

울릉분지 6-1 광구 유기물의 열적 성숙도 특성

Characteristics on Thermal Maturity of Organic Matter, Block VI-1 in the Ulleung Basin

정태진 (Tae-Jin Cheong)* · 이영주 (Young-Joo Lee)* · 류병재 (Byong-Jae Ryu)* · 오재호 (Jae-Ho Oh)* · 김지훈 (Ji-Hoon Kim)* · 이성숙 (Songsuk Yi)** · 박세진 (Se-Jin Park)**

요 약 : 울릉분지의 VI-1에서 최근에 상업적인 가스전이 발견되어 생산하기 시작하였다. 이와 같은 상업적 가스전을 발견할 때까지 많은 시추 탐사가 이루어졌으며, 많은 탐사 자료가 축적되었다. 이들 탐사자료를 이용하여 VI-1 광구 내의 석유 시스템 규명에 필요한 유기물의 열적 성숙 특성을 연구하였다. 광구 내에서 유기물의 열적 성숙은 지역에 따라 다르게 나타난다. 돌고래 5 구조에서 석유 생성대의 심도가 가장 얕으며, 이를 중심으로 하여 북쪽과 서쪽으로 가면서 석유 생성대 상한에 도달하는 심도가 깊어진다. VI-1광구의 변형대 2 지역에서는 구조 운동 이전에 현재의 열적 성숙도에 도달한 반면 다른 지역에서는 구조운동 이후에도 열적 성숙이 진행되었을 가능성을 보여준다.

주요어 : 울릉 분지, 석유 시스템, 열적 성숙도, 석유 생성대, 구조운동

Abstract : A total of 17 exploratory wells were drilled from the Block VI-1 and recently commercial gas field was discovered in the Ulleung Basin. Thermal maturity of organic matter in the sediments from the drilling wells were evaluated for the characterization of the petroleum system of the basin. Level of thermal maturation of organic matter is different depending on the area to area. The top of oil window is located at about 800 m in the Dolgorae 5 area, and it is relatively deeper in both western and northern areas. It seems that thermal maturity of organic matter reached present stage before tectonism in the deformed zone 2, whereas thermal maturation continued after tectonism in other zones.

Key words : Ulleung Basin, petroleum system, thermal maturation, oil window, tectonism

서 론

동해의 남서쪽에 위치하고 있는 울릉 분지는 서쪽 및 남쪽에서는 한반도와 일본열도의 대륙사면과 접하며, 동쪽과 북쪽으로는 오키뱅크 (Oki Bank) 및 한국대지와 접한다. 한반도와 접하고 있는 분지의 서측은 좁은 대륙붕과 가파른 경사의 대륙사면과 접하고 있다. 반면 남쪽 사면은 완만한 경사를 보이며 대한해협과 연결된다. VI-1 광구는 울릉분지의 남쪽에 위치하며, 1972년 돌고래 1공을 시작으로 현재까지 돌고래, 고래 구조들에서 총 17개 공이 시추되었다. 탐사 시추공 중에서 돌고래 1공에서는 가스징후 (gas show), 돌고래 2, 돌고래 3, 돌고래 5, 돌고래 5-1에서는 가스를 발견하였다. 고래 1, 고래 5, 고래 5-1, 고래 5-2, 고래 5-3 시추공에서는 가스 및 컨테네이트를 발견한 바 있으며, 고래 5 구조에서 발견된 가스는 상업성이 확인되었다.

지금까지 VI-1 광구에 대한 연구는 주로 분지 형성과 조구조 운동 연구 (Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992; Yoon, 1995; Lee *et al.*, 1999), 물리탐사 자료해석을 통한 구조 및 층서 규명 연구 (서만철 외, 1993; Park, 1998; Lee and Suk, 1998; Lee *et al.*, 2001) 등이 이루어졌다. 울릉분지에서 석유 지

화학적 연구는 구조와 층서분야의 연구에 비해서 비교적 적게 수행되었으며, 울릉분지의 퇴적 작용과 탄화수소 생성 모델링 연구 (Lee and Kim, 2002), 천부 탄화수소 가스의 특성에 대한 연구 (이영주 외 1999a, 1999b, 2003)가 수행된 바 있다. 그 외에 여러 시추공 시료의 지화학적, 암석학적, 고생물학적 분석이 시추공별로 이루어졌다 (한국석유개발공사, 1989a, 1989b, 1990a, 1990b, 1991, 1992, 1994, 1995a, 1995b, 1995c; PEDCO, 1998; KNOC, 2003).

이 논문에서는 지금까지 VI-1광구에서 획득된 석유지화학적 자료들을 재해석하여 유기물의 열적 성숙 특성을 밝힘으로써 향후 VI-1 광구의 석유시스템 규명을 위한 연구 방향을 제시하고자 한다. 열적 성숙도 연구에서 사용된 자료는 대부분 시추시료 분석 결과로 한국석유공사에 의해서 수립된 연구 개발 계획을 수행함으로써 사용이 가능하였다.

지질개요

연구지역은 동북아시아 대륙과 일본 열도에 의해 둘러싸인 반폐쇄성 주변해 (semi-closed marginal sea)인 동해의 남서부에 발

*한국지질자원연구원 석유해저자원연구부 (Marine and Petroleum Resources Research Div. KIGAM, 30 Gajeong-Dong Yusong-Gu 305-350); cheong@kigam.re.kr

**한국석유공사 기술실 (Technical Department, KNOC 1588-14, Kwangyang-Dong Anyang City, Kyungki-Do 430-060)

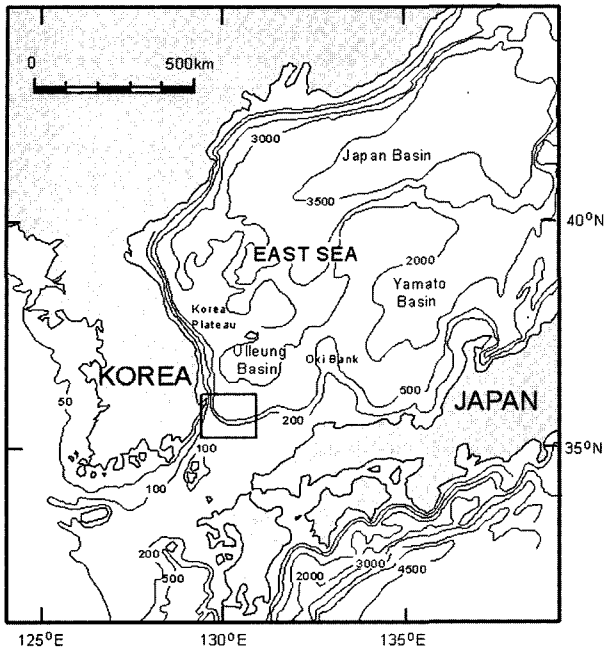


Fig. 1. Physiographic map of the study area (contour line: bathymetry in meters, □: study area).

달된 울릉분지의 남부 대륙붕에 위치하고 있다 (Fig. 1). 최대 수심이 약 3,700 m에 달하는 동해는 남쪽으로는 대한해협, 동쪽으로는 쓰가루 (Tsugaru) 해협과 소야 (Soya) 그리고 북쪽으로는 타타르 (Tartar) 해협을 통하여 각각 동중국해, 그리고 오호츠크해 (Sea of Okhotsk)와 연결된다.

울릉분지는 북쪽에 위치한 한국대지와 동쪽의 오키뱅크 (Oki Bank)에 의해 일본분지 (Japan Basin) 및 야마토편지 (Yamato Basin)와 구분되고, 한반도와 접하는 울릉분지의 서부에는 좁은 대륙붕 (continental shelf)과 급경사의 대륙사면 (continental slope)이 발달되어 있다 (Fig. 1). 분지의 남부에 발달된 사면은 완만한 경사를 보이며, 일본열도 (Japan-Arc)와 접하고 있다. 울릉분지는 북동쪽으로 가면서 수심이 증가하는 양상을 보이며, 울릉도와 독도 사이에 수심이 깊고 좁은 형태로 발달되어 있는 평원간 통로 (interplain gap: 수심 3,000 m, 너비 70 km)를 통해 일본분지로 연결된다 (Chough et al., 1984).

해저면 지진계 (OBS: Ocean Bottom Seismometer)를 이용한 탄성과 속도분석에 의하면 울릉분지에 분포된 지각은 두께가 약 15 km로 일반적인 해양지각에 비해 두껍다 (Ludwig et al., 1975; 석봉출 외, 1992; Kim et al., 1994; Park et al., 1996). 서만철 외 (1993), Stroev and Fujimoto (1996) 등은 중력연구를 통해 이 지각을 대륙지각과 해양지각의 중간지각으로 보고하였다. 울릉분지에 분포된 기반암의 암상과 지질시대는 기반암까지 시추가 이루어지지 않은 관계로 정확히 규명되지 않고 있다. 탄성과 탐사 및 중·자력 탐사자료 의하면 분지 중앙부의 음향 기반암은 해수면으로부터 왕복주사 5초~6초의 깊이에 분포하고 있으며, 남쪽으로 가면서 분포심도가 깊어지는 것으로 해석되었다 (Yoon et al., 1997).

울릉분지의 형성은 유라시안 판, 필리핀 판 (Philippine Plate), 태평양 판 및 오호츠크 판 운동과 관련된 열개 및 분지확장에 의한 결과로 알려져 있다. 그러나 울릉분지에서는 중기 마이오세 퇴적층까지만 시추가 이루어졌기 때문에 시추공 중심도 하위에 분포된 퇴적층의 지질시대 및 기반암에 대한 정확한 정보가 거의 없다. 분지의 형성 모드와 열개작용이 시작된 시기에 대한 해석은 연구자에 따라 차이가 있다. 즉, 동해에서 분지의 열개가 시작된 시기는 후기 올리고세에서 초기 마이오세까지로 해석되었으며, 분지의 형성 모드 또한 후열도 열개, 인리형 열개 및 리프팅 등으로 상이하게 해석되었다 (Ingle, 1975; Chough and Barg, 1987; Jolivet and Tamaki, 1992; Yoon, 1994; Yoon et al., 1997; Shin et al., 1997; Park, 1998; Park et al., 2002). 비교적 최근의 연구결과인 Park et al. (2002)에 의하면 울릉분지의 지구조 발달은 3단계로 구분된다. 후기 올리고세에서 초기 마이오세 동안 후열도 확장에 의해 울릉분지의 남서 주변부로부터 분지가 형성되기 시작하였으며, 중기 마이오세 말 동해에 영향을 미치고 있는 응력장은 신장력에서 횡압력으로 바뀌었다. 울릉분지는 중기와 후기 마이오세에 구조 변형을 받았으며, 융기된 지역으로부터 삭박된 퇴적물들은 지형적으로 낮은 지역에 재퇴적되었다. 플라이오세부터 분지의 주변부는 침강하기 시작하였으며, 이 침강작용은 현재까지 지속되고 있다.

장사방형의 형태로 발달되어 있는 울릉분지의 북쪽과 서쪽 경계부는 경사가 급하여 대규모의 사면침식, 사면붕락, 사면사태, 그리고 쇄설류 퇴적체가 특징적으로 발달되어 있다. 남쪽과 동쪽 경계부는 다소 경사가 완만하지만 역시 다양한 사면침식과 사면붕락, 사면사태, 소규모 협곡이 발달하고 있다. 분지평원의 수심은 약 2,000 m~2,500 m이며, 북동부에 위치한 몇 개의 섬과 화산 기원의 해산을 제외하고는 일반적으로 평탄한 형태를 갖는다. 울릉 평원간 통로에는 강한 저층류의 작용을 지지하는 침식기원의 해저수로가 저탁류 퇴적층 내에 잘 발달되어 있다 (Chough, 1983).

유기물의 열적 성숙

시추공별 열적 성숙도

고래 1, 고래 1-1 및 고래 1-2공 시료의 열분석 결과를 살펴보면 심도 1,700 m 부근부터 일부 시료들이 석유 생성대의 상한으로 알려진 T_{max} 435°C 이상을 보인다. 따라서 이 심도를 석유 생성대의 상한으로 볼 수도 있다. 그러나 심도 2,400 m 부근까지는 T_{max} 가 435°C 이상인 시료의 빈도가 적고, 심도의 증가에 따른 T_{max} 값의 증가 경향도 뚜렷하지 않다 (Fig. 2). 반면에 2,400 m 부근부터 435°C 이상의 T_{max} 값들이 연속적으로 나타나며, 심도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그리고 고래 1공에서는 심도 4,200 m에서도 석유 생성대에 머물러 있으므로 1,700 m를 석유 생성대의 상한으로 볼 경우 석유 생성대의 구간이 2,500 m 이상으로 지나치게 긴 것으로 생각된다. 따라서 2,400 m 부근에서 석유 생성대의 상한에 진입하는 것으로 보는 것이 타당하다 (Fig. 3).

고래 1공에서는 비트리나이트 반사도가 3,500 m까지 측정되었

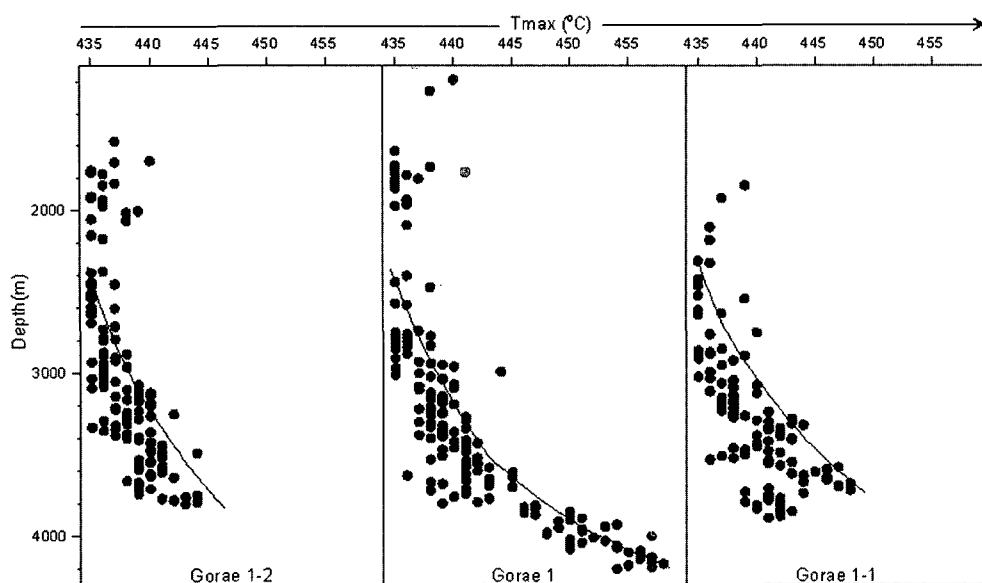


Fig. 2. Variation of T_{max} with depth, Goraе 1, 1-1, and 1-2.

는데 석유 생성대의 상한으로 알려진 Ro 0.6% 이상을 보이는 시료가 없다 (Figs. 3, 4). 반사도 측정 결과는 분산이 매우 심하지만 약 2,300 m까지는 심도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고, 이후에는 증가하지 않는다. 따라서 공 내 봉락의 영향을 많이 받은 것으로 보인다. 고래 1-1공에서는 약 2,500 m까지 측정되었는데 Ro 0.6% 이상을 나타내는 시료가 없다 (Figs. 3, 4). 고래 1공과 마찬가지로 분산이 심하지만 심도에 따른 증가경향은 나타난다. 고래 1-2공에서는 약 3,400 m까지 반사도가 측정되었는데 역시 Ro 0.6% 이상을 보이는 시료가 없다 (Figs. 3, 4). 심도에 따른 증가경향을 보이기는 하지만 분산이 심하고 규칙적이지 못하므로 공 내 봉락의 영향을 받은 것으로 보인다. 따라서 비트리나이트 반사도에 의하여 석유 생성대의 상한을 판단하기는 어렵

다. 단지 심도에 따른 반사도 증가 경향이 비교적 뚜렷한 고래 1 및 1-1공의 반사도 변화 추세선에 의하여 추정을 하면 심도 2,500 m 부근에서 석유 생성대의 상한에 도달할 수 있을 것으로 생각한다 (Fig. 4). 반사도 측정 자료에서 반사도 값이 상위 심도보다 증가하는 것들의 변화 추세선을 Fig. 4의 선 A, B 및 C와 같이 그릴 수 있을 것이다. 왜냐하면 시추 압편 시료의 반사도 측정에서는 일반적으로 상위의 값보다 작은 것은 공 내 봉락의 영향을 받은 것으로 보기 때문이다.

생물표기화합물의 모래탄/호판 비율은 열적 성숙도가 높아지면 감소하며 (Peters and Moldovan, 1993), 0.5 이상이면 대체로 미성숙 단계에 머물러 있는 것으로 알려져 있다. 고래 1, 1-1, 1-2공 분석결과를 보면 분석간격이 크기는 하지만 2,500 m 보다

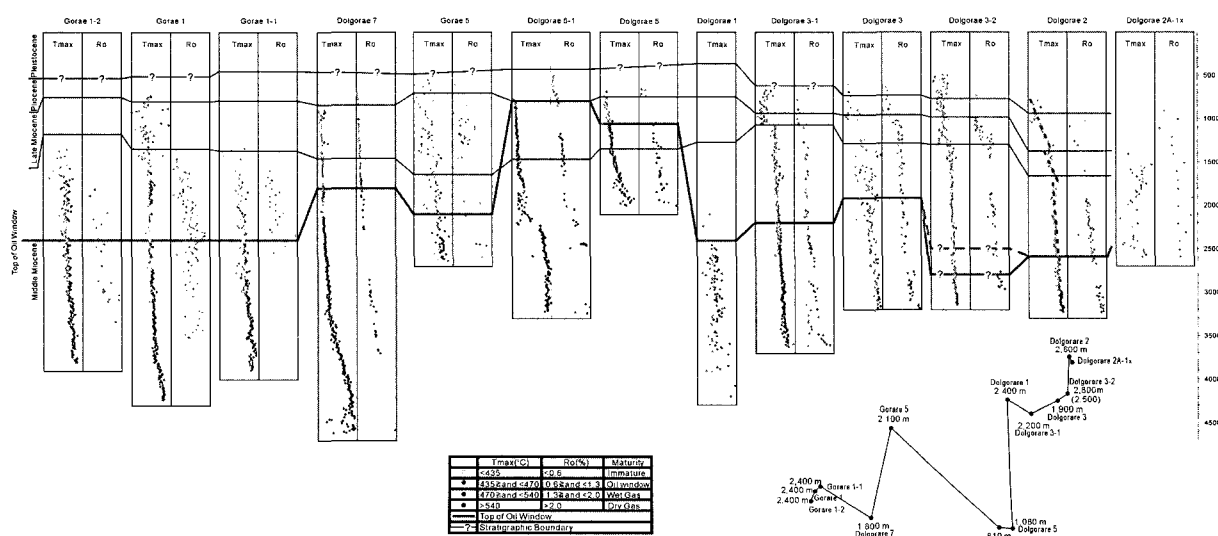


Fig. 3. Variation of Rock-Eval T_{max} and vitrinite reflectance with depth and depth of oil window top in the Ullung Basin.

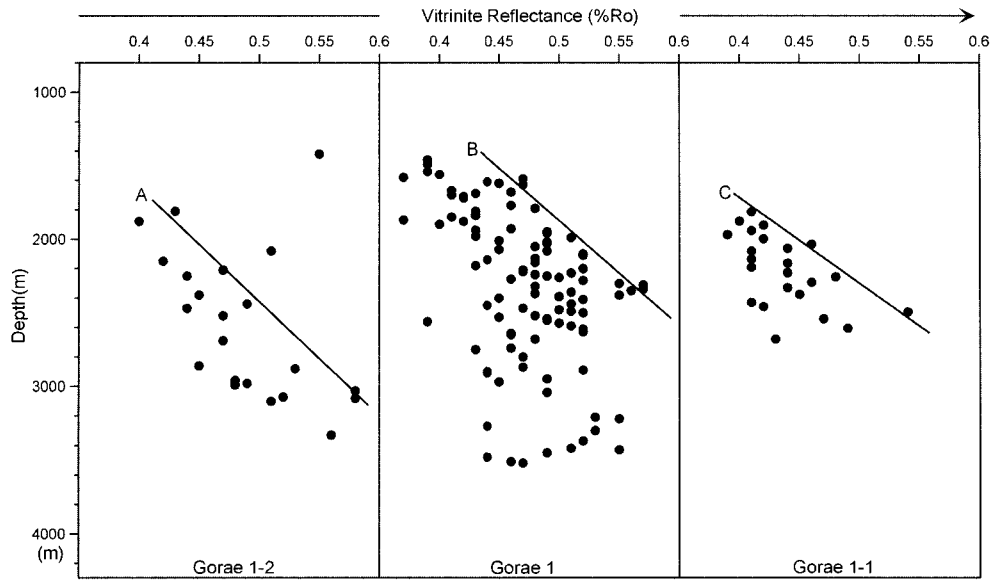


Fig. 4. Variation of vitrinite reflectance with depth, Gorae 1, 1-1, and 1-2.

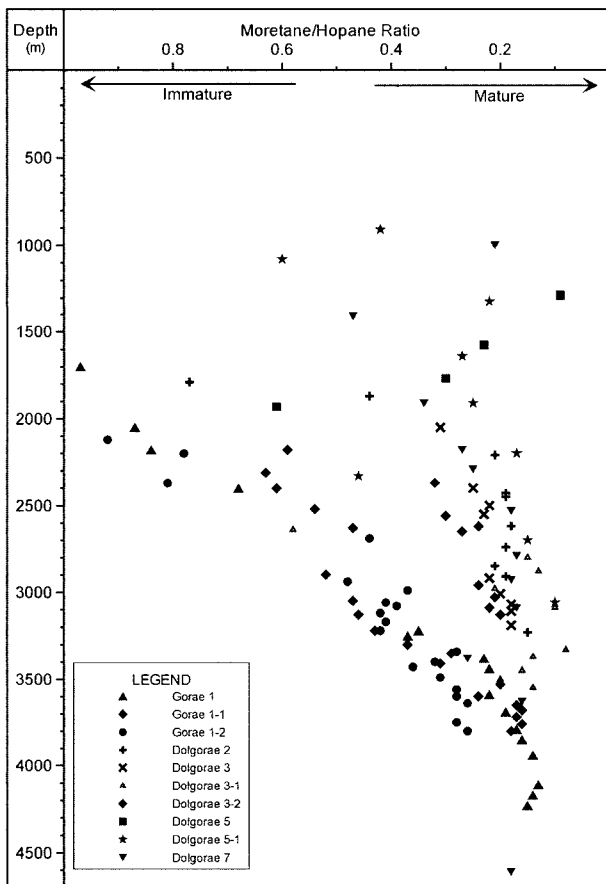


Fig. 5. Variation of Moretane/Hopane ratio with depth in the Ulleung Basin: smaller value indicate higher maturation.

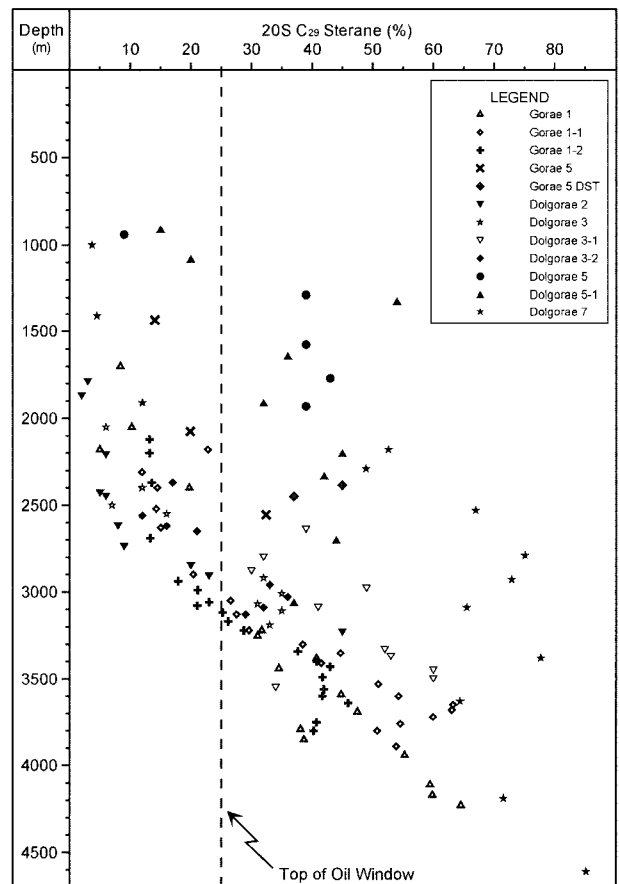


Fig. 6. Variation of 20S Sterane proportion with depth in the Ulleung Basin.

얕은 구간에서는 분석된 시료가 모두 0.5 이상의 값을 보인다 (Fig. 5). 따라서 2,500 m 이내의 구간은 미성숙단계에 머물러 있

는 것으로 볼 수 있다. 20S C₂₉ 스테란 (sterane)의 함량비는 3,000 m까지 미성숙 단계에 머물러 있는 것으로 나타난다 (Fig. 6).

이상과 같이 고래 1구조 지역에서는 1,700 m 부근에서 T_{max} 가 435°C 이상의 값을 보이는 시료들이 있다. 하지만 비트리나이트 반사도, 생물표기 화합물, 공기층가스 분석결과 등을 고려할 때 1,700 m 부근을 석유 생성대의 상한으로 보기는 어렵다. 적어도 2,400 m보다 깊은 곳에서 석유 생성대의 상한에 진입할 것으로 생각된다 (Figs. 3, 5, 6).

돌고래 7공에서는 열적 성숙도가 건성 가스 생성대에 도달한 것이 확인된다 (Fig. 3). 열분석 T_{max} 는 1,800 m 부근에서 석유 생성대의 상한인 435°C에 도달하고, 비트리나이트 반사도 역시 0.6% Ro에 도달한다. 따라서 석유 생성단계의 상한에 도달하는 심도는 약 1,800 m로 생각된다. 습성가스 생성대의 상한인 T_{max} 470°C와 비트리나이트 반사도 1.3% Ro는 각각 심도 3,400 m 부근과 3,100 m 부근에서 도달한다. 그리고 건성가스 생성대의 상한인 T_{max} 540°C는 4,200 m 부근에서 도달한다. 고래 5공의 시추 시료는 공 내 붕락의 영향을 심하게 받아 분석값들의 분산이 매우 심하여 열적 성숙도 판단에 어려움이 따른다 (Fig. 3). T_{max} 가 석유 생성대의 상한인 435 °C 이상에 처음으로 도달하는 심도는 약 1,500 m와 1,900 m이지만 3개의 시료가 고립되어 나타나기 때문에 신빙성이 떨어진다. 435°C의 값이 연속적으로 나타나기 시작하는 심도는 약 2,100 m이다. 이 심도부터는 공 내 붕락의 영향을 심하게 받았지만 심도의 증가에 따라 T_{max} 값도 증가하는 경향을 보인다. 비트리나이트 반사도는 등간격이 아니지만 전 구간에 걸쳐 측정되었다. 공 내 붕락의 영향으로 반사도 값의 분산이 심하지만 전체적으로 심도와 함께 증가한다. 그러나 석유 생성대의 상한인 0.6% Ro 이상의 값을 보이는 시료는 없다 (Fig. 3). 이것도 열분석 T_{max} 에 의한 열적 성숙도가 심도 1,900 m에서 석유 생성대에 도달하였다고 보는 것을 어렵게 하는 요인의 하나이다. 그리고 3개 시료만 분석되었지만 20S C₂₉ 스테란의 함량비는 석유 생성대 진입 심도가 2,000 m 부근임을 보여 준다. 따라서 석유 생성대의 상한은 1,900 m보다 깊은 2,100 m 부근에 위치할 가능성이 높다 (Fig. 6).

돌고래 5 및 5-1공에서는 각각 1,100 m와 800 m 부근에서 석유 생성대의 상한에 도달한다 (Fig. 3). 습성 가스 생성대의 상한을 지시하는 T_{max} 와 반사도 값이 돌고래 5공의 총 심도 부근 (약 2,000 m)에서 각각 1개씩 확인되었다. 비록 1개의 시료이기는 하지만 전체적인 변화곡선에서 벗어나지 않고, 돌고래 5-1공의 2,000 m 부근에서 습성가스 생성대 상한 (T_{max} 470°C, 반사도 1.3%; Peters and Cassa, 1994)에 도달하는 것으로 미루어 볼 때 돌고래 5공에서도 습성가스 생성대의 상한을 심도 약 2,000 m로 볼 수 있다. 돌고래 5-1공은 심도 2,450 m에서 건성 가스 생성대의 상한인 T_{max} 540°C와 비트리나이트 반사도 2% Ro를 보인다.

돌고래 1공에서는 열분석 T_{max} 자료만 열적 성숙도 해석에 이용될 수 있다 (Fig. 3). T_{max} 값은 분산이 심하여 해석에 어려움이 따르나 석유 생성대의 상한인 435°C 이상의 값이 심도 2,400 m 부근부터 계속하여 나타나며 뚜렷하지는 않지만 심도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 볼 수 있다 (Fig. 3). 따라서 이 심도가 석유 생성대의 상한일 가능성이 있다.

돌고래 3-1공은 돌고래 3공과 함께 심도 1,600 m 부근에서 몇

몇 시료가 435°C 이상의 T_{max} 값을 보이거나 전체적인 T_{max} 변화 경향에서 벗어나다 (Fig. 3). 그리고 이 심도를 지나면 상당히 긴 구간에서 다시 미성숙 단계의 T_{max} 값을 보이며 심도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 따라서 이 심도를 석유 생성대의 상한으로 보기는 어렵다. 연속적으로 435°C 이상의 값을 보이는 곳은 심도 2,100~2,200 m부터이다. 비트리나이트 반사도 값은 2,300 m 부근에서 0.6% Ro를 보이기 시작하고 (Fig. 3), 생물표기 화합물의 모레탄/호판 비도 2,000 m부터 분석된 모든 시료가 0.5 이하를 보인다 (Fig. 5). 따라서 돌고래 3-1공의 석유 생성대 상한 도달 심도는 T_{max} 가 연속적으로 435°C 이상을 보이기 시작하는 2,100 m와 반사도가 0.6% 이상을 보이기 시작하는 2,300 m의 중간인 약 2,200 m를 돌고래 3-1의 석유 생성대 상한으로 보는 것이 타당할 것으로 생각된다 (Fig. 3).

돌고래 3공에서도 돌고래 3-1공과 마찬가지로 몇몇 시료들이 1,400 m 부근에서 T_{max} 435°C 이상을 보이다가 1,900 m 부근에서 다시 두 개 시료가 435°C 이상의 값을 보인다 (Fig. 3). 연속적으로 435°C 이상의 값을 보이는 구간은 2,600 m부터이다. 1,400 m 부근의 값들은 전반적인 T_{max} 변화 경향에서 벗어나 있고, 비트리나이트 반사도 값도 1개 시료만이 1,500 m에서 0.6% Ro 이상의 값을 보이므로 1,500 m를 석유 생성대의 상한으로 보기는 어렵다. 반면에 1,900 m 부근에서 반사도는 0.6% Ro 이상의 값들을 연속적으로 보이기 시작한다. 따라서 T_{max} 값과 반사도 값을 함께 고려할 때 돌고래 3공의 열적 성숙도는 1,900 m 부근에서 석유 생성대의 상한에 도달하는 것으로 볼 수 있다 (Fig. 3). 그러나 생물표기 화합물 분석결과 (Figs. 5, 6)는 석유 생성대 상한이 2,500 m일 것으로 나타나기 때문에 돌고래 3공의 석유 생성대 상한을 1,900 m로 단정하기는 어렵다.

돌고래 3-2공에서는 2,800 m 부근에서 435°C 이상의 T_{max} 값이 나타나기 시작하여 총 심도까지 연속적으로 나타난다. 비트리나이트 반사도는 2,500 m 부근에서 한 개의 시료가 0.6% Ro 이상의 값을 보이고 연속적으로 0.6% 이상의 값을 보이기 시작하는 심도는 약 2800 m부터이다. 20S 스테란의 함량비는 석유 생성대의 상한이 2,700~2,800 m일 가능성을 보여준다 (Fig. 6). 따라서 돌고래 3-2공의 열적 성숙도는 2,800 m에서 석유 생성대의 상한에 도달하는 것으로 생각된다. 그렇지만 2,500 m 부근부터 생물표기 화합물의 모레탄/호판 비가 연속적으로 0.5 이하를 나타내는 것과 2,500 m 부근의 반사도가 0.6 혹은 0.59%의 값을 보이는 것을 고려할 때 석유 생성대의 상한이 2,500 m 부근일 가능성을 배제할 수 없다.

돌고래 2공에서 T_{max} 는 2,600 m 부근부터 435°C 이상의 값을 연속적으로 보이기 시작하고 비트리나이트 반사도는 2,500 m 부근부터 0.6% 이상의 값을 보인다 (Fig. 3). 생물표기 화합물의 모레탄/호판 비는 1,870 m와 2,210 m의 시료들이 석유 생성대를 지시하는 0.5 이하의 값을 보이고 (Fig. 5), 20S C₂₉ 스테란 함량비는 3,000 m까지 미성숙 단계에 머물러 있는 것으로 나타난다 (Fig. 6). 이와 같이 열적 성숙도 지시자에 따라 석유 생성대 상한의 심도가 상이하지만 그 차이가 가장 작은 T_{max} 와 반사도가 지시하는 2,600 m~2,500 m가 돌고래 2공의 석유 생성대 상한일 것으로 생각된다.

열적 성숙의 시기

12개 시추공의 열적 성숙도는 현재의 층서 경계와 무관하게 변화하는 것으로 보인다 (Fig. 3). 즉, 각 시추공에서 어떠한 층서 경계의 위치 (심도)와 열적 성숙도가 석유 생성대에 진입하는 심도 사이에는 특별한 연관성이 보이지 않는다.

중기 마이오세의 상부면이 1,400 m 부근에 위치하는 돌고래 5, 5-1 및 7공에서 석유 생성대의 상한이 각각 1,100 m, 800 m 및 1,700 m에 위치하여 돌고래 5 구조의 열적 성숙도가 돌고래 7공보다 적어도 600 m 이상 얕은 심도에서 석유 생성대의 상한에 도달한다 (Fig. 3). 즉, 석유 생성대의 상한이 돌고래 5 구조에서는 중기 마이오세 상부면의 상위에 위치하고 돌고래 7공에서는 중기 마이오세 상부면의 하위에 위치하는 것이다. 고래 1 구조의 3개 시추공에서는 열적 성숙도가 석유 생성대의 상한에 도달하는 심도가 돌고래 5 및 7 구조보다 깊은 2,400 m이며, 중기 마이오세 상부면보다 하위이다. 한편 돌고래 5 구조보다 북쪽에 위치하는 돌고래 1, 3 및 2 구조에서는 중기 마이오세 상부면의 위치가 돌고래 5 및 7 구조에서보다 얕거나 비슷한 심도에 위치하지만 석유 생성대의 상한은 중기 마이오세 상부면 보다 아래에 위치하는데 심도는 돌고래 5 및 7 구조에서 보다 깊은 2,100~2,500 m이다. 석유 생성대의 상한이 중기 마이오세 상부면 보다 깊은 심도에 위치하지만 석유 생성대 상한의 위치와 중기 혹은 후기 마이오세 상부면의 위치 사이에는 뚜렷한 연관성이 발견되지 않는다. 이러한 사실들은 VI-1광구 지역에서 유기물의 열적 성숙이 층서 즉 지층의 시대와 큰 연관성이 없음을 나타내는 것이다.

열적 성숙도가 심도의 증가에 따라 변화하는 양상으로부터 현재의 열적 성숙도에 도달한 시기와 구조 운동 시기 사이의 관계를 알 수 있다 (Fig. 7). 수직선상에서 단층이나 부정합면의 존재에도 불구하고 열적 성숙도 요소들이 심도의 증가에 따라 연속적으로 변화하면 구조 운동이 일어난 후에 열적 성숙이 진행되었다는 것을 말하는데 이때 단면도 상에서 등성속도선은 수평이다 (Figs. 7E, 7B). 부정합면이나 단층이 존재하지 않을 경우에도 열적 성숙도가 연속적으로 변화하는데 이때에는 등성속도 단면이

지층단면과 평행하다 (Figs. 7C, 7A). 한편 수직선상에서 열적 성숙도가 부정합면이나 단층을 중심으로 하여 불연속적으로 급격하게 변화하거나 비슷한 모양의 변화곡선이 반복될 경우에는 구조 운동 이전에 현재의 열적 성숙도에 도달한 것이다 (Fig. 7D).

고래 1, 돌고래 7, 고래 5, 돌고래 5구조의 시추공에서는 중기 마이오세 상부 부정합면 부근에서 열적 성숙도가 연속적으로 변화하여 부정합을 인지할 수 없고, 고래 1, 고래 5, 돌고래 5 및 돌고래 5-1공에서는 후기 마이오세 상부면의 부정합도 인지되지 않는다 (Fig. 3). 따라서 이들 지역에서는 플라이오세까지 구조 운동이 없었거나 구조운동 이후에 현재의 열적 성숙도에 도달한 것으로 해석할 수 있다. 그런데 탄성과 자료 혹은 고생물 자료에서 중기 마이오세, 후기 마이오세 상부면의 부정합이 인지되고, 등성속도선이 지층 경계와 평행하지 않으므로 구조운동 이후에 현재의 열적 성숙도에 도달한 것으로 볼 수 있다. 이들 시추공에서 현재의 열적 성숙도는 후기 마이오세 이후에 도달한 것으로 보는 것이 타당하다.

서로 인접하여 위치하는 돌고래 1, 3, 및 2 구조 지역의 시추공들 중에서 돌고래 1공과 돌고래 2A-1x 공에서는 열적 성숙도 측정 자료의 질이 좋지 않아 분명한 열적 성숙도 변화 경향을 파악할 수 없다. 반면에 돌고래 3, 3-1, 3-2 및 돌고래 2공의 열적 성숙도 변화 곡선에서 뚜렷한 불연속성이 확인된다. 즉 돌고래 3-1과 3-2공의 중기 마이오세 상부면 부근에서 T_{max} 혹은 Ro 값이 급격히 증가하고, 돌고래 3공에서는 후기 마이오세 상부면에서 이들 값이 급격히 증가한다 (Fig. 3). 이와 같이 급격한 열적 성숙도의 증가는 정단층 혹은 부정합면의 존재를 시사하는 것이다 (Fig. 7D). 탄성과 및 고생물 자료에 의하면 중기 및 후기 마이오세 상부면에는 부정합이 존재하므로 이와 같이 급격한 열적 성숙도 변화는 정단층보다는 부정합에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 이들 시추공의 현재 열적 성숙도는 중기 마이오세 상부면의 부정합을 형성한 구조운동 이전에 도달한 것으로 볼 수 있다. 돌고래 2공의 중기 및 후기 마이오세 상부면 부근에서 명확하지는 않지만 T_{max} 변화 곡선이 반복되는 것을 인지할 수 있는데 (Fig. 3) 이러한 반복 현상은 일반적으로 역단층을 지시하는 것이다 (Fig. 7D). 그러나 탄성과 및 고생물 자료에서 역단층이 확인되지 않았으므로 이러한 열적 성숙도 변화곡선의 반복 현상을 역단층에 의한 것으로 볼 수 있을지는 의문이다. 앞으로 이에 대한 정밀 분석이 필요하다. 그렇지만 이와 같은 불연속적인 열적 성숙도의 변화에 의하여 돌고래 2공의 현재 열적 성숙도가 구조운동 이전에 도달한 것으로 볼 수는 있을 것으로 생각한다.

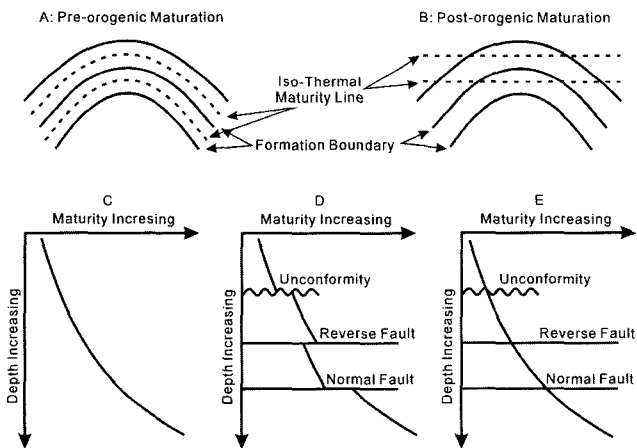


Fig. 7. Scheme of different maturity variation pattern according to geologic events (after M. & R. Teichmüller, 1966).

열적 성숙도 변화 특성

열적 성숙도가 석유 생성대의 상한에 도달하는 심도는 시추공의 지리적 위치와 관계가 있는 것처럼 보인다. 석유 생성대 상한의 심도가 가장 얕은 곳은 돌고래 5-1공으로 800 m이다. 돌고래 5 구조를 중심으로 하여 북쪽과 서쪽으로 가면서 석유 생성대 상한의 위치가 깊어지는 경향을 보이며 가장 북쪽의 돌고래 2공에서는 2,600 m, 서쪽의 고래 1구조에서는 2,400 m에서 석유 생성대 상한에 도달한다 (Fig. 3).

이러한 경향은 심도에 따른 열적 성숙도 증가율에서도 유사하

게 나타나는데 돌고래 5 및 7 구조에서 열적 성숙도 변화정도가 가장 크고, 북쪽과 서쪽으로 가면 변화 정도가 작아진다. 일반적으로 열적 성숙도 요소들은 심도에 따라 지수함수적으로 변하기 때문에 변화율을 정량화하기 어렵다. 다만 어떤 단계의 열적성숙도와 보다 높은 어떤 열적성숙단계 사이의 거리(심도 차이)를 계산함으로써 변화율의 크고 작음을 추정할 수가 있다. 예를 들면 석유 생성대 상한에 도달하는 심도와 습성가스 혹은 건성가스 생성대 상한에 도달하는 심도 사이의 거리를 계산하는 것이다. 두 심도 사이의 차이(거리)는 작을수록 열적 성숙도 변화율이 크고 거리가 클수록 변화율이 작다는 것을 나타낸다.

본 연구에서는 석유 생성대의 상한 (T_{max} 435°C)에 도달하는 심도와 T_{max} 445°C에 도달하는 심도 사이의 거리를 계산하였는데 그것은 돌고래 7공과 돌고래 5-1공에서만 습성가스 생성대의 상한이 확인되었기 때문이다. 몇몇 시추공에서는 T_{max} 가 최고 438°C로 측정이 되었기 때문에 438°C에 도달하는 것이 합리적으로 생각되나 이 경우 석유 생성대 상한인 435°C와 차이가 3°C에 불과하여 공 내 불량, 분석 오차 등에 의한 영향을 많이 받을 우려가 있다. 따라서 오차가 커질 수가 있으며, 445°C를 사용하였을 때 열적 성숙도 변화율의 크기를 추정하는 데 있어서 크게 무리가 없었기 때문이다. 이렇게 하여 추정된 각 시추공들의 열적 성숙도 변화율을 살펴보면 돌고래 5 구조에서 가장 크고 다음이 돌고래 7 구조이다 (Table 1). 고래 1 구조에서는 돌고래 5 및 7 구조보다는 열적 성숙도 변화율이 상당히 작다. 고래 5, 돌고래 3 및 돌고래 2 구조에서는 신빙성 있는 T_{max} 값 445°C가 확인되지 않아 변화율의 정도가 직접 추정되지 못하였다. 그러나 시추공 내의 최고 T_{max} 에 도달하는 심도에 의하여 T_{max} 445°C에 도달할 것으로 예상되는 거리를 추정하면 고래 5, 돌고래 3 및 돌고래 2 구조의 열적 성숙도 변화는 돌고래 5 혹은 돌고래 7 구조보다는 낮을 것으로 보인다. 이러한 결과는 유기물의 열적 성숙에 직접적으로 영향을 미치는 과거 혹은 현재의 열류량 (지하 증온율)이 지역에 따라 상당히 다르며, 돌고래 5 혹은 돌고래 7 구조 지역의 열류량이 가장 크다는 것을 의미한다.

시추공 내 온도 (BHT) 측정 결과에 의하여 산출된 시추공들의 지하 증온율을 보면 열적 성숙도 변화율 혹은 석유 생성대 상한의 심도와 어떠한 상관관계도 보이지 않는다 (Table 1). BHT에 의한 지하증온율의 산출 오차가 크지 않다면 울릉분지에서는 과거의 열류량이 현재와 다르며, 유기물의 열적 성숙은 현재의 열류량보다는 과거 열류량의 영향을 받은 것으로 볼 수 있다.

고찰

고래 1 구조 지역에서는 석유 생성대의 상한이 중기 마이오세 상부 부정합면 하위에 위치하고, 북쪽의 돌고래 1, 2, 3 구조 지역에서도 이 부정합면 하위에 위치하는데 부정합면에서 석유 생성대 상한까지의 거리는 일정하지 않다. 돌고래 7 및 고래 5공에서는 중기 마이오세 상부 부정합면 아래에 위치하고 돌고래 5구조에서는 이 부정합면 위에 위치한다 (Fig. 3). 이것은 유기물의 등성숙도 선 (예를 들면 석유 생성대 상한)이 단면상에서 지층의 경계 혹은 층서 경계의 위치와 상관관계를 보이지 않는다는 것을 뜻한다 (Fig. 3). 이러한 열적 성숙도 변화 특성은 울릉분지에서 유기물의 열적 성숙은 구조운동 이후에도 진행된 것으로 해석할 수 있게 한다. 그러나 돌고래 3 구조 지역의 수직적 열성숙도 변화 곡선은 중기 혹은 후기 마이오세 상부 경계 부근에서 부정합면의 존재 가능성을 보여준다. 그리고 돌고래 2공은 역단층이 존재하는 것으로 해석할 수 있게 하는 열적 성숙도 변화를 보인다. 따라서 돌고래 2와 3 구조 지역에서 중기 마이오세 지층 유기물의 열적 성숙은 중기 마이오세 상부 부정합 형성 혹은 단층 운동 이전에 일어난 것으로 해석된다. 반면에 고래 1, 5, 돌고래 5와 7 구조 지역에서는 지질학적 사건을 지시하는 불연속적인 열적 성숙도 변화가 인지되지 않으므로 구조 운동 이후에 현재의 열적 성숙도에 도달한 것으로 보인다. 이와 같은 사실들은 열적 성숙이 구조운동 이전에 끝난 지역과 구조운동 이후까지 진행된 지역으로 울릉분지를 구분할 수 있게 한다. 즉 한국석유공사 (1992)가 제시한 변형대 2 지역에서는 구조운동 이전에 현재의 열적 성숙

Table 1. Distance to reach T_{max} 445°C from 435°C and geothermal gradient data

	G1-2	G1	G1-1	D7	G5	D5-1	D5	D1	D3-1	D3	D3-2	D2
Depth1	2400	2400	2400	1800	2100	800	1100	2400	2200	1900	2800 (2500)	2600
Depth2	3800+	3800	3600	2600	2600+	1600	1600	?	3100	3200+	3100+	3200+
Depth2- Depth1	1400+	1400	1200	800	500+	800	500	?	900	1300+	300+ (600+)	600+
MT _{max}	443				440					438	438	442
GTG	3.2	3.5	2.9	3.8	2.3	3.8	3.0	3.4	4.0	3.7	3.6	4.6

Grt: T_{max} gradient/100 m (°C); TOW; Depth of top of oil window (m)

G: Gorae; D: Dolgorae

Depth1: depth of top of oil window (m)

Depth2: depth of T_{max} 445°C (m)

Depth2 - Depth1: distance from the depth of oil window top to the depth of T_{max} 445°C (m)

MT_{max}: Maximum T_{max} of the well (°C)

GTG: present geothermal gradient calculated from bottom hole temperature data (°C/100 m)

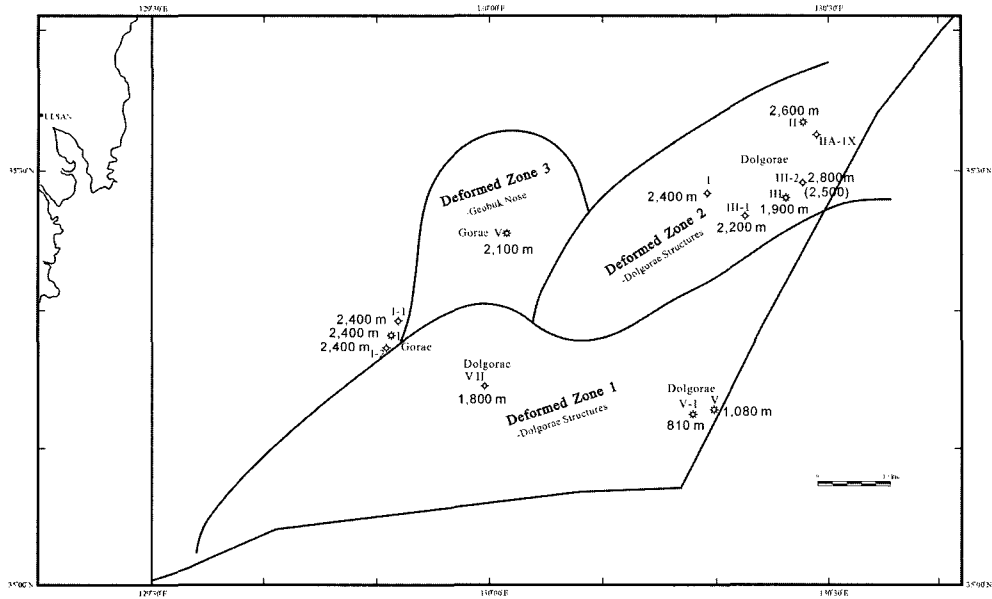


Fig. 8. Map showing structurally deformed zones with well locations (depth: top of oil window; PEDCO, 1992).

도에 도달하였고 다른 지역에서는 구조운동 이후까지 열적 성숙이 진행된 것으로 해석된다 (Fig. 8).

석유 생성대 상한의 심도를 보면 돌고래 5, 5-1 및 돌고래 7공이 가장 얇아 800~1,100 m이고, 북쪽과 서쪽으로 가면서 깊어져 2,800~2,400 m에 이른다 (Fig. 3). 이와 같은 양상은 구조 운동에 의하여 돌고래 5 및 7 구조 지역이 다른 지역보다 용기가 크게 일어난 것에 기인할 수도 있다. 그러나 구조 운동 이후에도 열적 성숙이 진행되었으므로 용기에 기인한 것으로 보기는 어렵다. 그런데 석유 생성대 상한의 심도에서 어떤 열적 성숙도 (T_{max} 445°C)에 도달하는 거리에 의하여 추정된 열적 성숙도 변화량이 석유 생성대 상한의 심도가 얕을수록 대체로 큰 것으로 나타났다 (Table 1). 열적 성숙도 변화량이 크다는 것은 유기물의 열적 성숙에 직접적 영향을 미치는 열류량 (지하증온율)이 크다는 것을 의미한다. 따라서 연구 지역에서 열류량은 돌고래 5 구조 지역의 열류량이 가장 크고, 북쪽과 서쪽으로 가면서 작아지는 것으로 볼 수 있다. 즉 변형대 1 지역 (한국석유공사, 1992)의 열류량이 다른 지역에 비하여 컸던 것으로 볼 수 있다.

이상과 같은 유기물의 열적 성숙도 변화특성 분석결과에 의하면 울릉분지는 구조운동 이전에 현재의 열적 성숙도에 도달한 지역과 구조운동 이후에 현재의 열적 성숙도에 도달한 지역으로 구분된다. 이렇게 열적 성숙의 진행 과정이 다른 것은 지역에 따른 열류량의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 그렇지만 현재까지 취득된 자료에서 열류량의 차이를 확인할 수 있는 증거는 확인되지 않았다.

결론

울릉분지에서 유기물의 열적 성숙은 지역에 따라 다른 특성을 보인다. 돌고래 5 구조에서 석유 생성대의 심도가 가장 얇으며, 이를 중심으로 하여 북쪽과 서쪽으로 가면서 석유 생성대 상한에

도달하는 심도가 깊어진다. 이와 같은 열적 성숙도 변화는 층서와 특별한 상관관계를 보이지 않는 것으로 변형대 2 지역에서는 구조 운동 이전에 현재의 열적 성숙도에 도달한 반면 다른 지역에서는 구조운동 이후에도 열적 성숙이 진행되었을 가능성을 보여 주는 것이다. 그러나 지역에 따른 열적 성숙도 차이의 요인이 되는 열류량 혹은 지하 증온율 차이에 대한 증거가 확보되지 않았으므로 앞으로 이에 대한 연구가 있어야 할 것이다.

참고문헌

김인수, 1992, 새로운 동해의 성인 모델과 양산단층계의 주향이동 운동, 지질학회지, 28, 84-109.
 서만철, 이미경, 석봉출, 1993, 해상 중력 자료를 이용한 울릉분지의 지질구조 연구, 지질학회지, 29, 119-127.
 석봉출, 김한준, 한상준, 박창홍, 김성렬, 김기영, 유해수, 양수영, 정태용, 주형태, 최동림, 홍종국, 장재경, 주용, 장남도, Anosov, G.I., Gnibidenko, H.S., Argentov, V., Bikkenina, S., Zhietsov, E., Zhigulef, V., Solovyev, V., 1992, 동해 울릉분지의 지구물리학적 연구, 한국해양연구소 연구보고서, 149p.
 이영주, 유동근, 김일수, 류병재, 2003, 울릉 분지 남서부 심해저 퇴적층에 분포하는 천부 가스의 지화학적 및 지구물리 특성. 자원환경지질학회지, 36, 149-157.
 이영주, 정태진, 박영훈, 김학주, 윤혜수, 1999a, 국내 대륙붕 및 육상에 분포하는 탄화수소 가스의 지화학. 한국석유지질학회 제6차 학술 발표회 논문집, 40-49.
 이영주, 허 식, 박영훈, 김학주, 천종화, 한상준, 유해수, 1999b, 울릉 분지 남동부 시추 퇴적물내에 함유되어 있는 천부가스의 특성. 한국석유지질학회지, 7, 35-40.
 한국석유개발공사, 1989a, 제VI-1광구 돌고래 2공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1989b, 제VI-1광구 돌고래 3, 3-1, 3-2공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1990a, 제VI-1광구 고래 5-1공 시추시료 분석보고서.

- 한국석유개발공사, 1990b, 제VI-1광구 고래 5공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1991, 제VI-1광구 돌고래 7공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1992, 국내 대륙붕 제 VI-1 광구 층서 트랩 평가.
 한국석유개발공사, 1994, 제VI-1광구 고래 1공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1995a, 제VI-1광구 고래 1-1공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1995b, 제VI-1광구 고래 1-2공 시추시료 분석보고서.
 한국석유개발공사, 1995c, 제VI-1광구 고래 1-2공 시추시료 분석보고서.
 Chough, S.K., 1983, Marine Geology of Korean Seas, International Human Resources Development Corporation Publishers, Boston, MA, 157p.
 Chough, S.K., and Barg, E.J., 1987, Tectonic history of Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan), *Geology* 15, 45-48.
 Chough, S.K., Lee, G.H., Park, B.K., and Kim, S.W., 1984, Fine structures of turbidite and associated muds in the Ulleung (Tsushima) Basin, East Sea (Sea of Japan), *J. Sediment. Petrol.* 54, 1212-1220.
 Ingle, J.C. Jr., 1975, Summary of late Paleogene-Neogene insular stratigraphy, paleobathymetry and correlations, Philippine Sea and Sea of Japan region, DSDP Initial Report 31, 837-855.
 Jolivet, L., and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan Arc, ODP Scientific Results 127/128 (part 2), 1311-1331.
 Kim, H.J., Park, C.H., Hong, J.K., Jopu, H.T., Chung, T.W., Zhigulef, V., and Anosov, G.I., 1994, A seismic experiment in the Ulleung Basin (Tsushima Basin), southwestern Japan Sea (East Sea of Korea), *Geophys. Res. Lett.* 21, 1975-1978.
 Korea National Oil Corporation, 2003, Petroleum geochemistry screening study of the interval 910 m to 2595 m (T.D.), DG2A-1X well, Ulleung basin, Block VI-1 offshore Korea.
 Lee, G.H., and Suk, B.C., 1998, Latest-Neogene-Quaternary seismic stratigraphy of the Ulleung Basin, east Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 146, 205-224.
 Lee, G.H., and Kim, B.Y., 2002, Infill history of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan) and implications on source rocks and hydrocarbons, *Marine and Petroleum Geology*, 19, 829-845.
 Lee, G.H., Kim H.J., Suh, M.C., and Hong J.K. 1999, Crustal structure, volcanism, and opening mode of the Ulleung basin, East Sea (Sea of Japan), *Tectonophysics*, 308, 503-525.
 Lee, G.H., Kim, H.J., Han, S.J., and Kim, D.C., 2001, Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the southwestern East Sea (Japan Sea) back-arc basin. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 651-634.
 Ludwig, W.J., Mirauchi, S., and Houtz, R.E., 1975, Sediments and structures of the Japan Sea, *Bull. Geol. Soc. of America* 86, 651-664.
 Park, C.-H., Kim, H.-J., Yang, C.-S., Suk, B.-C., and Isezaki, N., 1996, Crustal structure of the Ulleung Basin, the East Sea (Japan Sea), from gravity and ocean bottom seismometer data, *J. Geol. Soc. Korea* 32, 276-290.
 Park, S.J., 1998, Stratal patterns in the southwestern margin of Ulleung Back-arc Basin: A sequence stratigraphic analysis, unpublished Ph. D. thesis, Seoul Nat. Univ., 176p.
 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), in proc. of Korea-Japan Symposium; ed by Cheong T.J. and Suyehiro, K., 26-28 Sep., Gyeongju, Korea, 83-99.
 PEDCO, 1998, Petroleum geochemistry and sedimentary petrology of the Gorae V, offshore Korea Block VI-1.
 Peters, K.E., and Cassa, M.R., 1994, Applied source rock geochemistry, in Magoon, L.B & Dow, W.G., eds., The Petroleum System - from source to trap: AAPG Memoir 60, 93-120.
 Shin, K.S., Yu, K.M., Kim, K.D., and Um, C.Y., 1997, 3D seismic interpretation of the Gorae II area, Block VI-1, offshore southeast Korea, *Korean J. of Petrol. Geol.* 5 (No. 1), 27-35.
 Stroev, P.A., and Fujimoto, H., 1996, Gravity anomalies in and around the Japan Sea, in *Geology and Geophysics of the Japan Sea*, ed. by Isezaki, N., Bersenev, I.I., Tamaki, K., Karp, B.Ya. and Lelikov, E.P., Terra Scientific Publication Company, Tokyo, 49-60.
 Teichmüller, M., and R., 1966, Die Inkohlung im saar-lothringischen Karbon, vergleichen mit der im Ruhr Karbon, *Z. Deutsch Geol. Ges.* 117, 243-279.
 Yoon, S.H., 1994, The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution, unpublished Ph. D. thesis, Seoul Nat. Univ., 235p.
 Yoon, S.H., and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the east continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geol. Soc. of America Bull.* 107, 83-97.
 Yoon, S.H., Park, S.J., 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.
-
- (2004. 1. 7 원고 접수)
 (2004. 7. 2 수정본 채택)