멤브레인(Membrane Journal)
Vol. 24 No. 5 October, 2014, 350-357

Print ISSN: 1226-0088
Online ISSN: 2288-7253
DOI: http://dx.doi.org/10.14579/MEMBRANE_JOURNAL.2014.24.5.350

하수방류수 재이용 MF/RO 공정에서 가압식 MF의 전처리 성능 향상 방안 연구

나 유 미† · 박 용 민 · 이 양 우 · 김 원 경* · 김 지 태** · 조 일 형**

코웨이, *삼보과학, **경기대학교

(2014년 1월 27일 접수, 2014년 3월 3일 수정, 2014년 9월 11일 채택)

Improvement of Pressurized MF Pretreatment in MF/RO Process for Reuse

Yumee Na†, Yong-Min Park, Yang-Woo Lee, Won Kyong Kim*, Ji-Tae Kim, and Il-Hyoung Cho****

Coway, *Sambo Scientific, **Kyonggi University

(Received January 27, 2014, Revised March 3, 2014, Accepted September 11, 2014)

요 약: 하수방류수 재이용을 위한 RO 전처리로 부유물질 및 콜로이드 물질의 제거를 위해 가압식 MF를 사용하였다. 남양주 J 하수처리장의 생물학적 처리와 모래여과를 거쳐 방류되는 방류수를 원수로 사용하였으며 100 톤/일 규모의 pilot plant를 1년 이상 운전하여 성능을 검토하였다. 가압식 MF에 의해 원수 수질 및 온도의 변화에 상관없이 flux 40 LMH 운전이 가능하였으며 전처리로 응집제를 넣어 용존 유기물을 응집할 경우 60 LMH 운전이 가능하였다. RO 공정에서 장기간 정지 이후 운전을 재개하였을 때 1단 pressure drop이 급격히 증가하는 현상이 나타났고 이러한 결과는 배관 내 형성된 유기물과 이온물질의 복합오염물질이 1단 RO막에 침적된 결과로 사료된다.

Abstract: Pressurized MF membranes are used to remove suspended solid and colloidal materials of wastewater treatment plant effluent as the pretreatment of RO in reuse water production process. Membrane operation data and pollutants removal efficiency are investigated using 100 t/d scale pilot plant in J wastewater treatment plant located in Namyangju city. 40 LMH flux of pressurized MF membrane are obtained in various turbidity and temperature condition. Coagulation of dissolved organic enables flux improvement of MF from 40 LMH to 60 LMH. Pressure drop of 1st RO elements rapidly increased after long-term pause, which is because the complex contamination of organic matter and ionic substances of plumming systems.

***Keywords**: pressurized MF, wastewater reuse, coagulation pretreatment*

1. 서 론

최근 환경부는 물 재이용 촉진 및 물산업 활성화를 기대하며 '물 재이용시설 설계 및 유지관리 가이드라인[1]'을 제정하여 물 재이용 시설 현장에 보급하였다. 이에 부응하여 서울시는 2020년까지 서울시내 전체 물 사용량의 14.4%를 빗물, 수도, 하수 등 한번 사용하고 버려지는 물을 재이용해 충당한다고 밝혔다. 크게 세 분야로 추진하는데 빗물이용은 2010년 39 만톤/년에서 2030년 2.4 백만톤/년으로 약 6.1배 늘리고 중수도는 약 6.5배 늘린 18.4 백만톤/년 하수처리수재이용 약 4배 늘린 188 백만톤/년을 재사용한다[2]. 재이용 목표에 하수처리수재이용이 가장 많은 부분을 차지하여 향후 하수처리수재이용 사업이 증가될 전망이다.

'물 재이용시설 설계 및 유지관리 가이드라인'에 따르면 하수처리수 재이용시설은 공공하수처리시설 부지 내 설치하는 것을 원칙으로 하고 있다. 생산수질은 현재 처리장 방류수질, 하폐수처리수 재처리수의 용도별 수질기준 및 수요자의 요구수질을 고려하여 합리적으로 결정하며 처리시설 및 송배수시설을 갖추어야 한다. 하수처리시설 부지 내 처리시설 및 송배수시설을 갖추기 위해서는 가용 부지의 제한조건을 만족해야 한다. 재이용수 처리공법으로는 급속여과법, 고속응집침전법,

†Corresponding author(e-mail: envumi@gmail.com)

Table 1. Membrane Specifications

	Microfiltration		Reverse osmosis	
Manufacturer	GE		Woongjin Chemical	
Model	ZW1500		RE-4040FE	
Materials	PVDF (NIPS)		PA (Polyamide)	
Configuration	Hollow Fiber (outside-in)		Spiral Wound	
Area/module	51.1 m^2		7.9 m^2	
Modules	2		3 : 2	
Dimensions	1920 (L) mm		40 (L) 4 (OD) inches	

활성탄흡착법, 막분리법 등이 검토되고 있으나[1] 부지 소요가 가장 적은 공법은 막분리법이다[3].

현재 국내 분리막을 이용한 하폐수 재처리 시장은 일부 공업용수 공급을 위한 RO 공정을 제외하면 거의 형성되어 있지 않다. RO 공정의 안정적인 운전을 위해 전처리 공정으로는 콜로이드 물질의 제거가 가능한 pore size 0.1 μm 미만의 MF가 주로 선정되며 주로 침지형 MF가 선정되었다. 포항 하수 재이용사업, 인천 가좌 하수 재이용사업, 포천 재이용 사업에는 GE의 침지형 분리막과 웅진케미칼 역삼투막이 선정되었으며 대산 공업용수 재이용에는 Siemens 가압식 MF와 웅진케미칼의 역삼투막이 선정되었다.

정수분야와는 달리 하수처리수를 이용한 공업용수 재이용은 낮은 산업용 용수값으로 인해 사업성을 확보가 어려워 사업이 활발하게 이루어지지는 않는 실정이다. 통상적으로 MF/RO 등 막을 이용한 하수 재이용 기술은 초기 설치비가 높으며 하수방류수에 포함된 유기물 및 이온물질이 분리막에 막오염을 일으키면 재이용수 생산을 위한 펌프 동력비와 분리막 세정에 필요한 약품비로 운영비가 증가되는 단점이 있다. 또한 하수방류수는 시간과 계절에 따라 수질과 수온이 변화하고 수질이 악화되거나 수온이 저하되면 분리막 운영 압력이 증가된다.

분리막을 이용한 하수방류수 재이용 공정이 사업성을 확보하려면 RO 전처리 MF 공정이 경제적으로 운영되어야 하며 MF의 flux를 향상시켜 초기 사업비를 낮추고 세정주기를 길게 확보하여 운영비를 절감해야 한다. flux를 높게 운전하고 세정주기를 증가시키기 위한 목적으로 본 연구에서는 MF 및 RO 분리막에 막오염을 유발하는 유기물을 MF 전단에 응집제로 응집하여 제어하였다. 가압식 MF 분리막 플럭스를 40 LMH과 60 LMH으로 구분하여 응집 전처리 전/후의 CIP주기와 TMP상승 속도를 비교하였다. 또한 전처리에 따른 유기물 제거 효율 및 가압식 MF 분리막에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실 험

2.1. 분리막과 모듈

본 연구에서 사용한 GE사의 ZW1500 중공사 가압식 MF 분리막과 웅진케미칼의 RE-4040FE RO 분리막 사양은 Table 1과 같다. ZW1500 가압형 MF 분리막은 하부에 원수와 공기 주입구가 있으며 상부에서 처리수가 생산되며 상부 옆에 역세수 및 농축수의 배출구가 있다. 중공사의 ID/OD는 0.47/0.90 mm이며 pore size는 0.02 μm이다. RO 분리막은 1단 vessel 3열, 2단 vessel 2열로 3 : 2 구성으로 되어 있으며 vessel 당 6개 element로 되어 총 30개 element가 장착되어 있다. 가압식

Table 2. Operating Conditions of Pressurized MF

	1st condition (12/3~12/22)	2nd condition (1/8~4/24)	3rd condition (8/23~8/30)	4th condition (10/1~10/30)
Pretreatment condition	no coagulation	no coagulation	no coagulation	5 ppm PAHCS Line Mixer
Flux	40 LMH	40 LMH	60 LMH	60 LMH
Recovery	94%	90%	92%	92%
Temperature	7.7~12.9°C	6.7~17.7°C	23.9~30.2°C	14.0~23.7°C

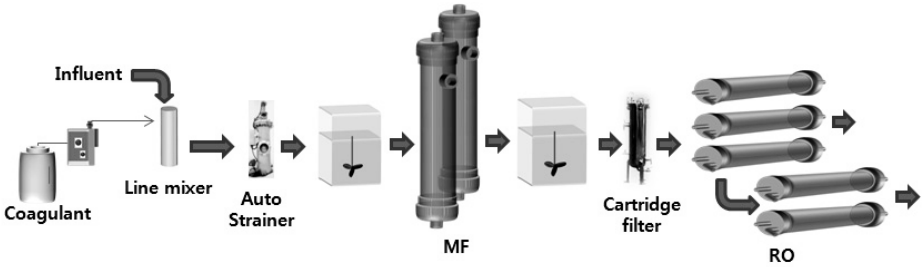

Fig. 1. Process flow schematic diagram MF and RO system.

MF분리막 전단에는 협잡물을 제거하기 위한 auto-strainer (400 μm)가 있으며 RO 분리막 전단에는 MF 생산수 저장과정에서 생성될 수도 있는 부유물을 제거하기 위한 catridge filter (5 μm)가 있다.

2.2. 실험방법

2011년 12월부터 2013년 10월까지 남양주 J 하수처리장에서 98~14 7m^3/day의 처리용량을 가진 실증 파일럿 플랜트를 운영하였다. 원수는 고도처리, 총인처리, 모래여과로 구성되어 있는 J 하수처리장 방류수를 사용하였다. 전체 공정도는 Fig. 1과 같으며 MF 분리막의 TMP와 탁도 RO 분리막의 pressure drop과 TDS의 연속 데이터를 확보하였다.

2011년 12월부터 2012년 4월까지는 응집 전처리 없이 가압형 MF를 40 LMH로 운전하였다. 40 LMH 안정적 결과 확보 이후 플럭스를 60 LMH로 높여 무응집 조건과 PAHCS 5 ppm을 line mixer로 주입한 응집조건에서 운전하였다(Table 2). PAHCS는 폴리수산화 염화황산알루미늄(Poly Aluminium Hydroxy Chloro Sulfate)로 알루미늄계 응집제이다. 황산알루미늄과 PAC와 비교하여 응집 이후 잔류 알루미늄의 농도가 가장 적은 응집제로 알려져 있다[4]. 응집 전처리 이후 잔류 알루미늄은 RO 분리막의 오염물질이 될 수 있기 때문에 잔류 알루미늄이 적은 응집제를 사용하였다.

Table 3. Operation Method of Pressurized MF in Wastewater Reuse

Method	Dead-end filtration
Filtration Back pulse with aeration Feed-flush	14 min (recovery 92%) 1 min (3.4 m^3/hr per module, 66 LMH) 1 min (3.4 m^3/hr per module)

MF 운전은 회수율에 따라 여과시간을 조정하였고 공기와 같이 시행되는 역세(back pulse with aeration)는 1분, 원수공급과 같이 농축수를 배출하는 feed-flush는 1분 시행하였다(Table 3).

RO 운전은 회수율 75%로 운전하였으며 MF 처리수의 CODcr 농도가 10 mg/L 이상이 되어 안정적인 RO 운전을 위해 응집 전처리에 따른 유기물 제거 효율 평가를 위한 본 연구 기간에는 설계 플럭스(17.6 LMH) 이하로 유지하였다(Table 4).

2.3. 실험분석

막여과 공정을 평가하면서 분석한 수질실험은 Table 5와 같으며 MF 분리막의 원수와 처리수의 turbidity, 온도, pH와 RO 분리막의 원수, 처리수, 농축수의 TDS는 연속적으로 측정되었다.

Table 4. Operating Condition of RO

	1st condition (12/3~12/21)	2nd condition (1/12~3/7)	3rd condition (3/20~4/4)	4th condition (4/11~4/24)	5th condition (8/23~10/30)
Array (1st : 2nd)	3 : 2	3 : 2	2 : 1	2 : 1	2 : 1
Flux	10.4 LMH	8 LMH	15.2 LMH	14 LMH	12.6 LMH
Recovery	73.7%	76%	74.5%	75.7%	75%

Table 5. Analytical Method and Instruments

Items	Units	Analytical methods and instruments
Turbidity	NTU	1720E, HACH
TDS	mg/L	AC200, AX410(low level), ABB
Conductivity	μS/cm	VSTAR20, Thermo
SS, COD_{Cr}, COD_{Mn}	mg/L	Standard method
TOC	mg/L	TOC analyzer, GE Analytical Instrument
TN	mg/L	HACK DR/2500 Method 10071
NO3N, NH4N	mg/L	ICS-2000 IC, DIONEX
TP	mg/L	HACH DR/2500 Method 8190
Na, Al, Ba, Ca, Mg, Mn, Fe, K, SiO_2	mg/L	ICP-MS, Perkinelmer

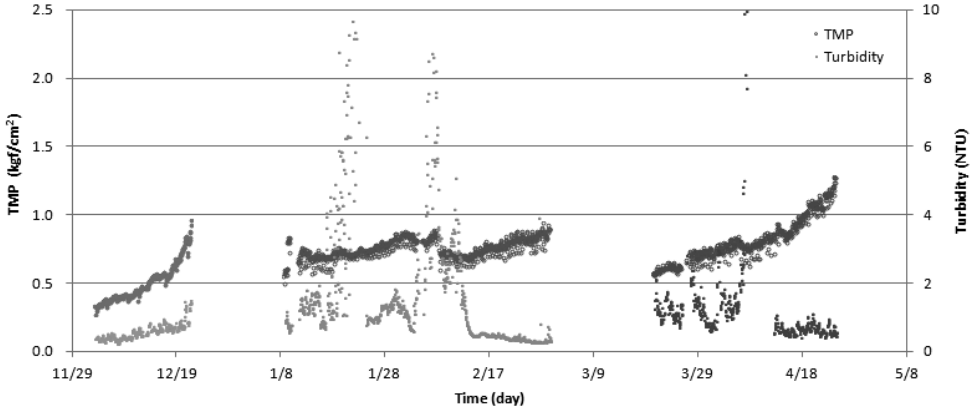

Fig. 2. TMP and turbidity in 40 LMH MF operation.

3. 결과 및 고찰

3.1. 가압식 MF를 통한 막여과 공정

응집 전처리 없이 40 LMH 조건으로 2012년 12월 3일부터 2013년 4월 24일까지 운전한 결과는 Fig. 2와 같다. 2012년 12월 3일부터 12월 22일까지 회수율 94%로 20일, 2013년 1월 8일부터 2월 28일, 3월12일부터 4월 24일까지는 회수율 90%로 각각 52일, 43일 운전이 가능하였다. 8°C~15°C의 원수 수온에도 최대 52일 까지 0.3 kgf/cm^{2}의 TMP 상승을 보여주며 안정적인 운전이 가능하였다. 원수 탁도는 하수처리장 운영에 따라 일시적으로 상승하여 TMP상승에 영향을 주고 있으나 탁도 저하 시 다시 안정적인 TMP로 회복되는 결과를 보여주고 있다.

응집 전처리가 가압형 MF의 차압 상승 속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 무응집조건과 응집제 투입조건(5 mg/L PAHCS)을 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 응집제 투입량은 jar test를 통해 용존성 유기물이 가장 많이 제거되는 결과에 따라 선정되었다. 무응집조건보다 응집제 투입조건에서 TMP 상승속도가 3배 이상 저하되는 것으로 나타났다. 무응집조건(no coagulation)에서는 8월 23일부터 8월 30일까지 8일 운전이 가능하였

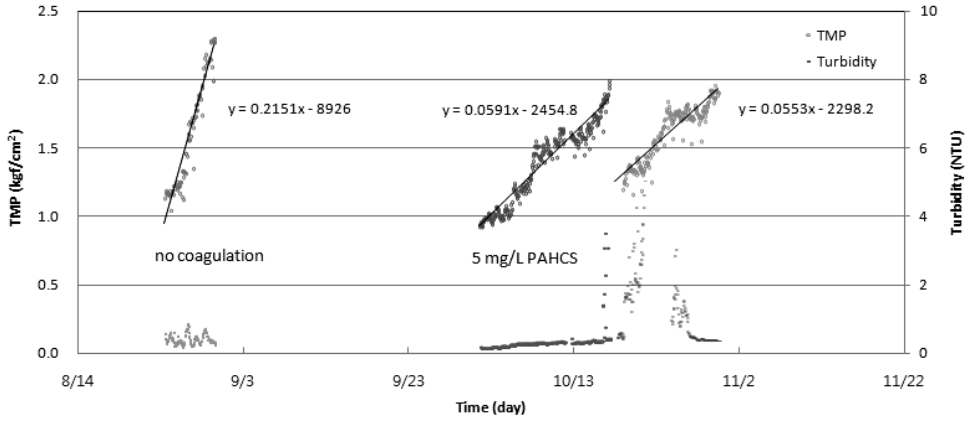

Fig. 3. TMP and turbidity in 60 LMH MF operation.

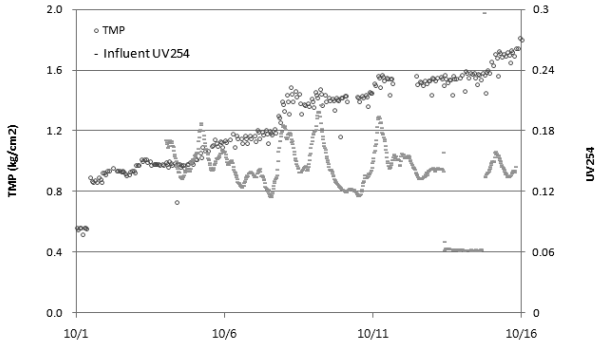

Fig. 4. TMP and UV_{254} of MF operation in 5 ppm PAHCS pretreatment condition.

다. 10월 1일부터 PAHCS 5 mg/L를 Line Mixer에서 원수와 혼합하여 주입한 결과 10월 16일까지 총 16일 운전하여 무응집 조건에서보다 CIP주기가 2배 증가하는 것을 알 수 있었다. 동일한 조건으로 응집제를 주입하여 10월 18일에서 10월 30일까지 13일 운전할 수 있었는데 이 기간 동안에는 원수의 탁도가 급격히 증가하여 초기 TMP가 10월 1일보다 높게 시작되어 이전 구간에서 16일 운전되었던 것보다는 3일 적은 13일 운전된 것으로 판단된다.

용존유기물의 간접지표인 UV254를 MF 원수를 연속적으로 측정한 결과는 Fig. 4와 같다. UV254의 변화와 TMP의 변화 추이가 비슷하게 나타났으며 이것은 원수의 용존유기물이 분리막의 TMP에 영향을 주고 있다는 것을 의미한다.

일반적으로 분리막의 오염현상을 최소화하기 위하여 전처리로 혼화/응집/(침전)적용하지만[5] 전처리 시설이 추가될수록 부지면적, 설치시설, 약품비가 증가된다[6]. 그러나 본 연구에서 응집 전처리에 의해 가압형 MF의 플럭스는 40 LMH에서 60 LMH로 50% 향상이 가능하고 이에 따라 MF의 설치량과 소요면적의 33% 절감이 가능하다. 또한 하수방류수는 정수장과 같이 고탁도 원수가 유입되는 경우는 없기 때문에 응집 전처리 시설은 응집제와 원수를 혼화를 위한 급속혼화장치만을 요구하여 전처리에 따른 부지면적 증가가 크지 않다. 따라서 응집 전처리를 통한 가압형 MF의 고플럭스 운전 데이터 확보가 향후 하수방류수 재이용 경제성 판단을 위해 필요하다고 판단된다.

3.2. RO를 통한 2단 막여과 공정

RO 분리막은 원수압 및 pressure drop (원수압과 농축압과의 차이)을 Fig. 5에 나타내었다. Flux를 가장 높게 운전했던 Table 4의 3rd와 4th 조건에서 가장 높은 원수압이 관찰되었다. 5~7월 장기간 운전이 정지되었던 이후 5th조건이 운전이 시작된 8월 23일부터 1단 pressure drop의 급격한 증가로 인해 1단 원수압이 증가로 운전을 정지하여 8월 30일 분리막을 점검해 본 결과 Fig. 7의 좌측 사진과 같이 1단 막이 2단 막에 비해 막오염이 많이 진행된 것을 알 수 있었다.

오염이 진행된 1단 막의 5개 element 중에 첫 번째 element와 2단막의 5개 element 중에 첫 번째 element만 분리하여 HCl 2,000 mg/L에 12시간 침적한 이후 세정 전후 농도를 측정하여 1단과 2단 오염 정도를 비교한 결과는 Table 6과 같다. 1단 RO막이 2단 RO막보다 모든 항목에서 더 높은 농도의 오염현상이 진행된 것으로 나타났다. 장기간 미운전으로 인해 배관에 생성된 유기물 및 이온성분들이 복합된 오염물질이 분리막에

Table 6. Concentration and Increase Rate of Waste Solution After Cleaning with HCl

	Na	Mg	Mn	Ba	Al	SiO_2	Fe	K	Ca	COD_{cr}
RO Influent (mg/L)	45.37	5.44	0.028	0.023	0.012	11.87	0	13.86	30.71	9
HCl (mg/L) (a)	7.37	2.46	0	0.017	0.05	6.5	0	2.56	22.91	15
RO 1st waste solution (mg/L) (b)	13.83	4.93	0.35	0.356	26	9.85	7	4.58	71.82	150
increase rate ((b-a)/a)	88%	100%	-	1994%	51900%	52%	-	79%	213%	900%
RO 2nd waste solution (mg/L) (c)	8.57	3	0.057	0.043	1.1	7.78	3.8	3.11	33.68	15
increase rate ((c-a)/a)	16%	22%	-	153%	2100%	20%	-	21%	47%	0%

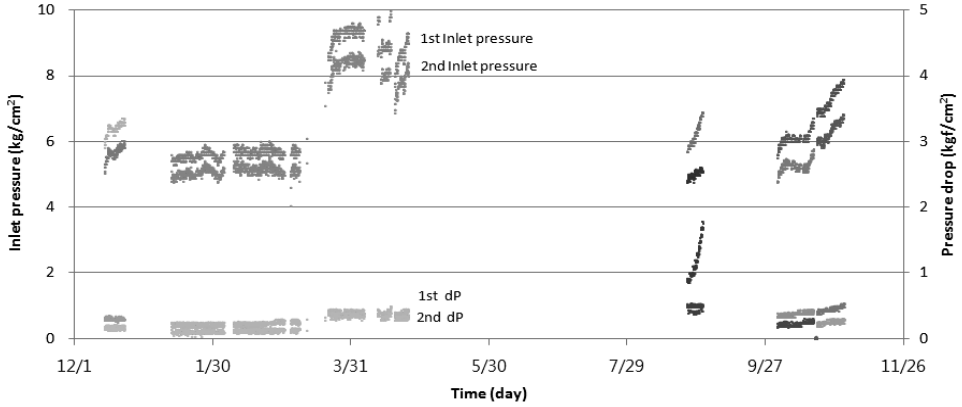

Fig. 5. Inlet pressure and pressure drop of RO process.

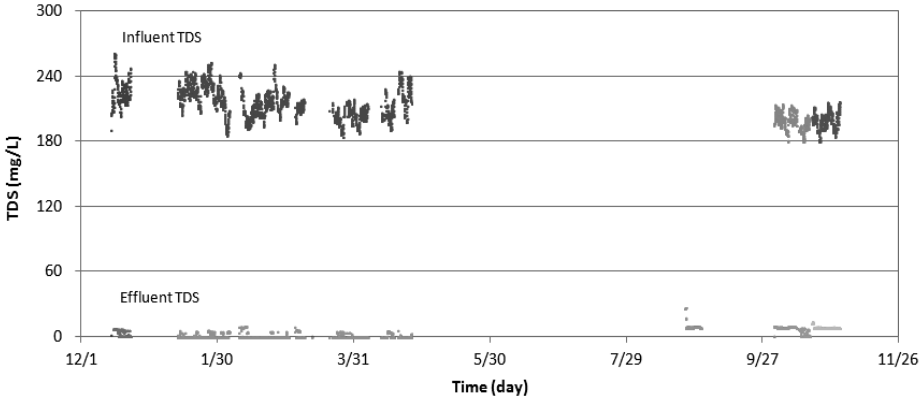

Fig. 6. Influent TDS and Effluent TDS of RO process.

침적되어 생긴 현상으로 사료된다. RO CIP 이후 10월 1일부터 10월 30일까지 운전된 RO막을 분리하여 점검해본 결과는 Fig. 7의 오른쪽 사진과 같으며 8월 30일에 관찰되었던 1단 RO막의 오염현상은 나타나지 않았다.

3.3. 수질 결과

수질 분석 결과는 응집 전처리 실시 이전과 이후로 나누어 Table 7에 나타내었다. 응집 전처리 이후 원수는 응집제를 주입하고 line mixer를 통한 급속교반과 혼화기를 통한 완속교반를 거친 이후 MF로 들어가기

Table 7. Water Quality Analytical Data of Membrane Operation

	MF Influent	MF permeate	MF Influent	MF permeate	RO permeate
	without coagulation (12/12/11~13/8/28)		with coagulation (13/10/5~13/10/27)		
SS (mg/L)	0.57 (0~2)	0	33 (28~38)	0	0
COD_{Cr} (mg/L)	13.5 (3~28)	13.1 (6~20)	15.9 (10~19.1)	10.9 (8~14.5)	2.2 (0~3)
COD_{Mn} (mg/L)	9.55 (4.8~14.6)	7.81 (4.8~12)	12 (9.2~14.8)	6.6 (4.1~9)	0.37 (0~0.8)
TOC (mg/L)	4.95 (2.61~7.03)	4.22 (2.38~5.5)	2.78 (2.6~2.95)	2.65 (2.26~3.04)	0.46 (0.3~0.6)
TN (mg/L)	8.78 (5.2~13.1)	8.5 (4.9~11.1)	6.45 (5.9~7)	5.85 (5.8~5.9)	0.4 (0~1)
NH_4-N (mg/L)	6.18 (0.52~9.85)	5.91 (0.04~9.9)	4.4 (4.0~4.8)	3.39 (3.0~3.77)	0.2 (0.12~0.4)
NO_3-N (mg/L)	3.65 (0.6~9.9)	2.86 (0.3~9.6)	2.6 (1.2~5.2)	2.4 (2.3~2.5)	0.17 (0~0.3)
TP (mg/L)	0.28 (0~0.76)	0.15 (0~0.64)	0.23 (0.17~0.29)	0.1 (0~0.15)	0.15 (0.06~0.21)
Al (mg/L)	0.03 (0~0.08)	0.02 (0~0.05)	0.01 (0~0.02)	0.005 (0~0.01)	0
Ca (mg/L)	31.5 (26.5~41.2)	31.3 (26.6~41.9)	33.1 (31.3~34.8)	33.2 (31.8~34.7)	0.02 (0~0.1)
Mg (mg/L)	5.64 (3.9~6.92)	5.51 (3.95~6.39)	6.4 (5.95~6.75)	6.35 (5.99~6.71)	0
conductivity (μS/cm)	507 (380~665)	520 (370~759)	559 (545~574)	564 (546~582)	42.2 (10.9~54.7)

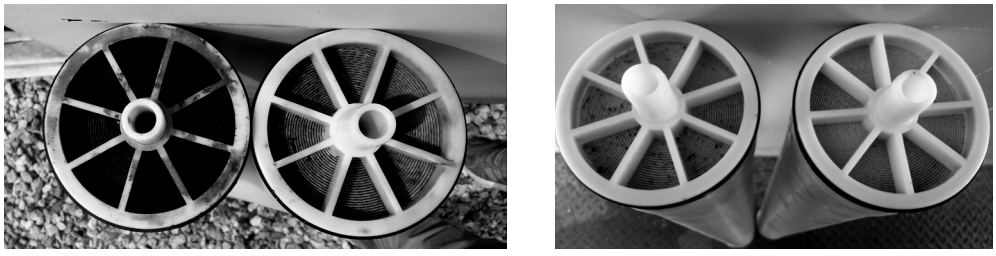

Fig. 7. Comparison of RO fouling in 30th August (left) and 30th October (right).

전의 용수를 말한다. MF 원수로 사용되는 남양주 J 하수처리장 방류수는 유기물 및 알루미늄, 바륨 등 이온농도에서 국내 다른 하수처리장 방류수와 비슷한 정도의 수질로 나타났다. RO 처리수는 MF 이전에 응집제 주입과 관계없이 Fig. 6과 같이 일정한 수질이 확보되어 전처리에 따라 수질을 분리하여 나타내지 않았다.

MF의 하수처리장 방류수 CODcr 제거율은 3%이나 응집제 5 mg/L 주입 시 CODcr 제거율이 31.4%로 증가되었다. MF의 원수는 부유물질이 거의 없었으나 응집제 주입 시 용존유기물과 응집제의 플럭이 형성되어 부유물질이 33 mg/L로 증가되는 것을 알 수 있었다.

PAHCS는 알루미늄계 응집제로 PAC와 Alum 보다 응집 이후 잔류 알루미늄의 농도가 적은 특징이 있어 사용하였고 응집 전처리 시 MF 처리수에 알루미늄 농

도는 0.005 mg/L로 나타났고 응집제 주입으로 인한 MF 처리수에 알루미늄 농도는 나타나지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수방류수 재이용 공정 개발을 위해 응집 전처리, 가압형 MF, RO 공정을 100 톤/일 규모로 남양주 J 하수처리장에서 12개월 동안 운전하여 응집 전처리에 따른 가압식 MF 성능향상을 검토하였다.

1) 가압식 MF 40 LMH 조건에서는 응집 전처리 없이도 동절기에 회수율 94%로 운전 가능하고 응집 전처리를 통해 플럭스가 50% 향상된 60 LMH 운전이 가능한 것을 확인하였다. 가압형 MF 60 LMH 운전 시 무응집에 비해 응집 전처리를 통해 TMP 상승율이 3배 저하되는 것을 알 수 있었다.

2) 하수방류수의 유기물은 대부분 용존 유기물로 MF 공정만으로는 유기물이 효과적으로 제거되기 어렵기 때문에 용존유기물은 응집을 통해 제거효율을 높여 후단 RO 공정의 유기오염 부하를 낮추어야 한다. 응집 전처리를 통해 MF 처리수의 CODcr 제거율은 3%에서 31.4%로 증가하는 것을 알 수 있었으며 MF의 원수는 부유물질이 거의 없었으나 응집제 주입시 용존유기물과 응집제의 플럭이 형성되어 부유물질이 33 mg/L로 증가되는 것을 알 수 있었다. 응집제 투입에 따른 MF 처리수의 알루미늄 증가는 나타나지 않았다.

3) RO 공정에서 장기간 정지 이후 운전을 재개하였을 때 1단 pressure drop이 급격히 증가하는 현상이 나타났고 이러한 결과는 유기물과 이온물질의 복합오염 물질이 1단에 RO막에 침적된 결과로 사료된다.

감 사

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 하·폐수고도처리기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호 : GT-13-B-02-001-4).

Reference

1. Korea Water and Wastewater Works Association, “Guideline for water reuse facility design and maintenance management” (2013).
2. “Appropriation 14.4% of water usage by means of rainfall and wastewater in 2020”, Seoul (2013).
3. Korea Institute of Material Science, “Material Technology White Paper” (2010).
4. J. S. Kim, Master Dissertation, Univ. of Chonbuk National, (2008)
5. J. D. Lee, S. H. Lee, M. H. Jo, P. K. Park, C. H. Lee, and J. W. Kwak, “Effect of coagulation conditions on membrane filtration characteristics in coagulation-microfiltration process for water treatment”, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 3780 (2000).
6. J. Kim, B. Mun, H. J. Jang, J. Kim, and B. Kim, “Increase of recovery ratio by two stage membrane process the pressurized PVDF membrane followed by submerged PE membrane”, *Membrane Journal*, **23**(1), 45-53 (2013).