



남해 대륙붕 제주분지의 3-D 석유시스템 모델링

손병국* · 이호영

한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

남해 대륙붕 제주분지의 각 퇴적층에 대한 심층 구조도를 작성하고 이를 기반으로 3-D 석유시스템 모델링을 수행하여, 이 지역의 석유와 가스의 생성과 배출, 그리고 이동과 집적에 대하여 분석하였다. 최하부 퇴적층인 에오세층을 근원암으로 설정하였으며, 하천-호수의 퇴적환경을 고려하여 타입 II와 III가 혼합된 케로젠으로부터 석유와 가스가 생성되는 것으로 입력하여 모델링을 실시하였다. 초기 유기탄소 함량은 기존의 시추공 자료들과 퇴적환경을 고려하여 4%로 입력하였다. 모델링 결과 많은 양의 석유와 가스가 생성되는 지역은 제주분지 내 한 일공동개발광구(Joint Development Zone; 이하 JDZ) 4소구 서쪽지역으로, 20 Ma에 많은 양의 석유와 가스가 이곳의 근원암으로부터 배출되어 상위의 저류층으로 이동하였다. JDZ 4소구 지역의 근원암에서 배출되어 나온 석유와 가스는 주변에 이미 형성되어 있는 크고 작은 폐쇄형 유망구조(closure)로 이동하여 집적되었다. JDZ 1소구와 2소구가 접한 지역의 동쪽부분도 석유와 가스가 많이 생성되는 지역이다. 이곳에서 생성된 석유와 가스는 10 Ma에 주로 배출되었으며 근원암에서 배출된 석유와 가스는 상위의 퇴적층으로 이동하여 집적되었다. JDZ 1소구와 2소구가 접한 지역은 JDZ 4소구 지역보다 석유와 가스의 배출이 상대적으로 늦게 이루어지고 저류암으로의 이동도 상대적으로 늦게 나타나는 것으로 모델링되었다. 석유의 경우는 비교적 짧은 수평거리를 이동하는 것에 비하여 가스의 경우는 상대적으로 먼 수평거리를 이동하였으며 수직이동도 활발하였을 것으로 추정된다. 석유와 가스의 이동이 활발했던 시기는 마이오세 시기이며 이때는 광역적인 덮개암이 형성되기 이전이므로 많은 양의 석유와 가스가 지표로 유출되었을 가능성이 있다. 그러나 올리고세층과 마이오세층은 사질암과 이질암이 교호되는 지층으로, 폐쇄형 유망구조가 잘 형성된 곳에서는 석유와 가스가 집적된 것으로 모델링 되었다.

주요어: 대륙붕, 제주분지, 석유, 가스, 석유시스템, 모델링

Byeong-Kook Son and Ho-Young Lee, 2018, 3-D petroleum system modeling of the Jeju Basin, offshore southern Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 6, p. 587-603

ABSTRACT: 3-D petroleum system modeling was performed on the Jeju Basin, offshore southern Korea to analyze the hydrocarbon migration and accumulation as well as the generation and expulsion of the hydrocarbon, based on subsurface structure maps of respective sedimentary formations. The lowermost formation deposited in Eocene time was assigned as a source rock, for which a mixed kerogen of type II and III was input in the modeling of oil and gas generation in consideration of the sedimentary environment of fluvio-lacustrine condition. Initial TOC was 4% as an input, based on the analysis of the well data and sedimentary environment. The modeling results show that a considerable amount of hydrocarbons was generated and expelled from the source rocks at the western Joint Development Zone (JDZ) sub-block 4, where the hydrocarbons was migrated to the above reservoir rocks at 20 Ma. The oil and gas in the reservoir rocks of the JDZ sub-block 4 are accumulated into the prospects with closure structures that has already been formed at the nearby areas. Another generation of hydrocarbon occurs from the source rock at the eastern border area of JDZ sub-block 1 and 2, where the expulsion of the hydrocarbons occurs at 10 Ma from the source rock into the above reservoir rocks, in which the accumulation also is expected. The generation, migration and accumulation were retarded at the eastern area of the JDZ sub-block 1 and 2, compared with the area of the western JDZ sub-block 4. Based on the modeling results, it is estimated that gases migrated laterally and vertically in long distance whereas oil migrated laterally in shorter distance than gases. A substantial amount of hydrocarbon could have seeped out of the reservoir formations to the surface since the migration of oil and gas actively occurred in Miocene time before the formation of seals. However, the modeling shows that the hydrocarbon could be accumulated smoothly into the closed structures that can be formed locally by alternation of sand and shale beds.

Key words: offshore, Jeju Basin, petroleum, gas, petroleum system, modeling

(Byeong-Kook Son and Ho-Young Lee, Petroleum and Marine Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

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

1. 서론

우리나라 대륙붕 해역에는 석유부존 가능성이 높은 퇴적분지들이 존재함에 따라 석유탐사 광구를 설정하여 수십 년 동안 탐사가 수행되어 왔으며, 동해 대륙붕에서는 경제성 있는 천연가스가 발견되어 상업적 생산이 이루어져 왔다(Oh *et al.*, 1997; KNOC, 2018; 그림 1). 상업적 생산 이후에도 국내 대륙붕을 대상으로 많은 물리탐사와 시추가 이루어져 왔고 많은 자료가 축적되어 왔으나 더 이상의 상업적 석유와 가스의 발견에는 실패하였다. 따라서 이제는 단순히 구조해석에 의한 유망구조의 발견에만 초점을 맞추는 탐사활동보다는 석유시스템의 개념을 바탕으로 석유의 생성과 이동, 집적과정을 종합적으로 고

려하는 탐사활동이 필요하다(Welte and Yalçin, 1987; Magoon and Dow, 1994; Underdown and Redfern, 2008; Al-Hajeri *et al.*, 2009).

석유시스템은 탄화수소의 생성, 배출, 이동, 집적을 위해 요구되는 모든 지질학적 요소와 과정을 고려해야 하는 자연계 시스템으로 정의되며, 이들 요소와 과정을 공간뿐만 아니라 시간적으로도 이해하여야 석유와 가스가 존재하는 유망구조를 찾을 수 있다(Magoon and Dow, 1994; Han *et al.*, 2013). 또한, 석유시스템은 수십 년에 걸친 탐사 경험으로부터 과학적으로 정의된 개념이므로, 탄화수소 탐사에서 중요성이 더욱 강조되고 있으며, 석유자원 매장량 평가의 기본단위로도 사용되고 있다(Ahlbrandt *et al.*, 2005; Underdown and Redfern, 2008; Gautier

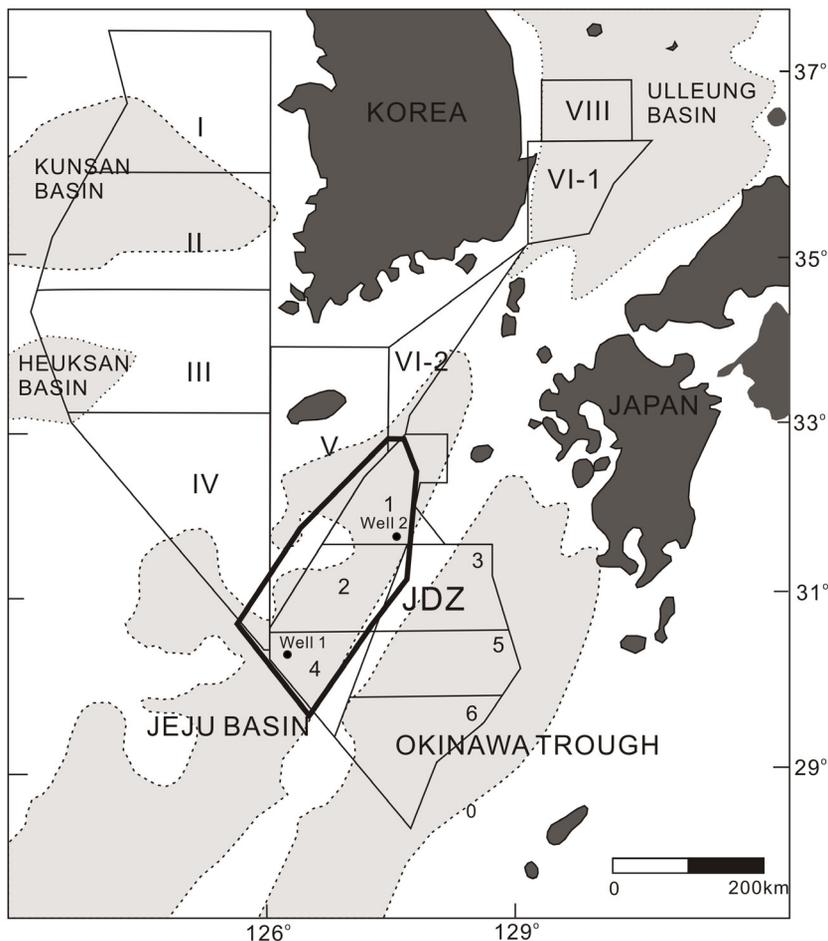


Fig. 1. Location map of the Jeju Basin and the study area with pseudo-wells (modified from Oh *et al.*, 1997 and KNOC, 2018).

et al., 2009). 최근에는 셰일가스와 같은 비전통 탄화수소 자원이 새로운 연료 자원으로 부상함에 따라 석유시스템의 개념은 비전통 자원으로도 확대 적용되고 있다(Jarvie *et al.*, 2007).

탄화수소의 생성, 이동, 집적과정을 시뮬레이션하는 석유시스템 모델링은 석유시스템을 분석하는 가장 좋은 방법이다(Welte and Yalçın, 1987; Wygrala, 1988; Welte *et al.*, 1996; Al-Hajeri *et al.*, 2009; Hantschel and Kauerauf, 2009). 석유시스템 모델링에 의해 석유가 근원암에서 생성되고 저류층에서 이동되어 집적되는 전 과정을 공간적으로 뿐만 아니라 지질시대를 통하여 시간적으로도 가시화할 수 있기 때문에, 탄화수소의 유망지역을 예측하는 데 매우 효과적인 방법이다.

최근에 국내 대륙붕에 대해서도 모델링에 의한 석유시스템 분석이 수행되어 왔다(Lee and Son, 2007; Kim and Son, 2013; Son and Park, 2013; Lee and Son, 2016). 특히 Kim and Son (2013)은 동중국해 분지의 북동쪽 끝부분에 해당하는 우리나라의 남해 대륙붕 제주분지에 대하여 기존의 시추공 자료와 시추공 주변의 주요 탄성과 축선의 해석 자료를 이용하여 석유시스템 1-D 모델링과 2-D 모델링을 수행한 바 있다. 그러나 이 연구들은 시추공과 시추공 주변의 단면만을 대상으로 하여 이루어져 왔기 때문에 탄화수소의 수평적 이동에 대한 정보를 제공할 수 없었다. 또한, 대부분의 시추는 탄성과 해석에 의해서 저류층 및 석유집적 구조에만 초점이 맞추어져서 수행되었기 때문에 제주분지의 어느 곳에서 어떻게 석유가 생성되어 어디로 이동되었는가를 지시하는 석유시스템을 정확하게 알 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 지도기반의 3-D 석유시스템 모델링을 실시하여 제주분지 전체에 대한 광역적인 석유시스템을 파악하고자 하였다.

한국지질자원연구원은 제주분지에서 기존에 획득된 탄성과 탐사자료를 종합하여 제주분지 전체에 대한 종합된 심층구조도(subsurface structure map)를 제작한 바 있다(Lee *et al.*, 2012). 본 연구에서는 이 심층구조도 자료를 사용하여 3-D 석유시스템 모델링을 수행함으로써 탄화수소를 생성-배출한 지역과 함께 탄화수소가 이동해서 집적된 지역을 밝히고자 하였다. 또한, 지도기반의 3-D 모델로부터 탄화수소를 생성하는 지역에 가상의 시추공을 설정하고

1-D 모델링을 실시하여 탄화수소의 생성과 배출을 명확히 함으로써 제주분지 전체에 대한 석유시스템을 규명하고자 하였다.

2. 자료 및 연구방법

석유시스템 모델링은 시추공이나 가상 시추공을 대상으로 특정 위치에 대하여 실시하는 1-D 모델링, 탄성과 단면해석을 바탕으로 단면상에 대하여 실시하는 2-D 모델링, 그리고 심층 구조도(subsurface structure map)를 사용하여 3차원 공간에 대하여 실시하는 3-D 모델링이 있다(Al-Hajeri *et al.*, 2009; Hantschel and Kauerauf, 2009). 석유시스템 모델링을 바탕으로 정확하고 신뢰할 수 있는 석유시스템 분석이 이루어져야 하며 이를 위해서는 해당 지역에 대한 양질의 자료와 철저한 자료의 해석이 필요하다(Lee and Son, 2016). 또한, 석유시스템 모델링을 위해서 수집되고 해석된 자료와 데이터로부터 모델링에 적합한 입력 값을 합리적으로 추출하는 과정이 필수적이다(Welte and Yalçın, 1987; Poelchau *et al.*, 1997; Welte *et al.*, 2012). 입력에 필요한 자료는 층서 및 지층연대, 지열류량, 암상, 유기물 타입과 함량, 탄성과 해석 자료 및 퇴적층 심도자료, 각 퇴적층의 심층구조도 등이다. 그러나 이와 같은 입력에 필요한 대부분의 자료들은 석유회사의 비공개 자료이기 때문에 실제로 입력한 데이터는 선행된 학위논문, 학술논문, 지질자원연구원의 보고서 등 공개된 자료로부터 입력에 적합하도록 정량적으로 추출한 것이다(Oh *et al.*, 1992; Kwon *et al.*, 1995; Lee, 1997; Lee *et al.*, 2012; Kim and Son, 2013; Lee and Son, 2016). 한편, 이들 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 석유회사의 비공개 자료들을 열람하기도 하였다.

분지 전체에서의 광역적인 석유생성, 이동, 집적을 가시화하기 위해서는 3-D 모델링이 요구된다. 이를 위해서는 분지 전체를 포함하는 심층 구조도(subsurface structure map)가 필요하다. 상업적인 석유탐사의 경우는 탐사대상으로 하는 좁은 지역에만 국한하여 심층 구조도를 작성하게 되며 분지 전체를 대상으로 심층 구조도를 작성하는 경우는 매우 드물다. 그러나 Lee *et al.* (2012)은 제주분지 전체를 대상으로 심층 구조도를 작성한 바 있어, 본 연구에서는 이를 사용하여 3-D 석유시스템 모델링을 실시하였다. 이 심층구조

도는 시간 구조도(time structure map)로 되어 있기 때문에 실제의 심도로 바꾸는 작업이 필요했다. 이를 위하여 기존의 시추공으로 부터 속도 변수를 추출하여 제주분지 전지역에 적용하여 실제의 퇴적심도로 바꾼 심층구조도(depth-converted subsurface structure map)를 작성하였다. 이 심층구조도를 G-Map plus 그리드 파일로 변환하여 석유시스템 모델링 소프트웨어에 입력하여 3-D 모델링을 실시하였다. 한편, 제주분지의 기존 시추공들에 대한 1-D 모델링이 Kim and Son (2013)에 의하여 수행된 바 있다. 이 선행 연구를 바탕으로 하여 이번 연구에서는 석유생성지역(pod area 또는 kitchen area)에 가상시추공(pseudo-well)을 설정하여 1-D 모델링을 실시함으로써 분지 전체에 대한 석유생성과 배출에 대한 분석을 수행하였다.

석유시스템 모델링을 위하여 Platte River Associates (PRA)사의 BasinMod[®] 소프트웨어 1-D와 3-D 모듈을 사용하였다. BasinMod[®]의 3-D 모듈은 BasinView라고도 불린다. BasinView는 모든 그리드상에서 수많은 1-D 모델링을 수행함으로써 탄화수소의 생성과 배출을 계산하며, 탄화수소의 이동은 심층구조도의 저류 지층형태와 부력을 계산하여 가시화한다(Lee and Son, 2016). BasinView는 완벽한 3차원 지질을 근간으로 하는 3-D 모델이 아니기 때문에 다중 1-D 모델(multi 1-D) 또는 2.5D라고도 한다. 그러나 빠른 속도로 석유의 생성, 이동, 집적을 계산하여 가시화할 수 있으므로 최근에 많이 사용되고 있다. 한편, 3-D 모델링 결과를 바탕으로 하여 탄화수소의 생성지역에 가상시추공을 설정하여 1-D 석유시스템 모델링을 실시하였다.

모델링에 필요한 고지열류량은 Kim and Son (2013)과 Lee and Son (2016)이 Easy %Ro 알고리즘에 의해 비트리나이트 반사도(Sweeney and Burnham, 1990)로부터 추출한 모델을 보정하여 입력하였다. 석유생성은 반응속도(kinetics) 모델을 사용하여 계산하였으며, 근원암으로부터 탄화수소가 배출되는 시기와 양은 탄화수소가 근원암 내 공극의 일정비율(약 20%)을 채웠을 때 배출이 일어난다는 역치법(threshold method)을 사용하여 계산하였다(Bordenave, 1993; Welte *et al.*, 1996; Okui *et al.*, 1998; Lee and Son, 2016). 석유와 가스의 이동은 다시의 법칙(Darcy's law)을 적용한 유체방정식을 사용하여 계산하였다

(Ungerer *et al.*, 1990; Welte *et al.*, 1996).

3. 분지발달

우리나라 남해 대륙붕에 분포하는 제주분지는 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin)의 북동부에 해당하며, 국내 석유탐사를 위해 설정된 4광구, 5광구, 6-2광구 그리고 한일공동개발구역(Joint Development Zone; JDZ)에 걸쳐 존재한다(그림 1; KNOC, 2018). 이들 광구에서는 모두 8개 공의 석유탐사를 위한 시추가 이루어진 바 있다. 제주분지 지역의 수심은 70-150 m이며 비교적 얕고 남동쪽으로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다(Kwon *et al.*, 1995; Kim and Son, 2013).

광역적으로 동중국해 대륙붕 분지 지역은 유라시아판, 태평양판, 필리핀판의 상호 구조작용에 따른 인장력에 의해 후기백악기에서 팔레오세 시기에 열개작용이 일어났으며 이로 인하여 지구대 및 반지구대가 형성되었다(Meng and Chou, 1976; Li, 1984; Jolivet *et al.*, 1989; Zhou *et al.*, 1989; Lee and Son, 2016). 이 지역은 후기 올리고세에서 전기 마이오세에 이르는 동안 침강이 계속되었으며 지구대 및 반지구대에 퇴적물이 충전되었다. 이후 후기 마이오세에는 구조역전이 발생하여 분지전체에 습곡과 침식 부정합이 발달하게 되었다. 전기 플라이오세 이후부터 현재까지는 광역적인 침강현상이 일어났으며 해침으로 인하여 현재와 같은 대륙붕 환경이 형성되었다(Zhou *et al.*, 1989; Lee, 1997; Lee *et al.*, 2006; Kim and Son, 2013; Lee and Son, 2016).

제주분지는 분지 기반암에 점완단층(listric fault)이 우세하게 나타나며 후기 마이오세 퇴적층에서는 습곡과 역전 재활성된 단층이 발달되어 있다(Yoon *et al.*, 2009; Koh *et al.*, 2016). 또한, 제주분지 중심부(depocenter)에서의 총 퇴적층 두께는 5.5 km 이상으로서 매우 두꺼운 것으로 알려지고 있다. 퇴적층의 최하부 연대는 올리고세로 해석되기도 했지만(Oh *et al.*, 1992; Kwon *et al.*, 1995) 최근의 연구에서는 에오세로 밝혀지고 있다(Yun *et al.*, 1999; Koh *et al.*, 2016).

분지 내의 퇴적작용은 열개와 동시에 후기 에오세부터 육성퇴적물이 집중적으로 퇴적되기 시작하였다. 열개 이후 올리고세에서 중기 마이오세 까지 지속된 열적침강(thermal subsidence)은 광범위한 하성 및

Table 1. Major input for the subsurface strata defined for modeling 3-D petroleum system.

Formation Name	Type	End Age	Lithology	Initial TOC and Kerogen Type	Petroleum System Element
Plio-Pleistocene	F/D	0	Slt10%, Sh90%		Seal
Late-Miocene	F/D	5.3	Ss45%, Slt20%, Sh35%		Reservoir
Early-Miocene	F/D	15	Ss45%, Slt10%, Sh45%		Reservoir
Oligocene	F/D	23	Ss40%, Slt30%, Sh30		Reservoir
Eocene	F/D	33.5	Ss20%, Slt20%, Sh60%	4%, 50%II+50%III	Source

호성 퇴적물의 퇴적을 가능하게 하였다(Kim and Son, 2013). 에오세 시기의 제주분지는 완전한 육성환경이었으나 올리고세에는 해침에 의해 해양환경으로 전이된 지역도 일부 나타난다. 초기 마이오세의 용기작용에 의하여 다시 육성환경이 발달되었으며 플라이오세 이후부터는 다시 해침에 의하여 해양환경으로 바뀐 것으로 해석되고 있다(Koh *et al.*, 2016).

4. 지도 기반 3-D 석유시스템 모델

4.1 자료입력

위에서 언급한 바와 같이 기존 시추공 및 주변 지역에 대한 1-D와 2-D 석유시스템 모델링은 Kim and Son (2013)에 의하여 수행된 바 있으며, 그 결과는 3-D 모델링의 필요성에 대한 동기가 되었다. 3-D 모델링은 제주분지의 어느 곳에서 석유와 가스가 생성되고 배출되어 저류층을 따라 수직 및 수평 이동하여 어디에 집적되는지에 대한 양상을 시·공간적으로 보여 줄 수 있다(Al-Hajeri *et al.*, 2009; Hantschel and Kauerauf, 2009; Lee and Son, 2016). 따라서 석유와 가스가 저류층 내에서 언제 어디로 이동하여 어느 위치에 집적되는지를 알 수 있기 때문에 최근의 석유탐사에서 유망구조를 찾는 데 많이 사용되고 있다(Johannesen *et al.*, 2002; Huvaz *et al.*, 2007; Kuhlmann *et al.*, 2011; Kuhn *et al.*, 2012).

제주분지에 대한 3-D 모델링의 기본 입력 자료는 탄성파 자료에서 뚜렷하게 나타나는 메가시퀀스 경계(megasequence boundary)를 따라 작성한 시간구조도(time structure map)이다(Lee *et al.*, 2012). 제주분지 탄성파 자료에서 음향기반암 위에 주요 층서를 경계로 하는 3개의 시퀀스가 인지되는데, 음향기반암으로부터 첫 번째 시퀀스는 에오세와 올리고세 퇴적층으로 해석된다. 또한, 두 번째 시퀀스는 마이

오세 퇴적층, 그리고 마지막 시퀀스는 플라이오-플라이스토세로 해석된다(Koh *et al.*, 2016). 이들 퇴적층의 시간구조도로 부터 시추공의 속도자료를 이용하여 도출한 평균속도 값을 제주분지 전 지역에 적용하여 실제 심도로 표시되는 심층구조도(subsurface structure map)를 제작하였으며, 앞에서 언급한 바와 같이 이들 심층구조도를 G-map Plus 포맷으로 변환하여 BasinMod의 BasinView에 입력하였다. 그러나 심층구조도는 일부 지층간에 겹친 부분, 비정상적으로 튀어나온 부분, 구멍난 부분 등이 일부분 존재하였다. BasinView 소프트웨어 상에서 일부 수정을 하였으나 소프트웨어 기능의 한계로 완전한 수정은 불가능하였다. 따라서 이러한 비정상적인 부분에 기인한 계산결과는 해석과정에서 재고려하여 최대한 배제하였다. 또한, 올리고-에오세 퇴적층은 BasinView의 지층분리 기능을 사용하여 올리고세층과 에오세층으로 나누었으며, 마이오세층은 전기 마이오세층과 후기 마이오세층으로 분리하였다. 이렇게 하여 최종적으로 5개의 퇴적층에 대하여 심도에 따른 심층구조도를 작성할 수 있었으며, 각 퇴적층에 대하여 연대와 암상을 입력하였다(표 1). 일부 퇴적층은 임의로 나누어졌기 때문에 정확한 석유, 생성, 이동, 집적을 계산하는데 오차를 발생시킬 수 있다. 그러나 해당 심층구조도는 기본적인 지층구조와 심도를 반영하고 있기 때문에 광역적인 석유생성, 이동, 집적을 가시화하는 3-D 석유시스템 모델링에 유용한 지도이다.

탄성파 해석에 의하면 제주분지는 에오세에서 마이오세에 이르는 동안 지구대 및 반지구대 내에 하천 및 선상지(fluvio-deltaic) 퇴적상과 하천-호수(fluvio-lacustrine) 퇴적상이 현저하다(Koh *et al.*, 2016). 에오세 퇴적물에서 평행 반사파형(parallel reflection)이 많이 인지되는데 이는 호수에 이질 퇴적물이 다

량 퇴적된 것으로 보이며, 열개(rifting)이후 에오세 퇴적물은 그 후의 올리고세-마이오세 퇴적물보다 이질 퇴적물이 많이 퇴적되었을 것으로 생각된다. 열개 초기에는 후배지 지형도 높지 않았던 점을 고려한다면 에오세에 세립 퇴적물의 유입이 많았을 것이며 근원암으로 발달하였을 가능성이 매우 높다. 지구대 발달 초기의 심부지역에는 입도가 큰 퇴적물의 공급은 적으며 호수기원의 근원암이 발달하고 있다. 이와 같은 근원암은 아시아와 동남아시아의 반지구대형 분지에서 보통 발견되고 있다(Zhang *et al.*, 2004; Doust and Sumner, 2007; Hall, 2009; Hao *et al.*, 2009). 우리나라 광주지역의 남쪽, 중국측에서 발견된 동중국해 분지 유전의 근원암은 모두 에오세 층이며, 남중국해 유전의 석유와 가스도 모두 에오세층에서 생성되고 있다(Zhang *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2011). 따라서 본 연구에서는 기반암에 접촉하고 있는 에오세 퇴적층을 주요 근원암층으로 설정하여 3-D 석유시스템 모델링을 수행하였다.

제주분지는 하천-호수(fluvio-lacustrine) 퇴적상의 근원암층이 현저할 것으로 보인다. 이는 조류성 유기물(algal organic matter)과 식물기원 유기물(plant debris)이 모두 존재할 수 있는 환경이다. 조류성 유기물은 케로젠 타입 I과 케로젠 타입 II로 진화될 수 있고 석유생성 잠재력이 매우 크다. 일반적으로 호수환경에 퇴적된 유기물은 케로젠 타입 I으로 진화하는 것으로 알려져 왔으나 모든 호수환경 케로젠이 타입 I일 수는 없다는 것이 최근에 연구되어 왔다(Peters *et al.*, 2018). 케로젠 타입은 록에발 열분석에 의한 수소지수 값(HI)이 600 mg HC/gTOC 이상인 경우 타입 I으로 정의하며 300-600 mHC/gTOC의 겨우 타입 II로 정의한다. 제주분지 시추시료의 록에발 분석 결과는 수소지수 값(HI)이 600 mg HC/gTOC 이하임을 지시하고 있다(Kim and Son, 1913). 또한, 동중국해 대륙붕 분지(East China Sea Shelf Basin)의 북동부에 해당하는 제주분지는 광역적으로 볼 때 호수 주변부나 하성 환경이 우세할 것으로 생각된다. 이와 같은 퇴적환경에서 퇴적된 유기물은 케로젠 타입 II와 케로젠 타입 III로 진화되어 가는 것으로 알려져 있다(Peters *et al.*, 2005). 따라서 이와 같은 퇴적환경을 고려할 때 우리나라 남해 대륙붕 퇴적물 내의 유기물들은 케로젠 타입 II와 케로젠 타입 III가 우세할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 기반암과 접촉하고 있는 최하위의 에오세 퇴적층을 근원암으로 할당하였다. 탄화수소 생성을 계산하기 위해서는 해당 퇴적층의 미성숙 근원암을 가지고 측정된 키네틱스값이 필요하다(Ungerer, 1990; Peters *et al.*, 2018). 그러나 연구지역의 에오세 층에 대한 미성숙 근원암 시료를 얻는 것을 불가능하다. 따라서 석유생성 계산을 위하여 소프트웨어상의 디폴트 케로젠의 키네틱스를 입력하여 석유생성을 계산하였다. 즉, 케로젠 타입 II와 타입 III가 반반씩 혼재되어 있는 케로젠의 키네틱스를 사용하여 석유생성량을 계산하였다(표 1). 제주분지 시추공에서 측정된 총유기탄소량(TOC)은 에오세층과 올리고세층에서 1-3%로 높게 나타나며 4%가 넘는 경우도 있다(Kim and Son, 2013). 이와 같은 TOC함량을 고려하면 초기유기탄소 함량(initial TOC)은 4% 정도이었을 것으로 생각된다. 따라서 모델링을 위하여 초기 유기탄소 함량을 4%로 입력하였다(표 1).

각 퇴적층의 실질적인 암상에 대한 정보는 기존 시추공을 통해서 얻을 수 있다. 그러나 제주분지의 시추공들은 기반이 높은 융기된 곳에서 시추가 이루어졌기 때문에 각 퇴적층의 암상을 대표할 수 없다. 따라서 시추공 자료를 기반으로 하되 조구조 운동과 퇴적 환경과 관련하여 BasinMod 소프트웨어에서 제시한 암상을 참고로 하여 각 지층의 암상을 입력하였다(표 1).

근원암 내의 유기물이 케로젠으로 변화하고 케로젠이 다시 탄화수소로 변화하기 위해서는 일정한 매물심도와 온도에 도달하여야 하며, 온도는 기반암에서 올라오는 지열류(heat flow)에 지배되게 된다. 따라서 석유시스템 모델링에서 지열류량의 입력은 매우 중요하다. 현재의 지열류량은 시추공 온도로부터 계산될 수 있지만 과거의 지열류량은 비트리나이트 반사도 값을 사용하여 열성숙도 모델링을 수행하는 과정에서 모델링될 수 있다. 제주분지 시추공의 비트리나이트를 사용한 지열류 모델링은 Kim and Son (2013)과 Lee and Son (2016)에 의하여 수행된 바 있다. 본 연구에서는 이들이 수행한 모델과 분지분달사를 고려하여 지열사 모델을 수정하였으며, 이를 3-D 석유시스템 모델링을 위하여 입력하였다(그림 2).

4.2 3-D 모델링 결과

석유시스템 3-D 모델링은 근원암에서 석유와 가스가 생성되고 배출되어 저류층을 따라 이동하는 양

상을 공간적으로 보여줄 뿐 만 아니라, 시간적으로도 보여주기 때문에 사실상 4-D 모델링이라고도 말할 수 있다(Lee and Son, 2016). 따라서 실제 석유와 가스가 저류층 내에서 어느 시기에 어느 방향으로 이동되고, 어느 위치에 유망구조를 형성하는지를 예측할 수 있고, 이에 따라 실제 석유 탐사에서 유용하게 사용되고 있다(Johannesen *et al.*, 2002; Huvaz *et al.*, 2007; Kuhlmann *et al.*, 2011; Kuhn *et al.*, 2012; Lee and Son, 2016).

위에서 언급한 바와 같이 제주분지는 에오세 시기에 기반암층 위에 유기물이 풍부한 호성층이 퇴적된 것으로 해석되므로 에오세층을 근원암층으로 설정하여 3-D 모델링을 수행하였다. 또한, 에오세층 위에 퇴적된 올리고세층을 저류암층으로 하여 모델링을 수행하였다. 3-D 모델링 결과는 그림 3, 4, 5, 6, 7에 도시하였다. 그림 3은 근원암층에서 생성되어 배출된 석유와 가스가 근원암 상위의 저류층으로 이동되어 저류층 내에서 어떻게 이동되어 현재 어디에 집적되어 있는가를 계산한 결과를 보여주는 것이다. 그림에서 바탕색은 퇴적층의 심도를 표시하며 석유와 가스의 이동은 녹색과 분홍색의 가는 실선으로 나타난다. 그림에서 잘 볼 수 있는 바와 같이 석유와 가스는 한일공동개발구역(JDZ) 4소구의 서쪽, 중국해역과 가까운 지역과 1소구와 2소구 사이의 심도가 깊은 곳에 존재하는 근원암층(pod area 또는 depocenter)에서 생성되어 상위의 올리고세 저류층에서 경사면을 따라 심도가 깊은 곳에서 심도가 낮은 곳으로 이동하여 집적되는 것을 알 수 있다. 그러나 이 그림은 바탕색과의 중첩에 의하여 석유와 가스의 이

동과 집적을 뚜렷하게 보여주지 못하고 있다. 그러므로 석유의 생성과 배출, 석유의 이동과 집적과정을 뚜렷하고 알기 쉽게 보기 위하여 3-D 모델링 결과를 지질시간별로 분리하여 그림 4, 5, 6, 7에 제시하였다.

근원암층인 에오세층에서 생성된 석유와 가스가 근원암으로 부터 배출되는 양상을 그림 4와 5에서 시-공간적으로 볼 수가 있다. 에오세 근원암층은 심도가 깊은 지역에서 부터 석유 생성온도에 도달하게 되고, 이곳에서 먼저 석유와 가스를 생성하였다. 매물심도가 더욱 깊어지고 생성량이 증가하게 되면 생성된 석유와 가스는 근원암으로 부터 배출이 일어나게 된다. 먼저 23 Ma에 JDZ 4소구의 서쪽 근원암층에서부터 석유가 배출되어 나오기 시작한다(그림 4). 4소구에서의 석유의 배출량은 지질시간이 경과할수

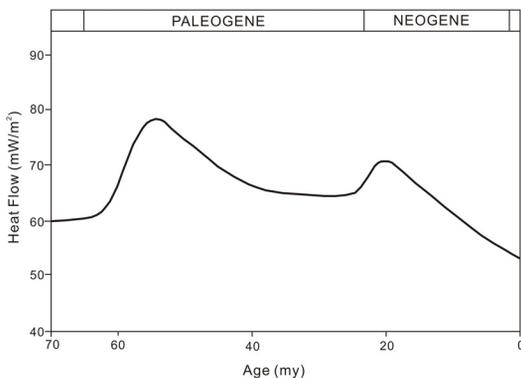


Fig. 2. Heat flow history model applied to 1-D and 3-D petroleum system models.

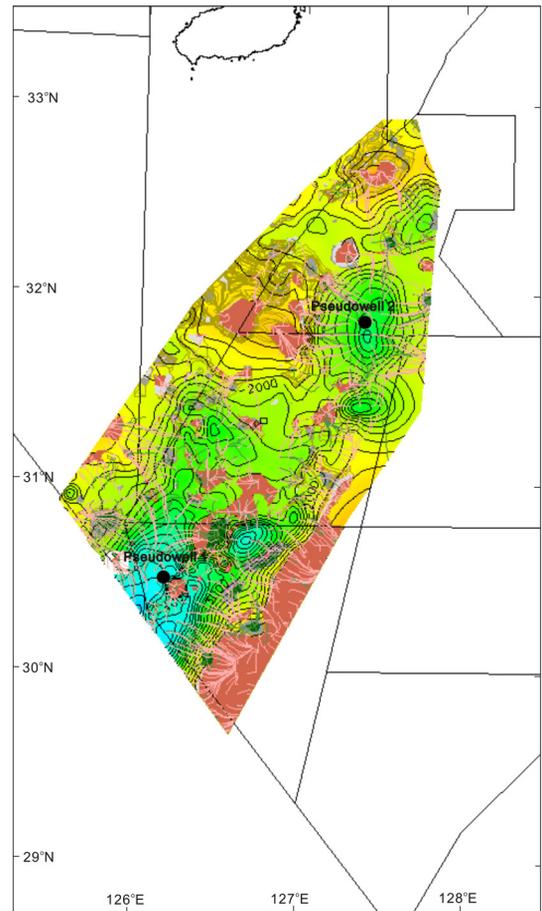


Fig. 3. 3-D migration and accumulation model. Green line: oil migration pathway, Pink line: gas migration pathway.

록 지속적으로 증가하는 것을 알 수가 있다. 5.3 Ma
에는 1소구와 2소구에서도 석유의 배출이 시작되어

현재(0 Ma)에 이르는 것을 볼 수가 있다(그림 4). 전
체적으로 보면 석유의 배출은 4소구의 서쪽지역에

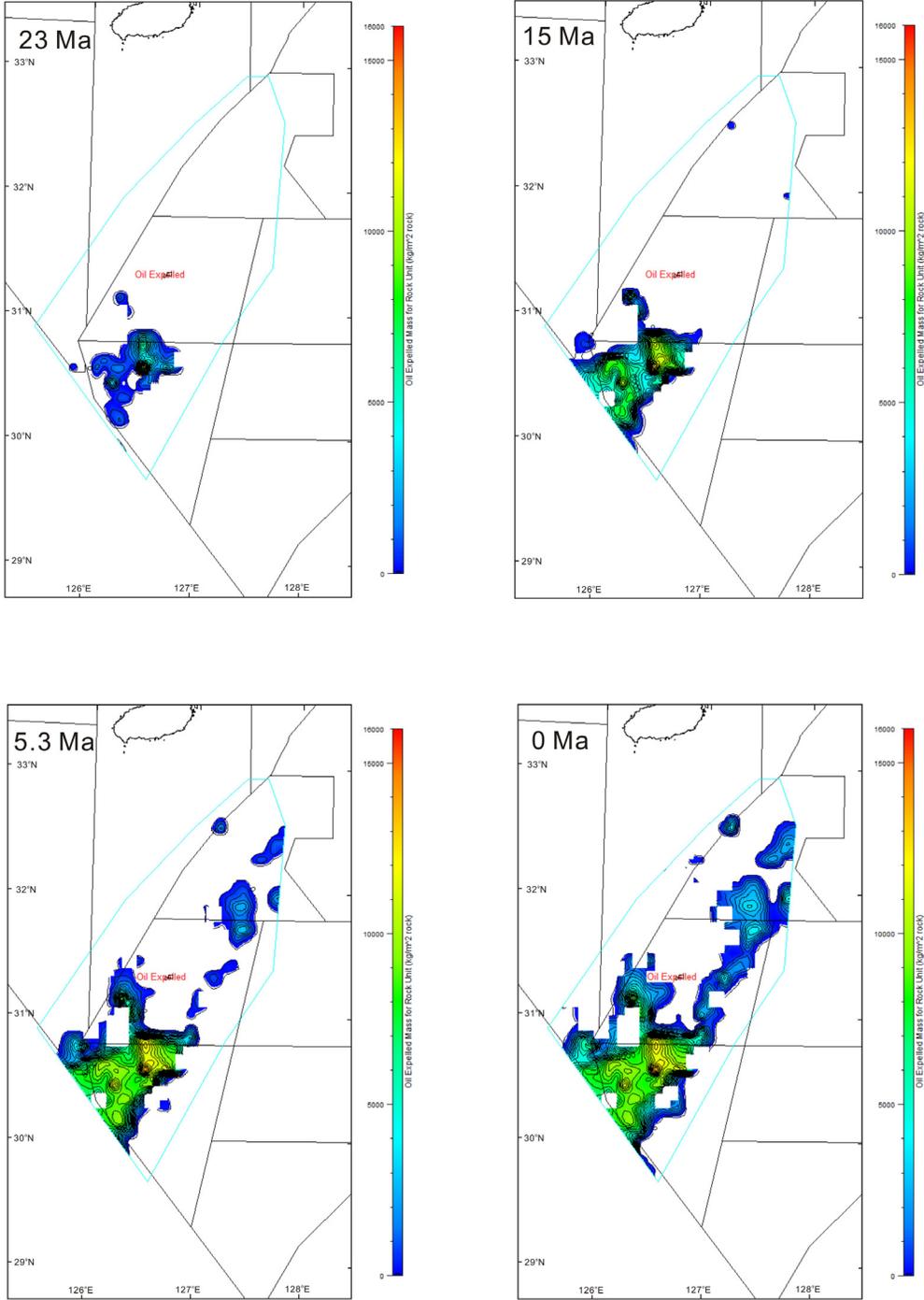


Fig. 4. 3-D oil expulsion model on the source bed.

서 가장 왕성하며 5.3 Ma 이후에는 1소구와 2소구 사이에서도 석유의 배출이 나타나는 것이 뚜렷하다.

가스의 배출도 석유의 배출 양상과 유사하게 모델링 된다. 즉, 가스도 23 Ma부터 4소구의 에오세 근원암

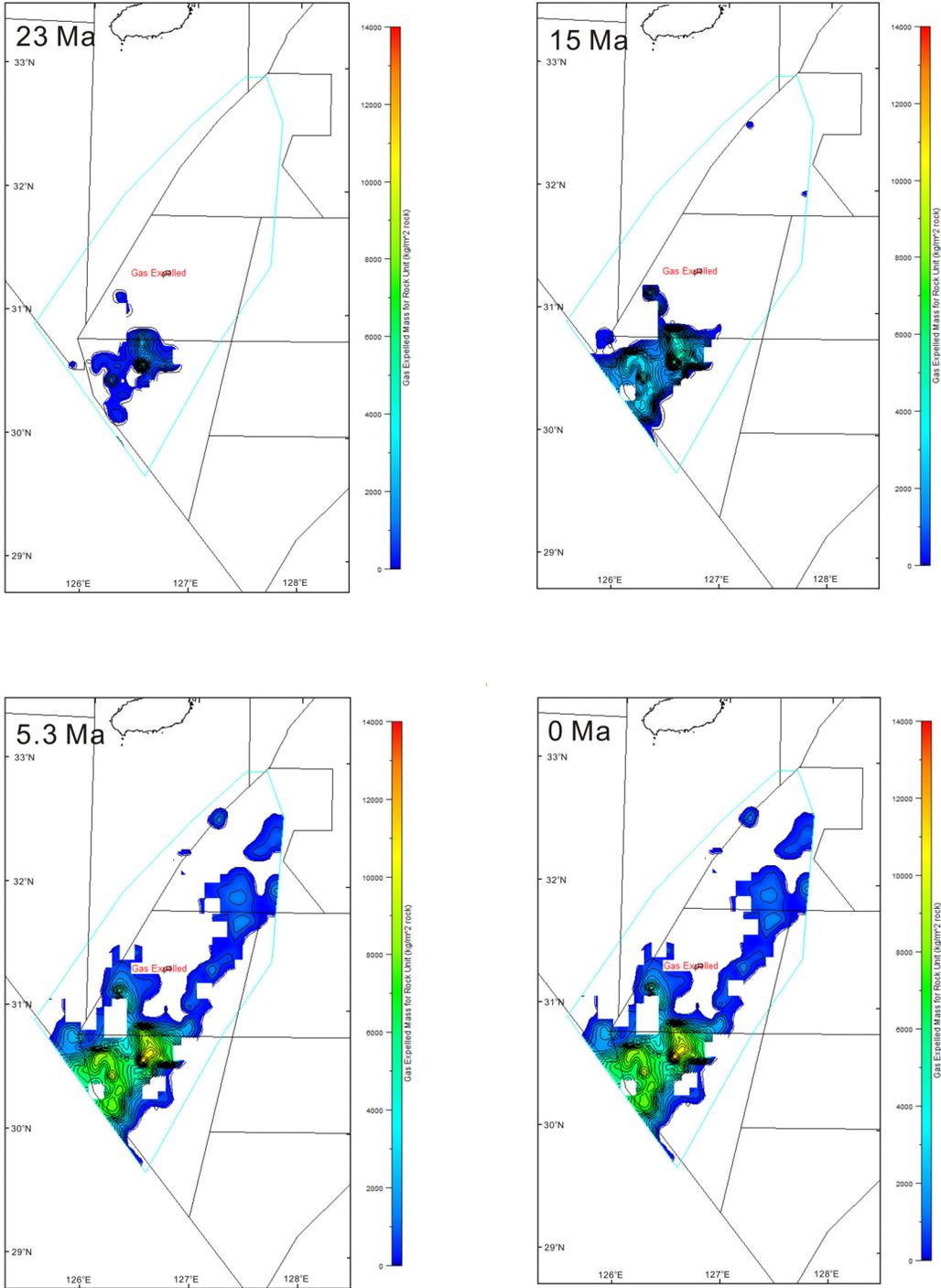


Fig. 5. 3-D gas expulsion model on the source bed.

에서부터 배출되기 시작한다(그림 5). 15 Ma까지는 4소구 근원암에서만 가스배출이 일어나지만 5.3 Ma부터는 1소구와 2소구의 근원암에서도 가스배출이 일어나고 있다(그림 5). 가스의 배출도 석유의 배출과 같이 4소구의 근원암에서 대량으로 발생하며, 다음으로 많이 배출되는 지역은 1소구와 2소구 사이의 지역이다(그림 5).

에오세 근원암에서 생성되고 배출된 석유와 가스는 상위의 올리고세 지층으로 이동하여 올리고세 사질층 내에서 부력과 모세관압이 작은 지역으로 움직이게 된다. 올리고세층에서의 석유와 가스의 이동은 그림 6과 7에서 시·공간적으로 볼 수가 있다. 그림에서 석유의 이동은 녹색 실선으로 표시되며 가스의 이동은 분홍색 실선으로 표시된다. 또한, 석유와 가

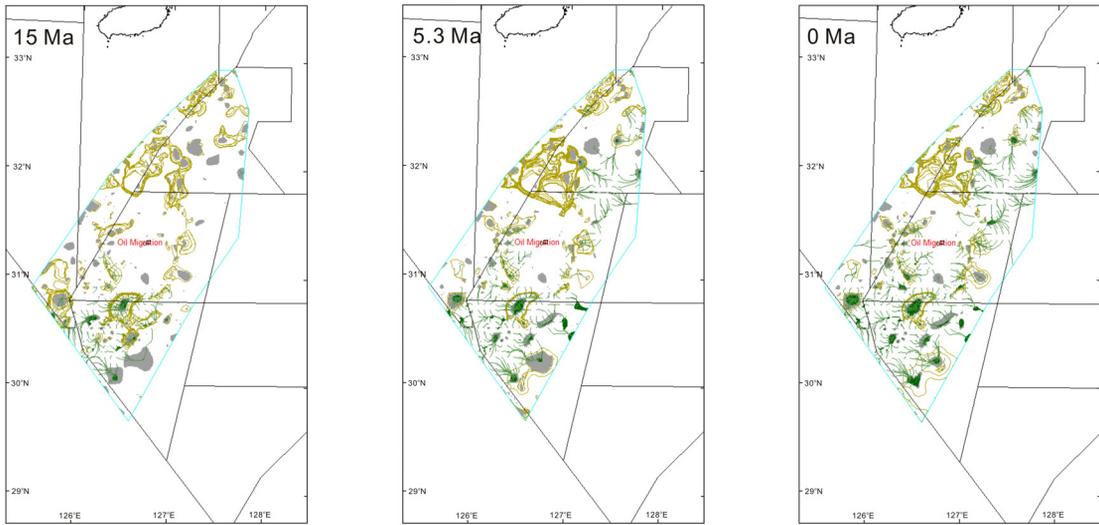


Fig. 6. 3-D migration and accumulation model of oil in the reservoir bed. Green line: oil migration pathway, Green area: oil trap, Gray area: vacant trap.

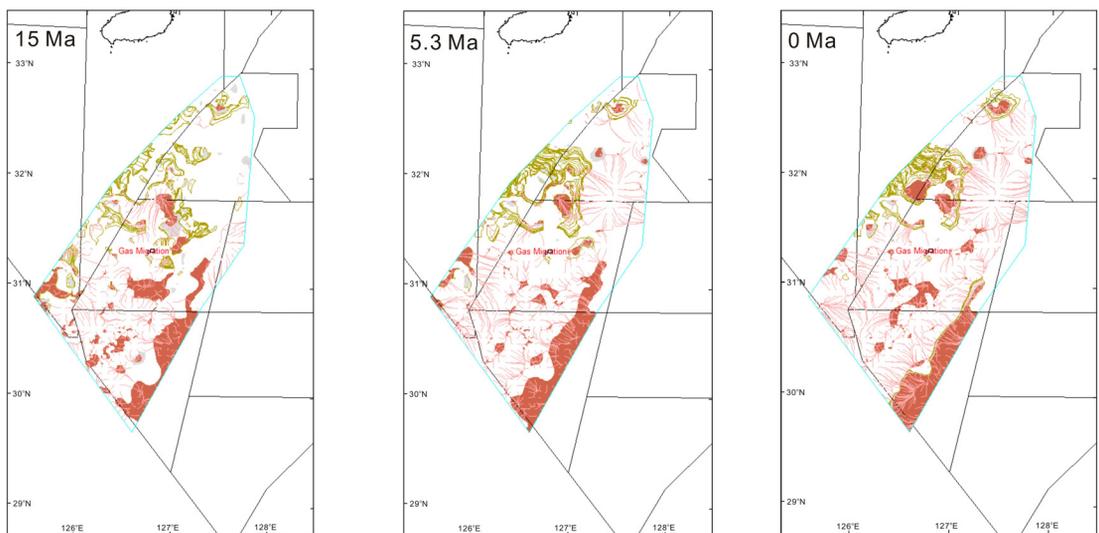


Fig. 7. 3-D migration and accumulation model of gas in the reservoir bed. Red line: gas migration pathway, Red area: gas trap, Gray area: vacant trap.

Table 2. Major input parameters for 1-D petroleum system modeling of Pseudowell-1.

Formation or Event Name	Type	Begin Age (my)	Present Thickness (m)	Eroded Thickness (m)	Lithology	Kerogen Type	Initial TOC (%)
Pleistocene	F	2.5	393		Ss15%, Slt5%, Sh80%		
Pliocene	F	5	340		Ss19%, Slt30%, Sh50%		
Late Miocene	H	5.3					
Missing	E	6		-500			
Deposit	D	7.5		500			
Late Miocene	F	11	145		Ss45%, Slt20, Sh45%		
Middle Miocene	F	16.5	817		Ss54%, Slt8%, Sh35%		
Early Miocene	F	23	695		Ss54%, Slt8%, Sh35%		
Oligocene	F	34	1419		Ss40%, Slt40%, Sh20%		
Eocene	F	50	1175		Ss20%, Slt20%, Sh60%	II50%+III50%	4

스를 집적할 수 있는 유망구조는 회색으로 표시되며, 구조에 석유가 채워진 경우는 녹색으로, 가스가 채워진 경우는 분홍색으로 표시된다. 먼저 석유는 15 Ma에 4소구의 서쪽지역에서 이동이 활발하게 일어나며 유망구조 중 일부를 채우고 있는 것을 잘 볼 수가 있다(그림 6). 5.3 Ma부터는 석유의 이동과 집적이 4소구에서, 보다 활발하게 일어나며 많은 유망구조를 채우고 있다. 또한 5.3 Ma부터는 1소구와 2소구에서도 석유의 이동과 집적이 시작되어 유망구조를 채워가는 것을 볼 수가 있다(그림 6). 석유보다 이동이 용이한 가스는 15 Ma부터 이동과 집적이 활발하게 나타나며 이미 형성되어 있는 유망구조에 트랩되기도 하고 용기된 지역으로 소실되기도 하는 것으로 보인다(그림 7). 즉, 4소구의 동쪽 용기부와 2소구의 서쪽 용기부에서 소실되기도 하지만, 유망구조에 집적되어 있는 것도 많이 관찰된다.

전체적인 모델링 결과로 볼 때, 석유와 가스의 생성, 이동, 집적은 JDZ 4소구의 서쪽지역과 1소구와 2소구 사이의 지역에서 활발하게 일어나고 있음을 뚜렷하게 알 수 있다.

5. 가상시추공의 1-D 석유시스템 모델

5.1 자료입력

1-D 모델링은 근원암에서 생성되고 배출되는 석유와 가스의 양을 지질시대에 따라 계산하여 보여줄 수 있다. 따라서 분지 전체에 대한 석유시스템을 이해하기 위해서는 분지 중심부(depo-center 또는 pod

area)에 대한 1-D 석유시스템이 필요하다. 그러나, 제주분지에 대하여 기존에 수행된 1-D 석유시스템 모델링은 용기된 지역에서 시추된 시추공에 대하여 서만 이루어졌기 때문에 제주분지 중심부에 대한 근원암을 이해하는 데는 어려움이 있었다(Kim and Son, 2013). 이 연구에서는 3-D 모델링 결과 석유와 가스의 생성, 이동, 집적이 활발한 것으로 밝혀진 JDZ 4소구의 서쪽지역과 1소구와 2소구의 사이의 동쪽지역에 가상 시추공을 설정하여 1-D 석유시스템 모델링을 실시하였다(그림 1, 3). 가상시추공 지역은 석유와 가스가 생성되어 제주분지로 공급되는 주요 공급지임이 3-D 모델링 결과로 나타났기 때문에 가상시추공은 기반암위의 에오세층 까지 깊게 설정하였다. JDZ 4소구의 서쪽지역 시추는 가상-1공(pseudowell-1)으로 명명하였으며, 1소구와 2소구의 사이의 동쪽지역의 시추는 가상-2공(pseudowell-2)으로 명명하였다.

가상 시추공들의 층서는 기본적으로 3-D 모델링을 위한 층서와 같다. 그러나, 각 퇴적층의 층서와 퇴적층의 두께는 지역에 따라 조금씩 다르게 나타나기 때문에 가상 시추공의 층서를 좀 더 세분화하려고 노력을 하였으며 부정합에 대하여도 고려하였다. 특히 마이오세를 초기, 중기, 후기로 구분하였으며 마이오세층의 용기와 삭박을 고려하여 층서 테이블을 작성하여 입력하였다(표 2, 3). 1소구와 2소구의 사이의 가상-2공 지역이 4소구의 가상-1공 지역에 비하여 상대적으로 용기와 삭박이 심하였으며, 이와 같은 점을 고려하여 입력하였다.

암상의 입력도 기본적으로 3-D 모델링을 위한 암

Table 3. Major input parameters for 1-D petroleum system modeling of Pseudowell-2.

Formation or Event Name	Type	Begin Age (my)	Present Thickness (m)	Eroded Thickness (m)	Lithology	Kerogen Type	Initial TOC (%)
Pleistocene	F	2.5	422		Ss15%, Slt5%, Sh80%		
Pliocene	F	5	335		Ss19%, Slt30%, Sh50%		
Late Miocene	E	5.3		-200			
Missing	E	6		-500			
Deposit	D	11		500			
Late Miocene	D	11.7		200	Ss45%, Slt20%, Sh35%		
Middle Miocene	F	16.6	258		Ss54%, Slt8%, Sh35%		
Early Miocene	F	23.7	340		Ss54%, Slt8%, Sh35%		
Oligocene	F	36.6	500		Ss40%, Slt40%, Sh20%		
Eocene	F	50	1888		Ss20%, Slt20%, Sh60%	II50%+III50%	4

상 입력과 같다. 그러나 가상시추공 들이 존재하는 분지중심부 지역의 심부 암상은 직접적으로 알 수 없기 때문에 층서 및 퇴적학적 위치를 고려하여 암상을 입력하였다. 제주분지는 하천-호수(fluvio-lacustrine) 퇴적상의 암상임을 고려하여 이암, 사암, 실트암을 일정 비율로 혼합한 암상을 입력하였다(표 2, 3). 분지형성 초기인 에오세층은 심호성 환경이 우세하였을 것으로 생각되기 때문에 이암의 함량을 우세하게 입력하였으며, 마이오세 층은 사질암이 우세하도록 입력하였다.

이미 위에서 언급한 바와 같이 근원암이 퇴적될 당시의 퇴적환경을 고려한다면 제주분지 근원암의 케로젠은 타입 II와 타입 III가 우세할 것으로 생각된다. 따라서 1-D 석유 시스템 모델링에서도 3-D 석유 시스템 모델링과 같이 타입 II와 타입 III가 반반씩 혼합된 케로젠의 키네틱 상수를 입력하였다. 또한 초기유기탄소 함량(initial TOC)도 3-D 모델링에서와 같이 4%를 입력하였다. 1-D 모델링을 위한 지열사 입력도 3-D 모델링에서와 같이 분지형성 초기에는 지열류량이 최대로 되었다가 이후에 감소하는 형태의 자료를 입력하였다(그림 2).

5.2 1-D 모델링 결과

가상-1공과 가상-2공의 1-D 석유시스템 모델링 결과는 그림 8과 9와 같다. 그림은 매몰사 및 지열사 곡선, 석유시스템 차트, 석유와 가스의 생성 누적량과 배출된 누적량을 보여주고 있다. 가상-1공 지역은 지속적으로 침강과 매몰이 진행되어 두꺼운 퇴적층을

형성한 것을 알 수가 있다(그림 8). 그러나 가상-2공 지역은 분지 형성 초기에는 침강과 매몰이 지속적으로 일어나지만, 37 Ma 이후에는 완만하게 매몰이 진행되는 것을 알 수 있다(그림 9). 또한, 두 지역 모두에서 마이오세 말기에 용기와 삭박이 크게 일어나며 가상-1공 지역에 비하여 가상-2공 지역의 용기와 삭박량이 크게 나타난다.

두 지역 모두 에오세 근원암에서 40 Ma부터 석유 생성 온도에 도달하여 석유와 가스를 생성하고 있다. 그러나 두 지역에서 매몰 속도와 매몰 정도, 그리고 구조의 역전에 의한 용기 및 침식 정도 등이 다르기 때문에 석유와 가스의 배출시기는 다르게 나타나고 있다. 즉, 가상-1공에서는 22 Ma부터 근원암으로부터의 배출이 시작되고 있는 반면(그림 8), 가상-2공에서는 이보다 훨씬 늦은 12 Ma부터 배출이 일어나고 있다(그림 9). 또한 가상-1공에서 배출된 석유와 가스의 양은 매우 많지만 가상-2공에서 배출된 석유와 가스의 양은 매우 적게 나타난다. 모델링을 위하여 동일한 양의 유기물 값을 입력하였기 때문에, 이와 같은 차이는 두 지역의 매몰사에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 이상과 같은 1-D 석유 시스템 모델링의 결과는 3-D 석유 시스템 모델링의 결과와도 잘 일치하고 있다.

6. 토 의

6.1 석유의 생성

기존에 제주분지에서 수행된 탐사시추 결과에 의

하면, JDZ 4소구의 시추공들과 2소구의 남쪽지역에 위치하는 시추공에서 가스징후가 인지되고 있으며, JDZ 4소구의 한 시추공에서는 석유의 징후도 인지된 바 있다. 이것은 이 지역에 석유시스템이 작동했거나 작동하고 있다는 것을 시사한다. 모델링 결과에서도 탄화수소의 생성은 JDZ 4소구의 서쪽지역과 1소구와 2소구 사이의 동쪽지역에서 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다. 이들 석유와 가스가 활발하게 생성되는 지역은 상대적으로 매몰심도가 깊은 지역 (depo-center 또는 pod area)이다.

모델링 결과에 의하면, 석유와 가스의 생성은 매몰심도가 깊은 JDZ 4소구 지역에서부터 먼저 시작되며, 시간이 경과하고 제주분지 근원암의 매몰이 증가함에 따라 2소구와 1소구 지역 중에서 매몰심도가 상대적으로 깊은 작은 소분지(sag)에서도 석유와 가스의 생성이 발생하기 시작한다. 생성된 석유와 가스는 근원

암 내의 미세한 공극을 채우게 되며 공극의 20%(역치값)을 채웠을 때 근원암으로부터 배출이 시작된다 (Bordenave, 1993; Welte *et al.*, 1996; Okui *et al.*, 1998). 석유와 가스의 배출은 4소구 서쪽지역에서 활발하게 일어난다(그림 4, 5). 매몰심도가 증가하고 이에 따른 매몰온도도 증가함에 따라 석유와 가스의 생성과 배출은 지속적으로 증가한다. 또한 2소구와 1소구의 작은 소분지(sag)의 근원암에서 생성된 석유와 가스도 배출되기 시작한다.

제주분지 퇴적층은 초기에 퇴적률이 높고 퇴적 속도가 빨랐기 때문에 석유와 가스의 생성은 40 Ma부터 일어나기 시작한다. 1-D 모델링에 의하면 JDZ 4소구 지역과 JDZ 1소구와 2소구 사이의 지역 모두 석유와 가스의 생성은 거의 같은 시기에 발생하지만 석유와 가스의 배출의 시기는 다르게 나타난다(그림 8, 9). 이것은 두 곳 모두 매몰 초기의 퇴적률은 같았지만 이

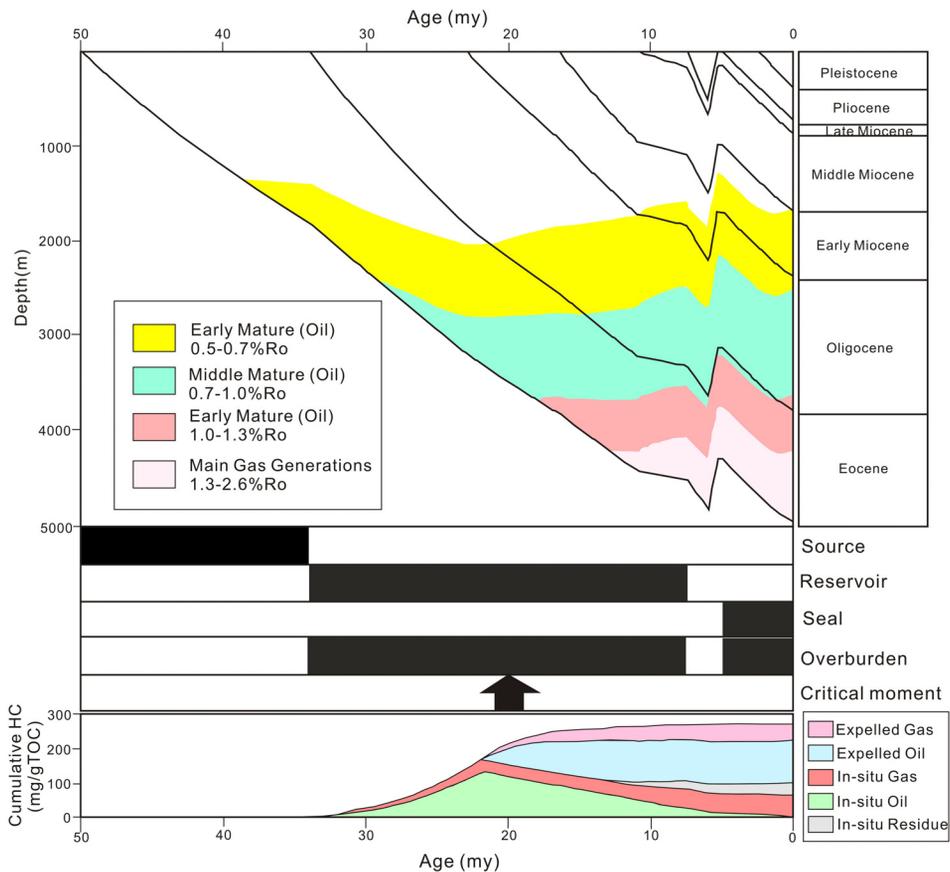


Fig. 8. 1-D petroleum system model of pseudo-well 1 including burial and thermal history, petroleum system chart, and cumulative hydrocarbons through geologic time.

후 JDZ 1소구와 2소구 사이의 지역이 퇴적률이 적어 지고 용기와 침식률이 컸기 때문에 JDZ 4소구 지역에 비하여 상대적으로 석유와 가스의 배출시기가 늦게 나타나고 있다. 최대의 석유와 가스의 배출시기(critical moment)는 JDZ 4소구 지역에서 약 20 Ma인데 반하여 JDZ 1소구와 2소구 사이의 지역에서는 약 10 Ma이다(그림 8, 9). 또한, 두 지역에서 생성된 석유와 가스의 양은 비슷하나 배출된 양은 JDZ 4소구 지역이 JDZ 1소구와 2소구 사이의 지역에 비하여 압도적으로 많다. 이와 같은 경향은 3-D 모델링에서도 잘 볼 수가 있다.

제주분지 내에서의 석유생성은 매몰사 및 지열사에 따라 전체적으로 비슷한 시기에 탄화수소가 생성된다. 그러나 제주분지는 작은 소분지들을 포함하고 있고, 소분지 마다 분지규모, 퇴적층 두께, 구조의 역전에 의한 침식 두께 등이 다르기 때문에 탄화수소의 생성과 배출 시기는 지역적으로 다르게 나타나는

것으로 해석된다.

6.2 석유의 이동 및 집적

에오세 근원암층에서 배출되어 나온 석유와 가스는 근원암층 상위의 다공질 저류암층으로 들어가서 이동을 시작하게 된다. 석유와 가스의 이동을 보여주는 3-D 모델링 결과에 의하면 JDZ 4소구 지역의 근원암에서 배출되어 나온 석유와 가스는 주변에 이미 형성되어 있는 크고 작은 폐쇄형 유망구조(closure)로 이동하여 들어간다(그림 6, 7). 지질시간이 경과함에 따라 근원암에서 배출되어 나오는 석유와 가스의 양은 많아지고 저류암에서도 지속적으로 석유와 가스의 이동이 일어나며 폐쇄형 유망구조를 채운다. 석유의 경우는 비교적 짧은 수평거리를 이동하는 것에 비하여, 가스의 경우는 상대적으로 먼 거리를 이동하며 JDZ 4소구 남동부의 용기된 지역으로 이동

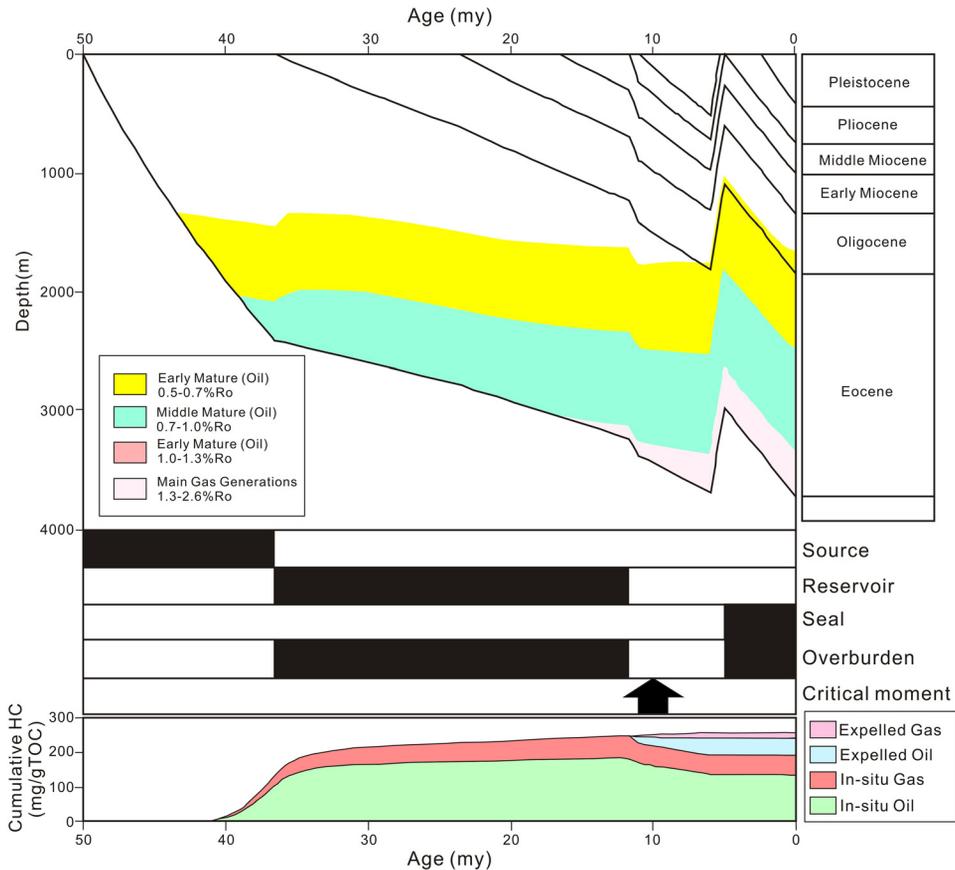


Fig. 9. 1-D petroleum system model of pseudo-well 2 including burial and thermal history, petroleum system chart, and cumulative hydrocarbons through geologic time.

하고 있다(그림 7). JDZ 4소구 남동부로 이동된 가스는 지표로 유실되었을 것으로 생각된다.

1-D 모델링에 의하면 JDZ 1소구와 2소구 사이의 에오세 근원암에서는 10Ma 부터 석유와 가스의 배출이 시작(critical moment)된다. 이 석유와 가스가 저류암층에서 이동하는 양상은 3-D 모델링 결과에서 잘 볼 수 있다(그림 6, 7). 이 지역은 JDZ 4소구 지역과는 달리 근원암에서의 석유와 가스의 배출이 상대적으로 늦게 이루어지고 저류암에서의 이동시기도 상대적으로 늦게 나타나는 것으로 모델링된다. 이동된 석유와 가스는 주변에 이미 형성되어 있는 폐쇄형 유망구조에 집적되는 것을 알 수 있다.

에오세 근원암에서 석유와 가스의 최대 배출 시기(critical moment)는 JDZ 4소구지역은 20Ma, 그리고 JDZ 1소구와 2소구 사이 지역에서는 10Ma인 것으로 모델링되었다(그림 8, 9). 이 최대 배출시기는 마이오세 시기이며 석유와 가스의 이동도 이 시기에 가장 활발했을 것으로 보인다. 한편, 광역적인 덮개암층은 플라이오세와 프라이스토세 시기에 형성되었기 때문에 덮개암 형성 이전에 올리고세층과 마이오세층에서 이동이 이루어진 상당량의 석유와 가스가 지표로 유출되었을 가능성이 많다. 그러나 올리고세층과 마이오세층은 하성 사질암과 이질암이 교호되어 나타나고 있기 때문에 지층형태가 폐쇄형 유망구조를 이루고 이질암의 덮개가 잘 형성된 트랩 구조가 만들어 졌을 경우에는 석유와 가스가 집적되어 보존되었을 것으로 보인다. 지도를 기반으로 한 3-D 모델링은 이와 같은 경우를 잘 보여주고 있다.

7. 결론

우리나라의 남해대륙붕 제주분지에 대한 광역적인 심층구조도(subsurface structure map)를 사용하여 3-D 석유시스템 모델링을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 모델링 결과는 석유와 가스의 생성, 이동, 집적의 석유시스템이 잘 이루어지고 있는 것을 보여주며, 기존 시추공들이 시추 당시 유징(oil show)과 가스징후(gas show)를 보였던 점을 고려한다면 모델링 결과는 잘 일치함을 보인다. 따라서 제주분지 지역에는 석유시스템이 작동했거나 작동하고 있는 것으로 생각된다.

2) 석유와 가스의 주 생성지역은 JDZ 4소구 서쪽 지역으로서 이곳에서 가장 많은 석유와 가스가 근원암으로부터 배출되었다. 다음으로 석유와 가스가 많이 생성된 지역은 JDZ 1소구와 2소구가 접한 지역의 동쪽부분이다.

3) JDZ 4소구 동쪽지역과 JDZ 1소구와 2소구가 접한 지역의 석유생성량은 비슷하나 근원암으로부터 배출된 양과 시기는 뚜렷하게 다르다. 즉, JDZ 4소구 동쪽지역은 20M에 많은 양이 배출되었지만 JDZ 1소구와 2소구가 접한 지역에서는 이보다 늦은 10 Ma에 배출이 일어나며 배출량도 매우 적다.

4) 근원암에서 배출되어 나온 석유와 가스는 상위의 올리고세층과 마이오세층에서 이동과 집적이 일어났을 것으로 보인다. 석유와 가스의 이동이 활발했던 시기는 마이오세 시기이며 이때는 광역적인 덮개암이 형성되기 이전이므로 많은 양의 석유와 가스가 지표로 유출되었을 가능성이 있다.

5) 그러나 올리고세층과 마이오세층은 사질암과 이질암이 교호되는 지층이므로 폐쇄형 유망구조가 잘 형성된 곳에는 석유와 가스가 집적되어 있을 것으로 생각된다. 이것은 모델링 결과에서 잘 보여주고 있다.

모델링 결과로부터 한반도 남해 대륙붕 제주분지의 석유시스템을 제시하였다. 주변국들과의 해양경계 갈등 등으로 인하여 현재는 JDZ지역에 대한 탐사가 중단된 상태이지만, 추후 국가간 문제가 해소되고 탐사가 다시 이루어질 경우에는 이번에 수행된 석유시스템 모델링 결과가 이 지역 석유탐사의 기초 자료가 될 수 있을 것이다. 또한 물리탐사와 시추에 의하여 새로운 자료들을 얻게 되면 이번에 수행된 석유시스템 모델링은 수정되거나 더욱 정교하게 이루어 질 수 있다. 이 지역에 대하여 석유시스템 모델링이 지속적으로 수행되면 제주분지의 석유와 가스의 발견에 크게 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “석유시스템-정적-동적자료 융합을 통한 유가스전 지능형 평가 기술개발(과제번호 18-3311)” 사업의 지원으로 수행되었다. 원고는 정대교 교수와 익명 심사자의 교정과 지적에 의하여 개선되었다. 두 분께

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, 324 p.
- Al-Hajeri, M.M., Saeed, M.A., Derks, J., Fuchs, T., Hantschel, T., Kauerauf, A., Neumaier, M., Schenk, O., Swientek, O., Tessen, N., Welte, D., Wygrala, B., Kornpohl, D. and Peters, K., 2009, Basin and petroleum system modeling. *Oilfield Review*, 21, 14-29.
- Bordenave, M.L., 1993, *Applied Petroleum Geochemistry*, Editions Technip, Paris, 524 p.
- Doust, H. and Sumner, H.S., 2007, Petroleum systems in rift basins - a collective approach in Southeast Asian basins. *Petroleum Geoscience*, 13, 127-144.
- 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, 1175-1179.
- Hall, R., 2009, Hydrocarbon basins in SE Asia: Understanding why they are there. *Petroleum Geoscience*, 15, 131-146.
- 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 p (in Korean).
- Hantschel, T. and Kauerauf, A., 2009, *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 476 p.
- Hao, F., Zhou, X., Zhu, Y., Bao, X. and Yang, Y., 2009, Charging of the neogene Penglai 19-3 field, Bohai Bay Basin, China: Oil accumulation in a young trap in an active fault zone. *American Association of Petroleum Geologists*, 93, 155-179.
- Huvaz, O., Sarikaya, H. and Işık, T., 2007, Petroleum systems and hydrocarbon potential analysis of the north-western Uralsk basin, NW Kazakhstan, by utilizing 3D basin modeling methods. *Marine and Petroleum Geology*, 24, 247-275.
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E. and Pollastro, R.M., 2007, Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91, 475-499.
- 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 Staffjord area, Norwegian North Sea. *Petroleum Geoscience*, 8, 37-50.
- Jolivet, L., Huchon, P. and Claude, R., 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).
- KNOC, 2018, http://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_1_2.jsp (October 14, 2018).
- Koh, C.-S., Yoon, S.-H., Lee, D.-K. and Yoo, H.-S., 2016, Tectonic evolution and depositional environments of Jeju and Socotra basins in the southernmost continental shelf of the South Sea, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 355-371 (in Korean with English abstract).
- 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, 387-414.
- 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, 1867-1897.
- Kwon, Y.I., Park, K.S., Yu, K.M. and Son, J.D., 1995, Stratigraphy and provenance of Non-marine sediments in the Tertiary Cheju Basin. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 3, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.-R. and Son, B.-K., 2007, Petroleum system modeling of continental shelf area, Southwestern margin of the Ulleung Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 477-499 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., Kim, B., Shin, K.S. and Sunwoo, D., 2006, Geological evolution and aspects of the petroleum geology of the northern East China Sea self basin. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 237-260.
- Lee, H.-Y., Shin, W.-C., Koo, N.-H., Kang, D.-H., Kim, W., Kim, B.Y., Cheong, S., Kim, Y.-G., Hwang, K.-D., Seo, G.-S. and Cho, D., 2012, Atlas of petroleum resources exploration on the Korean continental shelf (Jeju Basin). *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 40 p (in Korean).
- Lee, S.A. and Son, B.-K., 2016, Petroleum system modeling of the Sora basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 333-353 (in

- Korean with English abstract).
- Lee, Y.J., 1997, Petroleum Geochemistry of Organic Matter from the Cheju Basin, northeastern part of the East China Sea. Ph.D. thesis, Chungnam National University, Daejeon, Korea, 328 p.
- Li, D., 1984, Geologic evolution of petroliferous basins on continental shelf of China. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 68, 993-1003.
- 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 Taiwan basins in framework of Western Pacific Ocean. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 25, 256-260.
- Oh, J., Park, K.-S. and Park, K.-P., 1997, The name of the sedimentary basins in the continental margin of Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 33, 148-159 (in Korean with English abstract).
- Oh, J.-H., Kwak, Y.-H., Son, J.-D., Cheong, T.-J., Huh, D.-K., Ryu, B.-J., Son, B.-K., Kwon, S.-K., Lee, Y.-J. and Kim, H.-J., 1992, Study on the petroleum geology and geochemistry in Korean Offshore. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KR-91-5B-2, 141 p.
- 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. In: Düppenbecker, S.J. and Illiffe, J.E. (eds.) Basin Modelling: Practice and Progress. Geological Society, London, Special Publications, 141, 45-72.
- Peters, K.E., Burnham, A.K., Walters, C.C. and Schenk, O., 2018, Guidelines for kinetic input to petroleum system models from open-system pyrolysis. Marine and Petroleum Geology, 92, 979-986.
- Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M., 2005, The Biomarker guide. I. 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. In: Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R. (eds.), Petroleum and basin evolution. Springer-Verlag, Berlin, 5-70.
- Son, B.-K. and Park, M., 2013, Hydrocarbon generation and migration modeling in southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea, 49, 453-471 (in Korean with English abstract).
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.K., 1990, Evolution of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 74, 1559-1570.
- 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., 1990, State of the art of research in kinetic modelling of oil formation and expulsion. Organic Geochemistry, 16, 1-25.
- 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, 309-335.
- Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R., 1996, Petroleum and basin evolution. Springer-Verlag, Berlin, 535 p.
- 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 Yalçin, M.N., 1987, Basin modelling - A new comprehensive method in petroleum geology. Advances in Organic Geochemistry, 13, 141-151.
- Wygrala, B.P., 1988, Integrated computer-aided basin modeling applied to analysis of hydrocarbon generation history in a Northern Italian oil field. Organic Geochemistry, 13, 187-197.
- Yang, F.-L., Xu, X., Zhao, W.-F. and Zun, Z., 2011, Petroleum accumulations and inversion structures in the Xihu depression. Journal of Petroleum Geology, 34, 429-440.
- Yoon, S.H., Son, B.K. and Shinn, Y.J., 2009, Review on geology and potential petroleum systems of sedimentary basins in the South Sea of Korea. KIGAM Bulletin, 13, 54-69 (in Korean with English abstract).
- Yun, H., Yi, S., Kim, J.H., Byun, H.S., Kim, G.H. and Park, D.B., 1999, Biostratigraphy and paleoenvironment of the Cheju sedimentary basin-based on materials from explorations, Geobuk-1 and Okdom-1. Journal of Paleontological Society of Korea, 15, 43-94 (in Korean with English abstract).
- Zhang, C., Li, S., Yang, J., Yang, S. and Wang, J., 2004, Petroleum migration and mixing in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 21, 215-224.
- Zhou, Z., Zao, J. and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the east China Sea. In: Zhu, X. (ed.), Chinese sedimentary basins, Elsevier, 165-179.

Received : October 22, 2018

Revised : November 21, 2018

Accepted : November 23, 2018