셰일가스 개발 시 적용되는 수압파쇄공법에 의한 환경문제

한협조¹ · 김경웅^{1*} · 나경원² · 박희원³ · 이진수⁴ · 심연식⁴

¹광주과학기술원 환경공학부, ²에코리서치그룹 (주), ³에너지홀딩스그룹 (주), ⁴광해관리공단 기술연구소

Environmental Issues for the Hydraulic Fracturing Applied in the Process of the Shale Gas Development

Hyeop-Jo Han¹, Kyoung-Woong Kim^{1*}, Kyung-Won Na², Hee-Won Park³, Jin-Soo Lee⁴ and Yon-Sik Shim⁴

¹School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

²Eco Research Group, Inc.

³Energy Holdings Group, Inc.

⁴Technology Research Center, Mine Reclamation Corporation

This paper discusses important environmental issues that must be considered during shale gas development. Shale gas has been attracting many attention as the next key energy resource with its large abundance through easily accessible production fields, and its lower carbon dioxide & sulfur dioxide emission profile upon combustion when compared to the conventional oil and natural gas resources. Successful development of a shale gas field requires the use of hydraulic fracturing to recover hydrocarbon through the very tight shale formation, which has been frequently associated with environmental contamination issue of water, soil, and atmosphere. Therefore, environmental issues and their solution to minimize environmental impact should be considered for successful development of shale play in a future.

Key words : shale gas, hydraulic fracturing, environmental issues, contamination pathway

본 연구에서는 최근 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 셰일가스 개발 과정 중 발생 가능한 환경문제에 대해 고찰하고자 하였다. 셰일가스는 개발 가능한 자원량 측면에서 매우 우수하며, 기존의 석유 및 석탄에 비해 이산화탄소 및 아황산가스 배출량도 적은 친환경적인 연료이다. 셰일가스가 부존하는 지층의 특성상 개발 과정 중 유체투과도를 높이는 수압파쇄공법 적용이 필수적이나, 이러한 기술 적용에 따라 수질, 토양, 대기 오염 등 다양한 환경문제의 발생이 예상된다. 셰일가스 개발에 따른 오염은 지상 및 함수층 주변에서 발생 가능하며, 따라서 셰일가스 개발은 환경적으로 위험 요소가 될 수 있다. 그러므로 셰일가스 개발 시 발생 가능한 환경문제에 대한 이해가 필요하며, 본 연구에서는 향후 수압파쇄공법에 의한 셰일가스 개발 시 발생할 수 있는 주요 환경 문제들을 정리하고, 이에 대한 해결 방안들을 제시하고자 하였다.

주요어 : 셰일가스, 수압파쇄, 환경문제, 오염경로

1. 서 론

셰일가스(shale gas)는 기존의 석유 및 석탄에 비하여 이산화탄소 및 아황산가스 배출량에 있어 친환경적이며, 개발 가능한 자원량 측면에서도 굉장히 매력적

인 자원이라고 할 수 있다(Holditch and Madani, 2010). 그러나 기존의 전통가스(conventional gas)에 비하여 낮은 공극률과 투수성으로 인해 개발이 어렵다는 단점을 가지고 있으며, 이러한 문제를 해결하고자 최근 수압파쇄공법(hydraulic fracturing technology)이

*Corresponding author: kwkim@gist.ac.kr

이용되고 있는 실정이다. 수압파쇄공법은 유체투과도가 낮은 지층에 수압을 가하여 생산율을 높여주는 방법이나, 이로 인해 다양한 환경학적 문제가 발생할 수 있다(Soeder and Kappel, 2009; U.S.DOE, 2009). 따라서 본 논문에서는 우리나라 환경관련 연구분야에 생소한 셰일가스 개발 및 환경문제에 관한 이해를 도모하고자 하였으며, 이를 위해 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 셰일가스에 대해 해설하고, 셰일가스 개발 시 발생 가능한 환경문제를 고찰하고자 한다.

2. 비전통가스 자원(unconventional gas) - 셰일가스

천연가스 자원은 일반적으로 전통가스와 비전통가스로 구분하며, 전통가스는 근원암(source rock)에서 생성된 이후 유체투과도가 큰 저류암(reservoir rock)을 거쳐 배사구조(anticline structure) 등 특정한 지질구조에 대량으로 집적되어 있는 가스를 말한다. 이러한 전통가스는 가스의 존재 형태에 따라 수반가스(associated gas)와 비수반가스(non-associated gas)로 구분되는데, 수반가스는 석유와 가스가 동시에 있는 유전에서 나오는 가스를 말하며, 비수반가스는 가스만 집적된 가스전에서 나오는 가스를 의미한다. 반면 비전통가스는 유체투과도가 적은 셰일층(shale rock), 사암층(sandstone), 석탄층 등에 의해 흘러나가지 못하고 각 지층 내에 넓게 분포해 있는 가스를 말하며, 셰일가스, 치밀가스(tight gas), 석탄층 가스(CBM: coalbed methane), 가스하이드레이트(gas hydrate) 등으로 구분한다. 이러한 천연가스 자원을 Fig. 1과 같이 구분하였

으며, 이를 설명하면 다음과 같다(Baek, 2011; Holditch, 2006).

1. Fig. 1에서 삼각형의 상부로 갈수록 전통가스 자원 중에서도 유체투과도가 큰 가스전을 의미하며 따라서 상대적으로 개발이 쉽고 소요 비용이 저렴한 반면 규모는 작을 수 있음을 의미한다.
2. Fig. 1의 삼각형 하부로 내려갈수록 매장 규모는 커지는 반면 가스의 집적도가 낮아지고 유체투과도가 작아져 개발비용이 증가하며 특수 기술이 필요함을 의미한다.

세계적으로 비전통가스 자원이 풍부하게 분포되어 있을 것으로 예측하고는 있지만 아직 직접적인 개발에 의해 상세한 분석이 전면적으로 이루어지고 있지는 않다(Baek, 2011). 그러나 최근 Holditch & Madani (2010)의 연구에 따르면, 지역별 CBM, 셰일가스, 치밀가스의 자원량(gas resources in place)은 Table 1과 같다.

IEA (International Energy Agency) 의 세계에너지 전망을 보면 (IEA, 2010), 1차 에너지원 중 석유가 차지하는 비중이 2008년 33%에서 2035년 28%로 감소하게 되는데 이는 높은 석유가격, 산업/발전부분에서의 탈석유 및 연료 효율 향상을 위한 각 정부 정책, 수송부분에서 석유제품을 대체할 다른 연료의 등장에 기인한 것이다. 석탄에 대한 수요는 2025년 전후까지 상승하지만 이후 감소하기 시작하여 2035년 24%에 근접할 것으로 전망하고 있다. 반면 천연가스를 1차 에너지원으로 사용하는 비중은 2009년 21%에서 2035년 23%로 늘어나 석탄 사용비중(24%)에 근접할 것으로

Fig. 1. Natural gas resource triangle (Holditch, 2006).

Table 1. Unconventional gas resources in various regions (Holditch and Madani, 2010)

Region	Coalbed Methane (Tcf)	Shale Gas (Tcf)	Tight-Sand Gas (Tcf)	Total (Tcf)
Northe America	3,017	3,842	1,371	8,228
Latin America	39	2,117	1,293	3,448
Western Europe	157	510	353	1,019
Central and Eastern Europe	118	39	78	235
Former Soviet Union	3,957	627	901	5,485
Middle East and North Africa	0	2,548	823	3,370
Sub-Saharan Africa	39	274	784	1,097
Centrally planned Asia and China	1,251	3,528	353	5,094
Pacific (Organization for Economic Cooperation and Development)	470	2,313	705	3,487
Other Asia Pacific	0	314	549	862
South Asia	39	0	196	235
World	9,051	16,112	7,406	32,560

Fig. 2. Comparison of CO₂ emissions in various energy source (Kuuskraa, 2009).

예측하고 있으며, 이는 천연가스가 보다 실용적이며 친환경적인 특성을 가지고 있기 때문이다(Fig. 2). 증가하는 가스 수요의 많은 부분은 여전히 전통가스에 의존하겠지만, 셰일가스를 비롯한 비전통가스의 공급 비중은 더 빠르게 늘어날 것으로 전망되고 있다. 또한 IEA는 천연가스 총공급량 대비 비전통가스의 비중이 2009년 13%에서 2035년 22%로 늘어날 것으로 예측하고 있으며, 최근 셰일가스 개발이 활발한 북미 지역의 경우 같은 기간 56%에서 64%로 증가할 것으로 전망하고 있다.

3. 셰일가스 개발 - 수압파쇄공법

셰일은 점토 성분이 풍부한 진흙퇴적암층에서 미세한 진흙이 퇴적된 후 탈수되어 생성된 퇴적암으로, 진흙에 포함된 높은 유기물 함량으로 인해 천연가스 및 원유 퇴적이 활발하다(Rozell and Reaven, 2012). 셰

일가스는 셰일층에 퇴적된 유기물이 열분해 또는 박테리아에 의해 생분해되어 생성된 탄화수소가 미세 공극 내에 남아있거나 유기물 및 광물입자에 흡착상태로 존재하는 천연가스를 의미한다(Baek, 2011; Howarth *et al.*, 2011). 과거에도 유기물 및 광물입자에 흡착된 상태로 매장되어 있는 셰일가스 자원량은 막대하다고 알려져 있었으나, 시추 및 수압파쇄의 기술력 부족으로 경제성이 맞지 않았다. 그러나 최근 다중 수평시추 기술이나 수평정의 긴 구간에서 여러 단계로 수압파쇄하는 다단계 파쇄기법(multi stage fracturing) 등의 발달로 인해 경제성을 확보하게 되었으며, 최근에는 바넷 셰일(Barnett shale) 등 다양한 지역에서 상업적으로 개발되고 있다(Hari and Laun, 2010). 이러한 셰일가스는 상업적인 생산이 이루어지는 대표적인 비전통가스 자원으로 근래 석유가격의 지속적인 상승에도 불구하고, 천연가스 가격의 안정을 주도한 가장 핵심적인

요인으로 알려져 있다(Shin *et al.*, 2012). 유기추이와 석탄층 메탄가스 등 다른 비전통가스 자원의 개발추이와 상호보완적인 형태로 개발 속도가 다소 조정될 것으로 예상되지만, 근본적으로 고유가의 지속이 예견되는 상황이고 셰일가스 개발과 생산기간이 장기적이라는 특징에 미루어 세계적으로 개발이 지속적으로 이루어질 것으로 전망되고 있다(EIA, 2011).

자연적인 지층압 상태에서 셰일 및 셰일가스 저류층은 매우 낮은 공극률과 투과도로 인해 자연 유동에 따른 생산이 불가능하지만, 균열이 쉽게 발생하는 특성을 가지고 있어 수압파쇄를 통한 균열 생성을 통해 생산이 가능하다. 수압파쇄공법이란 Fig. 3에 나타난 바와 같이 시추정을 통해 물과 화학물질의 혼합물을 고

압으로 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 프로판트(propant)라 불리는 지지체를 주입하여 균열상태를 유지시킨다(Guo *et al.*, 2007; Shin *et al.*, 2012). 이러한 수압파쇄법은 유체투과도가 낮은 저류층에 적합한 생산정 자극법이지만, 최근에는 생산량을 극대화하고자 유체투과도가 높은 생산정에도 널리 사용되고 있다(Hopkins *et al.*, 1993; Guo *et al.*, 2007).

수압파쇄공법에 이용되는 용매는 약 90%의 물, 9.5%의 모래, 0.5%의 화학물질로 이루어져 있고, 특히 화학물질에 포함된 산, 윤활유, 계면활성제, 용매제 등

Fig. 3. Schematic diagram of the equipments and process of hydraulic fracturing (Guo *et al.*, 2007).

Fig. 4. Volumetric percentages of additives used in hydraulic fracturing (U.S.DOE, 2009).

은 각 오염물질의 기준에 비해 수천 ~ 수백만 배의 오염원을 포함할 수 있다(Fig. 4). 화학물질은 목적에 따라 유체의 종류(수성, 유성, 에멀전, 메탄올 등) 및 첨가제의 종류(젤링에이전트, 마찰감소제, 브레이커, 계면활성제, 에멀전 방지제, 가스 등)가 매우 다양하므로 현장 적용 시 환경적인 검토가 필요하다(Soeder and Kappel, 2009; U.S.DOE, 2009).

4. 수압파쇄공법 - 환경문제(Environmental issues)

최근 미국에서는 세일가스 개발 시 대수층을 오염시킬 수 있다는 문제가 제기되어 사회적 이슈가 되고 있다. 수압파쇄를 위해서는 모래를 물과 섞어 고압으로 주입하는데 이 때 시추공의 케이싱(casing)에 문제가 있거나 목표지층이 천부에 있어 대수층과 가깝다면 지하수 오염 문제가 발생할 수 있다(Baek, 2011).

일반적으로 제기되는 세일가스와 관련된 환경적 이슈는 지하수의 오염, 그리고 지표수와 토양 오염, 가스 전 폭발, 파쇄에 따른 지층영향, 천연방사성물질 및 메탄 등의 방출에 의한 대기 오염 등이다. 가장 먼저 제기되는 문제는 Fig. 5에 제시한 것과 같이 수압파쇄를 위해 주입한 용액 내 화학물질이 주변 대수층에 유입됨에 따라 발생할 수 있는 지하수 등의 오염 문제와 대량의 물을 사용함에 따른 수자원 부족을 들 수 있다. 시멘팅이나 케이싱 과정에서 생산정(production well)이 완벽하게 차폐되지 않는다면 시추와 수압파쇄에 사용된 수압파쇄수나 화학첨가제가 지상이나 대수층으로 유출되면서 천연가스, 수압파쇄 용수, 고농도의 용존 고형물이 함유되어있는 지층수가 시추공 주위의 세일층, 음용 지하수가 부존된 지층, 주위의 다른 지층으로 이동하여 식수원에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 대표적인 환경문제 중 가장 위험한 경우는 생산정의 개발과정에 오류가 있거나 저류층 압력의 제어가 상대적으로 난해한 점 등에 기인하여 가스정폭발이 일어날 수 있다. 실제로 최근 마르셀러스 셰일(Marcellus Shale)의 시추과정에서 가스정폭발이 일어났고, 수압파쇄 시 낮은 진도의 지진을 일으킬 수 있다는 우려도 제기되고 있다(Saya, 2010). 이상의 발생 가능한 환경문제를 수질, 대기, 토양, 기타환경분야로 크게 분류하면 다음과 같다(Mark *et al.*, 2010; Daniel *et al.*, 2009).

1. 수질 오염: 지표수, 함수층과 지하수 등의 오염으로 구분하여 살펴 볼 수 있다. 지표수 오염은 수압 파쇄에 사용된 수압파쇄 유체의 회수(flowback

fluids) 시, 파쇄 공정에 사용된 화학약품과 세일층에 존재하던 유류오염원, 파쇄된 암석 및 중금속, 천연방사성물질에 의해 오염 가능성이 있다. 함수층과 지하수 오염은 세일층 균열 유지에 따른 수압파쇄 용액의 이동에 따른 오염, 파쇄 후 회수되는 용액 이동에 따른 오염, 시추 및 시추관 균열에 의해 오염 가능하며, 유류 오염원, 메탄, 화학물질, 중금속, 천연방사성물질 등이 오염원이 될 수 있다.

2. 토양 오염: 지표면 및 지층의 오염으로 구분하여 살펴 볼 수 있다. 지표면 오염은 오염원의 직접적인 확산에 의해 유류원, 수압파쇄수 내 화학물질, 천연방사성물질, 중금속 등이 유입될 수 있다. 지층 오염에서는 대수층, 지하수 오염원의 지층 내로의 확산과 시추관의 균열, 수압파쇄에 의한 오염 등이 있으며, 유류원, 화학물질, 중금속, 천연방사성물질 등이 오염원이 될 수 있다.
3. 대기 오염: 생산정, 관련 시설에서의 고농축 메탄 확산, 유류계 화합물 중 휘발성 유기화합물의 확산 등에 의한 오염이 예상된다.
4. 기타: 수자원 고갈, 소음·진동, 소규모 지진, 지반 침식, 폭발, 자연환경 파괴 등을 들 수 있다. 미국의 마르셀러스 셰일 개발 공정에는 대량의 물이 수압파쇄에 사용되어 세일가스 개발 시 필요한 수자원 확보에 관한 문제가 제기된 적 있다(Western, 2008). 소음·진동은 생산 시설의 개발 공사, 시추, 수압파쇄 등에 의해 발생할 수 있으며, 소규모 지진은 수압파쇄에 의한 암석 충격으로 발생할 수 있다. 또한 세일층 및 지층 파쇄와 균열에 의한 침식 현상이 발생 가능하며, 유·가스전의 유류 특성과 고농축 메탄의 발생으로 폭발 사고가 일어날 가능성도 무시할 수 없다. 세일가스 개발의 붐에 의한 무분별한 개발 시설의 확장으로 자연 환경이 훼손될 가능성도 배제할 수는 없다.

5. 세일가스 개발 - 환경오염 경로

세일가스 개발과 운영에서 환경 오염원이 발생할 수 있는 예상 경로를 지상, 함수층 주변, 함수층 이하로 구분하면, 지상에서는 생산정, 수압파쇄 회수 수자원 필드, 지상 유·가스 저장 및 수송 장치 등으로 나열할 수 있고, 함수층 주변에서는 시추와 시추관, 수압파쇄 공정, 함수층 오염원의 유입으로 볼 수 있다. 이와 같은 세일가스 개발 공정에 따른 오염원 발생 예측경로

를 도식화하면 Fig. 5와 같이 예상할 수 있으며, 이는 다음과 같이 나열할 수 있다(Howarth and Ingraffea, 2011; Mark *et al.*, 2010).

1. 지상 오염: 생산, 저장, 수송, 처리 시설 등에서 오염이 발생 가능하다. 셰일가스의 생산정 및 세일층에서 고농축의 메탄이 지상으로 확산될 가능성이 있으며, 각 셰일가스 개발 공정에서의 관리 소홀에 의한 유류원 유출 사고, 수압파쇄수 회수 과정에서의 오염 확산을 예상할 수 있다.
2. 함수층 주변의 오염: 셰일가스의 유류원이나 수압파쇄수 또는 수압파쇄수 회수 시 용액이 유출되어 오염 가능하다. 지상의 오염된 지표수의 함수층 유입에 따른 오염, 수압파쇄에 따른 세일층의 균열에 의해 오염원이 함수층으로 확산될 가능성이 있다.
3. 함수층 하부 오염: 시추에 의한 오염 발생, 수압파쇄 시 주입한 화학물질에 의한 오염 발생, 미회수된 수압파쇄수의 세일층 잔류, 수압파쇄 후 세일층 균열에 의한 오염원 이동, 시추관의 관리 소홀에 의한 오염원 확산 등을 예상할 수 있다.

이러한 환경적 위험요소를 줄이기 위해서 수압파쇄에 사용되는 유체를 친환경적으로 개발하거나, 생산에 사용된 폐수를 정화하여 순환 사용하는 방법 등이 개발되고 있다. 이 외 주요한 대비방안으로는 수압파쇄 기술의 안정성 강화, 장공 및 다중 수평정 시추 기술, 수자원 재처리, 친환경적 화학제 개발 및 환경관리, 모니터링 기술 등이 있으며, 언급한 각 분야에 대해 지속적인 관심이 필요하다.

6. 결 론

셰일가스는 천연가스 중 하나로 기존의 석유 및 석탄에 비하여 이산화탄소 및 아황산가스 배출량에 있어 친환경적이며, 개발 가능한 자원량 측면에서도 굉장히 매력적인 자원이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 장점을 가지고 있는 동시에 지하수의 오염, 그리고 지표수와 토양 오염, 가스전 폭발, 파쇄에 따른 지층영향, 천연방사성물질 및 메탄 등의 방출에 의한 공기 오염 등 다양한 환경학적 문제를 야기할 수 있다. 이러한 환경문제를 감소시키고자 수압파쇄용수를 친환경적으로 개발하거나, 사용된 폐수를 정화하여 재사용하는 기술 등이 개발되고 있으나, 이러한 해결 방안만으로 수압파쇄공법에 따른 다양한 환경문제를 해결하기는 어렵다. 따라서 향후 수압파쇄기술의 안정성 강화, 장공 및 다

중 수평정 시추 기술 적용에 따른 시추 고화체 처리, 수자원 재처리, 친환경적 화학제 개발 및 환경관리, 모니터링 기술 등 다양한 분야에 대한 지속적인 관심 및 추가적 연구가 필요하다.

참고문헌

- Baek, M.S. (2011) Unconventional gas resources & KOGAS' Project. J. Kor. Soc. Geosystem Eng., v.48, n.4, p.524-538.
- Daniel, A., Brian, B. and David C. (2009) Environmental considerations of modern shale gas development. 2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, Oct. 4-7.
- EIA, (2011) Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays, US DOE.
- Guo, B., Lyons, W.C. and Ghalambor, A. (2007) Petroleum production engineering: A computer-assisted approach, Gulf Professional Publishing, Oxford, U.K., p.17-252.
- Hari, R. and Laun, L. (2010) Improvements in multistage fracturing of horizontal wells using a newly introduced single trip coiled tubing conveyed annular perforating and fracturing tool - Benefits, savings, and case histories, 2010 LADC/SPE Drilling conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, Feb. 2-4.
- Holditch, S.A. (2006) Tight gas sands. Journal of petroleum Technology, v.58, n.6, p.86-93.
- Holditch, S.A. and Madani H. (2010) Global unconventional gas - It is there, but is it profitable? Journal of petroleum Technology, v.62, n.12, p.42-49.
- Hopkins, C.W., Gatens III, J.M., Caballero, J.S. and Jankura, B.E. (1993) Stimulation optimization in a low-permeability upper devonian sandstone reservoir: A case history, SPE 21499, SPE Advanced Technology Series, p.182-190.
- Howarth, R.W. and Ingraffea, A. (2011) Natural gas: Should fracking stop? Nature, v.477, p.271-275.
- Howarth, R.W., Santoro, R. and Ingraffea, A. (2011) Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations, climatic change, v.106, n.1, p.679-690.
- IEA (International Energy Agency) (2010), World energy outlook. International Energy Agency, IEA.
- Kuuskraa, V.A. (2009) Worldwide gas shales and unconventional gas: A status report, Advanced Resources International, Inc.
- Mark, Z., Saya, K. and Brad, C. (2010) Addressing the environmental risks from shale gas development. Worldwatch Institute, Natural Gas and Sustainable Energy Initiative.
- Rozell, D.J. and Reaven, S.J. (2012) Water pollution risk associated with natural gas extraction from the Marcellus shale. Risk Analysis, v.32, n.8, p.1382-1393.
- Saya, M. (2010) Addressing the environmental risks from shale gas Development. Shale Gas Workshop, Oran, Algeria, February 27-28.
- Shin, C.H., Lee, S.M., Kwon, S.I., Park, D.J. and Lee, Y.S. (2012) A classification and a survey on the core tech-

- nology for shale gas development. J. Kor. Soc. Geosystem Eng., v.49, n.3, p.395-410.
- Soeder, D.J. and Kappel, W.M. (2009) Water resources and natural gas production from the Marcellus shale. United States Geological Survey, Fact Sheet 2009-3032.
- U.S.DOE. (2009) Modern shale gas development in the United States: A Primer, U.S. Department of Energy
- Western, R.T. (2008) Development of the Marcellus shale-water resource challenges. Published by Kirkpatrick and Lockhart preston Gates Ellis LLP.
-
- 2013년 2월 5일 원고접수, 2013년 2월 21일 게재승인