

분리막 종류에 따른 하수의 생물학적 고도처리 효율 비교 연구

박종부[†] · 신경숙 · 허형우 · 강 호*

(주)한화건설 기술연구소

*충남대학교 환경공학과

Comparison of Biological Nutrient Removal Efficiencies on the Different Types of Membrane

Jong-Bu Park[†] · Kyung-Sook Shin · Hyung-Woo Hur · Ho Kang*

Research Institute of Technology, Hanwha E&C Corp.,

*Department of Environmental Engineering, Chungnam University

(Received 23 February 2011, Revised 4 April 2011, Accepted 5 April 2011)

Abstract

This study was performed to investigate the characteristics of nutrient removal of municipal wastewater in the membrane bioreactor system with the different types of membrane. Membrane bioreactor consists of three reactors such as two intermittent anaerobic and the submerged membrane aerobic reactor with flat sheet and hollow fiber membrane, respectively. The removal efficiencies of COD_{Cr}, BOD, SS, TN and TP on the flat sheet membrane bioreactor were 94.3%, 99.0%, 99.9%, 70.3% and 63.1%, respectively. In addition, The removal efficiencies of COD_{Cr}, BOD, SS, TN and TP on the hollow fiber membrane bioreactor were 94.0%, 99.3%, 99.9%, 69.9% and 66.9%, respectively. The estimated true biomass yield, specific denitrification rate (SDNR), specific nitrification rate (SNR) and phosphorus removal content on the flat sheet membrane bioreactor were 0.33 kgVSS/kgBOD·d, 0.043 mgNO₃-N/mgVSS·d, 0.031 mgNH₄-N/mgVSS·d, and 0.144 kgP/d, respectively. In addition, the estimated true biomass yield, specific denitrification rate (SDNR), specific nitrification rate (SNR) and phosphorus removal content on the hollow fiber membrane bioreactor were 0.30 kgVSS/kgBOD·d, 0.067 mgNO₃-N/mgVSS·d, 0.028 mgNH₄-N/mgVSS·d, and 0.121 kgP/d, respectively. There was little difference between the flat sheet and hollow fiber on the nutrient removal efficiencies except SNR and SDNR. These differences between them were caused by the air demand to prevent the membrane fouling. The flux and oxygen demand for air scouring were 19.0 L/m²/hr and 2.28 m³/min for the flat sheet membrane, and 20.7 L/m²/hr and 1.77 m³/min for the hollow fiber membrane on an average.

keywords : Flat sheet, Hollow fiber, Membrane bioreactor, SDNR, SNR

1. 서론

최근 인구집중화와 도시화 따른 물사용량이 증가하고 있으나 수자원의 고갈로 하수 처리수의 재이용 사례가 증가하고 있는 추세이다. 또한, 2005년부터 시작된 노후 하수관거 교체 및 분류식화 사업으로 하수도 보급률이 85.5%로 증가하여 고농도 하수에 의한 신규 하수종말처리장의 건설 및 기존 활성슬러지 공법의 고도처리 개선이 필요하다. 활성슬러지 공법은 처리 효율이 낮으며 부하변동 대응성이 부족하여 유출수의 수질 저하를 가져오게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에는 생물학적 고도처리 공정에 분리막을 결합한 생물막공법(membrane bioreactor)공법의 적용이 증가하고 있으며 국내의 경우, 2007년말 가동중인 하수처리시설 중 20~900 m³/day의 중소규모 처리시설에

적용되어 운영 중에 있다(환경부, 2007).

하수처리장에 적용되는 막은 일반적으로 평막과 중공사막을 사용하고 있다. 평막의 경우, 역세없이 분리막의 가동과 휴지를 반복하는 단순사이클로 구성되어 있어 설비가 간단하고 운전이 용이하므로 중소규모 하수처리장에 적용이 용이하다. 반면, 중공사막의 경우, 역세공정이 있어 부대설비 및 운전기법이 다소 복잡하나, 안정적인 막 운영이 가능하고, 세정공기량이 평막에 비해 적어 유지관리비가 저렴한 특징이 있다. 또한, 평막에 비해 대부분의 중공사막이 막 집적도가 높아 단위막 면적당 처리용량이 많다. 상용화된 Membrane bioreactor의 단위 면적당 세정공기량은 평막의 경우 0.35~1.28 m³/m²·hr이었으며 중공사막의 경우 0.18~1.0 m³/m²·hr이었다(Judd, 2006).

이러한 막분리(membrane bioreactor) 시스템은 2차 침전 및 여과 소독공정이 필요 없고 짧은 수리학적 체류시간으로 부지면적이 작으며 고농도 MLSS 유지 및 높은 SS 제거율로 엄격한 재이용수 수질 기준을 충족시킬 수 있을 뿐만 아

[†] To whom correspondence should be addressed.

jongbu@hanwha.co.kr

나라 낮은 F/M비와 긴 슬러지 체류시간으로 인하여 기존 활성 슬러지법에 비해 슬러지 발생량이 작은 장점이 있다(Gander et al., 2000; Melin et al., 2006; Stepheson et al., 2000).

그러나, Membrane bioreactor시스템은 막 특성에 대한 이해 부족으로 미생물 및 영양물질의 처리에 대한 명확한 해석과 예측이 곤란하여 운전조건을 선택하는데 어려움이 있다(김규진과 윤성훈, 2001). 또한, 대부분의 MBR공정은 A²O계열로 높은 내부순환율과 막오염 방지를 위한 과도한 포기로 인해 호기조로부터 혐기조로 유입되는 질산성 질소와 용존산소의 영향으로 혐기조건의 형성이 어려워 인 방출 기작이 원활하지 못한 단점이 있다(여상민과 이영옥, 2006).

따라서, 본 연구에서는 평막 및 증공사막을 이용하여 고도처리 막분리 공정을 운영함으로써 막 특성에 따른 생물학적 고도처리 효율을 비교 분석하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험장치 및 실험방법

Membrane bioreactor의 구성은 Fig. 1에서 보듯이, 두 개의 간헐혐기반응조(Intermittent Anerobic)와 침지형 막분리 호기조(Submerged membrane aerobic)로 구성되었으며 시설 규모는 일최대 57 m³/day으로 D하수종말처리장에 설치하여 운전하였다. 분리막은 동일구성의 반응조에서 평막과 증공사막 각각 침지시켜 운전하였다. 수리학적 체류시간은 간헐 혐기반응조 #1 1.5 시간, 간헐혐기반응조 #2 1.5 시간 및 호기조 3.0 시간으로 총 6 시간으로 제작하였으며 슬러지 반송은 막분리 호기조에서 간헐혐기반응조로 유입유량 대비 200%로 구성하였다. 하수는 간헐혐기반응조 #1과 #2에 각각 2 시간 간격으로 간헐적으로 유입되어 혐기와 무산소 조건이 교대로 이루어진다. 즉, 간헐혐기반응조 #1로 하수와 반송슬러지가 유입될 경우 간헐반응조 #1은 무산소 조건이 형성되어 탈질 반응이 진행되며 하수가 유입되지 않는 간헐 혐기반응조 #2은 혐기조건이 형성되어 인 방출이 일어난다.

본 연구에 사용된 분리막은 P사의 평막과 K사의 침지형 증공사막을 사용하였으며 공칭공경과 재질은 각각 0.35 μm

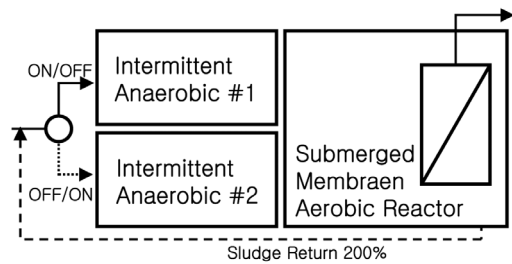


Fig. 1. Schematic diagram of submerged membrane bioreactor.

의 chlorinated PVC와 0.1 μm의 PVDF (polyvinylidene fluoride)이다. 분리막 운전은 평막의 경우 7 분 흡입, 3 분 휴지로 반복 운전하였으며 증공사막으로 10 분 흡입, 30 초 역세정으로 연속 운전하였다. 또한, 평막은 2.28 m³/min의 공기로 공기세정을 실시하였으며 별도의 유지세정을 실시하지 않았고 TMP에 따라 4 개월에 1 회 0.25% NaOCl로 계내에서 회복 세정을 실시하였다. 증공사막의 경우 1.77 m³/min의 공기로 공기세정을 실시하였으며 200 mg/L NaOCl로 1일 2~3 회 2 분간 유지 세정을 실시하였다. 또한 TMP에 따라 회복세정은 0.25% NaOCl과 1% 옥살산(C₂H₂O₄)을 사용하여 년 1 회 실시하였다.

Membrane bioreactor의 운전조건은 Table 1과 같다.

2.2. 성상 분석 및 미생물 활성도 분석방법

COD_{Cr}, BOD₅, 총질소, TKN, 총인, NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P, SS, MLSS, MLVSS 등을 수질오염공정시험법 및 Standard Methods (APHA, 1999)에 따라 분석하였으며 수은, ORP, 용존산소, 막간차압(trans-membrane pressure, TMP), 유량 및 유속 등은 계측기를 이용하여 실시간 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 및 질소·인 제거 특성 분석

유로변경형 MBR공정에서 평막 및 증공사막을 이용한 고도처리 효율을 비교한 결과는 Table 2와 같다.

Table 1. Operation conditions in this study

Item	Case 1	Case 2
Membrane type	Flat sheet	Hollow fiber
Module size (mm)	L560 × W8 × H1000	L850 × W77 × H1770
Available area (m ²)	174.6	120
Filtration capacity (m ³ /m ²)	0.33	0.48
Nominal pore size (μm)	0.35	0.1
Flux (L/m ² /hour)	19.0 LMH	20.7 LMH
Material	Chlorinated-PVC	PolyvinylideneFluoride (PVDF)
Filtration type	Cross-Flow (Out→In)	Cross-Flow (Out→In)
Operation mode	Filtration 7minute / rest 3minute	Filtration 10minute / Backwashing 30second
Net operation time	16.8 hr/day	22.3 hr/day
Operation pressure (kgf/cm ²)	0 ~ 0.5	- 0.1 ~ - 0.3
Maintenance cleaning	No	2 ~ 3 times/day with 200 mg/L of NaOCl for 2 minute
Recovery cleaning	1 time/4 months with 0.25% of NaOCl	1 time/year with 0.25% of NaOCl and 1% C ₂ H ₂ O ₄

평막을 사용하였을 경우, BOD의 제거효율은 유입수 BOD 26.7~321.0 (평균 136.3) mg/L에서 유출수 BOD 0.3~2.9 (평균 1.2) mg/L로 평균 99.0%였으며 COD_{Cr}의 경우 유입수 COD_{Cr} 43.8~700.0 (평균 267.5) mg/L에서 유출수 COD_{Cr} 2.2~29.5 (평균 14.2) mg/L로 평균 제거율은 94.3%였다. 증공사막을 사용하였을 경우, BOD의 제거효율은 유입수 BOD 37.5~243.2 (평균 111.6) mg/L에서 유출수 BOD 0.5~2.5 (평균 1.0) mg/L로 평균 99.3%였으며 COD_{Cr}의 경우 유입수 COD_{Cr} 65.6~489.0 (평균 217.1) mg/L에서 유출수 COD_{Cr} 4.8~26.3 (평균 12.8) mg/L로 평균 제거율은 94.0%로 평막을 사용하였을 경우와 비교할 때 유기물 제거능은 큰 차이가 없었다. 또한, 유입수의 온도에 따른 처리효율을 비교하기 위하여 동절기 및 하절기의 처리수질을 검토하였다. 12월에서 익년 3월까지의 동절기의 평막을 사용하였을 경우, 생물학적 처리수의 COD_{Cr} 및 BOD 농도는 각각 6.9~29.5 (평균 17.0) mg/L 및 0.3~2.9 (평균 1.5) mg/L였으며 4월에서 11월까지 기간의 생물학적 처리수의 COD_{Cr} 및 BOD 농도는 각각 2.2~24.8 (평균 11.8) mg/L 및 0.4~2.5 (평균 1.0) mg/L였다. 동절기의 증공사막을 사용하였을 경

우, 생물학적 처리수의 COD_{Cr} 및 BOD 농도는 각각 7.5~20.3 (평균 13.4) mg/L 및 0.6~2.5 (평균 1.0) mg/L였으며 4월에서 11월까지 기간의 생물학적 처리수의 COD_{Cr} 및 BOD 농도는 각각 4.8~26.3 (평균 12.6) mg/L 및 0.5~2.2 (평균 1.0) mg/L으로 계절별 영향이 없었다(Fig. 2). 동절기의 BOD 및 COD_{Cr}의 제거율은 각각 평막의 경우 98.9% 및 93.5%였으며 증공사막의 경우 99.2% 및 94.0%로 큰 차이가 없었다.

유입 및 유출 SS농도는 각각 평막의 경우 30.0~370.0 (평균 130.0) mg/L 및 0~0.1 (평균 0.1) mg/L였으며 증공사막의 경우 27.0~355.0 (평균 112.6) mg/L 및 0~0.4 (평균 0.1) mg/L였다. SS 제거효율은 각각 99.9%로 막의 종류 및 pore 크기에 따른 차이가 없었다.

유로변경형 MBR공정에서 평막 및 증공사막을 이용한 T-N 제거 효율을 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 평막을 사용하였을 경우, T-N의 제거효율은 유입수 T-N 8.8~75.2 (평균 38.3) mg/L에서 유출수 T-N 3.7~28.2 (평균 11.1) mg/L로 평균 70.3%였으며 증공사막을 사용하였을 경우, T-N의 제거효율은 유입수 T-N 9.6~53.0 (평균 33.7) mg/L

Table 2. Influent and effluent concentrations of MBR bioreactor systems

Item	Case 1		Case 2	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent
Quantity (m ³ /d)	35.0~87.0 (56.0)		18.9~69.7 (57.1)	
COD _{Cr} (mg/L)	43.8~700.0 (267.5)	2.2~29.5 (14.2)	65.6~489.0 (217.1)	4.8~26.3 (12.8)
BOD ₅ (mg/L)	26.7~321.0 (136.3)	0.3~2.9 (1.2)	37.5~243.2 (111.6)	0.5~2.5 (1.0)
SS (mg/L)	30.0~370.0 (130.0)	0~0.1 (0.1)	27.0~355.0 (112.6)	0~0.4 (0.1)
T-N (mg/L)	8.8~75.2 (38.3)	3.7~28.2 (11.1)	9.6~53.0 (33.7)	4.5~18.9 (9.9)
NH ₄ -N (mg/L)	4.2~55.2 (27.4)	0.1~17.4 (1.4)	5.4~34.2 (24.0)	0.1~8.9 (1.1)
T-P (mg/L)	1.4~7.0 (3.9)	0.3~2.9 (1.3)	1.1~5.8 (3.3)	0.1~2.1 (1.0)
PO ₄ -P (mg/L)	0.4~2.6 (1.8)	0.1~2.0 (1.0)	0.5~2.9 (1.7)	0.1~1.9 (1.0)

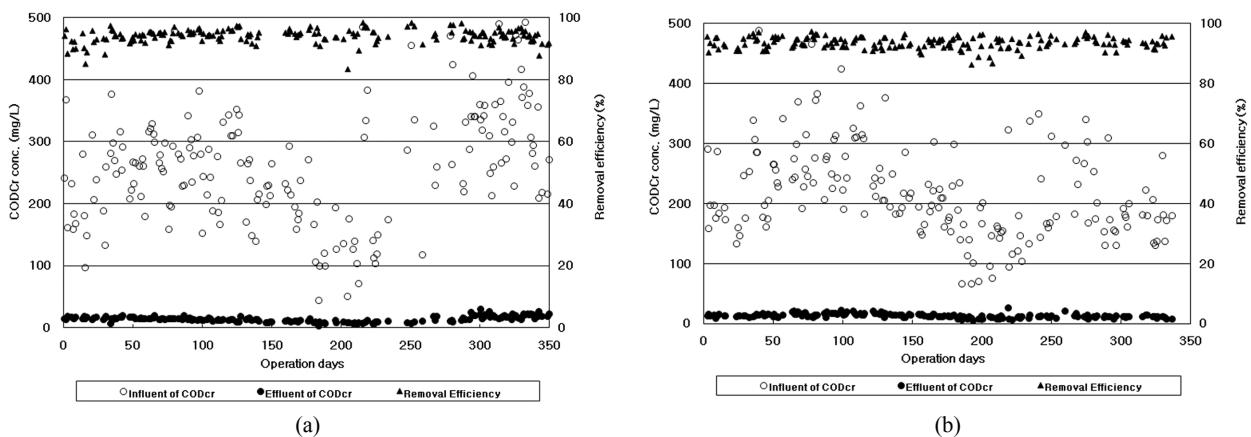


Fig. 2. Variation of COD_{Cr} removal efficiency on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane (a) and the hollow fiber membrane (b).

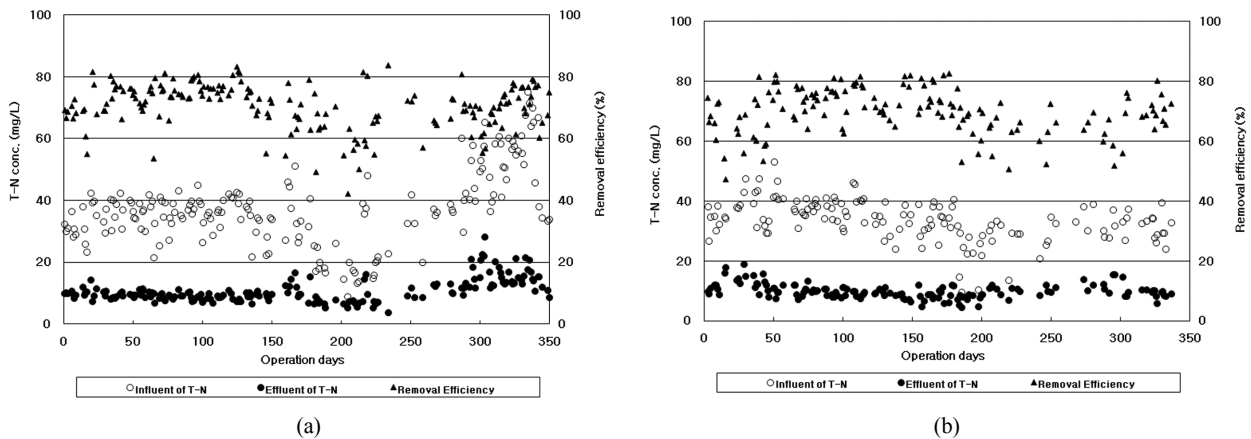


Fig. 3. Variation of T-N removal efficiencies on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane (a) and the hollow fiber membrane (b).

에서 유출수 T-N 4.5~18.9 (평균 9.9) mg/L로 평균 69.9%였다. NH₄-N 농도는 평막의 경우 유입수 중 4.2~55.2 (평균 27.4) mg/L에서 유출수 중 NH₄-N농도는 0.1~17.4 (평균 1.4) mg/L였으며 중공사막의 경우 유입수 중 5.4~34.2 (평균 24.0) mg/L에서 유출수 중 NH₄-N농도는 0.1~8.9 (평균 1.1) mg/L으로 평막을 사용한 경우 일부 질산화 저해현상이 나타났다. 이는 막의 종류에 따른 차이가 아니라 일시적인 고농도의 하수 유입에 따른 질산화 효율 저하인 것으로 판단되었다. 이때 유입 T-N의 농도는 65.2 mg/L였고 유출 T-N의 농도는 28.2 mg/L, 유출 NH₄-N의 농도는 17.4 mg/L였으며 유입 하수 알카리도는 190 mg/L였으며 호기조의 pH 및 수온은 6.5와 17°C였다. 이는 고농도 암모니아 함유 폐수를 대상으로 하는 Wu 등의 실험결과와 일치하는 것으로 pH 6.5이하에서 질산화 반응이 저해되었다(Wu et al., 2007). 비질산화율(Specific nitrification ratio, SNR) 및 비탈질산화율(Specific denitrification ratio, SDNR)은 각각 평막의 경우 0.011~0.061 (평균 0.031) mgNH₄-N/mgVSS·d 및 0.011~0.091 (평균 0.043) mgNO₃-N/mgVSS·d이었으며 중공사막의 경우 0.008~0.049 (평균 0.028) mgNH₄-N/mgVSS·d 및 0.011~0.129 (평균 0.067) mgNO₃-N/mgVSS·d으로 평막에서는 질산화율이 중공사막에서는 탈질산화율이 다소

높게 나타났다. 이는 평막의 경우 막 fouling 방지를 위해 공기세정만 실시하므로 공기 공급량이 2.28 m³/min으로 중공사막에 비해 많은 공기를 공급하여 탈질산화율이 중공사막에 비해 낮아 질소 제거효율이 다소 떨어지는 것으로 판단하였다. 중공사막의 경우 공기세정, 역세정 및 유지세정을 실시하며 이 때 공기 공급량은 1.77 m³/min이었다.

유로변경형 MBR공정에서 평막 및 중공사막을 이용한 T-P 제거 효율을 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 평막을 사용하였을 경우, T-P의 제거효율은 유입수 T-P 1.4~7.0 (평균 3.9) mg/L에서 유출수 T-P 0.3~2.9 (평균 1.3) mg/L로 평균 63.1%였으며 중공사막을 사용하였을 경우, T-P의 제거효율은 유입수 T-P 1.1~5.8 (평균 3.3) mg/L에서 유출수 T-P 0.1~2.1 (평균 1.0) mg/L로 평균 66.9%였다. 인 평균 제거량은 평막 및 중공사막에서 각각 0.144 kg/일 및 0.121 kg/일이었다. 12월에서 3월까지의 동절기의 인 평균 제거량은 평막 및 중공사막에서 각각 0.157 kg/일 및 0.156 kg/일로 전체 평균 제거량보다 높게 나타났다. 이는 동절기에 낮은 수온으로 인하여 질산화가 저해되어 반송 슬러지내 질산화 농도가 낮게 유지되어 인 방출이 촉진됨으로써 질소 제거효율은 떨어지고 인 제거효율 반대로 높아지는 현상에 기인한다(여상민과 이영옥, 2006). 허형우 등(2003)에

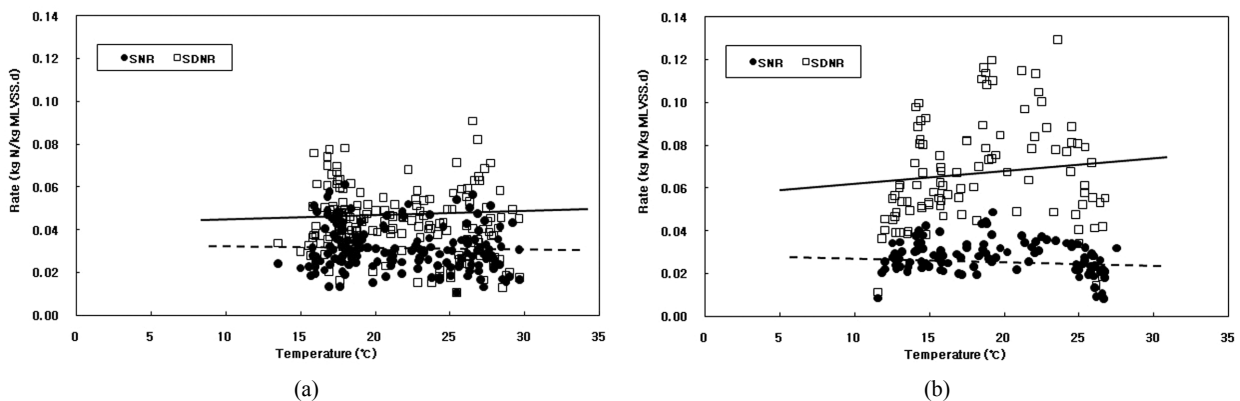


Fig. 4. The effect of temperature on SNR and SDNR on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane (a) and the hollow fiber membrane (b).

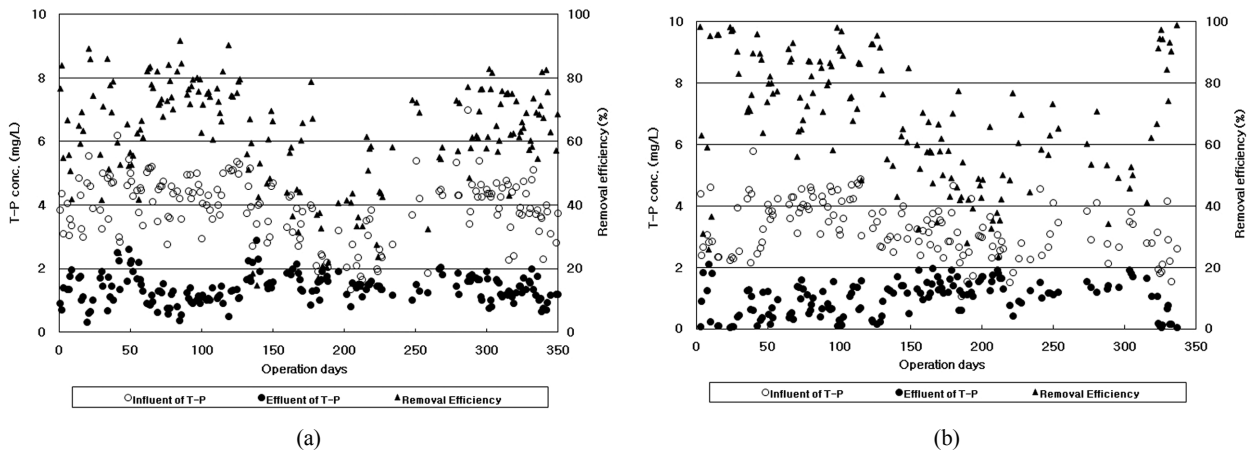


Fig. 5. Variation of T-P removal efficiencies on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane (a) and the hollow fiber membrane (b).

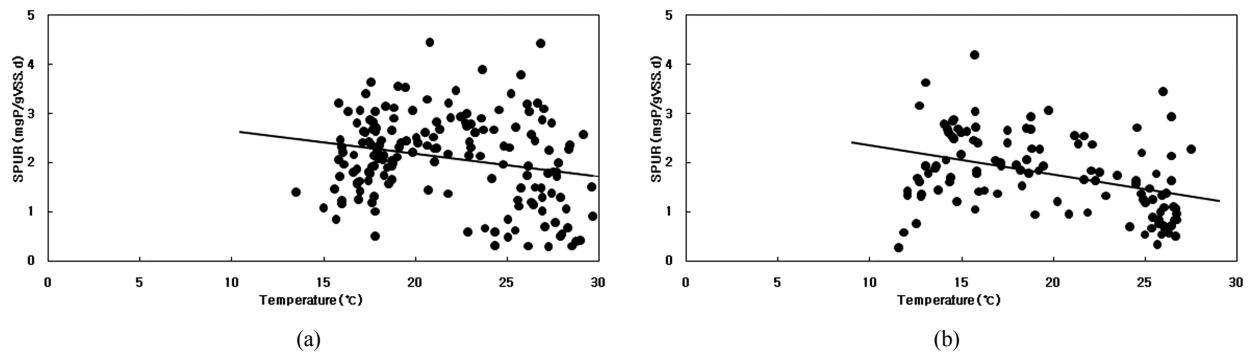


Fig. 6. The effect of temperature on the TP specific removal rates on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane (a) and the hollow fiber membrane (b).

의하면 혐기조건에서 NO₃-N 농도가 1.0 mg/L 이상에서는 인 방출이 일어나지 않는 것으로 보고하였다.

3.2. Membrane bioreactor 운영 특성 분석

운영기간동안 평막의 경우 MLSS의 농도는 간헐혐기조 및 막분리 호기조에서 각각 8,600 mg/L 및 12,000 mg/L였으며 MLVSS/MLSS비는 평균 0.74이었다. 또한, 중공사막의 경우 MLSS의 농도는 간헐혐기조 및 막분리 호기조에서 각각 9,700 mg/L 및 13,000 mg/L였으며 MLVSS/MLSS비는 평균 0.64이었다. 평막을 사용하였을 경우 간헐혐기조의 평균 ORP, DO 및 pH는 각각 -121.6 mV, 0.1 mg/L 및 7.0이었으며 분리막 호기조의 평균 ORP, DO 및 pH는 각각 131 mV, 1.3 mg/L 및 6.9였다. 또한, 중공사막의 경우 간헐혐기조의 평균 ORP, DO 및 pH는 각각 -117.5 mV, 0.1 mg/L 및 7.3이었으며 분리막 호기조의 평균 ORP, DO 및 pH는 각각 110 mV, 1.6 mg/L 및 7.2로 평막을 운영했을 때와 큰 차이가 없었다. 슬러지 평균 발생량은 슬러지 인발량을 기준으로 할 때 평막 및 중공사막에서 각각 COD_{Cr} 기준으로 0.18 kgVSS/kgCOD 및 0.19 kgVSS/kgCOD였으며 BOD 기준으로 0.33 kgVSS/kgBOD 및 0.30 kgVSS/kgBOD이었다. 위의 결과, 막의 종류에 따라 큰 차이가 없었으나 분리막 공법의 특성인 긴 SRT에 의한 슬러

지 산화로 인해 Fan 등(1996)의 실제 하수를 대상으로 분석한 결과인 0.61 kgVSS/kgCOD에 비해 매우 낮게 나타났다. Fig. 7은 수온 상승에 따른 슬러지 발생량을 분석한 결과로 수온 상승에 따라 슬러지 생산량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 수온 상승에 따른 질소 제거율의 증가에 따라 유기물이 탈질산화 반응의 탄소원으로 사용됨으로써 미생물 생산량이 감소한 것으로 판단되었다(Fan et al., 1996).

평막의 파울링 방지를 위하여 운영기간동안 공기세정 및 차아염소산에 의한 계내·외 세정을 실시하였으며 막간차압(trans-membrane pressure, TMP)은 초기 0.096 kgf/cm²에서 최대 0.309 kgf/cm²까지 증가하였으며 140일 간격으로 계내·외 세정을 2 회 실시하였다. 중공사막의 경우 막파울링 방지를 위해 공기세정과 차아염소산에 의한 유지관리 및 계외 세정을 실시하였으며 막간차압은 초기 0.11 kgf/cm²에서 최대 0.33 kgf/cm²까지 증가하였으며 150 일간격으로 계외 세정을 2 회 실시하였다. Fig. 8은 운영기간동안의 TMP 변화를 나타낸 것으로 중공사막의 경우 공기세정, 역세정 및 유지세정을 실시하여 TMP의 변화가 완만하게 이루어지지만 평막의 경우 공기세정만 실시하여 TMP가 급격하게 높아졌다. 이러한 TMP 증가는 차기철 등에 의한 수온 감소에 따른 점성계수의 증가와 운영기간 누적에 따른 생물대사산물에 의한 막오염에 의해 유발되었다(차기철

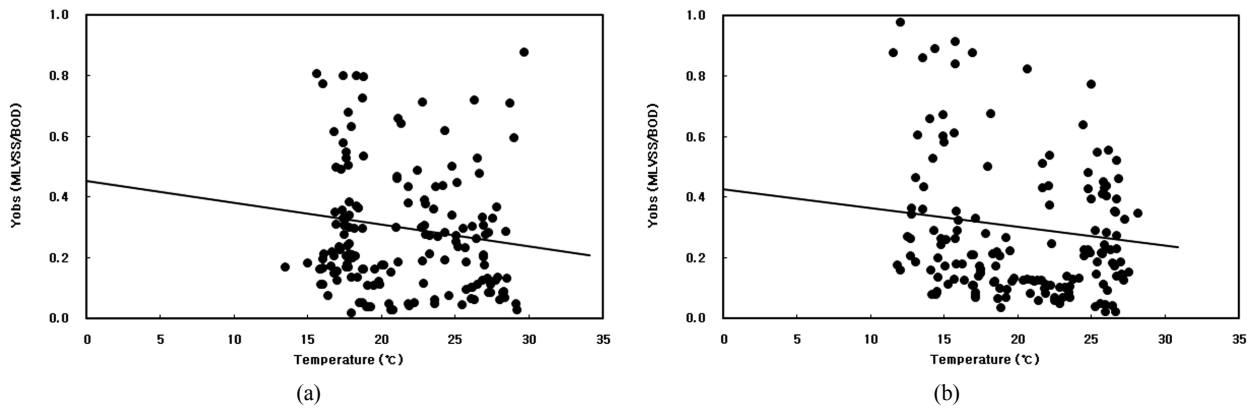


Fig. 7. The Yield coefficients on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane (a) and the hollow fiber membrane (b).

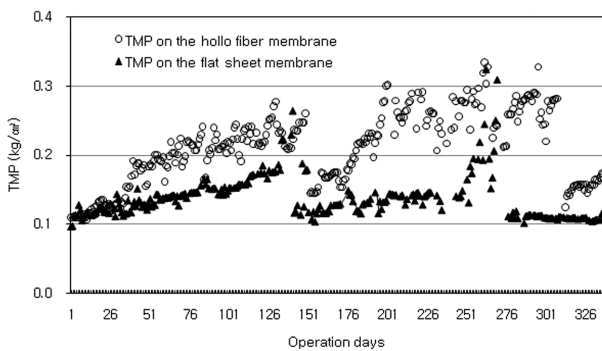


Fig. 8. Profile of trans-membrane pressures on the Membrane bioreactors with the flat sheet membrane and the hollow fiber membrane.

등, 2003). 막투과유속(flux)은 평막의 경우 11.7~28.0 (평균 19.0) L/m²/hr이었으며 증공사막의 경우 15.0~23.5 (평균 20.7) L/m²/hr으로 평막에 비해 약 10% 높게 유지되었다.

4. 결론

본 연구에서는 평막 및 증공사막을 이용하여 고도처리 막분리 공정을 운영함으로써 막 특성에 따른 생물학적 고도처리 효율을 비교 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) COD_{Cr} 및 BOD₅의 유출수의 평균농도는 각각 평막의 경우 1.2 mg/L 및 14.2 mg/L였으며 증공사막의 경우 1.0 mg/L 및 12.8 mg/L였으며 평막 및 증공사막의 평균 COD_{Cr} 제거율은 각각 94.3% 및 94.0%로 막의 종류에 따른 유기물 제거능은 큰 차이가 없었다. 동절기의 평막 및 증공사막의 평균 COD_{Cr}의 제거율은 각각 93.5% 및 94.0%였다.
- 2) 평막 및 증공사막에서의 평균 유출 SS농도는 각각 0.1 mg/L였으며 평균 SS 제거효율은 각각 99.9%로 막의 종류 및 pore 크기에 따른 차이가 없었다.
- 3) T-N 제거 효율을 비교한 결과, 평막의 경우 유출수의 평균 T-N농도는 11.1 mg/L으로 평균 제거율은 70.3%였으며 증공사막의 경우 유출수의 평균 T-N농도는 9.9

mg/L으로 평균 제거율은 69.9%였다. 평균 SNR 및 평균 SDNR은 각각 평막의 경우 0.031 mgNH₄-N/mgVSS·d 및 0.043 mgNO₃-N/mgVSS·d이었으며 증공사막의 경우 0.028 mgNH₄-N/mgVSS·d 및 0.067 mgNO₃-N/mgVSS·d으로 증공사막에서 다소 높게 나타났다.

- 4) T-P 제거 효율을 비교한 결과, 평막의 경우 유출수의 평균 T-P농도는 1.3 mg/L로 평균 제거율은 63.1%였으며 증공사막의 경우 유출수의 평균 T-P농도는 1.0 mg/L로 평균 제거율은 69.9%였다. 인 평균 제거량은 평막 및 증공사막에서 각각 0.144 kg/일 및 0.121 kg/일이었다.
- 5) 슬러지 평균 발생량은 평막 및 증공사막에서 COD_{Cr} 기준으로 각각 0.18 kgVSS/kgCOD 및 0.19 kgVSS/kgCOD였으며 BOD 기준으로 각각 0.33 kgVSS/kgBOD 및 0.30 kgVSS/kgBOD으로 막의 종류에 따라 큰 차이가 없었다.
- 6) 평막의 TMP는 초기 0.096 kgf/cm²에서 최대 0.309 kgf/cm²까지 증가하였으며 140 일 간격으로 계내·외 세정을 2 회 실시하였으며 증공사막의 경우 TMP는 초기 0.11 kgf/cm²에서 최대 0.33 kgf/cm²까지 증가하였으며 150 일간격으로 계외 세정을 2 회 실시하였다. 평막 및 증공사막의 막투과유속은 각각 19.0 L/m²/hr 및 20.7 L/m²/hr으로 증공사막이 평막에 비해 약 10% 높게 유지되었으며 평막 및 증공사막의 공기공급량은 각각 2.28 m³/min 및 1.77 m³/min으로 증공사막이 평막에 비해 약 22% 적게 공급되었다.

따라서, 위의 실험결과 막 fouling 방지를 위한 세정 방식의 차이에 따라 평막의 경우 높은 공기 공급량으로 탈질산화율이 증공사막에 비해 다소 떨어졌으므로 공기세정 방법에 대한 개선이 필요할 것으로 판단되었다.

참고문헌

김규진, 윤성훈(2001). Membrane Bioreactor(MBR)를 이용한 오·폐수 처리. *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(3), pp. 239-248.
 여상민, 이영욱(2006). 생물학적 인 제거 공정에서 탄소원에 따른 미생물군집구조의 변화. *대한환경공학회지*, **28**(2), pp. 165-172.

- 차기철, 유영욱, 이명규, 김동진, 유익근, 엄태규(2003). MBR공정에서 생물대사산물의 농도에 따른 막오염 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **19**(5), pp. 503-511.
- 허형우, 신경숙, 박승국, 박종부, 최은주, 강호(2003). 혐기조의 인 방출 최적화를 위한 영향인자 평가. *대한환경공학회지*, **25**(11), pp. 1382-1387.
- 환경부(2007). *하수도통계*.
- APHA, AWWA and WEF (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., Washington, DC.
- Fan, X. J., Urbain, V., Qian, Y., and Manem, J. (1996). Nitrification and mass balance with a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1-2), pp. 129-136.
- Gander, M., Jefferson, B., and Judd, S. (2000). Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost consideration. *Separation and Purification Technology*, **18**, pp. 119-130.
- Judd, S. (2006). The Membrane Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. *Elsevier*.
- Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., Wilde, W., and Koning, J. (2006). Membrane Bioreactor technology on wastewater treatment and reuse. *Desalination*, **187**, pp. 271-282.
- Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., and Brindle, K. (2000). Membrane bioreactors for wastewater treatment. *IWA Publishing*, London, U.K.
- Wu, C. Y., Chen, Z. Q., Liu, X. H., and Peng, Y. Z. (2007). Nitrification- denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, **36**(2), pp. 87-92.