

물통합형 정삼투 시스템을 이용한 파일럿 스케일 담수 공정 모사

김봉철 · 홍승관* · 최준석†

한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소

*고려대학교 건축사회환경공학부

Pilot-Scale Simulation of Desalination Process Using Water Integrated Forward Osmosis System

Bongchul Kim · Seungkwan Hong* · Juneseok Choi†

Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

*School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

(Received 27 May 2017, Revised 21 June 2017, Accepted 3 July 2017)

Abstract

In these days, wastewater reclamation and seawater desalination play essential role in addressing the challenge of worldwide water scarcity. Particularly, reverse osmosis (RO) for seawater desalination process is commonly used due to less energy consumption than conventional thermodynamic systems. However, membrane fouling and electrical energy consumption during operation of RO system for seawater desalination have continued to be a obstruction to its application. In this study, therefore, wastewater secondary effluent is used for osmotic dilution of seawater. Firstly, fouling behaviour of RO by simulating wastewater effluent in osmotic dilution process was measured and we calculated energy consumption of overall desalination process by theoretical equations and commercial program. Our results reveal that RO membrane fouling can be efficiently controlled by pre-treatment systems such as nano filtration (NF) or forward osmosis (FO) process. Especially FO system for osmotic dilution process is a non-pressurized membrane system and, therefore, the operating energy consumption of overall desalination system was the lowest. Moreover, fouling layer on FO membrane is comparatively weak and reversible enough to be disrupted by physical cleaning. Thus, RO system with low salinity feed water through FO process is possible as a less energy consuming desalination system with efficient membrane fouling control.

Key words : Energy consumption, Forward osmosis, Fouling, Osmotic dilution, Reverse osmosis

1. Introduction

전 세계적인 미래 물 부족 문제를 해결하기 위해 막여과 기술 기반의 하수재이용 및 해수담수화 공정이 대두되고 있다(Kim and Chung, 1999; Bella et al., 2013). 특히 해수 담수화를 위한 역삼투막(reverse osmosis, RO) 공정은 기존의 증발법 대비 낮은 소비에너지로 점차 기존 공정을 대체하고 있는 추세이다(Elimelech and Phillip, 2011). 하지만 역삼투 공정 또한 막분리를 위한 구동력으로 다량의 전기 에너지를 소비하는 고압을 사용하기 때문에 막오염으로 인한 처리수 문제와 이를 해결하기 위한 화학세정의 비용 및 전기에너지 소비에 따른 경제성 문제가 대두되고 있다(Potts et al., 1981).

이를 대체하기 위하여 유도용액의 삼투압을 구동력으로

이용하는 정삼투막(forward osmosis, FO) 공정은 역삼투 공정에 비해 소비에너지 측면에서 우수하며, 비가압 공정으로 인한 막오염 가역성이 뛰어나다는 장점이 있다(Kim et al., 2012; Lee et al., 2010). 하지만, 정삼투 공정에서 유효한 삼투압을 발현함과 동시에 분리회수가 용이한 유도용질의 부재가 극복해야 할 부분으로 평가되고 있다(Mcginis and Elimelech, 2007; Jun et al., 2015). 정삼투막의 이러한 단점을 상쇄하고 장점을 부각시키기 위하여 하수처리수를 유입수로, 해수를 유도용액으로 이용하여 해수의 회석을 통한 역삼투 공정의 해수담수화 에너지를 낮추는 저에너지 물통합형 해수담수화 공정이 주목받고 있다(Boo et al., 2013; Sohn, 2016).

이에 따라, 하수재이용과 해수담수화를 정삼투 공정으로 통합시킨 정삼투-역삼투 물통합형 공정의 평가가 필요하다. 특히, 하수처리수를 통해 해수를 회석하여 역삼투 공정에 적용하기 위해서는 필수적으로 역삼투막의 막오염을 유발시키는 물질들의 제거가 정삼투 공정을 통해 이루어질 수 있어야 한다. 또한 물통합형의 전체 공정의 소비에너지가 기존 공정에 비하여 저감되는 것을 평가할 수 있어야 한다.

* To whom correspondence should be addressed.

jschoi@kict.re.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.

이를 위하여 본 연구에서는 현재 상용되고 있는 정삼투막과 역삼투막을 이용하여 하수처리수의 막오염유발물질을 모사한 용액으로 lab scale 막오염 실험을 진행하였다. 이를 통하여 정삼투 공정의 성능을 검증한 후 pilot scale의 물통합형 공정을 모사하여 기존 공정과 소비에너지를 비교, 평가하였다.

2. Materials and Methods

2.1 물통합형 공정의 물질 수지

본 연구는 정삼투-역삼투 물통합형 공정의 물질 수지를 바탕으로 10 m³/day의 pilot scale 플랜트를 모사하여 가장 효율적인 운영조건을 도출하고자 하였다. 유입수 조건은 정삼투공정에 1차적으로 적용하기 용이하도록 해수를 0.6 M NaCl, 하수처리수를 0.0086 M NaCl으로 가정하여 모델링을 진행하였다. 정삼투, 역삼투 각 공정의 회수율은 통상적으로 역삼투 공정에서 이용하는 40~60%의 평균인 50%를 기준으로 설정하였다(Fritzmann et al., 2007).

2.1.1 정삼투 공정 모사

현재 정삼투 공정의 경우 상용화 된 공정 모사 프로그램이 존재하지 않기 때문에 기존 문헌에 명시되어있는 막의 성능평가인자와 모듈의 스펙을 통하여 Fig. 2와 같은 농도분극현상을 모사하여 수투과량을 예측하였다.

사용된 막은 현재 상용화 되고 있는 HTI社의 모듈을 기본 조건으로 하였으며, 각 인자들의 값은 아래 Table 1에 정리하였다(Kim and Park, 2011; Park et al., 2011).

이와 더불어 Fig. 1의 공정의 정삼투 부분을 모사하고자 Table 2와 같은 운영인자를 설정하였으며, 해수와 하수의 삼투압을 OLI program (Morris Plains: NJ)으로 계산하였다. Table 1과 2에 나타난 인자를 바탕으로 아래 식을 통하여 유효삼투압에 의해 유입수에서 유도용액으로 이동되는 수투과량을 계산하였다(Cath et al., 2006).

$$J_W = A[\pi_{D,b} \exp(-\frac{J_W}{k}) - \pi_{F,b} \exp(\frac{J_W}{k})] \quad (1)$$

이를 통하여 계산된 생산수의 양을 모듈 길이에 따른 회수율로 계산하여 회수율에 따른 소요 막면적을 계산하였다.

2.1.2 역삼투 공정 모사

하수처리수를 정삼투 공정을 통해 회수하여 희석된 해수

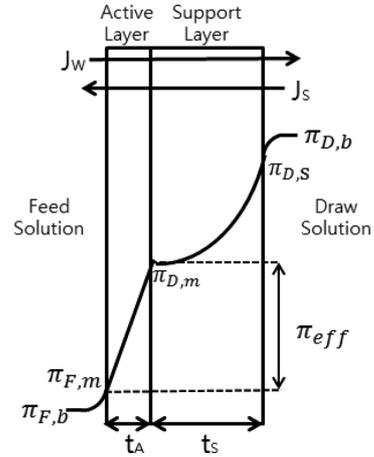


Fig. 2. Schematic illustration of osmotic pressure profile in FO system. J_w is, J_s is, $\pi_{D,b}$ is bulk draw osmotic pressure, $\pi_{D,s}$ is membrane surface osmotic pressure on the support layer at the draw side, $\pi_{D,m}$ is membrane surface osmotic pressure on the active layer at the draw side, $\pi_{F,m}$ is membrane surface osmotic pressure on the active layer at the feed side, $\pi_{F,b}$ is bulk feed osmotic pressure, π_{eff} is effective osmotic pressure, t_A is thickness of active layer, and t_S is thickness of support layer.

Table 1. Module parameters of HTI FO membrane

Module Parameters	Value
Water Permeability (A) ($\mu\text{m/s}\cdot\text{bar}$)	0.308
Solute Permeability (B) ($\mu\text{m/s}$)	0.127
Structure parameter (S) ($\mu\text{m/s}$)	302
Height (H) (m)	0.00114
Width (W) (m)	3.1496
Length (L) (m)	1.0

Table 2. Operating parameters for modeling of FO process

Operating parameters	Value
Mass transfer coefficient (k) ($\mu\text{m/s}$)	3.89
Temperature (T) ($^{\circ}\text{C}$)	20
Draw solution concentration (C_D) (M)	0.6
Feed solution concentration (C_F) (M)	0.0086

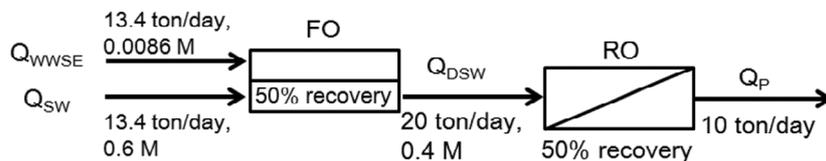


Fig. 1. Schematic illustration of mass balance for water integrated FO system. Q_{WWSE} is flow rate of wastewater secondary effluent, Q_{SW} is flow rate of seawater, Q_{DSW} is flow rate of diluted seawater, and Q_P is flow rate of permeate.

의 농도를 실제 상용화된 Toray社의 CSMPRO4 프로그램에 입력하여 운영압력을 도출하였다. 이 때, 사용된 멤브레인인 RE2540-SHF 모델로, 1 stage, 6 elements/vessel로 설

정하여 적용하였으며, 프로그램을 통해 도출된 인자를 통하여 아래에 식을 이용하여 이론적인 RO 공정의 소비에너지를 계산하였다(Bartman et al., 2010).

$$Energy\ Consumption = \frac{\Delta P}{Y} = \frac{\Delta P \cdot Q_F}{Q_P} \quad (2)$$

2.2 전처리 공정 적용여부에 따른 역삼투 공정의 막오염 경향

물통합형 공정의 경우 단순한 해수와 하수처리수의 혼합을 통한 희석 효과를 얻기 위해서는 하수처리수 내의 막오염유발물질(유기물과 2가 이온)의 제거를 통해 유기막오염 및 스케일링을 제어할 필요가 있다(Lee et al., 2010; Boo et al., 2013). 따라서 단순한 하수처리수의 혼합을 통하여 해수를 희석한 경우와 NF, FO 공정을 전단에 하수처리수를 전처리하는 공정으로 적용하였을 때의 RO 투과유량을 비교하여 막오염저감효과를 비교해보았다.

2.2.1 Lab scale 실험 장치

모든 lab scale 실험을 위하여 가로 7.7 cm, 세로 2.6 cm, 높이 0.3 cm (막의 유효 면적은 20.02 cm²)의 동일 규격 cell을 이용하였으며, 정삼투 cell은 유입수와 유도용액의 독립된 두 대칭 흐름이 가능하도록 구성되었다. 기어펌프를 사용하여 유입수와 유도용액의 십자흐름 속도를 21.4 cm/s로 일정하게 유지하였으며, 항온조를 통해 용액의 온도는 20°C로 유지되었다. 투과유속은 유도용액의 무게 증가를 저울로 3분마다 측정하여 컴퓨터에 자동 기록되도록 설정하였으며 기타 세부사항은 선행 연구에 자세하게 나타나 있다(Lee et al., 2010).

2.2.2 해수와 하수처리수 모사

해수에 의한 막오염현상을 방지하기 위하여 NaCl 0.6 M 용액을 이용하여 해수의 농도만을 모사하였으며, 하수처리수를 모사하기 위하여 문헌 값을 참고하여 하수처리수 내 막오염을 유발시키는 유기오염물질(Effluent Organic Matter: EfOM)을 선정하였다(Boo et al., 2013). 대표적 EfOM으로 휴믹계열, 프로틴계열 및 폴리사카라이드 계열의 유기물을 모사하고 막오염 현상을 가속화시키기 위하여 Table 3과 같은 물질을 각각 증류수로 희석하여 0.45 mm 필터로 거른 뒤 표준용액을 제조하여 사용하였다(2 g/L). 이와 더불어 유기막오염을 심화시키는 2가 이온물질의 농도를 마찬가지로

가지로 Table 3과 같이 적용하여 실험을 진행하였다.

2.2.3 Lab scale 막오염 실험

RO의 유입수로 모사한 하수처리수와 해수의 비율을 1:2로 설정하였으며, 단순히 혼합하여 섞은 용액, 하수처리수를 NF에서 처리하여 해수에 혼합한 용액, 하수처리수를 FO의 유입수 및 해수를 유도용액으로 사용하여 처리한 용액 세 가지를 각각 RO 유입수로 흘려보내 35 bar의 운영압력으로 운전하였다. 세 가지 용액을 이용한 각각의 실험의 초기 유량은 동일한 것을 확인 후 실험을 진행하였으며, 1,200 mL의 투과수를 얻기까지의 투과유량의 변화를 기록하였다.

3. Results and Discussion

3.1 물통합형 공정 모사

3.1.1 정삼투 공정

Table 1에 나타난 모듈 인자를 식 1에 대입하여 도출된 투과유량을 모듈 길이에 따라 희석되는 삼투압을 다시 농도로 환산한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 정삼투 모듈의 길이가 길어져 해수가 희석됨에 따라 그에 준하는 해수삼투압의 감소에 의하여 투과유량의 저감이 일어나 후단으로 갈수록 모듈길이에 따른 희석효과가 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 해수 농도를 가정하여 설정한 0.6 M NaCl의 과다한 희석은 정삼투 막 면적이 과다하게 소비될 것으로 판단된다.

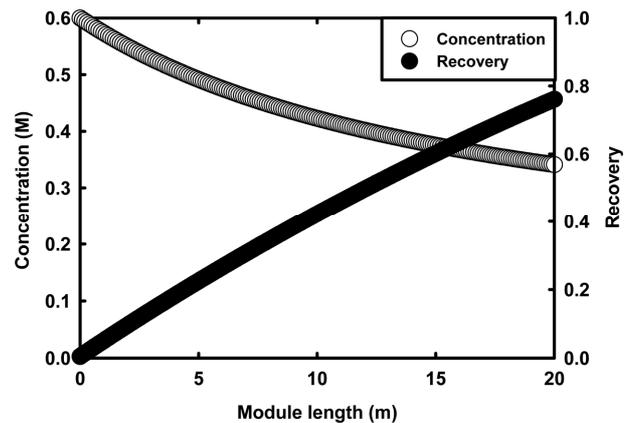


Fig. 3. Diluted seawater concentration and recovery of FO system by FO module length.

Table 3. Components of Synthetic seawater and wastewater effluent solutions for lab-scale fouling test

	Components	Concentration	Volume
Synthetic seawater	NaCl	0.6 M	4 L
	Humic acid	75 mg/L	
Synthetic wastewater effluent	Bonin Serum Albumin (BSA)	75 mg/L	2 L
	Alginate	75 mg/L	
	CaCl ₂	1.5 mM	

이를 더 정량적으로 분석하기 위하여 해수의 회석 농도 별로 도달하기 위한 정삼투막의 필요 모듈수를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 최초 0.6 M에서 0.55 M로 농도를 희석시키기 위해서 필요한 모듈 수는 2.0개로 나타났으나, 최종적으로 0.35 M에 도달하기 위해서는 0.4 M로 희석시킨 모듈 수에 6.3개의 모듈이 추가적으로 필요한 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 해수가 희석됨에 따라 발현되는 삼투압이 낮아져 정삼투 성능이 저감되는 것으로, 이는 정삼투 막의 소비를 증가시켜 부지면적이 넓어지는 단점으로 작용할 것으로 판단된다.

Fig. 3과 마찬가지로 Table 1과 식 (1)을 활용하여 각각의 막 표면 및 내부 농도분극현상을 부분별 삼투압을 역산하여 모듈 길이에 따라 모델링하였다(Fig. 5). 특히, 정삼투 공정에서의 메커니즘 상 외부농도분극(External Concentration Polarization: ECP), 내부농도분극(Internal Concentration Polarization: ICP) 현상이 발생하여 실제 구동력으로 작용하는 삼투압은 실제 해수 농도에 비하여 낮게 작용하는 것

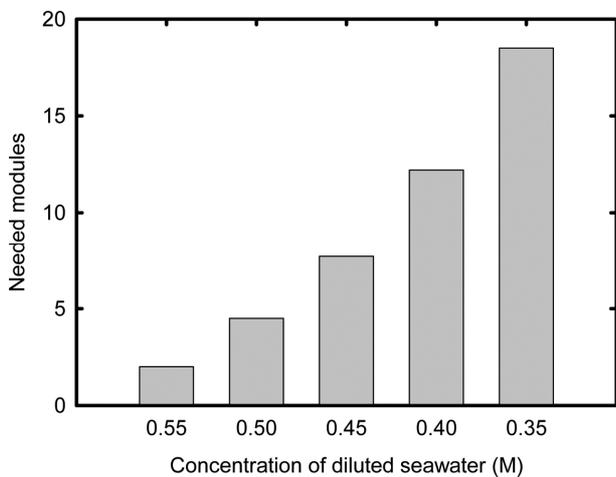


Fig. 4. Needed FO modules to achieve concentration of diluted seawater.

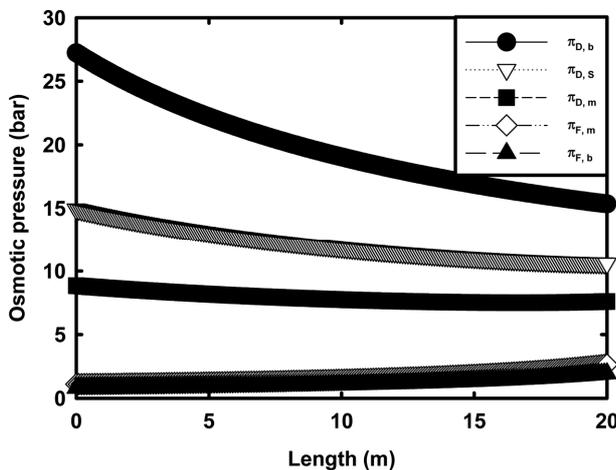


Fig. 5. Osmotic pressure data plotted against FO module length. All data indicates model as given in Eq. (1). Model prediction is based on FO membrane parameters such as A, B, S.

으로 나타났다. 이는 앞의 수식에 따라 투과유량에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히 초반의 높은 투과유량으로 인하여 외부농도분극 현상과 내부농도분극 현상이 크게 일어나는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 3과 4에서 설명한 것과 같이 후단으로 갈수록 유효삼투압이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 결과적으로 투과유량의 감소, 즉 해수의 희석효과가 감소되는 것으로 판단된다.

3.1.2 역삼투 공정모사 및 전체 물통합형 공정의 이론적 소비에너지 도출

정삼투 공정을 모사한 결과의 회수율을 바탕으로 희석된 해수의 농도를 CSMPRO4 프로그램에 입력하여 후단에 역삼투 공정을 모사한 결과 정삼투 공정에서 회수율의 증가로 해수의 농도가 희석될수록 후단의 역삼투 공정에서 최종 처리수량을 얻기 위한 소비에너지는 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6).

이는 역삼투 공정의 유입수의 농도가 낮을수록 동일한 생산수량을 얻기 위해 낮은 압력으로 운영이 가능해지면서 나타나는 현상으로 판단된다. 하지만 3.1.1의 Fig. 3, 4 결과와 같이 정삼투 공정의 회수율이 증가함에 따라 해수의 삼투압 감소로 정삼투막 소요면적이 증가하므로, 해수의 희석효과를 높이면서 정삼투막 면적이 과도하게 소비되지 않는 50%의 회수율을 통한 해수의 희석이 가장 적합할 것으로 판단된다. 하수처리수를 통한 해수의 희석효과 결과 에너지 저감 효과는 달성하였으나, 하수처리수를 이용함에 있어 막오염을 유발할 수 있기 때문에 전처리 성능으로써의 정삼투 공정을 3.2에서 평가하였다.

3.2 전처리 성능 평가

하수처리수 내 유기 막오염유발물질과 2가이온이 해수담수화 RO 막에 미치는 영향을 단순 혼합, NF 전처리, FO 공정을 통한 희석을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

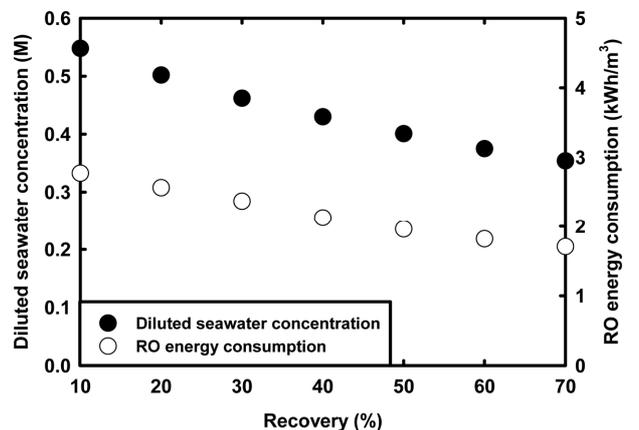


Fig. 6. Diluted seawater concentration and RO energy consumption data plotted against different recovery of FO process. Circles indicate model as given in Eq. (2). Model prediction is based on pressure calculated by CSMPRO4.

실험의 결과 단순한 하수처리수와 해수의 혼합만으로 희석된 용액을 RO 공정으로 운영할 때 초기 대비 70%까지 투과유량이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이와 반면에 FO와 NF 공정을 통한 전처리를 도입하여 RO 공정을 운영한 결과 90% 이상의 초기 투과유량이 유지되는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 단순 혼합시에는 하수처리수 내 유기물질에 의한 RO 막오염 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

3.3 정삼투막의 성능개선을 통한 소비막면적 감소 효과

현재 정삼투막의 성능으로는 해수 희석시 생기는 투과유량 감소로 인한 부지면적 및 모듈 소요 증가 등의 단점이 존재한다. 따라서 정삼투막의 성능이 개선됨에 따른 소비막면적의 변화를 모사하여 간접적인 정삼투 공정의 capital cost를 확인하였다. Fig. 1의 공정을 바탕으로 Table 1의 모

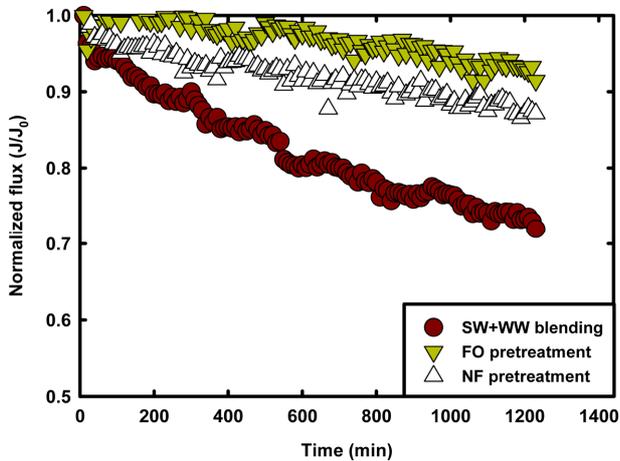


Fig. 7. Flux decline behavior of RO system with seawater + wastewater effluent blending solution, osmotic dilution solution by FO system, wastewater effluent pre-treated solution by NF system.

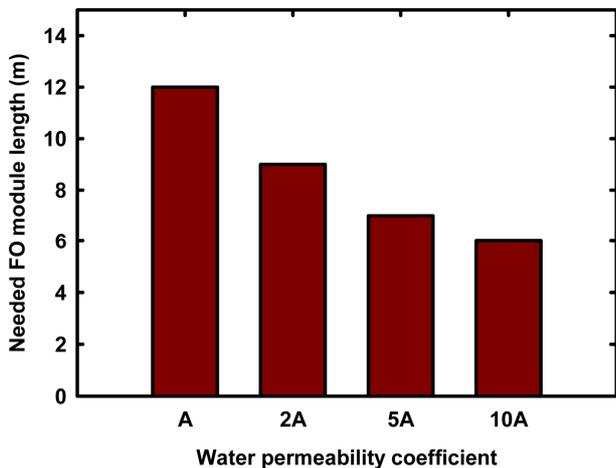


Fig. 8. Needed FO modules by water permeability coefficient value to achieve 50% wastewater effluent recovery using seawater.

둘 인자를 식 (1)에 대입하여 모듈 길이별 회수율에 도달 가능한 막면적을 모사하였다. 정삼투 공정의 특성상 지지층의 과도한 S 값의 개선을 통해 내부농도분극현상을 해결하기에는 내구성이 떨어지는 문제점이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, B 값의 경우 성능개선에 따라 수투과량의 영향은 미비하므로 A 값의 성능개선에 따른 소비막면적의 변화를 계산하였다(Fig. 8).

Fig. 8에 나타난 바와 같이 3.2의 연구결과에 의하여 하수처리수의 막오염물질 제거가 가능한 NF급 이상의 A 값을 갖는 활성층의 성능을 모사하기 위하여 A 값을 기존 대비 2배, 5배, 10배일 경우를 가정하여 공정모사를 진행하였다. 수투과도(water permeability)를 나타내는 A 값은 활성층의 주요 성능평가 인자 중 하나로 압력에 따른 수투과량을 나타낸다. 공정모사 결과 A 값의 성능개선에 따라 소비막면적은 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 A 값이 증가함에 따라서 막 내부에서 많은 양의 투과유량이 유도물질의 삼투압 발현을 방해하여 A 값의 성능개선이 일정부분 이상이 되면 소비막면적의 감소 효과는 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 일반적인 NF의 성능인 기존 정삼투막 대비 5배 정도의 A 값으로 운영 시, 막오염에 영향을 주는 2가염은 효율적으로 제거가 가능함과 동시에, 기존 대비 60%의 막 소비만으로 공정은 운영할 수 있을 것으로 기대된다.

4. Conclusion

정삼투막을 통한 해수의 희석 공정은 후단의 역삼투 공정에서 소비에너지를 효과적으로 저감시킬 수 있는 것으로 확인하였다. 하지만 해수의 삼투압을 구동력으로 하는 정삼투 공정에서는 회수율을 높여 해수를 희석하기 위해서 상당량의 정삼투막이 소요되는 것으로 나타났다. 정삼투막의 특성상 지지층과 활성층 표면에서의 농도분극현상으로 유효삼투압이 크게 감소하는 것을 확인하였다.

단순히 해수에 하수처리수를 혼합하여 사용할 경우에는 RO 공정 운영시 초기 대비 70%까지 투과유량이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 반면에 NF와 FO 공정을 통한 해수의 희석을 진행할 시에는 90% 이상 투과유량이 유지되는 것으로 확인되었다. 따라서 하수처리수를 이용하여 해수담수화의 에너지를 저감시키기 위해서는 FO, NF 성능의 전처리공정이 필수적일 것으로 판단된다. 또한 전처리공정을 포함한 전체 해수담수화 공정의 소비에너지를 도출한 결과 비가압으로 운영되는 FO공정이 NF 공정에 비해 효율적으로 해수담수화 공정의 소비에너지를 저감하는 것으로 나타났다.

앞서 설명한 농도분극현상에 의한 저감하기 위하여 정삼투막의 성능개선에 따라 소비막면적의 개선을 확인해보았다. 계산 결과 가장 영향력이 큰 수투과도가 NF 수준으로 성능개선이 이루어질 경우 30% 가량의 막 소비를 저감할 수 있는 것으로 확인되었다.

본 실험 결과를 통하여 정삼투막을 통한 하수재이용과

해수담수화를 융합한 물통합형 공정은 후단의 역삼투 공정의 소비에너지를 효과적으로 감소시킴과 동시에 하수처리수의 막오염유발물질을 효과적으로 저감시킬 수 있는 전처리 공정으로서 적합함을 보여주었다. 마지막으로 정삼투 공정에서 농도분극현상에 의한 유효삼투압이 저감되는 단점을 보완하기 위해서는 수투과도의 성능이 NF 수준으로 개선되어야 막 소비를 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통하여 향후 저에너지 물통합형 해수담수화 공정 적용을 위하여 막성능 및 특성을 반영하여 효과적인 운영조건을 설정하여야 함을 제시하였다.

기호설명

- A : Water permeability, 수투과도($\mu\text{m/s}\cdot\text{bar}$)
 A_m : Membrane area, 막 유효면적(m^2)
 B : Solute permeability, 염투과도($\mu\text{m/s}$)
 $C_{D,b}$: NaCl concentration of draw solution, 유도용액의 NaCl 농도(mol/L)
 $C_{F,i}$: NaCl concentration of feed solution, 유입수의 NaCl 농도(mol/L)
 D : Diffusion coefficient of draw solute, 유도용질의 확산 계수($\mu\text{m}^2/\text{s}$)
 J_w : Water flux, 투과유량($\mu\text{m/s}$)
 k : Mass transfer coefficient, 물질전달계수($\mu\text{m/s}$)
 ΔP : Operating pressure, 운영압력(bar)
 S : Structural parameter, 지지층 구조인자(μm)
 t : Time, 측정시간(s)
 V_{F0} : Initial volume of feed solution, 유입수의 최초 부피 (L)
 $\Delta\pi$: Effective pressure, 유효삼투압(bar)
 $\pi_{D,b}$: Osmotic pressure of draw solution, 유도용액 삼투압 (bar)
 $\pi_{F,i}$: Osmotic pressure of feed solution, 유입수 삼투압(bar)
 $Q_{F,i}$: Volume flow rate of feed solution, 유입수 유량(ton/day)
 Q_p : Volume flow rate of permeate, 생산수 유량(ton/day)
 Y : Recovery, 회수율

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원 (과제번호 15IFIP-B088091-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bartman, A. R., Zhu, A., Christofides, P. D., and Cohen, Y. (2010). Minimizing Energy Consumption in Reverse Osmosis

- Membrane Desalination Using Optimization-Based Control, *Journal of Process Control*, 20, 1261-1269.
- Bella, G. D., Trapani, D. D., Torregrossa, M., and Viviani, G. (2013). Performance of a MBR Pilot Plant Treating High Strength Wastewater Subject to Salinity Increase: Analysis of Biomass Activity and Fouling Behaviour, *Bioresource Technology*, 147, 614-618.
- Boo, C., Elimelech, M., and Hong, S. (2013). Fouling Control in a Forward Osmosis Process Integrating Seawater Desalination and Wastewater Reclamation, *Journal of Membrane Science*, 444, 148-156.
- Cath, T. Y., Childress, A. E., and Elimelech, M. (2006). Forward Osmosis: Principles, Applications, and Recent Developments, *Journal of Membrane Science*, 281, 70-87.
- Elimelech, M. and Phillip, W. A. (2011). The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment, *Science*, 333, 712-717.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., and Melin, T. (2007). State-of-the-art of Reverse Osmosis Desalination, *Desalination*, 216, 1-76.
- Jun, B. M., Han, S. W., Kim, Y. K., Nga, N. T. P., Park, H. G., and Kwon, Y. N. (2015). Conditions for Ideal Draw Solutes and Current Research Trends in the Draw Solutes for Forward Osmosis Process, *Membrane Journal*, 25(2), 132-143. [Korean Literature]
- Kim, B. C., Boo, C. H., Lee, S. Y., and Hong, S. K. (2012). Evaluation of Forward Osmosis (FO) Membrane Performances in a Non-Pressurized Membrane System, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(2), 292-299. [Korean Literature]
- Kim, C. H. and Chung, H. W. (1999). Removal of Boron in Reverse Osmosis Process for Drinking Water Production, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 15(1), 13-22. [Korean Literature]
- Kim, Y. C. and Park, S. J. (2011). Experimental Study of a 4040 Spiral-Wound Forward-Osmosis Membrane Module, *Environmental Science & Technology*, 45, 7737-7745.
- Lee, S., Boo, C., Elimelech, M., and Hong, S. (2010). Comparison of Fouling Behavior in Forward Osmosis (FO) and Reverse Osmosis (RO), *Journal of Membrane Science* 365, 34-39.
- McGinnis, R. L. and Elimelech, M. (2007). Energy Requirements of Ammonia-Carbon Dioxide Forward Osmosis Desalination, *Desalination* 207, 370-382.
- Park, M. K., Lee, J. J., Lee, S. H., and Kim, J. H. (2011). Determination of a Constant Membrane Structure Parameter in Forward Osmosis Processes, *Journal of Membrane Science*, 375, 241-248.
- Potts, D. E., Ahlert, R. C., and Wang, S. S. (1981). A Critical Review of Fouling of Reverse Osmosis Membranes, *Desalination*, 36, 235-264.
- Sohn, J. S. (2016). FO-RO Hybrid Desalination Project - An Ambitious First Step toward Low Energy and Low Fouling Desalination, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, 64(2), 18-24. [Korean Literature]