

Membrane-BNR 공정의 유동상 담체 호기조내 SND 평가

이정열 · 민경석[†]

경북대학교 환경공학과

SND in Fluidized Media Aerobic Tank of Membrane-BNR Process

Jung-Yeol Lee · Kyung-Sok Min[†]

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University
(Received 29 October 2008, Revised 10 March 2009, Accepted 10 March 2009)

Abstract

The advantage of simultaneous nitrification and denitrification (SND) is to reduce requirement of oxygen as well as tank volume. The fluidized media was used in the oxic (aerobic) tank of Membrane-BNR to enhance the efficiency of SND. Nowadays, the interest of applying membrane to the wastewater treatment plant has been increased, which is proved by a lot of research published about the MBR. The Membrane-BNR, consisted of total 5 reactors might be called the compact process by using the fluidized media and having short HRT of 6.5 hr. It could attain the further removal of not only the organics but also nutrients such as T-N and T-P. The mode A and B were identified with or without the step feed of influent. The mode A was classified with 3 modes according to the different DO concentration in the fluidized media aerobic reactor, and the mode B with step feed was operated with the optimum DO condition. The step-feed was capable of improving TN removal efficiency under the domestic wastewater with the low ratio C/N. On the other hand, the efficiency of SND with the 1.0~1.5 mg/L DO in the oxic media tank was better than the one with below 1.0 mg/L, on which the nitrification did not happen enough, and with above 3.5 mg/L, on which the reduction of anoxic area in the tank happened. It means that the profitable nitrification should be performed prior to the denitrification step. The removal efficiency of nitrogen by SND was about 20% among of total denitrified nitrogen. And some organic carbon consumed could be reduced by the endogeneous denitrification.

keywords : DO, Fluidized media, Membrane-BNR, Simultaneous nitrification and denitrification (SND), Step-feed

1. 서론

Metcalf & Eddy 등(2004)은 동시 질산화/탈질(Simultaneous Nitrification and Denitrification, SND)이란 단일 호기성 반응조에서 일어나는 질소제거 현상이라고 정의하였다. 또한 Masuda 등(1991)은 실험을 통해 실제 호기조안에서 SND가 일어나는 것을 관찰하였다.

일반적으로 생물학적 질소제거반응을 위해 질산화를 위한 호기조와 탈질을 위한 무산소조를 따로 구분하여 설계하나, Munch 등(1996)은 한 반응조안에서 질소가 제거되는 동시 질산화/탈질의 원리를 적용할 경우, 반응조 부피와 소요되는 산소 공급량을 줄일 수 있는 장점이 있다고 보고하였다.

Pochana와 Keller(1999)는 SND현상을 물리적인 원인과 생물학적인 원인으로 나누어 설명할 수 있다고 보고하였는데, 특히 DO농도와 플록크기 등 물리적인 원인이 SND에 미치는 영향에 관해 연구하였다. 또한 Puznava 등(2001)은 호기조 내 DO농도 구배에 따른 무산소 영역의 발생을 언급하였고, Kugleman과 Spector(1988)는 미생물 플록 내 DO

농도 구배에 따른 무산소 영역의 형성 등으로 인해 탈질이 발생한다고 보고하였다.

반면, 생물학적인 관점에서 Kugleman 등(1991)은 탈질 효소가 비활성화 되기까지는 시간이 걸리므로 높은 DO가 운데서도 어느 정도 탈질이 일어난다고 하였다.

현재까지 DO농도와 관련된 물리적인 원인에 대한 SND 실험들은 주로 긴 수리학적 체류시간을 가지는 산화구, 소규모 하수 처리에 적합한 SBR반응조(Pochana and Keller, 1999), 고정상 담체를 이용한 연구들이 대부분이었다(Halling and Hjuler, 1992; Masuda et al., 1991).

한편 최근에 하수처리수를 재이용하기 위해 막을 도입하는 연구가 활발하다. MBR은 안정적인 유출수 수질을 확보하고, 동일한 부지에서 시설 개선이 용이하다. 또한, 초기 가동 및 적응 시간이 짧고, 운전을 자동화 할 수 있는 잇점이 있다. 대용량 적용시 에너지 소요가 큰 문제, 막 오염, 막 세정과 교환 방법, 막 수명, 전처리 및 운전비용 등의 문제를 해결하기 위한 연구가 많이 행해지고 있다(Yang et al., 2006).

정용철 등(2008)은 Membrane-BNR공정의 호기조에 고정상 담체를 적용하여 유출수의 수질 및 SND효율에 대한 연구를 하였다. 실험결과, 유기물을 대상으로 환경부(2006)에서 제안하는 고도환경용수 중 습지용수 및 지하수 충전수

[†] To whom correspondence should be addressed.
ksmin@knu.ac.kr

수준을 달성할 수 있었고, 전체 질소제거량 대비 약 40%의 질소가 SND에 의해 제거된 것으로 보고하였다. 반면, 운전 중 낮은 DO농도하에서 고정상 담체의 공극 폐색현상이 발생하였다.

따라서, 본 연구에서는 호기조내 유동상 담체를 사용하여 SND효율을 비교하고, 호기조내 DO농도를 조절함으로써 DO농도가 SND효율에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한, 국내 하수처리장 유입하수의 낮은 C/N비하에서도 안정된 처리수 수질을 확보하기 위해 Membrane-BNR 공정에서 유입수 분배주입에 따른 영향을 연구하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험장치 및 운전조건

Fig. 1에 본 실험 장치를 나타내었는데, 무산소조로의 유입수 분배 여부에 따라 모드 A와 B로 나누었다. 유입수량은 48 L/d이며, 특히, 모드 B에서는 혐기조와 무산소조로 6 : 4 비율로 유입수를 분배 주입하였다.

혐기조/무산소조/호기조 1/담체 호기조/호기막조/용존산소저감조 순으로 반응조를 집적화하였고 각각의 HRT 및 아크릴 반응조 용적은 혐기조 1 hr (2 L), 무산소조 1 hr (2 L), 호기조 1 hr (2 L), 담체 호기조 2 hr (4 L), 호기막조 1 hr (2 L) 및 용존산소저감조 0.5 hr (1 L)로, 총 6.5 hr이었다.

모드 A에서 유동상 담체 호기조내 DO농도를 0.1~0.5, 0.5~1.0 및 3.5~4.0 mg/L로 조절하여 DO농도가 SND에 미치는 영향을 조사하였다. DO농도는 질산화와 내생탈질에 동시에 영향을 주게 되는데, 반응조내 약 1 mg/L 내외가 타당한 것으로 조사되어 모드 B에서는 1.0~1.5 mg/L로 고정하였다.

내부반송은 모드 A와 B에서 유입수량대비 180% 및 215%로 호기막조에서 무산소조로 실시하였다. 슬러지 반송은 혐기조로 유입되는 NO₃-N와 DO농도에 의한 영향을 줄이기 위해 용존산소저감조에서 혐기조로 모드 A와 B에서 각각 140~210% 및 120%로 운전하였다.

SND을 유도하기 위해 담체 호기조에 유동상 담체를 반응조 부피비 15%로 투입하였는데, 한 번의 길이가 15 mm인 정육면체 모양이며, 에테르계 폴리올을 주원료로 제작하였고, 공극율은 95.1%, 겉보기 밀도는 0.041 g/cm³이었다. 또한, 담체 표면을 친수첨가제로 코팅함으로써, 담체 투입

초기에 침지시간을 줄일 수 있었다.

DO농도에 따른 SND효율을 관측하기 위해 저농도의 산소에 대해서도 유동이 가능하도록 교반기를 설치하였다. 호기막조에 중공사막인 MF를 침지시키고, 후단부 용존산소저감조에는 수위센서를 설치하여 막을 간헐운전하였다.

또한, 막 오염을 줄이기 위해, 막 모듈을 호기막조내에서 유동하도록 고정시키고, 아래쪽 바닥에서 지름 10 mm 정도의 산기관을 통해 큰 공기방울을 공급함으로써, DO를 최소화시키는 동시에 큰 난류를 발생시켰다.

혐기조, 무산소조, 호기조 1 및 담체 호기조내 MLSS 및 MLVSS 농도는 각각 8,000~9,000 mg/L 및 6,100~7,600 mg/L로 유지하였고, 호기막조와 후단 용존산소저감조의 경우는 각각 10,000~12,000 mg/L 및 8,200~9,200 mg/L로 유지하였다.

단위면적 및 시간당 투과하는 유출수량(Flux)은 20 LMH (L/m² · hr)로 설정하였고, SRT는 30~35 일로 조정하였다. 운전 온도는 항온실에서 약 20~22°C를 유지하였다. pH는 7.2~7.6로 안정적이었다. 분석은 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하였다.

운전평가를 위한 수질분석은 안정적인 상태(steady state)를 유지한다고 판단된 후, 30일 동안, 주당 1~3회 간격으로 수행하였으며, 수질은 평균값을 사용하였다.

2.2. 유입수 성상

유입하수는 대구시 B하수처리장의 1차 처리수를 사용하였는데, Table 1에 유입수의 성상을 나타내었다. 모드 B의 낮은 C/N비하에서 step-feed에 대한 영향을 조사하기 위해 글루코스과 염화암모늄을 모드에 따라 첨가하여 조정하였다. SS농도는 80~100 mg/L정도로 다소 높았고, 알칼리도의 경우, 충분한 질산화를 유도할 만큼 유입하수에 존재하고 있어 따로 약품을 주입하지 않았다. TKN은 45~50 mg/L, 암모니아성 질소는 19~29 mg/L이었고, 총 인은 3.7~5.3 mg/L로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

유기물, 질소 및 인의 제거율 및 유출수 수질을 Table 2에 나타내었다. 모드 A-1, A-2 및 A-3의 질소제거율이 각

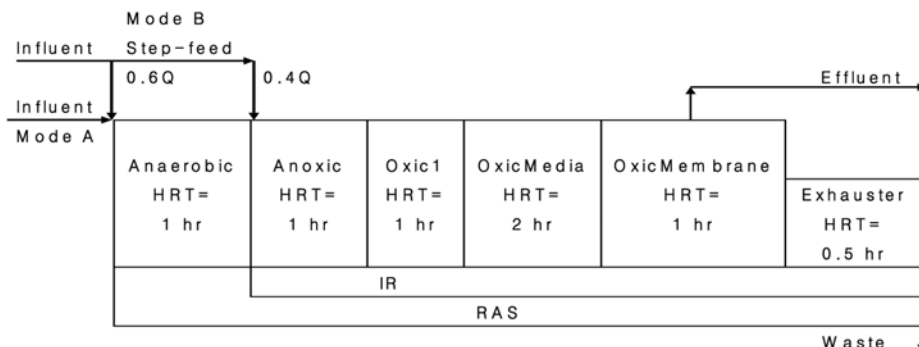


Fig. 1. Schematic diagrams of laboratory set up of mode A and B.

Table 1. Characteristics of influent

Item/Mode		Unit	Mode A Mode A-1,2,3	Mode B
CODcr	Total	mg/L	297	214
	Soluble		180	132
N	TKN		45	50
	NH ₄ ⁺ -N		19.7	28.8
	NO ₃ ⁻ -N		0.5	0.29
P	Total		3.7	5.3
	Soluble		3.6	4.8
SS			98	84
Alakalinity			198	234
Temperature			°C	21.4
pH		-	7.6	7.2
C/N (TCOD/TKN)		-	6.6	4.3

각 82%, 83% 및 79%로 비슷하여 구분 없이 전체 운전기간을 대상으로 유입수 분배주입에 따른 모드 A와 모드 B로 구분하여 제거율을 비교하였다.

3.1. 질소 제거

TN제거율은 모드 A와 B에서 각각 81.3%와 78%로, 암모니아성 질소의 제거율은 97.5% 및 97.7%로 비슷한 결과를 나타내었다. 특히, 모드 B의 경우, C/N비 4.3이하의 낮은 유입수 성장에도 높은 질소 제거율을 나타내었다. 유출수의 암모니아성 질소는 0.5 mg/L정도로 아주 낮았는데, 이는 30~35 일의 긴 SRT와 유동상 담체에 의한 높은 MLSS 유지에 의해 질산화 미생물이 충분히 활동하였기 때문이다.

Table 3과 4에는 반응조별 비질산화속도와 비탈질속도를 나타내었다. 모드 A의 호기조 1, 담체 호기조 및 호기막조의 NH₄⁺-N의 농도 및 질산화량은 각각 3.57 mg/L (0.78 g/d), 2.47 mg/L (0.26 g/d) 및 0.49 mg/L (0.47 g/d)이고, MLVSS 농도는 각각 6,733, 6,683 및 8,267 mg/L, 반응조의 유효용량은 각각 2, 4 및 2 L이었다. 모드 B의 호기조 1, 담체 호기조 및 호기막조의 NH₄⁺-N의 농도 및 질산화량은 각각 3.80 mg/L (0.63 g/d), 2.20 mg/L (0.33 g/d) 및

Table 2. Effluent quality and removal efficiencies at each mode

	mg/L	TCODcr		SCODcr		NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N		TN		TP		SP	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Effluent	mg/L	27.0	6.36	27.0	6.36	0.49	0.65	6.59	9.07	8.50	11.0	0.06	0.04	0.06	0.04
Rem.	%	90.9	97.0	85.0	95.2	97.5	97.7	-	-	81.3	78.0	98.3	99.2	98.2	99.1

Table 3. SNR at each mode

	Mode A			Mode B		
	Ox1	OxMed.	OxMem.	Ox1	OxMed.	OxMem.
SNR (mg NH ₄ ⁺ -N/g Mv/d)	57.8	9.7	28.4	39.9	11.0	18.8
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	3.57	2.47	0.49	3.80	2.20	0.65
MLVSS (mg/L)	6,733	6,683	8,267	7,900	7,600	8,600
HRT (hr)	1	2	1	1	2	1

Note : OxMed: fluidized media aerobic reactor
OxMem.: membrane reactor

Table 4. SDNR at each mode

	Mode A		Mode B	
	Ax	OxMed.	Ax	OxMed.
SDNR (mg NO ₃ ⁻ -N/g Mv/d)	12.0	6.51	77.2	9.86
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	1.79	3.73	1.28	4.65
MLVSS (mg/L)	6,567	6,683	8,100	7,600
HRT (hr)	1	2	1	2

0.65 mg/L (0.32 g/d)이고, MLVSS 농도는 각각 7,900, 7,600 및 8,600 mg/L로 나타났다.

Fig. 2에는 호기조 1과 담체 호기조의 비질산화속도 및 영향 인자들을 나타내었다. 모드 A와 B공정의 호기조 1에서 SNR은 각각 57.8과 39.9 mgNH₄⁺-N/gMLVSS · d로 나타났는데, 박종복과 최의소(2003)가 유입수 분배에 따른 단단으로 구성된 하수고도처리시스템을 대상으로 실험한 결과인 40.8~81.6 mgNH₄⁺-N/gMLVSS · d와 비슷한 양상을 보였다. 반면, 제한된 DO농도와 담체에 의한 무산소 영역이 발생한 유동상 담체 호기조에서는 SNR이 모드 A와 B에서 각각 9.7과 11.0 mgNH₄⁺-N/gMLVSS · d로 나타나 상대적으로 낮은 질산화속도를 보였다.

비탈질속도를 구했는데, 모드 A의 무산소조 및 담체 호기조의 NO₃⁻-N 농도 및 탈질량은 각각 1.79 mg/L (0.16 g/d) 및 3.73 mg/L (0.17 g/d)이고, 무산소조의 MLVSS 농도와 유효용량은 각각 6,567 mg/L 및 2 L이었다. 또한, 모드 B의 무산소조 및 담체 호기조의 NO₃⁻-N 농도 및 탈질량은 각각 1.28 mg/L (1.25 g/d) 및 4.65 mg/L (0.3 g/d)이고, 무산소조의 MLVSS 농도와 유효용량은 각각 8,100 mg/L 및 2 L이었다.

비탈질속도는 무산소조, 유동상 담체 호기조순으로 높았다. 하수를 대상으로 무산소조에서 SDNR은 기존문헌에서 60 mgNO₃⁻-N/gMLVSS · d로 나타난 반면(Barker and Dold, 1996; Bortone, et al., 1994), 본 실험에서 구한 모드 A와 B에서 각각 12 및 77.2 mgNO₃⁻-N/gMLVSS · d로 나타났다. 특히, 모드 B의 값이 크게 나타났는데 이는 유입수의 분배 주입에 의해 탈질속도가 크게 증가하였기 때문이다.

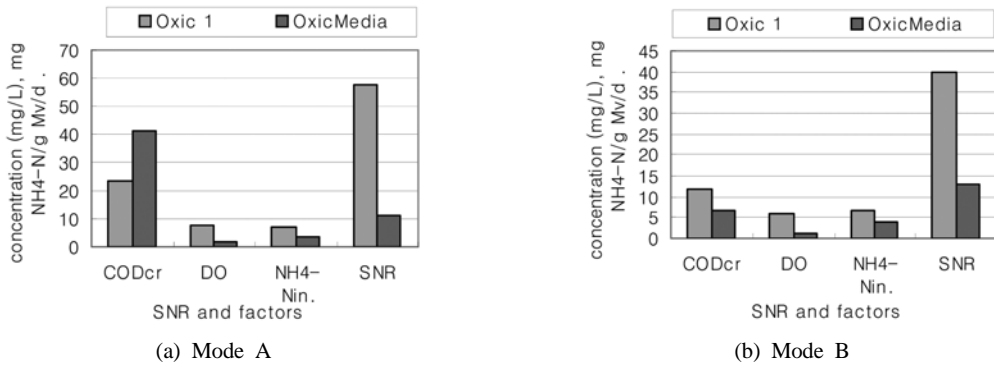


Fig. 2. SNR and factors in Oxidic 1 and OxidicMed.

또한, 모드 A 및 모드 B의 담체 호기조내 비탈질속도는 각각 6.51 및 9.86 mgNO₃⁻-N/gMLVSS · d으로 나타났다.

호기조 1과 비교해서 담체 호기조의 비질산화속도는 모드 A와 B에서 각각 6배 및 4배 정도로 낮았고, 무산소조 대비, 담체 호기조의 비탈질속도는 각각 2배 및 8배 정도 낮게 나타났다. 또한, 모드 B의 무산소조내 비탈질속도는 유입수 분배주입을 실시하지 않은 모드 A보다 약 6배 이상 높게 나타나 탈질에 효과적으로 유기물을 이용한 것으로 판단된다.

3.2. 담체 호기조내 질소물질수지

Fig. 3에는 용존산소농도에 따라 구분한 모드 A-1, A-2, A-3 및 모드 B의 유동상 담체 호기조내 질소물질수지를 나타내었다.

모드 A 및 B의 유입수 SCODcr 농도가 각각 180 및 132 mg/L이고, 호기조 1에서의 SCODcr 농도가 각각 23 및 18

mg/L로 나타나, 유기물의 대부분이 전단의 혐기조와 무산소조 및 호기조 1에서 소비되었다. 따라서, 담체 호기조내 탈질량은 주로 미생물의 자산화에 의해 발생하는 바이오매스를 전자공여체로 사용하는 내생탈질로 간주하였다.

질소물질수지는 담체 호기조로 유입되는 NH₄⁺-N 및 NO₃⁻-N 부하량과 담체 호기조에서 유출되는 NH₄⁺-N 및 NO₃⁻-N 부하량의 차이에 의한 내생탈질량을 합산하여 작성하였다. 고행성분내 질소의 가용화, 용존성 유기성 질소 농도, 질산화미생물의 성장에 따른 암모니아성 질소의 소비량 및 내생호흡에 의한 암모니아성 질소의 생산량 등은 무시하였다.

모드 A-1의 유출수내 NH₄⁺-N 및 NO₃⁻-N 부하량은 각각 0.56 g/d 및 0.46 g/d이고, 내생탈질량은 0.01 g/d이었다. 반면, 담체 호기조로 유입되는 질소 부하량은 1.02 g/d이었다.

모드 A-2의 유출수내 NH₄⁺-N 및 NO₃⁻-N 부하량은 각각 0.67 g/d 및 0.33 g/d이고, 내생탈질량은 0.08 g/d이었다. 반

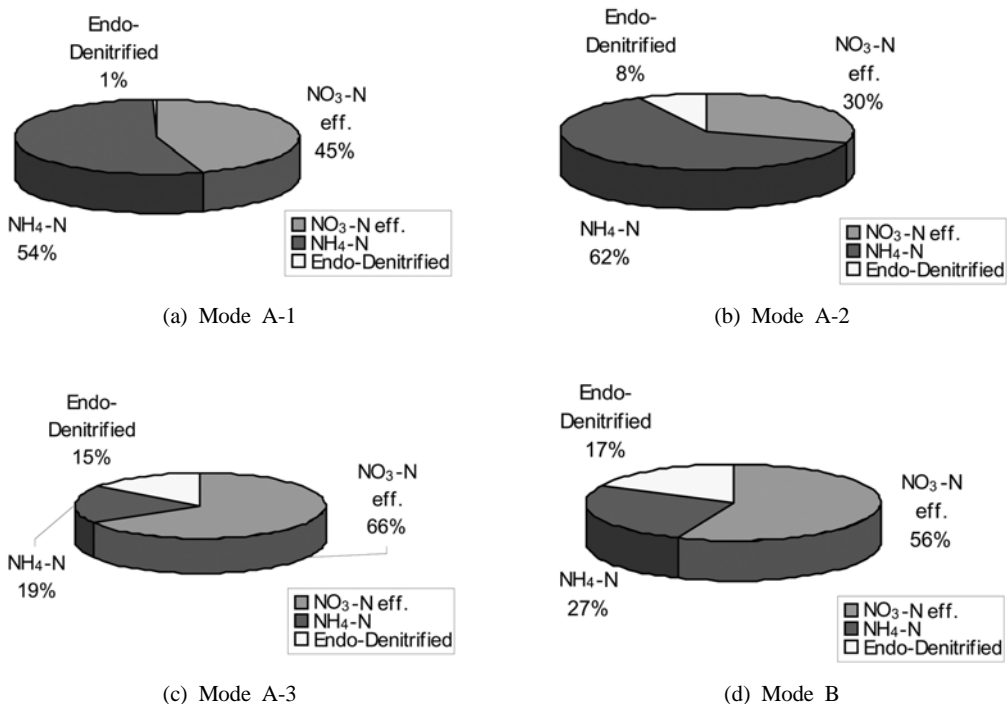


Fig. 3. Nitrogen mass balance in fluidized media aerobic reactor.

면, 담체 호기조로 유입되는 질소 부하량은 1.08 g/d이었다.

모드 A-3의 유출수내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 부하량은 각각 0.44 g/d 및 1.58 g/d이고, 내생탈질량은 0.36 g/d이었다. 반면, 담체 호기조로 유입되는 질소 부하량은 2.39 g/d이었다.

모드 B의 유출수내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 부하량은 각각 0.46 g/d 및 0.97 g/d이고, 내생탈질량은 0.30 g/d이었다. 반면, 담체 호기조로 유입되는 질소 부하량은 1.73 g/d이었다.

유동상 담체 호기조내 용존산소농도가 낮았던 모드 A-1 및 A-2 보다 상대적으로 용존산소농도가 높았던 모드 A-3 및 모드 B에서 탈질량이 증가하였다. 유입질소 부하량 대비, 내생탈질량비도 각각 0.01, 0.07, 0.15 및 0.17으로 나타나, 담체 호기조내 용존산소가 1.0 mg/L 이상일 때, 내생탈질량도 증가하는 것으로 나타났다.

3.3. 담체 호기조내 DO농도에 따른 SND효율

모드 A-1, A-2 및 A-3 와 모드 B 의 유동상 담체 호기조내 산소농도가 SND에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 5에 나타난 것처럼 용존산소농도가 질산화에 미치는 영향이 분명하게 나타났는데, 용존산소가 충분히 공급된 모드 A-3의 질산화율이 55%까지 이른 반면, 용존산소농도가 1.0 mg/L이하인 모드 A-1과 모드 A-2에서는 10% 내외의 낮은 값을 보였다. 탈질효율을 나타내는 TN 제거율은 모드 A-3와 모드 B에서 각각 15% 및 17%로 높게 나타나, SND가 활발히 이루어지기 위해서는 부족한 산소 농도보다는 충분한 산소 공급이 이루어지는 가운데 본 실험과 같이 고농도의 미생물 군집이나 유동상 담체를 통해 질산화된 질산염을 탈질시키는 것이 효율적인 것으로 사료된다.

반면, 모드 A-3에서는 탈질에 필요한 충분한 질산염이 질산화에 의해 확보되어 높은 탈질율을 나타내었으나, 상대적으로 모드 B에서의 탈질율보다는 작았다. 이는 DO농도가 높아 무산소 영역안으로 산소가 침투하였기 때문이다. 이는 호기성 생물막을 대상으로 실험한 Puznava 등(2001)의 실험결과와 유사하였다.

DO농도가 낮은 모드 A-1과 A-2에서는 전단 호기조 1을 통하여 각각 0.39와 0.34 g/d의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 주입되었으나, 탈질이 발생하지 않았고, 이는 호기조 내 DO농도가 0.2~0.3 mg/L정도일 때, 탈질미생물의 환원효소의 활성이 저해받는

다는 연구 보고(Tiedje, 1988)의 내용과 일치하였다. 한편, DO농도가 3.5~4.0 mg/L로 높았던 모드 A-3에서는 0.36 g/d 만큼 탈질이 발생하면서 15%의 TN제거율을 보였다. 이는 호기조에서도 담체에 의한 무산소 영역 발생으로 인해 효율이 낮더라도 DO농도 구배에 따른 무산소 영역의 형성 등으로 인해 탈질이 발생한다는 Kugleman과 Spector (1988)의 보고와 일치하였다.

DO농도를 낮게 유지하면 탈질효율이 증대될 수 있으나, 질산화 효율이 떨어지므로 전체적으로 질소제거효율이 낮게 되므로 DO농도를 일정한 수준 이상으로 유지시켜야 한다.

따라서, 본 실험에서 SND를 위한 담체 호기조내 부유용액의 DO농도는 무산소 영역의 확보 측면에서 볼 때, 1.0~1.5 mg/L정도가 적당한 것으로 사료된다.

전체 질소제거량 대비 SND에 의한 질소제거율은 Table 5에 나타난 바와 같이 각 공정에서 19~24%정도로 나타났다. 이는 정용철 등(2008)이 고정상 담체를 이용하여 실험한 값인 40%보다 작았는데, 상대적으로 무산소 영역의 확보가 부족한 것으로 사료된다. 모드 B의 SND에 의한 제거율이 19%로 모드 A보다 낮은 것은 유입수 분배주입에 따라 무산소조에서 상대적으로 1.25 g/d의 높은 탈질량을 나타내었기 때문이다.

3.4. 유기물 제거

총 운전기간 동안 유기물에 관한 거동 및 평균 제거율을 Table 2에 나타내었다.

모드 A와 유입수 분배주입을 실시한 모드 B의 TCODcr, SCODcr 제거율은 각각 90% 및 85%이상으로 나타났다. 모드 B의 유입수, 혐기조, 무산소조, 호기조 1, 담체 호기조, 호기막조의 SCODcr 농도는 각각 132 mg/L, 21 mg/L, 17.6 mg/L, 11.7 mg/L, 6.52 mg/L 및 6.36 mg/L로 나타났다. 유입수의 분배주입을 실시한 모드 B의 유출수 SCODcr값이 6.36 mg/L로서 상당히 낮았는데, 이는 유입수의 C/N비가 4.3으로 상대적으로 낮고, 인 방출 및 무산소조의 탈질에 유기물이 거의 소비된 반면, 담체 호기조에서는 내생분해에 의한 세포성 산물(Biomass-associated products, BAP)을 포함한 생분해성이 있는 용해성미생물산물(soluble microbial products, SMP)을 이용하여 탈질이 발생한 것으로 사료된다.

Table 5. SND by DO con. in fluidized media aerobic reactor

		Mode A-1	Mode A-2	Mode A-3	Mode B
DO con. of fluidized media aerobic reactor	mg/L	0.1~0.5	0.5~1.0	3.5~4.0	1.0~1.5
Nitrification efficiency	%	12	10	55	42
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ con. of fluidized media aerobic reactor	mg/L	2.36	2.85	2.21	2.20
SNR	mg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ / g Mv/d	2.67	2.89	18.1	11.0
Denitrification efficiency	%	1	8	15	17
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ con. of fluidized media aerobic reactor	mg/L	1.94	1.38	7.88	4.65
SDNR	mg $\text{NO}_3^-\text{-N}$ / g Mv/d	0.38	3.31	12.1	9.86
Percentage of nitrogen removed by SND of total nitrogen removed	%	24			19

모드 A에서 1 g의 인이 제거되는데 21.6 g의 COD가 소요되었고, 모드 B에서는 13.7 g의 COD가 소요되었다. 모드 B에서 유기물양이 적음에도 인 제거 효율이 높은 것은 dPAOs(denitrifying phosphorus accumulation organisms)에 의한 영향으로 사료된다. 인 제거당 소요 유기물량은 최의소(2001)가 제시한 값인 30~40 gCOD/gP와 비교해 볼 때, 다소 낮았다.

메탄올을 유기물로 간주하였을 때, 1 g의 질산성 질소가 제거되기 위해서는 약 2.85 g의 COD가 소요된다. 모드 A의 전체 질소 제거량 대비 SND에 의한 질소 제거량이 0.17 g/d이었고, 2.85 gCOD의 약 17%인 0.48 g/d의 탄소원이 절감되었다. 또한, 모드 B의 전체 질소 제거량 대비 SND에 의한 질소 제거량은 약 0.3 g/d이었고 2.85 gCOD의 약 30%인 0.86 g/d의 탄소원이 절감되었다.

3.5. 인 제거

Table 2에는 운전기간 중 인의 제거율을 나타내었는데, TP와 SP 모두 98% 이상의 높은 제거율을 보였다.

Table 6에는 각 반응조별 인의 방출속도 및 흡수속도를 나타내었는데, 모드 A의 호기조 1, 담체 호기조 및 호기막조에서의 용해성 인 농도 및 인 흡수량은 각각 2.03 mg/L (0.57 g/d), 1.39 mg/L (0.15 g/d) 및 0.1 mg/L (0.31 g/d)이고, 모드 B의 무산소조, 호기조 1 및 호기막조에서의 인 농도 및 인 흡수량은 각각 0.48 mg/L (0.82 g/d), 0.31 mg/L (0.04 g/d) 및 0.04 mg/L (0.08 g/d)이었다.

모드 A와 모드 B의 혐기조에서는 용해성 인의 농도가 각각 6.97 및 8.65 mg/L이고, 0.6 및 0.65 g/d의 인 방출이 일어났다. SPRR은 각각 48.9와 47.4 mgPO₄³⁻-P/gMLVSS · d이었고, 이는 Isaacs and Henze(1995)의 연구에 의한 보고 값인 79.2 mgPO₄³⁻-P/gMLVSS · d보다는 다소 낮았다.

또한 모드 B의 무산소조에서 0.82 g/d의 인 흡수가 일어났고, 동시에 1.25 g/d의 탈질이 발생하였다. SPUR은 모드 A의 호기조 1과 호기막조에서 각각 42.3 및 18.7 mgPO₄³⁻-P/gMLVSS · d로 나타난 반면, 모드 B에서는 무산소조에서 50.6 mgPO₄³⁻-P/gMLVSS · d로 높게 나타났다. 이는 질산염을 전자수용체로 사용하여 인을 흡수한 dPAOs에 의한 영향으로 사료된다.

실제적으로 모드 B의 무산소조로 유입된 SCODcr 농도는 21 mg/L로 낮았고, 유출되는 NO₃⁻-N 양이 0.27 g/d로 나타나 과잉의 NO₃⁻-N 공급이 관찰되었다. 이는 Hu 등(2002)이 제시한 무산소조내 질산염이 탈질미생물이 이용할 수 있는 양보다 많을 때, dPAOs가 존재할 수 있다는 보고와 일치하는 내용이었다.

반면, 모드 A의 무산소조에서는 0.17 g/d의 낮은 탈질량

과 함께 인의 동시흡수현상은 발생하지 않았다. 이는 무산소조로 유입되는 SCODcr농도가 44 mg/L로서 다소 높아 탈질미생물의 경쟁력이 dPAOs의 비해 우세했던 것으로 판단된다.

3.6. 슬러지 발생량

모드 A 및 B의 슬러지 인발량은 각각 3.06 g/d 및 3.20 g/d이었고, 그에 따라 각 반응조별 미생물량과 용적을 이용하여 SRT는 30~35 d로 운전하였다.

모드 A 및 B의 TCOD 제거량은 각각 12.96 및 9.96 g/d, 용존산소저감조내 MLVSS 농도는 각각 8,750 및 9,450 mg/d이었다. TCOD 제거량과 매일 용존산소저감조에서 인발되는 미생물량을 이용하여 구한 슬러지 생성량은 각각 0.24 gVSS/gCOD 및 0.32 gVSS/ gCOD으로 나타났다.

4. 결론

- 1) Membrane-BNR 집적화 공정에서 6.5 시간의 짧은 HRT에도 불구하고 TCODcr 및 SCODcr 제거율은 각각 90%, 85% 이상 나타났다. 특히, 유입수 분배주입에 의해 유기물이 탈질에 효과적으로 이용되었고, 낮은 C/N비하에서도 T-N과 T-P 제거율이 각각 78% 및 98% 이상으로 높게 나타났다.
- 2) 전체 질소제거량 대비 SND에 의한 질소제거율은 각 모드에서 약 20%정도로 나타났다. 모드 A의 전체 질소제거량 대비 SND에 의한 질소제거율은 약 24%이었고 약 17%의 탄소원이 절감되었다. 또한, 모드 B의 전체 질소제거량 대비 SND에 의한 질소제거율은 약 19%이었고 약 30%의 탄소원이 절감되었다.
- 3) 담체 호기조내 DO농도가 1.0 mg/L이하에서는 질산화율이 낮아 전체적으로 질소 제거효율이 낮았다. 반면, 3.5 mg/L이상에서는 높은 질산화율을 보였으나, 오히려 무산소 영역의 감소로 인한 탈질율의 감소가 나타나 전체적인 질소 제거효율은 낮아졌다. 따라서 본 실험에서는 담체 호기조내 DO농도를 1.0~1.5 mg/L로 유지할 때 가장 높은 SND효율을 나타낼 수 있었다.

사 사

본 연구는 2006년도 환경부 수처리선진화사업단의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

박종복, 최의소(2003). 다단으로 구성된 하수고도처리공정에서 원수 분배율에 따른 질소·인 제거 특성. *대한환경공학회지*, **25**(5), pp. 624-631.
 정용철, 이정열, 민경석(2008). 저농도 하수 유입 Membrane-BNR 공정내 고정상담체 호기조에서의 SND. *수질보전한국물환경학회지*, **24**(3), pp. 328-332.

Table 6. SPRR and SPUR at each mode

	SPRR	SPUR			
	(mg PO ₄ ³⁻ -P/g Mv/d)	(mg PO ₄ ³⁻ -P/g Mv/d)			
	An	Ax	Ox1	OxMed.	OxMem.
Mode A	48.9	0	42.3	5.6	18.7
Mode B	47.4	50.6	2.5	0	4.7

- 최의소(2001). *상하수도 공학*, 청문각, 서울.
- 환경부(2006). *물순환이용체계개선에 관한 연구*.
- APHA (1998). WEF and ASCE, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Eds. Washington DC. U.S.A.
- Barker, P. S. and Dold, P. L. (1996). Denitrification Behaviour in Biological Excess Phosphorous Removal Activated Sludge Systems. *Water Res.*, **30**(4), pp. 769-780.
- Bortone, G., Malaspina, F., Stante, L., and Tilche, A. (1994). Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in an Anaerobic/Anoxic Sequencing Batch Reactor with Separated Biofilm Nitrification. *Water Sci. Technol.*, **30**(6), pp. 303-313.
- Halling, S. B. and Hjuler, H. (1992). Simultaneous Nitrification and Denitrification with an Upflow Fixed Bed Reactor Applying Clinoptilolite as Media. *Water Treat.*, **7**, pp. 77-88.
- Hu, Z., Wentzel, M. C., and Ekama, G. A. (2002). Anoxic Growth of Phosphate-Accumulating Organism (PAOs) in Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems. *Water Res.*, **36**(19), pp. 4927-4937.
- Isaacs, S. H. and Henze, M. (1995). Controlled Carbon Source Addition to an Alternating Nitrification-Denitrification Wastewater Treatment Process Including Biological P Removal. *Water Res.*, **29**(1), pp. 77-89.
- Kugleman, I. J. and Spector, M. (1988). Nutrient Removal in Staged Biological Reactors, *Proceedings of the Third WPCF Joint Technical Seminar on Sewage Treatment Technology, Tokyo, Japan*, pp. 4-27.
- Kugleman, I. J., Spector, M., Harvilla, A., and Parees, D. (1991). Aerobic Denitrification in Activated Sludge. *Environ. Eng.*, pp. 312-318.
- Masuda, S., Watanabe, Y., and Ishiguro, M. (1991). Biofilm Properties and Simultaneous Nitrification and Denitrification in Aerobic Rotating Biological Contactors. *Water Sci. Technol.*, **23**, pp. 1355-1363.
- Metcalf & Eddy inc., Tchobanoglous, G., Burton, F., and Stensel, H. D. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse Fourth Edition*, The McGraw-Hill Companies, New York, U. S. A.
- Munch, E. V., Lant, L., and Keller, J. (1996). Simultaneous Nitrification and Denitrification in Bench-scale Sequencing Batch Reactors. *Water Res.*, **30**(2), pp. 277-284.
- Pochana, K. and Keller, J. (1999). Study of Factors Affecting Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND). *Water Sci. and Technol.*, **39**(6), pp. 61-68.
- Puznava, N., Payraudeau, M., and Thornberg, D. (2001). Simultaneous Nitrification and Denitrification in Biofilters with Real-time Aeration Control. *Water Sci. Technol.*, **43**(1), pp. 269-276.
- Tiddje, J. M. (1988). *Ecology of Denitrification and Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium*. in *Biology of Anaerobic Microorganisms*, edited by A.J.B.Zehnder, John Wiley, New York, U. S. A., pp. 179-244.
- Yang, W., Cicek, N., and Ilg, J. (2006). State-of-the-art of Membrane Bioreactors: Worldwide Research and Commercial Applications in North America. *J. Membrane Sci.*, **270**, pp. 201-211.