

나권형 모듈을 이용한 압력지연삼투 공정의 에너지생산에 관한 연구 Assessment of Power Generation by Pressure Retarded Osmosis Process from Spiral-Wound Membrane Pilot-Plant

고길현 · 박태신* · 강임석[†]
Gil hyun Go · Tae shin Park* · Lim seok Kang[†]

부경대학교 환경공학과 · *GS건설
Department of Environmental Engineering, Pukyong National University · *GS E&C

(Received January 18, 2016; Revised February 4, 2016; Accepted August 15, 2016)

Abstract : Pressure retarded osmosis (PRO) is a quite new technique for power generation using an osmotically driven membrane process. In the PRO process, water permeates through a semipermeable membrane from a low concentration feed solution to a high concentration draw solution due to osmotic pressure. This study carried out to evaluate the performance of the 8 in spiral wound membrane module using reverse osmosis concentrate for a draw solution and reverse osmosis permeate for a feed solution. Three different flowrates of draw and feed solution, such as 2.4 L/min, 5.0 L/min, and 10.0 L/min were used to estimate the power density and water flux under various range of hydraulic pressure differences between 5 bar and 30 bar. In addition, the effects of feed and draw solution concentration, flowrate, and mixing ratio on 8 in spiral wound PRO membrane module performance were investigated in this study. As major results, increases of the draw solution concentration lead to the improvement of power density, and water flux. Also, increase of flowrate resulted in the improvement of power density and water flux. In addition, optimal mixing ratio of draw and feed solution inlet flowrate was found to be 1:1 to attain a maximum power density.

Key Words : Pressure Retarded Osmosis, Water Flux, Power Density, Spiral Wound Module

요약 : 압력지연삼투는 삼투압을 구동력으로 하여 에너지를 생산하는 새로운 막 기술이다. 압력지연삼투는 반투과성 막을 사이에 두고 삼투압으로 인해 저농도의 유입원수가 고농도의 유도용액으로 이동하는 것이다. 본 연구는 역삼투 공정의 농축수를 유도용액으로, 역삼투 공정의 생산수를 유입원수로 하여 8인치 나권형 막모듈의 성능을 평가 하였다. 실험에 사용된 유입원수와 유도용액의 유량은 2.4 L/min, 5.0 L/min, 10.0 L/min, 압력범위는 5 bar에서 30 bar이다. 유입원수와 유도용액의 농도, 유입유량, 유입비에 따른 공정 성능의 영향을 본 연구에서 확인 하였다. 중요 결과로 유도용액의 농도의 증가는 압력지연삼투 공정의 전력밀도, 투과수량을 향상시키는 결과를 보였다. 유입유량의 증가 또한 전력밀도와 투과수량을 향상시키는 결과를 보였다. 또한 최대 전력밀도를 형성하는 유입원수와 유도용액의 최적 유입비는 1:1의 비에서 나타났다.

주제어 : 나권형 모듈, 압력지연삼투, 전력밀도, 투과수량

1. 서론

최근 세계적으로 화석연료를 통한 에너지 공급 불균형 해소 및 안정적이고 원활한 에너지 공급을 위하여 주요 선진국들을 중심으로 새로운 에너지원의 개발이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 현재 활발히 연구되거나 이미 개발 단계에 있는 신·재생 에너지 종류에는 소수력, 지열, 태양열·광, 풍력, 바이오매스 등이 있으며,¹⁾ 2013년 기준 전 세계 평균 전력의 22.1%를 신·재생 에너지가 담당하고 있는 것으로 보고되었다.²⁾

이러한 신·재생 에너지 중 하나로 두 용액의 염분농도차를 이용하여 에너지를 생산하는 새로운 방식이 주목받고 있다. 이 기술은 염도차 발전이라 불린다. 이러한 염도차 발전 기술 중 하나인 압력지연삼투(Pressure retarded osmosis, PRO)는 저농도의 feed solution과 고농도의 draw solution 사이에 반투과 막을 놓아 저농도의 용액이 삼투압 차에 의해 반투막을 통과하여 고농도 용액으로 투과되며, 이 때 증

가한 유량이 터빈을 회전시켜 에너지를 생산한다.^{3,4)} 즉, 두 용액간의 농도차에 의해 발생한 삼투압이 수압의 형태로 바뀌어 이 수압이 터빈을 회전시켜 에너지를 얻는 것이다. 다른 전력생산 대체 에너지원 보다 원천자원인 해수와 강물에 대한 변화 요소가 적어 안정적인 친환경 기술이라 할 수 있으며,⁵⁾ 온실가스를 배출하지 않는 청정에너지 기술이기도 하다.⁶⁾ 또한 작은 부지의 사용과 24시간 운전할 수 있다는 장점도 가지고 있다.⁷⁾ PRO 공정의 유입원수는 크게 해수 공정수, 지표수, 하수처리장 방류수, 재이용수, 기수 또는 지하수 등 PRO 공정이 설치되는 지역의 특성에 맞게 다양한 원수를 활용할 수 있다.⁸⁾

최근에는 에너지 생산의 목적만이 아니라 다양한 수처리 및 담수화 공정에 결합하여 전체 에너지 사용감소를 위한 연구가 진행되고 있다. 압력지연삼투 공정에서 에너지 생산량을 나타내는 지표로서 사용되는 전력밀도는 노르웨이의 Statkraft사에서⁹⁾ 3 W/m², 일본의 ‘메가톤 물 시스템’에서¹⁰⁾ 4.4 W/m²로 보고된바 있으며, Kim 등¹¹⁾의 나권형 막 모듈을

[†] Corresponding author E-mail: kangls@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6527 Fax: 051-629-6523

Table 1. Summary of experimental results using NaCl concentrations > 6% as draw solution

PRO scheme (feed solution vs. draw solution)	Operating pressure (bar)	Water flux (Lm ⁻² h ⁻¹)	Power density (Wm ⁻²)	Membrane type	Source
River water (< 0.6% NaCl) vs. seawater brine (≈ 6% NaCl)	8.4	47.2	11	Customized TFC hollow fiber membrane for PRO	
Waste water brine (0.23% NaCl) vs. seawater brine (≈ 6% NaCl)	9.0	42.5	10.6	Customized TFC hollow fiber membrane for PRO	Wang et al. ¹²⁾ Chou et al. ¹³⁾
Concentrated waste water brine (≈ 0.5% NaCl) vs. A seawater brine (≈ 6% NaCl)	9.1	33.3	8.4	Customized TFC hollow fiber membrane for PRO	
DI water (0.0% NaCl) vs. 6% NaCl solution	9.7	19.0	5.1	Commercial flat sheet cellulose triacetate FO membrane from HTI	
Brackish water (≈ 0.25% NaCl) vs. seawater brine (≈ 6% NaCl)	9.7	16.2	≈ 4.0	Commercial flat sheet cellulose triacetate FO membrane from HTI	Achilli et al. ¹⁴⁾
Brackish water-concentrated (≈ 0.5% NaCl) vs. seawater brine (≈ 6% NaCl)	9.7	16.2	≈ 4.0	Commercial flat sheet cellulose triacetate FO membrane from HTI	
Water (< 0.06% NaCl) vs. 6% NaCl solution	13.0	11.0	3.8	Commercial asymmetric cellulose acetate membrane from HTI	She et al. ¹⁵⁾

이용한 연구에서 1.0 W/m²로 보고된바 있다. Table 1은 실험실 규모의 실험을 통한 연구결과를 나타낸 것이다. 현재까지 PRO 실험은 주로 중공사막과 평막을 이용한 연구가 진행되었으며, 최대전력밀도를 형성하는 압력은 8~13 bar로 이론적인 최대전력밀도 형성 압력보다 현저히 낮은 압력에서 형성되는 것을 알 수 있다. 25℃에서 6~7% NaCl 용액의 삼투압은 각각 50.2 bar, 58.6 bar로 이론상 얻을 수 있는 최대전력밀도는 각각 25.1 bar, 29.3 bar에서 최대 전력 밀도가 형성 되어야 한다. 평막과 중공사막 모두 막의 내압성의 한계로 인해 이론적 최대전력밀도 형성 압력에서 형성되지 못한 것으로 생각된다. 이러한 내압성의 한계를 극복하기 위해 기존 국·내외 연구결과에 비교하여 내압성이 높은 8 in 나권형 모듈을 사용 하였으며, 보다 실제 규모에 가까운 20 m³/d 규모의 파일럿을 연구에 사용하였다.

따라서 본 연구는 이론상 최대전력밀도 형성 압력에서 최대 전력밀도를 얻기 위해 PRO 전용 막으로 제작된 8 in 나권형 모듈을 이용하였다. 또한 PRO 막의 성능은 유도용액과 유입원수의 농도, 유량, 온도에 영향을 받는 것으로 보고된바 있다.^{19,20)} 따라서 유도용액의 압력을 저압(5 bar)에서 고압(30 bar)으로 변화시키면서 유도용액의 염분 농도와 유도용액 및 유입원수의 유량 변화에 따른 PRO 막의 성능 변화를 조사하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에 사용된 PRO 모듈은 Toray Chemical 사에서 제공한 CSM-PRO 2 모듈을 사용하였다. 막의 제원은 Table 2에 나타내었으며 막 모듈의 구조는 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 용액은 염분농도 35,000 mg/L (0.6 M NaCl)을 제조하여 RO 공정을 거친 후 농축수는 유도용액(염분농도

Table 2. Parameters of membrane used for CSM-PRO 2

Module type	Active layer	Structure	A value	B value	S value
Spiral wound	18 m ²	PA/SL/BL	2.5 L/m ² ·h·bar	0.6 L/m ² ·hr	1.1 mm

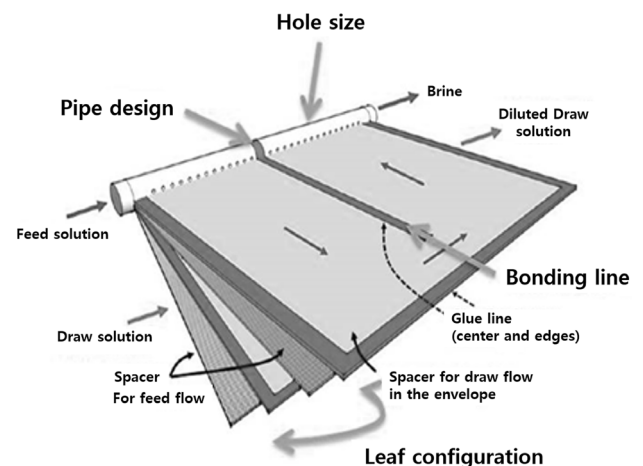


Fig. 1. A schematic illustration of PRO membrane module.

50,000 or 70,000 mg/L)으로 생산수(RO 투과수)는 유입원수(염분농도 400 mg/L)로 사용하였다.^{15,16)}

2.2. 압력지연삼투 공정

압력지연삼투 공정은 20 m³/day 규모의 파일럿 플랜트를 통해 실험을 진행하였다. Fig. 2는 압력지연삼투 공정의 모식도이다. 유도용액은 고압펌프에 의해 압력지연삼투 모듈로 유입되며, 유입원수는 저압펌프에 의해 압력지연삼투 모듈로 유입된다. 두 용액 모두 컨트롤 밸브와 리턴 밸브에 의해 유량을 조절하며, 유도용액의 경우 backpressure 밸브에 의해 압력을 제어하게 된다. 투과수량 및 전력밀도는 유도용액의 유량 변화를 통해 30초 단위로 측정하여 계산하였다.

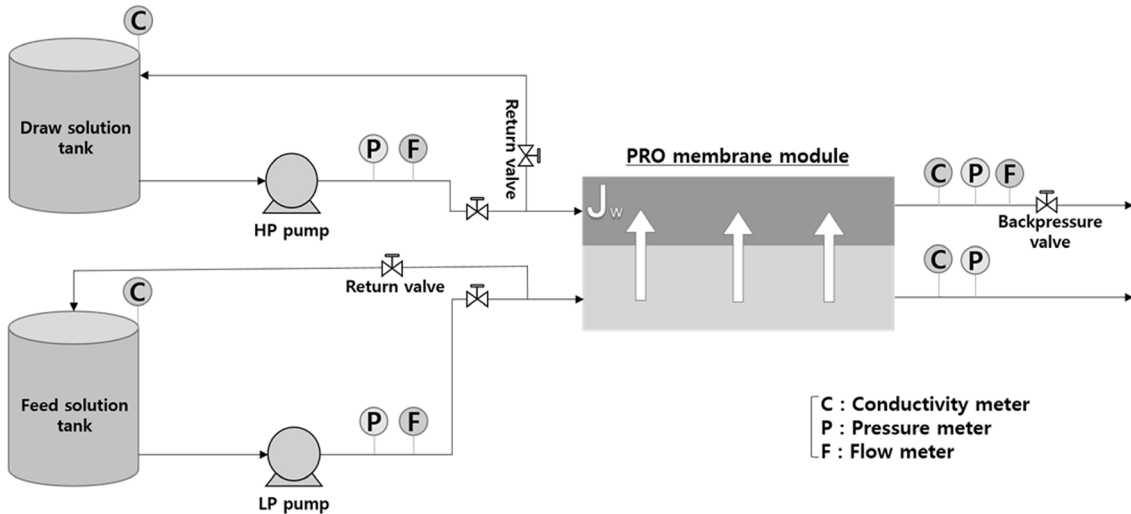


Fig. 2. Schematic of pressure retarded osmosis process.

2.3. 압력지연삼투 공정의 분석

압력지연삼투 공정에서 물은 반투과성막을 통해 저농도 유입원수(feed solution)에서 고농도 유도용액(draw solution)으로 이동하며, 그 성능은 용액-확산(solution-diffusion) 모델에서 유도된 투과수량 식과 단위 면적당 전력밀도로 표현된다. 이때, 압력지연삼투공정의 투과되는 물의 흐름은 역삼투 공정과는 반대 방향이므로, 식 (1)과 같이 변형되었으며 투과수량 및 전력밀도는 아래의 식과 같다.

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1)$$

$$W = J_w \Delta P = A(\Delta\pi - \Delta P) \Delta P \quad (2)$$

여기서 J_w 는 투과수량[L/m²hr], W 는 전력밀도[W/m²], $\Delta\pi$ 는 삼투압 차[bar], ΔP 는 압력차[bar]를 의미한다.

식 (1), (2)에 따르면 압력이 증가할수록 투과수량은 낮아지고, 삼투압 차의 1/2의 압력이 가해질 때 최대 전력밀도

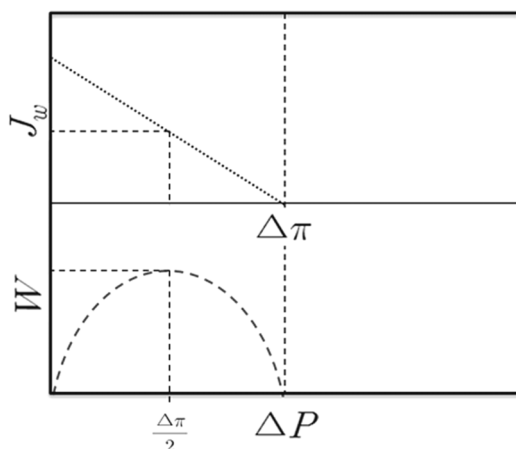


Fig. 3. Magnitude and direction of J_w and magnitude of W for PRO.

를 형성하게 된다. Fig. 3은 식 (1), (2)에 따른 투과수량과 전력밀도를 나타낸 그래프이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유도용액의 염분농도에 따른 영향

Fig. 3의 (a)와 (c)는 유도용액과 유입원수의 유입량을 5.0 L/min, (b)와 (c)는 유도용액과 유입원수의 유입량을 10.0 L/min 조건에서의 투과수량과 전력밀도를 나타낸 것이다. 5.0 L/min의 유량에서는 50,000 mg/L의 경우 15.1 bar에서 1.24 W/m²의 70,000 mg/L의 경우 17.7 bar에서 2.71 W/m²이 도출되었으며, 유입유량 10.0 L/min 조건에서 최대 전력밀도는 50,000 mg/L의 경우 18.3 bar에서 1.83 W/m², 70,000 mg/L의 경우 19.2 bar에서 3.68 W/m²이 도출되었다. 유도용액의 염분 농도가 높은 경우 높은 투과수량과 전력밀도를 형성한 것을 알 수 있는데,¹⁵⁾ 이는 높은 삼투압차를 가질 때 높은 투과수량을 형성하여 높은 전력밀도를 도출할 수 있다는 것을 위의 식 (1)과 (2)를 통해 설명이 가능하다. 식 (2)에 따르면 50,000 mg/L와 70,000 mg/L 염분농도를 가진 유도용액에서의 이론적 최대전력밀도 형성 압력은 약 20 bar와 29 bar이나 최대 전력밀도가 이론상의 압력보다 낮은 압력에서 형성 되는 것은 막 내·외부의 농도분극 현상 및 역염투과에 의한 유효 삼투압의 저하로 인한 결과¹⁷⁾로 판단된다. 그러나 본 연구에서 사용된 내압성이 높은 나관형 모듈을 사용함으로써 Table 1에서 나타낸 연구결과들에 비교하여 보다 높은 압력에서 최대전력밀도를 형성하는 것을 알 수 있다.

3.2. 유도용액과 유입원수의 유입유량에 따른 영향

유도용액과 유입원수의 유입유량에 따른 영향을 비교하기 위해 두 용액의 유입 비를 1 : 1로 하여 유입 유량변화에 따

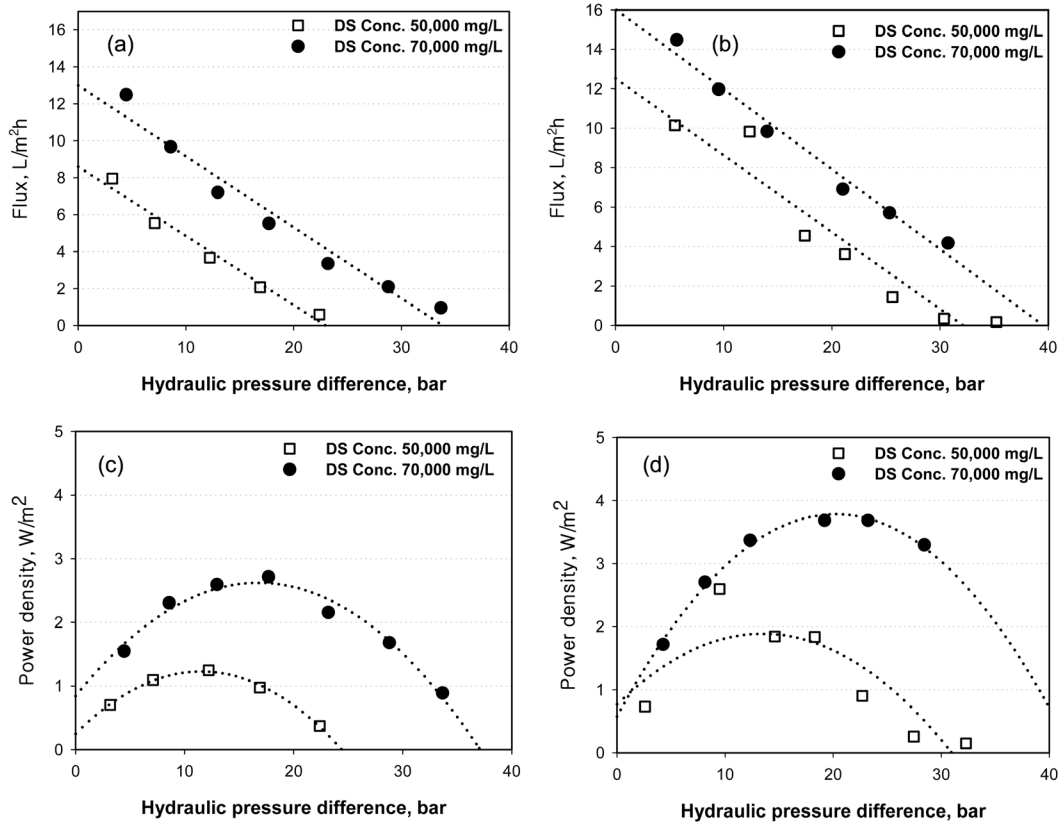


Fig. 4. Effect of the salt concentration on the PRO performance with hydraulic pressure difference. Draw and feed solution inlet flowrate: (a) and (c) 5.0 L/min, (b) and (c) 10.0 L/min. Experimental conditions used: TDS 400 mg/L for feed solution and ambient temperature.

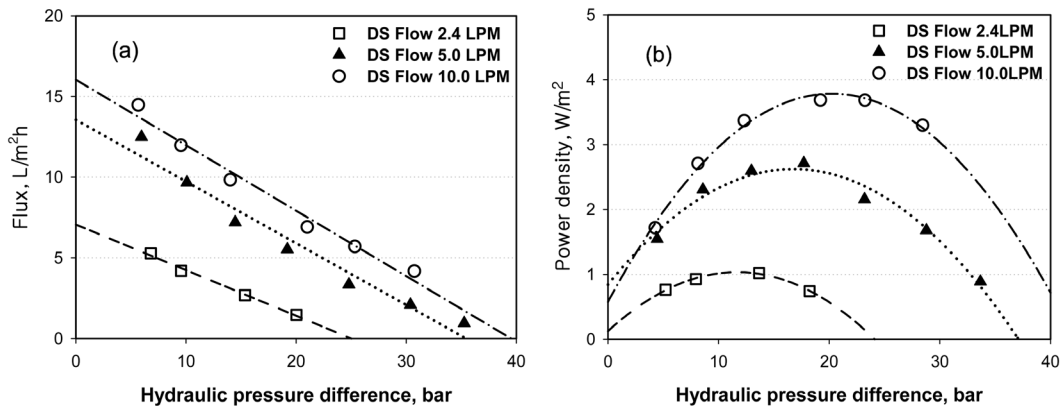


Fig. 5. Effect of the draw solution and feed solution inlet flowrate on the PRO performance with hydraulic pressure difference. Experimental conditions used: TDS 70,000 mg/L for draw solution, TDS 400 mg/L for feed solution and ambient temperature.

른 투과수량 및 전력밀도를 비교하였다. Fig. 5는 유량 변화에 따른 투과수량 및 전력밀도를 나타낸 것이다. 2.4 L/min의 유량에서 유도용액과 유입원수의 유속은 각각 0.42 cm/s, 0.53 cm/s이며, 5.0 L/min의 유량에는 각각 0.88 cm/s, 1.10 cm/s이며, 10.0 L/min에서는 각각 1.75 cm/s, 2.19 cm/s이다. 2.4 L/min의 유량에서 최대 전력밀도는 0.7 W/m², 5.0 L/min의 유량에서는 2.71 W/m², 10.0 L/min의 유량에서는 3.68 W/m²이 도출되었다. 유량이 증가할수록 투과수량이 증가하고 이로 인해 전력밀도 또한 높게 나타나는 것을 알 수

있다. 또한 최대전력밀도를 형성하는 압력은 유량이 증가할수록 각각 13.6 bar, 17.7 bar, 19.2 bar로 증가하였다. Kim 등¹¹⁾의 연구에 따르면 유도용액의 염분농도 70,000 mg/L, 유입원수로 수돗물을 사용하여 유도용액 22.5 L/min, 유입원수 7 L/min의 유량 조건에서 연구결과 15.6 bar에서 최대 전력밀도 2.1 W/m² 얻었다. 그러나 본 연구에서는 이와 가장 유사한 5.0 L/min, 10.0 L/min 유량 조건에서 각각 17.7 bar, 19.2 bar에서 2.71 W/m², 3.68 W/m²으로 높은 압력에서 높은 전력밀도를 얻었다. 이는 유량의 변화는 막 내부의

유속을 변화시키므로써 막 표면의 물질전달 층의 두께를 변화시키며,¹⁸⁾ 유속의 증가는 물질 전달 층의 두께를 줄여 그 결과 막과 유도용액 경계의 외부농도분극을 감소시켜^{7,19)} 최대 전력밀도와 최대 전력밀도 형성 압력이 올라가는 것으로 판단된다.

3.3. 유도용액과 유입원수의 유입비에 따른 영향

유도용액과 유입원수의 유량 유입비에 따른 투과수량 및 전력밀도의 비교하였다. 유도용액의 염분농도는 70,000 mg/L이며, Table 3에 각각의 비에 대한 유도용액과 유입원수의 유량을 나타내었다. Fig. 6은 유도용액의 유량 5.0 L/min과 10.0 L/min에서 유도용액/유입원수의 비에 따른 투과수량 및 전력밀도를 나타낸 것이다.

유도용액의 유입량이 5.0 L/min일 때 1 : 1의 유입비에서 17.7 bar에서 2.71 W/m²으로 가장 높게 나타났으며, 10.0 L/min일 때 1 : 1의 유입비에서 19.2 bar에서 3.68 W/m²의 최대 전력 밀도를 얻었다. 투과 수량 또한 각각의 압력에서 5.51 L/m²·hr, 6.90 L/m²·hr로 가장 높게 나타났다. Altaee and

Sharif⁷⁾의 보고에 따르면 유도용액/유입원수의 비가 높을수록 투과수량은 증가에 의한 전력밀도 증가가 나타났으며, 유입원수/유도용액의 비의 증가는 투과수량에 영향을 미치지 않는다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 유도용액의 유량이 5.0 L/min의 1 : 1 (5 L/min : 5 L/min)의 비와 10.0 L/min의 1 : 0.5 (10.0 L/min : 5 L/min)의 투과수량 및 전력밀도 비교 시 유도용액의 유량의 증가에 따른 유도용액/유입비의 증가는 투과수량 및 전력밀도의 증가를 보였으나, 유입원수의 증가에 따른 유입원수/유도용액 비의 증가는 투과수량 및 전력밀도 비교 시 유도용액의 유량 5.0 L/min, 10.0 L/min 조건 모두 유입원수의 유량이 변화함에 따라 투과수량 및 전력밀도 또한 변화하여 유입원수의 유량 변화 또한 투과수량 및 전력밀도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 유입원수의 증가에 따른 투과수량 및 전력밀도의 증감은 일정하지 않으나, 본 연구에서 사용된 8 in 막 모듈에서 적용 시 5.0 L/min과 10.0 L/min 유량 조건 모두 유도용액과 유입원수의 비가 1 : 1일 때 가장 높은 투과수량과 전력밀도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 향후 유입원수의 유량 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Ratio of draw solution and feed solution flow rate

DS flowrate	FS flowrate			
	Ratio 1:0,5	1:1	1:1,5	1:2
5,0 L/min	2,5 L/min	5,0 L/min	7,5 L/min	10,0 L/min
10,0 L/min	5,0 L/min	10,0 L/min	15,0 L/min	-

4. 결론

본 연구는 증공사막이 가지는 내압성의 한계를 극복하기 위한 방안으로 나권형 모듈을 사용하였으며, 유도용액의 염

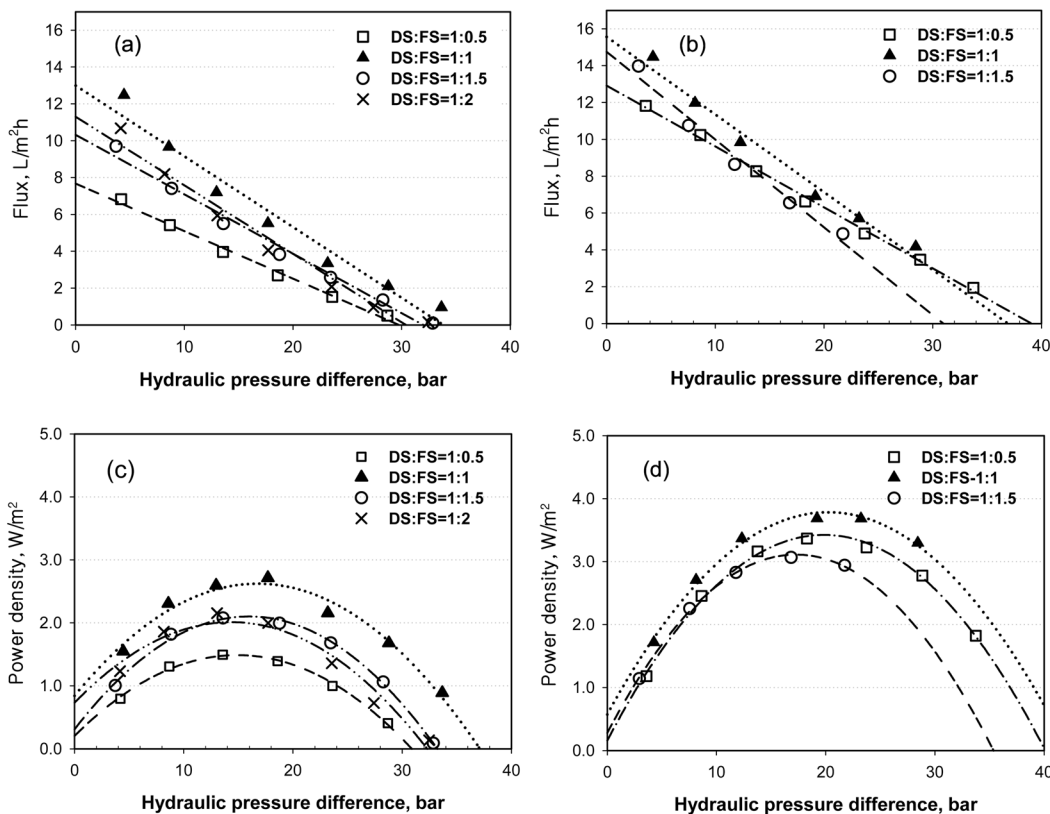


Fig. 6. Effect of the draw solution and feed solution mixing ratio on the PRO performance with hydraulic pressure difference. Experimental conditions used: TDS 70,000 mg/L for draw solution, TDS 400 mg/L for feed solution, and ambient temperature.

분농도 및 유량, 유도용액과 유입원수의 유입 비에 따른 압력지연삼투 공정의 투과수량 및 전력밀도를 조사하였다. 중요 결과로 나권형 모듈의 사용 시 증공사 막을 이용한 기존의 연구결과 보다 6~10 bar 높은 압력에서 최대전력밀도를 형성하였으며, 유도용액의 염분농도가 높을수록, 유도용액과 유입원수의 유량이 높을수록 유효삼투압차의 증가로 높은 투과수량 및 전력밀도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 유도용액과 유입원수의 유입 비에 따른 비교 결과, 1:1의 유입비에서 가장 높은 투과수량 및 전력밀도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 이 연구를 통해 압력지연삼투 공정에서 유도용액의 염분농도와 유도용액 및 유입원수의 유량 및 유입비에 따른 투과수량 및 전력밀도의 영향을 알 수 있었다. 또한 유입원수의 유량 변화에 따른 투과수량 및 전력밀도에 대한 추가적인 연구가 필요 할 것으로 보이며, 본 연구의 결과를 토대로 공정 설계 시 유도용액의 염분농도와 유도용액 및 유입원수의 유량을 고려한 공정설계가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원 (과제번호 16IFIP-B065893-04)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

- Choi, Y. G., "National policy to foster renewable energy industry," *News Information Chem. Eng.*, **26**(5), 502~505 (2008).
- REN21, "Renewables 2014 Global Status Report," pp. 1~216(2014).
- Loeb, S., "Production of energy from concentrated brines by pressure retarded osmosis I. Preliminary technical and economic correlations," *J. Membr. Sci.*, **1**(1), 49~63(1976).
- Loeb, S., "Large-scale power production by pressure-retarded osmosis, using river water and sea water passing through spiral modules," *Desalination*, **355**, 108~115(2002).
- Logan, B. E. and Elimelech, M., "Membrane-based processes for sustainable power generation using water," *Nature*, **488** (16), 313~319(2012).
- Han, G., Zhang, S., Li, X. and Chung, T. S., "High performance thin film composite pressure retarded osmosis (PRO) membranes for renewable salinity gradient energy generation," *J. Membr. Sci.* **440**, 108~121(2013).
- Altaee, A. and Sharif, A., "Pressure retarded osmosis: advancement in the process applications for power generation and desalination," *Desalination*, **356**, 31~46(2015).
- Lee, S. H., Choi, J. S. and Hwang, T. M. "What Can We Expect on the Next Generation Desalination Technology in the Future Civil and Environmental Engineering?," *KSCE J. Civil Eng.*, **61**(5), 102~107(2013).
- Kim, J. H., Kim, S. H., Kim, J. H., "Pressure Retarded Osmosis: Current Status and Future," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(11), 791~802(2014).
- Kurihara, M. and Hanakawa, M., "Mega-ton water system: Japanese national research and development project on seawater desalination and wastewater reclamation," *Desalination*, **308**, 131~137(2013).
- Kim, Y. C., Kim, Y., Oh, D. and Lee, K. H., "Experimental investigation of a spiral-wound pressure-retarded osmosis membrane module for osmotic power generation," *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 2966~2973(2013).
- Wang, R., Tang, C. and Fane, A. G., "Development of pressure retarded osmosis (PRO) membranes with high power density for osmotic power harvesting," In: Proceedings of the 3rd Osmosis Membrane Summit, Statkraft, Barcelona(2012).
- Chou, S., Wang, R., Shi, L., She, Q., Tang, C. and Fane, A. G., "Thin film composite hollow fiber membranes for pressure retarded osmosis (PRO) process with high power density," *J. Membr. Sci.*, **389**, 25~33(2012).
- Achilli, A., Cath, T. Y. and Amy, E. Childress, "Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation," *J. Membr. Sci.*, **343**, 42~52(2009).
- Qianhong, S., Xue, J. and Chuyang, T. Y., "Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: Effects of operating conditions and reverse solute diffusion," *J. Membr. Sci.*, **401-402**, 262~273(2012).
- Efraty, A., "Pressure retarded osmosis in closed circuit without need of energy recovery," in: Proceedings of the 3rd Osmosis Membrane Summit, Statkraft, Barcelona(2012).
- Lee, K. L., Baker, R. W., Lonsdale, H. K., "Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis," *J. Membr. Sci.*, **8**, 141~171(1981).
- Geankoplis, C. J., "Principles of Mass Transfer, Transport Processes and Separation Process Principles," Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, pp. 410~456(2003).
- Touati, K., Hänel, C., Tadeo, F. and Schiestel, T., "Effect of the feed and draw solution temperatures on PRO performance: Theoretical and experimental study," *Desalination*, **365**, 182~195(2015).
- Yip, N. Y., Tiraferri, A., Phillip, W. A., Schiffman, J. D., Hoover, L. A., Kim, Y. C. and Elimelech, M., "Thin-film composite pressure retarded osmosis membranes for sustainable power generation from salinity gradients," *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 4360~4369(2011).