

셰일가스 개발정보의 글로벌 동향분석

구영덕¹ · 김영인^{2*} · 박관순²

¹한국과학기술정보연구원 미래기술분석실, ²한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램

Global Trends of Shale Gas Development Information

Young Duk Koo¹, Young-In Kim^{2*} and Kwan Soon Park²

¹Dept. of Future Technology Analysis, Korea Institute of Science and Technology Information(KISTI), Daejeon 305-806, Korea

²ReSEAT Program, Korea Institute of Science and Technology Information(KISTI), Daejeon 305-806, Korea

Shale gas has caused a change in the dynamics of gas market since development of horizontal drilling technic and hydraulic fracturing technic caused its commercial production. The commercial amount of shale gas is 187.5 trillions m³ so human can use it for 59 years and the amount will increase in the future. Several nations such as USA, Canada, China and Russia have more and more interested in shale gas as a futuristic major energy source. In accordance with this trend in the world, the amount of studying theses for development of shale gas have increased so their theses became important increasingly. The number of searched theses (1986~The first half of 2013) is 3,468 and has increased recently. Among 89 nations studying shale gas, USA has 637 theses as No.1 in the world. 1,813 global studying institutes have studied shale gas; in the analysis result of several studying institutes, US geological survey institute was ranked as No.1 for the quality level of shale gas study and intensity of global cooperation.

Key words : shale gas, shale gas studying information, gas market, paper analysis of shale gas, USGS (US. geological survey), intensity of global cooperation, horizontal drilling, hydraulic fracturing

셰일가스는 수평시추기술과 수압파쇄법의 개발로 상업적인 생산이 이루어지면서 가스시장의 판도를 바꾸었다. 셰일 가스 가체매장량은 187.5조 m³로서 인류가 59년 사용가능한 매장량이지만 향후 더욱 증가할 수 있다. 셰일가스 생산은 미국에 이어 캐나다, 중국, 러시아 등 여러 나라에서 관심이 고조되어 미래의 주요 에너지원으로서 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 세계적으로 셰일가스개발에 대한 학술논문도 증가하고 논문분석의 중요성이 다대하다. 검색된 논문(1986년~2013년 상반기)은 3,468편으로 최근 증가추세를 보이고 있다. 셰일가스를 연구를 하는 89개 국가 중 미국이 637편의 논문으로 1위를 기록했다. 세계적인 1,813개 기관에서 연구가 수행되고 있고 기관별 수준분석 결과 미 지질조사소가 질적 수준과 국제협력강도 분석에서 가장 높은 것으로 나타났다.

주요어 : 셰일가스, 셰일가스 학술정보, 가스시장, 셰일가스 논문분석, 미 지질조사소, 국제협력강도, 수평시추, 수압파쇄

1. 서 언

1.1. 셰일가스 개요

천연가스는 크게 전통가스와 비전통가스로 구분되는

데, 전통가스는 근원암에서 생성된 가스가 배사구조와 같은 특정한 지질구조에 대량으로 집적되어 있는 가스를 말한다. 전통가스는 가스의 부존특징에 따라 수반가스와 비수반가스로 구분된다. 수반가스는 석유와 가

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: kyio210@resear.re.kr

스가 같이 부존되어 있는 유전에서 나오는 가스를 말하며, 비수반가스는 가스만 집적된 가스전에서 나오는 가스를 의미한다(An, 2013).

비전통가스는 유체투과도가 적은 셰일층, 사암층, 석탄층, 미고결 퇴적물 등에서 각 지층 내에 넓게 분포되어 있는 가스를 말하며, 셰일가스(Shale Gas), 사암층의 타이트가스(Tight Gas), 탄층가스(Coal Bed Methane, CBM), 가스 하이드레이트(Gas Hydrate) 등으로 구분된다. 비전통가스는 암석층에 넓게 분포하는 특징이 있어 공극률, 투과도 및 암석 구조가 상이하여 기존 전통자원 생산방식만으로는 생산할 수 없다(Baek, 2011).

1.2. 셰일가스

셰일가스는 입자지름이 1/16~1/256 mm인 미사(Silt)가 퇴적 고결되어 형성된 셰일층에 함유되어 있는 천연가스이다. 전통적인 천연가스와는 달리 지하 심부 1,000 m 이하에 광범위하게 발달되어 있는 셰일층에서 추출하기 때문에 개발비용이 높다. 셰일가스는 1800년대에 발견되었지만 셰일가스는 전통가스보다 심부에 부존되어 있고, 셰일층에 퍼져있어 상업적인 개발이 어려웠다. 2000년대 들어 수평시추·수압파쇄법 등의 기술이 개발되었고, 2005년 미국 텍사스 바넷(Barnett) 지역의 셰일가스 개발에 성공했다.

수평시추법은 수직방향으로 암석층을 뚫은 뒤 시추관을 가스층에 수평으로 삽입하여 표면적을 높여 채굴 생산성을 높이는 기술이고, 수압파쇄법은 수평시추 파이프에 뚫린 여러 구멍으로 다량의 물, 모래, 화학약품 혼합액으로 이루어진 화합물을 고압(500~1,000기압)으로 셰일층에 분사하여 균열을 일으킴으로써 투과율을 높여 가스를 채굴하는 기술이다. 수평시추 길이는 1~2 km로 4~5개 지점에서 수압파쇄를 수행하여 가스 회수율을 크게 높인다. 가스를 생산하기 위한 셰일의 조건으로는 유기물이 0.5~25% 함유되어야 한다.

셰일가스는 전 세계적으로 가채매장량이 187.5조 m³로서 전통가스의 확인매장량인 187.1조 m³(2011년 말 기준)과 비슷한 수준으로 향후 인류가 59년간 사용가능한 매장량(2010년 소비기준)이며, 전 세계적으로 고르게 분포되어 있다(Lee, 2012). 셰일가스는 기존의 원유나 가스가 중동과 러시아에 집중적으로 매장되어 있는 것과 달리 전 세계에 고르게 분포됨에 따라 에너지 안보 차원에서 매력적인 자원이며, 특히 에너지 수요가 높은 중국과 미국의 매장량이 세계 1, 2위를 차지한다(Global Energy Cooperation Center, 2012).

셰일가스 개발성공으로 미국의 가스 생산이 늘어나면서 가스가격이 크게 하락하여 가스시장이 안정화되고 있다. 특히 미국이 가스 수입국에서 수출국으로 변모함에 따라 에너지관련 산업이 판도가 바뀌는 셰일가스 혁명이 진행 중에 있다. 그러나 셰일가스가 부각되고 있는 한편으로는 사업의 수익성과 환경오염 등에 대한 문제가 제기되고 있는 실정이다. 여러 논란에도 불구하고 탐사, 채굴기술이 계속 발전하고 있고, 초대형 기업들의 개발 참여가 늘어나 앞으로 미국의 셰일가스 생산이 계속 확대 될 것으로 전망된다.

셰일가스 개발 확대를 위해서는 환경오염 등 사회적 리스크 완화 노력이 필수적이다. 셰일가스는 생산과정에서 수압파쇄 화학물질로 인한 수질오염, 다량의 용수사용으로 인한 수자원 고갈, 가스방출로 인한 온실가스 증가, 지진 야기와 같은 환경문제를 풀어야 하는 숙제를 안고 있다(Lee, 2012).

셰일가스개발에 핵심적인 수평시추와 수압파쇄 등에 대한 기술은 다른 비전통 에너지자원 개발과 지하탄층 가스화, CO₂지중저장 등 범위가 확대 될 것이기 때문에 관련 논문분석의 중요성이 커지고 아울러 학술 논문도 증가하고 있다. 이에 따라 셰일가스(shale gas), 수평시추(horizontal drilling), 방향시추(directional drilling), 수압파쇄(hydraulic fracturing), 시추이수(drilling mud), 시추이수 첨가제(mud additive) 등을 키워드로 한 글로벌 셰일가스개발에 대한 학술논문 동향도 분석하였다.

2. 셰일가스자원 개발기술동향

2.1. 개발현황

셰일가스 개발의 선도국은 미국으로 이미 상업화에 성공해 자국 내 천연가스 공급의 상당량을 셰일가스로 충당하고 있다. 미국 에너지부 산하 에너지 정보국(EIA: Energy Information Administration)은 미국 내 셰일가스 매장량을 24조 m³으로 추정하고 있다. 이는 미국 천연가스 전체 매장량의 32%에 해당하는 양이다. 현재 Marcellus, Haynesville, Barnett, Utica 등에서 개발이 이루어지고 있다(Bae, 2012).

미국은 선진 시추기술을 바탕으로 2000년대 중반부터 생산량이 급증했다. 1998년 미국 내 천연가스 생산량 중 셰일가스가 차지하는 비중은 1.9%(2,800만 m³)에 불과했으나, 2010년에는 24.1%(4.8억 m³)로 성장했고, 2011년 말에는 34%를 넘어서었다. 이후 본격적으로 셰일가스 생산이 늘어나기 시작하였으며, 2009년부터는 러시아를 제치고 세계 최대 천연가스 생산국이 되

었다(Bae, 2012).

미국의 천연가스 가격은 현재 MBtu당 2~3달러 수준이며, 아시아의 1/6~1/8수준이다. 당분간 이런 가격이 유지될 것으로 예상하고 있지만 후에는 MBtu당 4~8달러 수준까지는 상승할 것으로 전문가들은 전망하고 있다(Bae, 2012). 또한 2035년에는 미국 가스 수요의 45%를 셰일가스가 담당할 것으로 전망하고 있다(Bae, 2012).

중국의 경우는 세계 최대 셰일가스 매장국으로 주요 셰일가스 분지는 Sichuan분지와 Tarim분지에 분포한다. 2012년 3월 '전국 셰일가스 잠재력조사 평가 및 유망지 선정' 프로젝트를 시행하여 셰일가스 매장량을 조사하고 향후 탐사 및 개발전망을 제시하였다. 13차 5개년 계획 기간에는 2015년에 65억m³ 규모의 셰일가스를 생산하는 것을 목표로 하고 있다(Yu, 2013).

2009년 '미-중 친환경 에너지협력방안에 셰일가스 개발협력 이니셔티브(Shale Gas Resource Initiative)를 포함시켜 미국의 셰일가스 개발기술을 이전받기 위한 제도적 장치를 마련하였다. 이는 중국 내 셰일가스 매장량 평가, 셰일가스 개발촉진을 위한 공동 기술연구 수행, 셰일가스 개발투자 촉진 등을 골자로 한다. 그러나 중국은 전반적으로 지질구조가 복잡하고, 셰일가스 탐사 및 개발을 위한 기술이나 파이프라인 등 인프라가 미흡한 데다 탐사작업에 필요한 용수가 부족하여 향후 셰일가스 개발에 많은 어려움이 따를 것으로 전망되고 있다.

중남미 최대의 셰일가스 자원량 보유국인 아르헨티나는 점차 심화되고 있는 천연가스 공급부족 문제를 해소하기 위해 셰일가스 개발을 장려하는 제도개선 노력을 강화하고 있다. 정부는 가스 공급을 늘리기 위해 2000년대 중반부터 관련 법령을 정비하기 시작하여 2008년 3월에는 민간 부문의 가스전 탐사 및 개발을 촉진하기 위한 '가스 플러스(Gas Plus)' 프로그램을 추진하였고, 이에 힘입어 아르헨티나는 남미 최초의 셰일가스 개발 국가가 되었다(Lee, 2012). 셰일가스 개발은 국영 에너지기업인 YPF가 가장 활발하게 추진하고 있다. 현재 프랑스 Total, 미국 Exxon Mobil, Apache, EOG Resource, 영국-네덜란드 Shell, 영국-아르헨티나 Pan-American Energy 등 메이저 회사들이 탐사 및 개발 사업에 참여하고 있다.

멕시코는 2012년 2월 '국가 에너지 전략(Estrategia Nacional de Energía) 2012-2026을 발표하고, 셰일가스 개발을 통한 천연가스 증산 및 파이프라인 증설 등 인프라 현대화를 추진하기로 하였다. 국영 에너지기업인 PEMEX는 2010년경부터 셰일가스에 대한 잠재성

평가를 추진해왔으며, 2011년 3월에는 멕시코 북동부의 코아우일라(Coahuila)지역에서 셰일가스 생산에 성공하였다. PEMEX는 2011년부터 2015년까지 연간 7억 달러를 투자하겠다고 밝혔으며, 본격적인 셰일가스 생산은 2016년부터 이루어질 것으로 전망하고 있다(Lee, 2012).

전통적 가스 생산이 활발한 호주는 셰일가스 경제성 평가를 위한 탐사활동을 추진 중이다. 주요 부존지역인 퍼스(Perth)와 쿠퍼(Cooper)지역을 중심으로 Origin Energy사, Santos사 등 호주 에너지 기업들과 함께 CNOOC사, Bharat사 등 해외 기업들의 탐사 및 투자가 진행 중이다. 탐사작업 결과 수직가스정에 대한 파쇄 및 가스채취 결과는 우수하나, 아직까지 미국과 같은 수평 가스정 기술을 이용한 탐사는 추진되지 않은 실정이다(Global Energy Cooperation Center, 2012).

캐나다는 셰일가스 자원량이 비교적 풍부할 뿐만 아니라 미국과 함께 셰일가스 개발에 필요한 기술을 보유한 국가이다. 셰일가스가 매장되어 있는 지역은 주로 앨버타(Alberta)주, 브리티시 컬롬비아(British Columbia)주, 퀘벡(Quebec)주 등이다. 특히 브리티시 컬롬비아주의 몬트니(Montney)와 혼 리버(Horn River), 앨버타주의 콜로라도(Colorado), 퀘벡주의 유틀카(Utica) 등이 대표적이다. 캐나다 셰일가스 개발 인프라는 미국에 비해 열위이나, 아시아시장의 막대한 가스 수요를 겨냥한 관련 인프라가 추진되고 있고, 선진화된 에너지 자원 관련 금융시장, 최첨단 자원개발 기술 보유 등의 장점이 있는 만큼, 투자 잠재력이 매우 큰 시장이다. 아시아 지역 기업들의 진출이 활발하게 진행 중이며 특히 일본, 중국, 한국 등이 셰일가스 개발 사업에 참여 중이다.

폴란드는 유럽 국가들 중 셰일가스 개발에 가장 활발한 움직임을 보이고 있는 국가들 중 하나이다. 2014년 초부터 셰일가스를 생산한다는 계획 하에 현재까지 109개의 개발권을 현지 및 해외업체에 발급하였으며, 2012년 5월에는 캐나다 정부와 셰일가스 개발협력에 합의하였다(Lee, 2012). 폴란드는 셰일가스 매장층이 미국보다 깊고, 지질구조가 복잡하여 셰일 가스 추출 및 가공비용이 더 많이 들 것으로 추정되고 있다. 또한 파이프라인, 저장설비, 시추설비 등 인프라가 크게 부족한 실정이다. 폴란드의 지형적 특성에 기인한 높은 개발비용 및 부족한 인프라와 설비 문제 등으로 향후 상업적인 생산이 가능할지에 대한 전망은 불투명하다.

우크라이나는 폴란드와 마찬가지로 가스 수요의 2/3를 러시아로부터 수입하고 있어 에너지 안보 확보 차

원에서 셰일가스 개발 정책을 적극 추진 중이다. 러시아에 대한 에너지 의존 탈피 및 에너지 자급 필요성이 셰일가스개발 기술의 환경적 영향에 대한 고려보다 우선시되고 있다. 최근 셀과 세브론이 우크라이나 셰일가스 탐사 및 개발 입찰에 성공하면서 2017년경 셰일가스를 생산할 수 있을 것으로 전망되며, 2020년경에는 가스 내수의 10%를 동부 유지프스카(Yuzivska)와 서부 올레스카(Oleska)광구에서 생산되는 셰일가스로 충당이 가능할 것으로 보고 있다. 그러나 인프라 부족은 셰일가스 개발에 장애물이 되고 있다(Lee, 2012).

러시아의 경우는 현재 셰일가스 매장량에 대하여 구체적으로 발표된 자료는 없다. 세계 1위의 전통가스 매장량을 가지고 있고, 가스 생산도 활발하며, 대륙붕 및 북극권역의 향후 개발을 고려할 때 당분간 전통가스 생산에 집중할 전망이다. 2009년 미국 발 셰일가스 붐을 단기적인 것으로 평가 절하했으나, 최근 천연가스 시장에서의 셰일가스 영향력을 인정하고 2013년 초부터 셰일가스개발을 본격화 하고 있다.

2.2. 셰일가스 개발절차

셰일가스 개발은 대개 3단계로 이루어진다. 제 1단계는 퇴적분지 내의 가스 생성과 집적이 가능한 셰일층의 유무와 가스부존 유망지점(Sweet Spot)을 규명하고 평가한다. 이를 위하여 셰일퇴적분지의 구조조 분석과 퇴적환경, 순차층서학적 해석을 실시한다. 시추공 물리검층자료, 코어자료, 탄성과 탐사자료 분석 결과를 종합 해석하여 셰일가스 저류층의 구조도와 층후도를 작성한다. 셰일층의 비균질성에 따른 암석역학적 성질(취성도 등)의 이방성 및 다양성은 셰일층 수압파쇄 및 수평정 설계에 중요한 정보를 제공하며, 취성도에 영향을 주는 광물과 점토의 조성은 물리검층 자료 분석을 통해 계산된다.

제 2단계에는 가스 부존 유망 셰일층을 대상으로 지질학적(유기지화학적, 암석역학적, 퇴적학적, 암석물리적) 특성을 파악하고, 생산예측 시뮬레이션, 생산시험 자료를 이용한 압력감퇴곡선 분석 등을 바탕으로 생산성을 파악한다. 셰일 내 유기물 함량을 분석하여 셰일가스 부존이 양호한 셰일층을 확인하고, 케로젠 타입 분석, 비트리나이트 분석을 통해 열성속도를 규명함으로써, 가스 생성 여부를 확인하는 유기물과 열성속도 분석을 실시한다. 셰일가스층의 층후도와 비트리나이트 반사도 분포도를 이용하여 유망성이 높은 지점(Sweet Spot)을 예측한다. 셰일층 내 흡착되어 있는 가스를 생산하기 위해서는 수압파쇄와 같은 특별한 공법이 필요

하다. 셰일 저류층의 분포, 방향성, 연장성을 분석한다. 이는 셰일 저류층의 자원량과 매장량의 계산에 필요하며, 셰일 저류층의 암석 물리적 특성과 탄성과 속성과의 상관성 분석 등을 통해 연속성을 예측할 수 있다.

생산예측 시뮬레이션은 셰일 저류층의 물성, 가스물성, 생산조건 등을 입력하여 생산량을 예측하는 기술이다. 저류층 특성화 분석결과, 저류층 특성 자료, 수압파쇄 및 수평정 영향과 같이 모든 현장 조건을 고려하여 생산량을 예측하고, 실제 생산자료와의 히스토리 매칭을 통한 입력자료 수정하기 위해 필요하다. 경제성 평가는 개발 전 입력자료의 불확실성을 고려한 위험도 평가 및 이를 고려한 경제성을 파악하는 기술이다. 이를 위해 자원량 및 매장량에 대한 추정이 필요하며 생산설비, 해당국의 세제 등을 파악할 필요가 있다.

셰일가스 개발을 위해서는 수평시추가 필요하기 때문에, 전반적인 방향성 시추와 관련된 장비를 개발해야 한다. 효과적인 시추정 위치 제어 및 관리 기술 향상 등을 통해 경제적인 비용을 최소화하며, 수평정 시추 시 발생하는 가스를 실시간으로 분석하여 생산성을 예측하는 기술이 필요하다. 방향성 시추기술은 셰일층의 효율적인 시추로서 시추 모터(Drilling Motors) 또는 회전식 방향제어 장비(Rotary Steerable System)를 이용하여 장공의 경사정 및 수평정을 시추하 것으로 실시간 위치제어 기술이 필요하다.

실시간 가스측정 기술이 필요하다. 이는 공저 장비에 설치된 탄소추적자(Carbon Tracker)를 이용하여 시추와 동시에 실시간 시추이수 검층을 통해 탄화수소의 정량적 및 화학적 조성을 분석하여 스마트 유정완결 및 유정 구간별 생산성 예측을 도와주는 기술이다. 셰일가스의 생산성 및 수압파쇄의 효율성을 향상시키기 위해서는 수압파쇄에 사용하는 프로판트 개선, 시추정 위치 설계, 미소지진과 관측 및 자극 설계 등의 기술 개발이 필요하다. 고압의 수압을 이용하여 저류층 내 인위적으로 균열을 만들어 효과적으로 가스 생산을 증대하기 위하여 균질한 입자의 모래 또는 균열지지제(프로판트)를 주입하여 저류층 주변보다 더 높은 균열투과도(Fracture Conductivity)를 갖도록 한다.

저류층 암반공학 분석기술이 필요하다. 이는 암석물성, 시추공 안정성, 균열 분포, 모래 생산, 시추공 이미지, 단층 및 응력분포 등을 분석하여 이방성의 셰일 저류층 시추 및 완결 효율성을 증대하는 기술이다. 균열처리 최적화 기술은 수압파쇄를 통해 만들어진 인공 균열층을 미소지진파(Microseismic)등과 같은 기술을 이용해 균열의 위치, 구조 및 크기를 분석하고 균열

파쇄대를 예측하는 기술이다. 자극 설계 기술은 셰일 가스 생산성을 높이기 위해 시추공에 인위적으로 자극을 주는 기술로서 90도 이상의 경사 수평공(Toe Up Horizontal Well), 다단식 수압파쇄 단계 및 천공군(Perforation Cluster) 분포를 설계하는 기술이다. 균열 투과도 개선기술은 수압파쇄를 통해 생성된 인공균열의 균열투과도(Fracture Conductivity)를 유지하고 증대시키는 기술로서 모래 또는 복사이트와 같은 특수 균열지지제(프로판트)를 이용하여 인공균열의 균열투과도를 개선하고 모래생산(Sand Production)을 방지하는 기술이다.

많은 양의 물이 셰일가스 개발 시 필요하고, 수압파쇄 시 사용되는 화합물에 의해 환경오염이 발생할 수 있고, 지하수 오염, 대기 오염, 인공지진 등이 발생할 수 있다. 최근 셰일가스 개발과 관련한 환경오염 법규가 강화되고 있는 추세이며, 따라서 셰일가스 개발 생산 시 발생할 수 있는 환경오염을 주기적으로 모니터링 및 저감할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 셰일가스 수평시추 및 수압파쇄 작업을 위해서는 한 시추당 7.6~15.2백만 리터의 많은 양의 물이 필요하다(USDOE, 2010). 최종적으로 제 3단계에서는 개발 및 생산을 위한 시추, 완결, 자극을 수행한다.

2.3. 시추기술

셰일가스는 도시와 같은 인구 밀집 지역이나 늪지, 밀림, 사막 등 환경적으로 열악한 지역에 위치한 경우가 많아 시추장비의 접근이 제한되어 수직 시추가 한계를 갖기 때문에 셰일가스 개발에는 방향성 시추 기술의 적용이 필수적이다. 흔히 Multi-well Pad라 불리는 10여개의 유정을 하나의 단일 Pad에서 개발하는 방법을 사용한다. 이는 시추공, Pad, 접근로, 배관망, 생산설비에 소요되는 비용의 절감은 물론, 공공적 또는 환경적 영향을 최소화할 수 있다.

비전통자원의 경우, 암석의 치밀함이나 낮은 유동성으로 인해 일반적으로 수직정을 통해서 생산성이 떨어지며, 셰일가스전과 같이 얇고 광범위한 지층분포 특성을 가진 경우는 Barnett 셰일가스전의 사례를 보듯이 수평정을 시추함으로써 생산성을 크게 높일 수 있다. 또한 셰일가스의 개발에는 보통 수 천 개 이상 대량의 생산정을 통해 생산이 이루어지고, 낮은 유동성에 따라 2~3 km에 달하는 긴 장공의 수평시추가 필수적이다.

수평 시추는 방향성 시추(Directional, Slant, or Sideway Drilling)의 일종으로 직하 방향에서 벗어난 예정된 목표 지점에 도달하기 위하여 미리 설계된 방

향, 각도 및 경로에 따라 시추하는 기술이다. 수평 시추의 종류에는 휘는 부분의 곡률 반경에 따라 단, 중, 장반경이 있다. 단반경은 곡률 반경이 25~40 ft(8~12 m)로 급격하게 꺾어 목표에 접근할 수 있어서 기존의 수직 시추정으로부터 저류층에 수평으로 굴착하여 회수율을 높이거나, 투과도가 낮은 셰일가스 지층 개발에 적절하다(Ko, 2007).

중반경은 곡률 반경이 300~700 ft(90~210 m)로 수평 성분 3,500 ft(1,067 m) 이내에 적용되며, 띄엄 띄엄 분포하는 여러 개의 저류층을 동시에 개발하는데 효과적이다. 장반경은 곡률 반경이 1,000~4,500 ft(305~1,372 m)로 멀리 떨어져 있는 목표에 접근할 수 있어서 주로 해상의 단일 플랫폼에서 다수의 개발 대상을 시추하는데 사용된다.

수평 시추의 정밀한 경로 제어는 전향 모터, 굴곡자, 전향 췌기 등 시추공 저장비(Bottom Hole Assembly)의 발달과 시추 중 측정기술(MWD: Measurement While Drilling Technology or Borehole Telemetry)의 진보에 의해 이루어졌다. 이 수 순환에 의해 작동하는 전향 모터가 개발되면서 시추동의 움직임 없이 비트만 공저에서 회전하고, 모터와 시추동 사이의 굴곡자에 위치하여 시추공 저장비의 굴절을 일으켜서 경로를 제어한다. 시추 방위(Azimuth)와 기울기(Inclination) 등 시추 진행 상황을 MWD로 실시간으로 측정하고 비트 회전의 멈춤 없이 3차원 자동 제어하는 시추공저 시스템의 개발 등 수평 시추 전 과정의 자동화도 이루어지고 있다(Ko, 2007).

셰일가스의 개발을 위해 핵심적으로 요구되는 시추 분야 기술을 열거하면 다음과 같다(Shin, 2012). 시추공 위치 및 궤도/경로 설계 기술을 위하여 경사정/수평정 시추 시 시추공의 경사도를 제어하는 것으로 발기점의 선정, 지층의 특성, 시추궤도/경로, 경사도 변화, 현장 장비 운영 및 수반 서비스 기술 등이 포함된다.

패드/생산정(Pad/Well) 설계 기술을 위하여 Well 단위의 개발과 비교하여 Pad 단위의 개발은 수평시추 기술의 발달과 더불어 지상 설비 및 주변 환경에 대한 영향을 최소화하며 경제적인 방향, 각 가스전의 특성을 고려하여 설계 방향을 결정하여야 한다.

시추 현장 운영 기술에는 경사정/수평정에서 시추공 압력제어를 위한 시추이수 운영, 시멘팅, 케이싱 설치 및 장비와 인력운영, 공 내 모니터링 및 공정 개선 기술의 확보가 필요하다.

시추중 공내 모니터링 기술은 크게 시추공의 경사도와 시추 위치 추적을 위한 MWD(Measurement

While Drilling) 기술, 시추 중 물리검층을 위한 LWD(Logging While Drilling) 기술로 나눌 수 있으며, 자료 취득 및 해석 기술과 이를 경사정/수평정에서 운영하기 위한 장비 개선, 현장 작업 기술이 요구된다.

시추공 안정성 및 지층 평가 기술에는 장공 또는 다중의 시추공 굴착에서 필수적으로 요구되는 공벽 안정성 개선관련 기술 및 시추공에서 지층평가는 물리검층 자료, 코어분석 자료 등을 통합하여 지층과 균열의 특성을 규명하는 작업으로 물리검층 자료 해석, 코어분석 자료 통합 적용이 요구된다

2.4. 수압파쇄 및 유정완결

세일은 연약해서 시추는 쉽지만 투과도가 매우 낮아 자극 없이는 회수가 어렵기 때문에 특별한 완결을 필요로 한다. 시추공에 고압으로 유체를 주입하여 주위를 파쇄시켜서 생산대를 확립하고, 유체에 혼합된 지지체(Proppant; 모래 등)가 단열을 열린 상태로 유지하는 자극 기술이 핵심 기술이다.

수압파쇄공법이란 시추정을 통해 물과 화학물질의 혼합물을 고압으로 주입해 시추공 주변으로 균열을 생성시키는 패드 과정(Pad Stage)과, 균열의 틈이 지층압력으로 인해 닫히는 것을 방지하는 슬러리 과정(Slurry Stage)으로 이루어진다. 슬러리 과정에서는 지지체를 주입하여 균열상태를 유지시킨다(Guo *et al.*, 2007; Shin *et al.*, 2012).

수압파쇄공법에 이용되는 용매는 약 90%의 물, 9.5%의 모래, 0.5%의 화학물질로 이루어져 있고, 특히 화학물질에 포함된 산, 윤활유, 계면활성제, 용매제 등은 오염물질의 기준에 비해 수천~수백만 배의 오염원을 포함할 수 있다(Han *et al.*, 2013). 1980년대에 행해진 초기의 자극에는 겔-이산화탄소 또는 질소 혼합물에 의한 파쇄를 하였으나 성공적이지 못했으며, 1986년에 MHF(Massive Hydraulic Gel Frac)가 도입되었으나, MHF는 고비용이 소요되었다. 1997년 겔 대신 물을 파쇄 유체로 사용하는 경사 파쇄 기술(LSF; Light Sand Frac, Water Frac or Slick Water Frac)이 도입되면서 세일 개발에 새로운 전기를 맞는다.

물이 겔보다 파쇄 강도는 약하나 점토광물의 속성도가 높아 물과 접촉하여도 반응하지 않고, 세일의 투과도가 낮아 약간의 틈만 생겨도 유체 유동성이 높아져 충분한 생산이 가능하였다. 지지물을 부유상태로 유지시키기 위해 점성도를 높여주는 고분자 화학물질을 첨가하기도 한다. 개발 비용이 1.00달러/Mcf로 떨어지면서 수익성이 크게 향상되어 유정 완결 및 재완결과 충

진 및 확장 시추가 기하급수적으로 증가하였다.

파쇄작업은 구간으로 나누어 진행되는데 구간별로 천공하여 고압으로 유체와 지지물을 주입하고 플러그 하면서 이동하는 작업을 반복한다. 일반적으로 500ft (150 m)당 2~4천공대를 형성하며 자극작업을 수행한다. 단열 형성 방향은 자연적 응력과 자극 시 인위적 압력의 상호작용에 의해 결정되는데 일반적으로 시추공에 직각방향으로 설계한다. 그러나 시추공과 평행하게 형성시킨다면 저비용으로 다단계의 가로축 방향 자극에 버금가는 자극 효과를 얻을 수 있어 현재 연구 중이다(Ko, 2007).

주입 유체 및 지지물 소재에 대한 연구도 진행 중이다. 유체는 지지물을 단열 깊숙이 이동시키고 이동과정에서 침전 양을 최소화해야 하며, 지지물은 가스 이동을 제한하지 않으면서 단열을 열린 상태로 유지시킬 수 있어야 한다. 단열 벽면과의 마찰을 줄이는 미량의 고분자 화합물을 넣기도 하며, 장시간 부유능력 유지를 위해 점성을 높이거나 섬유질 물질을 혼합하기도 한다. 또한 지지물로 모래 대체 소재도 개발 중이다(Ko, 2007).

수압파쇄 및 유정완결 분야의 주요 기술은 다음과 같다(Shin, 2012). 생산정 및 파쇄작업 최적설계 기술로 수압파쇄의 기본적 절차는 산처리, 유체주입, 프로판트 주입 및 Flush 작업으로 요약된다. 이때 파쇄작업은 각 지층의 지질학적, 유동학적 특성에 따라 설계되어야 한다. 수압파쇄의 핵심 고려인자는 파쇄압력, 지층 응력분포와 암석학적 특성에 따른 균열특성, 지층두께와 암석투과도에 따른 파쇄 길이 및 너비 설계 등이다.

천공(Perforation) 및 구간분리 기술로 천공의 효율 향상을 위해 생산정과 저류층의 접촉을 만들어 주는 기술이 필요하며, 천공의 구간 간격 및 구간 길이 등에 대한 최적 조건을 찾는 노력이 필요하다. 지지체(Proppant) 설계기술에는 최초의 수압파쇄 작업 당시 강모래를 사용하였으며, 오랜 기간 동안 플라스틱 알갱이, 쇠구슬, 유리구슬, 알루미늄 알갱이, 고강도 유리구슬, 견과류 껍질, 수지로 코팅된 모래 등 다양한 종류가 적용되었다. 주입 장비의 발달에 따라 모래의 농도는 증가하는 추세이며, 입자는 점점 작아지고 있다. 수압파쇄 효과를 극대화하기 위한 입자 크기, 주입 방법 등에 대한 개선이 계속 요구되고 있다.

파쇄 유체(Fracturing Fluid) 적용기술에는 유체 선정, 투입량, 첨가제, 유속 등에 대한 선정이 필요하다. 최초로 사용된 유체는 젤화된 원유를 사용했으며, 물이 파쇄유체로 사용된 이후로 다양한 젤화 첨가제가

사용되었다. 현재는 96% 이상의 물, 염수 등이 지지체와 혼합되어 사용되며, 저류층의 특성에 따라 유체를 투입하기도 한다. 주입 장비 관련 기술로는 균일하게 많은 양의 지지체를 유체와 혼합하기 위하여 복잡한 장비가 개발되고 있으며, 많은 양의 지지체 공급을 위한 보관 설비도 개발되어야 한다

수압파쇄 운영기술(유체 및 지지체 선정, 주입량, 주입 속도, 운영압력 설계)로서 생산량을 극대화하는 유정완결 기술의 핵심은 수압파쇄 기술이다. 최적 조건은 저류층의 특성에 따라 달라지므로 인근 유 가스전의 파쇄조건과 생산량 등을 비교하여 최적의 조건을 설계하여야 하며 관련기술의 확보가 요구된다.

수압파쇄 관련 장비 및 운영기술(CT, Wireline, Composite Plug 외)로는 시추작업에 사용되는 CT장비는 유정완결 작업, 천공 작업 및 수압파쇄가 종료된 후 생산정에 있는 플러그들을 제거하는데도 이용된다. Wireline은 천공작업과 구간 차단을 위한 장비 투입 등에 사용되며, 이러한 관련 장비의 운영, 개발기술이 요구된다.

기타 화학제 선정 및 주입기술로서 유정완결을 위하여 다양한 화학제들이 수압파쇄 중에 주입되기도 한다. 유체와 지지체 주입 전, 이물질 및 시멘트를 제거하기 위한 산(Acid) 투입, 생산정 내부의 얼음 또는 하이드레이트 생성을 제거하기 위한 메탄올 투입, 유체와 함께 주입되는 마찰 저감제(Friction Reducer), 생산정 내부 쇠파우 등의 제거를 위한 젤 슬러그(Gel Slug) 등을 주입하기도 하며, 각각의 활용을 위한 설계기술이 요구된다.

2.5. 시추이수

이수의 사용목적은 공벽과 시추비트 보호, 압편 및 코어회수이며 이수에 사용되는 화학물질은 이수점성 향상제, 윤활제, 비중제, 비트보호제, 공벽 보호제, 부식방지제 등이 있다. 젤(Gel)은 수압파쇄액의 점성을 높여 균열지지체가 시추정 하부로 이동하는데 도움을 준다. 과산화황(Peroxidesulfate)은 수압파쇄액을 주입하는 동안 젤의 점성을 낮춘다. 15%의 농도의 산성용액은

은 염산으로 시멘트 제거에 사용된다. 기타 케이싱부식방지제, 수평정내에 존재하는 박테리아 증식을 억제하는 유기산, 세일내 점토광물의 팽창을 막는 염화칼륨 등이 있다. 수압파쇄용액 첨가제와 구성비는 (Table 1)과 같다(Kim, 2013).

2.6. 환경영향과 규제법(Kim, 2013)

우려되는 환경재해는 지표수 및 지하수 등 수자원오염, 대기오염, 시추정패드 및 도로건설에 따른 산림 및 형질훼손, 유정폭발, 소규모 지진, 소음 및 먼지발생 등이 있다. 수압파쇄 때 사용되는 방대한 양의 물(공당 일 1만톤, 모래 700톤)을 취수 및 저장, 처리하는 과정에서 수자원 오염은 물론 식수를 고갈시킬 수 있다. 또한 시추 도중, 케이싱 및 시멘트 작업, 수압파쇄 시물이 지하로 스며들어 지하수오염 가능성과 재처리과정에서 발생하는 14~15%의 재활용수로 인한 지표수 오염이 우려된다.

수압파쇄용액 화학물질은 발암물질과 신체발달을 지연을 초래하는 독성물질이 포함되어 있어 취급자 및 인근 주민에게 피해가 예상되고 운송과 보관에 있어서도 유출과 누수 등으로 하천오염을 초래할 수 있다. 수압파쇄에 이용되는 물은 지표수 60~70%, 지하수 4%, 나머지 재활용수이다. 시추와 수압파쇄에 이용된 물의 30~70%는 다시 지표로 흘러나오고 나머지는 지층에 남게 된다. 방대한 양의 물 사용으로 인하여, 가뭄 시에는 용수공급차질이 우려된다.

도로건설 및 시추정 패드 설치로 산림훼손 및 지형형질 훼손은 산사태는 물론 야생동식물 감소 등 생태계에 영향을 미친다. 굴착에 따라 나오는 유해한 휘발성 유기화합물(VOC)과 생산시 메탄이 8%정도 대기로 방출되어 천연가스나 석탄, 석유보다 온실효과가 크다는 주장이 있다. 운송시 유해가스와 산림훼손은 대기오염을 가중시킨다. 미국 동해안 세일가스 생산지에서 수도꼭지에 불을 대면 화염이 발생하거나 물의 착색 및 냄새 등이 확인되고 있어 인체 및 환경에 대한 우려가 제기되고 있다. 세일가스 개발은 교통혼잡, 기존 도로훼손, 소음, 먼지발생 등으로 환경을 오염시킨다.

Table 1. The ratio of hydraulic fracturing additive solution(Fayetteville Shale)

Additive	Ratio %	Additive	Ratio %	Additive	Ratio %
Surfactant	0.085	pH Adjusting Agent	0.011	Corrosion Inhibitor	0.002
KCL	0.06	Breaker	0.01	Biocide	0.001
Gelling Agent	0.056	Crosslinker	0.007	Acid	0.123
Scale Inhibitor	0.043	Iron Control	0.004	Friction Reducer	0.088

Marcellus 셰일의 한 유전에서 폭발 사고가 발생한 적이 있으며 수압파쇄로 인한 소규모 지진이 발생한다는 주장이 제기되고 있다.

미국 최대의 Marcellus 셰일 개발에 대한 반대 움직임에 따라 뉴저지 주에서는 수압파쇄공정 금지 법안이 상정되었다. 펜실베이니아 주에서는 셰일가스개발사에 Local Impact Fee를 부과하는 법안을 심의 중에 있고 웨스트버지니아 주에서는 셰일개발 사업에 대한 추가규제방안을 마련 중이며 수압파쇄공정을 전면 재검토하라는 주지사령이 하달된 상태이다. 텍사스 및 와이오밍 주는 첨가화학물질에 대한 세부내역 공개의무화 법안을 상정중이다.

IEA는 회원국정부에 비전통가스 개발기술에 대한 규제 가이드라인을 발표할 예정이다. 미 환경보호국(EPA)은 수압파쇄공정에 대한 환경영향 평가(2014년 최종결과 발표예정)를 하기로 발표했다. 한편 프랑스에서는 연구목적 외 수압파쇄공정을 일체 금지하고 있다.

2.7. 가스시장에의 셰일가스 영향

세계가스 시장의 제2위의 수입국인 미국이 수출국으로 전환하면서 세계가스시장은 공급과잉으로 판매자 중심에서 구매자 중심의 시장으로 재편되고 있다. 세계에너지기구(IEA)는 오는 2017년이면 미국은 사우디아라비아를 제치고 세계 1위 원유생산국으로 부상할 것으로 전망했다. 저렴한 셰일가스 대량생산으로 2035년까지 가스수요는 50%이상 상승하고 세계에너지소비의 구성에서 25%이상을 담당할 것으로 전망된다.

미국 연평균 천연가스 가격은 셰일가스 개발붐으로 100만 Btu(1 BTU = 0.252 kcal/h) 당 2008년 8.9달러에서 2012년 2.83달러로 하락했다. 셰일가스를 이용한 에틸렌 제조원가를 보면 미국은 톤당 316달러, 사우디아라비아 455달러, 한국을 포함한 아시아는 1,717달러로 가격경쟁력에서 한국 에틸렌 공장이 경쟁할 수 없는 수준이다. 세계적으로 셰일가스를 포함하여 비전통가스의 개발에 힘입어 에너지시장의 판도가 변하여 수입선 전환 및 국내에너지원별 수요비중조정을 고려할 시점이다. 미국산 셰일가스는 LNG보다 22% 저렴하다.

한편 셰일가스 개발확대는 한국의 LNG선 등 조선, 파이프라인, 천연가스액화 설비, 저장터미널 등엔 긍정적인 영향을 미칠 전망이다. 셰일가스를 석유로 전환하면 디젤, 가솔린, 나프타 등을 추출할 수 있어서 경제적가치가 올라간다. 한국화학연구원은 가스액화기술(GTL, Gas-To-Liquids)에 사용되는 기존촉매보다 부피를 1/10로 줄이고 효율은 50%높은 크기가 4nm로 균

일한 나노코발트 촉매(NCR)를 개발했다(ChosunBiz, 2013). 기존의 GTL 촉매 코발트는 크기가 수십 nm에 달하면서 균일하지 않아 반응효율이 떨어졌다.

러시아는 셰일가스 붐을 단기적인 것으로 평가 절하했으나, 최근 천연가스 시장에서의 셰일가스 영향력을 인정하고 2013년 초부터 셰일가스개발을 본격화 하고 있다. 러시아와 중국의 셰일가스 생산은 또 다시 가스 시장에 지대한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

셰일가스 공급 증대로 세계 천연가스가격이 장기적으로 안정세를 유지하게 될 것이다. 석유화학산업의 원료는 석유에서 분리한 나프타 중심에서 가스원료중심으로 전환되고 발전의 경우는 가스발전비중이 확대되어 전력수용에 대응하는 유력한 방안으로 부상할 전망이다. 특히 온실가스 배출이 적어 친환경적이라는 점에서도 가스발전 비중을 확대시키는 요인으로 작용한다. 석탄발전을 장기적으로 대체할 것으로 예상된다(Jeong, yu gyeong, 2012).

셰일가스 개발 확대와 맞물려 우리나라의 경우, 채굴기계류(감속기, 가스압축기, 굴삭기)의 수출증대, 강재, 강관, 자동밸브의 수요 증가, LNG선 발주 확대 및 부유식 LNG 처리 장치의 수요 증대, 보냉제 수요 증대, 가스화학 설비의 투자 증가, 가스 연료 자동차의 대중화에 따른 파급효과가 예상된다(Sin and Bak, 2012).

3. 셰일가스 학술정보 분석

3.1. 개요

셰일가스개발 기술은 오일셰일과 가스하이드레이트 개발, 육상 및 해양 지하탄층가스화(UCG), CO₂지중저장 등에 응용될 수 있으며 그 범위는 더욱 확대 될 것이기 때문에 셰일가스 기술개발과 해외 논문에 대한 동향분석은 그 중요성이 다대하다.

본 분석에는 Web of Science(Thomson Reuters) 데이터베이스를 사용하였으며, 해당 기술 분야의 논문 검색 키워드는 셰일가스(shale gas), 수평시추(horizontal drilling), 방향시추(directional drilling), 수압파쇄(hydraulic fracturing), 시추이수(drilling mud), 시추이수 첨가제(mud additive)이다.

검색식은 # 1 2,147 (TI=(shal* near (gas or oil))) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=모든 범위, # 2 307 (TI=((horizontal or directional) near drill*)) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=모든

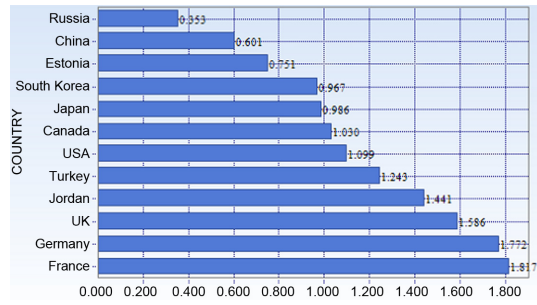
범위, # 3 716 (TI=(hydraulic near fractur*)) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=모든 범위, # 4 295 (TI=(drill* near mud)) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=모든 범위, # 5 29 (TI=(mud near additiv*)) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=모든 범위, # 6 3,469 (#5 OR #4 OR #3 OR #2 OR #1) AND 문서 유형=(Article) 데이터베이스=SCI-EXPANDED 기간=모든 범위이다.

검색 연도는 1986년~2013년 상반기로 제한하여 검색된 총 논문수는 3,468편이다. 1986년부터 2006년까지는 연 100편 내외의 논문수가 2007년부터 130편을 상회하여 매년 증가세를 보여 2012년에는 275편을 기록하였다.

3.2. 국가별 분석

셰일가스 관련 논문의 저자 국적을 분석한 결과 세계적으로 89개 국가에서 관련 연구가 수행되는 것으로 나타났고 이들 국가 중 미국이 637편의 논문을 발표하여 전체 3,468편의 논문 중 18.37%를 점유하며 가장 많은 논문을 발표한 것으로 나타났다. 에스토니아는 293편 (8.45%), 중국은 278편 (8.02%)의 논문을 발표하여 각각 2,3위를 차지하였으며 한국은 21편 (0.61%)의 논문을 발표하여 23위를 차지하였다.

국가별 논문의 수준 지수 분석 결과 프랑스가 가장 높은 값(1.817)을 보여 논문의 피인용 관점에서 질적 수준이 가장 우수한 것으로 나타났다. 순위별로 분야 평균 이상의 수준을 보이는 국가는 France(1.817), Germany(1.772), UK(1.586), Jordan(1.441), Turkey



Source : Web of Science

Fig. 1. The index level of country for papers in shale gas.

(1.243), USA(1.099), Canada(1.03) 등 이다. 표의 국가들 중 순위별로 한국의 수준 지수는 0.967을 기록하였으며, 이는 한국의 질적 수준이 세계 평균 이하로 나타났다(Table 2, Fig. 1).

셰일가스 분야의 국제 공동연구 현황을 분석한 결과 미국이 자국을 제외한 41개 국가와 공동연구를 수행하여 가장 넓은 국제네트워크를 형성하고 있는 것으로 나타났으며 한국의 경우 6개 국가와 공동연구를 수행하였으며 주요 국제공동연구 대상 국가로는 USA, Japan, China 등이 있다.

3.3. 기관별 분석

셰일가스 관련 논문의 저자 소속기관을 분석한 결과 세계적으로 1,813개 기관에서 관련 연구가 수행되는 것으로 나타났다.

이들 기관 중 Tallinn Univ Technol가 100편의 논문을 발표하여 전체 3,468편의 논문 중 2.88%를 점유하며 가장 많은 논문을 발표한 것으로 나타났다

Table 2. The index level of country for papers in shale gas

Country	*Number	**Citations	Index level
France	120	11	1.817
Germany	126	10.73	1.772
UK	166	9.602	1.586
Jordan	94	8.723	1.441
Turkey	101	7.525	1.243
USA	637	6.653	1.099
Canada	171	6.234	1.03
Japan	66	5.97	0.986
South Korea	21	5.857	0.967
Estonia	293	4.549	0.751
China	278	3.637	0.601
Russia	115	2.139	0.353

*Number: Number of papers.

**Citations: Number of citations per paper.

Table 3. The ranking major institute for papers in shale gas

Rank	Institute	*N	Weight(%)
1	Tallinn Univ Technol	100	2.88
2	Tallinn Tech Univ	84	2.42
3	Russian Acad Sci	62	1.79
4	Univ Tartu	52	1.5
5	Middle E Tech Univ	34	0.98
6	US Geol Survey	28	0.81
6	China Univ Petr	28	0.81
8	Univ Calgary	27	0.78
9	Chinese Acad Sci	26	0.75
9	CSIRO	26	0.75

*N: number of papers.

Table 4. The papers citation and index level of Institute

Institute	*N	**Citations	index level
US Geol Survey	28	14.679	2.424
CSIRO	26	10.846	1.791
Middle E Tech Univ	34	10.706	1.768
Univ Tartu	52	6.462	1.067
Univ Calgary	27	4.407	0.728
Tallinn Tech Univ	84	4.143	0.684
Tallinn Univ Technol	100	3.46	0.571
Chinese Acad Sci	26	3.423	0.565
Russian Acad Sci	62	2.387	0.394
China Univ Petr	28	0.821	0.136

*N: number of papers.

**Citations: Number of citations per paper.

(Table 3). 2위인 Tallinn Tech Univ는 84편 (2.42%)으로 1, 2위가 같은 대학이다. Russian Acad Sci는 62편 (1.79%)의 논문을 발표하여 3위를 차지하였다. 기관의 연도별 논문 수는 1997년 이후 급증하는 추세를 보인다.

해당 기술의 기관별 수준 분석 결과 US Geol Survey(이)가 가장 높은 값(2.424)을 보여 논문의 피인용 관점에서 질적 수준이 가장 우수한 것으로 나타났다(Table 4).

분야 평균 이상의 수준을 보이는 기관으로는 US Geol Survey(2.424), CSIRO(1.791), Middle E Tech Univ(1.768), Univ Tartu(1.067) 등 이다. 기관별 국제협력강도 분석 결과, US Geol Survey(4.372)의 국제협력강도가 가장 높은 것으로 나타났다. 분야 평균 이상의 수준을 보이는 기관으로는 US Geol Survey

Table 5. The index and strength of international collaboration of major institute in shale gas

Institute	*N	**Index	***Strength
US Geol Survey	28	0.643	4.372
Middle E Tech Univ	34	0.529	3.597
Chinese Acad Sci	26	0.346	2.353
CSIRO	26	0.269	1.829
Univ Calgary	27	0.259	1.761
Univ Tartu	52	0.192	1.306
Russian Acad Sci	62	0.177	1.204
Tallinn Univ Technol	100	0.14	0.952
Tallinn Tech Univ	84	0.083	0.564
China Univ Petr	28	0.071	0.483

*N: number of papers.

**Index: The index of international collaboration.

***Strength: The strength of international collaboration.

Table 6. Q-L Q-L distribution for the selection of main institute

Institute	*N	CPP	Q	S	L
Tallinn Univ Technol	100	3.46	0.571	0.14	0.952
Tallinn Tech Univ	84	4.143	0.684	0.083	0.564
Russian Acad Sci	62	2.387	0.394	0.177	1.204
Univ Tartu	52	6.462	1.067	0.192	1.306
Middle E Tech Univ	34	10.706	1.768	0.529	3.597
US Geol Survey	28	14.679	2.424	0.643	4.372
China Univ Petr	28	0.821	0.136	0.071	0.483
Univ Calgary	27	4.407	0.728	0.259	1.761
CSIRO	26	10.846	1.791	0.269	1.829
Chinese Acad Sci	26	3.423	0.565	0.346	2.353

*N: number of papers.

(4.372), Middle E Tech Univ(3.597), Chinese Acad Sci(2.353), CSIRO(1.829), Univ Calgary(1.761), Univ Tartu(1.306), Russian Acad Sci(1.204) 등 이다(Table 5).

핵심 기관 선정은 수준분석(Q) 및 국제협력강도(L) 분석 결과를 통해 이루어졌으며 연구자별 수준지수(Q) 및 국제협력강도(L)는 Q=L=1을 기준으로 네 개의 구역(I-IV)으로 구분할 수 있다(Table 6).

3.4. 저자별 분석

저자별 수준 분석 결과, 분야 평균 이상의 수준을 보이는 저자로는 Kok, MV(2.454), Jaber, JO(1.99), Kuusik, R(1.372), Han, XX(1.156), Arro, H(1.123), Jiang, XM(1.119) 등 이다. 저자별 국제협력강도 분석 결과, Jaber, JO(2.591)의 국제협력강도가 가장 높은 것으로 나타났고 분야 평균 이상의 수준을 보이는 저자로는 Jaber, JO(2.591), Kok, MV(1.618), Kuusik, R(1.17) 등 이다(Table 7).

Table 7. The papers and level index(Q) by author

Author	*N	CPP	Q
Kok, MV	21	14.857	2.454
Jaber, JO	21	12.048	1.99
Kuusik, R	29	8.31	1.372
Han, XX	21	7	1.156
Arro, H	20	6.8	1.123
Jiang, XM	22	6.773	1.119
Pihu, T	20	5.55	0.917
Luik, H	19	3.368	0.556
Tiikma, L	21	2.238	0.37
[Anonymous]	61	0	0

*N: number of papers.

Table 8. The index and strength of international collaboration of author in shale gas

Author	*N	**Index	***Strength
Jaber, JO	21	0.381	2.591
Kok, MV	21	0.238	1.618
Kuusik, R	29	0.172	1.17
Luik, H	19	0.105	0.714
Pihu, T	20	0.1	0.68
Tiikma, L	21	0.095	0.646
Arro, H	20	0.05	0.34
[Anonymous]	61	0	0
Han, XX	21	0	0
Jiang, XM	22	0	0

*N: number of papers.
 **Index: The index of international collaboration.
 ***Strength: The strength of international collaboration.

Table 9. Q-L distribution for the selection of the main authors

Author	*N	CPP	Q	S	L
[Anonymous]	61	0	0	0	0
Kuusik, R	29	8.31	1.372	0.172	1.17
Jiang, XM	22	6.773	1.119	0	0
Tiikma, L	21	2.238	0.37	0.095	0.646
Kok, MV	21	14.857	2.454	0.238	1.618
Jaber, JO	21	12.048	1.99	0.381	2.591
Han, XX	21	7	1.156	0	0
Pihu, T	20	5.55	0.917	0.1	0.68
Arro, H	20	6.8	1.123	0.05	0.34
Luik, H	19	3.368	0.556	0.105	0.714

*N: number of papers.

핵심연구자 선정은 수준분석(Q) 및 국제협력강도(L) 분석 결과를 통해 이루어 졌으며 연구자별 수준지수(Q) 및 국제협력강도(L)는 Q=L=1을 기준으로 네 개의 구역(I-IV)으로 구분할 수 있다(Table 8, Table 9).

3.5. 고 피인용 논문 분석

셰일가스 기술에 속하는 논문 3,468편(1986-2013년 상반기 출판된 논문) 중 적어도 1회 이상 인용된 논문 수는 2,274편(65.57%)이며 셰일가스 기술에 속하는 논문 중 피인용수가 100이상인 논문은 9편으로 나타났으며 주로 지구과학, 지구화학, 수리지질학 관련지에 게재되었다.

4. 결 언

셰일가스는 수평시추기술과 수압파쇄법의 개발로 상

업적인 생산이 이루어지면서 에너지 시장의 판도를 바꾸고 있다. 셰일가스는 세계 가체매장량이 187.5조 m³로서 전통가스의 확인매장량인 187.1조 m³과 비슷한 수준으로 향후 인류가 59년간 사용가능한 매장량이지만, 전 세계적으로 고르게 분포되어 있어서 매장량은 더욱 증가할 수 있다.

셰일가스 생산은 미국에 이어 캐나다, 중국으로 확산되고 있으며 여기에 셰일가스 붐을 단기적인 것으로 평가 절하했던 러시아가 2013년 초부터 셰일가스개발을 본격화 하고 있는 등 여러 나라에서 관심이 고조되어 미래의 주요 에너지원으로서의 위치가 확실히 되고 있다.

셰일가스 개발은 퇴적분지 내의 가스 생성/집적이 가능한 셰일층의 유무와 가스부존 유망지점을 규명하고 평가한다. 이어 가스 부존 유망 셰일층을 대상으로 유기지화학적, 암석역학적, 퇴적학적, 암석물리적 특성을 파악하고, 생산예측 시뮬레이션, 생산시험 자료를 이용한 압력감퇴곡선 분석 등을 바탕으로 생산성을 파악한다. 다음 단계에서는 개발/생산을 위한 시추, 완결, 자극을 수행한다.

셰일가스 개발 확대를 위해서는 환경오염 등 사회적 리스크 완화 노력이 필수적이다. 셰일가스는 생산과정에서 수압파쇄 화학물질로 인한 수질오염, 다량의 용수사용으로 인한 수자원 고갈, 가스방출로 인한 온실가스 증가, 지진 야기와 같은 환경문제를 풀어야 하는 숙제를 안고 있다. 우려되는 환경영향에도 셰일가스 생산이 확대될 것으로 예상되기 때문에 셰일가스개발 반대 여론과 사회적 우려를 극복하기 위해서는 개선된 파쇄공법, 수처리 기술, 무독성 첨가제개발 등 환경영향을 완화하는 관련 기술 및 장비개발이 필요할 것이다.

셰일가스개발 기술은 오일셰일과 가스하이드레이트 개발, UCG, CO₂지중저장 등 범위가 확대 될 것이기 때문에 관련 논문분석의 중요성이 다대하다. 이에 따라 세계적으로 셰일가스개발에 대한 학술논문도 증가하고 논문분석의 중요성이 다대하다. 검색된 논문(1986년~2013년 상반기)은 3,468편으로 최근 증가추세를 보이고 있다. 셰일가스를 연구를 하는 89개 국가 중 미국이 637편의 논문으로 1위를 기록했다. 세계적인 1,813개 기관에서 연구가 수행되고 있고 기관별 수준 분석 결과 미 지질조사소가 질적 수준과 국제협력강도 분석에서 가장 높은 것으로 나타났다.

세계적인 셰일가스 확대에 따라 국내 정책적으로는 에너지원 중 가스비중을 확대하고 가스하이드레이트 채굴기술, CO₂의 부가가치 이용 및 지중저장 기술과 연

계한 셰일가스 탐사에서 평가까지 전 과정에 대한 전문 인력양성이 시급하며 국내 기업이 해외 셰일가스개발 참여를 통하여 자주개발률을 높이기 위하여 개발기술 및 환경기술동향과 학술논문 분석에 대하여 지속적인 모니터링이 이루어져야 할 것이다.

사 사

이 글(Review article)은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 수행하고 있는 미래창조과학부의 과학기술진흥기금과 복권기금 사업인 ‘고경력 과학기술인을 활용한 지원사업(ReSEAT Program)’의 일부이다. 심사과정에서 미비점을 꼼꼼하게 지적, 보완하여 준 교열자에게 깊이 감사드린다.

참고문헌

- An, H.Y., *et al.* (2013) The domestic industry impact of the shale gas and oil sands development, Hana Institute of Finance, p.3-4.
- Bae, S.G. (2012) Shale gas, is the new alternative to fossil fuel era?, Issue Report v.21, SUSTINVEST. p.3-5.
- Baek, M.S. (2011) Unconventional Gas Resources & KOGAS" Projects, J. Kor. Soc. Geo-system Eng., v.48, n.4, p.542-538.
- ChosunBiz (2013) "Shale Gas Shock" Korea's shipbuilding and steel industry has the opportunity. <http://blog.chosun.com/blog.log.view.screen?blogId=28533&logId=6985256>
- Global Energy Cooperation Center (2012) Global shale gas developments(- The developments and prospects of major countries's shale gas -), p.5-6.
- Guo, B., *et al.* (2007) "Petroleum production engineering: A computer-assisted approach", Gulf Professional Publishing, Oxford, U.K., p.17-252.
- Han, H.J., *et al.* (2013) Environmental issues for the hydraulic fracturing applied in the process of the shale gas development, Econ. Environ. Geol., v.46, n.1, p.63-69.
- Jeong, Y.G. (2012) Shale gas will bring three big changes, SERI Management Notes, n.143, p.1.
- Kim, Y.I. (2013) Unconventional natural Gas, shale gas, development trend, The Conference of The Society of Mineral and Energy Resources Engineers, p.345.
- Ko, J.H. (2007) Barnett Shale Gas System in the Fort Worth Basin, Texas, U. S. A., J. Kor. Soc. Geo-system Eng., v.44, n.5, p.455-473.
- Lee, G.S. (2012) Shale Gas Technology Trends and Policy Implications, National Research Foundation of Korea, p.5, 20.
- Lee, K.Y., *et al.* (2012) Major national trends and implications of shale gas development, World Economy Update, v.12, n.11, Korea Institute for International Economic Policy, p.3-15.
- Shin, C.H., *et al.* (2012) "A classification and a survey on the core technology for shale gas development", J. Kor. Soc. Geo-system Eng., v.49, n.3, p.395-410.
- Sin, Y.S. and Bak, G.S. (2012) Shale gas development boom impact on Korean industries, e-KiET industry economic information, n.540, p.5-12.
- USDOE (2010) Modern shale gas: development in the United States-A Primer, in: Nash, K. M, (Ed), Shale Gas Development, p.174.
- Yu, Y.S. (2013) Shale gas, a breakthrough to overcome the global economic slow growth, Gyeonggi Research Institute, p.13-15.

2014년 2월 16일 원고접수, 2014년 3월 23일 1차수정, 2014년 4월 10일 게재승인