

베네주엘라 초중질유 저류층 지질 특성

김대석^{1,2} · 권이균^{2*} · 장찬동¹

¹충남대학교, ²한국지질자원연구원

Geological Characteristics of Extra Heavy Oil Reservoirs in Venezuela

Daesuk Kim^{1,2}, Yi Kyun Kwon^{2*} and Chandong Chang¹

¹Department of Geology, Chungnam National University, 79 Daehang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

Extra heavy oil reservoirs are distributed over the world but most of them is deposited in the northern part of the Orinoco River in Venezuela, in the area of 5,500 km². This region, which has been commonly called “the Orinoco Oil Belt”, contains estimated 1.3 trillion barrels of original oil-in-place and 250 billion barrels of established reserves. The Venezuela extra heavy oil has an API gravity of less than 10 degree and in situ viscosity of 5,000 cP at reservoir condition. Although the presence of extra heavy oil in the Orinoco Oil Belt has been initially reported in the 1930’s, the commercial development using in situ cold production started in the 1990’s. The Orinoco heavy oil deposits are clustered into 4 development areas, Boyaco, Junin, Ayachoco, and Carabobo respectively, and they are subdivided into totally 31 production blocks. Nowadays, PDVSA (Petróleos de Venezuela, S.A.) makes a development of each production block with the international oil companies from more than 20 countries forming a international joint-venture company. The Eastern Venezuela Basin, the Orinoco Oil Belt is included in, is one of the major oil-bearing sedimentary basins in Venezuela and is first formed as a passive margin basin by the Jurassic tectonic plate motion. The major source rock of heavy oil is the late Cretaceous calcareous shale in the central Eastern Venezuela Basin. Hydrocarbon materials migrated an average of 150 km up dip to the southern margin of the basin. During the migration, lighter fractions in the hydrocarbon were removed by biodegradation and the oil changed into heavy and/or extra heavy oil. Miocene Oficina Formation, the main extra heavy oil reservoir, is the unconsolidated sand and shale alternation formed in fluvial-estuarine environment and also has irregularly a large number of the Cenozoic faults induced by basin subsidence and tectonics. Because Oficina Formation has not only complex lithology distribution but also irregular geology structure, geological evolution and characteristics of the reservoirs have to be determined for economical production well design and effective oil recovery. This study introduces geological formation and evolution of the Venezuela extra heavy oil reservoirs and suggest their significant geological characteristics which are (1) thickness and geometry of reservoir pay sands, (2) continuity and thickness of mud beds, (3) geometry of faults, (4) depth and geothermal character of reservoir, (5) in-situ stress field of reservoir, and (6) chemical composition of extra heavy oil. Newly developed exploration techniques, such as 3-D seismic survey and LWD (logging while drilling), can be expected as powerful methods to recognize the geological reservoir characteristics in the Orinoco Oil Belt.

Key words : Venezuela, Orinoco Oil Belt, extra heavy oil, eastern Venezuela Basin, Oficina Formation

베네주엘라 중앙에 위치한 오리노코강을 따라 55,000 km²의 면적에 동서로 길게 자리하는 오리노코 오일벨트에는 원시부존량이 약 1조 3천억 배럴, 가체매장량이 2,500억 배럴에 달하는 초중질유가 매장되어 있다. 베네주엘라 초중질유는 API 비중이 10° 이하이고, 점성도가 5,000 cP 정도로 무겁고 점성이 큰 탄화수소 자원이다. 오리노코 지역의 초중질유는 1930년대 최초로 보고되었지만, 이들의 상업적 개발은 1990년대에 이르러 비가열식 일차생산기법을 통해서 본격적으로 이루어지기 시작하였다. 오리노코 오일벨트는 초중질유 분포 양상에 의해 보야카, 주닌, 아야쿠초, 카

*Corresponding author: kyk70@kigam.re.kr

라보보의 생산광구로 나누어지며, 이들은 모두 31개의 생산블럭으로 소분된다. 현재 각 생산블럭은 베네주엘라 PDVSA와 외국계 기업의 합작 형태로 개발되고 있으며, 20개국 이상이 초중질유 개발 프로젝트에 참여하고 있다. 오리노코 오일벨트는 베네주엘라의 주요 석유분지 가운데 하나인 동베네주엘라 분지의 남쪽지역에 위치한다. 동베네주엘라 분지는 쥘라기 판 분화에 의해 형성되기 시작한 수동형 대륙 주변부 분지로 그 면적은 약 120,000 km²이다. 동베네주엘라 분지에서 백악기 말에 형성된 석회질 세일은 초중질유의 주요 근원암이다. 분지 내 탄화수소는 북쪽에서 남쪽으로 평균 150 km를 이동하면서 생분해작용을 거쳤으며, 이로 인해 점성과 비중이 높은 초중질유를 분지 남쪽 경계부인 오리노코 지역에 형성하였다. 주요 초중질유 저류층인 마이오세 오피시나층은 하성-에스츄어리 퇴적환경에서 발달한 미고결 사질 및 이질이 교호하는 퇴적체이다. 또한 오피시나층은 판의 운동에 의한 압축작용과 분지침강에 의해 형성된 다수의 신생대 단층이 분포하여 복잡한 저류층 지질 특성을 나타낸다. 불균질한 저류층 암상 분포와 복잡한 지질 구조의 저류층에서 경제적인 생산정의 설계와 효율적인 초중질유 회수를 위해서는 초중질유 저류층의 발달 과정과 그로 인한 지질학적 특성에 대한 심도 깊은 이해가 필요하다. 본 연구에서는 오리노코 초중질유 저류층에서 (1) 사질 저류층 두께 및 분포, (2) 이질 퇴적층의 분포, (3) 단층의 기하학적 분포, (4) 저류층 대상 심도 및 지열 특성, (5) 저류층 지층 용력상태, (6) 초중질유의 화학적 조성 등을 초중질유 생산성에 상대적으로 큰 영향을 미치는 주요한 지질학적 특성으로 주목하였다. 이러한 오리노코 지역의 지질학적 특성들은 3차원 탄성파 탐사, 시추간 물리검층과 같은 최신 기술들을 통해 앞으로 보다 빠르고 정확하게 규명되어질 것으로 기대된다.

주요어 : 베네주엘라, 오리노코 오일벨트, 초중질유, 동베네주엘라 분지, 오피시나층

1. 서 론

재래형 원유와 다르게 통상적인 개발기술로 생산이 어려운 탄화수소 자원의 하나인 비재래 원유자원은 중질유 (medium heavy oil), 초중질유 (extra heavy oil), 오일샌드 (oil sands), 비투멘 (bitumen), 오일셰일 (oil shale) 등이 있다. 이들은 탄화수소의 물리-화학적 성질, 매장 심도, 저류층 지질 특성 등에 의해 재래적 방식으로 생산되는 원유보다 더 높은 기술력과 개발비용을 요하게 된다 (Rongner, 1997). 비재래 원유 가운데 베네주엘라의 초중질유와 캐나다의 오일샌드는 3조 5천억 배럴에 달하는 원시부존량으로 주목을 받고 있으며, 그 중 베네주엘라의 오리노코 지역에는 약 1조 3천억 배럴의 초중질유가 부존되어 있다 (Gonzalez *et al.*, 2006; Hinkle and Batzle, 2006). 베네주엘라 초중질유는 일반적으로 API 비중이 10° 이하, 점성도는 5,000 cP 정도로 무겁고 점성이 큰 석유자원이다. 이러한 물성으로 인하여 베네주엘라 초중질유는 600-1,200 m의 평균 저류층 심도에서 약간의 유동성만을 가지고 있는 것으로 알려져 있다 (Cutis *et al.*, 2002). 베네주엘라 중앙에 위치한 오리노코 강의 북부 지역에는 강을 따라 동서로 길게 약 55,000 km²의 초중질유 부존 지역이 있으며, 이 지역을 일반적으로 “오리노코 오일벨트 (Orinoco oil belt or tar belt)”라고 한다 (Fig. 1). 오리노코 오일벨트 초중질유의 가채매장량은 2,500억 배럴로 알려져 있으며 (James, 2000b), 최근에는 수평시추 및 회수기술의 향상으로 인하여 이 지

역의 초중질유 가채매장량이 5,130억 배럴로 보고되기도 하였다 (USGS, 2009).

오리노코 오일벨트 내에 대규모의 초중질유가 부존되어 있다는 것은 1935년에 처음 확인되었지만, 본격적인 초중질유 저류층 연구는 PDVSA에 의해서 1978년부터 수행되었다. 5년 동안의 장기 프로젝트를 통해 물리탐사와 시추탐사가 수행되었으며, 일차생산기법과 열회수기법을 적용한 생산기술들이 검토되었으나, 각각 5% 이하의 낮은 회수율과 스템을 이용한 열회수기법의 높은 비용 문제로 생산효율은 저조하였다 (Martinez, 1987). 하지만 1980년대 말에 접어들면서 고성능 지하

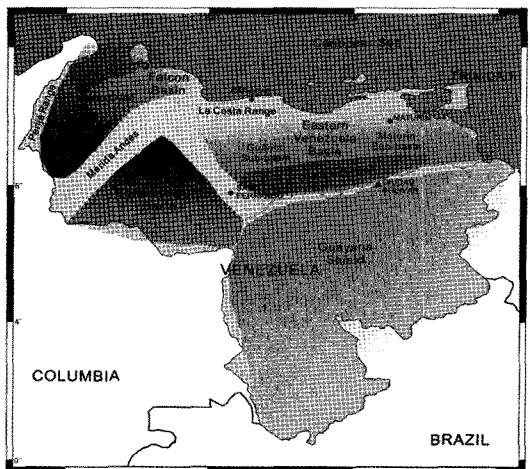


Fig. 1. Geological overview in Venezuela and the location of the Orinoco Oil Belt.

펌프가 등장하였고, 1990년대 중반에 수평시추공 굴착 기술이 상용화 되면서 일차생산기법의 회수율이 비약적으로 증가되어 상업적 개발이 가능하게 되었다 (Curtis *et al.*, 2002). 현재까지 오리노코 오일벨트 내 초중질유의 개발은 대부분 비가열식 일차생산기법을 이용하여 이루어지고 있으며, 최근에는 스팀주입중력법 (SAGD; Steam Assited Gravity Drainage)과 같은 현장 열회수기술이 일부 생산광구에서 적용되어 생산평가가 진행 중이다.

최근 초중질유 개발과 관련된 주요 연구분야 중 하나는 최적화된 생산정 설계를 통해 생산 효율을 증진시킬 수 있도록 저류층의 지질 특성을 정확하고 효율적으로 파악하는 저류층 지질특성화 분야이다 (Curtis *et al.*, 2002; Labourdette *et al.*, 2008). 일반적으로 유전지역에서 지하의 저류층과 비저류층을 정확히 구분하는 것은 대단히 중요하지만, 오리노코 오일벨트의 저류층은 하성-해성 기원에서 퇴적된 이질사질 퇴적체가 혼재하여 있기 때문에 이를 파악하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 오리노코 오일벨트 저류층의 지질학적 형성과정을 요약하고, 현재 개발기술 및 그 적용 사례를 통해 초중질유 개발에서 파악되어야 할 저류층 지질 특성에 대해서 소개하고자 한다.

2. 지질개요

베네주엘라는 오리노코 오일벨트에 분포하는 초중질유 외에도 많은 양의 재래원유와 천연가스를 보유한

산유국이다. 베네주엘라의 북부지역과 인근 해양 분지에 형성된 유전지역에서 재래원유 약 730억 배럴, 가스자원 약 146조 입방피트 (Tcf) 그리고 오리노코 오일벨트의 초중질유 2,500억 배럴이 가채매장량으로 추정되고 있다 (James, 2000b). 베네주엘라의 지질은 크게 북서부 지역의 마라카이보 (Maracaibo)분지와 팔콘 (Falcon)분지, 중앙부터 북동부 지역까지 넓게 자리한 동베네주엘라 (Eastern Venezuela)분지, 오리노코강 서편에 존재하는 바리나스-아푸레 (Barinas-Apure)분지의 대규모 분지 4개와 오리노코강의 남쪽에 선클렘브리아 구아야나 선상지 (Guayana shield)로 구성된다 (Fig. 1). 베네주엘라의 주요 유전들은 앞서 소개한 4개의 분지와 인근 해역에서 주로 발달하며, 그 중 가장 넓은 면적을 차지하는 동베네주엘라 분지는 오리노코 오일벨트를 포함하여 베네주엘라에서 가장 많은 양의 탄화수소 자원을 매장하고 있다 (Fig. 2). 동베네주엘라 분지는 중앙의 아나코 단층 (Anaco fault)에 의해 서편의 구아리코 소분지 (Guárico Sub-basin)와 동편의 마추린 소분지 (Maturín Sub-basin)로 세분된다. 초중질유가 집적되어 있는 오리노코 오일벨트는 동베네주엘라 분지의 남부지역에 위치하며, 오리노코 강을 따라 동서로 길게 분포한다.

오리노코 오일벨트를 포함하고 있는 동베네주엘라 분지는 쥬라기에 최초 형성되어 백악기 퇴적체가 두껍게 발달한 수동형 대륙 주변부 분지이다 (James, 2000a; Summa *et al.*, 2003). 분지 내 탄화수소는 천해 내지 심해 기원의 석회암 또는 셰일을 주요 근원암으로 하

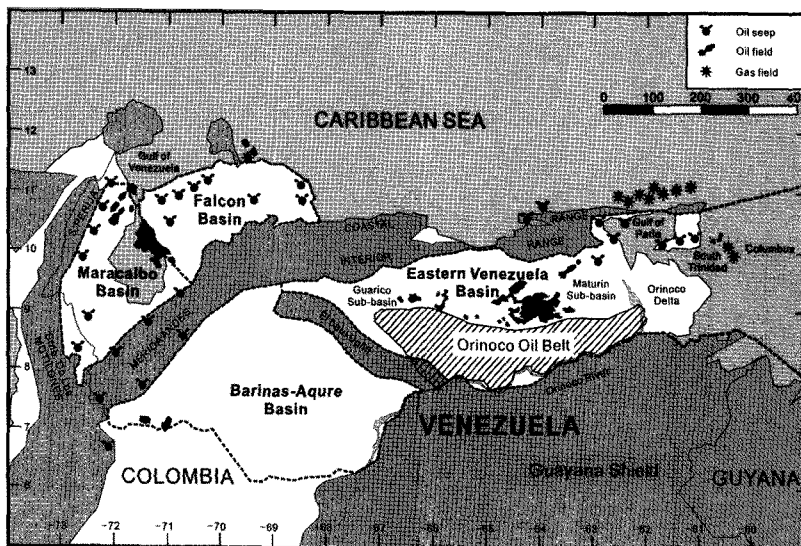


Fig. 2. Distribution of major sedimentary basins and oil/gas fields in Venezuela (modified after James, 2000).

여, 백악기 말 퇴적된 사암층과 제3기 에오세 이후에 퇴적된 사암층을 주요 저류층으로 하고 있다 (Isea, 1987; James, 2000a, 2000b; Summa *et al.*, 2003). 오리노코 오일벨트 내 초중질유의 생성 및 저류특성을 이해하기 위해서는 동베네주엘라 분지의 형성과정과 층서에 대한 이해가 선행되어야 하며, 이는 베네주엘라 주변에 분포한 다양한 판들의 지구조 운동과 직접적인 관련을 가지고 있다.

3. 동베네주엘라 분지 진화 및 석유 형성과정

북아메리카판, 남아메리카판, 카리브판, 나즈카판 등의 경계부에 위치하는 베네주엘라 내 대규모 분지의 형성은 판 주변부의 지구조 운동과 밀접한 관련을 가지고 있으며, 그 과정은 크게 중생대의 수동형 대륙 주변부 형성과 신생대의 카리브판의 우수향 주향이동성 운동으로 나뉘어 설명된다 (Summa *et al.*, 2003). 주

라기 초 초대륙이 북아메리카, 백시코, 유카탄 및 아프리카판이 발산을 시작한 이후, 이들 경계부에는 이에 따른 북대서양 및 원시 카리브해가 약 140 Ma에 형성되었다. 그 시기에 북미와 남미 사이에 형성된 새로운 판 경계를 따라서 새로운 분지들이 형성되었고, 남대서양의 발산부와 남아메리카 판 주변에 새로운 판 경계들이 생성되기 시작하였다. 카리브해를 중심으로 발생한 판의 이동으로 남아메리카 북부 지역은 백악기 후기까지 고지형적으로 이상적인 퇴적 환경을 제공하는 수동형 대륙 주변부가 만들어졌다 (Fig. 3 (a)). 이들 분지 내에서 형성된 퇴적체는 북부 베네주엘라에 배태된 탄화수소의 주요 근원암 및 저류층으로 발달하였다 (James, 2000a, 2000b; Summa *et al.*, 2003).

백악기 후기에 카리브판은 북서방향의 대서양 쪽으로 이동을 하다가, 에오세 시기에 이르러서는 북아메리카와 남아메리카판의 충돌에 의해 다시 동쪽 방향으로 운동하였다 (Fig. 3 (b) and (c)). 동베네주엘라 분

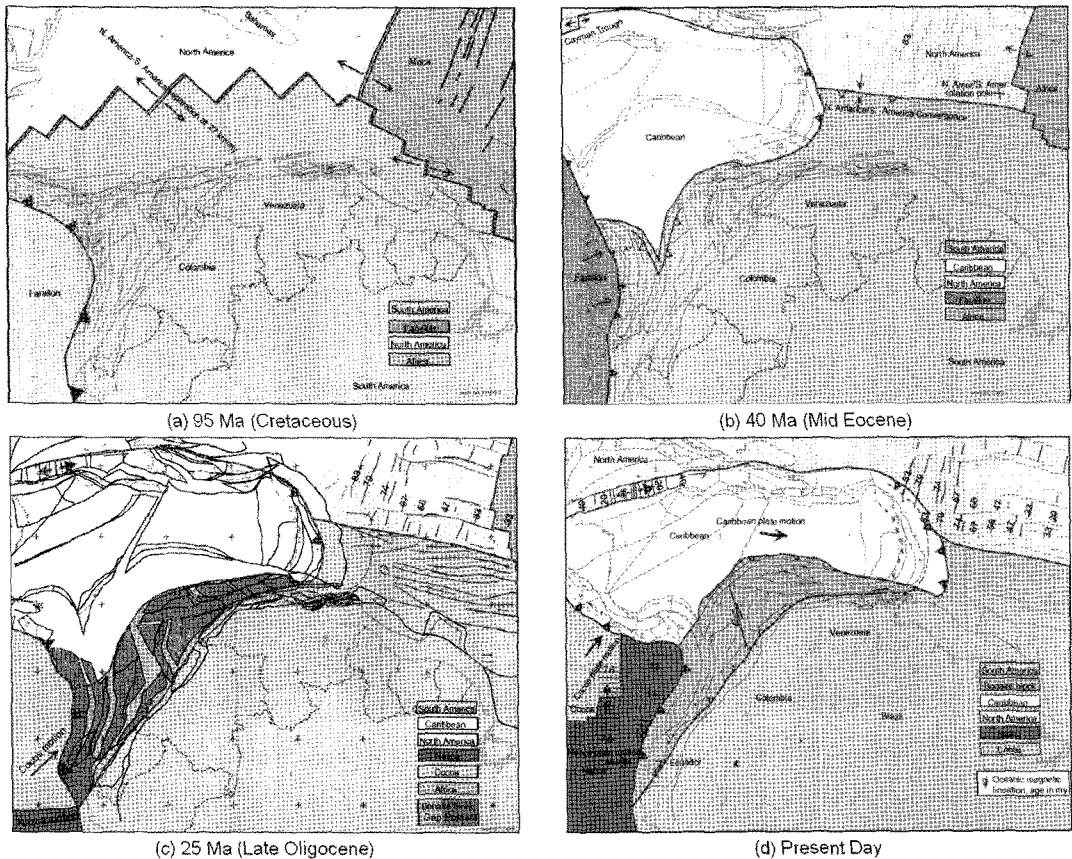


Fig. 3. Tectonic evolution of northern South America; (a): plate reconstruction in 95 Ma, (b): 40 Ma, (c): 25 Ma and (d): present, respectively (modified after Summa *et al.*, 2003).

지에는 남아메리카 판의 북부지역에 지속되고 있는 이러한 판의 이동 방향으로 북서-남동 방향의 횡압력이 우세하게 작용하며, 이는 지역적으로 수백 킬로미터의 연장을 가진 남아메리카와 북아메리카 판의 경계 (Coastal Range)를 따라 광범위하게 나타난다 (Fig. 3 (d)). 지속적인 카리브판의 동편 운동은 베네주엘라 북쪽 경계를 따라 동쪽 방향으로 새로운 분지를 순차적으로 생성하였으며, 동시에 분지 내에 배태된 탄화수소의 성숙에도 기여하였다.

동베네주엘라 분지는 선캄브리아기 구아야나 선상지를 남쪽 경계로 하고, 백악기-팔레오세 퇴적암으로 된 내륙산맥과 쥘라기-백악기 변성퇴적암체로 이루어진 해안산맥의 융기로 형성된 고지형대를 북쪽 경계로 하고 있다 (Fig. 2). 동베네주엘라 분지는 서부 지역의 융기와 침식작용 그리고 남아메리카 판의 섭입으로 인해 광역적으로는 북동 방향의 경사를 나타낸다. 동베네주엘라 분지의 면적은 약 120,000 km²이며, 총후가 가장 발달한 북부지역의 경우 퇴적물의 두께는 12 km를 넘을 것으로 추정된다 (Hedberg, 1950; Drew and Schuenemeyer, 1997; James, 2000b).

베네주엘라에 분포하는 다른 대규모 분지와 마찬가지로 동베네주엘라 분지 역시 중생대 수동형 대륙주변부에 의해 형성되어 카리브판의 지구조 운동에 의해 대륙전면분지로 진화하였다 (Fig. 4). 베네주엘라 주변

의 지구조 운동은 동베네주엘라 분지의 형성 뿐 아니라 습곡, 단층과 같은 구조의 형성에도 관여하였다. 북쪽 경계 지역에는 백악기 말 이후 카리브판의 이동에 따른 북서-남동 방향의 횡압력으로 다수의 습곡과 스리스트가 발달한다. 한편 분지 중앙부에 위치한 퇴적층은 분지의 침강과 카리브판의 우수향 주향이동에 기인한 응력장으로 인해 주로 동북동 방향의 정단층이 발달한다. 이러한 지질구조는 동베네주엘라 분지 내 탄화수소의 이동과 제3기 퇴적층의 충서적 또는 구조적 트랩 형성에 주요한 역할을 하였다 (James, 2000a).

초중질유의 근원암은 백악기 해성환경에서 퇴적된 석회암과 일부 제3기의 육성 또는 해성환경의 퇴적암으로 현재 동베네주엘라 분지의 북부 지역에 동서 방향으로 분포한다 (James, 2000a; Summa *et al.*, 2003). 북부 동베네주엘라 분지 내 5-10 km 심도의 근원암으로부터 분지 남부의 초중질유 지류층까지 거리는 150 km 이상이며, 원유의 이동과정에서 탄화수소는 무겁고 점성이 큰 초중질유가 되었다 (Fig. 4; Talukdar *et al.*, 1987; James 2000b). 고비중, 고점성의 초중질유가 만들어진 주된 원인은 원유물질의 이동과정에서 호기성 박테리아의 활동에 의한 생분해작용이다 (Head *et al.*, 2003). 깊은 심도의 퇴적층에서 생분해작용을 하는 박테리아가 생존하기 위해서는 80°C 이하의 온도조건, 8 ppm 이상의 산소함량, 영양분을 함유한 지하수가 있

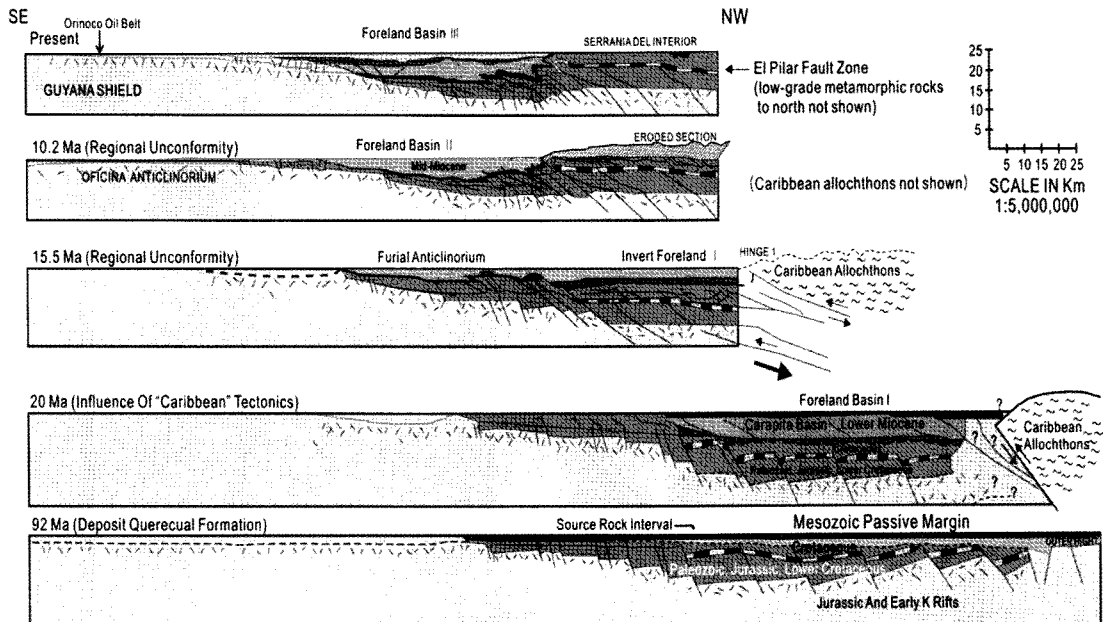


Fig. 4. Geological cross-sections in northern Venezuela demonstrated basin evolution and hydrocarbon generation and migration in Eastern Venezuela basin (modified after Summa *et al.*, 2003).

어야 한다. 또한 박테리아가 생존할 수 있도록 이 같은 조건들이 지질학적 시간동안 충분히 유지되어야 한다. 베네주엘라 초중질유의 경우 대륙전면분지 (동베네주엘라 분지)와 함께 형성된 다량의 해성기원 원유물질이 분지 내 층서-구조적 트랩을 북에서 남으로 이동하면서 1억 년 이상의 생분해작용을 통해 형성되었다. 분지 내 단층과 습곡과 같은 지질구조들은 생분해작용이 지속될 수 있는 안정적인 트랩구조를 형성하는 역할을 담당하였다. 동베네주엘라 분지 내 석유자원의 개발과 관련하여 단층과 습곡은 원유물질의 생성과 이동 및 생분해작용에 관여하였을 뿐만 아니라 광구개발에 있어서도 생산성에 영향을 줄 수 있는 지질요소가기 때문에 이들의 분포 및 영향에 대한 이해가 필요하다.

4. 초중질유 저류층 형성과정 및 분포특성

동베네주엘라 분지의 북쪽에서 남쪽으로 이동하는 동안 생분해작용에 의해 점성과 비중이 높아진 탄화수소인 초중질유는 오리노코강의 북북지역에 동서로 길게 분포하고 있으며, 이 지역을 흔히 '오리노코 오일벨트'라 한다. 오리노코 오일벨트에서 초중질유가 가장 많이 배태되어 있는 주요 저류층은 마이오세 오피시나층이다. 주로 하성-충적 기원의 사암층인 오피시나층은 분지 북부지역의 유전보다는 상대적으로 얇은 600-1,200 m의 심도를 가지며, 두께는 300-1,000 m에 이른다 (Gonzalez de Juana *et al.*, 1980; Isea, 1987). 오피시나층을 비롯한 주요 저류층의 형성은 하성기원 퇴적물을 공급한 오리노코강과 카우라강의 진화와 밀접한 관련을 가지고 있다 (Díaz de Gamero, 1996). Díaz de Gamero(1996)는 제3기 고지형 복원 연구에서 오리노코강의 하구는 팔레오세에 현재의 마라카이보 호수

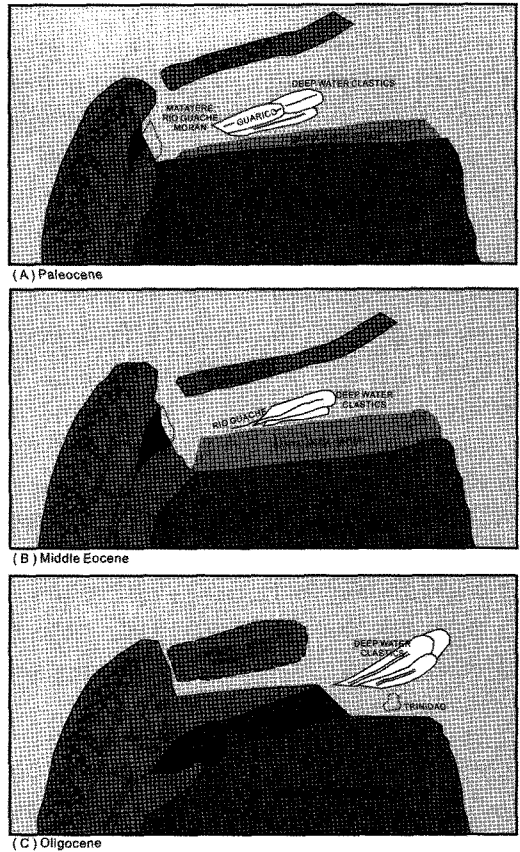


Fig. 5. Paleogeographic maps in Tertiary, northern Venezuela, (a): Paleocene, (b): middle Eocene, (c): late Eocene to Oligocene (modified after Kasper and Larue, 1986). Dashed lines mean outline of present Maracaibo Lake and Trinidad.

방향인 북쪽을 향하고 있다가 점차 동쪽으로 이동하였으며, 마이오세 말에 이르러서야 현재 오리노코강과 비슷한 방향으로 진화하기 시작하였다고 보고하였다 (Fig.

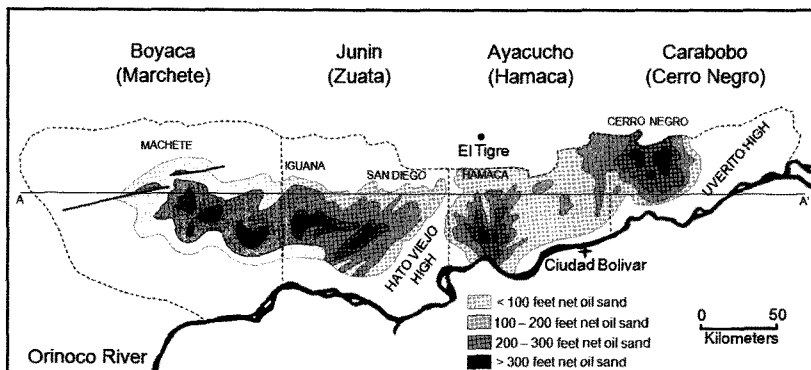


Fig. 6. Distribution of heavy oil producing regions and net oil sand thickness in the Orinoco Oil Belt (modified after Martinez, 1987). AA' line means cross-section of Fig. 8.

5). 이 시기 오피시나강의 삼각주가 발달한 해양은 서쪽이 닫히고 동쪽이 개방된 형태였으며, 해침과 해퇴에 의해 형성된 오피시나층은 연안의 사질퇴적체와 친해의 이질퇴적체가 반복적으로 교호한다. 이러한 순차층서학적 특성으로 오피시나층에서는 하도의 중첩에 의한 두꺼운 사질퇴적체가 초중질유의 주요 대상 저류층으로 알려져 있다 (Labourdet *et al.*, 2008).

오리노코 오일벨트는 마셰트 (Machete), 주아타(Zuata), 하마카 (Hamaca), 세로네그로 (Cerro Negro)의 생산광구로 구성된다. 최근 베네주엘라 정부의 오리노코 오일벨트 생산관련 정책 변경에 따라 광구 명칭이 새롭게 개정되었으며, 이는 각각 보야카 (Boyaca), 주닌 (Junin), 아야쿠초 (Ayacucho), 카라보보 (Carabobo)이다

(Fig. 6). 네 개의 생산광구는 초중질유의 분포를 기준으로 나누어졌으며, 가장 큰 면적의 보야카는 구아리코 소분지에 해당하고, 나머지 생산광구는 모두 마추린 소분지에 해당한다. 오리노코 오일벨트 서편의 보야카와 주닌 그리고 동편의 아야쿠초와 카라보보는 하토비에조 단층 (Hato Viejo fault)에 의해 서로 구분되며, 이를 경계로 저류층의 층서적-구조적 지질이 상이하게 나타난다 (Fig. 7 and 8). 먼저 서편의 생산광구 지역은 백악기와 고생대 퇴적암이 저류층 하부의 기반암이며, 주요 저류층인 오피시나층은 침식에 의해 광역적으로 지표에 노출되어 나타난다. 한편 서편보다 상대적으로 얇은 충후의 오피시나층이 분포하는 동편의 생산광구는 덮개암 역할을 하는 해성 이질층인 프라이테스층 (Freites Formation)이 오피시나층 상부를 피복하며, 기반암은 선캄브리아기 화성암 내지 변성암으로 이루어졌다. 동편의 생산광구는 구조적으로 서편에 비해 상대적으로 제3기층을 절단하는 단층들이 다수 분포하고 있으며, 이들 단층들은 생산 규모에서 사질 저류층의 수평적 연장성에 영향을 미치기 때문에 효율적인 초중질유 생산을 위한 생산정 설계를 위해서는 반드시 단층의 분포를 정밀하게 파악해야 한다.

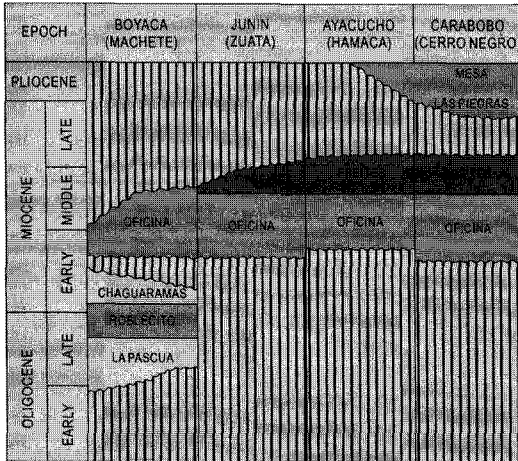


Fig. 7. Tertiary stratigraphic chart in Orinoco Oil Belt reservoir (modified after Díaz de Gamero, 1996).

5. 초중질유 개발현황 및 생산기술

1935년 처음 생산 시추공이 굴착되어 40 배럴/일이 시험생산 된 이후, 오리노코 오일벨트 내 초중질유는 약 30년 동안 경제성을 갖춘 생산기법이 없어 개발이 진행되지 않았다. 그 후 1968년에 베네주엘라 정부 주도로 5년 동안 두 번째 생산 시도가 이루어졌으나, 비

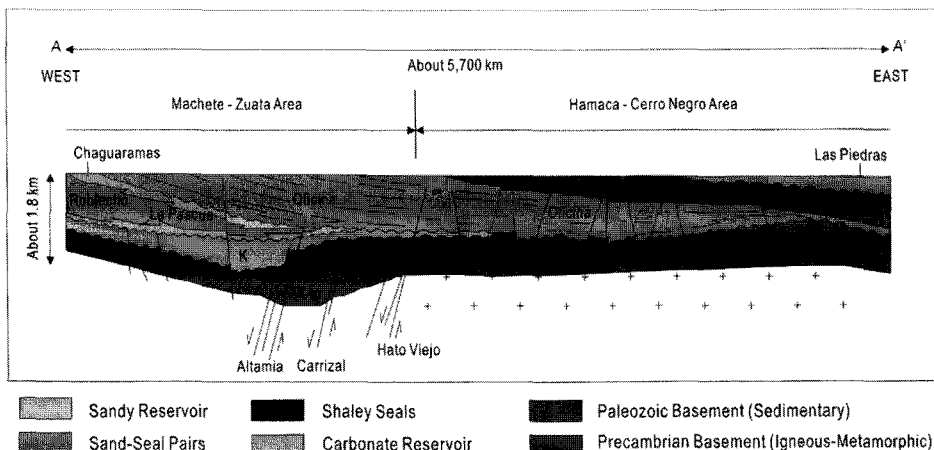


Fig. 8. Schematic structural cross-section reconstruction of the Orinoco Oil Belt (modified after Isea, 1987). Location of AA' line is indicated in Fig. 6.

중이 무거운 초중질유를 시장에 판매하기 위한 정제기술이 확보되지 못하여 생산정들을 모두 폐기하게 되었다. 본격적인 초중질유 개발이 이루어진 것은 1978년 PDVSA가 설립되고 4개의 상업광구가 지정된 이후이다. 상업광구에는 Exxon Mobil, Vega Oil & Gas, Conoco Phillips, Total, Statoil, Chevron Texaco 등의 다국적 석유기업들이 PDVSA와 합작형태로 개발에 참여하였다 (Cutis *et al.*, 2002). 현재 오리노코 오일벨트는 4개의 생산광구 내 31개의 생산블럭을 지정하여 60% 이상의 지분을 PDVSA가 갖고, 나머지 부분을 프랑스, 러시아, 스페인, 노르웨이, 이탈리아, 인도, 일본, 중국, 베트남 등 20여 개국의 외국계 기업에 할당하여 합작형태의 공동개발을 진행하고 있다. 베네주엘라 정부는 이러한 개발형태로 2012년까지 오리노코 오일벨트 내 초중질유의 생산량을 약 3백만 배럴/일까지 늘려서 자국의 원유생산량을 550만 배럴/일로 증가시킬 계획을 가지고 있다 (Fig. 9).

오리노코 오일벨트 초중질유의 생산방식은 저류층에 스팀이나 열을 가하지 않고 시추공을 통해 직접 펌핑하여 생산하는 일차생산기법 (Cold heavy oil production) 을 주로 이용한다. 점성이 높은 초중질유 생산에 비가

열식 생산기법이 적용될 수 있는 것은 저류층의 물리적 조건과 향상된 생산 기술이 적용되었기 때문이다. 우선 초중질유는 높은 비중에도 불구하고 저류층 내에서 점성은 5,000 cP 이하로 약간의 유동성을 갖는 특징이 있다. 이러한 이유는 깊은 심도에 저류층이 형성되어 지중온도가 높기 때문으로 오일벨트 내의 지중온도는 평균적으로 800 m에서 약 50°C, 1100 m에서 약

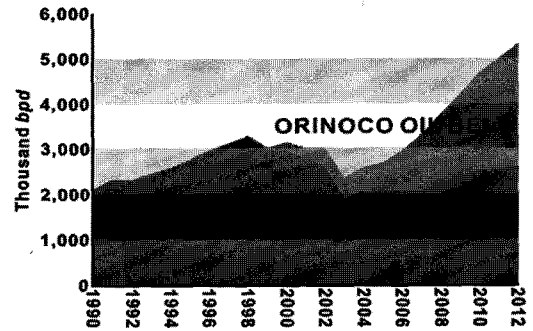


Fig. 9. Prediction of crude oil production in Venezuela (historical data from IPD Latin America, 2007 and forecast data from IPD based on currently planned investment and Venezuela government, 2007).

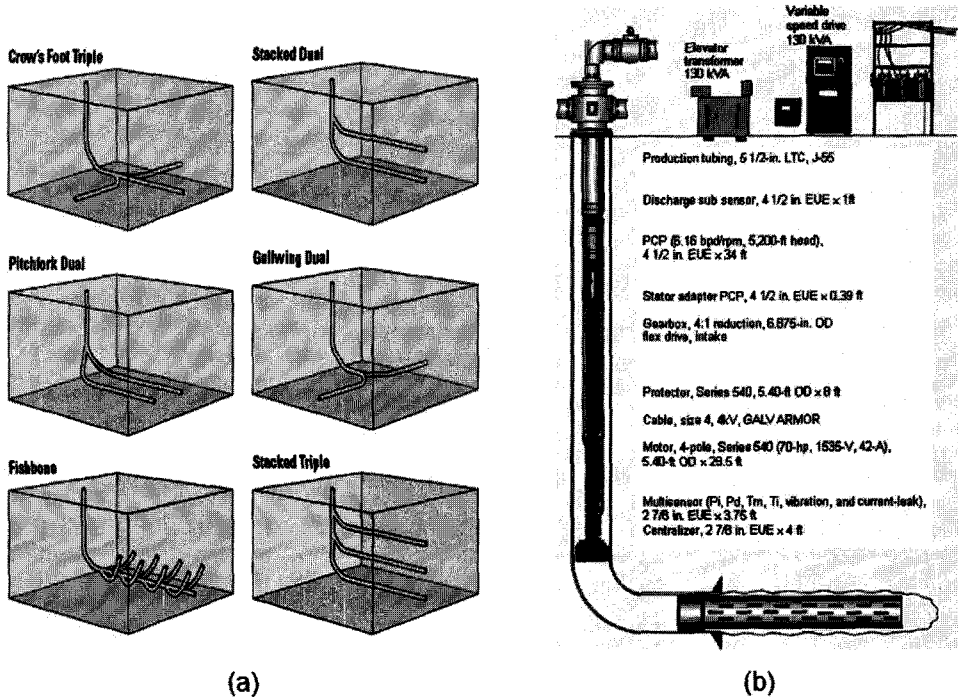


Fig. 10. Extra heavy oil recovery techniques for increase of production rate by cold production; (a) different types of multilateral production well used to improve extra heavy oil recovery (modified after Cutis *et al.*, 2002) and (b) Schematic of a PCP bottom-drive installation for horizontal well (modified after Ramos *et al.*, 2007).

60°C의 범위이다 (James, 2000b). 둘째, 수평시추공 굴착기술이 상용화되어 생산정의 효율적인 설계가 가능해졌고, 또한 생산 시 수반되는 샌드 회수가 현저히 감소하게 되었다. 주아타 (주닌) 필드에 적용된 단일 수평시추공은 최대 1,500 m까지 굴착되었으며, 복잡한 저류층 지질 특성을 반영한 다중수평공 (Multilateral wells)을 적용하여 생산정 네트워크의 총 연장이 19,200 m에 이르도록 설계되기도 하였다 (Fig. 10; Cutis *et al.*, 2002). 셋째, 생산 수평정이 대상 사질층에 정확하게 위치할 수 있도록 상세한 저류층 지질정보를 빠르게 파악하고자 시추간 검층 기술 (LWD, Logging while drilling)이 이용되었다. 시추간 검층기술은 저류층의 심도 및 두께, 이질층의 분포를 실시간으로 해석이 가능하게 하여, 상세한 저류층 탐사와 생산정 굴착을 동시에 진행시킴으로써 생산효율 향상에 기여하였다. 마지막으로 PCPs (progressive cavity pumps)와 ESPs (electric submersible pumps) 등의 고성능 펌프가 개발되어 초중질유의 회수율이 증진될 수 있었다. 나프타나 경유 (light oil)와 같은 희석액을 펌프 주위에 주입시키는 방법을 통해 초중질유의 점성을 낮추어 보다 쉽게 회수하는 방법도 일부 생산지역에서 적용되고 있다. 최근에는 일반적으로 사용되는 지표에 설치된 PCP를 이용한 회수방식 (Top-Drive PCP)을 대신하여 지중 PCP 생산방식 (Bottom-Drive PCP)이 개발되어 초중질유 생산에 이용되고 있다 (Fig. 10, (b)). 세로네그로 (카라보보) 지역에서 처음 적용된 지중 PCP 방식은 상대적으로 초중질유를 끌어올리는 거리를 단축시켜서 50% 정도 낮은 출력의 펌프를 사용하여도 종전 방식과 비슷한 1,000 배럴/일까지 초중질유가 생산되었다 (Ramos *et al.*, 2007).

지금까지 널리 적용되는 일차생산기법의 초중질유 회수율은 10% 이하로 아직까지 높은 편은 아니다. 최근에는 카라보보 지역을 중심으로 캐나다 오일샌드의 현장생산에서 이용되는 스팀주입중력법 방식의 스팀주입 생산기법에 대한 적용성 평가가 이루어지고 있다. 관련 업계에서는 스팀주입중력법을 활용한 회수기법을 적용할 경우 20-25%의 초중질유 회수율을 나타낼 것이라고 기대하고 있으나, 아직까지 현장 적용 사례에 대한 결과는 보고된 바가 없다. 하지만 캐나다 오일샌드 지역에 스팀주입중력법 방식의 생산이 상업적으로 성공하고 있으며, 베네주엘라 초중질유 개발에 높은 수준의 기술력을 갖고 있는 외국계 기업이 활발하게 참여하고 있기 때문에 심부가열식 생산기법도 오리노코 오일벨트의 현장에 머지않아 적용될 것으로 예상된다.

6. 오리노코 오일벨트 저류층 지질특성

베네주엘라 오리노코 오일벨트의 초중질유는 비중이 무겁고 점성이 큰 원유자원이기 때문에 원유의 생산, 정유, 운송의 과정에서 기존의 석유보다 높은 기술력과 비용이 요구된다. 이러한 이유로 오리노코 지역의 초중질유가 처음 발견된 1935년 이후부터 1990년대에 이르기까지 주목할 만한 생산 결과들이 없었던 것이 사실이다. 하지만 지난 10년 여 동안 수평시추공과 다중수평정을 이용한 생산정 설계와 고성능 생산 펌프가 도입되어 결과적으로 생산정 당 목표 생산량이 종전 200 배럴/일에서 현재 10배 증가한 2,000 배럴/일로 증가되었다 (Ramos *et al.*, 2007). 최근 도입되고 있는 스팀주입중력법과 같은 심부가열 회수방식이 현장에 성공적으로 적용된다면 초중질유의 생산량은 더욱 증대될 것으로 기대된다.

오리노코 오일벨트의 초중질유 생산 분야에 대한 기술적 문제들은 상당한 부분에서 해결되었으며, 현재 다양한 상업적 생산 기술이 현장에 폭넓게 적용되고 있다. 이에 반하여 최적화된 설계를 위해 필요한 저류층의 지질분포를 규명하는 것은 대부분의 저류층이 지하에 위치하고, 암상과 구조가 복잡하게 분포하기 때문에 현재까지도 상대적으로 많은 어려움을 가지고 있다. 지하 저류층의 지질 특성을 규명하기 위해서는 저류층의 지질 특성이 고려되어 다양한 물리탐사 수행과 탐사자료 해석이 이루어져야 하며, 궁극적으로는 이들을 바탕으로 정밀한 저류층 지질 모델이 만들어져야 한다.

최근까지 수행된 오리노코 오일벨트 내 생산블럭 규모의 개발사례들을 종합할 때, 초중질유의 개발과정에서 고려되어야 할 대표적인 저류층 지질 특성에는 사질 저류층 두께 및 분포 특성, 이질 퇴적층의 분포 양상, 단층의 기하학적 구조, 저류층 대상 심도 및 지열 특성, 저류층 지중 응력상태, 초중질유의 화학적 조성 등이 있다.

먼저, 오리노코 오일벨트 내 사질 저류층에서 일차생산방식을 통한 개발이 가능한 최소 두께는 저류층의 공극률 및 투수율과 원유 포화도 등에 따라 15-130 m의 범위를 가지며, 그 평균치는 50 m 정도이다. 오피시나층 사질 퇴적체의 대부분은 채널 이동과 증첩에 의해 형성되었기 때문에 두꺼운 사질 저류층은 특정한 방향성을 갖고 분포하는 경우가 많다. 따라서 수평생산정을 통한 일차생산기법 또는 열회수기법을 적용할 때 사질 저류층의 방향성을 추적하는 것이 대단히 중요하다.

주요 저류층인 오피시나층은 오일벨트 내에서 동편

으로 경사져 있으며, 층후도 경사방향으로 가면서 얇아진다 (Fig. 8). 이러한 특징은 광역적으로 오피시나층이 오피시나강의 퇴적작용에 의한 퇴적층으로 인식하게 하고 있으나, 퇴적물의 공급량과 층후의 관계를 고려할 때 카우라강의 역할도 주요하게 작용하였던 것으로 보고된다 (Díaz de Gamero, 1996). 구아야나 순상지로부터 북쪽 방향으로 유입되는 카우라강은 올리고세부터 오일벨트 지역에 퇴적물을 지속적으로 공급하였으며, 오피시나층에서 지역적으로 남북 방향으로 발달하는 채널들은 카우라강에 의해 형성되었을 것으로 판단된다 (Fig. 5). 대표적으로 아야쿠초 (하마카) 지역 Ameriven 필드의 저류층 특성화 연구에서는 3차원 탄성과 탐사를 통해 효과적으로 채널 방향성을 추적하였고, 약 3.6 km 폭의 채널 중첩에 의한 사질퇴적체가 남북방향으로 분포하고 있음을 보고하였다 (Tankersley and Waite, 2002). 앞으로 오리노코 오일벨트 저류층의 분포 특성 파악을 위해 3차원 탄성과 탐사의 수요는 더욱 증가될 것으로 예상된다.

저류층 내 분포하는 이질 퇴적체는 낮은 투수성을 갖기 때문에 저류층의 연장성 및 생산 소통을 방해하여 초중질유의 생산 효율을 저하시키는 대표적인 저류층 암상이다. 특히 스템주입증력법을 통한 개발이 이루어질 경우 스템주입정과 생산정 사이의 불투수성 이질 퇴적층은 스템챔버 형성과 열전파를 방해하여 심각한 경제적 손실을 가져올 수 있다 (Kwon, 2008). 오피시나층에서 세립질 퇴적층들은 최대해침면 또는 순차층서계면을 따라 발달하는 경우가 많으며, 이들은 경우에 따라 채널의 침식작용에 의해 일부가 단절되기도 한다 (Labourdette *et al.*, 2008). 따라서 생산 계획 수립에 앞서 저류층의 퇴적학 및 순차층서적 연구를 통해 이질 퇴적층의 분포 양상 파악이 필요하다.

세립질 퇴적체와 마찬가지로 저류층에 분포하는 단층은 저류층 연장성을 저해하는 지질구조이다. 오피시나층을 절단하는 신생대 단층은 주로 오일벨트의 동편에 많이 분포하며, 분지 침강으로 인하여 동서 내지 동북동 방향의 정단층이 주를 이룬다 (Isea, 1987). 단층에 의해 저류층은 구조적으로 구획화될 수 있으며, 각 구획마다 생산 저류층 심도, 연장방향, 공극율, 투수율 및 포화도 등이 특성화된다. 따라서 초중질유 저류층 지질특성화 모델을 만들기 위해서는 개별 생산능력 내 단층의 3차원적 구조가 결정되어야 하며, 이는 2차원 내지 3차원 탄성과 탐사자료의 해석을 통하여 규명될 수 있다.

초중질유의 생산에 직접적으로 영향을 주는 점성은

지하에서 생산에 필요한 유동성을 제공한다는 점에서 중요한 물성이다. 베네주엘라 초중질유의 점성은 평균적으로 1,000-5,000 cP이며, 이는 주로 지하의 매장 심도와 온도에 의하여 결정된다. 오리노코 지역의 평균 지온경사는 32.4°C/km로 심도가 깊어질수록 점성이 작아져 유동성이 증가하는 경향이 있다. 하지만 저류층 심도가 1,300 m 이상이 되면 생산정 굴착비용의 증가로 경제성이 현저하게 낮아지며, 따라서 개발 가능한 대상 저류층 심도는 평균적으로 600 m 내외로 한다. 저류층의 심도가 증가함에 따라 지중 응력도 평균적으로 9.6 kPa/m 증가하며, 지하 500 m에서 저류층의 압력은 5.6 MPa 정도가 된다 (Fiorillo, 1987). 높은 지중 응력은 샌드 생산 (sand production)과 생산정 안정성에 영향을 줄 수 있으며, 상대적으로 수직정보보다 수평정이 두 측면에서 모두 유리하다.

마지막으로 초중질유는 금속과 황 성분을 불순물로 포함하고 있으며, 이러한 화학 조성은 생산 단계 (upstream) 뿐만 아니라 개질 및 정류과정에 해당하는 하류부분 (downstream)에 이르기까지 중요한 역할을 담당한다. 일반적으로 초중질유에서 금속성분은 500 ppm 정도로 바나듐과 니켈이 대표적이며, 생분해작용에 의해 형성된 황은 3-4% 정도 함유되어 있다.

앞서 제시된 초중질유 저류층의 지질 특성들은 각 생산블럭의 사례연구들을 종합하여 요약한 것으로 저류층의 개발 및 탐사의 계획수립 단계에서 합리적인 기초 자료의 역할을 충분히 할 수 있다. 하지만 본 연구에서 소개된 지질특성들은 광역적인 규모에서 개별 저류층의 평균적인 양상이기 때문에 생산블럭에 바로 적용하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 생산블럭 규모에서의 정밀한 저류층 지질 모델을 만들기 위해서는 각각의 지질 특성들이 탐사 및 생산정 설계 단계에서 반드시 세밀하게 측정되어야 한다. 이러한 지질 특성들은 다양한 물리탐사를 통해 파악될 수 있으며, 특히 최근 도입된 3차원 탄성과 탐사 및 시추간 검층 기술 등은 시간과 비용 측면에서 보다 효율적이고 정교한 지질 자료를 제공할 것으로 기대된다.

7. 결 론

베네주엘라 오리노코 오일벨트에는 1조 3천억 배럴의 초중질유가 매장되어 있으며, 초중질유 회수 기술의 지속적인 향상으로 인하여 그 가채매장량은 증가 추세에 있다. 현재 고성능 펌프 및 다중수평 시추 기술을 비롯하여 스템주입증력법과 같은 열회수 기술은 대표

적인 초중질유 회수 기술로 평가받고 있으며, 이들을 적용하여 최적의 생산 결과를 도출하기 위해서는 복잡한 저류층의 지질특성에 대한 이해가 요구된다. 초중질유 저류층의 지질특성은 광역적으로 지구조 운동에 의한 동베네주엘라 분지의 진화와 퇴적환경 변화에 의해 주로 결정되며, 지역적으로는 채널 사질 퇴적상 및 신생대 단층의 분포에 의해 복잡한 양상을 나타낸다.

복잡한 오리노코 오일벨트의 효율적인 개발을 위해서는 지하 저류층의 분포를 파악하여 정확한 저류층 지질 모델 수립이 이루어져야 한다. 초중질유 저류층의 분포 및 생산효율에 영향을 미칠 수 있는 주요 지질특성으로 본 연구에서는 1) 사질 저류층 두께 및 분포 특성, 2) 이질 퇴적층의 분포 양상, 3) 단층의 기하학적 구조, 4) 저류층 대상 심도 및 지열 특성, 5) 저류층 지중 응력상태, 6) 초중질유의 화학적 조성 등을 제안하였다. 오리노코 오일벨트에서 각 지질특성은 동편 (야쿠초와 카라보보 지역)과 서편 (보야카와 주닌 지역)의 상이한 지질구조로 인하여 양분되어 나타난다. 또한 채널 이동 방향과 지역적인 단층의 존재로 인하여 각 지역의 생산블록 마다 편차를 보인다. 따라서 특정 생산블록의 개발 계획 수립을 위해서는 대상 저류층에 대한 정밀한 탐사가 수행되어 명확한 지질특성 규명이 필요하다.

오리노코 오일벨트에서는 초중질유 저류층의 지질특성을 이해하기 위해 그 동안 많은 시추탐사 및 탄성과 탐사가 이루어졌으며, 이를 통해 저류층의 지질모델과 생산 수평정의 설계가 수행되고 있다. 최근에는 3차원 탄성과 탐사, 시추간 검층 (LWD)과 같은 최신 기술이 도입되어 정밀한 지질모델을 효율적으로 생산하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 향후 국내 석유 관련 기업과 연구진도 여기에 관심을 가질 필요가 있다.

사 사

본 연구는 지식경제부 재원으로 한국지질자원연구원 기관목적사업인 ‘비재래형 석유저류층 지질특성 조사 (과제번호 GP 2010-019)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 아울러 논문의 완성에 유익한 의견을 제공해주신 최재용, 이민정, 허덕기 연구원에게도 감사를 드립니다.

참고문헌

- Cutis, C., Kopper, R., Decoster, E., Guzmán-García, A., Huggins, C., Knauer, L., Minner, M., Kupsch, N., Linares, L.M., Rough, H. and Waite, M. (2002) Heavy-Oil Reservoirs, *Oil field Review*, v.14, p.30-51.
- Díaz de Gamero, M.L. (1996) The changing course of the Orinoco River during the Neogene: a review. *Paleoecology*, v.123, p.385-402.
- Drew L.J. and Schuenemeyer J.H. (1997) Oil- and gas-resources assessment in certain South American basins-An application of ARDS (ver. 5.0) to complex exploration and discovery histories, *Nonrenewable Resources* v.6, 4, p.295-315
- Fiorillo, G. (1987) Exploration and Evaluation of the Orinoco Oil Belt, in *Exploration for Heavy Crude Oil and Natural Bitumen*, Editor Meyer, R.F., AAPG Studies in Geology 25, p.103-114.
- Gonzalez de Juana, C., Iturralde de Arozena, J. and Picard, X. (1980) Geology of Venezuela, Its Petroleum Basins, *Foninves*, p.5-300.
- Gonzalez, O., Hernandez, J., Chaban, F. and Bauza, L. (2006) Screening of suitable exploitation technologies on the Orinoco Oil Belt applying geostatistical methods, *World Heavy Oil Conference*, Beijing, China, November 12-15, 2006, Proceedings, Paper 2006-774, p.12.
- Head, I.M., Jones, D.M. and Larter, S.R. (2003) Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil, *Nature*, v.426, p.344-352.
- Hedberg, H.D. (1950) Geology of the Eastern Venezuela Basin, *Bulletin of the Geological Society of America*, v.61, p.1173-1216.
- Hinkle, A. and Batzle, M. (2006) Heavy oils: a worldwide overview, *The Leading Edge*, v.25, p.742-749.
- Isea, A. (1987) Geological synthesis of the Orinoco oil belt, Eastern Venezuela. *Journal of Petroleum Geology*, v.10, p.135-148.
- James, K.H. (2000a) The Venezuelan Hydrocarbon Habitat, Part 1: Tectonics, Structure, Paleogeography and Source Rocks, *Journal of Petroleum Geology*, v.23, p.5-53.
- James, K.H. (2000b) The Venezuelan Hydrocarbon Habitat, Part 2: Hydrocarbon Occurrences and Generated-Accumulated Volumes. *Journal of Petroleum Geology*, v.23, p.131-164.
- Kasper, D.A. and Larue, D.K. (1986) Paleogeographic and tectonic implications of quartzose sandstones of Barbados, *Tectonics*, v.5, p.837-854.
- Kwon, Y.K. (2008) Geology of Athabasca Oil Sands in Canada, *Korean Jour. of Perol. Geol.*, v.14, p.1-11.
- Labourdette, R., Casas, J. and Imbert, P. (2008) 3D sedimentary modelling of a Miocene deltaic reservoir unit, Sincor Field, Venezuela: A new approach, *Journal of Petroleum Geology*, v.21, 2, p.135-152.
- Martinez, A.R. (1987) The Orinoco Oil Belt, Venezuela. *Journal of Petroleum Geology*, v.10, p.125-134.
- Ramos, M.A., Brown, J.C., Rojas, M., Kuyucu, O. and Flores, J.G. (2007) Producing extra-heavy oil from the Orinoco Belt, Cerro Negro area, Venezuela, using Bottom-Drive progressive cavity pumps, *SPE Production & Operation*, PAPER SPE 97889, p.151-155.
- Rongner, H.H. (1997) An assessment of world hydrocarbon resources. *Annu. Rev. Energy Environ.*, v.22, p.217-262.
- Summa, L.L., Goodman, E.D., Richardson, M., Norton,

- I.O. and Green, A.R. (2003) Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. *Marine and Petroleum Geology*, v.20, p.323-349.
- Talukdar, S.C., Gallango, O. and Ruggeiro, A. (1987) Generation and migration of oil in the Maturin Subbasin, Eastern Venezuelan Basin. *Organic Geochemistry*, 13, p.537-547.
- Tankersley, T.H. and Waite, M.W. (2002) Reservoir modeling for horizontal exploitation of a giant heavy oil field - Challenges and lessons learned, SPE/PS-CIM/CHOA International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and International Horizontal Well Technology Conference 2002, Alberta, Canada.
- USGS (2009) An estimate of recoverable heavy oil resources of the Orinoco oil belt, Venezuela. Fact Sheet 2009-3028.

2010년 11월 25일 원고접수, 2011년 2월 24일 게재승인