

<Review>

비전통 탄화수소 자원의 지질학적 의의

이용일¹ · 임현수^{2,*} · 최태진³

¹서울대학교 지구환경과학부

²부산대학교 지질환경과학과

³조선대학교 에너지자원공학과

요 약

이 논평에서는 방향성 시추 및 수압파쇄 기술의 발전에 의해 최근 관심이 높아지고 생산량이 증가하고 있는 셰일, 치밀지층 및 석탄층에 포함된 비전통 탄화수소 자원의 지질학적 특징에 대해 살펴보고자 한다. 석유산업에서 수압파쇄 기술의 적용이 점차 증가하고 있기 때문에, 전통적인 탄화수소와 비전통 탄화수소의 구분이 과거에 비해 점차 모호해지고 있으므로 비전통 탄화수소는 새로운 형태의 전통적인 탄화수소 자원이 될 것이다. 치밀한 저류암층에 포획된 비전통 탄화수소는 구조트랩이나 층서트랩에 저장되어 있는 전통적인 탄화수소와는 매우 다른 다음과 같은 지질학적 특징을 갖는다. 1) 탄화수소의 근원암과 저류암이 공존한다, 2) 공극률과 투수율이 매우 낮다, 3) 나노미터 크기의 공극 사이 연결통로가 널리 분포한다, 4) 탄화수소를 함유하는 저류암체가 연속적으로 분포한다, 5) 뚜렷한 트랩의 경계가 존재하지 않는다, 6) 부력과 우체역학적인 기작의 영향이 미미하다, 7) 다르시의 법칙이 적용되지 않는다, 8) 물, 오일, 가스의 상이 거의 분리되어 있지 않다, 9) 뚜렷한 오일-가스-물의 경계면이 존재하지 않고 압력계 역시 일정하지 않다, 그리고 10) 오일과 가스 포화도가 다양하다. 요약하면 비전통 탄화수소는 넓은 지역에 걸쳐 연속적으로 집적된다는 것이 전통적인 탄화수소와의 가장 큰 차이점이다.

주요어: 비전통 탄화수소, 수압파쇄, 셰일, 치밀지층, 석탄층

Yong Il Lee, Hyoun Soo Lim and Taejin Choi, 2016, Geological characteristics of unconventional hydrocarbon resources. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 1, p. 79-93

ABSTRACT: This paper reviews the geological characteristics of unconventional hydrocarbon plays from shales, tight formations, and coal bed, which are gaining much attention and are being commercially produced in significant amounts recently due to the modern development of directional drilling and hydraulic fracturing technologies. In fact, the hydraulic fracturing techniques are being increasingly adopted by the petroleum industry, and thus the distinction between conventional and unconventional hydrocarbons becomes less meaningful than before, leading to unconventional hydrocarbons becoming a new type of conventional hydrocarbons. The unconventional hydrocarbons trapped in tight reservoirs have much different characteristics than the conventional hydrocarbons stored in structural and stratigraphic traps. The unconventional hydrocarbons have the following geological features: 1) the hydrocarbon source and reservoir rocks coexist; 2) porosity and permeability are very low; 3) nanometer-sized pore-throat are widely distributed; 4) hydrocarbon-bearing reservoirs are continuously distributed; 5) no obvious trap boundary occurs; 6) there is little effect of buoyancy and hydrodynamics; 7) Darcy's law does not apply; 8) there is poor separation of water, oil, and gas; 9) there occurs no clear interface among oil, gas, and water as well as pressure system; and 10) oil and gas saturation varies. In summary, continuous accumulation of hydrocarbons over a large area is the most distinguishing characteristic of unconventional petroleum.

Key words: unconventional hydrocarbon, hydraulic fracturing, shale, tight formations, coalbed

(Yong Il Lee, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Hyoun Soo Lim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Taejin Choi, Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-51-510-2251, E-mail: tracker@pusan.ac.kr

1. 서론

지금까지 에너지 자원으로 주로 전통적인(conventional) 석유자원에 대한 탐사, 개발 및 생산이 이루어져 왔지만, 최근 비전통(unconventional) 석유자원에 대한 중요성이 점차 부각되면서, 이제는 석유 탐사의 방향이 전통적인 자원에서 비전통 자원으로 점차 전략적 전환이 이루어지고 있는 상황이다. 전통 석유자원과 비전통 석유자원은 석유자원의 배태에서부터 생산에 이르기까지 많은 차이를 나타내지만 이 둘의 가장 큰 차이점은 탄화수소의 유동성 정도이다. 우리가 전통 석유자원이라고 부르는 것은 사암이나 석회암에 들어 있는 오일과 가스를 가리키는데 이들 자원은 시추 시에 다량의 오일과 천연가스가 즉각 시추정으로 유입되는 반면, 비전통 석유자원을 포함하고 있는 치밀(tight) 사암, 셰일이나 석탄층에서 에너지를 생산하기 위해서는 저류층에 강한 자극을 가해야 한다는 차이점이 있다.

비전통 석유자원도 전통 석유자원과 마찬가지로 퇴적물에 들어있는 식물이나 미생물과 같은 유기물이 매몰된 후 온도와 압력이 높아지면서 오일과 천연가스로 천천히 전환된 것이다. 이렇게 생성된 탄화수소의 일부는 인접한 공극률과 투수율이 높은 지층으로 빠져나가 전통적인 오일과 천연가스로 집적된다. 그렇지만 생성된 대부분의 탄화수소는 치밀하고 투수율이 낮은 생성층 또는 인접한 층으로 이동하여 잔류하게 되는데, 이와 같은 탄화수소를 비전통 탄화수소라고 한다. 보통 비전통 석유자원이라고 분류되는 것 중에는 중유(heavy oil)와 역청(bitumen), 오일셰일(oil shale), 그리고 가스하이드레이트(gas hydrate)도 포함되는데 이들은 오래 전부터 알려져 있지만, 최근에 주목 받고 있는 셰일가스(shale gas), 셰일오일(shale oil)이나 치밀가스(tight gas), 치밀오일(tight oil) 등의 비전통 석유자원과는 산출 양상과 생산 기법에서 차이가 난다. 이들 역시 비전통 석유자원의 범주에 들기 때문에 먼저 이들에 대하여 간략히 소개를 하고, 수압파쇄 공법을 이용하여 탄화수소를 생산하는 후자의 비전통 석유자원(이하 '비전통 석유자원'이라고 함)에 대한 지질학적 특성과 전통적인 석유자원과의 차이점, 비전통 석유자원의 생산 방식에 대해 간단히 소개하고자 한다.

2. 전통 석유자원

전통 석유자원은 유기물이 풍부한 세립질 퇴적물(근원암)이 매몰되어 열적 성숙도에 따라 오일과 가스가 생성된다. 이렇게 근원암에서 생성된 탄화수소가 수압에 의해 근원암에서 배출되어 공극률과 투수율이 높은 대수층을 따라 상향 이동을 하다 셰일과 같은 불투수성의 지층(덮개암)을 만나면 더 이상 이동하지 못하고 대수층의 상부(저류암)에 집적된다. 전통적인 석유자원은 이렇게 탄화수소가 더 이상 이동하지 못하도록 하는 집적구조인 트랩이 형성된 곳의 저류암을 탐사하여 생산한다(그림 1). 트랩에는 구조적인 트랩, 층서적인 트랩, 유체역학적인 트랩 및 이들의 복합적인 트랩이 있으며, 이들은 지하의 제한된 공간에 걸쳐 분포한다.

석유탐사 초기에는 이 중에서 비교적 쉽게 찾아낼 수 있는 구조적 트랩의 탐사와 개발에 주력하였다. 이후 탐사의 주된 방향은 구조트랩보다는 탐사하기 어려운 층서 트랩으로 전환되었다.

전통적인 탄화수소의 집적은 균일한 압력과 석유-물의 접촉 경계를 가지는 개개의 트랩에 탄화수소가 집적되는 것을 가리킨다. 만약에 이 트랩에 하나의 유체상 탄화수소인 오일이나 가스만 존재한다면, 이를 각각 오일 pool 또는 가스 pool이라고 하며, 만약 오일과 가스가 공존한다면 석유 pool이라고 한다.

정리하면 전통 탄화수소의 집적이 된 곳은 그 경계가 뚜렷이 구분되는 3차원적인 지질 실체를 가리킨다. 탄화수소 pool을 기술하는데 탄화수소가 유출되는 지층 구조의 하한인 배수점(spill point), 고도 및 분포 범위와 같은 요소를 필요로 한다. 또한 오일

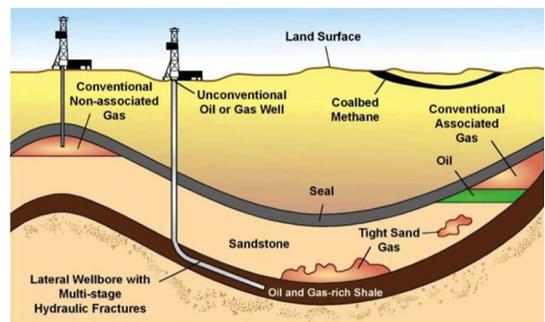


Fig. 1. Schematic diagram showing the geology of conventional and unconventional oil and gas (US EIA, <https://www.eia.gov/>).

이나 가스층의 두께, 오일이나 가스층의 경계와 범위, 가스 top과 오일 ring, 공극률과 같은 요소들은 pool의 가채매장량을 계산하는데 이용된다. 전통 탄화수소의 집적에는 탄화수소의 이동과 유체의 흐름은 다공성 매질을 통과하는 유체의 단위 시간당 유량과 유체의 점도, 유체가 흐르는 거리와 그에 따른 압력 차이 사이의 비례관계를 규정한 다르시의 법칙(Darcy's law)을 따른다. 유체역학의 법칙에 따라 전통 탄화수소의 저류암은 유체역학적으로 낮은 위치에너지가 가지는 곳에 분포한다. 이 저류암에는 탄화수소가 개별적으로 유입되고 저장되며 불투수층에 의해 덮여 더 이상 이동하지 못한다. 탄화수소는 대략 1mm-1mm 크기의 공극을 가지는 저류암에 집적되며, 이 저류암은 독립적으로 분포하거나 또는 군집을 이루고 분포하기도 한다. 이렇게 전통적인 탄화수소 자원은 이들의 집적에 적용되는 유체역학적인 특징으로 다르시의 법칙이 적용된다는 점, 명확하게 구분되는 오일-가스-물의 경계를 가진다는 점, 그리고 세 종류의 유체(오일, 가스, 물)는 비중과 부력에 따라 분포하며, 탄화수소는 개별 트랩에 집적된다는 특징을 가진다.

3. 비전통 석유자원

비전통 석유자원에는 셰일가스, 셰일오일, 오일셰일, 치밀가스, 치밀오일, 천연 역청, 중유, 석탄층 메탄(coal-bed methane; CBM)과 가스하이드레이트가 있다.

3.1 중유(重油), 역청, 오일셰일 및 가스하이드레이트

중유와 역청은 점도가 매우 높기 때문에 정상적인 저류암 조건에서는 쉽게 생산정으로 이동하지 못한다. 중유와 역청은 원유를 붙잡아두는 덮개암의 역할이 충분하지 않아 지하 얕은 곳까지 이동하여 온 원유에서 박테리아에 의해 가벼운 석유 성분이 분해되어 무거운 석유 성분이 남아있을 때 생성되는 것으로 알려지고 있다. 이들은 밀도나 비중이 정상적인 원유에 비하여 큰데, 중유는 미국석유협회(American Petroleum Institute: API)의 비중 척도에서 20° 보다 낮고(Dusseault, 2001), 역청은 석유에서 가장 무거운 성분으로 API 비중이 10° 이하이다(Meyer and Attanasi, 2003). 참고로 API 비중

[API gravity=141.5/(60°F에서의 비중)-131.5]이란 오일의 비중을 60°F 온도조건에서 물과 비교해 나타낸 것으로, API 비중이 10 보다 크면 물 보다 가벼워 물 위에 뜨고, 10 보다 작으면 물보다 무거워 가라앉는다. 중유는 오일샌드(oil sand)에서 산출하는 천연 역청과 밀접히 연관되어 있다. 중유의 생산은 현재 여러 나라에서 시행되고 있는데, 2008년의 생산량으로 볼 때 캐나다와 베네수엘라가 선두에 있다(Society of Exploration Geophysicists, 2008).

오일샌드로부터 중유를 생산하는 방법으로는 지하에 두 개의 수평정을 수 m 간격으로 설치한 후 상부 수평정에 스팀을 계속 주입하여 중유의 점성도를 낮춰 하부의 수평정으로 떨어진 중유를 추출해 내는 생산 공정(steam-assisted gravity drainage), 스팀을 주입하여 중유의 점도를 낮춰 생산정에서 중유를 생산하는 공정(steam injection), 지하에 두 개의 수평정을 설치한 후 상부 수평정에 석유 용매제를 주입하여 중유를 모래 알갱이에서 분리한 후 하부 수평정에 중유를 집적시켜 생산하는 공정(vapor extraction), 그리고 공기가 주입되는 수직정과 수평정을 이용하여 수직정 구간에 점화를 시켜 중유의 점도를 낮춰 수평정으로 유입된 중유를 생산하는 공정(toe-to-heel air injection)과 노천 채굴의 방법 등이 있다.

오일셰일은 유기물이 풍부한 셰일로서 아직 유기물의 열적 성숙도가 낮아 오일이나 가스가 생성되지 않은 단계의 매물 속성작용을 받은 퇴적암이다. 이 같은 유기물의 낮은 열적 성숙도가 오일샌드나 셰일 가스와의 가장 큰 차이점이다. 오일셰일은 높은 온도(450-500°C)에서 가열을 하면 케로젠(kerogen)의 열분해가 일어나 유증기가 생성되며 이를 모아 냉각시키면 액상의 오일과 가스를 얻을 수 있다. 오일셰일에서 오일이나 가스를 생산하는 과정에는 많은 에너지가 사용되어야 하므로 전통적인 탄화수소 생산에 비해 생산 비용이 더 많이 든다. 이에 따라 아직 북미에서는 오일셰일로부터 오일의 상업적 생산은 하지 않고 있다. 또한 오일셰일을 열분해 시키고 남은 셰일에는 아직 추출하지 못한 오일이 다량 잔류하고 있기 때문에 폐기물을 처리하는 과정에서 환경 오염원으로 작용할 수 있다. 전 세계적으로 오일셰일의 매장량은 2010년 셰일 오일 기준으로 5조 배럴(7,900억 m³)으로 전통적인 오일을 대체할 수 있는 양으로 추산되며(US EIA, 2010), 미국이 가장 많은

오일셰일 매장량을 가지고 있다. 오일셰일은 현재 브라질 등에서 노천채광 기법(surface mining)을 활용하여 소량 생산이 이루어지고 있으며, 셸(shell)사 등에서 전기적 열주입을 통한 현장 생산기법을 연구 중이다

가스하이드레이트 또는 메탄하이드레이트는 영구 동토나 심해저 퇴적층의 저온과 고압 상태에서 천연가스가 물과 결합해 생성된 고체 에너지원으로, 향후 주요한 녹색 화석연료 에너지원으로 여겨지고 있다. 가스하이드레이트에 들어 있는 천연가스는 메탄뿐 아니라 다른 종류의 천연가스(에탄, 부탄 등)도 함유하고 있으며 황화수소와 이산화탄소도 존재한다. 이들 천연가스는 두 가지의 성인으로 생성된다. 첫 번째는 지하 심부 퇴적물에서 유기물이 열적으로 성숙되어 생성된 열기원 가스이며, 두 번째는 지하 천부에서 유기물의 분해에 의해 생성된 생물기원 가스이다. 가스하이드레이트에 들어있는 메탄의 총량은 10^{15} - 10^{17} m^3 으로 추정되며(Marshall, 2009), 심해저 퇴적물에 들어있는 가스하이드레이트의 메탄 함량은 약 6.4조 톤(6.4×10^{12} ton)에 달하는 것으로 추정된다(Buffett and Archer, 2004). 영구동토 가스하이드레이트는 1998년 북극권에 속하는 캐나다의 맥켄 지강 삼각주에서 처음 연구가 시작되었는데(Mallik Gas Hydrate Production Research Program), 이곳에는 지하 890-1,160 m 심도 구간에 두께가 총 110 m에 달하는 3개의 가스하이드레이트 층준이 분포하는 것으로 알려지고 있다(Dallimore, 2005). 지금까지 전 세계에서 3회의 육상 생산 시험과 1회의 해양 생산 시험이 이루어졌지만, 가스하이드레이트로부터 메탄의 상업적 생산은 아직 이루어지지 않고 있다. 우리나라도 한국지질자원연구원에서 가스하이드레이트의 부존량 및 저류층 특성, 생산 기법, 환경영향 분석 등에 대해 연구하고 있으며 동해의 울릉분지에서 해저 시추를 통해 가스하이드레이트의 부존을 확인하였지만(Kang *et al.*, 2015), 2015년 예정되었던 시험 생산은 기술적 난제로 연기되었다.

3.2 비전통 석유자원

위에서 언급한 중유와 역청, 오일셰일, 그리고 가스하이드레이트를 제외한 비전통 석유자원은 전통적인 석유자원의 지질 측면에서 보면 많이 다루어지지 않는 치밀한 비전통 지층에 분포한다. 비전통 지

층이란 세립질이며 유기물이 풍부한 퇴적암을 가리키는데, 주로 셰일과 이와 유사한 암석으로 공극의 크기는 매우 작고 공극들간의 연결이 빈약하여 오일과 천연가스가 공극을 통하여 쉽게 흐르지 못한다. 여기서 셰일과 기타 암석 저류암들은 우리가 전통 석유 저류암이라고 부르는 암석과는 달리, 오일이나 천연가스의 근원암이자 저류암의 역할을 동시에 하고 있다. 이들 치밀 암석에 들어있는 탄화수소는 단지 이들이 들어있는 암석에서 탄화수소를 추출하고 생산하기 위하여 '비전통적'인 방법을 사용하기 때문에 붙여진 것으로 비전통 석유자원 지층에는 다음과 같은 암상이 있다.

셰일: 유기물이 풍부한 흑색 지층으로 지질 시간에 따라 석유와 가스가 생성되는 근원암을 형성한다. 셰일은 투수율이 매우 낮으며, 이에 따라 탄화수소는 셰일 내의 공극에 존재한다. 셰일은 유기물의 종류와 이들이 매물 속성작용 동안 겪은 열적 성숙도에 따라 주로 가스 또는 석유를 함유한다. 물론 원유 생산정을 통하여 가스가 함께, 또는 가스 생산정에서 액화 탄화수소가 함께 산출되기도 한다(US EIA, 2011; USGS, 2013).

치밀 지층: 치밀 지층에는 치밀 사암, 실트암, 탄산염암 등이 포함되는데 이들 암석은 매우 낮은 투수율을 가지며, 셰일이 아닌 암상으로 탄화수소를 함유하고 있는 지층이다. 이들 암상에도 역시 탄화수소는 지층의 공극에 존재한다. 치밀가스 저류암이란 암석의 기질 공극률이 10% 또는 그 이하의 값을 가지며, 투수율은 0.1 mD나 그 이하인 암석으로 정의된다. 물론 이 정의에서 균열에 의한 투수율은 제외한다. 문헌상에서 "치밀가스"는 "셰일가스"와는 구분되는 것처럼, 셰일과 치밀 지층에 들어있는 오일도 보통 통칭 "셰일오일" 또는 "치밀오일"로 구분되어 사용된다(WEC, 2013; USGS, 2014).

석탄층: 석탄층에는 메탄이 석탄의 공극이나 석탄층 내의 구조에 함유되어 있는 것이 아니라 석탄의 표면에 흡착되어 분포한다. 이러한 석탄층 내의 메탄을 추출하기 위하여 일반적으로 수압파쇄 공법이 적용된다. 석탄층에 수압파쇄를 실시한 후 주입된 물이나 지층수를 생산정에서 뽑아내면 메탄은 석탄의 표면에서 탈착되어 시추공이나 지표로 흘러나오게 된다(USGS, 2000).

비전통 석유자원은 넓은 지역에 널리 퍼져 분포

하는데, 이들은 깊이에 따른 수압의 영향을 비교적 적게 받으며 분포한다. 반면에 전통적인 석유와 천연가스는 공극률이 높고 투수율이 높은 사암과 탄산염암의 저류암에 존재한다. 물론 비전통 석유자원을 함유하는 지층들도 다른 퇴적암의 저류암과 비슷한 공극률을 가지고 있다 하더라도 이들의 공극은 크기가 매우 작고 투수율 또한 매우 낮기 때문에 탄화수소가 이러한 작은 공극을 통하여 이동할 수 없다. 투수율이 매우 낮다는 것은 이들 암석에 들어있는 석유와 천연가스는 자연적으로나 인위적으로 균열이 만들어지지 않는 한 암석 내에 그대로 잔류한다는 것을 의미한다.

4. 비전통 탄화수소 집적의 지질학적 특성

퇴적층에 함유된 유기물이 매몰된 후 열적으로 성숙되어 생성되는 탄화수소의 종류는 열적 성숙도의 단계에 따라 다르다(Tissot and Welte, 1978). 전통 석유자원에서의와 마찬가지로 저류암의 특성과 탄화수소의 생성-배출 사이의 관계에 따라 비전통 탄화수소 저류암의 종류가 결정된다(그림 2). Type I-II 케로젠은 낮은 열적 성숙도(immature) 단계에서 오일이 생성되며 근원암에서 그 존재가 검출되고, 오일세일이 생성된다. 점점 열적 성숙도가 높아지면서 이 케로젠을 함유한 근원암은 많은 양의 오일과 가스를 생성하며 방출시킨다. 이렇게 방출된 오일과

가스는 근원암에 인접한 치밀한 저류암에 치밀오일로 집적되며, 남아있는 오일은 세일오일로 저장된다. 케로젠의 과성숙(over mature) 단계에서는 근원암에서 주로 가스가 생성되며, 이렇게 생성된 가스는 근원암 주변의 치밀 저류암으로 이동하여 집적되며 치밀가스를 형성한다. 또한 근원암에 남아 있는 상당한 양의 가스는 세일가스로 저장된다.

반면 Type III 케로젠은 열적으로 성숙되면서 천연가스가 생성되고 이렇게 생성된 가스는 근원암 자체나 인접한 치밀 저류암으로 이동하여 각각 세일가스와 치밀가스를 형성한다. Type III 케로젠으로 구성된 석탄층메탄 역시 석탄이 열적으로 성숙되는 동안 지속적으로 생성되어 석탄층에 저장된다. 석탄층에서 생성되는 메탄은 층서적으로 석탄층 상·하부가 모두 치밀한 불투수층일 경우에는 생성된 메탄이 잘 보존될 수 있으나, 만약 치밀한 불투수층이 석탄층 상·하부에 모두 또는 한 쪽에 존재하지 않을 경우 석탄층의 메탄은 확산에 의해 상·하부의 투수층으로 빠져나가 지층수의 흐름에 따라 이동된다.

탄화수소를 생산하는 저류암의 품질은 저류암의 공극률과 투수율에 의해 결정된다. 저류암이란 스펀지와 같아서 오일과 탄화수소를 암석 안에 있는 빈 공간(공극)에 배태하고 있다. 전통적인 저류암은 공극의 크기가 육안으로 관찰되는 정도에서 현미경적인 공극까지 비교적 큰 편이며, 공극률 또한 전체 암석 체적의 30% 정도 또는 그 이하를 가지고 있다. 그런데 치밀한 저류암에서는 공극률이 보통 10% 미만이다.

공극률과는 별개로 공극들이 서로 잘 연결되어 있지 않으면 오일과 천연가스는 이동을 할 수 없다. 이와 같이 유체가 움직이는 정도를 투수율이라고 하는데 저류암에서 투수율은 공극률과 함께 매우 중요하다. 투수율이 높은 암석에서는 더 많은 양의 유체가 암석을 투과할 수 있다. 투수율 단위는 다르시(darcy)로 1 기압의 압력구배에서 1 cm당 1 centipoise의 점도를 가진 유체(15°C의 물)가 1cm²를 통하여 1초당 1 mm를 흐를 때 1 다르시라고 하는데, 일반적으로 투수율은 이보다 훨씬 낮기 때문에 mD (millidarcy) 단위를 사용한다. 전통적인 석유 저류암은 투수율이 수 십-수 백 mD를 나타내는데 비해, 치밀 저류암은 보통 0.1-0.01 mD의 투수율을 가진다. 세일 저류암의 투수율은 이보다 더 낮은 0.001-0.0001 mD의 범위를 보인다.

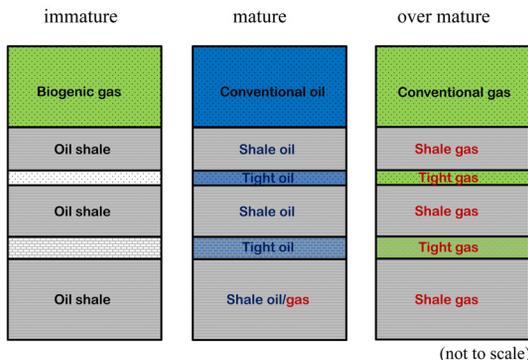


Fig. 2. Schematic diagram of the relationship between Type I-II kerogen maturation and hydrocarbons. Natural gas is generated from Type III kerogen during thermal evolution and the stratigraphic distribution of hydrocarbon reservoirs is similar to that of the over-matured Type I and II kerogen.

Table 1. Comparison of petroleum geology between conventional and unconventional hydrocarbon resources.

Features	Conventional hydrocarbons	Unconventional hydrocarbons
Source	from separate and distant source rocks	within the source rocks or nearby
Migration	secondary migration over a long distance- buoyancy-driven migration	primary migration or secondary migration over a short distance-non-buoyancy-driven migration
Percolation	Darcian percolation	mainly non-Darcian percolation
Hydrocarbon entrapment	by reservoir-forming factors and geological events	gas content is affected by the temperature and pressure fields
Storage	in obvious structural, stratigraphic, hydrodynamic and combination traps	in large-scale and wide-spread continuous reservoirs
Reservoirs	conventional reservoirs, with high porosity and permeability	unconventional tight reservoirs, with very low porosity and permeability
Fluid relationship	uniform fluid contacts	no uniform fluid contacts, various hydrocarbon saturation
Distribution	discrete or clustered	widespread, continuous or quasi- continuous in basin center or slope

비전통 탄화수소 자원에 대한 관심은 이미 오래 전 부터 있어왔으나(Roen and Kepferle, 1993), 실제로 이에 대한 탐사와 개발은 잘 이루어지지 않았다. 그렇지만 1970년대 후반에 치밀사암 가스, 석탄층 메탄과 셰일가스 등과 같은 비전통 탄화수소의 가채매장량이 전체 탄화수소의 가채매장량 증가의 주된 공급 원으로 간주되었다. Schmoker (1995)는 비전통 탄화수소의 집적을 “연속형 석유 집적(continuous-type petroleum accumulation)”이라는 개념으로 소개하였는데, 비전통 탄화수소는 상당히 넓은 지역에 걸쳐 분포하고 탄화수소가 집적되는 데 필요한 트랩이 존재하지 않으며, 또한 탄화수소의 이동에 부력은 큰 영향을 끼치지 않는다고 설명하였다. Law and Curtis (2002)도 비전통 탄화수소는 전통 탄화수소와 같은 구조트랩과는 전혀 관련이 없고, 탄화수소가 비중에 따라 서로 크게 구분이 되지도 않으며 광역적으로 배태된다고 하였다.

비전통 석유자원은 전통 석유자원과 트랩의 조건, 저류암 특성, 근원암과 저류암의 복합, 집적의 특성, 여과 기작 등에서 많은 차이가 있다. 비전통 석유자원과 전통 석유자원의 비교는 표 1에 정리되어 있다. 전통 탄화수소의 집적에서 탄화수소는 근원암에서 생성되어 저류암으로 이동된다. 저류암으로 이동된 탄화수소는 다시 부력에 의해 2차 이동이 일어난 후 구조 트랩이나 층서 트랩에 최종적으로 집적된다. 하지만 비전통 탄화수소는 대부분 근원암 자체 내에

집적되기 때문에 근원암이 분포하는 넓은 지역에 걸쳐 연속적으로 분포한다. 비전통 탄화수소를 함유하는 지층은 지층 전체에 걸쳐 분포하는 나노미터(nm) 크기의 공극 연결통로(pore throat) 망을 이루고 있다. 공극 연결통로의 직경은 대체로 ~100-500 nm를 가지는데, 이렇게 좁은 공극 연결통로 때문에 넓은 면적에 걸쳐 연속적인 탄화수소의 집적이 일어나게 된다. 이에 따라 탄화수소는 일차 이동이나 근원에 가까운 2차 이동을 할 뿐이다. 비전통 탄화수소의 집적은 전통 탄화수소의 집적과는 달리 트랩과 덮개암 사이에 뚜렷한 경계가 존재하지 않으며, 저류암 전체에 걸쳐 균일한 압력 하에 놓이지 않는다. 또한 비전통 탄화수소의 집적은 오일, 가스와 물의 유체 3상이 서로 구분되지 않고 이들이 서로 공존되어 있다는 차이가 있다. 이상에서 살펴 본 비전통 탄화수소 저류암의 특징은 표 1에 요약되어 있다.

5. 비전통 석유자원의 탐사 및 생산

5.1 비전통 석유자원의 탐사

석유 개발의 역사에서 볼 때 오일과 가스와 같은 전통 탄화수소는 지하 깊은 근원암에서 생성이 된 후 얕은 곳으로 이동하여 불투수층 아래에 집적된 전통적인 저류암에서 다양한 방식으로 생산되었다(그림 1). 저류암의 투수율이 좋고 또한 적당한 압력 하에 놓여있을 때에는 오일과 가스가 비교적 빠르게

생산정으로 이동하기 때문에 석유나 가스의 경제적인 생산은 수직 시추공(생산정)을 이용하는 간단한 생산 방식이 적용되었다. 그렇지만 이런 경우가 아니면 생산 공정은 저류암에 물 또는 이산화탄소를 압력 하에 주입하여 주입정 주변의 하나 또는 그 이상의 인접한 생산정을 통하여 석유나 가스를 생산한다. 그러나 여기서 중요한 점은 오일이나 가스의 생산은 지하에 상대적으로 접근이 가능한 곳에 이미 축적되어 있는 석유를 뽑아낸다는 점이다.

21세기 들어서기 전까지도 셰일은 탄화수소의 저류암으로 여겨지지 않았었지만, 유기물이 많이 들어 있는 셰일은 전통적인 석유의 트랩으로 이동하기 전에 오일과 가스가 성숙되는 질 높은 근원암으로서의 가치에 대하여 연구가 이루어졌다. 물론 셰일층을 통과하여 저류암층을 시추할 때 셰일층에서 가스의 흔적이 검출되기도 하였지만 이에 대한 유출 시험은 거의 이루어지지 않았다. 석유 개발의 역사에서 보면 전통적인 오일층 상부에 놓인 셰일층에서 자연적으로 생성된 균열이 하부의 오일층에 연결되어 유출된 오일이 발견되기도 하였다(예: Norman Wells, Northwestern Territories, Canada; www.nrcan.gc.ca/energy).

석탄층매탄, 셰일가스 및 셰일오일과 같은 비전통 탄화수소는 탄화수소가 생성된 근원암에 그대로 잔류하고 있는 양이 약 50% 정도를 차지하는데 비해, 치밀 사암, 치밀 석회암 등에 연속적 또는 준연속적으로 들어 있는 비전통 탄화수소는 탄화수소가 생성된 후 일차 이동과 짧은 거리의 이차 이동을 겪은 후 집적된 것으로 이들의 양은 약 30% 정도에 이른다. 이러한 셰일(치밀) 저류층의 평가는 두 가지 관점에서 수행되어야 한다. 첫 번째는 부존하는 탄화수소의 양에 대한 계산이고, 두 번째는 이 중에서 회수가능한 양에 대한 평가이다. 이러한 평가작업은 일견 전통적 저류층평가와 유사한 듯 보이지만, 훨씬 다양한 지질학적 특성을 고려해야 하며 표준화된 평가기준이 없어 각 유전별로 평가방법이 차별적이다.

셰일이나 치밀한 지층이 생성된 오일이나 천연가스를 저장하고 있는지에 대한 평가를 하기 위해서는 이 지층들에 들어있는 유기물의 함량 및 종류, 그리고 유기물의 열적 성숙도를 분석하여 어떤 종류의 탄화수소가 어느 정도 양으로 생성되었는지를 조사하여야 한다. 또한 이들 지층에 자유롭게 들어있는

탄화수소의 양과 광물 및 유기물 표면에 흡착된 탄화수소의 양에 대하여 파악해야 한다. 셰일에 들어 있는 천연가스는 두 가지의 상태로 존재한다. 1) 자유 가스(free gas): 가스가 셰일을 구성하는 광물 입자 사이나 유기물 내의 빈 공간(공극)에 가스 상태로 존재한다. 2) 흡착 가스(adsorbed gas): 이 가스는 유기물과 점토 광물의 표면에 약하게 흡착되어 있는 가스이다. 자유 가스는 공극들을 통하여 균열을 통하여 자유롭게 흐를 수 있지만, 흡착 가스는 저류암의 압력을 낮추어야만 탈착되어 흐를 수 있게 된다. 셰일 저류암 내에 들어 있는 천연가스의 매장량은 셰일의 기본적인 물리적 특성을 이해해야만 가능할 수 있다. 예를 들면 셰일층의 두께, 공간적 분포, 그리고 공극률의 값을 곱하여 자유 가스를 포함한 전체 공극의 규모를 계산할 수 있다. 또한 셰일층에 들어있는 유기물의 함량을 알아야만 다양한 압력 조건 하에 셰일에 흡착되어 있는 가스의 양을 추정할 수 있다. 그런데, 퇴적분지 내에서 셰일층의 지질 특성과 이 셰일층에 들어있는 가스의 함량도 퇴적분지의 위치에 따라 지역마다 다르다는 점을 고려해야 한다. 이 밖에도 치밀 지층의 광물 함량과 투수율, 취성도(brittleness) 등의 물리적 특성에 대한 검토도 필요하다. 이상과 같이 치밀 지층의 탄화수소 잠재력을 평가하기 위해서는 유기물의 특성, 암상, 물리적 특성, 깨지는 성질, 잠재 탄화수소 양과 압력 불균질성 등을 검토해야 한다. 이 밖에도 치밀 지층의 심도와 체적, 내부 변화 다양성을 포함한 기하학적인 변수들을 알아보기 위하여 탄성과 탐사를 실시한다.

셰일과 치밀한 지층에서 전통적인 생산 공법인 수직정을 시추하여 수압파쇄 공법을 적용하면 경제적인 양의 석유를 생산하기가 어려운데, 이는 수직정이 보통 지층의 두께가 수 십-수 백 m 에 해당하는 대상 지층의 제한된 일부만 관통하기 때문에 생산할 수 있는 오일과 천연가스의 양이 적기 때문이다. 이에 따라 비전통 탄화수소를 개발하기 위해서는 새로운 생산공법이 필요하다. 비전통 탄화수소의 저류암은 큰 용량을 가지나 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ($<1 \text{ mD}$) 정도의 낮은 투수율과 $<10\%$ 의 낮은 공극률을 가지기 때문에 새로운 생산공법은 저류암의 투수율이나 유체의 점도를 개선하는 기술로, 수평시추(horizontal drilling)와 수압파쇄(hydraulic fracturing or fracking)라는 공법을 사용한다.

수압파쇄 공법은 전통적인 오일이나 가스 저류암의 수직 생산정에서 오일이나 가스의 생산을 증가시키기 위해 사용하는 여러 방법 중 하나이다. 사실 이 수압파쇄 공법은 석유산업에서 지난 60년 동안 이용된 공법이지만, 현대의 시추 공법은 상대적으로 얇은 두께로 수평으로 발달하는 셰일층의 등고선을 따라 한 개의 수평 시추공을 시추할 정도로 발달하였다. 이런 시추 기술의 발전으로 시추공의 긴 수평 거리를 따라 수압파쇄를 할 수 있게 되었다. 이 수압파쇄 공법은 암석에 인위적으로 균열을 만들고 이 균열의 틈이 유지되도록 하여 저류암의 표면적을 넓히는 것이 주된 목적으로, 탄화수소가 암석에서 균열을 통하여 흘러나와 생산정을 통해 지표로 흘러나오게 하는 것이다.

5.2 셰일가스 생산 공정

비전통 탄화수소를 생산하는 공법으로 셰일가스를 생산하는 공정을 소개한다. 시추공은 지하 깊이에 따라 구간 별로 시추가 이루어진다(그림 3). 지표에서 가까운 구간은 수직으로 직경이 큰 시추 비트를 이용하여 시추가 이루어지며 이 시추공에 파이프

를 삽입한다. 그 후 시추공과 파이프 사이 공간에 시멘트를 주입하여 파이프가 고정되도록 한다. 이후에는 작은 구경의 시추공으로 지하수면 아래의 깊이까지 시추한다. 다음에는 케이싱(casing)이라고 하는 공벽 보호를 위한 파이프를 삽입한 후 다시 시추공과 파이프 사이를 시멘트로 고정시킨다. 이와 같이 지속적으로 케이싱 작업을 하는 것은 가스 생산 구간에서 흘러나오는 가스가 케이싱을 하지 않은 압력이 낮은 다른 지층으로 빠져나가지 않고 시추공으로 유입되도록 하기 위해서이다. 이러한 과정을 계속 반복하면서 수직 시추 작업을 실시한 후, 생산 대상이 되는 셰일층의 가까운 상부 깊이에서 시추공의 방향을 틀면서 셰일층을 따라 약 600-1500 m 정도 길이로 수평 시추를 한다. 셰일가스 생산시 이렇게 수평 시추를 하는 이유는 가스의 생산량을 증가시키기 위해서이다. 수평시추 후 시추공 내에서 케이싱과 시멘트를 가로지르며 일정한 간격으로 천공하여, 화학약품(예: HCl)과 모래를 섞은 유체를 수압을 가하며 시추공을 통해 지층에 주입시켜 시추공 주변의 암석을 파쇄한다. 수압파쇄 유체는 대부분이 물이지만, 지층의 특성에 따라 오일, 또는 질소, 이산화탄소, 프로판 질과 같은 가스를 이용하기도 한다. 화학약품은 대체로 주입하는 유체의 1% 이내이며, 이 화학약품을 쓰는 목적은 주입하는 액체의 점도를 증가시키고, 수압파쇄 후 물의 회수율을 높이기 위해, 또는 생산 파이프 케이싱의 부식 및 미생물 성장을 방지하기 위해서이다. 이렇게 파쇄된 암석 내 균열에는 균열지지제(proppant, 모래 알갱이)가 유입되어 인공적으로 생성된 균열이 계속 열려있도록 버팀목 역할을 한다(그림 4). 수압파쇄가 완료되면 수압파쇄에 이용되었던 물의 일부는 지층의 압력으로 시추공을 통해 빠르게 배출된다. 그런 다음 시추공에 물이 차있는 깊이까지 관을 삽입한 후 부풀어지는 고정 장치(packer)를 설치하여 케이싱과 관 사이를 막아 삽입된 배관으로 유체가 유입되도록 한다. 이런 과정이 끝나면 시추공은 이제 생산 단계로 들어간다. 생산 단계에서는 천연가스, 물, 또는 천연 액화가스가 지층에서 시추공으로 유입된다. 이 유체는 지상에서 분리되며, 가스는 파이프라인을 통해 가스를 처리하는 시설로 운반된다. 생산되는 물은 수압파쇄 시 주입된 물과 지층수가 혼합이 되어 있는데, 따로 보관하며 다시 지하에 주입을 하거나 수처리를 하여 재

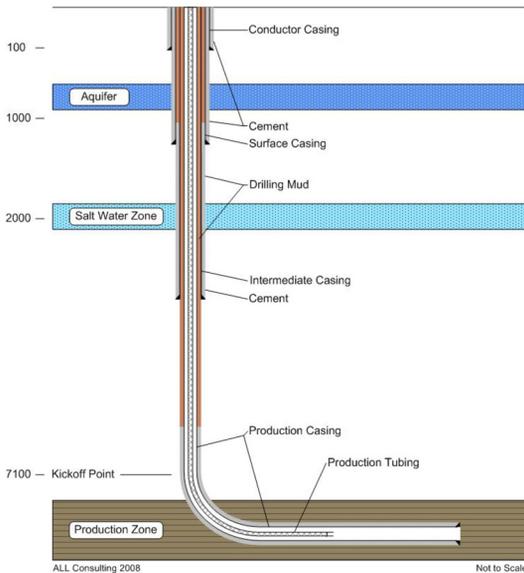


Fig. 3. Schematic diagram showing horizontal drilling to “mine” a seam of oil- or gas-bearing shale by drilling laterals that penetrate the oil- or gas-bearing shale layer horizontally (modified after Ground Water Protection Council, and All Consulting, 2009).

사용하고, 또는 증발시키거나 처리하여 흘려보낸다.

세일층에 수압파쇄를 실시하여 오일이나 가스를 생산하는 지층의 깊이는 다양하다. 수압파쇄 공정은 일반적으로 지하수의 오염을 막기 위해 지하수 대수층보다 깊은 지하 1 km 이상의 깊이에서 실시된다. 미국의 경우 펜실바니아주, 뉴욕주와 웨스트버지니아주에 걸쳐 발달한 애플래치아 분지의 데본기 흑색 세일인 Marcellus 세일(층)은 141 tcf (trillion cubic feet)의 가스가 매장되어 있는 것으로 추정되는 미국에서 가장 큰 가스전으로 수압파쇄 지하 깊이가 1,200-2,600 m에 달한다(US EIA, 2012). 미국에서 두 번째로 큰 추정 매장량(66 tcf)을 가지는 루이지애나주와 텍사스주에 걸쳐 분포하는 쥐라기의 Haynesville- Bossier 세일(층)은 지하 3,200-4,100 m에 위치하며, 텍사스주 미시시피기의 Barnett 세일(층)은 지하 2,000-2,600 m에 위치한다.

6. 치밀 탄화수소 지질 연구 사례

비전통 치밀가스 사암의 연구 사례(Zhang *et al.*, 2015)로 최근에 연구된 중국 북동부에 위치한 백악

기 송요분지(Songliao Basin)에 발달한 치밀가스 사암의 연구 결과와 치밀가스 사암의 탐사 및 개발에 어떠한 점을 고려하여야 하는가를 소개하고자 한다. 송요분지는 중국 육상에서 가장 석유 매장량이 큰 육성 분지로 그 총면적은 260,000 km²에 이른다(Zhao *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013). 송요분지는 6개의 구조구로 나뉘는데, 이들은 남서 용기부, 남동 용기부, 북동 용기부, 중앙 요곡부(downwarp), 서부 사면과 북부 급경사부이다(그림 5). 연구된 치밀가스 사암층인 하부 백악기 Denglouku층은 중앙 요곡부의 Changling Sag에 분포하는데 이 층은 송요분지가 열개작용으로 생성된 후 열적 침강 단계에 있는 동안 퇴적되었다. Denglouku층은 석유지질 측면에서 저류암으로서 경제적인 가치가 없는 것으로 여겨졌으나 2013년 상업적으로 생산할만한 치밀가스가 발견되면서 Changling, Dalaoyefu, Shuangtuozhi 및 Fulongquan 가스전에서 이 층으로부터 가스를 생산하고 있다. Denglouku층의 가스 가채매장량은 약 3×10¹⁰ m³ (1.05 tcf)인 것으로 알려지고 있으며, 저류암 공극 압력은 정상적인 수압 조건을 가지고 있다.

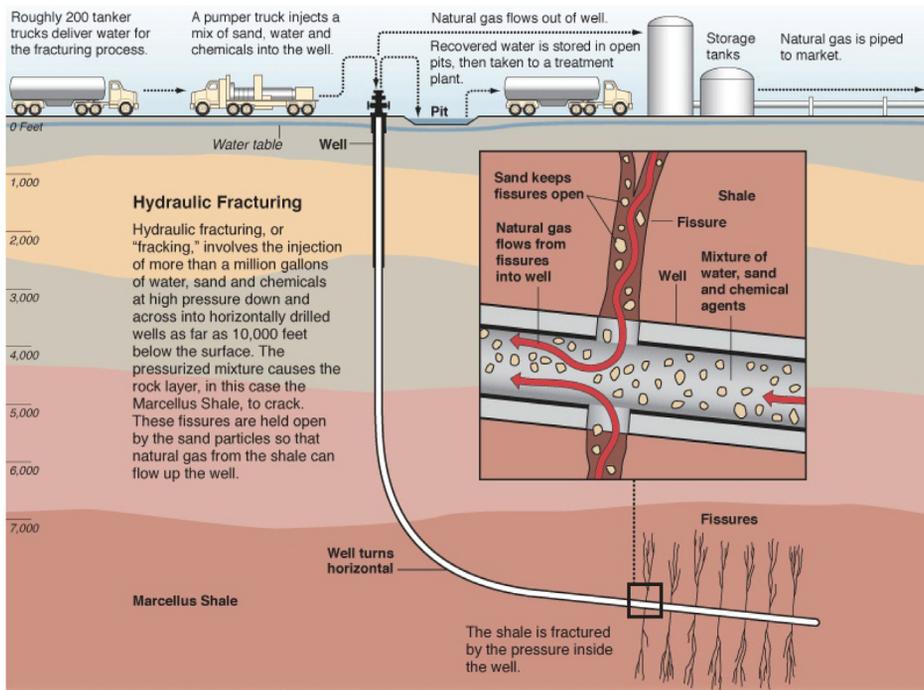


Fig. 4. Schematic diagram showing shale gas production (<http://www.propublica.org/special/hydraulic-fracturing-national>).

Denglouku층은 두께가 500-1000 m로 망상하천, 망상삼각주(braid delta) 및 얇은 호수 환경과 같은 육성 환경에 쌓인 후 매물 속성작용을 받는 동안 심한 압축작용과 교결작용을 많이 받은 암편질 사암, 실트스톤과 이암으로 구성되어 있다. 치밀가스 저류암은 퇴적물 입자의 크기와 퇴적상 그리고 속성작용의 영향이 매우 다양하며 이러한 퇴적학·퇴적암석학적인 요인들이 저류암의 품질에 많은 영향을 미치고 있다.

Zhang *et al.* (2015)은 Dalaoyefu 가스전과 Shuangtuozhi 가스전(그림 5)에서 시추한 8개의 시추 코어의 암상과 퇴적학적 특성, 그리고 지구물리 검층 자료를 해석하여 퇴적상을 구분하였고, 각 퇴적상의 대표적인 사암 시료를 채취하여 퇴적암석학적인 조사를 하였다. 사암 시료들은 중급에서 양호한 분급을 보이며 세립-중립의 장석질 암편사암(평균 석영:장석:암편 = 44:19:37)으로 온난하고 건조-아건조의 기후 하의 망상하천과 망상 삼각주 환경에서 형성되었다. 사암에서 관찰되는 속성작용은 이 층이 지하 2-3 km (최대 4.4 km)의 깊이로 매몰되면서 압축작용과 교결작용을 모두 받은 것으로 방해석, 백운석, 함철 방해석, 석영, 녹니석과 일라이트의 교결물이 관찰된다

(그림 6). 이 저류암 사암의 공극 특성은 이들이 쌓인 퇴적 환경과 밀접히 관련되어 있어, 퇴적물의 조직과 퇴적상에 따라 달리 나타나는 속성작용의 특성으로 3개의 저류암 그룹으로 구분된다(그림 7). 가장 좋은 저류암의 품질은 망상 삼각주 하구 사주, 삼각주 분지 하천(distributary channels)과 망상하천에 쌓인 비교적 조립질인 사암(Group 1)으로 이 사암의 공극률은 약 5% 정도까지 나타나며 교결물로는 녹니석과 일라이트가 주를 이루지만 탄산염 교결물은 제한적으로 산출된다(그림 6). 이 그룹의 사암에는 입자간 공극이 보존되어 있으며, 비교적 큰 공극 연결통로도 관찰된다. 즉, 이 사암층은 Denglouku 층에서 치밀가스를 함유한 가장 좋은 저류암으로 여겨진다. 저류암 품질이 중간 정도인 Group 3 사암은 세립질 사암으로 망상 삼각주 하구 사주의 하부, 삼각주 분지 하천의 상부, 그리고 망상하천의 상부와 사주에 쌓인 퇴적물로 공극을 둘러싸는 점토광물 교결물을 가장 많이 함유하고 있지만 탄산염 교결물은 소량 함유하고 있다. 높은 점토광물의 함량으로 물을 많이 흡착하고 있어 가스의 흐름이 방해 받는 것으로 여겨진다. 이에 비하여 저류암의 품질이 가장 낮은 Group 2 사암은 망상 삼각주 사주의 하부, 외

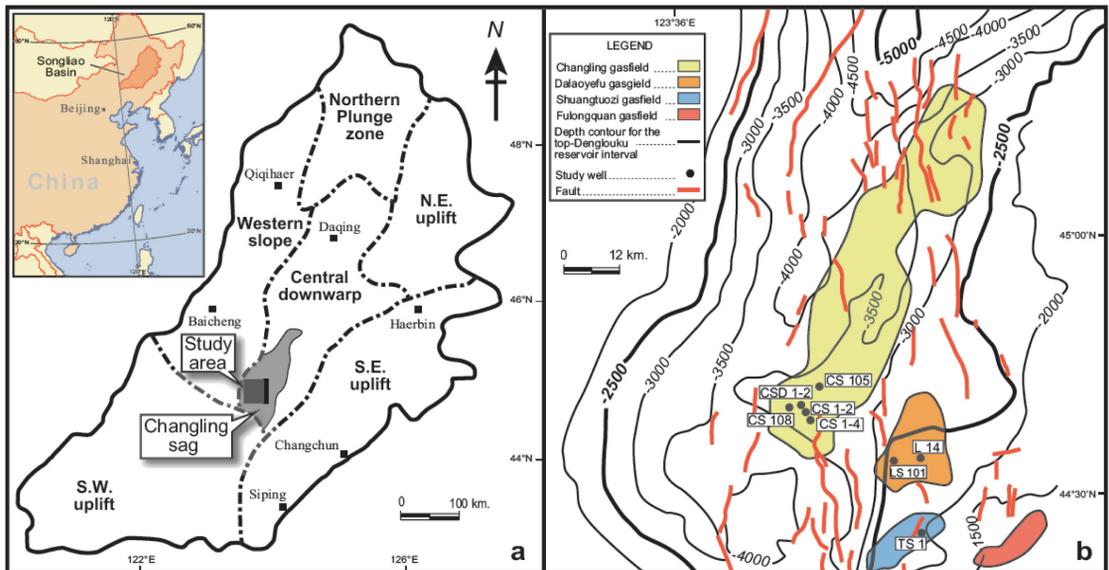


Fig. 5. (a) Outline map of the Songliao Basin, northeastern China, showing the locations of the major structural units including the Changling Sag, and the study area. (b) Map of the study area showing the locations of the Changling, Dalaoyefu, and Shuangtuozhi gasfields and the studied wells. Contours show the depth to the top of the Lower Cretaceous Denglouku Formation. After Zhang *et al.* (2015).

곽부 사주의 상부와 모래 sheets, 그리고 망상하천의 사주에 쌓인 퇴적물로 탄산염과 석영의 교결물이 가장 많이 생성되어 있으며 점토광물 교결물은 Group 1에 비하여 적은 편이다. 하지만 풍부한 탄산염과 석

영의 교결물 때문에 입자간 공극과 공극 연결통로는 대부분 막혀있어 결과적으로 가스의 흐름을 막기 때문에 저류암으로서 가치는 거의 없는 것으로 판단된다. 이상의 퇴적학적·퇴적암석학적 관찰을 바탕으로

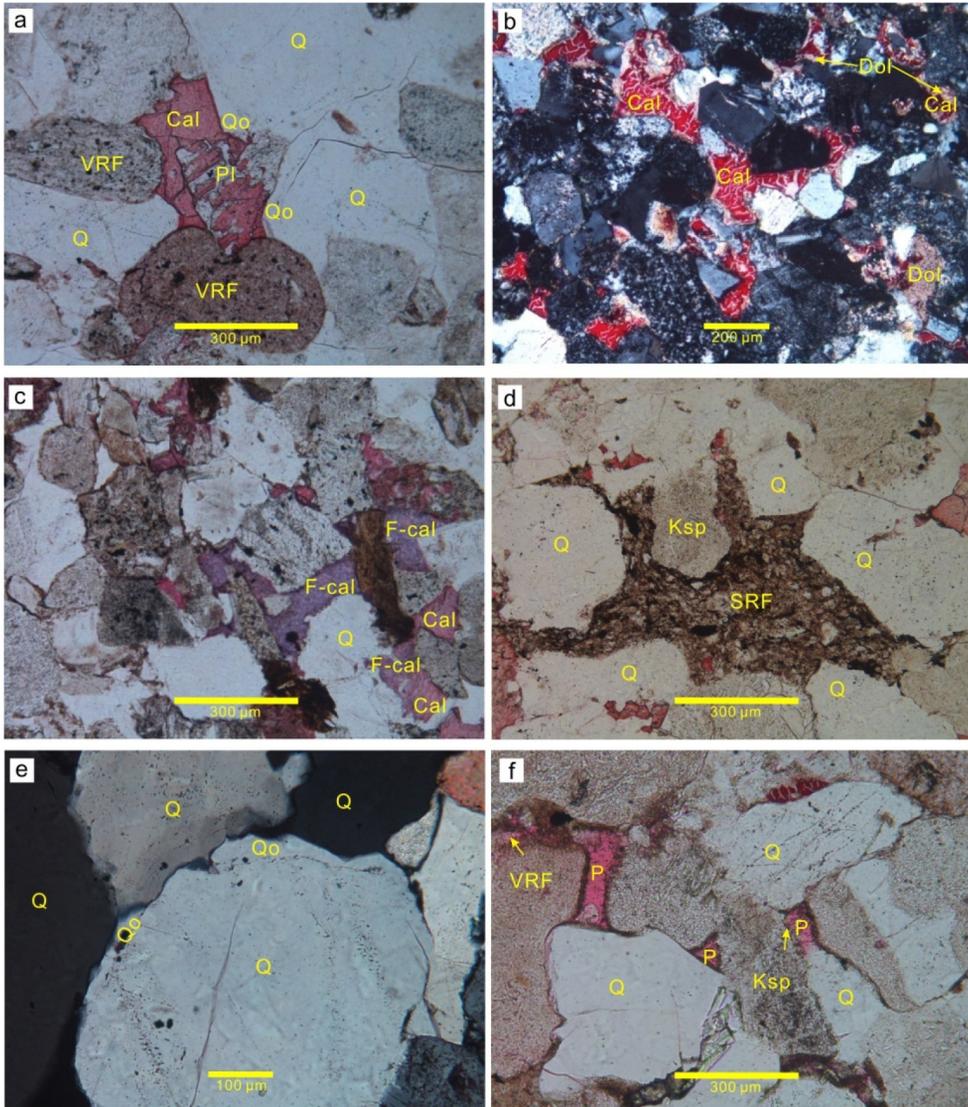


Fig. 6. Photomicrographs of the Denglouku sandstones (Deng IV Member) showing: (a) Quartz overgrowth (Qo) and calcite (Cal) pore-fill cement. Plagioclase (Pl) is largely replaced by calcite. Plane polarized light. Well CS1-4, 3583.69 m. (b) Calcite (Cal) pore-fill and rhombohedral dolomite (Dol) cements. Dolomite also replaced replacive calcite cement and detrital grains. Crossed polarized light. Well CS1-4, 3593.14 m. (c) Ferroan calcite (F-cal) and earlier calcite pore-fill cement. Plane polarized light. Well CS1-4, 3608.52 m. (d) Deformed sedimentary rock fragment (SRF). Plane polarized light. Well CS1-4, 3585.7 m. (e) Concave-convex or sutured contacts of quartz (Q) grains together with quartz overgrowth (Qo). Crossed polarized light. Well CS1-4, 3585.7 m. (f) Intergranular pores (P) lined with clay minerals. Arrows indicate slight dissolution of volcanic rock fragment (VRF) and K-feldspar (Ksp). Plane polarized light. Well CS108, 3618.72 m. After Zhang *et al.* (2015).

Zhang *et al.* (2015)은 저류암 품질을 예측하는 모델 (그림 7)을 제안하였으며, 이 모델은 육성 환경에 퇴적된 치밀가스 사암 저류암에서 가스 생산 가능성이

높은 최적지(이를 sweet spot이라고 함)을 찾아내는 데 도움을 줄 것이며, 이를 통해 보다 효율적인 가스 생산에 도움이 될 것으로 주장하였다.

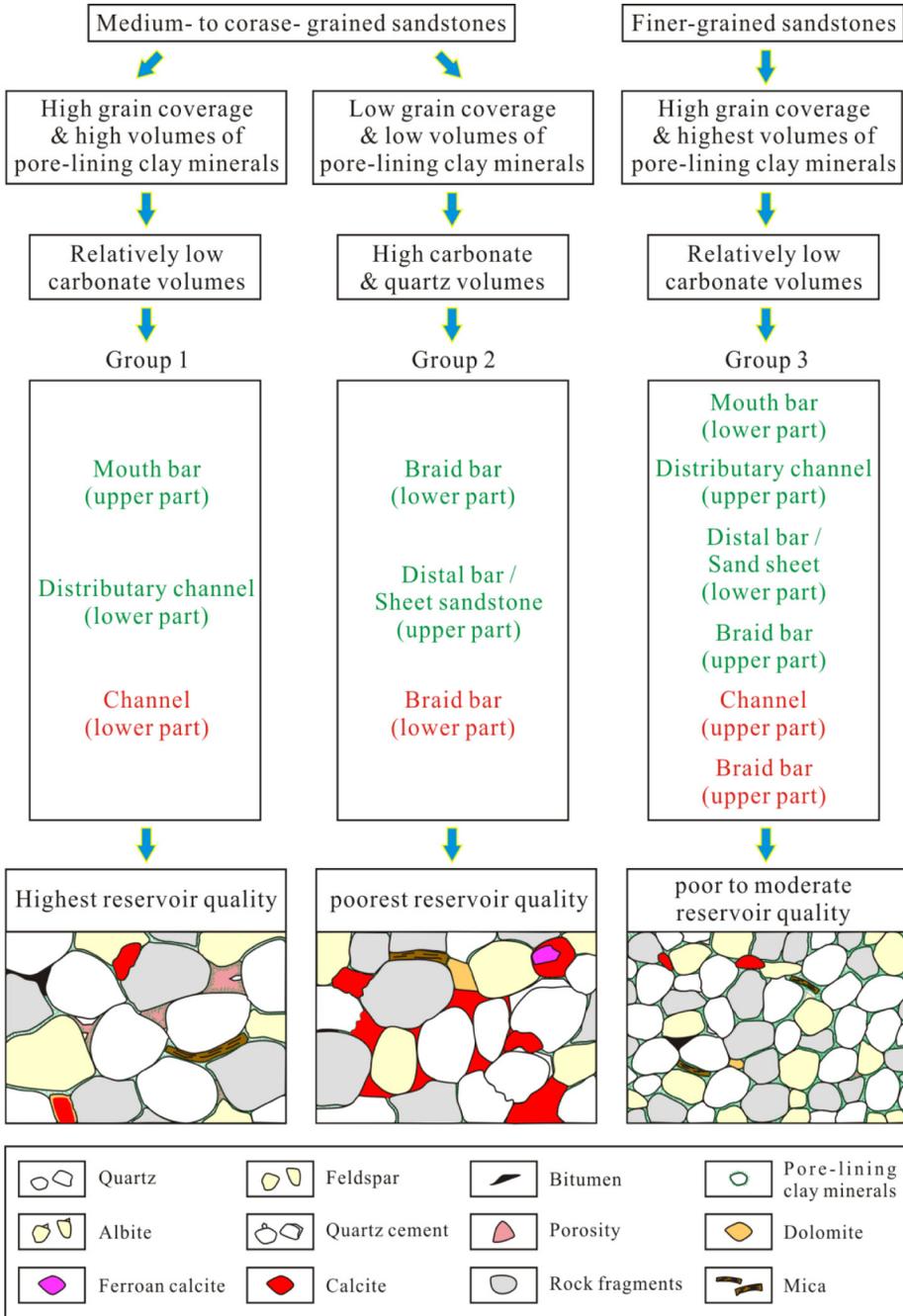
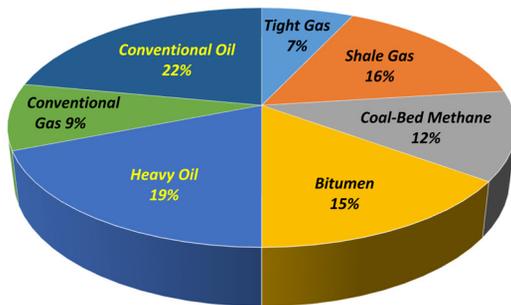


Fig. 7. Schematic model for reservoir-quality prediction incorporating sediment textures, diagenetic alterations, and depositional facies. Note that the green fonts reveal deposits in the braid-delta environment, whereas the red fonts represent deposits in the braided-fluvial environment (After Zhang *et al.*, 2015).

Table 2. Top ten countries with technically recoverable shale resources (US EIA, 2014).

Shale oil			Shale gas		
Rank	Country	Billion barrels	Rank	Country	Trillion cubic feet
1	Russia	75	1	Chian	1,115
2	United States	58	2	Argentina	802
3	China	32	3	Algeria	707
4	Argentina	27	4	United States	665
5	Libya	26	5	Canada	573
6	Venezuela	13	6	Mexico	545
7	Mexico	13	7	Australia	437
8	Pakistan	9	8	South Africa	390
9	Canada	9	9	Russia	285
10	Indonesia	8	10	Brazil	245
	World total	345		World total	7,299

**Fig. 8.** World hydrocarbon resources (http://www.radialdrilling.com/?page_id=17130).

7. 앞으로의 전망

수압파쇄 기술과 잘 발달된 방향성 시추 기술이 결합하여 셰일, 치밀 지층과 석탄층으로부터 비전통 석유자원을 경제적으로 생산할 수 있게 되었다. 미국에서 석유와 가스의 탐사 활동은 셰일가스과 치밀오일 자원을 회수하기 위하여 수평 시추 또는 경사 시추 공법을 이용하여 급속히 팽창하고 있다. 수압파쇄 공법을 적용한 미국과 캐나다에서는 2000년대 중반에 가스 가격의 상승에 따라 붐을 일으켰으며, 미국 환경보호국(U.S. Environmental Protection Agency: US EPA, 2015)의 통계에 의하면 미국에서만 2011-2014년 사이 매년 25,000-30,000개의 수압파쇄정기 시추 되었다고 한다. 이러한 생산 공법으로 미국은 2009년에는 이전까지 천연가스의 최대 생산국이었던 러시아를 제치고 전 세계에서 최대 가스 생산국의 반열

에 오르기도 하였다. 또한 이러한 공법의 지속적인 적용으로 지난 몇 년 동안 미국의 오일생산량도 급증하였다. 미국의 예를 들면 2008년 1월과 2014년 5월 사이에 오일의 월 생산량은 하루에 320만 배럴에 이르렀는데, 이 중 85%가 텍사스주와 노스다코타주에서 셰일과 이에 층서적으로 연관되어 있는 치밀오일 지층에서 생산되었다(Ratner and Tiemann, 2015). 물론 이 기술들은 전통적인 석유자원의 생산에도 많은 도움을 준다. 중국의 경우에도 2010년에 전체 발견된 석유 자원의 약 75%를 비전통 탄화수소가 차지할 정도이다(Zou, 2012). 이처럼 비전통 탄화수소 자원의 가채매장량은 상당한 것으로 알려져 있다.

전 세계의 종류별 탄화수소 예상 매장량은 그림 8에 나타나 있다. 이 그림에서 보듯이 전통적인 탄화수소의 가채매장량은 전체의 약 31% 정도를 차지하여 전체 탄화수소의 약 1/3을 차지하는 반면, 탄화수소 가채매장량의 2/3는 비전통 탄화수소로서 중유, 셰일가스, 역청, 석탄층메탄과 치밀 사암 가스가 차례로 뒤를 잇는다. 중유와 역청을 제외한 비전통 탄화수소의 양은 전체 가채매장량의 약 35%를 차지한다.

현재의 생산 기술로 생산할 수 있는 셰일가스과 셰일오일의 국가별 매장량 순위는 표 2에 나타나 있다. 셰일오일은 러시아, 미국, 중국, 아르헨티나, 리비아의 순이며, 셰일가스는 중국, 아르헨티나, 알제리, 미국, 캐나다의 순이다. 현재 셰일층에서 수압파쇄 공법으로 오일과 가스를 채취하는 기술을 가진

나라는 미국과 캐나다뿐으로 이러한 생산 공법이 널리 보급되면 전 세계의 비전통 석유자원 생산량은 상당히 증가할 것으로 예상된다.

8. 비전통 석유자원 개발에 대한 논의

수압을 이용하여 암석을 균열시키는 공정은 물, 모래와 약간의 화학약품을 고압으로 주입하여 암석 내 연결된 균열망을 만들거나 또는 이미 존재하는 균열들을 확장시켜 탄화수소의 생산을 활발하게 하는 작업이다. 그런데 이런 수압파쇄 공정이나 다른 비전통 탄화수소를 생산하기 전에 심도 있는 공청회 과정을 거쳐야 한다. 비전통 탄화수소의 개발을 지지하는 입장에서는 국가의 에너지 안보가 굳건해지고 경제발전과 신규 고용창출을 이룰 수 있으며, 다른 화석 연료에 비해 천연가스는 온실 가스의 배출 감소와 이들을 생산하기 위하여 잘 수립된 공법이 있다는 측면을 강조한다. 반면에 비전통 탄화수소의 개발에 반대하는 입장에서는 이를 생산하는 과정에서 공중 위생과 환경에 관한 문제, 즉, 지표수와 지하수의 오염, 수자원의 고갈, 동식물 서식지의 분리와 파괴, 주민 건강 영향, 지진 발생 유도, 공기 오염, 그리고 천연가스의 누출로 인한 온실 가스의 방출량 증가 등을 지적하고 있다. 따라서 비전통 탄화수소 자원의 개발을 위해서는 이상과 같은 문제점들을 충분히 검토하여 사업의 성패를 가늠해야 할 것이다.

9. 결론

전통적인 석유자원은 탄화수소가 집적된 트랩을 중심으로 전통적인 생산 공법에 의해 경제적으로 생산되어 왔다. 반면 비전통 석유자원의 경우 과거의 전통적인 생산 공법으로는 경제성이 없었지만, 최근 현대적인 수압파쇄 기법과 방향성 시추기법이 결합된 기술의 발전에 의해 경제적 생산이 가능해졌다. 이렇게 현대의 수압파쇄 기술이 석유산업에서 이제는 거의 표준화된 생산 기술로 적용됨에 따라 비전통 석유자원과 전통적인 석유자원을 구분하는 의미가 점차 퇴색되고 있다. 어떻게 보면 시간이 지남에 따라 이러한 비전통 석유자원이란 의미가 점차 새로운 전통 석유자원의 하나로 자리매김할 수도 있을 것이다.

치밀한 저류암에 들어있는 비전통 탄화수소는 구조트랩이나 층서트랩에 들어있는 전통 탄화수소와는 여러 가지 측면에서 다른 특징을 가지고 있다. 일반적으로 전통 탄화수소는 국부적인 장소에 많은 양의 집적이 일어나지만 비전통 탄화수소는 광범위한 지역에 연속적으로 집적된다. 비전통 탄화수소는 다음과 같은 석유지질학적인 특징을 가진다. 이들은 1) 탄화수소의 근원암과 저류암이 함께 공존한다, 2) 저류암체의 공극률과 투수율이 매우 낮다, 3) 나노미터 크기의 공극간 연결통로가 널리 분포한다, 4) 탄화수소를 함유하는 저류암체가 연속적으로 분포한다, 5) 뚜렷한 트랩의 경계가 존재하지 않는다, 6) 부력과 유체역학적인 기작의 영향이 미미하다, 7) 다르시의 법칙이 적용되지 않는다, 8) 물, 오일, 가스의 상이 거의 분리되어 있지 않다, 9) 뚜렷한 오일-가스-물의 경계면이 존재하지 않고 압력계 역시 일정하지 않다, 그리고 10) 저류암의 오일과 가스 포화도가 다양하다는 점이다. 결론적으로 전통적인 탄화수소와의 가장 큰 차이는 비전통 탄화수소의 집적은 넓은 지역에 걸쳐 연속적으로 일어난다는 것이다.

사 사

이 연구는 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2014R1A2A2A01005404)입니다. 논문을 검토하고 좋은 의견을 제시해 주신 한국지질자원연구원 김지훈 박사님과 익명의 심사위원, 편집위원 및 편집위원장님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Buffett, B. and Archer, D., 2004, Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 227, 185-199.
- Dallimore, S.R., 2005, Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. T.S. Collett (Ed.). Ottawa, Ontario, Canada: Geological Survey of Canada.
- Dusseault, M.B., 2001, Comparing Venezuelan and Canadian heavy oil and tar sands (PDF). Calgary, Canada: Canadian International Petroleum Conference.
- Ground Water Protection Council, and All Consulting,

- 2009, Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer. Prepared for the Department of Energy Office of Fossil Energy and National Energy Technology Laboratory, Washington DC.
- Kang, D.-H., Chun, J.-H., Koo, N.-H., Kim, W.-S., Lee, H.-Y., 2015, Consideration on the gas and gas hydrate indicators in seismic profiles based on drilling result from the Ulleung Basin, East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 561-568 (in Korean with English abstract).
- Law, B.E. and Curtis, J.B., 2002, Introduction to unconventional petroleum systems. *AAPG bulletin*, 86(11), 1851-1852.
- Marshall, M., 2009, Ice that burns could be a green fossil fuel. *New Scientist* (Daily News 26 March 2009). <https://www.newscientist.com/article/dn16848-ice-that-burns-could-be-a-green-fossil-fuel/>.
- Meyer, R.F. and Attanasi, E.D., 2003, Heavy oil and natural bitumen-Strategic petroleum resources - "definitions." (Report). U.S. Geological Survey Fact Sheet 70-03. August 2003-Online Version 1.0.
- Ratner, M. and Tiemann, M., 2015, An overview of unconventional oil and natural gas: Resources and federal actions. *Congressional Research Service Report 7-5700*, 30 p.
- Roen, J.B. and Kepferle, R.C., 1993, Introductory review-Devonian and Mississippian black shales, eastern North American. In: Roen, J.B. and Kepferle, R.C. (Eds.), *Petroleum Geology of the Devonian and Mississippian Black Shale of Eastern North America*. U.S. Geological Survey, A1-A8.
- Schmoker, J.W., 1995, Method for assessing continuous-type (unconventional) hydrocarbon accumulations. In: Gautier, D.L., Dolton, G.L., Takahashi, K.I. and Varnes, K.L. (Eds.), *National assessment of United States oil and gas resources-results, methodology, and supporting data*. U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-30.
- Society of Exploration Geophysicists, 2008, Special Section - Heavy Oil. *The Leading Edge*, 27, 1104-1201.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1978. *Petroleum Formation and Occurrence: a New Approach to Oil and Gas Exploration*. Springer, Berlin, 699 p.
- US EIA (Energy Information Administration), 2010, *International Energy Outlook 2010*, 731 p.
- US EIA (Energy Information Administration), 2011, *Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays*. United States Department of Energy. <http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/>.
- US EIA (Energy Information Administration), 2012, *Geology and technology drive estimates of technically recoverable resources*. July 20. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=7190>.
- US EIA (Energy Information Administration), 2014, *Outlook for shale gas and tight oil development in the U.S.* http://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski_04042013.pdf.
- US EPA (Environmental Protection Agency), 2015, *Assessment of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing for Oil and Gas on Drinking Water Resources* (External Review Draft), 49 p.
- USGS (U.S. Geological Survey), 2000, *Coal-bed methane: Potential and concerns* [Fact Sheet]. (Fact Sheet 123-00). <http://pubs.usgs.gov/fs/fs123-00/fs123-00.pdf>
- USGS (U.S. Geological Survey), 2013, *Map of assessed shale gas in the United States, 2012*. <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-069/dds-069-z/>.
- USGS (U.S. Geological Survey), 2014, *Energy glossary and acronym list*. Available online at <http://energy.usgs.gov/GeneralInfo/HelpfulResources/EnergyGlossary.aspx#>
- Wang C.S., Feng, Z.Q., Zhang, L.M., Huang, Y.J., Cao, K., Wang, P.J. and Zhao, B., 2013, Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, northeast China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385, 17-30.
- WEC (World Energy Council), 2013, *World Energy Resources, 2013 Survey*. 468 p.
- Zhang, P., Lee, Y.I. and Zhang, J., 2015, Diagenesis of tight-gas sandstones in the Lower Cretaceous Dengloulou Formation, Songliao Basin, NE China: Implications for reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*, 38, 99-114.
- Zhao, W., Zou, C., Chi, Y. and Zeng, H., 2011, Sequence stratigraphy, seismic sedimentology, and lithostratigraphic plays: Upper Cretaceous, Sifangtuozi area, southwest Songliao Basin, China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 95, 241-265.
- Zou, C.N., 2012, *Unconventional Petroleum Geology*. Elsevier, Beijing, 373 p.

Received : January 8, 2016

Revised : February 24, 2016

Accepted : February 26, 2016