Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 26, No. 2, pp.289-296 (2010)

하수처리수 재이용을 위한 RO 공정의 타당성 및 막오염 평가

홍기웅 · 이상엽 · 김창우 · 부찬희 · 박명균* · 안호철* · 홍승관†

고려대학교 건축사회환경공학부
*금호 환경 기술

Evaluation of RO Process Feasibility and Membrane Fouling for Wastewater Reuse

Keewoong Hong · Sangyoup Lee · Changwoo Kim · Chanhee Boo · Myunggyun Park* · Hochul An* · Seungkwan Hong†

Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University
**Water & Wastewater Engineering Team, Kumho Envirotech*
(Received 20 October 2009, Revised 8 December 2009, Accepted 14 December 2009)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate various pre-treatment methods and proprieties of water quality for wastewater reuse using reverse osmosis (RO) processes. Secondary effluents were sampled from wastewater treatment plants and lab scale pre-treatments and RO filtration test were conducted systematically. Specifically, different types of pre-treatments, such as coagulation, microfiltration and ultrafiltration, were employed to evaluate the removal efficiency of particle and organic matters which may affect the membrane fouling rate. RO process was later added to eliminate trace amounts of remaining organic matters and salt from the raw water for wastewater reclamation. The permeate through the RO process satisfied water quality regulations for industrial water uses. The experimental results showed that the initial fouling tendency differed not only by the feed water properties but also by the membrane characteristics. Membrane fouling was greater for the membranes with large surface roughness, regardless of the hydrophobicity and zeta potentials. Thus both careful consideration of pre-treatment options and proper selection of RO membrane are of paramount importance for an efficient operation of wastewater treatment.

keywords : Membrane fouling, Modified Fouling Index (MFI), Pretreatment, RO membrane, Silt Density Index (SDI), Wastewater reuse

1. 서 론

전 세계적으로 수자원 고갈 및 수요의 증가로 인해 대체 수자원의 확보가 중요한 현안으로 대두되고 있다(안규홍 등, 2003). 이러한 물 부족 현상의 대안으로서 수자원의 보존과 친환경적인 측면, 안정적인 용수의 확보 측면에서 하수처리수의 재이용이 대두되고 있으며, 최근 들어서 재이용을 위한 하·폐수의 처리 공정에 막을 이용한 기술적용이 증가되고 있는 추세이다(현승훈 등, 2005). 하수처리장의 방류수는 갈수기에도 안정적인 유량을 확보할 수 있다는 이점과 고도처리시설의 도입에 따라 양질의 처리수가 연중 방류되기 때문에 적절히 활용하면 대체 수자원으로 그 가치가 크다고 할 수 있다(이용두 등, 2007). 하수처리 재이용수는 세정용수, 살수용수, 조경용수, 하천유지용수, 농업용수, 공업용수 등과 같이 다양한 목적으로 활용가능하나 용도에 따른 적절한 수질을 필요로 한다. 막을 이용한 공정은 원수의 특성에 맞게 처리가 가능하며, 재이용수의 용도에 따른 수질제어가 가능할 뿐만 아니라 운용의 편리성 때문에 많은 각광을 받고 있다(박기영 등, 2004).

최근 들어 국내에서 하수처리수 재이용에 관한 몇몇 연구결과가 보고되고 있다. 재이용을 위한 전처리에 관한 연구로써 문성용 등(2006)과, 안세혁 등(2006), 이철우 등(2005), 안규홍 등(2003)은 응집이나 오존, UV와 H_2O_2를 사용한 고도산화를 연구하여 유기물 제거를 위한 전처리 시스템의 성능을 평가하였다. 또한 현승훈 등(2005), 오세현 등(1998), 송경근과 안규홍(1997)에 의해 규정수질의 충족을 위한 막 선정과 막오염 저감을 위한 운전조건의 도출에 관한 연구가 수행되었다. 기존의 연구에서는 수질기준을 맞추기 위한 막선정이나 유기물과 무기물의 제거로 수질·화학적 측면의 막오염 저감을 위한 전처리 효율 등에 관해 논의되었을 뿐, 막표면의 물리·화학적 특성에 의한 막오염 정도의 차이에 대해서는 연구가 미비한 상태이다. 하지만 원수와 막표면의 특성에 의해서도 막오염 정도가 크게 차이 날 수 있기 때문에 막오염 저감을 위해서 막특성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

† To whom correspondence should be addressed.
skhong21@korea.ac.kr

본 연구에서는 실제 하수처리장 2차 처리수를 대상으로 응집 및 막여과 공정을 이용하여 전처리 후 lab scale RO unit을 운전하여 공정별 처리수질, 전처리 및 RO 공정의 효율성과 막특성에 따른 막오염 정도 등을 평가하고자 한다. 또한 정밀여과(Microfiltration, MF) 및 한외여과(Ultrafiltration, UF)를 이용한 전처리 공정을 통해 탁도를 유발할 수 있는 입자성 물질, 콜로이드, 미생물 등을 대부분 제거 및 역삼투(Reverse Osmosis, RO) 공정을 통한 유기물 및 무기물, 이온성 물질 등의 제거를 실험하여 양질의 재이용수 공급에 대한 타당성을 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 원수

하수처리수의 재이용을 위한 막 분리 공정 실험을 위하여 경기도 B시 하수처리장의 2차 처리수를 사용하였다. B시 하수처리장은 B시와 I시의 하수를 병행 처리하고 있으며, 처리용량은 약 80만 톤/일이다. 처리시설로는 전형적인 하수처리장의 형태인 침사지, 일차침전지, 생물반응조와 이차침전지로 구성되어 있으며 T-N과 T-P의 저감을 위한 고도처리 시설(4stage BNR 공법)을 갖추고 있다. 본 연구에서는 일반적인 하수처리수에서 RO 공정에 가장 적합한 원수를 생산하기 위하여 고도처리를 거치지 않은 2차 처리수에 다양한 전처리 방법을 적용하였다.

2.2. 전처리 방법

응집을 하지 않은 원수의 전처리를 위해 MF(0.45 μm capsule filter(웅진케미컬))로 여과하였고 이렇게 여과된 유출수는 다시 UF(0.05 μm capsule filter(웅진케미컬))로 여과하였다. 또한 전처리 응집 공정을 위하여 Jar test를 통해 Alum($Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$14~18)의 최적주입량을 결정하였다. 응집시킨 원수는 상등수를 채수하여 위와 동일한 방법으로 여과 하였다. 응집 후 0.05 μm capsule filter로 여과된 원수를 사용하여 농축수 제조와 다양한 막을 이용한 막오염 실험을 위하여 lab scale RO unit을 사용하였다.

2.3. 수질 분석

원수를 크게 응집 전과 후로 나누고 각 공정의 원수를 0.45 μm와 0.05 μm capsule filter로 처리한 후 RO 공정을 적용하였다. 각 공정의 처리수와 RO 공정의 농축수에 대해서 기본 수질항목인 pH (Orion520$^+$, Thermo Electron Corp., MA), Conductivity (30/10 FT, YSI incorporated), Turbidity(2100F Turbidimeter, HACH)와 일반적인 수질항목(COD, T-N, T-P, Color, TDS)의 분석을 실시하였으며 모든 수질분석은 공정시험법과 Standard method(APHA, 1995)에 의거하여 수행되었다. 또한 막 공정에서 막오염에 많은 영향을 미칠 수 있는 유기물의 분석을 위하여 TOC, UV_{254} (DR5000, HACH)와 FEEM(Safire^2, TACAN, Japan)을 이용하였다. 각 공정이 미생물에 미치는 영향을 규명하기 위해 원수와 각 공정의 처리수를 Petrifilm(Coliform Count Plate, 3M)에 1 mL 씩 떨어뜨려 36°C에서 24시간 동안 배양한 후 colony의 개수를 세어 각 공정의 미생물 개체수를 확인하였다.

2.4. RO membrane

Flux decline test를 위하여 국내외 3개 사의 LPRO membrane을 사용하였다. 모든 membrane의 재질은 PA (polyamide) 재질이며 염제거율은 A, B사의 membrane은 98%, C사의 membrane은 99.2%이다. 또한 각 membrane에 대한 원수의 SDI 최대값은 5로 동일하였다.

2.5. 막오염지수

각각의 공정에 의한 처리수는 SDI, MFI test를 통하여 RO 공정 적용의 적합성을 판단하였다. 막오염지수는 auto SDI test kit (GE Osmonics, USA)과 auto SDI booster pump (GE water Tech., USA)를 사용하여 측정하였다.

2.5.1. Silt Density Index (SDI)

SDI는 0.45 μm의 공경을 가지는 47 mm disk membrane을 사용하여 30 psi에서 15분간 운전 후 다음 식을 이용하여 산출하였다.

$$SDI = \frac{100[1-(t_i/t_f)]}{T} \quad (1)$$

t_i는 최초 500 mL을 여과하는데 걸리는 시간, t_f는 일정시간(T) 후 500 mL을 여과하는데 걸리는 시간, T는 일정시간(일반적으로 5, 10, 15분)을 나타내었다. 일반적으로는 SDI_{15}의 값을 많이 사용하지만 막오염이 심하여 오랜 시간 운전이 곤란한 경우에는 SDI_5 값을 사용하였다.

2.5.2. Modified Fouling Index (MFI)

MFI (Modified Fouling Index)는 SDI와 동일하게 0.45 μm의 공경을 가지는 47 mm disk membrane을 사용하며 30 psi에서 15분간 운전하여 측정하였다. 15분간 운전을 하는 동안 매 30초 마다 유량을 기록하며 최종적으로 다음과 같은 식으로 나타내는데, Fig. 1과 같이 X축을 누적부피(V), Y축을 유량의 역수값(1/Q)을 가지는 그래프를 그려 그 기울기로 값을 구하였다.

$$\frac{1}{Q} = a + MFI \times V \quad (2)$$

MFI는 SDI와 달리 cake formation을 고려한 것으로써 그래프의 모양을 바탕으로 대략적인 막오염 mechanism을 알 수 있다. Fig. 1과 같이 그래프에서 초기에 급격하게 기울기가 증가하는 구간이 pore adsorption이 일어나는 구간이고 기울기가 일정한 중간이 cake formation, 마지막 부분에 다시 기울기가 증가하는 부분이 cake compression이 일어나는 구간을 나타낸다. 여기서 가운데의 cake formation이 일어나는 linear한 구간의 기울기가 MFI가 값이 된다.

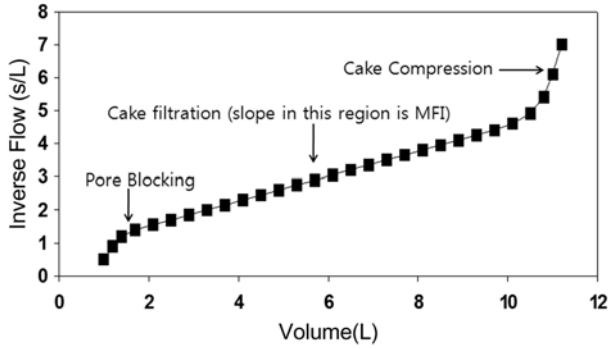


Fig. 1. Typical MFI graph.

2.6. 막 오염 실험

실제 RO 공정에서 일어나는 막오염의 경향을 예측하기 위하여 다양한 국내·외 제조사의 LPRO(Low pressure RO) 막을 사용하여 lab scale RO unit을 운전하였으며 응집 후에 최종적으로 0.05 μm capsule filter로 여과한 하수처리수 20 L를 원수로 사용하였다. 면적이 52 cm^2인 평막을 사용하였고, 초기 permeate 유량을 20 GFD(34 LMH)로, cross flow 유속은 15 cm/s로 설정한 뒤 정압으로 운전하였다. 유량은 저울을 사용하여 측정하였으며 3분마다 컴퓨터에 자동으로 기록되도록 설정하고 48시간 동안 운전하였다.

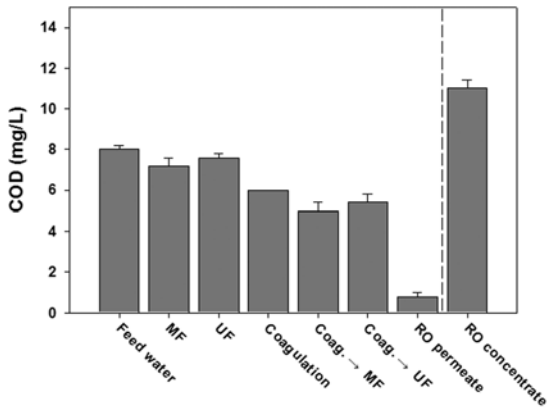
2.7. 막 표면 분석

본 실험에 사용된 다양한 LPRO 막의 특성과 각각의 막에 대한 운전 전·후의 특성 변화를 알아보기 위하여 막 표면 분석을 실시하였다. Dynamic Contact Angle (Sigma 701 microbalance, KSV Instrument, Ltd., Finland), Zeta Potential (SurPass, Anton Paar, German), AFM (Atomic Force Microscope, Pucostation, German)을 이용해 막의 친·소수성 경향, 표면전하, roughness를 비교하여 막 특성에 따른 막오염 경향을 연구하였다.

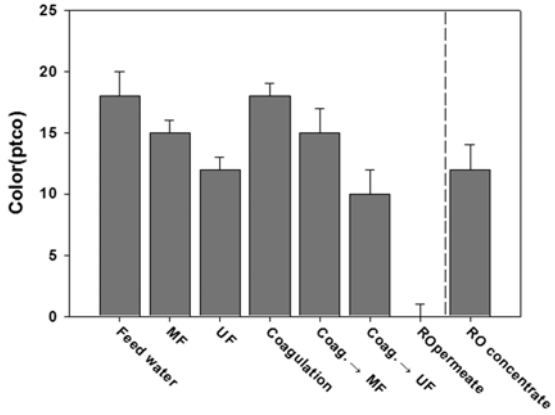
3. 결과 및 고찰

3.1. 처리공정별 수질분석

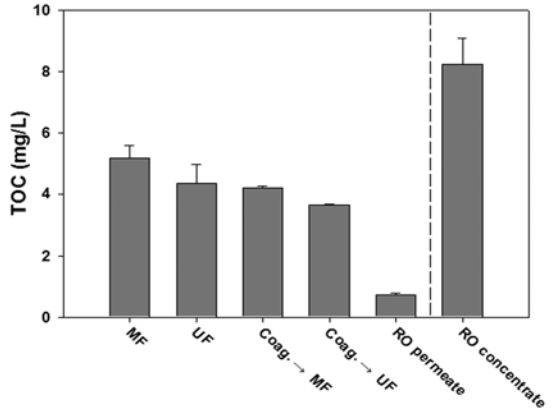
연구에 사용된 하수처리장의 2차 처리수의 수질은 Table 1과 같다. 아래의 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 응집 공정을 거치지 않고 0.45 μm 및 0.05 μm로 전처리를 거친 경우 단계별로 입자성 물질 및 미생물에 대해서는 처리수 수질이 향상되었으나 이온성 물질 및 유기물의 제거율은 변화가 거의 없었다. 이는 여과과정을 거치며 filter의 공경보다 크기가 큰 물질에 대해서만 선택적으로 제거가 되었기 때문이다. 응집을 하였을 경우는 응집제에 의해서 pH나 T-P, alkalinity와 같은 항목이 급격하게 낮아졌지만 반대로 막



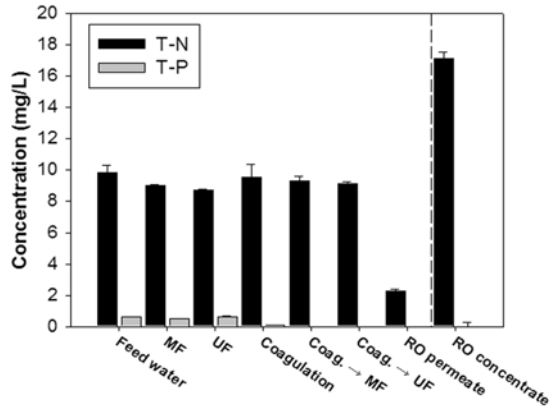
(a) COD



(b) Color

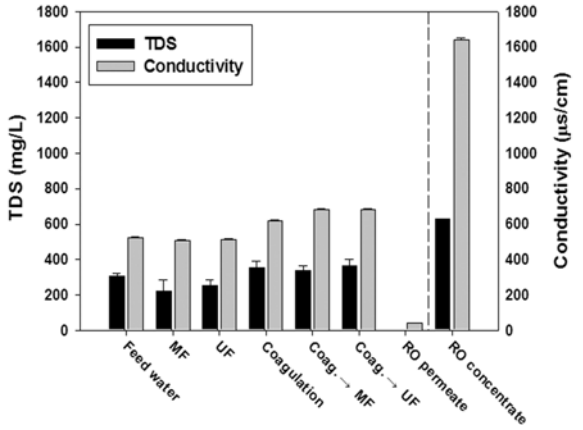


(c) TOC

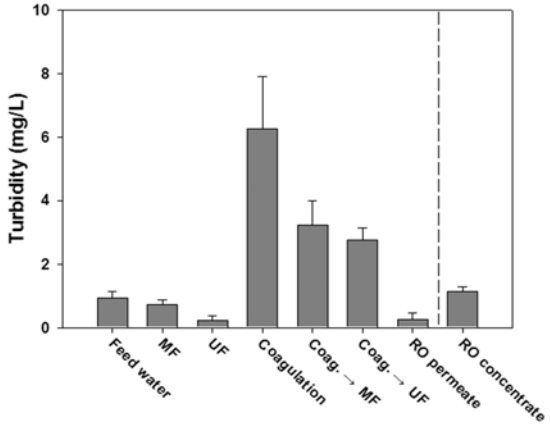


(d) T-N & T-P

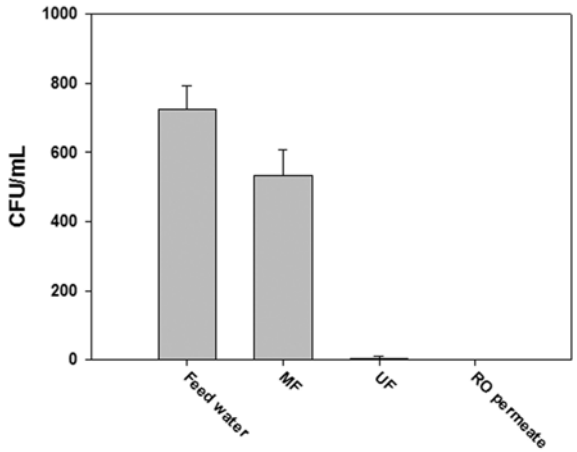
Fig. 2. Compression of water quality for various pretreatment processes.



(e) TDS & Conductivity



(f) Turbidity



(g) The number of forming units

Fig. 2. Compression of water quality for various pretreatment processes (continued).

Table 1. Quality of secondary effluent from wastewater treatment plant (B city)

Name	Secondary effluent
pH	6.71
Amount Nitrite (mg/L)	N.D.*
Amount Nitrate (mg/L)	8.81
Amount Phosphate (mg/L)	0.75
Cl^- (mg/L)	35.5
T-N (mg/L)	9.8
T-P (mg/L)	0.6
BOD (mg/L)	6.42
COD (mg/L)	8.0
Color (ptco)	20.0
Conductivity (μs)	524
Turbidity (NTU)	0.93
Hardness (mg/L as $CaCO_3$)	83.5
Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	47.2
TDS (mg/L)	305.5
TS (mg/L)	310.0
TOC (mg/L)	5.16

* No detection

오염을 유발하거나 증가시키는 요인인 turbidity와 TS, TDS 값은 증가하였다. 대부분의 유기물질 및 이온성 물질 등은 응집이나 0.45 μm와 0.05 μm의 fliter를 사용해 전처리를 하여도 제거되지 않아 그 값이 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 미생물의 양을 측정한 실험의 결과 0.45 μm와 0.05 μm filter를 이용한 전처리에 의해 미생물이 대부분 제거되는 것을 확인하였다. 하지만 전처리를 통과한 미생물이 RO 공정에서 막 표면에 흡착되고 유기물 등 영양소가 공급이 될 경우 급격한 성장을 하며 biofilm을 형성하여 생물막오염(biofouling)을 발생시킬 수 있는 요인이 되기 때문에 전처리 과정에서 미생물의 100% 제거를 위하여 biocide 등을 이용하는 것도 고려해야 할 것이다. 결론적으로 전처리 공정과 RO 공정을 통해 하수처리수의 재이용 시 영향을 줄 수 있는 물질들은 모두 효과적으로 제거되어 공업용수 또는 중수도로서 수질이 적합한 것으로 나타났다.

3.2. 막오염 지수(SDI & MFI)

각 공정의 MFI와 SDI는 비슷한 경향을 나타내었다. MFI 및 SDI 값의 변화를 통한 오염물질 제거 정도를 비교해 보았을 때, 작은 공경의 filter로 여과를 할수록 막오염지수가

Table 2. Comparison of the recommendation standards for the discharged treated waste water, reclaimed water, reused water, and the result of this study (mg/L)

Clause		BOD	COD_{Mn}	SS	TN	TP	Escherichia coli	Remark
[1]Sewage treatment Plant effluent	over $50m^3$/day	≤10	≤40	≤10	≤20	≤2	3000 ea/mL	Ecologic toxicity (TU) 1
	under $50m^3$/day	≤10	≤40	≤10	≤40	≤4	3000 ea/mL	Ecologic toxicity (TU) 1
[1]Standard of reclamated wastewater		≤10	≤20	≤2 (NTU)	-*	-*	No detection /100 mL	No N, P standard
[2]Recommendation standard for reuse		≤3	-*	≤6	≤10	≤1	No detection /100 mL	Differentiation of usage
RO process effluent		N.D.	1.0	0.0	2.3	N.D.	No detection /100 mL	Suitable for reuse

[1] The Ministry of Environment (2009)
[2] The Ministry of Environment (2007)
* No standard provisions

Table 3. Fouling indexes (MFI and SDI) of various pretreatment processes

Process	SDI_{15}	MFI (s/L^2)
Feed (Secondary effluent)	19.32*	1405.0
Feed → 0.45 μm	4.76	3.53
Feed → 0.45 μm → 0.05 μm	3.14	2.52
Feed → Coag.	5.57	456.7
Feed → Coag. → 0.45 μm	5.38	30.73
Feed → Coag. → 0.45 μm → 0.05 μm	4.48	4.61

* Use SDI_5 value, SDI_{15} was not measurable

낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. Table 3에 나타낸 바와 같이 원수는 MFI와 SDI_5 값이 매우 크게 나왔으며 막오염이 심하여 SDI_{10}과 SDI_{15}값은 측정조차 불가하였다. 또한 응집과정에서도 오염물질들은 상당량 제거가 되는 것으로 나타났지만, 응집전후의 막오염 지수를 비교해보면 원수의 특성과는 반대로 응집을 하지 않고 0.45 또는 0.05 μm filter로 여과하였을 경우 응집을 한 경우보다 매우 작은 막오염 지수 값을 나타냈다. 이는 응집 전 0.45 혹은 0.05 μm 이하의 미세한 오염물질들이 응집제의 영향으로 막에 대한 흡착력이 강해졌기 때문으로 판단된다. 이 두 가지 경우 모두 일반적으로 RO 공정의 적용에 적절한 막오염 지수의 범위(SDI value 4 이하)보다 다소 높게 나타났다.

3.3. 막오염 실험

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 FEEM을 이용하여 나타낸 3D image에 나타난 peak의 높이와 면적으로 미루어 볼 때 (Swietlik and Sikorska, 2004), 원수부터 RO 공정 전 단계까지 응집이나 0.45 또는 0.05 μm를 이용한 여과와 같은 전처리 공정에 의해서는 유기물의 양과 특성이 변화되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 위의 막오염 지수와 비교하였을 때 막오염 측정 시 사용된 MF막에 막오염을 유발한 것은 입자성 또는 콜로이드성 물질이라는 것을 알 수 있었으며 응집이나 여과공정에서 대부분 제거되어진 것으로 생각된다. 원수에 함유된 유기물은 RO 공정에 의해서 대부분 제거가 되었는데 이러한 결과를 미루어 볼 때 유기물이

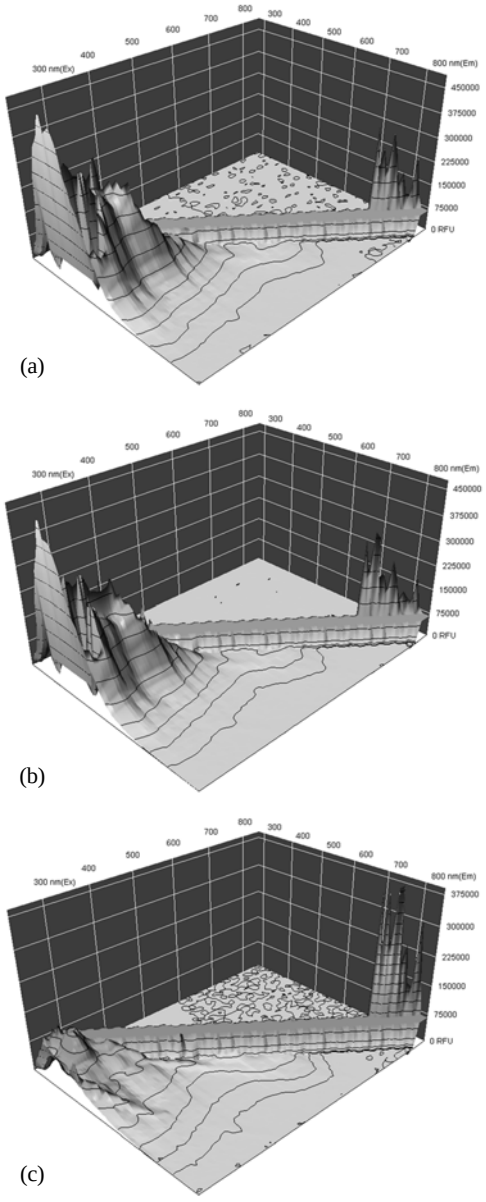


Fig. 3. 3D image analysis of organic matter by FEEM. (a) Feed Water, (b) Influent of RO process (Coag. → 0.45 μm → 0.05 μm filtering), (c) RO permeate

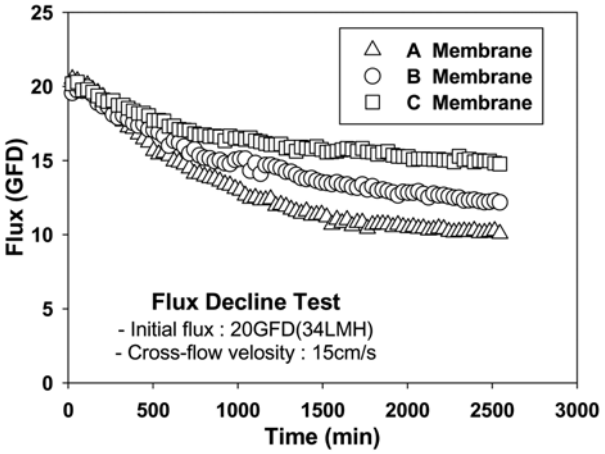


Fig. 4. LPRO membrane flux decline test (Feed water : Secondary effluent from B wastewater treatment plant treated by coagulation and 0.05 μm filtration).

RO 공정에서 막오염을 일으키는 주된 원인으로 작용한 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서와 같이 동일한 원수와 운전조건(permeate flux, cross flow)하에 lab scale RO unit을 사용하여 다양한 LPRO막을 48시간 동안 테스트한 결과 제조사별로 flux 감소량에 차이를 보였다. 이는 각 제조사의 막표면 특성에 의해 막오염 정도의 차이가 있었기 때문으로 보이며 다음의 막표면 분석을 통해서 원인을 규명하였다. RO 공정에서 유기물에 의한 막오염 저감을 위해서는 전처리 과정에서 본 연구에서 사용된 0.05 μm의 filter보다 더욱 공경이 작은 UF를 사용하거나 기타 유기물 제거에 효과적인 전처리 공정을 적용해야 할 것으로 보인다.

3.4. 막 표면 분석 결과

막오염에 크게 영향을 미치는 막표면 특성으로는 크게 roughness, zeta potential, contact angle 등이 있다. 하지만 이러한 막 표면의 특징과 막오염의 상관관계는 아직 명확하게 규명되지 않은 상태이다. 막 표면이 거칠수록 막오염이 잘 일어난다는 연구 결과(Nabe et al., 1997; Vrijenhoek et al., 2001)와 막표면 roughness보다 zeta potential과 같은 막의 화학적 특성이 막오염에 더 많은 영향을 끼친다는 연구(Kim et al., 2004)결과가 있다. 본 실험에 사용된 각 제조사별 막 표면분석에 대한 결과는 Table 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에 나타난 바와 같다.

Fig. 5에서와 같이 막표면의 roughness와 막오염 경향성을 보면 flux 감소가 가장 작은 C사 막의 표면 거칠기가 가장 낮게 나타났고, flux 감소가 가장 큰 A와 B사 막의

Table 4. Dynamic contact angle measurements before and after RO membranes were used

Corporation	Contact angle	
	Before use (°)	After use (°)
A	35.78	59.49
B	32.44	70.71
C	70.51	60.69

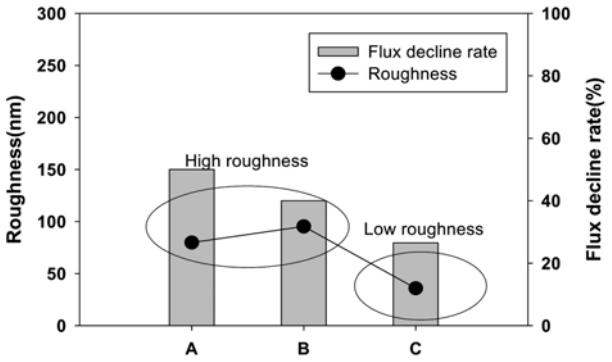


Fig. 5. Correlation between roughness and flux decline rate.

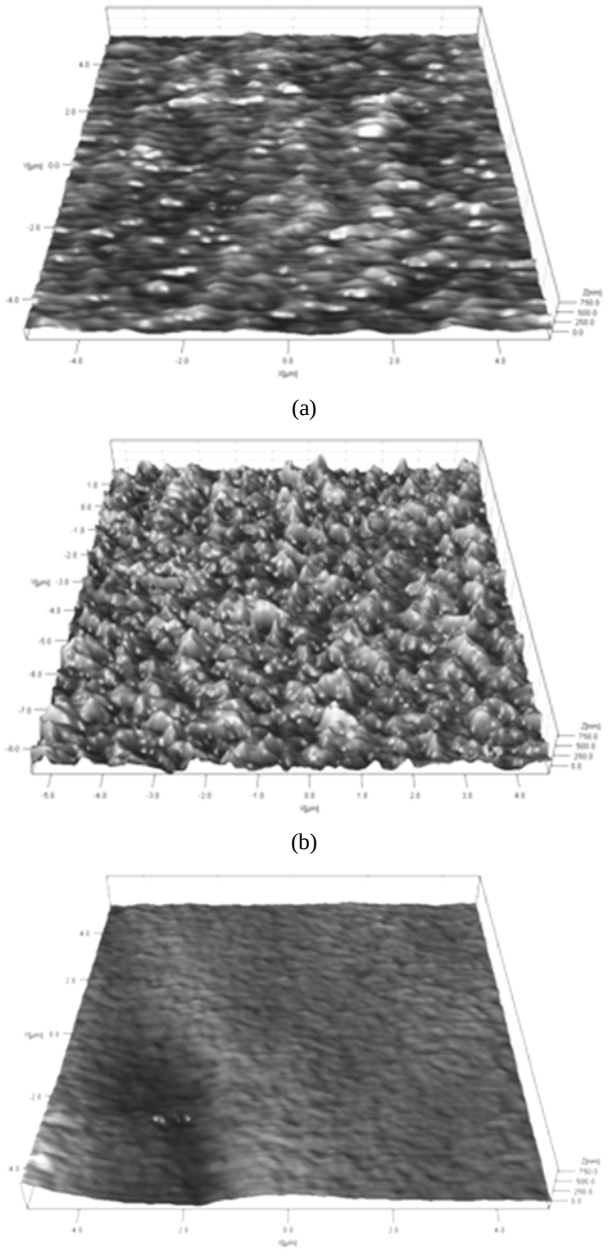


Fig. 6. AFM images of three LPRO membranes used showing significant differences in surface foughness. (a) A membrane, (b) B membrane, (c) C membrane

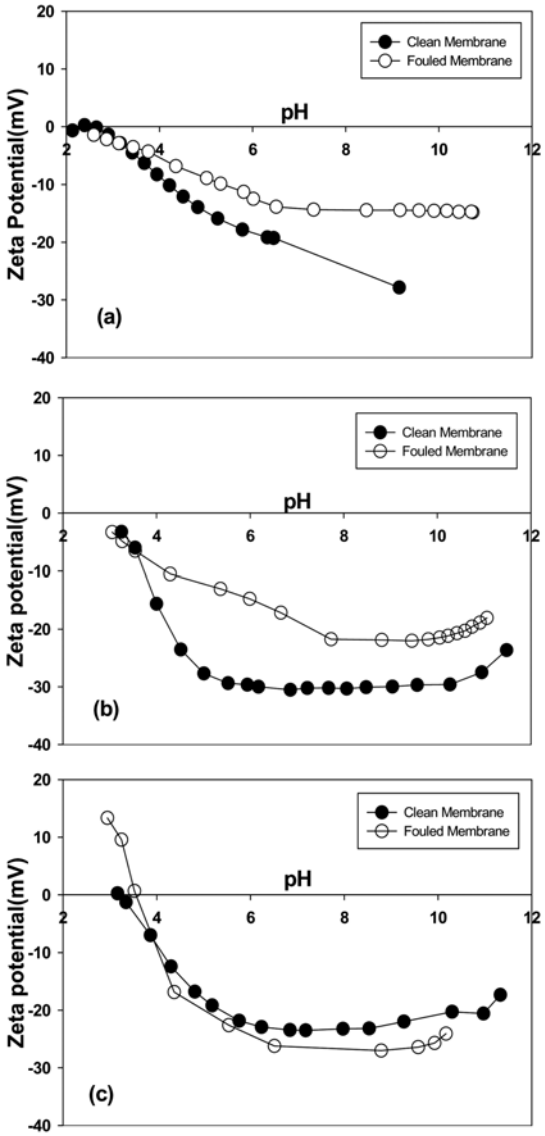


Fig. 7. Zeta potential of LPRO membranes used. (a) A membrane, (b) B membrane, (c) C membrane

roughness가 높게 나타났다. 따라서 roughness가 큰 막일수록 막오염이 잘 일어날 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 이는 roughness가 클수록 그 사이에 오염물질이 쌓여 막오염이 잘 일어난다는 Vrijenhoek 등(2001)의 연구와 일치하였다. Fig. 6의 AFM image를 통해서 막표면의 roughness의 차이를 알 수 있었으며, Table 4와 Fig. 7에 나타낸 Dynamic contact angle과 zeta potential의 값을 통해서 결과가 더욱 명확하게 나타났다. 막오염이 심하게 일어난 A와 B사의 막은 막 표면에 붙은 오염물에 의해 분석 값이 크게 변한 반면 C사의 막은 막오염이 적게 일어나 막표면 특성의 변화가 거의 나타나지 않았다. 즉, 막오염이 일어날 경우 오염물질이 막표면을 덮으면서 음전하를 나타내는 zeta potential의 값이 감소한 것으로 생각되며 막오염을 증가시키는 주된 물질이 소수성을 띠는 유기물이었기 때문에 contact angle 값이 증가된 것으로 생각된다. 하수처리수의 재이용을 위한 막의 표면특성 역시 중요한 것으로 나타났으며 원수에 포함된 2가 양이온이 막오염을 증가시킨다는 연구결과(Hong and Elimelech, 1997)를 볼 때 응집제의 선택과 응집공정의 적정성에 대한 고려가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

하수처리수의 재이용을 위한 RO 공정의 적용성 평가의 결론은 다음과 같다.

1) 응집공정과 0.45, 0.05 μm의 filter를 사용하여 전처리를 하였을 경우 입자성 물질(80% 이상)이나 미생물(99% 이상)은 제거되어 만족할만한 효과를 보였지만 이온성 물질과 유기물의 제거에는 효과가 없었다. 하지만 전처리 공정을 통과한 이온성 물질과 유기물은 RO 공정에 의해 80~99%가 제거되어 공업용수로서 적합한 수질로 나타났다.
2) 응집제에 의해서 pH나 T-P, alkalinity는 급격히 낮아졌지만, 막공정에서 막오염을 일으키거나 가중시킬 수 있는 TS 및 TDS는 증가하였고, SDI나 MFI와 같은 막오염 지수도 높게 나타났다. 따라서 응집제의 종류 및 침전시간 등의 재검토 및 해석을 통해 전처리에 적합한 최적응집조건에 대한 연구가 후속적으로 필요할 것으로 판단된다.
3) 원수의 특성뿐만 아니라 막 표면 특성에 의해서도 막오염 정도의 차이가 나타났다. 막오염에 가장 큰 영향을 미친 막표면의 특성은 roughness로 나타났으며 막 표면의 roughness가 큰 막일수록 막오염이 잘 일어났다. 따라서 roughness가 커서 막오염이 많이 일어난 막은 막표면의 오염물질에 의해서 dynamic contact angle이나 zeta potential값이 크게 변하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 금호환경기술 하수처리수 재이용을 위한 기초연구와 국토해양부 플랜트고도기술고도화사업의 연구비 지원(과제번호: 07해수담수B01-05)에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

문성용, 안세혁, 이상협, 박종훈, 홍석원, 최용수(2006). 정밀여과법 하수재이용 공정에서 오존의 전처리 효과에 관한 연구. *상하수도학회지*, **20**(4), pp. 535-543.

박기영, 맹승규, 김기팔, 이석헌, 권지향, 안규홍(2004). 물재이용을 위한 하수처리장 방류수 색도의 자외선처리에 미치는 과산화수소의 영향. *상하수도학회지*, **18**(3), pp. 377-384.

송경근, 안규홍(1997). 하수 처리수 재이용을 위한 고도처리로서 한외여과 공정의 적용에 관한 연구. *대한토목공학회지*, **17**(5), pp. 493-501.

안규홍, 안석, 맹승규, 김기팔, 홍준석, 정민우, 권지향, Zubair Ahmed(2003). 하수2차 처리수 재이용을 위한 저압 및 중압 고도산화시스템의 성능평가. *상하수도학회*

지, **17**(4), pp. 543-549.

안세혁, 이상협, 홍석원, 최용수, 홍승관(2006). 하수처리수 재이용에서 정밀여과막의 막오염 방지를 위한 전처리 공정에 관한 연구. *공동 추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 189-194.

오세현, 오호영, 장일현, 송석룡, 윤영찬, 송기섭(1998). 1차 처리 하수의 재이용을 위한 와권형 한외여과막 적용에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **20**(5), pp. 665-674.

이용두, 김창영, 박형건(2007). 하수처리장 방류수 재이용을 위한 섬유사여과기(PCF)/RO 적용에 관한 연구(1). *공동 춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, p. 183.

이철우, 손정기, 손인식, 한승우, 강임석(2005). 하수 2차 처리수 재이용을 위한 hybrid 응집 -UF 막분리 공정의 적용. *상하수도학회지*, **19**(5), pp. 605-612.

현승훈, 김응도, 홍승관, 안원영, 임성균, 김건태(2005). 침지형 MF 중공사막을 이용한 하수 2차 처리수의 재이용 연구. *상하수도학회지*, **19**(1), pp. 47-52.

환경부 물산업육성과(2007). 제 511호 하수처리수 재이용 가이드북.

환경부(2009). 하수도법 시행규칙.

APHA, AWWA, WEF (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. In: Andrew, D., Eaton, Lenore, S., Clesceri, Arnold, E. (eds.), 19th edition.

Hong, S. and Elimelech, M. (1997). Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, **132**, pp. 159-181.

Kim, I. C., Ka, Y. H., Park, J. Y., and Lee, K. H. (2004). Preparation of fouling resistant nanofiltration and reverse osmosis membrane and their use for dyeing wastewater effluent. *Ind. Eng. Chem.*, **10**(1), pp. 115-121.

Nabe, A., Staude, E., and Belfort, G. (1997). Surface modification of polysulfone ultrafiltration membrane and fouling by BSA solutions. *Journal of Membrane Science*, **133**, pp. 57-72.

Swietlik, J. and Sikorska, E. (2004). Application of fluorescence spectroscopy in the studies of nature organic matter fractions reactivity with chlorine dioxcide and ozone. *Water Research*, **38**(17), pp. 9791-3799.

Vrijenhoek, E. M., Hong, S., and Elimelech, M. (2001). Influent of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, **188**, pp. 115-128.