

역삼투막 공정에서 화학적 세정에 의한 SiO₂ scale 제거특성

Characteristics of SiO₂ Scale Removal by Chemical Cleaning in Reverse Osmosis Membrane Process

독고석^{1*} · 이형집²

Seok Dockko^{1*} · Lee Hyung Jib²

1 단국대학교 토목환경공학과, 2 우석대학교 토목공학과

(2009년 월 일 접수 ; 2010년 월 일 수정 ; 2010년 월 일 채택)

Abstract

Reverse osmosis (RO) membranes have been widely used for desalination as well as water and wastewater treatment facilities. Cleaning process is important to maintain stable operation as well as prevention of membrane fouling. Purpose of this research is to analyze electrostatic and chemical characteristics after cleaning of RO membrane against SiO₂ scale. Four RO membranes of polyamide are used and examined about effect of chemical cleaning. EDTA (ethylene diamine tetraacetic acid) and SDS (sodium dodecyl sulfate) and NaOH are applied for cleaning process after operation in synthetic water. Then, cleaning was performed with chemicals such concentration as 6hr, 12hr and 24hr, respectively. As a result, transmittances of FT-IR of four membranes are compared at each cleaning concentration. Ta/Tv shows difference of chemical composition between new membrane and cleaning membrane after cleaning. Type B of RO membrane is turned out to be most vulnerable to cleaning among four membranes. In terms of zeta potential, new membrane has -16 mV to +6 mV on pH while scaled membrane has -18 mV to 2 mV. However, it changed -23mV to 0.9 mV after cleaning. In comparison with existing salt rejection of RO membranes after cleaning, the rejection of the membranes goes down 0.7% maximum. Though cleaning changes the characteristics of membrane surface, it does not greatly affect salt rejection. pH is a critical factor to flux change in PA (polyamide) membrane.

Key words : reverse osmosis, chemical cleaning, zeta potential

주제어 : RO막, 화학적세정, 제타전위

1. 서론

최근 수자원의 부족을 해결하기 위한 방안으로 개발되어 온 RO막의 기술은 비약적으로 발전하고 있다. 특히 해수담수화 공정에서는 RO막을 주 공정으로 사용되고 있지만 막 표면에 발생하는 scale 및 fouling을 저감하기 위한 세정기

술은 막재생에 중요한 문제로 인식되고 있으며, 사용되는 막의 성질에 따라서 세정방법도 다양하다.

막 표면은 소수성, 표면전하, 그리고 거칠기 등이 막의 품질 및 성능에 영향을 미칠 수 있으며 복합적 작용이 막 fouling에 중요한 메커니즘으로 작용할 수 있다(Weis et al., 2003, 2005). RO막에서 발생하는 fouling의 50.2%는

* Corresponding author Tel:+82-41-550-3516, Fax:+82-41-550-3521, E-mail: dockko@dku.edu(Dockko, S.)

organic물질에 의한 것이고 나머지 49.8%는 inorganic물질에 의한 것이며, 특히 SiO₂가 scale을 유발하는 주요물질이다(Sutzkover et al., 2000, 2001; Semiat et al., 2003). SiO₂는 두 고분자 및 결정형태로 되어 있어 매우 복잡한 화학적 형태를 갖고 있다고 Iier에 의해 밝혀졌으며, 또한 Sheikholeslami와 Tan은 비결정질인 SiO₂나 콜로이드 입자의 흡착에 의하여 막 오염이 발생할 수 있기 때문에 화학적 세정을 할 수밖에 없으며, 이러한 화학적 세정은 화학반응 중 막표면과 foulant 사이의 흡착력과 foulant 사이에서의 결합력에 따라 다르다.

RO막에서 막표면의 정전기적 변화는 막의 성능과 fouling 경향에 중요한 역할을 한다. 따라서 제타전위 및 여과에 의해 RO막의 정전기적 특성에 관한 연구가 진행되고 있으며, Evans 등은 UF막에서 fouling으로 인하여 막 표면의 제타전위가 변화된다고 발표하였다(Evans et al., 2008). 그러나 현재 RO막에 대해서는 fouling과 세정에 따른 표면특성 특히 전하량의 변화 등에 관한 연구는 미비한 실정이다. RO막의 경우는 막표면의 정전기적 특성이 무기성 이온성분을 제거하는데 영향을 미치기 때문에 MF/UF 막에 비하여 막 표면 정전기적 성질을 분석하는 것이 필요하다.

본 연구의 목적은 RO막에서 fouling 및 세정 후 pH에 따른 표면의 특성변화를 분석하고 특히 표면전하변화가 flux 회복율에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 화학적 세정에 따른 막 표면의 화학적 손상 정도를 알아보기 위하여 FT-IR

(Fourier Transform Infra Red)을 이용하여 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에서 사용한 역삼투 분리막 장치는 평판형 투과 셀과 high pressure pump, feed tank, 그리고 water bath, chemical pump, 세정 solution tank로 구성되어 있으며, 이에 대한 모식도가 Fig. 1에 나타나 있다. 평판형 투과셀의 경우 4개의 원형 stainless steel로 제작하였으며 한 개 셀의 유효 투과 면적은 41.8cm²이다. 그 외에 pump의 rpm을 제어하기 위해 inverter system을 설치하였고, 안전장치의 하나로서 BP relief valve등을 달아 압력을 제어할 수 있게 하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 막종류 및 운전조건

RO막은 제조회사별 A(F사제품), B(H사제품), C(T사제품), D(W사제품)의 막을 선정하여 실험에 사용하였고, 모두 PA(Polyamide) 재질로 Thin-film composite으로 되어 있었다. 표면전하는 모두 음전하를 띄고 있으며, 99.75%이상의 salt제거율을 나타내고 있다. Flux는 27.5~38.29 l/m²·hr의 크기를 나타내고, 최대운전압력은 800~1,200psi (56.5~84.7bar)이다.

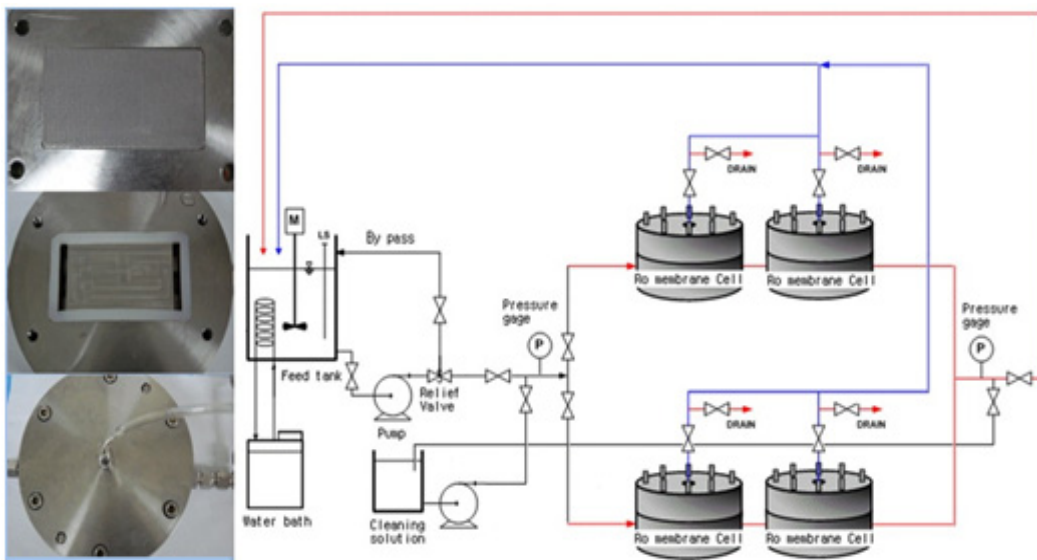


Fig. 1. 실험실 RO 공정 모식도

2.2.2 feed solution

fouling을 발생시키기 위한 feed solution으로 SiO₂를 용해시켜 실험하였다. 원수 제조 방법은 제타 전위의 측정을 위하여 distilled water에 background electrolyte 0.01M NaCl을 주입하였다. 그리고 SiO₂는 commercial silica colloids (Aerosil 200, Degussa) 약품을 사용하여 90ppm, 150ppm의 농도로 20 ℓ를 제조하였다.

2.2.3 세정액

Zhu 등의 논문에 따르면, EDTA+SDS+NaOH의 화학약품을 0.1%의 농도로 혼합하여 사용하였을 때 세정 효과가 가장 높았다. 따라서 세정용액으로는 EDTA 0.1% 용액을 사용하였으며, pH에 대한 막의 표면변화를 관찰하기 위하여, HCl+EDTA+SDS (pH3), NaOCl (pH3, pH12)의 세정액을 만들어 각 결과를 도출하였다. 사용 화학약품은 EDTA-2Na (Ethylenediaminetetraacetic Acid Disodium Salt Dihydrate, DAEJUNG), SDS (Sodium Lauryl Sulfate, DAEJUNG), NaOH (Sodium Hydroxide Pellets, DAEJUNG), NaOCl (Sodium Hypochlorite DAEJUNG)을 사용하여 세정액을 만들었으며 0.1M의 NaOH와 HCl의 사용량을 조절하여 NaOCl pH 3, 12의 세정액을 만들었다. 그리고 극한 조건의 세정 실험에는 같은 약품을 10배 높은 1%의 농도로 혼합하여 사용하였다.

2.2.4 실험조건

이와 같은 조건하에서 제조된 SiO₂ feed solution을 사용하여 24hr 동안 운전 후 scale 유발 후 세정 실험을 실시하였다. 이 막에 대하여 Pure Water Flux(PWF)를 측정하였으며, 0.1% 농도의 세정액(EDTA+SDS+NaOH)으로 1시간 동안 on-line 방식으로 세정을 실시한 후 플럭스를 측정하였다. 그리고 각 막 표면의 제타전위 분석기(ELS-8000/OTSUKA ELECTRONICS)를 이용하여 각 pH에 따라 측정하였으며, pH는 0.1M HCl, 0.1M NaOH를 사용하여 조절하였다. 각각 새막, fouling 후, 그리고 세정 후의 RO 막 제타전위를 측정하여 비교분석하였으며, SiO₂ fouling과 세정의 횟수를 달리하여 그에 따른 제타전위와 플럭스 변화를 알아보았다. 원수 및 세정액, 세정방식은 매회 위의 실험과 동일하며, 다음과 같이 fouling과 세정을 반복하여 막 표면의 변화를 분석하였다. 분석 막은 ①New membrane, ②Fouled 1, ③Fouled 1 Cleaned 1, ④Fouled 2 Cleaned 1, ⑤Fouled 2 Cleaned 2으로 이 막을 이용하여 제타전위 및 PWF측정을 하였다.

세정농도와 시간에 따른 막 표면이 화학적 세정으로 일어날 수 있는 표면적 손상에 대해 알아보기 위하여, 1%의 세정

액(EDTA+SDS+NaOH 혼합용액) 농도로 세정시간 6hr, 12hr, 24hr 연속 세정을 실시한 막으로 FT-IR 및 제거율분석을 하였으며, 각 막에 대한 PWF를 측정하였다.

FT-IR(Nicolet 380, Thermo)을 이용하여 각 contact time별로 세정된 막을 가지고 분석하였다. 결과 데이터를 이용하여 막 표면의 화학적 성상이 어떻게 바뀌었는지를 알아보기 위하여 normalize spectrum값을 이용하였고, 초기 대비 세정 후 막 표면의 성상 변화 정도를 파악하는 척도로 사용하였다. S는 세정 후 막의 spectrum peak값이고, S₀는 새막에 대한 spectrum peak값을 나타낸다.

$$\text{Normalize spectrum} = S / S_0$$

세정에 따른 막표면의 손상을 알아보기 위하여 원수와 처리수를 가지고 Ion-Chromatography (Metrohm) 실험을 실시하여 새막 대비 세정 후 막의 salt제거율의 변화를 알아보았다.

세정액 pH에 따른 플럭스 변화를 알아보기 위하여 SiO₂의 인공시료를 150 mg/L으로 제조하여 12시간 운전하였으며 permeate를 시작 10분 후와 12hr 후에 측정하였다. PWF는 세정 후와 12hr 후에 각각 세정액과 feed를 제거한 뒤 DI water로 측정하였다. 이 실험에서도 결과 데이터를 이용하여 플럭스 경향을 normalize하여 나타냈으며, J_w는 새막의 PWF이고, J_c는 세정후의 PWF, J_{syn}는 12hr 운전 후의 PWF를 나타낸다. 실험결과는 Fig. 7에 나타나 있다.

$$\text{Flux Recovery} = (J_c - J_{syn}) / (J_w - J_{syn})$$

실제 해수에서의 pH에 따른 flux 특성을 알아보기 위하여 MF막으로 전처리된 해수에 NaOH, HCl을 이용하여 pH를 변화시키며 플럭스 영향을 파악하였다. ① pH 3→12→3 ② pH 12→3→12 두 가지 단계로 각각 변화시켜 pH 하나당 2시간 즉 한 단계실험을 6시간 동안 진행하여 막의 플럭스변화를 분석하였다.

3. 실험결과

3.1 세정에 따른 제타전위 변화특성

다음 Fig. 2는 4개 RO막에 대한 각각 초기 상태의 pH에 따른 제타전위 값을 나타내고 있다. 그림에 나타나 있듯이 A, C, D 막은 pH변화에도 -4.0~2.0mV로 균일한 분포의 제타전위를 나타낸 반면 B 막은 pH 2에서는 (+)를 나타내었으나, pH 10에서는 -10mV의 (-)를 나타내었다.

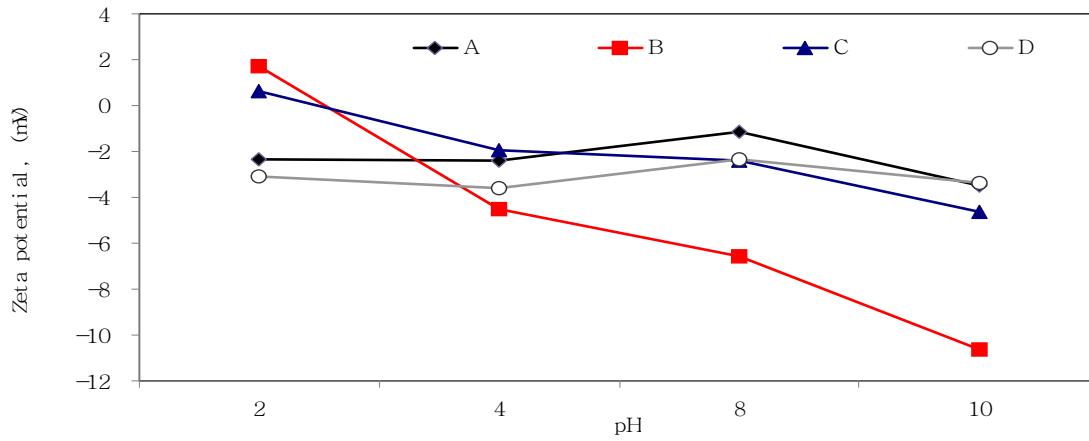


Fig. 2. 새막의 제타 전위 변화특성

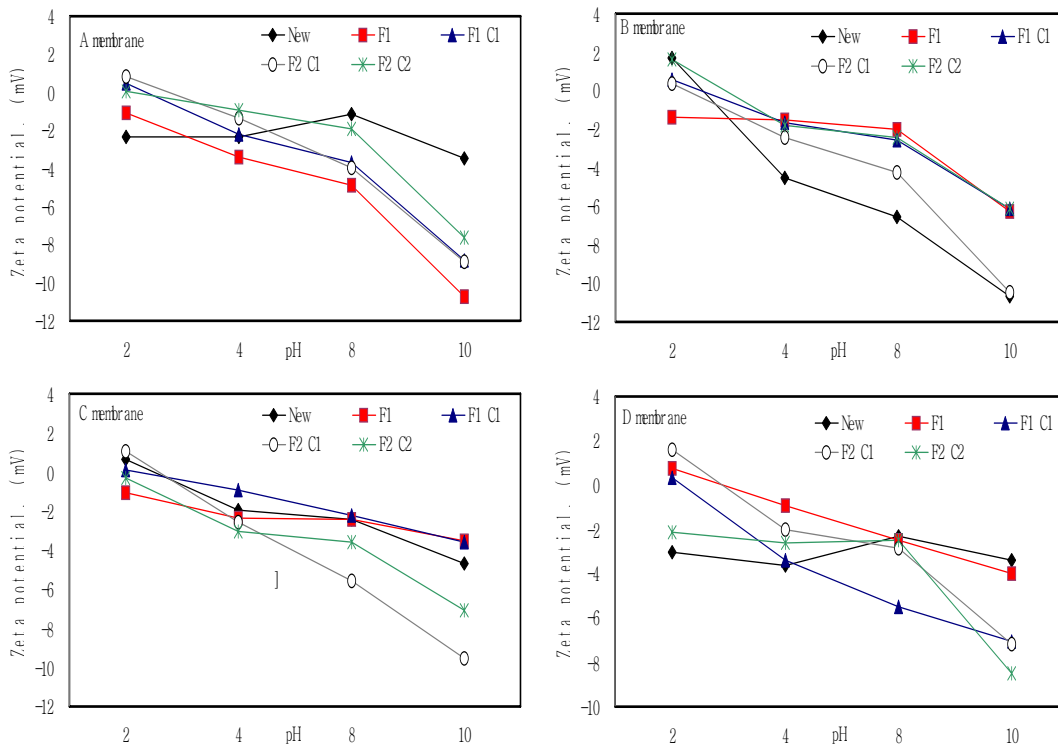


Fig. 3. 막 표면의 fouling, 세정 후의 제타 전위 특성

Fig. 3을 보면 각 종류별, pH별 막 표면 제타 전위값의 변화를 나타내었다. A, C 막의 경우 fouling으로 인하여 (-)로 떨어진 전위가 세정으로 인하여 (+)로 올라가는 경향을 보인다. 이와는 반대로 B, D 막의 경우 fouling으로 인하여 (+)로 올라간 전위가 세정으로 인하여 (-)로 떨어지는 경

향을 보이고 있다. D막을 제외하고 1차 cleaning을 하면 제타전위는 상승했다가 2차 fouling이 발생하면서 제타전위 값이 하락하는 경향을 나타내고 있다. 이후 2차 cleaning으로 제타전위는 다시 상승하는 경향을 보였다.

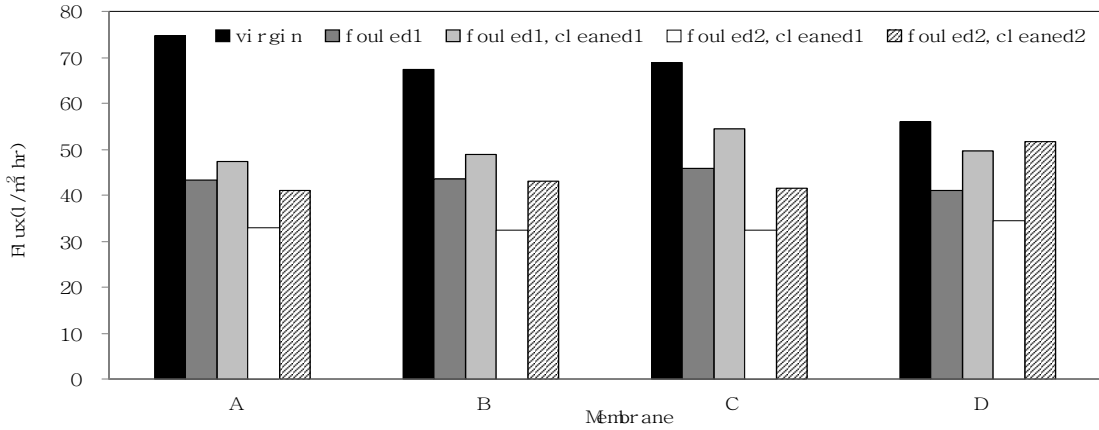


Fig. 4. SiO₂에 의한 막오염후 세정 후 4가지 막의 플럭스변화 특성

3.2 A, B, C, D 막의 상태별 Flux 변화

Fig. 4는 4종류 막의 fouling 발생과 세정조건에 따른 플럭스의 변화를 나타내었다. 새막에 비하여 1차 fouling 후에서의 플럭스는 4가지 막 모두 약 40 L/m² hr 정도로 비슷한 플럭스가 나왔고, [fouled 1, cleaned 1]에서는 C막이 54 L/m² hr로 가장 플럭스가 회복되었으나, A막이 48 L/m² hr로 낮은 값을 나타내었다. 반면 D막의 경우는 초기 플럭스가 낮았음에도 불구하고 세정후 플럭스가 A, B, C막과 거의 동등한 수준으로 회복되었다. D막의 경우 1회 세정후보다 플럭스가 3~4% 더 증가하였는데 막손상여부 분석을 위하여 FT-IR 분석을 수행하였다.

SiO₂에 대한 플럭스 감소율을 보면 A막이 가장 컸으며, 회복율도 다른 막에 비하여 낮게 나타났다. [fouled 1, cleaned 1]에서의 플럭스 회복율은 C막이 38%로 가장

높게 나왔지만 [fouled 2, cleaned 2]에서는 31% 높게 나타났다. A, B, C막은 [fouled 2, cleaned 2]의 플럭스 보다 [fouled 1, cleaned 1]의 플럭스가 더 높게 나타났지만 D막에서는 [fouled 1, cleaned 1]의 플럭스보다 [fouled 2, cleaned 2]에서 더 높은 플럭스가 나타났다.

3.3 세정에 따른 막 표면 성상변화

3.3.1 세정시간에 따른 막 표면의 성상변화

Fig. 5, Fig. 6 및 Table 1은 4개막에 대하여 새막과 24시간 EDTA+SDS+NaOH 1.0% 세정액에 세정후에 대한 결과값을 나타내고 있다. Fig. 5는 세정 시간에 따른 막표면에서 FT-IR spectrum의 변화를 볼 수 있다. Fig. 6은 새 막과 24시간 세정 후 막의 FT-IR 분석 spectrum을 normalize spectrum값으로 변환시켜 나타내었는데 wave number값

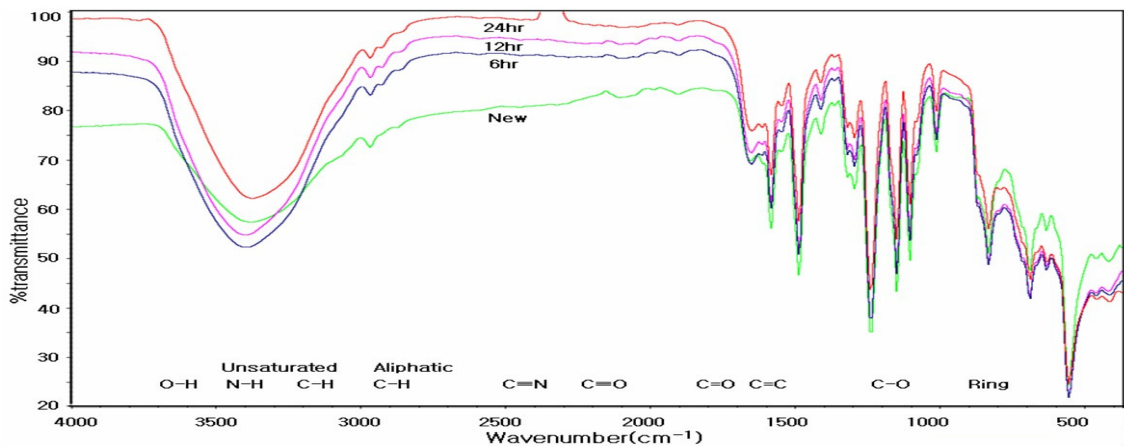


Fig. 5. 세정 시간에 따른 D 막의 FT-IR spectrum 변화특성

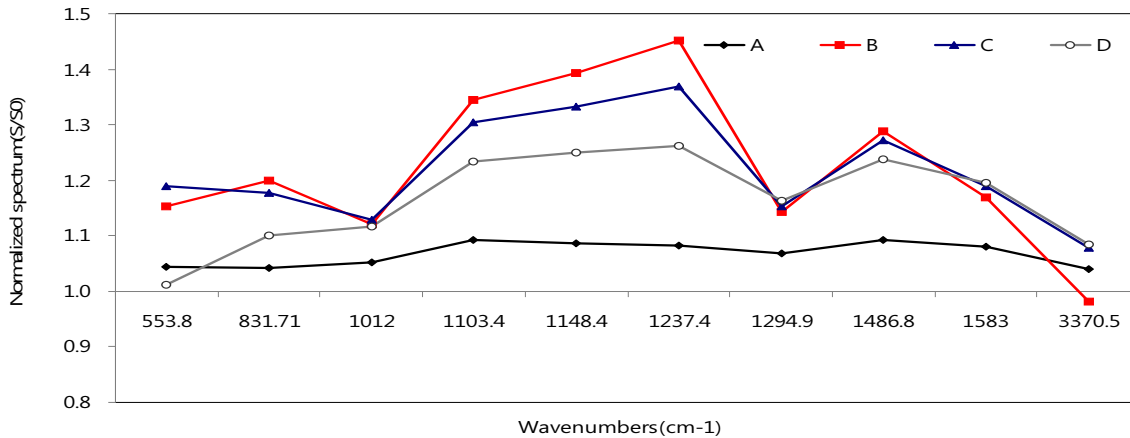


Fig. 6. EDTA+SDS+NaOH 1.0%의 24시간 세정후 normalize spectrum 변화특성

Table 1. New와 세정후 막의 salt제거율 변화 특성

		A	B	C	D
New	Flux, ℓ/m^2hr	74.6	67.5	68.9	56.0
	Salt Rejection, %	99.3	99.5	99.1	99.2
Cleaned	Flux, ℓ/m^2hr	66.3	94.7	68.7	56.9
	Salt Rejection, %	98.6	99.1	98.6	99.1
Recovery, %		88.8	140.4	99.6	101.7
Max. normalized spectrum		1.08	1.44	1.36	1.24

1,103cm⁻¹에서 1,237cm⁻¹의 범위에서 막이 초기에 비하여 C-O, C=O, C=C, N-H 결합 부위에서 wave number의 투과도가 40%정도 감소한 것을 알 수 있었다.

Table 1에서는 극한상태에서의 막세정이 막표면을 손상시켜 플럭스를 증가시키는 결과를 나타내고 있다. B, D 막이 극한상태의 세정에 의해 플럭스가 새 막에 비해 증가하였고 A, C 막은 오히려 세정으로 플럭스가 감소한 것을 알 수 있다.

플럭스의 증가와 감소로 인하여 막의 성능은 어떻게 달라졌는지 알아보기 위하여 salt제거율을 알아보았다. 사용 원수로는 seawater salt를 사용하여 30,500ppm의 농도로 제조하여 사용하였으며, 새막과 세정 후의 막처리수를 대상으로 IC로 측정하여 salt의 제거율을 알아보았다.

세정 전 막의 경우 salt에 대한 제거율은 99.2~99.5%였지만 세정 후 막은 98.6~99.1%로 세정 후 최대 0.7% 감소되었다. 막 세정후 salt제거율과 플럭스의 변화와는 직접적인 상관성이 없었으며, 24hr의 극한세정의 경우에는 막세정 후에 표면의 손상 등의 원인으로 플럭스 변화를 가져왔다.

3.4 pH에 따른 막 표면의 성상변화 특성

3.4.1 세정액 pH에 따른 플럭스변화 특성

D막을 이용하여 세정액 pH 변화에 따른 플럭스 변화를 측정된 결과, 세정후의 J_c/J_w값이 변화에 세정액 pH 12에서 세정후 플럭스가 높게 측정되었지만 pH 3에서는 세정후의 플럭스가 초기보다 낮게 나타났다. SiO₂의 feed를 이용하여 12hr 운전 후의 플럭스 변화는 4가지 세정액에서 초기보다 감소한 것으로 나타났으며, 4가지 세정액 중 pH 12에서의 플럭스가 pH 3에서의 플럭스 보다 높게 나타났다. 이는 polyamide 막표면의 N-H bond가 세정후 N-Cl로 치환되어서 막표면을 크게 손상시키는 N-Chlorination 현상에 의한 것이다(G.D. Kang et al., 2007). 막의 세정에 따른 회복율은 NaOCl pH 12에서 86%로 가장 높게 나타났으며, NaOCl pH 3이 4%로 가장 작게 나타났다. 세정액의 종류는 NaOH+EDTA+SDS를 사용하였을 때 회복율이 100%를 넘게 나타나서 막표면의 일부가 손상되었다는 것을 알 수 있었다.

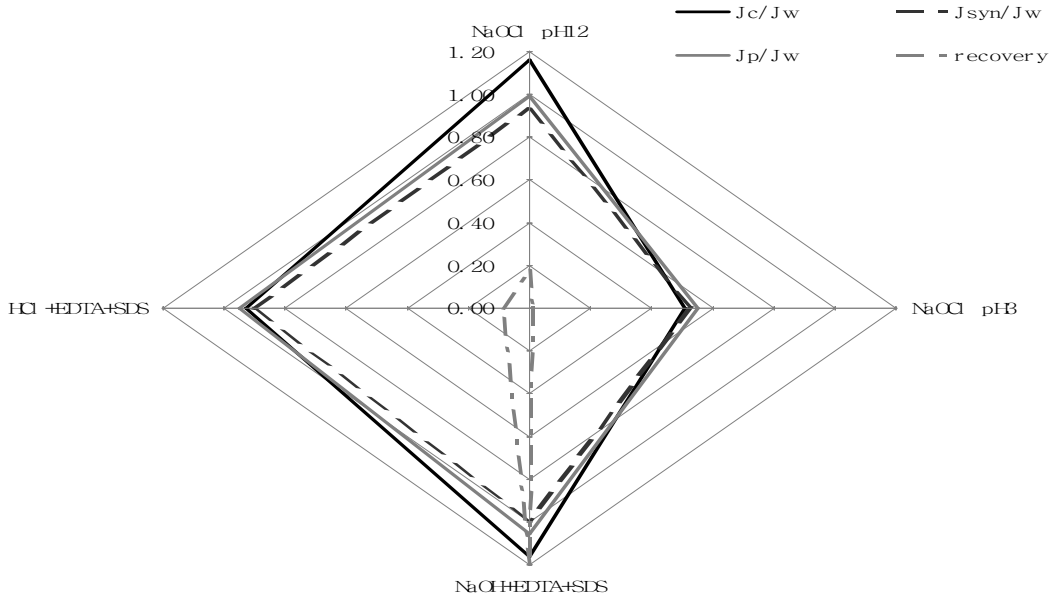


Fig. 7. 세정액 pH에 따른 플럭스변화 특성

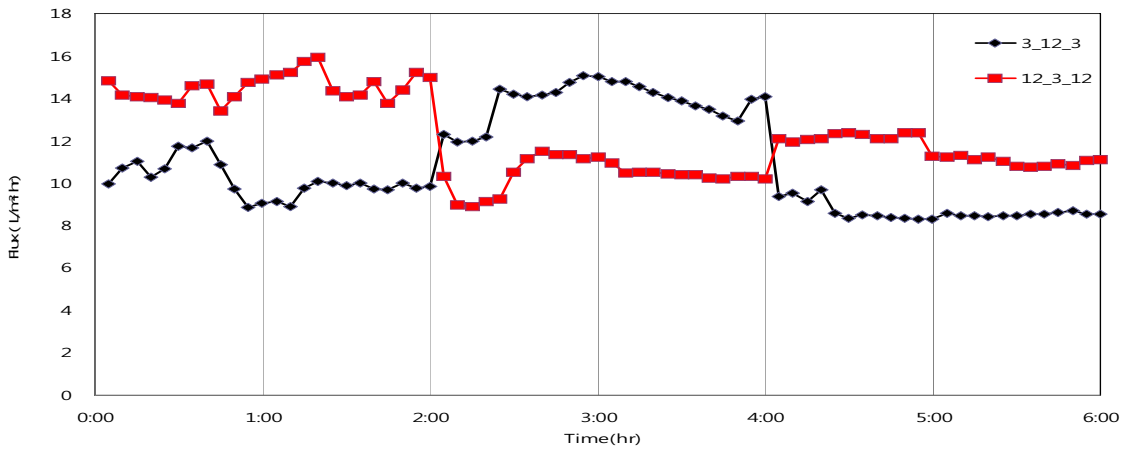


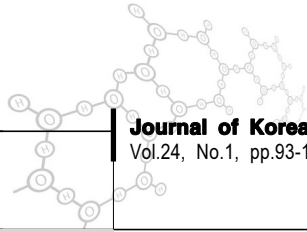
Fig. 8. D 막의 해수 pH에 따른 플럭스 변화

3.4.2 실제 해수 pH에 따른 플럭스 변화 특성

실제 해수를 이용하여 상이한 pH 상태에서 플럭스의 변화를 연속적으로 측정한 실험결과가 Fig. 8에 나타났다. 운전 시작후 2시간 이내의 pH 3과 pH 12에서의 결과를 보면 각각 10.1 L/m² hr, 14.6 L/m² hr로 나타나, 높은 pH에서 운전할 경우가 약 4.5 L/m² hr 이상 크게 나타났다. 2~4시간 운전후에는 pH 12에서는 13.8 L/m² hr, pH 3에서는 10.4 L/m² hr로 높은 pH에서 플럭스가 크게 증가되었다. 4~6시간 사이의 운전시 pH 12에서 플럭스가 증가하였으나, fouling으로 인하여 전체적으로 플럭스가 감소하

는 경향을 보였다.

pH 3→12→3로 변화시킨 실험에서 플럭스는 각각 10.1, 13.8, 8.6 L/m² hr로 변화하여, 낮은 pH에서 높은 pH로 변화하였을 때 약 37% 증가하였으나, 다시 pH를 감소시켰을 때 플럭스는 초기 대비 15% 감소하였다. pH 12→3→12로 변화시킨 실험에서의 플럭스는 각각 14.6, 10.4, 11.6 L/m² hr로 높은 pH에서 낮은 pH로 변화하였을 때 약 29% 감소하였으나, 다시 높게 변화시켰을 때에는 초기 대비 20% 감소되어 나타났다. RO막에서 세정액의 pH가 낮으면, 막의 공경이 축소되어 플럭스가 감소되며, 세정액의 pH가 높아지



면 공경이 확대되어 플럭스가 증가하는 현상이 발생되는데 (G.D. Kang et al., 2007), 본 연구결과 Feed측의 pH가 높아지면 이로인한 공경확대가 지속되어 플럭스량은 지속적으로 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 자연해수에서 Mg(OH)₂ 침전물에 대한 고 PH에서 방해효과는 지속적으로 연구해야 한다. 따라서 RO막과 같은 PA막의 경우는 세정시 산성용액을 마지막으로 사용하는 것 보다는 알칼리성 용액을 사용하는 것이 세정후 플럭스를 회복하는데 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 막의 세정방법에 대한 막 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 세정에 따른 4개 제조사의 막에 대한 표면의 제타전위를 비교분석한 결과, 같은 PA계열의 막이지만 실험 결과값은 차이가 있었다. A와 C사 막의 경우 fouling으로 인하여 제타값이 (-)로 많이 떨어졌다가 다시 세정으로 회복하는 양상을 보이는 반면, B와 D사 막의 경우 fouling 후 제타값이 오히려 (+)로 되었다.
2. 세정 농도를 극한 상태하여 세정한 경우에 FT-IR spectrum을 이용하여 막 표면을 분석한 결과, C=O, C=O, C=C, N-H 결합이 감소하였다. 본 실험에서 사용된 RO막의 경우에, 기존 salt제거율과 세정 후의 제거율을 비교하였을 때 세정 후 막의 제거율이 새 막에 비해 최대 0.7% 떨어진 것을 볼 수 있다. 세정에 의해 막 표면의 특성을 변화시키고 플럭스 변화를 가져왔지만 salt제거율에는 크게 영향을 미치지 않았다.
3. 세정액 pH에 따른 플럭스 변화를 비교하여 본 결과, 세정액 pH 12에서의 플럭스는 초기 플럭스보다 높게 나타났으며 pH 3 플럭스는 초기 플럭스보다 낮게 나타났다. SiO₂의 feed를 이용한 12hr 운전후의 플럭스는 4가지 세정액에서 모두 초기 플럭스보다 낮게 측정되었고, PWF의 결과는 rinsing 효과가 발생하여 12hr 후의 플럭스보다 높게 나타났다.
4. 실제 해수를 이용한 pH에 따른 플럭스 변화를 분석하여 본 결과, pH 3-12-3에서의 플럭스는 각각 10.1, 13.8, 8.6 L/m² hr로 변화하였고, 낮은 pH에서 높은 pH로 변화하였을 때 플럭스가 증가하였다가 다시 낮은 pH에서는 감소하였다. pH 12-3-12로 변화시킨 경우에는 상기와 반대로 플럭스는 증가했다가 감소했다가 다시 증가하였다. 이러한 결과는 PA막이 pH에 민감하여 산성용액에서는 플럭스가 감소되지만, 알칼리성 용액에서는 플

럭스가 증가되는 것을 알 수 있었다. 따라서 RO막과 같은 PA막의 경우는 세정시 산성용액을 마지막으로 사용하는 것 보다는 알칼리성 용액을 사용하는 것이 세정후 플럭스를 회복하는데 효과적임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업의 연구비지원(07해수담수B01-05-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- A. Casas, M.J. Ariza, J. Benavente. (2001) *J. Membrane Sci.*, **183**, pp.135.
- A.E. Yaroshchuk, Y.P. Boiko, A.L. Makovetskiy. (2002) *Langmuir*, **18**, pp.5154.
- A. Szymczyk, M. Sba, P. Fievet. (2005) *Langmuir*, **21**, pp.1818.
- A. Weis, M.R. Bird, M. Nyström. (2003) The chemical cleaning of polymeric UF membranes fouled with spent sulphite liquor over multiple operational cycles, *J. Membr.Sci*, **216**, pp.67-79.
- A. Weis, M.R. Bird, M. Nyström, C. Wright. (2005) The influence of morphology, hydrophobicity and charge upon the long-term performance of ultrafiltration membranes fouled with spent sulphite liquor, *Desalination*, **175**, pp.73-85.
- C. V. Vedavyasan. (2000) Combating water shortages with innovative uses of membranes, *Desalination*, **132**, pp.345-347.
- G. D. Kang, C.J. Gao, W.D. Chen, X.M. Jie, Y.M. Cao, Q. Yuang. (2007) Study on hypochlorite degradation of aromatic polyamide reverse osmosis membrane, *Journal of Membrane Science*, **300**, pp. 167-171.
- G. Tr g rdh. (2005) Membrane cleaning, *Desalination*, **71**, pp.325.
- I. Sutzkover, D. Hasson and R. Semiat. (2000) Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse osmosis system, *Desalination*, **131**, pp.117-127.
- I. Sutzkover, D. Hasson and R. Semiat. (2001) Technique for evaluating silica scaling and its inhibition in RO desalting, *Desalination*, **140**, pp.181-193.

- K. Ikeda, H. Hachisuka, T. Nakamura, S. Kimura, K. Umeyama, J. Chem. (1999) *Eng. Jpn*, **32**, pp.581.
- M. Wilf, S. Alt. (2000) Application of low fouling RO membrane elements for reclamation of municipal wastewater, *Desalination*, **132**, pp.11-19.
- Philip J. Evans, Michael R. Bird, Arto Pihlajamäki, Marianne Nyström. (2008) The influence of hydrophobicity, roughness and charge upon ultrafiltration membranes for black tea liquor clarification, *J. Membrane Sci.*, **313**, pp.250-262
- R. Semiat, I. Sutzkover and D. Hasson. (2003) Scaling of RO membranes from silica supersaturated solutions, *Desalination*, **157**, pp.169-191
- R. Semiat, I. Sutzkover and D. Hasson. (2003) Characterization of the effectiveness of silica anti-scalants, *Desalination*, **159**, pp.11-19.
- R. Sheikholeslami and S. Tan. (1999) Effects of water quality on silica fouling of desalination plants, *Desalination*, **126**, pp.267.
- Sayed Siavash Madaeni, Toraj Mohamamdi, Mansour Kazemi Moghadam. (2001) Chemical cleaning of reverse osmosis membranes, *Desalination*, **134**, pp.77-82.
- X. Zhu, M. Elimelech. (1997) Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, pp.36-54.