

고염도 폐수 농축을 위한 평판형 정삼투막 모듈의 성능 분석

김유창*[†] · 이승윤* · 박상진* · 김한석*

Performance Analysis of Plate-and-Frame Forward Osmosis Membrane Module for Concentrating High Salinity Wastewater

Yu Chang Kim*[†], Sungyun Lee*, Sang-Jin Park*, Han Seok Kim*

Key Words : Concentration Factor(농축팩터), Forward Osmosis(정삼투), Membrane Module(멤브레인 모듈), Osmotically-driven Process(삼투압 구동 공정), Plate-and-frame(평판형), Wastewater(폐수)

ABSTRACT

Hydraulic fracturing of wells during oil and gas (O&G) exploration consumes large volumes of fresh water and generates larger volumes of contaminated wastewater with high salinity. It is critical to treat and reuse the O&G wastewater in a cost-effective and environmentally sound manner for sustainable industrial development and for meeting stringent regulations. Recently, forward osmosis (FO) has been examined if it is a promising solution for treatment and desalination of complex industrial streams and especially fracturing flowback and produced waters. In the present study, the performances of a plate-and-frame FO membrane element and a module (6 elements combined in series) were investigated for concentrating high TDS wastewater. An FO module has achieved up to 64 % water recovery (i.e., concentration factor of 2.76) from 10,000 ppm wastewaters and can concentrate feed streams salinities to greater than 30,500 ppm.

1. 서 론

셰일가스 채굴을 위해서는 다량의 용수를 사용하는 수압 파쇄(hydraulic fracturing)과정이 필요하며 이로 인해 염(salt) 농도가 높은 다량의 폐수가 발생하게 된다.⁽¹⁻³⁾ 이 폐수는 크게 두 종류로 구분되는데, 지반을 뚫고 수압파쇄를 하는 동안에 발생하는 환류수(flowback water)와 가스를 생산하는 동안 가스와 함께 배출되는 생산수(produced water)로 나뉜다. 셰일가스전 개발의 총 운송비용중 용수와 폐수를 취수원, 셰일가스전, 그리고 폐수처리장 등으로 운송하는 비용이 차지하는 비율이 약 60-80% 정도로 아주 높기 때문에 폐수를 농축하여 부피를 감소시키거나 처리하여 재사용을 하면 운송비를 줄이는 효과와 함께 용수 확보가 용이해져 수자원의 활용도를 높일 수 있다.

농도가 100,000 mg/L 이상인 생산수의 경우 증발법 이외에는 처리 방법이 없지만, 환류수의 경우 농도가 30,000

ppm 이하이기 때문에 역삼투법의 적용이 가능해 진다.⁽¹⁾ 하지만 역삼투법은 구동력이 압력차이기 때문에 고압펌프에 의존하며 그로 인해 에너지소비가 크다는 단점을 갖고 있다. 따라서, 최근에는 고농도의 유도용액(draw solution)을 사용하는 삼투압차 기반의 정삼투법(forward osmosis)을 셰일 가스전의 발생폐수 처리에 적용하는 기술이 개발되고 있다.^(2,3) 대표적인 유도용액으로는 NaCl과 NH₃-CO₂가 사용되고 있는데, 전자의 경우 희석된 NaCl 용액은 수압파쇄 등의 용수로 재이용이 가능하고, 후자의 경우 희석된 NH₃-CO₂ 용액은 증류법을 통해 농축된 유도용액과 방류가 가능한 처리수로 한 번 더 분리하고 있다.⁽²⁻⁴⁾

정삼투 공정에 사용되는 정삼투막 엘리먼트는 기존의 역삼투막 엘리먼트의 구조와는 달리, 두 개의 입구와 두 개의 출구를 갖는다. 즉, 역삼투막 엘리먼트에서 투과수(permeate)가 이동하여 모듈을 빠져나오는 유로와는 달리, 공급수 내의 물을 삼투현상에 의해 이동시킬 수 있는 고농도 유도용액이 유

* 열공정극한기술연구소, 한국기계연구원(Korea Institute of Machinery & Materials)

† 교신저자, E-mail : kimyc@kimm.re.kr

입되어 공급수의 반대편에서 흐르기 위한 유로를 가지고 있다. 따라서 막의 성능과 엘리먼트의 구조가 기존 수처리용 분리막 엘리먼트와는 많은 차이를 갖기 때문에 새로운 공정에 적용하기 전에 막 엘리먼트의 성능을 정확히 분석하여야 한다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 고염도 폐수의 농축 공정에 정삼투 공정의 적용 가능성을 알아보기 위해 몇 가지 조건에서 정삼투막 엘리먼트의 성능을 실험적으로 분석하였다. 작은 면적의 막과는 달리 엘리먼트 입구와 출구의 삼투압 차이가 클 것이기 때문에 작은 면적의 막을 이용하여 평가하는 막의 성능과는 큰 차이를 보일 것이다. 정삼투 공정은 삼투압차의 크기에 크게 영향을 받기 때문에 공급수와 유도용액의 농도에 따른 투과 및 농축 성능을 분석하였다. 이를 위해 유도용액과 공급수의 농도 변화에 따른 막 엘리먼트(또는 모듈)의 성능을 측정하기 위한 새로운 성능 측정방법이 사용되었다. 또한, 엘리먼트 6개를 직렬 연결한 모듈에서의 투과 및 농축 성능 분석을 수행하였다. 즉, 농축팩터(concentration factor) 향상을 위해서는 막 엘리먼트를 직렬로 연결하여 회수율을 높이기 때문에 직렬 배열에 따른 성능이 분석되었다.

2. 이 론

2.1 정삼투막의 전달 특성

정삼투막의 전달 특성은 활성층(active layer)의 성능을 나타내는 수투과도(water permeability coefficient, A)와 염투과도(salt permeability coefficient, B)와 지지층(support layer)의 성능을 나타내는 구조인자(structural parameter, S)로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾ 각각은 아래와 같은 식 (1), (2), (3)으로 표현되며 A 와 B 값은 역삼투 조건에서 S 값은 정삼투 조건에서 측정하여 구할 수 있다.

$$A = J_w / \Delta P \quad (1)$$

$$B = J_w \left(\frac{1-R}{R} \right) \exp \left(-\frac{J_w}{k} \right) \quad (2)$$

$$S = \frac{D_s}{J_w} \ln \left(\frac{B + A\pi_{D,b}}{B + J_w + A\pi_{F,m}} \right) \quad (3)$$

여기서, J_w 는 물 플럭스, R 은 염배제율, k 는 물질전달계수, D_s 는 유도용질의 확산계수, $\pi_{D,b}$ 는 유도용액의 벌크에서의 삼투압, $\pi_{F,m}$ 은 공급수 측의 멤브레인 표면에서의 삼투압을 나타낸다.

정삼투 기술은 압력차가 아니라 삼투압차의 크기에 따라 물이 투과되기 때문에 막의 성능중 수투과도(A)는 크고 구조인자(S)는 작아야 한다. 하지만, 폴리아마이드(polyamide) 계열의 막의 경우, 수투과도(A)를 올리면 염투과도(B)도 동시에 올라가기 때문에 공급수와 유도용액이 상대 이온에 의

해 오염되는 문제가 생긴다. 따라서, A 와 B 가 균형을 이루지만 최대한 큰 플럭스를 내며 염배제율(Rejection, R)이 가능한 큰 막이 절대적으로 필요하다.

2.2 물 플럭스

역삼투 공정과는 달리, 정삼투 공정에서는 막을 통한 물의 이동(투과)이 압력차가 아니라 삼투압차에 절대적으로 의존한다. 하지만 정삼투막에서는 내부 및 외부 농도 분극(internal and external concentration polarization; ICP and ECP)의 영향으로 벌크(bulk) 용액에서의 삼투압차와 막표면에서의 삼투압차가 큰 차이를 보여 플럭스가 크게 영향을 받는다.⁽⁷⁾ 또한, 막에서 물의 이동 방향과는 반대 방향으로 염의 역확산(reverse salt flux)이 일어나기 때문에 내부 농도 분극이 더 심해진다.⁽⁸⁾ 결국, 아래와 같이 정삼투 조건에서의 물 플럭스는 기본식 (4)와 같은 단순한 형태에서 ICP, ECP, RSD가 모두 고려된 식 (5)로 바뀌게 된다.

$$J_w = A(\pi_D - \pi_F) \quad (4)$$

$$J_w = A \left[\frac{\pi_D \exp \left(-\frac{J_w S}{D_s} \right) - \pi_F \exp \left(\frac{J_w}{k} \right)}{1 + \frac{B}{J_w} \left[\exp \left(\frac{J_w}{k} \right) - \exp \left(-\frac{J_w S}{D_s} \right) \right]} \right] \quad (5)$$

3. 재료 및 실험 방법

3.1 실험 장치

정삼투 공정의 개략도와 제작된 시스템의 사진은 Fig. 1과 2와 같다. 실험을 위해 제작된 정삼투 시스템에는 평판형 정삼투막 엘리먼트(Porifera사, 엘리먼트의 막면적 7 m^2)가 사용되었으며, 엘리먼트 1개(막면적 7 m^2)의 성능과 6개 직렬(막면적 42 m^2) 연결시의 성능을 각각 측정할 수 있도록 구성되었다. 정삼투막 엘리먼트의 성능 측정을 위해 엘리먼트(또는 모듈)의 공급수측 배관과 유도용액측 배관의 입출구에 유량계를 설치하여 투과유량을 측정하였다. 또한, 일정한 실험 조건을 유지하고 정확한 성능을 분석하기 위해 유량계 외에도 압력계, 전도도계, 온도계를 각각의 입출구에 설치하였다.

3.2 실험 방법

정삼투막의 물질전달 특성인 수투과도(A), 염투과도(B), 및 구조인자(S)는 막의 성능시험에 사용되는 기존의 교차흐름 멤브레인 셀을 이용하여 A 와 B 는 역삼투 조건(RO mode)에서, S 는 정삼투 조건(FO mode)에서 측정하였다.

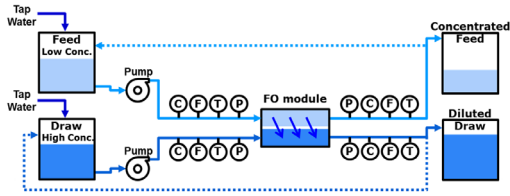


Fig. 1 Schematic diagram of the forward osmosis (FO) experimental system for concentrating high TDS wastewater

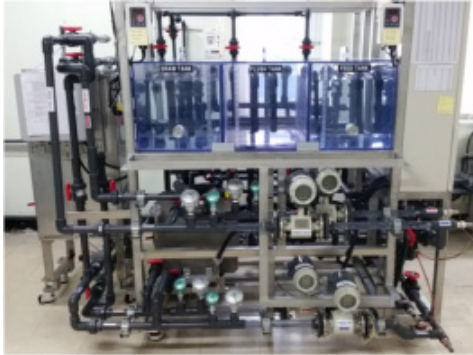


Fig. 2 FO system using six plate-and-frame FO membrane elements

세일가스전 폐수의 경우 국내에서는 구하기 어렵기 때문에, 평판형 정삼투막 엘리먼트 및 모듈의 성능 시험을 위해 공급수(폐수)와 유도용액 모두 NaCl용액을 이용하여 제조하였다. 실패수를 사용하지는 못했지만, 양 측에 제조된 NaCl 용액만을 사용하면 실험시 삼투압차 계산이 쉽다는 장점을 갖는다.

유도용액의 초기 농도는 약 73.6 g/L로, 공급수의 초기 농도는 약 10.2, 21.9, 35.4, 50.5 g/L로 제조하여 사용하였다. 유도용액과 공급수 측의 입구 유량은 모두 약 10 L/min으로 유지하였으며, 공급수 측과 유도용액 측의 압력차(transmembrane pressure)는 단일 막 엘리먼트에서는 약 0.03 bar, 6개가 직렬로 연결된 막 모듈에서는 0.07 bar로 유지하였다. 또한, 두 용액의 온도는 모두 25°C로 유지하였다.

초기에 제조된 두 용액의 농도는 실험 시작 후 어느 정도의 시간동안은 변하지 않도록 유지하다가 특정한 한 용액만 임의의 시간이 지나면 물(수도물)을 공급하여 희석시켜 농도 변화를 유도하였다. 유도용액의 농도를 희석시켜 삼투압차를 감소시키거나 공급수의 농도를 희석시켜 삼투압차를 증가시켜 변화에 따른 투과성을 분석하였다.

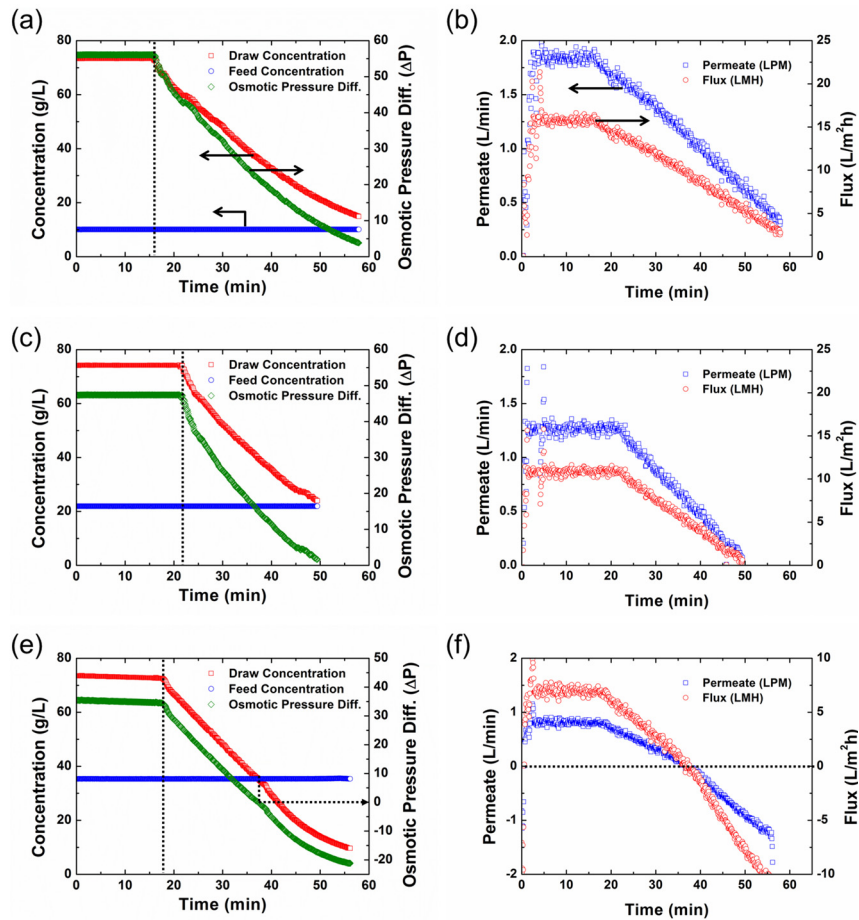


Fig. 3 Effect of osmotic pressure difference decreasing on water permeation for single FO element. Initial draw and feed concentrations are (a) 73.4 and 10.1 g/L, (c) 74.2 and 21.9 g/L, and (e) 73.5 and 35.4 g/L, respectively. (a, c, and e) solution concentration (left Y-axis) and osmotic pressure difference (right Y-axis) as a function of time. (b, d, and f) the corresponding water permeate (left Y-axis) and flux (right Y-axis) as a function of time

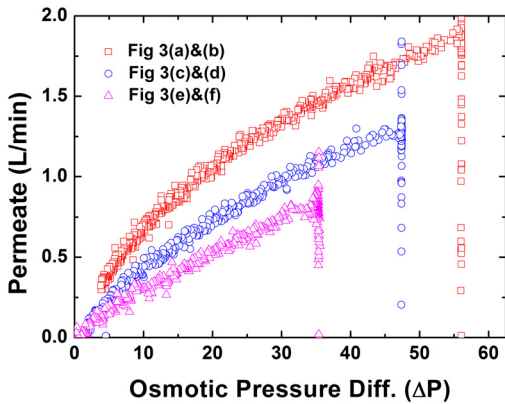


Fig. 4 Water permeate as a function of osmotic pressure difference for the results of Fig. 3

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정삼투막의 물질전달 특성

정삼투막의 물질전달 특성(transport property)은 교차흐름 멤브레인 셀을 이용하여 측정하였다. 역삼투 조건에서 측정된 수투과도(A)와 염투과도(B)는 각각 $2.22 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$ 와 $0.49 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 였고, 이 때 막의 염배제율(B)은 96%이었다. 정삼투 조건에서 측정된 구조인자(S)는 $269 \mu\text{m}$ 였다.

4.2 단일 정삼투막 엘리먼트의 투과 성능

4.2.1 투과 성능에 대한 삼투압차 감소의 영향

Fig. 3은 삼투압차의 감소에 따른 단일 정삼투막 엘리먼트의 투과 성능을 보여주고 있다. 약 73.7 g/L의 유도용액과 3가지 농도(10.2, 21.9, 35.4 g/L)의 공급수를 대응시켰으며, 각각의 공급수 농도는 실험 전기간 동안 일정하게 유지한 반면 유도용액의 농도는 일정 시간이 지난 후에 물을 일정한 유량으로 투입하여 농도변화(희석에 따른 삼투압차 감소)를 유도하였고 그에 따른 모듈의 투과성능을 측정하였다.

Fig. 3(a), (c), (e)는 시간에 따른 두 용액의 농도 변화를 보여주고 있으며, Fig. 3(b), (d), (f)는 그에 따른 물 투과유량과 플럭스 결과를 보여주고 있다. 3가지 경우에서 두 용액의 초기 삼투압 차는 각각 약 56.1, 47.4, 35.0 bar이며, 그림 내에 표시된 수직의 점선이 위치하는 시간까지는 유도용액의 농도를 변화시키지 않고 일정하게 유지하였고, 이후 물을 투입하여 희석하여 공급수와 삼투압차를 감소시켰다.

이렇게 유도용액을 희석하면서 측정하게 되면 삼투압차의 변화에 따른 투과 유량의 변화 추이를 한번의 실험을 통해 확인할 수 있는 장점이 있다. 삼투압차가 변하기 전까지는 거의 일정한 투과 유량을 보이다가 삼투압차가 감소하면 투과유량도 감소하였다. 공급수의 농도가 클 때는 유도용액을 물로 희석하여 공급수의 농도와 비슷하게 맞추는데 소요되는 시간이 짧아 정삼투 실험 시간도 단축되었다.

73.7 g/L의 유도용액에 대해 10.2 g/L의 공급수가 적용되었을 경우 투과 유량은 1.81 L/min, 물 플럭스는 $15.6 \text{ L/m}^2\text{h}$, 21.9 g/L의 공급수가 적용되면 투과 유량은 1.31 L/min, 물 플럭스는 $11.2 \text{ L/m}^2\text{h}$, 35.4 g/L의 공급수가 적용되면 투과 유량은 0.78 L/min, 물 플럭스는 $6.70 \text{ L/m}^2\text{h}$ 를 얻었다. 각각의 초기 삼투압은 앞에서 언급한 바와 같이 56.1, 47.4, 35.0 bar이었다. 특히, 35.4 g/L의 공급수가 적용된 경우에는 유도용액의 농도를 공급수의 농도보다 더 낮게까지 희석하여 공급수의 삼투압이 유도용액측의 삼투압보다 더 높아지게 유도하여 물의 투과 방향이 역전되는 현상을 확인하였다. Fig. 3(f)에서 음의 값을 보이는 투과유량과 플럭스는 투과 방향이 바뀐 것을 의미한다.

Fig. 4는 Fig. 3의 데이터를 삼투압차에 대해 투과유량으로 다시 도시한 것이다. 공급수의 농도가 다른 3가지 조건에서도 유도용액의 농도에 따라 동일한 삼투압차를 가질 수 있지만 세 경우의 투과유량이 모두 다른 것을 확인할 수 있었다. 이는 동일한 삼투압차라도 공급수의 농도가 높아질수록 RSD로 인해 지지층의 ICP 상승에 영향을 주기 때문인 것으로 보인다.

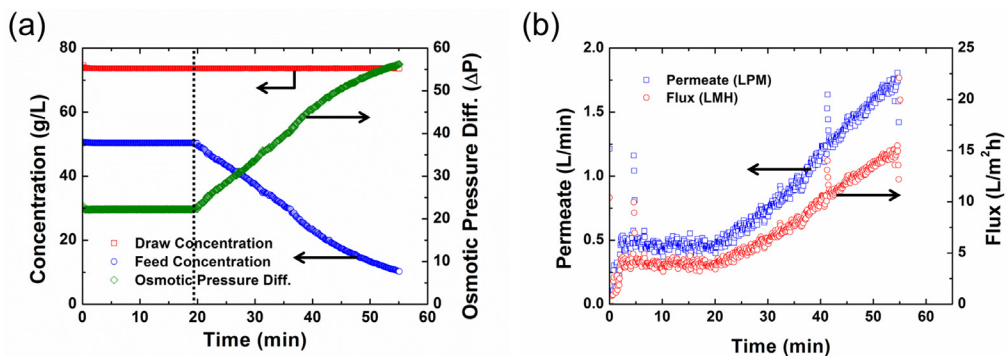


Fig. 5 Effect of osmotic pressure difference increasing on water permeation for single FO element. Initial draw and feed concentrations are 73.7 and 50.5 g/L, respectively. (a) solution concentration (left Y-axis) and osmotic pressure difference (right Y-axis) as a function of time. (b) the corresponding water permeate (left Y-axis) and flux (right Y-axis) as a function of time

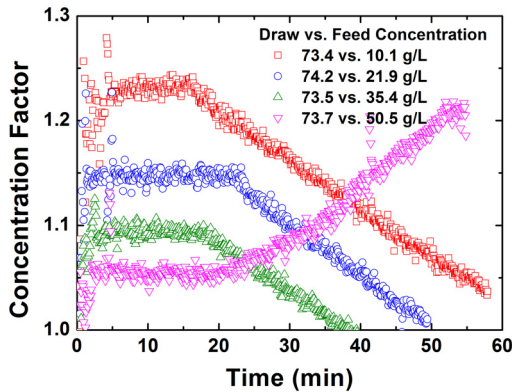


Fig. 6 Concentration factor as a function of time for the results of Figs. 3 and 5

4.2.2 투과 성능에 대한 삼투압차 증가의 영향

Fig. 5는 삼투압차의 증가에 따른 단일 정삼투막 엘리먼트의 투과 성능을 보여주고 있다. 약 73.7 g/L의 유도용액과 50.5 g/L의 공급수를 대응시켰으며, 4.2.1항의 경우와는 반대로 유도용액의 농도는 실험 전 기간동안 일정하게 유지한 반면, 공급수의 농도는 일정 시간이 지난 후에 물을 일정한 유량으로 투입하여 희석하면서 농도변화(삼투압차 변화)를 유도하였고 그에 따른 모듈의 투과성능을 측정하였다.

Fig. 5(a)는 시간에 따른 두 용액의 농도 변화를 보여주고 있으며, Fig. 5(b)는 그에 따른 투과유량과 물 플럭스 결과를 보여주고 있다. 이 두 용액의 초기 삼투압 차는 약 22.2 bar이며, 그림 내에 표시된 수직의 점선이 위치하는 시간까지는 공급수의 농도를 변화시키지 않고 일정하게 유지하였다. 이후, 공급수에 물을 투입하여 희석할수록 유도용액과의 삼투압차는 점차 커졌다.

73.7 g/L의 유도용액에 대해 50.5 g/L의 공급수가 적용되었을 경우, 투과 유량은 0.41 L/min, 물 플럭스는 3.49 L/m²h를 얻을 수 있었다. 공급수가 희석되어 유도용액과의 삼투압차가 점점 커지게 되면 막 엘리먼트에서의 투과유량도 점차 늘어나는 것을 확인하였다.

4.3 단일 정삼투막 엘리먼트의 농축 성능

4.2절의 정삼투 실험을 통해 공급수중의 물은 유도용액 쪽으로 투과되어 공급수의 농도는 올라가며 부피는 감소하게 된다. 실험 데이터로부터 농축 팩터(Concentration Factor)는 아래와 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$Conc. Factor = \frac{1}{1-Y} \quad (6)$$

여기서, Y는 회수율(recovery)을 나타낸다.

4.2절의 실험에서 얻은 데이터를 농축팩터로 표현해 보면 Fig. 6과 같다. 유도용액이 희석된 경우의 농축 팩터는 시간이 지남에 따라 감소하는 모양을 보이며 공급수가 희석된 경우의 농축 팩터는 시간이 지남에 따라 증가하는 모양을 보인다. 실제로는 시간에 따른 변화라기보다는 삼투압차의 변화로 인해 농축팩터도 변한 것이다. Fig. 3(a),(c),(e)와 Fig. 4(a)의 농도 변화가 없는 영역에서의 농축팩터는 각각 약 1.22, 1.16, 1.09, 1.05이다. 이는 각각의 실험조건에서 공급수가 막 엘리먼트 1개를 한 번 통과하면 농축팩터의 수치만큼 농축이 된다는 것을 의미한다.

4.4 복수의 정삼투막 엘리먼트의 직렬 연결시 투과 성능

실제 모든 수처리 플랜트에서는 처리 용량을 맞추기 위해 단일 엘리먼트를 직렬 및 병렬로 연결하여 시스템을 구성한다. 직렬 연결은 공급수를 연속적으로 처리하여 회수율을 높이기 위해서는 꼭 필요한 연결방식이다. 하지만, 사용된 막 전체 면적을 고려하여 계산한 플럭스는 단일 엘리먼트에서의 플럭스에 비해 작아진다. 직렬 연결된 엘리먼트로 공급되는 유량에는 한계가 있기 때문에 투과량 또한 공급수 유량이 최대 한계값이다. 물론 회수율은 농축에 의한 스케일링 등을 방지하기 위해서 70-80% 이상 올릴 수는 없다. 결국, 시

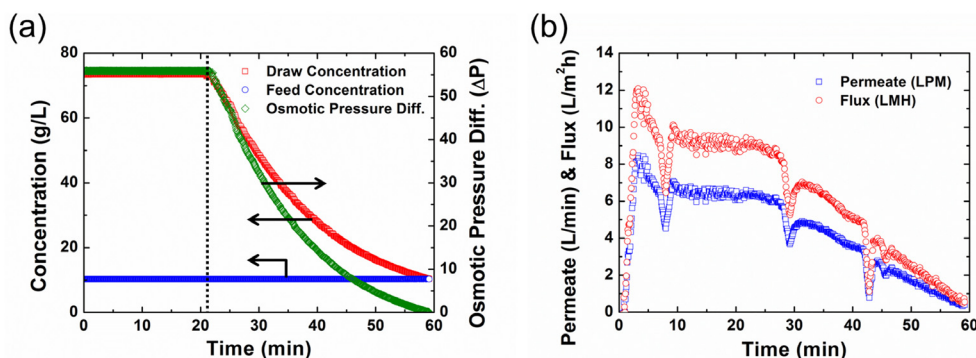


Fig. 7 Effect of osmotic pressure difference decreasing on water permeation for 6 elements combined in series. Initial draw and feed concentrations are 73.4 and 10.3 g/L, respectively. (a) solution concentration (left Y-axis) and osmotic pressure difference (right Y-axis) as a function of time. (b) the corresponding water permeate (left Y-axis) and flux (left Y-axis) as a function of time

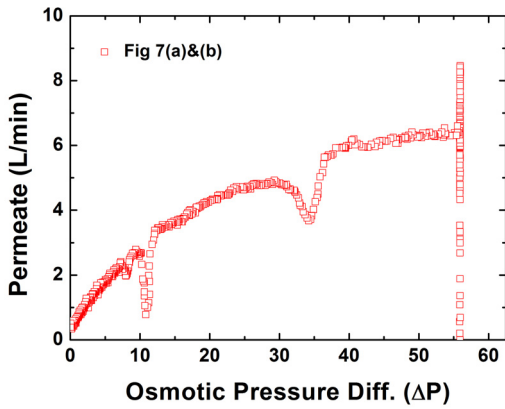


Fig. 8 Water permeate as a function of osmotic pressure difference for 6 elements combined in series

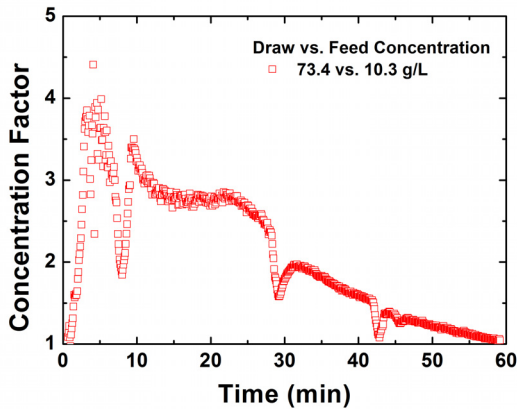


Fig. 9 Concentration factor as a function of time for 6 elements combined in series

시스템의 처리용량을 맞추기 위해서는 직렬과 병렬이 조합되어 연결되어야 한다.

Fig. 7은 엘리먼트의 직렬 연결시(6개) 삼투압차의 감소에 따른 투과 성능을 보여주고 있다. 73.4 g/L의 유도용액에 대해 10.3 g/L의 공급수가 적용되었을 경우 농도 변화가 없을 때의 투과 유량은 6.34 L/min, 물 플럭스는 9.06 L/m²h이었다. 앞에서 언급한 바와 같이 투과유량은 커지고 플럭스는 작아지는 것을 알 수 있다. 공급수의 유량이 약 10 L/min이기 때문에 회수율은 약 63.4 %였다. Fig. 7(a)는 시간에 따른 용액의 농도 변화이며, Fig. 7(b)는 그에 따른 투과 유량과 플럭스값을 나타내고 있다. 초기 10분까지는 안정화가 안된 상태의 데이터이며, 두 번의 아래 방향으로의 현팅은 밸브 조작으로 인한 약간의 압력변화에 따른 영향이다.

막 엘리먼트가 여러 개 직렬로 연결됨에 따라 투과유량은 점차 증가하였지만 엘리먼트 1개의 투과유량의 배수로 증가되지는 않았다. 이는 막 엘리먼트 1개를 통과하면서 공급수와 유도용액의 농도가 점차 변하고 결국 뒤쪽 엘리먼트로 갈수록 두 용액간의 삼투압차가 점차 줄어들므로 투과유량이 감소하였기 때문이다. 물론 6개 엘리먼트 전체의 막면적을 기준으로

하는 플럭스도 엘리먼트 1개의 플럭스보다 크게 줄었다.

Fig. 8은 Fig. 7의 데이터를 삼투압차에 대한 투과유량으로 다시 도시한 것이다. 삼투압차가 증가함에 따라 투과유량은 증가하였지만 그 기울기는 삼투압차가 증가함에 따라 조금씩 감소하였다. 약 56 bar의 삼투압차에서 수직방향으로 투과유량 데이터가 표시된 것은 운전 시작시 안정화되기 전의 투과유량의 변화를 나타낸다.

4.5 복수의 정삼투막 엘리먼트의 직렬 연결시 농축 성능

4.4절의 실험결과를 농축팩터로 표현해 보면 Fig. 9와 같다. 6개의 엘리먼트가 직렬로 연결된 하나의 모듈에서는 앞에서 언급한 조건에서 공급수가 2.76 배가량 농축되는 것을 확인할 수 있었다. 유도용액의 희석에 따른 삼투압차 감소 시에는 당연히 농축팩터도 감소한다. 물이 유도용액 쪽으로 투과됨에 따라 부피의 감소가 일어나고 농도 또한 3배가량 상승하였다.

평판형 모듈의 유로는 구조적으로 나권형 모듈에 비해 단순하기 때문에 입출구간의 압력강하가 크지 않았다. 이는 나권형에 비해 직렬로 연결하여 투과유량을 쉽게 키울 수 있다는 장점을 갖는다. 또한, 공급수의 농도를 고려하여 유도용액의 농도를 증가시키면 3 배 이상의 농축도 가능할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 평판형 정삼투막 엘리먼트와 이 엘리먼트가 직렬로 연결된 모듈의 성능을 삼투압차를 변화시키면서 분석하였다. 작은 면적만 사용하여 분석하게 되는 막의 성능과는 달리, 실제 공정 및 시스템에 사용하는 대면적 엘리먼트의 성능은 큰 차이를 보였으며, 6개의 엘리먼트를 직렬로 연결하여 막면적을 더 증가시키면 사용된 총면적에 기반을 둔 플럭스는 더 큰 감소를 보였다. 하지만, 앞에서 설명한 바와 같이 공급수를 연속적으로 처리하여 회수율을 높이기 위해서는 엘리먼트의 직렬 구성은 꼭 필요하며 그러한 직렬 구성 시 성능 분석은 실제 수처리 플랜트를 설계하기 위해 반드시 선행되어야 한다.

막분리 공정은 모듈의 직병렬 어레이 설계를 얼마나 최적화하느냐에 따라 성능이 좌우된다. 하지만, 역삼투 공정과는 달리, 정삼투 공정은 다양한 조건에서의 막모듈에 대한 성능 데이터나 공정을 설계하기 위한 전용 프로그램이 아직 없기 때문에 설계가 어려운 실정이다. 따라서 정삼투 시스템 설계를 위해서는 다양한 조건에서 얻은 많은 양의 실험 데이터와 그런 데이터에 기반을 둔 수치분석 및 예측기능을 갖는 설계 프로그램의 개발이 반드시 필요하다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업(NK197B)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Igunnu, E. T. and Chen, G. Z., 2012, "Produced Water Treatment Technologies," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 0, pp. 1~21.
- (2) Coday, B. D., Xu, P., Beaudry, E. G., Herron, J., Lampi, K., Hancock, N. T., and Cath, T. Y., 2014, "The Sweet Spot of Forward Osmosis: Treatment of Produced Water, Drilling Wastewater, and Other Complex and Difficult Liquid Streams," *Desalination*, Vol. 333, pp. 23~35.
- (3) Coday, B. D. and Cath, T. Y., 2014, "Forward Osmosis: Novel Desalination of Produced Water and Fracturing Flowback," *Journal AWWA*, Vol. 106, No. 1, pp. 55~66.
- (4) McGinnis, R. L., Hancock, N. T., Nowosielski-Slepowron, M. S., and McGurgan, G. D., 2013, "Pilot Demonstration of the NH₃/CO₂ Forward Osmosis Desalination Process on High Salinity Brines," *Desalination*, Vol. 312, pp. 67~74.
- (5) Kim, Y. C. and Park, S. J., 2011, "Experimental study of a 4040 Spiral-Wound Forward Osmosis Membrane Module," *Environmental Science and Technology*, Vol. 45, pp. 7737~7745.
- (6) Cath, T. Y., Elimelech, M., McCutcheon, J. R., McGinnis, R. L., Achilli, A., Anastasio, D., Brady, A. R., Childress, A. E., Farr, I. V., Hancock, N. T., Lampi, J., Nghiem, L. D., Xie, M., and Yip, N. Y., 2013, "Standard Methodology for Evaluating Membrane Performance in Osmotically Driven Membrane Processes," *Desalination*, Vol. 312, pp. 31~38.
- (7) McCutcheon, J. R. and Elimelech, M., 2006, "Influence of Concentrative and Dilutive Internal Concentration Polarization on Flux Behavior in Forward Osmosis," *Journal of Membrane Science*, Vol. 284, pp. 237~247.
- (8) Phillip, W. A., Yong, J. S., and Elimelech, M., 2010, "Reverse Draw Solute Permeation in Forward Osmosis: Modeling and Experiments," *Environmental Science and Technology*, Vol. 44, pp. 5170~5176.