

하수재이용에서 전처리 막 손상에 의한 수질변화가 SDI에 미치는 영향평가

이 민 수* · 서 동 주** · 이 용 수*** · 정 건 용*,†

*서울과학기술대학교 에너지환경공학과, **한국건설환경시험연구원 대외사업본부 신사업기획팀,

***한양대학교 건설환경공학과

(2022년 5월 6일 접수, 2022년 8월 4일 수정, 2022년 8월 14일 채택)

Evaluation of Water Quality Change by Membrane Damage to Pretreatment Process on SDI in Wastewater Reuse

Min Soo Lee*, Dongjoo Seo**, Yong-Soo Lee***, and Kun Yong Chung*,†

*Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Republic of Korea

**Korea Conformity Laboratories, Seoul 06711, Republic of Korea

***Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

(Received May 6, 2022, Revised August 4, 2022, Accepted August 14, 2022)

요약: 본 연구에서는 하수 재이용을 위한 역삼투막 공정에서 전처리 정밀여과막(MF) 손상에 대한 누출되는 다양한 수질변화로써 막 손상 검지 방안을 제시하였다. 이를 위하여 역삼투막 유입수질 적합성 평가지표인 SDI (silt density index)를 3에서 5의 범위 내에서 막 손상 시 검지 감도를 정량화하기 위하여 전처리 분리막이 1에서 3가닥 파단에 따라 SDI는 1.92에서 6.11까지 증가한 결과를 확인할 수 있었다. 일반적으로 3을 기준으로 역삼투막 유입수질로 설정하였을 때 분리막이 3가닥까지 파단이 되어야만 막 손상 검지가 가능하다는 것을 의미하며 역삼투막의 오염은 잠재적으로 가속화되어 효율을 저하시킬 수 있다. 또한 이때 누출되는 입자성과 유기물질에 대하여 0.45 μm 이상의 크기만 걸러주는 입자계수는 입도분포별 막 파단 개수에 따라 일정한 패턴을 확인할 수 없었으며, TOC 농도는 약 2배의 변화패턴으로써 SDI와의 상관관계로써 TOC가 막 손상 수질지표로써 신뢰성이 높은 것으로 확인되었다. 수질분석결과와 더불어 USEPA에서 제시하는 막 손상 검지 방법 중 압력손실시험과 이를 기반으로 LRV_{DIT} 모델의 적합성 평가를 한 결과 막 손상 또는 역삼투막 공정으로 유입되는 막오염물질을 신속하게 확인할 수 있는 SDI 및 TOC를 포함한 LRV_{DIT} 모니터링과 UCL 설정을 병행해야 한다.

Abstract: This study suggests a guideline for designing unit process of wastewater reuse in terms of a maintenance of the process based on critical parameters to draw a high quality performance of RO unit. Defining the parameters was done by applying membrane integrity test (MIT) in pretreatment process utilizing lab-scale MF. SDI is utilized for judging whether permeate is suitable to RO unit. However, result said TOC concentration matching with particle count analysis is better for judging the permeate condition. When membrane test pressure (P_{test}) was measured to derive log removal value in PDT, virgin state of membrane fiber was used to measure dynamic contact angle utilizing surface tension of the membrane fiber. Actually, foulant affects to the state of membrane surface, and it decreases the P_{test} value along with time elapsed. Consequently, LRV_{DIT} is also affected by P_{test} value. Thus, sensitivity of direct integrity test descends with result of P_{test} value change, so P_{test} value should be considered not the virgin state of the membrane but its current state. Overall, this study focuses on defining design parameters suitable to MF pretreatment for RO process in wastewater reuse by assessing its impact. Therefore, utilities can acknowledge that the membrane surface condition must be considered when users conduct the direct integrity test so that P_{test} and other relative parameter used to calculate LRV_{DIT} are adequately measured.

Keywords: membrane integrity test, membrane fouling, wastewater reuse, silt density index

†Corresponding author(e-mail: kychung@seoultech.ac.kr; <http://orcid.org/0000-0002-5182-0012>)

1. 서 론

하수재이용 과정에 역삼투(RO)막 공정의 유입수 조건을 충족하기 위하여 필수적으로 요구되는 전처리 공정에 막분리 공정을 도입하였다. 입자상 물질들의 제거는 전처리(pre-treatment)에 전적으로 의존하고 있고, 더욱이 RO 설비는 고압에서 운전되기에 막오염을 최소화하기 위해서는 적절하고 해당 시설에 최적화 되어있는 전처리 공정이 필수적이다[1-2].

전처리를 거친 공급수의 수질을 평가하는 기준으로 AWWA에서는 silt density index (SDI) 사용을 제안하고 있다. SDI는 물속의 점토질 농도를 계수화한 것이다. 이 지표가 기준값(3에서 5 사이, 현장조건에 따라 달라짐)을 초과하면, 확산(diffusion)이 구동력인 NF와 RO의 공급수로서는 적절하지 않다. SDI의 장점은 측정이 다른 지표에 비해 상대적으로 간편하다는 점으로, 현재까지 현장에서 가장 널리 사용되고 있는 막오염에 관한 지표, 즉 RO 공급수의 수질 기준을 대변하고 있다. 그러나 SDI의 높고 낮음으로 나타내는 점토질의 농도와 NF 및 RO의 막오염과의 연계성은 다소 떨어진다.

SDI 측정을 위해서 0.45 μm 크기의 필터를 사용하는 데, 실제로 RO의 막오염을 일으키는 물질은 0.45 μm 미만의 크기를 가진 유기물질이나 나노입자라는 것이다[3-4]. 이는 막오염 지표로써의 SDI가 가지고 있는 가장 큰 약점으로 오랜 시간 지적되어 왔다. 그러나 앞에서 언급했듯이 측정의 간편함 때문에 현재까지도 널리 사용되고 있으며, SDI를 대체할만한 수질예측지수는 없는 실정이다. 본 연구에서는 RO 공급수의 수질을 예측하기 위한 지수로 SDI를 선정하였다. 이에 따라, 안정적인 SDI를 얻기 위한 전처리 방법을 선행된 연구를 통해 찾아본 결과 모래여과 보다 막여과(MF/UF) 방식을 채택하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다[5]. 하지만, SDI 3 이하에 대한 조건이 RO 유입수 조건으로서 타당한지에 대한 검증은 미비한 실정이다. 또한, 막여과 공정의 완결성 시험인 압력손실시험에 의한 압력손실률과 이를 기반으로 정립된 기존의 정수시설에 적용된 압력손실시험기반의 로그제거율(log removal value direct integrity test; LRV_{DIT}), 상한한계값(upper control limit; UCL) 등 RO 공정에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 막 손상 감지 기준에 대한 적합성 평가 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 하수재이용의 유지관리 측면

에 집중하여, RO의 성능을 최대한으로 이끌어낼 수 있도록 침지식 중공사형 막여과 공정을 이용한 막완결성 시험을 통하여 주요 인자를 도출하고, 도출된 결과를 바탕으로 하수재이용 계열설계와 막 손상 모니터링 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 원수 및 막 여과수 수질분석

본 연구에서 사용된 원수인 하수처리시설 방류수는 수원 소재의 S대학교 내 하수처리장에서 채수하였으며, 수질 분석을 위한 측정항목은 SDI 및 RO 막여과 공정에 영향을 줄 것으로 예상되는 항목에 집중하고자 관련 자료 및 문헌을 통해 Table 1과 같이 선정하였다[6-8]. 여기서, 분리막 손상에 따른 역삼투막공정에 적합한 SDI 영향을 보기 위하여 분리막이 완전한 상태(blank) 및 막 손상 개수(integrity breach 1~3 ea; IB 1, 2, 3)에 따른 막 여과수(integrity breach) 수질분석항목을 추가로 PAMAS system31 모델의 입자계수(particle counting) 분석을 반영하였다.

분석 및 전처리는 수질오염공정시험방법에 준하였으며, 시험분석은 항목 당 각 2회에 걸쳐 실시하여 각 회의 결과를 산술평균으로 산출하여 데이터를 확보하였다.

Table 1. A List of Items for Water Quality Analysis

Sample	Measurement Item	Unit
	pH (ORION 290A)	-
	COD _{Mn}	mg/L
Rawwater	Turbidity (HACH 2100)	NTU
Blank	Color (TC-3000)	PCU
IB 1	T-N	mg/L
IB 2	EC (HACH SensIon5)	$\mu\text{s}/\text{cm}$
IB 3	TOC (SHIMAZU TOC-VCPh)	mg/L

2.2. 정밀여과(microfiltration; MF) 막여과 장치 구성 및 제원

실험장치 구성에 사용된 중공사형 막의 제원을 Table 2에, 분리막장치의 제원은 Table 3에 각각 나타내었다. RO 공급수 생산을 위한 실제 Lab-scale 중공사형 침지형 분리막장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

Table 2. Specification of Hollow Fiber Membrane

Item	Index
Membrane material	PVDF (Polyvinylidene fluoride)
Pore size	0.1 μm
Inner / Outer Diameter	0.8 mm / 2.0 mm

Table 3. Specification of Submerged Type Mf Membrane Unit

Item	Index
Submerged tank volume	130 L
Flux	1.0 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$
Membrane area	0.26 m^2
Operating pressure	- 0.15 $\text{kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2$

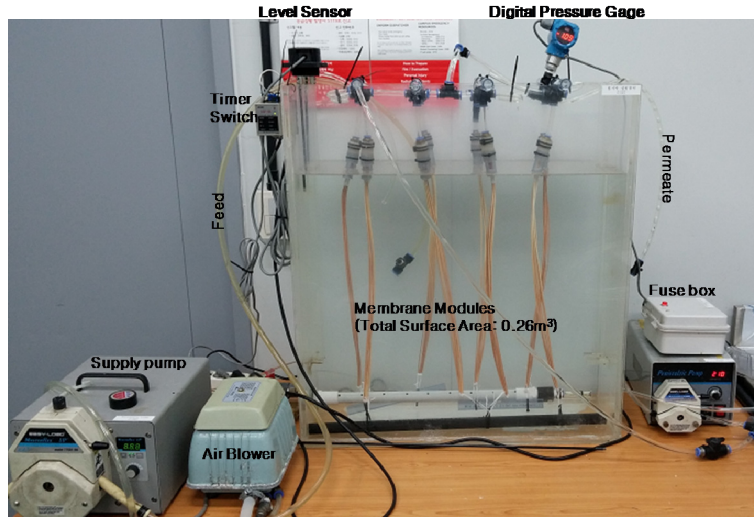


Fig. 1. Composition of submerged type MF membrane unit.

2.3. 동접촉각 측정 및 최소적용시험압력 산출

동접촉각 측정은 분리막의 고유물성 중 하나이며, USEPA에서 제시하는 막 손상 검지 모델로써 식 1인 LRV_{DIT} 의 압력손실시험을 통한 ΔP_{test} 를 적용하기 위한 식 2의 인자 중 $\cos \theta$ 값을 도출하기 위하여 측정하였다.

동접촉각 측정을 위해서 Attension社(구 KSV社)의 Sigma 700/701을 사용하였다. 온도에 영향을 받는 표면장력 측정 시 온도와 습도를 확인할 수 있는 디지털 온도계를 준비하여 매 측정마다 기록을 하였다. 측정조건은 온도 27°C, 습도 21%로 기록되었다. Liquid Phase로는 증류수를 사용하였다. 초기 2 mm는 계면의 영향으로 인하여 오차가 발생할 수 있기에 측정결과를 무시하도록 S/W에서 설정하였다.

식 1의 $\cos \theta$ 를 제외한 최소적용시험압력(P_{test}) 계산을 위해서 공극형상정정계수(κ)는 구형에 가까운 형상으로써 사용되는 1을 대입하였고, BP_{max} 는 막역과 장치의 구성에 따른 값을 대입하여 최소적용시험압력을 산출하였다. 따라서 막 손상 부위로 누출되는 수질변화 패턴과 SDI의 상관관계를 해석하는 것과 더불어 막 여

과운전을 정지한 뒤 막 손상을 검지하는 USEPA의 MFGM (membrane filtration guidance manual)에서 제시하는 압력손실시험의 모니터링 방안을 병행하고자 하였다.

2.4. 막 손상 및 SDI₁₅ 측정방법

분리막 손상에 의한 역삼투막 공정의 유입수질 영향 평가를 위한 손상된 분리막은 분리막 길이방향의 전단면을 절단하여 내경인 0.8 mm의 손상면적을 주어 IB 1에서 3인 1가닥부터 총 3가닥 손상으로써 유출되는 수질변화와 완결성 시험 평가에 적용하였다.

SDI 측정은 미국 ASTM에 제시된 표준방법을 적용하였다(D 4189-95 ASTM). Fig. 2에 나타난 바와 같이 시료를 준비한 후 가압펌프(DX-8000-0350)와 레귤레이터를 이용하여 30 psi의 압력으로 0.45 μm 의 필터 (MILLIPORE MFTM membrane filters, 0.45 μm HA)를 통해 시료를 여과시켜 SDI를 측정하였다.

초기에 여과된 시료를 500 mL 취수하는 데에 걸린 시간(T_0)을 스톱워치를 이용하여 측정하고 이후 15분간

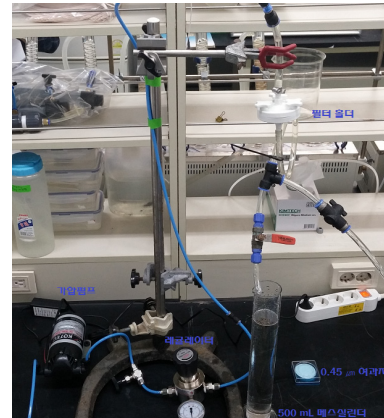
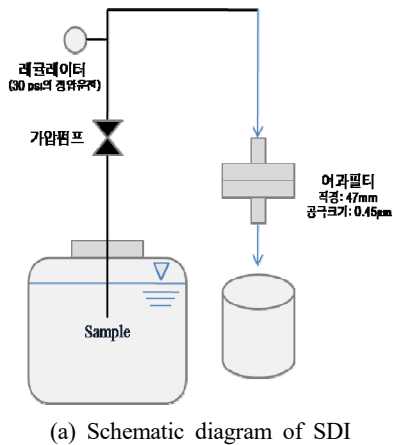


Fig. 2 SDI measurement unit.

여과를 계속 한 후 T_0 측정이 끝난 15분 후에 다시 시료를 500 mL 취수하는 데 걸리는 시간(T_{15})을 측정하였다. 측정에 요구되는 시료의 양은 10~20 L 범위이지만 SDI가 낮을 것으로 예상되는 수질일수록 많은 양이 필요할 것이다. 실험 중 필터가 완전히 막히게 되면 실험을 종료하고 T_{15} 를 무한대로 간주할 수밖에 없으며, 이러한 경우 SDI는 6.67이 된다. 즉 SDI가 6.67로 표시된 경우 또는 여과시간이 경과함에 따라 7.0에 수렴하는 시료의 SDI가 측정이 불가능하다는 것을 의미할 수 있다. 역삼투막 유입수로서 적정한 SDI 기준치는 역삼투막 공정의 운영방식에 따라 3~5 범위를 경험적 일반화 수치로 설정하고 있다.

실험 수행은 각 시료를 약 40 L 정도 준비하여 시료별로 각각 2~3번씩 SDI 측정을 진행하였다. 상대적으로 깨끗한 시료는 2번 측정 후 두 값의 평균을 내었고, IB 1, IB 2, IB 3 시료는 3번씩 측정 후 이상값이라고 판단되는 결과는 제거하고, 정상범위에 들어오는 값을 포함하여 평균을 낸 후 결과를 도출하였다.

2.5. 막 완결성 시험(PDR, LRV_{DIT} , UCL)의 재이용수 적용성 평가

막 완결성 시험은 EPA 815-R-06-009에 제시된 시험법에 맞추어 진행되었다. 압력손실시험(pressure decay rate; PDR)의 경우는 반응성이 없는 질소기체를 이용하여 실험을 수행하였다. LRV_{DIT} 와 UCL의 경우, PDR과 동접촉각실험(dynamic contact angle)에 의해 산출되어진 P_{Test} 값과 MFGM에서 제공하는 보존적인 값을 이용하여 감도계산에 이용하였다. 계산을 위해 사용된 식은

다음과 같다.

$$LRV_{DIT} = \log \left(\frac{Q_p \cdot ALCR \cdot P_{atm}}{\Delta P_{test} \cdot V_{sys} \cdot VCF} \right) \quad (1)$$

여기에서,

LRV_{DIT} = 직접완결성시험에서 LRV의 감도 (dimensionless)

Q_p = 설계 멤브레인 여과수량(L/min)

$ALCR$ = 기-액 치환 비(dimensionless)

BP = 완결성 시험 동안 시스템에서 back pressure (psi)

ΔP_{test} = 완결성 시험 동안의 압력손실 비(psi/min)

V_{sys} = 시험 동안 시스템에서 압축된 공기의 부피 (L)

VCF = 체적농도계수(dimensionless)

본 실험에서 사용한 중공사형 막의 경우, $ALCR$ 을 계산하기 위한 접근법으로는 중공사형 막 내부의 흐름을 난류로 보고 Darcy pipe flow 모델을 적용하는 방법이 있다. 자세한 계산 방법은 USEPA의 MFGM의 Appendix C.2에 서술되어 있다.

VCF 를 제외한 나머지 인자들은 실험 중 기록하여 단위환산을 한 후 계산에 사용하였다. VCF 값의 경우, Table 4와 같이 설계 시 여과운전 시간과 역세척 및 막침지조의 용적 등을 고려하여 물질수지를 수립하여 동적으로 반영해야 한다[10]. 하지만 여과운전 중에 분리막 파단을 인위적으로 일으켰으며 장기운영이 아닌 파단된 분리막 가다수에 따른 역삼투막 공정의 유입수질

Table 4. Typical Range of Values for Various Hydraulic Configurations

Hydraulic configuration		VCF
Deposition mode	Dead-end	1
	PFR	3-20
Suspension mode	Crossflow	4-20
	CSTR	4-20

로써 SDI₁₅ 변화패턴과 임계점을 확인하기 위함이기 때문에 USEPA에서 제공하는 Table 4에서 CSTR 조건과 12 시간의 여과운전을 고려하여 5의 값을 적용하였다.

2.6. SDI₁₅ 측정값을 활용한 회귀분석

2.1과 2.4에서 언급한 바와 같이 전처리 MF 막여과 공정에서 완결성을 유지하는 상태의 대조군(Blank)과 완결성이 결여된 IB 1, 2, 3의 막 손상 정도를 40 LMH로 여과한 RO 공급수의 SDI₁₅를 측정하여 기초실험에서 얻어진 데이터와의 회귀분석을 통하여 SDI를 대체할 만한 수질지표가 있는지 확인하고자 하였다. SDI₁₅는 3.5에서 기수행된 실험값을 활용하였고, 스프레드시트를 이용하여 기초실험을 통하여 얻은 샘플(Blank, IB 1~3)의 수질기준항목의 수치를 포함하면서, 인위적으로 공급수의 수질을 단계적으로 저감시킨 샘플(A, B, C)을 추가로 준비 및 분석하여 값을 얻은 후 회귀분석을 실시하였다. 확인하고자 하는 항목은 아래와 같다.

- SDI₁₅ - 탁도
- SDI₁₅ - 입자 수

3. 결과 및 고찰

3.1. 막오염이 막 완결성 시험에 미치는 영향 평가

RO 막여과 공정의 유입수질 기준을 맞추기 위한 전처리 MF 막여과 공정을 운전하는 데에 있어 운전시간에 따른 막 오염이 막 완결성 시험에 어느 정도의 영향을 미치고, 이 영향의 정도를 수치화하여 실제 분리막 운전 시 어떻게 유지관리를 하여야 하는지에 대한 자료를 확보하기 위하여 막 오염정도에 따른 막 완결성 시험의 영향평가를 실시하였다. 영향평가는 식 2로 산출된 결과로 판단하였다.

전처리 막여과 공정의 여과운전시간은 총 12시간 연속운전을 하였으며, 막간차압(transmembrane pressure;

Table 5. Results of Minimum and Maximum Test Pressure as a Result of Surface Tension and Dynamic Contact Angle

Elapsed Time (h)	Surface Tension (mN/m)	Contact Angle (°)	P _{test} (kPa)	P _{max} (kPa)
0	6.844	84.46	0.0187	
2	7.892	83.60	0.0215	120
6	9.288	82.47	0.0253	(1.2 bar)
12	17.365	75.81	0.0473	

TMP)은 (-) 35 kPa로써 제조사가 제시하는 허용운전압력까지 도달하였다. 연속운전을 하면서 2, 6, 12시간에 식 2의 압력손실시험 수행을 위한 초기설정압력(최소시험압력; P_{test})값 도출인자인 동접촉각 변화결과를 Table 5에 나타내었다.

$$P_{test} = (0.193 \cdot \kappa \cdot \sigma \cdot \cos\theta) + BP_{max} \quad (2)$$

여기에서,

P_{test} = 최소시험압력(psi)

κ = 공극형상정정계수(pore shape correction factor)

σ = air-liquid 계면에서의 표면장력 (dynes/cm)

θ = liquid-membrane 접촉각 (degrees)

BP_{max} = 시험 중 시스템 최대 backpressure (psi)

0.193 = defect diameter (3 μm)와 단위변환계수를 포함한 상수

Fig. 3은 시간에 따른 MF 막의 표면장력과 접촉각을 이용하여 USEPA에서 제시하는 MFGM에서 나타난 최소시험압력(P_{test})을 구하기 위한 인자를 정리한 것을 Table 5에 정리하였다.

Table 5에서 보이듯이 운전 경과시간에 따른 막에서의 표면장력과 접촉각의 변화에 따른 최소적용시험초기압력(P_{test})의 변화와 최대적용시험초기압력(P_{max})을 살펴보았다. 계산에서 침지식 조인 것을 감안하여 P_{test} 계산 시 BP 값을 0으로 계산하였다. 막의 오염이 진행됨에 따라 P_{test}이 증가함을 알 수 있으며, 추후 공정의 유지관리를 직접완결성시험법으로 할 경우에는 LRV_{DIT}와 UCL의 감도계산을 막의 오염정도에 따라 다르게 적용하여야 함을 알 수 있다. 하지만 산출된 P_{test}는 실제 공정운전에서 UCL에 적용하기에는 너무 작은 압력이므로 P_{max}로 감도계산에 활용하였다.

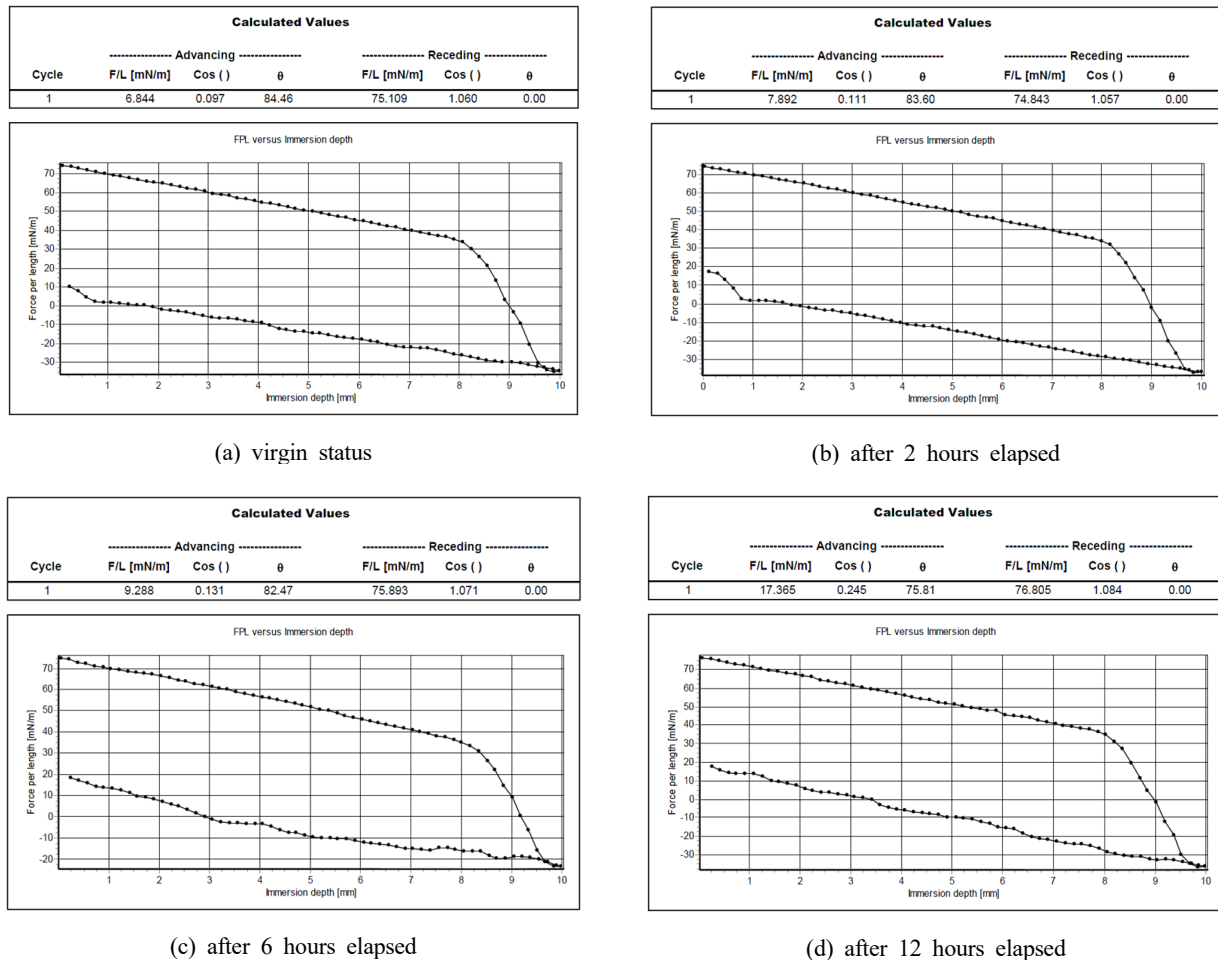


Fig. 3. Membrane contact angle and surface tension.

Table 6. Result of Samples Quality Analysis

Sample	pH	TDS (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	TOC (mg/L)	Color (PCU)	Turb. (NTU)	TN (mg/L)	EC (μS/cm)
DW	6.9	N.D.	-	1.025	-	-	-	0.56
Rawwater	6.7	522	19.17	5.22	22	0.508	12.87	1066
MF_Blank	6.6	521	17.43	4.34	2	0.395	12.83	1063
MF_IB 1	6.7	519	27.01	8.16	4	0.374	11.69	1057
MF_IB 2	6.7	517	42.7	29.75	8	0.381	12.08	1055
MF_IB 3	6.8	517	108.1	54.89	23	0.292	12.18	1054

3.2. 막 손상에 의한 수질 영향평가

각 샘플에 대한 기초수질 자료를 확보하기 위하여 표준공정시험법에 준하여 원수, Blank, 역삼투막 공정의 전처리 정밀여과 막공정의 분리막 파단 개수인 MF_IB

1~3에 대해서 각각 측정항목을 정한 뒤 파단된 면적으로 누출되는 수질이 포함된 막 여과수의 SDI, 수질분석을 위한 시료를 취하여 Table 6의 결과를 얻었다.

Table 7. Number of Particles Existed in the Solutions (Unit: N/100 mL)

Diameters (μm)	DW	WW	MF_Blank (No breach)	MF_IB 1	MF_IB 2	MF_IB 3
1 ~ 3	866	1,181,194	14,698	81,580	258,912	497,422
3 ~ 5	78	16,716	586	2,170	2,886	4,552
5 ~ 7	16	1,010	44	342	416	226
7 ~ 10	8	182	22	240	92	162
10 ~ 15	10	62	6	100	30	66
15 ~ 20	2	26	4	50	6	20
20 ~ 25	0	12	0	24	0	8
25 ~ 30	0	10	0	6	0	2
30 ~ 35	0	0	0	4	2	2
35 ~ 40	0	2	0	2	0	2
40 ~ 50	0	2	0	2	2	0
50 ~ 60	0	0	0	0	0	2
60 ~ 75	0	0	0	0	0	0
75 ~ 90	0	4	0	0	0	2
90 ~ 100	0	0	0	0	0	0
> 100	0	0	0	0	0	0
Total	980	1,199,220	15,360	84,520	262,346	502,466
Total (over 3 μm)	114	18,026	662	2,940	3,434	5,044

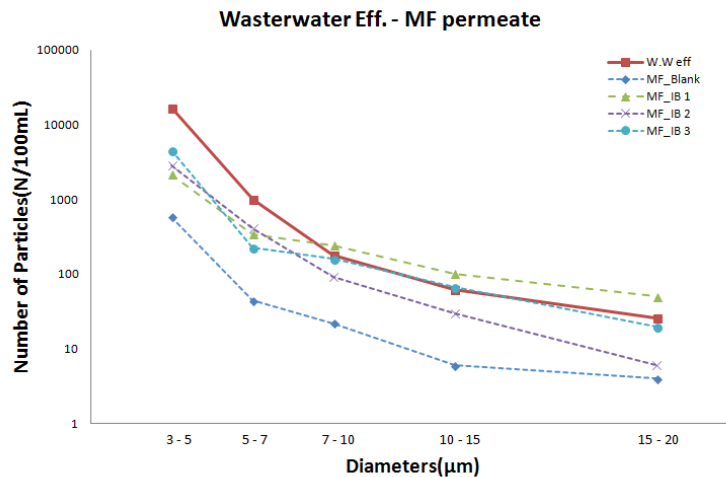


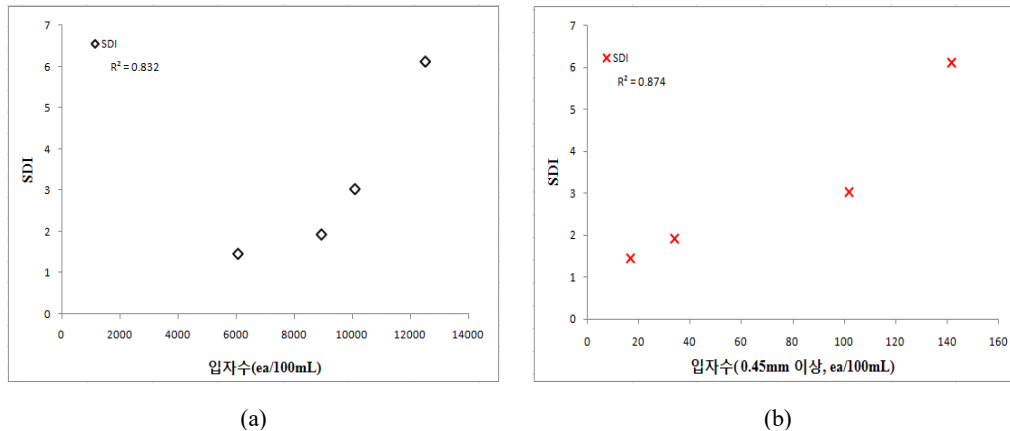
Fig. 4. Number of Particles Size Distribution before and after the pretreatment process in logarithmic scale.

각 샘플의 입자 수를 측정해 보았을 때 Table 7와 Fig. 4에서 알 수 있듯이 하수방류수의 3~5 μm 범위 100 mL당 입자 수는 16,716개로 나타났다. 이후 PVDF 재질 중공사막을 활용한 MF 전처리 과정을 정상적으

로 거친 후 동일범위 100 mL 당 입자 수는 586개로 급격히 줄었으며, 96.5%의 제거율을 보였다. 반면, 막의 파단 개수가 1개에서 3개로 증가할수록 동일범위 100 mL 당 입자 수가 각각 2,170개, 2,886개, 그리고 4,552

Table 8. Result of SDI Easurement According to the Standard Method

Item	Trial	T ₀	T ₁₅	SDI	SDI _{AVG}
Blank	1	44.71	58.6	1.58	1.45
	2	45	56.2	1.33	
MF_IB 1	1	46	62.77	1.78	1.92
	2	44.8	64.22	2.02	
	3	47.3	66.93	1.96	
MF_IB 2	1	48.25	84	2.84	3.02
	2	46.3	84.6	3.02	
	3	45.9	88.4	3.21	
MF_IB 3	1	47.5	565	6.11	6.11
	2	49.2	542	6.06	
	3	44.3	592	6.17	

**Fig. 5.** Effect of particles on SDI: (a) Counted particle ranges 0 to 100 μm , (b) Counted particle ranges 45 to 100 μm .

개로 증가함을 관찰할 수 있었다.

3.3. 막 손상에 의한 SDI의 영향인자 도출

3.3.1. 막 손상에 의한 SDI 변화

SDI 값을 조금이라도 더 정확히 얻고자 각 샘플에 대해서 SDI 측정을 2~3회 진행하였다. Table 8에서 보듯이, 결과적으로 대조군인 Blank와 파단의 개수가 1개인 IB 1은 SDI 값이 각각 1.45와 1.92로 MF/UF로 처리했을 때 얻을 수 있는 대표범위 내의 값을 나타내었고[11], 파단의 개수가 2개인 IB 2는 3.02로 RO 막공정의 유입수로 적용되는 범위인 3~5 이하의 범위에 들어 온 것을 확인하였다. 반면 파단의 개수가 3개인 IB 3은 막의 파단을 통해 입자성 물질의 급격한 증가로 SDI 6.11로 SDI가 측정이 불가능 할 때 표시하는 6.77에 거의 근접한 수준으로써 RO 막공정의 유입수질로

적절하지 않음을 확인하였다.

Fig. 5에 입자 수가 SDI 값에 미치는 영향을 pearson 상관계수와 함께 나타내었다. (a)는 입자의 크기를 고려하지 않고 입자 수에 따른 SDI 값의 변화를 나타내었고, (b)에서는 SDI 실험에 쓰이는 여과지 공극의 크기에 영향을 주는 0.45 mm 이상인 입자의 개수만 세어서 그래프에 나타내었다. 양쪽 모든 결과에서 상관계수가 0.8 이상으로 나타났고, 여과지 공극 크기를 고려한 (b)에서 pearson 상관계수가 조금 더 높은 것으로 나타났다. 이로 인하여 입자 수를 SDI 지표를 예측하는 간접적인 인자로 볼 수 있을 것이라 고려된다.

SDI₁₅ - 탁도와 SDI₁₅ - 입자 수 각각의 상관관계를 알아보기 위해 수행된 본 실험에서 결과가 보여주는 것을 살펴보면, 샘플의 특성상 탁도는 실험군과 대조군

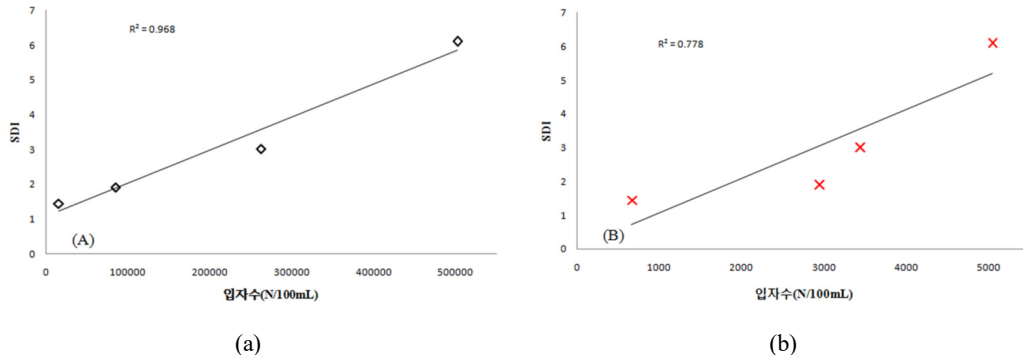


Fig. 6. Effect of counted particle size range on SDI: (a) Whole channel, (b) Channel indicating over 3 μm.

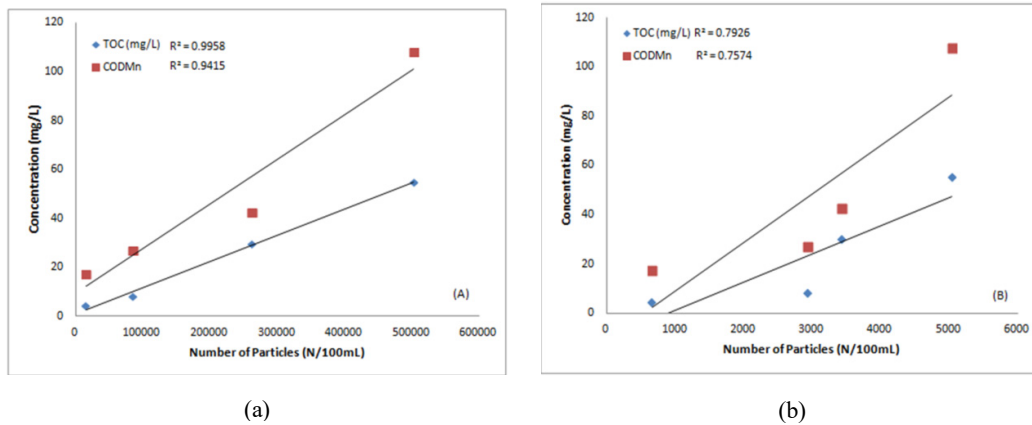


Fig. 7. Effect of Counted Particle size range on TOC and COD: (a) Whole channel, (b) Channel indicating over 3 μm.

사이의 상관관계 측면에서 모호함을 유발한다고 볼 수 있다. 각 샘플에 대한 SDI 측정결과는 분리막의 파단 개수가 증가함에 따라 SDI 값도 증가하지만 탁도는 그 반대의 결과를 나타내었다. 이는 입자성물질의 탁질 유발 정도에 많은 영향을 받기에 원수의 성상과 깊은 관련이 있다고 사료된다. 결론적으로 SDI 지표를 간접적으로 나타낼 수 있는 인자는 입자 수로 볼 수 있다. 하지만, 전술하였듯이 SDI 지표가 각기 다른 특성을 가진 원수에 대해 같은 방법으로 전처리를 하였을 때, 똑같은 경향을 나타낼지에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 생각된다.

3.3.2. 막 손상에 의한 수질변화

막여과 공정의 운전을 정지한 상태(offline)에서 감시할 경우, 운영관리자 입장에서 편의성은 떨어지지만 감지감도가 증가하였다. 하지만 여전히 SDI를 활용하여 RO 공정의 유입수질로 적합한 기준을 판단하는 것의

적합성 연구는 진행되어야 할 것이다.

Fig. 6에서 단순히 (a) 전체 채널에서의 입자개수와 SDI의 상관관계와 (b) 3 μm 이상의 크기만 표시한 채널에서의 입자개수와 SDI의 상관관계를 나타내 보았다. 하수재이용 수질기준에서 친수용수 수준의 재이용수를 얻고자 한다면 대장균과 병원성 미생물을 고려하지 않을 수 없는데, 이를 고려한 PCA와 SDI의 상관관계는 0.778로 나타났다. USEPA의 가이드라인을 준수한다면 먹는 물 수질기준이기 때문에 병원성 미생물의 포낭 크기인 3 μm의 이하에서 결과를 반영해야 하지만 하수재이용에서는 0.45 μm 이상으로써 입자성물질인 입도분포 전체범위에 대한 상관관계가 높지 않았다.

또한, Fig. 7과 같이 입자성 유기물을 포함하는 지표인 TOC분석과 COD_{Mn} 측정값과 입자 수와 상관관계를 보면, TOC 분석에서는 SDI보다 더 높은 상관관계를 나타낸다. 즉, 입자성 유기물을 하수재이용에서 RO 공정의 유입수에서 요구하는 제거대상으로 보고 로그제

Table 9. Given Information and Derived Value for Calculating LRV_{DIT} and UCL

Item	Value	Item	Value
Q _p , L/min	0.25	TMP, psi	182.6
V _{sys} , L	1.9	P _{atm} , psi	14.7
ALCR	9.057467	VCF	5

거울을 구하게 되면 더 높은 검지감도를 얻을 수 있다는 결론에 도달하게 된다. 즉, SDI가 설계인자로서 어느 정도 적합하나 해수가 아닌 하수방류수를 원수로 할 경우에는 TOC 농도를 고려하는 것이 더 적합하다고 볼 수 있다.

3.4. 주요영향인자의 누출에 의한 막여과 장치 운전 결과

ALCR을 계산하기 위한 Y (Net expansion factor)는 0.7로 가정하였다. LRC (Log Removal Credit)은 일반적인 MF 공정에서 요구되는 탁질물질은 절대적인 제거가 가능하지만 막 손상에 따른 감도 변화를 병원성 미생물의 제거율인 3을 대입하였고, 체적농도계수는 MFGM에서 제공하는 값을 사용하였다.

Table 10에서 알 수 있듯이, 역삼투막 공정의 전처리 과정에서 제거 대상으로 입자성 유기물질을 주요영향인자라고 보았을 때, 전처리 막여과 조의 운전시간에 따른 제거율 변화는 막오염이 진행됨에 따라 입자성 유기물의 제거율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 초기상태[12]에서의 막 손상 감지로써 계열구성 설계에 반영하는 감지 감도는 여과운전을 통하여 막오염 현상이 불가피하게 감도에 영향[13]을 주므로, 신뢰성을 고려한다면 막 손상을 확인하는 압력손실시험의 결과를 초기상태의 기준이 아닌 막오염 정도에 따른 범위로 확인을 해야 한다고 판단된다.

4. 결 론

막 손상이 발생하였을 경우 조건별로 수질분석과 SDI 실시하여 얻은 결과를 살펴보았을 때, 파단을 통하여 유입된 입자성 물질이 존재함에도 불구하고 SDI 3 이하의 조건을 만족하는 경우가 있었다. 또한 전처리 막여과 유닛 내에서 파단의 개수가 증가하였지만, 탁도는 오히려 감소하였다. 이러한 사실로 볼 때, 하수재이

Table 10. LRV_{DIT} and UCL changes according to MF fouling

Elapsed Time (hr)	P _{test} (kPa)	P _{test} (psi)	LRV _{DIT}
0	0.0187	0.0027	3.111
2	0.0215	0.0031	3.051
6	0.0253	0.0037	2.980
12	0.0473	0.0069	2.708

용 과정에서 탁도는 입자성 물질의 농도를 측정하기 위한 방법으로서 의미가 없음을 알 수 있었다.

역삼투막 공정의 전처리 과정에서 막오염이 진행됨에 따라 입자성 유기물의 제거율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 여과운전을 통하여 막오염 현상이 불가피하게 감도에 영향을 주므로, 신뢰성을 고려한다면 막 손상을 확인하는 압력손실시험의 결과를 초기상태가 아닌 막오염 후에 따른 범위로 적용해야 한다고 판단된다.

하수재이용 시 역삼투막의 전처리 공정으로 MF/UF 분리막 공정을 적용했을 때의 분리막 초기상태부터 막오염 정도를 고려하여 확산 또는 bubble point 이상의 압력을 즉시 최소압력감도로써 막 손상 검지 인자에 반영해야 한다. 또한 장기적인 운전 중 막 손상 또는 역삼투막의 막오염 가속화를 신속하게 확인하기 위하여 SDI, TOC, PCA와 더불어 LRV_{DIT}, 모니터링을 병행해야만 수질의 안정성을 확보할 수 있다.

Reference

1. A. Brehant, V. Bonnelye, and M. Perez, "Assessment of ultrafiltration as a pretreatment of reverse osmosis membranes for surface seawater desalination", *Water Sci. Technol. Water Supply*, **3**, 437-445 (2003).
2. F. H. Butt, F. Rahman, and U. Baduruthamal, "Hollow fine fiber VS. spiral-wound RO desalination membranes part 1: pilot plant evaluation", *Desalination*, **109**, 67-82 (1997).
3. J. C. Schippers, J. H. Hanemaayer, C. A. Smolders, and A. Kostense, "Predicting flux decline of reverse osmosis membranes", *Desalination*, **38**, 339-348 (1981).

4. S. F. E. Boerlage, M. Kennedy, M. P. Aniyé, and J. C. Schippers, "Applications of the MFI-UF to measure and predict particulate fouling in RO systems", *J. Membr. Sci.*, **220**, 97-116 (2003).
5. S. J. Kim, C.-H. Ahn, and G. T. Kim, "Pilot scale assesment of pressurized MF and VF(Vortex Filter) processes for the pretreatment of RO process on treated wastewater reuse", *Proceeding of Korean Soc. Water & Wastewater*, 41-42 (2011).
6. D. Kim, K. Choi, D. Son, S. Kim, and L. Kang, "The use of filtration process for seawater pretreatment prior to RO membrane", *Proceeding of Korean Soc. on Water Environment*, 9-10 (2011).
7. S. Kim, C. H. Kim, S. H. Kang, W. T. Lee, and J. L. Lim, "Verification of Silt Density Index (SDI) as a fouling index for reverse osmosis(RO) feed water", *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **25**, 489-495 (2011).
8. C. Min, S. Kim, and S. Lee, "Evaluation of pre-treatment process in SWRO using granular activated carbon, Korean Society on Water Environment", *Proceeding of Korean Soc. on Water Environment*, 565-566 (2011).
9. Dong-Min Son and Lim-Seok Kang, "Effect of pretreated seawater quality on SDI in SWRO desalination process", *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **35**, 200-205 (2013).
10. USEPA, Membrane Filtration Guidance Manual, EPA 815-R-06-009, Cincinnati, OH 45268: USEPA (2005).
11. W. T. Bates and R. Cuzzo, "Integrated membrane systems", *Hydranautics Available*, http://www.membranes.com/docs/papers/01_ims.pdf (2000).
12. Y.-S. Lee, H.-S. Kim, and J.-O. Kim, "Influencing factors on sensitivity of pressure decay test for membrane damage assessment", *Membr. J.*, **27**, 367-373 (2017).
13. Y.-S. Lee, H.-Y. Kang, H.-S. Kim, and J.-O. Kim, "Evaluation of membrane damage sensitivity by defect types for improving reliability of membrane integrity monitoring", *Membr. J.*, **27**, 248-254 (2017).