상업용 정밀여과/한외여과막의 특성 분석 및 해수 여과 성능 평가 Characterization and Seawater Filtration Performance of Commerical Microfiltration and Ultrafiltration Membranes

최창규 · 김인수^{*}

Changkyoo Choi · In S. Kim^{*}

광주과학기술원 지구환경공학부 글로벌담수화연구센터

Global Desalination Research Center (GDRC), School of Earth Sciences
and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

(Received June 5, 2017; Revised June 14, 2017; Accepted September 8, 2017)

Abstract : This paper was to analyze the membrane characterization of hydrophilicity, surface morphology and membrane chemical analysis of three commercial microfiltration/ultrafiltration membranes, and evaluate the filtration performance of a seawater to assess the availability for pretreatment of desalination process. From the results of contact angle, Mem-3, fabricated with polyacrylonitrile, was highly hydrophilic. It find out that Mem-3 has more anti-biofouling property. In Field emission scanning electron microscope (FESEM), Mem-1 (polyethylene) and Mem-2 (Polyvinylidene fluoride) showed the sponge-like shape and Mem-3 showed finger-like shape. Membrane chemical analysis by energy dispersive spectrometer (EDS) presented that Mem-2 was mostly fluoride and Mem-3 had a high ratio of N (32.47%) due to the nitrile group. The permeation flowrate per time on suction pressures using deionized water (D.I. water) tends that permeation rate of Mem-3 more increased when the pressure was increased compared to other membranes. From the results of turbidity and total suspended solids (TSS) removal, turbidity of permeate was 0.191 NTU to 0.406 NTU and TSS was 2.2 mg/L to 3.0 mg/L in all membranes, indicating that it was not suitable for the pretreatment of seawater desalination by short-term experiments.

Key Words : Microfiltration Membrane, Ultrafiltration Membrane, Membrane Characterization, Permeation, Rejection Rate, Pretreatment Of Seawater Desalination

요약 : 본 연구는 국내에서 상용화된 3 종류의 친수성 정밀여과막/한외여과막을 대상으로 막의 특성분석 및 해수 여과 성능 평가를 수행하였다. 접촉각 측정 결과에서는 PAN 재질인 Mem-3가 가장 친수성도가 높은 것으로 나타나 장기간 운전 시 유기성 오염 물질에 가장 내오염성이 높을 것으로 예상된다. FESEM 측정결과에서는 PE 재질인 Mem-1과 PVDF 재질인 Mem-2는 sponge 형태의 단면을 보였으며, PAN 재질인 Mem-3는 finger 형태의 단면을 나타냈다. EDS에 의한 막의 원소분석 결과에서 Mem-2는 Fluoride가 대부분이었고 Mem-3는 PAN이 Nitrile기로 인해 N이 32.47%의 높은 구성 비율을 보였다. D.I. water를 이용한 투과수량 분석은 압력 증가 시 Mem-3의 투과수량이 다른 막에 비해 큰 폭으로 증가되는 경향을 보였다. 탁도 및 부유물질 제거 실험은 모든 막에서 유출수의 탁도는 0.191-0.406 NTU, TSS는 2.2-3.0 mg/L 사이의 투과수질을 보여 단기간 실험으로부터 해수담수화 전처리용으로 사용하기에는 부적합하다는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 정밀여과막, 한외여과막, 막 특성분석, 투과수량, 제거율, 해수담수화전처리

1. 서론

전세계 해수담수화플랜트는 2000년-2009년에 생산수 용량 기준으로 MSF (multi-stage flash) 및 MED (multi effect distillation)와 같은 열 기반 해수담수화가 25%, 역삼투막(reverse osmosis, RO)과 같은 막 기반 해수담수화가 75%였으나, 2010년-2016년에 증발식 해수담수화가 7%, 막기반 해수담수화가 93%로 변화하여 증발식에서 막 기반 담수화 기술로 급격하게 변화하고 있다.¹⁾

역삼투막은 조류 및 박테리아 등의 미생물에 의해 발생하는 유기성 막오염(Biofouling)에 매우 취약하고, 막 투과 유량 감소와 막 손상을 유발함으로써, 플랜트의 운전이 중단되며, 막의 수명이 급격히 감소됨으로써, 플랜트의 유지관

리 비용이 증가하는 등 많은 문제점을 유발한다.^{2,3)} 이에 역삼투막 기반의 해수담수화 공정에서 전처리 공정은 막의 사용연한 증가와 파울링의 문제에서 플랜트의 유지관리 측면에서 매우 중요하다.

해수담수화플랜트의 전처리 공정은 주로 Dual media filtration (DMF)로 사용해 왔으나, 2010년 이후 정밀여과막(microfiltration, MF) 및 한외여과막(ultrafiltration, UF)과 같은 막분리 공정으로 대체되는 추세이다.⁴⁾ 막분리 공정은 DMF에 비해 적은 부지면적, 불량한 유입해수 수질에 대한 SDI (silt density index) 3 이하의 안정된 RO 유입수질, 낮은 Bio-fouling 유발, 적은 화학약품 소비 등과 같이 RO 기반의 해수담수화 공정에서 많은 장점을 가지고 있다.⁵⁻⁷⁾

역삼투 기반의 해수담수화 공정에서의 전처리 공정 처리

^{*} Corresponding author E-mail: iskim@gist.ac.kr Tel: 062-715-2580 Fax: 062-715-2584

수의 수질은 평균 탁도 0.1 NTU 이하, SDI 5 이하, 총 유기탄소(total organic carbon, TOC) 1 mg/L 이하, pH 4.0-9.0 범위 유지되는 것이 적절한 농도로 간주된다.⁸⁾ 일반적으로 DMF를 이용한 전처리에서는 평균 탁도 0.09 NTU와 평균 SDI 3.88 정도이며, UF 막을 이용한 전처리에서는 평균 탁도 0.05 NTU와 평균 SDI 2.57 정도인 것으로 조사되었다.⁹⁾

또한, 이¹⁰⁾는 이단여과는 98%의 탁도제거 성능을 보였지만 처리수의 SDI가 6 이상으로 유지되어 역삼투막 기반 해수담수화 전처리 공정으로 사용하기에는 부적합한 반면, UF 막은 처리수의 SDI가 2 이하로 배출되어 역삼투 기반 해수담수화의 전처리 공정으로 적합하다는 사실을 입증하였다. 성¹¹⁾은 응집 및 흡착과 연계된 세라믹 막여과 공정의 해수담수화 전처리 공정에의 가능성을 평가하였으며, 원수 종류 및 공정 조합에 관계없이 탁도 처리수질은 모두 만족하였으며, 응집과 흡착을 연계할 경우 고티플렉스 조건에서도 0.1 NTU 이하의 탁도 유출수질을 유지한다는 사실을 입증하였다. 강¹²⁾은 해수담수화 전처리를 위해 PAC (Poly aluminium chloride)-흡착-MF 막여과 공정을 이용하여 유기물 및 보론 제거능력을 검증하였으며, 그 결과 PAC를 주입한 흡착-MF 막여과 공정이 최대 56%의 보론을 제거할 수 있음을 증명하였다. 양¹³⁾은 40 μm 의 디스크 필터와 UF 막을 조합한 전처리 설비를 통해 역삼투막 해수담수화 전처리 공정으로의 가능성을 평가하였으며, SDI₁₅는 1-2, 탁도는 0.1 정도를 유지하여 해수담수화 전처리 공정으로 적합하다고 발표하였다.

이상의 결과에서와 같이, MF/UF를 이용한 해수담수화 공정의 전처리로의 활용 가능성 평가를 위해 응집 등의 조합을 통해 검증하는 것이 대부분이다. 하지만, 국외에서 시판되는 MF/UF 막에 비해 국내에 시판되는 상업용 MF/UF 막은 해수담수화 전처리보다는 수처리라는 범용적인 목적으로 제조된 것이며, 막에 대한 특성도 제시되어 있지 않아 상대적으로 비교하는데 어려움이 있다. 또한, 탁도 등의 유입 수질도 동일한 조건에서 실험하지 않아 상대적으로 비교하는데 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 상용화된 3종류의 MF/UF 막을 대상으로 막의 특성분석을 통해 차이점을 살펴보고, 실제 해수담수화플랜트의 DAF 유출수를 대상으로 투과수질을 검증함으로써, 해수담수화 전처리로 활용 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 막의 종류 및 제원

앞서 설명한 바와 같이, 본 연구에서는 국내에서 상용화된 3개 종류의 MF/UF 막을 S사와 E사를 통해 얻어 연구를 진행하였으며, 일반적으로 수처리에 많이 사용하는 Polyethylene (PE), Polyvinylidene-fluoride (PVDF), Polyacrylonitrile (PAN) 재질의 친수성 막을 대상으로 하였다. 제조사에서 제시한 막의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Membrane properties

Membrane No.	Materials	Hydrophilicity	Types	Pore size (μm)	ID/OD (mm)
Mem-1	Polyethylene (PE)	Hydrophilic	Hollow fiber	0.4	0.41/0.65
Mem-2	Polyvinylidene-fluoride (PVDF)	Hydrophilic	Hollow fiber	0.1	0.7/1.2
Mem-3	Polyacrylonitrile (PAN)	Hydrophilic	Hollow fiber	0.01	0.85/1.55

* ID/OD: Inner diameter/Outer diameter of membrane

Fig. 1. The membrane modules of tested materials.

2.2. 막 모듈

막 모듈은 제조사에서 얻은 fiber를 모듈 형태로 직접 제작하여 실험하였으며, 막 면적을 100 cm^2 으로 동일하게 하기 위해 모듈의 길이는 20 cm로 하고 OD에 따라 PE는 25개, PVDF는 14개, PAN은 11개의 fiber를 하나의 모듈로 제작하였다. 이때 모듈의 실제 사진은 Fig. 1과 같다.

막 투과 성능 실험은 Deionized water (D.I. water)를 대상으로 막 모듈을 침적하여 흡입 펌프를 통해 Out-In 방식으로 투과하였으며, Masterplex digital pump (No. 7523-37, USA)를 이용하여 50, 60, 70, 80, 90, 100 rpm에서의 투과량을 측정하였다. 해수 대상 제거를 실험은 투과량 실험과 동일하게 막 모듈을 침적하여 Out-In 방식으로 여과하였으며, 약 2 L 정도의 투과수를 획득하여 실험하였다.

2.3. 유입 해수 수질 및 측정 방법

본 연구의 유입수는 실제 해수를 대상으로 하였으며, G 해수담수화플랜트의 DAF 후의 MF 전처리 공정 유입수를 채취하여 사용하였다. 유입수의 성상은 TDS 농도를 고려하였을 때, 국내 해수의 평균 수질을 보였으며, 자세한 유입수질은 Table 2와 같다.

수질 측정 방법은 pH는 Orion 3 Star, 탁도는 HACH사의 2100N TURBIDMETER, 이온성 물질은 DIONEX사의 ICS-3000으로 측정하였으며, TSS와 TDS는 Standard Method에 따라 실험을 진행하였다.

막 특성 분석을 위한 측정 방법에서, 접촉각(Contact angle)

Table 2. Water quality of DAF effluent at G plant

Items	Concentrations	Items	Concentrations
pH	8.1	K ⁺	414 mg/L
Turbidity	2.81 NTU	Mg ²⁺	1,306 mg/L
TDS	32,400 mg/L	Ca ²⁺	428 mg/L
TSS	10.4 mg/L	Cl ⁻	18,995 mg/L
Na ⁺	10,865 mg/L	SO ₃ ²⁻	2,667 mg/L

은 SEO 사의 Phoenix300Touch, 푸리에 변환 적외선 분광기 (Fourier transform infrared, FT-IR)은 Varian 660-IR, FESEM 은 HITACHI S4700을 이용하여 측정하였으며, 모든 시료 는 정밀도를 고려하여 적어도 3개 이상의 시료를 분석하여 결과를 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 막 특성 분석

3.1.1. 접촉각 측정

접촉각은 고체 표면에 형성된 액적에 대해 3개의 상이 만나는 점에서의 고체표면 접선과 액체표면 접선이 이루는 각도로서, 일반적으로 90도를 기준으로 낮으면 친수성, 높으면 소수성으로 구분한다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 접촉각 측정 방법 중 Contact angle goniometer를 사용하였으며, 이는 고체 표면 상에 액적을 syringe를 이용하여 떨어뜨린 다음, CCD camera로 촬영하여 각도를 측정하는 방법이다. 막의 친수성도를 평가하기 위해 20℃의 D.I. water 0.05-0.1 μL 사이의 양으로 접촉각을 측정한 결과는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서와 같이 PAN 재질의 Mem-3가 가장 높은 친수성도를 보였으며, PE 재질로 된 Mem-1이 가장 낮은 친수성도를 보였다. 일반적으로 유기성 막오염을 주로 유발하는 Dissolved organic carbon (DOC) 중에 소수성이 49%로 친수성의 30% 보다 상대적으로 높기 때문에 막이 친수성이 강할수록 유기성 막오염이 적게 일어난다는 연구결과^{15,16)}를 감안할 경우, 장시간 운전 시 PAN 재질의 Mem-3가 유기성 막오염에 보다 우수한 내오염성을 보일 것으로 판단된다.

3.1.2. SEM 측정

막 표면의 형상을 알아보기 위한 FESEM 측정결과는 Fig. 3과 같다. PE 재질인 Mem-1과 PVDF 재질인 Mem-2는 sponge

Fig. 3. FESEM pictures of tested membranes.

형태의 단면을 보였으며, PAN 재질인 Mem-3는 finger 형태의 단면을 나타냈다. 이는 상대적으로 기계적 강도가 높은 PAN은 finger 형태로 막을 제조함으로써, 막의 투과성을 높일 수 있도록 제조한 것으로 판단된다. 반면, PE와 PVDF는 finger 형태로 제조할 경우 장기간의 운전 시 막의 내구성에 문제를 보일 수 있기 때문에 보다 견고한 sponge 형태로 제조하고, 막 두께를 PE 막은 0.24 mm, PVDF 막은 0.5 mm로 함으로써, PAN (0.7 mm)에 비해 상대적으로 얇게 제조하여 막의 투과 성능을 향상시키도록 제조한 것으로 사료된다.

막 외벽에 대한 SEM 결과에서는, Mem-1은 막 표면의 공극 크기가 가장 컸으며, 막 제조 과정 상 열연신법이 사용되어 막의 공극이 긴 타원형 구조로 되어 있었고 막의 공극의 세로 길이는 2 μm 이상으로 긴 반면, 가로 길이는 1 μm 이하로 짧아 실제 공극 크기보다 작은 크기의 부유물질의 제거가 가능할 것으로 예상된다. 또한, PVDF 재질인

Fig. 2. Contact angles of membranes.

Mem-2가 PE 재질인 Mem-1에 비해 작은 pore size를 가지는 것으로 나타났는데, 이는 막 제조사에서 제시한 수치와 유사한 결과를 도출하였다. Mem-2는 막의 공극 분포도가 낮으면서도 비교적 작은 원형 구조를 보였으며, 거의 모든 공극이 표면에서 1 μm 이하의 크기를 보여 Mem-1에 비해 작은 물질까지 제거가 가능할 것으로 예상된다. Mem-3의 경우에는 제조 과정상에서 표면처리로 인해 SEM에 의한 외부면의 형상 파악에는 어려움이 있었다.

3.1.3 막의 화학적 특성 분석

EDS (Energy Dispersive Spectrometer)에 의한 막의 원소 분석 결과(Table 3)에서, Mem-1은 C, N, O로 구성되어 있으며, O가 50% 이상의 비율을 차지하고 있었다. Mem-2의 경우, C, O, F로 구성되어 있으나, PVDF의 특성 상 Fluoride가 98% 이상을 차지하여 가장 큰 구성 비율을 보였다. Mem-3

Table 3. Composition of chemical elements by EDS

Mem-1			Mem-2			Mem-3		
Ele-ments	Weight (%)	Atomic (%)	Ele-ments	Weight (%)	Atomic (%)	Ele-ments	Weight (%)	Atomic (%)
C	23,71	27,40	C	1,24	1,94	C	4,96	7,52
N	23,92	23,71	O	0,52	0,61	N	32,47	42,23
O	52,37	45,49	F	98,24	97,45	O	40,21	45,78
						Zr	22,36	4,47

는 C, N, O, Zr로 구성되어 있으며, PAN이 Nitrile기를 가지고 있기 때문에 N이 32.47%의 높은 구성 비율을 보였고, Zr이 다량 검출된 것은 막 내외부 면에 내화학성과 내부식성을 높이기 위해 지르코늄을 코팅했기 때문으로 판단된다.

FT-IR은 유기화합물로 이루어진 막의 작용기가 적외선을 흡수하는 파수를 분석함으로써, 막 표면에 어느 화학결합(bond)이 지배적인 지를 분석하는 것으로, 분석결과는 Fig. 4

Fig. 4. FT-IR spectra of tested membranes.

에 나타내었다. FT-IR 측정 결과에서는 PE 재질인 Mem-1에서 주로 CH₂ bond로, PVDF 재질인 Mem-2는 C=O와 C=CH₂ 결합으로 이루어진 것을 확인하였다. 또한, PAN 재질인 Mem-3는 C-OH 결합 이외에도 nitrile 기로 인해 C=O amide에서 peak 지점을 보였다.

3.2. 투과수량 분석

각 막의 투과수량 분석을 위해 100 cm²의 막면적을 갖는 모듈 형태로 제작하여 실험하였으며, D.I. water를 이용하여 Masterplex digital pump로 각각 50, 60, 70, 80, 90, 100 rpm에서 투과된 수량은 Fig. 5와 같다. 50 rpm에서는 PAN 재질인 Mem-3가 1.67 L/hr로 가장 높았으며, PVDF 재질인 Mem-2가 1.53 L/hr로 가장 낮았다. 또한, 100 rpm으로 증가함에 따라 PAN 재질인 Mem-3의 투과수량이 3.28 L/hr로 다른 막에 비해 큰 폭으로 투과수량이 증가되는 경향을 보였다.

이는 Mem-1과 Mem-2의 경우 Out-In 방식으로 높은 압력에서 운전할 경우 비교적 낮은 기계적 강도(mechanical strength)로 인해 막 공극이 작아지는 현상을 보여 투과도가 낮아진 것으로 판단되며, Mem-2가 Mem-1에 비해 투과수량이 적은 것은 SEM의 결과에서와 같이 Mem-2의 공극비율이 Mem-1에 비해 상대적으로 작기 때문으로 사료된다. 또한, Mem-3는 막의 공극 분포도가 일정하면서 PAN의 특성 상 비교적 높은 기계적 강도(차압 44 psig 이상)를 가지고

Fig. 5. Permeated flowrate per time on tested membranes.

Fig. 6. Concentrations of Turbidity, TSS and TDS in permeates.

있어 높은 흡입압력에서도 공극의 변형이 일어나지 않아 높은 수투과도를 유지하는 것으로 보인다.

3.3. 제거율 측정

해수를 대상으로 한 전처리용 MF/UF 막은 주로 탁도와 부유물질을 제거함으로써, 역삼투막을 보호하기 위한 목적이기 때문에, 본 연구에서는 탁도와 부유물질을 대상으로 제거율을 실험하였다. 실험결과(Fig. 6)에서 보면, 모든 막에서 유출수의 탁도는 0.191-0.406 NTU, TSS는 2.2-3.0 mg/L 사이의 투과수질을 보였는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 역삼투 기반의 해수담수화 공정에서의 전처리 공정 처리수의 수질이 평균 탁도 0.1 NTU 이하여야 한다는 사실⁸⁾을 감안하면, 다소 높은 유출수질을 보여 장기간의 운전 시 역삼투막 운영에 상당한 부담을 줄 것으로 예상된다. 또한, 유출수의 탁도 및 부유물질 농도를 보면, MF 급인 Mem-1과 Mem-2가 UF 급인 Mem-3에 비해 약간 낮은 농도를 보였는데, 이는 MF/UF의 공극 크기 차이에 비해 탁도와 부유물질의 제거효율의 차이는 미미한 것으로 나타났다. TDS 제거효율은 모든 막에서 1% 이하의 제거율을 보여 이온성 물질에 대한 MF/UF 막 제거가 거의 이루어지지 않는다는 것을 재확인하였다.

이상의 결과로서, 단기간 운전에만 따른 투과수질만을 고려한다면, 본 연구에서 사용한 3가지 MF/UF 막은 해수담수화 전처리용으로 사용하기에는 부적합한 것으로 판단되며, 이에 대한 정확한 검증을 위해서는 장기간 운전에만 따른 정확한 투과수질 및 수투과도에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

국내에서 상용화 된 3종류의 MF/UF 막을 대상으로 막의 특성분석을 통해 차이점을 살펴보고, 실제 해수담수화플랜트의 DAF 유출수를 대상으로 여과 성능을 평가하여 해수담수화 전처리로의 활용 가능성 검증을 목적으로 하였다.

접촉각 측정 결과에서는 PAN 재질인 Mem-3가 가장 친수성도가 높은 것으로 나타나 장기간 운전 시 유기성 오염물질에 가장 내오염성이 높을 것으로 예상된다.

FESEM 측정결과에서는 PE 재질인 Mem-1과 PVDF 재질인 Mem-2는 sponge 형태의 단면을 보였으며, PAN 재질인 Mem-3는 finger 형태의 단면을 나타냈다. 막 외벽에 대한 SEM 결과에서는, Mem-1은 막 표면의 공극 크기가 가장 컸으며, PVDF 재질인 Mem-2가 PE 재질인 Mem-1에 비해 보다 작은 pore size를 가지는 것으로 나타났고, Mem-3는 SEM에 의한 외벽의 형상 파악에 어려움이 있었다.

막의 원소분석 결과는 Mem-1은 C, N, O로, Mem-2는 C, O, F로, Mem-3는 C, N, O, Zr로 구성되어 있으며, Mem-2는 Fluoride가 대부분이었고 PAN이 Nitrile기로 인해 N이 32.47%의 높은 구성 비율을 보였다.

D.I. water를 이용한 투과수량 분석은 압력을 증가할 경우 PAN 재질인 Mem-3의 투과수량이 다른 막에 비해 큰 폭으로 증가되는 경향을 보였다. 이는 막의 공극 분포도가 일정하면서 비교적 높은 기계적 강도로 인해 높은 흡입압력에서도 공극의 변형이 일어나지 않아 높은 투과수량을 유지하는 것으로 보인다.

탁도 및 부유물질 제거 실험은 모든 막에서 유출수의 탁도는 0.191-0.406 NTU, TSS는 2.2-3.0 mg/L 사이의 투과수질을 보여 역삼투 기반의 해수담수화 공정에서의 전처리 공정 처리수 수질에 비해 높다는 것을 증명하였다. 따라서, 본 연구에서 사용한 3가지 MF/UF 막은 해수담수화 전처리로 사용하기에는 부적합한 것으로 판단되며, 정확한 투과수질의 검증을 위해 장기 운전을 통해 적합성을 재검토할 필요가 있음을 알 수 있었다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(과제번호17IFIP-C071145-05)와 (과제번호17IFIP-C087389-04)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. GWI, "IDA Desalination Yearbook," Water desalination report (2017).
2. Cha, S., "Microfiltration biofouling by marine bloom-forming algae; Comparison with bacterial biofouling," Master's thesis of Seoul National Univ.(2013).
3. Voutchkov, N., "Desalination engineering planning and design," McGraw Hill e-book, United States, 343~357(2010).
4. Kim, D. K., Choi, J. S., Lee, C. K., Kim, J., Choi, J. H. and Lee, W., "Removal characteristics of organic matters in pretreatment and reverse osmosis membrane processes for seawater desalination," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(7), 491~497(2014).
5. Reiss, C. R., Robert, C., Dietrich, J. and Mody, A., "Pretreatment and design considerations for large-scale seawater facilities," *Desalination and Water Purification Res. and Development Program Report*, **137**, 1~100(2008).
6. Kim, Y., Kim, J. H., Lee, S., Lee, C. K., Park, K. D. and Choi, J. S., "Cost comparison of pretreatment processes in large SWRO desalination plant," *J. Korean Soc. Wat. Wastewat.*, **27**(5), 555~560(2013).
7. Lau, W. J., "Ultrafiltration as a pretreatment for seawater desalination: A review," *Membr. Wat. Treat.*, **5**(1), 15~29(2014).
8. Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I. and Hasan, S. W., "A short review on reverse osmosis pretreatment technologies," *Desalination*, **354**, 30~38(2014).
9. Frenkel, V. and Lozier, J., "Conventional vs MF/UF pretreatment for SWRO desalination," Pacific Northwest Section, AWWA Annual Conference, 8 May(2009).
10. Lee, I., "Comparison of sand filtration and UF process as pretreatment of seawater desalination by reverse osmosis," Master's thesis of Pukyong National Univ(2010).
11. Sung, S., "Effect of coagulation and adsorption on filtration efficiency in seawater reverse osmosis desalination pretreatment process using ceramic membrane," Master's thesis of Myongji Univ(2017).
12. Kang, J. S., "Removal of organic matter and boron by membrane pretreatment in seawater desalination process," Master's thesis of Myongji Univ(2011).
13. Yang, K. M., Lim, D. H., Kim, J. H. and Jung H. H., "Evaluation of seawater reverse osmosis desalination system with UF and disk filter as pre-treatment," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C.*, **1**(1), 59~68(2013).
14. Yuan, Y. and Lee, T. R., "Contact angle and wetting properties," Chapter 1 of Surface Science Techniques, Springer Series in Surface Sciences, 51, DOI: 10.1007/978-3-642-34243-1_1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, 3-33 (2013).
15. Zularisam, A. W., Ismail, A. F., Salim, M. R., Sakinah, M. and Ozaki, H., "The effects of natural organic matter (NOM) fractions on fouling characteristics and flux recovery of ultrafiltration membranes," *Desalination*, **212**, 191~208(2009).
16. Cui, X. and Choo, K. H., "Natural organic matter removal and fouling control in low-pressure membrane filtration for water treatment," *Environ. Eng. Res.*, **19**(1), 1~8(2014).