

압력지연삼투(PRO) 발전 시스템에서 채널 입구 압력차의 영향에 대한 수치해석적 연구

홍성수* · 류원선* · 전명석** · 정귀영*†

*홍익대학교 화학공학과

127-791 서울 마포구 와우산로 94

**한국과학기술연구원 미세유체연구팀

136-791 서울 성북구 화랑로 14길 5

(2013년 8월 30일 접수, 2013년 10월 8일 수정본 접수, 2013년 10월 15일 채택)

Numerical Studies on the Effects of the Channel-Inlet-Pressure Difference in the Pressure-Retarded Osmosis (PRO) Power System

Sung Soo Hong*, Won Ryoo*, Myung-Suk Chun** and Gui Yung Chung*†

*Department of Chemical Engineering, Hong-Ik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea

**Complex Fluids Laboratory, National Agenda Res. Division, Korea Institute of Science and Technology (KIST),
5 Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

(Received 30 August 2013; Received in revised form 8 October 2013; accepted 15 October 2013)

요 약

해수-담수 염도 차 발전을 위한 압력지연삼투(pressure-retarded osmosis: PRO) 시스템의 나권형(spiral wound) 모듈에서 공급채널과 유도채널 사이의 입구 압력차의 영향이 수치적으로 연구되었다. 그리하여 막을 통한 물과 용질-플럭스들의 변화와 전력이 예측되었다. 막을 통한 물-플럭스의 크기는 두 채널 간 입구 압력차가 증가할수록 x축 방향으로 감소하고 y축 방향으로 증가하였다. 반면에 막을 통한 용질-플럭스의 크기는 반대의 경향을 보였다. 공급채널 내 유체의 농도는 y축 방향으로 크게 증가하였고, 유도채널 내 농도는 x축 방향으로 크게 감소하였다. 본 시스템에서 입구 압력차가 1~11 atm일 때 공급채널 내 유량은 8~13% 가량 감소하였고, 유도채널 내 유량은 그만큼 증가하였다. 전력밀도는 입구 압력 차가 증가할수록 증가하다가 감소하였다.

Abstract – In the spiral wound module of the pressure-retarded osmosis (PRO) system for the salinity gradient power generation, effects of the inlet pressure differences between feed-channel and draw-channel were studied. Fluxes of water and solute through membrane and power were estimated. The water flux through membrane decreased along the x-direction and increased along the y-direction with the increase of inlet pressure differences between two channels. On the other hand, the solute flux through membrane showed the opposite trend. The concentration of flow in the feed-channel increased a lot along the y-direction and that in the draw-channel decreased along the x-direction. In our system, for the inlet pressure differences of 1~11 atm, the flow rate in the feed-channel decreased about 8~13% and that in the draw-channel increased by the same amount. The power density increased and then decreased with the increasing inlet pressure difference.

Key words: Numerical Study, Pressure-Retarded Osmosis System, Spiral Wound Module, Water Flux, Solute Flux, Power

1. 서 론

전 세계적인 인구 증가와 산업발달로 인하여 화석연료의 수요가 급증하고 이로 인한 환경오염이 큰 문제로 대두되고 있다. 이를 해

결하기 위해 세계적으로 화석연료를 대체하기 위한 노력으로 많은 신 재생에너지 기술들이 연구·개발 중에 있다. 이러한 신재생에너지원 중에는 해양 염도차발전, 조력발전, 파력발전, 조류발전과 같은 해양 자원이 있으며, 국내에서는 2009년 설치된 울돌목 조류발전소와 2011년도 국내 최초 조력발전소인 시화호 조력발전소가 운영되고 있다.

염도 차 에너지 회수 조작 기술은 역전기투석[1]과 압력지연삼투 발전이 각광받고 있다. 이 중 압력지연삼투는 농도가 다른 두 용액의 삼투압 차이를 이용한 발전으로 정삼투압(forward osmosis)을 이용하여 해수 담수화의 역방향 조작이다. 고농도 용액 쪽이 삼투압

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: gychung@hongik.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

보다 낮은 압력이면, 삼투압에 의해 막을 통한 고농도 용액으로 가는 물-플럭스가 존재하고, 이로 인해 상승한 유도채널의 수압을 이용하여 터빈을 돌려 에너지를 생산한다. 즉, 두 용액의 농도차에 의해 발생된 삼투압 차이를 기계적 에너지로 회수하는 공정이다. 본 연구에서 저농도의 용액은 담수, 고농도의 용액은 해수이다[2].

막을 사이에 둔 압력차 즉, 삼투압(osmosis)을 이용한 염도 차 에너지 회수 연구의 초기 시작은 1950년대 Pattle[3]의 연구로부터 접근하기 시작하였다. 그 후 1970년대 석유과동을 겪으면서 재조명을 받게 되었고 많은 연구가 진행되었다. 이 시기에 Loeb과 Norman[4]에 의해 압력지연삼투(pressure-retarded osmosis: PRO)라는 용어가 제안되었다.

압력지연삼투 발전 시스템의 나권형(spiral wound) 모듈은 유도채널(draw channel), 막 그리고 공급채널(feed channel)로 구성되어 있다. 모듈의 공급채널을 통해 유입된 담수가 중앙에 위치한 관의 축에 수직방향으로 흐르고, 유도채널을 통해 유입된 해수는 막을 사이에 두고 담수와 교차하여 중앙관의 축 방향으로 흐른다. 이 때 막을 중심으로 담수에서 해수로의 물의 이동이 발생하게 된다. 일반적으로 유도채널 내 해수 유량의 1/3은 전력생산을 위해 터빈으로 가고, 나머지 2/3는 나권형 모듈로 유량을 공급해주는 압력교환기로 유입되어 순환하게 된다. 압력지연삼투 공정을 통하여 보다 높은 전력을 얻기 위해서는 사용되는 막의 구조가 중요하다. 해수와 담수가 농도차에 의해 막을 중심으로 용매의 흐름이 생기게 되는데 이 때 막 표면과 내부에 용질이 축적되는 현상이 발생하게 된다. 이를 농도분극(concentration polarization)이라 하며 막 외부에서 생기는 현상을 외부농도분극, 내부에서의 현상을 내부농도분극이라 한다. 막을 통한 물-플럭스는 농도분극의 영향을 받아 시간이 흐를수록 그 양이 감소하게 된다[5]. 위 두 가지의 농도분극을 압력지연삼투에 고려하여 Yip 등[6]은 막을 통한 물-플럭스와 용질-플럭스 그리고 전력밀도 측정 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 내부농도분극과 외부농도분극을 고려하여 막을 통한 물-플럭스와 용질-플럭스를 계산하고, 이때의 모듈 내 압력, 유량, 농도 분포 및 변화, 그리고 막 면적당 얻을 수 있는 전력밀도를 수치해석으로 예측하였다.

2. 기본원리

2-1. 시스템과 지배방정식

나권형 모듈은 담수화 기술에 있어 가장 많이 사용되는 형태이다. 이 모듈은 Fig. 1(a)와 같이 중심관의 주위로 평판을 감아 놓은 형태이다. 이 평판은 세 층의 유도채널, 막 그리고 공급채널로 구성되어 있다. 본 연구에서 막의 특성치들은 폴리아미드(polyamide) 막의 것들이다. 유도용액은 해수이며 모듈의 중심축의 방향으로 흐르고, 공급용액은 담수이며 중심축에 대해 수직방향으로 흘러 두 유체는 교차 흐름이다. 공급용액의 일부는 삼투압에 의해 막을 통해 유도용액에 첨가되며 나머지는 중심축의 관을 통하여 회수된 용액이 나오게 된다.

반투과막을 중심으로 서로 농도가 다른 용매가 나뉘어 있을 때 발생하는 삼투압 차이($\Delta\pi$)는 Van't Hoff의 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\Delta\pi = iRT\Delta C \quad (1)$$

여기서 i 는 이온종의 갯수, C 는 용질농도[g/L], R 은 기체상수[atm·L/mol·K], 그리고 T 는 절대온도[K]이다. 이 식에 따르면 20 °C, 35 g/L의

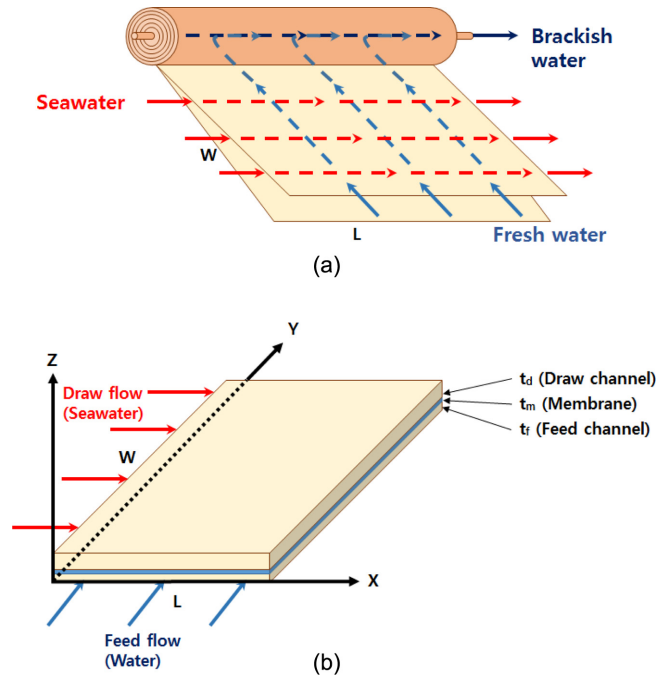


Fig. 1. The schematic diagram of the PRO system. (a) Configuration of the spiral wound module unrolled for visualization and (b) the spiral wound plate. Here, seawater flows parallel to the axis of the cylinder and fresh water flows in the circular direction and gets out through the central tube.

Table 1. Dimensions of the spiral wound module

Thickness of the membrane, t_m [m]	4×10^{-5}
Thickness of the draw channel, t_d [m]	5×10^{-4}
Thickness of the feed channel, t_f [m]	8×10^{-4}
Length of the module, L [m]	1
Width of the membrane, W [m]	8.4

해수는 29 atm의 삼투압을 가진다.

나권형 모듈 관의 구성은 Fig. 1(b)에 나타나 있다. 위에 언급된 바와 같이 모듈 관은 유도채널, 막, 공급채널로 이루어져 있으며, 각 두께는 t_d , t_m , t_f 이다. 모듈의 치수들은 Table 1에 나타나 있다. 해수는 x 축 방향으로 그리고 담수는 y 축 방향으로 유입되며, 이 때 두 용액의 농도 차에 의해 공급채널의 담수가 막을 통하여 유도채널로 이동한다. 공급채널의 남은 용매는 y 축 방향으로 나가게 된다. 공급채널의 담수로부터의 용매의 이동으로 유도채널의 해수 압력은 높아지고 이를 이용하여 전력을 얻을 수 있다. 각 채널의 z 축 방향으로의 압력, 유량, 농도 변화는 무시하였다. Fig. 1(b)와 같이 담수는 y 축 방향으로, 해수는 x 축 방향으로 흐르며, 용매는 막을 통해 공급채널에서 유도채널로 z 축 방향으로 이동한다. 이 때 용매인 물-플럭스의 방향을 양(+)으로 정하였고, 그 반대인 용질-플럭스의 방향을 음(-)으로 정의하였다. 물-플럭스와 용질-플럭스는 식 (2)와 식 (3)으로 정의된다[8].

$$J_w = A(\Delta\pi_m - \Delta P_m) = A \left[\frac{\pi_D \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) - \pi_F \exp\left(\frac{J_w S}{D}\right)}{1 + \frac{B}{J_w} \left\{ \exp\left(\frac{J_w S}{D}\right) - \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \right\}} - \Delta P_m \right] \quad (2)$$

Table 2. Characteristic values of the PRO system [9,10]

Water permeability coefficient, A [m/atm·s]	9.5×10^{-7}
Solute permeability coefficient, B [m/s]	8.5×10^{-8}
Structure parameter of the membrane, S ($=t_s \tau / \epsilon$) [m]	3.5×10^{-4}
Diffusion coefficient, D [m^2/s]	1.5×10^{-9}
Membrane resistivity, K ($=S/D$) [s/m]	2.3×10^5
Mass transfer coefficient of solute, k [m/s]	8.5×10^{-5}
Friction parameter in the each channels, b [atm·s/m ⁴]	8,500

$$J_s = -B(C_{d,m} - C_{f,m}) = -B \left[\frac{C_d \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) - C_f \exp\left(\frac{J_w S}{D}\right)}{1 + \frac{B}{J_w} \left\{ \exp\left(\frac{J_w S}{D}\right) - \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \right\}} \right] \quad (3)$$

여기서 하첨자 d, f, 그리고 m은 각각 유도채널, 공급채널, 막을 의미한다. 또한, A[m/atm·s]는 막의 용매침투계수이고, B[m/s]는 용질침투계수이다. $\Delta\pi_m$ 은 채널 각 지점에서의 두 채널의 농도 차에 따른 삼투압이고, ΔP_m 은 공급채널과 유도채널 간의 각 지점에서의 압력차를 의미한다. 막의 고유특성인 용매침투계수(A) 값이 클수록, 용질침투계수(B) 값은 작을수록 압력지연삼투 시스템으로부터 더 높은 전력밀도를 얻을 수 있다[6]. 하지만 압력지연삼투의 가장 큰 단점인 농도분극 현상으로 인해 사용 빈도와 시간의 흐름에 따라 그 효율이 감소하게 된다. 식 (2)와 (3)의 오른쪽 항은 외부농도분극과 내부농도분극을 포함한 식이다[5]. 한편, k[m/s]는 용질인 염(NaCl)의 물질전달계수이고, D($=D_m \epsilon / \tau$)[m²/s]는 확산계수, S($=t_s \tau / \epsilon$)[m]는 막 내부 지지층의 고유 값으로 막내의 지지층의 두께(t_s), 기공도(porosity, ϵ), 기공의 굴곡도(tortuosity, τ)에 의해 결정된다. S와 D의 비는 막 저항도로서 K[s/m]로 표기되고 그 값은 Table 2에 나타나 있다[9].

2-2. 물질수지

압력지연삼투에서 물-플럭스와 용질-플럭스를 포함한 유도채널과 공급채널에서의 물질수지는 다음과 같다.

2-2-1. 용매수지

유도채널과 공급채널에 대한 용매물질수지는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{du_d}{dx} = \frac{J_w}{t_d} \quad (4)$$

$$\frac{du_f}{dy} = -\frac{J_w}{t_f} \quad (5)$$

식 (4)는 유도채널 내에서 유체의 유속(u_d)의 변화는 막을 통하여 공급채널로부터 들어오는 물-플럭스의 증가량에 비례하는 것을 나타낸다. 또한, 식 (5)는 막을 중심으로 공급채널에서 유도채널로 이동하는 물-플럭스로 인해 공급채널에서의 유체의 유속(u_f)이 감소하는 것을 의미한다.

2-2-2. 용질수지

유도채널과 공급채널에 대한 용질물질수지는 다음과 같이 주어진다.

$$u_d \frac{dC_d}{dx} + C_d \frac{du_d}{dx} = \frac{J_s}{t_d} + \frac{J_w C_f}{t_d} \quad (6)$$

$$u_f \frac{dC_f}{dy} + C_f \frac{du_f}{dy} = -\frac{J_s}{t_f} - \frac{J_w C_f}{t_f} \quad (7)$$

물-플럭스와 달리 용질-플럭스는 유도채널에서 막을 통하여 공급채널로 이동한다. 유도채널에서 이동해오는 용질-플럭스의 영향으로 인해 식 (6)에서 유도채널에서의 용질 농도는 감소하고, 식 (7)의 공급채널에서의 농도는 증가한다.

각 채널에서의 유량(F_f 와 F_d) 변화는 물-플럭스가 주요 원인으로 작용한다. 유도채널과 공급채널에서 유체의 유량변화는 다음과 같다.

$$\frac{dF_d}{dx} = WJ_w \quad (8)$$

$$\frac{dF_f}{dy} = -LJ_w \quad (9)$$

식 (8)은 유도채널의 유량이 공급채널에서 이동해오는 물-플럭스로 인해 증가하고, 식 (9)는 공급채널의 유량이 유도채널로 이동하는 물-플럭스 만큼 감소하게 된다.

막 면적당 생산 가능한 전력밀도(P_D)는 막을 통한 물-플럭스(J_w)와 막을 사이에 둔 두 채널 사이의 압력차(ΔP_m)의 곱이며, 다음 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$P_D = J_w \Delta P_m \quad (10)$$

위의 식들을 무차원한 후에 전력밀도의 예측을 위해 Table 1과 Table 2의 변수값들을 적용하여 유한차분법으로 계산하였다. 무차원 식들은 유한차분법에서 x축으로 21개, y축으로 41개 요소로 분할하여 각 지점에서의 값들이 구해졌다.

3. 결과 및 고찰

나권형 모듈 기반의 압력지연삼투 시스템에 대해 유한차분법을 이용하여 수치해석하였다. 두 채널 사이의 압력차에 따른 막을 통한 물-플럭스의 변화는 압력지연삼투 시스템을 이용하여 생산 가능한 전력밀도를 예측하는데 중요한 요인이다. 따라서 본 연구에서는 입구에서 두 채널의 압력차가 압력지연삼투발전 시스템에 미치는 영향을 관찰하였다.

막을 통한 물-플럭스는 두 채널 사이의 압력차에 따라 변하고 그로 인해 얻을 수 있는 전력량이 결정된다. 전력밀도를 예측하기 위해 두 채널의 입구 압력차에 따른 막을 통한 공급채널로부터의 물-플럭스와 유도채널로부터의 용질-플럭스가 계산되었고, 또한 그에 따른 채널의 유량이 계산되었다. 이들 막을 통한 플럭스와 채널 내 유량 변화, 즉 발전 시스템의 작동에 대해 공급채널과 유도채널 사이의 입구 압력차가 미치는 영향을 관찰하였다.

3-1. 물-플럭스와 용질-플럭스에의 영향

모듈 내부에서 막을 중심으로 나뉘어 있는 두 유체의 구동력은 식 (2)에서와 같이 두 용액의 삼투압($\Delta\pi_m$)과 막에 걸리는 압력(ΔP_m)의 차이이다. 두 채널 입구에서의 압력의 차이를 ΔP_0 라 할 때 ΔP_0 의 크기가 ΔP_m 의 크기로 연결되므로 이 ΔP_0 가 모듈 성능에 미치는 변화가 관찰되었다. 유도채널의 압력이 12 atm으로 고정되었고, 공급채

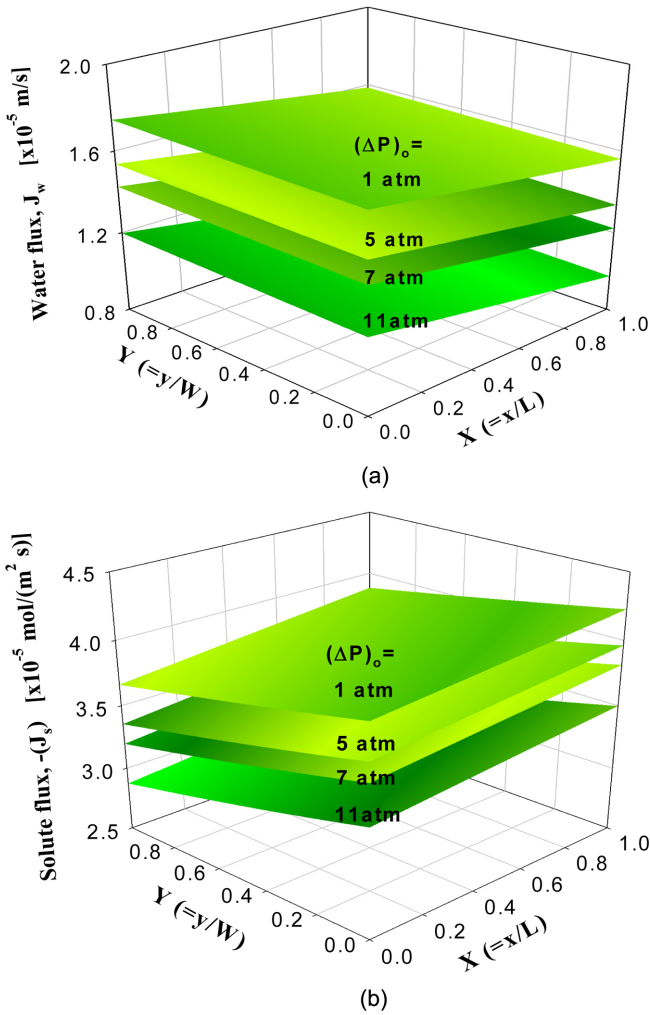


Fig. 2. Distributions of (a) the water flux (J_w) and (b) solute flux (J_s) across membrane at different inlet pressure differences. Here, ΔP_o is ($P_{do}-P_{fo}$) and P_{do} was fixed at 12 atm.

널의 압력은 1, 5, 7, 11 atm으로 변화를 주었다. 즉, ΔP_o 가 11, 7, 5, 1 atm일 때 시스템 작동 변화가 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2(a)는 ΔP_o 에 따른 물-플럭스의 크기이다. 식 (2)에서와 같이 ΔP_o 이 증가할 수록 ΔP_m 이 증가하여 막을 통한 물-플럭스가 감소한다. 즉, ΔP_o 가 1 atm에서 11 atm으로 증가할 때 물-플럭스의 크기가 감소하였다. ΔP_o 가 11 atm에서의 물-플럭스는 1 atm에서의 물-플럭스 크기보다 약 35% 감소하였다.

앞서 설명된 바와 같이 본 연구의 시스템에서 물-플럭스는 양(+의) 값이고, 용질-플럭스는 음(-의) 값이다. 이러한 용질-플럭스의 크기 변화가 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 식 (3)에서와 같이 용질-플럭스는 막을 사이에 둔 두 채널 간의 농도차에 비례하고 또한 물-플럭스의 영향도 받는다. 두 채널 간 입구 압력차(ΔP_o)가 증가하면 물-플럭스는 감소하는 반면 용질-플럭스는 증가한다. 따라서 Fig. 2(a)에서 물-플럭스의 크기가 x축 방향으로 약 17% 감소하고 반면에 y축 방향으로 약 12% 증가하는 경향과 달리, Fig. 2(b)의 용질-플럭스의 크기는 x축 방향으로 약 10% 증가하고 y축 방향으로 약 5% 감소하는 경향을 보였다.

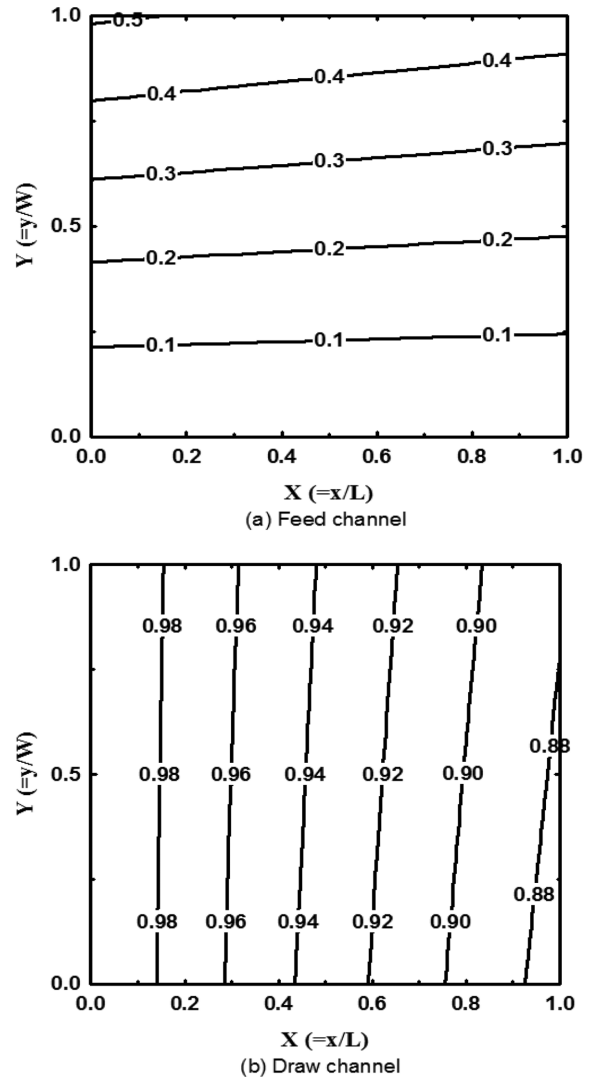


Fig. 3. Distributions of dimensionless concentration for each channel flow, (a) feed-flow (C_f/C_{do}) and (b) draw-flow (C_d/C_{do}). Here, calculations were done when ΔC_o was 35 g/L (i.e., C_{fo} 0 g/L NaCl and C_{do} 35g/L NaCl) and ΔP_o was 1 atm (i.e., P_{do} was 12 atm and P_{fo} was 11 atm).

3-2. 채널 내 농도분포

본 시스템에서 유도용액은 해수와 같은 농도의 NaCl 35g/L이고, 공급용액은 NaCl 0 g/L이다. 공급채널의 농도는 y축의 흐름 방향을 따라 크게 증가하였고, 유도채널의 NaCl 농도는 x축의 흐름 방향을 따라 크게 감소하였다. Fig. 3(a)는 공급채널 내 NaCl의 농도분포이고, Fig. 3(b)는 유도채널 내 NaCl의 농도분포이다. Fig. 3(a)에서 공급채널 내의 유체가 y축 방향으로 흐르고 있기 때문에 공급채널 내에서 유체의 농도가 y축 방향으로 증가하는 것이 두드러지게 나타났다. 또한, x축으로의 농도도 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 유도채널 내 유체의 흐름이 x축 방향이기 때문에 유도채널로부터 첨가되는 용질-플럭스가 공급채널 내 x축 흐름방향의 농도에 영향을 미치기 때문이다. 공급채널에서의 농도증가는 막 내부에 생기는 농도분극이 영향을 미치기 때문에 그 변화가 크게 나타난 것이다.

유도채널 내 NaCl의 농도분포인 Fig. 3(b)는 유체의 농도가 공급채널로부터 들어오는 물-플럭스로 인하여 유도용액의 흐름방향인 x

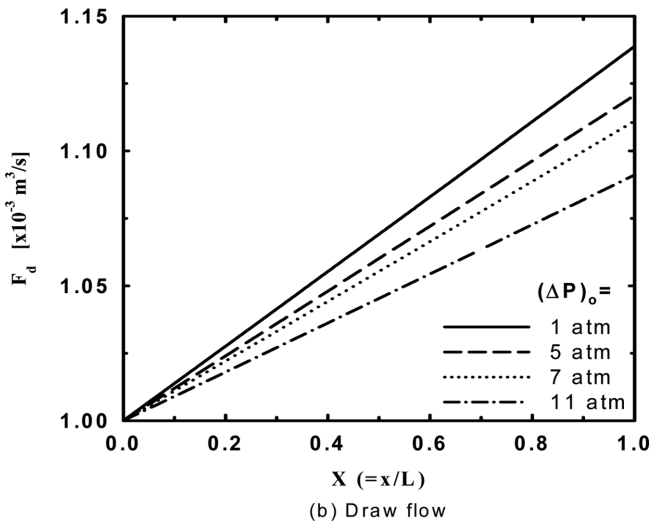
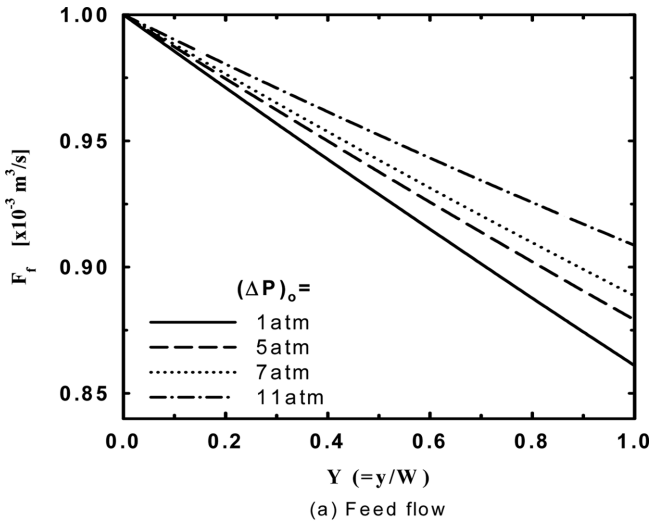


Fig. 4. Changes of the channel flow rates along the direction flows at different inlet pressure differences between two channels. (a) feed flow and (b) draw flow.

축 방향으로 가면서 희석되는 것을 보여준다. 공급채널로부터 들어오는 물-플럭스의 농도는 공급채널 유체의 흐름이 y 축 방향으로 증가하는 관계로 이 물-플럭스가 합해지는 유도채널에서의 농도분포는 공급채널에서와 같이 y 축을 따라서 약간 증가하고 있는 것이다.

3-3. 채널 내 유량에의 영향

두 채널 간의 입구 압력차(ΔP_o)가 11, 7, 5, 1 atm일 때의 유량 변화는 Fig. 4에 나타나있다. 식 (8)과 식 (9)에 나타난 것처럼 채널 내 유량변화에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 물-플럭스이다. 식 (8)에서 유도채널 내 유체의 유량은 유체에 더해지는 물-플럭스의 영향으로 증가하고, 식 (9)의 공급채널 내 유체는 공급채널에서 유도채널로 빠져나가는 물-플럭스 때문에 유량이 감소한다. 그런데 식 (2)에서와 같이 입구 압력차의 증가는 물-플럭스를 감소시킨다. 따라서 공급채널에서의 유량은 입구 압력차가 클수록 유도채널로 빠져나가는 물-플럭스가 줄어들기 때문에 본 시스템에서 Fig. 4(a)처럼 입구 압력차(ΔP_o)가 1~11 atm일 때 공급채널 내 유량은 출구에 도달할 때까지 약 8~13% 가량 감소하는 것을 보여준다. 입구 압력차

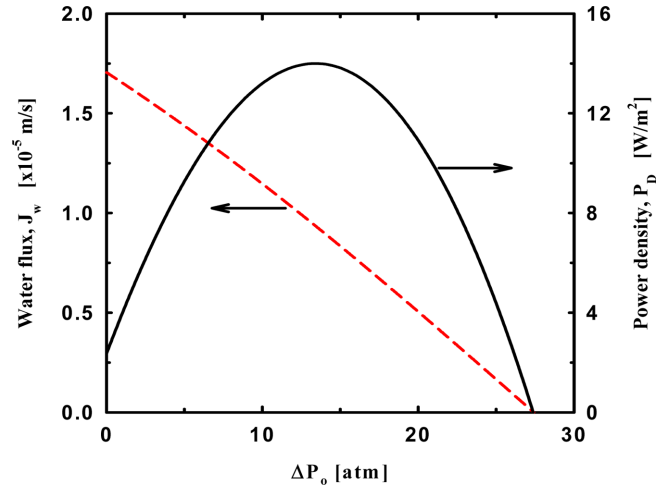


Fig. 5. The water flux (J_w) and the power density (P_b) versus the inlet pressure difference ΔP_o . Calculations were made at 35 g/L of ΔC_o (i.e., C_{fo} 0 g/L NaCl and C_{do} 35 g/L NaCl).

가 1 atm에서의 공급채널에서의 유량 감소량은 11 atm일 때의 유량 감소량보다 약 60% 가량 증가하였다.

이와 반대로 유도채널로 유입되는 물-플럭스는 식 (2)에서와 같이 입구 압력차가 감소할수록 증가한다. Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 본 시스템에서 유도채널 내 유량은 입구 압력차가 11 atm일 때 약 8% 증가한 반면 1 atm일 때는 약 14% 가량 증가하였다. 입구 압력차가 11 atm에서 1 atm으로 감소하면 유량 증가량은 약 75% 가량 크게 나타났다. 즉, 입구 압력차의 증가는 공급채널 내 유량 감소와 유도채널 내 유량 증가에 영향을 미치는 것이다.

3-4. 전력밀도에의 영향

압력지연삼투 발전은 삼투압으로 인한 유도채널의 부피 유량이 증가하면서 발생한 수압으로 터빈을 돌리게 된다[11]. 이 때 전력밀도는 식 (10)으로부터 막을 통해 이동하는 물-플럭스와 압력차이의 곱으로부터 구할 수 있다.

식 (2)에서와 같이 물-플럭스는 두 채널 사이의 압력차이가 클수록 작아지며, Fig. 2(a)로부터 그 결과를 확인하였다. 따라서 Fig. 5에는 입구 압력차가 삼투압에 해당하는 약 29 atm까지 증가할 때의 막을 통한 물-플럭스의 크기가 나타나 있다. 또한, 입구 압력차와 물-플럭스의 곱으로 막 면적당 얻을 수 있는 전력밀도가 나타나 있다. 압력차가 증가할수록 물-플럭스는 감소하고, 삼투압에 해당하는 약 29 atm에서 그 값이 0이 되는 것을 알 수 있다. 물-플럭스는 입구 압력차이가 증가할수록 감소하기 때문에 증가하는 입구 압력차(ΔP_o)와 감소하는 물-플럭스(J_w)의 곱인 전력밀도는 Fig. 5에 나타난 것처럼 초기에 증가하다가 감소하게 된다.

본 시스템에서는 약 14 atm에서 최대의 전력밀도를 얻을 수 있었다. 이론적으로 압력지연삼투 시스템에서 최대의 전력밀도를 얻을 수 있는 입구 압력차는 삼투압의 절반에 해당하는 차이일 때라고 보고되었다[12]. 본 시스템에서도 이와 같은 입구 압력차에서 가장 큰 전력밀도를 얻을 수 있었다. 또한, Yip 등[13]은 이 압력차에서 이론적으로 약 18 W/m²의 최대 전력밀도를 얻었고, Tiraferri 등[14]도 실험을 통하여 약 15 W/m²의 최대 전력밀도를 얻었음을 보였다.

4. 결 론

나관형 모듈 기반의 압력지연삼투에 대한 수치해석적 연구가 수행되었다. 막을 통한 공급채널로부터의 물-플럭스와 유도채널로부터의 용질-플럭스가 계산되었다. 또한, 공급채널과 유도채널 사이의 입구 압력 차이에 따른 물-플럭스와 용질-플럭스의 변화, 채널 내의 농도분포, 채널 내 유량변화와 막의 단위 면적당 얻어지는 전력밀도에 대해 관찰하였다.

두 채널 간의 입구에 가해지는 압력차(ΔP_0)가 증가할수록 막을 통한 물-플럭스의 크기는 감소하였다. 본 시스템에서 ΔP_0 가 11 atm에서의 물-플럭스는 1 atm에서의 물-플럭스 크기보다 약 35% 감소하였다. 용질-플럭스는 막을 사이에 둔 두 채널 간의 농도차에 비례한다. 물-플럭스의 크기가 x축 방향으로 약 17% 감소하고 y축 방향으로 약 12% 증가하는 경향과 달리, 용질-플럭스의 크기는 x축 방향으로 약 10% 증가하고 y축 방향으로 약 5% 감소하는 경향을 보였다.

본 시스템에서 공급채널 내 유체의 농도는 y축 방향으로 증가하는 것이 두드러지게 나타났다. 또한, 유도채널 내 유체의 흐름이 x축 방향이기 때문에 유도채널로부터 첨가되는 용질-플럭스가 공급채널 내 x축 방향의 농도에 영향을 미쳤다. 유도채널 내 농도는 공급채널로부터 들어오는 물-플럭스로 인하여 유도용액의 흐름방향인 x축 방향으로 가면서 희석되었고, y축을 따라서는 공급채널에서와 같이 약간 증가하였다.

본 시스템에서 공급채널 내 유량은 출구에 도달할 때까지 입구 압력차(ΔP_0)가 1~11 atm일 때 약 8~13% 가량 감소하였고, 유도채널 내 유량은 약 8~13% 가량 증가하였다. 증가하는 입구 압력차(ΔP_0)와 감소하는 물-플럭스(J_w)의 곱인 전력밀도는 삼투압의 절반에 해당하는 약 14 atm에서 최대의 전력밀도가 얻어졌다.

감 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업 연구과제(No. 20103020070060)입니다. 또한, 이 논문은 2013학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

Nomenclatures

A	: Solvent (i.e., water) permeability coefficient [m/atm·s]
B	: Solute (i.e., salt) permeability coefficient [m/s]
C_{cb} , C_f	: Concentration of salt in the channel
D	: Diffusion coefficient in the porous support layer ($=D_m \epsilon/t$) [m^2/s]
F_{cb} , F_f	: Volumetric flow rate in the channel [m^3/s]
J_w	: Water flux [m/s]
J_s	: Solute flux [mol/m^2s]
k	: Mass transfer coefficient of solute [m/s]
P_{cb} , P_f	: Pressure in the channel [atm]
P_D	: Power density [W/m^2]
L	: x-directional length in the feed channel [m]
R	: Gas constant ($=0.082$) [atm·m ³ /(mol·K)]

$S(=\tau_s \tau/\epsilon)$: Structure parameter of the support layer [m]
t_{cb} , t_f	: Height of the channel [m]
t_s	: Thickness of the support layer [m]
T	: Temperature [K]
u_{cb} , u_f	: Velocity of fluid in the channel [m/s]
W	: y-directional width in the draw-channel [m]
X	: Dimensionless x-directional distance along the flow in the draw channel
x	: x-directional distance along the flow in the draw-channel [m]
Y	: Dimensionless y-directional distance along the flow in the feed channel
y	: y-directional distance along the flow in the feed-channel [m]

Greek Letters

ϵ	: porosity of the support layer
τ	: tortuosity of pores in the support layer

Subscript

d	: draw-channel
D	: density
f	: feed-channel
o	: inlet condition
s	: solute, i.e., salt
w	: solvent, i.e., water

References

- Kim, K. S., Ryoo, W., Chun, M.-S., Chung, G. Y. and Lee, S. O., "Transport Analysis in Reverse Electrodialysis with Pulsatile Flows for Enhanced Power Generation," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**(2), 162-168(2012).
- Gerstandt, K., Peinemann, K. V., Skilhagen, S. E., Thorsen, T. and Holt, T., "Membrane Processes in Energy Supply for an Osmotic Power Plant," *Desalination*, **224**, 64-70(2008).
- Pattle, R. E., "Production of Electric Power by Mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile," *Nature*, **174**, 660(1954).
- Loeb, S. and Norman, R. S., "Osmotic Power Plants," *Science*, **189**, 654-655(1975).
- Kim, S. and Hoek, E. M. V., "Modeling Concentration Polarization in Reverse Osmosis Processes," *Desalination*, **186**, 111-128(2005).
- 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).
- Hwang, S. T., "Fundamentals of Membrane Transport," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 1-15(2011).
- Sundaramoorthy, S., Srinivasan, G. and Murthy, D. V. R., "An Analytical Model for Spiral Wound Reverse Osmosis Membrane Modules : Part I-Model Development and Parameter Estimation," *Desalination*, **280**, 403-411(2011).

9. Achilli, A., Cath, T. Y. and Childress, A. E., "Power Generation with Pressure Retarded Osmosis: An Experimental and Theoretical Investigation," *J. Membr. Sci.*, **343**, 42-52(2009).
10. Sundaramoorthy, S., Srinivasan, G. and Murthy, D. V. R., "An Analytical Model for Spiral Wound Reverse Osmosis Membrane Modules : Part II-Experimental Validation," *Desalination*, **277**, 257-264(2011).
11. Yip, N. Y. and Elimelech, M., "Thermodynamic and Energy Efficiency Analysis of Power Generation from Natural Salinity Gradients by Pressure Retarded Osmosis," *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 5230-5239(2011).
12. Hong, S. S., Ryoo, W., Chun, M.-S., Lee, S. O. and Chung, G. Y., "Numerical Studies on the Pressure-retarded Osmosis (PRO) System with the Spiral Wound Module for Power Generation," *Desalination Water Treat* (2013) online.
13. Yip, N. Y. and Elimelech, M., "Performance Limiting Effects in Power Generation from Salinity Gradients by Pressure Retarded Osmosis," *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 10273-10282(2011).
14. Tiraferri, A., Yip, N. Y., Phillip, W. A., Schiffman, J. D. and Elimelech, M., "Relating Performance of Thin-film Composite Forward Osmosis Membranes to Support Layer Formation and Structure," *J. Membr. Sci.*, **367**, 340-352(2011).