한국지반환경공학회 논문집
제8권 제6호 2007년 12월 pp. 21～28

Membrane bioreactor(MBR)과 Reverse osmosis(RO) 공정을 이용한 하수처리

Sewage Treatment using Membrane Bioreactor(MBR) and Reverse Osmosis(RO) Process

오 승 욱[1] · 정 종 태[2] · 이 진 우[3] · 김 종 오†
Oh, Seungwook · Jung, Jongtae · Lee, Jinwoo · Kim, Jongoh

ABSTRACT : The objective of this study was to investigate the effect of hydraulic retention time (HRT) on removal efficiencies of organic matter, nitrogen and phosphorus in MBR-RO process for treating synthetic sewage. In MBR process, turbidity was less than average 2 NTU and average removal efficiency showed more than 99% during the operation period(MBR 105 day). As a result of HRT variation, average removal efficiencies of COD_{Cr} on HRT 6, 12, 18 and 24hour were about 72.4, 84, 88.6 and 92.5%, respectively. The NH_4^+-N removal efficiency was about 60.2 85.5, 91.3 and 92.2%, respectively. T-N and T-P removal efficiencies increased from 53.7 and 56.8 to 82.5 and 86.4%, respectively as the HRT increased from 6 hour to 24 hour. In RO process, average removal efficiencies of color and COD_{Cr} in RO permeate were about 99.9% and 96.8%, respectively. Also, removal efficiencies of T-N, NH_4^+-N, NO_3^--N and T-P were all above average 90%.

Keywords : MBR, RO, T-P, T-N, HRT

요 지 : 본 연구는 합성하수 처리에 있어 MBR-RO 공정 적용시 유기물 및 질소, 인 제거에 대하여 수리학적체류시간이 제거효율에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. MBR 공정에서 탁도는 운전기간(105일)동안 2 NTU 이하로 평균 99% 이상의 제거효율을 보였다. 또한, 수리학적체류시간 6, 12, 18 그리고 24 hour에 대한 COD_{Cr}, T-N, NH_4^+-N 그리고 T-P의 평균 제거효율을 살펴보면, COD_{Cr}의 평균 제거율은 각각 72.4, 84, 88.6 그리고 92.5%, NH_4^+-N의 제거효율은 각각 60.2, 85.5, 91.3 그리고 92.2%였다. T-N과 T-P의 제거효율은 수리학적 체류시간을 6시간에서 24시간으로 증가시킴에 따라 각각 53.7과 56.8%에서 82.5와 86.4%로 증가했다. RO 공정에서 색도와 COD_{Cr}의 제거효율은 각각 99.9%와 96.8%였다. 또한 RO 유출수에서 T-N, NH_4^+-N, NO_3^--N 그리고 T-P는 평균 90% 이상 제거되었다.

주요어 : MBR, RO, T-P, T-N, 수리학적체류시간

1. 서 론

하천수질은 하천수의 이용에 큰 영향을 주는데, 이는 상수의 맛과 상수 생산비를 좌우할 뿐 아니라 국민건강에도 직접적인 영향을 미친다. 그러나 경제개발과 더불어 하천 오염도가 증가하였고 특히 질소 및 인과 같은 영양염류 물질은 하천이나 호소로 유입시 부영양화를 일으키는 주원인 물질이며 악취 유발, 병원성 세균의 번식 및 사후 저질토에서의 생분해시 용존 산소를 고갈시켜 어류와 같은 수생생물에 악영향을 미쳐 수질관리 측면에 매우 중요하다(김종오 등, 2006; 신항식 등, 2003).

활성슬러지법은 다른 수처리 공정들에 비해 경제적이고 안전하다는 측면 때문에 하·폐수의 처리에 광범위하게 사용되고 있지만 슬러지 침강성의 악화에 따른 미생물 유실로 인한 미생물 농도감소와 처리 수질의 악화가 일어나기 쉬운 단점을 가지고 있다(김규진 등, 2001). MBR은 기존의 생물학적 처리의 중력침전에 의한 슬러지의 분리를 분리막으로 대체하여 반응조 내의 고농도 미생물 유지 및 질산화균과 같은 성장속도가 늦은 미생물 보유를 통한 처리효율이 증가되고, 막에 의한 수처리가 결합되어 유출수의 수질을 향상시키고 생물학적 처리조건에 상관없이 처리수질이 안정적이며 병원균 제거도 어느 정도 가능한 우수한 수처리 시스템이다(Fane 등, 1996; Ueda 등, 1997; Debkowska 등, 1996). 그러나 최종처리단계에서 응집제에 의한 응집, 입상활성탄(Granular activated carbon, GAC)에 의한 흡착 등 추가적인 물리·화학적 처리공정을 적용해 인, 색도 등

1) 비회원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 석사
2) 정회원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
3) 비회원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 석사과정
† 정회원, 강릉대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail : jokim@kangnung.ac.kr)

을 제거해야 하는 문제점들이 지적되고 있다. 최근, MBR 공정에 RO를 연계한 새로운 개념의 공정이 도시 폐수를 재이용하기 위해 개발되고 있으며 MBR의 단점을 보완할 수 있는 것으로 보고되었다(Qin 등, 2006; Comerton 등, 2005; Ahn 등, 2002). Lozier 등(2001)은 MBR-RO 시스템을 운전한 결과 2차음용수 수질기준을 만족시킬 뿐만 아니라 처리수의 간접적인 재이용 가능성을 보고하였다. Poitel 등(1999)은 침출수 처리를 위해 MBR-RO 시스템을 이용하였다. 그 결과, 처리수의 COD와 BOD_5는 각각 15mg/L, 1mg/L이하였으며 염소와 질소제거효율을 각각 99%와 90%로 보고하였다.

본 연구에서는 합성하수 처리에 대한 MBR-RO 공정 적용시 공정효율에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 또한, MBR 공정의 경우 HRT(Hydraulic retention time) 변화가 유기화합물 및 질소, 인 제거에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 대상폐수

본 연구에서 사용된 합성하수의 성상은 표 1에 나타내었으며 탄소 공급원으로는 포도당($C_6H_{12}O_6$)을 사용하였고 염화암모늄(NH_4Cl)을 질소 공급원으로 하여 실험에 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 막결합형 생물반응기(Membrane bioreactor, MBR)와 RO(Reverse osmosis)의 구성

본 실험에 사용된 MBR의 membrane module은 침지형 중공사막((주)이엔이)으로써 분리막의 사양은 표 2, MBR-RO 시스템의 개요도는 그림 1에 나타내었다. 반응기는 아크릴 재질로서 반응기 유효용량은 3L이다. 반응기 내부에 침지형 중공사막을 침적시켜 module 하부에는 연속적인 공기 주입과 함께 막 표면에서의 미생물 및 슬러지의 부착을 최소화하기 위해 산기관을 설치하였다. 표 3과 표 4에 MBR과 RO 공정의 운전조건을 나타내었다. 모듈의 하단부에 설치된 산기관을 이용하여 폭기량은 2mg/L이상의 용존산소 공급과 막오염 저감을 고려하여 5L/min의 포기강도로 운전하였다. MBR 운전 전에 MLSS 농도를 3000±200mg/L로 유지하기 위해 적당량의 슬러지를 반응조 내에서 폐기함으로써 SRT(Sludge retention time)를 10day로 조절하였으며, 운전기간 0～30, 30～60, 60～90, 90～105일에 대해 HRT를 6, 12, 18, 24시간으로 조절하여 실험을 수행하였

표 1. 합성하수 조성성분

Components	Concentration (mg/L)
Glucose	225
Na_2CO_3	212
NH_4Cl	152
$CaCl_2$	17.5
NaCl	37.5
$MgSO_4$	12.5
KH_2PO_4	90.6

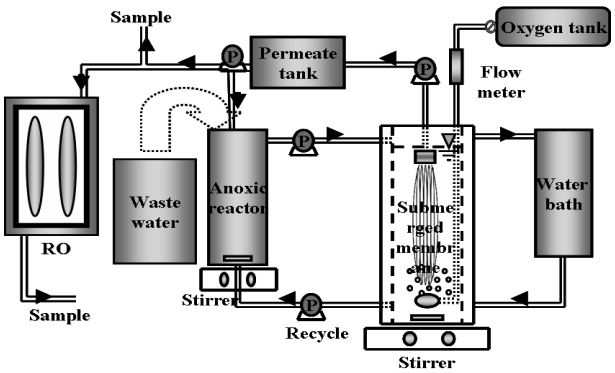


그림 1. MBR-RO 시스템의 개요도

표 2. Membrane module 사양

System type	Submerged
Material	PVDF
Membrane type	Hollow fiber
Pore size	0.4㎛
Total membrane surface area	0.11m^2

표 3. MBR 운전조건

Operating condition				
Working volume	Anoxic reactor 5L			
	MBR reactor 3.5L			
Feed volume	10L			
Operating pressure	> 10kPa			
Sludge retention time (SRT)	10day			
Hydraulic retention time (HRT)	6hour	12hour	18hour	24hour
Flux ($L/m^2 \cdot hr$)	4.43	2.16	1.4	1.02
Aeration intensity	5L/min			
Dissolved oxygen	2～3mg/L			
Temperature	25±1℃			
pH	7.0±0.5			

표 4. RO 시스템의 운전조건 및 구성

Operating pressure	200psi
Capacity	200L/hr
RO pump	DS-960 (Speck pump)
Vessel	AFV-4040
Membrane	AG-4040F

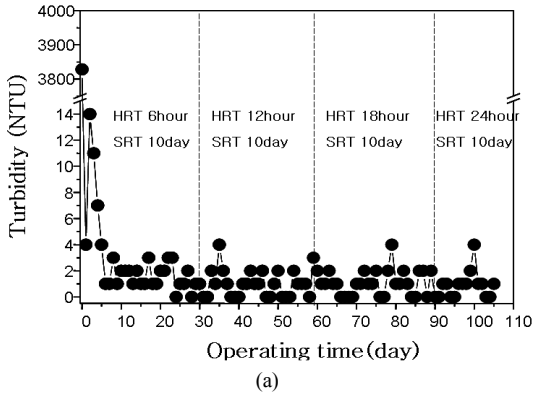
다. 미생물의 활성을 유지하기 위해 water bath를 이용하여 온도는 25℃로 유지하였고, pH는 중탄산나트륨(Sodium bicarbonate)을 이용하여 중성 부근으로 조절하였다. 폭기조에 사용된 슬러지는 하수처리장의 반송슬러지를 합성하수에 적응시키면서 MLSS 농도를 3000±200mg/L로 유지하기 위해 주기적인 슬러지의 첨가와 MBR 반응조에서 무산소조로 배출함으로써 MLSS 농도를 유지하였다. 또한 permeate tank의 MBR 유출수는 시료 분석을 위한 일정량을 제외하고는 MBR 반응조 내의 농도 유지를 위해 투과수 일부를 다시 MBR 반응조로 유입시켰다. 또한 HRT 24시간의 MBR 유출수를 RO 유입수로 사용하여 RO 공정의 처리특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

실험기간 동안 반응조내 운전 조건은 MLSS 3000±200 mg/L, F/M 비 0.15(KgCOD/Kg MLSS·d), C/N 비 2.5, 폭기강도 5L/min, SRT 10일, 운전기간 30, 60, 90, 105일에 대해 HRT를 6, 12, 18 그리고 24시간으로 조절하여 실험을 수행하였다. SRT를 10일로 고정하기 위하여 주기적인 폭기조 내 슬러지의 반송과 폐기를 통해서 조절하였다. 또한 MBR 반응조에 무산소조의 반송비는 0.37, F/M 비 0.4 (KgCOD/Kg MLSS·d) 그리고 C/N 비 2.5로 유지하였다.

그림 2의 실험결과는 MBR을 이용하여 합성하수를 대상으로 운전기간 동안 폭기조의 투과수를 대상으로 탁도를 분석한 결과이다. 폭기조내의 중공사막을 통해 나온 처리수의 탁도는 운전기간 동안 평균 3NTU 이하의 농도로 유지되었으며 99% 이상의 제거율을 보였다. 이는 공경 0.4㎛ 중공사 막에 의한 부유물질 제거로서 막의 특성 중의 하나인 고액분리가 효과적으로 이루어졌기 때문이다. 그러나 그림 2 (b)에서 유출수의 색깔은 옅은 노란색을 띄었으며 이는 생물학적 처리시 나타나는 공통적인 결과(김진길 등, 2001)로서 미생물의 용해성 혹은 콜로이드성 대사생성물질인 SMP(Soluble microbial products) 때문에 나타나는 현상이며 MBR의 한계성을 단적으로 보여주는 것이다. 따라서 이러한 문제점 해결을 위해 다른 공정의 첨가가 요구되며 본 연구에서는 역삼투막 공정을 적용시켜 상기 문제점을 해결하고자 하였다.

그림 3의 실험결과에서 COD_{Cr}의 농도는 $SCOD_{Cr}$로서의 농도이며 그 제거 거동 결과를 살펴보면 유입수 평균 COD_{Cr}의 농도는 219mg/L이며 MBR 운전 15일 이후 유출수의 평균 COD_{Cr}의 농도는 29.5mg/L로 안정적인 처리수질을 보였다. 그러나 15일 이전에는 COD_{Cr}의 농도가 감소하고는 있지만 불안정한 처리수질을 보이는데 이는 폐수 내에서 미생물이 유기물을 분해하기 위해서는 환경 내에서의



(a)

(b)

그림 2. HRT와 운전 시간에 따른 탁도 변화

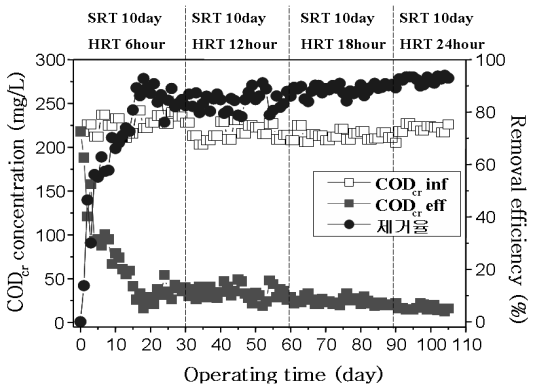


그림 3. HRT와 운전 시간에 따른 COD_{cr}의 농도 변화

적응기간이 필요하기 때문이다. 일반적으로 미생물이 환경에 적응하기 위해서는 미생물 생체 내에서 효소활동이 이루어지게 되고 효소분비를 통해 그 환경에 적응한 후 유기물을 분해하게 된다. 또한 미생물을 이용한 유기오염물질 제거에서 MBR 반응조 내에서의 반응조가 처리할 수 있는 적정 폐수 농도, 적정 미생물의 농도 그리고 최적의 미생물 활성상태를 유지하는 것이 안정된 유기물 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

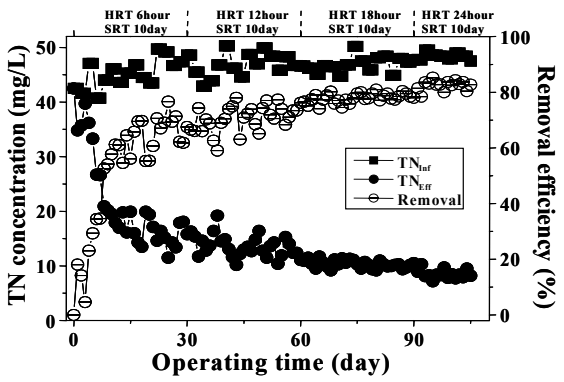
HRT 12hour(MBR 운전 30일) 이후의 COD_{Cr} 농도는 안정적으로 감소하며 평균 88.7%의 높은 제거효율을 보였다. 이는 종래의 활성슬러지 공정의 유기물 제거효율보다 높은 제거효율이다(Gao 등, 2004). 이는 생물학적 처리공정

에 분리막 공정을 결합함으로써 침전 분리로 제거할 수 없는 부유성 고형물과 미생물들이 분리막에 의해 완전 배제되기 때문이다. 따라서 분리막에 의한 고액분리 과정동안 반응조 내에서 농축된 미생물들의 반응에 의해서 유기물 분해효율이 증가된 것으로 판단되다.

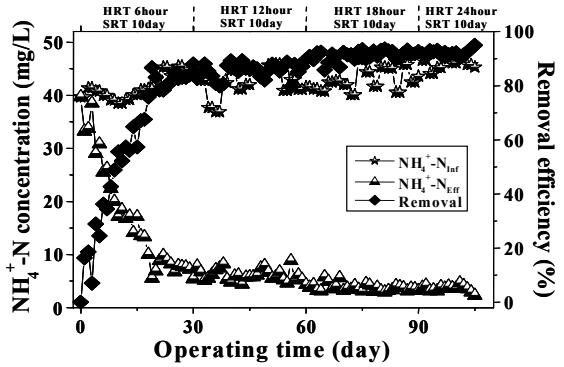
그림 4는 MBR 공정에서 운전시간에 대한 NH_4^+-N, TN 그리고 NO_3^--N의 농도 변화를 나타낸 실험 결과이다. 유입수의 NH_4^+-N과 TN의 평균 농도는 각각 42.3mg/L과 46.4mg/L였다. MBR 공정 20일 이후부터 NH_4^+-N과 TN는 안정적인 처리수질을 보였고 HRT 18hour(MBR 공정 60일)부터 NH_4^+-N과 TN의 평균 농도는 각각 3.7mg/L과 10.3mg/L였다. TN은 NH_4^+-N보다 상대적으로 낮은 제거효율을 보였으며 변화폭도 NH_4^+-N에 비해 적은 것으로 나타났다. 이는 질산화를 통해 NH_4^+-N의 제거는 효과적으로 이루어 졌지만 그림 4(c)에서 보여준 것처럼 상대적으로 생성되는 NO_3^--N의 농도 증가로 인해 NH_4^+-N보다 TN의 제거율이 낮은 것으로 판단된다. 생물학적 처리시 효과적인 질소 제거효율은 유입수의 C/N비가 큰 영향을 미치며 본 연구에서는 C/N비를 약 2.5로 유지하여 운전 105일 동안 운전한 결과 약 90%의 NH_4^+-N와 TN의 평균 제거율을 얻었다. 이러한 결과는 황규대 등(1999)의 연구에서 C/N비를 약 3으로 유지하면서 운전하여 총 질소 제거효율이 90%인 연구결과와 유사한 결과를 보였다.

그림 5는 MBR 공정에서 운전시간에 대한 TP의 농도 변화를 나타낸 실험결과이다. MBR로 유입되는 유입수의 평균 TP의 농도는 21.3mg/L이었다. 운전시간 15일 이후에 안정적인 처리 수질을 보였으며 HRT를 18hour로 운전한 60일 이후의 평균 MBR 유출수의 TP 농도는 2.9mg/L이고 제거율은 86%로서 HRT 6과 12hour보다 높은 것으로 나타났다. 전반적으로 TP의 제거는 안정적으로 이루어 졌는데 이는 SRT와 MLSS의 주기적인 조절을 통한 슬러지 폐기가 있었기 때문에 슬러지에 축척된 인도 함께 제거된 것으로 판단된다.

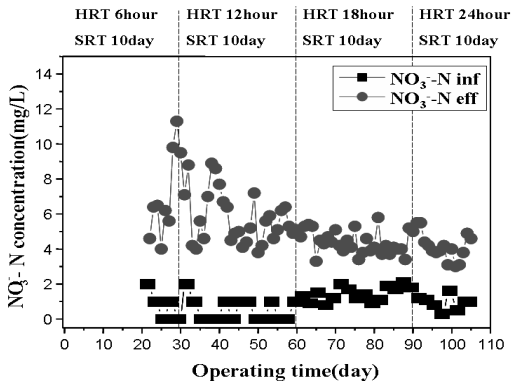
그림 6에서는 HRT 24hour로 105일 운전 후 MBR 공정에서 막으로 투과한 투과수에 대해서 RO공정을 후처리 실험에 도입하여 RO 투과수에 대해 색도 및 탁도의 처리수질을 분석한 실험결과이다. RO 시스템의 운전조건은 투과시간 5, 10, 15, 20 그리고 25분으로 하여 운전압력을 200psi로 조절한 후 AG-4040F의 RO막을 사용하여 투과실험을 하였다. DS-960(Speck pump) 펌프를 이용하여 시간당 200L의 속도로 RO시스템을 운전하여 실험을 수행하였다. 그림 6 실험결과에서 MBR 유출수를 대상으로 RO 여과 공정을 사용하였을 때 RO 투과수 평균 색도는 1 PtCo로써 90%이상의 제거율을 보였으며 서울시 수돗물 수질



(a)



(b)



(c)

그림 4. HRT와 운전 시간에 따른 TN(a), NH_4^+–N(b)과 NO_3^-–N(c)의 농도 변화

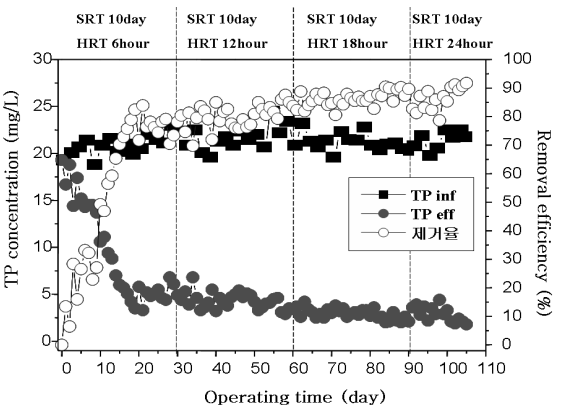
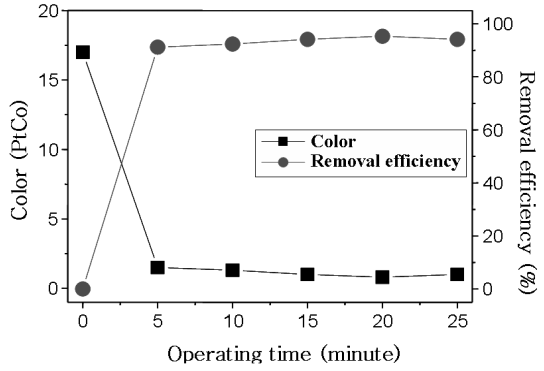
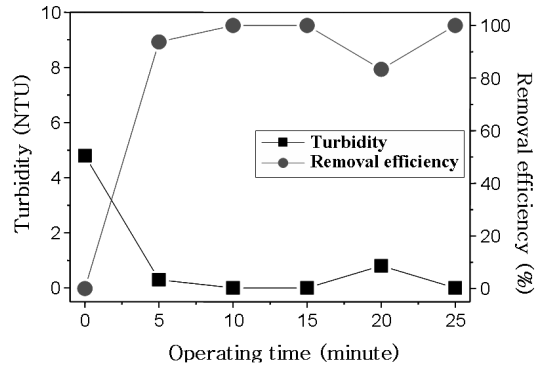


그림 5. HRT와 운전 시간에 따른 TP의 농도 변화



(a)



(b)

그림 6. MBR 유출수를 대상으로 RO 여과시 색도(a)와 탁도(b) 변화

기준(5 PtCo)보다 낮은 농도를 나타내었다. 또한 탁도 제거에 대해서는 평균 90%의 제거율을 보였으며 안정적인 탁도 제거 효율을 보였다.

그림 7은 MBR 공정에서 막으로 투과한 투과수에 대해서 RO공정을 후처리 실험에 도입하여 RO 투과수에 대해 COD_{Cr}의 처리수질을 분석한 실험결과이다. 그림 7의 실험결과를 살펴보면 RO 여과 공정 5분 이후 평균 COD_{Cr}의 농도는 6.9mg/L로서 평균 75%의 제거율을 보였다. 이 결과는 RO 여과 공정을 통한 처리수의 수질이 MBR 공정에서 재활용수로서 만족시키지 못했던 수질을 대신하여 재활용수로서의 이용이 가능하다는 것을 보여준 것이다.

그림 8은 MBR 공정에서 막으로 투과한 투과수에 대해서 RO 여과 공정을 후처리 공정에 도입하여 RO 투과수에 대한 NH_4^+-N, NO_3^--N 그리고 TN의 처리수질을 분석한 실험결과이다. RO 여과 공정 유입수(MBR 투과수)의 초기 NH_4^+-N, NO_3^--N 그리고 TN의 평균 농도는 각각 평균 6.3, 7.4 그리고 16.2mg/L이었다. 그러나 RO 여과 공정 적용 5분 후 NH_4^+-N 및 NO_3^--N의 제거율이 모두 70% 이상으로 높은 제거효율을 보였고 TN의 경우 초기운전 5분후 평균 농도는 7.5mg/L로 53.7%의 평균제거율을 보였다. RO여과 공정 25분 후 NH_4^+-N 및 NO_3^--N의 농도는 각각 1.04와

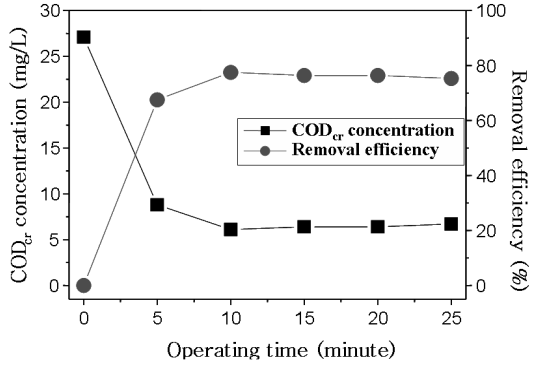
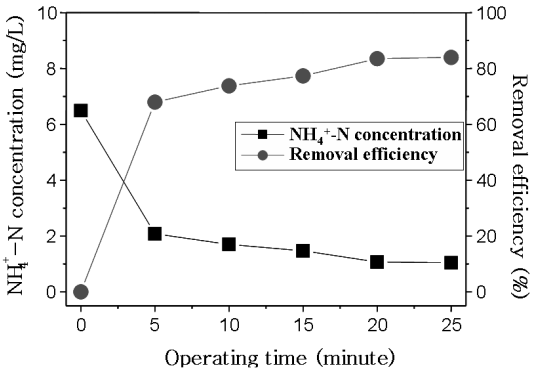
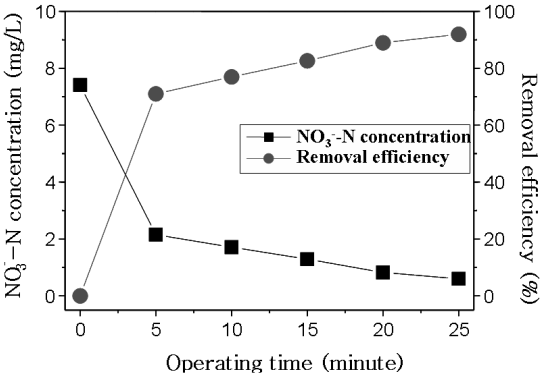


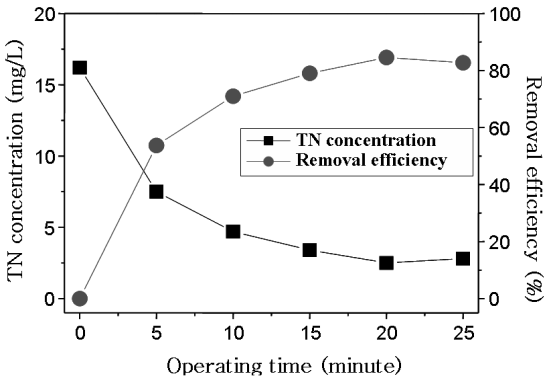
그림 7. MBR 유출수를 대상으로 RO 여과시 COD_{Cr} 농도 변화



(a)



(b)



(c)

그림 8. MBR 유출수를 대상으로 RO 여과시 NH_4^+-N(a), NO_3^--N(b), TN(c) 농도 변화

0.6mg/L이었고 제거효율은 각각 84와 92%로 높은 제거효과를 보였으며 TN의 경우 RO 여과 공정을 20분 동안 시행한 결과 2.5mg/L로 84.6%의 좋은 제거특성을 나타내었다.

그림 9는 RO 투과수에 대한 TP의 처리수질을 분석한 실험결과이다. 그림 9의 실험결과를 살펴보면 MBR 유출수의 초기 TP의 평균 농도는 6.5mg/L이었다. MBR 유출수를 대상폐수로 하여 RO여과 공정을 시행한 결과 초기운전 5분후의 평균 농도는 0.09mg/L로 98.6%의 평균제거율을 보였고 RO 여과 공정을 20분 동안 시행한 결과 0.02mg/L로 99.7%의 평균 제거율을 나타내어 전체 운전 기간 동안 안정정인 처리 수질을 보였다.

4. MBR-RO 공정의 물질수지

그림 10-12는 MBR-RO 공정에서 COD_{Cr}, TN 그리고 TP의 물질수지도를 나타낸 것이며 각 공정의 유출수와 MBR

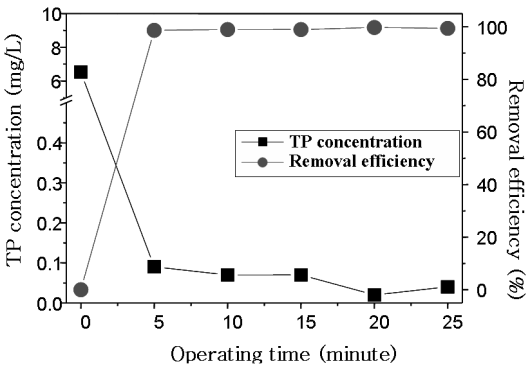


그림 9. MBR 유출수를 대상으로 RO 여과시 TP 농도 변화

반응조 내에서 일정량의 시료를 채취한 후 각각의 분석방법을 통해 제거율을 나타내었다. 그림 10은 MBR-RO 공정에서 COD_{Cr}에 대한 물질수지이다. 초기 100%의 COD_{Cr}이 MBR 공정을 거치면서 87.7%가 제거 되었고 나머지 12.3%는 RO 여과 공정 적용으로 처리되어 최종 COD_{Cr}의 3.2%만이 MBR-RO 공정에서 제거되지 않았다.

그림 11은 MBR-RO 공정에서 TN의 물질수지도를 나타낸 것이다. 물질수지도를 살펴보게 되면 MBR공정 유입수의 TN의 평균 농도는 47.2mg/L이었지만 MBR 공정을 거치면서 평균 70.8%의 TN이 제거 되었다. 그러나 제거되지 않은 TN의 29.2% 중 유입폐수 내에 거의 존재하지 않았던 NO_3^--N가 NH_4^+-N의 질산화를 통해 생성되어 MBR 처리수의 TN 성분 중 약 50% 정도를 차지했다. 또한 MBR 공정에서 제거되지 못한 처리수의 잔여 29.2% TN에 대해서는 RO 여과 공정을 적용함으로써 전체 TN의 8.9%만이 제거되지 않았다.

그림 12는 MBR-RO 공정에서 TP의 물질수지도를 나타낸 것이다. TP의 경우 MBR 공정 처리를 통해 76.7%가 제거되었고 나머지 TP의 23.3%는 후처리 RO 여과 공정 적용으로 인해 전체 TP 중 99.7%가 제거되고 0.3% 만이 MBR-RO 공정으로 제거되지 않았다.

5. 결 론

MBR-RO 여과 공정을 이용하여 합성하수를 처리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

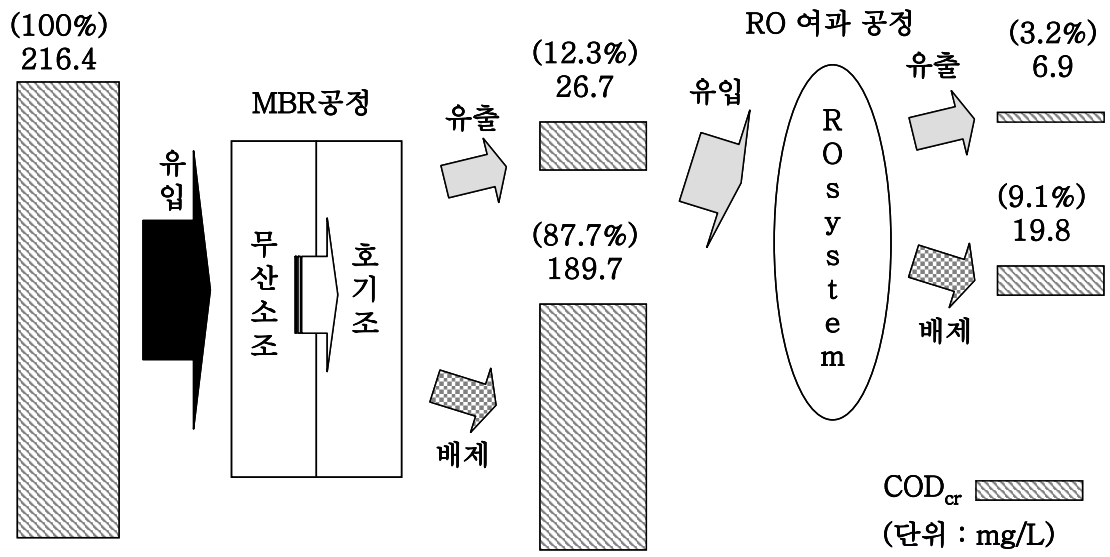


그림 10. MBR-RO 공정에서 COD_{Cr}의 물질수지

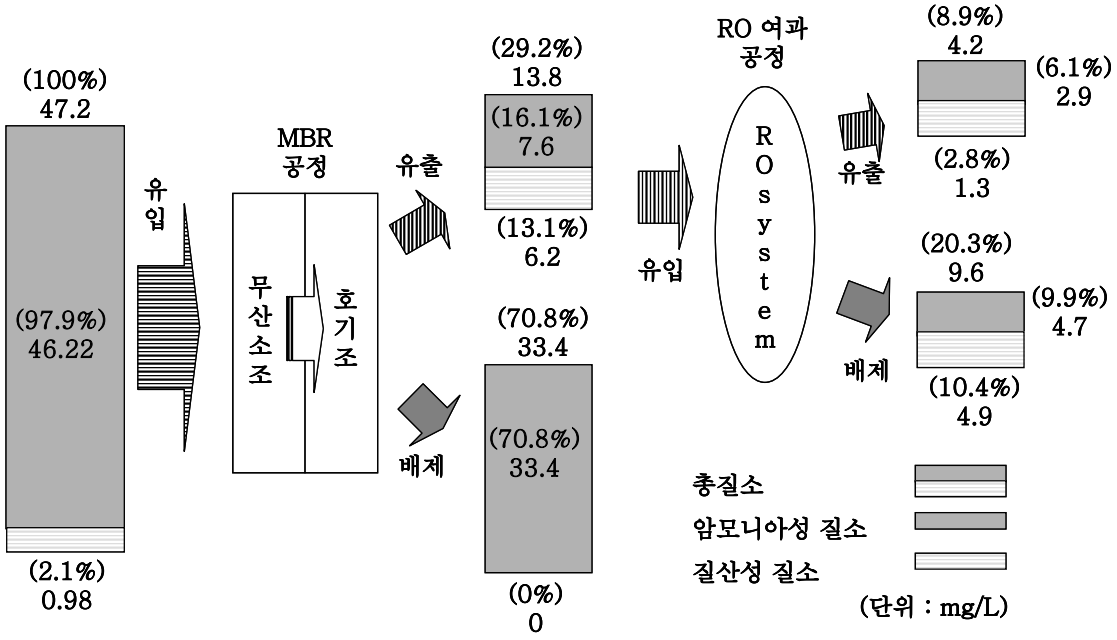


그림 11. MBR-RO 공정에서 TN의 물질수지

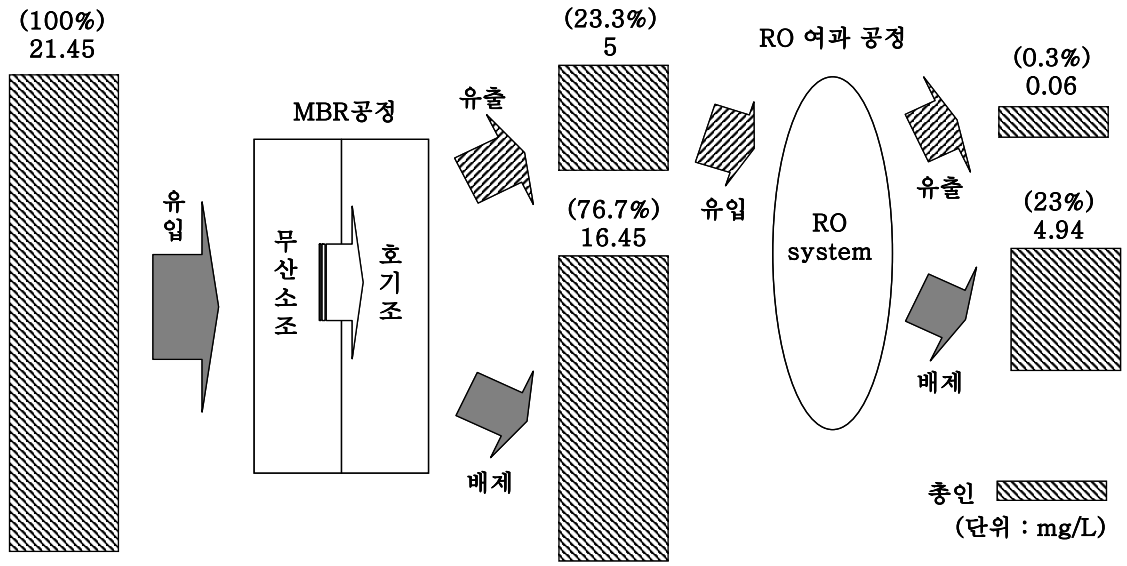


그림 12. MBR-RO 공정에서 TP의 물질수지

(1) MBR 공정을 적용한 결과 유출수의 탁도는 운전기간 동안 평균 2NTU 이하의 농도로 유지되어 99% 이상의 제거율을 보였으며 COD_{Cr}의 경우 HRT 12hour(MBR 운전 30일) 이후에 COD_{Cr}의 농도가 안정적으로 감소하였다.

(2) MBR 공정 60일 이후에는 NH_4^+-N, NO_3^--N, TN의 농도가 3.7, 4.3, 10.3mg/L로 NH_4^+-N보다 TN의 제거율이 상대적으로 낮았으며 변화폭도 NH_4^+-N에 비해 적은 것으로 나타났다. 이는 질산화를 통해 NH_4^+-N의 제거는 효과적으로 이루어 졌지만 상대적으로 생성되는 NO_3^--N로 인해 NH_4^+-N보다 TN의 제거율이 더 낮은 것으로 판단된다.

(3) HRT를 18hour로 운전한 60일 이후의 평균 MBR 유출수의 TP 농도는 2.9mg/L이고 제거율은 86%로 HRT 6, 12hour보다 제거율이 높은 것으로 나타났다. 이는 SRT와 MLSS의 주기적인 조절을 통한 슬러지 폐기로 인하여 슬러지에 축적된 인도 함께 제거되었기 때문이다.

(4) MBR 유출수를 대상으로 RO 여과 공정을 적용한 결과 RO 투과수 평균 색도는 1 PtCo로써 90%이상의 제거율을 보였고 RO 투과수의 탁도 제거에 대해서는 평균

90%의 제거율을 보이며 안정적인 탁도 제거 효율을 보였다.

(5) MBR 유출수를 대상폐수로 하여 RO 여과 공정 적용결과, COD_{Cr}, NH_4^+-N, TN 그리고 TP의 평균제거율은 90% 이상이었으며 재활용수로서의 가능성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 R&D 클러스터 구축사업(No. RTI 05-01-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김규진, 윤성훈, MBR을 이용한 오·폐수 처리(2001), *J. Korea Ind. Eng. Chem*. Vol. 12, No. 3, pp. 239～248.
2. 김종오, 정종태, 김학균(2006), Struvite 결정화를 이용한 혐기성 발효액의 질소와 인 제거, *한국지반환경공학회지*, Vol. 7, No. 6, pp. 5～12.
3. 김진길, 최홍림, 홍성창, 안희권(2001), 축산폐수 2차침전조 유출수의 난분해성 유기물 제거를 위한 광촉매 시스템 적용과 그 반응 특성, *동물자원지*, Vol. 43, No. 3, pp. 409～422.
4. 신항식, 김구용, 이상형, 임재림(2003), SBR을 이용한 축산폐수의 질소 제거, *한국지반환경공학회지*, Vol. 4, No. 3, pp. 61～67.
5. 황규대, 조철휘, 정민모(1999), 무산소-호기공정을 이용한 축산폐수 처리에서 유입수 C/N비와 내부 반송률이 질소제거에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, Vol. 21, No. 11, pp. 2205～ 2220.
6. Fane, A.G.(1996), Membranes for water production and wastewater reuse, *Desalination*, Vol. 106, No. 1, pp. 1～9.
7. Ahn, W,Y,, Kang, M.S., Yim, S.K and Choi, K.H(2002), Advanced landfill leachate treatment using an integrated membrane process, *Desalination*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 109～114.
8. Comerton, A.M., Andrews, R.C. and Bagley, D.M.(2005), Evaluation of an MBR-RO system to produce high quality reuse water: Microbial control, DBP formation and nitrate, *Water Research*, Vol. 39, No. 16, pp. 3982～3990.
9. Debkowska, B.Z., Lobos, E. and Konieczny, K.(1996), Biomembrane wastewater treatment by activated sludge method. *Desalination*. Vol. 107, No. 1, pp. 83～95.
10. Lozier, J. and Fernandez, A.(2001), Using a membrane bioreactor/reverse osmosis system for indirect potable reuse, *Water supply*, Vol. 5-6, No. 1, pp. 303.
11. Gao, M., Yang, M., Li, H., Yang, Q. and Zhang, Y.(2004), Comparison between a submerged membrane bioreactor and a conventional activated sludge system on treating ammonia-bearing inorganic wasterwater, *J. of Biotechnology*, Vol. 108, No. 3, pp. 265～269.
12. Poitel, D., Courant, P., Primi, C. and Mandin, J.M.(1999), Proceedings of Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, October 4-8, Cagliari, Italy, Various leachate treatment plants in France.
13. Qin, J.J., Kekre, K.A., Tao, G., Oo, M.H., Wai, M. N., Lee, T.C., Viswanath, B. and Seah, H.(2006), New option of MBR-RO process for production of NEWater from domestic sewage, *J. of Membrane Science*, Vol. 272, pp. 70～77.
14. Ueda, T., Hata, K. and Kikuoka, Y.(1997), Effect of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor, *Wat. Res*. Vol. 31, No. 3, pp. 489～494.

(접수일: 2007. 6. 11 심사일: 2007. 6. 22 심사완료일: 2007. 11. 6)