

온도가 막분리 투과성능에 미치는 영향

김광수[†] · 문덕수 · 김현주 · 이승원 · 지 호 · 정현지 · 원혜정
선박해양플랜트연구소

The Effect of Feed Temperature On Permeate Flux During Membrane Separation

Kwang Soo Kim[†], Deok Soo Moon, Hyeon Ju Kim, Seung Won Lee, Ho Ji,

Hyeon Ji Jung and Hye Jung Won

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

요 약

막분리법에 의한 해수 담수화시 공급 원수 온도는 막성능에 영향을 미친다. 특히 폐열원을 이용하여 분리막 투과량을 증대시키고자 하는 경우에는 고온의 공급 원수가 분리막 성능에 미치는 영향을 정확히 분석하여 적용하는 것이 필요하다. 온도에 의한 막투과 성능 분석을 위해 10 °C에서 60 °C까지 공급 해수 온도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 온도가 상승하면서 투과량이 증가하는 경향을 물의 점성 변화와 막의 변화로 나누어서 분석하였다. NF 막에서는 온도에 따른 물의 점성 변화로 투과량 변화를 예측할 수 있었으나 RO막의 경우는 물의 점성변화로 예측한 투과량과 실험에 의한 투과량은 60 °C에서 30%정도 차이가 나타났다. 이는 RO막이 원수 온도가 상승함에 따라 막의 수축이 일어나 공극의 크기가 8%정도 감소함에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 막분리식 해수 담수화에서 투과량을 증대시키기 위한 온도 상승은 막변형이 일어나지 않는 범위 내에서 효과적으로 수행하여야 할 것이다.

Abstract – The feed temperature has an effect on the performance during desalination of seawater by membrane separation. When the permeate flux intends to increase using the waste heat, it is necessary to analyze the effect of feed temperature precisely on the membrane performance. The experiments were carried out to investigate the performance of membranes by varying the seawater temperature from 10 °C to 60 °C. The increase of permeate flux with increase of feed temperature was interpreted as the change of water viscosity and the membrane itself. While the increase of permeate flux could be predicted by the viscosity change in case of nanofiltration membrane, there exists 30% difference between the experiment data and the prediction by the viscosity change in case of reverse osmosis (RO) membrane, which seems to be due to 8% decrease of the pore size in RO caused by the contraction of membrane with the increase of temperature. Therefore, the desalination of seawater should be carried out within the range that the elevation of temperature does not cause the alteration of membrane itself even for the purpose of increasing the permeate flux.

Keywords: Reverse Osmosis(역삼투), Waste Heat(폐열), Desalination of Seawater(해수 담수화), Flux(투과량), Temperature(온도), Viscosity(점성), Contraction(수축)

1. 서 론

전 세계는 물 부족이라는 문제에 직면해 있고 이를 해결하려는 다양한 노력이 시도되고 있다. 그 중 해수 담수화가 가장 유력한 대

안으로 부각되고 있다. 하지만 해수 담수화는 담수 생산에 있어서 여전히 에너지 소모가 많은 공정이다. 이에 고효율 저에너지 담수화 공정이 요구된다. 해수 담수화 방법에는 증발법과 막여과법으로 크게 나누어 볼 수 있고 증발법에는 다단 플래시 증발법과 다중 효율 증발법이 있으며 막여과법에는 역삼투법과 전기투석법이 있다. 증발법은 해수를 증발시켜 증기를 만든 다음 그 증기를 냉각시켜 담수를 생산하는 방식이다. 역삼투법은 삼투압보다 높은 압력을 가

[†]Corresponding author: kwangkim@kiost.ac

본 논문은 2013년 춘계 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표한 논문을 근거로 하고 있음을 밝힙니다.

해 주어 해수 중 물만 막을 통과시켜 담수를 생산하는 방식이고 전기투석법은 양극과 음극사이에 양이온 교환막과 음이온 교환막을 교대로 설치하여 담수와 농축수를 생산하는 방식이다. 해수 담수화 방법으로 종전에는 증발법이 주를 이루었으나 점차 막여과 방식으로 패러다임이 이동되고 있다. 이는 담수화 과정 시 소모되는 에너지가 가장 작은 공정으로 담수를 생산하려는 경향을 반영하는 것이다.

역삼투법은 실제 담수현장에 적용하기 위해 극복해야 할 과제가 있는데 그 중 가장 중요한 것은 바로 투과량의 향상이다. 투과량을 향상시키더라도 에너지 소모량은 크게 증가시키지 말아야 한다. 투과량은 운전압력, 온도, 막오염 정도등에 영향을 받는데 가해진 압력을 상승시키려면 그만큼 에너지 소모량이 많아지는 단점이 있다. 담수 과정 중 막오염을 낮출 수 있는 막의 개발도 투과량 향상을 도모할 수 있다. 또한 원수의 온도상승은 투과량의 상승을 가져오는데 다른 공정에서 발생한 폐열을 이용할 수 있다면 경제적인 공정이 될 것이다. 하지만 공급원수의 온도상승이 어떻게 막 투과량 상승으로 이어지는지는 아직 밝혀지지 않았다.

2. 이론적 배경

폐열을 이용할 수 있는 곳에서는 원수의 온도를 상승시켜 역삼투 공정을 진행할 수 있는데 원수 온도 상승이 투과량 상승으로 이어진다는 사실은 이미 알려진 사실이다. 그러나 이러한 투과율 향상을 어떻게 설명할 지는 미지수이다. 먼저 원수 온도 상승이 물의 점성 감소를 유도하여 투과량 상승을 유도한다고 설명할 수 있다. 투과량은 물의 점성에 반비례하는데 온도 상승시 물의 점성이 감소하여 투과량이 증가한다고 볼 수 있다. Goosen *et al.*[2011]에 의하면 permeance는 점성에 반비례하는 공식을 다음과 같이 나타내었다.

$$L_{T2} = (\mu_{T1}/\mu_{T2})L_{T1} \quad (1)$$

여기서 μ_T 는 온도 T에서 물의 점성
L은 Permeance (flux/pressure)

식 (1)을 이용하여 기준 온도 대비 permeance 변화량을 구해 낼 수 있다. 다음으로 온도변화에 의한 막의 변화도 살펴 보았다. 막의 변화는 투과량에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 막의 운전 에 중요한 요소이기도 하다. 막의 pore 내부의 흐름이 Hagen Poiseuille flow를 따른다는 가정 하에 pore 상대적 크기인 크기에 대한 예측을 할 수 있다(Goosen *et al.*[2011]). pore의 상대적 크기는 온도와 압력이 표준화된 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\frac{r_{PT}}{r_{P20}} = \left(\frac{J_{VT}\Delta P_{20}\mu_T}{J_{V20}\Delta P_T\mu_{20}} \right)^{1/4} \quad (2)$$

여기서 r_{PT} , r_{P20} : 온도 T와 20 °C에서 pore 크기
 J_{VT} , J_{V20} : 온도 T와 20 °C에서 플럭스
 ΔP_{20} , ΔP_T : 온도 20 °C와 T 에서 압력
 μ_T , μ_{20} : 온도 T와 20 °C에서 점성

Sharma *et al.*[2003]에 의하면 온도에 의한 영향은 Arrhenius 식으로 표현할 수 있다고 보았다. 즉 activation energy가 존재하는 반응에서 반응이 온도에 의해 영향을 받는다고 해석하였고 온도 보정한 플럭스를 구한 식을 경험적으로 나타내었다.

TFCS membrane (polyamide, Koch Fluid Systems):

$$TCF = \exp\left[C\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \quad (3)$$

DL membrane (polyamide, Osmonics):

$$TCF = \exp\left[C\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \quad (4)$$

여기서 TCF: 온도보정계수(Temperature Correction Factor), 즉 온도 T와 25 °C에서 투과량 비

C: polyamide 재질의 경우 2500-3000사이 값을 나타냄

지금까지 온도의 영향은 점성변화와 막의 변화로 살펴 보았지만 온도는 다양한 요소에 영향을 미친다. Zhao *et al.*[2011]에 의하면 삼투압, 점성, 물질전달계수, 미네랄의 용해도, 농도 분극 등이 온도에 의해 영향 받는다. 용질 저항도(solute resistivity)는 다음과 같이 정의될 수 있다(Zhao *et al.*{2011}).

$$K = \frac{t_s \tau}{D \epsilon} \quad (5)$$

여기서, t_s : 막 지지층 두께(support layer thickness)

τ : 막 굴곡도(membrane tortuosity)

D: 확산 계수(diffusion coefficient)

ϵ : 막 공극률(membrane porosity)

K: 용질 저항도(solute resistivity)

용질 저항도는 투과량과 밀접한 관계를 가지는데 용질 저항도가 높으면 투과량이 감소하고 용질 저항도가 낮으면 투과량이 증가한다. Stokes-Einstein equation(Baker *et al.*[2004]에 의하면 확산계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{kT}{n\pi a \eta} \quad (4 \leq n \leq 6) \quad (6)$$

여기서, k: Boltzmann's constant

T: 온도

a: 용질의 반경(radius of solute)

η : 점성

식 (5)와 식 (6)을 결합하여 K로 정리하면

$$K = \frac{k_s \tau n \pi a \eta}{k T \epsilon} \quad (7)$$

식 (7)에 의하면 온도가 상승하면 용질 저항도가 감소한다. 이는 온도상승이 막 지지층에서 염 이동을 향상시켜 내부 농도분극(internal concentration polarization)을 감소시켜 투과량 증가를 가져온다. Pohland *et al.*[1988]는 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$\frac{J_T}{J_{25}} = 1.03^{(T-25)} \quad (8)$$

본 연구에서는 해수의 온도를 상승시켜 역삼투막 공정에 적용시켜 투과율의 변화를 관찰하였다. 이는 온도가 역삼투 공정에 미치는 영향을 파악하여 폐열을 이용할 수 있는 곳에 적용하기 위함이다. 또한 Goosen *et al.*[2011]에 의한 연구에 기초하여 기준온도에 대한 투과량 변화량도 예측해 보았다. 이러한 온도가 투과율에 미치는 영향 뿐만 아니라 염배제율에도 미치는 영향을 살펴보았다. 해수 중 미량원소의 막 투과율도 온도변화에 따라 어떻게 변하는지 살펴 보았다.

3. 실험 및 분석방법

해수로부터 콜로이드성 입자(거대 미생물, 거대 미네랄 입자 등)에 의한 막오염을 방지하기 위해 카트리지형 필터(cartridge depth filter, synopex사)를 사용하였다. 전처리 필터는 공극이 10 μm이고 재질은 polypropylene이고 적정 압력이 2.0 kg/cm²이다. 실험에 사용한 nanofiltration 막 모듈은 중국 Vontron사 제품(model 명 VNF1-4040)으로 최대 허용 압력은 42 kg/cm²였다. nanofiltration 막은 polyamide 재질로 길이 1 m, 직경 10 cm의 모듈안에 외권형으로 감겨져 있고 실제운전 압력은 25 bar 였다. NF 막은 NaCl 기준으로 40-60%정도의 염 배제율을 나타낸다. 역삼투막은 polyamide 계통의 고분자 막으로서 중국 Vontron사(model 명 SW21-4040) 제품으로 최대 허용 압력은 70 kg/cm²이고 실제 운전 압력은 45 bar으로 실험하였다. 모듈당 유효면적은 7.4 m²이고 막 제공회사에서 제시한 염배제율은 99.5%였다.

실험에 사용된 역삼투막 장치는 Fig. 1과 같다. Feed tank로부터 나온 해수는 전처리 막을 통과한 후 나노 필터막을 통과하고 난 뒤 역삼투막을 통과한다. Feed tank는 수중 heater를 설치하여 온도조절이 가능하도록 하였다. 전처리 막은 cartridge 형태의 micro filter로서 해수 중 colloid 성분(미생물, 바이러스, 무기성 colloid 입자)과 고분자 유기물을 제거하여 후단 막이 colloid 오염이 일어나지 않도록 한다. Feed pump는 micro filter의 효과적인 여과능력을 향상시키기 위한 장치이다. High Pressure Pump는 반투막의 효과적인 효율을 발휘하기 위한 고압의 압력과 유량을 공급하는 장치이다.

R/O 시스템은 Nano module과 R/O module로 구성되어 있으며 막을 통과한 Permeate와 Concentrate는 각각 분리되어 저장되거나 recycle 시켜서 연속적으로 사용할 수 있다. NF 유입전 tank를 두어 온도변화를 최소화하였고 NF 처리수 또한 tank를 두어 RO유입전 유입온도를 일정하게 하였다. NF 후 RO를 구성한 이유는 MF 후 잔존하는 유기물질을 걸러내어 RO에 걸리는 부하를 줄이기 위해서이다.

역삼투압 공정에 사용된 원수는 강원도 고성 해역에서 채수된 청정한 동해 심층수이다. 동해 심층수는 부유입자와 세균의 농도가 적고 청정하며 영양염이 풍부하며 수온과 염분이 일정하게 유지되는 안정성을 가지고 있다(Moon[2004]). 역삼투압 공정의 성능평가 인자로는 운전 온도, 운전 압력, 회수율, 원수의 농도 등이 있다[1]. 이 중에서 온도에 의한 역삼투 공정의 영향을 알아보기 위해 원수를 heater로 가열하였다. 원수의 온도는 10 °C에서 60 °C까지 10단위로 실험하였다. 역삼투압 공정의 압력은 압력의 영향을 제거하기 위해 45 kg/cm²로 일정하게 유지시켰다. 실험에 사용된 원수, 농축수, 생산수는 멀티 미터(Seven Multi, METTLER TOLEDO)를 사용하여 pH, 전기전도도(conductivity), TDS(Total Dissolved Solids)를 측정하였다. 농축수와 생산수 유량은 일정시간 동안 수집된 물의 무게를 측정하여 환산하였다. 역삼투막을 통과한 생산수에서 Na, K, Mg, Ca 등과 같은 미네랄 성분 분석을 ICP-AES(Perkin Elmer Optima 2000DV)을 이용하여 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 막분리 공정에서 온도에 의한 투과량 분석

온도에 따른 막분리 특성을 살펴 보기 위하여 동해 심층수 원수를 10 °C에서 60 °C까지 10씩 변화시켜 가면서 실험하였다. 먼저 NF (nanofiltration) 공정과 NF 공정 후 RO(reverse osmosis) 공정의 투과량(Flux)를 구해 보았다(Fig. 2). NF 공정은 10 °C에서 투과량 9.5 LMH, 60 °C에서 28.49 LMH를 보였다. NF 막은 온도에 따라 투과량이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. NF막을 통과한 생산수를 RO막에 적용시켰을 경우 10 °C에서 투과량 14.38 LMH, 60 °C에서 26.62 LMH를 보였다. RO막 또한 온도에 따라 투과량이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 원수 온

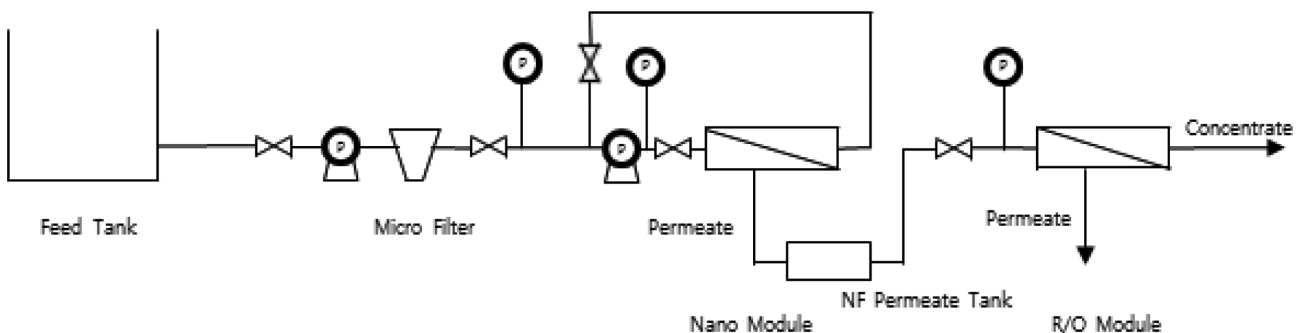


Fig. 1. Schematic Diagram of Reverse Osmosis system.

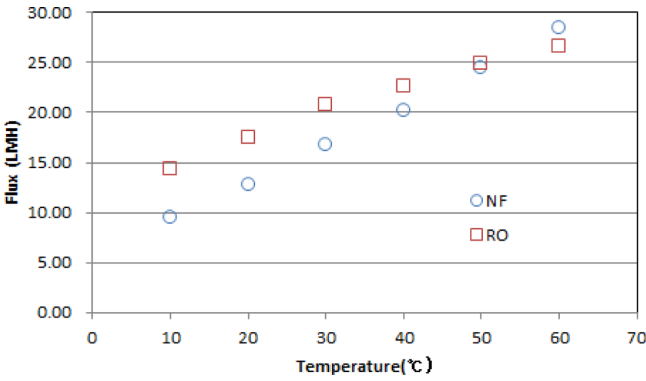


Fig. 2. Flux at Different Feed Temperature, LMH (L/m²/hr).

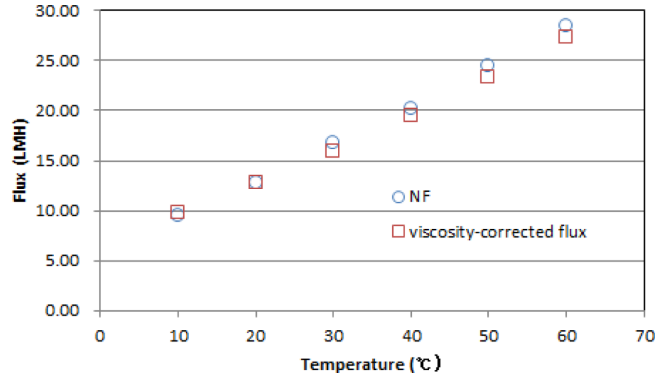


Fig. 4. The Effect of Viscosity on Nanofiltration, LMH (L/m²/hr).

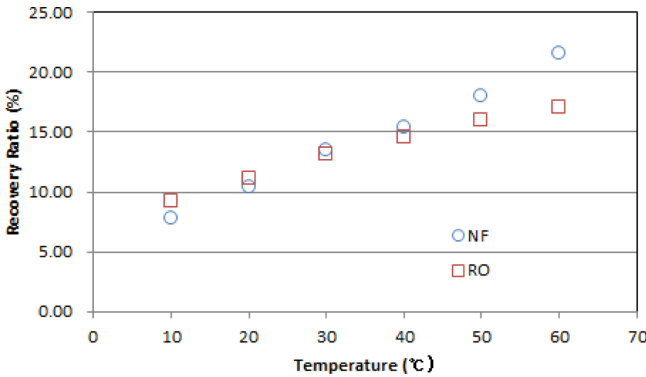


Fig. 3. Recovery Ratio at Different Feed Temperature.

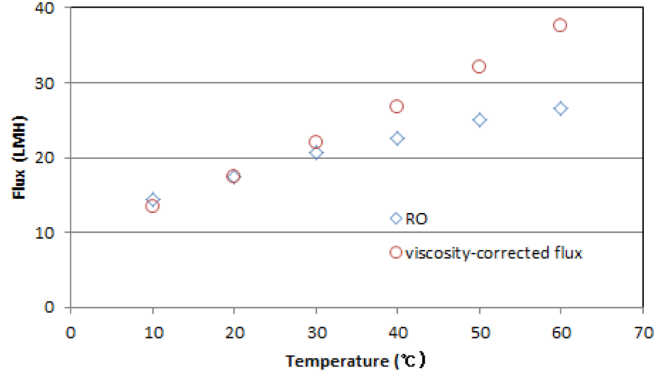


Fig. 5. The Effect of Viscosity on Reverse Osmosis, LMH (L/m²/hr).

도에 따른 투과량 변화는 실험에 사용된 NF 막이 RO막보다 급격히 증가하였다.

다음으로 회수율을 다음과 같은 식으로부터 구해 보았다.

$$\text{Recovery Ratio}(\%) = \frac{F_p}{F_p + F_c} \quad (9)$$

여기서, F_p : 생산수 유량(permeate flowrate)

F_c : 농축수 유량(concentrate flowrate)

Fig. 3는 NF공정과 NF 공정 후 RO공정의 회수율을 온도에 따라 나타내었다. NF 막은 10 °C에서 회수율 7.86%, 60 °C에서 회수율 21.63%를 나타냈고 RO막의 경우에는 10 °C에서 회수율 9.22%, 60 °C에서 회수율 17.11%를 나타냈다. 투과량과 마찬가지로 온도가 올라감에 따라 회수율이 증가하였으나 증가량은 NF 막이 RO막보다 더 컸다. Fig. 2과 3를 통해 NF막과 RO막은 둘 다 온도에 따른 투과량 증가시 회수율도 증가함을 보였다.

일반적으로 물의 온도가 상승하면 물의 점성이 감소한다. 물의 점성은 막 분리 과정에서 저항으로 작용한다. 즉 낮은 온도의 원수를 막분리할 시 동일한 압력 하에서 고온의 원수를 막분리할 때와 비교하여 투과량이 감소한다. Fig. 4와 5는 온도 상승시 투과량 증가를 해석하기 위해 식 (1)에 의해 구한 각 온도별 물의 점성 변화를 고려하여 기준 온도 20 °C에 대한 비를 나타내었다. NF 막의 경우는 점성을 고려한 투과량과 실제 실험값이 거의 일치하였다. 하

지만 NF 막을 통과한 RO막의 경우는 점성을 고려한 투과량과 실제 실험에서 구한 투과량 사이 큰 차이를 나타내고 있다. RO막의 경우 점성을 고려하여 구한 60 °C에서 투과량은 37.53 LMH이지만 실제 실험에서 구한 투과량은 26.62 LMH였다. 이는 RO막의 경우 온도 상승시 물의 점성 감소만으로는 투과량 상승을 설명할 수 없다는 것을 나타낸다. MF의 경우에는 flux 실험값과 점성의 영향을 고려한 이론값이 잘 일치하고 있으나 RO의 경우에는 실험값과 이론값이 일치하고 있지 않으므로 온도상승에 의한 점성 감소 외에 다른 요소도 작용하고 있음을 알 수 있다.

온도에 따른 막의 변화 역시 투과량에 영향을 미친다. 일반적으로 원통을 통과하는 물의 경우 Hagen-Poiseuille flow를 따른다. 막의 경우 공극은 완전한 원통형이 아니지만 투과량 경향을 알아 보기에는 충분하다. 기준 온도 20 °C에 비해 공극의 상대적인 크기를 식 (2)로 나타낼 수 있다. 즉 투과량 변화를 기준 온도에 대한 공극 크기 변화를 통해 알 수 있다. 식 (2)는 공극크기의 변화를 투과량, 압력, 점성을 고려하여 구한 식으로 식 (1)보다는 업그레이드된 식이다. Fig. 6은 Hagen-Poiseuille식을 이용하여 구한 상대적인 공극 크기를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보듯이 NF막은 온도변화에 상관없이 거의 일정한 공극 크기를 나타내었지만 RO막의 경우는 온도가 상승함에 따라 공극이 감소함을 보였다. 특히 60 °C에서는 20 °C의 공극크기보다 약 8% 정도 작은 공극 크기를 나타내었다. 이는 온도 상승으로 투과량이 상승하지만 동시에 막의 공극 감소로 인한 투

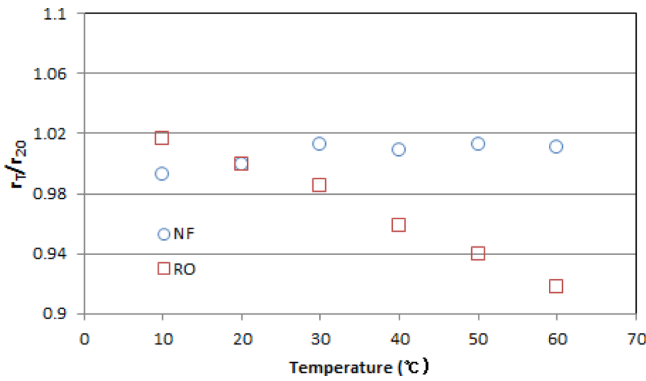


Fig. 6. The Effect of Temperature on the Relative Pore Sizes of Membranes.

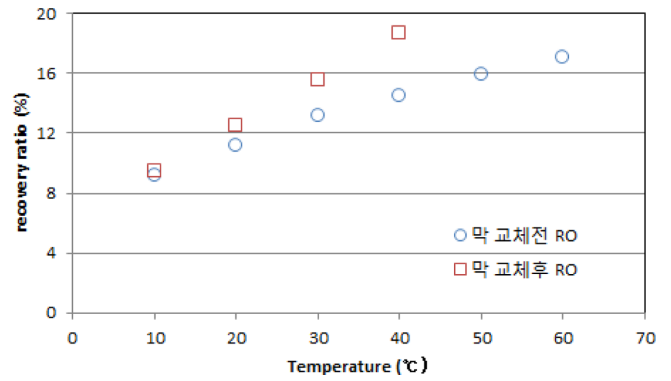


Fig. 8. Recovery Ratio Before and After the Replacement of Membranes.

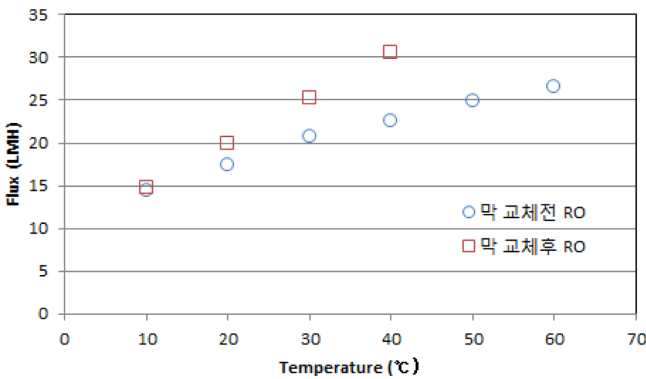


Fig. 7. Flux at Different Temperature Before and After the Replacement of Membranes, LMH (L/m²/hr).

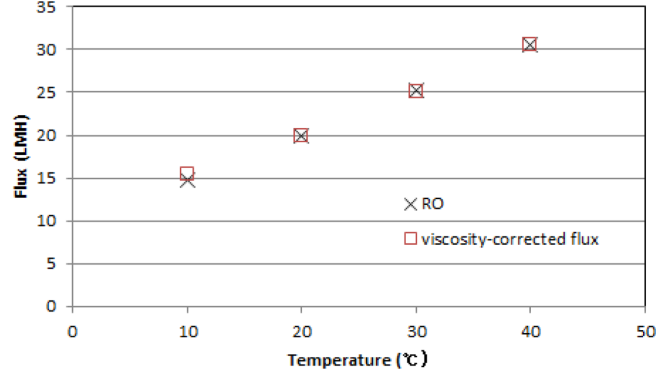


Fig. 9. The Effect of viscosity on Flux after the Replacement of Membranes, LMH (L/m²/hr).

과량이 감소하여 온도상승으로 인한 투과량을 상당부분 상쇄시켜 점성에 의한 투과량 상승보다는 작은 양만큼 투과량이 커진다. 이는 60 °C까지 온도상승으로 인한 막 변형이 일어났음을 알 수 있다.

막 교체후 동일한 실험을 10 °C에서 40 °C까지 하였다. 막교체전 온도를 60 °C에서 10 °C로 변화하면서 실험한 결과 막의 변형을 가져와서 막 교체후에는 온도를 10 °C에서 40 °C까지 단계적으로 실험하였다. 막교체 후 최고 온도를 40 °C로 하여 막의 변형을 최소화하였다. Fig. 7은 막 교체후 NF 생산수를 RO막에 통과시켰을 경우 투과량을 나타낸 것이다. 10 °C에서는 막교체 전후 투과량에서 큰 차이를 나타내지 않았지만 40 °C에서 막 교체전에는 투과량이 22.64 LMH였으나 막교체 후 투과량이 30.52 LMH로 증가하였다. Fig. 8에서는 막교체 전후 회수율 차이를 나타내었는데 투과량과 마찬가지로 막 교체후 회수율이 증가하였다.

이러한 차이를 설명하기 위해 식 (1)을 사용하여 막 교체 후 점성에 의한 보정을 한 투과량과 실제 실험에서 구한 투과량을 Fig. 9에 나타내 보았다. 막 교체전과 비교해 보았을 때(Fig. 5) 막 교체 후 점성을 고려한 투과량과 실험에서 구한 투과량이 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 이는 40 °C까지 온도변화에 의해 막의 변형이 거의 발생하지 않고 투과량 증가는 단순히 물의 점성 감소만으로 설명할 수 있음을 의미한다. 막교체 후 막의 변형을 알아보기 위해 Hagen-Poiseuille식을 이용하여 기준온도에 대한 상대적인 공극 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 막 교체전에는 온도가 올라감에 따라

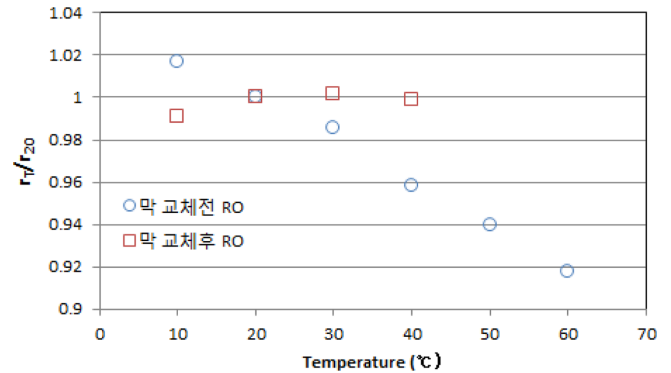


Fig. 10. The Relative Pore Sizes Before and After the Replacement of Membranes.

막의 공극이 감소하는 경향을 나타내었으나 막 교체 후에는 온도가 상승하더라도 막의 공극이 일정함을 알 수 있었다. 이는 막 교체 전에는 온도가 올라감으로써 막의 변형이 일어났으나 막 교체 후에는 막의 변형이 거의 일어나지 않았음을 의미한다.

막을 통한 염배제율은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$\text{Rejection} = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (10)$$

여기서 C_f : 원수 농도(Feed Concentration in TDS)

C_p : 생산수 농도(Permeate Concentration in TDS)

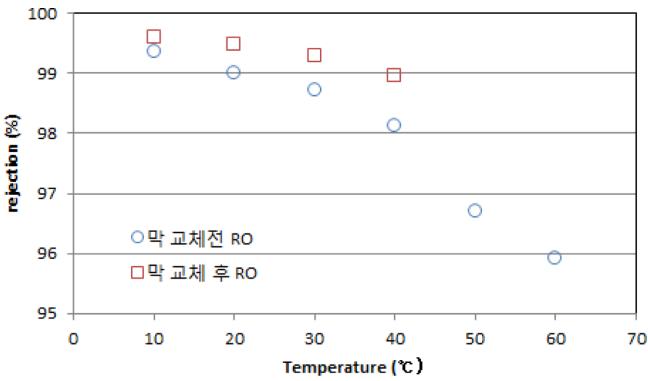


Fig. 11. Rejection Ratio Before and After the Replacement of Membranes.

막 교체 전 후 RO막의 염배제율을 Fig. 11에 나타내었다. 막 교체 전에는 온도가 상승하면서 염배제율이 급격히 감소하였으나 막 교체 후에는 감소량이 완화되었다. 이는 막 교체 전 실험에서는 온도상승으로 인한 막의 손상으로 염배제율이 급격히 감소했으나 막 교체 후 실험에서는 온도가 상승하여도 염배제율이 완만히 감소하였다. 역삼투의 경우 온도상승에 의한 투과율 상승 및 염배제율도 약간 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보아 삼투압의 영향보다 다른 요인에 의한 투과율 감소를 설명해야 될 것으로 사료된다. 즉 농도분극현상이 온도상승으로 인해 감소되어 염배제율이 감소하는 것으로 사료된다.

NF막과 RO막의 pH는 Fig. 12에 나타내었다. NF 생산수의 pH는 7.9에서 8.4정도였는데 온도가 상승할수록 약간 증가하는 경향을 나타내었다. RO 생산수의 pH는 6에서 7.4정도로 NF와 비교해서 약간 낮은 값을 나타내었으며 온도에 따른 pH 상승효과는 미미하였다. NF막과 RO막의 전기전도도는 Fig. 13에 나타내었다. NF막의 경우에는 대부분의 이온성분을 통과시키므로 전기전도도가 48°C에서 49.7 mS/cm 정도의 높은 전기전도도를 나타내었다. 온도상승함에 따라 전기전도도가 조금 상승하였다. 이는 온도상승으로 인한 농도 분극층이 감소하여 염이 좀 더 쉽게 막을 통과하는 것으로 사료된다. RO막의 경우에는 대부분의 이온성분이 막을 통과하지 못하므로 전기전도도가 0.3°C에서 2.0 mS/cm 정도의 낮은 값을

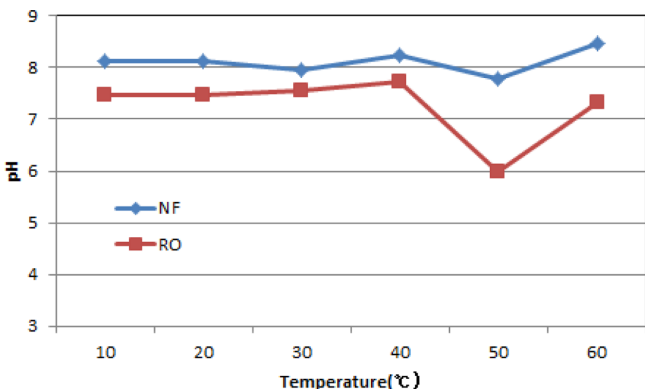


Fig. 12. pH of NF and RO permeate at different temperatures.

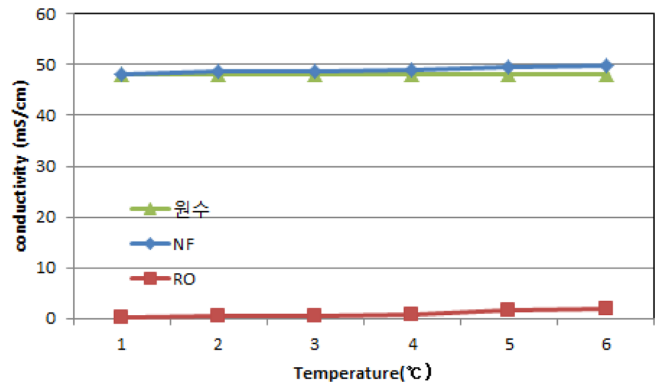


Fig. 13. Conductivity of NF and RO permeate at different temperatures.

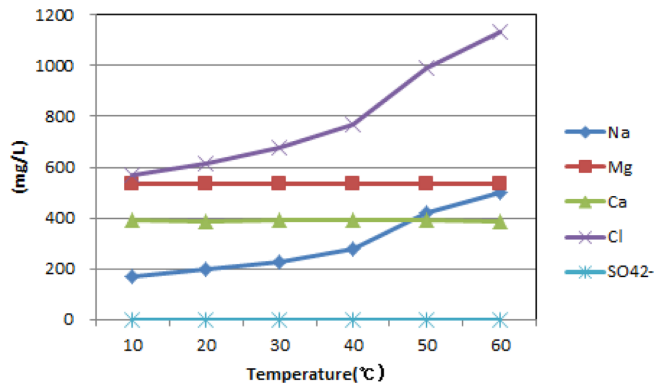


Fig. 14. Mineral amounts of NF permeate at different temperatures.

나타내었다. NF막과 마찬가지로 온도상승으로 인해 전기전도도가 약간 상승하였다.

NF 생산수의 미네랄성분은 Fig. 14에 나타내었다. 칼슘은 380°C에서 390 mg/L 정도였으며 마그네슘은 535°C에서 540 mg/L 정도였다. 칼슘과 마그네슘은 온도가 상승하더라도 일정한 값을 나타내는 것으로 보아 칼슘과 마그네슘의 NF막 투과는 온도에 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. sulfate의 경우에는 NF막에 의해 99% 이상 제거되었다. 나트륨과 염소의 경우에는 온도가 상승함에 따라 막 투과율이 증가함을 나타내었다. 즉 온도상승에 따라 농도분극층이 감소하여 나트륨과 염소가 쉽게 막을 통과할 수 있는 것으로 생각된다.

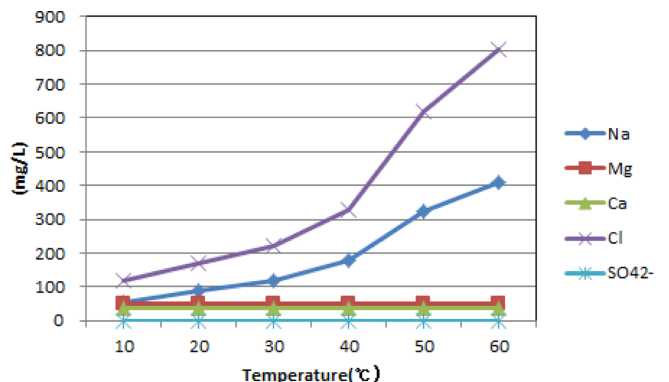


Fig. 15. Mineral amounts of RO permeate at different temperatures.

막 교체전 RO 생산수의 미네랄성분은 Fig. 15에 나타내었다. 칼슘은 35 °C에서 36 mg/L정도였으며 마그네슘은 50 °C에서 52 mg/L정도였다. 즉 NF는 콜로이드 성분과 고분자 유기물을 걸러내고 1가 이온은 걸러내지 못하지만 RO는 1가 이온 성분도 걸러낸다. 칼슘과 마그네슘은 온도가 상승하더라도 일정한 값을 나타내는 것으로 보아 칼슘과 마그네슘의 RO막 투과는 온도에 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. sulfate의 경우에는 RO막에 의해 99%이상 제거되었다. 나트륨과 염소의 경우에는 온도가 상승함에 따라 막 투과율이 증가함을 나타내었다.

5. 결 론

이 연구결과는 다음과 같이 요약될 수가 있다. 즉 온도가 올라갈수록 NF막과 RO막은 투과량이 증가하였다. 이러한 투과량 증가는 물의 점성 감소와 막의 변형으로 설명할 수 있다. 온도가 상승할수록 물의 점성이 감소하여 투과량은 증가한다. 하지만 원수 온도 상승이 막의 변형을 가져왔을 경우는 물의 점성 감소로 인한 투과량 상승을 상쇄시킨다. 막의 변형은 공극의 감소를 가져와 투과량 감소를 유발시킨다. 막의 변형을 최소화시키기 위해서는 막을 일정한 온도 이상으로 운전해서는 안된다. 온도가 상승함에 따라 염배제율은 감소하는 경향을 나타내었으나 그 영향은 미미하였다. 온도상승으로 공극이 작아지더라도 농도분극현상이 감소함으로써 염배제율이 낮아 질 수 있고 온도상승으로 고분자막의 수축을 유도하여 막공극이 작아짐을 추측할 수 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 ‘해양 심층수 산업지원 기술’ 및 ‘해양 심층수의 에너지 이용 기술 개발’ 과제 연구결

과 중 일부이며 연구비 지원에 감사드리며 본 논문의 내용은 해양수산부의 공식적인 견해가 아님을 알려 드립니다.

참고문헌

- [1] Baker, R.W., 2004, Membrane Technology and Application, 2nd ed. John Wiley & Sons. Ltd.
- [2] Goosen, M.F.A., Sablani, S., Dal Cin, M., Wilf, M., 2011, “Effect of Cyclic Changes in Temperature and Pressure on Permeation properties of Composite Polyamide Seawater Reverse Osmosis Membranes”, Separation Science and Technology, Vol. 46, 14-26.
- [3] Moon, D.S., Chung, D.H., Kim, H.J. and Shin, P.K., 2004, “Evaluation of Seawater Desalination Apparatus Using the Principles of Reverse-Osmosis”, Proceedings of Korean Society of Marine Environment and Energy, 167-172.
- [4] Pohland, H.D., 1988, Theory of Membrane Processes, Proceedings of the AWWA Annual Conference, Orlando, Florida.
- [5] Sharma, R.R., Agrawal, R. and Chellam, S., 2003, “Temperature Effects on Sieving Characteristics of Thin-Film Composite Nanofiltration Membranes: Pore Size Distributions and Transport Parameters”, Journal of Membrane Science, Vol.223, 69-87.
- [6] Zhao, S. and Zou, L., 2011, “Effect of Working Temperature on Separation Performance, Membrane Scaling and Cleaning in Forward Osmosis Desalination”, Vol. 278, 157-164.

2013년 9월 30일 원고접수

2013년 11월 19일(1차), 2013년 12월 26일(2차) 심사수정일자

2013년 12월 30일 게재확정일자