



# 기수 역삼투 공정에서 온도와 압력이 공정성능에 미치는 영향

## Effects of temperature and pressure on process performance in brackish water reverse osmosis

안선아 · 박철규 · 이진산 · 조성민 · 김한승\*

Sun-A An · Cheol-Gyu Park · Jin-San Lee · Seong-Min Cho · Han-Seung Kim\*

명지대학교 환경에너지공학과

Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University

### ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the filtration performance according to the feed temperature composed of NaCl and the operating pressure of the brackish water reverse osmosis (BWRO) process. The temperature is known that decides the filtration performance of reverse osmosis (RO). It is noted that temperature increase activates the permeate of salts due to augment of diffusivity and mass transfer. Filtration of the lab-scale RO system was performed with constant pressure and the constant flow was simulated. The salt rejection measured by the concentration of the feed and permeate was compared with water permeability and salt permeability in the conditions containing various temperatures (5, 10, 15, 20, 25, and 30°C) and pressures (10, 12, 15, and 18 bar). An increase in feed temperature from 5 °C to 30 °C caused a 4.65% decrease in salt rejection in CSM, due to an increase in salt permeability (4.06 times) rather than an increase in water permeability (2.62 times). Specific energy consumption (SEC) was calculated by using an electricity meter set in the RO system. It was expected that the SEC by the increases in temperature and pressure decreased due

Received 20 December 2022, revised 13 February 2023, accepted 14 February 2023.

\*Corresponding author: Han-Seung Kim (E-mail: kimhs210@mju.ac.kr)

- 안선아 (박사과정) / Sun-A An (Ph.D. Student)  
경기도 용인시 처인구 명지로 116, 17058  
116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17058
- 박철규 (석사과정) / Cheol-Gyu Park (Master Student)  
경기도 용인시 처인구 명지로 116, 17058  
116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17058
- 이진산 (석사과정) / Jin-San Lee (Master Student)  
경기도 용인시 처인구 명지로 116, 17058  
116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17058
- 조성민 (석사과정) / Seong-Min Cho (Master Student)  
경기도 용인시 처인구 명지로 116, 17058  
116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17058
- 김한승 (정교수) / Han-Seung Kim (professor)  
경기도 용인시 처인구 명지로 116, 17058  
116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17058

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.

to the viscosity decline of the feed and the permeate flux augment, respectively. The SEC decreased by 63.4% in CSM and by 54.3% in Nittodenko when the feed temperature increased from 5 °C to 30 °C. It discussed how to operate the optimal RO process through the effect of temperature and operating pressure and the comparison of SEC.

**Key words:** Brackish water reverse osmosis (BWRO), Reverse osmosis (RO) membrane, Temperature, Filtration performance, Energy consumption

**주제어:** 기수 역삼투, 역삼투 막, 온도, 여과 성능, 에너지 소비

## Nomenclature

brackish water reverse osmosis (BWRO); reverse osmosis (RO); thermal vapor compression (TVC); multiple-effect distillation (MED); multi-stage flash evaporation (MSF); nanofiltration (NF); membrane distillation (MD); specific energy consumption (SEC); high pressure pump (HPP); energy recovery device (ERD); thin-film composite (TFC); polyamide (PA); trans-membrane pressure (TMP); concentration polarization (CP); total dissolved solids (TDS)

## 1. 서 론

많은 연구들은 세계적인 기후 변화로 인한 극심한 가뭄 발생 가능성을 예견하고 있다 (Aghakouchak et al., 2014; Wilhite, 2016). 탈염(Desalination)은 기하급수적으로 증가하는 인구, 지속적인 산업화 및 기후 변화 등으로 인한 물 부족 문제를 해결하기 위한 방법으로 가장 주목받는 수처리 기술이다 (Ghaffour et al., 2013; Jamaly et al., 2014; Qasim et al., 2015). 탈염 기술은 열 담수화(thermal desalination)와 막 기반 담수화(membrane-based desalination)로 분류되는데 대표적인 열 담수화로 구분되는 열 증기 압축법(thermal vapor compression, TVC), 다중효용증류법(multiple-effect distillation, MED), 다단플래쉬법(multi-stage flash evaporation, MSF)은 열 에너지의 의존성이 매우 높기 때문에 기본 자본 및 운영 비용이 많이 요구된다 (Micale et al., 2009; Youssef et al., 2014; Anis et al., 2019). 반면, 역삼투(reverse osmosis, RO), 나노여과(nanofiltration, NF), 막 증류(membrane distillation, MD) 등의 막 기반 담수화는 소요 부지가 적고, 공정의 자동화로 인해 간편하다는 이점이 있다 (Qasim et al., 2019).

탈염의 운영비용은 크게 에너지, 인건비, 소모품, 화학약품으로 구분될 수 있다 (Shahzad et al., 2017).

Nassrullah et al. (2020)에 따르면, 탈염 운영비용의 46.6%가 에너지로 사용되며 절반에 가까운 비율로 나타났다 (Al-Karaghoul et al., 2013; Nassrullah et al., 2020). 여러 수자원 중에서 1 m<sup>3</sup>의 식수를 얻고자 할 때 요구되는 에너지는 해수 (seawater)가 2.58~8.5 kWh/m<sup>3</sup>의 값을 기록하며 가장 높았다 (Nassrullah et al., 2020). 이외 수자원은 담수 수요를 만족시키지 못한다고 여겨져 왔으나 담수 생산 비용 및 에너지를 줄일 수 있는 공정에 대한 연구 및 개발이 이루어진다면 비에너지소비 (specific energy consumption, SEC)를 감소시킬 수 있고 또한 수자원을 재이용하는 공정을 동시에 적용하면 담수 수요를 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다.

많은 탈염 기술 중에서 RO는 1950년대 이후 크게 증가하며 현재까지 가장 신뢰받는 기술로 알려져 있다 (Park et al., 2012; Goh et al., 2018). RO 기술은 반투과성 막에 삼투압 이상의 압력을 구동하여 용매 (water)는 분리막을 통해 확산되는 동시에 용질 (salt)은 제거되는 기작을 갖는다 (Okampo et al., 2021). 분리막 공정에서 유입수 온도는 중요한 매개변수로 여겨져야 한다. 유입수의 온도는 RO 공정 효율에 영향을 미친다. 먼저, 투과도(permeability)를 증가시키고 막여과 유속(flux)을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 특히 Al-Mutaz과 Al-Ghunaimi의 연구 (2001)에 따르면 특정 여과 조건에서 섭씨 온도 당 3%까지 막여과 유속의 변화가 발생했다고 보고했다 (Al-Mutaz and Al-Ghunaimi, 2001). 또한 온도 증가는 막의 저항을 감소시켜 같은 유입 막여과 유속에 해당하는 공급압력이 더 적게 요구되어 낮은 에너지 소비 요구로 연결된다 (Farooque et al., 2008). Jin et al. (2009)의 연구에 의하면, 온도가 증가함에 따라 용질의 확산성(diffusivity)은 증가했고, 용매의 점도(viscosity)가 감소함에 따라 전체적인 투과도가 증가했다고 보고하였다 (Jin et al., 2009). 추가적으로 유입수 온도의 증가는 용매의 점도



감소로 인하여 마찰 손실이 감소함에 따라 고압펌프 (high pressure pump, HPP)와 에너지 회수장치(energy recovery device, ERD)의 효율을 증가시킨다고 보고되었다 (Al-Zahrani et al., 2012; El-Emam and Dincer, 2014). 또한, 지리적 위치나 계절에 따라 변화하는 유입수 온도, 또는 산업 플랜트에서 발생하는 폐열 등으로 인해 SEC의 변화가 초래된다 (Voutchkov, 2018). 앞서 언급한 듯이 SEC를 최소화하는 것은 RO 공정의 설계 및 운영을 최적화하는 중요한 인자로 작용한다 (Figoli and Criscuoli, 2017; Koutsou et al., 2020).

본 연구는 RO 공정에서 변화하는 온도와 압력 조건 하에 여과 성능의 변화를 분석하고자 수행되었다. 온도와 압력의 증가는 막을 투과하는 유체의 양을 확대시키고 그로 인해 투과도의 증가를 야기한다. 이에 대해 용매와 용질에 대한 투과도를 수투과도와 염투과도로 각각 산출하였고 이를 염배제율 결과와 비교함으로써 여과 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 RO 시스템에 연결된 전력량계를 통해 다양한 온도에 따른 모터의 전력량을 측정하여 에너지 소모를 비교하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 역삼투 여과 공정

Lab-scale의 RO 시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 저온항온수조(refrigerated circulation water bath)를 이용

하여 원수의 온도를 유지하였고 막 전단에 코일을 설치하여 전체적으로 막에 유입되는 원수의 온도를 일정하게 유지하였다. 또한 원수가 이동하는 관은 단열재로 감싸 대기로의 열 방출을 최소화 하였다. 그 결과, 유입온도와 유출온도의 온도 편차는 1°C 미만으로 유지되었다. 실험에 사용된 RO 막의 cell은 Fig.1에 보이는 것과 같이 직경 80 mm의 원형이며 단면적은 50 cm<sup>2</sup> 이었다. RO 여과 장치에는 농축 유량, 모터의 회전속도, 유입온도 및 유출온도를 확인할 수 있었고 이 정보들은 유입압력, 유출압력과 함께 컴퓨터로 전달되어 10초마다 기록되었다. 또한 전자저울을 사용하여 10초동안 증량된 여과수의 질량을 통해 투과유량이 산출되었다.

### 2.2. 실험절차

연구에 사용된 분리막은 BWRO(brackish water reverse osmosis)공정에서 상용되고 있는 막인 thin-film composite(TFC)인 polyamide(PA) 소재의 CSM사의 막 (RE4040-BE, Republic of Korea)과 NittoDenko사의 막 (ESPA2-LD, Japan)으로 선정하였다. 온도와 압력에 따른 여과 성능을 파악하기 위해 유입온도는 5, 10, 15, 20, 25, 30°C로 설정하였고 압력은 10, 12, 15, 18 bar의 정압여과로 실험이 수행되었다. 각 조건에서 3%의 회수율과 30 분 동안의 여과를 통해 막 여과 유속을 비교하였고 여과가 시작된 지 10분이 경과하였을 때의 유입수와 투과수의 농도를 통해 염배제율을 계산하였

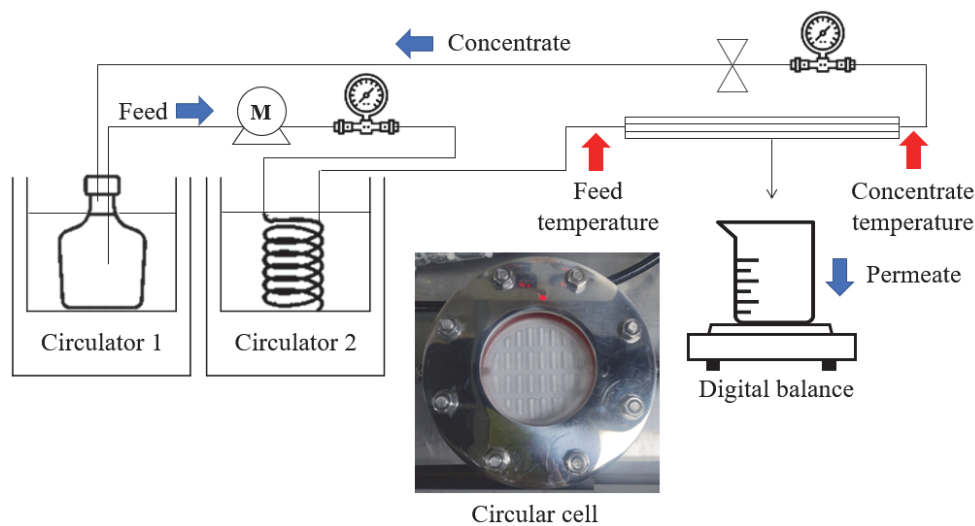


Fig. 1. Schematic of lab-scale RO system.

**Table 1.** Characteristics of raw water for NaCl 2,000 ppm

Conductivity	TDS	Salinity	Resistance
4033±172 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1977±139 ppm	2169±151 ppm	248.1±15.9 ohm-cm

다. 또한, 온도와 압력에 따른 전력 사용량을 비교하기 위해 RO 장치 패널 내 소비전력 측정장치(SJPM-C16, Seojun electric)를 설치하였다. 압력은 RO 시스템의 pump control valve와 back pressure valve를 사용하여 조절하였다. 또한 염배제율은 막 제조사에서 test 운전조건으로 사용하는 2,000 ppm의 NaCl을 사용하여 비교하였다. 원수에 대한 특성은 Table 1에 나타났다. 재현성을 확인하기 위해 3회의 반복 실험이 수행되었다.

### 2.3. 이론적 관계식

Solution-diffusion model에 따르면 RO membrane의 여과 성능은 용질과 용매의 투과도에 따라 결정된다 (Mulder, 1996; Jin *et al.*, 2009). 일반적으로 염배제율 ( $r_s$ , intrinsic salt rejection)은 유입수의 염농도( $c_f$ )와 투과수의 염농도( $c_p$ )로 계산된다 (식 (1)). 수투과도( $A$ , water permeability)는 적용된 hydraulic pressure ( $\Delta P$ )와 membrane osmotic pressure( $\Delta\pi$ )와 water flux( $J_w$ )의 관계로 식 (2)의 관계로 나타낼 수 있다. 염투과도( $B$ , solute permeability)는 염배제율과 water flux( $J_w$ )의 관계로 식 (3)과 같이 나타낸다. 수투과도와 염투과도는 온도 및 압력 등 여러 운전조건에 따라 변화한다. 실험적으로 산출된 염배제율을 각 조건에서의 수투과도와 염투과도의 관계를 통해 온도와 압력이 RO 공정의 여과 성능에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

$$r_s = 1 - c_p/c_f \tag{1}$$

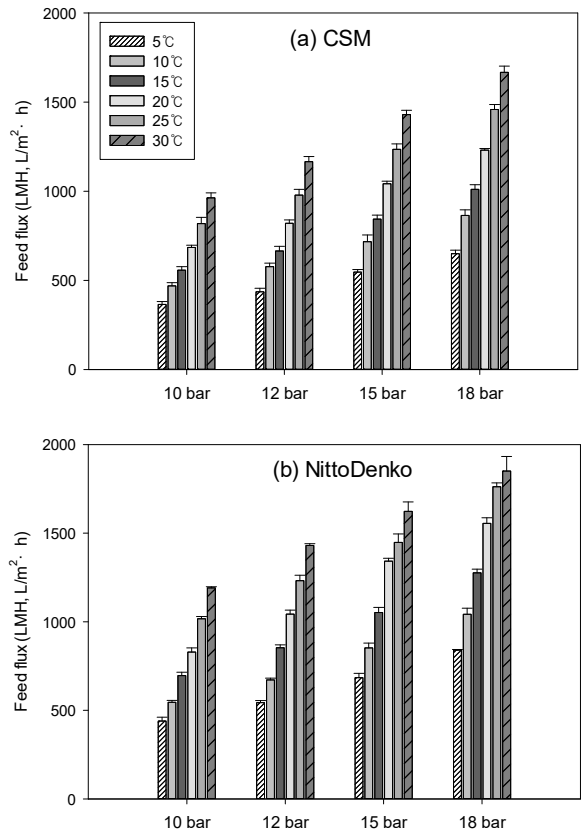
$$A = J_w/(\Delta p - \Delta\pi) \tag{2}$$

$$B = \frac{(1 - r_s)}{r_s} J_w \tag{3}$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 분리막 여과 특성 및 정압운전 시뮬레이션

RO 시스템의 기초적인 여과 성능을 추적하고자 온



**Fig. 2.** Obtained feed flux in line with temperature and pressure; (a) CSM and (b) NittoDenko.

도와 압력에 따른 여과가 수행되었다. 유입 막여과 유속은 10초마다 측정된 투과 막여과 유속과 농축 막여과 유속의 합을 통해 산출되었다. 일반적으로 온도와 압력이 증가함에 따라 막의 투과도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 그에 따라 유입 막여과 유속도 증가하게 되는데, 10~18 bar의 압력과 5~30°C의 온도 조건에서 나타난 유입 막여과 유속의 변화를 Fig. 2에 나타냈다. CSM은 365.7 LMH~1667.9 LMH의 막여과 유속을 보였고 NittoDenko는 440.0 LMH~1850.3 LMH로 기록되었으며 이는 전반적으로 CSM보다 높은 값을 나타냈다. 실험을 통해 온도와 압력이 증가할 때 막여과 유속이 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 같은 압력의 차라고 하더라도 온도가 증가함에 따라



압력에 의해 높아지는 막여과 유속은 확연히 큰 차이를 보였다. 특히, 유입온도가 5°C에서 30°C로 증가했을 때의 유입 막여과 유속은 유체의 점도 감소로 인해 약 2.2배에서 2.7배 높은 값을 기록했다. Roorda와 van der Graaf (2001)가 주장한 온도와 점도의 관계식에 따르면 25°C의 온도증가는 약 47%의 점도 감소를 야기한다 (Brink et al., 2011; Tao et al., 2022).

압력은 막여과 유속에 대해 정비례 관계를 갖는다. 따라서 압력증가에 따른 유입 막여과 유속을 선형관계로 나타냈고 Table 2에 보여지듯이, 모든 온도 조건에서 0.99이상의 결정계수 R<sup>2</sup>값을 얻었다. 또한 대부분 온도가 증가함에 따라 회귀식의 기울기가 증가하며 온도의 증가가 압력에 따른 유입 막여과 유속의 투과도 상승에 많은 영향을 미친다는 것을 암시했다. 5~30°C의 regression equation을 통해 정유량으로 운전했을 때의 압력 변화를 모의하여 Fig. 3에 표현하였다. 유입 막여과 유속은 500 LMH와 2,000 LMH 두 가지로 가정했고 정압여과 data를 통해 예측해본 정유량 운전조건에서 온도가 증가함에 따라 막간차압 (trans-membrane pressure, TMP)은 감소하였다. 같은 온도의 운전조건에서 CSM은 NittoDenko와 비교하여 더 높은 운전압력이 요구될 것으로 예상되었다. 이는 같은 성능을 만족하기 위해서 CSM의 분리막을 사용한 경우 더 높은 운전압력, 즉 더 큰 에너지를 필요로 한다는 것을 암시했다. 한편, 2,000 LMH로 정압운전을 모의했을 때 온도에 따른 막간차압의 변화는 다음과 같다. CSM은 10°C에서 5°C 대비 약 26.2% 감소한 막간차압을 나타낸 반면, 30°C에서 25°C 대비 약 12.1%의 막간차압이 감소했다. 동일한 조건에서 NittoDenk는 10°C에서 5°C 대비 약 19.0% 감소한 막간차압을 나타냈고 30°C에서 25°C 대비 약 4.96%의 막간차압이 감소했다. 이를 통해 같은 5°C의 온도 차이라고 할지

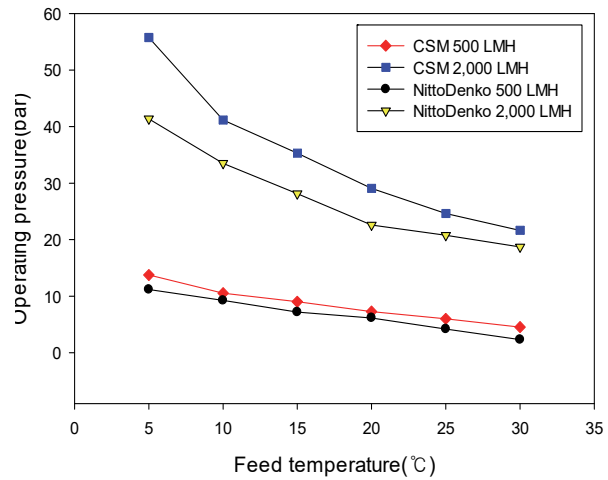


Fig. 3. Constant-flow simulation according to temperature.

라도 낮은 온도에서의 온도 증가가 더욱 효과적인 TMP 감소를 도출하며 이는 곧 매우 낮은 온도의 원수가 유입되는 RO 시스템은 에너지 감축 측면에서 온도를 일정 수준으로 증가시킬 필요가 있음을 의미한다.

### 3.2. 염배제율과 투과도(수투과도와 염투과도)

본 연구에서 NaCl 2,000 ppm은 여과 성능을 확인하기 위한 원수로 사용되었으며 각 RO membrane에 따른 총용존 고형물(total dissolved solids, TDS)의 염배제율을 Fig. 4에 나타냈다. CSM과 NittoDenko 모두 온도가 증가함에 따라 염배제율이 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 CSM은 88.3~92.0% 범위의 염배제율을 기록했고 NittoDenko는 97.2%~98.3% 범위로 CSM보다 높은 범위의 염배제율을 기록했다. Fig. 2와 Fig. 4를 종합하여 판단했을 때, NittoDenko의 분리막이 CSM보다 높은 투과도와 염배제율의 특징을 갖는다는

Table 2. The linear regression equation and R<sup>2</sup> of feed flux for the operating pressure according to the feed temperature

	CSM		NittoDenko	
	Regression equation	R <sup>2</sup>	Regression equation	R <sup>2</sup>
5°C	y=35.70x+9.093	0.9998	y=49.66x-55.82	0.9996
10°C	y=48.96x-15.85	0.9995	y=61.80x-71.76	0.9999
15°C	y=57.03x-14.184	0.9997	y=71.59x-14.78	0.9991
20°C	y=68.85x-1.835	0.9989	y=91.17x -61.32	0.9922
25°C	y=80.53+15.90	0.9992	y=90.50x+120.1	0.994
30°C	y=87.67x+101.07	0.9975	y=91.49x+287.39	0.991

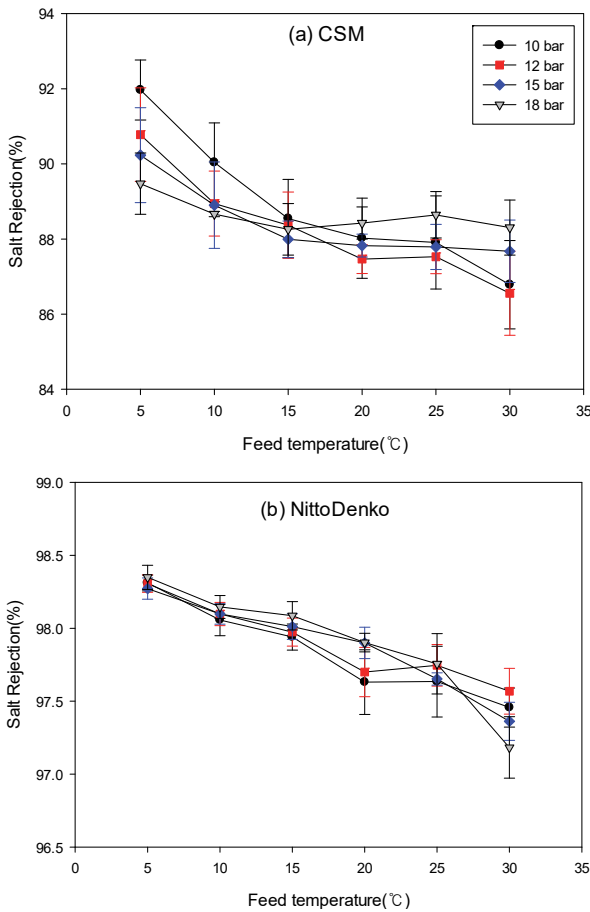


Fig. 4. Salt rejection comparison of various operating conditions; (a) CSM and (b) NittoDenko.

것을 확인하였다. 한편, 온도가 증가함에 따라 나타나는 이론적 영향이 존재하는데, 점도가 감소하면 수투과도와 염투과도 모두 증가하고 농도분극(concentration polarization, CP)이 감소하며 또한 확산성과 물질 전달(mass transfer)이 증가한다고 알려져 있다 (Jin et al., 2009). 정유량 공정의 경우 증가된 유입온도에 의해 유체의 흐름이 빨라져 운전압력이 감소하기도 한다.

CSM은 10 bar와 같은 비교적 낮은 운전압력에서 온도증가에 따라 18 bar보다 급격한 염배제 감소를 보였다. 특히 18 bar의 압력에서는 온도에 따른 염배제율이 약 88%를 내외하며 크지 않은 염배제율을 나타낸 것으로 보아 고압에서의 염배제가 일정하게 이루어짐을 확인하였다. 반면, NittoDenko는 모든 압력에서 온도 증가에 대해 염배제율이 감소하는 결과를 가져왔다. 물론 이는 CSM 보다 높은 염배제율이지만, 온도와 압력에 대한 염배제율의 변화에 있어 주목

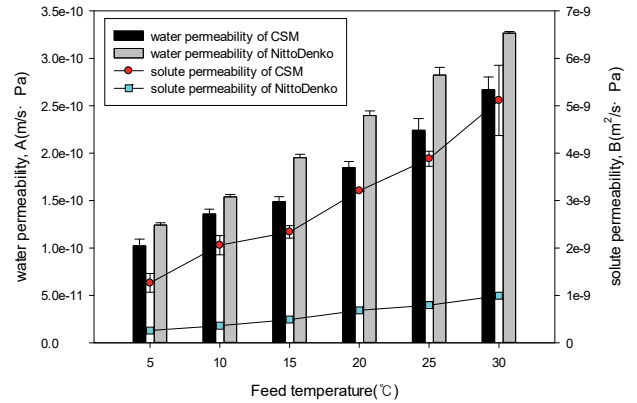


Fig. 5. Trend in water and salt permeabilities at 12 bar.

할 만하다. 각 조건의 염배제율을 구체적으로 비교하기 위해 각각 수투과도와 염투과도를 확인하였다.

염배제율을 정량적으로 평가하고자 수투과도와 염투과도를 산출하였다. 우선 수투과도는 압력증가에 따른 변화는 크게 두드러지진 않지만 온도증가에 따라 증가 추세를 보였다. 염투과도는 압력과 온도 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 나타냈다. 유입온도의 증가는 수투과도와 염투과도 모두의 상승을 야기하기 때문에 그 중 12 bar에서 온도에 따른 각각 수투과도와 염투과도의 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 유입온도가 5°C에서 30°C로 증가했을 때, CSM의 수투과도는 약 2.62배 증가한 것에 비해 염투과도는 약 4.06배 증가하였다. 그 결과, 염투과도의 증가에 더 많은 영향을 미쳐 염배제율이 약 4.65% 감소한 것을 확인하였다. Fig. 5에 보여지듯이 수투과도는 NittoDenko가 CSM보다 높은 특성을 가지고 염투과도는 낮은 특성을 가짐으로써 전체적으로 NittoDenko의 염배제율이 높은 것으로 나타났다. 이는 온도 증가에 따라 용매의 점도가 감소하고 반투과성 막을 투과하는 용질의 확산성 증가로 인해 염배제율이 감소한다고 주장한 Jin et al. (2009)의 연구와 일치하는 결과를 보였다 (Jin et al., 2009).

### 3.3. 온도에 따른 전력소모량 변화

온도와 압력에 따른 전력소모량을 비교하기 위해 RO 장치 내 전력 측정기를 설치하였다. 그에 따른 전력소모량의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. CSM은 온도와 압력에 따라 2.87~11.5 kWh/m<sup>3</sup>의 범위를 가졌고 NittoDenko는 2.61~10.0 kWh/m<sup>3</sup>의 범위를 가졌다. 같은 조건에서 CSM의 전력소모량이 NittoDenko보다 많

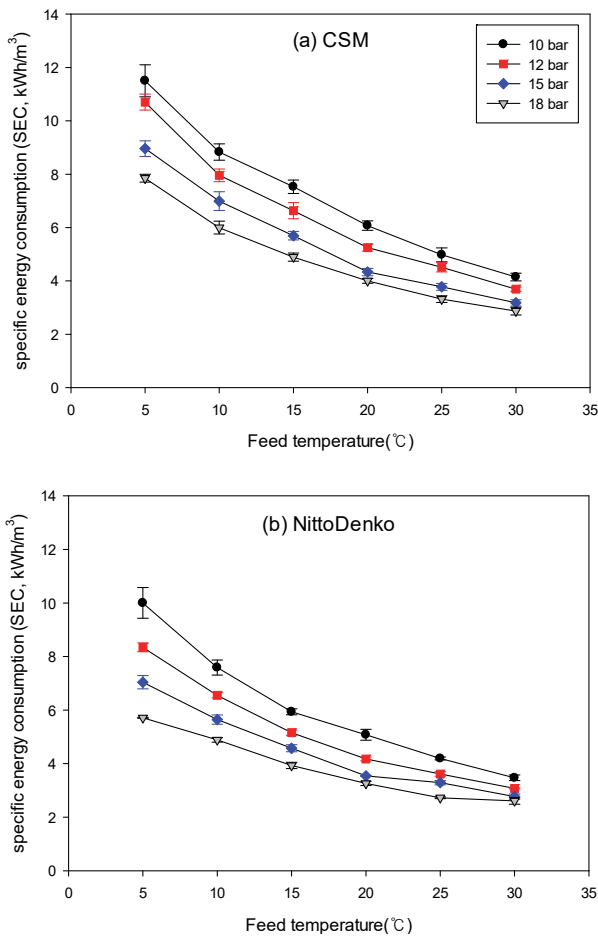


Fig. 6. Obtained specific energy consumption by increase in temperature; (a) CSM and (b) NittoDenko.

이 요구됨을 확인하였다. 이는 NittoDenko의 상대적으로 높은 수투과도에서 야기된 결과로 예상된다. 18 bar의 막간차압에서 유입온도가 5°C에서 30°C로 증가했을 때 CSM은 약 63.4%의 전력소모량 감소율을 보였으며 NittoDenko는 약 54.3%의 전력소모량 감소율을 보였다. 이는 CSM의 분리막을 사용했을 때 낮은 온도에서 높은 전력소모량이 요구된다는 결과와 동시에 NittoDenko 분리막이 낮은 온도에서 CSM에 비해 투과유량이 높고 여과에 유리하다는 것을 의미한다. 또한 두 분리막 모두 동일한 온도 상승에 대해 낮은 온도에서의 온도 증가가 더 효과적인 전력 감소 효과를 보였다. 12 bar의 운전압력에서 동일한 5°C 온도 높임에 대해, 5°C에서 10°C로 온도를 증가시켰을 때, CSM과 NittoDenko는 각각 25.7%, 21.5% 감소한 것에 비해, 25°C에서 30°C으로의 온도 증가 시 각각 18.2%,

14.9% 감소하였다. 이에 따라 겨울철과 같이 원수의 온도가 매우 낮은 상황에서는 공정 효율과 에너지 감축에 긍정적인 효과를 위해 온도를 적절한 수준으로 증가시킬 필요성이 있음을 암시했다.

## 4. 결론

본 연구는 여러 온도와 압력에서 RO 여과 성능과 전력량을 비교하고 공정의 효율 향상을 도모하고자 수행되었다. RO 공정의 온도와 압력은 여러 선행 연구와 같이 투과도를 변화시키는 제반인자로서 작용하였다. 특히 온도의 증가는 압력에 따른 막여과 유속 차이를 더욱 증가시켰고 이는 감소된 유체의 점도에 기인한 것으로 추정된다. 여러 정압 운전의 데이터를 취합하여 정유량 운전을 모의했을 때, TMP는 온도가 증가함에 따라 감소하는 추세를 가졌으며 낮은 온도에서 모의된 높은 TMP는 온도 증가에 의해 큰 감소 효과를 보였다. 온도와 압력 증가에 의해 낮아진 염배제율은 수투과도와 염투과도로 분류되어 그 감소 추세를 분석하였다. 비교적 높은 온도에서 낮아진 점도는 투과도와 확산성 및 물질 전달을 증가시키는 것으로 알려져 있는데 특히 염투과도가 수투과도에 비해 크게 증가하였기 때문에 염배제율이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 전력량 비교를 통해 비교적 저온에서의 온도 증가로 인한 전력량 감소 효과가 상대적으로 큰 것을 확인하였다. 이에 따라 본 연구는 유입수 온이 낮은 환경에서의 RO 시스템은 초기에 확립한 염배제율의 기준을 초과하지 않을 정도의 온도 상승을 필요로 한다는 것을 확인하였다.

## 사 사

본 연구는 한국환경산업기술원 “수열 활용확대 기술 및 환경적합성 기술개발사업(G232020120073)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdiyasi, O., and Farahmand, A. (2014). Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California

- drought, *Geophys. Res. Lett.*, 41(24), 8847-8852.
- Al-Karaghoul, A., and Kazmerski, L.L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 24, 343-356.
- Al-Mutaz, I.S., and Al-Ghunaimi, M.A. (2001). "Performance of reverse osmosis units at high temperatures", *In The IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*, Bahrain: IDA.
- Al-Zahrani, A., Orfi, J., Al-Suhaibani, Z., Salim, B., and Al-Ansary, H. (2012). Thermodynamic analysis of a reverse osmosis desalination unit with energy recovery system, *Procedia Eng.*, 33, 404-414.
- Anis, S.F., Hashaikeh, R., and Hilal, N. (2019). Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review, *Desalination*, 452, 159-195.
- El-Emam, R.S., and Dincer, I. (2014). Thermodynamic and thermoeconomic analyses of seawater reverse osmosis desalination plant with energy recovery, *Energy*, 64, 154-163.
- Farooque, A.M., Jamaluddin, A.T.M., Al-Reweli, A.R., Jalaluddin, P.A.M., Al-Marwani, S.M., Al-Mobayed, A.A., and Qasim, A.H. (2008). Parametric analyses of energy consumption and losses in SWCC SWRO plants utilizing energy recovery devices, *Desalination*, 219(1-3), 137-159.
- Figoli, A., and Criscuoli, A. (Eds.). (2017). *Sustainable Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment*, Springer Nature, Singapore, 1-387. ISBN 978-981-10-5623-9.
- Ghaffour, N., Missimer, T.M., and Amy, G.L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination*, 309, 197-207.
- Goh, P.S., Lau, W.J., Othman, M.H.D., and Ismail, A.F. (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies, *Desalination*, 425, 130-155.
- Jamaly, S., Darwish, N.N., Ahmed, I., and Hasan, S.W. (2014). A short review on reverse osmosis pretreatment technologies, *Desalination*, 354, 30-38.
- Jin, X., Jawor, A., Kim, S., and Hoek, E.M. (2009). Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes, *Desalination*, 239(1-3), 346-359.
- Koutsou, C.P., Kritikos, E., Karabelas, A.J., and Kostoglou, M. (2020). Analysis of temperature effects on the specific energy consumption in reverse osmosis desalination processes, *Desalination*, 476, 114213.
- Micale, G., Rizzuti, L., and Cipollina, A. (Eds.). (2009). *Seawater desalination: conventional and renewable energy processes*, Springer.
- Mulder, M., and Mulder, J. (1996). *Basic principles of membrane technology*. Springer science & business media.
- Nassrullah, H., Anis, S.F., Hashaikeh, R., and Hilal, N. (2020). Energy for desalination: A state-of-the-art review, *Desalination*, 491, 114569.
- Okampo, E.J., and Nwulu, N. (2021). Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 140, 110712.
- Park, P.K., Lee, S., Cho, J.S., and Kim, J.H. (2012). Full-scale simulation of seawater reverse osmosis desalination processes for boron removal: Effect of membrane fouling, *Water Res.*, 46(12), 3796-3804.
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N.N., Darwish, N.A., and Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review, *Desalination*, 459, 59-104.
- Qasim, M., Darwish, N.A., Sarp, S., and Hilal, N. (2015). Water desalination by forward (direct) osmosis phenomenon: A comprehensive review, *Desalination*, 374, 47-69.
- Qasim, M., Darwish, N.N., Mhiyo, S., Darwish, N.A., and Hilal, N. (2018). The use of ultrasound to mitigate membrane fouling in desalination and water treatment, *Desalination*, 443, 143-164.
- Roorda, J.H., and van der Graaf, J.H.J.M. (2001). New parameter for monitoring fouling during ultrafiltration of WWTP effluent, *Water Sci. Technol.*, 43(10), 241e248.
- Shahzad, M.W., Burhan, M., Ang, L., and Ng, K.C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability, *Desalination*, 413, 52-64.
- Tao, C., Parker, W., and Bérubé, P. (2021). Assessing the role of cold temperatures on irreversible membrane permeability of tertiary ultrafiltration treating municipal wastewater, *Sep. Purif. Technol.*, 278, 119556.
- van den Brink, P., Satpradit, O.A., van Bentem, A., Zwijnenburg, A., Temmink, H., and van Loosdrecht, M. (2011). Effect of temperature shocks on membrane fouling in membrane bioreactors, *Water Res.*, 45(15), 4491-4500.
- Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination - current status and trends, *Desalination*, 431, 2-14.
- Wilhite, D.A. (Ed.). (2016). *Droughts: a global assessment*, Routledge, London, 1-752. ISBN 1317854233.
- Youssef, P.G., Al-Dadah, R.K., and Mahmoud, S.M. (2014). Comparative analysis of desalination technologies, *Energy Procedia*, 61, 2604-2607.