



고성능 PRO 모듈 개발 및 운전조건이 모듈 성능에 미치는 영향

The development of high-performance PRO module and effects of operating condition on the performance of PRO module

한만재*·심연주·이종화

Man Jae Han*·Yeonju Sim·Jong Hwa Lee

대한민국 경상북도 구미시 구미대로 102 도레이케미칼(주) 기술연구소, 730-030

Toray Chemical Korea Inc., R&D Institute, 102 Gumi-daero, Gyeongsangbuk-do, Gumi 730-030, Korea

ABSTRACT

Pressure retarded osmosis(PRO) has attracted much attention as potential technology to reduce the overall energy consumption for reverse osmosis(RO) desalination. The RO/PRO hybrid process is considered as the most logical next step for future desalination. The PRO process aims to harness the osmotic energy difference of two aqueous solutions separated by a semipermeable membrane. By using the concentrated water(RO brine) discharged from existing RO plants, the PRO process can effectively exploit a greater salinity gradient to reduce the energy cost of processing concentrated water. However, in order to use RO brine as the draw solution, PRO membrane must have high water flux and enough mechanical strength to withstand the high operational pressure. This study investigates the development of a thin film composite PRO membrane and spiral wound module for high power density. Also, the influence of membrane backing layer on the overall power density was studied using the characteristic factors of PRO membranes. Finally, the performance test of an 8-inch spiral wound module was carried out under various operating conditions(i.e. hydraulic pressure, flow rate, temperature). As the flow rate and temperature increased under the same hydraulic pressure, the PRO performance increased due to the growth of water permeability coefficient and osmotic pressure. For a high performance PRO system, in order to optimize the operating conditions, it is highly recommended that the flow pressure be minimized while the flow rate is maintained at a high level.

Key words: Pressure retarded osmosis, Power density, PRO module, Thin-film composite membrane

주제어: 압력지연삼투, 전력밀도, PRO 모듈, 복합박막

1. 서 론

최근 세계적으로 물부족 현상을 해결하기 위해 해수담수화에 대한 관심이 높아지고 있으며 특히 역삼투(Reverse Osmosis, RO) 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 역삼투 공정은 기존 해수담수화 공정

인 다단 증발법(Multi Stage Flash, MSF) 보다는 적은 에너지가 소모된다는 장점에 의해 전 세계적으로 상용화가 활발히 진행되고 있다. 하지만 시장요구에 따른 가격경쟁 및 에너지 소모의 최소화 그리고 역삼투 공정에서 배출되는 해수농축수 처리 등 환경적인 문제를 해결해야하는 과제가 남아있다(Saito et al., 2012).

이러한 역삼투 공정에서 발생하는 에너지 및 환경적

Received 23 June 2017, revised 26 July 2017, accepted 2 August 2017

*Corresponding author: Man Jae Han(E-mail: manjae.han@toray-tck.com)

pp. 273-279

pp. 281-287

pp. 289-296

pp. 297-301

pp. 303-310

pp. 311-319

pp. 321-328

pp. 329-338

pp. 339-346

pp. 347-356

pp. 357-362

인 문제를 해결하기 위해 역삼투/압력지연삼투(Pressure Retarded Osmosis, PRO) 공정에 대한 관심이 높아지고 있다(Prante et al., 2014). 압력지연삼투는 반투과성막을 경계로 존재하는 두 용액 사이의 염 농도차에 의해 발생하는 삼투압을 이용하여 에너지를 생성하는 방법으로서, 일반적으로 저 농도의 담수와 고 농도의 해수 혹은 해수농축수를 각각 유입용액과 유도용액으로 사용한다. 압력지연삼투공정은 고농도의 유도용액에 압력이 가해지기 때문에 삼투에너지를 효과적으로 사용하기 위해서는 고성능 분리막의 사용이 필수적이다.

고성능의 PRO 분리막을 개발하기 위해서는 고투과성 및 고염제거 그리고 농도분극현상에 영향을 미치는 폴리아미드(Polyamide)의 활성층 그리고 내압성이 우수한 다공성의 지지체가 고려되어야 한다.

또한 압력지연삼투 공정에서 고 전력밀도를 얻기 위해서는 내부농도분극현상(Internal Concentration Polarization, ICP)과 외부농도분극현상(External Concentration Polarization, ECP)을 최소화 시켜야 한다(Achilli et al., 2009, Yip, Elimelech, 2011). 압력지연삼투에서 내부농도분극현상은 분리막 지지층에 염이 축적되는 현상을 말하며 수투과도가 감소되어 전력밀도가 낮아질 수 있다(Xu et al., 2010, She et al., 2012).

이러한 농도분극현상을 최소화하기 위해서는 분리막 뿐만 아니라 모듈 내 스페이서의 구성이 최적화 되어야한다. 스페이서 구성은 분리막 경계면에서의 투과된 물과 유도용액간의 혼합 및 유입용액과 유도용액의 유동저항에 영향을 미칠 수 있기 때문이다(She et al., 2013, Koutsou et al., 2009, Kim, Elimelech, 2012). 또한 스페이서 구성에 따른 운전조건의 최적화가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고 전력밀도의 PRO 분리막/모듈 개발을 위해 지지체가 분리막 성능에 미치는 영향 및 성능인자를 분석하고 모듈 구성과 운전조건에 따른 성능변화에 대하여 논의하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 PRO 분리막 제조

폴리설풀론(Polysulfone) 지지층을 제조하기 위해 분리막 제조방법 중 하나인 상전환침지법(Phase inversion precipitation)을 사용하였다.

폴리설풀론을 N,N-dimethylformamide(DMF)과 N-methyl-2-pyrrolidone(NMP) 용매에 녹여 폴리설풀론 용액을 제조한 후 캐스팅 전 약 24시간 동안 탈기시킨다. 제조된 고분자 용액을 Non-woven fabric 및 Porous fabric 위에 캐스팅 한 후 즉시 비용매 응고조에 침지시켜 상분리를 유도한다. 상분리가 완료된 분리막은 세척 공정을 거쳐 계면중합을 실시한다.

폴리아미드 활성층은 지지층 표면에 폴리아미드 구조를 가진 얇은 막을 계면중합반응으로 형성한다. 계면중합 공정은 분리막을 1,3-phenylenediamine(MPD) 용액과 1,3,5-benzenetricarbonyl trichloride(TMC) 용액에 침지시켜 폴리아미드 활성층을 형성시킨다. 수용층과 유기층 경계면에서 중합반응이 일어나며 아민 그룹과 acid halide 그룹의 반응 속도는 반응물질의 확산속도에 비하여 느리기 때문에 두꺼운 필름층이 형성된다. 형성된 필름은 지지층과의 연결 역할을 하고, 높은 압력에서 막이 견딜 수 있게 한다. 최적의 수투과도와 제거율을 얻기 위해서는 균일하게 밀도가 높으면서 얇은 분리막 제조가 필요하다.

RO막과 PRO막은 물의 흐름 방향이 다른 차이점이 있다. Fig 1에서 볼 수 있듯이 PRO막은 삼투현상에 의해 물이 지지체 방향에서 활성층 방향으로 흐르게 된다. 일반적으로 분리막의 특성은 다음과 같은 특성인자들을 고려해야 한다. A는 water permeability coefficient, B는 Salt permeability coefficient, S는 Membrane structural parameter이다. 분리막의 성능을 높이기 위해서는 수투과도 상수인 A값이 커야 하고 높은 삼투현상을 구현하기 위해서는 염투과도 상수인 B값이 작아야 하며 막 구조적 측면에서 지지층 구조 상수인 S 값을 줄이는 것이 유리하다. 즉, 두께가 얇고, 굴곡도가 적으면서 기공도가 높은 지지층이 내부 농도 분극현상을 낮추어 삼투현상에 의한 수투과도를 높일 수 있고 전력밀도 또한 증가시킬 수 있다(Ghosh, Hoek, 2009).

분리막의 구조상수가 PRO 분리막 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 여러 종류의 지지체를 적용하여 비교하였다.

지지체 변경은 Table 1과 같이 다양한 부직포가 적용되었다. Non-woven fabric A를 기준으로 하여 porous fabric B로 갈수록 지지체의 두께는 얇아졌으며 투기도 또한 증가하였다. 다만 porous fabric B는 porous fabric A보다 두께는 얇지만 투기도는 높은 지지체를 적용하여 분리막을 제조하였다.

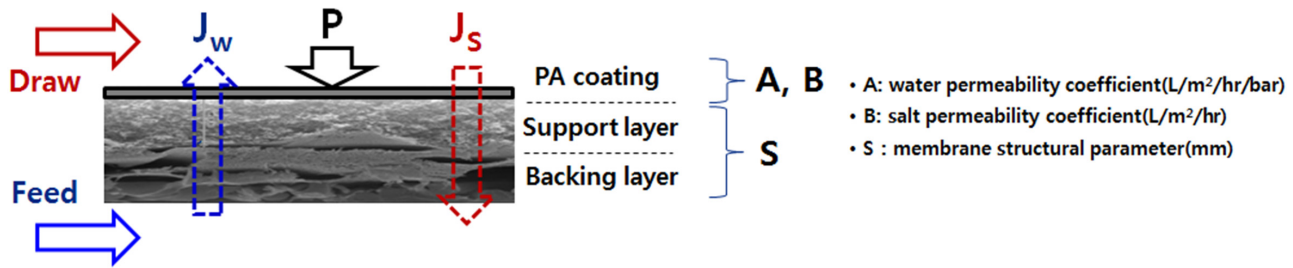


Fig. 1. SEM image of PRO membrane.

Table 1. Characteristics of backing layer

	Non-woven fabric A	Non-woven fabric B	Porous fabric A	Porous fabric B
Air permeability (cc/m ² /sec)	7	11	355	127
Thickness (μm)	136	103	83	62

2.2 PRO 모듈 제조

상기 제조된 PRO 분리막을 이용하여 PRO 8인치 모듈을 제조하였다. PRO 모듈 내 유도용액측과 유입용액측 부분의 스페이서 구성은 다르게 제조되었다. 유입용액측은 다수의 트리코트로 구성되었으며 유도용액측은 트리코트보다 두꺼운 메쉬를 삽입하여 유로의 흐름을 원활하게 하였다.

2.3 PRO 분리막 및 모듈 전력밀도 평가

전력밀도는 압력지연삼투에서 가장 중요한 성능지표로서 분리막의 단위면적당 생산 가능한 전력량으로 정의될 수 있으며, 최대전력밀도는 분리막을 투과하는 수투과도와 수압차의 곱으로 계산된다(McCutcheon, Elimelech, 2006, Gray et al., 2006).

보다 자세하게는 압력지연삼투공정에서 저 농도의 유입수는 삼투현상에 의해 고 농도의 유도용액으로 이동하게 되며 이때 증가된 유도 용액 부분의 유량을 이용하여 터빈을 운전시켜 전력을 생산한다. 이때 전력밀도는 분리막을 투과하는 투과유량을 구하는 식 (1)을 이용하여 식 (2)로 표현된다(Thorsen, Holt, 2009, Lee et al., 1981).

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

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

PRO 모듈은 Fig. 2의 PRO 모듈평가설비를 이용하여 전력밀도를 측정할 수 있다. 자사에서 직접 제작한

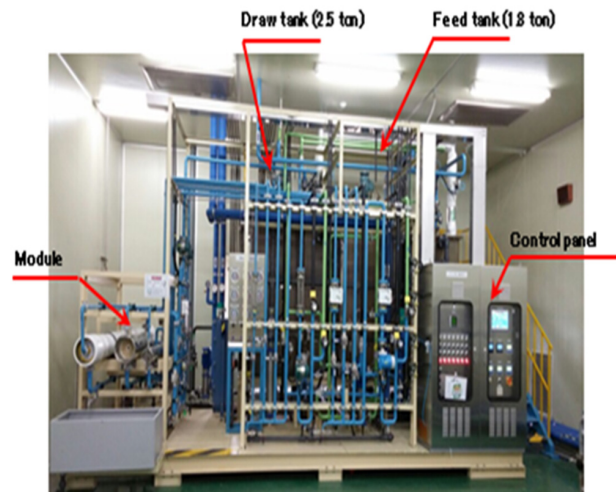


Fig. 2. The evaluation facilities of PRO modules.

모듈 평가설비로서 유도용액 및 유입용액 탱크가 구비되어 있고 8인치 모듈과 4인치 모듈을 테스트할 수 있다. 분리막 및 모듈평가 시 유도용액 농도는 해수농축수 기준인 70,000ppm NaCl로 고정하였으며 동일 시료를 3회 평가 후 평균치를 작성하였다.

2.4 PRO 분리막 성능인자 분석

실제 PRO 수투과량은 식 (1)에서 얻어지는 값보다는 낮은 수투과량을 나타낸다. 이는 1) 염 투과로 인한 삼투압 손실, 2) 지지층 내에서 염 확산의 방해로 인한 유효삼투압 저하 3) 활성층에서의 유도용액 희석이 작용하기 때문이다. 이 세 가지의 영향은 각각 염투과 상수(B), 지지층 구조 상수(S)를 포함하는 확산 저항 값(KR=S/D,

D= 염확산 계수), 그리고 유도용액의 유체흐름과 수투과량과 관계된 J_wk 로 표현 될 수 있다. 이 영향을 고려하여 수투과량 J_w 를 표현하면 식 (1)은 다음 식(3)으로 수정되어 나타 낼 수 있다(Thorsen et al., 2009, Lee et al., 1981, Loeb et al., 1997).

$$J_W = \frac{1}{K_R} \ln \left(\frac{A\pi_{draw} + B - J_W - A\Delta P}{A\pi_{feed} + B} \right) \quad (3)$$

K_R = 멤브레인 지지층 염확산 저항 계수 = τ/ϵ
 $D=S/D$, A = 멤브레인 수투과 상수, $\pi_{D,m}$ = 멤브레인 표면에서의 유도용액 삼투압 = $\pi_{Draw} \exp(-J_w/k)$, B = 염투과 상수, R =염제거율, π_{feed} , π_{Draw} = 유입수 및 유도용액 삼투압, k = NaCl 물질 전달 계수

특성인자 A 와 B 값은 RO mode에서 측정가능하다. 동일한 PRO 측정 장비에서 유도용액 대신 1000 ppm NaCl 용액을 사용하여 10 bar 조건에서 염제거율 및 플럭스 양 측정을 통해 가능하다(Phillip et al., 2010, Loeb et al., 1997). A , B 값은 식(1)과 식(4)를 이용하여 측정 되었다(Mulder, 1996, Tiraferri et al., 2011).

$$B = \frac{J_W(1-R)}{R} \exp\left(-\frac{J_W}{k}\right) \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 PRO 분리막 개발

이상적으로 압력지연삼투 분리막은 높은 수투과도와 염제거율을 나타내어야 한다. 염제거율이 높은 분리막은 유도용액의 염들이 유입용액으로 이동하는 것을 최소화 할 수 있으며 그로 인해 더 낮은 운전에너지가 소모될 수 있고 더 높은 전력밀도를 확보할 수 있다(McCutcheon, Elimelech, 2006, Phillip et al., 2010).

유도용액과 유입수의 농도가 정해져 있을 경우 이상적으로 얻을 수 있는 삼투압차이는 결정된다. 결정된 삼투압 차에서 더 많은 수투과량을 이끌어 내기 위해서는 PRO막의 수투과 상수가 커져야 한다. B 값과 S 값은 이상적인 삼투압보다 적게 삼투압을 얻을 수 밖에 없는 손실을 나타낸다. 즉 물은 통과하고 염은 통과하지 않는 이상적인 반투과막과 달리 염이 막을 통해 이동하게 될 경우, 이상적인 삼투압 보다 낮은 삼투압을 얻을 수밖에 없다. S 값이 크면 통과한

염이 확산하지 못하여 이상적인 삼투압보다 낮은 삼투압을 이용하게 된다. 따라서 고유량을 얻기 위해서는 A 값 최대화 및 B , S 값 최소화가 이뤄져야 된다.

지지층 구조 상수를 줄이기 위해서는 폴리머 지지층을 개선하는 방법과 부직포 지지체를 개선하는 방법이 있다. 폴리머 지지층의 S 값을 줄이기 위해서는 공극을 증가, 굴곡도를 감소시켜 가능하며 부직포 지지체의 S 값을 감소시키기 위해서는 두께가 얇고 다공성이 우수한 부직포를 사용하면 가능하다. 이에 본 연구에서는 2.1에서 기술한대로 각각 두께 및 공극률이 상이한 non-woven fabric 2종류와 porous fabric 2종류를 이용하여 PRO 분리막을 제조하여 전력밀도 및 각 성능인자를 분석하였다.

Fig. 3은 각 지지체별 PRO 분리막의 SEM 사진을 보여주고 있다. Porous fabric B로 갈수록 분리막의 두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있으며 이는 지지체의 두께에 의한 것으로 설명할 수 있다.

상기 연구방법에서 기술된 식들을 이용하여 지지체별 PRO 분리막의 수투과도, 전력밀도 및 성능인자를 분석하였다. 각 지지체별 PRO 분리막의 물성 및 성능인자 값을 Table 2에 정리하였다.

Table에서 볼 수 있듯이 non-woven fabric B는 non-woven fabric A보다 수투과도 상수 A 가 감소하였으나 오히려 전력밀도는 $3.2W/m^2$ 에서 $8.6W/m^2$ 로 대폭 증가하였다. 수투과도 상수가 감소하였음에도 불구하고 전력밀도가 증가한 것은 지지체의 두께가 얇아짐에 따라 분리막 구조상수인 S 값이 감소하고 이에 따른 수투과도의 증가가 원인이라고 판단된다. 또한 다공성이

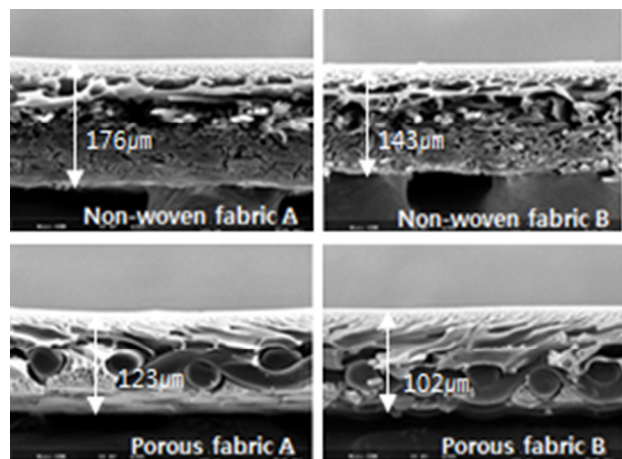


Fig. 3. SEM image of PRO membrane with various backing layer.

**Table 2.** Effect of different backing layer on PRO performance

	A (L/m ² /hr/bar)	B (L/m ² /hr)	S (mm)	Power density (W/m ²)	Water flux (LMH)
Non-woven fabric A	1.80	0.714	2.530	3.2	5.7
Non-woven fabric B	1.55	0.187	2.098	8.6	14.8
Porous fabric A	2.85	0.466	0.926	17.4	31.4
Porous fabric B	1.97	0.619	0.710	18.3	35.5

우수하고 두께가 얇은 Porous fabric B를 사용한 PRO 분리막의 S값은 non-woven fabric A와 비교하였을 시 약 3.6배 감소한 0.710mm를 나타내었으며 수투과도는 35.5LMH로 약 6.2배 상승하였다. 수투과도 증가에 따라 전력밀도는 18.3W/m²으로 약 6배 증가하였으며 앞선 결과와 마찬가지로 분리막 구조 상수가 대폭 감소함에 따라 전력밀도가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한 porous fabric A의 경우 porous fabric B보다 A값은 크고 B값이 작음에도 불구하고 S값이 증가함에 따라 전력밀도가 감소하였다. 즉, PRO 분리막의 성능에는 A, B값도 중요하지만 S 값이 보다 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었으며 PRO 분리막 개발 시 코팅층도 중요하지만 지지층과 지지체의 구조와 다공성을 필히 고려해야한다고 사료된다.

3.2 PRO 모듈 개발

일반적으로 모듈 내 스페이서는 용액의 혼합을 유도하여 농도분극현상을 억제시켜주고 분리막 표면에서의 물질전달을 증가시켜주는 역할을 한다(Schwinge et al., 2004). 스페이서로는 트리코트와 메쉬가 사용될 수 있는데 메쉬는 트리코트와 비교하여 공극률이 높고 단섬유가 두껍기 때문에 용액의 혼합을 증가시킬 수 있다(Costa et al., 1994). 본 연구에서 개발된 PRO 8

인치 모듈은 상기 설명된 스페이서의 역할 뿐만 아니라 유도용액과 유입용액의 유로를 형성시키기 위한 역할을 부여하고자 유입용액측은 다수의 트리코트로 유도용액측은 메쉬로 모듈의 구성을 최적화 하였다.

Fig. 4는 실제 PRO 모듈을 절단한 사진과 유로 흐름 모식도를 보여주고 있다. PRO 모듈에서 유도용액은 메쉬가 삽입된 분리막 활성층 부분으로 흐르며 유입용액은 파이프 내부로 이동한다. 파이프 중앙내부와 분리막 및 스페이서에는 본딩을 처리하여 유입용액의 유로를 형성하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 유입용액은 삼투압에 의해 분리막을 투과하여 유도용액측으로 이동하게 되며 이때 흐름은 1→2→3 방향으로 흐르게 된다. 유입용액 측 스페이서로 구성된 트리코트는 한 방향으로 채널이 형성되어 있으며 일반적으로 PRO 모듈에서는 트리코트를 유입용액의 1번, 3번 흐름과 평행하게 배열을 한다. 하지만 이러한 배열에서는 유도용액이 2번 방향으로 이동할 시 흐름에 저항이 생겨 수투과도가 낮아지고 결과적으로 모듈의 전력밀도가 현저히 낮아지는 현상이 나타난다.

본 연구에서는 이러한 모듈 내 유도용액의 유동저항을 개선하기 위해 유도용액 측 다수의 트리코트 중 1장의 배열을 2번 방향으로 구성하여 모듈의 성능을 테스트 하였다.

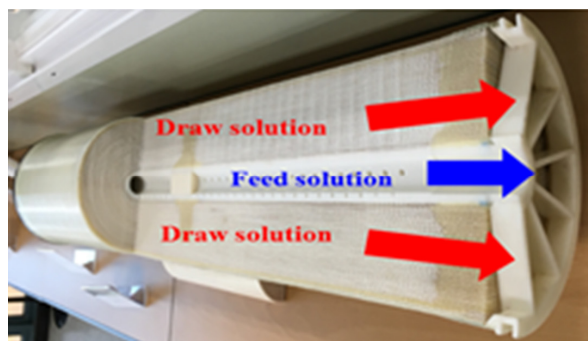
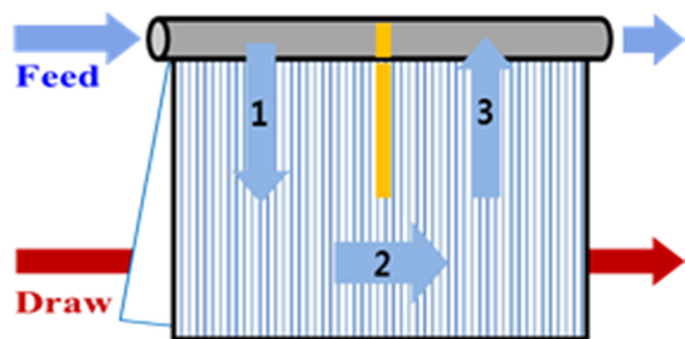
**Fig. 4.** Flow diagram of solution in the module.

Fig. 5는 기존 배열의 트리코트로 구성된 모듈과 트리코트 1장 배열을 변경한 모듈의 압력별 전력밀도 변화를 보여주고 있다. 두 모듈 모두 차압이 증가할수록 전력밀도는 상승하였으며 기존 배열은 15bar에서 최대전력밀도인 6.9W/m^2 를 나타냈으며 변경된 모듈은 같은 압력에서 8.2W/m^2 의 최대전력밀도를 보여 기존 배열보다 전력밀도가 증가한 것을 알 수 있다. 그리고 기존 모듈은 15bar 이후부터는 전력밀도가 급격히 감소하였으나 변경된 모듈의 경우에는 20bar에서도 15bar와 유사한 전력밀도인 8.4W/m^2 를 나타내어 보다 내압성이 뛰어나다는 것을 확인하였다.

또한 Fig. 6과 같이 유입용액 유입부에서의 압력을 비교한 결과 변경된 모듈의 유입압력이 기존 모듈보다 모든 차압조건에서 현저히 낮은 압력을 나타내었으며

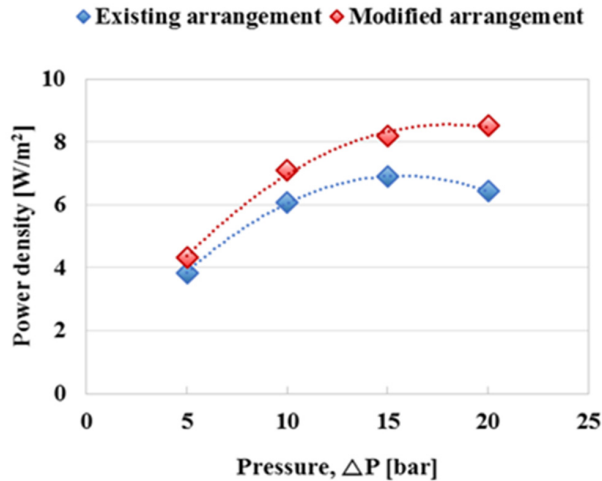


Fig. 5. Power density with different module composition.

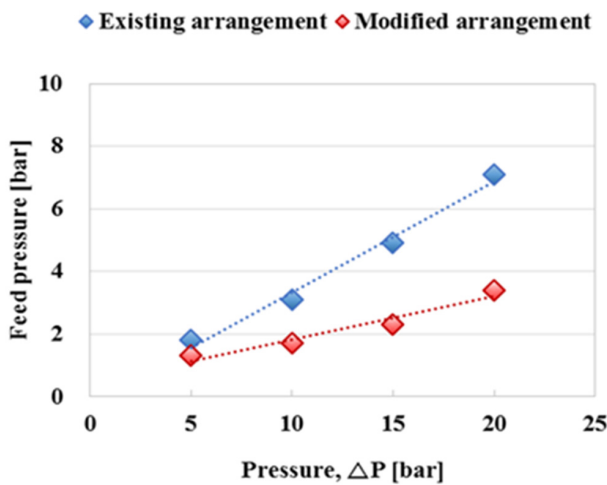


Fig. 6. Feed inlet pressure with different module composition.

특히 차압이 상승할수록 기존모듈과 변경된 모듈의 유입압 차이는 더욱 커졌다. 이는 변경된 모듈에서 유입수의 유동저항이 감소하였다는 것을 간접적으로 판단할 수 있으며 외부압력에 의해 막의 구조가 변형되는 현상도 줄어들 것으로 사료된다.

3.3 PRO 모듈 운전조건

상기 기존 모듈과 변경모듈의 운전조건별 테스트를 진행하였다. 유도용액과 유입용액의 유속에 따른 전력밀도 변화를 Fig. 7에서 볼 수 있다.

유속이 증가할수록 두 모듈 모두 전력밀도는 증가하였으며 변경된 모듈의 경우 기존 모듈보다 모든 유속에서 전력밀도가 높았으며 15LPM에서 최대 전력밀도를 나타내었다. 15LPM이상에서는 유입용액 펌프의 용량 한계에 의해 측정이 불가하였다. 상기와 같이 유도용액 및 유입용액의 속도가 증가할수록 전력밀도가 증가하는 현상은 다른 연구에서도 나타난 현상으로서 유속이 증가함에 따라 분리막을 통과하는 수투과도의 향상에 의한 것으로 판단된다.(Achilli et al., 2014).

Fig. 8은 용액의 온도에 따른 두 모듈의 전력밀도 변화를 보여주고 있다. 온도는 유입용액 및 유도용액 모두 동일한 온도로 25, 35, 45°C로 10°C 씩 상승시키면서 전력밀도를 측정하였으며 용액의 유속은 15LPM으로 고정하였다. 온도가 증가할수록 모듈의 전력밀도는 증가하였으며 변형된 모듈의 전력밀도는 기존모듈보다 큰 것을 확인할 수 있다. 온도상승에 따른 전력밀도의 증가는 여러 이론으로 설명될 수 있다. 먼저

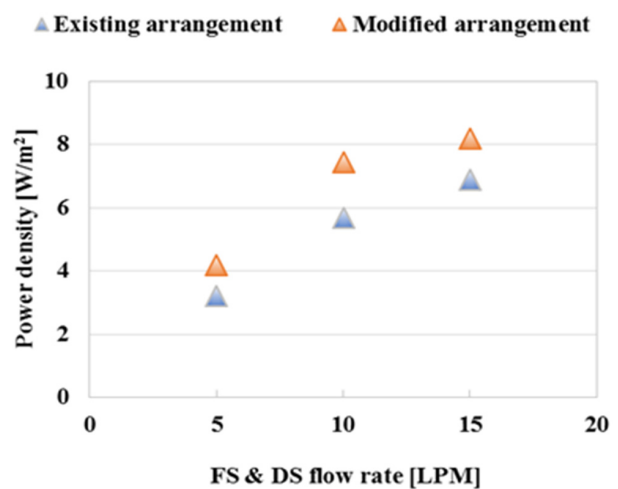


Fig. 7. Power density as flow rate of solution.

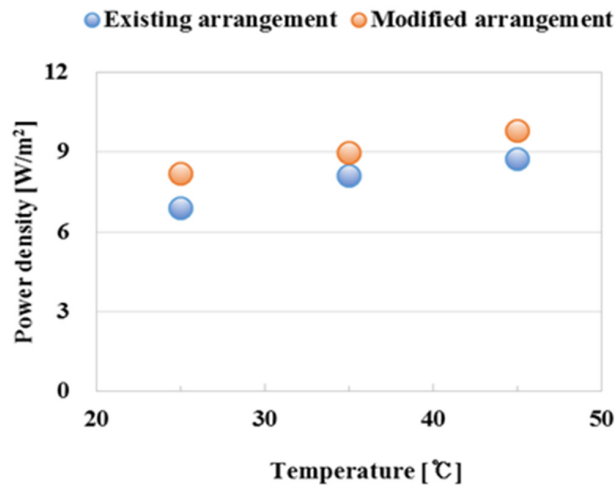


Fig. 8. Power density as solution temperature.

Van't Hoff 이론에 따라 온도가 상승할수록 삼투압은 증가하게 되며 이것은 수투과도의 향상을 이끌어 결과적으로 전력밀도가 증가하게 된다. 또한 용액 온도의 증가는 물의 점도를 감소시켜 분리막의 통과하는 물의 확산율을 증가시켜 전력밀도가 증가하게 된다 (McCutcheon, Elimelech, 2006).

4. 결론

본 연구에서는 다공성이 증가하고 두께가 감소한 지지체를 적용한 PRO 분리막일 수록 지지층 구조 상수인 S값이 감소되고 전력밀도가 18.3W/m²까지 상승한다는 것을 확인하였으며 수투과도 상수인 A값이 크고 염투과상수인 B값이 작아도 S값이 클 경우 전력밀도가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 A, B 값도 중요하지만 S값이 PRO 분리막 성능에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 PRO 8인치 모듈을 개발하고 유입용액 측 스페이서 구성에 따른 전력밀도 변화도 관찰하였다. 모듈 내 스페이서의 구성에 따라 유입용액의 유동저항이 감소하여 유입압이 저감되고 전력밀도는 8.4W/m² 까지 증가하는 결과를 보여 주었다. 마지막으로 PRO 모듈 운전조건에 따른 모듈의 성능변화를 테스트하였다. 유입용액 및 유출용액의 유속이 증가하고 온도가 상승할수록 전력밀도는 증가하였다. 결론적으로 고성능 PRO 모듈 개발을 위해서는 PRO 분리막의 성능과 더불어 PRO 모듈의 구성 그리고 운전조건 또한 최적화되어야 한다.

기호설명

J_W : Water flux

A : Water permeability coefficient of membrane

$\Delta \pi$: Transmembrane osmotic pressure difference

ΔP : Transmembrane hydraulic pressure difference

B : Salt permeability constant

K_R : The resistance to salt

$K_R = S/D$ (D: Salt diffusion coefficient, S: A factor related to the support structure)

사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 17IFIP-B065893-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- A. Achilli, J.L. Prante, N.T. Hancock, E.B. Maxwell, A.E. Childress, (2014), Experimental results from RO-PRO: a next generation system for low-energy desalination, *Environ. Sci. Technol.*, 48, 6437-6443.
- A. Achilli, T.Y. Cath, A.E. Childress, (2009), Power generation with pressure retarded osmosis: an experimental and theoretical investigation, *J. Membr. Sci.*, 343, 42-52.
- A.K. Ghosh, E.M.V. Hoek, (2009), Impacts of support membrane structure and chemistry on polyamide-polysulfone interfacial composite membranes, *J. Membr. Sci.*, 336, 140-148.
- A.R. Da Costa, A.G. Fane, D.E. Wiley, (1994), Spacer characterization and pressure drop modelling in spacer-filled channels for ultrafiltration, *J. Membr. Sci.*, 87, 79-98.
- A. Tiraferri, N.Y. Yip, W.A. Phillip, J.D. Schiffman, M. Elimelech, (2011), Relating performance of thin-film composite forward osmosis membranes to support layer formation and structure, *J. Membr. Sci.*, 367, 340-352.
- C.P. Koutsou, S.G. Yiantsios, A.J. Karabelas, (2009), A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number, *J. Membr. Sci.*, 326, 234-251.
- G.T. Gray, J.R. McCutcheon, M. Elimelech, (2006), Internal concentration polarization in forward osmosis, *J. Membr.*

- Sci., 284, 237-247.
- J. Bartram, (2008), Improving on haves and have-nots, *Nature*, 452, 283-284.
- J.L. Prante, J.A. Ruskowitz, A.E. Childress, A. Achilli, (2014), An integrated low-energy approach to seawater desalination, *Appl. Energy*, 120, 104-114.
- J.R. McCutcheon, M. Elimelech, (2006), Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis, *J. Membr. Sci.*, 284, 237-247.
- K.L. Lee, R.W. Baker, H.K. Lonsdale, (1981), Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis, *J. Membr. Sci.*, 8, 141-171.
- M. Mulder, (1996), *Basic principles of membrane technology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- N.Y. Yip, M. Elimelech, (2011), Performance limiting effects in power generation from salinity gradients by pressure retarded osmosis, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 10273-10282.
- Q. She, D. Hou, J. Liu, K.H. Tan, C.Y. Tang, (2013), Effect of feed spacer induced membrane deformation on the performance of pressure retarded osmosis(PRO): implications for PRO process operation, *J. Membr. Sci.*, 445, 170-182.
- Q. She, Xue Jin, C.Y. Tang, (2012), 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.
- Schwinge, J. Neal, P.R. Wiley, D.E. Fletcher, D.F. Fane, A. G., (2004), Spiral wound modules and spacers: Review and analysis. *J. Membr. Sci.*, 242, 129-153.
- Saito K, Irie M, Zaitso S, Sakai H, Hayashi H, Tanioka A, (2012), Power generation with salinity gradient by pressure retarded osmosis using concentrated brine from SWRO system and treated sewage as pure water, *Desalin Water Treat*, 41, 114-121.
- S. Loeb, L. Titelman, E. Korngold, J. Freiman, (1997), Effect of porous support fabric on osmosis through a Loeb-Sourirajan type asymmetric membrane, *J. Membr. Sci.*, 129, 243-249.
- T. Thorsen, T. Holt, (2009), The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis, *J. Membr. Sci.*, 335, 103-110.
- W.A. Phillip, J.S. Yong, M. Elimelech, (2010), Reverse draw solute permeation in forward osmosis; modeling and experiments *Environ. Sci. Technol.*, 44, 5170-5176.
- Y.C. Kim, M. Elimelech, (2012), Adverse impact of feed channel spacers on the performance of pressure retarded osmosis, *Environ. Sci. Technol.*, 46, 4673-4681.
- Y. Xu, X. Peng, C.Y. Tang, Q.S. Fu, S. Nie, (2010), Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module, *J. Membr. Sci.*, 348, 298-309.