



막 증발법을 이용한 셰일가스 폐수 처리 가능성 평가

Feasibility study on shale gas wastewater treatment using membrane distillation

조형락·최용준·이상호*

Hyeonrak Cho · Yongjun Choi · Sangho Lee*

국민대학교 건설시스템공학부

School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

ABSTRACT

Development of shale gas has drawn increasing attention since it is one of promising alternative energy resources. However, contamination of groundwater and surface water during the extraction of shale gas is becoming a serious environmental issues, which brings the needs to treat wastewater generated from hydraulic fracking. In this study, the feasibility of membrane distillation (MD) for the treatment of shale gas wastewater was investigated using a laboratory scale experimental setup. Flat-sheet MD membranes were used to treat produced water from a shale gas well in the United States. Different configurations such as direct contact MD (DCMD) and air gap MD (AGMD) were compared in terms of flux and fouling propensity. The foulants on the surface of the membranes were examined. The results suggest that MD can treat the shale gas produced water containing more than 200,000 mg/L of total dissolved solids, which is impossible by other technologies such as reverse osmosis (RO) and forward osmosis (FO). In this study, we investigated the possibility of processing and characterization of shale gas produce wastewater using membrane distillation. Laboratory scale membrane distillation experimental device was developed. It was compared the flat-sheet direct contact membrane distillation and flat-sheet air gap membrane distillation. AGMD flux in lower than the flux of DCMD, it was expected that the contamination caused by organic matters.

Key words: flux, membrane distillation, shale gas, total dissolved solids, wastewater

주제어: 플럭스, 막 증발법, 셰일가스, 총 용존물질, 폐수 처리

1. 서 론

셰일가스는 지구의 퇴적암층에 간혀 있는 천연가스로서 최근 전 세계적으로 많은 관심을 받고 있다. 셰일가스 자원의 매장량은 인류가 앞으로 최소한 100년은 풍족히 쓰기도 남을 양으로 추정되고 있다(USEIA, 2012). 특히 셰일가스는 중국에 886조, 미국에 750조

세제곱피트의 매장량이 있는 것으로 추정되고 있으며 전 세계적으로 매장량의 1, 2위를 차지하고 있다. 향후 유가의 변동에 따라서 셰일가스의 개발속도가 영향을 받을 수 있으나 장기적으로 볼 때 셰일가스는 기존의 석유자원을 대체하는 미래에너지로 각광받을 것으로 전망된다(zhang et al, 2016, Thiel, 2015).

셰일가스 개발이 최근 활발하게 진행될 수 있었던 것은 이를 개발하는 기술이 최근 10년 동안 비약적으로 발전했기 때문이다. 특히 수압파쇄 기술은 기존에

Received 26 April 2016, revised 4 August 2016, accepted 5 August 2016

*Corresponding author: Sangho Lee (E-mail: sanghlee@kookmin.ac.kr)

pp. 361-367

pp. 369-379

pp. 381-389

pp. 391-399

pp. 401-408

pp. 409-415

pp. 417-425

pp. 427-440

pp. 441-447

pp. 449-457

pp. 459-469

채굴이 불가능하였던 세일가스를 상업적으로 성공할 수 있도록 하는데 큰 기여를 하였다. 수압파쇄는 모래, 물, 화학물질 등을 고압으로 지층에 밀어넣어서 세일 퇴적암에서 석유와 가스를 추출하는 방식이다. 수압파쇄는 세일가스의 생산효율을 비약적으로 향상시키는 효과를 가져왔다(USEIA, 2012). 그러나 수압분쇄 방식은 처리가 어려운 폐수를 발생시키며, 지하수를 오염시킬 수 있고, 많은 양의 물을 필요로 하는 단점을 가지고 있다(zhang et al., 2016, Thiel, 2015). 따라서 향후 세일가스의 개발이 확대된다면 수압파쇄로 인한 환경문제를 해결하는 것이 필요하다고 볼 수 있다. 수압파쇄를 이용하면서 발생하는 폐수는 여러 가지 종류가 있으나 그 중에서 대표적인 것으로 크게 환류수(Flowback water)와 생산수(Produced water)로 구분하고 있다(zhang et al., 2016). 환류수는 수압파쇄 과정에서 주입된 물의 일부가 지상으로 다시 되돌아 나오면서 발생하는 폐수이며, 점토, 화학 첨가제, 용존 금속이온, 총 용존 고형물(Total Dissolved solids, TDS) 등을 포함하고 있다. 한편, 지층 내에 존재하는 물이 세일가스 생산 과정으로 오일 및 가스과 함께 지표면으로 방출될 때 발생하는 염수를 생산수(Produced water)라 한다. 생산수는 오일, 유지 및 탄화수소뿐만 아니라, 다량의 이온성분을 포함하고 있는 폐수이다. 또한, 생산수는 높은 TDS를 가지고 있으며, 자연적인 방사성 물질도 포함하고 있다.

이러한 세일가스의 폐수처리에는 물리적 방법과 화학적 방법, 생물학적 방법이 다양하게 조합되어 적용되고 있다(Thiel, 2015, Coday, 2014, Mininer-Matar, et al., 2015). 또한 환류수와 생산수는 특징이 서로 다르기 때문에 상이한 처리방법이 적용되고 있다. 환류수는 수압파쇄유액으로 인하여 다양한 화학첨가제, 프로판트(Propan) 등의 성분이 있어 물리적 분리, 호기성 생물여과, 살균, 산화, 막분리 등의 방법이 사용되는 반면, 생산수는 염분농도가 높아서 증발/증류, 역삼투압 기반의 처리 방법이 적용된다. 그리고 이와 같은 처리 방법의 적용은 지역별 수질특성에 따라 다양하게 적용되고 있다. 최근 개발되고 있는 복합기술로는 증류증발, 압력기반 회수증진, RO상용처리, IX기반으로한 MF, UF, NF, RO의 복합 공정상용처리기술 등이 있으며, GE, Aqua-Pure, Intevras,, CDM, Veolia, EMIT, Drake, Eco-Tech 등의 회사에서 이들 기술을 보유하고 활용중이다(김극태, 2014). 이와 같이 다양한 수처리

기술이 적용되고 있지만 아직도 높은 염분 농도를 가지는 세일가스 생산수의 처리에는 많은 비용이 필요하며 현장에서 요구되는 성능을 맞추기 어려운 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 세일가스 폐수처리의 새로운 방법으로서 막 증발법의 적용가능성을 검토하고자 하였다. 막 증발법은 기존의 증발법에 비하여 상대적으로 낮은 온도에서 작동이 가능하며, 집적도가 높은 분리막을 사용함으로써 장치의 소형화와 경량화가 가능하다는 장점을 가진다(Alkhudhiri, 2012). 또한 막 증발법은 처리수의 플럭스가 유입수의 총 용존물질 농도에 영향을 받는 정도가 역삼투에 비하여 낮기 때문에 높은 염분농도를 가지는 세일가스의 생산수를 처리하는 것이 가능한 방법이다. 그러나 아직까지 실제 세일가스 폐수를 이용하여 막 증발법을 적용한 사례와 연구결과가 많지 않기 때문에 적용가능성에 대한 충분한 검토가 이루어졌다고 보기 어렵다. 따라서 본 연구는 막 증발법을 이용하여 실제 세일가스 폐수를 처리하는 연구를 통하여 막 증발법의 적용가능성을 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 막 증발 분리막

실험에는 PVDF(Poly-vinylidene fluoride, Milipore) 재질의 소수성의 평막이 사용되었다. 분리막의 평균 공극 크기는 0.22 μm 이며 두께 125 μm , 공극률 75%의 특성을 가지는 것으로 알려져 있다.

2.2 유입원수

생산수와 환류수는 폐수 발생 시점에 따라 구분되어지고 있는데, 실험에 사용된 유입원수는 같은 기간에 발생된 미국 Bakken Williston의 세일가스 채굴현장에서 취수한 생산수와 미국 Eagle ford의 세일가스 채굴현장에서 취수한 환류수를 이용하였다. 생산수는 입자성 물질이 적은 고농도의 염을 함유한 폐수이기 때문에 MD 실험을 위해 간단하게 여재필터와 활성탄 필터로 전처리하여 부유성분을 제거하였으며, 환류수는 고농도의 염을 함유하지 않고, 부유성분들이 많았기 때문에 FMX(부강테크, 한국)를 이용하여 전처리를 하였다. 사용한 폐수의 성상은 Table 1과 2에 정리되어

**Table 1.** Compositions of shale gas produced water

| Parameter | Value |
|---|--------|
| pH | 5.5 |
| Total Suspended Solids (mg/L) | 3134 |
| Total Dissolved Solids (mg/L) | 357500 |
| Volatile Suspended Solids (mg/L) | 343 |
| Turbidity (NTU) | 454 |
| Oil & Grease (mg/L) | 84 |
| Total Hardness (mg/L as CaCO ₃) | 64300 |
| Dissolved Oxygen (mg/L) | 7 |
| Chemical Oxygen Demand (mg/L) | 15820 |

Table 2. Compositions of shale gas flowback water

| Parameter | Value |
|---|-------|
| pH | 4.3 |
| Total Suspended Solids (mg/L) | 1559 |
| Total Dissolved Solids (mg/L) | 1493 |
| Volatile Suspended Solids (mg/L) | 482 |
| Turbidity (NTU) | 2255 |
| Oil & Grease (mg/L) | 1037 |
| Total Hardness (mg/L as CaCO ₃) | 700 |
| Dissolved Oxygen (mg/L) | 9.5 |
| Chemical Oxygen Demand (mg/L) | 6730 |

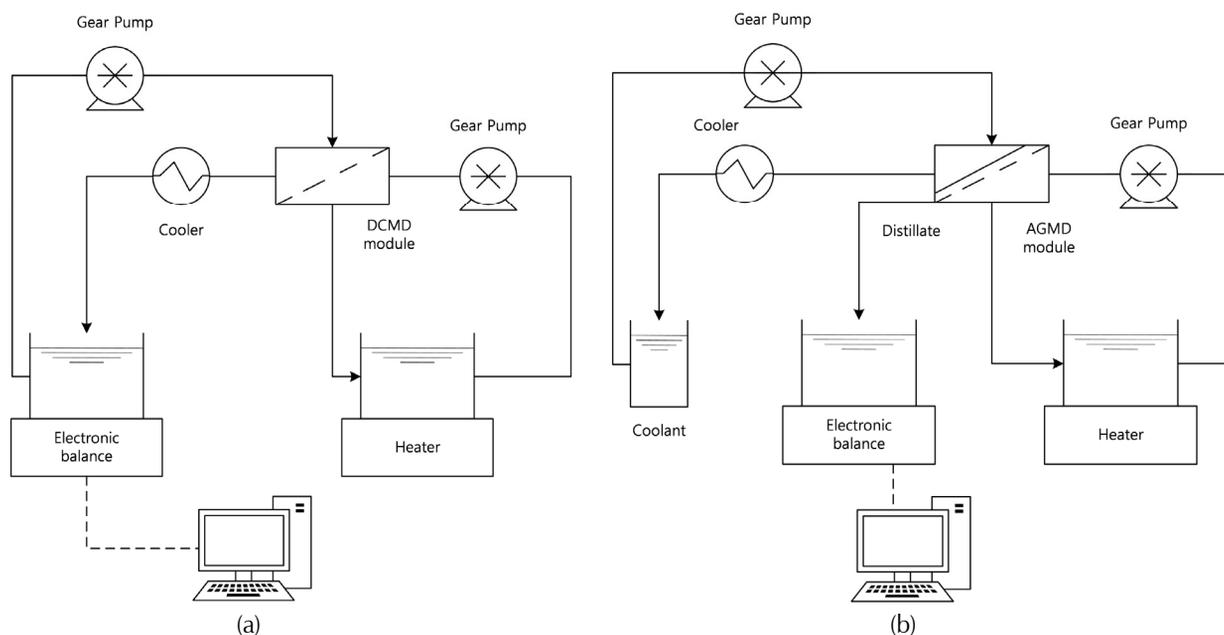
Table 3. Operating conditions for Bench-scale FMX system

| Parameter | Value |
|-------------------|--------------------------|
| Filtration method | crossflow |
| Membrane material | PVDF |
| Pore size | 0.1 μm |
| Membrane area | 0.015 m ² |
| Temperature | 20°C |
| Applied pressure | 2 bar |
| Average flux | 165 L/m ² -hr |

있다. 또한 환류수의 전처리에 사용된 FMX의 운전조건은 Table 3에 정리되어 있다.

2.3 실험장치

막 증발 실험은 Fig. 1과 같이 직접접촉식(Direct contact MD, DCMD)과 공기간격방식(Air gap MD, AGMD)의 막 증발 실험장치가 사용되었다. 이를 위하여 유효 막 면적이 12.2 cm²인 소형의 평판형 모듈이 사용되었다. 유입수는 자동적으로 온도제어가 되는 가열기를 이용하여 일정한 온도로 가열을 하였으며, 기어펌프를 이용하여 막 모듈에 공급되었다. 직접접촉식 막 증발에서는 막을 통과한 증기가 낮은 온도의 물에 의하여 응축되었으며, 이때 무게 증가를 전자저울로 측정

**Fig. 1.** Schematic diagram for laboratory-scale MD systems (a) Direct contact MD (b) Air gap MD.

함으로써 시간에 따른 플럭스 변화를 계산하였다. 공기간격방식 막 증발에서는 막을 통과한 증기가 얇은 두께(3 mm)의 공기층을 지나 응축벽에서 응축되고 처리수조에 수집되었으며, 이때 무게 증가를 전자저울로 측정함으로써 시간에 따른 플럭스 변화를 계산하였다. 응축벽은 냉각수를 순환시킴으로써 계속 일정하게 낮은 온도를 유지하도록 하였다.

2.4 실험방법 및 조건

막 증발 실험의 조건은 표 4에 제시되어 있다. 실험을 수행하는 동안 유입수의 온도는 60°C로 일정하게 유지하였다. 한편, DCMD의 경우 처리수의 온도를 20°C로 유지하였으며, AGMD의 경우 응축이 일어나는 표면의 온도를 20°C로 유지하였다. 실험은 600분 이상 수행하였으며, 플럭스와 유입수 전도도 변화, 처리수 전도도 변화 등을 측정하여 기록하였다.

Table 4. Experimental conditions

| Item | | Condition |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| Operation mode | | DCMD, AGMD |
| Membrane | | PVDF 0.2 μm |
| Effective membrane area | | 0.0125 m ² |
| Cross-flow velocity | Feed | 0.6 L/min |
| | Permeate (DCMD) | 0.4 L/min |
| Temperature | Feed side | 60°C |
| | Permeate side (DCMD) | 20°C |
| | Air gap (AGMD) | 20°C |
| Air gap thickness (AGMD) | | 3 mm |

3. 결과 및 고찰

3.1 전처리

앞서 Table 1에 제시된 조성을 가진 생산수를 바로 막증류의 유입수로 사용할 수는 없을 것으로 판단되어 입자성 물질을 제거하기 위한 수단으로 여재필터와 활성탄 필터를 이용하여 전처리를 수행하였다. 전처리 전에는 탁도가 454 NTU이었으나, 전처리 후에는 4.54 NTU까지 탁도를 감소시킬 수 있었다. 그러나 다른 수질성분은 큰 변화가 없었다.

또한 Table 2에 제시된 조성을 가진 환류수의 경우 Table 3의 조건을 가지는 FMX를 이용하여 입자성 물질을 제거하는 전처리를 수행하였다. FMX는 멤브레인 표면의 물리적 오염을 방지하기 위한 장치로 멤브레인이 고정된 원형 판을 일정속도로 회전시키며 여과를 진행하는 방식이다. 또한, 정밀여과막을 이용한 장치이므로, 처리 후의 탁도는 1 NTU 미만의 낮은 값을 나타내었다. FMX를 처리한 경우에는 TDS도 약 30% 정도 제거되는 결과가 나타났는데 이는 FMX 처리를 위하여 pH를 8.1로 조정하고 처리하였으므로, 일부 염의 경우 석출된 후 분리막에 의하여 제거되었기 때문에 나타난 현상이라고 판단된다. 여기서 oil & grease 성분의 영향으로 인한 막의 wetting 현상이 염려되었으나 실험 결과 크게 영향을 받지 않은 것으로 보아 oil & grease 성분이 물과는 분리되어 상부에 위치하고 있었기 때문이라고 판단된다.

3.2 DCMD 운전결과

Fig. 2는 DCMD로 운전한 경우 유입수의 종류에 따른 플럭스의 변화를 나타낸 것이다. 실험은 500분 이상 수행하였으며, 전체 실험결과에 대한 평균값과 표준편차값을 이용하여 그래프를 작성하였다. 증류수를 이용하여 운전한 경우에는 초기 플럭스인 15 kg/m²-hr가 계속 유지되었으며, 환류수에서도 비슷한 경향이 나타났다. 그러나 생산수로 실험한 경우에는 초기 플럭스가 11 kg/m²-hr이었으며, 실험종료 시점인 1000분에는 약 3 kg/m²-hr로 감소하였다. 이러한 결과가 나타난 것은 생산수 내에 포함되어있는 다량의 이온성분과 유기물 등이 막 표면에 축적되어 막오염을 유발하였기 때문으로 생각된다.

막증발 공정에서 온도와 이온농도에 따른 구동력(증기압)의 변화는 다음의 식으로 계산할 수 있다(구재욱, 2015).

$$P_w = 1.333 \times 10^{-3} \times 10^{\left(A - \frac{B}{C+T}\right)} \quad (1)$$

$$P_s = \frac{P_w}{1 + 0.57357 \frac{S}{1000 - S}} \quad (2)$$

여기서 A, B, C는 상수이며, T는 온도(°C), S는 염분농도(g/kg), P_w는 순수한 물의 증기압, P_s는 염분(이온)을

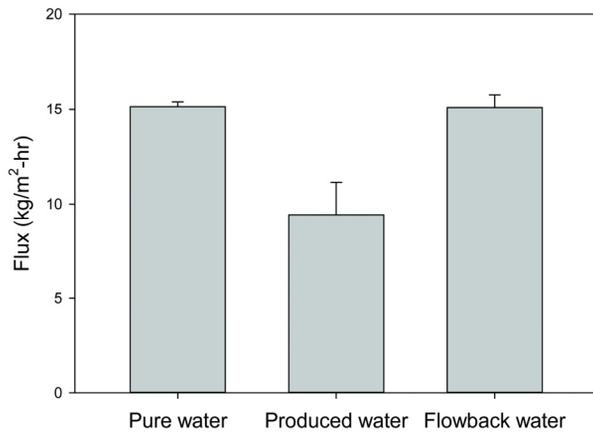


Fig. 2. Comparison of flux in DCMD treatment of different feed solutions.

포함한 물의 증기압이다. 상기의 식들로부터 계산을 해보면, 생산수(Produced water) 처리의 경우 증기압은 동일한 온도에서 순수한 물을 처리 할 때 발생하는 증기압에 비하여 12.6%가 감소하는 것으로 나타났다. 실제 생산수(produced water)를 DCMD로 처리할 때 초기플럭스는 동일한 운전조건에서 순수한 물을 처리하는 경우의 초기플럭스에 비하여 26.6%가 감소하였고, 이는 초기플럭스의 차이가 단순히 증기압(구동력)의 감소에만 기인하는 것이 아니고 초기부터 막오염에 의한 플럭스 감소가 나타난다는 것을 보여주는 결과라고 볼 수 있다. 즉, 순수한 물 대비 생산수(produced water) 처리 초기플럭스 감소 26.6% 중 12.6%는 구동력의 감소에 의한 플럭스 감소, 14%는 초기부터 나타나는 막오염에 의한 영향이라고 판단되며, 운전종료 시점까지 추가적으로 발생하는 53.4%에 해당하는 플럭스 감소는 스케일 형성 등 운전 후반부에 나타나는 막오염에 기인한다고 생각되었다.

비록 생산수 처리에서 플럭스 감소가 크게 나타났으나, 처리수의 전도도를 연속적으로 측정해본 결과 처리수질 악화는 나타나지 않았다. 이는 막오염에도 불구하고 막젖음 현상은 나타나지 않았다는 것을 나타내는 결과이다.

3.3 AGMD 운전결과

Fig. 3.은 AGMD로 운전한 경우 유입수의 종류에 따른 플럭스의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 DCMD에 비하여 약 59%정도 낮은 플럭스를 보이는 반면 플럭스의 감소폭도 적은 것을 볼 수 있다. 순수한 물을

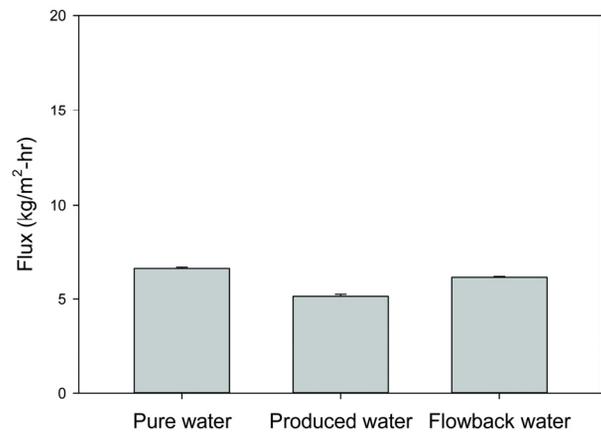


Fig. 3. Comparison of flux in AGMD treatment of different feed solutions.

유입수로 하여 AGMD를 운전하였을 때 초기 플럭스는 $6.45 \text{ kg/m}^2\text{-hr}$ 이었으며, 이는 운전종료 시점까지 거의 변하지 않고 일정하게 유지되었다. 반면에 생산수를 AGMD로 처리한 경우에는 초기 플럭스가 $5.33 \text{ kg/m}^2\text{-hr}$ 로 나타났으며, $5.0 \text{ kg/m}^2\text{-hr}$ 까지 감소하였다. 환류수의 경우에는 초기 플럭스가 $6.25 \text{ kg/m}^2\text{-hr}$ 이고 운전종료 시점에는 $6.11 \text{ kg/m}^2\text{-hr}$ 로 유지되었다. 즉 AGMD의 경우에도 DCMD와 유사하게 환류수를 처리하는 경우에는 막오염에 의한 플럭스 감소가 크지 않음을 알 수 있다.

생산수 처리에서 AGMD가 DCMD에 비하여 막오염 경향이 크지 않은 이유는 상대적으로 낮은 플럭스에 기인한다고 볼 수 있다. AGMD의 플럭스는 DCMD의 50% 이하이었으므로 막오염 물질이 막 표면으로 끌어당겨지는 힘이 약할 것이라 볼 수 있다. 또한 플럭스가 낮기 때문에 유입수가 농축되는 속도가 느려서 더 낮은 농도에서 운전되었고 이로 인하여 스케일 형성에 의한 막오염도 크지 않았다고 생각된다. 실제로 동일한 시간동안 운전을 하더라도 AGMD는 DCMD의 절반 정도의 회수율만을 보였기 때문에 스케일 형성이 활발하게 일어나는 농도 이전에 AGMD의 운전이 종료된 것으로 볼 수 있다. 만약에 AGMD를 DCMD의 2배 이상의 기간동안 운전을 하였다면 AGMD에서도 스케일 형성에 의한 급격한 막오염 현상이 나타났을 것으로 생각된다.

AGMD에서도 처리수의 전도도를 연속적으로 측정해본 결과 DCMD와 마찬가지로 처리수질 악화는 나타나지 않았다. 비록 다소의 막오염이 발생하기는 하지만 AGMD에서도 막젖음 현상은 나타나지 않았다.

3.4 막오염 물질 분석

Fig. 4.는 막증발 실험 후 막 표면에 형성된 막오염 물질을 XPS로 분석한 결과이다. 막오염 물질의 생성량은 막증발의 방식(DCMD, AGM)에 영향을 받았으나 그 조성은 영향을 받지 않았다. 반면에 막오염 물질의 조성은 유입수의 종류(생산수, 환류수)에 따라 큰 차이를 보였다. 생산수의 경우 막오염 물질을 주로 구성하는 것은 염소 (35%), 탄소 (30%), 나트륨 (14%), 산소 (10%), 칼슘 (4%) 등으로 분석되었으며, 환류수의 경우 탄소 (85%), 산소 (11%) 등으로 나타났다. 대략적인 조성비로부터 추정해보면 생산수 처리에서의 막오염 물질은 주로 NaCl과 유기물이라고 판단되며, 환류수의 경우 막오염 물질의 대부분이 유기물이라고 볼 수 있다.

이러한 결과로부터 환류수는 생산수에 비하여 오일과 같은 유기물이 포함될 가능성이 높은 반면 이온농도가 높지 않으므로, 스케일 형성보다는 유기물 층 형성이 막오염의 주요 원인이라고 생각할 수 있으며, 생산수는 높은 이온농도로 인한 스케일 형성이 유기물과 함께 막오염의 주요 원인으로 작용한 것으로 판단할 수 있다.

3.5 생산수와 환류수의 처리 가능성 비교

막 증발의 장점 중 한 가지는 삼투압에 영향을 받지 않고 높은 이온농도를 가지는 유입수를 처리할 수 있다는 점이다. 여기서는 생산수와 환류수의 처리특성에 대하여 MD와 타 공정을 이론적으로 비교하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 실험에 사용한 생산수와 환류수의 삼투압을 계산하기 위하여 다음의 식을

사용하였다(A Efraty, 2016).

$$\pi = n \Phi cRT \quad (3)$$

위의 식에서 π 는 삼투압, Φ 는 삼투계수, n 은 해리된 이온의 수(NaCl의 경우 2), c 는 이온의 활성도, R 은 기체상수(J/mole-K), T 는 온도(K)이다. 여기서 Φ 는 이온농도에 따라 변화하게 되는데, 예를 들어 0.1 M 용액의 경우 0.9325, 0.5 M의 용액의 경우 0.9222의 값을 가진다. 용액의 농도가 3 M 이상이 되면 삼투계수는 오히려 증가하여 1보다 큰 값을 가진다. 위의 식을 이용하여 생산수와 환류수의 삼투압을 계산하면 각각 179 bar와 0.513 bar의 값을 가지는 것으로 나타났다.

RO 공정에서 필요한 구동압력(PRO)은 다음의 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$P_{RO} = \frac{J_{min}}{L_w} + \frac{P_s}{1 - \eta} \quad (4)$$

여기서 J_{min} 는 RO 공정의 가장 후단에서 유지해야 하는 최소의 플럭스이며, L_w 는 RO막의 물 투과도, η 는 회수율이다. 생산수의 경우 삼투압이 179기압이므로, 회수율 40%를 가정하더라도 303기압의 구동력을 필요로 하게 된다. 일반적으로 RO의 작동압력은 70기압을 넘기 어렵고, 특수하게 제작된 RO막이더라도 100기압 이상의 압력을 가하기는 어렵기 때문에 RO 공정으로 생산수 처리는 불가능하다고 볼 수 있다. 한편 환류수는 상대적으로 낮은 삼투압을 가지고 있기

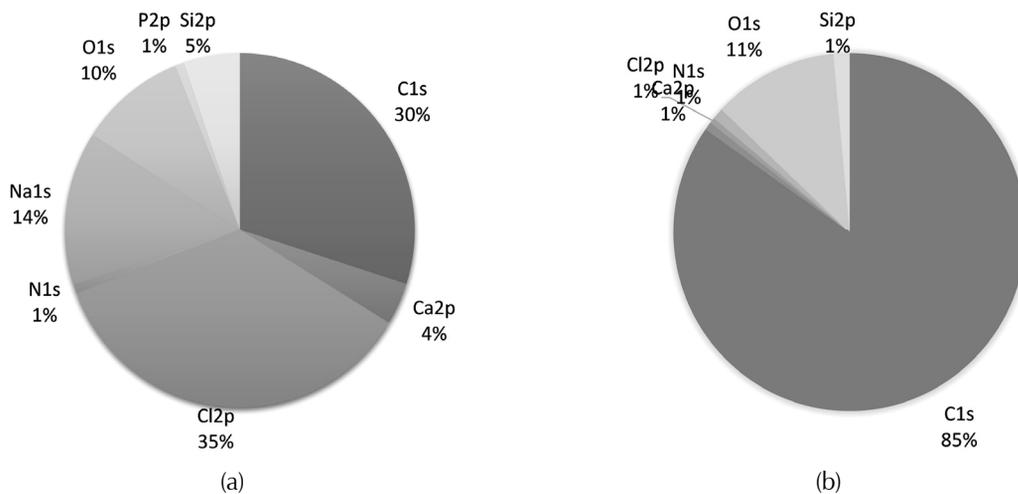


Fig. 4. Elementary composition of foulants on the membrane surface (a) produced water (b) flowback water.



때문에 85%정도의 회수율을 유지하는 조건에서 5~15 기압 정도의 압력이 필요한 것으로 계산되었다.

한편 FO 공정에서 필요한 유도용액의 삼투압(PFO)은 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$P_{FO} = \frac{e^{\frac{J_{min}S}{D_s} \left(B + J_{min} + \frac{AP_s}{1-\eta} \right)} - B}{A} \quad (5)$$

여기서 S는 막의 구조인자이고 Ds는 이온의 확산계수, A는 FO막의 물 투과도, B는 FO막의 이온 투과도이다. FO에서는 높은 삼투압을 가지는 유도용액을 사용하더라도 내부농도분극에 의하여 실제 유효삼투압은 크게 감소한다. 실제로 A=5 L/m²-hr-bar, B=0.1 L/m²-hr, S=300 μm인 FO막을 사용한다고 하면, 생산수 처리에는 약 1800 기압의 삼투압을 가지는 유도용액을 이용하여야 한다는 결과를 얻을 수 있다. 상기의 삼투압은 실제로 얻기가 불가능하기 때문에 RO와 마찬가지로 FO로도 생산수의 처리는 불가능한 것을 알 수 있다. 한편, 환류수의 경우 필요한 유도용액의 이론적인 삼투압은 10 기압 이하로서 충분히 FO로 처리가 가능한 것으로 판단되었다.

따라서 이러한 결과로부터 볼 때 생산수(produced water)의 처리를 위한 막분리 공정은 막증발이 유일하게 가능할 것으로 판단되며, 높은 삼투압으로 인한 에너지가 필요한 RO나 생산수보다 높은 농도의 유도용액이 필요한 FO로는 처리가 불가능한 것으로 판단된다. 한편, 환류수의 경우 이론적으로 처리가 가능하나, 실제 처리를 위해서는 막오염 등의 문제를 고려해야 할 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 막증발법을 이용한 세일가스 발생폐수의 처리 가능성과 특성을 고찰하였다. 막증발법을 적용하였을 때, 유입수 60°C의 조건에서 생산수의 경우 DCMD에서는 평균 8 L/m²-hr, AGMD에서는 평균 5 L/m²-hr로 나타났으며, 환류수의 경우 DCMD에서는 평균 15 L/m²-hr, AGMD에서는 평균 7 L/m²-hr로 나타났다. 생산수를 처리하는 경우 DCMD에서의 막오염이 AGMD에서보다 심각하게 나타났으며, 막오염 물질은 주로 NaCl과 유기물인 것으로 판단되었다. 환류

수의 경우 막오염이 상대적으로 크지 않았으며, 막오염 물질은 주로 유기물인 것으로 판단되었다. 생산수와 환류수의 특성을 검토해보았을 때 FO와 RO로는 처리가 불가능한 것으로 계산되어, 막증발법이 유일하게 적용가능한 막분리 공정인 것으로 나타났다.

사 사

This subject is supported by Korea Ministry of Environment as Global Top Project (Project No. : GT-14-B-01-003-0) and by a grant(code 15IFIP-B065893-03) from Industrial Facilities & Infrastructure Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

- A. Efraty, CCD series no-22: Recent advances in RO, FO and PRO and their hybrid applications for high recovery desalination of treated sewage effluents, *Desalination*, 389 (2016). 18-38.
- A. Alkudhiri, et al., Membrane distillation: A comprehensive review, *Desalination*, 287 (2012). 2-18.
- B.D. Coday, et al., The sweet spot of forward osmosis: Treatment of produced water, drilling wastewater, and other complex and difficult liquid streams, *Desalination*, 333(1) (2014). 23-35.
- G.P. Thiel, et al., Energy consumption in desalinating produced water from shale oil and gas extraction, *Desalination*, 366 (2015). 94-112.
- J. Minier-Matar, et al., Application of forward osmosis for reducing volume of produced/Process water from oil and gas operations, *Desalination*, 376 (2015). 1-8.
- USEIA, Annual Energy Outlook 2012 with Projections to 2035. Vol. DOE/EIA-0383 2012, Washington, DC: U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.
- X. zhang, et al., Shale gas wastewater management under uncertainty, *Journal of Environmental Management*, 165 (2016). 188-198.
- 김국태, 정건용, 박정규, 비전통자원개발에 따른 수처리 최신 기술, *Korean Chem. Eng. Res.*, 52(2), 154-165 (2014).
- 구재욱, et al., Theoretical analysis of different membrane distillation modules, *Desalination and Water Treatment*, 54(4-5) (2015) 862-870.

pp. 361-367

pp. 368-379

pp. 381-389

pp. 391-399

pp. 401-408

pp. 409-415

pp. 417-425

pp. 427-440

pp. 441-447

pp. 449-457

pp. 459-469