

셰일가스 생산에 관한 연구개발 현황[§]

한방우^{*†} · 김학준^{*} · 김용진^{*} · 김한석^{*}

* 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

Current R&Ds Status for Shale Gas Extraction

Bangwoo Han^{*†}, Hak-Joon Kim^{*}, Yong-Jin Kim^{*} and Han-Seok Kim^{*}

* Environmental & Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received May 29, 2013 ; Revised June 6, 2013 ; Accepted June 6, 2013)

Key Words: Horizontal Drilling(수평시추), Hydraulic Fracturing(수압파쇄), Fracturing Fluid(파쇄유체)
Produced Water Treatment(생산수 처리), Mobile(이동형)

초록: 에너지 소비량 증가 및 고유가로 인한 에너지 자원 수급의 불안정 상황에서 새로운 차세대 에너지 지원으로 셰일가스가 관심을 받고 있다. 셰일가스는 풍부한 매장량과 고른 지역적 분포로 인해 기존의 에너지 역학 구도까지 바꿀 것으로 기대되고 있다. 셰일가스의 개발과정은 시추와 파쇄 및 생산의 과정으로 이루어지는데 이러한 셰일가스 개발과정에서 요구되는 수평시추, 수압파쇄 등의 핵심 기술과 개발 과정에 발생하는 환경 이슈문제, 그리고 이를 해결하기 위한 추가 요구 기술과 현재의 연구 진행 현황 등을 살펴보고자 한다.

Abstract: Shale gas is in the limelight as one of the new energy sources under the circumstances of unstable energy supply and high energy consumption. It is expected to change dynamics of global energy markets due to its abundant resources and global distribution. Shale gas extraction process consists of drilling, fracturing and production. We have surveyed the technologies required for shale gas developments such as a horizontal drilling, a hydraulic fracturing and so on, the environmental issues occurred during the development, the additional technologies to solve the environmental problems and the current research and developments status.

1. 서론

셰일가스는 깊이 1-5 km 이하의 지하 퇴적암층(셰일층)내에 매립된 천연가스로서 근원암(source rock)에서 생성된 가스가 낮은 투과율(<0.1 millidarcies)로 인해 저류암(reservoir rock)으로 이동하지 못하고 근원암에 갇혀있는 가스를 지칭하고 있다. 화학조성은 메탄 70-90%, 에탄 5%, 콘덴세이트 5-25% 정도로 전통가스와 동일하나 셰일층에 높은 열과 압력을 가해 추출해야 하기 때문에 치밀가스(tight gas), 석탄층 메탄가스(coal bed methane) 등과 함께 비전통가스(unconventional gas)로 분류되고 있다.⁽¹⁾ 셰일가스가 현재 크게 각광을 받고 있는 이유는 확인매장량이 기존 전통가스 매장량과 유사한 수준인 187.5 조m³으로 전 세계가 59년간 사용가능한 양이 존재하고, 잠재매장량은 약 635조 m³으로 전 세계가 약 200년간 사용가능하다고 보고가 되고 있기 때문이다.⁽²⁾ 또한 러시아나 중동 지역에 집중되어 있는 기존의 전통가스와는 달리 미국, 중국, 남미, 유럽 등 전세계에 고르게 매장되어 있어 에너지 수급 관계에 큰 변화를 줄 수 있는 것도 이슈화 되고 있는 이유 중 하나이다.

셰일가스는 그동안 채굴비용이 높아 경제성이 없는 자원으로 분류되었으나 채굴기술(수평시추와 수압파쇄)의 발달로 인해 대량 생산이 가능해지고 경제성을 확보하면서 미국과 캐나다를 중심으로 개발이 활발하게 진행되고 있다.⁽³⁾ 미국은 2008년 7월에서 2013년 1월에 이르기까지 약 75%의 천연가스 비용이

§ 이 논문은 대한기계학회 플랜트부문 2013년도 춘계학술강연회(2013. 6. 4.-5., 한국수자원공사 교육원) 발표논문임

† Corresponding Author, bhan@kimm.re.kr

하락하였고, 2000년 기준으로 미국의 가스생산량의 1%이었던 셰일가스 비중이 2010년에는 약 23%를 차지하고 있고, 향후 2035년에는 약 46%까지 높아질 것으로 전망하고 있다.

셰일가스의 개발은 가스산업, 석유화학산업, 발전, 철강, 자동차 등 관련 산업에 매우 큰 영향을 줄 것으로 보인다.⁽⁴⁾ 미국을 중심으로 가스배관이나 수송설비의 투자가 급격히 늘어나고 있고 석유화학산업에서도 기존의 석유 기반의 납사 원료가 아닌 저렴한 가스 기반의 에탄 원료를 이용한 생산설비가 건설되고 있다.⁽⁵⁾ 우리나라의 경우도 이미 건설기계 부품, 보일러, 펌프, 압축기 및 밸브류 등 셰일가스 생산 장비 및 플랜트 기자재의 일부 품목에 대해 대미 수출이 증가하고 있다.

본 논문에서는 이러한 셰일가스 개발에 따른 경제적, 산업적 변화보다는 셰일가스 시추 및 생산기술과 관련된 이슈사항과 이와 관련된 최근 연구동향에 대해 중점으로 살펴보기로 한다.

2. 셰일가스의 시추, 파쇄 및 생산 프로세스

셰일가스의 생산과정은 Fig. 1과 같이 크게 시추(drilling), 파쇄(fracturing or fracking), 생산(production)의 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저 시추를 하기 전에 셰일층의 위치와 매장량 분석, 경제성 여부 등을 판단하는 지질학적 탐사, 지질모델링 및 파일럿 테스트를 수행한다. 지질학적 분석이 끝나면 시추를 수행하기 위한 유정 패드(pad)를 건설하고 시추 리그(rig)를 현장에 설치한다. 셰일층은 주로 지표면에서 1-5 km 지하에 수백 km²의 면적으로 10-200 m 정도의 얇은 층을 이루고 있어 시추는 수직시추(vertical drilling) 보다는 수평시추(horizontal drilling)를 적용한다. 수평시추는 채굴파이프를 수직방향으로 암석층을 관통시킨 뒤 셰일층에서 수평으로 주입하는 기술로서 지상의 개발면적을 최소화하면서 가스전의 표면적을 최대화시킬 수 있는 기술이다. 수평시추는 1929년에 처음으로 시도되었으나 1980년대에서야 일반적으로 적용되기 시작하였다. 보통 약 1-2 km 정도로 수평구간으로 시추를 진행하였으나 최근에는 보다 많은 셰일가스를 생산하기 위해 3 km 이상 까지도 진행하기 시작하였다.

수압파쇄는 약 90%의 물과 약 9%의 프로판트(proppant), 약 1%의 화학약품을 섞어 만든 파쇄유체(fracturing fluid)를 500-1000 bar의 고압으로 주입하여 투과율이 낮은 셰일층에 균열을 일으키는 기술이다. 프로판트는 수압파쇄로 발생시킨 가스 이동경로를 다시 닫히지 않도록 지지하기 위해 첨가하는 것으로서 주로 모래를 사용한다. 화학약품은 광물질 용해, 부식방지, 점성유지 등을 위해 첨가하는 첨가제들의 혼합물로서 개발 업체 및 사용 현장 지층에 따라 다양한 혼합 비율로 적용되고 있다. 수압파쇄는

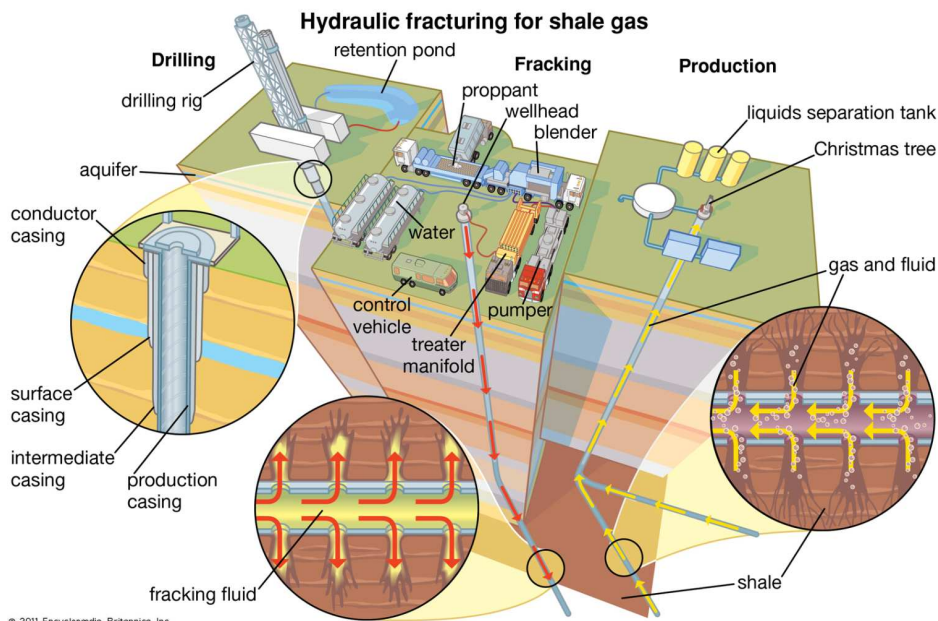


Fig. 1 Shale gas drilling, fracking and production processes (source: Encyclopedia Britannica, Inc.)

1947년부터 오일과 가스의 생산 증진을 위해 시도되기 시작한 기술로서 1980대 초에 오일 생산을 위해 실제 적용되었고 1990년대에 미국의 Mitchell Energy에서 Barnett shale에서 상업생산을 개시한 이래로 2005년부터 Marcellus Shale에서 본격적으로 적용되기 시작되었다. 수압파쇄 공정에는 고압 프랙처프, 혼합프, 모래 저장탱크, 화학약품 저장탱크, 혼합 파쇄유체 탱크, 데이터 모니터링 장치가 설치된 다양한 트럭들이 패드에 설치되어 운용된다.

생산(production) 공정은 수압파쇄 이후 유정에서 배출되는 천연가스를 물, 오일 등과 분리한 뒤 압축기를 이용하여 중앙처리설비로 이송시키고 오일과 생산수는 처리나 수송을 위해 저장탱크에 저장시키는 기능을 한다. 여러 개의 패드(pad)에서 모아진 가스는 중앙처리설비에서 수분 분리를 위한 탈수공정(dehydration), CO₂와 H₂S 분리를 위한 스위트닝(sweetening) 공정, 질소 및 NGLs(natural gas liquids)의 분리를 위한 극저온 플랜트 공정을 거친 뒤 배관을 통해 가스 공급지로 배송된다. 수처리는 현장 상황에 따라 이동형 장치로 패드 현장에서 직접처리하거나 트럭으로 중앙처리설비로 수송하여 모아서 처리한다.⁽⁶⁾

3. 세일가스 기술개발 이슈

세일가스를 개발함에 있어 가장 문제가 되고 있는 것은 개발 지역 주변의 수질 오염 문제이다.⁽⁷⁾ 수압 파쇄 할 때 주입된 물은 약 10-40%가 다시 지표로 배출되는데 이를 환류수(flowback water)라고 한다. 환류수에는 수압파쇄 때 사용된 화학물질과 함께 지하로부터의 용존 고형물이 포함되어 있다. 천연가스와 함께 유정의 생산 기간 동안 표면으로 조금씩 배출되는 물이 생산수(produced water)이며 환류수와 생산수를 잘못 처분하면 지표면에서 누설되어 지층수와 토양을 오염시킬 수 있다. 또한 유정의 완벽한 기밀 실패로 파쇄유체가 대수층(aquifer)으로 유입되거나 메탄 가스가 지하수로 유입되어 음용수를 오염시킬 수도 있다. 이러한 환경문제로 프랑스, 불가리아, 남아공 등의 나라들은 수압파쇄를 통한 세일가스 생산을 반대하고 있는 입장이다. 미국에서는 8개 주에 대해 수압파쇄 화학물질을 온라인에 공개하도록 요구하고 있고⁽⁸⁾ 나머지 주에서도 대부분의 회사가 자발적으로 각자 사용하는 화학물질을 공개하고 있다. 그럼에도 불구하고 아직도 많은 화학물질이 미국의 안전 음용수 법령(U.S. Safe Drinking Water Act)으로 규제되지 못하고 있다. 또한 수압파쇄할 때 유정당 4,000-30,000 톤의 물이 사용되므로 수자원이 부족한 지역에서는 세일가스를 개발하는데 어려움이 존재하고 있고, 세일가스를 개발할 때 발생하는 메탄의 누출 문제, 수압파쇄로 인한 지진 발생 등도 세일가스 개발의 장애의 원인이 되고 있다.⁽⁹⁾

따라서 앞으로 세일가스 관련 연구개발의 핵심 이슈는 수자원 관리, 메탄 배출 억제 등을 포함한 친환경 생산 공정 기술의 개발이 될 것이다. 이를 위한 다양한 연구가 진행되고 있고 다음 절의 연구개발 현황에서 다루고자 한다.

4. 요구기술 및 관련 연구개발 현황

시추공을 설치할 때 지하 100-400 m 정도에 위치한 지하수(aquifer)의 오염 방지를 위한 케이싱(casing) 설치가 매우 중요하다. 지하수 보호를 위해 3중, 4중의 케이싱(conductor casing, surface casing, intermediate casing, production casing 등)을 적용하고 있다. 시멘트로 유정의 기밀성을 확보하기 위해서는 적절한 시멘트 설계 기술 및 머드 제어 기술이 중요하다.⁽¹⁰⁾ 시멘트의 정수압이 지하의 가스 압력보다 낮으면 시멘트가 굳기 전에 가스가 시멘트로 침투될 수 있고 반대로 정수압이 너무 높으면 케이싱이 파손되어 시멘트의 손실이 발생할 수 있다. 또한 시추 머드를 시추공에서 적절히 제어하지 않으면 잔류한 머드가 가스 이동 채널로 작용하여 외부의 가스를 시추공 내로 이동시키는 역할을 할 수도 있다.

세일층의 탐사와 시추 시 방향 제어를 위한 물리검층 기술인 MWD (measurements while drilling)와 LWD (logging while drilling) 기술이 매우 중요하다. MWD는 시추하면서 방향 제어를 위한 방향과 각도 등을 측정하는 기술이고 LWD는 지층 구조를 파악하기 위해 자연감마, 공극률, 전기비저항 등의 물성치를 측정하는 기술이다. MWD 및 LWD 기술은 일반적인 오일이나 가스탐사, 광물탐사, 지하수탐사, 지질 공학적 및 환경탐사 등 다양한 목적으로 적용되어 왔지만 세일층의 정확한 특성분석에 근거하여 시추

위치, 시추 깊이 및 경로를 선정하는 매우 중요한 기술이 되고 있다. 또한 수압파쇄 수행 후 세일층의 미세균열 분포를 파악하기 위해 미세지진 발생위치를 실시간으로 모니터링하는 미세지진(microseismic) 탐사기술도 중요한 기술이다.⁽¹¹⁾

수압파쇄에서는 최소한의 유정을 배치하면서 길이에 따라 일정한 간격으로 단계적으로 균열을 일으켜 세일층 내의 전체 면적에 대해 균일하게 균열 패턴을 형성시켜야 하므로 최적의 유정 간격과 파쇄 부피를 결정하는 패드(pad) 최적화 설계 기술이 매우 중요하다.⁽¹²⁾ 또한 패드 단위로 세일가스 개발운영 모델을 최적화하고 표준화하여 비용 절감과 효율성을 극대화하고자 하는 연구도 진행되고 있다.⁽¹³⁾

한편 수자원 과다 사용문제를 해결하기 위해 파쇄 공정에서 물 사용량을 줄이거나 물을 전혀 사용하지 않는 공법 연구가 많이 진행되고 있다. 수압파쇄의 대안 기술로는 1980대부터 시도되었던 기체상의 질소를 사용하는 nitrogen fracturing,⁽¹⁴⁾ 액체 이산화탄소를 사용하는 liquid CO₂ fracturing,⁽¹⁵⁾ 질소나 이산화탄소 거품을 물과 함께 사용하는 foam fracturing⁽¹⁶⁾ 기술들이 다시 재조명 받고 있고, 최근 들어 Gasfrac사에서 LPG를 사용하는 LPG fracturing,⁽¹⁷⁾ 프랑스 Pau 대학, 미국 Texas Tech 대학 등에서 연구 중인 강력한 전기에너지로 균열을 일으키는 electric pulse fracturing이나 plasma fracturing⁽¹⁸⁾ 등도 있다. 한편 친환경적인 파쇄유체 개발을 통한 수압파쇄의 환경 오염문제를 극복하려는 연구도 진행되고 있다. Halliburton사에서는 음식물에서 얻은 성분만으로 새로운 파쇄유체를 개발하여 Haynesville Shale에서 사례 연구를 진행하였고⁽¹⁹⁾ Chesapeake Energy사에서는 기존의 화학 첨가제의 약 75%를 줄이고 친환경 첨가제로 대체하는 프로젝트를 Barnett Shale 등의 5개 지역에서 적용하는 연구를 진행하였다.⁽²⁰⁾

독성의 화학약품을 포함한 파쇄유체가 지하의 용존 고형물질과 함께 회수되어 나오는 환류수와 생산수의 처리를 위한 물 관리 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 미국 DOE에서는 오일과 가스 생산 중에 발생하는 생산수의 처리를 위한 다양한 과제를 Table 1과 같이 진행하고 있고 최근 종료된 과제도 32개나 된다.⁽²¹⁾ 이는 오일 및 가스의 생산수 물관리 분야가 미국에서도 가장 활발히 진행 중인 연구 분야임을 보여주고 있다. 이러한 이유로 향후 40-50년 이후에 세일가스 수처리 시장이 100조를 넘을 것으로 추정되기도 한다.⁽²²⁾ 현재 이러한 생산수를 처리하는 방법으로 가장 활발하게 진행하고 있는 것은 이를 다시 지하로 주입하는 방법이지만 처리비용이 높고 주입할 수 있는 용량이나 적용 위치에 한계가 있다.⁽⁷⁾ 다른 방법은 이를 다시 파쇄유체로 활용하는 것이다.⁽²³⁾ 이를 위해서는 오일과 폴리머 첨

Table 1 Current produced water management projects supported by Department of Energy (DOE)⁽²¹⁾

Project name	Primary performer
Produced Water Treatment Catalog and Decision Tool	Arthur Langhus Layne LLC
Effects of Irrigating with Treated Oil and Gas Product Water on Crop Biomass and Soil Permeability	Western Research Institute
Water-Related Issues Affecting Conventional Oil and Gas Recovery and Potential Oil Shale Development in the Uinta Basin, Utah	Utah Geological Survey
Innovative Water Management Technology to Reduce Environmental Impacts of Produced Water	Clemson University
GIS and Web-Based Water Resource Geospatial Infrastructure for Oil Shale Development	Colorado School of Mines
Research and Development Concerning Coalbed Natural Gas—Congressional Mandate	University of Wyoming
Evaluation of Phytoremediation of Coal Bed Methane Produced Water and Water of Quality Similar to that Associated with Coalbed Methane Reserves of the Powder River Basin, Montana and Wyoming	Montana State University
Water & Waste Regulatory Analysis	Argonne National Laboratory
Hypoxia, Program Review, and Total Petroleum Hydrocarbon Workshop	Argonne National Laboratory
Managing Coal Bed Methane Produced Water for Beneficial Uses, Initially Using the San Juan and Raton Basins as a Model	Sandia National Laboratory



Fig. 2 Aquatech's mobile water treatment systems⁽³⁰⁾ : (a) pre-treatment, (b) thermal distillation

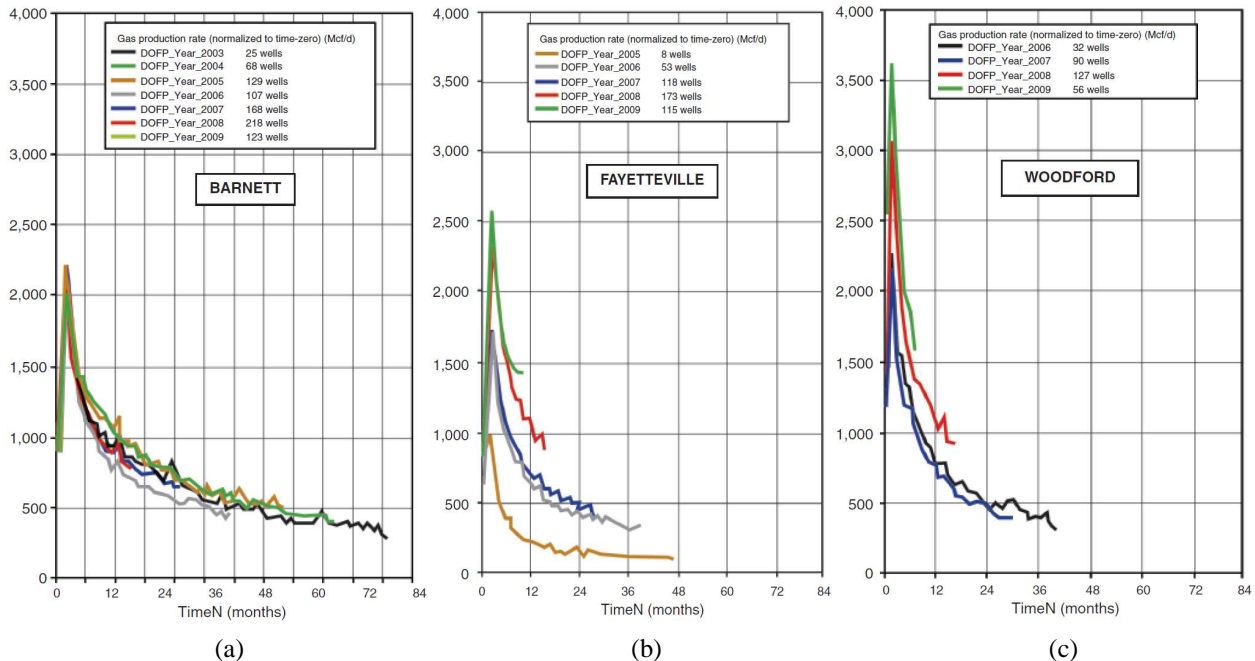


Fig. 3 Shale gas decline rates in the (a) Barnett, (b) Fayetteville and (c) Woodford.⁽³²⁾

가제, 스케일(scale) 형성 무기성분, 박테리아 등을 처리해야만 한다. Superior Well Services사에서는 환류수를 사용하여 친환경적인 파쇄유체를 개발한 사례를 보고하였다.⁽²⁴⁾ 마지막 방법은 방류(discharge)를 위해 앞에 언급한 불순물과 함께 총 용존 고형물질(total dissolved solid; TDS)까지 처리하는 방법으로 역삼투 멤브레인법(reverse osmosis membrane),⁽²⁵⁾ 증발법(evaporation),⁽²⁶⁾ 결정화법(crystallization)⁽²⁷⁾ 등의 대안으로 고려되고 있고 막증발법(membrane distillation)⁽²⁸⁾이나 정삼투 멤브레인법(forward osmosis membrane)⁽²⁹⁾도 연구되고 있으나 파울링(fouling)이나 처리비용 문제로 아직 극복해야할 문제가 많은 상황이다. 또한, 생산수의 성분은 셰일가스 생산 위치에 따라 차이가 많으므로 다양한 변수를 고려하여 현장에 적합한 처리 방법이 필요하고 Fig. 2와 같이 쉽게 이동이 가능한 컴팩트화 및 모듈화된 기술들이 개발되어야 한다.⁽³⁰⁾

모래는 강도가 낮고 크기가 불균일하며 수송 능력이 떨어지므로 모래를 대체하는 프로판트의 개발 연구도 활발하다. Preferred Sands사에서는 Dow사와 협력하여 전달력이 우수한 균일 크기의 고강도 레진 코팅 프로판트를 개발하였고, 텍사스 오스틴 대학에서도 밀도가 1에 가까워 전달력이 우수하면서도 강도가 높은 초경량 세라믹 프로판트를 개발하였다.⁽³¹⁾

셰일가스는 Fig. 3과 같이 주로 5년 이내에 전체 매장량의 90% 정도가 생산되므로⁽³²⁾ 채굴 후 쉽게 이동이 가능해야 하고 셰일가스가 매장된 지형 조건이 다양하여 접근성이 중요하므로 앞에 언급한 수처리 설비와 같이 이동성이 높으면서 효율이 우수한 콤팩트형의 모듈화된 처리설비가 요구되고 있다. 패드 현장에서 가스와 물, 오일의 분리는 M-I Swaco사에서와 같이 트레일러 탑재형 3상 중력 세퍼레이터가 주로 이용되고 있지만 최근에는 Mueller Environmental사, Scultz Process Servicest사 등 보다 이동성을 높이고 처리 속도를 높일 수 있는 원심 분리형 세퍼레이터를 개발하여 셰일가스 현장에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 또한 EPA에서는 natural gas STAR program을 마련하여 유정 마무리 (Well completion) 단계에서의 메탄 방출을 줄이기 위한 분리 프로세스를 개발하고 있고 이 프로그램을 통해 Devon사에서는 Sand trap, 3상 세퍼레이터 및 탱크로 구성된 이동형 분리 시스템을 개발하였다.⁽³³⁾ 현장 장비의 부식 문제를 해결하고 작업 현장의 오염원 노출 억제를 위해 황화합물을 Pad 현장에서 직접 처리하는 연구를 Baker Hughes 사에서 진행하고 있고,⁽³⁴⁾ CO₂ 대비 낮은 H₂S 비율을 갖는 셰일가스 특성에 맞는 스위트닝 (sweetening) 최적화 기술을 Optimized Gas Treating사, Merichem Company사 등에서 개발하고 있다.⁽³⁵⁾ UOP사에서는 셰일가스에서 CO₂, H₂S 및 수분을 동시에 단일공정으로 처리하는 연구개발을 진행하고 있다.⁽³⁶⁾

5. 결론

셰일가스 개발의 핵심기술은 수평시추와 수압파쇄 기술이지만 수압파쇄에서 필요한 과다 물사용과 생산수에 의한 환경문제를 극복하는 것이 글로벌한 보편적 셰일가스 생산 기술을 확보하기 위해 무엇보다 요구되고 있다. 이를 위해 물을 사용하지 않는 워터리스(waterless) 공법이나 친환경 첨가제, 고효율 프로판트 개발 등 친환경 파쇄기술 개발 연구가 활발하게 진행되고 있고, 물의 재사용 및 처분을 위한 수처리 기술도 매우 중요한 이슈 기술이 되고 있다. 한편 물-오일 분리장치, 스위트닝(sweetening) 등의 셰일가스의 처리장치는 현장 접근성과 이동성이 높은 콤팩트화 기술로 전환되어 현장 평가가 활발하게 진행 중이다.

셰일가스는 미국 이외의 지역에서는 전 세계적으로 기술 개발 역사가 짧고 특히 매장량이 가장 많은 중국의 경우 셰일가스를 포함한 비전통자원의 개발 착수를 공격적으로 시작하였으나 자체 개발 기술이 부재하고 수자원이 부족하여 아직까지 생산이 진행되지 않고 있는 상황이다. 따라서 우리나라도 이러한 셰일가스를 고부가가치를 창출할 수 있는 에너지 자원개발 산업분야에 본격적으로 진입하는 기회로 삼아 중국과 제3국에서의 개발 산업에 적극적으로 진입하는데 주력해야 할 것이다. 특히, 셰일가스 개발과 같은 보수적인 에너지 개발 시장에 진출하기 위해서는 국가 주도의 대규모의 R&D 투자와 함께 공정기술과 소재-기자재에 대한 성능과 신뢰성을 입증할 수 있고 사용실적(track record)을 확보할 수 있는 테스트베드(test-bed) 사업이 무엇보다도 필요하다. 또한 셰일가스의 가치사슬의 전주기적 접근을 위해서는 셰일가스 생산 기술 이외에도 LNG 액화 플랜트, LNG 수송선 등의 가스 수송기술과 가스로부터의 GTL(gas to liquid), DME(dimethyl ether), 올레핀 등의 고부가가치화 제조 기술, 가스엔진 선박, 발전용 가스터빈 등의 가스 활용기술까지 관련 기술의 경쟁력 확보를 위한 노력이 매우 필요하다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 자체사업(KM3050)의 지원으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Holditch, S., Perry, K. and Lee, J., 2007, "Unconventional Gas Reservoirs--Tight Gas, Coal Seams, and Shales, Working Document of the National Petroleum Council on Global Oil and Gas Study," National Petroleum Council.
- (2) Advanced Resources International Inc., 2011, "Economic and Market Impacts of Abundant International

- Shale Gas Resources."
- (3) U.S. Energy Information Administration, 2013, "Annual Energy Outlook 2013, Early Release."
 - (4) Lee, Y., 2012, "Development Trend and Prospect of Shale Gas," *Journal of the Korean Professional Engineers Association*, Vol. 45, No. 4, pp.30~34.
 - (5) Swift, T. K., 2012, "Looking for Growth in the Chemicals Industry," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 108, No. 1, pp. 12~15.
 - (6) Lobato, J., 2013, "Continuous Improvements in Produced Water Management," IDA Water Recycling and Desalination for Oil & Gas Industry, 12-14 May 2013, Banff, Alberta, Canada.
 - (7) Vidic, R. D., Brantley, S. L., Vandenbossche, J. M., Yoxtheimer, D. and Abad, J. D., 2013, "Impact of Shale Gas Development on Regional Water Quality," *Science*, Vol. 340, 1235009.
 - (8) www.FracFocus.org.
 - (9) Gorody, A. W., 2012, "Factors Affecting the Variability of Stray Gas Concentration and Composition in Groundwater," *Environmental Geosciences.*, Vol. 19, No. 1, pp. 17~31.
 - (10) Bonnett, A. and Pafitis, D., 1996, "Getting to the Root of Gas Migration," *Oilfield Review*, Vol. 8, No. 1, pp. 36~49.
 - (11) Warpinski, N., 2009, "Microseismic Monitoring: Inside and Out," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 61, No.11, pp. 80~85.
 - (12) Hanna, B., Ayoub, J. and Cooper, B., 1992, "Rewriting the Rules for High-Permeability Stimulation," *Oilfield Review*, Vol. 4, No. 4, pp. 18~23.
 - (13) Miskimins, J. L., 2008, "Design and Life Cycle Considerations for Unconventional Reservoir Wells," SPE Unconventional Reservoirs Conference, 10-12 February, Keystone, Colorado, USA.
 - (14) Lokhandwala, K.A., Jariwala, A., 2005, "Natural Gas Treatment Process for Stimulated Well," US Patent No. 7537641.
 - (15) Gupta, D.V.S., 2003, "Field Application of Unconventional Foam Technology: Extension of Liquid CO₂ Technology," SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 5-8 October.
 - (16) Edrisi, A. R. and Kam, S. I., 2012, "A New Foam Rheology Model for Shale-Gas Foam Fracturing Application," SPE Canadian Unconventional Resources Conference, 30 October-1 November 2012, Calgary, Alberta, Canada.
 - (17) LeBlanc, D., Martel, T., Graves, D., Tudor, E., Lestz, R., 2011, "Application of Propane (LPG) Based Hydraulic Fracturing in the McCully Gas Field, New Brunswick, Canada," North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, 14-16 June, The Woodlands, Texas, USA.
 - (18) Maurel, O., Reess, T., Matallah, M., Ferron, A. De, Chen, W., Borderie, C. La, Pijaudier-Cabot, G., Jacques, A., Rey-Bethbeder, F., 2010, "Cement and Concrete Research Electrohydraulic shock wave generation as a means to increase intrinsic permeability of mortar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 12, pp. 1631~1638.
 - (19) Holtsclaw, J., Loveless, D., Saini, R. and Fleming, J., 2011, "Environmentally Focused Crosslinked-Gel System Results in High Retained Proppant-Pack Conductivity," SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October - 2 November, Denver, Colorado.
 - (20) McCurdy, R., 2011, "High Rate Hydraulic Fracturing Additives in Non-Marcellus Unconventional Shales," EPA Hydraulic Fracturing Workshop 1, 24-25, February.
 - (21) http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/Petroleum/projects/Environmental/Environmental_TOC.htm.
 - (22) Global Water Intelligence, 2010, "Water Follows the Shale Trail," *GWI Magazine*, Vol. 11, Iss. 1. January.
 - (23) Rossenfoss, S., 2011 "From Flowback to Fracturing: Water Recycling Grows in the Marcellus Shale,"

- Journal of Petroleum Technology*, Vol. 63, No. 7, pp. 48~51.
- (24) Blauch, M. E., 2010, "Developing effective and environmentally suitable fracturing fluids using hydraulic fracturing flowback waters," SPE Unconventional Gas Conference, 23-25 February, Pittsburgh, Pennsylvania.
- (25) Çakmakcea, M., Kayaalp, N. and Koyuncu, I., 2008, "Desalination of produced water from oil production fields by membrane processes," *Desalination*, Vol. 222, No.1-3, pp. 176~186.
- (26) Veil JA (2008) Thermal Distillation Technology for Management of Produced Water and Frac Flowback Water. United States Department of Energy, Argonne National Laboratory Water Technology Brief #2008-1.
- (27) DiTommaso, F. A. and DiTommaso, P. N., 2012, "Method of Making Pure Salt From Frac-Water/Wastewater," US patent No. 8158097.
- (28) Koo, J. W., Han, J., Lee, S. and Hong, S., 2013, "A Feasibility Study on Shale Gas Plant Water Treatment by Direct Contact Membrane Distillation," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 16, No. 1, pp. 56~60.
- (29) Lampi, K., 2013, "Innovative FO Filtration and ZLD Technology for Oil & Gas Waters," IDA Water Recycling and Desalination for Oil & Gas Industry, 12-14 May 2013, Banff, Alberta, Canada.
- (30) Aquatech, 2013, "Shale Gas: Mobile Water Treatment Tackles New Oil and Gas," *Filtration+Separation*, Vol. 50, Iss. 2, pp. 24~25.
- (31) Gaurav, A., Dao E.K., Mohanty K.K., 2010, "Ultra-Lightweight Proppants for Shale Gas Fracturing," Tight Gas Completions Conference, 2-3 November, San Antonio, Texas, USA.
- (32) Baihly, J., Altman, R., Malpani, R. and Luo, F., 2010, "Shale Gas Production Decline Trend Comparison over Time and Basin," SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 19-22 September 2010, Florence, Italy.
- (33) O'Sullivan, F., Paltsev, S., 2012, "Shale Gas Production: Potential versus Actual Greenhouse Gas Emissions," *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 4, 044030.
- (34) Chaudhry, F., Mobley, G., Tsang, Y. H., Ramachandran, S., Jovancicevic, V. Braman, S. C. Rowton, E., McDonald, A. Davis, J. 2013, "Laboratory Development of a Novel Non-Triazine-based Hydrogen Sulfide Scavenger and Field Implementation in the Haynesville Shale," 2013 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 08-10 April, The Woodlands, TX, USA.
- (35) Weiland R. and Hatcher, N., 2011, "What Are the Benefits from Mass Transfer Rate-Based Simulation?," *Hydrocarbon Processing*, Vol. 90, Iss. 7, pp. 43~49.
- (36) UOP, 2010, "UOP Separex Membranes Remove Contaminants from Natural Gas," *Membrane Technology*, Vol. 2010, Iss. 9.