

셰일가스 수처리 기술 동향 및 전망[§]

구재욱* · 이상호*[†] · 홍승관** · 김준하***

* 국민대학교 건설시스템공학부 , ** 고려대학교 건축사회환경공학과, *** 광주과학기술원 환경공학과

Current Status and Perspectives of Shale Gas Water Treatment Technology

Jae-Wuk Koo*, Sangho Lee*[†], Seungkwan Hong*** and Joon Ha Kim***

* Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.,

** School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.,

*** School of Environmental Science and Engineering, GIST

(Received May 20, 2013 ; Revised June 3, 2013 ; Accepted June 3, 2013)

Key Words: Shale Gas(셰일가스), Water Treatment(수처리), Wastewater(폐수) Hydrofracking(수압파쇄)

초록: 셰일가스는 전 세계의 에너지 사용방식을 크게 변화시킬 만한 잠재력을 가지고 있다. 그러나 셰일가스 생산과정에서의 물의 사용과 폐수의 처리와 관련된 환경문제에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 논문은 셰일가스 용수관리와 관련된 이슈를 제시하고 이러한 이슈를 해결하기 위한 기존 기술들에 대한 내용을 소개하고 있다. 또한 본 논문은 정삼투와 막증류와 같이 셰일가스 폐수처리를 위한 새로운 기술의 전망에 대해서도 다루고 있다.

Abstract: Shale gas has the potential to significantly change the way of the world's energy use. However, there are increasing concerns on environmental problems, particularly with respect to water use and wastewater treatment. This paper highlights issues related to shale gas water management and technologies currently used to address them. It also presents perspectives of emerging technologies for the treatment of shale gas wastewater, including forward osmosis (FO) and membrane distillation (MD).

1. 서 론

셰일가스는 진흙퇴적암층(Shale)에 함유되어 있는 천연가스를 지칭한다. 기존의 천연가스에 비하여 셰일가스는 깊은 암석층에 매장되어 있으며, 채굴이 용이하지 않아서 경제성을 확보하기 어려웠으므로 2000년 이전에는 많이 개발되지 않았다. 그러나 2000년대 들어서 수평시추법과 수압파쇄법 기술이 개발됨에 따라 셰일가스의 채굴이 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁾ 셰일가스의 가채매장량은 187.5조m³으로 추정되고 있으며, 전통가스 확인 매장량인 187.1조m³(2010년 기준)과 비슷한 수준이다. 이는 향후 인류가 59년간 사용가능한 매장량에 해당한다. 또한 셰일가스의 확인매장량에 러시아와 중동이 포함되어 있지 않아 향후 매장량은 증가할 가능성이 있다.⁽²⁾

미국 에너지정보청의 2011년 자료에 의하면 셰일가스는 중국 (36.1조m³), 미국(24.4조m³), 아르헨티나 (21.9조m³), 멕시코(19.28조m³), 남아공(13.73조m³), 호주(11.21조m³) 등의 순서로 가채매장량이 존재하고 있는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 현재 셰일가스는 미국에서 가장 활발하게 개발되고 있으며, 이에 천연가스 순수수입국이었던 미국이 2009년 러시아를 제치고 세계 최대 천연가스 생산국이 될 수 있었다. 또한 2010년 미국 천연가스 총 생산량 중 셰일가스의 비중은 23%이었으나 2035년에는 49%를 차지할 것으로 전망되고 있다. 한편 미국 외의 지역에서도 셰일가스 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

그러나 셰일가스의 개발에는 환경오염 등의 문제가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 관심과 우

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

† Corresponding Author, sanghlee@kookmin.ac.kr

려가 높아지고 있다. 셰일가스의 생산과정에서 필요한 수압파쇄는 화학물질에 의한 지하수 오염을 야기할 수 있으며, 다량의 물 사용으로 인한 수자원 고갈과, 발생한 폐수의 불완전한 처리로 인한 수계의 오염 등이 발생할 수 있다. 따라서 환경규제가 엄격한 유럽의 국가에서는 셰일가스의 많은 매장량에도 불구하고 개발이 활발하게 진행되고 있지 못하고 있으며, 미국의 경우에도 규제의 수준이 계속 높아지고 있다.

본 논문에서는 셰일가스 용수관리와 관련된 핵심적인 이슈를 제시하고 이를 해결하기 위한 수처리 기술들에 대한 내용을 소개하고자 한다. 또한 정삼투와 막증류와 같이 셰일가스 폐수처리를 위해 검토되고 있는 새로운 기술의 가능성과 전망을 같이 다루고자 한다.

2. 셰일가스 채굴과정과 발생폐수

전통적으로 석유나 천연가스 자원 관련기술은 효율적으로 오일이나 가스를 수집하는 측면이 강조되어 왔다. 그러나 셰일가스의 경우 용수의 공급과 폐수의 배출이 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있으며, 특정 지역의 경우 채굴의 가능여부를 결정할 만큼 중요한 인자가 되고 있다. 이는 현재 사용되는 셰일가스 채굴과정의 특성 상에서 많은 양의 물을 사용하고 동시에 처리하기 어려운 폐수가 발생하기 때문이다.

셰일가스의 채굴과정의 핵심은 수평시추법 (Horizontal drilling)과 수압파쇄법 (Hydraulic fracturing)의 2가지 단계이다(Fig. 1). 수평시추법은 넓은 공간에 분포되어 있는 셰일가스를 채굴하기 위한 방법으로 목표지점에 도달하기 위해 미리 설계된 방향, 각도에 따른 경로로 시추하는 기술이다. 전통적인 천연가스

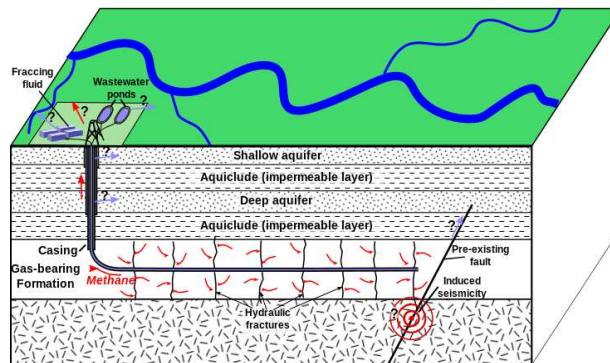


Fig. 1 Horizontal drilling and Hydraulic fracturing⁽⁷⁾

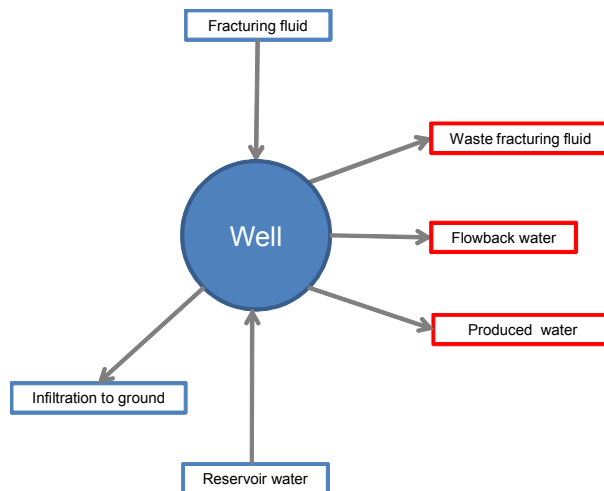


Fig. 2 Water and wastewater flows in shale gas wells

의 채굴에 사용되는 기존의 수직시추법과 달리 지하 내 지반을 수평으로 시추하여, 가스층과의 접촉면을 넓혀 가스를 더욱 많이 회수할 수 있는 장점이 있다. 수압파쇄법은 수평시추법으로 만든 시추공 내로 높은 점성의 모래 현탁액(fracturing fluid)을 강제 주입하고 충전하여 지하수면 아래의 대수층 틈새로 확산시킴으로써 관상의 투수대를 생성시키는 기술이다. 즉, 수압파쇄법은 시추공에 물과, 모래, 그리고 화학물질 등을 섞은 현탁액을 고압으로 지하에 주입하여 셰일가스가 존재하는 암석층에 균열을 일으키고 셰일 층의 투과성을 높여 셰일가스를 추출하는 공법이다.^(3,4)

수압파쇄법에 사용하는 모래 현탁액은 물과 2% 가량의 모래가 현탁액의 대부분을 이루고, 지반 특성에 따라 여러 화학물질들이 현탁액에 포함된다. 이러한 화학물질로는 계면활성제, KCl, Gelling agent, Antiscalant, pH 조절제, Breaker, Crosslinker, 부식방지제, 살균제, 산, 그리고 Friction reducer 등 다양한 종류가 포함된다. 또한 수압파쇄를 하는 회사마다 서로 다른 종류의 현탁액을 사용하기 때문에 실제로 셰일가스 채굴에 사용되는 화학약품의 종류는 다양하고 이의 유해성에 대해서는 아직까지 많은 논란이 있다.^(4,5)

수평시추와 수압파쇄에는 한 개 관정당 15,000 m³에서 23,000 m³의 물이 사용된다. 따라서 물이 부족한 지역에서는 이러한 많은 양의 물을 확보하는 것이 어려우므로 셰일가스 개발이 제한적이다. 가장 많은 매장량을 가지고 있는 중국에서 셰일가스 개발이 아직까지는 활발하게 진행되고 있지 못한 이유 중 한 가지도 이러한 물 부족 문제 때문인 것으로 알려져 있다. 그러나 이보다 큰 문제는 투입된 물 중에서 약 15~40%는 다시 폐수의 형태로 회수된다는 점이다. 이러한 폐수는 현탁액에 함유되어 있던 화학약품 뿐 아니라 셰일가스와 같이 존재하는 지하수 내의 염분이 같이 포함된다. 따라서 총 고형분(TDS)과 독성이 높은 폐수가 한 관정당 최소 2,200 m³에서 9,200 m³이 발생하며, 이를 처리하는 것이 중요한 이슈로 부각되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

셰일가스를 채굴과정에서 발생한 폐수는 지역에 따라 편차가 있으나, 일반적으로 40,000 mg/L 이상의 높은 TDS를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. Table 1은 미국 Marcellus 지역의 셰일가스 채굴에서 발생하는 폐수의 조성을 예로서 나타내고 있다. 폐수 내의 TDS가 낮게는 66,000 mg/L에서 높게는 261,000 mg/L로 해수에 비해 2배에서 7.5배까지 높은 값을 보이고 있다. 높은 TDS 이외에도 오일과 그리스, 그리고 난분해성 유기물 등도 셰일가스 용수의 주 오염원이다. 따라서 기존의 수처리 기술로서는 이를 처리하는 것은 어렵고 많은 비용이 드는 것으로 보고되고 있다.

수압파쇄를 위한 현탁액 중에서 폐수로서 회수되지 않고 지하에 남게 되는 물에 의한 지하수 오염이나 환경파괴에 대한 논의도 진행되고 있다. 이에 대해서는 여러 가지 의견이 있으며 아직까지 확실한 결론을 내리지 못하고 있다.⁽⁵⁾

Table 1 Range of constituents in flowback water from development in the Marcellus Shale, USA⁽⁵⁾

Constituent	Low (mg/L)	Medium (mg/L)	High (mg/L)
Total dissolved solids	66,000	150,000	261,000
Total suspended solids	27	380	3200
Hardness (as CaCO ₃)	9100	29,000	55,000
Alkalinity (as CaCO ₃)	200	200	1100
Chloride	32,000	76,000	148,000
Sulfate	-	7	500
Sodium	18,000	33,000	44,000
Calcium	3000	9800	31,000
Strontium	1400	2100	6800
Barium	2300	3300	4700
Bromide	720	1200	1600
Oil and grease	10	18	260

3. 셰일가스 폐수 처리를 위한 기술

셰일가스는 채굴과정에서 화학물질을 첨가한 물을 대량 사용해 지하수를 오염시킬 우려가 있으며, 수자원의 낭비 및 오염된 폐수처리의 어려움을 가지고 있다. 또한 다량의 이온을 포함하고 있어 기존의 방법으로는 처리가 어려운 것으로 알려져 있다. 이전에는 셰일가스 개발에 사용된 후 회수된 물을 처리하지 않고 모아서 특정지역에서 지하로 투입하거나, 인근 수원에 방류하는 경우가 많았다. 그러나 최근에는 적절한 처리를 하여 재이용하거나 방류하는 방법이 고려되고 있다.

일반적으로 하수나 폐수를 처리하여 방류하거나 재이용하는 경우에는 방류를 위한 처리공정보다 재이용을 위한 처리공정이 더 복잡하고 최종 처리수의 수질이 높은 것이 대부분이다. 그러나 셰일가스 채굴에서의 발생폐수 처리에서는 이와 반대의 경우가 나타난다.⁽⁸⁾ 즉, 이러한 폐수를 재이용하고자 하는 경우에는 주로 오일이나 그리스, 유기물과 화학물질 등을 처리하고, 이온성분은 처리하지 않는 반면에, 이를 방류하고자 할 때는 추가적으로 이온성분을 제거하여 TDS를 낮추어야 한다. 따라서 셰일가스 폐수의 처리 후 재이용을 하는 공정과 방류를 하는 공정의 가장 큰 차이는 TDS를 낮추기 위한 탈염공정의 유무가 된다(Fig. 3).

TDS를 제거하지 않고 폐수를 재이용하는데 사용되는 공정은 Fig. 4와 같이 보통 화학적 산화와 용존공기 부상, 모래여과, 소독, 그리고 슬러지 탈수 등의 단위공정으로 구성된다. 화학적 산화는 오일에 의하여 형성된 에멀전을 파괴하는데 사용되며, 그 외 수압파쇄 현탁액 내에 존재하던 화학물질 (예: Friction reducer)을 분해하는 역할을 한다. 추가적으로 박테리아의 불활성화와 철, 망간 등의 제거에도 효과적이다. 용존공기부상은 폐수 내의 오일성분을 분리하여 제거하기 위하여 사용되는 공정이며, 일부의 경우에는 오일을 회수하여 사용하는 용도로 적용될 수 있다. 여과공정은 부유성 고형물을 제거하는 공정이며, 소독은 최종 처리수

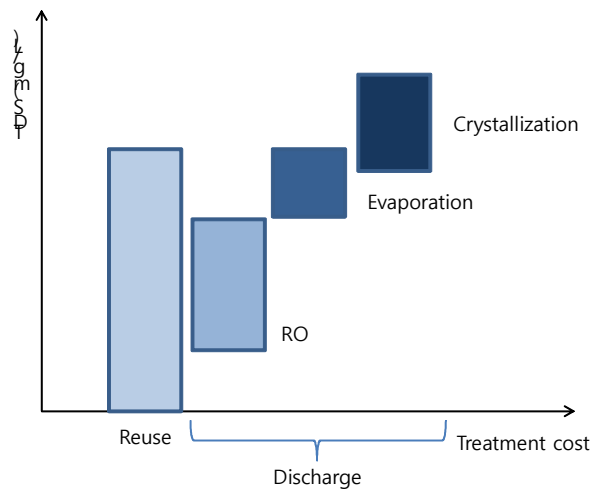


Fig. 3 Treatment and/or reuse of wastewater from shale gas wells

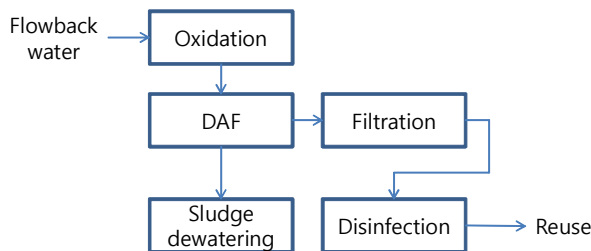


Fig. 4 An example of wastewater treatment system without TDS removal

의 생물학적 안정성을 유지하기 위하여 적용된다. 물론 이러한 공정구성 외에도 경우에 따라서 다양한 단위 공정의 조합이 가능하다. 최근에는 Electro-coagulation 등의 방법이 기존의 방법을 대체할 수 있는 효율적인 방법으로 관심을 모으고 있다.^(8,9)

한편 폐수를 방류하고자 하는 경우에는 TDS의 제거가 필수적이다. 이 경우 Fig. 4에 제시된 것과 같은 시스템이 전처리 공정으로 사용되며, TDS를 제거하기 위한 주 공정으로 역삼투나 증발법, 결정화법이 적용된다. 특히 TDS가 비교적 낮은 경우에는 역삼투가 경제적인 방법으로 적용될 수 있다. 역삼투 공정은 낮은 TDS에서는 증발법에 비하여 10% 이하의 비용으로 폐수를 처리할 수 있다. 그러나 현재 개발된 역삼투막은 80기압 이상의 작동압력을 가하기 어려우므로, TDS가 높은 경우에는 적용이 불가능하다. 보통 유입수의 TDS가 40,000 mg/L 이하이며, 농축수의 TDS가 100,000 mg/L 이하의 경우에는 역삼투가 성공적으로 적용될 수 있다.⁽⁸⁾

역삼투를 적용하는데 있어서 문제점 중 한 가지는 막오염이 발생하는 것이다. 유입 폐수는 경도가 높고 철이나 망간, 실리카 등 스케일 형성물질을 많이 포함할 뿐 아니라 유기물과 박테리아 등이 포함되어 있다. 따라서 이를 사전에 제거하기 위한 전처리 공정이 필수적이다. 따라서 보통은 Fig. 4와 같은 공정을 전처리로 하여 처리수를 역삼투의 유입수로 사용하게 된다.

증발법은 40,000 mg/L 이상의 높은 TDS를 가지는 폐수를 처리할 수 있으나 역삼투에 비하여 많은 에너지를 필요로 한다. 반면에 처리수의 수질은 일반적으로 역삼투보다 우수하다. 증발법의 경우에도 TDS가 120,000 mg/L 이상의 경우에는 처리하기 어려운데 이는 스케일이 형성되어 증발기를 오염시키기 때문이다. 따라서 이 경우에는 증발기와 함께 결정화법이 같이 적용되어야 한다. 결정화법은 물에 대한 무방류 시스템(Zero Liquid Discharge)의 구현을 가능하게 하며, 만들어진 결정(주로 CaCl₂와 NaCl)을 자원으로 활용할 수도 있다.

4. 새로운 기술의 적용 가능성

셰일가스 채굴과정에서 발생하는 폐수를 처리하는 것은 기존의 상하수도 처리에 비하여 많은 비용을 필요로 한다. 또한 셰일가스 채굴의 특성상 한 지역에서 오랜 기간동안 처리를 하는 것이 아니고 한 관정에서 셰일가스를 모두 추출하게 되면 다른 관정으로 이동하게 된다. 따라서 수처리 시설도 이동성을 고려하여 모바일화 혹은 모듈화를 하여야 한다.

최근에는 이러한 셰일가스 채굴을 위한 새로운 대안으로 정삼투와 막 증류법이 검토되고 있다. 정삼투는 역삼투 공정을 대체하는 방법으로서 높은 압력을 사용하지 않고 폐수로부터 물을 여과하는 방법이다. 크게 2가지 방법으로 적용될 수 있는데, 즉 방류를 목적으로 하는 경우에는 Fig. 5(a)와 같은 정삼투-역삼투 하이브리드 공정이, 재이용을 목적으로 하는 경우에는 Fig. 5(b)와 같은 정삼투 단독공정이 고려될 수 있다.

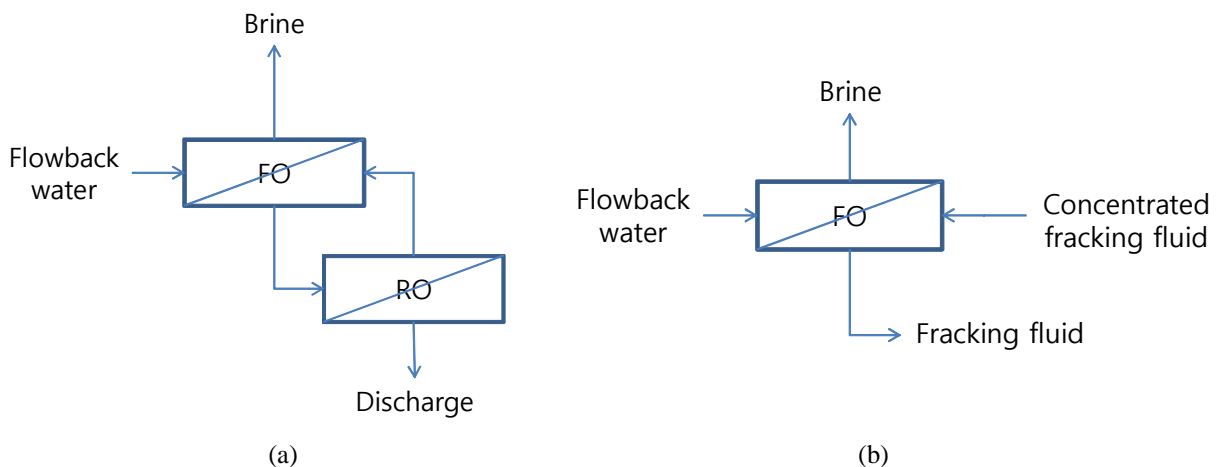


Fig. 5 Treatment and reuse of wastewater from shale gas wells using forward osmosis

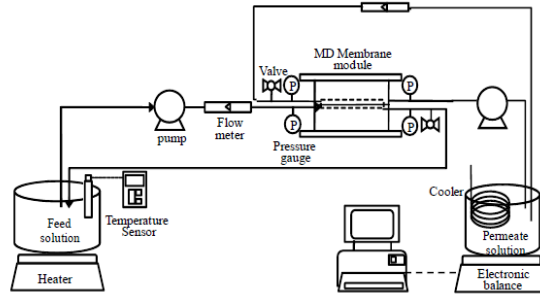


Fig. 6 Schematic diagram of direct contact MD system

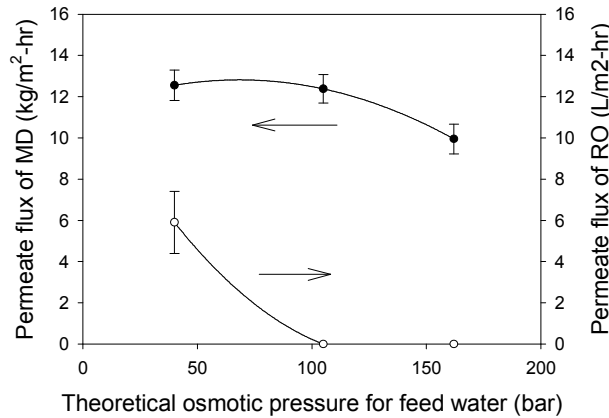


Fig. 7 Comparison of MD flux with RO flux for synthetic flowback water (Membrane: Millipore GVHP; MD feed temperature: 60 °C; RO feed and MD distillate temperature: 20 °C; RO pressure: 60 bar)

한편 막증류는 기존의 증발법을 대신하는 방법으로 최근 검토가 진행되고 있다. 막증류는 물의 온도 차에 따른 증기압차를 이용하여 다공성 막의 미세 공극을 통해 원하는 물질을 분리 또는 제거할 수 있고, 고순도의 물을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또, 기존 증발법에 비하여 비교적 낮은 운전온도(50~80°C)에서 운전이 가능하며, 장치의 크기를 작게 하여 차량탑재형이나 이동형으로 만들기 유리한 장점을 지닌다. Fig. 6은 직접접촉방식의 막증류 장치의 구성을 나타내고 있다.

Fig. 7은 막증류와 역삼투를 이용하여 세일가스 채굴과정에서의 발생폐수를 처리하는 경우 막 투과 플럭스를 비교하고 있다. 유입수의 조성은 Table 1의 정보를 바탕으로 결정하였으며, 서로 다른 TDS를 가지는 3가지 종류의 합성폐수(Low: 66,000 mg/L, Medium: 150,000 mg/L, High: 261,000 mg/L)를 만들어서 실험에 사용하였다. 이때 각각의 이론적인 삼투압을 계산한 결과 각각 44 bar, 105 bar, 161 bar이었다. 따라서 삼투압의 영향을 크게 받는 역삼투의 경우 TDS가 낮은 경우에만 적용이 가능하였다. 반면에 삼투압의 영향을 상대적으로 작게 받는 MD의 경우 플럭스는 모든 경우에 대하여 10~12 kg/m²-hr의 안정적인 값을 나타내었다. 이러한 결과는 막증류법이 세일가스 폐수처리에 활용될 가능성이 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다. 물론 아직까지 MD를 세일가스 폐수처리에 적용하고자 하는 시도는 초기단계이며, 현장 적용을 위해서는 안정적인 플럭스를 얻기 위한 전처리 공정, 막오염 억제기술, 운전조건의 최적화, 모듈화 기술 등이 필수적으로 요구된다.

4. 결론

본 논문에서는 세일가스 용수관리와 관련된 내용들을 검토하고 현재 적용되고 있는 수처리 공정과 미래에 적용이 가능한 새로운 기술에 대하여 고찰하였다. 세일가스의 시장이 빠르게 성장함에 따라 세일

가스 채굴에 필요한 용수관리 시장도 같이 성장하고 있다. 따라서 셰일가스 산업 관련 수처리 기술의 개발은 미래 에너지원 확보에 기여할 수 있을 뿐 아니라 환경분야의 새로운 시장을 형성하는 효과를 가져올 수 있다. 앞으로는 우리나라에서도 이 분야에 대한 많은 관심을 갖고 미래 시장을 선도할 수 있는 방안을 함께 모색하여야 할 것이다.

참고문헌

- (1) 한원희. 2012. 셰일가스(shale Gas) 개발 현황 및 전망. 전기저널, Vol. 429, pp. 46~52.
- (2) 외교통상부, 2012, 글로벌 셰일가스 개발 동향.
- (3) Jenkins, C. D. And Boyer, C. M. I., 2008, Coalbed- and Shale-Gas-Reservoirs. Journal of Petroleum Technology, Vol. 60, pp. 92~99.
- (4) 홍승관, 김인혁, 김정원, 이상호, 김준하, 2013, 셰일가스 개발관련 수처리 산업의 현황과 미래, 건설교통기술평가원 이슈리포트.
- (5) Gregory, K. B., Vidic, R. D. and Dzombak, D. A., 2011, Global Water Sustainability: Water Management Challenges Associated with the Production of Shale Gas by Hydraulic Fracturing, *ELEMENTS*, Vol. 7, pp. 181~186.
- (6) Arthur, J. D., Bohm, B., Coughlin, B. J. and Layne, M., 2009, Evaluating the Environmental Implications of Hydraulic Fracturing in Shale Gas Reservoirs. SPE Americas E&P Environmental and Safety Conference. San Antonio, Texas, Society of Petroleum Engineers.
- (7) http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_fracturing
- (8) Hoon, H., 2012, Shale Gas Development and Water Management
- (9) Hubbard, A. B., 1971, Method for Reclaiming Waste Water from Oil Shale Processing, ACS Division of Fuel Chemistry, Preprint.