

폐수의 고도처리를 위한 무산소/호기형 분리막생물반응조 - 역삼투 공정과 활성슬러지공정 - 정밀여과 - 역삼투 공정의 비교

노성희 · 김선일 · 전홍화 · 송연호[†]

조선대학교 생명화학공학과
(2006년 7월 26일 접수, 2006년 8월 18일 채택)

Comparison of Anoxic/Oxic Membrane Bioreactor - Reverse Osmosis and Activated Sludge Process-Microfiltration-Reverse Osmosis Process for Advanced Treatment of Wastewater

Sung-Hee Roh, Sun-Il Kim, Hong-hua Quan, and Yon-Ho Song[†]

Department of Chemical and Biochemical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
(Received July 26, 2006; accepted August 18, 2006)

폐수를 재이용하기 위한 고도처리 시스템으로서 분리막 생물반응조(Membrane Bioreactor, MBR)는 기존의 활성슬러지 공정(Activated Sludge Process, ASP)에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 도시 하수 중에 포함된 유기물과 영양염류를 동시에 제거하기 위하여 침지형 정밀여과(Microfiltration, MF) 막을 이용한 무산소/호기(Anoxic/Oxic, A/O)형 MBR에서 투과플럭스를 10.2 L/m²·h로 일정하게 유지하면서 고형물 체류시간(Solids Retention Time, SRT) 변화에 따른 막 여과 특성을 조사하였다. 실험 결과, SRT를 증가시킬수록 체외고분자물질(Extracellular Polymeric Substances, EPS)내 단백질/탄수화물(Protein/Carbohydrate, P/C) 비가 높아져서 막 오염이 빠르게 진행되었다. A/O MBR에 RO막을 결합한 A/O MBR-RO 공정을 폐수의 고도처리에 적용하고자 하였으며, 성능평가를 위해 A/O MBR-RO 공정과 기존의 활성슬러지 공정에 MF와 RO막을 결합한 ASP-MF-RO 공정의 유기물 및 영양염류 제거율을 비교하였다. 실험 결과 A/O MBR-RO 공정이 ASP-MF-RO 공정보다 더 우수한 처리효율을 나타내었다.

A membrane bioreactor (MBR) is an effective tool for wastewater treatment with recycling. MBR process has several advantages over conventional activated sludge process (ASP); reliability, compactness, and quality of treated water. The resulting high-quality and disinfected effluents suggest that MBR process can be suitable for the reused and recycling of wastewater. An anoxic/oxic (A/O) type MBR was applied to simultaneous removal of organics and nutrients in sewage. At first, the efficiency of submerged MBR process was investigated using a hollow fiber microfiltration membrane with a constant flux of 10.2 L/m² · h at each solids retention time (SRT). Results showed that protein/carbohydrate (P/C) ratio increased and total extracellular polymeric substances (EPS) remained constant with SRT increased. Secondly, A/O type MBR with a reverse osmosis (RO) membrane was employed to treat the municipal wastewater. The performance of A/O type MBR-RO process is better for the treatment of organics and nutrients than ASP-MF-RO process in terms of consistent effluents quality.

Keywords: membrane bioreactor, microfiltration, reverse osmosis

1. 서 론

용수의 수요량이 증가하고 수자원도 한정되어 있는 상황에서 하·폐수의 재이용에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 사용되고 있는 생물학적 하·폐수처리법으로는 현재의 방류수 수질 기준도 안정적으로 준수하기 힘들며 특히 부유물질(Suspended Solids, SS) 제거가 완벽하지 않아 처리수 재이용을 위한 중수도 시스템으로도 부적절하다.

기존 생물학적 처리공정의 최종 처리단계로 사용되는 침전조를 대신하여 분리막을 이용하는 분리막 생물반응조(Membrane Bioreactor, MBR)에 관한 연구가 30여 년 전부터 시작되었다[1]. MBR은 분리막

을 이용하여 반응기내의 미생물 농도를 높게 유지하여 유기물, 질소 성분 등의 처리효율을 높이고, 또한 막에 의해 부유물질, 미생물 등이 제거됨으로써 고·액 분리의 효율을 높이고 기존 생물학적 처리공정의 문제점을 해결할 수 있는 많은 장점을 가지고 있다[2]. 침지형 생물막 반응조는 기존의 2차 생물학적 처리시설 후속 공정으로 이용되는 막 결합형 처리시스템과는 달리 막 모듈을 2차 생물반응조 내부에 침지시켜 고·액 분리(solid/liquid separation)를 가능하게 한 반응조를 말하는데, 이것은 단순한 고·액 분리의 역할을 수행함과 동시에 수질을 고도처리의 수준으로 상승시킬 수 있는 이중 효과를 얻을 수 있도록 고안되었다[3]. 역삼투(Reverse Osmosis, RO)막은 유체 내에 가장 적은 범위의 물질을 처리하는데 유체내의 분자량이 100보다 큰 유기물질뿐만 아니라, 용해성염인 무기물질을 95~98%까지 처리한다.

[†] 주 저자 (e-mail: yhsong@chosun.ac.kr)

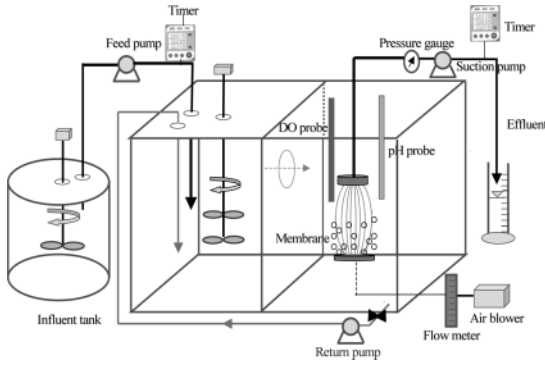


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus for A/O MBR.

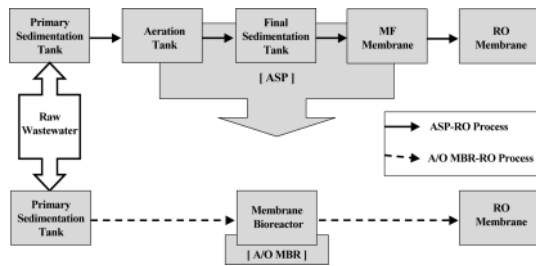


Figure 2. Schematic diagram of ASP-MF-RO and A/O MBR-RO process.

RO막의 응용분야는 해수 담수화(desalination)로부터 음용수 또는 초순수 제조 그리고 폐수 재이용 등의 전반적인 산업공정에서 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 폐수를 재이용하기 위하여 무산소/호기(Anoxic/Oxic, A/O) 조건의 침지형 MBR에 RO막을 결합한 A/O MBR-RO (Anoxic/Oxic Membrane Bioreactor-Reverse Osmosis) 공정을 이용하여 폐수를 고도처리 하고자 하였다. A/O 조건의 침지형 MBR에서 고형물 체류시간(Solids Retention Time, SRT)변화에 따른 막 오염 특성을 조사하였으며, A/O MBR-RO 공정의 성능평가를 위하여 기존의 활성슬러지공정(Activated Sludge Process, ASP)에 정밀여과(Microfiltration, MF)막과 RO막을 결합한 ASP-MF-RO (Activated Sludge Process-Microfiltration-Reverse Osmosis) 공정[4]에서 유기물과 영양염류의 제거율을 조사하여 각 공정의 처리효율을 비교 검토하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 A/O MBR 실험장치의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 반응조는 투명아크릴 재질을 사용하여 장방형 구조의 무산소조와 분리막 생물반응조로 제작하였으며, 각 조의 유효용적은 20 L씩이다. 분리막 생물반응조 내부에 장치한 침지형 MF막의 사양을 Table 1에 나타내었으며, 후속 공정에 사용한 RO막의 사양을 Table 2에 나타내었다. 침지형 분리막 모듈의 하단부에 설치한 산기관은 폭기하는 동안 공기방울과 유체의 흐름에 의해 막 표면을 세척함으로써, 여과수행시 발생하는 막 오염에 의한 여과 저항을 최소화 할 수 있도록 설계하였다. 따라서 폭기는 세 가지 역할을 수행하는데, 첫째로 생물반응조에 용존산소를 공급하며, 둘째로 분리막의 표면에 쌓인 케이크층을 제거함으로써 물리적인 세정 작용을 하고, 셋째로 교반작용을

Table 1. Specification of the Submerged MF Membrane

Manufacturer	ENE Co.
Module type	Hollow fiber
Pore size	0.2 μm
Material	PVDF
Hydro-property	Hydrophilic
Surface area	0.2 m ²
Outer diameter	2.0 mm
Inner diameter	1.8 mm

Table 2. Specification of the RO Membrane

Manufacturer	FILMTEC
Module type	Spiral Wound
Material	Polyamide
Active area	1.2 m ²
Applied pressure	15.5 bar
Permeate flow rate	1.23 m ³ /d
Stabilized salt rejection	99.5%

Table 3. Composition of Synthetic Wastewater

Composition	Molecular weight (g/mol)	Concentration (mg/L)
C ₆ H ₁₂ O ₆	180.0	200.00 (as COD)
NH ₄ Cl	53.5	40.00 (as N)
KH ₂ PO ₄	136.0	8.00 (as P)
NaHCO ₃	84.0	250.00
FeCl ₃ · 6H ₂ O	270.5	0.38
CaCl ₂ · 2H ₂ O	147.0	10.00
KCl	74.5	4.70
MgSO ₄ · 7H ₂ O	246.0	50.00

하여 반응조를 균일한 상태로 유지시키는 것이다[5].

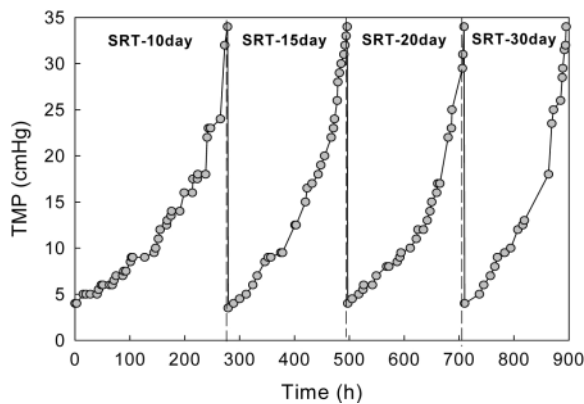
실험에 사용한 활성슬러지는 하수종말처리장 내 슬러지 반송라인에서 채취한 후 50 mesh 체로 헹잡물을 제거하여 합성폐수로 장기간 순용시킨 후 사용하였다. 합성폐수는 실험 중 분석 물질의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 탄소원으로 glucose (Junsei Chemical Co., Japan)를 사용하고 질소원 및 인산원으로는 각각 NH₄Cl (Junsei Chemical Co., Japan)과 KH₂PO₄ (Junsei Chemical Co., Japan)를 사용하였으며, 완충 용액으로 NaHCO₃ (Junsei Chemical Co., Japan)를 사용하여 제조하였으며, 합성폐수의 조성을 Table 3에 나타내었다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 폐수를 재이용하기 위한 시스템으로서 A/O MBR-RO 공정을 이용하여 폐수를 고도처리 하고자 하였다. 먼저 A/O MBR의 막 여과 특성을 알아보기 위하여 투과플럭스를 10.2 L/m² · hr로 일정하게 유지시키고 SRT를 10, 15, 20, 30 day로 변화시키면서 막투과압력(Transmembrane Pressure, TMP)과 침지형 막에 형성된 체외고분자물질(Extracellular Polymeric Substances, EPS)의 특성을 조사하였다. 이 때 SRT를 제외한 운전조건은 일정하게 유지하였으며, 각 여과 실험의 TMP가 MF막의 상용차압인 35 cmHg에 도달하면 반응조에서 막을 꺼내어 고압수로 물리적 세척을 수행하여 초기 투과압력으로 회복시킨 후 다음 여과실험에 사용하였다. 그 후 A/O MBR에 의한 투과수를 RO막으로 처리하여 A/O MBR-RO 공정의 최종 투과수의 처리 효율을 조사하였다.

Table 4. Operating Condition of ASP and A/O MBR

Operating Condition	ASP	A/O MBR
HRT (hr)	24	24
MLSS (mg/L)	3000 (± 500)	5000 (± 500)
Anoxic volume ratio (%)	25	50
Re-circulation flow ratio	1 : 1	2 : 1
Operation mode	Continuously	On / Idle = 5 min / 1 min
Maximum TMP (cmHg)	-	35
DO (mgO ₂ /L)	< 5	< 5
Temperature (°C)	20~25	20~25

**Figure 3. Variation of TMP of each SRT in the A/O MBR.**

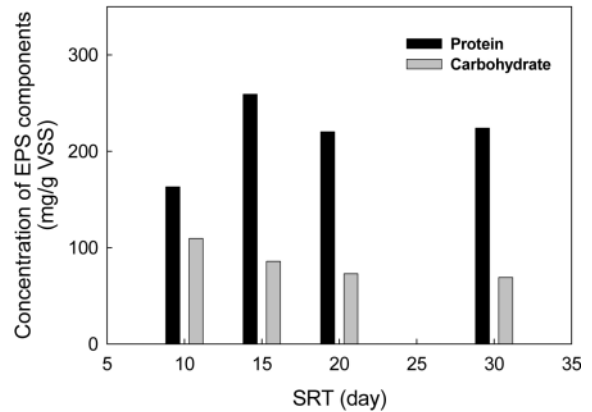
또한 A/O MBR-RO 공정의 성능평가를 위하여 ASP-MF-RO 공정 실험을 수행하여 처리효율을 비교 검토하였다. A/O MBR-RO 공정과 ASP-MF-RO 공정에서 수행한 A/O MBR과 ASP의 운전조건을 Table 4에 나타내었으며, 각 공정의 개략도를 Figure 2에 나타내었다. ASP-MF-RO 공정은 기존의 일반적인 활성슬러지공정(ASP)에 의한 처리수를 MF막으로 여과한 후 RO막으로 최종 처리하는 시스템으로 구성하였다. 한편 A/O MBR-RO 공정은 무산소(anoxic)조 다음단계의 호기(oxic)조 내부에 MF막을 침지시킨 생물반응조(MBR)에 의한 처리수를 RO막으로 최종 처리하는 시스템으로 구성하였다. 각 공정의 최종처리단계에서 사용한 RO막은 동일한 사양(Table 2)의 막모듈을 사용하였다.

2.3. 분석방법

시료는 각 공정의 반응조에서 채취하여 GF/C filter와 0.45 μm membrane filter로 여과한 후 standard method[6]에 의하여 분석하였다. EPS 추출방법으로는 미생물의 용혈이 적고 추출 효율이 가장 양호한 방법으로 알려져 있는 열처리법[7]을 이용하여 추출하였으며, 추출된 EPS는 단백질과 탄수화물의 성분을 측정하여 MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspend Solids)에 대한 값을 환산총량으로 하였으며, 다음 식 (1)과 같이 표시된다[8].

$$EPS(\text{mg/g VSS}) = \frac{\text{protein}(\text{mg/l}) + \text{carbohydrate}(\text{mg/l})}{MLVSS(\text{g/l})} \quad (1)$$

탄수화물 성분은 phenol-sulfuric acid[9]법으로 측정하였다. 시료 0.6 mL에 5% phenol 용액 0.36 mL와 농황산(con-H₂SO₄)를 2.16 mL를 넣고

**Figure 4. Effect of SRT on EPS formation.**

즉시 vortex mixer로 혼합한다. 시료를 실온에서 방냉시킨 후 UV spectrometer (UV-2101PC, Shimadzu)를 이용하여 480 nm에서 흡광도를 측정하였다. 단백질 성분은 Lowry 법[10]에 의하여 측정하였다. 시료 1.0 mL에 같은 양의 2 N NaOH와 Lowry reagent 1 mL를 넣고 10 min간 방치한 다음 Folin-ciocalteuphenol reagent 0.1 mL 넣고 vortex mixer로 혼합 후 30 min 동안 방치한 후 750 nm에서 흡광도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. A/O MBR에서 SRT 변화에 따른 막 여과 특성

A/O MBR에서 SRT 변화에 따른 막 여과 특성을 알아보기 위하여 SRT를 10, 15, 20, 30 day로 변화시키면서 막 여과시간 경과에 따른 TMP를 조사하여 Figure 3에 나타내었다. 막 오염은 MBR 공정에 있어 가장 중요한 문제 중의 하나로 알려져 있다. A/O MBR의 SRT 증가에 따른 운전기간은 SRT 10 day인 경우 279 h 운전 후 MF막의 상용차압인 TMP 35 cmHg에 도달하였으며, SRT를 15, 20, 30 day로 증가시킬수록 각각 220 h, 213 h, 185 h로 운전기간이 단축되었다. Figure 3에 나타난 바와 같이 A/O MBR의 SRT 30 day에서는 긴 SRT로 인하여 TMP가 급격히 증가되었는데, 이것은 SRT가 증가됨에 따라 미생물 체류시간이 길어지고 막 표면에 슬러지 입자들의 빠른 침전이 일어나 막 오염을 가속화시켰기 때문으로 사료된다.

EPS 내의 탄수화물과 단백질은 MBR에서 막 여과성능을 저하시키는 막 오염의 주된 요인으로 알려져 있으며, 이들은 미생물 세포외각의 고분자 물질로서 높은 점성을 형성하는 성분이다. 이러한 고분자 물질은 반응조 내 미생물의 플록형성에 도움을 줄뿐만 아니라 다른 부유물질의 부착을 가능하게 해준다고 보고 되어있으며[11], MBR에 있어 막 표면의 부착 층 형성과 반응조 혼합액의 유기물 농도 상승에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. SRT 변화에 따른 EPS내의 탄수화물과 단백질의 농도변화를 Figure 4에 나타내었다. EPS내에는 단백질이 대부분을 차지하고 있으며, 탄수화물은 SRT가 증가됨에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이것은 단백질이 EPS내에서 주된 작용을 한다는 것을 의미하며, SRT가 증가됨에 따라 낮아진 유기영양물의 양/미생물의 양(Food/Microorganisms, F/M) 비에 의해 이용 가능한 탄소원인 미생물 플록내의 탄수화물 농도가 줄어들었기 때문으로 사료된다.

SRT 변화에 따른 EPS 총량과 EPS내 단백질/탄수화물(protein/carbohydrate, P/C) 비를 조사하여 Figure 5에 나타내었다. Mukai[12]는 MBR 공정의 연구결과 EPS내 P/C 비가 높은 반응조의 투과수량이 낮

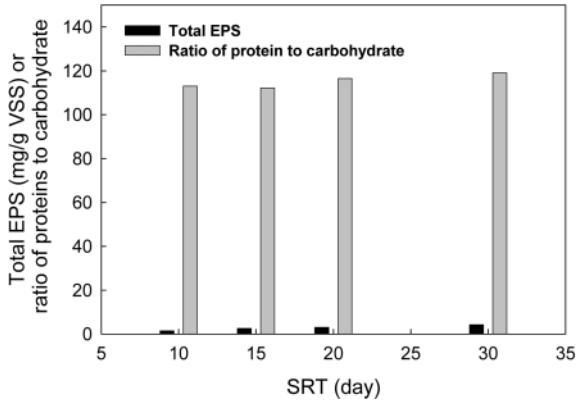


Figure 5. Effect of SRT on EPS production and it's composition.

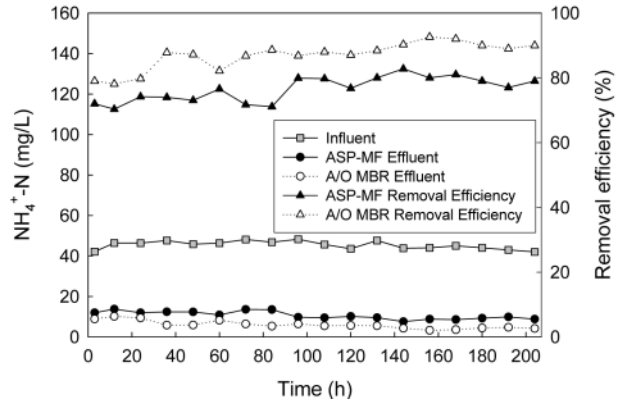


Figure 7. Comparison of NH_4^+-N removal efficiency in ASP-MF and A/O MBR.

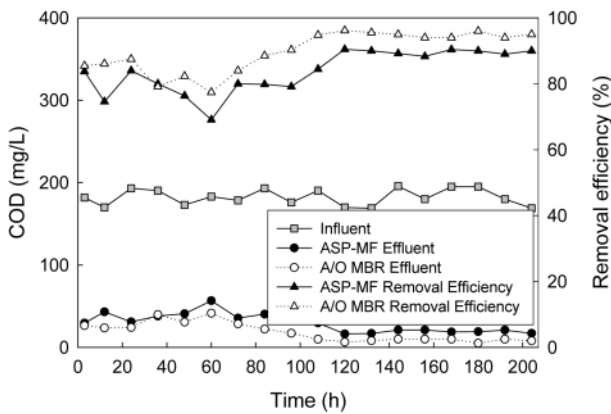


Figure 6. Comparison of COD removal efficiency in ASP-MF and A/O MBR.

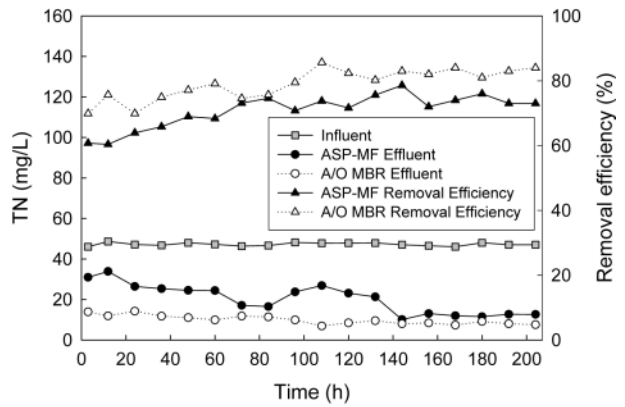


Figure 8. Comparison of TN removal efficiency in ASP-MF and A/O MBR.

게 나타났다고 보고하였다. 본 연구에서도 MBR 공정의 SRT가 증가됨에 따라 P/C 비가 높아져서 막 오염이 심해지고 투과플럭스가 감소되었다. 신 등[13]의 연구결과에 의하면 낮은 EPS에서도 P/C 비에 따라 막 오염에 미치는 영향이 현저하게 달라지므로 침지형 막분리 반응조 운전시 EPS 총량 뿐만 아니라 EPS내 단백질 농도를 관찰하는 것이 중요하다고 하였다. 또한 높은 SRT에서 내부신진대사가 대부분을 차지할 경우 급속성장이 일어날 때보다 더 많은 양의 EPS가 생성된다고 하였으나, 본 연구결과(Figure 5)에서는 SRT 변화가 EPS 총량에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. Gulas 등[14]의 연구결과에서도 EPS의 생성은 높은 SRT의 슬러지에서 고정적이고 내생적인 단계에만 국한되어 있는 것이 아니라 상당한 양의 EPS가 낮은 SRT를 가진 슬러지에서조차 추출이 된다고 보고하였다.

3.2. ASP-MF-RO 공정과 A/O MBR-RO 공정의 처리효율 비교

3.2.1. ASP-MF와 A/O MBR의 처리효율 비교

Figure 6에 ASP-MF와 A/O MBR에서의 COD (Chemical Oxygen Demand) 제거율을 나타내었다. ASP-MF와 A/O MBR에서의 COD 제거율은 각각 70.04~90.43% 및 77.39~96.16%로 A/O MBR에서의 COD 제거율이 ASP-MF에서 보다 높게 나타났다. 이것은 MBR의 침지형 분리막에 의한 고·액분리 과정에서 부유물질 뿐만 아니라 고분자량의 유기물도 동시에 배제시켜 생물학적 분해기회를 증진시킬 수 있기 때문으로 사료된다. 따라서 A/O MBR에서는 침전분리에 따르는 미생물의 유실이 일어나지 않아 다양한 미생물군을 폭기조 안에 유지

시킬 수 있으므로 COD 제거효율이 높게 나타남을 알 수 있었다. MBR을 이용한 일반 하수 및 고농도 폐수의 질산화에 대한 연구는 많은 연구자들[15-17]에 의해 수행되었다. 이들의 연구결과에 의하면 MBR이 유기물 제거는 물론 질산화에도 매우 효과적인 공정이라고 보고 되었으며, 0.1~3.3 kgNH₄/m³·d의 높은 암모니아성-질소(NH₄⁺-N) 부하에서도 반응조내에 고농도의 질산화 미생물이 존재할 수 있게 되어 원만한 질산화가 이루어지는 것으로 알려져 있다. Figure 7에 ASP-MF와 A/O MBR에서의 NH₄⁺-N 제거율을 나타내었다. ASP-MF와 A/O MBR에서의 NH₄⁺-N 제거율은 각각 70.31~82.76% 및 78.10~92.58%로 A/O MBR에서의 NH₄⁺-N 제거율이 ASP-MF에서 보다 높게 나타났다. 일반적으로 질산화 미생물이 질소 제거 반응의 제한단계로 간주되는데 질산화 미생물은 성장계수가 매우 작아 부유성장 반응기에서 높은 질산화를 일으키기 위해서 3~4일 이상의 SRT가 필요하다. 또한 질산화균은 호기성 상태에서 유기물을 이용하는 미생물들과 경쟁을 하게 되는데, 상대적인 기질 비성장속도가 느려 긴 SRT를 갖는 시스템이 필수적인 제한조건이다. 이를 위해서는 미생물의 재순환이 필수적이나 중력 침강조를 이용하는 기존 ASP시설에서는 슬러지 농도가 높아지면 효과적인 고·액분리가 잘 되지 않기 때문에 어려운 점이 많다. 그러나 MBR에서는 슬러지 침강 특성에 관계없이 질산화에 필요한 슬러지의 긴 체류시간을 얻을 수 있어 질산화에 매우 효과적이다. 따라서 MBR에 고농도로 유지된 미생물은 질산화에 필요한 시간을 단축시킬 수 있으며, 암모니아와 같은 저해물질에 대해서도 고농도의 부하에 대한 높은 질산화 효과를

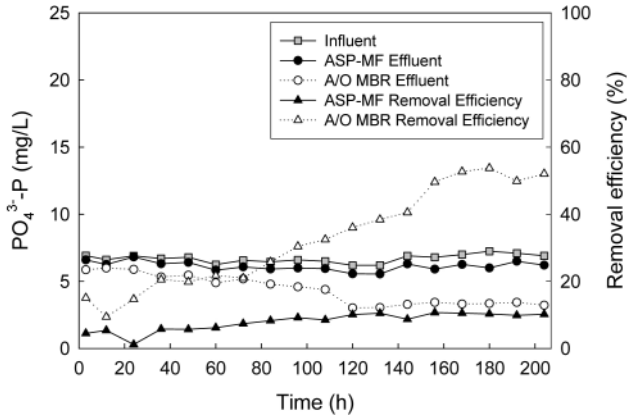


Figure 9. Comparison of $PO_4^{3-}P$ removal efficiency in ASP-MF and A/O MBR.

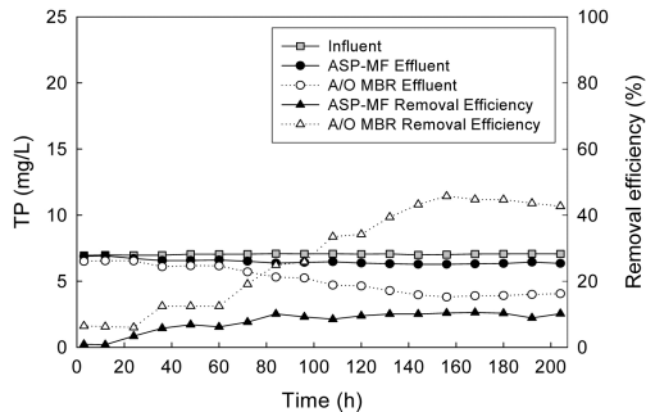


Figure 10. Comparison of TP removal efficiency in ASP-MF and A/O MBR.

Table 5. Comparison of Removal Efficiency between ASP-MF-RO and A/O MBR-RO Process

Parameter	Feed concentration (mg/L)	Effluent concentration (mg/L)		Removal efficiency (%)	
		ASP-MF-RO	A/O MBR-RO	ASP-MF-RO	A/O MBR-RO
COD	179.83~200.75	12.77~31.90	0.70~24.40	82.26~93.64	86.43~99.65
NH_4^+-N	38.13~45.23	1.23~2.79	0.36~1.88	92.68~97.28	95.06~99.21
TN	46.00~48.62	2.68~6.97	0.77~2.96	84.85~94.49	93.56~98.42
$PO_4^{3-}P$	7.53~8.03	0.01~0.06	0.01~0.02	99.15~99.89	99.67~99.92
TP	6.94~8.08	0.05~2.01	0.03~1.23	71.08~99.41	82.26~99.58

을 얻을 수 있다[18]. Figure 8에 ASP-MF와 A/O MBR에서의 총질소(TN) 제거율을 나타내었다. ASP-MF와 A/O MBR에서의 TN 제거율은 각각 60.40~78.58% 및 69.88~85.63%로 A/O MBR에서의 TN 제거율이 ASP-MF에서 보다 높게 나타났다. 이것은 ASP-MF에서는 무산소 단계가 없어 원활한 탈질이 이루어지지 않은 반면에, A/O MBR에서는 무산소 단계에서 원활한 탈질이 이루어졌으며, 막에 의한 높은 슬러지 체류시간이 유지되어 박테리아의 성장과 막 사이에 형성된 무산소지역에서 탈질화가 원활하게 이루어졌기 때문에 사료된다.

생물학적 인 제거는 활성슬러지 내의 인 축적 미생물(Phosphorus Accumulating Organisms, PAOs)에 의해 이루어지는데, 이 미생물은 혐기성과 호기성 조건의 각 단계를 교대로 거치면서 인을 제거한다. 위와 같은 조건을 교대로 거쳐 미생물의 대사경로를 전환시키는 환경의 극한적인 변화에 의하여 혐기성 인 방출 대사에서 호기성 인 섭취가 정상수준 이상이 된다. 인 축적 미생물은 혐기성 조건에서 인을 과잉방출하고 혐기성 조건에서 호기성 조건으로의 전환을 통하여 인을 과잉섭취(luxury uptake)하며, 인을 과잉섭취한 미생물을 슬러지로 폐기함으로써 인을 제거하게 된다. 그러나 일반적인 생물학적 처리공정에서 인 제거는 유기물이나 질소 제거에 비하여 처리효율이 이상적이지 못하다. Figure 9, 10에 ASP-MF와 A/O MBR 시스템에서의 인산염-인($PO_4^{3-}P$) 제거율과 TP 제거율을 각각 나타내었다. ASP-MF와 A/O MBR에서의 $PO_4^{3-}P$ 제거율은 각각 1.20~10.69% 및 9.41~53.72% (Figure 9), TP 제거율은 각각 0.80~10.54% 및 6.01~45.71% (Figure 10)로 높게 나타났다. ASP-MF에서 보다 A/O MBR에서의 인 제거가 약간 높게 나타났지만, 유기물이나 질소 제거에 비하여 상당히 낮은 수준의 처리효율을 나타냈다. 이것은 A/O MBR의 무산소조에서 과잉 DO의 존재로 인하여 인의 방출이 원활하지 않아 폭기조에서 인의 과

잉섭취가 일어나지 않았으며, ASP에서는 혐기조와 무산소조가 모두 존재하지 않아 인 방출이 거의 일어나지 않은 것으로 사료된다.

3.2.2. ASP-MF-RO 공정과 A/O MBR-RO 공정의 처리효율 비교

Table 5에 ASP-MF-RO 공정과 A/O MBR-RO 공정의 처리효율을 비교하여 나타내었다. ASP-MF-RO 공정과 A/O MBR-RO 공정에서 COD 제거율은 82.26~93.64% 및 86.43~99.65%, NH_4^+-N 제거율은 92.68~97.28% 및 95.06~99.21%, TN 제거율은 84.85~94.49% 및 93.56~98.42%, $PO_4^{3-}P$ 제거율은 99.15~99.89% 및 99.67~99.92%, TP 제거율은 71.08~99.41% 및 82.26~99.58%로 높은 제거율을 나타내었다. 이와 같이 두 공정에서 모두 높은 제거율을 나타낸 것은 각 공정의 마지막 단계에 장치한 RO막에 의해 부유물질, 미생물, 일반 유기화합물질 및 중금속의 완벽한 제거와 이온성 물질에 대한 높은 처리효율을 얻을 수 있었기 때문으로 사료된다. 또한 A/O MBR-RO 공정이 ASP-MF-RO 공정보다 약간 높은 제거율을 나타낸 것은 각 공정의 RO 여과단계 유입전 단계인 A/O MBR 시스템이 ASP-MF 시스템보다 처리효율이 더 우수하였기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 고도처리 시스템으로서 A/O MBR-RO 공정을 이용하여 폐수를 재활용하고자 하였다. A/O MBR-RO 공정의 성능평가를 위하여 A/O 조건의 침지형 MBR에서 SRT 변화에 따른 막 오염 특성을 조사하였으며, A/O MBR-RO 공정과 기존의 활성슬러지공정(ASP)에 막을 결합한 ASP-MF-RO 공정의 처리효율을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) A/O MBR에서 SRT 변화에 따른 막 여과 특성을 알아보기 위하여 막 여과시간 경과에 따른 TMP와 EPS 변화를 조사하였다. SRT를 증가시킬수록 TMP의 급격한 상승을 초래하여 막 여과 시간이 단축되었으며, EPS내 P/C 비가 높아져서 막 오염이 빠르게 진행되어 투과플럭스가 감소되었다.

(2) ASP-MF와 A/O MBR에서의 COD 제거율은 70.04~90.43% 및 77.39~96.16%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거율은 70.31~82.76% 및 78.10~92.58%, TN 제거율은 60.40~78.58% 및 69.88~85.63%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 제거율은 1.20~10.69% 및 9.41~53.72%, TP 제거율은 0.80~10.54% 및 6.01~45.71%로 A/O MBR에서의 처리효율이 ASP-MF에서 보다 높게 나타났다.

(3) ASP-MF-RO 공정과 A/O MBR-RO 공정에서 COD 제거율은 82.26~93.64% 및 86.43~99.65%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거율은 92.68~97.28% 및 95.06~99.21%, TN 제거율은 84.85~94.49% 및 93.56~98.42%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 제거율은 99.15~99.89% 및 99.67~99.92%, TP 제거율은 71.08~99.41% 및 82.26~99.58%로 높은 제거율을 나타내었다. 이와 같이 두 공정에서 모두 높은 제거율을 나타낸 것은 각 공정의 마지막 단계에 장치한 RO막에 의해 이온성 물질에 대한 높은 처리효율을 얻을 수 있었기 때문이다. 또한 RO 여과단계 유입전 단계인 A/O 조건의 침지형 MBR 시스템의 효과로 인하여 A/O MBR-RO 공정이 ASP-MF-RO 공정보다 처리효율이 더 우수함을 알 수 있었다.

따라서 A/O MBR의 SRT를 적절히 유지함으로써 막의 오염을 감소시켜 운전기간을 연장시킬 수 있으며, A/O MBR의 투과수를 RO에 유입시켜 고도처리 함으로써 유기물 및 영양염류의 처리효율을 향상시킬 수 있다. 또한 A/O MBR-RO 공정은 ASP-MF-RO 공정에 비해 높은 동력비를 유발하지만, 중·소규모의 폐수처리 공정에 필요한 초기 투자비 및 소요부지가 상당부분 절감되므로 처리효율 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 매우 효과적이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고 문헌

1. Y. Wang, X. Huang, and Q. Yuan, *Pro. Biochem.*, **40**, 1733 (2005).
2. M. Mayhew and T. Stephenson, *Environ. Tech.*, **18**, 883 (1997).
3. A. D. Bailey, G. S. Hansford, and P. L. Dold, *Water Res.*, **28**, 297 (1994).
4. J. A. Lopez-Ramirez, S. Sahuquillo, D. Sales, and J. M. Quiroga, *Water Res.*, **37**, 1177 (2003).
5. J. J. Qin, K. A. Kekre, G. Tae, M. H. Oo, M. N. Wai, T. C. Lee, B. Viswanath, and H. Seah, *J. Membrane Sci.*, **272**, 70 (2006).
6. APHA, *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. American Public Health Association, Washington DC. (1998).
7. M. J. Brown and H. N. Lester, *Appl. Environ. Microbio.*, **40**, 179 (1980).
8. H. S. Shin, S. T. Kang, and S. Y. Nam, *Biotech. Bioprocess Eng.*, **5**, 460 (2000).
9. M. Dubois, *Anal. Chem.*, **28**, 350 (1956).
10. O. H. Lowry, *Bio. Chem.*, **193**, 265 (1951).
11. J. W. Lee, *Biotech. Letters*, **19**, 799 (1997).
12. T. Mukai, in *Proc. of Asian Water Quality* **97**, 1499 (1997).
13. H. S. Shin, H. H. An, and S. T. Kang, *J. Korean Soc. Water Quality*, **5**, 415 (1999).
14. V. Gulas, M. Bond, and L. Benefield, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **51**, 798 (1979).
15. K. J. Kim and S. H. Yoon, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**, 239 (2001).
16. W. L. Jones, P. A. Wilderer, and E. D. Schroeder, *J. WPCF*, **62**, 259 (1990).
17. J. Soreusen, D. E. Thoruberg, and M. K. Neilsen, *Water Res.*, **66**, 236 (1994).
18. M. Huh, B. G. Kim, and J. Y. Kang, *J. Korean Environ. Eng.*, **24**, 171 (2002).