

## 정삼투 공정의 저에너지 고효율 세정을 위한 최적 유속 평가

김 이 향 · 김 정 빈 · 잔 민 · 민 다 혜 · 홍 승 관<sup>†</sup>

고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부  
(2019년 11월 29일 접수, 2019년 12월 20일 수정, 2019년 12월 20일 채택)

### Optimal Flow Rate Evaluation for Low Energy, High Efficiency Cleaning of Forward Osmosis (FO)

Yihyang Kim, Jungbin Kim, Min Zhan, Dahae Min, and Seungkwan Hong<sup>†</sup>

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

(Received November 29, 2019, Revised December 20, 2019, Accepted December 20, 2019)

**요 약:** 정삼투 공정(forward osmosis, FO)은 역삼투 공정(reverse osmosis, RO)에 비해 저압으로 운영되므로 오염 제어, 유지 보수, 막 세정 및 잠재적 에너지 저감 측면에서 큰 이점이 있어 다양한 분야에 적용할 수 있는 기술이다. 특히, 정삼투 공정의 막오염층이 비교적 느슨하고 분산된 특성을 가지므로 역삼투 공정과 달리 물리세정만으로도 충분한 막오염 제어가 가능하다. 하지만 기존 연구들의 경우 정삼투 물리세정에 적합한 세정 유속을 적용하지 않아 최적화 운전을 하지 못했다는 한계가 있다. 따라서 이 연구는 경제적인 에너지량으로 높은 효율의 세정을 보일 수 있는 적절한 유속의 정당성 평가를 목적으로 한다. 정삼투 공정 막오염 실험을 8.54 cm/s 순환 유속으로 유지하고 세 가지 세정유속으로 회복률과 SEC (specific energy consumption) 비교 평가하였다. 이 실험의 결과로 2배속 세정이 3배속 세정의 수투과도 회복률 만큼의 높은 효율을 보이는 동시에, 2배속 세정이 높은 세정효율 및 경제적인 SEC를 보이는 적절한 유속이라는 것을 확인하였다.

**Abstract:** Forward osmosis (FO) is operated at a lower pressure than reverse osmosis (RO), which has great advantages in terms of fouling control, maintenance, membrane cleaning, and potential energy reduction. In particular, since the membrane fouling layer of the forward osmosis process has a relatively loose and dispersed property, it is possible to control the membrane fouling by physical cleaning, unlike the reverse osmosis process. However, existing studies do not apply the proper cleaning flow rate for forward osmosis physical cleaning, and thus there is a limit that the optimal operation can not be performed. Therefore, this study aims to evaluate the justification of proper flow rate that can show high efficiency cleaning with economical energy amount. The membrane fouling experiments of the forward osmosis process were maintained at a circulating flow rate of 8.54 cm/s and the recovery rates were compared with the three cleaning flow rates. As a result of this experiment, it was confirmed that the 2 × speed cleaning showed the same efficiency as the water permeability recovery rate of the 3 × speed cleaning, and it was confirmed that the 2 × speed cleaning was an appropriate flow rate with high cleaning efficiency and economical SEC.

**Keywords:** forward osmosis, specific energy consumption (SEC), flow rate, cleaning

#### 1. 서 론

막(membrane)을 이용한 담수화 기술은 향후 물 부족 문제를 해결하는데 있어 가장 유망한 기술로 간주되고

있다[1]. 특히, 역삼투(reverse osmosis, RO) 공정을 이용한 담수화는 고염의 유입수 조건에서도 고품질의 음용수를 제공할 수 있으므로 산업 전반에 걸쳐 적용되고 있다[2]. 그러나 역삼투 공정은 고압으로 운영되므로 막

<sup>†</sup>Corresponding author(e-mail: [skhong21@korea.ac.kr](mailto:skhong21@korea.ac.kr), <http://orcid.org/0000-0002-9455-6434>)

**Table 1.** A Comparative Evaluation of Fouling Reversibility Using Commercially Available FO Membranes

Membrane material	Feed solution	Draw solution	Operation/cleaning time (min)	Cleaning velocity (cm/s)	Fouling reversibility (%)	Ref.
PA	35,014 mg/L secondary effluent	31,954,253 mg/L seawater	4,200~4,560/10	25.6	85~100	[18]
PA	1,200 mg/L sea salts, 220 mg/L CaCl <sub>2</sub> , 200 mg/L alginic acid, 200 mg/L humic acid	35,000 mg/L sea salts	- /60	25	100	[29]
PA	4.2 mM silica, 115 mM NaCl, 19 mM MgCl <sub>2</sub>	4 M NaCl	1,440~4,320/15	21	60	[27]
PA	35 mM CaCl <sub>2</sub> , 20 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 19 mM NaCl	4 M NaCl	1,440/15	21	75	[26]
CTA	200 mg/L alginate, 0.476 M NaCl, 0.008 M CaCl <sub>2</sub>	3.5 M NaCl	1,440/30	4.0	82	[30]
CTA	50 mM NaCl, 0.5 mM CaCl <sub>2</sub> , 200 mg/L alginate	4 M NaCl	1,620/15	0.011	96	[28]
CA	100 mg/L alginate, 1 g/L silica	5 M NaCl	180/60	34.44	93.1	[20]
CA	200 mg/L alginate, 50 mM NaCl, 0.5 mM CaCl <sub>2</sub>	4 M NaCl	1,200~1,440/15	21	98	[25]

오염이 자주 발생하며 이로 인한 에너지 소비가 증가한다는 단점이 있다[3]. 특히, 여러 종류의 오염 물질이 막 표면에 증착 및 흡착되어 수투과도가 감소하게 되고 케이크 강화 삼투압이 발생하며[4-6], 이로 인해 분리막을 통한 순 구동력이 감소되어 운영비용 또한 증가하게 된다[2,4,7].

역삼투 공정 시스템의 운영에서 막오염을 컨트롤하고 많은 에너지를 절감하려는 노력에도 불구하고, 효율적인 시스템 면에서 역삼투 공정의 운영 개발에는 일정한 한계가 있다[16]. 이러한 한계를 극복하기 위한 차세대 수처리 기술로써 정삼투(forward osmosis, FO) 기술이 지속적으로 주목 받고 있다[6]. 삼투압보다 높은 압력으로 운영되는 역삼투 공정과 달리, 정삼투 공정은 삼투압을 구동력으로 사용한다. 즉, 정삼투 공정은 역삼투 공정에 비해 저압으로 운영되므로 하이브리드 시스템에서 오염 제어, 유지 보수, 세척 및 잠재적 에너지 저감 측면에서 이점이 있으므로 유도 용액의 재구성이 필요하지 않은 응용 분야에서 적용할 수 있는 기술이다[17,18]. 그 중 폐수를 재활용하고 바닷물을 담수화하는 정삼투-역삼투(FO-RO) 하이브리드 공정에 대한 활발한 연구가 진행되고 있는데, 이 공정은 분리막을 두고 폐수 쪽에서 해수 쪽으로 물을 이동시키고, 희석된 해수를 역삼투 공정으로 처리하여 저에너지로 해수담수화를 실현할 수 있다.

이전의 정삼투 공정에 대한 연구는 주로 정삼투 공정이 역삼투 공정과 구동력에 차이가 있으므로 이에 다른 파울링 메커니즘을 가지고 있음을 보였다[17-20]. 정삼투 공정은 삼투압을 구동력으로 사용함에 따라, 고압 조건에서 작동되는 역삼투 공정의 압축된 막오염과 달리 느슨하고 분산된 막오염층이 생성된다[2,17-24]. 비록 정삼투 막에서 막오염층이 더 두꺼울 수 있지만, 일반적으로 정삼투 막오염은 더 가역적이며, 수투과도 회수율을 초기값의 60~100%로 높게 만든다[17-19,25-29].

정삼투 공정의 막오염 세정 방법 중 화학세정은 가역성 파울링을 제거하기에 용이하지만 막 손상이 심해져 수명이 짧아지며, 화학 세정제 사용으로 인해 높은 비용이 발생한다는 단점이 있다. 그에 비해 물리 세정 방법인 플러싱은 오염 물질 제거에 효과적이고 높은 수투과도 회복률을 보이며, 막 손상이 적어 수명을 오래 유지할 수 있다. 정삼투 공정의 파울링은 높은 가역성을 보이므로 고농도의 유기 물질이 함유된 도시 폐수와 같은 유입수에서도 정삼투 공정을 적용할 수 있다[17,18,31-33].

정삼투 공정의 적용에서, 파울링은 더 높은 순환유속[4], flow pulsation[30], 기포 도입[25]을 통해 완화될 수 있다. Table 1은 높은 순환 속도에서 플러싱을 통해 정삼투 공정 막 시스템의 파울링 가역성에 대해 수행된 이전의 연구를 보여준다. 이러한 높은 가역성은 석고[26] 및 실리카[20,27]에 의한 스케일링과 단백질 및 바이오

**Table 2.** Water Flux, Reverse Salt Flux and Materials for FO Membrane Measured in a Lab-scale FO Cross-flow Setup at 25°C

	PA	Conditions	Ref.
Material	Polyamide	31,954 ± 253 mg/L TDS	
Water flux (L/m <sup>2</sup> h)	16 ± 1	Feed: 350 ± 14 mg/L TDS	[34]
Reverse salt flux (mol/m <sup>2</sup> h)	0.18 ± 0.01	Draw solution	

Commercially available flat-sheet FO membrane was used in these experiment: polyamide (PA, Porifera).

폴리머에 의한 오염[18,28-30]으로도 관찰된다. 전체 결과는 화학 세정이 필요 없는 주기적 행굼을 통해 정삼투 공정의 막 오염을 쉽게 제어할 수 있음을 의미한다.

그러나 기존의 데이터들은 실험실 규모 연구에 사용된 높은 세정 유속이 필요로 하는 에너지에 대하여 재검토해 볼 필요가 있다(Table 1). 일부 정삼투 공정 시스템과 다른 작동 조건 하에서 높은 유속의 세정으로 수류가 향상될 수 있지만, 결과적으로 그만큼 증가된 에너지 수요의 타당성도 고려해 보아야 한다. 현재의 연구들은 정삼투 공정에서의 수투과도 회복성 뿐만 아니라 전체 공정효율을 향상시키기 위해서 에너지 효율도 고려되는 연구도 필요하다. 또한 이로써 벤치, 파일럿 및 데모 규모의 연구에서 에너지 소비에 대한 보고가 향상되면 정삼투 공정의 최적화 및 상용화 촉진에 대한 경쟁 과제를 보다 잘 이해할 수 있게 된다.

본 연구에서는 정삼투 공정에서 경제적인 에너지로 높은 효율의 세정을 보일 수 있는 적절한 유속 정당성 평가를 한다. 정삼투 공정 막오염 실험을 8.54 cm/s 순환 유속으로 유지하고, 세 가지 세정유속으로 회복률을 비교 평가하며, 동시에 생산수량에 비해 소모되는 에너지량을 확인했다. 이로써 높은 회복률을 달성하며 에너지 절감효과로 세정할 수 있는 세정유속을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 정삼투 공정

#### 2.1.1. 정삼투 막

본 연구에서 정삼투 막으로 thin-film composite (TFC) membrane (Porifera, Inc., CA)을 사용하였다. 이 상업용 멤브레인은 우수한 안정성과 성능을 나타내어 높은 수투과도  $16 \pm 1$  (L/m<sup>2</sup>h)과 낮은 염 투과율  $0.18 \pm 0.01$  (mol/m<sup>2</sup>h)을 나타낸다[34]. 해당 정삼투 막을 평평한 시트로 4°C에서 초순수(DI)에 보관한 후 초순수로 여러 번 행굼었다. 모든 정삼투 공정 실험은 활성층이 공급용액을 향한 AL-FS 방향으로 수행되었다.

#### 2.1.2. 정삼투 공정 실험 장비

정삼투 공정 실험은 실험실 규모의 교차흐름(cross-flow) 단위로 수행되었다. 공급 및 유도 채널 모두 길이가 7.7 cm, 너비 2.6 cm, 높이 0.3 cm의 크기를 갖는 맞춤형 아크릴 셀(acrylic cell)로 유효면적은 20.02 cm<sup>2</sup>를 제공한다. 두 가지 가변속도 기어펌프(Cole-Parmer, IL)를 사용한 재순환을 통해 공급 및 유도용액의 흐름이 0.4 L/min로 유지했다. 두 용액의 온도는 항온조를 통해  $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 조정하였다. 벌크유도용액(bulk draw solution) 탱크의 중량 데이터는 해당 탱크를 컴퓨터에 연결된 디지털 저울에 올려 측정하였다. 삼투막을 통과한 수투과도는 유도용액의 중량 변화를 기반으로 결정하였다.

#### 2.2. 실험 용액

인공하수용액 제조를 위해 alginic acid sodium salt powder, bovine serum albumin (Sigma-Aldrich, St. Louise, MO), dextrose anhydrous (Junsei Chemical Co., Ltd.)을 유기물 막오염 물질로 사용했다. 제조사에 따르면, BSA의 분자량은 ~66 kDa이며, 동결건조한 파우더 형태이다. Alginic acid sodium salt powder는 알긴산 사슬의 카르복실산기는 물에 불용성이지만 알긴산을 나트륨 형태로 전환하여 물에 쉽게 용해될 수 있는 파우더 형태이다. Dextrose의 분자량은 180.16 Da이며, 파우더 형태이다. Alginate, BSA, dextrose (10 g/L)의 stock solution을 준비하기 위해 초순수에 용해시켰다. 해당 물질을 stock solution에 24시간 동안 완전히 용해시킨 후, 멸균된 유리병에서 4°C로 유지시켰다.

#### 2.3. 실험 방법

##### 2.3.1. 막오염 형성

탱크 1과 3에 인공하수용액 2 L와 탱크 2와 4에 0.6 M NaCl 용액 2 L를 각각 채운다(인공하수용액은 Table 1 참조). 항온조를 20°C로 유지한 채 펌프 1~4를 가동시켜 탱크 1~4에 담긴 용액의 온도를 안정화시킨다. 펌

프 1~4를 0.4 LPM의 유량으로 정삼투 막에 공급한다. 운영 직후 수투과도를 (15분 이내) 안정화시킨다. 안정화된 이후 10분 간 측정된 수투과도를 초기 수투과도 (initial flux)로 한다. 안정화 후, 정삼투 막 표면에 충분한 막오염이 형성될 수 있도록 실험을 지속한다. 막오염 생성 실험은 수투과도를 지속적으로 기록하며 진행하고, 측정 시간은 4시간으로 한정한다. 종료 직전 10분간 기록된 수투과도를 바탕으로 최종 수투과도(final flux)를 계산한다. 이때, 펌프 1, 2와 3, 4의 전력 소모량 (kW)과 생산수 수투과도를 측정하여 4시간 동안 소비되는 전력 소모량과 생산수량을 계산한다.

### 2.3.2. 물리 세정 및 전력 소모량 측정 단계

막오염 형성 후, unit 내에 용액을 완전히 비운 후, 초순수 2 L로 교체하여 채운다. 펌프 1, 2의 유량을 2배로 증가시켜(0.8 LPM) 정삼투 막으로 30분간 공급하여 물리 세정을 실시한다. 이때, 펌프 1, 2의 전력 소모량(kW)을 측정한다. 펌프 3, 4의 유량을 3배로 증가시켜(1.2 LPM) 정삼투 막으로 30분간 공급하여 물리 세정을 실시한다. 이때, 펌프 3, 4의 전력 소모량을 측정한다.

### 2.3.3. 세정 효율 및 에너지 소비 확인 단계

세정 실험 종료 직후, unit 내에 용액을 완전히 비운다. 탱크 1과 3에 있는 용액을 새로운 인공하수용액 2 L와 탱크 3과 4에 있는 용액을 새로운 0.6 M 염화나트륨 용액 2 L로 교체하여 채운다. 막오염 생성 단계의 과정을 반복한다. 식 (1)을 이용하여, 막오염 생성 단계에서 계산된 초기 수투과도(initial flux,  $J_{\xi}$ ) 및 최종 수투과도(final flux,  $J_{xf}$ )와 세정 효율 확인 단계에서 계산된 초기 수투과도(recovered initial flux,  $J_{xr}$ )를 바탕으로 세정 효율(FR)을 계산한다. 그리고 물리세정 및 전력 소모량 측정 단계에서 측정된 펌프 1~4의 전력 소모량으로 식 (2)를 이용하여, 에너지 소비량을 구한다. 계산된 펌프 1, 2와 3, 4의 전력 소모량(kW)을 생산수량 (ton/hr)으로 나누어 에너지 소비량(kWhr/ton)을 구한다. 이때에  $W_{pump}$ 는 펌프의 전력소비(kWh)이고,  $V_{permeate}$ 는 특정 운전시간 동안 얻은 생산수량( $m^3$ )이다. 막오염 생성단계의 SEC ( $W_{pump, fouling}/V_{permeate, fouling}$ )와 물리세정 단계의 SEC ( $W_{pump, cleaning}/V_{permeate, cleaning}$ )를 합하여 한 사이클의 SEC를 나타낼 수 있으며, 각 실험의 SEC는 매 사이클의 누적되는 SEC 값이 된다.

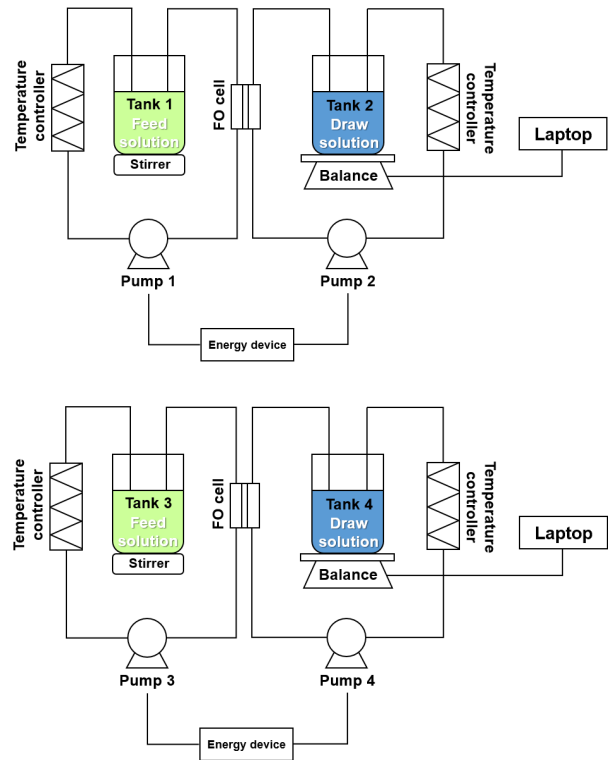


Fig. 1. Schematic diagram of low energy 2 × speed physical cleaning and 3 × speed physical cleaning.

$$\text{Fouling reversibility (FR) (\%)} = \frac{J_{xr} - J_{xf}}{J_{\xi} - J_{xf}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{SEC} = \frac{W_{pump}}{V_{permeate}} \left( = \frac{W_{pump, fouling}}{V_{permeate, fouling}} + \frac{W_{pump, cleaning}}{V_{permeate, cleaning}} \right) \quad (2)$$

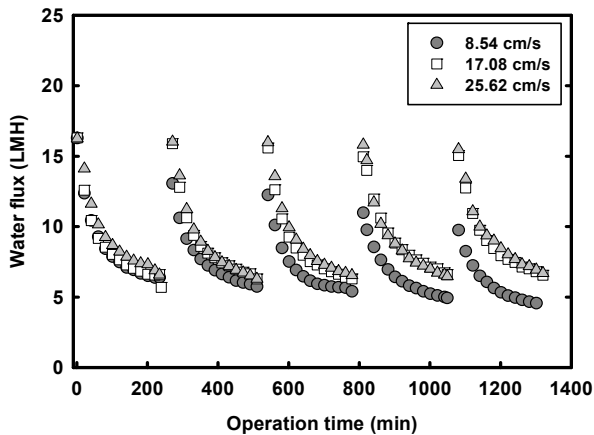
## 2.4 SEM 분석

분리막의 단면 및 표면 상태를 확인하기 위해 환경 전자 주사 현미경(FE-SEM with low vacuum & bio application technology, Quanta 250 FEG, FEI)으로 1,000~5,000배의 배율에서 관찰하였다. 정확한 단면분석을 위해 분리막을 액화질소로 판단하였고, 시료는 SEM 분석을 위해 팔라듐/백금 코팅하였다.

**Table 3.** Flux Recovery of Cleaning Flow Rate. The Initial Water Permeability Value of the Next Cycle is Required to Obtain the FR

Cleaning flow rate (cm/s)	FR (%)				
	1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	4th cycle	5th cycle
8.54	66.7 ± 7.6	61.7 ± 7.2	51.3 ± 7.1	41.4 ± 4.6	
17.08	95.8 ± 3.1	92.8 ± 5.9	86.5 ± 8.7	87.0 ± 6.0	
25.62	97.6 ± 5.4	97.2 ± 6.7	95.4 ± 8.1	92.1 ± 6.8	

Since it is a 5 cycle experiment, only 4 cycles of FR are obtained.



**Fig. 2.** Water flux according to 5 cycles after operating 240 minutes and flushing for 30 minutes.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 정삼투(FO) 막오염에 대한 수투과도 회복률 및 표면 특성

##### 3.1.1. 장기간 운영된 수투과도 회복률 비교

기존의 연구[1,3,4,15-18,26]에서는 8.54 cm/s 유속 대비 3배인 25.62 cm/s를 세정유속으로 사용하고 있다. 이 경우 100% 회복률로 높은 편이며 장기간 연속 운영을 하여도 회복률이 크게 떨어지지 않는다는 장점이 있다. 즉, 높은 순환유속에서 전단력이 강하므로 막 세정에 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 순환유속을 높이기 위해선 에너지가 많이 소모되므로 막오염 물리 세정 시 제거 효율이 좋으면서 에너지가 적게 드는 최적 유속 적용을 고려해볼 필요가 있다. 이를 위해 세 가지 유속순환속도로 물리 세정을 시행하였고, 5회 연속 반복 실험하여 FR값을 측정하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 세정유속이 각각 25.62와 17.08 cm/s의 경우 첫 번째 사이클에서 막오염이 거의 제거되었지만, 실험을 반복하면서 FR값이 지속적으로 감소하였다. 주목할 점은 25.62 cm/s보다 낮은 유속인

17.08 cm/s로 세정하였을 때도 25.62 cm/s 유속 세정과 비슷한 회복률을 보인다는 것이다. 네 사이클로 연속 장기 운전을 하였을 때에도 가역성 수치는 최고 효율을 보인 25.62 cm/s의 유속의 수치보다 5% 이하의 격차인, 87.0 ± 6.0%로 높은 효율을 보였다(Table 3).

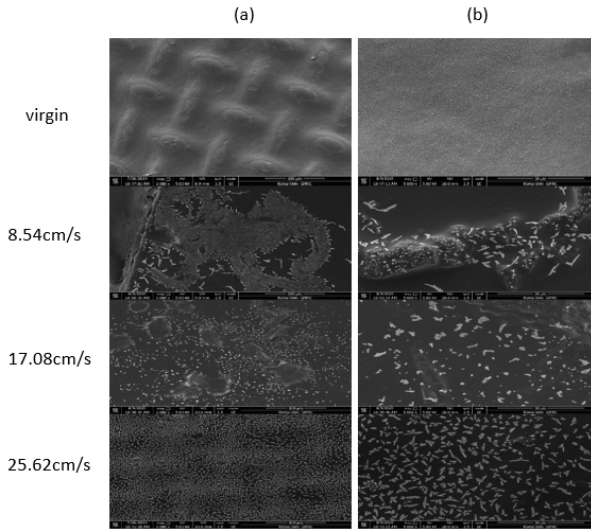
반면 8.54 cm/s의 경우 첫 번째 사이클부터 수투과도 회복률이 다른 세정유속 적용 대비 저조하며, 실험을 반복할수록 회복률이 더 떨어짐을 관찰할 수 있다. 즉, 8.54 cm/s 유속으로 실험할 때 막오염이 생긴 경우, 1배속 세정유속 적용 시 높은 회복률을 보이기 어렵다는 것을 알 수 있다.

##### 3.1.2. FE-SEM을 통한 막오염 표면

다양한 유속의 물리세정으로 얻은 회복률과 상응하는 막 표면을 확인하고자 FE-SEM을 이용하여 1,000, 5,000 배 확대한 이미지를 분석하였다(Fig. 3). 일반적으로 하수 성분 중 Ca<sup>2+</sup> 같은 2가 양이온들과 유기물 성분들은 결합 후 고점도 응집물이 되어 막에 부착되는데[35], 이 경우 약한 유속으로는 막 오염 세정이 잘 되지 않는다. 17.08과 25.62 cm/s 유속 세정 결과 이미지를 살펴보면 막 위에 형성된 오염물질들이 더 잘게 부서져 있고 제거가 훨씬 잘 된 것을 확인할 수 있다. 반면 8.54 cm/s 유속으로 세정하였을 때는 막 위의 부착물들이 점도가 높아 세정이 효율적으로 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 다른 유속들의 막에 비해 더 심하게 막이 오염된 것을 볼 수 있고 회복률도 낮게 나타난다.

#### 3.2. 생산수량에 따른 specific energy consumption (SEC)

기존 연구에서는 세정에 필요한 유속보다 더 높은 유속으로 세정을 진행하였으므로 불필요하게 에너지가 많이 소모되었다(Table 1). 높은 유속의 효율성과 비슷한 고효율을 가지는 동시에 경제적인 에너지까지 고려된 세정유속의 평가를 위해서 각각의 생산수량에 따른 에



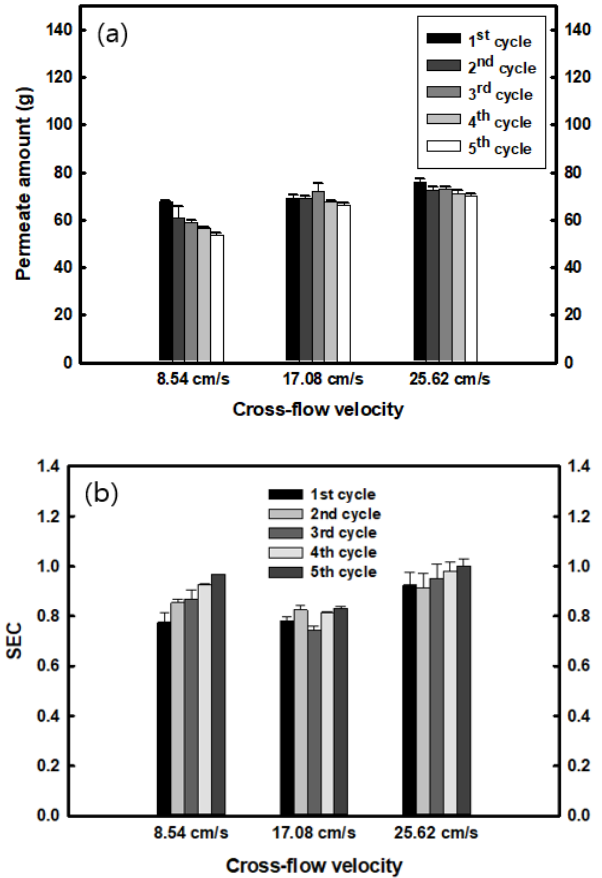
**Fig. 3.** (a) 1,000 × magnified SEM image and (b) 5,000 × magnified SEM image of membrane fouling after 5 cycles according to three cross-flow velocities (8.54, 17.08, and 25.62 cm/s).

너지 소모량을 확인했다.

Specific energy consumption (SEC)는 보통 소비된 에너지와 관련된 비용을 설명하는데 사용된다. 따라서 생산수량에 따른 전력소비량인 SEC로 에너지 효율성을 비교평가 해보았다. 그러나 실험실 규모의 기기 에너지 효율이 낮아 SEC 값이 상대적으로 높게 측정되므로 이를 상대적인 값으로 나타내었다.

반복 실험을 통해 막오염이 진행되면서 세 가지 세정 유속에 대한 생산수량이 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 특히, 회복률이 가장 저조했던 8.54 cm/s 세정 유속 경우 5사이클 중 마지막 사이클을 기준으로 생산수량이  $53.69 \pm 0.95$  g으로 가장 낮았고, 17.08과 25.62 cm/s 세정 유속 경우의 생산수량은 각각  $65.98 \pm 1.09$ ,  $70.12 \pm 1.12$  g으로 비교적 생산수량이 높았다 [Fig. 4(a)]. 그러나 세정 유속이 달라질수록 각 시스템에서 소모된 전력량이 달랐다. 세 유속의 전력소비량은 매 실험마다 점차 증가하였으나 8.54 cm/s 세정 유속의 경우 생산수량이 다른 두 세정 유속보다 12~16 g 정도 적었다. 따라서 유속이 1~3배 증가한다고 해서 SEC 값이 1~3배만큼 비례해서 증가하지는 않았다. 8.54 cm/s 세정 유속의 경우 3, 2배속의 보다 적은 전력량이 소비되었지만, SEC의 값은 최종적으로 7.08 cm/s 세정 유속의 SEC보다 13.71% 높게 나타난다[Fig. 4(b)].

또한, 반복 실험이 거듭될수록 생산수량은 감소하고



**Fig. 4.** (a) Permeate amount and (b) specific energy consumption (SEC) under three cross-flow velocities (8.54, 17.08, and 25.62 cm/s) operated by 5 cycles. SEC values are expressed as relative values.

전력소비량은 증가하므로 SEC도 증가한다. 세정 유속은 높을수록 막오염 제거가 원활히 되어 대체로 생산수량이 많았다. 1배 세정 유속(8.54 cm/s)에서는 생산수량이 적었기 때문에 상대적으로 SEC가 크게 나타났다. 3배 세정 유속(25.62 cm/s)의 경우 생산수량이 많았으나 전력 소모가 높아 SEC가 비교적 높게 나타났다. 8.54 cm/s 세정 유속의 소모되는 전력량은 세 유속에 비해 가장 낮지만, 낮은 유속에 비례하여 생산수량도 가장 적다. 이 때문에 1배속이지만 에너지 소비 측면에서 보았을 때, 비효율적으로 2배속과 유사한 SEC 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 적절한 세정 유속의 정당성

정삼투(FO) 공정에서 장기간 운전을 위한 최적의 물리세정 유속을 채택할 시, 수투과도의 회복률 뿐만 아



나라 생산수량 대비 전력소비량인 SEC가 함께 고려되어야 한다. 이는 수투과도 회복률도 운영 측면에서 중요하지만, 장기운영에 있어서는 에너지 효율적 측면 즉, 에너지 소비량이 전체 생산수 단가에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 17.08 cm/s 세정유속은 25.62 cm/s 세정유속과 유사한  $87.0 \pm 6.0\%$ 의 높은 수투과도 회복률을 보였고, Fig. 4(b)에서는 8.54 및 25.62 cm/s 세정유속의 SEC 대비 낮은 SEC를 보임으로써 에너지 효율성을 알 수 있다. 즉, 장기간 운전을 위한 적절한 세정유속으로 17.08 cm/s 유속이 수투과도 회복력 및 에너지 효율 방면으로 보았을 때 고효율성을 가진다는 것에 정당성이 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 정삼투 공정에서 경제적인 에너지로 높은 효율의 세정을 보일 수 있는 적절한 유속의 정당성을 평가하고자 했다. 이를 위해 장기간 운영으로 연속 5사이클의 막 오염 실험을 수행하였다. 8.54 cm/s의 순환유속으로 유지시켰으며, 4시간 경과 후 각각 세 가지 유속을 적용하여 실험을 진행하였다. 이 실험의 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 17.08 cm/s 세정유속은 5번의 반복 실험 동안 초기 수투과도 대비 최종수투과도 회복률이  $87.0 \pm 6.0\%$ 로 높은 효율을 보였다.

2) 각각의 다른 세정유속 적용 시 5번 반복하여 실험할 때, SEC가 17.08 cm/s의 세정유속을 적용할 때 다른 세정유속 대비 작다는 것을 확인할 수 있었다.

3) 수투과도 회복률과 SEC를 모두를 고려할 경우, 정삼투(FO) 공정에서 높은 세정효율과 효율적인 SEC를 보이는 적절한 유속은 17.08 cm/s로 판단할 수 있다.

따라서 순환유속의 3배가 아닌 2배 유속으로 세척을 시행할 경우, 비교적 적은 에너지를 사용하면서 3배 세정유속 효과의 세척 효율을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 17.08 cm/s 세정유속을 정삼투 공정에서 높은 회복률과 효율적인 에너지 세정을 보이는 적절한 유속으로 볼 수 있다. 기존 연구에서는 세정에 필요한 유속보다 더 높은 유속으로 운전하여 불필요한 에너지 소모하였지만, 이 연구를 통해 최적의 세정 유속으로 운전 시 불필요한 에너지를 줄일 수 있다는 것을 확인했다.

#### 감 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 플랜트연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(148-5016282).

#### Reference

1. M. Elimelech and W. A. Phillip, "The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment", *Science*, **333**, 712 (2011).
2. L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, and P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Water Res.*, **43**, 2317 (2009).
3. M. A. Shannon, P. W. Bohn, M. Elimelech, J. G. Georgiadis, B. J. Mariñas, and A. M. Mayes, "Science and technology for water purification in the coming decades", *Nature*, **452**, 301 (2008).
4. S. Lee, C. Boo, M. Elimelech, and S. Hong, "Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO)", *J. Membr. Sci.*, **365**, 34 (2010).
5. E. M. Hoek and M. Elimelech, "Cake-enhanced concentration polarization: A new fouling mechanism for salt-rejecting membranes", *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 5581 (2003).
6. D. L. Shaffer, J. R. Werber, H. Jaramillo, S. Lin, and M. Elimelech, "Forward osmosis: Where are we now?", *Desalination*, **356**, 271 (2015).
7. N. Misdan, W. Lau, and A. Ismail, "Seawater reverse osmosis (SWRO) desalination by thin-film composite membrane - Current development, challenges and future prospects", *Desalination*, **287**, 228 (2012).
8. T. Nguyen, F. A. Roddick, and L. Fan, "Biofouling of water treatment membranes: A review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures", *Membranes*, **2**, 804 (2012).
9. A. Ruiz-García, N. Melián-Martel, and I. Nuez, "Short review on predicting fouling in RO desali-

- nation”, *Membranes*, **7**, 62 (2017).
10. C.-H. Wei, S. Laborie, R. B. Aim, and G. Amy, “Full utilization of silt density index (SDI) measurements for seawater pre-treatment”, *J. Membr. Sci.*, **405**, 212 (2012).
  11. L. N. Sim, Y. Ye, V. Chen, and A. G. Fane, “Comparison of MFI-UF constant pressure, MFIUF constant flux and crossflow sampler-modified fouling index ultrafiltration (CFSMFI UF)”, *Water Res.*, **45**, 1639 (2011).
  12. ASTM, “Standard test method for silt density index (SDI) of water”, D19.08 D4189-07 (2014).
  13. A. Alhadidi, B. Blankert, A. Kemperman, R. Schurer, J. Schippers, M. Wessling, and W. van der Meer, “Limitations, Improvements and alternatives of the silt density index”, *Desalin. Water Treat.*, **51**, 1104 (2013).
  14. Y. Jin, H. Lee, Y. O. Jin, and S. Hong, “Application of multiple modified fouling index (MFI) measurements at full-scale SWRO plant”, *Desalination*, **407**, 24 (2017).
  15. Y. Jin, Y. Ju, H. Lee, and S. Hong, “Fouling potential evaluation by cake fouling index: Theoretical development, measurements, and its implications for fouling mechanisms”, *J. Membr. Sci.*, **490**, 57 (2015).
  16. L. Malaeb and G. M. Ayoub, “Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review”, *Desalination*, **267**, 1 (2011).
  17. B. G. Choi, D. I. Kim, and S. Hong, “Fouling evaluation and mechanisms in a FO-RO hybrid process for direct potable reuse”, *J. Membr. Sci.*, **520**, 89 (2016).
  18. B. G. Choi, M. Zhan, K. Shin, S. Lee, and S. Hong, “Pilot-scale evaluation of FO-RO osmotic dilution process for treating wastewater from coal-fired power plant integrated with seawater desalination”, *J. Membr. Sci.*, **540**, 78 (2017).
  19. C. Boo, M. Elimelech, and S. Hong, “Fouling control in a forward osmosis process integrating seawater desalination and wastewater reclamation”, *J. Membr. Sci.*, **444**, 148 (2013).
  20. Y. Kim, M. Elimelech, H. K. Shon, and S. Hong, “Combined organic and colloidal fouling in forward osmosis: Fouling reversibility and the role of applied pressure”, *J. Membr. Sci.*, **460**, 206 (2014).
  21. G. Gwak and S. Hong, “New approach for scaling control in forward osmosis (FO) by using an anti-scalant-blended draw solution”, *J. Membr. Sci.*, **530**, 95 (2017).
  22. G. Gwak, B. Jung, S. Han, and S. Hong, “Evaluation of poly (aspartic acid sodium salt) as a draw solute for forward osmosis”, *Water Res.*, **80**, 294 (2015).
  23. B. Mi and M. Elimelech, “Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes”, *J. Membr. Sci.*, **320**, 292 (2008).
  24. A. Achilli, T. Y. Cath, E. A. Marchand, and A. E. Childress, “The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes”, *Desalination*, **239**, 10 (2009).
  25. B. Mi and M. Elimelech, “Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents”, *J. Membr. Sci.*, **348**, 337 (2010).
  26. B. Mi and M. Elimelech, “Gypsum scaling and cleaning in forward osmosis: Measurements and mechanisms”, *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 2022 (2010).
  27. B. Mi and M. Elimelech, “Silica scaling and scaling reversibility in forward osmosis”, *Desalination*, **312**, 75 (2013).
  28. N. M. Mazlan, P. Marchetti, H. Maples, B. Gu, S. Karan, A. Bismarck, and A. G. Livingston, “Organic fouling behaviour of structurally and chemically different forward osmosis membranes - A study of cellulose triacetate and thin film composite membranes”, *J. Membr. Sci.*, **520**, 247 (2016).
  29. G. Blandin, H. Vervoort, P. Le-Clech, and A. R. Verliefde, “Fouling and cleaning of high permeability forward osmosis membranes”, *J. Water Process Eng.*, **9**, 161 (2016).
  30. M. M. Motsa, B. B. Mamba, J. M. Thwala, and A. R. D. Verliefde, “Osmotic backwash of fouled FO membranes: Cleaning mechanisms and membrane



- surface properties after cleaning”, *Desalination*, **402**, 62 (2017).
31. C. Boo, M. Elimelech, and S. Hong, “Fouling control in a forward osmosis process integrating seawater desalination and wastewater reclamation”, *J. Membr. Sci.*, **444**, 148 (2013).
  32. R. V. Linares, S. S. Bucs, Z. Li, M. AbuGhdeeb, G. Amy, and J. S. Vrouwenvelder, “Impact of spacer thickness on biofouling in forward osmosis”, *Water Res.*, **57**, 223 (2014).
  33. N. T. Hancock, P. Xu, M. J. Roby, J. D. Gomez, and T. Y. Cath, “Towards direct potable reuse with forward osmosis: Technical assessment of long-term process performance at the pilot scale”, *J. Membr. Sci.*, **445**, 34 (2013).
  34. B. G. Choi, M. Zhan, K. Shin, S. Lee, and S. Hong, “Pilot-scale evaluation of FO-RO osmotic dilution process for treating wastewater from coal-fired power plant integrated with seawater desalination”, *J. Membr. Sci.*, **540**, 78 (2017).
  35. M. Zhan, G. Gwak, D. I. Kim, K. Park, and S. Hong, “Quantitative analysis of the irreversible membrane fouling of forward osmosis during wastewater reclamation: Correlation with the modified fouling index”, *J. Membr. Sci.*, DOI:10.1016/j.memsci.2019.117757.