

MBR 유출수 재활용을 위한 RO 막분리 공정에 대한 연구

윤현수², 김종수^{1*}

¹선문대학교 토목공학과, ²(주)지에스텍

Application of RO Membrane Process for Reuse of MBR Effluent

Hyun-Soo Yoon² and Jong-Soo Kim^{1*}

¹Department of Civil Engineering Sunmoon University, ²Green Solution Technology

요 약 S전자에서 발생하는 유기성 산업폐수의 생물학적 처리인 MBR 공정의 유출수를 LCD 제조공정의 용수로 재사용하기 위하여 32 m³/d 규모의 pilot-scale RO 막분리 공정을 구축하고 RO 막분리 공정의 운전압력과 투과유량에 따른 막간차압 및 CIP 주기 그리고 TOC와 전기전도도의 용질분리에 대한 영향을 분석하였다. MBR 공정의 유출수는 일반적인 처리수 재사용 수질기준을 만족하나 LCD 제조공정의 S전자 자체 재사용 용수 수질기준인 TOC<1mg/L와 전기전도도<100 μ S/cm를 만족하지 못하므로 후속 처리가 불가피하다. RO 막분리 공정의 회수율을 85%로 일정하게 유지한 상태에서 투과유량을 12.5 LMH에서 22.0 LMH로 증가시키면서 운전한 결과 모든 투과유량에서 RO 투과수는 자체 재활용 용수 수질기준을 만족하였다. 그러나 RO 막오염에 의한 막간차압이 상승되어 CIP 주기는 투과유량이 증가되면 짧아지는 효과가 나타났다. RO 막분리 공정의 최적 운전인자는 회수율 85%에서 투과유량 16.5~18.5 LMH이었으며 운전압력은 6.7~12.4 kgf/cm², CIP 주기는 투과생산량/운전비에 적절한 20일~25일로 나타났다.

Abstract Reuse feasibility of MBR effluent of S Electronic Company's organic wastewater as a LCD process water was investigated by a 32 m³/d pilot-scale RO membrane process. The effects of operating pressure and permeate flux at constant 85% recovery of RO membrane process using MBR effluent were analyzed for transmembrane pressure and period for CIP by membrane fouling as well as rejection of TOC and conductivity. MBR effluent requires additional treatment to meet the LCD process water quality criteria of TOC<1 mg/L and conductivity<100 μ S/cm which is stringent as compared with those of conventional reuse water quality criteria. The RO process operated at 85% recovery with stepwise increasing of permeate fluxes from 12.5 LMH to 22.0 LMH was able to meet LCD process water quality criteria. However, the transmembrane pressure increased and the period of CIP decreased as increasing permeability fluxes due to fouling of RO membrane. The optimum operational conditions of RO membrane process were permeate fluxes of 16.5~18.5 LMH with operating pressure of 6.7~12.4 kgf/cm² and CIP period of 20~25 days at constant 85% recovery.

Key Words : Reuse of MBR effluent, RO Process, Operating Pressure, Permeate Flux, Transmembrane Pressure, Solute Separation

1. 서론

산업의 발달과 인구의 도시집중, 산업폐수와 생활하수에 의한 수질오염은 수자원 관리에 심각한 문제로 떠오르고 있다. 우리나라의 수자원장기종합계획(2006~2020)에 따르면 2003년 기준 1인당 가용수자원은 1,512 m³으

로 물 스트레스 국가로 분류되고 있으며 현재 추세의 물 사용량이 증가되면 물 부족사태의 발생은 예상이 아닌 현실로 그 대책이 시급하지 않을 수 없다[1].

물 부족 사태의 해결을 위해 새로운 용수공급원의 개발이 필요하며 최근 시도되고 있는 방법은 (1) 하폐수의 재사용, (2) 우수의 활용, 그리고 (3) 해수담수화가 있다.

*교신저자 : 김종수(jskim@sunmoon.ac.kr)

접수일 10년 02월 12일

수정일 10년 04월 07일

게재확정일 10년 04월 09일

이중 하폐수 처리수의 재사용은 공학적 접근이 가능한 방법으로 환경부는 하폐수의 재사용에 대한 이용목적별 수질 권고기준안을 표 1과 같이 제시하고 있다.[2] 수질 권고기준안의 항목은 일반적인 활성슬러지 공정 혹은 영양염류 제거를 위한 고도처리를 연계한 활성슬러지 공정에 의하여도 만족될 수 있으나 보다 더 안정적이며 처리 효율이 높은 공정이 요구되기도 한다. 최근 개발되어 실용화되기 시작한 생물학적 처리에 MF(microfiltration) 혹은 UF(ultrafiltration)를 장착한 MBR (membrane bioreactor) 공정이 시도되고 있으며 처리수 재사용을 위한 수질 권고 기준안을 만족하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 공업용수로 재사용 하는 경우 해당 산업체는 공정 특성상 자체적으로 수립된 보다 엄격한 수질기준을 요구하며 이를 만족하기 위하여 MBR 공정에 역삼투(RO, reverse osmosis)를 연계한 공법이 적용되고 있다. S 전자의 경우 LCD 제조공정의 공업용수로 재사용을 위한 자체 수질 기준으로 TOC<1 mg/L 그리고 전기전도도 <100 μ S/cm를 적용하고 있다.

RO 막의 수투과도와 용질분리에 대한 이론은 RO 막은 다공성이며 용매인 물이 용질보다 선택적으로 막표면에 수착(sorption)되고 압력에 의하여 세공을 확산, 투과함으로써 용질이 분리된다는 preferential sorption-capillary flow mechanism[3]에 근거하고 있다. 이 이론에 의하면 RO 막에는 적정 수투과도와 용질분리를 만족시키는 임계 세공직경이 존재하며 세공직경이 작으면 용질 분리 효율은 증가되나 수투과도는 감소하고 세공직경이 크면 분자량이 작은 용질 중 일부는 세공을 투과하게 되어 용질분리 효율은 감소하나 수투과도는 증가하게 된다. RO 막오염은 막표면 혹은 막세공에 이물질의 축적으로 인한 일반적인 수투과도 감소현상을 통칭하여 정의되고 있다. RO를 이용한 하폐수의 재활용이나 해수담수화의 연구에서 막오염에 의한 운전압력의 상승과 CIP(clean in place) 주기의 필요성 그리고 수투과도의 감소는 막분리 공정의 실용화에 있어서 경제성과 관련하여 가장 큰 걸림돌로 작용한다.[4-9] 따라서 RO 막분리 공정에서 운전 인자인 운전압력에 의한 수투과도, 용질분리, 막오염에 대한 영향을 분석한다는 것은 공정의 최적 운전조건 확립에 필수적이다.

본 연구는 S전자에서 발생하는 유기성 산업폐수를 처리하는 MBR 공정의 유출수를 LCD 제조공정의 용수로 재사용하기 위하여 pilot-scale RO 막분리 공정을 구성하고 MBR 공정 유출수를 이용한 RO 막분리 공정에서 운전압력과 투과유량에 따른 막오염에 의한 막간차압과 CIP 주기 그리고 TOC와 전기전도도의 용질분리 효율의 영향을 분석하였다. 이러한 연구 결과는 MBR-RO system

의 처리수가 자체 LCD 공정의 공업용수 재사용 수질기준을 만족할 수 있는 RO 막분리 공정의 운전조건을 제시하고 full-scale MBR-RO system을 설계, 구축 및 운전 하는데 기초자료로 활용될 것이다.

【표 1】 환경부 처리수 재사용 수질권고 기준

수질항목	재이용 수질권고기준								
	범용 재이용수					인체비접촉세척용수	고도환경용수		공업용수
	청소용수	도시조경용수	친수용수	유지용수	농업용수		습지용수	지하수충진	
pH	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	5.8 ~ 8.5	
SS, mg/L			<6			<6	<6	<6	
BOD, mg/L			<3		<8	<3	<5	<5	
DO, mg/L			>2	>2	>2		>2		
탁도, NTU	<2	<2				<2	<2	<10	
냄새	미분쇄	미분쇄	미분쇄	미분쇄	미분쇄	미분쇄	미분쇄	미분쇄	
색도, 도	<20	<20	<5	<20	<20	<5	<5	<5	
결합진류염소, mg/L	>0.2					>0.2			
대장균군수, 개/100 mL	불검출	불검출	불검출	<1,000	<200	불검출	불검출	불검출	
염화물, mgCl/L		<250			<250		<250	<250	
T-N, mg/L			<10			<10	<10	<10	
T-P, mg/L			<1	<1		<1	<1	<1	
ABS, mg/L			<1	<1	<0.5		<0.5	<0.5	

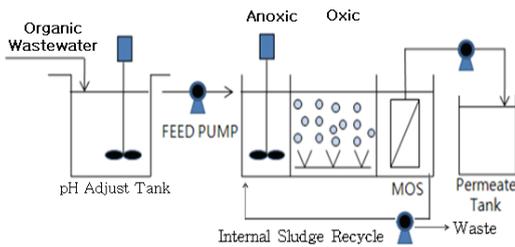
2. 실험장치 및 방법

2.1 MBR 공정의 구성과 운전

S전자 유기폐수의 생물학적 처리인 MBR 공정 유출수를 재사용하기 위한 후속 RO 막분리 공정에 대한 연구를 MBR 공정의 운전 결과에 영향을 받으므로 먼저 MBR 공정에 대하여 기술한다. MBR 공정은 용량 50 m³/day의 pilot-scale 규모로 그림 1과 같이 제작되었다. 유입수는 pH 조정조를 거쳐 탈질을 위한 무산소조(anoxic), 유기물질의 제거와 질산화를 위한 포기조(oxic), 그리고 침지형 UF 막이 장착된 막 운전조(MOS, membrane operating system)로 구성되었다.

MBR 공정에 사용된 유입수 특성은 표 2에 요약되었

다. BOD와 COD_{Cr}는 각각 평균 1,597 mg/L, 평균 2,494 mg/L이며 COD_{Cr}/BOD 비는 일반적인 하수의 1.72보다 낮은 1.54로 나타났다. 유기폐수는 미생물의 성장에 필요한 유기물에 대한 영양염류의 적정 비인 COD:N:P=100:5:1에 비교하여 낮은 질소와 인 함유량을 보이므로 질소(NH₄HCO₃)와 인(H₃PO₄)을 첨가하였다. 유입수의 pH는 NaOH 혹은 HCl에 의하여 pH 6~8로 조정하였다. 유입수에 함유된 오염물질 중 MBR 공정의 UF 막과 후속 RO 막에 영향을 줄 수 있는 무기물질은 Ca²⁺, Ba²⁺, Mg²⁺, SiO₂ 등이며 그 평균 농도는 각각 14.8 mg/L, 0.15 mg/L, 0.61 mg/L, 1.66 mg/L로서 막에 영향을 줄 수 있는 범위에 있는 것은 아닌 것으로 사료된다.



[그림 1] Pilot-scale MBR 공정의 개략도

[표 2] Pilot-scale MBR 공정의 유입수

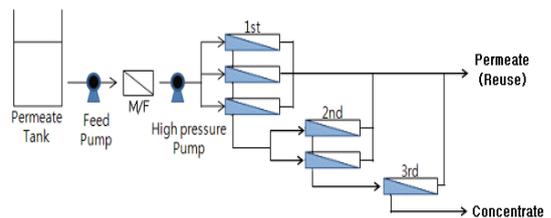
항목	단위	평균 (범위)
pH	-	3.2 (2.0~11.3)
전기전도도	μ S/cm	950 (720~4,140)
COD _{Cr}	mg/L	2,494 (785~6,240)
BOD		1,597 (406~2,640)
TOC		746 (230~1,850)
T-N		66.0 (13.0~125.0)
T-P		3.6 (0.3~9.1)
HCO ₃ ⁻	mg/L as CaCO ₃	2.1 (0.0~12.9)
CO ₃ ²⁻		19.0 (0.0~70.9)
경도		37.0 (10.0~75.0)
Ca ²⁺	mg/L	14.8 (3.1~27.6)
Ba ²⁺		0.15 (0.06~0.41)
Mg ²⁺		0.61 (0.02~1.13)
SiO ₂		1.66 (0.28~11.5)

MBR 공정의 생물반응조인 무산소조와 포기조의 유기물 부하율(OLR, organic loading rate)은 1.8(1.0~3.3) kgBOD/m³-d 그리고 유입유량을 조정하여 F/M 비를 0.41(0.17~0.82) kgBOD/ kgMLSS로 운전하였다. 생물반

응조의 SRT 30일 기준으로 내부반송과 폐기슬러지 유량으로 조절하였으며 이에 따른 생물반응조 MLSS는 8,000~10,000 mg/L로 유지되었으며 HRT는 평균 22시간으로 운전되었다. 슬러지 내부반송은 MOS조 내에서 유입유량 대비 평균 5배로 내부반송 하였으며 일부 슬러지는 폐기하였다. MBR 공정에 장착된 UF 막은 외국에서 제작된 침지형 중공사막으로 14분 운전하고 30초 동안 back pulse에 의한 역세척을 하는 방식으로 운전되었다. MOS조의 MLSS는 무산소조와 포기조의 생물반응조보다 높은 10,000~12,000 mg/L로 유지되었고, UF막의 투과유량은 16~20 LMH (L/m²-hr)로 유지하였다.

2.2 RO 막분리 공정의 구성과 운전

RO 막분리 공정의 흐름도는 그림 2에 나타내었다. RO 막분리 공정은 용량 32 m³/day로 제작 되었다. MBR 공정 유출수는 유입펌프에 의하여 RO 막 보호를 위한 microfilter(MF, 5 μ m)를 거친 후 고압펌프에 의하여 1, 2, 3 단계로 구성된 RO 막분리 공정에 유입되었다. RO 막분리 공정은 1단, 2단, 3단 각각 RO 모듈을 3개, 2개, 1개 병렬로 연결되었고 각 단계의 농축수가 다음 단계로 유입되는 단계적인 운전이 되도록 구성되었다. 3단의 농축수는 자체 폐수종말처리시설 집수조로 이송 처리되었다.



[그림 2] RO 막분리 공정의 흐름도

RO 막분리 공정에서 사용된 RO 막은 국내에서 제작된 S막으로 재질은 polyamide, 형태는 나권형이며 크기는 직경 6.25 cm와 길이 101.6 cm로서 유효 막 면적은 2.23 m²/ea이다. 막 제조회사에서 추천하는 운전인자는 최대 운전압력 15 kgf/cm², 투과유량 16.0 LMH(L/m²-hr) 그리고 회수율 85%이다.

RO 막분리 공정의 운전은 막 제조회사가 추천하는 운전조건인 회수율 85% 그리고 운전압력 15 kgf/cm² 이하를 유지하면서 운전압력의 조절에 따른 투과유량을 12.5~22.0 LMH로 단계적으로 증가하면서 136일 동안 운전하여 운전압력과 막간차압 그리고 용질분리 효율의 변화를 분석하였다. 막간차압은 막오염에 의하여 발생되며 CIP는 주어진 recovery와 투과유량에 대하여 운전압력이

15%로 증가한 경우에 실시하였다. RO 막의 CIP[10]는 유기 막오염의 경우 NaOH에 의하여 pH 11 그리고 무기 막오염의 경우에는 HCl에 의하여 pH 2로 유지하여 세정하였으며 온도는 30℃를 유지하였다.

RO 막분리 공정의 전 운전기간 동안 permeate tank 내 미생물의 성장을 억제하기 위하여 NaOCl을 4~5 mg/L를 투입하였고 탈염소를 위하여 NaHSO₃도 유입 전단부(MF 후단)에 정량 투입하였다. 유입수의 Ba²⁺에 의한 막 내부에 황산바륨 스케일 형성을 방지하기 위하여 스케일 방지제(hyper disperse MDC-220)를 투입하였다.

2.3 RO 막분리 공정의 성능분석

RO 막분리 공정은 24시간 연속으로 운전되기 때문에 운전인자는 주로 현장 감시에 의존하였고 용질분리 효율은 시료를 채취하여 분석하는 방법을 병행하였다. 운전압력과 막간차압은 압력계이지에 의하여 실시간 측정하였다. 막간차압은 1단의 RO 막 유입부분과 3단의 RO 막 모듈의 농축수 부분에서 측정된 압력의 차이로 구하였다. 회수율은 유입유량 대비 투과수량의 비(%)로 측정하였다. pH, 전기전도도 그리고 탁도는 portable 측정기에 의하여 1일 4회 이상 수시로 측정하였다. 용질분리 효율을 감시하기 위하여 RO 막분리 공정의 유입수 그리고 투과수(1, 2, 3단 투과수의 혼합수)와 최종 RO 모듈의 농축수에서 시료를 채취하였으며 COD_{Cr}(dichromate COD), COD_{Mn}(permanganate COD), 잔류염소 그리고 SDI(silt density index)는 Standard Methods[11]에 준하여 분석하였다. TOC(total organic carbon)는 TOC 분석기(GE Sievers 900, USA)에 의하여 on-line으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Pilot-scale MBR 공정의 운전 특성

RO 막분리 공정의 유입수는 MBR 공정의 처리에 직접적인 영향을 받으므로 우선적으로 MBR 공정의 운전이 안정적이며 정상상태를 유지되어야 한다. MBR 공정은 약 4 개월의 식중 및 정상운전기간을 거친 후 RO 막분리 공정과 결합되었다. 그러나 RO 막분리 공정의 운전기간 동안 MBR 공정은 일부 불안정한 기간도 있었지만 RO 막분리 공정의 성능에는 크게 영향을 주지 못하였다.

MBR 공정을 운전한 결과 유출수 특성은 표 3에 요약하였다. MBR 공정 유출수는 COD_{Cr} 11.8(5.7~21.1) mg/L, TOC 5.6(4.1~26.0) mg/L 그리고 전기전도도 650(102~1,500) μ S/cm의 범위에 있었다. 유기성 오염

물질의 처리 효율은 COD_{Cr}과 TOC 기준으로 평균 98.5% 그리고 T-N은 57~94%인 것으로 나타났다. MBR 공정 유출수에 함유된 오염물질 중 RO 막오염에 영향을 줄 수 있는 탁도는 MBR 공정의 초기에는 2 NTU 정도를 보였으나 안정된 후 평균 0.8 NTU를 유지되었고 SDI는 평균 3.6으로 RO 막의 유입수 조건인 SDI<5를 만족하였다. MBR 공정의 유출수는 하폐수 처리수의 일반적인 공업용수로서 재사용 수질기준을 만족하고 있으나 S전자 LCD 제조공정의 용수로 재사용을 위한 수질기준인 TOC<1 mg/L과 전기전도도<100 μ S/cm을 만족하지 못한다. 표 3의 수질자료에 따르면 MBR 공정의 유출수는 재사용을 위한 RO 막분리 공정의 유입수로서 적용이 적합하다고 판단된다.

[표 3] RO 막분리 공정의 유입수로 사용된 MBR 공정 유출수 특성

항목	단위	평균 (범위)
pH	-	7.0 (6.2~8.0)
전기전도도	μ S/cm	650 (102~1,500)
COD _{Cr}	mg/L	11.8 (5.7~21.1)
TOC		5.6 (4.1~26.0)
T-N		8.8 (0.4~65.0)
T-P		0.34 (0.3~7.3)
Ca ²⁺		0.34 (0.01~2.65)
Mg ²⁺		0.03 (0.01~0.27)
Ba ²⁺		0.12 (0.01~0.26)
SiO ₂		0.80 (0.04~3.23)

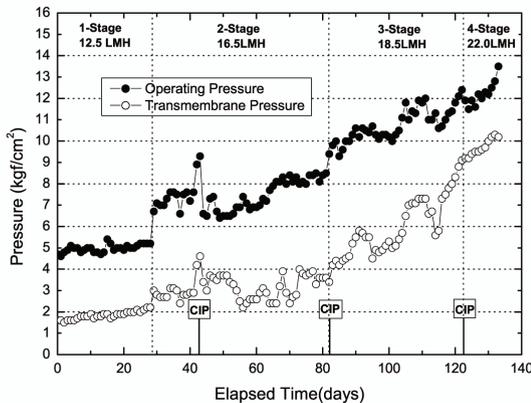
3.2 RO 막분리 공정의 운전 결과

RO 막분리 공정은 회수율을 85%로 일정하게 유지하면서 운전압력의 조절에 의하여 투과유량을 증가시키면서 운전압력과 막간차압, 예상 CIP 주기 그리고 TOC와 전기전도도에 대한 용질분리 효율에 대한 영향을 비교 분석하였다. RO 막분리 공정의 운전은 1단계 12.5 LMH에서 29일간, 2단계 16.5 LMH에서 55일간, 3단계 18.5 LMH에서 37일간 그리고 4단계 22.0 LMH에서 13일간 합계 136일 동안 운전하였다.

3.2.1 투과유량의 운전압력과 막간차압에 대한 영향

RO 막분리 공정의 전체 운전기간 동안 각 단계별 투과유량의 운전압력과 막간차압에 대한 영향을 그림 3에 나타내었다. 1단계는 투과유량 12.5 LMH에서 29일 간 운전하였는데 운전압력은 4.6 kgf/cm²에서 5.2 kgf/cm²로

그리고 막간차압은 1.6 kgf/cm²에서 2.2 kgf/cm²로 증가되었다. 운전압력과 막간차압의 상승은 RO 막오염에 의한 것으로 판단된다. 투과유량 12.5 LMH는 막 제조회사의 추천 투과유량(16.5 LMH)보다 낮은 투과유량으로 투과유량적 측면에서 100% 성능을 나타내고 있지 않다. 29 일간의 운전기간 동안 운전압력 상승은 113% 정도로서 실제 CIP는 진행되지 않았지만 CIP 주기는 30일 정도로 예측되었다.



[그림 3] RO 막분리 공정에서 운전압력과 막간차압의 변화

투과유량 12.5 LMH의 29일간 운전에서 운전압력과 막간차압의 증가가 미비하여 CIP를 진행하지 않고 2단계인 투과유량 16.5 LMH로 운전 29일부터 55일간 운전하였다. 2단계 초기 운전압력은 6.7 kgf/cm² 그리고 막간차압은 3.0 kgf/cm²이었으며 운전 30~40일 동안 그림 3에 나타나듯이 운전압력과 막간차압은 각각 7.5 kgf/cm²과 3.0 kgf/cm²로 상승하며 일정하게 유지하였으나 그 후 1~2일 동안 운전압력은 9.3 kgf/cm², 막간차압은 4.6 kgf/cm²까지 급격하게 상승하였다. 압력 상승의 원인은 MBR permeate tank에 직사광선에 의한 수온의 상승(33℃)으로 미생물이 성장하여 막오염을 유발한 것으로 판단되어 이에 대한 대책으로 운전 43일에 NaOCl을 투입하여 미생물 증식을 억제시키고, MF 후단에 NaHSO₃를 투입하여 잔류염소를 제거한 뒤 CIP를 수행하였다. 그 결과 운전압력은 6.7 kgf/cm² 그리고 막간차압은 3.0 kgf/cm²로 감소되어 35일 동안 연속운전이 가능하였다. CIP 이후 운전압력은 8.5 kgf/cm²까지 상승하였고 CIP 주기는 CIP 이후 운전압력인 6.7 kgf/cm²의 115%되는 기간인 25일 정도로 예측되었다.

투과유량 16.5 LMH의 55일간 운전 후 CIP를 진행하고 3단계인 투과유량 18.5 LMH에서 운전 85일부터 37일

간 운전하였다. 운전압력은 9.8 kgf/cm²에서 12.4 kgf/cm²로 그리고 막간차압은 4.2 kgf/cm²이어서 8.8 kgf/cm²로 지속적으로 상승하였다. 그림 3에 나타나와 같이 운전 115일~116일에 운전압력과 막간차압이 급격히 하강하였다. 원인은 2단의 RO 모듈 한 개에서 pressure vessel의 brine seal과 U-cup의 손실을 가져와 유입유량의 일부분이 모듈 밖으로 우회, 통과하였기 때문이고 문제의 RO 막을 교체한 결과 운전압력과 막간차압은 정상적으로 회복되었다. CIP 주기는 투과유량 18.5 LMH의 초기 운전압력인 9.8 kgf/cm²의 115%되는 기간인 20일 정도로 예측되었다.

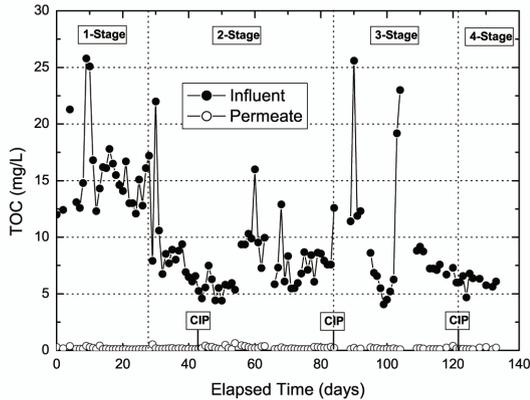
4단계인 투과유량 22.0 LMH로 운전을 하기 전에 CIP를 실시하고 한계 투과유량 시험을 운전 123일부터 13일간 실시하였다. 투과유량 22.0 LMH의 초기 운전압력은 11.9 kgf/cm² 그리고 막간차압은 9.2 kgf/cm²이었다. 투과유량 22.0 LMH로 운전 12일 후 그림 3과 같이 운전압력은 13.7 kgf/cm² 그리고 막간차압은 10.3 kgf/cm²로 이하여 지속적인 운전을 할 수 없었다. CIP 주기는 투과유량 22.0 LMH의 초기 운전압력인 11.9 kgf/cm²의 115%되는 기간인 12일 정도로 예측되었다.

3.2.2 투과유량의 용질분리 효율에 대한 영향

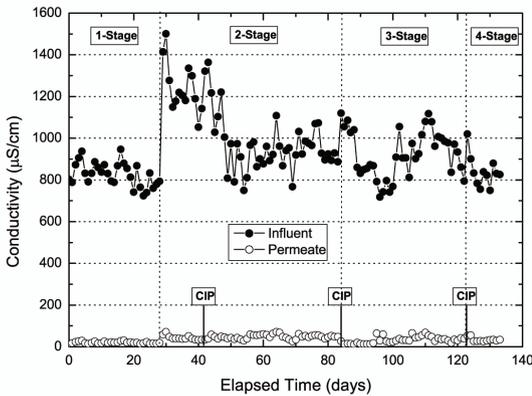
RO 막분리 공정의 전 운전기간 동안 TOC와 전기전도도의 용질분리에 대한 결과는 각각 그림 4와 5에 나타났다. 투과유량 12.5 LMH의 1단계 운전에서 RO 막분리 공정의 유입수 TOC는 초기 운전기간에 25.6 mg/L로 상승하였으나 이후 15 mg/L 범위로 안정되었다. 운전기간 동안 TOC는 유입수 15.6(12.0~25.6) mg/L에서 투과수 0.171(0.092~0.42) mg/L로 평균 98.9% 그리고 전기전도도는 유입수 794(725~947) μ S/cm로서 투과수 20.6(14.1~30.0) μ S/cm로 평균 97.4%의 제거효율이 각각 유지되었다. 투과수의 TOC와 전기전도도로 볼 때 자체 공업용수 수질기준을 만족하였지만 낮은 투과유량으로 인하여 성능을 100%로 발휘하지 못함으로 인하여 투과생산량이 적어지는 결과를 초래하였다.

투과유량 16.5 LMH의 2단계 운전기간 동안 TOC는 유입수 7.8(4.4~22.0) mg/L에서 투과수 0.225(0.110~0.657) mg/L로 평균 97.1% 그리고 전기전도도는 유입수 1,045(774~1,530) μ S/cm에서 투과수 45.8(24.0~76.0) μ S/cm로 평균 95.5%의 제거효율이 각각 유지되었다. 투과유량 18.5 LMH의 3단계 운전기간 동안 TOC는 유입수 9.7(4.0~25.6) mg/L에서 투과수 0.161(0.069~0.402) mg/L로 평균 98.3% 그리고 전기전도도는 유입수 950(743~1,163) μ S/cm에서 투과수 29.3(12.2~57.4) μ S/cm로 평균 96.9%의 제거효율이 각각 유지되었다. 투

과유량 22.0 LMH의 4단계 운전기간동안 TOC는 유입수 6.0(4.7~6.8) mg/L에서 투과수 0.159(0.080~0.290) mg/L으로 평균 97.7% 그리고 전기전도도는 유입수847(758~1,035) μ S/cm에서 투과수 36.4(28.1~53.0) μ S/cm로 평균 95.7%의 제거효율이 각각 유지되었다.



[그림 4] RO 막분리 공정에서 TOC 변화



[그림 5] RO 막분리 공정에서 전기전도도 변화

3.2.3 RO 막분리 공정의 운전결과에 대한 고찰

RO 막분리 공정의 운전에서 회수율을 85%로 일정하게 유지한 상태에서 투과유량을 12.5 LMH에서 22.0 LMH까지 증가시켜 운전한 결과 운전압력과 막간차압의 증가 그리고 예상되는 CIP 주기에 대한 결과를 Table 4 그리고 TOC와 conductivity의 용질제거 효율을 Table 5에 각각 요약하였다.

투과유량 12.5 LMH에서 RO 막분리 공정의 운전은 RO 막 제조회사의 추천 투과유량인 16.5 LMH보다 낮게 운전되었으므로 운전압력과 막간차압의 상승은 상대적으로 낮았고 CIP 주기는 상대적으로 길어서 30일 정도로

예측되었다. 투과수 수질로서 TOC는 0.171(0.092~0.42) mg/L 그리고 전기전도도는 20.6(14.1~30.0) μ S/cm을 유지하였다. 투과수 수질은 자체 수질기준인 TOC<1 mg/L 그리고 전기전도도<100 μ S/cm를 만족하지만 낮은 투과유량으로 인하여 성능을 100%로 발휘하지 못함으로 인하여 투과생산량이 적어지는 결과를 초래 할 것으로 판단된다. 투과유량 16.5 LMH 운전에서 운전압력은 4.6kgf/cm²~5.2 kgf/cm² 그리고 막간차압은 3.0 kgf/cm²~4.1 kgf/cm² 범위에 있었으며 CIP 주기는 25일로 예측되었다. 투과수 TOC는 0.225(0.110~0.657) mg/L 그리고 전기전도도는 45.8(24.0~76.0) μ S/cm 유지하였으며 자체 수질 기준을 만족하였다. 투과유량 18.5 LMH 운전에서 운전압력은 9.8 kgf/cm²~12.4 kgf/cm² 그리고 막간차압은 4.2 kgf/cm²~8.8 kgf/cm² 범위에 있었으며 CIP 주기는 20일로 예측되었다. 투과수 TOC는 0.161(0.069~0.402) mg/L 그리고 전기전도도는 29.3(12.2~57.4) μ S/cm로 역시 자체 수질기준을 만족하였다. 투과유량 16.5 LMH와 18.5 LMH에서의 운전은 운전압력과 막오염에 의한 막간차압도 막 제조회사의 추천 운전압력의 범위에 있으므로 MBR 유출수의 LCD 제조공정의 공업용수로 재사용을 위한 최적 운전조건이라고 판단된다.

[표 4] RO 막분리 공정에서 투과유량에 따른 운전압력, 막간차압과 CIP에 대한 영향

투과 유량	운전일수 (day)	운전압력 (kgf/cm ²)	막간차압 (kgf/cm ²)	CIP 주기 (day)
12.5	29	4.6~5.2	1.6~2.2	30
16.5	55	6.7~8.5	3.0~4.1	25
18.5	37	9.8~12.4	4.2~8.8	20
22.0	13	11.9~13.7	9.2~10.3	12

[표 5] RO 막분리 공정에서 투과유량에 따른 TOC와 전기전도도에 대한 영향

투과 유량	TOC (평균)			전기전도도(평균)		
	유입수 (mg/L)	투과수 (mg/L)	제거율 (%)	유입수 (μ S/cm)	투과수 (μ S/cm)	제거율 (%)
12.5	15.6	0.171	98.9	794	20.5	97.4
16.5	7.8	0.225	97.1	1,045	45.8	95.5
18.5	9.7	0.161	98.3	929	29.3	96.9
22.0	7.0	0.159	97.7	838	36.4	95.7

투과유량 22.0 LMH로 한계 투과유량 시험을 13일간 실시한 결과 운전압력은 막 제조회사의 추천 운전압력에 근접하면서 CIP 주기는 12일로 예측되어 지속적인 운전을 할 수 없었다. 그러나 용질분리 효율을 보면 투과수

TOC는 0.159(0.080~0.290) mg/L으로 평균 97.7% 그리고 전기전도도는 36.4(28.1~53.0) μ S/cm로 평균 95.7%의 제거효율을 각각 유지하여 자체 수질기준을 만족하고 있으나 고압의 운전압력과 짧은 CIP 주기로 인하여 최적 운전조건에서 제외되었다.

4. 결론

S전자 유기성 산업폐수를 LCD 제조공정의 용수로 재사용하기 위하여 MBR에 RO막을 결합한 pilot-scale MBR-RO 시스템을 구성하고 MBR 유출수를 이용하여 RO 막분리 공정을 회수율을 85%로 일정하게 유지한 상태에서 투과유량을 12.5~22.0 LMH로 운전하여 운전압력과 막간차압 그리고 용질인 TOC와 전기전도도의 제거효율에 대한 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MBR 유출수는 환경부 하폐수 처리수의 일반적인 재사용 수질기준을 만족하고 있으나 S전자 LCD 제조공정의 공업용수로 재사용 수질기준인 TOC<1 mg/L과 전기전도도<100 μ S/cm를 만족하지 못하므로 후속처리에 의하여 재사용 수질기준을 만족할 수 있도록 하여야 한다.
- (2) MBR 공정의 유출수를 이용한 RO 막분리 공정에서 운전압력과 막간차압은 투과유량이 증가에 따라 증가하였고 투과유량별 CIP 주기는 12.5 LMH에서 30일, 16.5 LMH에서 25일, 18.5 LMH에서 20일 그리고 22.0 LMH에서 12일로 각각 산출되었다.
- (3) RO 막분리 공정에서 투과유량 12.5 LMH~22.0 LMH의 운전조건은 MBR 공정의 유출수를 S전자 LCD 제조공정 용수로 재사용하는 수질기준인 TOC<1 mg/L과 전기전도도 100 μ S/cm를 만족하였다.
- (4) MBR 유출수를 이용하여 회수율을 85%로 일정하게 유지한 상태에서 RO 막분리 공정의 최적 운전조건은 운전압력 6.7 kgf/cm²~12.4 kgf/cm²에 의한 투과유량 16.5 LMH~18.5 LMH으로 막간차압은 3.0 kgf/cm²~8.8 kgf/cm² 그리고 CIP 주기는 20~25일 이었다. 최적 운전조건에서 RO 투과수는 S전자 LCD 제조공정 용수 재사용 수질기준인 TOC<1 mg/L과 전기전도도 100 μ S/cm를 만족하였다.

참고문헌

- [1] 국토해양부, "수자원장기종합계획 보고서", June, 2006.
- [2] 환경부, "하수 처리수 재이용 가이드북", 환경부 고시 제2007-511호, 2007.
- [3] Sourirajan, S. and Matsuura, T., "Reverse osmosis /ultrafiltration, Process Principles", National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 1985.
- [4] 강신경, 전희동, 박영규, "역삼투시스템을 이용한 산업폐수 재이용 기술의 실용화 연구", 대한환경공학회지, 21(9), 1689-1697, 1999.
- [5] Vrijenhoek, E.M., Hong, S., and Elimelech, M., "Influence of Membrane Surface Properties on Initial Rate of Colloidal Fouling of Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes", J. Memb. Sci., 188(1), 115-128, 2001.
- [6] 정지연, 이진욱, 김성연, 김인수, "역삼투 해수담수화 공정내 바이오 필름 형성 미생물의 부착 및 고압내성 특성", 대한환경공학회지, 31(1), 51-57, 2009.
- [7] 윤종섭, 김승현, 윤조희, 김건태, "역삼투 해수담수화의 전처리용 정밀여과 공정의 운전성능 및 운전효율에 영향을 미치는 인자", 대한환경공학회지, 26(4), 475-480, 2004.
- [8] Ng, H.Y., Tay, K.G., Chua, S.C., and Seah, H., "Innovative Large-Diameter RO System for Water Reclamation and Seawater Desalination", Water Sci. & Tech.:Water Supply-WSTWS, 8(1), 93-99, 2008.
- [9] Manttari, M. and Nystrom, M., "Membrane Filtration for Tertiary Treatment of Biologically Treated Effluent for the Pulp and Paper Industry, Water Sci., & Tech., 55(6), 99-107, 2007.
- [10] (주)새한 필터컴퍼니, 역삼투 분리막, pp 122~123, 2000.
- [11] APHA, AWWA, WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Eds., Washington, DC, USA, 2005.

김 종 수(Jong-Soo Kim)

[정회원]



- 1983년 3월 : (미)Georgia Institute of Technology, 토목환경공학과 (공학석사)
- 1987년 3월 : (미)Georgia Institute of Technology, 토목환경공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1990년 12월 : (미)HazWaste Ind., Inc.
- 1991년 1월 ~ 1991년 12월 : (미)조지아공대연구소
- 1992년 1월 ~ 현재 : 선문대학교 환경공학과/토목공학과 교수

<관심분야>

상하수도, 폐하수처리, 유기성폐자원의 에너지화, 막분리

윤 현 수(Hyun-Soo Yoon)

[정회원]



- 2006년 2월 : 선문대학교 환경공학과 (공학사)
- 2009년 8월 : 선문대학교 대학원 환경공학과 (공학석사)
- 2005년 9월 ~ 2009년 12월 : (주)엔텍
- 2010년 1월 ~ 현재 : (주)지에스텍

<관심분야>

생물학적 수처리, 막분리 공정