大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 519~524. 2005.

음식폐기물 응축수를 보조탄소원으로 이용하는 막 결합 생물 응조에서의 질소, 인 제거와 막 오염 특성

안용태† · 윤종호* · 채소룡 · 신항식

한국과학기술원 건설및환경공학과 · *신성대학 환경정보과

(2004년 12월 29일 접수, 2005년 5월 18일 채택)

Characteristics of Nutrient Removal and Membrane Fouling in a Membrane Bioreactor using Food Waste as an Additional Carbon Source

Young-Tae Ahn† · Jong-Ho Youn* · So-Ryong · Hang-Sik Shin

Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
**Department of Environmental Information and Engineering, Shinsung College*

ABSTRACT : Due to the low C/N ratio of domestic wastewater characteristic, addition of external carbon source for the effective N and P removal is necessary. High organic content of food waste can be used for the external carbon source in biological nutrient removal processes. The applicability of condensate of food waste (CFW), which is produced during the high-rate fermentation process, was examined in membrane bioreactor for the nutrient removal. Under the various operating conditions, nutrient removal efficiencies and membrane fouling characteristics were evaluated using synthetic wastewater. From nitrate utilization rate (NUR) test, denitrification rate was 0.19 g NO_3-N/g VSS/day. With the addition of CFW increased, average removal efficiencies of T-N and T-P could be increased up to 64% and 41%, respectively. Also the optimal retention time was 3 hr/5 hr for anoxic/aerobic reactor. When applied to real sewage, membrane fouling resistance was increased up to 60%, which could be reduced from 10.4×10^{12} m^{-1} to 5.9×10^{12} m^{-1} with the control of influent suspended solid concentration. In summary, it was suggested that CFW could be used as an economical and effective carbon source for membrane assisted biological N and P removal.

Key Words : *MBR, Nutrient Removal, Fouling, Food Waste*

요약 : 국내 하수의 낮은 C/N비를 나타내는 특성으로 인하여 질소와 인의 효과적인 제거를 위해서는 추가적인 보조 탄소원의 주입이 필요한 실정이다. 여러 가지 적용 가능한 외부 탄소원 중, 음식폐기물은 다량의 유기물을 함유하고 있어 다양한 전처리를 통하여 하·폐수 고도처리 공정의 외부탄소원으로 이용가치가 높다고 할 수 있다. 본 연구에서는 음식폐기물 고속발효건조 과정에서 발생하는 음식폐기물 응축수를 A/O 공정으로 구성된 막 결합 생물반응조의 외부탄소원으로 적용 가능성에 대해 평가하고 다양한 운전 조건에서의 질소·인 성분의 제거 효율을 살펴보았으며, 막 오염에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들에 대한 평가를 실시하였다. 실험 결과 무산소 조건에서 0.19 g NO_3-N/g VSS/day의 탈질율을 얻을 수 있었으며, 연속운전에서는 음식폐기물 응축수 주입을 통하여 총질소와 인 성분의 제거율을 각각 최대 64%, 41% 향상 시킬 수 있었다. 또한 유입수 유량의 0.5% (vol/vol)의 외부탄소원 주입 조건에서도 효과적인 처리효율을 얻을 수 있었으며, 전체 공정의 수리학적 체류시간 8시간 이상, 무산소조와 호기조의 체류시간은 각각 3시간, 5시간에서 최적의 처리효율을 나타내었다. 실제 생활하수 처리 시, 질소와 인의 제거효율은 증진되었으나 막 결합 생물 반응조 내의 전체 입자의 크기 증가 및 미생물 체외고분자 물질 중 단백질 성분의 증가로 인하여 전체 막 저항 값이 증가하는 경향을 보였으며, 유입수의 고형물질의 조절을 통하여 막 오염을 줄일 수 있었다.

주제어 : 막 결합 생물반응조, 영양염류 제거, 막 오염, 음식 폐기물

1. 서 론

최근 생활하수 및 산업폐수의 급격한 증가로 국내 하천 및 호소 등의 수질이 크게 악화되고 있다. 호소수의 수질은 유기물에 의한 오염정도와 부유물질 외에 호소수의 영양상태(질소, 인 농도)로 표현할 수 있다. 우리나라는 오염물질 방류로부터 지표수의 수질을 보호하기 위해 유기물이나 독성물질의 배출은 일찍부터 규제에 왔으나 질소와 인의 배출에 관한 항목은 1996년부터 에서야 방류수 수질 기준에 추가되기 시작하였다. 현재 국내에 건설되어 운전 중인 하수처리장들의 90% 이상이 표준활성슬러지법을 기초로한 2차 처리시설로 유기물과 고형물질의 제거에 주안점을 두고 있어 강화된 방류수 기준을 준수하기 위해서는 공정의 개선 및 추가적인 탄소원의 주입이 불가피한 상황이다.

† Corresponding author
E-mail: ytahn@kaist.ac.kr
Tel: 042-869-3653 Fax: 042-869-3610

최근 기존의 하·폐수처리에 일반적인 문제점으로 지적되었던, 고액분리의 문제점을 해결하기 위하여 막 공정이 다양한 형태로 적용되고 있다. 특히, 막을 생물반응기 내에 포함시켜 고액분리에 이용하는 침지형 막 결합 생물반응조 (submerged membrane bio-reactor)는 주로 정수처리나 2차 처리수의 재이용 목적으로 이용되는 순환형 측류식 (side-stream)에 비해 상대적으로 막 폐색 정도가 적고 동력비가 적게 소모되는 장점이 있어 그 적용이 증가하는 추세이다. 한편, 초기의 막 결합 반응조의 주요한 역할은 완벽한 고액분리에 의한 안정적인 유기물과 고형물질의 제거 및 성장속도가 낮은 질산화 미생물 농도의 증가에 의한 질산화 효율의 증대였으나, 최근에는 유기물 제거와 동시에 질소 · 인 성분을 제거하기 위해 분리막을 포함하는 호기조의 전·후단에 무산소 반응조를 추가한 형태의 고도처리 공정이 증가하고 있는 실정이다.[1~3)]

한편, 환경부(2002) 자료에 따르면 국내 음식물 쓰레기 발생량은 일일 11,397톤으로, 이는 도시 폐기물 발생량의 23%를 차지하며, 경제적 가치는 연간 15조원에 달하는 것으로 보고되고 있다.[4)] 기존의 연구자들은 이러한 음식폐기물의 높은 유기물 함량을 이용하여 하수의 질소 인 제거를 위한 고도처리공정의 외부탄소원으로 적용하고자 하는 연구를 진행하였다. 박 등은 음식물 산발효액을 이용하여 총 질소와 인의 제거효율을 각각 61, 90%까지 증가시켰고,[5)] 이 등은 음식물 산발효액을 일 처리량 100톤의 파일럿 규모의 BNR 하수고도처리 공정에 적용하여 각각 45%와 74%의 질소 및 인의 제거효율을 얻을 수 있었다고 보고하였으며,[6)] 신 등은 실험실 규모의 BNR공정에서 음식물 산발효액을 탈질에 필요한 이론적 주입량의 5배까지 증가시켜 주입한 결과 77%와 67%의 높은 질소와 인의 제거효율을 얻을 수 있었으며, 음식폐기물 산발효액 내에 존재하는 미생물이 쉽게 이용할 수 있는 유기산의 농도가 감소함에 따라 탈질율이 0.20 gNO_3-N/g VSS/day에서 0.017 gNO_3-N/g VSS/day로 감소하였다고 보고하였다.[7)] 기존의 연구자들이 사용한 음식폐기물 산발효액의 경우 고형물질의 농도가 높아 여름철에 부패되기 싶고, 공정의 운전 시 펌프 및 배관의 막힘 등의 문제가 우려되나, 본 연구에서 사용한 음식폐기물 응축수는 산발효액과 비교해 SS농도가 낮으므로 효과적으로 공정을 운전할 수 있으리라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 유기물 질소 및 인의 동시 제거를 위한 무산소 및 호기조로 구성된 막 결합 생물반응조를 운전하며, 보조 탄소원으로 음식폐기물 응축수를 주입하였다. 세부적인 연구 목표는 음식폐기물 응축수의 보조 탄소원으로의 이용 가능성 평가, 공정의 최적운전 조건의 도출이며, 보조 탄소원 주입에 따른 질소·인 성분 제거 특성에 대해 알아보고, 막 오염 특성 파악에도 목적을 두고 있다.

2. 실험방법

2.1. 하폐수 고도처리공정

본 연구에 사용된 하폐수 고도처리공정의 모식도를 다음의 Fig. 1에 나타내었다. 본 공정은 크게 탈질 및 인 방출을 위한 무산소조(anoxic tank)와 막결합 생물반응조로 구성하였다. 무산소조로 유입수와 외부탄소원이 공급되며, 무산소조에서 막결합생물반응조로의 흐름은 수두 차에 의한 자유낙하를 이용하였다. 최종 유출수는 중공사막 (폴리프로필렌 계열, 공칭공경 0.4 μm)을 통해 얻었으며 막 결합 생물반응조에서 질산화된 질산성 질소는 내부 반송에 의해 무산소조로 공급된다. 이 때, 효과적인 탈질 반응을 위하여 반송라인에 외부탄소원을 함께 주입하였다. 무산소조와 막결합생물반응조의 유효 부피는 각각 3 L, 7 L로 제작하였다.

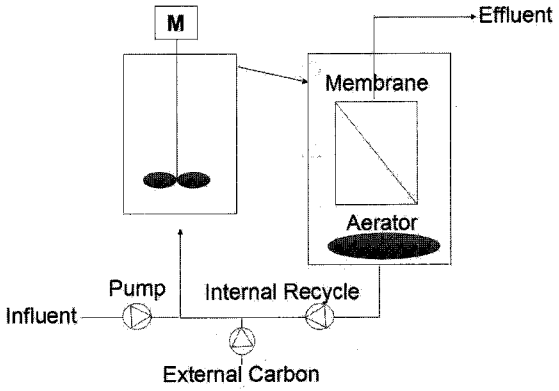

Fig. 1. Schematic diagram of biological nutrient removal process.

2.2. 유입수 특성

본 연구에서는 합성하수를 이용하여 본 공정의 처리효율을 최적화하고, 최적의 운전조건에서 실제 생활하수를 처리하는 방식으로 진행되었다. 실험 초기에는 국내 생활하수의 성상과 거의 동일한 성분을 다음의 Table 1과 같이 실험실에서 제조한 합성하수를 유입수로 사용하였다. 생활하수 처리 효율 검증을 위한 실험에서는 K대학의 생활하수를 사용하였으며, 드럼 스크린을 통해 협잡물을 제거한 원수를 사용하였고 일반적인 성상은 다음의 Table 2와 같았다.

Table 1. Composition and concentration of the synthetic wastewater

Constituents	Reagent	Concentration (mg/L)
COD	$C_6H_{12}O_6$	160
NH_4-N	$(NH_4)_2SO_4$	40
T-P	KH_2PO_4	4
pH	-	7.5 - 7.8
Alkalinity	$NaHCO_3$	200

Table 2. Characteristics of the sewage

	Solid		pH	COD		N			P	
	SS	VSS		TCOD	SCOD	TKN	NH_4-N	NO_3-N	T-P	PO_4-P
Conc. (mg/L)	190	130	8.1	309	118	58	27	0	4.8	4.5

Table 3. Operating condition of the process

Phase	External Carbon	HRT (hr)		SRT (day)	Internal Recycle
		Ax	Ox		
P1	0%	2	6	30	3Q
P2	2.4%				
P3	4.8%				
P4	1.0%	2	6		5Q
P5	0.5%				
P6	1.0%	3	5		
P7	0.5%				
P8	0.5%	3	3		

2.3. 실험조건

본 공정에서 외부탄소원 주입이 질소, 인 성분 제거에 미치는 영향을 알아보고자 운전 초기에는 외부탄소원의 주입이 없는 상태에서 실험을 수행하였다. 최적운전 조건 도출을 위하여 외부탄소원 주입량 변화, 무산소조와 호기조의 체류시간 변화에 따른 영향을 평가하고자 하였으며, 내부반송율은 유입수 유량의 3배와 5배로 고정하여 운전하였다. 자세한 운전조건은 다음의 Table 3에 정리하였다.

2.4. 분석방법

(1) 막 저항 측정

직렬여과 저항 모델[8]에 따라 총 저항(R_t)이 막 고유저항(R_m)과 케이크 저항(R_c), 눈 막힘 저항(R_p)으로 이루어진다고 가정하여 한외여과막(UF YM30, Millipore Co., USA)과 Amicon kit(Amicon, Co., USA)를 이용하여 일정한 압력하에서 각각의 저항 값을 측정하였다. 사용하지 않은 막을 실험 장치에 넣고 초순수를 투과하여 측정한 플럭스를 이용하여 R_m을 구하고, 측정하고자 하는 시료를 넣어 투과유량이 안정화 될 때까지 투과시켜 시간에 따른 투과유량을 측정하여 R_t를 구한다. 이렇게 사용한 막의 표면 케이크층을 제거한 뒤 다시 초순수를 이용하여 플럭스를 측정, 막 자체의 눈 막힘 저항을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 R_m, R_t, R_p를 이용하여 R_c를 구할 수 있다.

(2) 막오염 영향인자 측정

생물학적 막오염 유발 인자로서 최근에 가장 중요하게 고려되는 미생물 체외고분자 물질은(extracellular polymeric substances) 열처리법[9]에 의하여 추출한 후 흡광도 분석을 통해 정량한다. 단백질 성분과 탄수화물 성분은 각각 Smith 등[10]과 Dubois 등[11]이 제안한 방법을 이용하였다. 물리/화학적 인자로서 표면전하와 소수성도를 측정하였다. 표면전하의 경우 Morgan[12]이 제안한 콜로이드 적정법을 이용하여 측정하였다. 소수성은 상등액의 DOC값과 254 nm에서의 흡광도의 비인 SUVA (specific ultraviolet absorbance)를 측정하여 평가하였다.

(3) 공정의 효율 평가

MLSS, COD_{Cr}, SS, TKN, T-P 등의 분석은 Standard Methods[13]에 의거하여 측정하였고, NOx-N과 ortho-phosphate 등의 이온성 성분은 이온크로마토그래피(DX-120 IC, Dionex, USA)를 이용하여 측정하였다. 휘발성 유기산의 농도는 0.01 N H_2SO_4를 용매로 사용하는 HPLC(Aminex HPX-87H column, Spectra Physics 2000, USA)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 음식폐기물 응축수의 탈질 속도 평가

음식폐기물 응축수의 외부탄소원으로서의 효과를 검증하기 위해서 초기 질산염 농도 18 mg/L에서의 회분식 탈질 실험을 실시하였다. 다음의 Fig. 2에서와 같이 반응 초기 60분 동안에는 0.19 g NO_3-N/g VSS/day의 질산성 질소의 환원 속도가 60분 후에는 0.097 g NO_3-N/g VSS/day로 감소하는 것이 관찰되었다. 주입한 음식폐기물 응축수 중 휘발성 유기산 농도(VFAs)가 54.9 mg/L (as COD)임을 고려할 경우 초기 60분 동안 미생물이 쉽게 이용할 수 있는 휘발성 유기산이 고갈되었기 때문이다. USEPA는 메탄올을 전자공여체로 사용한 탈질율은 0.17~0.53 g NO_3-N/g VSS/day의 값을 나타낸다고 보고하고 있으며, 본 연구에 사용된 음식폐기물 응축수를 이용한 탈질율과 비슷한 범위의 값을 나타내고 있다.

3.2. 외부탄소원 주입에 따른 공정 효율 평가

공정의 운전에 앞서 외부탄소원으로 사용한 음식폐기물 응축수의 성상을 측정한 결과는 다음의 Table 4와 같다. 분석 결과 음식폐기물 응축수는 전체 유기물 중 휘발성유기산이 대략 42% 가량을 차지하고 있고, 유기산 중 아세트산이 차지하는 비중이 62% 가량으로 하·폐수의 질소와 인성분의 제거를 위한 고도처리공정의 외부탄소원으로서 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 부유고형물질이 검출되지 않음으로써 입자성 물질이 막 오염에 미치는 영향[3]을 최소할 수 있다.

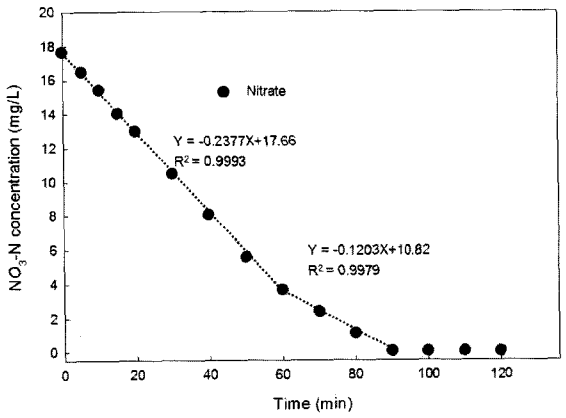

Fig. 2. Nitrate nitrogen profile in the anoxic batch test.

Table 4. Characteristics of CFW (Condensate of Food Waste)

	$TCOD_{Cr}$	$SCOD_{Cr}$	T-N	NH_4-N	T-P	PO_4-P	SS	TVFAs as COD
(mg/L)	12,000	11,250	51-639	21-181	2-10	1-9	N.D.	5,000

* VFAs 조성 = HAc (62%), HPr (7%), HBu (8%), HVa (23%)
주) N.D.: Not Detected

Table 5. Treatment efficiency at various amount of external carbon addition(3Q)

Operating condition			COD_{Cr}			NH_3-N+NO_x-N			Ortho-P			COD/N ratio
External Carbon	HRT (hr) Ax	Ox	In	Out	Re.	In	Out	Re.	In	Out	Re.	
0 %	2	6	160	7.4	95%	40	36.6	9%	4	2.3	46%	4.0
2.4%			160 (504)	7.7	95%	40 (56)	16.9	58%	4 (5.8)	2.0	50%	9.0
4.8%			160 (743)	9.1	94%	40 (68)	10.6	73%	4 (6.7)	0.5	87%	10.9

*( )는 외부탄소원을 포함한 농도

외부탄소원 주입이 본 공정의 질소와 인 성분의 제거에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동일한 운전조건 하에 외부탄소원 주입량을 유입수 유량의 2.4%, 4.8% (부피비)로 증가시켜 가며 그에 따른 처리효율을 비교하였다. Table 5에서와 같이 전체 유기물 제거효율은 외부탄소원의 주입여부와 관계없이 95%가량의 우수한 효율을 얻을 수 있었다. 외부탄소원 주입량이 증가할수록 질소와 인성분의 제거율은 급격히 증가하였으며, 외부탄소원을 주입하지 않은 경우에 비해 질소와 인 성분의 제거율은 최대 64%, 41% 씩 증가하여 음식폐기물 응축수 주입을 통하여 낮은 C/N비를 갖는 하수의 효과적인 고도처리가 가능함을 알 수 있었으며, 기존의 음식폐기물 산발효액을 외부탄소원으로 사용한 연구들에 비해 높은 처리효율을 얻을 수 있었다.

3.3. 운전 조건 변화에 따른 공정의 효율 평가

본 공정의 유기물 및 영양염류의 제거효율 최적화를 위하여 전체 공정의 수리학적체류시간 및 각 반응조의 체류시간, 외부탄소원 주입량을 변화시켜가며 그에 따른 공정의 처리효율의 변화를 살펴본 결과는 다음의 Table 6과 같다. 무산소조와 호기조 체류시간이 각각 2시간, 6시간일 경우(P4, P5)에 비해, 3시간, 5시간의 경우(P6, P7)에 전체적으로 처리효율이 향상되었다. 무산소조의 체류시간이 2시간인 경우 내부반송에 의해 실제 체류시간은 이보다 훨씬 짧아지게 되어 Fig. 3에서와 같이 탈질이 효과적으로 이뤄지지 않았으며, 호기조의 질산성 질소의 농도 또한 증가하여 전체적으로 질소 성분의 제거율이 감소하였다. 또한 전체 체류시간이 6시간일 경우에는 Fig. 4에서와 같이 질산화 효율 또한 크게 저하되었다.

외부탄소원 주입량을 0.5%로 감소시켜 운전한 결과, 앞선 외부탄소원 주입량 변화실험에서 외부탄소원을 4.8%가

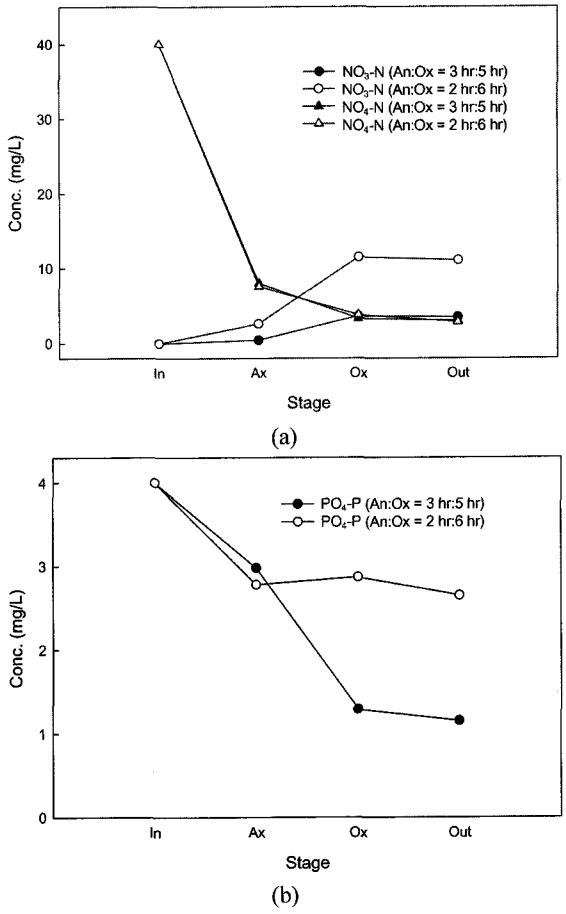

Fig. 3. Typical profiles of NH_4-N, NO_x-N and PO_4-P of the CFW applied BNR system (A = Nitrogen, B = Phosphorus).

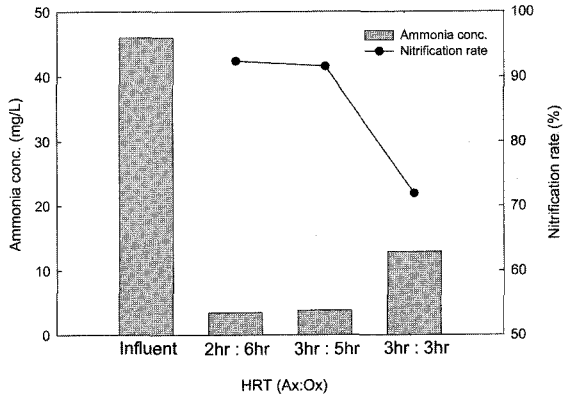

Fig. 4. Effluent ammonia concentration and nitrification rate at various HRTs.

량 주입하였을 경우의 처리효율과 비슷한 효율을 보임으로써 0.5%의 적은 주입량으로도 효과적인 질소, 인성분의 제거가 가능함을 알 수 있었다. 또한 전체 HRT를 6시간으로 감소시켜 운전한 Phase 8의 경우에 질소 성분의 제거율이 49%로 급격히 감소하였는데, 이는 높은 내부 반송율 (5Q)로 인하여 각 반응조의 실질적인 수리학적 체류시간이 충분하지 않음에 기인한 것이다.

Table 6. Treatment efficiency at various operating condition (5Q)

Phase	Operating condition			COD_{Cr}			NH_3-N+NO_x-N			Ortho-P			COD/N ratio
	E.C.	HRT (hr)		In	Out	Re.	In	Out	Re.	In	Out	Re.	
		Ax	Ox										
P4	1.0%	2	6	160 (323)	13	92%	40 (48)	13.9	65%	4 (5.7)	2.7	53%	6.7
P5	0.5%			160 (260)	8.5	96%	40 (46)	23.1	50%	4 (5.3)	2.0	62%	5.7
P6	1.0%	3	5	160 (298)	12.1	96%	40 (47)	6.7	87%	4 (5.4)	0.8	85%	6.3
P7	0.5%			160 (210)	8.7	97%	40 (46)	7.5	84%	4 (5.3)	0.7	87%	4.6
P8	0.5%	3	3	160 (210)	7.1	97%	40 (46)	23.4	49%	4 (5.3)	1.5	71%	4.6

E.C.: 외부탄소원

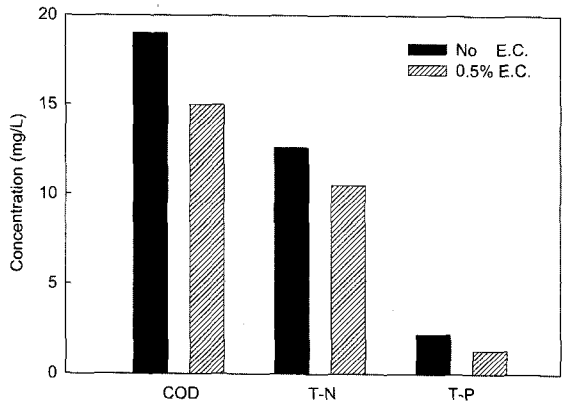

Fig. 5. Effluent COD, T-N, T-P concentrations treating sewage.

3.4. 생활하수 처리 효율 검증

합성하수 처리 실험에서 얻어진 최적의 운전 조건(P7)하에, K 대학의 실제 생활하수를 유입수로 사용하여 본 공정의 생활하수 처리 가능성을 평가하였다. 운전 초기 약 30일 동안은 외부탄소원의 주입 없이 운전하여 음식폐기물 응축수 주입에 따른 질소, 인 성분의 제거효율을 평가하였다. 실험은 동절기에 약 3개월 가량(11월-2월) 진행되었고, 유출수의 평균 농도는 다음의 Fig. 5와 같다.

실험에 사용한 생활하수의 경우 국내의 일반적인 생활하수에 비해 C/N비가 높은 특성을 보이고 있었다. 그 결과 외부탄소원을 주입하지 않은 경우에도 65%와 44%의 비교적 높은 질소, 인 제거효율을 얻을 수 있었다. 유기물의 경우 외부탄소원의 주입 여부와 관계없이 93% 이상의 높은 제거율을 보였으며, 고형물질의 경우 막 결합 생물반응조에서의 완벽한 고액분리로 인하여 100%의 고형물 제거가 가능하였다. 유입수 유량의 0.5%의 외부탄소원을 무산소조로 공급하여 운전한 결과, 총 질소 성분의 제거율은 65%에서 71%로 증가하였고, 인 성분의 제거율은 44%에서 66%로 증가하였다. 본 실험은 앞서 언급한 대로 수온이 10℃ 이하의 동절기에 진행되었음에도 불구하고 높은 처리효율을 보임으로써, 실제 생활하수 처리에 본 공정을 적용하였을 경우에도 만족할 만한 유출수 수질을 얻을 수 있으리라 판단되어 진다.

Table 7. Comparison of membrane fouling characteristics between MBR fed with synthetic wastewater and domestic sewage

Constituent	unit	Synthetic Wastewater	Domestic sewage	
			30 day	60 day
SSIN	mg/L	0	260	80
EPS_p	mg/gVSS	28.4	52.5	44.3
EPS_c	mg/gVSS	31.1	24.9	14.9
Rt	10^{12} m^{-1}	6.4	10.4	5.9
Rm	10^{12} m^{-1}	0.2	0.2	0.2
Rp	10^{12} m^{-1}	2.1	5.5	2.4
Rc	10^{12} m^{-1}	4.1	5.9	3.5
Particle size (average)	um	12.32	20.42	27.82
Hydrophobicity (SUVA)	$m^{-1}mg^{-1}$ L	0.017	0.019	0.025
Surface charge	meq/gVSS	-0.4040	-0.350	-0.364

3.4. 공정의 막오염 특성 파악

본 연구에서는 합성하수를 처리하는 반응조와 실제 생활하수를 처리하는 반응조에서 막오염의 특성을 살펴보았다. 막저항을 측정하여 상대적인 막오염 정도를 살펴보았으며, 미생물 체외고분자물질의 단백질과 탄수화물 성분을 측정하였다. 또한 반응조 내 미생물의 입도분포 및 소수성도와 표면전하 등의 다양한 인자들을 측정, 비교한 결과를 다음의 Table 7에 정리하였다.

생활하수 처리 반응조의 경우 유입수의 고형물질 농도가 높았던 운전 초기 기간에는 전체 막저항(R_t)값이 합성하수를 처리하는 반응조에 비해 상당히 높게 측정됨으로써 유입수 중 고형물질에 의해 막 오염이 심하게 진행되고 있음을 알 수 있었다. 그리하여 운전 30일 이후부터의 기간에는 원수를 1차적으로 침전시켜 SS성분을 제거한 생활하수를 유입수로 사용하였다. 그 결과 합성하수 처리 반응조의 전체 막저항보다 더 낮은 막저항 값을 얻을 수 있었다. 생활하수의 경우 합성하수에 비해 SS성분의 유입으로 인하여 전체 반응조 내의 입자들의 평균 입경이 12.32 μm에서 20.42 μm로 증가하였으며, 이로 인하여 막 저항 중 눈막힘 저항값 (R_p)과 케이크 층의 저항값 (R_c)이 합성하수 처리 반응조에 비해 증가하는 경향을 보였다. EPS 성분의 경우 전체 EPS 농도는 합성하수 처리 반응조의 경우 28.4 mg/g VSS인 것에 비해 생활하수 처리 반응조의 슬러지에서는 44.3-52.5 mg/gVSS의 높은 농도의 EPS값을 나타내고 있었으며 이로 인해 막 오염 또한 가중되었다고 판단된다.[14] 그 구성성분을 살펴보면 생활하수 처리 반응조의 경우 합성하수에 비해에 다양한 물질들이 유입되어 EPS의 총량이 증

가하였으며, 특히 탄수화물 성분에 비해 단백질 성분이 현저하게 증가하는 경향을 나타내었으며, 이에 대한 정확한 영향을 알아보기 위하여 유입수의 성상 변화와 막 오염 영향 인자들과의 상관관계에 관한 추가 실험이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

하수 고도처리 공정에 음식폐기물 고속발효 건조 시 발생하는 응축수를 외부탄소원으로 적용한 본 연구의 실험결과는 다음과 같다.

1) 음식폐기물 응축수의 탈질율을 평가한 결과, 기존의 메탄올 등과 같은 전자공여체와 비슷한 탈질율인 0.19 g NO_3-N/g VSS/day의 값을 나타내었다.

2) 음식폐기물 고속발효 건조기 응축수를 하수 고도처리 공정의 외부탄소원으로 사용하여 질소와 인의 제거율을 각각 64%, 41% 향상 시킬 수 있었으며, 그 주입량은 유입수 유량의 0.5%에서도 충분한 효율을 얻을 수 있었다.

3) 수리학적 체류시간의 변화 실험에서 무산소조와 호기시간의 체류시간이 각각 3시간, 5시간에서 최적의 효율을 나타내었으며, 전체 공정 체류시간은 8시간 이상으로 운전해야 함을 알 수 있었다.

4) 동절기에 수행된 생활하수 처리 실험에서도 외부탄소원 주입을 통해 71%와 66%의 질소와 인 제거율을 얻을 수 있었으며, 실제 공정에의 적용이 가능함을 알 수 있었으며 이를 통하여 음식폐기물과 생활하수의 효과적인 처리 방안이 될 수 있다고 판단된다.

5) 생활하수를 처리하는 반응조의 경우 슬러지의 평균입경과 반응조 내 EPS 농도가 증가하여 전체 막 저항 값이 크게 증가하였으며, 유입수의 SS 농도가 높을 경우에 막 오염이 심하게 진행되었으며, 유입수의 SS 제거를 통하여 막 오염을 효과적으로 저감할 수 있었다.

사 사

본 연구는 중소기업청 산학연공동기술개발사업 컨소시엄사업(S0305110-L117007 5-06006011)에 의해 지원되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Gander, M., Jefferson, B., and Judd, S., "Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost consideration," *Separation and Purification Tech.*, **18**, 119~130(2000).
2. Sofia, A., Ng, W. J., Ong, S. L., "Engineering design approaches for minimum fouling in submerged MBR," *Desalination*, **160**, 67~74(2004).
3. Chang, I. S., Kim, S. N., "Wastewater treatment using membrane filtration-effect of biosolids concentration on cake resistance," *Process Biochem.*, **40**, 1307~1314(2005)
4. 환경부 홈페이지, http://www.me.go.kr, 환경부(2004).
5. 박철휘, 이억재, 신창민. "음식물쓰레기 발효산물을 이용한 하수고도처리 특성 연구," 대한환경공학회 2001 춘계학술연구발표회 논문집(I), 이화여자대학교, pp. 53~54 (2001).
6. 이억재, 이응택, 이재기, "음식물쓰레기 산발효액을 이용한 하수고도처리기술," 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 2000 공동춘계학술발표회 논문집, 스위스 그랜드 호텔, pp. 239~242(2000).
7. 신항식, 채소룡, 남세용, 강석태, 백병천, "하수처리에서 음식물 산발효액이 영양염류 제거에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **24**(6), 1023~1031(2002).
8. Mulder, M., *Basic principle of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers(1996).
9. Brown, M. J. and Lester, J. N., "Comparison of bacterial extracellular polymer extraction methods," *Appl. Environ. Microbiol.*, **40**, 179~185(1980).
10. Smith, P. K., Krohn, R. I., Hermanson, G. T., Mallia, A. K., Gartner, F. H., Provenzano, M. D., Fujimoto, E. K., Goeke, N. M., Olson, B. J., and Klenk, D. C., "Measurement of protein using bicinchoninic acid," *Anal. Biochem.*, **150**, 75~85(1985).
11. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., rebers. P. A., and Smith, F., "Colorimetric method for determination of sugars and related substances," *Anal. Chem.*, **28**(3), 350~356(1956).
12. Morgan, J. W., Forster, C. F., and Evison, L., "A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludge," *Water Res.*, **24**(6), 743~750(1990).
13. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th edition., APHA/AWWA/WEF, Washington, D. C., USA(1992).
14. Wontae Lee, Seoktae Kang, and Hangsik Shin, "Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors," *J. Membr. Sci.*, **216**, 217~227(2003).