

치밀가스 저류층의 이해와 탐사개발

Understanding, Exploration, and Development of Tight Gas Reservoirs

손 병 국 (Byeong-Kook SON)*

요 약 : 비재래형 탄화수소 자원의 하나인 치밀저류층 내의 천연가스는 중요한 탐사개발 대상이 되고 있다. 치밀가스 저류층은 가스를 배태하고 있는 저류암으로서 투수율이 0.1 md 미만인 저류층을 말한다. 치밀가스 저류층은 광범위하게 두꺼운 층으로 산출되며, 재래형의 가스 집적체와는 달리 과대압력이나 저압력의 비정상적인 압력상태로 나타나는 것이 특징이다. 재래형 가스가 구조트랩이나 층서트랩에서 산출되는 것에 비하여 치밀가스는 이들 트랩들과는 무관하게 산출되고 있다. 치밀저류층에서 가스를 생산하기 위해서는 수압파쇄(hydraulic fracturing)와 같은 인공 자극법에 의해서만 가능하다. 치밀가스 저류층의 최적 생산지역을 스위트 스팟이라고 하며, 생산성을 높이기 위해서는 지질학적 자연균열 상태를 이해하여야 한다. 친환경 연료자원으로 주목을 받고 있는 치밀가스는 탐사기술과 회수방법이 발전함에 따라서 상업적으로 생산되고 있다. 자연균열대를 가로지르는 방향으로 수평시추나 경사시추를 수행할 때 생산성을 극대화할 수 있다. 실제로 미국과 캐나다 등에서는 치밀저류층에서 많은 양의 가스를 생산하고 있으며, 생산량은 해마다 증가하고 있다. 특히, 미국의 치밀사암층에서 생산되는 가스의 경우 1990년에 미국의 총 가스 생산량의 11.1%를 차지하였지만 2005년에는 총 가스 생산량의 24.1%를 차지하고 있다. 국내 대륙봉에서도 치밀가스의 존재 가능성이 제시되고 있으며 이를 개발하기 위해서는 기존의 재래형 가스자원의 탐사 및 개발의 패러다임을 완전히 바꾸는 것이 필요하다.

주요어 : 비재래형 탄화수소자원, 치밀가스, 수압파쇄, 스위트 스팟, 치밀저류층

Abstract: Natural gas in tight reservoirs, one of unconventional hydrocarbon resources, has become a significant exploration and exploitation targets. Tight gas reservoirs are the gas-bearing rocks that commonly have a permeability of less than 0.1 millidarcy (mD). Tight gas reservoirs are characterized by extensive and deep locations as well as abnormal pressure such as over- or under-pressure. The tight gas reservoirs are independent of structural or stratigraphic traps, whereas conventional gases normally occur at these traps. Tight gas reservoirs can be productive when stimulated by hydraulic fracturing. Better production areas within the tight reservoir beds are referred to as sweet spots that are commonly caused by natural fractures, which should be understood and identified to enhance the recovery of the gas from tight reservoirs. The exploration and production techniques allow the commercial production of tight gas, one of environmentally friendly resources. Slant and horizontal wells have best production when they intersect the fractures. Gas production from the tight reservoirs has rapidly grown in U.S. and Canada. Indeed, the U.S. gas production of tight sandstones increases from 11.1% in 1990 to 24.1% in 2005. The presence of tight gas reservoirs has been suggested on the Korean offshore block 6-1. Paradigm shift from conventional to unconventional tight reservoir is required to develop the tight gas from the block.

Keywords: unconventional hydrocarbon resources, tight gas, hydraulic fracturing, sweet spot, tight reservoir

서 언

세계적으로 석유자원은 고갈되고 있고 새로 발견되는 재래형의 탄화수소자원의 양은 소비되는 양을 따라가지 못하고 있다. 또한 지구 온난화 등 환경문제가 인류의 가장 중요한 문제로 대두됨에 따라 환경친화적인 연료자원의 필요성이 크게 대두되고 있다. 이에 따라 환경친화적이고 청정에너지인 천연가스의 개발과 생산이 세계적으로 급속히 증가되는 추세에 있다. 석탄, 석유보다 더 깨끗하게 연소되기 때문에 많은

나라들이 이산화탄소의 방출량을 줄이기 위하여 석유나 석탄을 대체하여 천연 가스의 사용을 장려하는 국가적인 계획을 세우고 있다. 이와 같이 확실한 수요의 증가에 따라 천연가스 소비는 2002년에서 2025년 사이에 거의 70%가 증가할 것으로 보고 있다. 전문가들은 2025년까지는 천연가스 소비량이 석유의 소비량을 넘을 것으로 예상하고 있다(Fig. 1).

천연가스 시장이 환경친화적인 연료로서 성장함에 따라 천연가스의 소비는 급속도로 증가하고 있으나 재래형 천연가스의 발견은 점차 줄어들고 있다. 이에 따라 비재래형의 천연

*한국지질자원연구원 석유해저자원연구본부(Petroleum and Marine Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Material Resources, Daejeon 305-350, Korea); Phone: +82-42-868-3208, E-mail: sbk@rock25t.kigam.re.kr

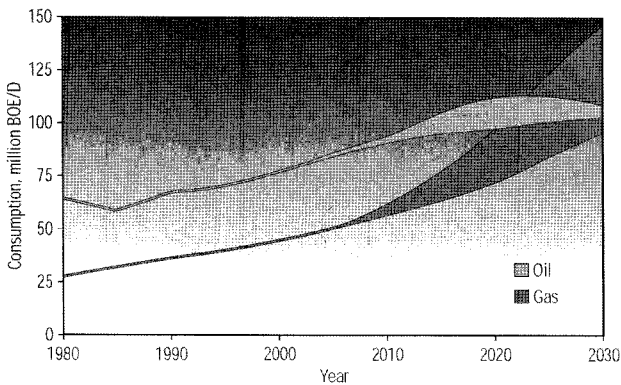


Fig. 1. Prediction of oil and gas consumption.

가스 개발에 대한 관심이 높아지고 있으며, 비재래형 탄화수소 자원의 하나인 치밀저류층 내의 천연가스는 중요한 탐사개발 대상이 되고 있다. 치밀저류층 가스는 약 20년 전부터 주목을 받기 시작한 비재래형 탄화수소 자원이며, 가스가격 상승 및 회수방법의 개선 등에 의하여 상업적 대상이 된 새로운 가스자원이다. 실제로 미국과 캐나다 등에서는 치밀저류층에서 많은 양의 가스를 생산하고 있으며, 생산량은 해마다 증가하고 있다.

이 논문에서는 지금까지 밝혀진 치밀가스 저류층의 지질학적 특성 및 개발방법을 설명하고 북미의 탐사 및 개발 현황에 대하여 기술하고자 한다. 또한, 이를 바탕으로 하여 우리나라 대륙붕에서의 치밀가스 존재 가능성에 대하여 토의한다.

치밀가스 저류층의 개념

치밀 가스저류층은 공극 내에 가스를 배태하고 있는 저류암이지만, 투수율이 0.1 md 미만으로써 지극히 낮아 수압파쇄법과 같은 인공적 방법에 의하지 아니하고는 개발이 불가능한 저류층을 말한다. 과거부터 배사구조가 아닌 향사지역에 존재하는 치밀한 암석에서 가스의 산출이 관찰되고 언급되어 왔지만 치밀 저류층에 대하여 이해하기 시작한 것은 1970년대 후반의 Masters(1979)의 논문이 발간되면서 부터이다. 그는 캐나다 앨버타분지의 근원암 성숙도, 암석과 로그의 비교, 압력변화 등에 대한 연구결과를 종합하여 이 분지에 존재하는 치밀저류층에 대한 지질학적 모델을 제시하였다. 그 후 10년 동안 많은 다른 연구자들에 의하여 치밀가스 저류층에 대한 이해도가 비약적으로 증대되어 오늘에 이르고 있다(Fig. 2).

치밀가스(tight gas)는 여러 형태의 모든 분지에서 산출되고 있으며 동일 분지에서도 다양한 지역에서 산출되고 있다. 일반적으로 분지 중심부의 심부지역에서 산출되는 경우가 많기 때문에 초기에는 deep basin gas 또는 basin-centered gas로 불려왔다(Law, 2002). 또한 미국 지질조사소에서 가스자원 평가를 수행할 때 치밀가스는 재래형의 가스집적체와는 달리 물-가스 경계면을 찾을 수가 없었기 때문에 continuous gas

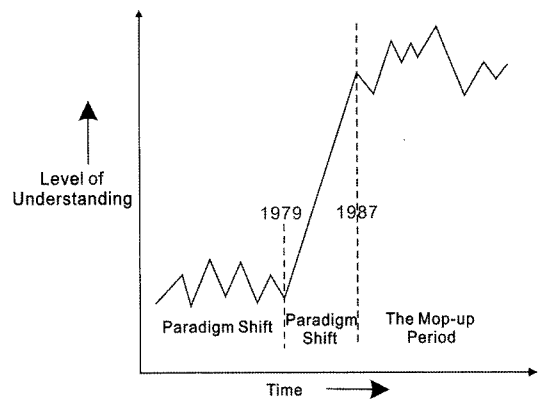


Fig. 2. Evolution of the knowledge of tight gas reservoirs associated with a paradigm shift (modified from Meckel and Thomasson, 2008).

로도 불렸다(Gautier *et al.*, 1996). 그러나 분지 주변부와 천부에서도 치밀저류층에서 가스가 산출되는 것이 알려지면 서부터는 이제는 “치밀가스”란 용어가 일반적으로 사용되고 있다. 보통 치밀가스는 석유 산출이 가능한 모든 지역에서 지역적으로 광범위하게 두꺼운 층으로 산출되는 것이 특징이며, 재래형의 가스 집적체와는 달리 과대압력이나 저압력의 비정상적인 압력으로 나타나는 것이 특징이다(Shanley *et al.*, 2004). 재래형 가스가 구조트랩이나 층서트랩에서 산출되는 것에 비하여 치밀가스는 이 들과는 전혀 무관하게 산출되고 있다. 이와 같은 치밀저류층에서 가스를 생산하기 위해서는 수압파쇄(hydraulic fracturing)와 같은 인공 자극법에 의해서만 가능하다. 치밀 가스저류층에 대한 이해가 증진되고 시추 기술 등의 개선됨 따라 치밀 저류층으로 부터 가스의 생산량은 급격히 증가하고 있다. 그러나 이와 같이 세계적으로 넓게 산출되고 있는 치밀가스에 대한 개발은 미국과 캐나다로 한정되어 있다. 즉, 치밀저류층의 분포와 집적에 대한 특성은 북미를 제외하고는 특별히 잘 알려져 있지 않다. 최근에 호주와 멕시코 등에서 치밀가스를 개발하려는 움직임을 보이고 있다.

북미의 치밀 가스 개발현황

2008년 Energy Information Administration(EIA)의 에너지 예측보고서에 의하면 미국의 천연가스 생산은 2006년에 18.5 tcf이며 점진적으로 증가하여 2030년에는 19.4 tcf가 될 것으로 예상하고 있다. 재래형 가스 개발이 급격히 감소하는 상화에서 증가의 주된 원인은 하와이와 알래스카 이외의 본토 48개 주에서 생산되는 비재래형 가스와 추후에 알래스카에서 산출될 것으로 기대되는 재래형 가스의 산출에 기인할 것으로 예측된다(Fig. 3). 또한 연안의 천해지역에서 산출되는 가스의 생산량은 천천히 감소할 것이며 심해지역에서 생산되는 가스의 양은 증가할 것으로 보고 있다. 근해에서의 생산량은 2006년에 3.0 tcf에서 2017년에 4.5 tcf로 증가되었다가 2030

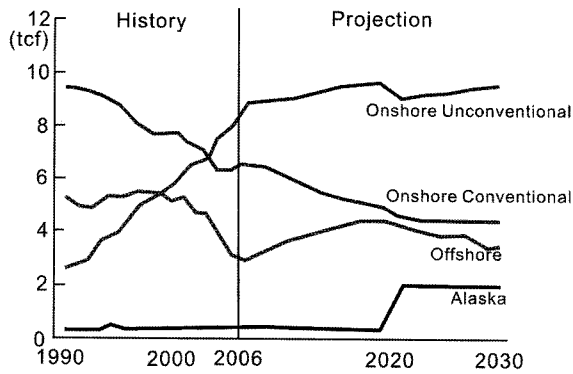


Fig. 3. Natural gas production of US by source, 1990-2030 (EIA, 2008).

년까지는 다시 감소할 것으로 예상하고 있다. 심해에서의 가스생산은 2019년에 3.0 tcf으로 증가하여 2030년까지 감소할 것으로 보고 있다(EIA, 2008).

새로운 재래형 가스자원의 발견은 점점 줄어들 것이며 더욱 더 심부 지역에서 발견될 것으로 예상된다. 따라서 개발과 생산 비용과 위험성은 더욱 더 증가될 것이다. 따라서 육상의 재래형 가스자원은 2006년 6.6 tcf에서 2030년 4.4 tcf로 감소할 것으로 보고 있다. 육상의 비재래형 가스 생산은 치밀사암 저류층 가스, 석탄층 가스, 셰일가스에서 2006년 8.5 tcf에서 2030년 9.5 tcf로 증가할 것으로 예측된다. 알래스카에서는 2020년부터 파이프라인으로 가스를 공급하게 되어 있어 이때부터 가스 생산이 급증할 것으로 예상하고 있다.

치밀가스는 최근 10년 이상 미국의 천연가스 생산량의 중요한 부분을 차지해 오고 있다. 석탄층 가스, 대수층 가스, 셰일가스와 같은 다른 비재래형의 가스와는 다르게 치밀가스의 기여도가 정량적으로 자세히 보고되는 것이 거의 없어 정확하게 이해되고 있지는 못하였다. 그러나, Nehring(2008)의 최근 조사에 의하면 1990년에서 2001년 사이에 미국 알래스카와 하와이를 제외한 48개 주에서 생산된 총 천연가스 양은 16.9 tcf에서 19.3 tcf로 매우 천천히 증가하였다. 2001년에서 2002년에 2% 정도로 약간 감소하다가 2003년에서 2005년 사이에 5%의 큰 감소가 나타난다. 이것은 허리케인 카트리나와 허리케인 리타로 인하여 파이프라인과 생산시설이 파괴되어 나타난 결과이다. Fig. 4에서 비재래형 천연가스의 생산이 현저하게 증가한 것을 볼 수 있다. 1990년에서 2005년 사이에 비재래형 가스생산은 2.81 tcf에서 8.90 tcf로 현저히 증가하였다(Fig. 4). 1990년에는 비재래형 가스가 차지하는 비율은 총가스생산량의 16.6%였으나 2005년에는 49.5%로 크게 증가하였다. 이 기간 동안 재래형의 가스 생산은 절대적으로나 상대적으로나 모두 감소한 것을 볼 수 있다. 재래형 가스생산량은 1990년에 14.09 tcf에서 2005년에 9.09 tcf로 35% 이상이 감소하였으며 차지하는 비는 83.4%에서 50.5%로 급감하였다. 재래형 가스 생산이 감소한 것은 상대적으로 비재래형 가스자원의 중요성을 말해 준다고 할 수 있다.

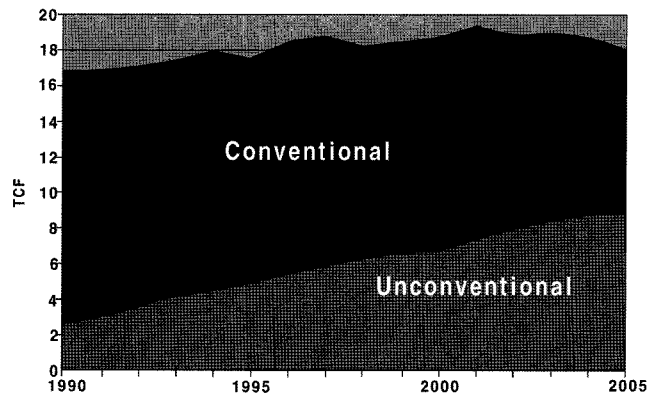


Fig. 4. Natural gas production in the contiguous 48 states of US by type, 1990-2005 (from Nehring, 2008).

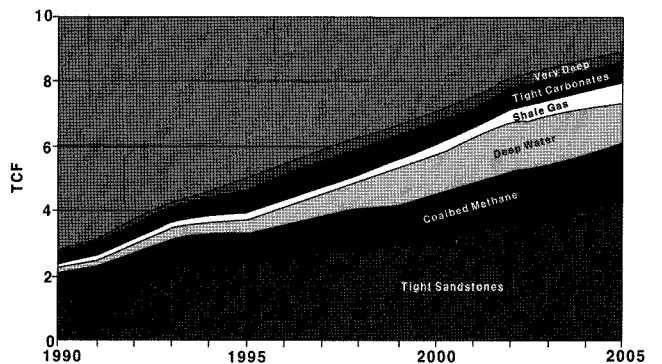


Fig. 5. The composition of unconventional natural gas production in the contiguous 48 states of US by type, 1990-2005 (from Nehring, 2008).

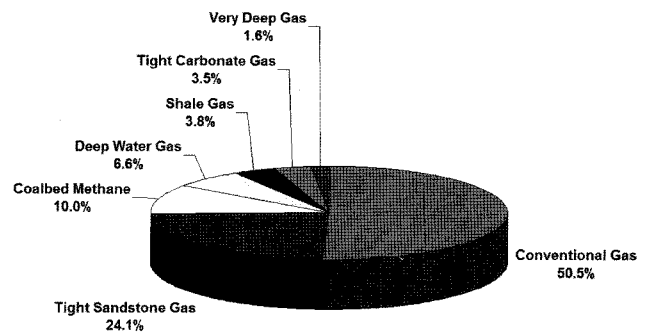


Fig. 6. The composition of gas production in the contiguous 48 states of US in 2005 (calculated from Nehring, 2008).

미국의 비재래형 가스 생산량은 치밀가스, 셰일가스, 석탄층가스, 심해가스, 심부가스 등을 중심으로 1990년부터 증가하였기 때문이다(Fig. 5). 치밀사암층에서의 가스 생산이 다른 비재래형 가스 생산에 비하여 월등히 많은 것을 알 수 있다. 2005년에 치밀가스의 생산은 4.43 tcf로 전체 비재래형 가스 생산량의 48.8%를 차지한다. 1990년에 치밀사암층에서 산출되는 가스는 미국의 총가스 생산량의 11.1%를 차지하였지만 2005년에는 총 가스 생산량의 24.1%를 차지하고 있다(Fig. 6).

현재 북미에서는 20개 이상의 분지에서 치밀가스가 중요한

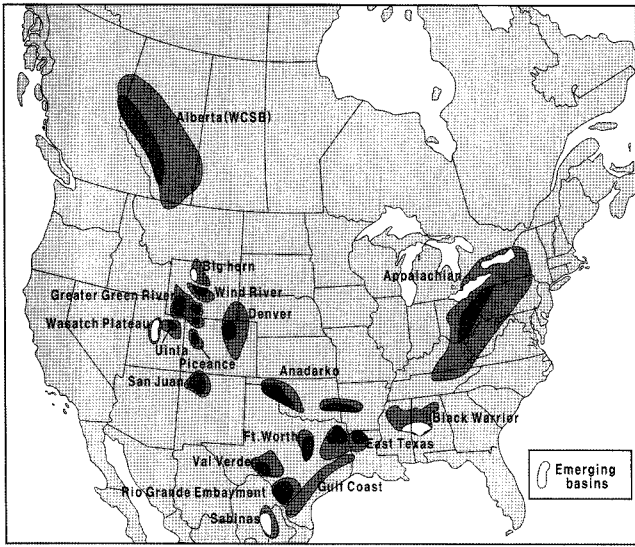


Fig. 7. The locations of basins in North America with production in tight gas sandstones. Red denotes currently active basins; yellow denotes emerging basins (modified from Meckel, 2008).

천연가스 자원으로서 산출되고 있다(Fig. 7).

치밀가스 생산이 가장 유망한 지역은 록키산맥 지역으로 확인된 매장량이 2000년에는 27.2 tcf에서 2004년에는 41.7 tcf로 크게 증가되었다(Spencer, 1987). 미국지질조사소에 의하면 몬타나와 다코다의 북부대고원에서의 치밀가스량은 100tcf이다. 콜로라도의 덴버-울스버그분지(Denver-Julesburg Basin, Colorado) 지역에서는 니오브라라층과 코델층에서 치밀가스가 생산된다. 와이오밍주의 윈드리버분지(Wind River Basin)에서 최대의 치밀가스전은 1959년 발견된 케이브걸취이다. 조사에 의하면 포트유니온과 랜스층에 450에서 680 bcf의 치밀가스가 매장되어 있는 것으로 보고 있다. 와이오밍주의 그레이터 그린리버분지(Greater Green River Basin)는 천연가스 7.3 tcf의 치밀가스가 생산되는 곳으로 주로 랜스층에서 산출된다. 산후안 분지(San Juan Basin)에서는 뉴멕시코 북부와 콜로라도 남부의 산후안분지의 메사베르데, 픽처드클리프, 카르카, 다코다층에서 치밀가스가 생산된다. 이 중 루이스세일, 클리프하우스, 메네피 및 포인트룩아우트사암 등으로 구성된 메사베르데층이 치밀가스 생산층으로는 가장 규모가 크다. 이러한 메사베르데층은 콜로라도, 유타 및 와이오밍 등에 걸쳐서 산출된다. 콜로라도의 피세안스분지(Piceance Basin)의 루리슨유전 중 윌리암포크층은 두꺼운 층후를 보이며 135 bcf의 매장량을 갖는다. 유타주 북동부에 있는 윈타분지(Uinta Basin)는 매장량이 31 tcf이다. 이 분지에는 블랙호크, 백악기 상부의 메사베르데 그리고 제3기층인 와사취층 등의 3개의 치밀사암층이 존재한다. 미국지질조사소는 약 7 tcf의 미발견 매장량이 있을 것으로 추산하고 있다.

텍사스북부 휘트위스분지의 바넬셰일층(Barnett Shale, Fort Worth Basin)은 치밀사암층 뿐만아니라 셰일 파쇄대를 대상으로 미국 내에서 가장 활발하게 시추가 이루어지고 있는 곳

이다. 기타의 미국의 여러 퇴적분지에서 치밀가스가 생산되고 있다(Fig. 7). 한편, 캐나다의 앨버타와 브리티시 콜롬비아 지역의 분지(Western Canada Deep Basin)에 재래형 저류암과 치밀가스 사암층이 공존하며 이곳에서 치밀가스가 생산되고 있다. 시추는 카도민층과 치녹층들과 같은 치밀가스 저류암층에 집중되어 이루어지고 있다.

치밀가스 저류층의 지질학적 특성

치밀가스 저류층의 존재를 예측하고 분포도를 작성하기 위해서는 치밀저류층의 산출 상태와 특성을 이해하여야 한다. 지난 25년 동안 북미의 로키 산맥분지들을 중심으로 저투수성의 저류층 가스에 대한 개발 생산이 이루어져 왔다. 따라서 북미를 중심으로 지금 까지 연구되고 이해된 치밀가스 저류층에 대한 지질학적 특징을 기술한다. 앞에서 언급한 바와 같이 저투수성의 치밀가스 저류암층은 Masters(1979)에 의하여 미국과 캐나다의 로키산맥 분지들에 대하여 처음으로 체계적으로 언급되었다. 그는 치밀가스 저류층이 분지의 심부 지역에 위치하며 저공극류(7-15%), 저투수율(0.15-1.0 md)을 가진 것을 인지하였다. 특히, 가스함유 지층경사의 상부(updip)에 물을 함유한 지층이 존재하는 것에 주목하였다(Fig. 8). 그림과 같이 물을 함유한 지층에서는 가스의 상대 포화도가 급격히 떨어진다. 이 물을 함유한 updip 지층이 가스를 함유한 지층의 덮개역할을 하는 것으로 생각된다. 재래형의 가스집적구조에서는 물 안에 있는 가스성분이 부력이 크기 때문에 구조적으로 높은 곳으로 이동하여 가스/물 접촉부가 명확하게 나타난다. 그러나 대부분의 치밀가스 저류층은 가스가 부력에 의하여 이동할 수 없을 정도로 낮은 투수율을 가지고 있다. 따라서 뚜렷한 가스/물 경계면이 존재하

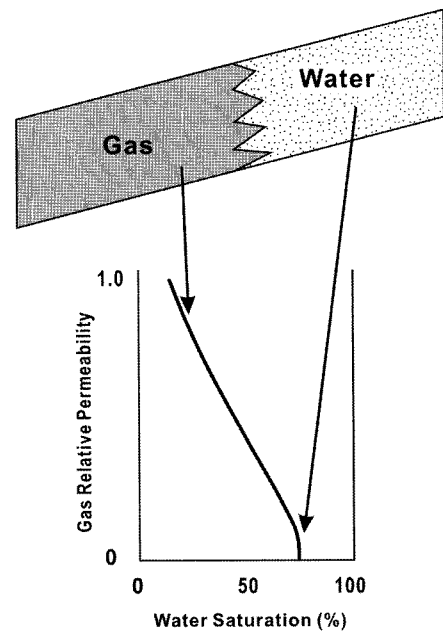


Fig. 8. Conceptual diagram of water block.

지 않게 되며 저류층 내에 넓게 분포하게 된다.

치밀 가스저류층은 비이상적으로 고압상태로 나타나든지 저압상태로 나타나는 경우가 일반적이다. 매물 축적작용동안, 모든 암석의 투수율은 감소하게 된다. 중국적으로 비이상 과대압력상태의 가스 집적이 이루어지기 위해서는 특별한 저투수율(<0.1 md)의 발달이 필요하다.

치밀가스는 육성환경, 해안선 퇴적환경, 해상퇴적환경 등에 퇴적된 저투수성의 사암, 실트스톤, 실트질 셰일, 석회암층 모든 암석층에서 산출되고 있다. 사실 치밀저류층은 특별한 저류층의 형태라기 보다는 연속적인 가스 생산 저류층의 저투수율 부분이라고 말할 수 있다. 과거에는 재래형가스와 치밀저류층 가스의 구분은 생산기술이나 생산경제를 바탕으로 임의적으로 치밀가스 저류층을 정의하였다.

대부분의 치밀가스(tight gas)는 분지 중심부의 심부지역에서 산출되는 경우가 많다(Fig. 9). 또한, 성숙된 근원암이 언제나 치밀저류층과 가까운 곳에 존재한다는 것이 특징이다. 즉, 가스생성 또는 가스배출의 단계에 있는 근원암이 반드시 가까운 곳에 존재한다. 근원암에서 배출된 가스가 바로 저류암층으로 들어가게 되는 것이다. 따라서 치밀저류암의 발달을 위해서는 저류암에 가스를 공급할 수 있는 충분한 근원암과 충분한 유기물의 양이 필수적이다. 치밀가스 저류층의 상위와 하위에 석탄층이 존재할 경우 완전히 가스로만 채워진 저류층이 존재하는 경우도 잘 알려져 있다. 가장 일반적으로 산출되는 곳은 분지의 심부이지만, 얕은 곳에 존재하는 치밀가스층은 가스생성 단계에 도달했던 곳이 용기되고 상위지층들이 침식되어 얕은 곳에 존재하게 된다.

치밀가스가 생산되는 구간은 언제나 비정상적인 압력상태로 나타나는 것이 특징이다. 과대압력이 될 수도 있고 저압력이 될 수도 있다. 과대압력의 크기는 가스생성 정도, 저장공간(공극률), 투수율에 따라 다르게 나타난다. 치밀한 암석에 들어간 가스는 투수율 작은 치밀암석 내에서 이동하기가 어려운 병목현상이 만들어지기 때문에 과대압력상태가 나타나게 되는 것이다. 케로젠이 모두 탄화수소화하게 되어서 생성이 멈추거나 분지가 용기하게 되면 과대압력지역의 가장자리 부분에서는 가스가 이탈되게 되고 저압력 상태가 나타난다. 그러나 중심부는 과대압력으로 남아 있게 된다. 결과적으

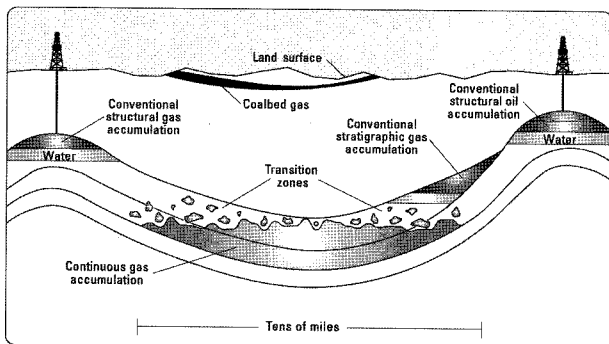


Fig. 9. Schematic diagram illustrating setting of basin-centered tight gas accumulations (from Schenk and Pollastro, 2002).

로 치밀저류암의 압력은 근원암 조건, 열성속도, 지역구배의 변화, 용기정도, 가스의 이동과 확산에 의한 유실정도에 따라 다르게 나타난다. 미국의 14개 분지의 상업 생산되고 있는 치밀저류층의 평균 공극률은 5-14%이고 전형적으로는 7-10%, 투수율은 주로 0.01-0.001 md인 것들이 우세하다.

치밀가스 저류층 발달의 모델

재래형 가스의 생성, 이동, 트랩 등에 관하여는 수많은 연구가 이루어져 왔으며 일반화된 이론과 모델이 확립되어 있다. 그러나 배재래형 치밀 저류층 가스에 대해서는 연구가 진행 중이며 아직까지 이론과 모델이 확실하게 정립되지 못한 상태이다. 그러나, Law and Dickson(1985)은 치밀가스 저류층의 발달과정에 대한 하나의 종합된 모델을 제시하였다(Fig. 10). 이 모델에 의하면 지층이 매몰됨에 따라 광천수(connate water)는 지층 내에서 배출되며, 저류암 가까이 있는 근원암이 온도 증가에 따라 성숙단계에 도달하여 가스가 생성되고 이동되어, 저류암에 광범위하게 가스가 채워지게 됨에 따라 비이상적인 고압대가 형성되는 과정으로 설명하고 있다. 좀 더 자세히 설명하면 치밀가스 저류층의 형성과 가스가 집적되는 과정은 다음의 네 단계로 설명할 수 있다.

1단계

그림과 같이 1단계는 퇴적된 직후 초기 매몰시기이다. 이

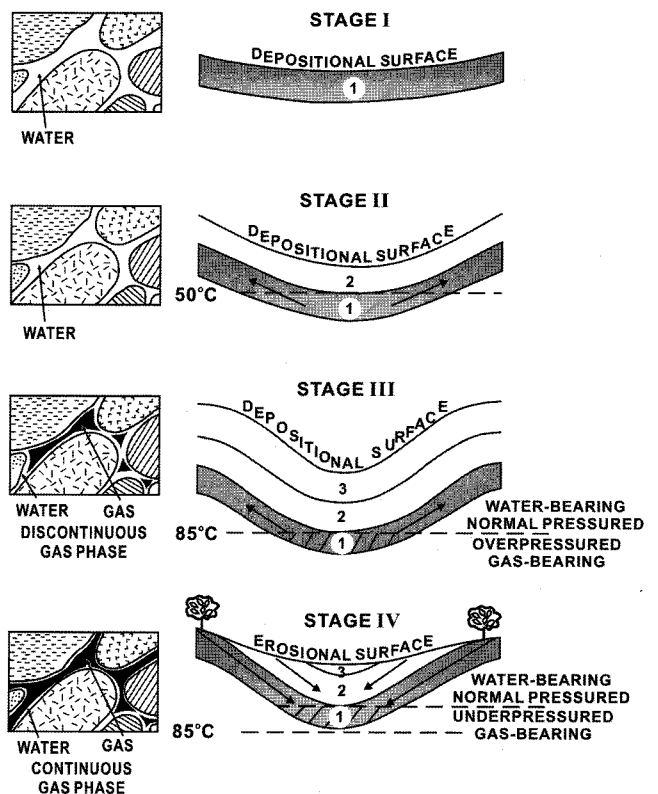


Fig. 10. Formation of tight gas reservoir (Law and Dickson, 1985).

때는 공극률과 투수율이 크기 때문에 인접한 암석 내에서 혹은 암석단위들 사이에서 자유롭게 물이 순환되고 혼합된다. 이때 공극률은 매우 커서 30-40% 정도이나 압밀작용과 공극 내에 교질물질이 침전됨에 따라 점차 줄어들게 된다.

2단계

중간정도의 매몰단계로 매몰온도는 약 50°C 정도이다. 이 단계에서는 이산화탄소가 열분해에 의하여 생성된다. 따라서 이 단계에서 많은 양의 이산화탄소가 생성되고 탄산이 만들어져서 간극수의 pH를 낮추게 되고 교질물과 골격입자를 용해시키게 된다. 이때는 공극률이 향상되기는 하나 압밀작용과 교질작용이 더 우세하여 전체적으로 공극율은 향상되지 못한다. 또한 공극 내의 meteoric water 이동은 줄어들게 된다. 탄질물, 유기물, 점토 등에서 나온 물이 공극을 채우게 되며 압밀작용에 의해 기존의 물이 배출되게 된다.

3단계

이 단계에서 많은 양의 열기원 가스가 발생하기 시작하고 저류층을 채우기 시작한다. 이때의 온도는 Greater Green River Basin의 경우에 82°C이다. 또한, 공내 안정온도로는 88-93°C이다. 교질화에 의하여 공극률과 투수율은 더욱 감소하게 되며 이에 따라 물의 이동과 혼합되는 경우가 줄어들게 된다. 이때는 압밀작용에 의한 공극감소는 영향력이 크지 않다. Meteoric water도 분지의 심부로 순환되지 않는다. 열분해 과정에서 유기물이나 점토로부터 나온 물이 저류층으로 이동하여 들어가게 된다.

열기원 가스의 발생이 시작되는 심도의 하부에서 지층수는 빠르게 가스로 포화된다. 즉, 더 많은 가스가 공극시스템으로 들어가게 되면 가스기포들이 형성된다. 가스 생성이 계속됨에 따라 공극의 압력은 수압(hydraulic pressure)보다 커지게 되고 이에 따라 결합력이 약한 물은 가스형성 지역에서 방출되어 압력이 낮은 경사상부(updip)로 이동하게 된다. 마지막까지 남아있게 되는 irreducible water는 골격입자를 얇게 필름상으로 둘러싸게 되고 작은 모세관을 채우게 된다(Fig. 10). 공극압력이 커짐에 따라 모세관압도 증가한다. 공극내 수포화도가 감소함에 따라 모세관압은 증가한다. 모세관압과 수포화도의 관계는 Fig. 11에서 볼 수 있다.

모세관압(공극의 압력)이 증가함에 따라 수포화도는 점차 감소한다. 그러나 일정한 수포화도에서는 모세관압만 크게 증가하게 된다. 이때의 수포화율을 비가역 수포화율(irreducible water saturation)이라고 한다. 이와 같은 상태에서는 공극수의 이동이 없기 때문에 용해된 물질이 다른 곳으로 이동되는 것이 차단되게 된다. 용해물질이 시스템 밖으로 빠져나갈 수 없기 때문에 공극률이나 투수율을 향상시킬 수 있는 용해작용은 의미가 없게 되고, 이와 같은 차단된 물 시스템은 투수율을 크게 감소시키게 된다.

압력이 과대하게 높아진 가스집적 저류층 공극에서 가스는 공극 또는 물에 의한 모세관에 의하여 분리된 고립된 불연속

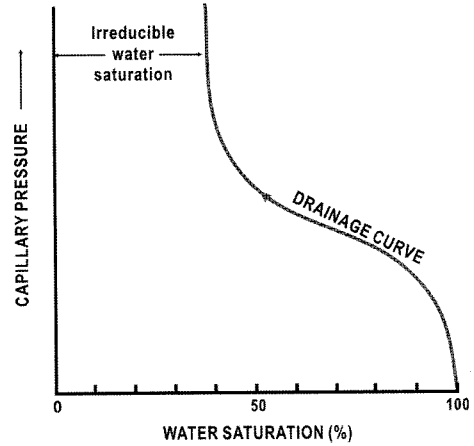


Fig. 11. Capillary pressure curve.

상으로 존재하게 되는 것이다. 가스는 지극히 투수율이 낮은 저류층에서라도 확산에 의하여 free gas나 용해가스로서 사라지는 경향이 있다. 그러나 이탈되는 가스의 양보다 생성되는 가스가 많기 때문에 높은 공극압력이 유지된다. 또한 공극의 압력이 높기 때문에 물이 과대압력 상태의 가스저류층으로 들어가지 못하게 된다. 이런 조건하에서 계속적으로 투수성이 상실됨에 따라 저투수성 암석이 가스의 유출을 막는 능력은 증가할 것이다. 공극내의 폐쇄된 수계 상태에서 물질의 용해와 침전 과정이 반복되면서 투수율은 더욱 감소한다. 미세공극이 형성되기도 하지만 전체적으로 볼 때 공극률은 변화가 없으며 투수율은 상실되게 된다. 이 3단계의 상태는 분지의 심부에 주로 존재하게 된다.

4단계

모델의 4단계에는 이미 매몰되어 3단계에 도달했던 지역이 용기되었을 때 나타나게 된다. 3단계의 과대 압력상태로 있던 가스 집적지가 용기되어 온도 압력조건이 낮게 되며 가스 생성은 줄어들거나 멈추게 된다. 또한 압력이 저하됨에 따라 공극은 팽창하게 된다. 3단계의 치밀저류층에 존재했던 가스는 빠져 나오게 되며 소실되는 가스의 양이 집적되는 양보다 많게 되고 공극의 압력은 낮아지게 된다. 온도저하의 정도와 소실된 가스의 양에 따라 가스 압력은 광역적인 수압보다 낮아지게 된다. 그리하여 3단계의 과대 압력 가스집적 상태이었던 것들이 과소압력 가스 집적 상태로 바뀌게 된다.

압력이 낮아짐에 따라 공극이 커지고 공극의 연결부가 넓어지며 고립되었던 가스 기포들도 더 커지게 되고 인접한 기포들과 합쳐져서 더욱 더 연속성을 가진 가스 상이 된다.

온도와 압력이 저하됨에 따라 가스로 포화된 저류층에 다시 물이 들어가게 되고 궁극적으로는 가스 집적체의 규모도 변화된다. 3단계의 과대압력 가스집적체의 경우에는 시스템에서 유실된 가스는 가스에 의해 다시 채워지고 높은 공극의 압력(모세관압) 때문에 물은 저류층으로 들어갈 수 없었다. 그러나 4단계의 과소압력 조건하에서는 공극압력과 모세관압력이 줄어들게 되므로 물이 가스를 함유한 지역으로 들어

갈 수 있게 된다. 모세관압이 감소하게 되면 물은 흡수되고 팽창된다. 압력이 감소함에 따라 나타나는 공극의 확장과 공극연결부가 통하게 됨에 따라 가스를 함유한 저류층으로 물이 들어가게 된다. 유동성을 가진 물이 점진적으로 가스 저류층의 가장자리로부터 침투해 들어감에 따라 공극률은 커지기 시작한다. 이런 조건하에서 과소압력 가스집적 조건의 상태는 점차 줄어들게 되어 결국은 모든 가스가 사라지게 된다. 최종적으로 비이상적인 저압대는 온도하강에 의하여 특정의 고립된 지역에서만 발달하게 된다.

이 모델에 의하면 과소압력 가스 저류층은 과대 압력상을 거친 이후에 만들어짐을 알 수 있다. 과대 압력상에서 과소 압력상으로 바뀌는 동안 많은 양의 가스가 유실되게 된다. 4 단계에서 과소 압력상의 가스집적체로 존재하게 될 것인지 혹은 과대 압력대로 존재하게 될 것인지는 집적되는 가스의 양이 유실되는 가스의 양 보다 빠르거나 혹은 늦는가에 달려 있다고 할 수 있다. 즉, 과대압력대의 가스집적지역에서는 가스의 집적이 소실되는 것보다 빠르고 과소압력대의 가스집적 지역에서는 가스의 집적이 소실되는 것보다 늦다. 따라서 과소압력대로 예상되는 지역이었지만 어떤 지질학적 요인에 의해 가스 유실이 지연될 경우는 과대압력지역으로서 발견되는 경우가 자주 나타난다.

치밀가스의 생산

재래형 가스를 생산할 경우는 구조트랩과 층서트랩을 찾아 시추를 수행하여 생산을 하게 된다. 그러나 치밀가스의 생산은 구조트랩이나 층서트랩과는 관련이 없다. 치밀가스 플레이에서 생산성이 특별히 좋은 공들이 존재하게 되는데 이 공들은 "스위트 스팟(sweet spot)"에서 생산된다고 말하고 있다 (Fig. 12). 스위트 스팟의 의미는 치밀가스 저류층에서 생산을 위한 최적의 장소를 말한다. 스위트 스팟을 결정해 주는 지질요인들은 다음과 같다.

- 1) 압력이 높은 곳
- 2) 저류층의 두께가 두꺼운 곳
- 3) 치밀 층준 내에서 특히 공극률, 투수율이 좋은 곳

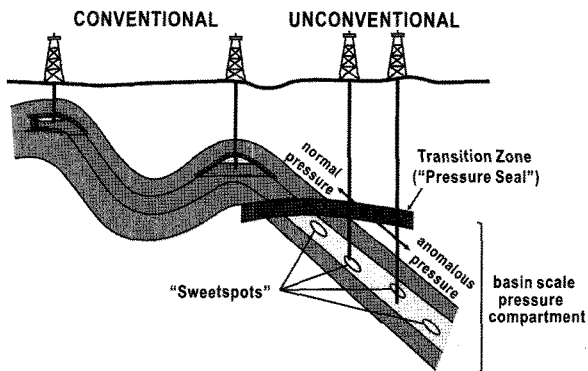


Fig. 12. Schematic Diagram of Production of Unconventional Tight Gas from Sweet Spots.

4) 상변화, 속성작용 등에 의하여 공극의 연결성이 잘 발달된 곳

5) 균열대가 발달한 곳

등이 스위트 스팟 지역이 될 수 있다.

치밀저류층에서 상업적으로 가스를 생산하기 위해서는 인공 자극(artificial stimulation)이나 특별한 시추기술과 유정완성기술(drilling and completion)이 필요하게 된다. 그러나 좀더 생산성을 높이기 위해서는 이들 작업 이전에 지질학적 균열대의 발달 상태를 이해하여야 한다. 왜냐하면 수압파쇄 등의 인공자극법은 천연 균열상태를 고려하여 수행할 때 생산성이 극대화될 수 있기 때문이다(Harstard et al., 1995). 연구에 의하면 사암층에는 수직 절리가 잘 발달하며 투수율이 매우 낮은 치밀사암층의 경우에는 수직 절리는 유체의 이동에 중요한 역할을 할 수 있다(Fig. 13).

사암층에 전형적으로 수직균열이 발달하는 것은 사암층 내에 유체의 압력이 증가함에 따라 수압단열(hydrofracture)이 먼저 사암에 생성되기 때문일 것이다. 따라서 치밀가스 저류 사암의 개발에는 절리발달에 대한 연구가 필수적이며 치밀저류 사암층의 치밀가스를 개발할 시는 수평시추나 경사시추를 사용하는 것이 매우 효과적일 것으로 생각된다(Fig. 14). 자연균열을 가로지르는 방향으로 수평시추나 경사시추를 하여 치밀저류층에서 가스 생산을 극대화할 수 있다. 경사시추의 경우는 렌즈상으로 발달해 있는 저류층의 개발에 사용되고,



Fig. 13. Vertical joints developed only within sandstone beds.

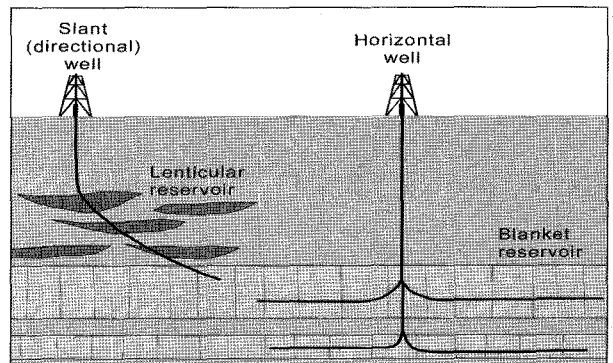


Fig. 14. Slant and horizontal wells for development of tight gas.

수평시추는 광역적으로 넓게 발달되어 있는 저류층에 효과적으로 사용할 수 있는 방법이다(Fig. 14).

치밀가스 저류층의 특성 연구방법

대부분의 가스는 암석의 공극 내에 존재하며 균열대를 통하여 시추공으로 이동될 수 있다. 따라서 치밀가스 저류층 및 관련된 균열대를 찾고 연구하기 위하여 여러 가지 기술이 이용된다. 앞에서 언급한 바와 같이 치밀저류층으로부터 경제성 있는 가스를 생산하기 위한 가장 중요한 요소가 천연 수직 균열(natural vertical fractures)이다. 왜냐하면 천연균열이 있는 암석이 천연균열이 없는 암석보다 언제나 투수율이 매우 높게 나타나기 때문에 투수율이 없는 치밀저류층에서 가스를 생산하기 위해서는 천연균열대를 찾는 기술개발에 주력하고 있다. 이를 위하여 NMR로그, 3-D 탄성과 정밀해석 등의 연구개발이 활발히 수행되고 있다(Sneider *et al.*, 1983).

암석의 시멘트 물질과 점토광물과 같은 자생광물의 연구가 강조되고 있다. 이것들이 부분적으로 일차와 이차공극을 채우게 되는데 광학현미경, 전자현미경, X-선회절분석, 유기탄소 측정 등을 사용하여 연구될 수 있다. 또한, 내부 표면장력측정, 열전도도 측정과 같은 정량적인 암석물성 측정도 저류층을 특성화하는 방법으로 사용되고 있다. 수압파쇄 처리를 하는 동안 가장 문제가 되는 공극간 연결성을 저해시키는 원인이 되는 것은 점토광물이다. 박편연구를 통해 퇴적물입자, 시멘트 광물, 자생점토의 관계를 잘 관찰할 수 있다.

기본적인 물리검층 방법 이외에 지층영상로그(formation image logs)를 사용하면 자연 균열의 존재와 방향성을 찾을 수 있다. 핵자기공명(NMR) 로그는 감소지역(depletion zone)을 감지할 수 있고 지층의 투수율을 결정할 수 있다. 일반적으로 사용되는 로그방법은 공극 내의 유체보다는 암질에 민감하며 시추공의 공경과 mudcake에 의해서도 영향을 많이 받게 된다. 따라서 보통의 로그방법은 유체를 위한 로그라고 할 수 없다. 핵자기공명(NMR) 로그는 광물질에 영향을 받지 않고 지층에 대하여 보정이 필요하지 않은 진정한 유체를 위한 유일한 검층방법이다. 대부분의 로그 틀은 공극률이 높은 지층을 평가하기 위하여 개발되었기 때문에 저투수성이고 저투수율의 암석층에서는 감도가 약하다고 할 수 있다. 저투수성 저류층의 지층평가를 위한 로그 방법의 개발은 공극률, 수포화율, 투수율을 보다 잘 평가할 수 있게 할 수 있게 하여 비재래형 저류층의 개발을 구체적으로 개선시킬 수 있게 할 것이다.

3-D 탄성과 데이터로부터 유도된 속성들(horizon attribute) 즉, dip, azimuth, curvature 등은 저투수성 저류층 내에서 균열이 많은 지역(sweet spot)을 찾기 위한 충분한 자료를 제공한다(Gray *et al.*, 2003; Wong and Boerner, 2003).

균열을 포함한 모든 암석조직 요소들은 P-파 속도 분포에 영향을 주기 때문에 최근에 P-파 속도에 의한 균열대 연구가 활발하다. 균열은 투수율이 낮은 암석에서 유체가 이동될 수

있는 통로가 되기 때문에 치밀가스 저류층에서 아주 중요한 요소이다.

국내 대륙붕의 치밀가스 존재 가능성

우리나라는 수십년에 걸쳐 대륙붕에서 석유탐사를 수행한 결과, 동해 울릉분지의 대륙붕 6-1광구 지역에서 경제성 있는 가스를 발견하여 개발 생산 중에 있으며, 더 많은 가스 매장량 확보를 위하여 탐사와 시추를 계속하고 있다. 최근의 연구에 의하면 대륙붕 6-1광구의 돌고래 구조에 발달되어 있는 저류사암은 양호한 공극률을 가지고 있으나 투수율이 지극히 적은 저투수성의 저류사암으로 알려진다. 또한 재래형 가스가 생산되고 있는 고래구조 지역 심부의 사암층도 저투수성의 치밀저류층일 가능성이 제시되고 있다(손, 2007; Son *et al.*, 2004; Son, 2008). Son(2008)은 구조적으로 비변형대에 속하는 고래구조의 심해지역(3,500 m 이상의 심부)은 공극률은 5-10%로 양호하나 투수율이 0.2 md 이하의 전형적인 치밀사암이며 시추시 가스징후가 있었고 특히, 압력이 과대압력 상태인 점에 주시하여 앞에서 제시한 모델의 3단계에 해당하는 것으로 보고 있다. 또한, 횡압력을 받아 옹기되고 구조적으로 변형이 심한 돌고래 지역의 사암층도 공극률은 양호하나 투수율이 지극히 낮은 전형적인 치밀가스 저류암이며, 모델의 4단계에 해당되는 것으로 보고 있다(Fig. 15).

치밀가스저류층의 탐사개발은 기존의 개념과 다른 새로운 개념으로 접근하여야 하며 치밀가스 저류층에 대한 지질학적 이해가 우선적으로 필요하다. 따라서 대륙붕 6-1광구 지역의 향후 치밀가스 탐사를 위해서는 지금까지 시추한 지역의 연구 자료를 종합하여 치밀가스저류층의 개념으로 재해석을 실시하고 저류층 특성 분석을 실시하여 이 지역에 발달되어 있는 유효한 치밀저류층의 수직적 및 수평적 분포를 밝혀내는 것이 필요할 것이다.

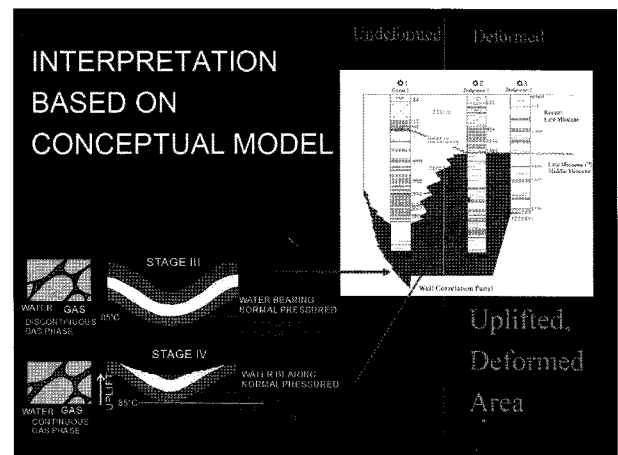


Fig. 15. Possible tight gas reservoirs of Block 6-1 compared with the model suggested by Law and Dickson (1985).

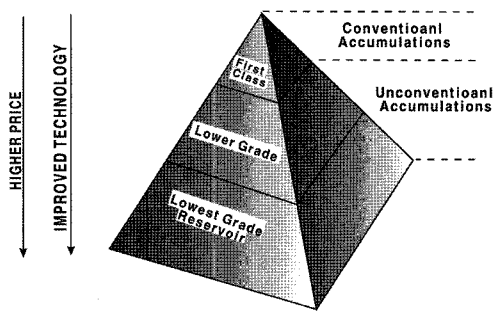


Fig. 16. Resource Pyramid. Tight gas accumulations fall in the lower or lowest grade reservoirs (Kuuskraa and Schmoker, 1998).

결 언

치밀가스 저류층의 형성과정과 치밀가스의 부존 형태는 기존 재래형 가스의 형성과 부존형태와는 완전히 다르기 때문에 탐사의 패러다임을 완전히 바꾸어야 한다. 따라서 치밀가스의 개발을 위해서는 치밀가스 저류층의 생성과정과 부존형태를 이해하는 것이 필요하다. 본 연구를 통해서 치밀저류층의 형성과정과 부존상황을 개략적으로나마 이해할 수 있기를 바라며 관련 비재래형 탄화수소 자연개발 분야에 기여할 수 있기를 바란다.

치밀가스를 개발하기 위해서는 개발비용이 많이 들고 회수율이 매우 낮을 수 있다. 특히, 대륙붕 광구와 같이 육상이 아닌 해상지역은 더욱 많은 비용이 요구될 것이다. 원래 고품위의 천연가스는 자원피라미드의 가장 작은 부분인 꼭대기에 위치한다. 품위가 낮아질수록 매장량은 증가한다(Fig. 16). 또한, 비용이 많이 들고 기술개발이 필요하다. 비재래형 탄화수소자원인 치밀가스 개발을 위해서는 더 많은 기술개발 노력과 투자가 필요할 것이다.

참고문헌

- 손병국, 2007, 대륙붕 6-1광구의 치밀가스 존재 가능성 고찰. 춘계지질과학기술공동학술대회(초록), 경주교육문화회관, 4월 25-27일, 686p.
- Energy Information Administration (EIA), 2008, Annual Energy Outlook 2008 with Projections to 2030: U.S. Department of Energy/EIA (available as PDF), 52p., www.eia.doe.gov
- Gautier, D.L., Dolton, G.L., Takahashi, K.I. and Varnes, K.L., 1996, National assessment of the United States oil and gas resources: Results, methodology, and supporting data: U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-30, Release 2, CD-ROM.
- Gray, D., Boerner, S., Todorovic-Marinic, D. and Zheng, Y., 2003, Analyzing fractures from seismic for improved drilling success. *World Oil*, 224, 62-69.
- Harstard, H., Tuefel, L.W. and Lorenz, J.C., 1995, Characterization and simulation of naturally fractured tight-gas sandstone reservoirs: Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference, Dallas, Texas, October 22-25, 1995, SPE Paper 30573.
- Kuuskraa, V.A. and Schmoker, J.W., 1998, Diverse gas plays lurk in gas source pyramid. *Oil and Gas Journal* (June 8), 123-130.
- Law, B.E. and Dickinson, W.W., 1985, Conceptual model for origin of abnormally pressured gas accumulations in low-permeability reservoirs. *AAPG Bulletin*, 69, 1295-1304.
- Law, B.E., 2002, Basin-centered gas systems. *AAPG Bulletin*, 86, 1891-1919.
- Masters, J.A., 1979, Deep basin gas trap, western Canada, *AAPG Bulletin*, 63, 152-181.
- Meckel, L.D. and Thomasson, M.R., 2008, Pervasive tight-gas sandstone reservoirs: An overview. In: Cumella, S.P., Shanley, K.W., and Camp, W.K. (eds.), Understanding, exploring, and developing tight-gas sands-2005 Vail Hedberg Conference: AAPG Hedberg Series, no. 3, p. 13-27.
- Nehring, R., 2008, Growing and indispensable: The contribution of production from tight-gas sands to U.S. gas production. In: Cumella, S.P., Shanley, K.W., and Camp, W.K. (eds.), Understanding, exploring, and developing tight-gas sands-2005 Vail Hedberg Conference: AAPG Hedberg Series, no. 3, p. 3-12.
- Schenk, C.J. and Pollastro, R.M., 2002, Natural Gas Production in the United States. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-113-01, 2p.
- Shanley, K.W., Cluff, R.C., Shannon, L.T., and Robinson, J.W., 2004, Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: Implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis. *AAPG Bulletin*, 88, 1083-1121.
- Sneider, R.M., King, H.R., Hawkes, H.E. and Davis, T.K., 1983, Methods for detection and characterization of reservoir rock, deep basin gas area, Canada, *Journal of Petroleum Technology*, 35, 1725-1734.
- Son, B.-K., Huh, D.-G., Kim, H.-T. and Park, S.-J., 2004, New insights into the permeability of sandstone reservoirs, offshore southeast Korea. Proceedings of the 69th annual meeting for the Japanese Association for Petroleum Technology, p.58-60.
- Son, B.-K., 2008, Tight gas reservoirs, offshore southeast Korea. The 33rd international geological congress. 6-14 August, Oslo (Abstract).
- Spencer, C.W., 1987, Hydrocarbon generation as a mechanism for overpressuring in the Rocky Mountain region. *AAPG Bulletin*, 71, 368-388.
- Wong, P.M. and Boerner, S., 2003, Ranking geological drivers for mapping fracture intensity at the Pinedale anticline, 65th Meeting: European Association Geoscientists and Engineers, p.C17.

(2008. 5. 15. 원고접수)

(2008. 8. 6. 수정본 채택)