◎ 논 문

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2013.16.1.061
ISSN (Print): 2287-9706

RO/PRO 공정에 의한 물/에너지/상호변환기술에 관한 연구

최영권* · 윤택근* · 손진식* · 이상호*† · 최준석**

Study on Water / Energy / Mutual-changing Technology by RO/PRO Process

Youngkwon Choi*, Taekgeun Yun*, Jinsik Sohn*, Sangho Lee*†, June-Seok Choi**

Key Words : Reverse osmosis(역삼투 공정); Pressure retarded osmosis(압력지연삼투);Power generation(전력생산);energy generation (에너지 생산)

ABSTRACT

Water is an integral part of energy production because it is used directly in many power generation systems such as hydroelectric power plants and thermoelectric power plants. Water is also used extensively in energy-resource extraction, oil, natural gas, and alternative fuels refining and processing. Recently, osmotic power systems using seawater and freshwater has been also investigated to produce electricity in a sustainable way.

This study focused on the use of RO and PRO for the mutual conversion of water and energy. This system allows the production of water from seawater if there is not enough water. It can also generate electricity from salinity gradient of brine water and fresh water if there is not enough energy. To demonstrate the feasibility of this technology, a set of laboratory-scale experiments were carried out using a specially-designed RO/PRO system. The efficiency of energy conversion was theoretically estimated based on the results from the experiments. The results indicated that water and energy could be easily converted using a single device. Nevertheless, a lack of optimum membrane for this purpose was identified as a major barrier for practical application.

1. 서 론

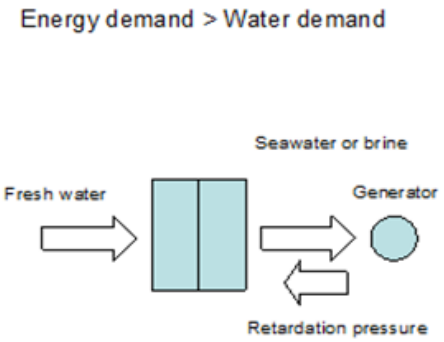
물과 에너지는 밀접한 관계를 가지고 있으며, 에너지 생산에는 물이 다양한 용도로 활용되고 있다. 수력발전과 같이 물을 직접 이용하는 경우도 있으며, 화력발전과 같이 냉각수로서 다량의 물을 이용하는 경우도 있다. 이러한 물을 생산하기 위한 방법으로 여러 가지 방법이 적용되고 있으나 특히 물이 부족한 지역에서는 해수담수화 기술을 널리 이용하고 있으며, 특히 삼투막을 이용하는 방법인 역삼투(Reverse Osmpsis: RO)가 주요 기술로서 인식되고 있다.(1) 역삼투는 물은 통과하지만 물속에 용해되어 있는 염분 등은 투과하지 않는 반투과막에 의해 해수를 담수화 하는 방법이다.

최근에는 서로 다른 종류의 물이 가지고 있는 삼투압의 차이를 이용하여 에너지를 생산하기 위한 방법도 연구되고 있다. 이와같이 삼투압을 이용한 발전방법 중 하나로 압력지연삼투(Pressure Retarded Osmosis: PRO)가 있으며,(2,3) 이는 해수와 담수와 삼투압의 차이를 이용하여 수압을 가진 물의 흐름을 만들어내고 이를 이용하여 터빈을 돌려 에너지를 생산하는 방법이다.(4,5)

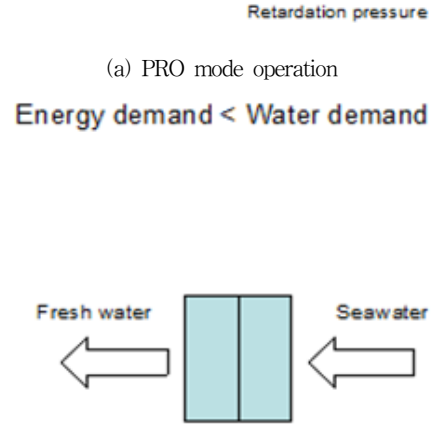
21세기 들어서 산업화와 인구의 증가, 기후변화 등의 문제로 인하여 물과 에너지의 부족 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 이러한 물과 에너지의 부족은 단순히 절대량이 부족한 것만을 의미하지는 않으며, 지역적 혹은 시간적으로 필요한 수요만큼 공급이 따라가지 못할 경우에도 발생하게 된다. 특히 전력시스템의 경우 시간별로 전력수요가 크게 변동하는데, 피크 전력을 맞추지 못하면 전체 시스템에서 큰 문제가 발생할 수 있기 때문에 이를 해결하기 위한 기술이 요구되고 있다.(6) 물의 경우에도 생산에 필요한 전력단가는 시간에 따라 변화하기 때문에 이를 고려한다면 상대적으로 낮은 비용으로 물을 생산할 수 있게 된다.

* 국민대학교 건설시스템공학과
** 한국건설기술연구원
† 교신저자, E-mail : sanghlee@kookmin.ac.kr

2012 유체기계 연구개발 발표회 발표 논문, 2012년 12월 5-7일, 부산
한국유체기계학회 논문집: 제16권, 제1호, pp. 61~65, 2013(논문접수일자: 2012.10.19, 심사완료일자: 2012.01.09)

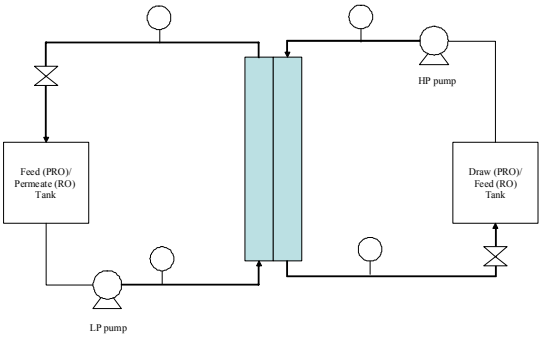


(a) PRO mode operation



(b) RO mode operation

Fig. 1 Basic concept for RO/PRO system for water/energy conversion.



(a) Schematic diagram

(b) Photograph of the system

Fig. 2 Experimental set-up for RO/PRO

Table 1 Experimental conditions

Items		Conditions
Membrane		Forward Osmosis Membrane (HTI, U.S.A)
Flow condition		Counter-Current Crossflow
Effective membrane area		0.014m^2(95.01mm × 145.58mm)
Pressure	PRO	0, 5, 10, 15, 20, 25bar
	RO	40, 50bar
Feed water	Feed solution	D.I. water
	Flow rate	480ml/min
	Initial volume	2L
Draw solution	Draw solution	NaCl 0.6M
	Flow rate	4800ml/min
	Initial volume	2L

본 연구에서는 물과 에너지에 대한 수요와 공급의 불균형을 해소하고 전체 운전비용을 절감할 수 있는 방법에 대하여 모색하고자 하였다. 즉, 잉여전력이 많은 시간에 역삼투 공정을 이용하여 해수를 담수화하여 물을 생산하고, 전력이 부족할 때는 해수나 농축수를 이용하여 에너지를 생산하여 공급할 수 있는 2가지 기능을 하나의 장치에 구현하는 시스템의 개발을 연구의 최종목적으로 하였다(Fig. 1). 이를 위하여 여기서는 실험실 규모의 장치를 구성하여 기본 운전특성을 파악한 후에 이를 바탕으로 하여 본 기술의 적용가능성과 효율에 대하여 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위하여 RO와 PRO로 상호변환하여 운전이 가능한 실험실 규모의 장치를 제작하여 이용하였다(Fig. 2). 유입수 측에는 유입수의 흐름을 만들어 줄 수 있는 저압펌프를 설치하고, 유도용액 측에는 높은 압력을 낼 수 있는 고압펌프를 사용하여 유도용액 측에 압력을 가해줄 수 있어 RO 공정을 운전할 수 있는 정도의 압력을 낼 수 있게 하였으며, 유효막면적 0.014 m^{2}을 가지는 평판형 막 모듈을 이용하였다. 분리막은 미국의 HTI사의 정삼투막을 사용하였다. PRO공정으로 장치를 운전할 경우 해수 조성에 해당하는 합성원수(NaCl 0.6M)를 제조하여 유도용액으로 사용하였으며, 증류수를 유입수로 사용하였다. 또한 유도용액 쪽의 압력을 변화시키며 유입수에 따라 변하는 막 투과 유속을 전자저울을 유입수 탱크에 설치하여 무게의 변화를 통해 측정하고, 막 투과 유속을 통해 전력생산량을 계산하였다. Fig. 2(a)는 PRO/RO hybrid 장치의 모식도를 나타낸 그림이며, Fig. 2(b)는 실제 실험에 사용한 실험실 규모의 PRO/RO hybrid 장치이다.

장치의 운전을 RO 모드로 할 경우에는 모든 조건을 PRO 공정을 운전할 때와 동일하게 설정하고 합성해수가 공급되는 쪽의 압력을 40 bar 이상으로 가압하였으며, 운전모드를

PRO 모드로 할 경우에는 압력을 25 bar 이하로 하였다. 이에 따라서 실제로 유도용액 측에 가해주는 압력의 정도에 따라서 막으로 통과하는 물의 방향이 25 bar 이하의 압력을 가하는 PRO 모드에서는 유입수에서 유도용액쪽으로 달라지면서 운전의 목적을 에너지 생산으로 조정할 수 있었으며, 40bar 이상으로 가압하는 RO 모드에서는 물의 흐름방향이 유도용액 쪽에서 유입수쪽으로 바뀌게 되며, 운전의 목적인 물의 생산으로 조정될 수 있었다.

아래 Table 1은 본 연구의 전체 실험조건에 대해 간단히 정리한 내용이다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 유도용액 측에서 압력을 변화시키며 PRO 공정을 운전하였을 때의 시간에 따른 막 투과유속을 나타낸 그래프이다. 막의 방향(orientation)은 AL-DS, 즉, 활성층(active layer)이 유도용액과 접촉되게 장착하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 유도용액 측에 아무 압력도 가해주지 않았을 때의 막 투과 유속은 7.95 L/m^2-hr이며 25 bar의 압력을 가해 주었을 때의 막 투과 유속이 -0.3 L/m^2-hr로 나타났다.

이러한 실험결과를 해석하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 PRO에 대한 간단한 모델식을 적용하였다.

$$J_w = A\left(\pi_D e^{-J_w K_D} - \Delta P\right) \quad (1)$$

$$W = J_w \Delta P \quad (2)$$

여기서 Jw는 물의 투과유량이고, A는 막의 물 투과도, πD는 유도용액의 삼투압, KD는 내부농도분극 관련계수, ΔP는 유도용액과 유입수 사이의 압력차이, W는 전력밀도이다. 위의 식을 이용하게 되면 모델을 이용한 예측값과 실험적으로 구한 플럭스와 전력밀도를 비교할 수 있다.

Fig. 4는 실험에 의한 플럭스와 모델에 의한 계산값을 비교한 것이다. 본 관계를 이용하여 비선형 최소자승법에 의하여 A와 KD는 각각 0.378 L/m^2-hr-bar와 0.18×106 sec/m로 계산되었으며, 향후 모델계산에서는 이 계수를 이용하여 실험값을 예측하였다.

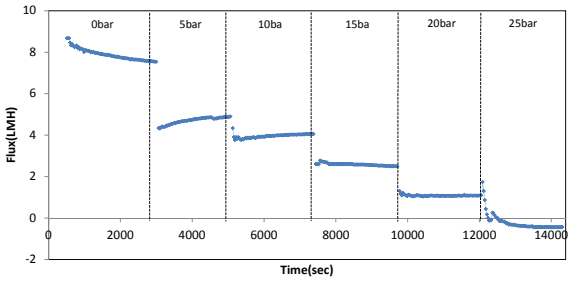


Fig. 3 Effect of applied pressure on flux in PRO mode

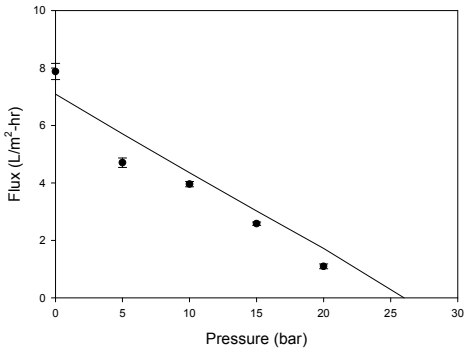


Fig. 4 Comparison of model calculation with experimental flux in PRO mode

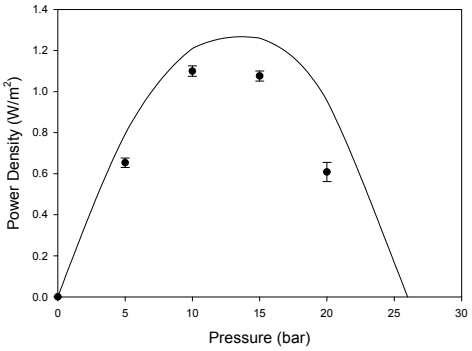


Fig. 5 Comparison of model calculation with experimental power density in PRO mode

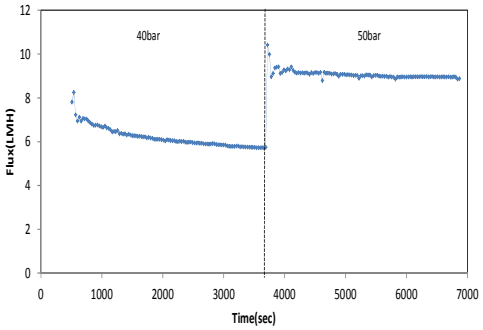


Fig. 6 Effect of applied pressure on flux in RO mode

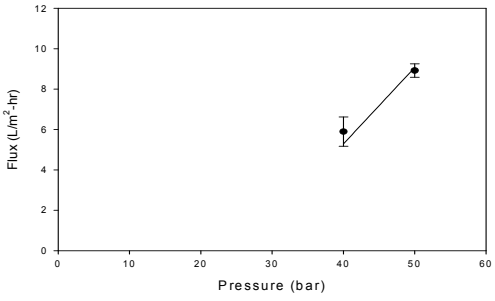


Fig. 7 Comparison of model calculation with experimental flux in RO mode

Fig. 5는 이론적 전력밀도와 실험값을 비교한 그래프이다. 전력밀도는 유도용액(합성해수) 삼투압의 약 1/2에 해당하는 지점에서 최대인 1.27 W/m^{2}가 되는 것으로 계산되었다. PRO에서 삼투압의 약 1/2에 해당하는 지점에서 최대전력밀도가 나타나는 것은 기존의 연구에서도 확인된 바 있다.[7,8]

Fig. 6는 PRO 공정을 마치고 막의 방향을 변경하지 않은 상태에서 유입수와 유도용액만을 교체하고 유도용액쪽에 가해주는 압력을 PRO 모드 보다 높은 압력으로 실험한 결과이다. 만약 각각의 모드로써 운전을 마치고 난 다음 운전을 변경할 때 마다 막을 꺼내어 방향을 바꾸어 주어야 한다면 동일 장치에서 PRO 모드와 RO 모드를 변환할 때 이 장치를 운전하는데 많은 어려움이 있을 것이므로 본 연구에서는 막의 방향을 변경하지 않은 상태로 실험을 수행하였다.

그래프에 나타난 바와 같이 RO 모드에서의 막 투과 유속은 유도용액에 가해지는 압력이 40 bar인 경우 약 6 L/m^2-hr를 보였으며, 50 bar인 경우에는 약 9 L/m^2-hr를 나타내었다. 이는 일반적인 Polyamide 재질의 RO막을 사용한 경우(일반적으로 40 bar에서 10 L/m^2-hr 이상)에 비해서는 낮은 값이었다. 이러한 현상이 나타난 것은 실험에 사용한 분리막이 RO 모드의 운전에 맞게 제조된 것이 아니고 FO 모드의 운전에 적합하도록 만들었기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 7은 실험으로 얻은 플럭스 값과 이론적 값을 비교한 그래프이다.

실제로, 본 실험에 사용한 정삼투막은 고압조건에서의 운전에 적합하지 않기 때문에 막이 압착되어 투과율이 낮아지는 현상이 나타났다. 또한 본 정삼투막을 사용하여 RO모드의 운전으로 압력을 60 bar 이상으로 높여 운전한 경우에는 막이 파손되는 현상도 관찰되었다. 따라서 본 연구와 같은 RO/PRO 공정의 운전효율을 향상시키기 위해서는 고압의 운전조건에 적합한 최적의 분리막이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

RO 운전의 경우에도 모델식을 이용한 플럭스의 예측값과 실험값이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

2

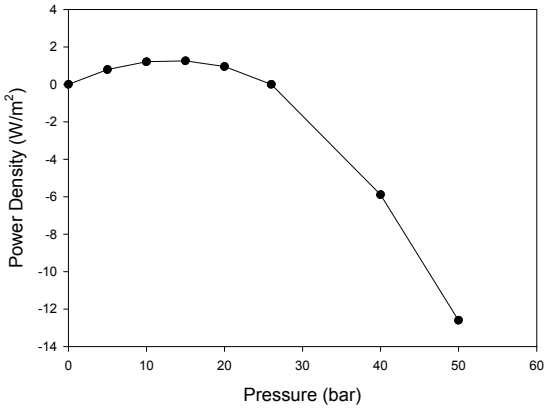


Fig. 8 Power Density in PRO and RO modes.

본 공정에서는 가해준 압력에 따라 에너지를 소비하거나 생산하게 되며, 이를 이용하면 일부 에너지를 저장해서 나중에 활용할 수 있게 된다. Fig. 8은 PRO와 RO 모드에서 에너지 사용량을 모델 식으로서 계산한 것이다. PRO 모드에서는 에너지를 생산하므로 양의 값으로 나타내며, RO 모드에서는 에너지를 소비하므로 음의 값을 나타내고 있다. PRO에서의 최대전력밀도가 1.27 W/m^{2}이나 RO에서의 전력밀도는 -6 W/m^{2}이하 이므로 전체적인 에너지 저장효율은 낮은 것으로 판단된다. 그러나 효율적인 PRO 전용막의 개발과 공정의 최적화를 통해서 에너지 저장효율을 향상시킬수 있는 가능성은 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 물과 에너지의 생산 및 상호전환을 위한 새로운 방법으로서 에너지 소요에 따라 한 장치에서 RO 모드와 PRO 모드로 상호 변환하여 운전 가능한 RO/PRO 시스템에 대하여 연구하였다. 실험실 규모의 연구를 통해서 RO/PRO 시스템의 기본개념 타당성에 대해서 확인할 수 있었으며, 운전조건에 따른 효율을 조사하였다. 본 연구결과 RO와 PRO에 동시 적용이 가능한 고성능 분리막의 필요성을 확인할 수 있었으며, 이러한 분리막이 개발된다면 전체 시스템의 성능을 향상으로 인해 더 높은 효용성을 얻을 수 있을 것으로 기대되었다. 또한 앞으로의 연구를 통하여 RO와 PRO 시스템 각각에 대한 최적의 운전조건을 도출함으로써 물과 에너지를 상호 전환하는 경우에 효율을 극대화시키는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 해수담수화플랜트사업단의 지원(code# C106A152000106A085700220) 하에 수행되었습니다.

참고문헌

(1) 홍승관, 이상호, 김준하, 김정훈, 주영길, 2011, “그린 미래를 향한 역삼투 공정의 진화,” 한국공업화학회지, Vol. 14, No. 6, pp. 9~20.

(2) Shuren Chou, Rong Wang, Lei Shi, Qianhong She, Chuyang Tang, Anthony Gordon Fane, 2012, “Thin-film composite hollow fiber membranes for pressure retarded osmosis (PRO) process with high power density,” Journal of Membrane Science, Vol. 389, pp. 25~33.

(3) Thor Thorsen, Torleif Holt, 2009, “The potential for power production from salinity gradients by pressure

retarded osmosis," Journal of Membrane Science, Vol. 335, pp. 103~110.

(4) Shuaifei Zhao, Linda Zou, Chuyang Y. Tang, Dennis Mulcahy, 2012, "Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges," Journal of Membrane Science, Vol. 396, pp. 1~21.

(5) Andrea Achilli, Amy E. Childress, 2010, "Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation-Review," Desalination, Vol. 261, pp. 205~211.

(6) 임경업, 윤종호, 신우철, 박재상, 김강식, 2011, "실측자료 기반의 공동주택의 시간별 전력소비 패턴 분석 연구," 한국태양에너지학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 127~132.

(7) Qianhong She, Xue Jin, Chuyang Y. Tang, 2012, "Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: Effects of operating conditions and reverse solute diffusion," Journal of Membrane Science, Vol. 401~402, pp. 262~273.

(8) Stein Erik Skilhagen, Jon E. Dugstad, Rolf Jarle Aaberg, 2008, "Osmotic power-power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients," Desalination, Vol. 220, pp. 476~482.