

## 미국 북서부 오레곤주 타이분지 내 탄화수소 생성과 배출에 대한 모델링 연구

장희정 · 유인창\*

경북대학교 지질학과

### Modeling of Hydrocarbon Generation and Expulsion in the Tye Basin, Oregon Coast Range, USA

Hee-Jeong Jang and In-Chang Ryu\*

Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

The timing of hydrocarbon generation and expulsion from source rocks can be evaluated by reconstructing the geohistory of the basin using petroleum system modeling. The Tye basin is generally considered having a high hydrocarbon generation potential. For the southern part of the basin, the basin evolution from a structural and stratigraphic points of view, the thermal history, and the burial history were reconstructed and simulated using numerical tools of basin modeling. An evaluation of organic geochemistry for the potential source rocks and the possible petroleum systems were analysed to improve the understanding of the hydrocarbon charge of the basin. Organic geochemical data indicate that the undifferentiated Umpqua Group, mudstones of the Klamath Mountains, and coals and carbonaceous mudstones in the Remote Member and the Coquille River Member are the most potential gas-prone source rocks in the basin. The relatively high maturity of the southern Tye basin is related to deep burial resulting from loading by the Coos bay strata. And the heating by intrusion from the western Cascade arc also affects to the high maturity of the basin. The maturation of source rocks, the hydrocarbon generation and expulsion were evaluated by means of basin modeling. The modeling results reveal that the hydrocarbon was generated in all potential source rocks and an expulsion only occurred from the Remote Member.

**Key words** : hydrocarbon, petroleum system modeling, Tye basin

근원암으로부터 탄화수소가 생성되고 배출되는 시기는 석유시스템 모델링을 이용하여 분지의 지사를 복원함으로써 평가할 수 있다. 미국 북서부 오레곤주에 위치한 타이분지는 탄화수소 생성 가능성이 높은 지역이다. 본 연구에서는 남부타이분지에 대한 구조·층서적 관점에서의 분지 진화와 열역사 및 매물사를 석유시스템 모델링의 수치모델을 사용하여 복원, 시뮬레이션 하였다. 분지 내 탄화수소 생성과 배출을 이해하기 위해 잠재 근원암에 대한 유기 지화학적 평가와 가능한 석유시스템을 분석하였다. 유기 지화학 자료를 통해 미분화된 옴과 그룹, 클라마스산의 이암층, Remote Member와 Coquille River Member에 협재된 탄층과 탄질 이암이 분지 내 가스를 생성시킬 수 있는 잠재력이 큰 근원암임을 알 수 있다. 남부 타이분지의 상대적으로 높은 열적 성숙도가 쿠스베이 퇴적층의 하중 압력에 의한 매물과 연관됨을 지시하여 준다. 서부 캐스케이드호로부터 관입에 의한 열 유입 또한 분지의 높은 열적 성숙도에 영향을 미친다. 이러한 분석을 바탕으로 근원암의 성숙과 탄화수소 생성, 및 배출이 석유시스템 모델을 통해 평가되어졌다. 모델링 결과는 모든 잠재 근원암으로부터 탄화수소가 생성은 되었으나 오직 Remote Member에서만 배출이 일어났음을 알려준다.

**주요어** : 탄화수소, 석유시스템 모델링, 타이분지

#### 1. 서 론

석유탐사에 있어서 퇴적분지의 구조를 파악하고 탄

화수소의 존재여부를 예측하는 방법으로 중자력 탐사, 탄성과 탐사 등이 주로 사용되어지고 있다. 그러나 물리탐사방법은 퇴적분지의 구조 도출, 기반암 파악, 단

\*Corresponding author: inchang@knu.ac.kr

층이나 단열대의 파악 등에는 유용하지만 탄화수소의 생성, 성숙, 이동 및 집적 등을 종합적으로 추적, 해석하지는 못하는 단점이 있다. 최근 이러한 물리탐사의 단점을 보완하기 위한 방법으로 분지모델링이 대두되고 있다.

분지모델링, 즉 석유시스템 모델링을 수행하기 위해서는 우선 기본 요소인 석유시스템에 대한 이해가 선행되어야 한다. 석유시스템이란 탄화수소가 생성되는 성숙된 근원암(source rock), 생성된 탄화수소가 이동되어 저장되는 저류암(reservoir rock), 저류암에서 탄화수소가 빠져나가지 못하도록 역할하는 덮개암(seal rock), 근원암층 위에 충분한 두께를 가지고 하부에 압력을 가하여 탄화수소의 생성을 돕는 피복하중암(overburden rock)과 이 네 가지 구성요소들 사이에서 일어난 탄화수소의 생성, 배출, 이동의 모든 과정들을 묶어 하나의 석유시스템으로 정의한다(Magoon and Dow, 1994; Lee, 2008).

이러한 석유시스템을 포괄적이고 정량적으로 분석하고 이해할 수 있는 방법이 컴퓨터를 이용한 석유시스템 모델링 방법이다(Welte and Yalcin, 1987; Lee, 2008). 석유시스템 모델링을 수행하기 위해서는 시추되지 않은 구조의 탄성과 탐사 자료나 직접적인 시추공 자료가 있는 경우 이들로부터 퇴적물의 연령과 두께, 침식면의 두께, 구조적 역사와 매몰사 복원을 통해 분지의 발달을 추측하는 개념적 모델(conceptual model)을 설정한 후 근원암으로 추정되어지는 암석에 대한 지화학 및 암석물성 자료와 분지가 형성된 이후 현재까지 겪어온 열변화를 알려주는 열역사(thermal history)를 석유시스템 모델링 소프트웨어에 입력시킨다. 석유시스템 모델링의 목적은 분지의 발달과정에서 수반되는 물리법칙을 적용하여 분지의 지질학적 역사를 수치적으로 재복원하고 수치모델(numerical model)을 통해 근원암 내 유기물의 열적 성숙도를 계산함으로써 분지 내 탄화수소의 생성과 배출시기를 유추하는 것이다.

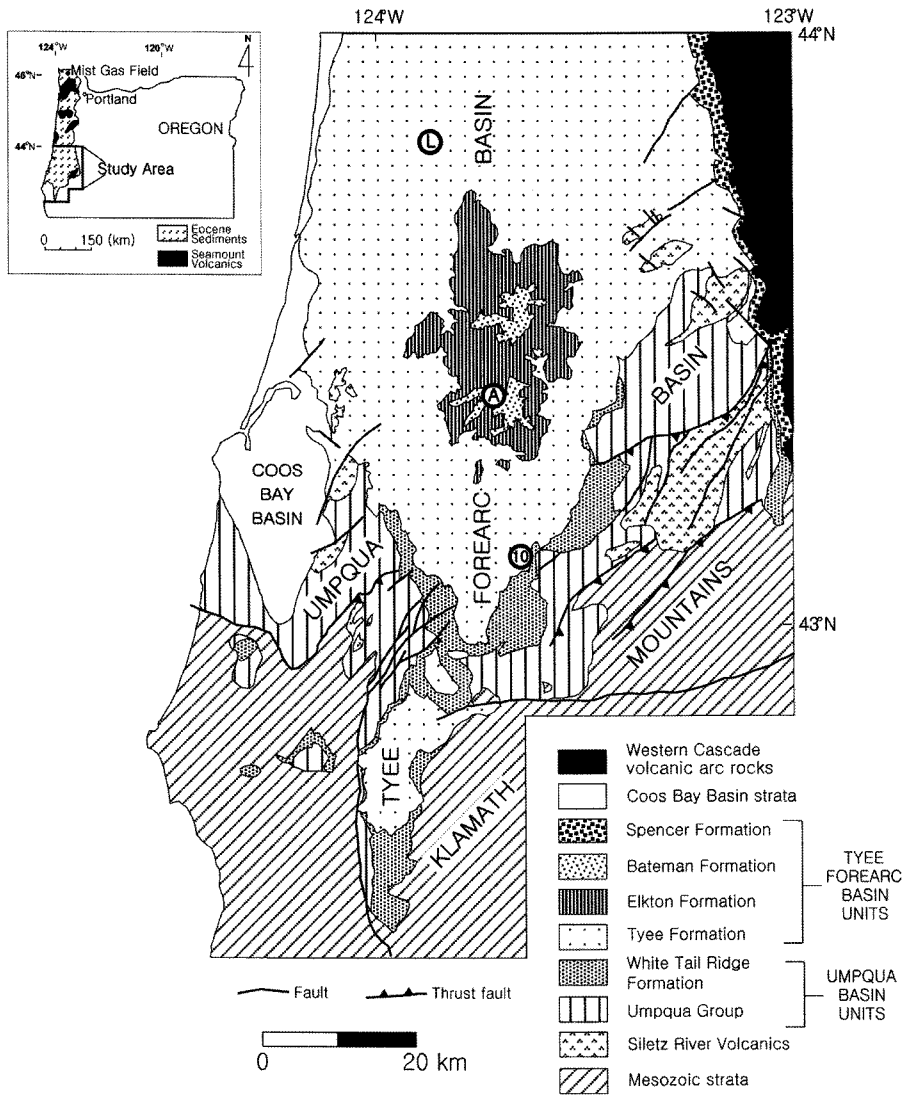
본 연구에서는 미국 북서부 오레곤 해안산맥에 위치한 타이분지(Tyee Basin)의 층서, 분지 진화, 시추공 자료 분석 및 잠재 근원암의 지화학 분석을 토대로 분지 내에서 일어나는 탄화수소의 생성 및 배출을 모델링하였다. 타이분지는 태평양판이 북미대륙 아래로 섭입하는 경계에 형성된 분지로 1979년 오레곤 북서부에 위치한 미스트 가스전에서 가스가 발견된 이후 탐사 활동이 계속되었지만 분지 내 탄화수소의 발견 가능성에 대한 종합적인 이해의 부족으로 인하여 더 이상의 발견

은 없었다(Armentrout and Suek, 1985). 지질학적 복잡성과 형성 메커니즘, 분지의 발달사에 대하여 Wells *et al.*(1984), Wells and Heller(1988) 등이 연구한 바 있으며 Heller and Ryberg(1983), Molenaar(1985) 등은 섭입에 따른 퇴적학적 기록과 움과-타이분지의 퇴적 관계에 대해 밝힌 바 있다. Niem and Niem(1990)은 타이분지에서 나타나는 에오세층의 탄화수소 산출 가능성을 평가하였으며 Ryu *et al.*(1996)은 분지 형성 구조운동의 변화에 따른 퇴적모델을 설정하고 남부 오레곤 해안산맥의 탄화수소 근원암 가능성에 대해 연구하였다. 이처럼 지질학적, 지화학적, 석유탐사 목적의 연구들이 타이분지에서 수행되어 왔지만 분지 내 시추공 자료를 토대로 석유시스템 요소로서의 역할을 할 가능성이 높은 암층들에 대한 직접적이고 종합적인 지화학 및 석유시스템 연구는 아직 부족하다. 본 연구에서는 지금까지 타이분지에서 획득된 지질학, 석유지화학, 시추공 등의 자료를 종합하여 타이분지의 층서적, 구조적 진화를 복원하고, 근원암의 유기 지화학 분석을 토대로 분지의 열역사와 매몰사를 모델링하여 타이분지 내 탄화수소의 생성 및 배출 가능성을 정량적으로 분석하고자 한다.

## 2. 지질개요

타이분지(Tyee basin)는 미국 서부 오레곤주의 서해안을 따라 위치한 남부 오레곤 해안 산맥에 놓여져 있는 길이 약 209 km, 폭 약 88 km에 달하는 분지로 남쪽은 중생대 클라마스산(Klamath Mountains)의 북쪽 경계와 접하고 있다(Snavely *et al.*, 1964; Chan and Dott, 1983; Niem *et al.*, 1992; Fig. 1). 대부분 에오세 퇴적물로 이루어져 있고 부분적으로 화산암체가 존재하고 있으며 본 연구에서는 탄화수소 산출 가능성이 높은 분지의 남부 120 km를 대상으로 하였다. 특히 남부 타이분지 내에는 다른 주향과 지질, 구조적 역사로 겹쳐 놓인 두 개의 개별분지인 초기 에오세의 퇴적물로 이루어진 북동-남서 주향의 움과분지(Umpqua basin)와 중기 에오세 퇴적물로 이루어진 남-북 주향의 타이 전호상 분지(Tyee forearc basin)가 나타난다.

연구지역의 층서와 구조적 진화를 살펴보면, 남쪽에는 중생대에 형성된 클라마스산이 있으며 북쪽으로는 팔레오세에서 에오세 초기에 형성된 Siletz River Volcanics가 해양지각으로 자리잡고 있다(Fig. 2 and 3). 초기 에오세 말, 하부 에오세에 형성된 베개현무암질 용암류(pillow basalt flows)로 이루어진 두꺼운 시퀀스



**Fig. 1.** Geologic map of the southern Oregon Coast Ranges (modified from Ryu, 2008). The NE-SW trend early Eocene Umpqua basin strata is overlain by the N-S trend middle Eocene Tyee basin strata and upper Eocene to middle Miocene Coos Bay basin. The three study wells, Longbell (L), Amoco B-1 (A), and section 10 pseudo-well (10) are shown from north to south. Section 10 pseudo-well is hypothetical well situated in the thrust fault zone that is considered having a high hydrocarbon generation potential.

과분지로 이루어진 해안산맥 압괴의 부가 동안 현재 오레곤의 바깥쪽 대륙붕-상부 대륙사면 아래로 서쪽을 향해 새로운 섭입대가 형성되며 오레곤주의 중심에 화산호(volcanic arc)가 발달하였다. 그에 따라 섭입대와 화산호 사이의 지역이 침강하며 타이 전호상 분지가 형성되어 남쪽으로부터 화산성 암질의 퇴적물과 함께 장석질 사암이 유입되어 Tyee Formation이 형성되었다. 이후 대륙사면 머드(slope mud)로 이루어진 Elkton Formation, 삼각주 환경에서 퇴적된 사암층인

의 기본 자료와 암석물성 및 지화학 자료를 토대로 진행되었다(Fig. 1). 근원암 잠재력을 평가하는 방법으로 유기물질의 함량을 알아보기 위한 총유기탄소량(Total Organic Carbon; TOC) 분석이 시행되었고 록예발 열분석의 수소지수(Hydrogen Index; HI)와 산소지수(Oxygen Index; OI)를 이용해 도시한 van Krevelen 그래프를 통해 잠재 근원암의 케로젠 타입 중 현재까지 나타나는 케로젠 타입을 알아보았다(Tissot and Welte, 1978; Bordenave, 1993). 유기물의 열적 성숙

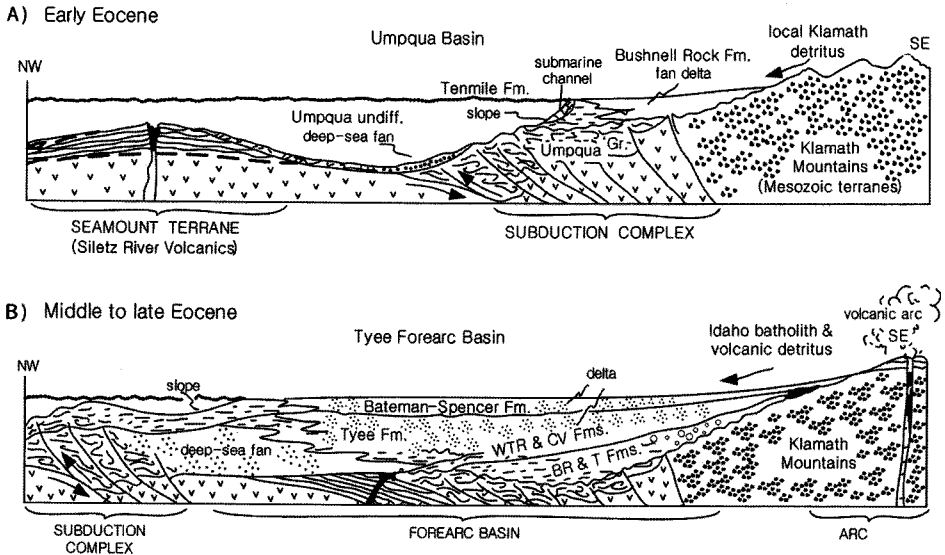


Fig. 2. Tectonic evolution of Umpqua-Tyee basins (modified from Ryu *et al.*, 1996). The Umpqua basin was formed by subduction of seamount terrane beneath the Mesozoic terrane, north-America continent, in the early Eocene. Tyee forearc basin was formed in middle Eocene by resubduction and arc volcanism.

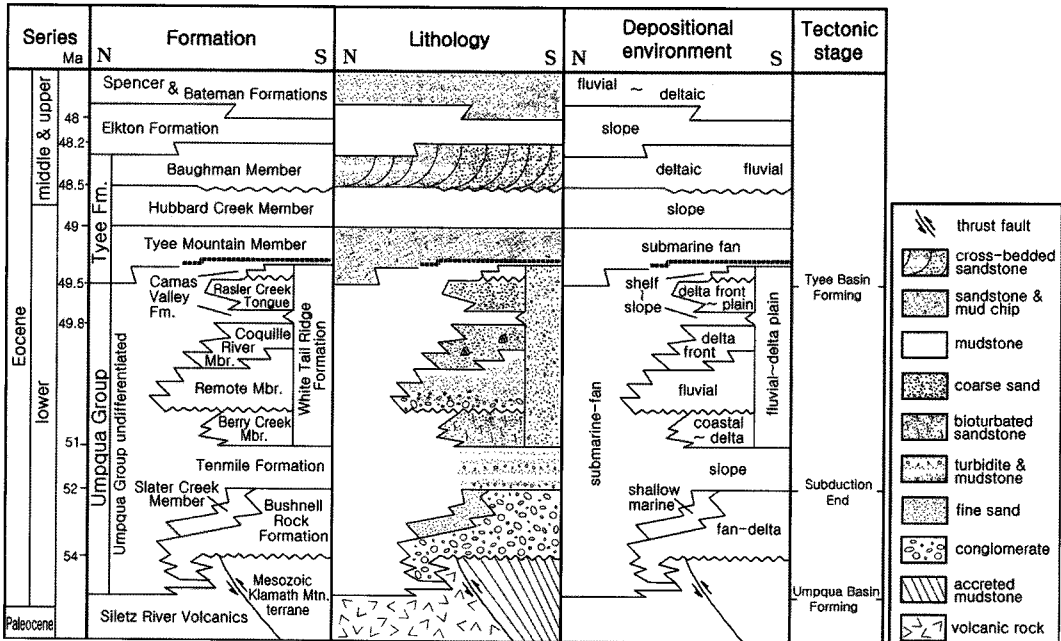


Fig. 3. Lithostratigraphy and correlated lithology, depositional environment, and tectonic stages of the southern Tyee basin, Oregon Coast Range (modified from Ryu *et al.*, 1992).

도와 생성된 탄화수소의 형태를 지시하는 요소를 위해서는 성숙도의 지시자로 전세계적으로 가장 신빙성 있게 쓰이는 비트리나이트 반사도 및 Rock-Eval Tmax를 이용하였다(Dow, 1977; Waples *et al.*, 1992).

석유시스템 모델링을 위한 소프트웨어는 미국 Platte River Associates 사의 BasinMod를 사용하였다. 시뮬레이션을 하기 위해 우선 각 시추공에서 얻어진 층서, 암상, 지화학 자료를 기초로 매물사를 복원하고,

Blackwell and Steele(1992)의 오레곤주 지온 자료에 따른 현재 열류값을 입력하여 열역사를 복원하였다. 이후 기존 연구 자료를 토대로 특정 지구조적 환경에서의 열류값을 타당한 범위 내에서 입력하고, 지구조 변화 및 분지 진화 과정에 맞게 합당한 범위 내에서 시간의 경과에 따른 열류값을 재조정하여 열역사를 복원하였다. 유기물의 열적 성숙도 계산은 석유시스템 모델링에서 열역사의 보정을 위해 쓰이는 기본적인 요소인 비트리나이트 반사도를 이용한 Sweeney and Burnham(1990)의 EASY %Ro 모델을 사용하였으며, 계산된 비트리나이트 반사도의 값과 3개의 시추공에서 나온 실측 %Ro 값들을 대비하여 보정하는 과정을 반복 수행 함으로써 가장 타당한 모델링 결과를 도출하였다.

#### 4. 잠재 근원암 및 석유시스템 분석

석유시스템 모델링을 실시하기에 앞서 대상 분지 내에서 나타나는 잠재적 근원암에 대한 지화학 분석 및 석유시스템 분석이 요구된다(Table 1). 본 연구지역의 잠재 근원암에 대한 지화학 분석 및 암석 물성 자료는 Ryu *et al.*(1996)이 남부 오레곤 해안 산맥의 에오세 퇴적체들과 인근 클라마스산의 제3기 이전 암층들에서 채취한 시료들의 분석 자료 및 Longbell 시추공, Amoco B-1 시추공과 section 10 가상 시추공으로부터 얻은 근원암의 지화학 분석 자료와 암석물성 자료를 토대로 하였으며, 이를 통해 각 시추공 별 잠재 근

원암의 지화학 분석 및 석유시스템 분석이 시행되었다(e.g., Amoco, 1983, 1985; Browning and Flanagan, 1980; Brown and Ruth Laboratories Incorporation, 1983; Law *et al.*, 1984; Mobil Oil Corporation, 1980; Newton, 1980). Longbell 시추공은 43° 48' N, 123° 53' W의 고도 121.92 m, Amoco B-1 시추공은 43° 23' N, 123° 43' W, 고도 396.24 m 지점, section 10 가상 시추공은 43° 8' N, 123° 39' W, 고도 0 m에 위치한다(Fig. 1).

##### 4.1. Longbell 시추공

본 시추공에서 약 180여개의 시료를 대상으로 근원암의 지화학 분석을 실시하였다. 분석된 결과를 이용하여 변형된 van Krevelen 그래프상에 도시하였다(Fig. 4). HI 값은 19~79 mg HC/g TOC의 낮은 범위로 나타나 본 시추공에서 생성된 탄화수소는 케로젠 타입 III의 가스 형태일 것으로 예측된다. 암상 내 유기물질의 함량을 나타내는 TOC 값은 0.1~1.36 wt%로 나타났으며 특히 시추공 하부 1,700~2,000 m 구간의 미분화된 움과 그룹은 탄화수소가 생성될 가능성이 있거나(fair) 양호(good)하다고 보여지는 0.5~1.1 wt%의 값을 보여주고 있다(Fig. 5).

탄화수소의 열적 성숙도와 형태를 판단하기 위한 자료로 비트리나이트 반사도와  $T_{max}$ 를 사용하였다. 비트리나이트 반사도 값은 0.5~2.4 %Ro의 값을 나타내어 시추공 내 퇴적층 전 구간에서 석유가 생성될 초기 성숙 단계에 접어든 것으로 해석된다(Fig. 5). 미분화된

**Table 1.** Organic geochemical data of the Longbell well, Amoco B-1 well, and section 10 pseudo-well.

Well	Depth [m]	TOC [wt%]	HI [mg HC/g TOC]	OI [mg CO <sub>2</sub> /g TOC]	Ro [%Ro]	T <sub>max</sub> [°C]
Long-bell	0~1329	0.1~1.36	19~79	34~275	0.5~0.59	
	1329~2618	0.12~1.1	12~48	33~300	0.55~2.4	305~465
Amoco B-1	1773~2540	0.1~1.4	43~84		0.64~0.77	446~449
	0~177	0.37~54.97	10~269	13~51	0.48~0.86	416~448
	177~511	0.06~2.01	20~259	16~64		369~491
	511~569	0.17~1.98	14~159	9~141	0.38~0.65	422~457
	569~1135	0.37~1.47	3~119	9~142		423~470
section 10	1135~1519	0.22~51.35	45~314	5~43		421~498
	1519~1641	0.08~45.58	24~311	16~306	0.4~0.48	420~472
	1641~2590	0.2~1.36	3~87	7~217	0.43~0.75	426~514
	2590~3001	0.26~0.43	2~50			356~392
	3001~3204	0.31~2.09	2~39	15~242	0.54~0.76	422~472
	3204~3282	0.13~0.56		27~177	0.69~2.1	

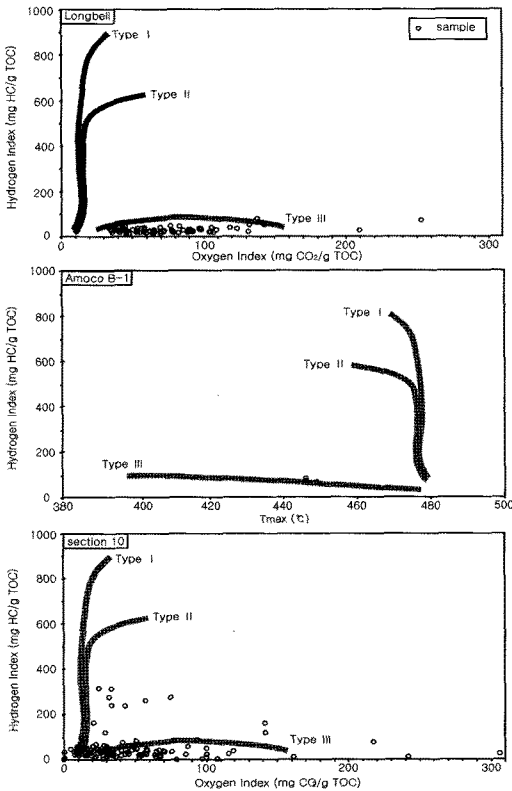


Fig. 4. Modified van Krevelen graphs of samples from Longbell and Amoco B-1 wells and section 10 pseudo-well. Almost all samples are dominated by Type III.

음과 그룹의 상부에서 2.4 %Ro의 값을 가지며 가스생성 단계에 접어든 시료가 나타나는데 이는 후기 에오세 이후 남부타이분지 동쪽경계의 서부 캐스케이드호의 화산활동에 의해 형성된 암맥들이 올리고세~마이오세 초기 음과분지 일부에 관입하여 차별적인 열적 성숙을 받은 결과이다(Ryu, 2008). 또한  $T_{max}$  값들은 305~465°C의 범위에서 나타났으며 주로 미분화된 음과그룹에서 435°C 이상으로 나타나 석유 생성단계에 접어들었음을 보여준다.

이러한 분석에 따라 Longbell 시추공에서는 주로 하부의 미분화된 음과 그룹에서 탄화수소가 생성될 가능성이 크며 석유가 생성될 초기 성숙 단계에 위치하여 근원암으로서 역할이 가능할 것으로 생각된다. 상부의 Tye Mountain Member는 사암과 이암으로 이루어져 있어 저류암 및 덮개암 역할을 동시에 할 것으로 가정하였다.

#### 4.2. Amoco B-1 시추공

Amoco B-1 시추공 내 지화학 분석은 근원암으로서 역할을 할 가능성이 가장 높은 하부의 미분화된 음과 그룹을 대상으로 이루어졌다. OI 자료의 부족으로 인해 HI와  $T_{max}$ 를 축으로 사용한 변형된 van Krevelen 그래프 분석을 통해 생성 가능한 탄화수소는 가스 형태로 나올 것임을 알 수 있다(Fig. 4). 지화학 분석 결과 TOC 분포는 0.1~1.4 wt%로 탄화수소가 생성될

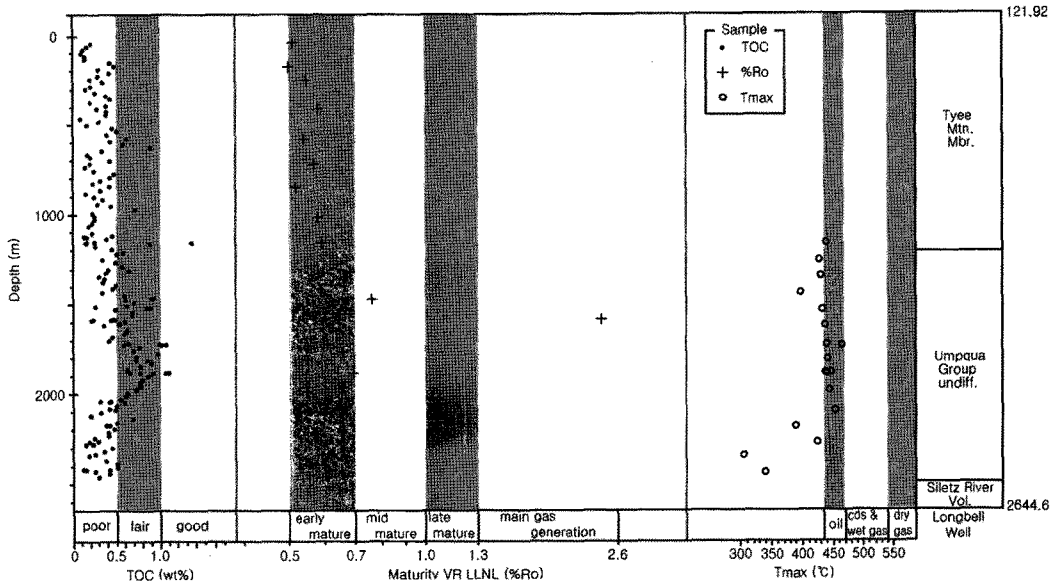


Fig. 5. Organic geochemical analysis of Longbell well. TOC, vitrinite reflectance, and  $T_{max}$  are plotted. The most potential source rock is Umpqua Group undifferentiated.

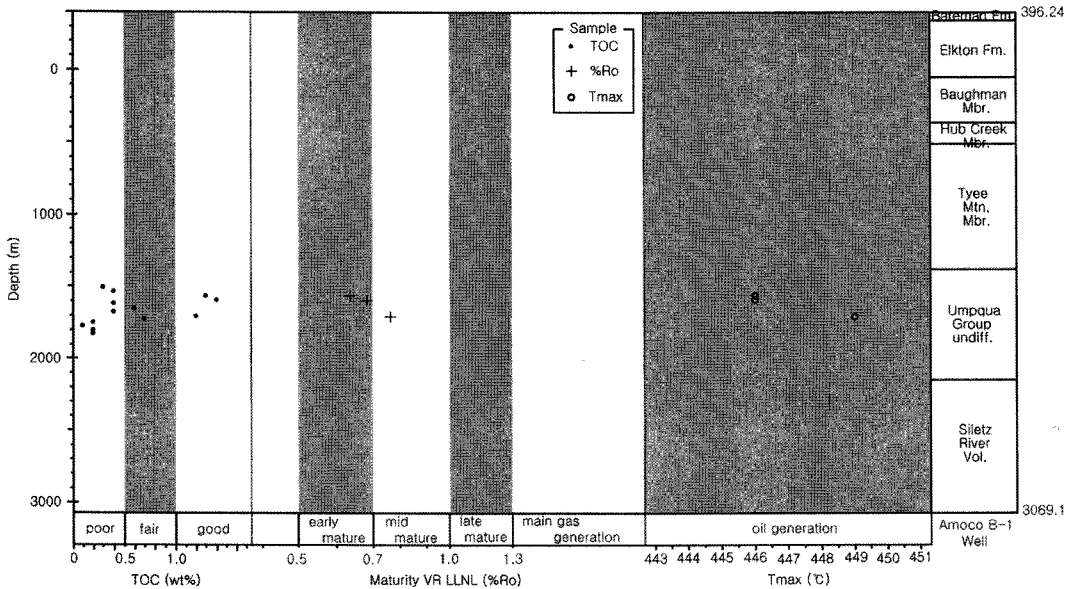


Fig. 6. Organic geochemical analysis of Amoco B-1 well. The most potential source rock is Umpqua Group undifferentiated.

수 있는 바탕이 되는 유기물질의 함량은 불량(poor)~양호(good)한 잠재성을 보여준다(Fig. 6). 비트리나이트 반사도는 0.64~0.77%Ro의 범위로 나타나 석유의 초기 성숙 단계에서 중기 성숙 단계에 있으며 Tmax 또한 446~449°C의 분포로 석유 생성 단계에 이르렀음을 지시하고 있다. 이러한 지화학 분석 결과는 미분화된 움과 그룹이 가능성 있는 근원암으로 역할을 할 수 있음을 지시한다. 사암으로 이루어진 Tyee Mountain Member가 저류암으로, 그 위 이암 상의 Hubbard Creek Member가 덮개암으로 역할을 할 것이다.

### 4.3. Section 10 가상 시추공

Section 10 가상 시추공은 타이분지 내 시추공 분석을 실시하며 시추공 간 대비와 지표 노두 조사를 통해 탄화수소가 산출될 가능성이 높은 트러스트단층 구조대에 위치시킨 가상 시추공이다(Ryu *et al.*, 1992). 따라서 실제 시추공 자체에서 나온 시료는 존재하지 않으며 본 가상시추공의 지화학 자료는 지표에서 채취한 시료를 분석하여 얻은 자료이므로, 이 시추공 지점에 실제 시추하여 얻을 수 있을 지화학 자료들과 비교하여 본 연구에서 사용된 지화학 자료들은 열적 성숙도 및 유기물 함량 등에 있어 실제 시추공 자료에 비해 낮은 값을 보인다.

유기물의 가상 시추공에 적용된 지화학 자료들을 분석하면, HI 값은 2~314 mg HC/g TOC의 범위로 나

타나 주로 가스가 생성될 것이며 200 mg HC/g TOC가 넘는 일부 시료들로부터 석유와 가스가 함께 생성될 가능성을 짐작할 수 있다(Fig. 4). TOC 값은 0.06~54.97 wt%의 분포로 앞의 두 시추공에 비해 매우 폭 넓은 범위를 가지고 나타난다(Fig. 7). 하부로부터 차례로 살펴보면 pre-Tertiary 암층은 0.31~2.09 wt%로 유기물질의 함량이 불량이거나 경우에 따라서는 큰 것으로 분석되며 1개의 시료는 유기물질이 아주 풍부(excellent)한 것으로 생각되는 2 wt%를 넘는 값을 가진다. Tenmile Formation 역시 유기물질의 함량은 주로 빈약하거나 꽤 있는 것으로 나타나며 일부 시료에서 양호한 것으로 나타난다. 반면 상부의 Remote Member와 Coquille River Member는 각각 0.08~45.58 wt%, 0.22~51.35 wt%의 분포로 유기물질의 함량이 아주 높은 2 wt%를 훨씬 넘는 값들을 가져 잠재근원암으로서의 가능성이 높으며, 이는 두 Member에 협재되어 나타나는 탄층과 탄질 이암 시료로부터 기원한다(Ryu, 2008). 나머지 상부 층인 Camas Valley Formation, Tyee Mountain Member, Hubbard Creek Member는 0.06~2.01 wt% 범위 내의 TOC 값을 가져 유기물질의 함량은 탄화수소를 형성할 근원암이 되기에 불량~양호한 상태에 이르는 것으로 나타나며, Baughman Formation은 0.37~54.97 wt%로 근원암이 되기에 매우 높은 유기물질 함량을 가지고 있지만 시추공의 최상부 층이므로 여기서는 잠재 근원암으로 고려하지 않는다.

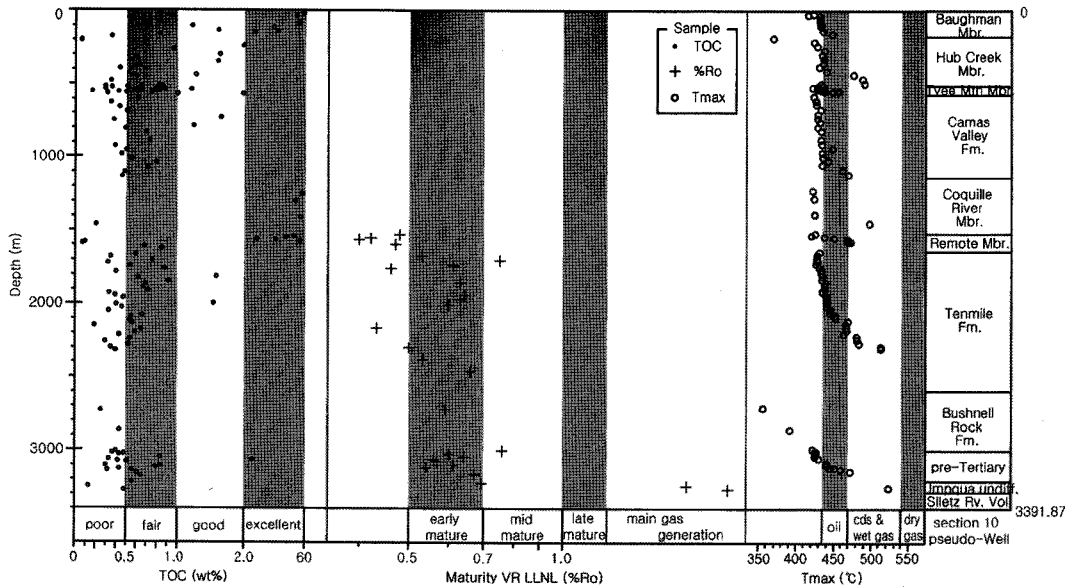


Fig. 7. Organic geochemical analysis of section 10 pseudo-well. The pre-Tertiary mudstone strata and carbonaceous mudstone and coal-bearing beds of Remote Member and Coquille River Member are the most potential source rock in this pseudo-well.

비트리나이트 반사도를 통해 분석한 유기물의 열적 성숙도는 Remote Member까지 분석되어진 결과 약 65%의 시료들이 석유의 초기 성숙 단계에 접어든 것으로 나타났으며, 미분화된 움과 그룹의 경우 1.0 %Ro 이상의 값을 나타내며 후기 성숙 단계에 까지 이르렀다.  $T_{max}$  분석을 살펴보면, 미분화된 움과 그룹은 470~540°C 사이로 습성가스가 형성될 수 있는 범위에 놓이며 pre-Tertiary 암층은 422~472°C의 분포로 주로 석유가 형성될 것으로 추정된다. Tenmile Formation 또한 426~514°C 분포로 석유와 습성가스의 생성단계에 들어있으며 Remote Member는 석유 생성단계, Coquille River Member는 4개의 시료 중 하나가 습성가스 생성단계에 도달했다. 이후 상부층들은 일부만이 석유 생성 단계에 도달하였으며 Hubbard Creek Member의 경우 일부가 습성가스 생성 단계에 도달한 것을 볼 수 있다.

본 가상시추공에서 나타나는 지화학 분석 결과를 요약하면, 일부 pre-Tertiary 암층과 Remote Member, Coquille River Member에 협재된 탄질 이암과 탄층 내 유기물질이 탄화수소를 생성하기에 아주 풍부한 것으로 나타났다. 비트리나이트 반사도 분석은 미분화된 움과 그룹에서 Remote Member까지 대부분의 층이 석유 생성의 초기 성숙 단계에 들어있음을 보이며  $T_{max}$  분석 또한 Remote Member를 포함한 하부의 층들이 석유생성단계에 접어들었음을 보여준다. 미분화

된 움과 그룹과 pre-Tertiary, Tenmile Formation, Remote Member와 Coquille River Member로부터 나온 시료 중 일부는 470°C 이상의  $T_{max}$  값을 보여 습성가스와 콘덴세이트가 생성될 수 있는 열적 성숙단계에 도달하였음을 지시하고 있다.

생산성 있는 근원암이 되기 위해서는 유기물 함량이 높아야 할 뿐 아니라 탄화수소를 생성할 수 있을 정도의 충분한 열적 성숙에 도달하여야 한다(Tissot and Welte, 1978). 앞에서의 근원암 지화학 분석으로 미루어 볼 때 유기물질 함량 면에서 본 시추공에서 가장 근원암으로서 가능성이 높은 암상은 pre-Tertiary 암층 및 Remote Member와 Coquille River Member에 협재된 탄층과 탄질 이암이며, 열적 성숙도 또한 위의 세 층에서 대부분 높게 나타난다. 그러나 이러한 열적 성숙 경향은 북부타이분지에서 나타나는 같은 퇴적 단위들에서는 관찰되지 않으므로 남부타이분지에서의 차별적인 열적 성숙으로 보여지며, 이는 에오세 상부~중기 마이오세 사이 남부 타이분지에서 쿠스베이분지가 형성, 퇴적층이 생성되어 북부에 비해 한때 깊이 매몰된 후 다시 융기하여 침식되었기 때문으로 생각된다(Ryu, 2008).

본 시추공에서 나타나는 종합적인 석유시스템의 형성은 다음과 같다. 상부 에오세에서 중기 마이오세 사이 남부타이분지가 북부보다 더 깊게 매몰되어 쿠스베이분지가 형성된 후 다시 융기하여 Coos Bay strata



가 침식되었다. 이 과정에서 pre-Tertiary 암층 및 Remote Member와 Coquille River Member에 협재된 유기물이 풍부한 탄층과 탄질 이암이 상부 퇴적체들에 의해 높은 압력을 받아 열적으로 성숙되었으며, 또한 타이분지의 퇴적이 거의 끝난 시점인 약 45 Ma에 시작된 캐스케이드호의 화산활동에 의해 형성된 관입암과 기존에 형성되어 있는 트러스트단층을 따른 열수의 이동에 의해서도 차별적인 열적성숙을 받아 생산성 있는 근원암이 형성되었다. 사암으로 이루어진 Remote Member와 Coquille River Member가 동시

에 저류암을 형성하였고 Camas Valley Formation의 이암이 덮개암으로서 그 위를 얇게 덮어 트랩을 형성하였을 것으로 생각된다.

### 5. 석유시스템 모델링

#### 5.1. 자료입력

본격적인 석유시스템 모델링을 위해 각 시추공에서 나온 퇴적층의 깊이에 따른 퇴적 시작 연령, 층서 및 암상의 변화, 부정합, 침식면의 두께, 유기물의 형태 등

**Table 2.** The Input data for petroleum system modeling. The lithology of each formation is inputted as the ratio of sandstone-siltstone-mudstone-(coal). Src means source rock and Rsv represents reservoir.

Well	Formation	Begin Age [Ma]	Top Depth [m]	Lithology [Ss-St-Mud-(Coal)]	Petroleum system
Longbell	Erosion	15			
	Coos Bay Strata	36.6		80-20-0	
	Tyee Mtn. Mbr.	49.5	0	90-5-5	Rsv + Seal
	Umpqua undiff.	54.5	1328.56	0-2-98	Source
	Siletz River Vol.	64	2618.05	volcanic	
Amoco B-1	Erosion	15			
	Coos Bay Strata	36.6		80-20-0	
	Bateman Fm.	48	0	85-10-5	
	Elkton Fm.	48.2	54.71	5-25-70	
	Baughman Mbr.	48.5	445.47	95-5-0	
	Hubbard Creek Mbr.	49	761.21	0-10-90	Seal
	Tyee Mtn. Mbr.	49.5	906.57	90-5-5	Reservoir
	Umpqua undiff.	54.5	1772.53	0-2-98	Source
section 10	Siletz River Vol.	64	2539.99	volcanic	
	Erosion	15			
	Coos Bay Strata	36.6		80-20-0	
	Baughman Mbr.	48.5	0	95-5-0	
	Hubbard Creek Mbr.	49	176.63	0-10-90	
	Tyee Mtn. Mbr.	49.5	511.12	90-5-5	
	Camas Valley Fm.	49.8	568.94	0-5-95	Seal
	Coquille River Mbr.	50.4	1134.77	85-0-10-(5)	Src + Rsv
	Remote Mbr.	50.7	1519.31	80-5-10-(5)	Src + Rsv
	Tenmile Fm.	52	1641.23	30-30-40	
	Bushnell Rock Fm.	54	2590.01	90-5-5	
	Unconformity	54.2			
	pre-Tertiary	67	3001.09	90-5-5	Source
	Umpqua undiff.	54.5	3204.3	0-2-98	
	Siletz River Vol.	64	3282.45	volcanic	

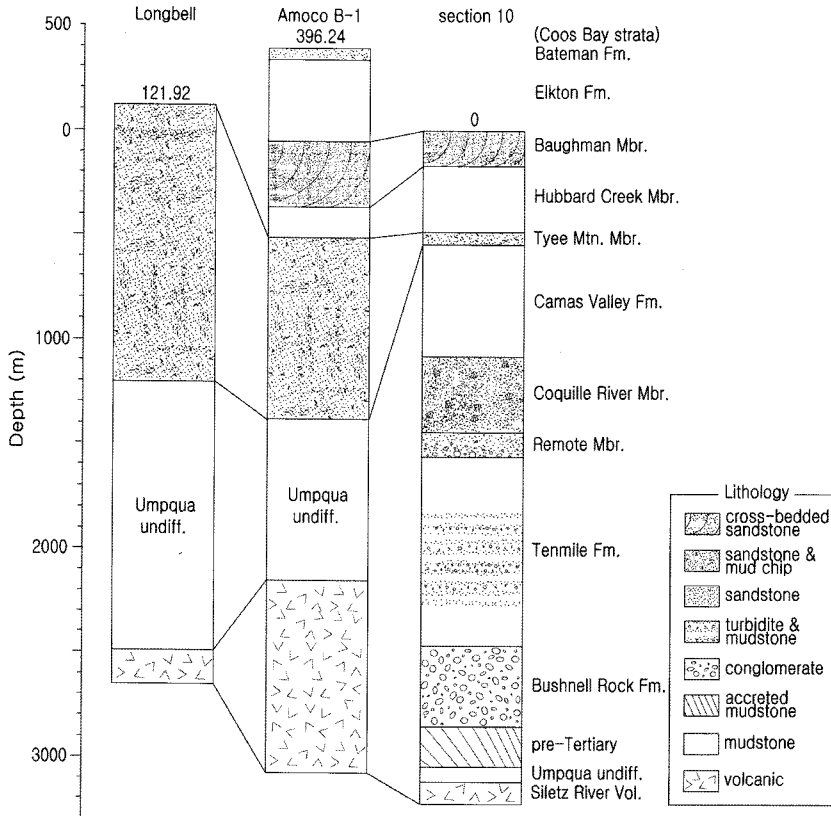


Fig. 8. Well correlation among 3 wells. Thickness and lithology are shown for each well.

의 자료를 입력하였다(Table 2).

석유시스템 1-D 모델링은 앞서 지화학 분석이 이루어진 3개의 시추공을 대상으로 하였다. Longbell 시추공과 Amoco B-1 시추공, section 10 가상 시추공은 각각 총 심도 약 2,767 m, 3,465 m, 3,392 m로 시추공 최하부의 Siletz River Volcanics로부터 지금은 침식되어 나타나지 않는 최상부 Coos Bay Strata까지 팔레오세에서 상부 마이오세에 걸쳐 생성, 퇴적 및 침식이 일어난 일련의 층들로 이루어져 있다(Fig. 8).

각 시추공으로부터 나온 퇴적층의 심도, 암상변화 등의 자료는 시추 자료를 토대로 작성하였고 퇴적층의 퇴적 시작 연령 및 암석 물성값은 Ryu *et al.*(1996)의 층서 및 암석 분석을 기초로 입력하였다(e.g., Amoco, 1983, 1985; Browning and Flanagan, 1980; Brown and Ruth Laboratories Incorporation, 1983; Law *et al.*, 1984; Mobil Oil Corporation, 1980; Newton, 1980). 각 층의 암상 분석은 사암-실트스톤-이암-(석탄)으로 구분되어 총 함량 100%를 기준으로 각 암상의 상대적 비를 이용하여 나타내었으며 그에 따라 소프트

Table 3. Saturation threshold according to the TOC values (from Waples, 1998).

TOC (wt%)	Saturation threshold (fraction of pore volume)
< 1.0	0.06
1.0	0.07
2.0	0.09
3.0	0.11
4.0	0.13
5.0	0.15
6-10	0.17
10 <	0.18

웨어 내 암석물성 기본값이 상대적 비율로 계산되어 각 층마다 입력되어졌다.

근원암내에서 생성된 탄화수소는 배출되어 투수성이 더 높은 층으로 이동하게 된다. 탄화수소의 배출 방법의 입력은 근원암 내 공극에 일정량의 탄화수소가 포화되면 근원암으로부터 탄화수소의 방출이 시작되는 포

화 모델(Saturation method)을 사용하였다. 배출이 시작될 수 있는 근원암 내 포화된 최소 공극값인 포화최소값(saturation threshold)의 프로그램내 기본값은 0.2 이나 Waples(1998)는 케로젠의 양이 증가함에 따라 흡착된 탄화수소의 양이 점점 증가하기 때문에 케로젠 방출에 있어 공극의 포화도 뿐만 아니라 케로젠의 흡착력까지도 고려해야 하며, 그에 따라 Table 3에 제시된 값을 입력하는 것이 더 합리적이라고 제안하였다(Lee, 2008). 따라서 각 시추공의 근원암에 대한 포화최소값은 Table 3에 따라 0.06 및 0.09를 입력하였다.

지화학 자료는 앞서 이루어진 시추공 및 가상 시추공 내 TOC, %Ro, Rock-Eval Tmax 등의 근원암 분석 자료를 사용하였으며 생성된 케로젠의 형태는 근원암 분석에 의해 Type III를 적용시켰다(Fig. 4, 5, 6, 7, Table 1).

분지 내 열역사는 퇴적물 내 유기물의 시간에 따른 성숙도 변화에 절대적인 영향을 미치며 이러한 열역사를 복원함에 있어 기본적으로 쓰이는 자료는 대상 분지의 지온 구배, 각 시추공의 지표온도 및 시추공 저면 온도(bottom-hole temperatures; BHT) 또는 실측된 현재 지표 열류값이다. 본 연구에서는 Blackwell and Steele(1992)의 연구에 따라 현재의 지표 열류값을 정하였다.

Longbell 시추공은 하부로부터 Siletz River Volcanics, 미분화된 움과 그룹, Tye Mountain Member, Coos

Bay strata가 정합적으로 퇴적되었다. Amoco B-1 시추공에서도 Siletz River Volcanics, 미분화된 움과 그룹, Tye Mountain Member, Hubbard Creek Member, Baughman Member, Elkton Formation, Bateman Formation, Coos Bay Strata가 정합적으로 퇴적되어 있다.

트러스트단층대에 위치한 section 10 가상 시추공의 모델링에는 단층 모듈을 사용하여 하부의 Siletz River Volcanics, 미분화된 움과 그룹과 상부의 pre-Tertiary 암층이 트러스트단층으로 접하도록 모델링하였다. 트러스트 단층 작용은 54.4 Ma에 시작하여 Tenmile Formation이 퇴적되기 전인 52.1 Ma에 끝나는 것으로 입력하였으며 pre-Tertiary 암층과 상부의 Bushnell Rock Formation은 부정합으로 경계되고 그 상부로는 Tenmile Fm., Remote Mbr., Coquille River Mbr., Camas Valley Fm., Tye Mountain Mbr., Hubbard Creek Mbr., Baughman Mbr., Coos Bay Strata가 정합적으로 퇴적되었다. 각 퇴적층들의 퇴적 당시 해저면 깊이는 Ryu *et al.*(1992)의 시퀀스 모델에 따라 퇴적학적 모델과 비교하여 합리적으로 입력하였다. 시추공 모두에서 나타나는 최상부의 Coos Bay strata는 남부타이분지의 서쪽에서 시작된 섭입에 의해 형성된 쿠스베이분지에 퇴적된 층으로, 한때 북부에 비해 상대적으로 깊이 묻혀있던 남부 타이분지에서 특징적으로 나타나는 퇴적층이다(Ryu, 2008). 이는 15 Ma에

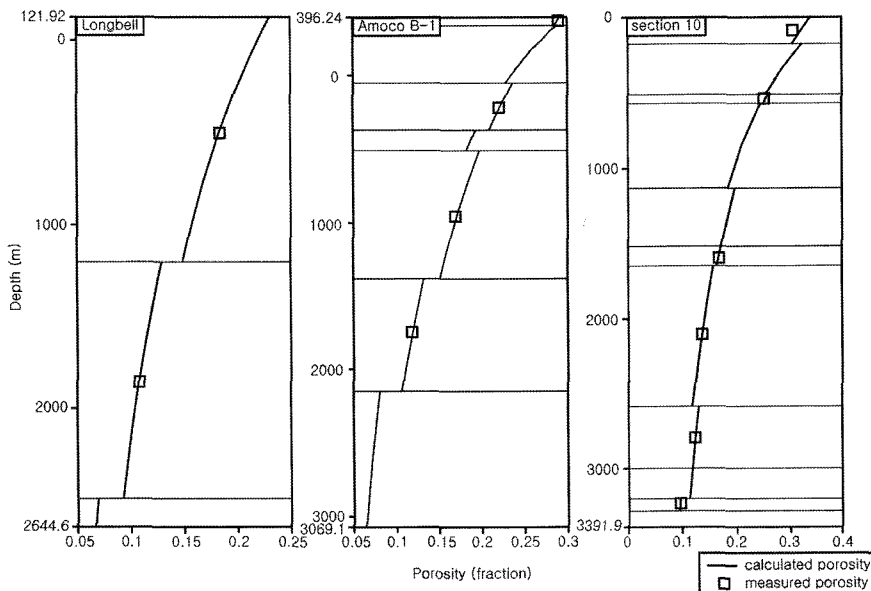


Fig. 9. Porosity calibration using measured porosity for each well.

남부타이분지의 용기가 시작되어 세 시추공 지점 모두에서 지금은 완전히 삭박되어 나타나지 않는 것으로 모델링하였다.

5.2. 모델링 보정

5.2.1. 공극률 모델링

퇴적체로부터 탄화수소가 생성되어 이동함에 있어 암층 내 공극률 및 퇴적물 부가에 따른 압밀작용 (compaction)은 석유시스템 모델링에서 필수적으로 고려되어야 할 요소로서, 압밀작용의 보정은 열역사 모델에 영향을 주게 되어 근원암의 성숙도와 탄화수소 생성 및 방출에 영향을 미친다. 여기서는 퇴적물 부가에 의한 결과로 나타난 깊이에 따른 공극률 변화를 계산하는 기계적 압밀작용(mechanical compaction)을 적용하였으며 이는 퇴적물과 암석의 두께는 암상과 매물 깊이에 따라 예측가능한 양으로 감소함을 기본 가정으로 한다. 본 연구지역의 퇴적물은 비교적 낮은 편이므로 공극의 감소는 퇴적물 부가와 비례하여 변할 것이다. 따라서 깊이에 따른 공극률은 상반관계(reciprocal)에 놓여있으며 아래의 식이 적용된다(Falvey and Middleton, 1981). 여기서  $\Phi$ 는 공극률,  $\Phi_0$ 는 초기 공극률,  $K$ 는 다짐율(compaction factor),  $z$ 는 심도를 나타낸다.

$$\frac{1}{\Phi} = \left(\frac{1}{\Phi_0}\right) + Kz$$

세 시추공 내 암석의 공극률은 공내 직접적인 자료의 부재로 인해 Ryu *et al.*(1992)이 측정한 각 암층별 공극률 자료를 바탕으로 입력하였다. 이렇게 입력된 공극률과 프로그램 내에서 계산되어진 공극률은 암상에 따른 초기 공극률과 다짐율의 차이에 의해 약간 다르게 나타나므로, 두 변수를 본 연구지역의 암상에 맞게 변화시켜 계산값과 실측값이 일치되도록 보정을 반복 시행하여 최적값을 모델링하였다(Fig. 9).

5.2.2. 성숙도 모델링

석유시스템 모델링에 있어 대상 분지가 어떠한 열적

진화를 겪어왔는지를 복원하는 열역사 모델링은 분지 내 탄화수소의 성숙도와 가장 밀접하게 연관된다. 그러므로 시추공 내 최하부의 암층이 형성되기 시작한 때부터 현재까지 시간에 따라 열류량이 어떻게 변해왔는지를 모델링함으로써 단순히 열역사의 복원뿐만이 아니라, 열적성숙도의 지시자인 비트리나이트 반사도의 실측값과 프로그램 내에서 계산된 값을 비교하여 성숙도 모델링을 보정, 최적화하는 데 도움을 준다(Dow, 1977; Waples *et al.*, 1992).

열역사 복원에 필요한 각 시추공의 현재 열류량은 Blackwell and Steele(1992)의 북미 열류값 데이터를 참고하여 30~37 mW/m<sup>2</sup> 범위의 값에서 입력하였다

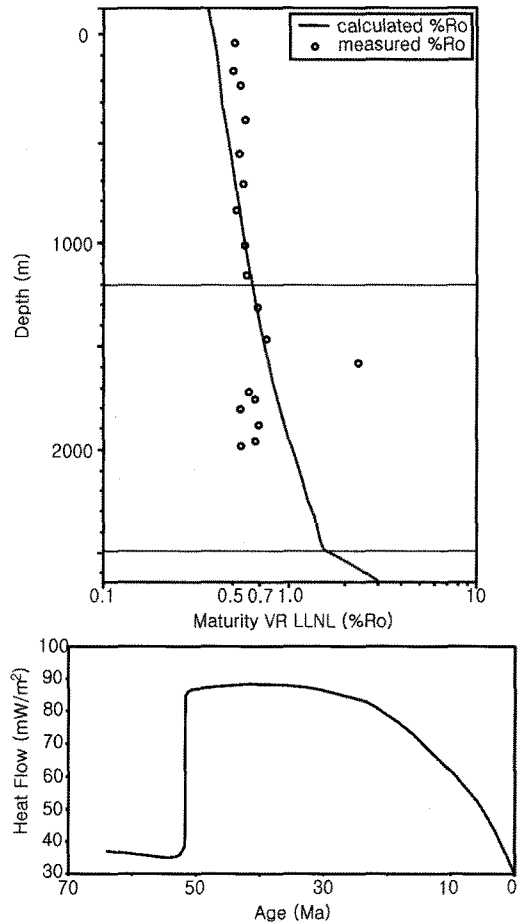


Fig. 10. Thermal modeling calibration of the Longbell well and correlated heat flow change through geologic time. Over-matured sample indicates the intrusion from the Cascade arc volcanism. The rapid increase of calculated vitrinite reflectance values in lower part is resulted from volcanic rocks (Siltz River Volcanics) that have the higher thermal conductivity than the upper sediments.

Table 4. Heat flow values and erosion amount of Coos Bay strata.

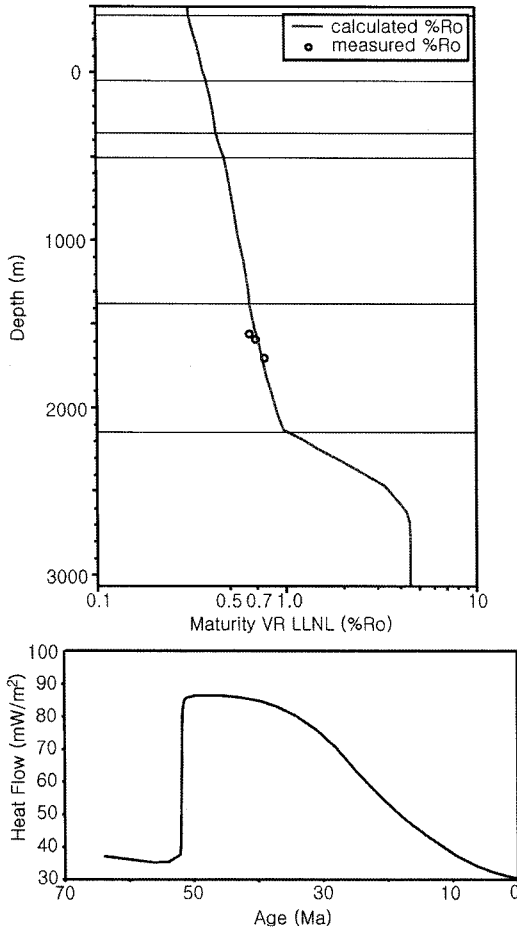
Well	Heat Flow (mW/m <sup>2</sup> )		Coos Bay strata Erosion (m)
	Maximum value	Present value	
Longbell	88	30	1200
Amoco B-1	86	30	500
section 10	92	37	400

(Table 4). 이를 바탕으로 시추공 최하부 암층의 형성으로부터 현재에 이르기까지 열류량의 변화를 분지 내 열류량을 일시적으로 높이는 사건, 지층의 침식량 등 지질학적 개념을 고려하여 지구조적 위치에 따른 특정 열류값의 범위 내에서 입력하였다.

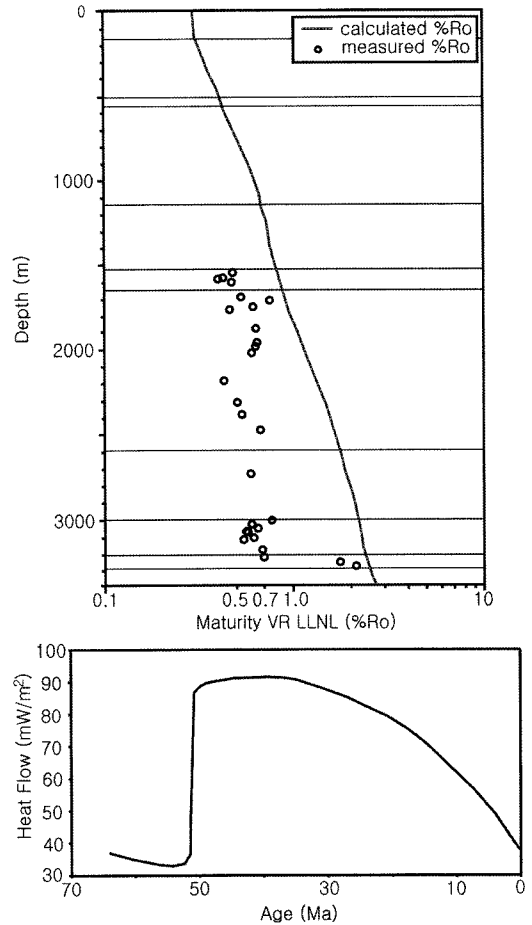
대상 시추공들은 모두 남부타이분지에 위치하며 Siletz River Volcanics에서 Coos Bay strata의 침식에 이르기까지 해구에 형성된 움푹분지로부터 약 50 Ma에 타이 전호상 분지로 진화한 뒤, 약 36.6 Ma에 새로운 섭입대가 형성되며 쿠스베이분지가 형성된 후 약 15 Ma부터 차별 침식을 겪었다. 이러한 분지의 지구조적 진화를 토대로 해구의 열류량 범위인

30~40 mW/m<sup>2</sup> 사이에서 분지의 진화 및 침식을 고려하여 열류량의 변화를 유추하였다(Allen and Allen, 1990; Welte *et al.*, 1996; Figs. 10, 11, and 12). 특징적 사건으로 후기 에오세 이후 약 45 Ma에 타이분지 남부의 동쪽 경계를 따라 시작되어 올리고세와 마이오세까지 지속된 캐스케이드호의 화산활동이 움푹그룹에 관입하여 열류량에 미쳤을 영향을 고려하였다.

분지의 성숙도 모델링에 있어 열류량 뿐만이 아닌 침식량 또한 열역사 복원에 중요한 영향을 끼친다. 시추공 지층의 최상부에 놓여있었을 Coos Bay strata의 침식량은 최대 약 1,830 m에 이른다(Ryu, 1996). 이에 따라 성숙도 모델링의 보정을 진행하는 동안 Coos Bay strata의 침식량 또한 시추공의 위치와 분지 진화를 고려한 차별적인 값을 입력하여 성숙도 모델링의



**Fig. 11.** Thermal modeling calibration of the Amoco B-1 well and correlated heat flow change through geologic time. The rapid increase of calculated vitrinite reflectance values in lower part is resulted from volcanic rocks (Siletz River Volcanics) that have the higher thermal conductivity than the upper sediments.



**Fig. 12.** Thermal modeling calibration of the section 10 pseudo-well and correlated heat flow change. The gap between the calculated and measured vitrinite reflectances is caused by the sediment's weathering and oxidation.

최적화를 반복 시행하였다(Table 4). 이때 시추공 상부 1,500 m 이상 심도의 시료를 제외할 경우 지질 자료와 지질학적 개념에 맞는 모델링 결과를 도출해 낼 수 있으므로 모든 시추공에서 퇴적물의 재이동 및 산화, 공벽붕괴 등에 의해 교란되어 나타나는 지표 근처 시료의 비트리나이트 반사도 값은 모델링에서 배제하였다(Waples *et al.*, 1992; Lee, 2008). 성숙도 모델링의 보정 결과와 시간에 따른 열류량 변화의 대비를 도시하였다(Figs. 10, 11, and 12).

Longbell 시추공에서의 비트리나이트 반사도는 Tye Mountain Member에서 미분화된 옴파 그룹의 상부에 이르기까지 깊이에 따라 증가한다(Fig. 10). 하지만 미분화된 옴파 그룹의 심도 1,720~1,982 m 사이에서는 지속적인 증가 경향에서 벗어나 0.54~0.7%Ro의 값을 가지는데 이는 시추공 자료 분석 실험 자체의 오류이거나 공벽붕괴에 의해 상부의 암석들이 섞인 것으로 판단된다. 관입이나 열수의 유입은 퇴적 분지의 일부에서 이상적으로 높은 비트리나이트 반사도 값을 야기시킨다(Welte *et al.*, 1996). 심도 1,590 m 지점 2.4%Ro 값의 시료는 캐스케이드호의 화성활동 시 미분화된 옴파그룹이 관입 당하면서 받은 차별적인 열적성숙의 결과이다. Blackwell *et al.*(1982)에 따르면 오레곤주 캐스케이드 산맥 주변부의 지표 열류량은 관입활동에 의해 본래의 값에서 40~60 mW/m<sup>2</sup>까지 증가한다. 따라서 본 시추공에서 열류량의 변화는 해구에 옴파분지가 형성될 당시 약 37 mW/m<sup>2</sup>의 초기값에서 감소하다

가 타이전호상분지 형성시 화성활동에 영향받아 약 87 mW/m<sup>2</sup>까지 높아진 이후, 45 Ma 캐스케이드호로부터 관입받아 열류량의 증가를 겪은 뒤 점차적으로 낮아져 현재 30 mW/m<sup>2</sup>에 이르렀다(Fig. 10).

Amoco B-1 시추공 내 미분화된 옴파 그룹 시료의 비트리나이트 반사도는 깊이에 따른 증가경향을 보이며, Longbell 시추공과 동일 분지내에 있으므로 캐스케이드호 화성활동의 영향권에 있었을 것이나 이상적으로 성숙된 시료는 관찰되지 않는다. 따라서 Longbell 공보다 낮은 최대 열류량을 가지며 보다 빨리 열류량이 감소하도록 하였고, 이와 동시에 시추공 상부 Coos Bay strata의 침식량을 조절하여 최적값을 찾아내었다(Fig. 11).

Section 10 가상시추공은 시추공으로부터 나온 직접 자료가 아닌 그에 대비되는 간접적인 지표 자료를 토대로 하였다. 트러스트단층의 형성은 Tenmile Formation 퇴적 이전에 완료되어 타이분지로 진화하기 전 열적 평형에 도달하였을 것이므로 열류량 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. 본 가상시추공 또한 동일한 남부타이 분지 내에 위치한 앞의 두 시추공과 유사한 열류량 변화를 겪었으며 현재 지표 열류량이 세 시추공 중 가장 높으므로 최고 열류값은 가장 높은 값을 입력하였다. 보정 결과 프로그램 내에서 계산된 비트리나이트 반사도 값보다 실측값이 낮게 나타났으며, 이는 지표에서 채취된 간접 시료로서 지표 노출로 인한 풍화와 퇴적물의 재이동 및 산화에 의해 교란받았기 때문일 수 있

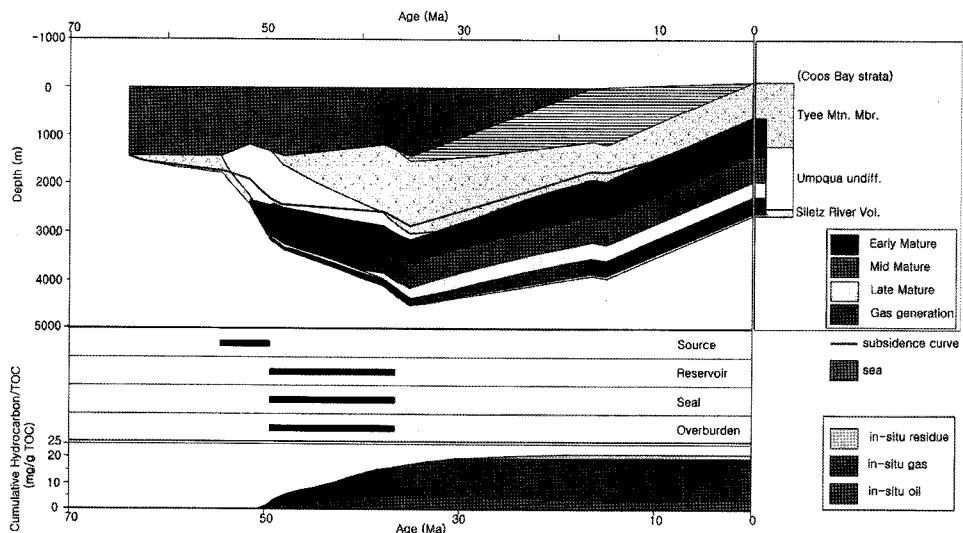


Fig. 13. Composite graph of burial and thermal history in Longbell well. This well reached the early oil maturation stage at 51.7 Ma and gas generation stage at 49.5 Ma in 3,140 m depth. Hydrocarbon started to be generated about 52 Ma, but no expulsion occurred from source rock.

다(Fig. 12). 따라서 계산된 성숙도 모델링 결과를 사용하여 석유생성과 배출을 모델링하였다.

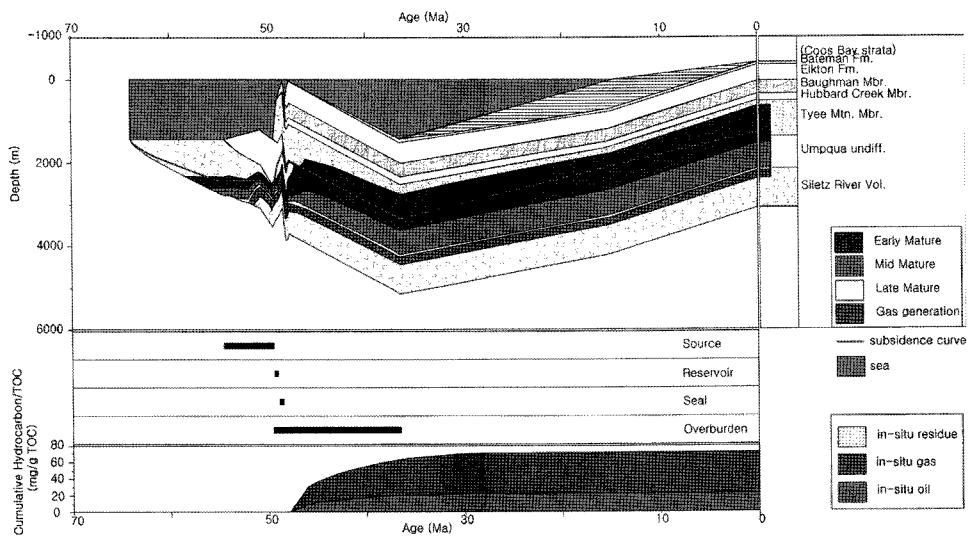
### 6. 모델링 결과

Longbell 시추공 내 퇴적층은 세 시추공 중 가장 단순한 층 구조로 정합적으로 퇴적되었으며 생성 이후 계속적인 침강을 겪은 뒤 35 Ma부터 거의 지속적인 용기를 겪어 오늘날에 이르렀다(Fig. 13). 약 51.7 Ma에 석유생성단계에 도달하였고 약 49.5 Ma에 3,140 m 부근에서 가스생성단계에 접어들어 현재 심도 2,290~2,630 m는 가스 생성이 가능한 열적성숙단계에 있다. 트랩은 49.5~36.6 Ma 사이 형성되었으며 약 52 Ma에 탄화수소가 생성되기 시작하여 현재까지 석유, 가스 및 잔류물질(residue)이 누적되고 있다. 하지만 타 시추공과 비교하였을 때 탄화수소의 생성량은 가장 적으며 근원암으로부터의 배출은 일어나지 않고 있다.

Amoco B-1 시추공은 Siletz River Volcanics로부터 Bateman Formation에 이르기까지 정합적으로 퇴적되었으며 타 시추공과 마찬가지로 상부의 Coos Bay strata는 지층의 용기로 인해 침식되어 사라진 상태이다(Fig. 14). 약 58 Ma부터 심도 2,326 m에서 석유생성이 가능한 열적성숙구간에 도달하였으며 약 52 Ma에는 심도 2,970 m에서 가스생성단계에 이르렀다. 49~48.5 Ma에 트랩이 형성된 후 약 48 Ma부터 탄화수소가 생성되기 시작하여 현재까지 석유와 가스가 계

속 누적되고 있으나 근원암으로부터의 배출은 Longbell 시추공과 마찬가지로 일어나지 않고 있다.

Section 10 가상시추공은 트러스트단층으로 들어온 최하부 Siletz River Volcanics에서부터 침식된 최상부 Coos Bay strata에 이르기까지 가장 다양한 층들이 부정합 또는 정합으로 퇴적되었다. 약 51 Ma에 심도 2,180 m에서 석유가 생성될 초기 성숙단계에 진입하였으며 약 49 Ma에 3,560 m 지점에서 가스가 생성될 성숙단계에 도달하여 현재 2,163~3,341 m 구간이 가스 생성 성숙단계에 놓여있다. 매몰사와 열역사를 나타내는 복합 그래프는 본 시추공의 세가지 잠재 근원암 중 최하부 pre-Tertiary 암층을 기준으로 하였으며 이 암층으로부터 석유 및 가스는 50.5 Ma부터 생성되기 시작하여 현재까지 누적되고 있다(Fig. 15). 나머지 두가지 잠재 근원암인 Coquille River Member와 Remote Member에 대해서도 살펴보면 우선 Coquille River Member는 48.3 Ma부터 석유 및 가스가 생성되기 시작하여 다른 근원암들과 마찬가지로 누적되고 있는 것으로 나타났다(Fig. 16). Remote Member는 Coquille River Member와 같은 시기인 48.3 Ma부터 석유 및 가스가 생성되기 시작하였는데 앞서 다른 근원암들과는 달리 37.5 Ma부터 석유 및 가스의 배출이 일어난 것으로 나타났다(Fig. 17). 이는 Remote Member 내 협재된 높은 TOC 함량의 탄층과 탄질 이암으로부터 유래한 케로젠이 이후 상부에 퇴적된 Coquille River Member에서 Coos Bay strata에 이르는 피복하중암에



**Fig. 14.** Composite graph of burial and thermal history in Amoco B-1 well. This well entered the early oil maturation stage at 58 Ma and gas generation stage at 52 Ma. The trap was formed between 49 Ma and 48.5 Ma. Only hydrocarbon generation was started at about 52 Ma.

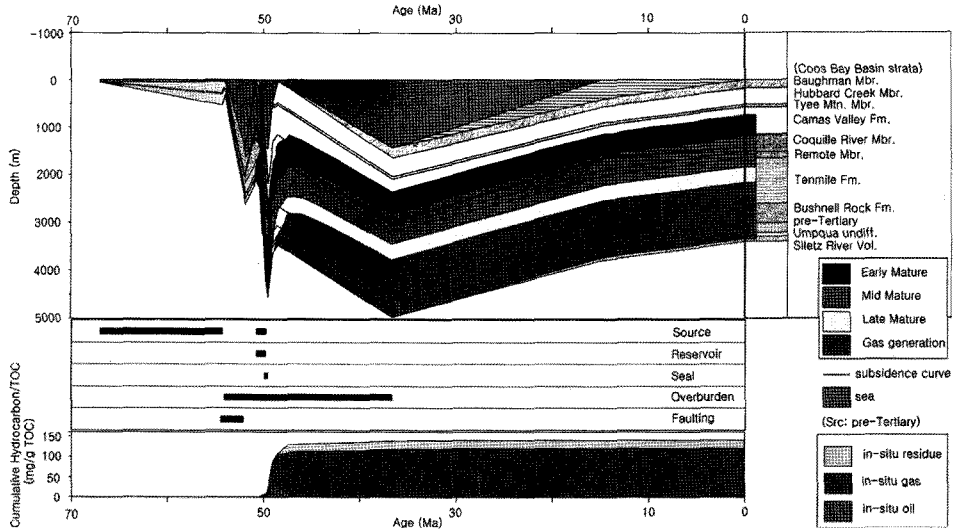


Fig. 15. Composite graph of burial and thermal history in section 10 pseudo-well. The part between 2,163 and 3,341 m in depth is set on the gas generation stage at present. The hydrocarbon generation graph was drawn on the basis of pre-Tertiary strata as a source rock. Hydrocarbon generation was started at about 50.5 Ma.

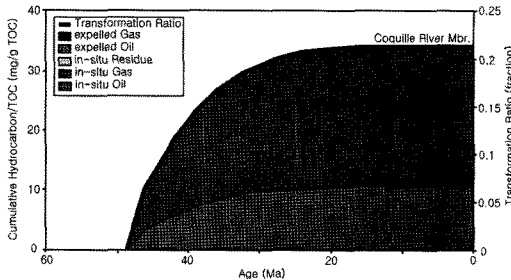


Fig. 16. Hydrocarbon generation in Coquille River Member of section 10 pseudo-well. Oil and gas started to be generated since 48.3 Ma.

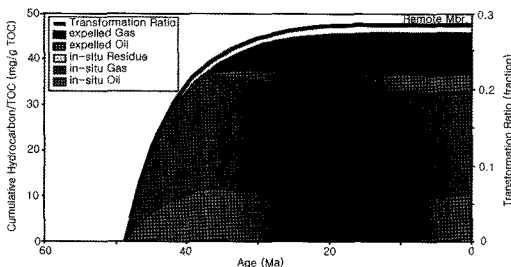


Fig. 17. Hydrocarbon generation and expulsion in Remote Member of section 10 pseudo-well. Oil and gas generations were started at 48.3 Ma and expelled from the Remote Member since 37.5 Ma.

의한 압력을 받았고, 캐스케이드호 화성활동으로부터 유입된 열수에 의해 열적 성숙을 겪어 케로젠이 탄화

수소로 변형되면서 근원암 내 최소포화값을 채워 배출이 일어난 결과로 해석된다.

### 7. 결 론

미국 북서부 오레곤 해안산맥에 위치한 옴과-타이분지는 에오세 초 북미대륙 아래로 해양지각이 섭입함에 따라 해구에 옴과분지가 형성되며 부가퇴적과 트러스트단층이 발달한 이후, 에오세 중기 화산호의 활동이 시작되며 또 다른 섭입에 의해 타이 전호상분지로 진화하였다. 암상 또한 구조적 진화에 따라 심해와 삼각주, 하천 환경을 오가는 이암, 저탁사암, 역암 등이 대부분 정합으로 퇴적되었다. 이러한 옴과-타이분지의 퇴적상과 구조, 화산활동 등의 사건은 에오세 후기, 북부에 비해 상대적으로 깊이 침강하여 쿠스베이분지가 형성되었던 남부타이분지에서 탄화수소 생성 가능성을 지시한다. 시추공 자료를 통해 잠재 근원암의 지화학 및 석유시스템 분석을 시행한 결과 생성된 케로젠의 대부분이 타입 III로서 가스가 주로 형성될 것이며, 미분화된 옴과 그룹의 이암과 pre-Tertiary 이암 압층, Remote Member와 Coquille River Member에 협재되어 있는 탄층과 탄질 이암이 잠재 근원암으로 역할을 할 것임을 알 수 있다. 이와 함께 구조적 요인으로 에오세 후기 이후 남부 타이분지가 상대적으로 깊이 매몰되어 Coos Bay strata가 퇴적된 후 다시 융기된 것, 그리고 타이분지의 퇴적이 거의 끝난 때 시작된



캐스케이드호의 화산활동에 의해 형성된 관입암과 기존에 형성되어 있는 트리스트단층을 따른 열수의 유입 및 이동, 이 두가지 요소에 의한 차별적인 열적성숙은 남부타이분지에서 탄화수소가 생성 및 성숙될 수 있는 석유시스템의 형성을 지시한다. 이를 토대로 세 시추공으로부터 자료를 취합하여 공극률 최적화를 실시하고, 타이분지의 열류량 변화에 영향주는 지질학적 요소들인 타이 전호상 분지의 형성 시 화산활동 및 이후 캐스케이드호의 화산활동에 따른 관입 및 열수의 유입 등을 고려하여 열류량 변화 분석, 침식량 추정을 통한 성숙도 최적화를 통해 석유시스템 모델링을 실시하였다. 그 결과 세 시추공 모두에서 근원암, 저류암, 덮개암, 피복허중암을 갖춘 트랩이 49~36.6 Ma 사이 형성되었고 약 52~48 Ma 사이 탄화수소가 생성된 것으로 나타났다. 특히 Remote Member에서는 근원암으로부터 탄화수소 배출이 일어났음을 확인하였으며 이는 Remote Member에 협재된 탄층 및 탄질 이암의 풍부한 유기물 함량과 상부 Coos bay strata에 의한 압력, 캐스케이드호 화산활동으로부터 유입된 열수에 의한 열적 성숙에 기인한다.

## 사 사

본 논문은 학술진흥재단 BK21의 지원 하에 수행되었으며 이에 감사한다. 본 논문을 심사하여 주신 한국 지질자원연구원 손병국 박사과 익명의 심사자에게 감사드린다.

## 참고문헌

- Allen, P.A. and Allen, J.R. (1990) Basin analysis: principles and applications. Blackwell Scientific Publications, London, 301p.
- Amoco Production Company (1983) Source rock evaluation: Eocene cuttings, Florida Exploration No. 1-4 Harris well, Douglas County, Oregon. Amoco Production Company Internal Report.
- Amoco Production Company (1985) Oil correlation evaluation: Drilling mud analysis, Amoco No. B-1 Weyerhaeuser well, Douglas County, Oregon. Amoco Production Company Internal Report.
- Armentrout, J.M. and Suek, D.H. (1985) Hydrocarbon exploration in western Oregon and Washington. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 69, p. 627-643.
- Baldwin, E.M. and Perttu, R.D. (1980) Paleogene stratigraphy and structure along the Klamath borderland, Oregon; in Oles, G.F., Johnson, J.G., Niem, A.R. and Niem, W.A., (eds.) Geologic field trips in western Oregon and southwestern Washington. Oregon Dept. of Geology and Mineral Industries Bulletin 101, p. 9-37.
- Blackwell, D.D., Bowen, R.G., Hull, D.A. and Riccio, J. (1982) Heat flow, arc volcanism, and subduction in Northern Oregon. Journal of Geophysical Research, v. 87, no. B10, p. 8735-8754.
- Blackwell, D.D. and Steele, J.L. (1992) Geothermal Map of North America: Decade of North American Geology, DNAG, Continent-Scale Map-006. Geological Society of America, Boulder, CO.
- Browning, J.L. and Flanagan, T. (1980) Source rock study of the lower Tertiary formations of southwestern Oregon. Unpublished reports on file in offices of Oregon Department of Geology and Mineral Industries.
- Brown and Ruth Laboratories Incorporation (1983) Regional petroleum geochemistry of the onshore and offshore sediments of Washington and Oregon: Geochemical reports on General Petroleum Long Bell No. 1, Sutherlin Unit No. 1, and Amoco Weyerhaeuser F-1 wells. Unpublished reports on file in offices of Oregon Department of Geology and Mineral Industries.
- Chan, M.A. and Dott, R.H., Jr. (1983) Shelf and deep-sea sedimentation in Eocene forearc basin, western Oregon - fan or non-fan?. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 67, p. 2100-2116.
- Dow, W.G. (1977) Kerogen studies and geological interpretation. Journal of Geochemical Exploration, v. 7, p. 77-99.
- Falvey, D.A. and Middleton, M.F. (1981) Passive continental margins: Evidence for a prebreakup deep crustal metamorphic subsidence mechanism. Oceanologic Acta Special Publication, p. 103-114.
- Heller, P.L. and Ryberg, P.T. (1983) Sedimentary record of subduction to forearc transition in the rotated Eocene basin of western Oregon. Geology, v. 11, p. 380-383.
- Law, B.E., Anders, D.E., Fouch, T.D., Pawlewicz, M.J., Lickus, M.R. and Molenaar, C.M. (1984) Petroleum source rock evaluation of outcrop samples from Oregon and northern California. Oregon Geology, v. 46, p. 77-81.
- Lee, B.R. (2008) Petroleum system modeling of continental shelf area, southwestern margin of the Ulleung basin, East Sea. Master Thesis, University of Science and Technology, 75p.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G. (1994) The petroleum system from source to trap. American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, p. 3-24.
- Mobil Oil Corporation (1980) Source rock data on Map of southwest Oregon. Mobil internal report.
- Molenaar, C.M. (1985) Depositional relations of Umpqua and Tyee Formations (Eocene), Southwestern Oregon. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 69, p. 1217-1229.
- Newton, Jr. V.C. (1980) Prospects for oil and gas in the Coos basin, western Coos, Douglas, and Lane counties, Oregon. Oregon Department of Geology and Mineral Industries Oil and Gas Investigation 6.
- Niem, A.R. and Niem, W.A. (1990) Geology and oil, gas, and coal resources, southern Tyee basin, southern Coast Range, Oregon. Oregon Department of Geol-

- ogy and Mineral Industries, Open-File Report O-89-3.
- Niem, W.A., Niem, A.R. and Snively, P.D., Jr. (1992) Early and Mid-Tertiary oceanic realm and continental Margin - western Washington-Oregon coastal sequence; *in* Burchfiel, B.C., Lipman, P.W., and Zoback, M.L., eds., The Cordilleran Orogen. Conterminous U.S.: Geological Society of America, v. G-3, p. 265-270.
- Ryu, I.C., Niem, A.R. and Niem, W.A. (1992) Schematic fence diagram of the southern Tyee basin, Oregon Coast Range, showing stratigraphic relationships of exploration wells to surface measured sections. Oregon Department of Geology and Mineral Industries Oil and Gas Investigation 18, p. 28.
- Ryu, I.C., Niem, A.R. and Niem, W.A. (1996) Oil and gas evaluation of the southern Tyee basin, Oregon Coast Range. Oregon Department of Geology and Mineral Industries Oil and Gas Investigation 19, p. 141.
- Ryu, I.C. (2008) Source rock characterization and petroleum systems of Eocene Tyee basin, southern Oregon Coast Range, USA. *Organic Geochemistry*, v. 39, p. 75-90.
- Snively, P.D., Jr., Wagner, H.C. and MacLeod, N.S. (1964) Rhythmic-bedded eugeosynclinal deposits of the Tyee Formation, Oregon Coast Range. *Kansas Geological Survey Bulletin*, v. 169, p. 461-480.
- Snively, P.D., Jr., MacLeod, N.S. and Wagner, H.C. (1968) Tholeiitic and alkalic basalts of the Eocene Siletz River Volcanics, Oregon Coast Range. *American Journal of Science*, v. 266, p. 454-481.
- Snively, P.D., Jr. (1987) Tertiary geologic framework, neotectonics, and petroleum potential of the Oregon-Washington continental Margin; *in* Scholl, D.W., Grantz, A., and Vedder, F.G., (eds.) *Geology and resource potential of the continental Margin of western north America and adjacent ocean basins - Beaufort Sea to Baja California*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, v. 6, p. 305-335.
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.D. (1990) Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 74, p. 1559-1570.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H. (1978) *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, New York. 538p.
- Walker, G.W. and MacLeod, M.S. (1991) Geologic map of Oregon. U.S. Geological Survey, scale 1:1,500,000.
- 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*, v. 76, p. 31-46.
- Waples, D.W. and Marz, R.W. (1998) The universality of the relationship between vitrinite reflectance and transformation ratio. *Organic Geochemistry*, v. 28, p. 383-388.
- Wells, R.E., Engebretson, D.C., Snively, Jr., P.D. and Coe, R.S. (1984) Cenozoic plate motions and the volcanotectonic evolution of western Oregon and Washington. *Tectonics*, v. 3, p. 275-294.
- Wells, R.E. and Heller, P.L. (1988) The relative contribution of accretion, shear, and extension to Cenozoic tectonic rotation in the Pacific northwest. *Geological Society of America Bulletin*, v. 100, p. 325-338.
- Welte, D.H. and Yalcin, M.N. (1987) Basin modelling - A new comprehensive method in petroleum geology. *Advances in Organic Geochemistry*, v. 13, p. 141-151.