

동해 울릉분지 남서연변부의 탄화수소 생성 및 이동 모델링

손병국* · 박미숙

한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

상업적 천연가스가 생산되고 있는 동해 울릉분지 남서연변부 대륙붕지역에 대하여 1D와 2D 석유시스템 모델링을 수행하여 탄화수소의 생성, 이동, 집적의 형태를 규명하였다. 4개 시추공에 대한 1D 모델링 결과, 시추공 구간내의 사암층에서 발견 되는 천연가스를 생성 할 수 있는 유효 근원암은 기존 시추공 구간의 심도 내에는 존재하지 않는 것으로 나타난다. 1D 결과와 기존의 다른 연구 결과들을 고려하여, 발견된 천연가스를 생성한 유효 근원암을 5,000 m 이상의 깊은 심도에 설정하고, 케로젠 타입을 타입 II로 하여 2D 모델링을 수행하였다. 2D 모델링을 위하여, 심하게 변형된 돌고래 구조 지역과 상대적으로 변형정도가 약한 고래 구조 지역의 주요 시추공들을 가로지르는 2개의 탄성과 축선을 선택하였다. 2D 모델링 결과, 천연가스의 생성과 배출이 우세하게 나타나며 근원암층으로부터 총 2회에 걸친 대규모 탄화수소 배출이 인지된다. 초기에 배출된 탄화수소는 광역적 덮개암층의 부재로 집적되지 못하고 대부분 유실되었다. 중기 마이오세 후기(12 Ma)부터 작용한 압축력에 의해 구조적 변형을 받고, 이후 배사구조로 발달되어 석유를 배태할 수 있는 유망 구조가 형성된다. 이 시기 이후에 쌓인 이질암층이 광역적인 덮개암 역할을 하여, 2차로 생성되어 배출된 가스가 고래 구조 쪽으로 지층경사를 따라 이동하여 고래 구조 지역에 집중적으로 집적된다. 2D 탄성과 단면에서 가장 깊은 심도에 가상 시추공 2곳을 설정하여 1D 모델링을 실시한 결과, 2D 모델링에서 계산된 탄화수소의 생성 및 배출 결과와 잘 일치하는 것이 확인된다.

주요어: 울릉분지, 석유시스템, 모델링, 탄화수소, 케로젠

Byeong-Kook Son and Meesook Park, 2013, Hydrocarbon Generation and Migration Modeling in Southwestern Margin of the Ulleung Basin, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 4, p. 453-471

ABSTRACT: 1D and 2D petroleum system modeling was performed to understand generation, migration and accumulation of hydrocarbons in the continental shelf area, southwestern margin of the Ulleung Basin, where natural gases have been commercially produced. The 1D models indicate that the natural gases found in the sandstone reservoirs are derived from the effective source rock at deeper strata than the total drilling depths of the studied wells. To model the generation and migration in 2D sections, the strata of the effective source rock were set at depths of over 5,000 m with Type II Kerogen based on the 1D results and other studies. The 2D models were performed on two seismic lines, which traverse Dolgorae wells in the structurally deformed zone as well as Gorae wells in the relatively less deformed zone. The wells are also very close to the lines. Natural gases prevail in the 2D models, which show two phase expulsion of hydrocarbon. The hydrocarbons from the first expulsion were seeped out to the surface because of the absence of regional seal. The hydrocarbons from the second stage, however, were accumulated into traps of anticlines that were formed by compressional stress at 12 Ma in late Middle Miocene. The second phase hydrocarbons were accumulated mostly into the Gorae prospect area because regional seals prevent the hydrocarbon from moving through the upper strata. Additional 1D models were also carried out on two pseudo-wells that were drilled up to two pods of the source strata. The results of 1D are consistent well with that calculated on the 2D section in the manner of generation and expulsion.

Key words: Ulleung Basin, petroleum system, modeling, hydrocarbon, kerogen

(Byeong-Kook Son and Meesook Park, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

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

1. 서 론

동해 울릉분지 남서부의 대륙붕 6-1광구 지역은 수십년간 석유탐사 작업이 수행되어 왔으며, 경제성 있는 가스가 발견되어 상업적으로 생산 중에 있으나 새로운 발견은 이어지지 않고 있다. 이 지역은 석유탐사를 위하여 수많은 탄성과 탐사와 시추 작업이 이루어져 왔으며, 이들 탄성과 자료와 시추시료를 이용하여 탄성과 및 생성서 해석, 유기지화학적 분석 등이 이루어졌다(Lee, H.Y., 1994; Park, 1998; Cheong *et al.*, 2004; Lee, G.H. *et al.*, 2004, 2011; Lee, Y.J. *et al.*, 2005). 그러나, 새로운 탄화수소 발견과 매장량 확보를 위해서는 지금까지 획득한 탐사 및 분석 자료를 종합적, 광역적으로 해석하여 석유의 생성, 이동, 집적에 대한 석유시스템의 틀을 설정할 필요가 있다.

석유시스템은 성숙된 근원암으로부터 석유의 집적에 필요한 저류암과 덮개암, 그리고 근원암을 성숙시키는데 필요한 하중암(overburden rock)의 지질 요소 뿐만 아니라 석유의 생성, 배출, 이동의 과정을 시공간적으로 종합하는 체계화된 개념이다(Magoon and Dow, 1994). 따라서, 석유시스템을 분석하고 이해함으로써 울릉분지 남서부 대륙붕 지역에 대한 석유발견 확률을 크게 향상시킬 수 있다. 또한, 석유시스템을 체계화하고 가시화하기 위해서는 석유시스템의 수치적 모델링이 필요하다(Welte *et al.*, 1996; Wygrala, 1988; Ligtenberg and Neves, 2008; Hantschel and Kauerauf, 2009). 석유시스템 모델링은 분지의 형성과정에서 일어나는 지질학적 및 물리화학적 현상을 정량화하고, 퇴적층에서 유기물이 탄화수소로 바뀌는 석유화 과정을 계산하여 가시화한다. 즉, 석유시스템 모델링은 퇴적분지의 퇴적물에 존재하는 유기물로부터 석유가 생성되어 이동, 집적되는 과정을 물리 화학적인 법칙에 근거하여 수식화한 방정식으로부터 컴퓨터상에서 계산하여 과거로부터 현재까지를 전진시뮬레이션에 의해 재현한다(Welte and Yalçin, 1987; Ungerer *et al.*, 1990; Waples, 1994; Poelchau *et al.*, 1997; Rodriguez and Littke, 2001; Ghori *et al.*, 2005; Lee and Son, 2007). 석유시스템 모델링을 통해 석유의 생성 및 배출시기와 집적위치를 가시화할 수 있기 때문에 탐사의 위험성을 줄일 수 있는 장점이 있다.

최근에 Lee and Son (2007)에 의하여 석유 생성 및

이동에 대한 모델링이 수행된 바 있으나, 제한된 시추공과 단면을 사용하였으며 현재 천연가스가 생산되고 있는 가스전을 포함한 전 지역에 대한 탄화수소의 생성, 이동, 집적을 이해하기에는 부족하다. 따라서 이 연구에서는 대륙붕 6-1광구 전 지역을 포함할 수 있고 대표할 수 있는 시추공 및 단면에 대하여 1D 및 2D 모델링을 실시함으로써, 이 지역의 지속적인 석유탐사와 발견을 위한 석유시스템에 대한 일관적이고 포괄적인 이해의 틀을 설정하고자 하였다.

2. 연구방법 및 자료

석유시스템 모델링은 지질, 지화학, 암석물성 등의 데이터로부터 석유의 생성, 이동, 집적을 수치적으로 계산하는 하나의 과정이므로 철저한 자료의 수집과 수집된 자료의 분석, 그리고 분지발달과 층서에 대한 개념정리가 요구된다(Welte and Yalçin, 1987; Poelchau *et al.*, 1997; Hay *et al.*, 2000; Yahi *et al.*, 2001; Higley *et al.*, 2009). 따라서 본 연구를 위해 기존에 발간된 학술논문, 학위논문, 연구 보고서 등에서 모델링을 위해 필요한 입력자료 들을 최대한 추출하였으며, 기존에 연구된 분지발달 개념을 적용하여 모델링을 수행하였다.

연구지역의 모델링을 위해서 전 광구지역을 가로지르는 두 개의 탄성과 측선과 네 개의 시추공을 선정하였다(그림 1). 탄성과측선은 연구지역의 지질구조와 퇴적형태 등을 고려하였으며, 시추공은 선정된 측선과 시추심도를 고려하여 선택하였다. 선정된 시추공들은 주변의 다른 시추공들보다 총심도(total depth)가 깊고, 이용할 수 있는 층서 자료나 지화학자료가 풍부한 시추공들이다. 구조운동에 의해 변형을 심하게 받은 지역에 위치한 돌고래 I, 돌고래 II공과 상대적으로 구조적 변형을 덜 받은 지역에 위치한 고래 I, 고래 V공이 선정되었다.

석유시스템 모델링은 퇴적물의 매몰과 압밀과정, 열성숙도, 석유생성, 석유와 가스의 이동에 대한 모델링을 수행한다. 모델링을 위한 소프트웨어는 미국 Platte River Associates 사의 BasinMod[®] 를 사용하였다. 선정된 시추공과 가상시추공에 대해서는 1차원(1D) 모델링을 실시하였으며 탄성과 단면에 대해서는 2차원(2D) 모델링을 실시하였다. 1D 모델링을 위한 지층의 층서, 암석물성, 시추공 온도, 근원암

의 유기물 함량 및 유기물 타입은 기존 자료로부터 정량값을 추출하여 입력하였다. 또한, 고지열류량 값은 온도 자료와 비트리나이트 자료로부터 분지 발달사를 고려한 보정작업(calibration)을 반복 시행함으로써 적정값을 얻었다(Waples *et al.*, 1992). 이렇게 하여 분지의 매몰과 지열역사를 복원하여, 과거부터 현재까지의 매몰과 지열이 변화되는 동안 근원암에서 탄화수소가 생성되고 배출된 시기와 양을 모델링 하였다. 열성속도 모델링을 위해서 고지온을 지시하는 비트리나이트 반사도 자료와 Rock-Eval

T_{max} 자료가 사용되었다(Espitalié *et al.*, 1985; Peters, 1986). 비트리나이트 반사도 모델링은 Sweeney and Burnham (1990)의 Easy%R, 알고리즘을 사용하였다. 실측값 R_o 와 모델링에 의한 계산값을 최적으로 일치시키기 위해 분지 발달사를 고려하여 지열류량을 추정했으며 이를 반영하였다(Deming, 1994). 석유 가스 생성량의 계산은 반응속도 모델(kinetics model)을 사용하였다. 2D 모델링 단계에서는 지질시대 동안에 일어나는 탄화수소의 생성, 이동, 집적을 2차원 단면상에서 계산하여 가시화하였다. 즉, 시추공

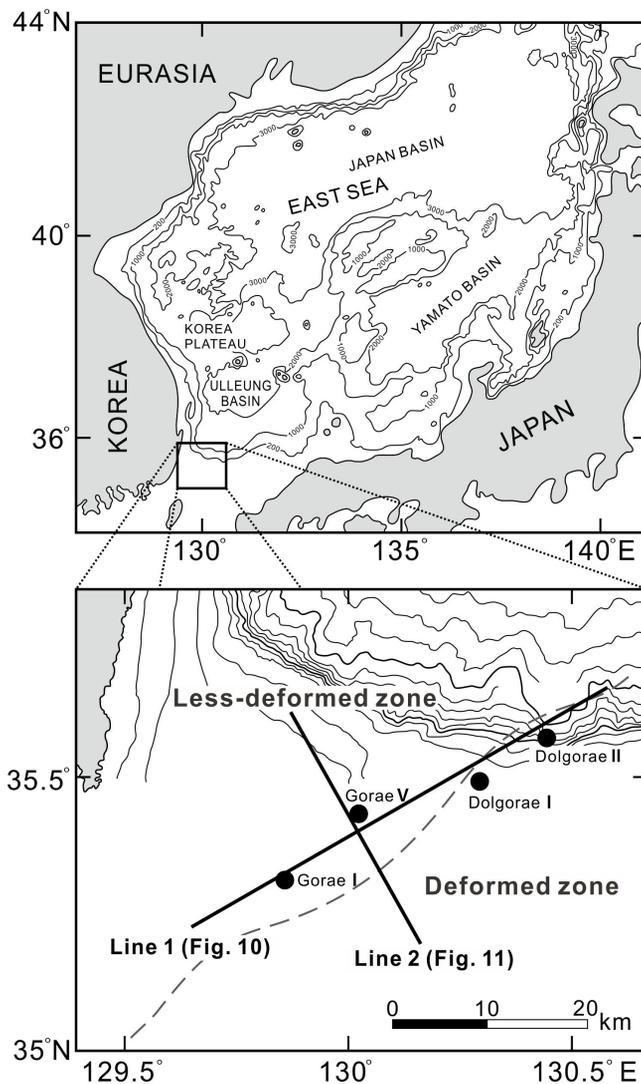


Fig. 1. Location map of the study area including two seismic lines and four wells. Modified from Yoon *et al.* (1997) and Lee, G.H. *et al.* (2004).

을 지나는 지질단면의 분석을 통해 퇴적물의 매물과 정, 지질시대동안 탄화수소의 생성과 탄화수소가 움직이는 방향과 경로, 탄화수소가 집적된 위치 등을 모델링하였다. 퇴적물 내 유기물로부터 탄화수소가 생성되는 과정은 유기물의 성숙도와 반응속도 모델을 적용하여 계산하였다. 탄화수소의 이동모델은 부력과 모세관압을 고려하여 상대투과율 개념을 다상 유체에 적용한 Darcy의 법칙을 사용하였다.

3. 분지발달 및 지질개요

울릉분지 및 주변 지역의 지구조 발달은 작용하는 응력장의 변화에 따라 진행되었다(Park et al., 2002; Takano, 2002). 분지의 형성은 후기 올리고세에서 초기 마이오세 동안 울릉분지의 남서 주변부로부터 후열도 확장에 의해 시작된다. 중기 마이오세 말(약 12Ma)에는 동해에 영향을 미치고 있는 응력장이 인장력에서 압축력으로 바뀐다(그림 2). 압축력에 의해 융기되고 구조적 변형이 일어났으며, 융기된 지역으로부터 삭박된 퇴적물들은 지형적으로 낮은 지역에 재퇴적되었다. 이로 인해 분지 전체에 광역적인 부정합이 형성되었다. 조구조 운동은 탄화수소의 생성과 이동에도 커다란 영향을 주었으며, 연구지역인 울릉분지 남서부에 존재하는 돌고래 구조와 고래

구조로 불리고 있는 일련의 배사구조와 쓰리스트 단층을 포함하는 석유가스 집적구조들은 모두 동해의 단층과 관련된 지각의 수축운동에 의해서 형성된 것이다(Park et al., 2002). 즉, 약 12 Ma경에 발생한 필리핀판의 섭입에 따른 강한 압축력이 돌고래 지역에 용기와 트러스트를 수반한 북동-남서 방향의 습곡구조를 형성하였으며, 고래 지역에는 완만한 경사의 습곡구조를 형성하였다. Lee, G.H. et al. (2004)에 따르면 돌고래 구조들은 초기 마이오세 최후기와 후기 마이오세 후기 사이에 형성되었으며, 고래 구조들은 후기 마이오세 후기에서부터 현재까지 형성되고 있다. 최근의 연구는 돌고래 구조대 습곡축과 고래 구조대의 습곡축이 서로 수직인 점에 착안하여 고래 구조는 동쪽으로 이동하는 아무르판에 의하여 형성되었을 가능성도 제기되고 있다(Lee, G.H. et al., 2011). 플라이오세부터 분지 주변부는 침강하기 시작하였으며 이 침강작용은 현재까지 지속된다.

분지 내의 퇴적작용은 초기 동해 형성 시기인 올리고세에 시작되었다. 분지형성 초기에는 내륙성 호소 퇴적층이 퇴적되었고 마이오세 이후부터는 두꺼운 해성 퇴적층이 퇴적되었다. 초기-중기 마이오세에 열개와 동시에 울릉분지 남쪽 연변부에 집중적으로 퇴적이 이루어졌고 퇴적물은 주로 대륙사면과 심해저에서 퇴적된 터비다이트 퇴적물로 구성된다. 이

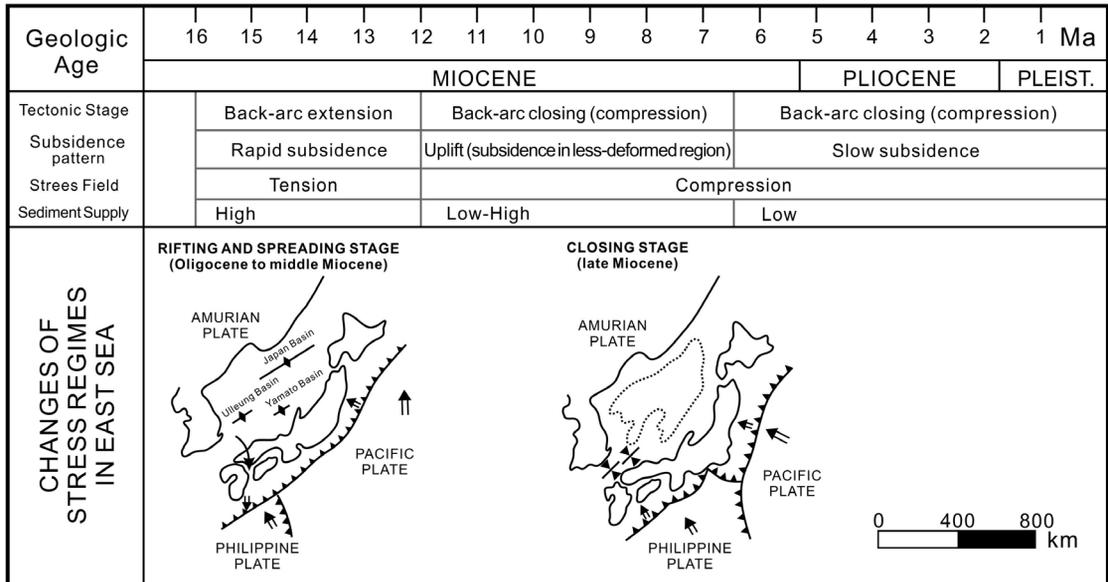


Fig. 2. Tectonic history of the East Sea. Modified from Takano (2002) and Chough et al. (1987).

는 동해 형성 초기 빠른 침강에 의해 생긴 퇴적 공간을 매우기 위해 퇴적된 퇴적물이며 총후는 8~10 km 정도이다. 플라이스토세 이후 울릉분지 전역에 광범한 퇴적작용이 일어났으며 천해성 퇴적층이 주를 이룬것(Shin, 2000)으로 추정했다.

4. 시추공의 1D 모델링

4.1 자료입력

선정된 4개 시추공의 분석자료로부터 입력에 필요한 층서, 암상, 유기물 등의 자료를 추출, 1D 모델링을 실시하였다. 돌고래 I과 돌고래 II 시추공은 구조적으로 변형이 심한 지역에 위치하고 있으며, 돌고래 I공의 총심도는 4,262 m이고 돌고래 II공은 3,230 m이다. 고래 I공과 고래 V공은 비교적 덜 융기되고 덜 변형을 받은 지역에 위치하며 총심도는 고래 I공이

4,229 m, 고래 V공이 2,637 m이다(그림 3). 모든 시추공은 전기 또는 중기 마이오세부터 플라이스토세 까지 퇴적된 사암과 셰일의 반복층으로 구성되어 있다.

지질시대는 생층서 및 퇴적환경에 대한 연구자료로부터 추출하여 입력하였다(Lee, H.Y., 1994; Yun and Yi, 2002; Lee, B.-R., 2008). 1D 모델링을 위한 각 지층의 단위명은 생층서에 의하여 구분된 지질시대명을 사용하였다(표 1). 매몰곡선을 계산하기 위해서 각 지층이 퇴적되기 시작한 시기와 퇴적이 완료되었을 때의 현재 심도를 입력하였다. 각 지층의 암상은 주상도 자료를 참고하여 사암, 실트암, 이암의 암상을 혼합한 암상을 입력하였다. 혼합된 사암, 실트암, 이암의 물성으로부터 각 지층의 물성치가 계산되도록 하였다. 암상과 심도 등을 고려하여 석유시스템 요소를 할당하였으며, 가장 심부에 위치하고 이질암 성분이 풍부한 지층을 근원암으로 할당하였다.

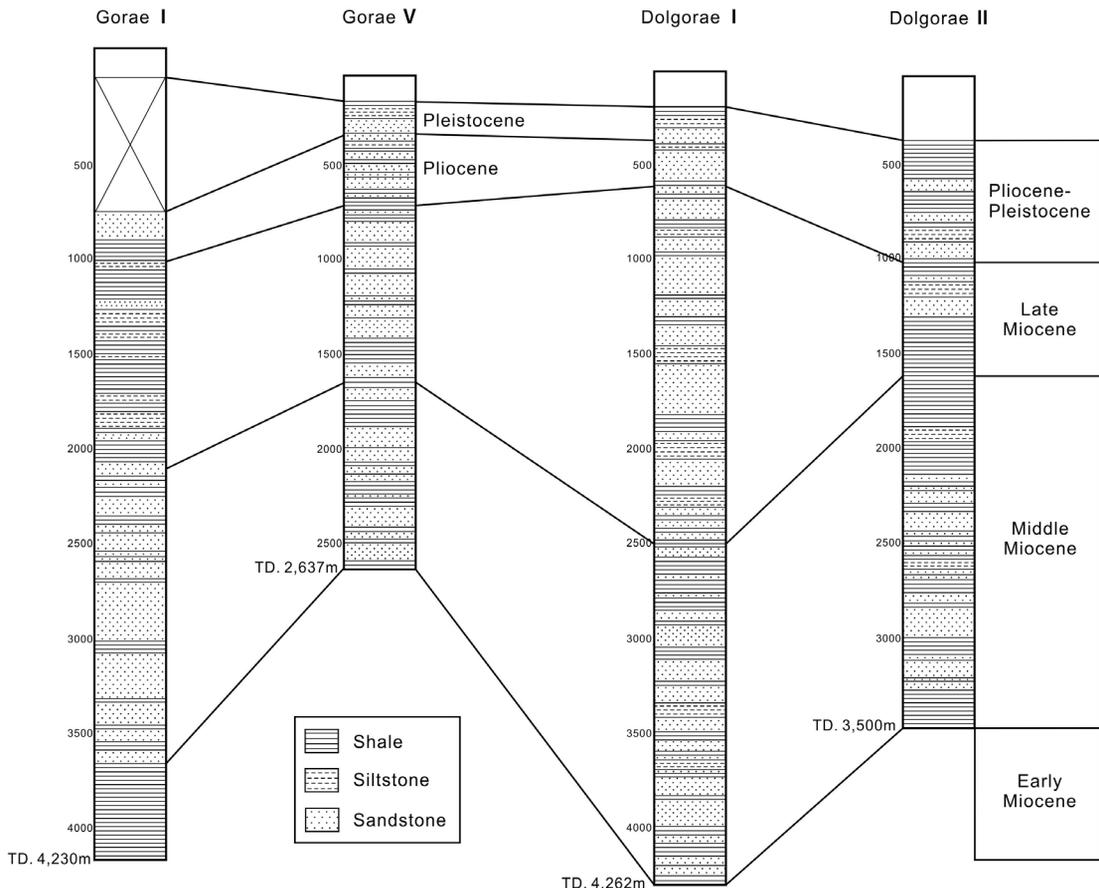


Fig. 3. Lithology and correlation of the Goraе and Dolgoraе wells.

Table 1. Input parameters for 1D modeling.

Well name	Formation unit	Begin age (Ma)	Top depth (m)	Lithology	Petroleum system elements
Gorae I	Pleistocene	0.9	0	Sh 100%	
	Late Pliocene	3.6	720	Ss 100%	
	Early Pliocene	5.3	870	Sh 100%	
	Late Miocene	10.5	1010	Sh 70%, St 25%, Ss 5%	Seal
	Middle Miocene	16.3	2130	Ss 70%, Sh 30%	Reservoir
	Early Miocene	23	3710	Sh 100%	Source
Gorae V	Pleistocene	1.6	143	Sh 70%, St 10%, Ss 20%	
	Late Pliocene	4.2	320	Ss 65%, St 5%, Sh 30%	
	Early Pliocene	5.3	500	Ss 45%, Sh 55%	Seal
	Late Miocene	10.3	700	Sh 40%, Ss 60%	Reservoir
	Middle Miocene	16.5	1650	Ss 55%, Sh 45%	Source
Dolgorae I	Pliocene-Pleistocene	1.5	221	Sh 30%, St 20%, Ss 50%	
	Erosion	2.9	-		
	Late Miocene	6	640	Sh 15%, St 5%, Ss 80%	
	Late Miocene	8	1240	Sh 20%, St 10%, Ss 70%	Reservoir & Seal
	Erosion	9	-		
	Late Miocene	13.8	1820	Sh 40%, St 15%, Ss 45%	Reservoir
	Middle Miocene	17	2500	Sh 55%, St 10%, Ss 35%	Source
Dolgorae II	Pliocene-Pleistocene	3	385	Sh 70%, St 10%, Ss 20%,	
	Erosion	3.2	-		
	Late Miocene	8	1035	Sh 65%, St 10%, Ss 25%	
	Middle Miocene	12	1630	Sh 90%, St 10%	Seal
	Middle Miocene	16	1990	Sh 70%, Ss 30%	Reservoir
	Middle Miocene	21	2335	Sh 55%, St 5%, Ss 40%	Source

* Sh: Shale, St: Siltstone, Ss: Sandstone.

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

Well name	Formation unit	Depth interval (m)	TOC (wt%)	S2 (mgHC/gRock)	HI (mgHC/gTOC)	T _{max} (°C)	R _o (%R _o)
Gorae I	Late Pliocene	720-870	0.28~0.63	0.1~0.36	27~61	422~435	-
	Early Pliocene	870-1010	0.14~0.74	0.05~0.32	20~116	400~465	-
	Late Miocene	1010-2130	0.04~1.02	0.03~1.49	30~275	404~466	0.3~0.52
	Middle Miocene	2130-3710	0.22~2.06	0.07~4.3	25~203	426~445	0.39~0.57
	Early Miocene	3710-4229	0.31~0.78	0.31~1.07	72~137	438~458	-
Gorae V	Early Pliocene	500-700	0.14~0.98	0.08~0.43	39~65	422~428	0.32
	Late Miocene	700-1650	0.37~0.89	0.15~0.80	35~100	417~436	0.31~0.43
	Middle Miocene	1650-2637	0.33~0.87	0.22~0.90	72~112	425~442	0.39~0.56
Dolgorae I	Late Miocene	2600	0.45~2.68	0.24~1.94	28.92~72.39	418~436	0.65
	Middle Miocene	3500	0.02~1.97	0.02~2.34	4.61~272.1	418~477	1.28
Dolgorae II	Pliocene-Pleistocene	385-1035	0.18~0.58	0.11~0.44	52~76	384~403	-
	Late Miocene	1035-1630	0.25~0.56	0.2~0.47	50~84	387~426	0.24~0.48
	Middle Miocene	1630-1990	0.54~0.98	0.4~0.64	56~92	421~434	0.49~0.53
	Middle Miocene	1990-2335	0.53~0.87	0.39~0.86	84~116	423~432	0.50~0.61
	Middle Miocene	2335-3230	0.46~0.89	0.34~0.54	54~140	426~443	0.37~0.75

유기물상은 록에발(Rock-Eval) 열분석 자료와 비트리나이트 반사도 자료 등의 지화학 자료로부터 추출하여 입력하였다(표 2). 근원암으로 할당된 지층의 총유기탄소함량은 고래 I공이 0.31-0.78%, 고래 V공이 0.33-0.87%, 돌고래 I공의 근원암은 0.02-1.97%, 돌고래 II공은 0.46-0.89%이다. 수소지수(HI)값은 모든 시추공에서 200보다 낮은 값으로 나타나고 있다. 모든 시추공에서 석유생성이 시작되는 열성속도를 지시하는 T_{max} 온도 435°C와 비트리나이트 반사도 0.5%Ro는 일정 심도에서 도달되고 있다. 록에발 분석의 S_2 값과 TOC 값을 도표상에 도시하여 보면(Langford and Blanc-Valleron, 1990), 케로젠 종류는 대부분 타입 III에 도시된다(그림 4). 따라서 1D모델링에서 유기물의 케로젠 타입은 타입 III를 입력하였다.

4.2 1D 모델링 결과

1D 모델링의 주 목적은 지층의 매몰사(burial history)와 지열사(thermal history)를 재현하고, 근원암으로부터 생성된 탄화수소의 양과 배출된 탄화수소의 양을 계산하는 것이다. 그림 5~8은 각 시추공

에 대한 1D 모델링 결과로서 매몰사와 지열사 곡선, 석유시스템 요소들의 발달시기, 그리고 근원암에서 생성되고 배출된 탄화수소의 누적된 양을 보여준다.

고래 I공은 용기나 침식 등의 지질 변동이 거의 없고 지속적인 매몰이 일어난다. 약 10 Ma에 매몰심도 약 3,000 m에 도달하며, 이때부터 석유와 가스가 생성되기 시작하여 현재까지 생성이 계속되고 있음을 지열사 곡선과 누적 탄화수소 생성량 그림에서 볼 수 있다(그림 5). 탄화수소의 생성시기는 덮개암 형성시기보다 늦고 완만한 배사구조의 트랩이 형성된 시기와 거의 같기 때문에 생성된 탄화수소가 근원암 으로부터 배출되었다면 트랩으로 이동하였을 것이다. 그러나 생성된 탄화수소의 누적 그래프에 의하면, 근원암에서 탄화수소가 생성되어 근원암 내에 존재하지만 근원암 밖으로의 배출(expulsion)은 일어나지 않은 것으로 모델링된다.

고래 V공도 지속적인 매몰이 일어났으며 매몰심도 약 2,200 m, 퇴적시기 약 6.5 Ma부터 근원암내에 탄화수소가 미량으로 생성되기 시작한다(그림 6). 그러나 시추심도가 2,637 m로써 매우 얕은 심도이

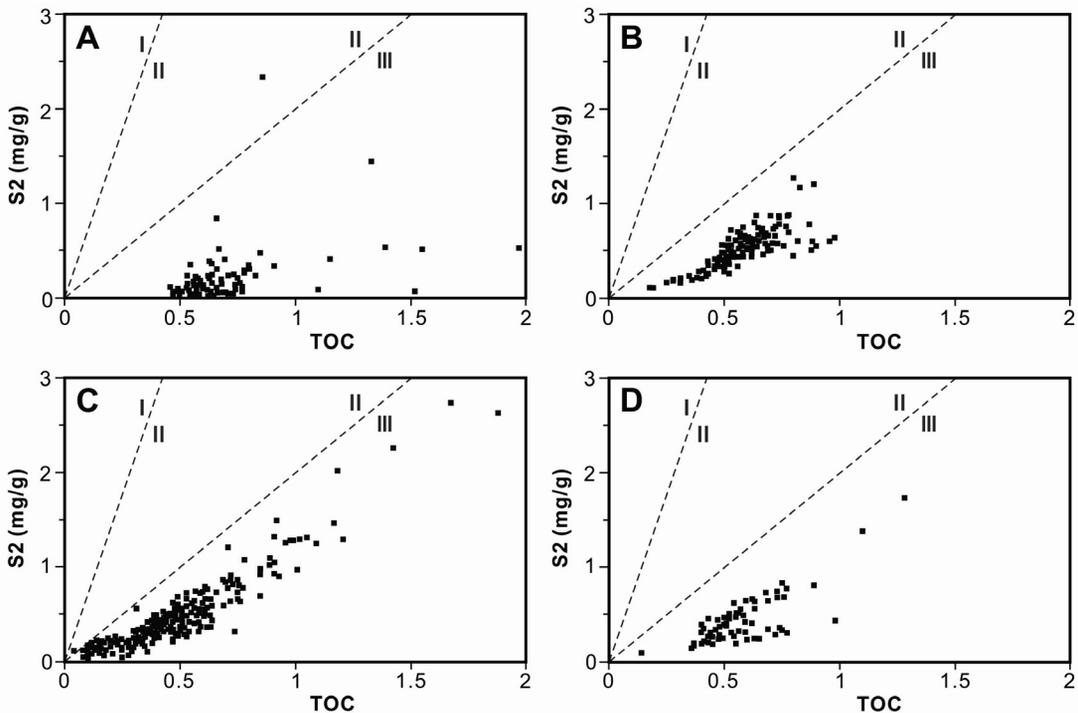


Fig. 4. S_2 vs. TOC diagram showing organic types of each well. (A) Gorae I, (B) Gorae V, (C) Dolgorae I, (D) Dolgorae II, All wells indicate type III kerogen.

기 때문에 이 심도의 근원암에서는 탄화수소의 배출 (expulsion)은 기대하기 어렵다.

돌고래 시추공 지역은 매물 초기에 고래 시추공 지역보다 수심이 깊었으며, 후기 마이오세에 일어난 용기와 침식작용에 의한 부정합이 매물사와 지열사에 반영되었다. 지층이 용기되는 시기에는 지층의 온도가

낮아짐을 지열사 모델에서 확인할 수 있다(그림 7, 8). 돌고래 I공은 약 15.5 Ma, 매물 심도 2,200 m에서부터 석유생성구간에 들어갔으며, 현재는 가스생성 단계에 까지 이르렀다(그림 7). 매물이 지속되는 초기 기간인 15 Ma에서 11 Ma 동안에 석유와 가스의 생성이 왕성하며, 용기된 이후에는 생성량이 증가하지 않았

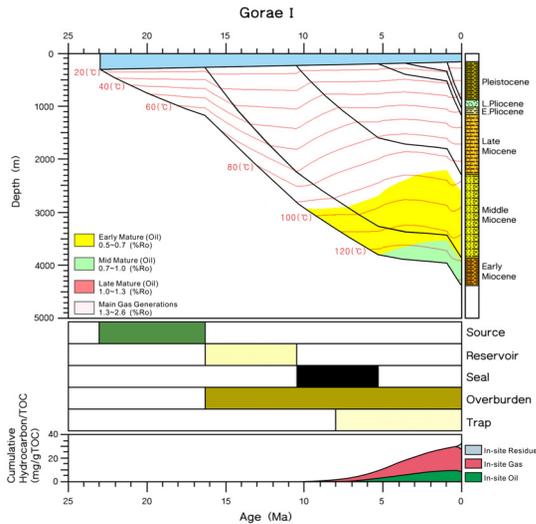


Fig. 5. 1D model of Gorae I well, including burial and thermal history, petroleum system events, and cumulative amount of hydrocarbons.

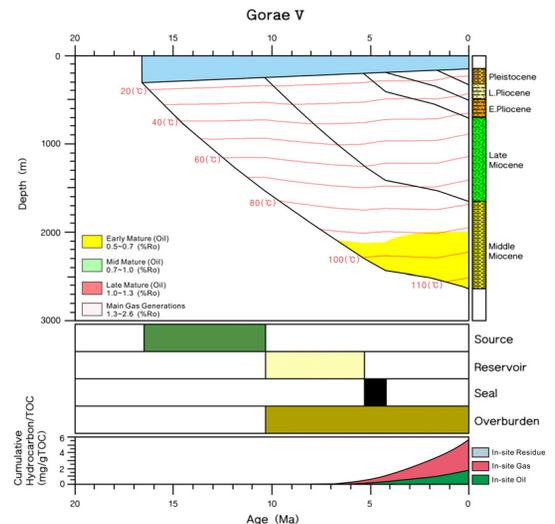


Fig. 6. 1D model of Gorae V well, including burial and thermal history, petroleum system events, and cumulative amount of hydrocarbons.

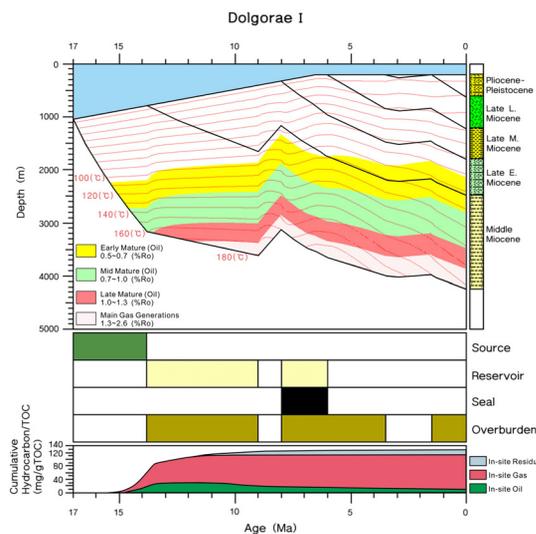


Fig. 7. 1D model of Dolgorae I well, including burial and thermal history, petroleum system events, and cumulative amount of hydrocarbons.

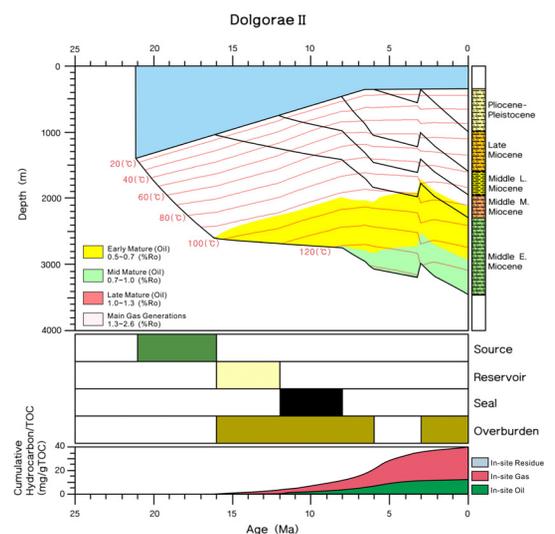


Fig. 8. 1D model of Dolgorae II well, including burial and thermal history, petroleum system events, and cumulative amount of hydrocarbons.

음을 탄화수소 생성량 누적 그림에서 볼 수 있다. 최대 매몰이후 용기가 일어났기 때문에, 근원암 내에 생성된 탄화수소는 근원암에서 저류층으로 배출되지 않았다.

돌고래 II공의 시추심도는 돌고래 I공의 심도에 비하여 총 시추심도가 낮다. 따라서 가스생성단계에는 도달하지 못하였다(그림 8). 약 16 Ma에 2,800 m의 매몰 심도에서 석유를 생성할 수 있는 단계에 들어가게 된다. 탄화수소는 약 13 Ma부터 활발하게 생성되기 시작하여 6.5 Ma에 급속도로 생성량이 증가하였지만 곧 줄어들어 현재까지 생성 중에 있다. 그러나 이 시추공에서도 근원암에서의 탄화수소 배출은 모델링되지 않는다.

연구지역의 모든 시추공에서 석유시스템의 필수 요소인 근원암, 저류암, 덮개암, 그리고 그 위에 온도와 압력을 증가시키기 위한 두꺼운 피복하중암을 모두 갖추고 있다. 또한 모든 시추공에서 10 Ma에서 15 Ma 사이에 탄화수소가 생성되기 시작하였으며 배사구조 트랩의 형성 시기는 고래 I공에서 약 8 Ma, 고래 V공에서 5 Ma, 돌고래 I공과 돌고래 II공에서 약 9~8 Ma로 나타난다. 그러나 전 지질시대를 통해 근원암 내에 탄화수소는 생성되었으나 근원암으로부터 탄화수소의 배출(expulsion)은 전혀 일어나지 않고 있다. 따라서 연구지역의 시추공 내 저류암층에서 확인되는 가스와 동해 가스전의 가스는 시추공 총 심도보다도 하부에 존재하는 근원암에서 기원하여 이동되어 왔을 것으로 예상할 수 있다.

4.3 유효 근원암의 심도

이상의 고래 I, 고래 V, 돌고래 I, 돌고래 II 시추공의 1D 모델링 결과를 종합해 보면, 모든 시추공에서 시추심도 내의 이질 근원암에서 탄화수소가 생성은 되었으나, 이 근원암으로부터 배출되어 나가지는 않았다. 이 지역에서 실시된 시추 결과에 의하면, 돌고래 I공에서는 가스 징후(gas show)가 나타났고, 돌고래 II공에서는 가스가 발견되었으며, 고래 I, 고래 V 시추공에서는 가스 및 컨텐세이트가 발견되었다(Cheong *et al.*, 2004; Lee, Y.J. *et al.*, 2005). 이것은 발견되는 가스나 컨텐세이트는 시추공 내 근원암에 존재하고 있는 유기물로부터 생성되어 나온 것이 아니라라는 것을 시사하며, 이들 가스와 콘텐세이트는 현재 시추된 심도보다 더욱 깊은 곳에 존재하는 근원암 지층에서 생성되어 이동하여 올라왔을 것으로 생각된다.

Lee, B.-R. (2008)는 고래 I, 돌고래 III-1, 돌고래 V-1, 돌고래 VII 시추공에 대한 1D 모델링을 실시하여, 시추공 심도 내의 근원암에서는 탄화수소가 생성은 되었으나 배출은 이루어지지 않았고, 시추심도 내에서 발견된 가스의 근원암은 현재 시추심도 보다 깊은 곳에 존재할 것이라 하였다. 이는 이번 연구에서의 1D 모델링 결과로도 확인된다. 또한 Lee, B.-R. (2008)는 고래 I공에서 채취한 가스의 탄소동위원소 분석 계산값을 비트리나이트 반사도 모델에 대입하여 근원암의 심도를 역으로 추정하여 근원암의 심도가 약 5,000 m일 것이라 하였다(그림 9). 따라서 연구지역의 시추공 내에서 발견되는 가스 및 컨텐세이트를 생성한 근원암층은 시추공 총 심도보다 깊은 약 5,000 m 정도에 존재할 것으로 생각된다.

또한, Son *et al.* (2010)는 동해 가스전으로부터 컨텐

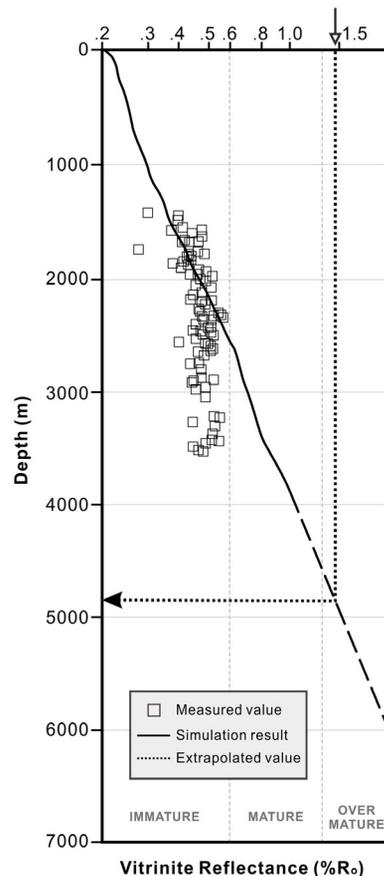


Fig. 9. Possible depth for effective source rock predicted from maturity model and carbon isotope data (Modified from Lee, B.-R. 2008).

Table 3. Key input parameters for 2D modeling.

Formation unit	Begin Age (Ma)	Chrono-stratigraphy	Lithology (%)	Petroleum system event
Floor	0			
M	2.58	Pleistocene	Ss 90%, Sh 10%	
L	4.56	Pliocene	Ss 90%, Sh 10%	
K	6.3		Ss 80%, Sh 20%	
J	8.2	Upper Miocene	Ss 90%, Sh 10%	
I	10.5		Ss 90%, Sh 10%	
H	12.5		Ss 80%, Sh 20%	
G	13.8		Sh 100%	Seal
F	15.5	Middle Miocene	Ss 90%, Sh 10%	Reservoir
E	16.5		Ss 80%, Sh 20%	Reservoir
D	17.5		Ss 90%, Sh 10%	
C			Ss 5%, Sh 95%	Source

* Sh: Shale, Ss: Sandstone.

세이트 시료를 채취하여 다이아몬드이드(diamondoid) 화합물을 분석 하였으며 이를 통하여 동해가스전 지역에서 발견되는 가스화합물인 컨테사이트를 생성시킨 근원암층을 추정할 수 있다. 다이아몬드이드(diamondoid)는 컨테사이트 내에 존재하는 다이아몬드와 비슷한 구조를 가진 유기화합물이다(Chen *et al.*, 1996; Dahl *et al.*, 1999). 스테란이나 호판보다 높은 온도에서도 사라지지 않기 때문에 근원암을 추정할 수 있는 생물지표(biomarker) 연구의 대상으로 이용되고 있다. 다이아몬드이드(diamondoid)분석 결과는 동해 가스 컨테사이트를 생성한 근원암이 해양환경이나 호성환경에서 퇴적되었음을 지시한다. 이는 동해 가스전에 존재하는 가스를 생성한 근원암은 분지 형성 초기의 호성이나 해성 환경에서 퇴적된 유기물 기원의 케로젠 타입 II일 가능성을 시사한다.

5. 2D 모델링

5.1 자료 입력

2D 모델링에서는 2차원 단면상에서 퇴적물의 매물 과정과 탄화수소의 생성, 탄화수소의 이동방향과 경로, 탄화수소가 집적된 위치 등을 모델링한다(Waples, 1994). 2D 모델링을 위한 탄성과 단면은 연구지역을 남서-북동 방향으로 가로지르는 축선 Line 1과 이를 수직으로 교차하는 축선 Line 2를 선택하였다(그림 1). Line 1은 연구지역을 크게 북동-남서 방향으로

통과하고 있으며, 비교적 구조운동의 영향이 적은 비변형대 지역과 변형이 심한 지역의 경계를 따라 가깝게 가로지르고 있다. 특히, Line 1 주위에는 동해 가스전과 고래 I, 고래 V, 돌고래 I, 돌고래 II 시추공이 가깝게 위치하고 있다. Line 2는 북북서-남남동 방향으로 약한 변형대와 심하게 변형된 지역을 가로지르며 위치한다.

연구지역은 많은 연구자들에 의하여 탄성과 층서가 연구되었으나, 이 연구에서는 Lee, G.H. *et al.* (2004)의 탄성과 해석에서 제시된 12개 층서 경계를 2D 모델링을 위한 기초자료로 사용하였다(그림 10A, 11A). 하지만 지층의 경계에 대한 탄성과 단면도의 심도는 왕복주시(two-way travel time)로 나타나므로 시추공 자료를 참고하여 층서경계를 실제 심도로 바꾸고 각 지층에 대한 퇴적시기를 할당하였다. 각 층준의 퇴적시기는 Lee, G.H. *et al.* (2004)의 탄성과 해석과 Lee, H.Y. (1994)의 고생물에 의한 층서구분을 참고하여 지정하고 시간층서 단면에 입력하였다(그림 10B, 10C, 11B, 11C). 각 지층경계 사이의 구간을 2D 입력을 위한 층서단위로 설정하였다. 즉, 단면상에서 총 12개의 층서단위를 나누어 설정하고 정의하였으며 각각의 층서단위에 대한 지질연대를 입력하였다. 또한 계산을 위하여 2D 단면의 수평 그리드를 50개의 포인트로 나누었다.

암상 입력을 위해서 시추공 자료와 퇴적환경 해석 자료를 참고하였다(Lee, H.Y., 1994; Shin, 2000; Cheong,

2004). 2D 모델에서는 정확한 암상을 입력하기가 어려우나 이 지역은 사암과 이질암이 주 성분이므로 사암과 이질암의 혼합비율로서 암상을 입력하였다(표 3). 석유시스템 소프트웨어는 입력된 혼합비율에 따라 각각의 지층에 대한 암석물성을 계산한다(Welte *et al.*, 1996; Hantschel and Kauerauf, 2009).

앞서 4개 시추공에 대해 실시한 1D 결과에 의하면 시추공 내 근원암에서는 석유와 가스가 생성은 되었으나 근원암에서 배출이 일어날 정도로 많은 양의 탄화수소는 생성되지는 않았다. 일부 시추공 내의 사암 저류층에서 발견되고 있는 천연가스와 컨덴세이트의 유효근원암은 시추공 심도 보다 깊은 곳에 존재할 것이라 판단되므로 탄화수소를 생성한 유효근원암은 5,000 m 보다 하부의 심도에 설정할 수 있다. 따라서 2D 입력 단면에서 약 5,000 m 심도에 존재하는 초기 이질암층인 C층을 유효근원암으로 입력하였다. 또한, 근원암의 상위 지층이며 후기 마이오세 이전에 쌓인 두꺼운 사암층들을 저류층으로 입력하였다. 이들 저류 사암층의 상위에 존재하며 후기 마이오세에 쌓인 이질암층인 G층을 광역적인 덮개암으로 입력하였다.

시추공의 이질암 지층 내 케로젠은 대부분 타입 III이다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 동해가

스전의 콘텐세이트 내에 존재하는 다이아몬드이드(diamondoid) 화합물 분석결과는 동해가스전 지역에서 발견되는 가스와 컨덴세이트를 생성시킨 근원암층은 해성 또는 호성환경 조건에서 퇴적되었음을 지시한다(Son *et al.*, 2010). 이는 이 지역에서 가스와 컨덴세이트를 생성시킨 근원암의 케로젠은 타입 II임을 의미한다. 따라서 케로젠으로부터의 석유생성을 계산하기 위한 키네틱 변수(kinetic parameter)로서 케로젠 타입 II의 변수를 입력하였다.

5.2 2차원 모델링 결과

5.2.1 축선 1

탄성파 축선 1은 고래 I, 고래 V, 돌고래 I, 돌고래 II 시추공 부근을 통과하며 총 길이는 약 100 km로 연구 지역을 남서-북동방향으로 가로지른다(그림 1). 단면의 남서쪽 지역은 상대적으로 구조적 변형이 심하지 않으며 심부의 초기 지층이 매우 두껍게 퇴적되어 있다(그림 10). 이것은 초기 마이오세(20 Ma)부터 중기 마이오세 초기(15.5 Ma)에는 빠른 열개 작용으로 인해 침강율이 컸으며 많은 퇴적물이 공급되었음을 지시한다. 조구조적으로 중기 마이오세 후기(12.5 Ma)부터 후기 마이오세 후기(6.3 Ma)까지는 열개를 멈추고 판구조

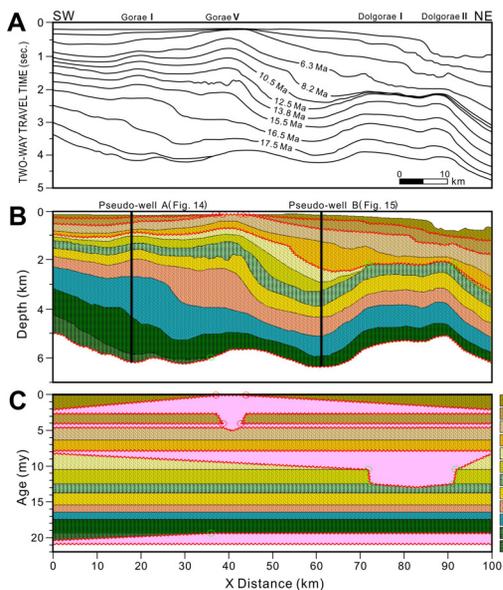


Fig. 10. (A) Seismic interpretation of Line 1 (Lee, G.H. *et al.*, 2004), (B) depth and (C) age space inputs for 2D modeling.

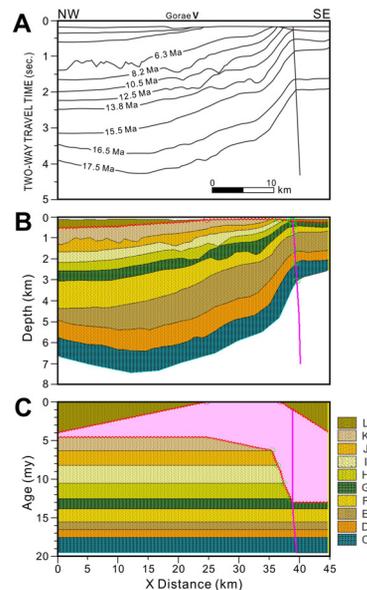


Fig. 11. (A) Seismic interpretation of Line 2 (Lee, G.H. *et al.*, 2004), (B) depth and (C) age space inputs for 2D modeling.

운동 변화에 따른 압축력의 영향을 받아 많은 지질구조가 형성되는 단계이며, 이것은 축선단면의 북동지역에서 잘 나타나고 있다. 단면도에서 보는 바와 같이 북동쪽 즉, 돌고래 시추공들이 존재하는 지역은 상대적으로 구조적 변형이 심하며, 용기되고 삭박된 부정합면이 잘 나타나고 있다. 후기 마이오세 후기(6.3 Ma)부터는 일부 압축력의 영향은 받지만 상대적으로 안정된 침강 및 퇴적이 일어나는 시기이며, 이는 단면도의 상부지층 퇴적양상에서 잘 나타나고 있다(그림 10).

2D 모델링의 탄화수소 포화도 결과로부터 탄화수소의 생성, 이동, 집적이 가시화되었다. 먼저 석유의 포화도(oil saturation)에 대한 모델링 결과에서는 17 Ma부터 매몰심도가 깊은 남서부 지역의 근원암에서 석유가 생성되기 시작한다. 이후 근원암 내

전 지역에서 생성된 석유는 약 12 Ma부터 배출을 시작하며 상위의 사암층으로 이동한다. 그러나 이때는 광역적인 덮개암층이 형성되지 않았기 때문에 대부분 상부로 이동하여 사라져 버린다. 용기와 재침강이 일어나고 광역적 덮개암층이 형성됨에 따라 뒤늦게 배출된 석유가 북동지역의 변형이 심한 곳 심부에 상당량이 집적된 것으로 모델링 된다. 가스 포화도(gas saturation) 모델링에서도 약 17.5 Ma부터 침강률과 퇴적률이 높고 매몰심도가 깊었던 남동부 지역에서부터 가스가 생성되기 시작한다(그림 12). 생성된 가스는 15 Ma부터 근원암에서 배출되기 시작하여 상위의 사암층으로 이동하였고, 중기 마이오세 말기인 12.5 Ma에 전 지층에 걸쳐서 최대의 가스 배출과 이동이 나타난다(그림 12G). 그러나 이때까

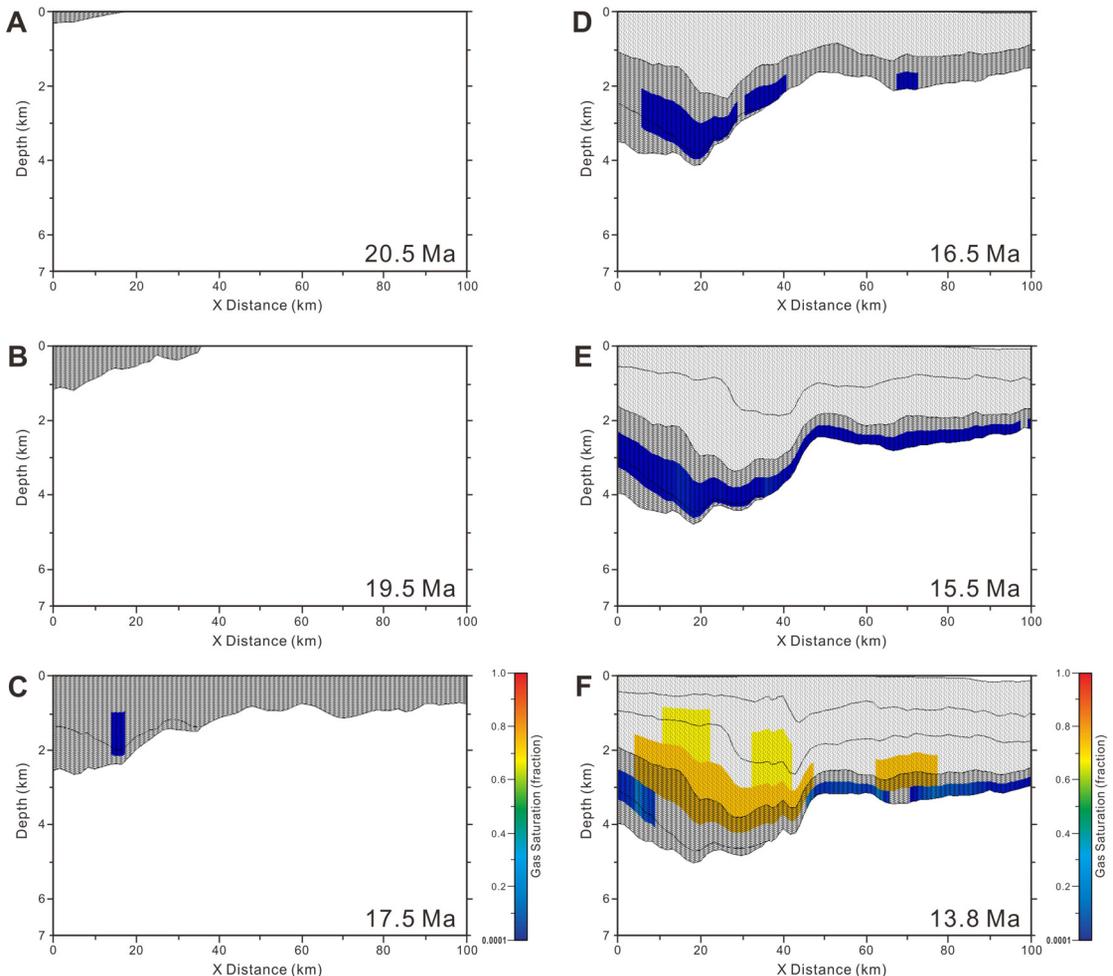


Fig. 12. 2D models of Line 1 showing gas saturation through time.

지 광역적인 덮개암층이 형성되지 않았기 때문에 근원암에서 배출되어 이동된 가스는 상부로 방출되어 버린다. 중기 마이오세 말(12 Ma) 이후 횡압력에 의한 용기와 배사구조가 형성되며, 이후 퇴적된 지층이 광역적인 덮개암층을 형성한다. 단면의 북동쪽에서 매몰이 계속됨에 따라 새로운 최대 매몰지역 (pod)이 형성되고 이 최대 매몰지역의 근원암에서는 지속적으로 가스가 생성, 배출되어 배출된 가스는 상위의 사암층으로 이동하여 지층의 경사방향 (updip)을 따라 이동하여 주로 남동 방향으로 대규모로 이동해 올라간다(그림 12 J, K, L). 지층경사를 따라 이동해 올라간 가스는 덮개암에 막혀 배사구조 내의 현재 위치에 집적된 것으로 나타난다.

2D 모델링 결과로부터, 과거부터 현재까지의 탄화

수소 포화도 양상을 보면, 석유보다는 가스의 생성, 이동, 집적이 우세하게 나타나며, 대부분의 가스는 단면의 남서지역 즉, 고래 시추공들이 존재하는 지역에 많은 양이 집적되고 있다. 이에 반해, 석유는 단면의 북동쪽 지역 즉, 구조적 변형이 심한 돌고래 지역의 심부에 집적되어 있는 것으로 나타난다. 또한 대부분의 석유는 근원암층으로부터 배출되어 이동되었으나 가스는 아직도 근원암층인 C층에 일부 잔존하는 것으로 모델링된다(그림 12). 이것은 근원암층이 셰일 가스층으로 존재하고 있을 가능성을 시사해 준다.

5.2.2 측선 2

탄성과 단면 2는 연구지역을 북북서-남남동방향으로 자르며 측선 1 과는 고래 V 구조 근처에서 수직

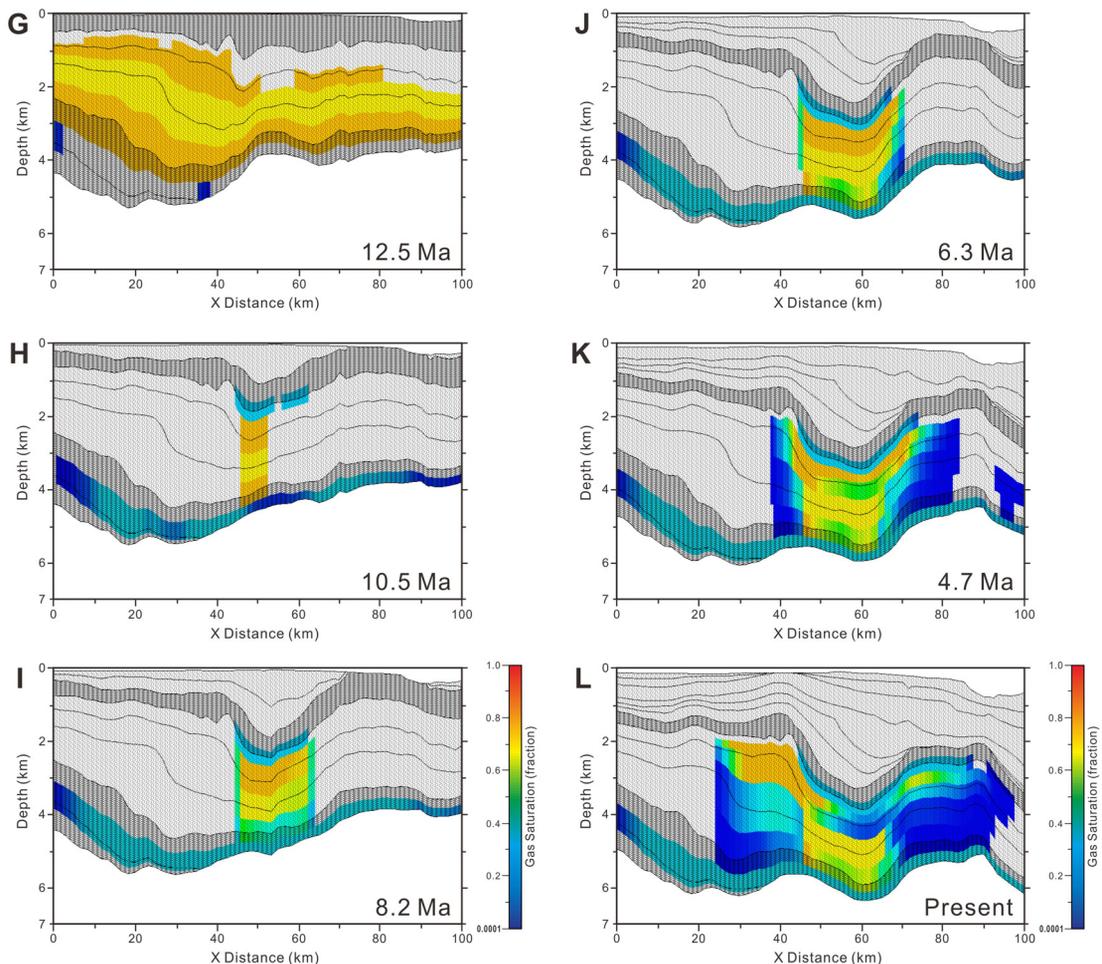


Fig. 12. Continued.

으로 교차한다(그림 1). 단면도의 길이는 약 50 km이며, 측선 1 단면도의 결과와 수직 방향에서의 탄화수소 생성, 이동을 비교, 보완하기 위하여 모델링하였다. 이 단면이 통과하는 지역은 분지 형성 초기에는 퇴적물이 평탄하게 퇴적되지만 횡압력을 받는 시기인 후기 마이오세 말부터는 단면도 남동부 지역에서 심한 융기가 일어나고 있음을 보여준다(그림 11).

측선 1에서와 같이 측선 2에서도 탄화수소의 생성은 17.5 Ma에 매몰 심도가 가장 깊은 곳에서부터 일어난다. 광역적 덮개암층이 형성되기 이전에 생성되어 상위지층으로 이동된 탄화수소 가스는 상부로 유실되지만, 12 Ma 이후 높은 침강률에 의해 지속적으로 생성된 많은 양의 가스는 상위 지층으로 수직

이동한 뒤 다시 지층경사(updip) 방향을 따라 이동하여 현재 고래 V 구조가 존재하는 근처에 집적되는 것으로 모델링된다(그림 13). 이는 측선 1에서 모델링된 퇴적물의 매몰과정, 가스의 움직임은 방향과 경로, 집적 위치 등과도 잘 일치하고 있다. 두 모델링 결과는 모두 고래 구조에 가스가 대량으로 집적되는 것을 잘 보여주고 있다.

6. 토 의

6.1 탄화수소의 생성 및 배출

2D모델링 결과에 의하면 이 지역의 탄화수소(특히, 가스)의 집적은 근원암에서 탄화수소가 생성되

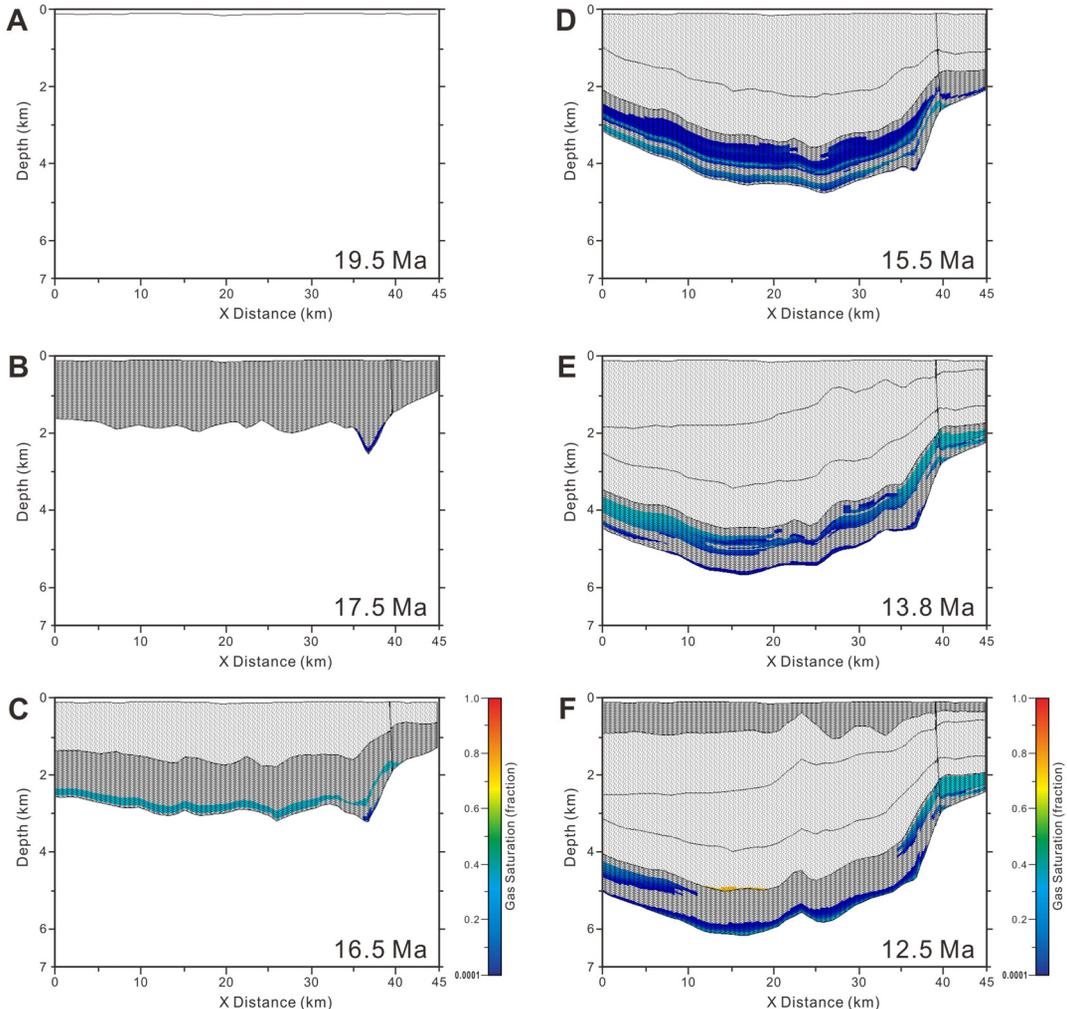


Fig. 13. 2D models of Line 2 showing gas saturation through time.

고 배출되는 시기와 광역적인 덮개암층의 형성시기에 의해 크게 좌우되었다. 즉, 17~18 Ma를 전후하여 침강과 매몰속도가 빨랐던 남서지역의 최대 매몰지역을 중심으로 대량의 탄화수소가 생성되고 배출이 일어났으나 광역적인 부정합과 덮개암의 부재로 집적되지 못하였으며, 뒤늦게 최대매몰에 도달하는 북동지역의 근원암에서부터 이동되어 온 탄화수소가 남서 지역으로 지층경사를 따라 이동하여 대규모 집적되는 형태로 모델링된다.

탄화수소의 집적에 중요한 영향을 미치는 생성과 이동의 시기를 명확하게 하기 위하여, 2D 모델링에서 탄화수소가 생성되기 시작하는 두 최대 매몰지역

(pod area)에 가상 시추공을 설정하여 1D 모델링을 수행하였다(그림 10B). 구조적 변형이 적으며 고래 구조가 위치하고 있는 단면의 남서지역에 설정한 가상시추공 A에 대한 1D 모델링의 매몰사 및 지열사 곡선을 보면, 퇴적작용에 의해 17.5 Ma 부터 약 2,000 m 심도 부근에서 석유생성구간에 진입했으며, 매몰, 속성작용이 최대 기울기를 보이며 빠르게 퇴적층이 형성될 때 근원암층의 가스 생성이 최고에 도달하였다(그림 14). 즉, 초기 마이오세 후기(17 Ma)부터 급격히 매몰됨에 따라 16.5 Ma에 본격적인 가스 생성이 시작되고, 15.5 Ma에 최대 가스 생성이 일어난다. 1차 생성된 가스는 13.8~12.5 Ma에 걸쳐 최대 배출

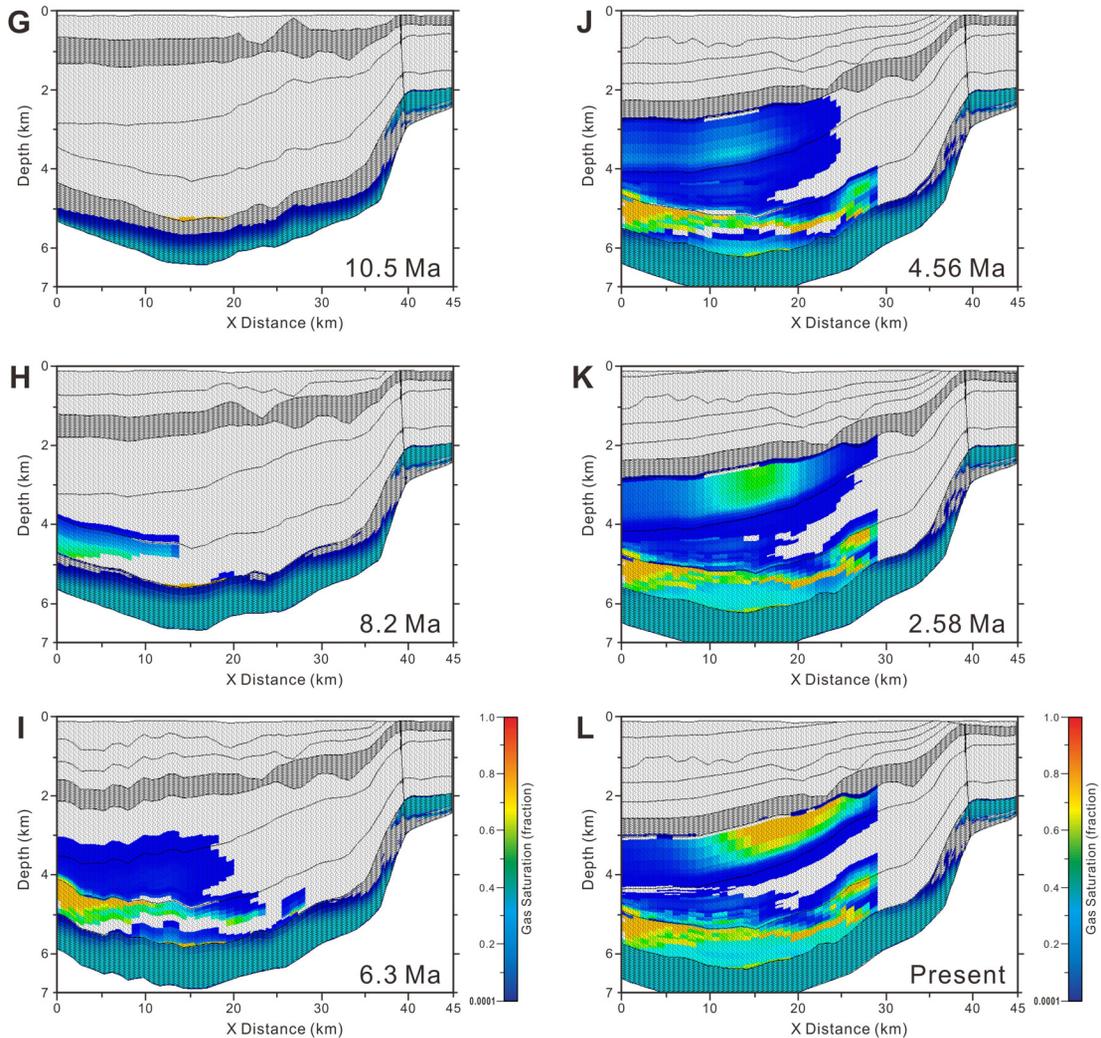


Fig. 13. Continued.

이 일어난다(그림 12 F, G). 이후 완만한 매몰 곡선을 그리면서 성숙도 곡선은 서서히 상승해서 낮은 심도로 이동하였다. 이때 근원암층의 하부는 유기물이 가스 생성이 가능한 성숙도를 지시하는 주 가스생성 구간에 이르렀으며 10 Ma에 2차적으로 가스 생성이 증가한다. 이는 2D 모델링에서 최대 생성된 가스가 배출되어 이동해 올라간 이후에도 근원암에서 지속적으로 근원암층의 하부에서 가스가 생성되어 이동하는 것과 일치한다. 또한, 1D 모델의 가스 생성율(gas generation rate)을 보여주는 그림에서 총 2번에 걸친 가스 생성 피크가 나타나는 것도 이를 잘 지시해 준다(그림 14). 이와 같이 먼저 매몰작용이 시작된 가상시추공 A 지역은 약 10 Ma에 근원암 하부에서 2차 가스 생성이 일어나지만 그 양은 매우 적다.

돌고래 구조 지역에 설정한 가상시추공 B는 가상시추공 A에 비해서 최대 매몰시기가 늦고, 16.5 Ma에 이르러서야 석유생성구간에 들어간다(그림 15). 가스 생성율(gas generation rate) 결과를 보면 약 15 Ma에서부터 가스 생성이 시작되고 약 11.5 Ma에 최대 생성을 보인 후 후기 플라이오세(2.5 Ma)까지 가스가 생성되었음을 알 수 있다. 이와 같은 지속적인 가스 생성은 가스의 배출과 이동이 계속될 수 있

록 하였으며 현재의 지층 내 가스포화도에 기여했을 것으로 보인다. 유기물의 성숙도를 지시하는 지열사 곡선을 보면 성숙도 곡선이 매몰 곡선을 따라 분포하지 않고, 시추공 내에서의 불규칙한 상승과 하강을 보여준다. 이는 마이오세 말기(12 Ma) 이후 이 지역에 작용한 횡압력의 영향으로, 기반의 상하운동에 따라 열적변화가 심하게 발생했음을 지시하여 준다.

이상의 가상시추공에 대한 1D 모델링 결과는, 2D 모델링에서 나타나는 형태 즉, 남동부 고래 구조 지역은 높은 퇴적률에 의해 먼저 매몰되어 가스 생성이 일어난 후 모두 배출되고, 그 후에 북동쪽 지역의 돌고래 구조 쪽에서 생성된 가스가 배출되어 고래 구조 쪽으로 이동되어 집적에 이르게 되는 결과와 잘 일치하고 있다.

한편, 생성된 대부분의 석유는 근원암층에서 대부분 배출되었으나 일부 가스는 아직 근원암층에 남아있는 것으로 모델링된다(그림 12). 1D 모델링 결과로부터 생성된 총가스의 10~15%의 가스가 아직 근원암 내에 잔류하여 있는 것으로 계산되는데, 이것은 최근에 북미지역에서 각광을 받고 있는 셰일가스 유형이 이 지역에도 존재하고 있음을 보여주고 있다고 할 수 있다(Pollastro, 2007).

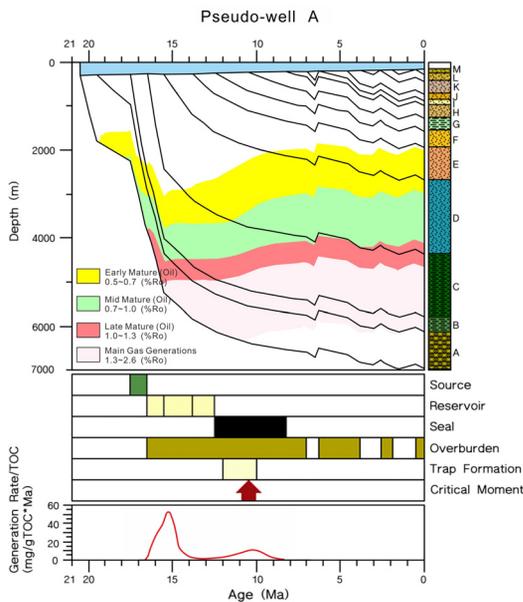


Fig. 14. 1D model of Pseudo-well A, including burial and thermal history, petroleum system events, and gas generation rate.

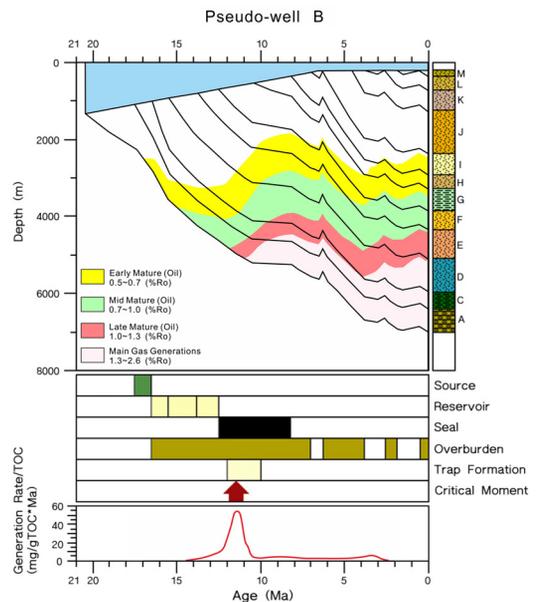


Fig. 15. 1D model of Pseudo-well B, including burial and thermal history, petroleum system events, and gas generation rate.

6.2 탄화수소의 이동 및 집적

2D 모델에서는 석유와 가스의 생성뿐만 아니라 이동되고 집적되는 과정을 과거부터 현재까지의 진시물레이션으로 재구성한다(Waples, 1994; Lutz *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2005). 탄화수소의 이동모델은 부력과 모세관압의 개념과 상대투과율 개념을 다상 유체에 적용한 Darcy의 법칙을 사용한 방정식으로부터 계산된다(Welte *et al.*, 1996; Hantschel and Kauerauf, 2009). 빠른 속도로 매몰된 근원암으로부터 배출된 탄화수소는 상위의 다공질이며 투수성이 좋은 사질암층으로 이동하여 부력에 의하여 수직 이동한다(그림 12, 13). 최대의 배출이 일어나는 시기인 13.8~12.5 Ma의 사질암층은 현재보다도 투수성이 훨씬 좋았기 때문에 수직이동이 용이했을 것으로 생각된다. 또한 이 시기에는 모세관압이 커서 부력을 저하시킬 수 있는 양호한 덮개암이 발달되지 않았기 때문에 탄화수소는 저류되지 못하고 쉽게 유실되었을 것이다. 특히, 남동쪽 고래 지역에서 가스유출이 심하게 일어나는 것을 볼 수 있다.

용기가 일어나고 10 Ma 이후에 재침강이 일어나면서 새롭게 형성 배출되어 나온 탄화수소, 특히 가스는 부력에 의하여 사질암층을 따라 수직 이동하다가 광역적으로 형성된 덮개암층에 막히게 되고 경사 방향을 따라 이동하여 남동쪽 고래 지역의 배사구조에 대규모로 집적되게 된다. 이 때는 이미 모세관압이 큰 이질 덮개암층이 형성되어 있었기 때문에 유실은 일어나지 않으며, 횡압력에 의하여 용기가 일어나면서 탄화수소를 집적시킬 수 있는 배사구조를 형성하였다.

이 지역의 탄화수소 집적은 탄화수소의 이동시기와 횡압력에 의해 형성된 배사구조 형성시기, 그리고 덮개암의 형성시기에 의해 크게 좌우되고 있는 것으로 나타난다.

7. 결론

동해 울릉분지 남서연변부 대륙붕지역의 탄화수소의 생성, 이동, 집적 형태를 알아보기 위하여 실시한 석유시스템 모델링으로부터 몇 가지 결론이 도출될 수 있다.

첫째, 이 지역의 천연가스를 생성한 근원암층은 현재 시추된 시추심도 보다 깊은 약 5,000 m 이심의

심도에 존재하며, 케로젠의 타입은 타입 II일 가능성이 높다는 기존의 연구와 잘 일치한다.

둘째, 이 지역의 탄화수소 집적은 탄화수소의 이동시기, 배사구조 형성시기, 광역적 덮개암의 형성시기가 매우 중요하게 작용하였다. 그 중에서도 덮개암의 역할이 매우 큰 것으로 모델링된다. 즉, 광역적 덮개암의 형성 이전에 많은 양의 탄화수소가 유실되었으며, 현재의 집적은 덮개암층이 퇴적된 이후에 집적된 것으로 해석된다.

셋째, 전체적으로 볼 때 이지역의 탄화수소는 타입 II의 케로젠으로부터 생성되었음에도 불구하고 가스집적이 우세한 것으로 모델링된다. 석유는 북동부의 돌고래 구조가 존재하는 지역의 심부에 소량으로 집적되어 있으며, 가스는 남서부의 고래 구조 지역에 주로 집적된 것으로 추정된다.

이상의 석유시스템 모델링 해석 결과로부터, 동해 울릉분지 남서연변부 지역의 탄화수소 생성 및 이동에 대한 모델을 제시하였으며, 제시된 모델 결과는 추후에 추가되는 탐사 결과로부터 지화학, 암상, 탄성과 해석에 대한 더 많은 정보를 얻게되어 더욱 정밀한 석유시스템 모델링 실시한다면 유용한 비교 자료가 될 것이다. 또한 이와 같은 모델링 자료는 향후 연구지역의 실제 석유시스템을 밝히는데 중요한 자료로 쓰일 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “국내·외 석유평적분지 분석 및 정보화(과제번호 : 13-1133)” 연구사업의 지원으로 수행되었다. 원고는 정대교 교수와 익명의 심사자의 유익한 조언과 세심한 검토에 의해 개선되었다. 두 분의 심사자에게 감사드린다.

REFERENCES

- Chen, J., Fu, J., Sheng, G., Liu, D. and Zhang, J., 1996, Diamondoid hydrocarbon ratios: novel maturity indices for highly mature crude oils. *Organic Geochemistry*, 25, 179-190.
- Cheong, T.-J., Lee, Y.J., Ryu, B.-J., Oh, J.-H., Kim, J.-H., Yi, S. and Park, S.-J., 2004, Characteristics on thermal maturity of organic matter, Block VI-1 in the Ullung

- Basin. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 10, 1-9 (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.
- Dahl, J.E., Moldowan, J.M., Peters, K.E., Claypool, G.E., Rooney, M.A., Michael, G.E., Mello, M.R. and Kohlen, M.L., 1999, Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking. *Nature*, 399, 54-57.
- Deming, D., 1994, Overburden rock, temperature, and heat flow. In: Magoon, L.B. and Dow, W.G. (eds.) *The petroleum system - from source to traps*, The American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, 165-186.
- Espitalié, J., Deroo, G. and Marquis, F., 1985, La pyrolyse Rock Eval et ses applications. *Revue de l'Institute Français du Pétrole*, 40, 563-784.
- Ghori, K.A.R., Mory, A.J. and Lasky, R.P., 2005, Modeling petroleum generation in the Paleozoic of the Carnarvon Basin, Western Australia: Implications for prospectivity. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 89, 27-40.
- Hantschel, T. and Kauerauf, A.I., 2009, *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Springer, 476p.
- Hay, S.J., Park, P.J. and Seim, K., 2000, Data calibrated migration modeling in the assessment of Brent Group prospectivity: a case study from the Veslefrikk area of the Norwegian North Viking Graben. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 821-839.
- Higley, D.K., Lewan, M.D., Roberts, L.N.R. and Henry, M., 2009, Timing and petroleum sources for Lower Cretaceous Mannville Group oil sands of northern Alberta based on 4-D modeling. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 93, 203-230.
- Hu, L., Fuhrmann, A., Poelchau, H.S., Horsfield, B., Zhang, Z., Wu, T., Chen, Y. and Li, J., 2005, Numerical simulation of petroleum generation and migration in the Qingshui sag, western depression of Liaohe basin, northeast China. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 98, 1629-1649.
- 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. Master thesis, University of Science and Technology, Daejeon, 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. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 477-499 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., Kim, B., Chang, S. and Kim, H.J., 2004, Timing for trap formation in the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications for hydrocarbon accumulations. *Geoscience Journal*, 8, 369-380.
- Lee, G.H., Yoon, Y., Man, B.H., Lim, H., Kim, Y.S., Kim, H.J. and Lee, K., 2011, Structural evolution of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and tectonic implications. *Tectonophysics*, 502, 293-307.
- Lee, H.Y., 1994, Neogene foraminiferal biostratigraphy of the southern margin of the Ulleung Basin, East Sea, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, 377 p (in Korean).
- Lee, Y.J., Cheong, T.-J., Oh, J.-O., Park, S.-J. and Lee, S., 2005, Geochemical characteristics of the hydrocarbons from the Block 6-1, Ulleung Basin. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 11, 1-8 (in Korean with English abstract).
- Ligtenberg, H. and Neves, F., 2008, Integrating disciplines for petroleum system analysis - from seismic interpretation to stratigraphic and basin modelling. *Petroleum Geoscience*, 14, 219-221.
- Lutz, R., Littke, R., Gerling, P. and Bönnemann, C., 2004, 2D numerical modelling of hydrocarbon generation in subducted sediments at the active continental margin of Costa Rica. *Marine and Petroleum Geology*, 21, 753-766.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994, *The petroleum system-from source to trap*. The American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, 3-24.
- Park, S.J., 1998, Stratal patterns in the Southwestern margin of Ulleung back-arc basin: a sequence stratigraphic analysis. Ph. D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 176 p.
- Park, S.J., Yoon, S.H., and Chough, S.K., 2002, Evolution of the sedimentary basin in the Ulleung Basin margin East Sea (Sea of Japan). Cheong T. J. and Suyehiro, K. (eds.) *Korea-Japan Symposium (Proceedings)*, Gyeongju, September 26-28, 83-99.
- Peters, K.E., 1986, Guideline for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, 318-329.
- 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.

- Pollastro, R.M., 2007, Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 91, 551-578.
- Rodriguez, J.F.R. and Littke, R., 2001, Petroleum generation and accumulation in the Golfo San Jorge Basin, Argentina: a basin modeling study. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 995-1028.
- Shin, K.S., 2000, Sequence stratigraphy of Tertiary sedimentary sequences in the SW margin of Ulleung Basin, East Sea. Ph.D. thesis, Yonsei University, 161 p (in Korean with English abstract).
- Son, B.-K., Okui, A. and Cheong, Y.H., 2010, Possible source rock of Dong Hae gases from Diamondoid analysis. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstract), Gyeongju, October 27-30, p. 47 (in Korean).
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.K., 1990, Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 19, 1559-1570.
- Takano, O., 2002, Tectonostratigraphy and changes in depositional architecture through rifting and basin inversion in the Neogene Niigata-Shin'etsu basin, Northern Forssa Magna, central Japan: implications for tectonic history of the Japan Sea marginal regions. In: Tateishi, M. and Kurita, H. (eds.), *Development of Tertiary sedimentary basins around Japan Sea (East Sea)*, Niigata University, 157-181.
- 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. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 309-335.
- Waples, D.W., Kamata, H. and Suizu, M., 1992, The art of maturity modeling. Part 1: Finding a satisfactory geologic model. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 1, 31-46.
- Waples, D.W., 1994, Modeling of sedimentary basins and petroleum system. In: Magoon, L.B. and Dow, W.G. (eds.), *The petroleum system -from source to trap*. AAPG Memoir 60, 307-322.
- Welte, D.H. and Yalçin, M.N., 1987, Basin modelling - A new comprehensive method in petroleum geology. *Advances in Organic Geochemistry*, 13, 141-151.
- Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, R., 1996, Petroleum and basin evolution. Springer-Verlag, Berlin, 73-167.
- 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.
- Yahi, N., Schaefer, R.G. and Littke, R., 2001, Petroleum generation and accumulation in the Berkine basin, eastern Algeria. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 85, 1439-1467.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1997, Western boundary fault system of the Ulleung Back-arc Basin : further evidence of pull-apart opening, *Geoscience J.* 1, 75-88.
- Yun, H.S. and Yi, S.S., 2002, Biostratigraphy and paleoceanography for the Gorae and Dolgorae Wells, offshore Korea, and their implications to Neogene tectonic history. In: M. Tateishi and H. Kurita (eds.) *Development of Tertiary Sedimentary Basins Around Japan Sea (East Sea)*, Niigata University 65-78.

투 고 일 : 2013년 6월 13일

심 사 일 : 2013년 6월 14일

심사완료일 : 2013년 7월 11일