

Membrane-Attached Biofilm Reactor(MABR)에서의 독립영양 미생물을 이용한 질소 제거

신정훈^{*,**} · 상병인^{*,†} · 정윤철^{*} · 정연규^{**}

^{*}한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

^{**}연세대학교 토목환경공학과

Nitrogen Removal using Autotrophic Microorganism in Membrane-Attached Biofilm Reactor (MABR)

Jeong-Hoon Shin^{*,**} · Byoung-In Sang^{*,†} · Yun-Chul Chung^{*} · Youn-Kyoo Choung^{**}

^{*}Water Environment and Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

^{**}Department of Civil & Environmental Engrg., Yonsei University

(Received 5 July 2005, Accepted 24 August 2005)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the performance of nitrogen removal using autotrophic microorganism in the Membrane-Attached Biofilm Reactor (MABR). The treatment system consists of an aerobic MABR (R1) for nitrification and an anaerobic MABR (R2) for hydrogenotrophic denitrification. Oxygen and hydrogen were supplied through the lumen of hollow-fiber membranes as electron acceptor and donor, respectively. In phase I, simultaneous organic carbon removal and nitrification were carried out successfully in R1. In phase II, to develop the biofilm on the hollow-fiber membrane surface and to acclimate the microbial community to autotrophic condition, R1 and R2 were operated independently. The MABRs, R1 and R2 were connected in series continuously in phase III and operated at HRT of 8 hr or 4 hr with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of influent, from 150 to 200 mgN/L. The total nitrogen removal efficiency reached the maximum value of 99% at the volumetric nitrogen loading rate of 1.20 kgN/m³·d in the combined MABR system with R1 and R2. The results in this study demonstrated that the combined MABR system could operate effectively for the removal of nitrogen in wastewater not containing organic materials and can be used stably as a high rate nitrogen removal technology.

keywords : Nitrogen removal, Autotrophic microorganism, Hollow-fiber membrane, Membrane-attached biofilm reactor

1. 서 론

Membrane-Attached Biofilm Reactor (MABR)는 멤브레인의 공극을 통하여 무기포방식으로 산소 또는 수소와 같은 가스 형태의 전자 수용체 및 전자 공여체를 멤브레인 표면에 형성된 생물막에 직접 공급하는 생물막 공법이다. 무기포식 생물막 공법의 장점은 유기물 분해 또는 질산화에서 필요한 산소를 생물막에 직접적으로 공급하기 때문에 이론적으로 100%에 가까운 산소이용효율을 얻을 수 있다는 것이다(Pankhania et al., 1994). 특히 순산소를 이용한 고효율 처리시스템에서는 유기물의 농도에 관계없이 안정적인 질산화를 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있어 MABR를 이용한 암모니아성 질소제거에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Brindle et al., 1998; Yamagiwa et al., 2004). 최근에는 MABR을 이용한 탈질에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 수소를 전자공여체로 이용한 독립수소자화 탈질에 대

한 많은 연구가 진행되고 있다(Ho et al., 2001; Lee et al., 2002). 탈질 공정에서는 종속영양 미생물을 이용하는 것이 가장 일반적인 방법이기 때문에 탈질에 필요한 적정농도의 유기물 함유가 중요한 제한인자로 작용한다. 유기물의 농도가 매우 낮은 지하수나 일부 공장폐수의 경우는 질소제거를 위하여 외부탄소원의 첨가가 필요하게 되며, 이에 따른 처리비용의 증가와 잔류 유기물에 의한 2차 오염물질의 발생을 초래할 수 있다. 이에 반해, 독립영양 미생물에 의한 탈질은 외부탄소원의 첨가가 필요하지 않으며, 2차 오염의 위험성이 적다는 점에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 독립영양 미생물에 의한 탈질공정으로는 전자공여체로서 황, 철, 수소 등을 이용하는 것이 가장 대표적인 독립영양탈질이다. 이중 전자공여체로서의 수소이용은 전자당량당 비용이 유기물보다 낮다는 점과 종속영양탈질에 비하여 미생물 생성량이 적다는 점, 환원된 형태의 질소가 잔류되지 않는다는 점이 장점이라고 할 수 있다(Rittmann et al., 2001). 수소를 전자공여체로 이용한 탈질 공정은 주로 고정상이나 유동상 시스템에서 사용되어 왔으며, 수소 공급 방법은 산기장치에 의한 것이 주된 방법이었다. 산기식 수소공급은

[†] To whom correspondence should be addressed.

biosang@kist.re.kr

수소의 용해도가 매우 낮기 때문에 필요농도의 수소공급이 어렵고 또한 잔여 수소의 대기배출시 폭발의 위험성이 있어 전자공여체로서의 수소사용은 많은 제한요소를 가지고 있다. 하지만 MABR 방식에 의한 수소공급은 필요한 만큼의 수소를 생물막에 직접적으로 공급할 수 있다는 점과 대기로의 배출을 최소화 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 MABR 방식 중 증공사막을 이용하는 경우는 다른 여재에 비하여 생물막이 부착되는 유효표면적을 상당히 크게 유지할 수 있기 때문에 고효율의 질소제거 시스템의 구성이 가능하게 된다.

앞에서 제시된 MABR을 이용한 외국의 선행연구에서는 질소제거에 있어서 질산화 또는 탈질을 위한 독립적인 단일공정에 국한된 연구가 대부분이며, 이들 독립공정을 조합하여 장시간동안 연속운전을 한 연구사례는 드물다. 또한, 국내에서는 황산화와 같은 독립영양 탈질에 대한 연구는 활발히 보고되고 있으나, 수소를 이용한 질산화 질소의 제거와 MABR을 이용에 대한 연구가 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 질산화 공정과 수소를 이용한 독립영양 탈질공정이 조합된 MABR 공정을 장시간 운전하여 인공폐수내의 총질소 제거를 목적으로 하였으며, 부하율에 따른 처리효율의 변화를 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 반응기의 개략도를 나타낸 것이다. 본 처리시스템은 질산화 공정을 수행하게 되는 호기성 반응조(R1)와 탈질 공정을 수행하게 되는 혐기성 반응조(R2)로 구성되어 있다. 각 반응조에 충전된 hollow fiber membrane은 polysulfone으로 제조된 UF membrane으로서 각각의 MWCO (molecular weight cut-off)는 10,000 Da, 30,000 Da였으며, hollow fiber membrane의 부피를 제외한 반응조의 유효용적은 75 mL로 동일하였다. MWCO가 30,000 Da인 hollow fiber membrane 반응조는 질산화를 위한 호기성 반응조로 사용하였으며, MWCO가 10,000 Da인 hollow fiber membrane 반응조는 탈질을 위한 혐기성 반응조로 사용하였다. 각 반응조에는 지름이 1.4 mm인 hollow fiber membrane이 100개씩 충전되어 0.22 m²의 막 표면적

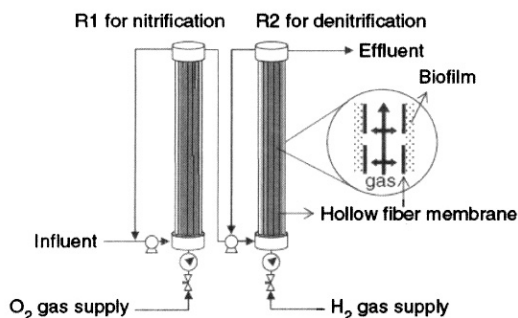


Fig. 1. Schematic diagram of combined Membrane-Attached Biofilm Reactor (MABR) system.

을 제공하였다. 각 반응조에는 하수종말처리장에서 채취한 활성슬러지와 혐기성 소화슬러지를 식용하였다.

2.2. 운전방법 및 분석방법

본 연구에서 사용된 반응조는 직경 25 mm, 길이 600 mm의 원통의 형태로 되어있어 모듈내로 유입된 원수가 반응조내에서 생물막과의 충분한 접촉기회를 가지기가 어렵다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 각 반응조에 순환펌프를 설치하여 반응에 필요한 충분한 접촉시간을 유지하여 주었다. 질산화 반응조는 hollow fiber membrane 내부로 산소를 공급하여 호기성 상태를 유지하였으며, 탈질 반응조는 hollow fiber membrane 내부로 수소를 공급하였다.

본 연구에서의 반응조 운전조건은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 운전방법에 따라 3단계로 구분되어지며, 1 단계에서는 유입수에 글루코오스를 첨가하여 단일 반응조에서의 유기물 제거와 질산화에 대하여 알아보았다. 2단계에서는 유기물을 첨가하지 않고 각 반응조에서의 질산화 효율과 탈질 효율을 알아보았으며, 3단계에서는 2단계에서와 마찬가지로 유입수에 유기물을 첨가하지 않고 별도로 운전되던 호기성 반응조와 혐기성 반응조를 조합하여 총 질소 제거효율을 알아보았다. 각 반응조의 하부에 압력계를 설치한 후 가스밸브를 이용하여 각 반응조의 hollow fiber membrane에 공급되는 가스의 양을 조정하였다. 질산화 반응조는 순환펌프로 연결된 순환라인에 DO probe를 설치하여 DO 농도가 1.0 mg/L 이상 유지되도록 가스 압력을 조정하였으며, 탈질반응조에 공급되는 수소는 모든 운전기간 동안에 7 psi로 일정하게 유지하였다.

본 연구에서 사용된 폐수는 실험실에서 제조된 인공폐수를 사용하였으며, 운전기간에 따라 질소농도를 변화시키며 질소제거 특성을 관찰하였다. 실험에 사용된 인공폐수의 질소원으로는 (NH₄)₂SO₄를 사용하였으며, NaHCO₃와 인산염 완충액(K₂HPO₄ + KH₂PO)를 첨가하여 반응조내에서의 질산화, 탈질 반응에 의한 pH 변화를 조정하였고, NaHCO₃는 동시에 독립영양미생물의 무기탄소원으로 이용되었다. 또한 미생물의 성장에 필요한 미량원소로 Mg, Ca, Mn, Co, K, Fe, EDTA 등을 유입수에 첨가하였다. 유입수는 농축된 원수를 수돗물로 희석하여 사용하였으며, 저장조내에서의 미생물 성장에 의한 유입수 농도의 변화를 방지하기 위하여 4°C에서 냉장보관한 상태로 반응조에 유입하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 인공폐수의 제조성상을 나타낸 것이다. 모든 시료의 분석은 Standard Methods(APHA et al, 1998)에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 호기성 MABR에서의 유기물과 질소제거

Fig. 2와 Fig. 3은 운전기간 동안에 R1에서의 NH₄⁺-N, COD의 농도변화와 제거율을 나타낸 것이다. 각 단계(Run 1, Run 2, Run 3)에서의 NH₄⁺-N의 평균 제거율은 각각

Table 1. Experimental conditions

	Phase I							
	Run 1		Run 2		Run 3			
	R1		R1		R1			
Term (day)	0-23		24-60		61-100			
HRT (hr)	8		8		8			
Nitrogen (mg N/L)	50		100		100			
COD (mg/L)	300		250		150			
Gas pressure (psi)	4 ^c		4 ^c		4 ^c			
	Phase II							
	Run 1		Run 2		Run 3		Run 4	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R2	
Term (day)	0-54		55-70		71-149		98-116	
HRT (hr)	6		6		6		6	
Nitrogen (mg N/L)	50		100		150		100	
Loading rate (kg N/m ³ · day) ^a	0.20		0.40		0.60		0.40	
Gas pressure (psi)	4 ^c		5 ^c		6 ^c		7 ^d	
	Phase III							
	Run 1		Run 2		Run 3			
	R1		R1		R1			
Term (day)	0-30		31-63		64-115			
HRT (hr)	8		8		4			
Nitrogen (mg N/L)	150		200		200			
Loading rate (kg N/m ³ · day) ^b	0.45		0.6		1.2			
Gas pressure (psi)	8 ^c /7 ^d		8 ^c /7 ^d		8 ^c /7 ^d			

a) based on single reactor volume
 c) oxygen supply pressure

b) based on full system volume
 d) hydrogen supply pressure

Table 2. Influent nutrient concentrations

Compound	Concentration (mg/L)
MgSO ₄	9.50
CaCl ₂ · 2H ₂ O	1.20
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	12.46
Na ₂ Mo · 2H ₂ O	1.29
MnSO ₄ · 4H ₂ O	10.06
CuCl ₂ · 2H ₂ O	2.61
CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.30
KCl	1.00
FeSO ₄ · 7H ₂ O	7.32
EDTA	9.75

95.1±3.5%, 95.6±4.1%, 97.0±1.7%였으며, 유출수의 NH₄⁺-N 평균농도는 2.5±1.8 mgN/L, 4.5±4.2 mgN/L, 3.1±1.7 mgN/L로 나타났다. 또한 운전기간 동안 COD의 평균 제거율은 82.1±3.3%, 85.5±4.3%, 81±6.5%였으며, 유출수의 평균 COD농도는 55.4±10.6 mg/L, 36.8±10.9 mg/L, 25.2±7.5 mg/L로 나타났다.

일반적으로 유기물을 전자공여체로 이용하는 종속영양 미생물이 질산화 미생물에 비하여 5배의 최대 성장속도와 2~3배에 이르는 수율을 가지고 있기 때문에(Grady et al., 1980), 질산화 미생물은 생물막에서 산소공급에 저해를 받을 수 있으며, 또한 생물막에서 서식할 수 있는 공간적인 제한을 받게 된다(Zhu et al., 2001). 이러한 제한인자로 인하여 일반적인 생물막 공법에서는 질산화 미생물을 안정적으로 확보하기가 어려우며, 따라서 고효율의 질소제거 시스템을 구성하기가 어렵다. 하지만 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 MABR에서는 유입수내에 포함된 유기물에

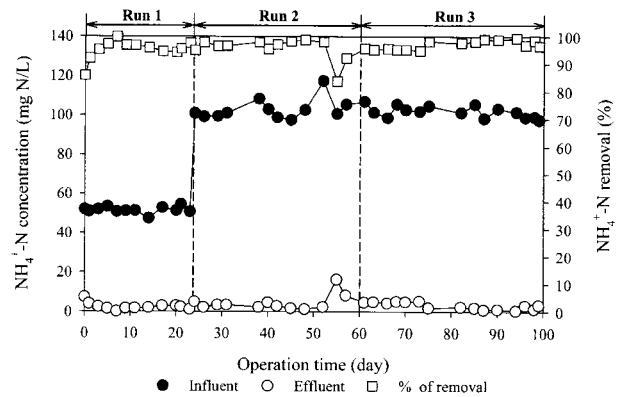


Fig. 2. Influent and effluent concentrations of NH₄⁺-N and the percentage of NH₄⁺-N removal in the aerobic MABR (R1).

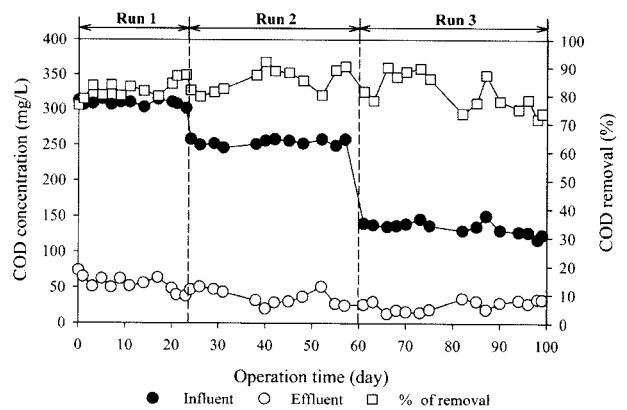


Fig. 3. Influent and effluent concentrations of COD and the percentage of COD removal in the aerobic MABR (R1).

영향을 받지 않고 운전기간 동안 안정적인 질산화 현상을 유지한 것으로 나타났으며, 유입수내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도 증가에도 질산화 현상은 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.

3.2. 호기성 MABR에서의 질산화 성능

Fig. 4는 유기물의 첨가하지 않은 상태로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 만을 질소원으로 첨가한 인공폐수를 제조하여 R1에 유입시킨 결과이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 유입수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 100 mgN/L에서 150 mgN/L로 증가한 71일 이후에 일시적으로 유출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 12 mgN/L까지 증가하였지만, 대부분의 운전기간 동안 유출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 3 mgN/L 이하로 나타났다. 유출수에서의 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 농도는 이 기간동안 대부분 검출되지 않았으며, 99% 이상의 안정적인 질산화 반응을 유지하였다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 의 농도는 유입수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도에 비하여 낮은 농도로 측정되었고, 이것은 미생물의 합성에 의한 질소 소모와 미생물의 내생호흡에 의한 탈질 현상이 발생하였기 때문으로 판단된다.

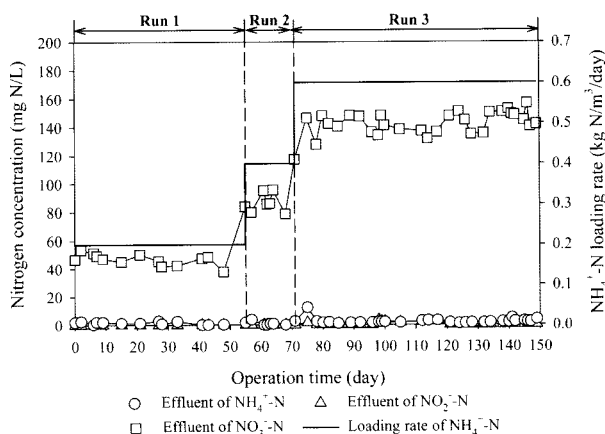


Fig. 4. Effluent concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^+\text{-N}$ and the loading rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the aerobic MABR (R1).

3.3. 혐기성 MABR에서의 독립영양탈질 성능

Fig. 5는 Phase II의 운전결과로서 혐기성 MABR에서의 수소를 전자공여체로 이용한 독립영양 탈질 반응에 대한 결과를 나타낸 것이다. 유입수의 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 농도는 30, 50, 100, 150 mgN/L까지 단계적으로 증가시켰으며, HRT는 6 시간으로 일정하게 유지하였다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 운전초기 약 60일까지와 유입수의 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 의 농도가 100 mgN/L에서 150 mgN/L로 증가한 Run 4의 초기기간을 제외하고는 안정적인 독립영양탈질 반응을 유지한 것으로 나타났다. Run 4에서 117일부터 132일까지는 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 의 유입부하율이 증가함에 따라 일시적으로 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 이 축적된 것으로 판단되며, 운전초기 0일부터 60일까지는 유입수에 인산염 완충액을 포함시키지 않았기 때문에 탈질소 반응에서 생성된 OH^- 에 의한 pH 상승이 탈질 반응에 저해작용을 일으킨 것으로 판단된다. 이때의 유출수의 pH는 8.3까지 상

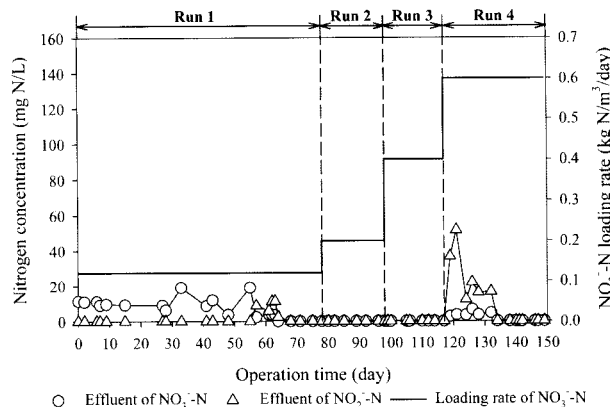


Fig. 5. Effluent concentrations of $\text{NO}_2^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ and loading rate of $\text{NO}_3^+\text{-N}$ in the anaerobic MABR (R2).

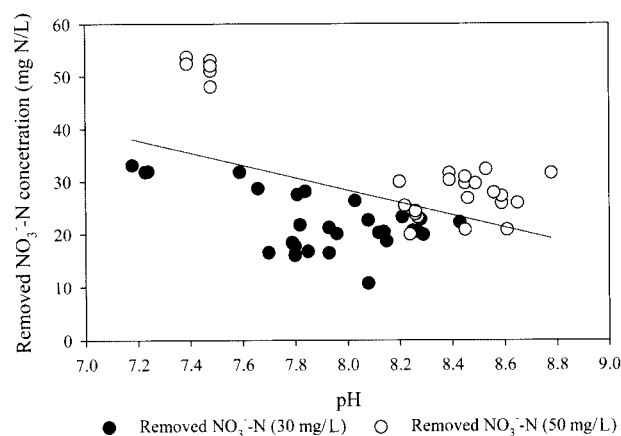


Fig. 6. Variation of $\text{NO}_3^+\text{-N}$ concentrations versus pH of effluent in the anaerobic MABR (R2).

승하였으며 독립영양미생물에 의한 탈질이 평균 66%로 나타났다. 그러나, 유입수내에 인산염 완충액을 첨가한 이후부터는 유출수의 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 농도가 점차 감소하였으며, 수소를 전자공여체로 이용한 독립영양탈질 반응이 안정적으로 유지되면서 99% 이상의 질소 제거율을 나타내었다.

Fig. 6은 pH 변화에 따른 수소를 이용한 독립영양탈질의 효율변화를 알아보기 위한 것으로 유입수의 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 농도가 30 mgN/L, 50 mgN/L일 때 pH 변화에 따른 유출수의 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 유출수의 pH가 7.6 이하인 경우에는 탈질 반응이 안정적으로 유지되었지만, pH가 7.8 이상으로 유지된 경우에는 탈질 반응이 감소하기 시작한 것으로 나타났다. 수소를 이용한 독립영양탈질 반응에서는 2몰의 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 이 제거됨에 따라 2몰의 OH^- 가 생성된다. Lee 등(2003)은 수소를 이용한 독립영양탈질 반응에서 pH 증가에 따른 탈질반응의 억제 작용을 방지하기 위하여 pH 완충시스템이 필요하며, pH 완충을 위해 인산염 완충액을 사용했을 경우 침전물 생성에 의한 효율저하가 발생할 수 있다고 보고하였다. 하지만 본 연구에서 사용한 반응기의 구조상 외부유입 방식의 pH 조정장치를 설치하기 어려워 연속실험시 pH 조절을 위하여 인산염 완충액을 사용하였으며, 침전물 발생에 의한 탈

질 감소현상은 나타나지 않았다. MBAR 공정의 특성상 membrane에 공급되어지는 가스의 종류에 따라 질산화 미생물과 탈질 미생물을 분리하여 확보할 수 있기 때문에 단일반응조를 이용한 질소제거 처리시스템을 구성할 경우에 질산화에서의 알칼리 소모와 탈질에서의 알칼리 생성에 의한 완충작용을 이용하여 pH 조절에 필요한 완충액의 투여량을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이러한 경우 단일반응조 내에서 산소와 수소의 누출에 따른 폭발 위험성등과 같은 부가적인 고려사항에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.4. 조합된 MABR system에서의 총질소 제거 성능

본 연구의 3단계에서는 1, 2단계에서 별도로 운전되던 호기성 MABR와 혐기성 MABR를 연계하여 조합한 MABR 시스템에서의 NH₄⁺-N의 부하율 변화에 따른 총질소 제거효율을 알아보았다. 각 반응조에서의 HRT는 동일하게 유지하면서 전체 처리시스템에서의 HRT는 8시간에서 4시간까지 변화시켰으며 유입수의 NH₄⁺-N 농도는 150 mgN/L에서 200 mgN/L까지 증가시켜 운전하였다. Fig. 7은 R1에서의 NH₄⁺-N 유입부하율과 NH₄⁺-N의 유출수농도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 운전기간 중 63일 이후 Run 3에서 부하율 증가에 따른 일시적인 유출수내의 NH₄⁺-N의 증가현상이 나타났지만, 점차 안정화되어 73일에는 약 99%의 제거율을 회복하였다. 이 기간을 제외한 각 단계(Run 1, Run 2, Run 3)에서 나타난 NH₄⁺-N의 평균 제거율은 98.9±1.0%, 98.7±0.8%, 98.8±0.5%였으며, R1의 유출수에서 측정된 평균 NH₄⁺-N 농도는 1.6±1.4 mgN/L, 2.4±1.6 mgN/L, 2.4±1.0 mgN/L로 나타나 NH₄⁺-N의 부하율의 증가에 영향을 받지 않고 안정적인 질산화 반응을 유지한 것으로 나타났다. R1에서의 NH₄⁺-N의 평균 막표면적당 비제거율은 0.30±0.01 gN/m²·d, 0.41±0.01 gN/m²·d, 0.80±0.02 gN/m²·d로 나타났으며, 단위부피당 최대 비제거율은 2.47 kgN/m³·d로 나타났다. 본 연구에서 나타난 질산화 효율은 MABR을 이용한 다른 연구에 비하여 단위부피당 NH₄⁺-N 제거율은 높게 나타났으나(Brindle et al., 1996; Brindl et al., 1998), 멤브레인 표면적당 NH₄⁺-N 제거율은 다른 연구에 비하여 낮은 것으로 나타났다(Brindl et al., 1998). 이것은 본 연구에서 사용된 반응조 내의 membrane의 수량이 많기 때문에 멤브레인 표면적은 상당히 큰 반면에 멤브레인간의 간격이 너무 밀집되어 있어 유입수의 반응조 내에서의 접촉효율이 떨어졌기 때문으로 판단된다.

Fig. 8는 R1에서 질산화 반응에 의하여 생성된 NO₃⁻-N가 R2에서 독립영양 탈질 반응에 의하여 제거된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 Run 1의 초기기간동안에 NO₂⁻-N가 일시적으로 축적되는 현상이 발생하였으나, 7일 이후부터는 안정적인 탈질 반응을 유지하였다. 이 기간을 제외한 R2에서의 평균 질소제거율은 Run 1, Run 2, Run 3에서 각각 100±0.0%, 99.2±0.8%, 98.7±1.7%를 나타내었으며, R2의 유출수에서 측정된 NO₃⁻-N의 평균

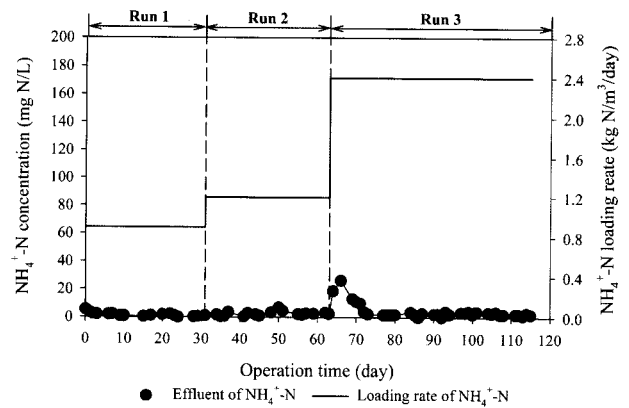


Fig. 7. Effluent concentration of NH₄⁺-N and loading rate of NH₄⁺-N in the aerobic MABR (R1).

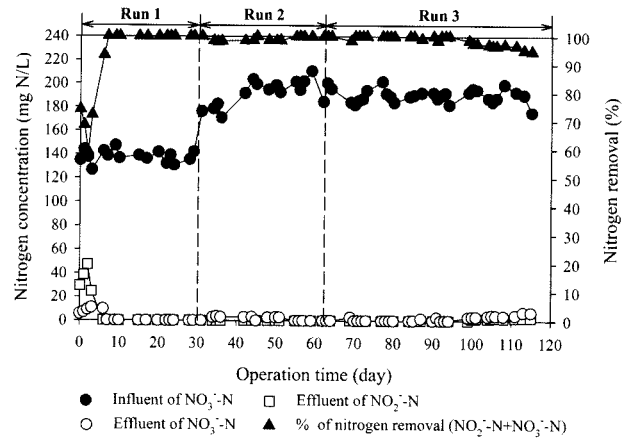


Fig. 8. Variation of NO₂⁻-N and NO₃⁻-N concentrations and percentage of nitrogen removal in the anaerobic MABR (R2).

농도는 0.0±0.0 mgN/L, 1.5±1.5 mgN/L, 1.8±2.2 mgN/L로 나타나 NO₃⁻-N의 부하량 증가에 크게 받지 않은 것으로 나타났다. R2에서의 평균 막표면적당 비탈질율은 각각 0.28±0.01 gN/m²·d, 0.39±0.02 gN/m²·d, 0.76±0.03 gN/m²·d로 나타났으며, 단위 부피당 최대 비탈질율은 2.42 kgN/m³·d로 나타났다. 본 연구에서 나타난 탈질율은 Dries 등(1988)과 Chang 등(1999)이 수행한 고정상 생물막 반응기를 이용한 독립수소자화탈질 연구에서 보고된 탈질율에 비하여 높은 효율을 나타냈으며, 이와 같이 산기식 수소공급에 비하여 MABR에서는 안정적인 고효율의 탈질 효율을 얻을 수 있었다. 본 처리시스템에서 나타난 총질소 제거율은 각 운전단계에서 모두 98%이상의 제거율을 나타냈으며, 반응기 부피당 최대 제거율은 1.22 kgN/m³·d로 나타났다. 본 연구에서 나타난 것처럼 질소제거를 위하여 MABR을 이용하는 경우에는 고효율의 처리시스템 구성이 가능하지만, MABR 공정에서의 질소제거율은 반응기내에 hollow-fiber의 밀도에 따라 달라질 수 있기 때문에 실제 적용을 위해서는 경제성 및 운전관리의 용이성 등을 고려한 반응기내의 적정 막밀도에 대한 연구가 필수적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 hollow fiber membrane를 이용하여 질산화 반응조와 독립영양 탈질 반응조로 조합된 MABR system에서의 총질소 제거효율을 알아보았다. 결과에서 나타난 바와 같이 장시간의 운전기간 동안 질소부하율의 증가에 영향을 받지 않고 양호한 질산화 반응을 유지하였으며, 외부탄소원의 공급없이 수소를 전자공여체로 사용하여 효과적인 탈질반응을 유지할 수 있음을 확인하였다.

- 1) 호기성 MABR에서 유입수내의 유기물 함유시 질산화가 저해를 받지 않고 단일 반응조내에서 유기물과 질산화가 원활히 유지되었다.
- 2) 호기성 MABR과 혐기성 MABR에서 각각 99% 이상의 질산화와 탈질화 반응을 유지하였으며, 질산화 미생물과 독립영양 탈질미생물을 안정적으로 확보할 수 있었다.
- 3) 혐기성 MABR에서는 독립영양탈질에 필요한 전자공여체를 효과적으로 미생물에게 공급할 수 있기 때문에 기존의 산기형태의 수소공급방식에 비하여 높은 탈질율을 얻을 수 있었으며, 혐기성 MABR에서는 안정적인 탈질 반응을 유지하기 위하여 pH의 조정이 중요한 인자인 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에서 나타난 MABR에서의 총 질소 제거율은 각 운전단계에서 모두 98% 이상을 유지하였으며, 반응기 부피당 최대 제거율은 1.22 kgN/m³·d로 나타났다.

사 사

본 연구는 2005년도 한국과학기술연구원 기관고유과제 및 과학재단의 특정기초연구사업의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

American Public Health Association(APHA), American Water Works Association and Water Environment Federation, Standard Methods for the Examination of Water and

- Wastewater, 20th ed., Washington D.C., USA. (1998).
- Brindle, K. and Stephenson, T., Nitrification in a Bubbleless Oxygen Mass Transfer Membrane Bioreactor, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(9), pp. 261-267 (1996).
- Brindle, K., Stephenson, T. and Semmens, M. J., Nitrification and Oxygen Utilisation in a Membrane Aeration Bioreactor, *Journal of Membrane Science*, **144**, pp. 197-209 (1998).
- Chang, C. C., Tseng, S. K. and Huang, H. K., Hydrogenotrophic Denitrification with Immobilized *Alcaligenes eutrophus* for Drinking Water Treatment, *Bioresource Technology*, **69**, pp. 53-58 (1999).
- Dries, D., Liessens, J., Verstrate, W., Stevens, P., de Vos, P. and Ley, J., Nitrate Removal from Drinking Water by Means of Hydrogenotrophic Denitrifiers in a Polyurethane Carrier Reactor, *Water Supply*, **6**, pp. 181-192 (1988).
- Grady, C. P. L. and Lim, H. C., *Biological Wastewater Treatment*, Marcel Dekker Inc. New York (1980).
- Ho, C. M., Tseng, S. K. and Chang, Y. J., Autotrophic Denitrification via a Novel Membrane-attached Biofilm Reactor, *Letters in Applied Microbiology*, **33**, pp. 201-205 (2001).
- Lee, K. C. and Rittmann, B. E., Applying a Novel Autohydrogenotrophic Hollow-fiber Membrane Biofilm Reactor for Denitrification of Drinking Water, *Water Res.*, **36**, pp. 2040-2052 (2002).
- Lee, K. C. and Rittmann, B. E., Effects of pH and Precipitation on Autohydrogenotrophic Denitrification using the Hollow-fiber Membrane-biofilm Reactor, *Water Res.*, **37**, pp. 1551-1556 (2003).
- Pankhania, M., Stephenson, T. and Semmens, M., Hollow Fibre Bioreactor for Wastewater Treatment using Bubbleless Membrane Aeration, *Water Res.*, **28**, pp. 2233-2236 (1994).
- Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., *Environmental Biotechnology*, McGraw-Hill, pp. 501-502 (2001).
- Yamagiwa, K., Abe, M., Shibai, M., Yoshida, M., Ohkawa, A. and Furusawa, M., Nitrification Performance of Membrane-Attached Nitrifying Biofilm, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **37**(11), pp. 1423-1426 (2004).
- Zhu, S. and Chen, S., Effects of Organic Carbon on Nitrification Rate in Fixed Film Biofilters, *Aquacult. Eng.*, **25**, pp. 1-11 (2001).