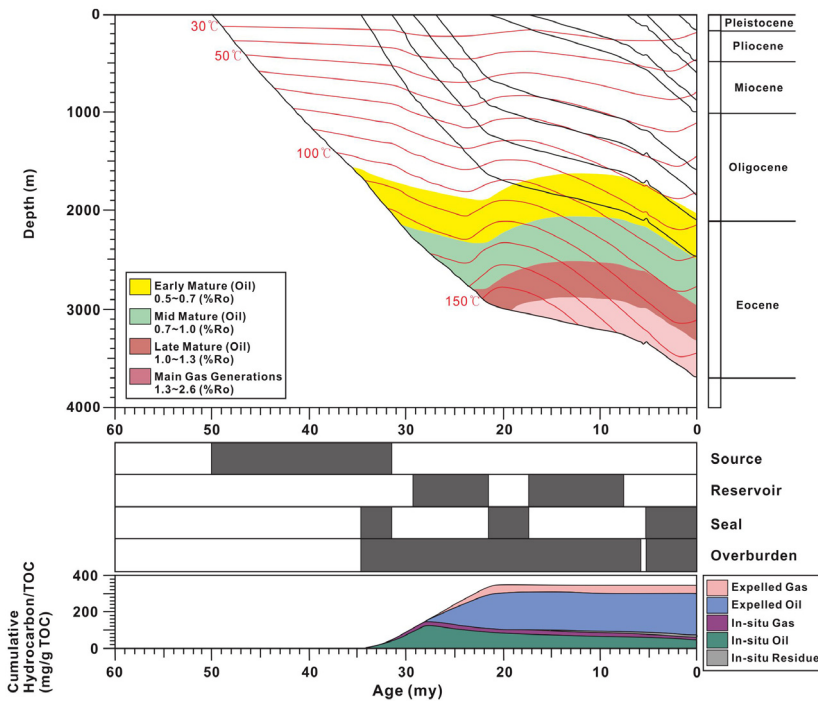


Fig. 11. 1-D petroleum system model of pseudo-well including burial and thermal history, petroleum system chart, and cumulative hydrocarbons through geologic time.

준다. 가상시추공 최하부의 근원암층은 약 2,000 m 부근에서 석유생성단계에 들어갔으며, 약 34 Ma부터 탄화수소를 생성하기 시작한다. 이후, 근원암층을 포함한 퇴적층들의 매몰속도와 퇴적율이 증가하면서 약 27 Ma에 탄화수소의 생성이 최대로 나타나며 근원암으로부터 탄화수소가 배출되기 시작한다. 또한 근원암층이 약 3,000 m 부근에서 가스생성단계에 도달한 이후 탄화수소의 배출이 증가하고, 약 21 Ma에 배출이 최대로 나타나는 것으로 확인된다. 이는 이 시기에 분지가 받은 지열류량이 높았기 때문인 것으로 판단된다. 가상시추공의 1-D 모델링 결과는 BP-1공과 비슷한 생성, 배출 양상을 보이나 BP-1공보다 분지의 중심에 위치하였기 때문에 매몰심도가 깊어 탄화수소의 생성과 배출이 먼저 발생한 것으로 추정된다.

7.2 탄화수소의 이동-집적

유효 근원암에서 생성된 후 배출되어 나온 탄화수소는 상부로 이동하려는 부력의 특성과 다공질층을 따라 유동하려는 모세관압의 특성이 결합되어 상위의 다공질 퇴적층으로 이동한다. 지층 내 존재하는 물과 같은 유체의 흐름과 단층 및 습곡과 같은 구조운동은 석유 및 가스의 이동에 영향을 준다. 특히, 단층은 단층 내 단층각력 등으로 인해 투수율이 높아 탄화수소가 이동하기에 적합한 조건을 만든다 (Radke *et al.*, 1980; Waples, 1985). 소라분지의 2-D 모델링 결과를 보면, 탄화수소가 근원암층에서 상위 지층을 향해 수직방향으로 이동하고 있는 것이 잘 관찰된다(그림 10). 이는 분지 내에 발달해 있는 단층들이 탄화수소 이동에 가장 중요한 이동 통로로 작용하였음을 지시한다. 또한 단층을 따라 상위지층으로 이동한 탄화수소는 퇴적층이 계속 쌓이면서 지층경계면을 따라 수평적으로 이동하는 모습도 관찰된다. 2-D 단면상에서 나타나는 수직 및 수평이동 형태를 3-D 모델링으로 살펴보면, 북서방향과 동쪽 방향으로 탄화수소의 이동이 이루어진 것으로 나타난다(그림 8). 근원암층에서 생성된 많은 양의 탄화수소는 광역 덮개암이 형성되기 이전부터 배출되었으나 근원암층 내에서의 생성과 배출은 계속되었다. 또한 퇴적층의 매몰이 계속됨에 따라 근원암층에서는 탄화수소가 현재까지 생성되고 있는 것으로 모델링된다. 이에 따라 근원암층에서 배출되지 못한 탄

화수소는 현재까지 근원암층 내에 남아 있을 것으로 보인다.

2-D 모델링 결과를 살펴 보면, 근원암층에서 배출되어 이동된 탄화수소는 올리고세 및 마이오세의 저류암층으로 이동하지만, 초기에는 많은 양의 탄화수소가 지표로 유출된다. 그러나 플라이오세 ~ 플라이스토세 시기에 광역 덮개암이 형성됨에 따라 이동되어 온 탄화수소는 올리고세 및 마이오세 저류암층에 집적되는 것이 관찰된다. 퇴적층의 매몰이 계속되면서 저류암층 내에 집적된 탄화수소는 수직 및 수평적으로 재이동하였고, 그 결과 저류암층의 중심부에서 가장자리에 걸쳐 탄화수소의 집적이 나타난다(그림 10). 이는 3-D 모델링을 통해 근원암층에서 배출된 탄화수소가 저류암층의 북서부 및 동쪽 가장자리에 집적된 것과 잘 일치한다(그림 8).

8. 결 론

남해 대륙붕 소라분지의 1-D, 2-D, 3-D 석유시스템 모델링을 수행한 결과, 아래와 같은 탄화수소의 생성과 배출, 이동, 그리고 집적에 대한 결론을 도출하였다.

첫째, 소라분지는 석유시스템의 필수적인 지질학적 구성요소인 근원암, 저류암, 덮개암, 그리고 피복 하중암을 모두 가지고 있는 것으로 확인되고, 분지 내에서 탄화수소가 생성되고 이동되어 집적되는 과정이 잘 관찰되며 뚜렷한 석유시스템이 인지된다.

둘째, 소라분지의 유효 근원암은 분지 최하부에 퇴적되어 있는 에오세층으로서 유기물 함량이 매우 높다. 케로젠은 타입 II와 타입 III가 혼합되어 나타나고, 그 중 타입 II의 함량이 높게 나타난다. 따라서 소라분지는 석유 생성 잠재력이 높은 분지이며, 탄화수소의 유망성이 클 것으로 보인다.

셋째, 에오세 근원암층에서 생성된 탄화수소는 상위의 다공질이며 투수성이 좋은 저류암층으로 이동되어 집적되었다. 이때, 탄화수소의 이동은 분지에 발달한 단층을 통해 수직방향으로 이동하여 상위 지층으로 이동했을 뿐만 아니라, 지층경계를 따라 분지 가장자리로 수평 이동하였다. 또한 근원암층에서 생성되어 배출되지 못한 일부의 탄화수소는 심부의 근원암에 그대로 잔류되어 있는 것이 확인된다.

넷째, 소라분지는 제주분지의 북동쪽 소분지 중

하나로 분지규모가 작고 매몰심도가 깊지 않기 때문에 근원암층에서 많은 양의 탄화수소 생성되기는 어려웠을 것이다. 따라서 집적된 탄화수소의 양은 많지 않았을 것이고, 탄화수소의 집적체는 비교적 작은 규모로 나타날 것이다.

이 같은 석유시스템 1-D, 2-D, 3-D 모델링 결과는 남해 대륙붕 소라분지의 탄화수소 생성 및 이동, 그리고 집적에 대한 석유시스템의 기본틀을 제시한다. 연구결과는 향후 연구지역의 석유탐사에 도움이 될 것이라 생각한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 연구과제 “미래 석유자원 전략지역 유망성 분석 및 정보화(과제번호: 16-3311)”사업의 지원으로 수행되었다. 원고는 정대교 교수님과 유인창 교수님, 그리고 편집위원님의 세심한 지적과 조언에 의해서 크게 개선되었다. 심사위원과 편집진에 감사드린다. 또한 모델링을 위하여 PetroMod[®] 소프트웨어를 기증하여 준 Schlumberger사에도 감사드린다.

REFERENCES

- Ahlbrandt, T.S., Charpentier, R.R., Klett, T.R., Schmoker, J.W., Schenk, C.J. and Ulmishek, G.F., 2005, Global Resource Estimates from Total Petroleum Systems: American Association of Petroleum Geologists Memoir 86. The AAPG Bookstore, U.S.A., 324 p.
- Bordenave, M.L., 1993, Applied Petroleum Geochemistry. Editions Technip, Paris, 524 p.
- Carr, A.D., 2000, Suppression and retardation of vitrinite reflectance, part 1. formation and significance for hydrocarbon generation. *Journal of Petroleum Geology*, 23, 3, 313-343.
- 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. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, KR-02-12, 140 p (in Korean with English abstract).
- Cheong, T.J., Son, J.D., Park, K.S., Kim, W.S., Seo, S.Y., Bong, P.Y., Lee, H.Y., Park, K.P., Shin, W.C., Huh, D.G., Lee, S.R., Ryu, B.J., Kwak, Y.H., Oh, J.H., Chung, B.H., Kim, I.K., Son, B.K., Sunwoo, D., Yu, D.G., Kwon, Y.I., Kim, H.T., Hwang, I.G., Lee, Y.J., Jang, S.H., Kim, S.J., Kim, S.P., Gu, N.H., Kim, K.O., Kang, M.H., Kang, D.H., Kim, H.J., Kim, Y.G., Hwang, G.D., Kim, J.G., Seo, G.S. and Choi, J.G., 2001, Evaluation of petroleum potential in the southern part of Korean offshore. *KIGAM Report*, KR-93-4A-1, 82 p.
- Daly, A.R. and Edman, J.D., 1987, Loss of organic carbon from source rocks during thermal maturation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71, CONF-870606.
- Gautier, D.L., Bird, K.J., Charpentier, R.R., Grantz, A., Houseknecht, D.W., Klett, T.R., Moore, T.E., Pitman, J.K., Schenk, C.J., Schuenemeyer, J.H., Sørensen, K., Tennyson, M.E., Valin, Z.C. and Wandrey, C.J., 2009, Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic. *Science*, 324, 5931, 1175-1179.
- HADSON, 1989, Well Domi-1 Offshore Korea Stratigraphy and Maturity of the interval 314-3, 201 m. *Report*, 17 p.
- Han, J.H., Son, B.K., Hwang, I.G., Ryu, I.C., Lee, G.H., Shin, K.S., Park, H., Kim, H.T. and Shin, S.H., 2013, *Integrated Petroleum Geology*. Goomibook, Seoul, 394 (in Korean).
- Hantschel, T. and Kauerauf, A.I., 2009, *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. Springer Science and Business Media, New York, 408 p.
- Hirayama, J., 1991, Total sedimentary isopach maps offshore East Asia, Committee for co-ordination of joint prospecting for mineral resources in Asian offshore area (CCOP). *Technical Bulletin*, 23, 116 p.
- Huvaz, O., Sarikaya, H. and Işık, T., 2007, Petroleum systems and hydrocarbon potential analysis of the northwestern Uralsk basin, NW Kazakhstan, by utilizing 3D basin modeling methods. *Marine and petroleum geology*, 24, 4, 247-275.
- Itoh, Y. and Nagasaki, Y., 1995, Post-Cretaceous structural evolution of offshore basins to the west of Kyushu, Japan. *Proceedings of 15 th international Symposium*, Kyungpook National University, 203-217.
- Itoh, Y. and Nagasaki, Y., 1996, Crustal shortening of Southwest Japan at the end of Miocene. *The Island Arc*, 5, 337-353.
- Jarvie, D.M., Claxton, B.L., Henk, F. and Breyer, J.T., 2001, Oil and shale gas from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 85, A100 p.
- 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, 4, 475-499.
- Johannesen, J., Hay, S.J., Milne, J.K., Jebsen, C., Gunnesdal, S.C. and Vayssaire, A., 2002, 3D oil migration modelling of the Jurassic petroleum system of the Statfjord area, Norwegian North Sea. *Petroleum Geoscience*, 8, 1, 37-50.
- Jolivet, L., Huchon, L. and Claude, R., 1989, Tectonic setting of Western Pacific Marginal Basins. *Tectonophysics*, 160, 23-47.
- KIER (Korea Institute of Energy and Resources), 1982, Petroleum Resources Potential in Continental Shelf of Korea. 342 p.
- Kim, E.J., Oh, J.Y., Chang, T.W., Yun, H.S. and Yu, I.C., 2008, Seismic Stratigraphy and Structural Evolution in Domi Basin, South Sea of Korea. *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 14, 53-62.
- 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).
- 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).
- Kuhn, P.P., Di Primio, R., Hill, R., Lawrence, J.R. and Horsfield, B., 2012, Three-dimensional modeling study of the low-permeability petroleum system of the Bakken Formation. *American Association of Petroleum Geologists bulletin*, 96, 10, 1867-1897.
- Kuhlmann, G., Adams, S., Anka, Z., Campher, C., Di Primio, R. and Horsfield, B., 2011, 3D petroleum systems modelling within a passive margin setting, orange basin, block 3/4, offshore south africa-implications for gas generation, migration and leakage. *South African Journal of Geology*, 114, 3-4, 387-414.
- Lee, B.R. and Son, B.K., 2007, Petroleum System Modeling of Continental Shelf Area, Southwestern Margin of the Ullung Basin, East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 477-499 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.M., 2011, 3D petroleum Systems Modeling of the Sora Sub Basin, South Sea, Offshore Korea. Kyungpook National University, Daegu, 49 p (in Korea with English abstract).
- Lee, S.D., Oh, J.Y., Park, M.H. and Chang, T.W., 2008, Interpretation on the seismic profiles of Sora and North Sora Sub-basins, South Sea of Korea. *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 14, 63-73.
- 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.
- Li, D., 1984, Geologic evolution of petroliferous basins on continental shelf of China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68, 993-1003.
- Lo, H.B., 1993, Correction criteria for the suppression of vitrinite reflectance in hydrogen-rich kerogen: preliminary guidelines. *Organic Geochemistry*, 20, 6, 653-657.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994, The petroleum system from source to trap. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 60, 3-24.
- Meng, W.J. and Chou, J.T., 1976, Petroliferous Tiwan basins in framework of Western Pacific Ocean. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 25, 256-260.
- McKenzie, D., 1978, Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40, 25-32.
- Miukhopadhyay, P.K., Wade, J.A. and Kruge, M.A., 1995, Organic facies and maturation of Jurassic/Cretaceous rocks, and possible oil-source rock correlation based on pyrolysis of asphaltenes, Scotian Basin, Canada. *Organic Geochemistry*, 22, 85-104.
- Okui, A., Siebert, R.M. and Matsubayashi, H., 1998, Simulation of oil expulsion by 1-D and 2-D basin modelling-saturation threshold and relative permeabilities of source rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, 141.1, 45-72.
- Park, E.J., 2011, Petroleum system modelling of the Sora Basin, South sea, offshore Korea. Chungnam National University, Daejeon, 101 p (in Korea with English abstract).
- 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, Kongju, Korea, 70 p (in Korean with English abstract).
- Pepper, A.S. and Corvi, P.J., 1995, Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen. *Marine and Petroleum Geology*, 12, 3, 291-319.
- Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M., 2005, *The Biomarker Guide Second Edition: Vol. 1 Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History*. Cambridge University Press, Cambridge, 471 p.
- Poelchau, H.S., Baker, D.R., Hantschel, T., Horsfield, B. and Wygrala, B., 1997, Basin simulation and the design of the conceptual basin model, *Petroleum and basin evolution*. Springer Berlin Heidelberg, 3-70.
- Radke, M., Willsch, H. and Welte, D.H., 1980, Preparative

- hydrocarbon group type determination by automated medium pressure liquid chromatography. *Analytical Chemistry*, 52, 3, 406-411.
- 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.
- Ujii, Y., Sherwood, N., Faiz, M. and Wilkins, R.W., 2004, Thermal maturity and suppressed vitrinite reflectance for Neogene petroleum source rocks of Japan. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 88, 10, 1335-1356.
- 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.
- Ungerer, P., Burrus, J., Doligez, B., Chenet, P.Y. and Bessis, F., 1990, Basin Evaluation by Integrated Two-Dimensional Modeling of Heat Transfer, Fluid Flow, Hydrocarbon Generation, and Migration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 3, 309-335.
- Waples, D.W., 1985, *Geochemistry in petroleum exploration*. International Human Resources Development Corporation, Boston, 217 p.
- Waples, D.W., 1994, Modeling of Sedimentary Basins and Petroleum Systems. In: Magoon, L.B. and W.G., *The Petroleum System-From Source to Trap*, American Association of Petroleum Geologists Memoir, 60, 307-322.
- Waples, D.W., Kamata, H. and Suizu, M., 1992, The art of maturity modeling. Part 1: Finding a satisfactory geologic model. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 31-46.
- Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R., 1996, *Petroleum and basin evolution*. Springer-Verlag, Berlin, 73-167.
- Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R., 2012, *Petroleum and basin evolution: insights from petroleum geochemistry, geology and basin modeling*. Springer Science and Business Media, New York, 535 p.
- Welte, D.H. and Yalçın, M.N., 1987, Basin modelling-A new comprehensive method in petroleum geology. *Advances in Organic Chemistry*, 13, 141-151.
- Yun, H.S., Byun, H.S., Oh, J.Y., Park, M.H. and Lee, M.W., 2012, Stratigraphy and Paleoenvironment of Domi-1 and Sora-1 Wells, Domi Basin. *Journal of Economic and Environmental Geology*, 45, 4, 407-429.
- Zhou, Z., Zhao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the east China Sea. Zhu, X. (Ed.), *Chinese sedimentary basins*, 165-179.

Received : April 4, 2016

Revised : May 1, 2016

Accepted : May 2, 2016