

간헐포기공정과 막결합 간헐포기공정의 오염물질 제거특성 비교

Comparison of Pollutants Removal between the Intermittently Aerated Bioreactor (IABR) and Intermittently Aerated Membrane Bioreactor (IAMBR)

최창규* · 이광호**

Choi, Chang Gyoo · Lee, Kwang Ho

Abstract

The purpose of this study was the comparison of pollutants removal and the track study of the nitrogen and phosphorus, the estimation of the nitrification and denitrification rate, and the investigation of the nitrogen mass balance between intermittently aerated membrane bioreactor(IAMBR) and intermittently aerated bioreactor(IABR), thus it verified the validity of the membrane submergence. As a result, it had no difference of organic matter removal, however, IAMBR showed better efficiency than IABR in the nutrients. Also, NO_3^- -N concentration at the anoxic state in the reactor was lower in IAMBR, and the denitrified nitrogen of IAMBR was 40.9%, that of IABR was 10.7%, thus it found out that the denitrification capability of IAMBR was higher than IABR above fourfold. Therefore, it seems reasonable to conclude that the membrane helps to improve the removal of pollutants, because of the high MLSS concentration and the available method of intermittent inflow/outflow.

Keywords : membrane, intermittently aerated membrane bioreactor, intermittently aerated bioreactor, nitrification/denitrification, nitrogen mass balance

요 지

본 연구의 목적은 간헐포기공정(IABR)과 막결합 간헐포기공정(IAMBR)의 오염물질 제거능력과 영양염류 제거 mechanism을 비교 검토하여 막침적의 타당성을 확보하고 질산화율 및 탈질율을 산정하였으며, 질소물질수지를 수립하고자 하였다. 그 결과로서 IAMBR과 IABR의 경우 유기물 제거에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았으나 영양염류 제거능력은 IAMBR이 IABR에 비해 높게 나타났다. 또한, 무산소 상태에서 반응조 내의 질산성 질소 농도가 IAMBR이 낮게 유지되는 것으로 보아 높은 탈질화 반응이 일어난 것으로 판단되며, 질소물질수지의 결과에서도 IAMBR에서 탈질된 질소성분이 40.9%로 IABR의 10.7%보다 4배 이상 높은 탈질능력을 보였다. 따라서, 높은 MLSS 농도의 유지와 간헐적 유입·유출 방식의 적용이 가능한 장점을 지니고 있는 막이 월등한 질소제거능력의 차를 보임으로써 간헐포기공정에 대한 막결합의 타당성이 충분한 것으로 사료된다.

핵심용어 : 막, 막결합 간헐포기공정, 간헐포기공정, 질산화/탈질화, 질소물질수지

1. 서 론

기존의 간헐포기공정은 하나의 반응조 내에서 24시간동안 시간비율에 따라 포기/비포기를 반복적으로 수행함으로써 유기물 및 영양염류를 일정수준까지 제거할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 유입수의 유기물부하가 불규칙적일 경우, 유기물 뿐 아니라 영양염류 제거에도 민감하게 반응할 수 있는 공정으로 단일 반응조로 운영하는 것보다 주로 2단 이상에서 운영해야 하는 단점을 가지고 있다.

그러나 반응조를 직렬로 2단 이상 연속적으로 운영할 경우 기존의 활성슬러지 시설을 변형 혹은 개조해야 한다는 점과 두개 이상의 반응조가 포기와 비포기를 서로 상반되게

운영함으로써 24시간 포기방식과 마찬가지로 연속적인 포기를 해줘야 하는 단점을 갖게 된다.

이러한 간헐포기공정의 충격부하에 대한 불안정한 유출을 해결하기 위한 방법으로 도입한 것이 막의 침적이며, 간헐포기공정과 막결합 간헐포기공정의 처리능력을 감안하여 막 침적의 타당성 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 간헐포기공정과 막결합 간헐포기공정에 대한 유입·유출수의 COD_{Cr} 및 T-N, T-P 농도를 비교하여 오염물질의 제거능력을 평가하였으며, 시간별 질소, 인성분의 거동을 조사하여 영양염류 제거특성을 비교하였고, 질소물질수지를 검토하였다.

*한국수자원공사 수지연구원 하수처리팀 연구원 · 공학박사(E-mail: mypoet@hanmail.net)
**정회원 · 충북대학교 도시공학과 교수 · 공학박사(E-mail: paullee@chungbuk.ac.kr)

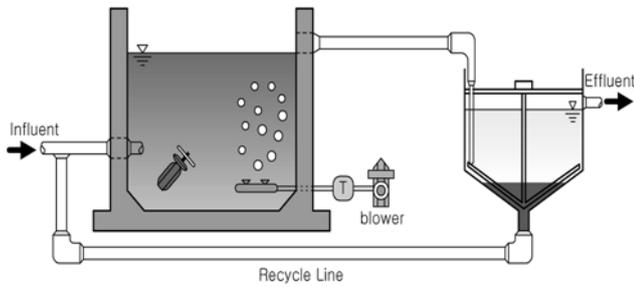


Fig 1. Schematic diagram of IABR

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험장치의 개략도는 Fig. 1, 2에서와 같이 유효용적 6 l의 직사각형 아크릴로 제작한 반응조를 이용하였으며, 간헐포기 공정의 경우 2 l의 침전지를 두었고 막결합 간헐포기공정의 경우 내부에 MF형 Membrane을 침적하였다(Table 1 참조). 간헐포기를 위해 timer에 의해 산기기가 on/off되어 무산소와 호기조건을 반복적으로 수행하도록 하였고, 충분한 혼합을 위해 30 rpm으로 교반하였다.

2.2 유입수 성상과 운영방법

본 연구에서 사용한 유입수는 합성폐수로써, C 하수처리장 포기조 유입부의 시료를 분석한 성상을 기준으로 Table 2와 같이 구성하였으며, 분석방법은 Standard Method에 따라 실험하였으며, 실험결과는 운전기간 중 MLSS와 유입·유출농도를 측정하여 정상상태를 유지한 10일 이상의 데이터의 평균값을 사용하였다.

유입·유출방법은 간헐포기공정의 경우 연속유입·유출방식으로 운영하였고, 막결합 간헐포기공정은 비포기시간에 유입하고 포기시간에 유출하는 방식을 이용하였으며, 두 공정의 세부적인 운영방법은 Table 3과 같다.

SRT 조절을 위한 슬러지 폐기는 반응조내에서 직접 인발하는 방법을 채택하였으며, 인발량은 일일 300 mL씩 폐기하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 반응조 MLSS 농도

운영기간 중 간헐포기공정과 막결합 간헐포기공정의

Table 1. The specification of hollow fiber membrane

Manufacturing Co.	Mitsubishi Rayon
Membrane Material	polyethylene
Particle Cut-Off	0.1(μm)
Hydrophilic Degree	hydrophilic
Permeation Degree	484(LMH)
Surface interaction	42(mN/m)
Flux	0.3~0.35($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)
Operation Method	Out-In
Membrane Change	5year/cycle
Membrane Washing	3~4 months/cycle
Operation Differential Pressure	<40 kPa
Operation Temperature	<40°C
pH	2~11
Experimental items	Conc. (mg/L)
COD _{Cr}	180~220(200)
T-N	40~50(45)
NH ₄ ⁺ -N	35~45(40)
NO ₂ ⁻ -N	<0.02
NO ₃ ⁻ -N	< 4.0
PO ₄ ³⁻ -P	5~6(5.5)
COD _{Cr} loading rate (gCOD _{Cr} /d)	2.40
COD _{Cr} /T-N	4.5

Table 2. The composition of the synthetic sewage

Compound	Conc. (mg/L)
Glucose	180
Pepton	100
Yeast extract	10
(NH ₄) ₂ SO ₄	175
KH ₂ PO	50
NaHCO ₃	500
MgSO ₄ · 7H ₂ O	20
CaCl ₂ · 2H ₂ O	1.5
MnSO ₄ · H ₂ O	1
FeCl ₃ · 6H ₂ O	1.8

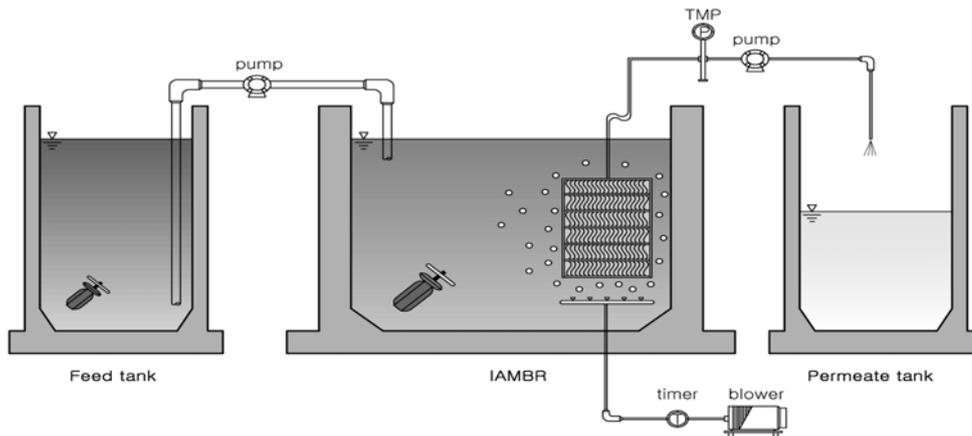


Fig 2. Schematic diagram of IAMBR

Table 3. Operating conditions of two processes

Item	Condition	
aeration on/off (min/min)	60/60	
HRT(hr)	9	
SRT(day)	20	
Flux(L/m ² · hr)	15	
pH	7±0.5	
Temp.(°C)	23	
DO(mg/L)	aeration on	5~6
	aeration off	<0.05

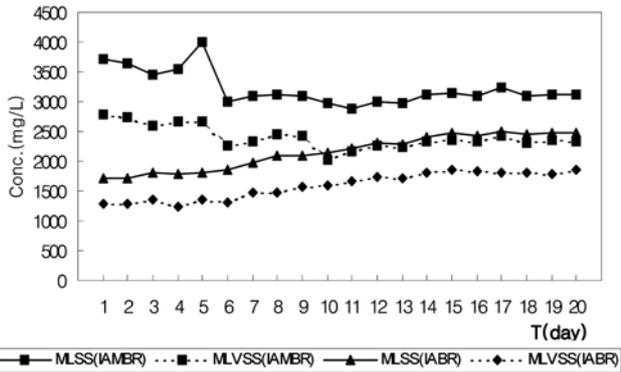


Fig 3. The variation of MLSS and MLVSS concentration in experimental period

Table 4. The F/M ratio of IAMBR and IABR

Process	COD _{Cr} (mg/L)	Q (L/d)	MLSS (mg/L)	MLVSS (mg/L)	V (L)	F/M ratio (gCOD _{Cr} /gMLVSS · d)
IAMBR	200	12	3223	2403	6	0.1665
IABR	200	12	2153	1591	6	0.2514

MLSS와 MLVSS 농도변화는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 보면 IAMBR과 IABR의 MLSS 농도는 각각 3200 mg/L와 2200 mg/L 수준에서 안정화되는 경향을 보였으며, IABR 보다는 IAMBR의 경우가 반응조에 높은 MLSS 농도를 유지시켰다. 또한, MLVSS의 경우도 2400 mg/L와 1600 mg/L에서 안정화되어 MLSS와 같은 경향을 보였다. 이는 IABR의 경우 유출수에 평균 10.6 mg/L의 SS 성분이 지속적으로 유출되어 MLSS 농도저하에 영향을 미친 반면, IAMBR은 막의 완전한 고액분리로 인해 유출수 내의 MLSS가 zero에 가까워 반응조 내의 미생물 농도를 최대로 유지시켰기 때문으로 사료된다.

이로 인해 반응조내의 F/M비는 Table 4의 결과에서와 같이 IAMBR에서 0.1665(gCOD_{Cr}/gMLVSS · d)로 IABR의 0.2514(gCOD_{Cr}/gMLVSS · d) 보다 비교적 낮게 나타났는데, 이는 IAMBR에서 비교적 높은 MLSS 농도의 유지때문이며 이의 결과로 포기조내 미생물의 상태는 내생호흡 단계로 유지되었다고 판단된다.

3.2 유기물 및 질소, 인 제거

간헐포기공정과 막결합 간헐포기공정의 COD_{Cr}, T-N, T-P의 유출농도와 제거효율은 Fig. 4와 같다.

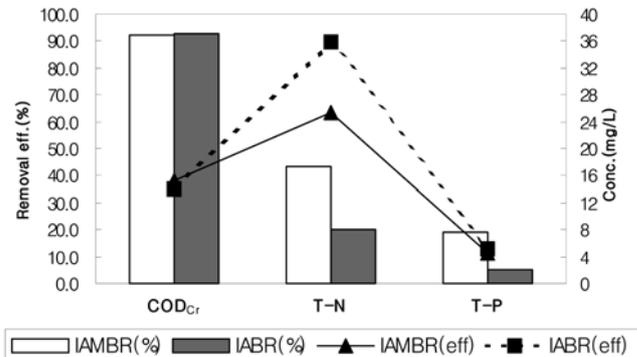


Fig 4. The concentration of outflow and removal efficiency of COD_{Cr}, T-N and T-P

Fig. 4에서와 같이 IAMBR과 IABR의 유출수 COD_{Cr} 농도는 각각 15.2 mg/L(제거율 92.4%), 14.0 mg/L(93.0%)로 거의 동일한 농도를 보였는데, 이는 IABR에서 유출수의 SS가 10.6 mg/L로서 비교적 적은 양이 유출되어 유출수 내의 유기물 농도에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

하지만 유출수의 T-N 농도는 각각 25.4 mg/L(43.6%), 35.9 mg/L(20.2%)로 나타났으며, 유출수의 T-P 농도는 4.46 mg/L(18.9%), 5.17 mg/L(6.0%)로 IAMBR이 IABR에 비해 비교적 높은 질소, 인 제거능력을 보였는데, 질소제거의 경우 막으로 인한 미생물 농도의 외부유출 차단효과가 반응조내에 긴 증식시간을 보이는 질산화/탈질 미생물 증식에 도움을 주어 낮은 유입부하와 일반적인 운영조건에서도 44%가량의 높은 질소제거능력을 보인 반면, IABR은 유출수 내의 SS성분 유출과 SRT 조정을 위한 슬러지 폐기로 인해 고농도의 MLSS를 유지시키지 못한 것이 질산화/탈질 반응에 영향을 미친 것으로 사료된다.

인 제거에 있어서는 IAMBR의 유출농도가 4.46 mg/L(18.9%)로 IABR의 5.17 mg/L(6.0%)에 비해 3배 가량 높은 제거능력을 보였지만 두 공정이 모두 높은 인 유출농도를 보였는데, 이는 질소제거를 위해 20일 이상의 긴 SRT에서 반응조를 운영할 경우 슬러지 폐기량을 감소시켜 반응조 내에서 슬러지 내에 함유된 인을 효과적으로 제거시킬 수 없기 때문에 초기 운영시에는 비교적 높은 인 제거능력을 보이지만 운영기간이 길어질수록 유출수 내의 인 농도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 긴 SRT 조건에서 막분리 공정 운영시 인 제거능력을 향상시키기 위해서는 인 제거를 위한 다른 방법의 조합이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 포기/비포기 시간별 질소, 인 거동

3.3.1 질소 거동과 제거량

유입수의 질소 성분은 대부분이 암모니아성 질소로 이루어져 있어 비포기시 반응조에 유입될 경우 반응조의 암모니아성 질소 농도가 증가하며, 호기조건에서 질산화가 일어나 유입된 암모니아성 질소가 질산성질소로 전환되어 시간이 경과함에 따라 질산성 질소 농도가 증가하게 된다. 이러한 하나의 반응조 내에서 일어나는 질소성분의 거동을 살펴보면 운영조건에서의 질소제거 메커니즘을 추정할 수 있다.

IAMBR과 IABR 반응조의 한 cycle내 질소 성분의 거동은 Fig. 5와 같으며, 이를 토대로 계산된 단위시간당 질소

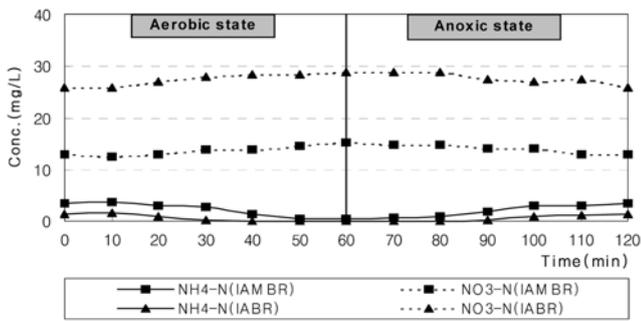


Fig 5. The track study of nitrogen compounds in a cycle

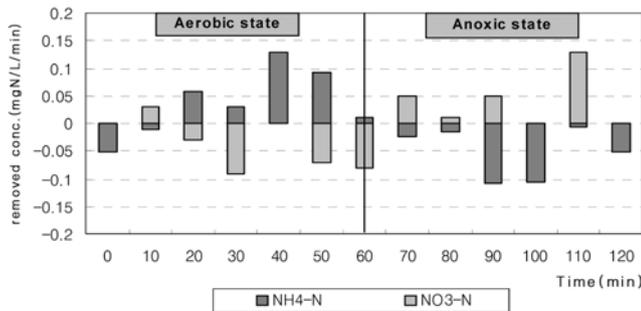


Fig 6. The removed nitrogen concentration per ten minutes in IAMB

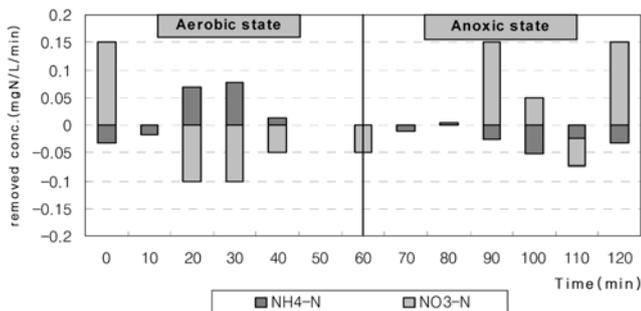


Fig 7. The removed nitrogen concentration per ten minutes in IABR

성분의 제거량은 Fig. 6과 7에 나타났다.

Fig. 5의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도를 보면 IABR과 IAMB에서 각각 40분과 50분 사이에 질산화반응이 완전히 종료된 것으로 보아 질산화에 필요한 산소와 알칼리도의 공급이 원활하게 이루어진 것으로 판단된다.

하지만 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도의 경우 두 공정 모두 무산소상태에서 질산성 질소의 탈질화 반응이 원활하게 이루어지지 않았는데, 이는 유입수의 COD_Cr 부하가 낮아 탈질화에 필요한 탄소원이 부족하여 완전 혐기상태가 아닌 무산소상태를 유지한 것으로 판단된다. 또한, IAMB의 반응조내 질산성 질소 농도가 12.6 mg/L~15.3 mg/L로 IABR 공정의 26.0 mg/L~29.0 mg/L보다 낮게 유지된 것은 고농도의 MLSS 농도로 인해 낮은 F/M비를 유지시킨 점 뿐만 아니라 유입방식에 있어서 연속적으로 유입시키는 IABR 공정에 비해 간헐적 유입방식으로 운전된 IAMB 공정에서 탈질이 이루어지는 비포기시간에 동일량의 유입수를 주입함으로써 단위시간당 유입수의 유기물부하가 증가하여 탈질능력이 향상된 것으로 판단된다. 따라서, 막분리의 적용이 하나의 반응조에서 간헐적 유입·유출 방식을 가능하도록 하여 간헐포기공정의 연속유입·유출방식에 비해 질소제거를 향상시킬 수 있었다.

단위시간당 제거된 질소성분을 검토한 Fig. 6과 7에서는 IAMB의 경우 20~50분 사이에 질산화가 이루어졌고 탈질 반응은 70~110분경까지 종료되어 탈질조건 형성 후 60분 이내에 모든 반응이 종결된 것으로 판단되며, 호기조건이 시작된 후에도 탈질반응이 미세하게 일어나는 것은 포기시작 후 낮은 DO 농도 조건에서 비포기 120분까지 유입된 유기물의 작용에 기인한 것으로 사료된다. 또한, IABR의 경우 질산화는 20~40분경에 종료되었고 탈질화는 90분부터 비포기가 종료되는 시점까지 지속적으로 일어난 것으로 나타났는데, 이는 반응조내의 낮은 미생물량으로 인해 탈질반응이 IAMB에 비해 비교적 오랜시간동안 지속적으로 일어나는 것을 알 수 있었다.

3.3.2 인 거동과 제거량

반응조의 인성분 거동을 알아보기 위해 한 cycle내에서의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 를 조사한 결과는 Fig. 8과 같으며, 단위시간당 제거량은 Fig. 9에 나타났다.

Fig. 8에서 한 cycle내 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 살펴보면, 유입농도에 비해 높은 농도로 반응조내에서 유지되었는데, 이는 긴 SRT로 인해 슬러지 내에 함유하고 있는 인 성분이 효과적으로 제거되지 못하는 상태에서 인의 섭취와 방출이 반복적으로 일어나 반응조 내의 인 농도가 높아진 것으로 판단된다. 또한, Fig. 5에서 보여지듯이 반응조내 질산성 질소 농도가 높게 유지되어 전체적인 NOX-N의 농도가 높아 인 제거에 영향을 미친 것으로 사료되며, 이는 일반적으로 인제거에 있어서 인의 섭취에 비해 방출에 걸리는 시간이 길게 요구될뿐더러 NOX-N의 농도가 높게 유지될 경우 효과적인 인의 방출은 기대하기 어렵다는 다른 연구결과와도 일치한다(Gerber, 1986). 따라서 반응조내의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 가 미생물에

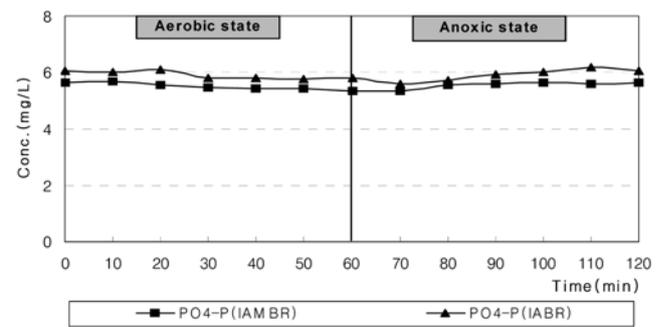


Fig 8. The track study of Ortho-P in a cycle

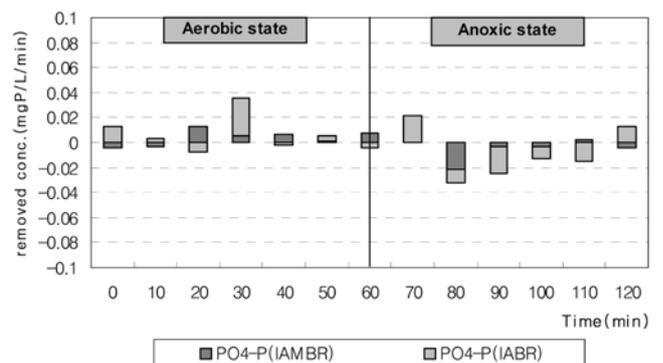


Fig 9. The removed ortho-P concentration per ten minutes in IAMB and IABR

Table 5. The rate of nitrification and denitrification in IAMBR and IABR

Process	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)		HRT (hr)	Nitri. rate (mg/L · hr)	NO ₃ -N(mg/L) (effluent)	Denit. rate (mg/L · hr)
	influent	effluent				
IAMBR	39.0	3.2	9	3.978	18.2	1.956
IABR	39.0	2.4	9	4.067	32.0	0.511

Table 6. The calculation of nitrogen mass balance

Process		nitrogen loading (A)	removed nitrogen(B)			N balance (B)/(A) (%)
			effluent	sludge wasting	denit.	
IAMBR	mass(g/d)	516	256.8	72.1	211.2	104.6
	rate(%)	100	49.8	14.0	40.9	
IABR	mass(g/d)	516	412.8	47.7	55.2	99.9
	rate(%)	100	80.0	9.2	10.7	

의해 제거되지 않은 것은 무산소상태에서 인의 방출이 NO_x-N의 방출로 인해 효과적으로 이루어지지 않아 호기상태의 인 섭취에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 9에서도 마찬가지로 호기상태에서는 인 섭취가, 무산소상태에서는 인 방출이 일어나지만 인 성분의 제거와 증가량이 미미하게 나타나는 것으로 보아 인 제거반응에 문제가 있었음을 알 수 있었다.

3.4 질산화율과 탈질율

질소제거를 위한 호기상태에서의 질산화 정도와 무산소상태의 탈질 정도를 비교하기 위해 계산한 질산화율과 탈질율은 Table 5와 같다.

Table 5에서 보면 IAMBR의 경우 질산화율 3.978(mg/L · hr), 탈질율 1.956(mg/L · hr)을 보인 반면, IABR은 각각 4.067(mg/L · hr), 0.511(mg/L · hr)로 나타나 질산화율에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았지만 탈질율에 있어서 IAMBR이 단위시간당 탈질된 양이 거의 4배 가량 많았는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 동일한 HRT임에도 불구하고 IAMBR의 운영특성상 유입수가 무산소조건에서만 유입되어 단위시간당 유기물부하가 높아 탈질에 도움을 주었기 때문으로 판단된다.

3.5 질소 물질수지

유입수 중의 질소 성분에 대해 반응조 내에서 유출된 질소 성분의 유출경로와 유출량 및 비율을 알아보기 위해 산정한 질소 물질수지는 Table 6와 Fig. 10에 나타났다.

Table 6에서와 같이 IAMBR과 IABR 모두 516(g/d)의 질소부하를 반응조내에 유입시켰고, IAMBR의 경우 유출수로 256.8(g/d), 슬러지 폐기에 의해 72.1(g/d), 질산화/탈질에 의해 211.2(g/d)가 제거되었으며 유입에 대한 N balance는 104.6%로 유입질소량에 비해 제거된 질소량이 조금 높게 산출되었는데, 이는 질소물질수지 계산과정에서 제거된 질소량을 유출과 슬러지 폐기, 그리고 탈질된 질소량으로 세분화하여 대략적으로 계산하였기 때문으로 사료된다.

IABR의 경우는 유출수로 412.8(g/d), 슬러지 폐기에 의한 외부유출은 47.7(g/d), 질산화/탈질에 의한 제거량은 55.2(g/d)로 계산되었으며 유입에 대한 N balance는 99.9%로 거의

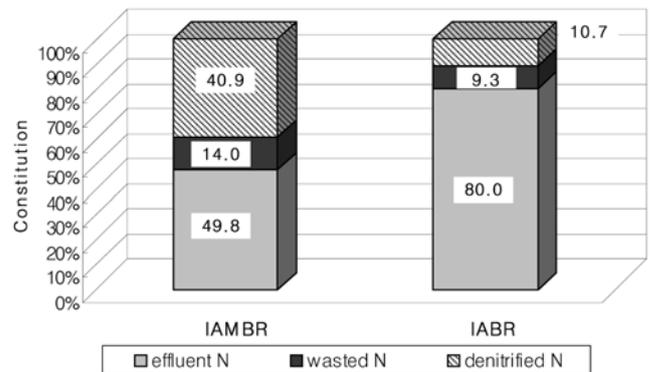


Fig 10. The comparison of mass balance between IAMBR and IABR.

100%에 가깝게 산출되었다.

이러한 결과를 토대로 Fig. 10에서 살펴보면, IAMBR의 경우 제거된 질소 성분 중 유출수에 포함된 양이 49.8%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 탈질된 양도 40.9%로 많은 비중을 차지하였다. 하지만 IABR의 경우 유출수에 포함된 질소성분의 양이 80.0%로 절대적으로 많은 부분을 차지하였으며 탈질된 양이 10.7%로 IAMBR 공정이 IABR에 비해 월등한 탈질능력을 보임으로써 질소 성분의 유출을 억제할 수 있는 공정이라고 판단된다.

4. 결 론

간헐포기공정(IAB)과 막결합 간헐포기공정(IAMBR)의 오염물질 제거와 시간별 질소, 인 거동 및 질산화율 및 탈질율, 질소물질수지를 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 오염물질 제거를 검토한 결과 COD_{Cr}은 IAMBR과 IABR에서 모두 92% 이상 높고 안정적인 제거능력을 보인 반면, 영양염류 제거에 있어서 유출수의 T-N 농도는 각각 25.4 mg/L(43.6%), 35.9 mg/L(20.2%)로 나타났으며, 유출수의 T-P 농도는 4.46 mg/L(18.9%), 5.17 mg/L(6.0%)로 IAMBR이 비교적 높은 제거능력을 보였는데, 이는 막으로 인한 미생물 농도의 외부유출 차단이 반응조내에 고농도의 MLSS를 유지시켜 질소, 인제거를 향상시킨 것으로 판단된다.

2. 시간별 질소, 인 거동에서는 두 조건 모두에서 질산화 반응은 문제가 없었으나 탈질화 반응이 원활하게 이루어지지 않았는데, 이는 유입 COD_{Cr} 부하가 낮아 탈질에 필요한 탄소원 부족이 원인으로 사료된다. 또한, IAMBR의 반응조내 질산성 질소 농도가 12.6 mg/L~15.3 mg/L로 IABR 공정의 26.0 mg/L~29.0 mg/L보다 낮게 유지된 것은 낮은 F/M비를 유지시킨 점 뿐만 아니라 간헐적 유입 방식으로 인해 단위시간당 유입수의 유기물부하가 증가하여 탈질능력이 향상된 것으로 판단되며, 막분리의 적용이 간헐적 유입·유출 방식을 가능하도록 하여 질소제거를 향상시킬 수 있었다.
4. 질소물질수지의 결과에서는 IAMBR의 경우 제거된 질소 성분 중 유출수에 포함된 양이 49.8%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 탈질된 양도 40.9%로 많은 비중을 차지하였다. 하지만 IABR의 경우 유출수에 포함된 질소성분의 양이 80.0%로 절대적으로 많은 부분을 차지하였으며 탈질된 양이 10.7%로 IAMBR 공정이 IABR에 비해 월등한 탈질능력을 보임으로써 질소 성분의 유출을 억제할 수 있는 공정이라고 판단된다.
5. 따라서, 간헐포기공정에 비해 막결합 간헐포기 공정은 유기물과 인 제거에 있어서 큰 차이를 보이지 않았지만, 질

소제거에 대해서는 높은 MLSS 농도의 유지와 간헐적 유입·유출 방식의 적용이 가능한 장점을 지니고 있어 보다 우수한 질소제거능력을 보임으로써 간헐포기공정에 대한 막분리 침적의 타당성이 충분한 것으로 결론지을 수 있다.

참고문헌

- 최창규(1999) 단일간헐포기공정을 이용한 생물학적 영양염류 제거, 석사학위논문, 충북대학교.
- 최창규(2005) 막결합 간헐포기공정에서의 운영인자 분석, 박사학위논문, 충북대학교
- 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*, Vol. 34, No. 1-2, pp. 129-136
- Gerber, A., Mostert, E.S. Winer, C.T., and DeVilliers, R.H. (1986) The effect of acetate and other short chain carbon compounds on the kinetics of biological nutrient removal, *Water SA*, 12, 7-12
- Rosenberger, S., Kruger, U. Witzig, R. Manz, W. Szewwyk, U. Kraume, M. (2002) Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater, *Water Research* 36, pp. 413-420.

(접수일:2005.9.23/심사일:2005.10.5/심사완료일:2005.10.10)