ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2016.30.2.131

하수방류수의 전처리 조건별 FO막의 운전성능평가

Evaluation of FO membrane performance for each type of pre-treatment from WWTP secondary effluents

정준원[1]·김지훈[1]·김건엽[1]·박준영[1]·김형수[1]·김형숙[2*]
Junwon Jeong[1]·Jihoon Kim[1]·Geonyoub Kim[1]·Junyoung Park[1]·Hyungsoo Kim[1]·Hyungsook Kim[2*]

[1]성균관대학교, [2]수원대학교
[1]Sungkyunkwan University, [2]Suwon University

ABSTRACT

The development of alternative water resources has emerged as an effective method for solving drought of water resources due to extreme weather and increase in water consumption. Recently, in Korea, there has been active research on reverse osmosis desalination technology, wastewater reuse using forward osmosis membranes, and the forward osmosis(FO)-reverse osmosis(RO) hybrid process combining these two technologies. In this study, the basic performance of FO membranes manufactured by three domestic and international manufactures such as Microfilter Co., Ltd., Toray Chemical Korea Inc., and Hydration Technologies Inc., were investigated for wastewater reuse. In addition, as an experiment to select feed solution, the selected membranes were operated 48 consecutive hours using three secondary effluents pretreated by the UF membrane with a pore size of 0.1 μm and auto strainer with pore sizes of 1 μm and 100 μm as feed solution. Although there was not much difference in the operating performance. Thus, the treated water using the 100 μm auto strainer was selected as feed solution applied to the assessment.

Key words: Desalination, Fouling, Forward osmosis, Membrane, Reverse osmosis

주제어: 담수화, 막오염, 정삼투, 분리막, 역삼투

1. 서 론

정삼투(FO, forward osmosis)를 이용한 담수화 방법은 1970년대부터 점차 연구가 진행되어 왔으며, 역삼투(RO, reverse osmisis) 공정에 비하여 이론적으로 삼투압만을 이용함으로써 에너지 소비 측면에서 1/10 수준으로 담수 생산이 가능한 것으로 보고된 바 있다(McGinnis et al., 2007). 그러나, 정삼투막 소재 개발과 회수공정 개발, 유도 용질 선정 등의 문제로 실용화가 진행되지 못하였으나, 최근 정삼투막의 개발이 이루어짐에 따라 활발한 연구가 진행되고 있다. 정삼투 공정은 삼투압을 이용하는 담수화 공정으로 유도용액을 투입하여 이온이 투과할 정도로 기공 크기가 작은 분리막에서 여과공정의 구동력인 삼투압을 발생시켜 여과하는 방식으로써 여과가 비교적 용이하지만 정삼투 기술의 본격적인 상업화를 위해서는 아직 해결해야 할 과제가 남아있다(Han et al., 2016).

정삼투 공정은 고농도의 유도용액을 적용하기 때문에 높은 효율을 지닌 유도용질의 선정과 용질 회수가 중요한 요인으로 작용하며, 물질 전달 시 저항요인으로 작용할 수 있는 내부 농도분극현상을 최소화 할 수 있는 유도용질을 선정해야한다(Yoon, 2013). 최근에는 유도 용액의 농도를 높이기 위해 휘발성 물질, 자성 나노물질, 이온성 고분자 물질 등이 개발되고 있다(McCutcheon et al., 2005; Ling et al., 2010; Ge et al.,

Received 13 February 2016, revised 20 February 2016, accepted 24 February 2016
*Corresponding author: Hyungsook Kim (E-mail: hyungsook@suwon.ac.kr)

2012). 하지만, 정삼투공정은 현재까지 최적화되지 않은 관계로 용질 회수 시 에너지 소모가 낮고, 용이한 방안으로써 증발법이나 역삼투 공정 등 다양한 회수 방법을 시도하고 있다(Hong et al., 2011).

정삼투 전용 분리막은 Cellulosic membrane, Thin-film composite membrane과 Chemically modified membrane 등 크게 3가지 종류가 개발되고 있다(Zaho et al., 2012). 정삼투 분리막 개발은 투과수량을 높이기 위해서 수투과도를 높여야 하며, 수투과도를 높이기 위해서는 분리막의 활성층과 내부농도분극현상과 관련이 깊은 지지층을 개선시켜야 한다.

역삼투 공정에서 에너지 소비 절감 및 유도용질 회수 문제를 해결하기 위한 방안으로 정삼투와 역삼투가 융합된 FO-RO 하이브리드 공정으로 구성이 가능하다. 본 공정은 정삼투 공정에서의 유입수는 하수처리수로 적용하고, 유도용액으로써 해수를 사용함으로써 정삼투공정에서 여과된 하수처리수와 유도용액으로써 사용된 해수가 혼합되어 TDS 농도 저하를 통해 역삼투 공정에서 에너지 소모량을 낮추어 줌으로써 저비용으로 생산수를 얻을 수 있는 효과를 가져온다(Zaviska et al., 2015). FO-RO 하이브리드 공정은 각 공정의 단점을 개선하기 위하여 제안된 기술이지만, 최종 처리수를 생산하는 역삼투 공정의 전처리로써 FO 공정을 적용한다는 것은 현재까지의 실정으로는 과잉설계로 연결될 수 있다는 우려가 있으며, FO 공정의 농축수 처리를 위한 추가시설이 필요하다는 단점이 있다(Bamaga et al., 2011).

따라서, 본 연구에서는 실제 하수방류수를 대상으로 국내외 정삼투 분리막의 기초성능을 평가 후 정삼투 공정의 전처리 필요 유무를 파악하기 위해 정삼투 전처리 공정으로써 Auto strainer와 분리막(UF, ultrafiltration)을 적용하여 정삼투 분리막의 전처리 조건별 투과성능을 비교하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 정삼투 분리막

전처리 조건별 투과성능 평가에 사용될 정삼투(FO) 분리막을 선정하기 위하여 polyamide(PA) 재질의 thin film composite (TFC) 타입으로 제조된 Microfilter Co., Ltd.(Microfilter, Korea), Toray Chemical Korea Inc.(TCK, Japan), Hydration Technologies Inc.(HTI, U.S.)의 정삼투 분리막에 대한 기초성능 비교 실험을 실시하였다. 기초성능 평가는 TDS(total dissolved solids) 1.8 mg/L의 초순수를 유입수로 적용한 경우와 100 μm Auto strainer로 여과한 TDS 190 mg/L의 하수처리수(하수방류수)를 유입수로 적용한 경우에 대하여 각각 수행되었고, 본 실험에 대한 유도용액(Draw solution)은 TDS 35,000 mg/L NaCl(sodium chloride)로 제조하여 사용하였다. 순환유량은 유입측과 유도용액측 모두 0.7 L/min을 적용하였으며, 플럭스(flux)는 1시간동안의 평균으로 산정하였다. 또한, 유입수와 유도용액의 수온은 25˚C를 유지하여 동일한 조건으로 실험을 진행하였다.

2.2 대상 원수 및 유도용액

본 실험에 대한 대상원수는 S대학교 내 하수처리장의 하수처리수(하수방류수)를 1 μm 및 100 μm의 Auto strainer로 전처리한 처리수와 0.1 μm의 공극크기를 가진 가압식 UF membrane(ECONITY, Inc. Korea)으로 여과한 처리수를 FO 분리막의 원수로 적용하여 운전성능을 평가하였다.

유도용액으로 사용된 인공해수는 해수 내의 무기물 성상 및 유기물의 영향을 배제하고 보편적인 염(salt) 농도만을 구현하여 사용하였고, 연 평균 표면 해수농도 중 보편성을 띄는 35,000 mg/L로 제조하였다(World Ocean Atlas, 2009). 인공해수 제조 시 초순수를 용매로 사용하였고, NaCl를 첨가 시 완전히 용해시켜 실시간으로 TDS를 측정하여 35,000 mg/L의 유도용액을 제조하였다.

2.3 정삼투 실험장치

정삼투 실험장치의 공정모식도는 Fig. 1에 나타내었고, 총 3계열로 구성하여 정삼투 분리막 여과 시 동일조건으로 비교가 가능하도록 장치를 구성하였다. 평판형 정삼투 분리막 FO셀은 정삼투 분리막을 사이에 두고 유입수와 유도용액이 개별적으로 순환되어 여과가 가능하도록 각기 다른 채널로 구성하였고, 각각의 수로는 길이 7.7 cm, 너비 2.6 cm, 깊이 0.3 cm로 20.02 cm2의 유효 막면적 및 0.78 cm2의 유로 단면적을 제공한다.

유도용액은 컴퓨터와 연결된 3대의 전자저울(A&D Company, Limited., FX-5000i, Japan)을 통하여 실시간으로 투과수량을 측정하였고, 유도용액의 순환을 위해 Gear pump head(Omp, MG317XK, China)를 별도의 제어기에 연결하여 사용하였으며, 유도용액의 순환은 원심

펌프(SHINMYUNG SERVO Co., Ltd., 6IN6S2H-2, Korea)를 사용하여 미세조절이 가능한 Needle 밸브로 유량을 조절하였다. Variable Area Flowmeter(Blue-White Industries, Ltd., F-450, U.S.)를 사용하여 순환유량 및 순환유속을 조절하였으며, 유입측과 유도용액측의 압력 제어 및 측정이 가능하도록 압력계를 구성하였다. 유입수와 유도용액의 수온은 수조와 직접 연결된 Heater 및 Heat sensor를 통하여 항시 25℃로 유지될 수 있도록 하였으며, 유입수조의 경우 교반기(SPG Co., Ltd., Korea)를 통해 연속교반하여 입자성 물질이 침전되지 않도록 균질한 상태를 유지하였다.

TDS 측정을 위해 TDS meter(HQ40d Portable Meter, HACH)를 사용하여 유도용액의 제조 및 희석, 농축 정도를 측정하였고, UV_{254} 측정은 Ultraviolet-visible spectrophotometer(DR6000, HACH)를 이용하여 분석하였다. 수중의 총유기탄소(TOC, total organic carbon)는 Total organic carbon analyzers(TOC-LCPN, SHIMADZU)를 사용하였고, 분석 전 SYRINGE FILTER(whatman, 25 mm 0.45 μm)으로 여과 후 용존유기탄소(DOC, dissolved organic carbon)를 측정하여 효율을 비교하였다. 또한, secondary effluent의 특성을 파악하기 위하여 suspended solid(SS)를 측정하였으며, Turbidimeter (2100AN, HACH)를 사용하여 Turbidity를 측정하였다.

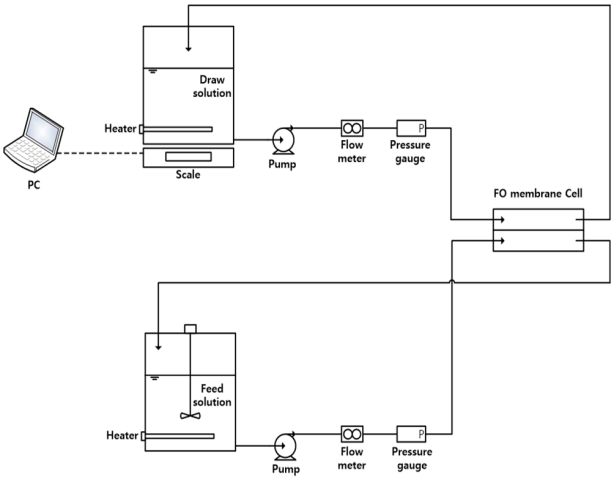

Fig. 1. Schematic diagram of FO unit.

3. 결과 및 고찰

3.1 초순수 적용 시 분리막 제조사별 정삼투 투과성능 실험

정삼투 투과성능 평가를 위해 초순수를 유입수로 사용하였고, 유도용액은 NaCl을 사용하여 TDS 35,000 mg/L 농도로 제조 후 분리막의 투과성능을 평가하였다. 여과시간은 각 정삼투 분리막의 성능 차이 비교가 가능한 시점까지 진행되었으며, 약 17시간 동안 연속 운전을 수행하였다.

Fig. 2는 시간에 따른 플럭스 변화, Fig. 3은 누적처리수량 변화를 나타내며, TCK와 Microfilter의 정삼투 분리막의 경우 약 10시간 전후로 플럭스에서 투과성능의 차이가 발생하였다. 초기 1시간 동안의 평균 플럭스는 Microfilter가 30.98 LMH로 가장 높았으며, TCK는 29.50 LHM, HTI의 경우 7.17 LMH 순으로 나타났다. 반면, 16시간 경과 후 1시간동안의 평균 플럭스는 TCK 분리막에서 19.16 LMH로 가장 높게 나타났으며, Microfilter가 15.91 LMH, HTI가 4.34 LMH 순으로 나타남으로써 오염물질이 없는 경우에도 분리막의 성능에 따라 투과성능에서 차이를 보이는 것으로 측정되었다.

17시간 동안 전체의 평균 플럭스는 TCK가 22.19 LMH, Microfilter는 21.44 LMH, HTI는 4.57 LMH로 TCK의 분리막이 가장 높은 플럭스를 보였고, 투과수량의 경우 약 13시간 경과 후부터 TCK 분리막은 Microfilter 분리막과 차이가 발생된 것으로 나타났다. 누적처리수량의 경우 17시간 여과하였을 때 TCK가 약 755 ml로 가장 높은 투과수량으로 나타났고, Microfilter가 약 730 ml, HTI가 약 155 ml로 측정되었다. Table 1은 초순수의 여과시간에 따른 플럭스 변화를 나타내며, 오염인자가 배제된 초순수를 대상으로 여과를 진행함에도 불구하고 초기 플럭스 대비 여과시간에 따라 플럭스가 낮아지는 현상은 여과된 초순수와 유도용액의 희석으로 인해 삼투압이 낮아짐에 따라 투과수량이 낮아진 것으로 사료된다.

Table 1. Comparison of pure water flux at different FO membrane

Item	Microfilter	TCK	HTI
초기 1시간 평균 플럭스 (LMH)	30.98	29.50	7.17
16시간 후 1시간 평균 플럭스 (LMH)	15.91	19.16	4.34
17시간 전체 평균 플럭스 (LMH)	21.44	22.19	4.57

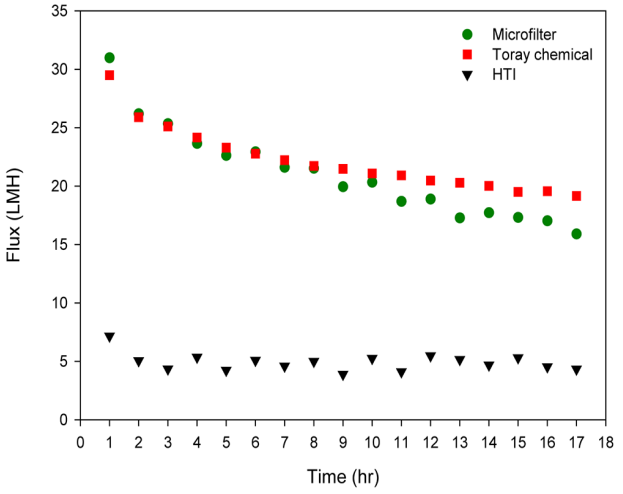

Fig. 2. Variation of pure water flux at different FO membrane.

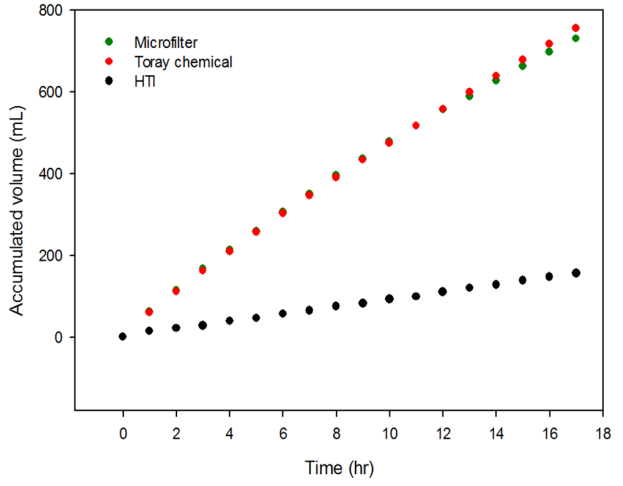

Fig. 3. A comparison of accumulated permeate flow rate of using pure water.

3.2 하수처리수 적용 시 분리막 제조사별 정삼투 투과성능 실험

초순수를 사용하여 여과한 경우 정삼투 분리막의 투과성능과 삼투압의 영향에 대한 차이만을 나타내기 때문에 오염인자가 포함된 유입수를 사용하여 막오염에 의한 저항발생 시 정삼투 분리막 제조사별 투과성능을 평가하고자 하였다. 유입수는 하수처리수(하수방류수)를 100 μm의 Auto strainer로 여과한 처리수를 사용하였고, 오염인자에 의한 플럭스의 영향을 보기 위하여 약 54시간 연속 운전하였으며, 초순수를 사용하였을 경우와의 비교를 위해 16시간을 기준으로 플럭스를 계산하였다.

하수처리수로 여과한 경우 TCK와 HTI의 정삼투 분리막은 초순수를 여과한 경우와 유사한 경향을 보였으나, Microfilter의 정삼투 분리막은 급격한 플럭스 감소를 나타내었다. Fig. 4는 여과시간에 따른 플럭스 감소 변화를 나타내며, 초순수와 하수처리수를 여과한 경우 초기 1시간 동안의 평균 플럭스에 대해 비교한 결과, Microfilter가 19.61 LMH로 약 10 LMH 감소하였고, TCK는 25.19 LMH로 약 5 LMH 낮은 값을 나타내었으며, HTI의 경우에는 7.36 LMH로 초순수를 사용한 경우와 유사한 결과를 나타내었다.

또한, 16시간이 경과된 후 1시간 동안의 평균 플럭스는 Microfilter가 8.70 LMH로 급격히 감소되었으나, TCK는 21.03 LMH로 플럭스 감소가 Microfilter 보다 낮게 나타났으며, HTI는 3.74 LMH로 소폭 감소된 경향을 보였다. 16시간 동안의 전체 평균 플럭스는 Microfilter가 12.76 LMH, TCK가 23.04 LMH였으며, HTI가 4.57 LMH로 초순수를 사용하였을 경우와 동일한 결과를 보였다. 53시간 연속운전 후 1시간 동안의 평균 플럭스의 경우, TCK는 13.32 LMH, Microfilter가 4.70 LMH, HTI가 2.86 LMH으로 나타났으며, 54시간 동안의 전체 평균 플럭스는 TCK가 17.44 LMH, Microfilter가 7.92 LMH, HTI가 3.31 LMH로 나타났다. Fig. 5는 여과시간에 따른 누적처리수량을 나타내며, 54시간 여과하였을 때 TCK가 약 1,991 ml로 가장 높은 투과수량으로 나타났고, Microfilter가 약 904 ml, HTI가 약 378 ml로 측정되었다. Table 2는 하수처리수의 여과시간에 따른 플럭스이고, 전처리 조건별 실험을 위해 상대적으로 투과성능이 높은 TCK 정삼투 분리막을 적용하고자 하였다.

Table 2. A comparison of flux of using Secondary effluent

Item	Microfilter	TCK	HTI
초기 1시간 평균 플럭스 (LMH)	19.61	25.19	7.36
16시간 후 1시간 평균 플럭스 (LMH)	8.70	21.03	3.74
53시간 후 1시간 평균 플럭스 (LMH)	4.70	13.32	2.86
54시간 전체 평균 플럭스 (LMH)	7.92	17.44	3.31

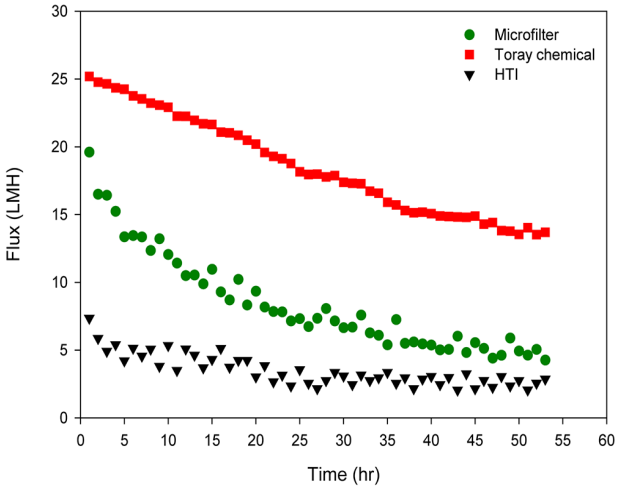

Fig. 4. A comparison of flux of using Secondary effluent.

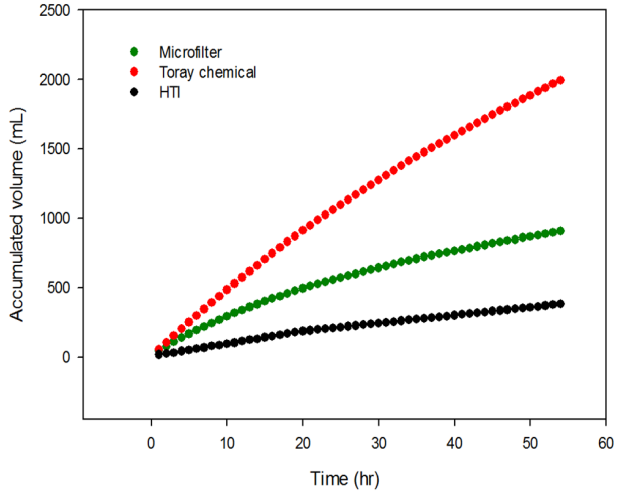

Fig. 5. A comparison of accumulated permeate flow rate of using Secondary effluent.

3.3 전처리 조건별 처리수질 분석

전처리 조건에 따른 정삼투 분리막의 투과성능 비교를 위해 전처리조건에 따른 대상원수의 수질을 분석하였다. 하수처리수(하수방류수)를 1 μm 및 100 μm의 Auto strainer와 0.1 μm의 가압식 UF 분리막으로 전처리하여 그 성상을 분석하였고, 분석항목으로는 DOC, UV_{254}, SS, Turbidity를 측정하였으며, 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

DOC의 경우, 2종류의 Auto strainer 처리수는 3.1 mg/L로 동일한 값을 나타내었고, UF 처리수는 2.8 mg/L로 가장 낮게 나타났다. UV_{254}의 경우, 1 μm Auto strainer 처리수가 0.102 cm^{-1}로 가장 높은 결과 값을 보였으며, 100 μm Auto strainer 처리수는 0.096 cm^{-1}로 나타났고, UF 처리수의 경우에는 0.061 cm-1로 가장 낮은 측정값을 나타내었다. SS 값의 경우, UF 처리수가 2 mg/L, 1 μm Auto strainer 처리수가 5 mg/L, 100 μm Auto strainer 처리수가 9 mg/L로 측정되었고, 탁도 또한 0.1 μm, 1 μm, 100 μm 순으로 각각 0.181 NTU, 2.403 NTU, 4.643 NTU의 결과 값을 보이며, 공극크기를 기준으로 2차처리수에 분포하고 있는 입자의 분포를 대략적으로 유추해 볼 수 있다.

3.4 전처리 조건별 정삼투 분리막의 투과성능 평가

전처리 조건별 처리수를 적용하여 TCK 정삼투 분리막의 플럭스 감소 변화를 알아보기 위해 48시간 동안 투과성능을 평가하였다. UF 분리막, 1 μm auto strainer, 100 μm auto strainer의 초기 1시간 동안의 평균 플럭스, 47시간 여과 후 1시간 동안의 평균 플럭스, 48시간 여과 후 전체 평균 플럭스를 Table 4에 나타내었고, Fig. 6과 Fig. 7은 플럭스 감소 및 누적처리수량을 나타낸다. 실험 결과 UF 처리수의 경우 100 μm Auto strainer 처리수와 비교하였을 때 각각 21.45 LMH, 21.56 LMH로 플럭스에서 유사한 결과를 보였으나, 1 μm Auto strainer 처리수에서는 20.8 LMH로 다소 낮은 결과 값을 나타내었다. 누적처리수량의 경우 UF와 100 μm Auto strainer 처리수는 각각 2,016 ml, 2,072 ml로 유사한 결과를 보였으나 1 μm Auto strainer 처리수에서는 1,998 ml로 가장 낮은 처리수량을 보였다. 또한, 유기물 처리 효율을 알아보기 위하여 처리수와 희석된 유도용액의 DOC 및 UV_{254}를 측정한 결과를 Table 5에 나타내었다. UF 분리막 전처리수의

Table 3. Analysis of feed solution for each type of pretreatment

Item	DOC	UV_{254}	SS	Turbidity
UF membrane 처리수	2.8 mg/L	0.061 cm^{-1}	2 mg/L	0.181 NTU
1 μm Auto strainer 처리수	3.1 mg/L	0.102 cm^{-1}	5 mg/L	2.403 NTU
100 μm Auto strainer 처리수	3.1 mg/L	0.096 cm^{-1}	9 mg/L	4.643 NTU

Table 4. Comparison of flux for each type of pretreatment using TCK membrane

Item	UF membrane (0.1 μm)	Auto strainer (1 μm)	Auto strainer (100 μm)
초기 1시간 평균 플럭스 (LMH)	29.96	30.35	29.17
47시간 후 1시간 평균 플럭스 (LMH)	16.86	16.57	16.42
48시간 전체 평균 플럭스 (LMH)	21.45	20.80	21.56

Table 5. Analysis of permeate solution for each type of pretreatment using TCK membrane

Item	UF membrane (0.1 μm)	Auto strainer (1 μm)	Auto strainer (100 μm)
DOC (mg/L)	0.4	0.6	0.5
UV254 (cm-1)	0.006	0.009	0.009

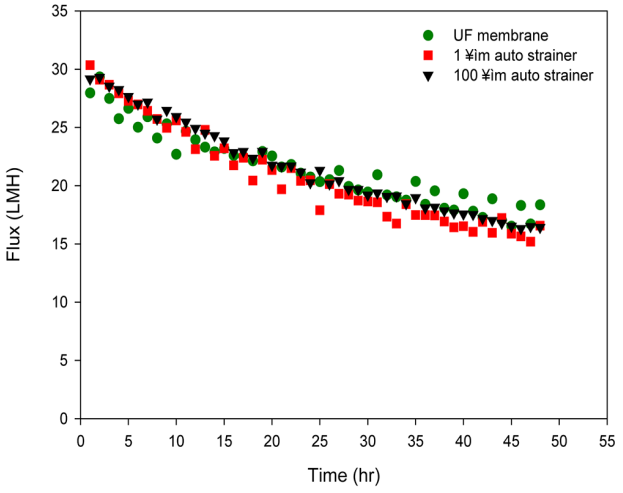

Fig. 6. Variation of flux decline for each type of pretreatment using TCK membrane.

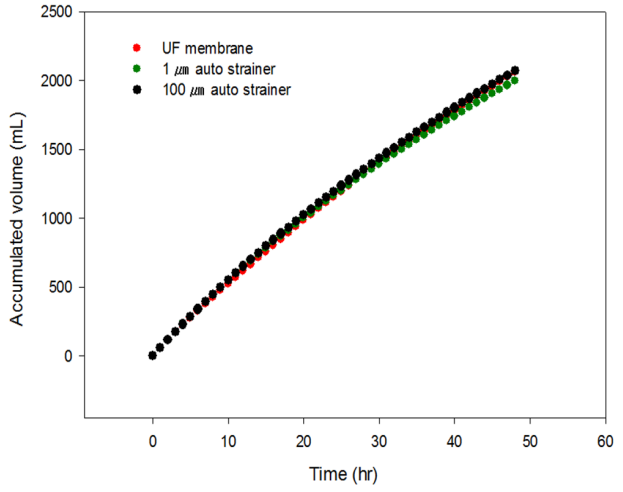

Fig. 7. Variation of accumulated volume for each type of pretreatment using TCK membrane.

DOC는 0.4 mg/L, 1 μm Auto strainer 처리수의 경우 0.6 mg/L, 100 μm Auto strainer 처리수를 적용했을 경우 0.5 mg/L로 측정되었고, UV_{254}의 경우 UF, 1 μm, 100 μm 각각 0.006 cm-1, 0.009 cm-1, 0.009 cm-1로 측정됨으로써 UF 전처리로 여과한 경우 유기물에 대한 처리수질이 가장 높음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Microfilter Co., Ltd., Toray Chemical Korea Inc., Hydration Technologies Inc.에서 제조된 정삼투 분리막의 기초성능을 평가하고, FO 공정의 전처리로써 0.1 μm, 1 μm, 100 μm로 여과 후 공극크기별 입자성물질 배제 유무에 따른 전처리 조건별 투과성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 초순수와 하수방류수를 대상으로 가장 높은 투과성능을 보인 정삼투 분리막을 선정하기 위해 3종류의 정삼투 분리막의 플럭스 감소 변화를 관찰한 결과, TCK에서 제조된 정삼투 분리막에서 100 μm로 여과된 하수방류수를 여과하였을 때, 가장 높은 투과성능 효율을 나타냈다.

2) 정삼투 공정에 적합한 전처리 공정을 선정하기 위해 하수방류수를 대상으로 투과성능이 가장 높은 TCK 정삼투 분리막을 동일조건으로 여과하여 플럭스 감소변화를 살펴본 결과, 0.1 μm의 UF 분리막과 1 μm 및 100 μm Auto strainer 전처리 조건에서 각각 21.45 LMH, 21.56 LMH, 20.8 LMH의 유사한 플럭스 감소 경향을 보였기 때문에 정삼투 공정의 간단하고 경제성을 확보한 전처리 공정으로서 Auto strainer의 적용을 고려해 볼 가치가 있다고 판단된다.

사 사

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

References

Bamaga, O.A., Yokochi, A., Zabara, B., Babaqi, A.S. (2011). Hybrid FO/RO desalination system: Preliminary assessment of osmotic energy recovery and designs of new FO membrane module configurations, Desalination, 268, 163-169.

Ge, Q., Su, J., Amy, G.L., Chung, T.S. (2012). Exploration of polyelectrolytes as draw solutes in forward osmosis processes, Water Research, 46(4), 1318-1326.

Han, G., Liang. C.Z., Chung. T.S., Weber. M., Staudt. C., Maletzko. C. (2016). Combination of forward osmosis (FO) process with coagulation/flocculation (CF) for potential treatment of textile wastewater, Water Research, 91, 361-370.

Hong, S.K., Lee, S.H., Kim, J.H., Kim, J.H., Ju, Y.G. (2011). Evolution of RO process for green future, KIC News, 14(6), 9-220.

Ling, M.M., Wang, K.Y., Chung, T.S. (2010). Highly water-soluble magnetic nanoparticles as novel draw solutes in forward osmosis for water reuse. Industrial & Engineering Chemistry Research, 49(12), 5869-5876.

McCutcheon, J.R., McGinnis, R.L., Elimelech, M. (2005). A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. Desalination, 174(1), 1-11.

McCutcheon, J.R., McGinnis, R.L., Elimelech, M. (2006). Desalination by ammoniacarbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. Journal of Membrane Science, 278(1-2), 114-123.

McGinnis, R.L., Elimelech, M. (2007). Energy requirements of ammonia-carbon diocide forward osmosis desalination, Desalination, 207(1-3), 370-382.

Yoon, H.S. (2013). Characteristics of biofouling in forward osmosis process, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, republic of Korea.

Zaho, S., Zou, L., Tang, C.Y., Mulcahy, D. (2012). Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges, Journal of Membrane Science, 396, 1-21.

Zaviska, F., Chun, Y., Heran, M., Zou, L., Using FO as pre-treatment of RO for high scaling potential brackish water: Energy and performance optimisation, Journal of Membrane Science, 492, 430-438.