

침지식 평판형 연속회분식 막반응기에서 유입 유기물 부하의 변화에 따른 영양염류의 제거 특성

김 승 건 · 이 호 원^{*,†} · 강 영 주

제주대학교 식품생명공학과, *제주대학교 생명화학공학과
(2010년 9월 6일 접수, 2010년 9월 17일 수정, 2010년 9월 17일 채택)

Nutrient Removal Characteristics on Organic Material Loadings in Submerged Flat Sheet Type Sequencing Batch Membrane Reactor

Seung-Geon Kim, Ho-Won Lee^{*,†}, and Yeung-Joo Kang

Department of Food Bioengineering, Jeju National University, Jeju-si, Jeju-do 690-756, Korea

*Department of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University, Jeju-si, Jeju-do 690-756, Korea

(Received September 6, 2010, Revised September 17, 2010, Accepted September 17, 2010)

요 약: 0.4 μm 의 세공크기를 갖고 있는 평막이 침지된 연속회분식 반응기에서 유입 유기물 농도가 영양염류 제거에 미치는 영향을 조사하였다. 분리막의 여과성능과 영양염류 제거효과를 규명하기 위하여 유입 유기물의 농도를 200 mg/L (Run-1), 400 mg/L (Run-2) 및 800 mg/L (Run-3)로 연속적으로 변화시키면서 실험하였다. COD/N 및 COD/P의 비가 증가할수록 T-N 및 T-P의 제거율은 모두 증가하였다. Run-1, Run-2 및 Run-3에서 T-N의 평균 제거율은 각각 28.1, 32.6 및 90.4%이었으며, 투과수의 T-N 평균 농도는 각각 32.0, 30.0 및 4.3 mg/L이었다. 또한 Run-1, Run-2 및 Run-3에서 T-P의 평균 제거율은 각각 13.6, 35.3 및 93.1%이었으며, 투과수의 T-P 평균 농도는 각각 3.11, 2.33 및 0.25 mg/L이었다.

Abstract: The effect of organic material loadings on nutrient removal characteristics were investigated in sequencing batch reactor, in which a flat sheet type microfiltration membrane with a pore size of 0.4 μm was submerged. Three organic concentrations of 200 mg/L (Run-1), 400 mg/L (Run-2) and 800 mg/L (Run-3) were carried out continuously to identify their effect on the filtration performance and nutrient removal. The removal efficiencies of T-N and T-P were increased with the increase of COD/N and COD/P. The T-N removal efficiencies of Run-1, Run-2 and Run-3 were 28.1, 32.6 and 90.4%, the average concentrations of T-N in permeate were 32.0, 30.0, and 4.3 mg/L, respectively. The T-P removal efficiencies of Run-1, Run-2 and Run-3 were 13.6, 35.3 and 93.1%, the average concentrations of T-P in permeate were 3.11, 2.33, and 0.25 mg/L, respectively.

Keywords: sequencing batch membrane reactor, nutrient removal, organic material loading

1. 서 론

생활수준의 향상과 산업의 발달로 인하여 오·폐수의 발생량과 오염물 부하량이 증가함에 따라 자정능력을 초과한 오염물의 유입으로 수질오염이 심화되어 국지적으로는 용수로서의 가치를 상실한 지역도 나타나고 있다[1].

2005년도 우리나라에서 발생하는 오·폐수는 하루 25,646천 톤에 이르며, 발생하는 오·폐수 중에서 생활하수 발생량은 하루 16,833천 톤으로 약 65.6%를 차지하고 있다[2]. 2005년도에 발생한 오수의 76%인 11,678천 톤은 하수처리구역 내에서 발생하고 있으나, 하수관 거의 정비 미흡, 하수종말처리장의 시설용량 부족 등으로 인하여 실제 하수종말처리장시설로 유입·처리되는 생활하수의 양은 이보다 적을 것으로 추정된다. 하수처

[†]주저자(e-mail: hwlee@jejunu.ac.kr)

리구역 외에서 발생하는 오수는 개별 건물에 설치된 오수처리시설로 유입·처리되도록 하고 있으나, 현재 수세식 화장실만 처리하는 단독정화조가 설치된 건물과 방류수 수질기준이 BOD 기준 40 mg/L 내지 80 mg/L로 완화된 오수처리시설이 현존하고 있다[3,4].

효과적인 수자원의 확보와 심각한 수질오염 문제를 효과적으로 대처하기 위하여 여러 가지 대안이 제시되고 있다. 그 해결책 중의 하나로 대두되는 것이 소규모 처리시설을 이용하여 오염배출원에서 고도 처리하여 이를 재활용하는 것이다. 이 방법은 기존의 대규모 처리장을 이용하는 방법에서 야기되는 차집 체계에 대한 문제점을 극복할 수 있고, 보다 궁극적으로 수질오염방지과 수자원 확보를 동시에 해결할 수 있다[5].

소규모 처리시설로 많이 이용되는 생물학적 제거방법인 연속회분식 반응기(sequencing batch reactor, SBR)는 한 반응기 내에서 시간별로 혐기, 호기 및 무산소조건을 만들어 줌으로써 반응기 용적을 줄이면서 질소와 인을 동시에 제거할 수 있다[6]. 그러나 SBR 공정에서는 침전 후 배출하는 동안 미생물의 상태의 악화에 따른 슬러지 별킹과 핀플러 현상으로 슬러지의 일부분이 부상되어 배출수에 포함될 수 있는 위험성이 있다[7].

막결합형 활성슬러지 시스템(membrane bioreactor, MBR)은 기존의 생물학적 처리 방법에 막분리 기술을 도입하여 좋은 수질의 유출수를 안정적으로 얻을 수 있어서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8-10]. MBR은 슬러지 팽화 등의 운전상의 문제에 상관없이 부유고형물이 없는 깨끗한 처리수를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 기존의 활성슬러지 시스템보다 높은 미생물의 농도를 유지할 수 있어 처리효율을 높일 수 있고, 고액분리에 필요한 2차 침전지가 필요치 않으므로 부지면적도 줄일 수 있어 소규모화할 수 있다[11].

MBR은 운전 방식에 따라 교차흐름 방식(cross flow type)과 침지형 방식(submerged type)으로 나눌 수 있다. 교차흐름 방식은 순환펌프를 사용하여 활성슬러지를 분리막 모듈로 순환하면서 여과하여 처리수를 얻는 방식이며, 침지형은 활성슬러지가 있는 폭기조에 분리막을 넣어 흡입 여과하여 처리수를 얻는 방식이다.

침지형 방식은 포기에 의하여 분리막 표면의 케이크를 제거할 수 있어 막오염을 어느 정도 억제할 수 있다. 또한 흡입여과 방식으로 수행하므로 순환펌프를 사용하는 교차흐름 방식에 비해 에너지 소모가 적고, 미생

물 활성의 감소를 방지할 수 있는 장점 등이 있어 최근에는 주로 침지형 방식이 이용되고 있다[12,13].

침지형 분리막과 연속회분식 반응기가 결합된 막결합형 연속회분식 반응기(membrane-coupled sequencing batch reactor, MSBR)는 일반적인 활성슬러지 공정에서 요구되는 침전조와 혐기성조 및 무산소조 없이 하폐수를 처리할 수 있어 소요 공간과 유지관리비가 적게 소요된다[14]. 또한 MSBR은 운전이 간단하고 슬러지 팽화를 유발하는 사상성 미생물의 성장을 방지할 수 있어 유량변동이 심하고 수질 변동이 큰 소규모의 폐수처리에 효과적이다[15-17]. 또한 독성폐수의 처리에도 MSBR의 사용이 가능하다[18]. 지금까지 막결합형 연속회분식 반응기에 대한 연구는 거의 대부분이 분리막으로 실관막을 사용하였다.

본 연구에서는 저비용/고효율을 갖는 침지식 평판형 연속회분식 막반응기(submerged flat sheet type sequencing batch membrane reactor)를 개발하기 위한 연구의 일환으로서 침지식 평판형 연속회분식 막반응기에서 유입 유기물 농도 변화가 총질소(T-N)와 총인(T-P) 등의 영양염류 제거효율에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용한 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 반응기의 크기는 가로 250, 세로 70, 높이 1,200 mm로 제작하였으며, 재질은 10 mm 두께의 아크릴판을 이용하여 만들었다. 반응기의 유효 부피(working volume)는 15 L로 하였다. 활성슬러지에 공기를 공급하고, 교반 및 분리막 표면에 부착되는 케이크 형성을 줄이기 위하여 산기관을 막모듈 밑 부분에 설치하였다. 또한 합성폐수의 공급, 에어펌프 및 흡입펌프의 작동은 PLC (programmable logic controller, SB-30S, Comfile Technology, Korea)를 사용하여 자동으로 제어하였다.

본 연구에 사용된 분리막은 국내 P사에서 제작한 PVC 재질의 침지형 평막으로 공극의 크기(pore size)는 0.4 μm 이며, 막 면적은 0.17 m^2 이다. Table 1에는 본 연구에 사용된 분리막의 사양을 나타내었다.

2.2. 실험방법

연속회분식 막반응기의 운전주기는 Table 2에 나타

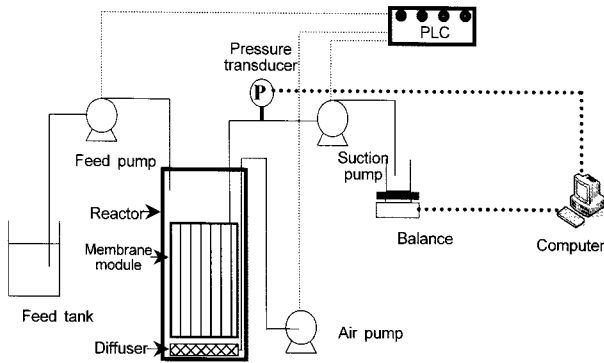


Fig. 1. Schematic diagram of sequencing batch membrane reactor.

Table 1. Specification of Membrane

Membrane material	PVC
Membrane type	Flat-sheet type
Pore size (μm)	0.4
pH	2~10
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	2~38
Hydrophobicity or Hydrophilicity	Hydrophilicity
Total surface area (m^2)	0.17

Table 2. Operating Mode of Sequencing Batch Membrane Reactor

Step	Run (min)
Filling (anoxic)	5
Anoxic reaction	55
Aerobic reaction (non-suction)	120
Aerobic reaction (suction)	(non-suction/suction = 20/20)
Total	180

내었으며, 무산소 유입(5분), 무산소 반응(55분), 호기 반응(120분)으로 총 180분을 한 싸이클로 하여 반복 운전 을 하였다. 한편, 호기 반응은 비흡입여과(non-suction) 와 흡입여과(suction)를 주기적으로 반복하여 운전(간헐 적 흡입여과)하였으며, 비흡입여과/흡입여과의 시간 간 격은 20분/20분으로 하였다. 이러한 운전주기는 이 등 [19]에 의한 선행 연구결과를 토대로 한 것이다. 이 등 [19]의 실험결과에 의하면 분리막의 투과성능은 비폭기 (무산소) 기간이 짧을수록 우수하며, 동일한 비폭기(무 산소)와 폭기 기간의 경우에는 간헐적인 흡입여과 운전 이 연속적인 흡입여과 운전보다 투과성능이 우수하다.

Table 3에는 연속회분식 막반응기의 운전조건을 나 타내었다. 호기 반응에서 공기의 유량은 10 L/min으로 일정하게 유지하였다. 항온실에 반응조 전체를 설치하

Table 3. Operating Conditions of Sequencing Batch Membrane Reactor

Working volume (L)	15
Decanting volume (L)	3
HRT (hr)	15
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	25 ± 2
Total filtration volume (L/day)	24

Table 4. Compositions of Synthetic Wastewater

Composition	Concentration (mg/L)		
	Run-1	Run-2	Run-3
Glucose	200	400	800
Peptone		30	
NH_4Cl		172	
KH_2PO_4		14	
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		1	
CaCl_2		4	
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		50	
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$		3	
NaHCO_3		750	
COD_{Cr}	216	410	805
T-N		44.6	
T-P		3.6	

여 반응 온도를 $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다.

본 실험에 사용한 합성폐수의 조성은 Table 4와 같 다. 탄소, 인 및 질소원은 각각 glucose, KH_2PO_4 및 NH_4Cl 을 사용하였다. 유입 유기물의 농도 변화에 따른 분리 막의 여과성능 및 영양염류의 제거 특성을 조사하기 위 하여 조업 시작 후 처음 14일 동안은 glucose의 농도를 200 mg/L로(Run-1), 다음 7일 동안은 400 mg/L로(Run-2), 마지막 44일 동안은 800 mg/L로(Run-3)하여 총 65일 동안을 연속적으로 운전하였다.

실험에 사용된 활성슬러지는 J 하수종말처리장 폭기 조로 유입되는 반송슬러지를 채취하여 사용하였으며, 실험실에서 본 실험에 사용된 합성폐수에 적응시키기 위해서 30일 정도 배양한 후, 본 실험에 사용하였다.

MLSS와 MLVSS는 Standard Method[20]에 의해 분 석하였으며, 총질소와 총인은 자외선/가시광선 흡광광 도계(DR-5000, HACH, USA)와 총질소 및 총인 분석키 트(HACH, USA)를 사용하여 분석하였다.

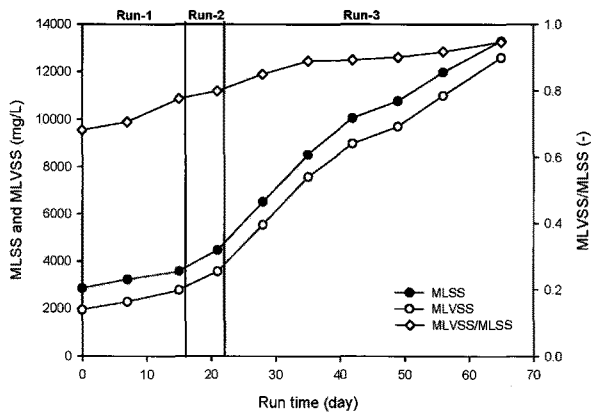


Fig. 2. Variations of MLSS, MLVSS, and MLVSS/MLSS.

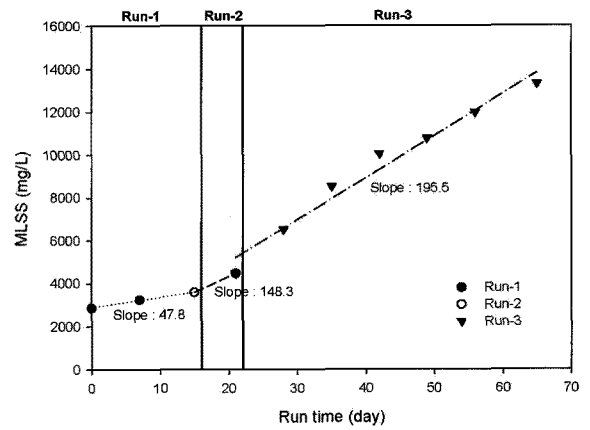


Fig. 3. The rate of MLSS change.

3. 결과 및 고찰

3.1. 활성슬러지 농도의 변화

Fig. 2에는 운전 시간에 따른 MLSS와 MLVSS의 변화를 나타내었고, Fig. 3에는 운전 시간에 따른 MLSS의 변화율을 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 Run-1에서 초기 MLSS의 농도는 2,860 mg/L이었으나 조업 15일 후에는 3,580 mg/L까지 증가하였으며, 글루코오스의 농도를 400 mg/L로 2배 증가(Run-2)시킨 다음 7일이 지난 후에는 4,470 mg/L까지 증가하였고, 글루코오스의 농도를 800 mg/L로 다시 2배 증가(Run-3)시킨 다음 43일이 지난 후에는 MLSS의 농도는 13,300 mg/L까지 증가하였다.

또한 Fig. 3에 나타난 바와 같이 Run-1, Run-2 및 Run-3에서의 MLSS 농도의 평균 변화율은 각각 47.8, 148.3 및 195.5 mg/L/day로서 글루코오스 농도가 증가됨에 따라 MLSS 농도의 평균 변화율은 증가하나, MLSS 농도의 평균 변화율에 대한 증가폭은 글루코오스 농도가 증가됨에 따라 감소하였다.

한편 Fig. 2에 나타난 바와 조업시간에 따른 MLVSS의 농도변화도 MLSS의 농도변화와 유사하게 증가하는 경향을 나타내었으나, MLSS에 대한 MLVSS의 비는 0.69에서 0.94로 점차적으로 증가하여 미생물의 양이 증가할 뿐만 아니라 MLSS 성분 중에서 미생물이 차지하는 상대적 양도 조업시간에 따라 증가함을 알 수 있었다.

3.2. TMP의 변화

Fig. 4에는 Run-1, Run-2 및 Run-3의 조건에서 조업

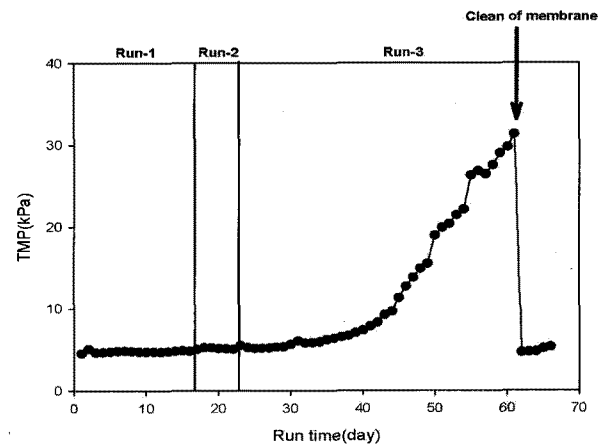


Fig. 4. Variations of TMP during operating time.

시간에 따른 막간차압(transmembrane pressure, TMP)의 변화를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 TMP는 운전이 진행된 후 30일까지 서서히 증가하는 경향은 보이나 큰 변화는 없었다. 그러나 30일 이후 TMP는 급격히 증가하여 조업 후 60일에는 30 kPa까지 도달하였다. 이러한 결과는 평막결합형 연속회분식 반응기에서 운전방식이 여과성능에 미치는 효과에 대한 선행 연구 실험결과와 유사하였다[19]. 이 선행 연구에서는 탄소 원으로 아세트산을 사용하였다.

막의 세정은 TMP가 30 kPa 이상에 도달하면 실시하였다. 세정 방법은 부드러운 스펀지로 막 표면에 형성된 케이크 층을 제거한 후, 0.5% NaOCl 용액으로 세정하였다[19]. 세정 직후의 TMP는 4.6 kPa로서 세정 후에 초기 TMP로 거의 회복되었다.

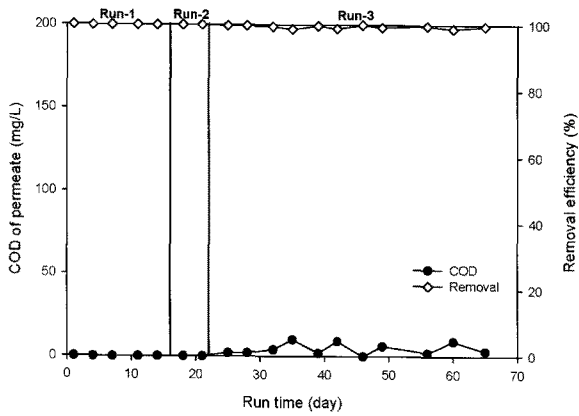


Fig. 5. Variations of COD of the permeate and removal efficiency.

3.3. 유기물과 부유물질의 제거

Fig. 5에 운전시간과 유입 유기물의 변화에 따른 COD의 변화 및 제거율을 나타내었다. 측정된 도입용액의 COD 평균값은 Run-1, Run-2 및 Run-3에서 각각 216, 410 및 805 mg/L이었다. Run-1과 Run-2의 경우 COD 성분인 글루코오스가 모두 산화되어 COD 제거율은 모두 100%이었다. 특히 Run-3의 경우에는 도입용액의 글루코오스 농도가 Run-1의 4배까지 증가되었음에도 불구하고, COD는 거의 100% 제거(평균 99.4%)되었다.

또한 모든 운전방식에서 투과수의 부유물질 농도는 0 mg/L로서 부유물질은 운전조건에 관계없이 100% 제거되었다.

유기물에 대한 제거율이 이와 같이 높은 이유는 미생물의 유실 없이 다양한 미생물을 고농도로 유지할 수 있었고, 일반적인 활성슬러지법에서는 제거할 수 없는 부유물질과 고분자 유기물도 동시에 제거할 수 있었기 때문이다.

3.4. 총질소의 제거

자연계에서 존재하는 질소의 형태는 유기질소(organic nitrogen), 암모니아성 질소(NH₃-N), 아질산성 질소(NO₂-N) 및 질산성 질소(NO₃-N)와 대기 중의 질소(N₂)로 구성되어 있다. 수중의 질소는 주로 단백질 및 요소의 형태로 많이 존재하며, 이들은 미생물의 분해에 의해 암모니아로 전환된 후, 생물학적 질산화(nitrification)와 탈질화(denitrification)에 의해 질소기체로 전환된다.

질산화는 암모니아성 질소가 질산성 질소로 전환되는 과정으로서, 주로 호기성 독립영양세균인 Nitroso-

monas와 Nitrobacter 등에 의해 수행된다. 이때 Nitrosomonas는 암모니아성 질소를 아질산성 질소로 산화시키며, Nitrobacter는 아질산성 질소를 질산성 질소로 산화시키는데, 질산화 과정에서의 속도제한단계(rate limiting step)는 Nitrosomonas에 의해 암모니아성 질소가 아질산성 질소로 산화되는 반응으로 알려져 있다[21,22]. 그러나 이 등[19]의 실험결과에 의하면 막결합형 연속회분식 반응기에서 분리막 투과수의 질소의 대부분은 질산성 질소의 형태로 존재함을 밝힌 바 있다.

탈질화는 통성 종속영양세균에 의해 이루어지며, 질산화와는 달리 몇몇 특정 미생물에 의해 단계적으로 진행되는 것이 아니라, Achromobacter, Aerobacter, Bacillus 및 Pseudomonas 등 매우 다양한 미생물에 의해 이루어진다. 이 때, 최종전자수용체로서 질산성질소를 이용하기 위해서는 무산소(anoxic) 상태가 만들어져야 한다[23].

본 연구에 사용된 폐수는 일정한 부하량을 유지하여 최적의 운전 조건을 규명하기 위해 합성폐수를 사용하였고, 질소원으로는 염화암모늄을 사용하였으며, 측정된 폐수의 총질소의 평균 농도는 44.6 mg/L이었다.

Fig. 6에는 운전시간과 유기물 변화에 따른 T-N의 농도 변화 및 제거율을 나타내었다. 조업 후 7일이 될 때까지는 급격히 감소를 하였으나 7일 이후에는 거의 변화가 없었으며, Run-1에서 투과수의 T-N의 평균 농도 및 제거율은 각각 32.0 mg/L와 28.1%이었다. Run-2의 경우에는 Run-1에 비해 큰 차이는 없었으나 제거율은 32.6%로 약간 상승하였으며, 투과수의 평균 농도는 30.0 mg/L이었다. 그러나 Run-3의 경우에는 Run-1과 Run-2에 비해 총질소의 제거율은 급격히 증가하여 총질소의 평균제거율은 90.4%이었으며, 투과수의 평균 농도 4.3 mg/L이었다.

Run-1, Run-2 및 Run-3의 COD/N은 각각 4.8, 9.2 및 18.1로서 COD/N이 증가할수록 T-N의 제거율이 급격히 증가함을 알 수 있었는데, 그 이유는 유기물에 의해 통성 종속영양세균에 의한 아질산성 질소 및 질산성 질소의 탈질화 반응이 촉진되기 때문이다. 이러한 결과는 Zhimin 등[24]이 MBR 반응기에서 COD/N의 값이 증가할수록 T-N의 제거율은 증가한다는 실험결과와 유사하였다.

3.5. 총인(P)의 제거

운전시간에 따른 투과수의 총인(T-P)의 농도와 제거율 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

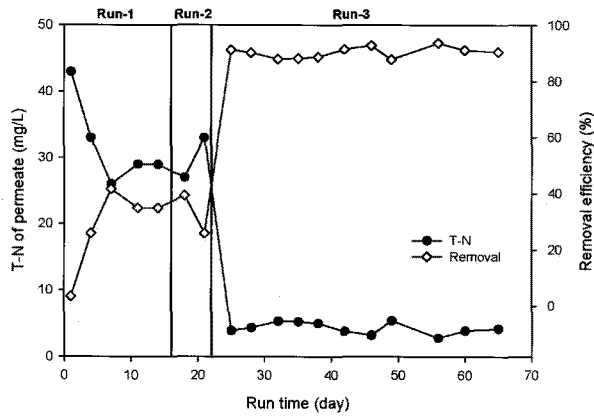


Fig. 6. Variations of T-N of the permeate and removal efficiency ($T-N_{Feed} = 44.6$ mg/L).

인 제거에 관여하는 미생물은 Acinetobacter, Pseudomonas, Micrococcus 등이 알려져 있다. 이러한 미생물들은 혐기/호기 조건을 교대로 변화시키면, 호기 조건에서 인을 최대한 섭취하게 되고, 인을 저장하고 있는 미생물을 적당량 배출시킴으로써 인을 제거하게 된다. 그러나 본 연구에서는 65일 동안 슬러지의 배출 없이 운전하였다.

유기물 변화와 운전시간에 따른 투과수의 총인 농도 및 제거율 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Run-1, Run-2 및 Run-3의 COD/P는 각각 60, 114 및 224이었으며, T-P에 대한 COD의 비가 증가함에 따라 총인의 제거율은 급격하게 증가하였다. Run-1, Run-2 및 Run-3에서 투과수의 총인 농도 평균값은 각각 3.11, 2.33 및 0.25 mg/L이었으며, 평균 제거율은 각각 13.6, 35.3 및 93.1%이었다.

Shin과 Park[25]은 전형적인 SBR과 PBCSBR (porous biomass carrier sequencing batch reactor)을 이용한 인 제거에 대한 연구에서 COD가 250에서 1,000 mg/L까지 증가하였을 때, SBR과 PBCSBR 처리수의 총인의 농도는 각각 11.1에서 4.0 mg/L까지, 10.3에서 0.6 mg/L까지 감소한다는 결과를 발표한 바 있다. 본 연구에서도 충분한 COD의 공급이 인의 제거에 유용하게 이용되어 높은 인 제거효율을 얻을 수 있었던 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 저비용/고효율을 갖는 침지식 평판형 연속

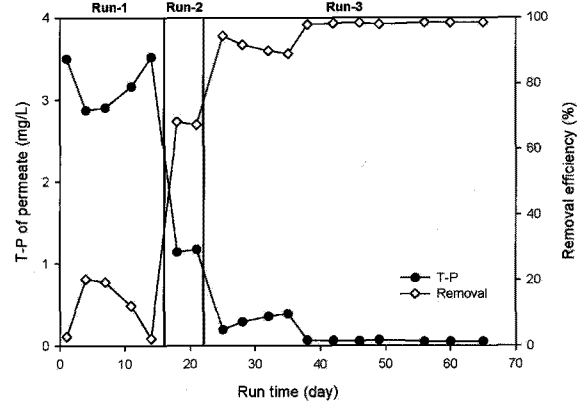


Fig. 7. Variations of T-P of the permeate and removal efficiency ($T-P_{Feed} = 3.6$ mg/L).

회분식 막반응기(submerged flat sheet type sequencing batch membrane reactor)를 개발하기 위한 연구의 일환으로서 연속회분식 막반응기에서 유입 유기물 농도 변화에 따른 분리막의 여과성능 및 영양염류 등의 제거효율에 미치는 영향을 조사하였다. 유입 유기물의 농도는 조업 시작 후 처음 14일 동안은 200 mg/L (Run-1), 다음 7일 동안은 400 mg/L (Run-2), 그 다음 44일 동안은 800 mg/L (Run-3)로 하여 총 65일 동안 연속 운전하였다.

Run-1, Run-2 및 Run-3에서의 MLSS 농도의 평균 변화율은 각각 47.8, 148.3 및 195.5 mg/L/day로서 글루코오스 농도가 증가됨에 따라 MLSS 농도의 평균 변화율은 증가하였다. TMP는 운전이 진행된 후 30일까지 큰 변화는 없었으나, 30일 이후 TMP는 급격히 증가하여 조업 후 60일에는 30 kPa까지 도달하였으며, 세정 후에는 초기 TMP로 거의 회복되었다. 유입 유기물의 부하량의 증가할수록 COD 제거율은 감소하였으나, Run-3의 경우는 Run-1에 비해 유입 유기물의 농도가 4배임에도 불구하고 제거효율은 98% 이상이었다. COD/N의 비가 증가할수록 T-N의 제거율은 증가하였다. Run-1, Run-2 및 Run-3에서 T-N의 평균 제거율은 각각 28.1, 32.6 및 90.4%이었으며, 투과수의 T-N 평균 농도는 각각 32.0, 30.0 및 4.3 mg/L이었다. 또한 COD/P의 비가 증가할수록 T-P의 제거율도 증가하였다. Run-1, Run-2 및 Run-3에서 T-P의 평균 제거율은 각각 13.6, 35.3 및 93.1%이었으며, 투과수의 T-P 평균 농도는 각각 3.11, 2.33 및 0.25 mg/L이었다.

감 사

본 연구는 제주지역 환경기술개발센터 연구개발사업의 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. M. J. Park and D. S. Kim, "A study on the small sewerage system using SBR process", *J. of the Environmental Sciences*, **12(4)**, 427 (2003).
2. Ministry of Environment, "2007 White Paper of Environment", p. 511 (2007).
3. Ministry of Environment, "2001 White Paper of Environment", p. 611 (2001).
4. P. H. Yeon, "Effect on the Operation Mode and Packing Media on the Performance of SBR Process", Ph.D. Dissertation, Kwangdong Univ.. Gangneung-si, Gangwon-do (2006).
5. T. H. Bae, "Membrane Sequencing Batch Reactor System for the Treatment of Dairy Industry Wastewater", M.S. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul (1999).
6. S. J. Kim, D. H. Lee, and H. S. Park, "Removal of Organic and Nutrients in Fish Market Wastewater using Sequencing Batch Reactor (SBR)", *J. of Korean Society on Water Quality*, **23(1)**, 46 (2007).
7. B. C. Ma, "Effect of physicochemical characteristics of microbial flocs on Membrane Performance in Membrane-coupled Sequencing Batch Reactor with and without anoxic phase", M.S. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul (2004).
8. K. Y. Kim, J. H. Kim, Y. H. Kim, and H. S. Kim, "The Effect of Coagulant on Filtration Performance in Submerged MBR System", *Membrane Journal*, **16(3)**, 182 (2006).
9. Y. K. Choi, O. S. Kwon, H. S. Park, and S. H. Noh, "Mechanism of Gel Layer Removal for Intermittent Aeration in the MBR Process", *Membrane Journal*, **16(3)**, 188 (2006).
10. H. S. Shin and S. T. Kang, "Characteristics and fates of soluble microbial products in ceramic membrane bioreactor at various sludge retention times", *Wat. Res.*, **37**, 121 (2003).
11. A. G. Fane, "Membrane for water production and wastewater reuse", *Desalination*, **106**, 1 (1996).
12. X. Y. Li and X. M. Wang, "Modelling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor", *J. Membr. Sci.*, **278**, 151 (2006).
13. C. Trigo, J. L. Campos, J. M. Garrido, and R. Méndez, "Start-up of the Anammox process in a membrane bioreactor", *J. Biotechnology*, **126**, 475 (2006).
14. J. Y. Jang and Y. M. Lee, "Application of ENVIS[®] Membrane System", *Membrane Journal*, **15(3)**, 241 (2005).
15. I. J. Kang, "Factors affecting filtration performance of submerged microfiltration membranes in a membrane coupled sequencing batch reactor", Ph.D. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul (2002).
16. J. Krampe and K. Krauth, "Sequencing batch reactor with submerged hollow fiber membranes for the biomass separation", *Water Sci. Technol.*, **43(3)**, 195 (2001).
17. J. M. Lee, W. Y. Ahn, and C. H. Lee, "Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganism in submerged membrane bioreactor", *Water Res.*, **35(10)**, 2435 (2001).
18. A. Vargas, M. A. Ivan, and G. Buitron, "Controlled backwashing in a membrane sequencing batch reactor used for toxic wastewater treatment", *J. Membr. Sci.*, **320**, 185 (2008).
19. H. W. Lee, S. G. Kim, and S. J. Khang, "The Effect of Operation Modes on Filtration Performance and Removal Efficiency in a Flat-Sheet Membrane-Coupled Sequencing Batch Reactor", *J. of KSEE*, **29(10)**, 1138 (2007).
20. APHA, AWWA, and WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 21th ed., Washington DC. (2005).
21. D. F. Bishop, "Single stage nitrification-denitrification", *J. WPCF*, **48(3)**, 520 (1973).
22. J. Y. Han, "Removal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sewage by Change of Opera-

- ting Conditions on SBR Process”, M.S. Dissertation, Jeju National Univ., Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province (1998).
23. H. A. Painter, “A review of literature on inorganic nitrogen metabolism”, *Wat. Res.*, **4**, 393 (1970).
24. F. Zhimin, Y. Fenglin, Z. Feifei, and X. Yuan, “Control of COD/N ratio for nutrient removal in a modified membrane bioreactor (MBR) treating high strength wastewater”, *Bioresource Technology*, **100**, 136 (2009).
25. H. S. Shin and H. S. Park, “Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor (PBCSBR)”, *Wat. Sci. Tech.*, **23**, 719 (1991).