

외부탄소원을 사용한 SBBR의 공정 특성 및 질소제거

한혜정 · 윤주환[†]

고려대학교 대학원 환경공학과

Evaluation of SBBR Process Performance Focused on Nitrogen Removal with External Carbon Addition

Hyejeong Han · Zuwhan Yun[†]

Department of Environmental Engineering, Korea University

(Received 23 March 2006, Accepted 14 April 2006)

Abstract

A sequencing batch biofilm reactor (SBBR) operated with a cycle of anaerobic - aerobic - anoxic - aerobic has been evaluated for the nutrient removal characteristics. The sponge-like moving media was filled to about 10% of reactor volume. The sewage was the major substrate while external synthetic carbon substrate was added to the anoxic stage to enhance the nitrogen removal. The operational results indicated that maximum T-N and T-P removal efficiencies were 97% and 94%, respectively were achieved, while COD removal of 92%. The observations of significant nitrogen removal in the first aerobic stage indicated that nitrogen removal behaviour in this SBBR was different to conventional SBR. Although the reasons for aerobic nitrogen removal has speculated to either simultaneous nitrification and denitrification or anoxic denitrification inside of the media, further researches are required to confirm the observation. The specific oxygen uptake rate (SOUR) test with biofilm and suspended growth sludge indicated that biofilm in SBBR played a major role to remove substrates.

keywords : Biofilm, Enhanced biological phosphorus removal (EBPR), Nitrogen removal, Sequencing batch reactor (SBR), Specific oxygen uptake rate (SOUR)

1. 서론

Sequencing batch reactor(SBR) 공정은 하나의 반응조 내에서 일정시간 간격으로 하수를 유입, 반응, 침전, 유출시킴으로써 운전이 간단하고, 쉽게 혐기 및 호기 조건을 변경할 수 있는 특징이 있어 생물학적 질소·인 처리에 효과적이다(Irvine et al., 1979). 또한 일반 활성슬러지 공정에 비하여 부하 및 유량변동에 대처가 용이하고, 자동화에 유리하여 소규모 하수처리에 적합하다(Wilderer et al., 1992). 그러나 anaerobic 기간에서 남아있는 NO₃-N에 의해 인제거에는 어려움이 있다(Kuba et al., 1994).

한편 Sequencing batch biofilm reactor(SBBR)는 SBR에 생물막을 적용하여 미생물 농도를 높게 유지할 수 있어 체류시간 단축 및 영양소 제거에 유리한 것으로 평가되나 생물막 두께의 인위적 조절이 난이하며 생물막 내부까지 산소전달이 어려워 활성슬러지보다 높은 DO를 유지할 필요가 있다(Wilderer et al., 2001).

최근 국내에서도 소규모 하수처리장에 SBR공정이 흔히 적용되고 있는데 관거의 부설, 유입유량과 농도의 가변성 등의 이유로 유입수의 C/N비가 낮거나 불량하여 영양염류

제거에 필요한 탄소원이 부족한 실정이다. 특히 SBR 공정에서 탈질과 인의 동시제거를 목표로 하거나, 처리정도를 높이려면 외부탄소원의 주입이 필요하다. 외부 탄소원으로서는 합성유기물, 음식물쓰레기 발효액 등을 이용할 수 있으며 이에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다(최, 2002). 탄소원으로 음식물 쓰레기 발효액을 주입하면 음식물 쓰레기 감량과 탄소원 대체로 경제적이다.

따라서 본 연구에서는 음식물쓰레기 발효액으로부터 회수한 탄소원을 사용하는 방안을 강구하기 위하여 그 전단계로 SBBR 공정의 무산소 단계에 합성탄소원을 추가 주입하고 혐기, 호기 및 무산소 조건을 교대로 형성시킴으로써 유기물, 질소 및 인의 동시제거를 시도하였다. 또한 SBBR 공정내 부유성 미생물과 부착성 미생물에 의한 영양소 제거와 미생물학적 상관 관계를 Specific Oxygen Uptake Rate(SOUR)측정으로 그 활성도를 비교하였으며, 설계 및 운전에 활용할 수 있는 방안을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서는 유효용적 5 L의 원통형 아크릴로 제작된 SBBR은 유효용적의 약 10%를 polyethylene 재질의 유동성

[†] To whom correspondence should be addressed.
envzyun@korea.ac.kr

상용 media(공극률 95% 정도)로 충전하여 운전하였다(Fig. 1). 반응조는 상온(21°C)에서 운전하였으며 하수 유입, 포기 및 혼합, 처리수 배출 등의 조작은 Programmable Logic Controller(PLC)에 의하여 자동 제어하였다. 공기주입은 air pump를 사용하여 diffuser stone을 통하여 1.0 L air/min 의 공기를 주입하여 호기조 내 DO 농도를 6 mg/L 이내로 유지하였고, 혼합을 위하여 기계식 혼합기를 사용하였다. Media를 제외한 반응조 내 MLSS 농도는 1,700~2,000 mg/L범위로 운전되었다.

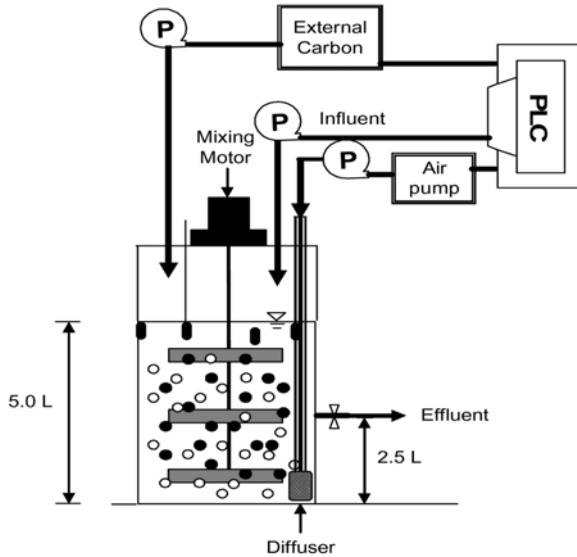


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory-scale SBBR reactor.

2.2. 유입원수특성

Table 1은 유입수의 성상을 보여주고 있다. 실험에 사용된 유입수는 “J” 하수처리장의 1차 침전지 유출수를 사용하여, 질소·인 제거에 필요한 유기물을 acetate와 KH₂PO₄로 보충하여 SCOD 농도 131 mg/L, 인 농도는 6.6 mg PO₄-P/L로 일정하게 유지하여 인 제거특성의 비교를 용이하게 하였다.

Table 1. Characteristics of Influent*

Parameters	Conc.(mg/L)
TCOD	255
SCOD	131
TSS	113
VSS	96
TN	36.9
NH ₄ -N	32.6
T-P	7.7
PO ₄ -P	6.6

*Average value

2.3. 실험방법

SBBR의 운전주기는 Fig. 2와 같이 1주기를 8시간으로 하였다. Anaerobic 기간에는 인의 방출이 일어나도록 하였고

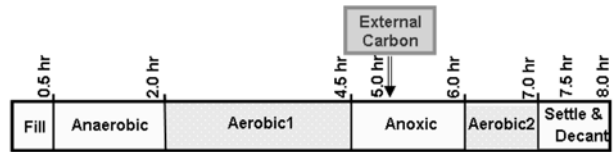


Fig. 2. Operating sequence of SBBR.

이어 질산화와 인의 흡수를 위한 Aerobic 1기간, 탈질을 위한 Anoxic 기간, 침전성 향상 및 잔여 유기물 산화를 위한 후반 Aerobic 2기간과 침전 및 유출기간으로 구성하였다. 또한 Aerobic 1기간에서 생성된 NO₃-N의 탈질에 필요한 탄소원을 이론적으로 계산하여 주입하였다. Aerobic 1기간 후 반응조 내 남아있는 용존산소에 의한 탄소원 소모를 줄이기 위하여 Anoxic 기간 시작 0.5 hr 후에 Masterflex pump를 이용하여 주입하였다. 잉여슬러지 배출은 Aerobic 2 기간 후반에서 이루어졌다.

모든 수질 분석은 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 수행하였으며, SOUR 실험은 micro DO sensor와 digital recorder가 연결된 biological oxygen monitor(YSI 5300A)를 사용하였다. 생물막 미생물은 가압 압축하에 media로부터 분리한 후 원심분리하여 상정수를 제거하고, 증류수로 3회 washing한 후 사용하였다. 원심분리한 샘플은 buffer solution에 넣어 DO measuring cell에 주입하여 DO uptake를 관찰하였는데 기질이 없는 상태에서의 초기 slope가 endogenous SOUR을 나타낸다. 또한 인을 제외한 유입수와 동일한 농도의 substrate를 Micro-syringe로 DO measuring cell에 주입하여 total SOUR을 구하였다. 이 때 total SOUR은 autotrophic 및 heterotrophic oxygen uptake를 포함한 것이므로 heterotrophic SOUR만 측정하기 위해 nitrification inhibitor(allylthiourea)를 measuring cell에 주입하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SBBR의 수질특성

Table 2와 Fig. 3은 동일한 조건에서 운전기간 중 제거효율이 높았던 경우와 낮았던 경우의 SCOD, 질소 및 인의 거동과 당시 수질을 비교하여 나타내었다. Table 2의 DO 농도는 Aerobic 1 후반의 DO 농도를 나타낸 것이다.

운전기간동안 SBBR에서 유기물 제거는 84~92%, 질소 제거 83~97% 및 인 제거는 최대 94%로 인 제거 효율이 높은 것으로 나타났는데, 이는 충분한 탄소원이 공급되었기 때문으로 판단된다. Fig. 3(a)는 운전 37th day의 운전 결과로 운전기간 중 유기물, 질소 및 인의 제거효율이 가장 높았던 시기였으며 enhanced biological phosphorus removal (EBPR)이 활발하게 이루어졌다.

반면 운전 57th day인 Fig 3(b)의 경우, 반응조 내 MLSS의 증가와 침전시 sluge와 Media의 층의 높이가 높아지면서 침전성이 불량하여 유출시 반응조 내 MLSS의 유실이 발생한 경우의 SCOD, 질소 및 인의 거동을 보여주고 있다. 이때 유출수 내 유기물, SS 및 인의 농도가 증가하였으

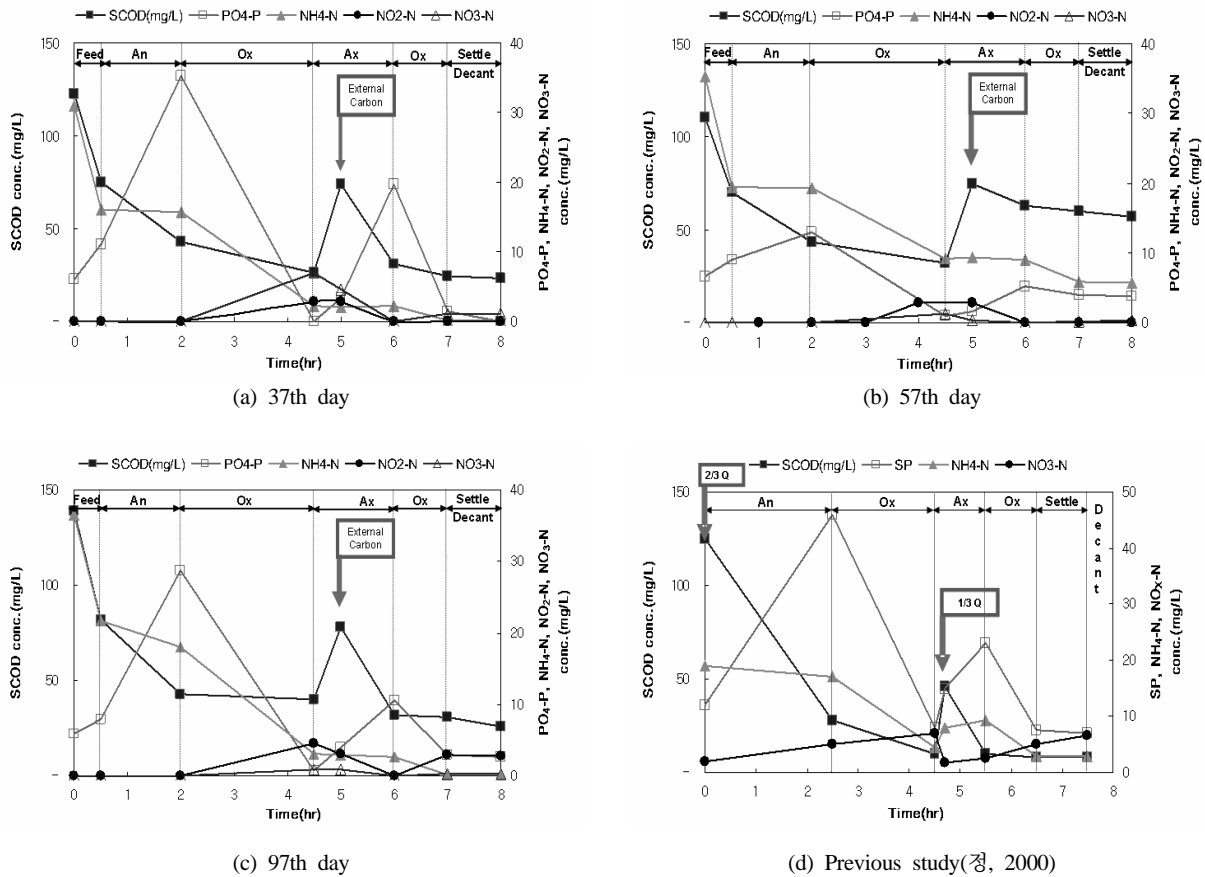


Fig. 3. Nutrient removal in 37th day (a), 57th day (b), 97th day (c), Previous study (d) with total sequence.

Table 2. Effluent concentration in 37th day (a), 57th day (b), 97th day (c), in previous study (d).

Parameters	Unit(mg/L)			
	(a)37th day	(b)57th day	(c)97th day	(d)Jung (2000)
TCOD	32.0	92.0	62.0	26.0
SCOD	23.0	57.0	26.0	17.0
TSS	12.0	30.0	56.0	18.0
VSS	10.0	28.0	46.0	(SS)
TN	1.0	8.0	4.0	12.2
NH ₄ -N	0.2	5.7	0.2	0.4
NO ₃ -N	1.1	0.2	0.3	10.9
NO ₂ -N	0.0	2.9	2.6	0.0
T-P	0.5	4.2	3.0	2.7
PO ₄ -P	0.1	3.5	2.7	2.4
MLSS in Reactor (without media)	1,700	1,780	1,680	2,000
DO	5.5	3.5	4.5	-
Organic Removal(%)	81	48	81	94
TN Removal(%)	97	83	92	73
TP Removal(%)	94	40	60	51
C/N in Influent	4.0	3.1	3.8	6.6

*Organic removal(%): SCOD basis.

며 유출수의 질소 농도도 높았다. 이 시기의 운전 중 특이 현상으로 일부 미디어의 부상현상이 관찰되었는데 이로 인하여 MLSS의 washout이 일어나 유출수의 수질저하가 일어난 것으로 추정된다. 그리고 이때 사상균은 존재하지 않았다.

이 시기의 유입수의 C/N비가 (b)의 경우 3.1로 낮았고, Aerobic 1 기간의 DO농도도 3.5 mg/L로 다른 시기에 비하여 낮아 이로 인하여 질산화 효율이 낮았으며, 인의 흡수량도 감소한 것으로 보인다. 그리하여 전체 TN 제거율(83%)과, 인 제거율(40%)이 낮았다. 반응조 내 DO 농도를 4.5 mg/L로 높여 유지한 후 운전한 97 day인 Fig. 3(c)는 비교적 높은 질소·인 제거효율을 나타냈으나 침전성은 좋지 않았다.

이 시기에는 (b)시기에 비하여 부상된 미디어 양도 증가하였으며 이로 인해 유출수의 SS농도가 증가한 것으로 추정된다. 미디어의 부상은 Anoxic기간에 주입한 다량의 탄소원에 의해 미디어 내부의 탈질량 증가로 발생된 탈질가스와 탄산가스에 의한 것으로 부상한 미디어를 압축할 때 가스방울을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)보다 침전성은 나빴으나 질소·인 제거효율은 더 높았는데 이것으로 볼 때 SBBR의 운전시 DO보다는 여타조건이 더 중요한 것으로 판단된다.

Fig. 3(d)는 본 연구와 유사한 조건에서 진행된 연구(정,

2000)로 유입수를 Step Feed 방식으로 분할 주입하여 Anoxic 기간 초에 유입수의 1/3Q를 주입하여 실험하였다. Table 2(d)에서 볼 수 있듯이 침전성이 좋지 않아 유출수의 TN, TP 제거율이 낮았던 (b)의 경우와 유사하게 질소제거율 73%, 인제거율 51%로 나타났다.

산소가 충분히 주입된 실험조건에서 이와 같은 결과는 질소와 인제거에 필요한 탄소원 양의 부족 때문이며, 침전 시간이 길어 침전기간동안 인의 재방출이 유출수의 높은 인 농도의 원인으로 추정된다.

이러한 분석결과에 의하면 운전기간동안의 유기물, 질소 및 인의 제거효율은 탄소원이 충분한 조건에서는 높았으나 사용된 Media의 특성, 반응조 내 슬러지의 침전성, Aerobic 기간에서의 DO 농도, 탄소원 추가주입량 등 여러 운전 환

경조건의 변화에 대하여 SBBR이 상당히 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

3.2. SBBR에서 질소제거

운전 사이클 중 첫 번째 호기성기간(Aerobic 1)은 aerobic P uptake와 유기물제거, 그리고 질산화를 목적으로 구성되었지만 호기성 반응초기와 마지막에서의 질소농도를 측정 한 결과 질소제거가 관찰되었다.

Fig. 4는 운전기간에 걸친 질소의 거동을 나타내었으며 Aerobic 1 기간에서 제거된 질소의 농도를 수치로 보여주고 있다.

Fig. 4(a)는 운전 37th day의 경우로 Anaerobic 후반, 즉 Aerobic 1 기간 직전의 반응조 내 질소는 거의 NH₄-N형태

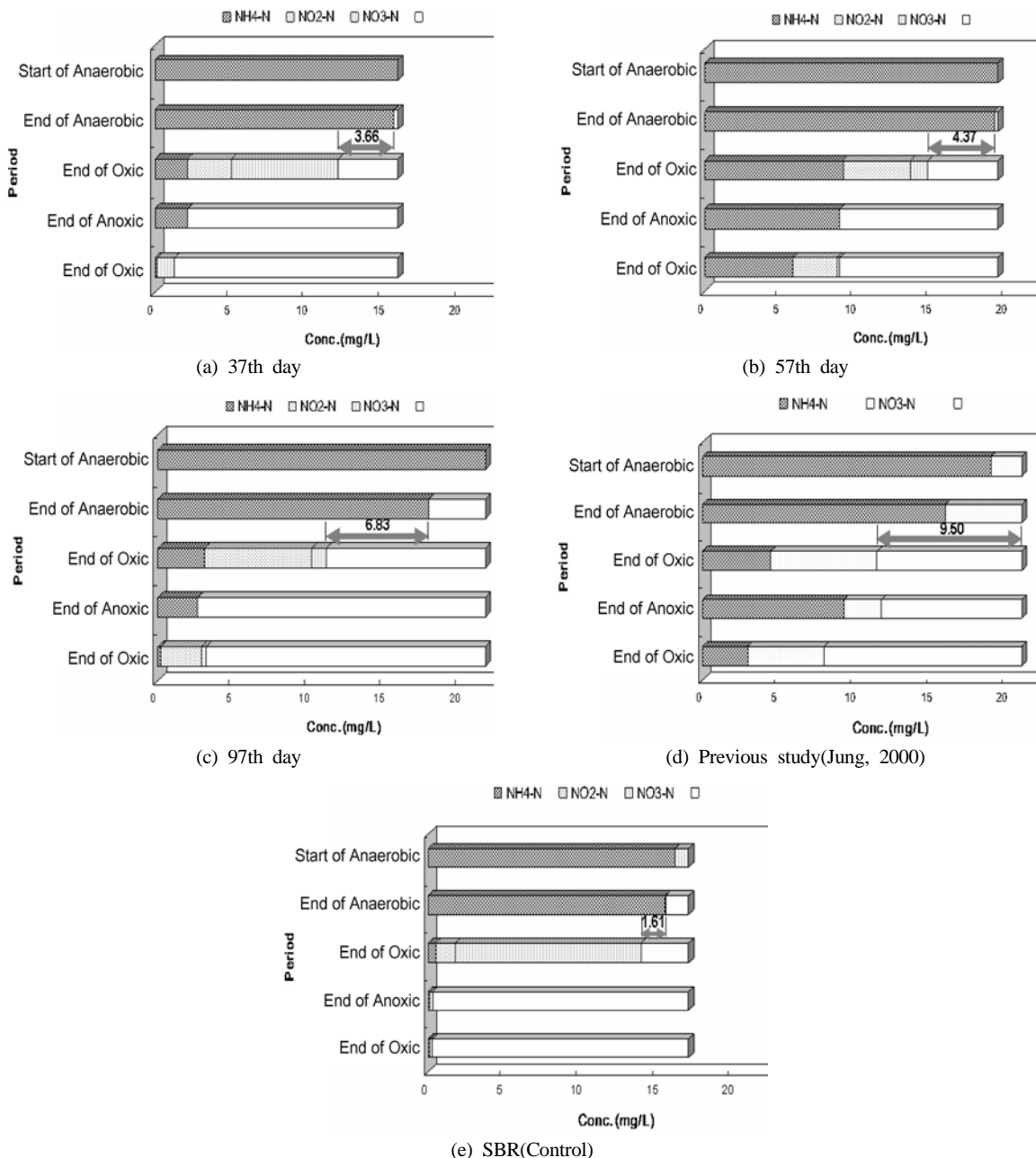


Fig. 4. Nitrogen removal with total sequence.

이나 2.5 hr의 Aerobic조건 이후의 질소는 NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N의 형태로 전환하였으며 총량기준 3.66 mg N/L 만큼의 질소가 제거되었다. Fig. 4(b)는 운전 57th day의 경우로 Aerobic 1 기간에서의 질소제거는 4.37 mg N/L로 (a)의 경우보다 증가하였으며, 운전 97th day인 Fig. 4(c)는 9.60 mg N/L의 질소제거를 나타내었다.

Fig. 4(d)는 유사한 조건에서 sponge media를 사용한 이전 연구(정, 2000)로 Aerobic 1 기간에서 9.50 mg N/L로 높은 질소제거를 나타내었는데, 이는 전체 MLSS 중 media에 부착된 MLSS가 전체 MLSS의 79% 정도로 본 연구(40%)보다 높기 때문인 것으로 보인다. 또 본 연구와 함께 동일한 운전 사이클 및 하수, 같은 양의 외부탄소원 주입 조건에서 운전된 SBR에서도 미량이지만(1.61 mg N/L) 유사한 현상이 관찰되었다.

Table 3은 Fig. 4를 토대로 운전 일수에 따른 SBBR과 SBR, 이전 연구에서 전체 사이클 중 Aerobic 1 기간과 Anoxic 기간에서의 질소제거를 나타낸 것이다. Media를 사용한 SBBR의 경우 상당량의 질소가 Aerobic 1 기간에서 제거됨을 알 수 있으며, SBR은 질소제거의 대부분이 Anoxic에서 주입된 탄소원에 의하여 탈질이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이전 연구(정, 2000)는 Aerobic 1 기간에서 대부분의 질소제거가 이루어졌고 Anoxic 기간의 제거율은 확인할 수 없었다.

Aerobic 1 기간에서의 질소제거의 원인으로는 여러 가지를 생각할 수 있다. ① Aerobic 1 기간에서 질산화와 함께 media 내부에 Anoxic 조건이 형성됨으로서 탈질이 이루어진 것으로 추정할 수 있으며, ② 부유성 sludge floc 내부의 탈질 가능성이 있으나 운전 중 SBBR의 부유성 부분의 관찰결과 floc으로 인한 탈질 가능성은 들 수 없다. 반면 SBR에서는 sludge floc을 확인할 수 있었고 SBR에서의 질소제거의 원인으로 추정할 수 있다. ③ 인체거 미생물에 의한 인의 release 및 uptake가 활발한 것으로 보아, dPAO에 의한 NO₃-N의 감소를 예상할 수 있으나 Kernn-Jespersion 등(1993)과 Wachtmeister 등(1997)의 실험과 유사하게 실시한 PAO중 dPAO의 분을 실험 결과 dPAO의 존재 또한 운전환경에 따라 변화가 심하여 질소제거의 원인으로 확신하기는 어려웠다. ④ Third and Sepramaniam(2004)은 SBR에서 PHB로 전환되어 저장된 유기물질이 Aerobic기간에서의 전자수용체로 사용되어 최대 86%까지 Simultaneous Nitrification and Denitrification(SND)에 의한 질소제거가 가능하다고 발표한 바 있다. 따라서 본 실험에서도 SND에 의한

Table 3. Nitrogen removal at SBR phase (Unit: mg N/L)

		Aerobic 1	Anoxic	Remark
SBBR	(a)37th day	3.6	9.6	External carbon fed at anoxic phase
	(b)57th day	4.4	5.9	
	(c)97th day	6.8	8.5	
SBR		1.6	13.7	
SBBR	Jung (2000)	9.5	.*	1/3Q step feed at anoxic phase

*No data

Aerobic기간에서의 질소제거를 예상할 수 있다.

위의 여러 경우를 고려하여 볼 때, 본 실험의 Aerobic 1 기간에서의 질소제거는 media 내부 탈질과 SND에 의한 것으로 좁혀 생각할 수 있는데 그 이유는 이미 밝힌 바와 같이 운전 중 SBBR의 부유성 부분의 관찰결과 floc으로 인한 탈질 가능성은 들 수 없으며 별도로 수행된 dPAO 분을 실험결과 dPAO의 존재가 낮은 것으로 나타났기 때문이다. 결과적으로 Aerobic 1 기간에서의 질소제거는 외부탄소원의 주입량을 감소시킬 수 있어 탄소원의 효율적 사용이 가능하며, Aerobic 1 기간에서의 질소제거를 극대화시킬 수 있으면 C/N비가 낮은 국내 하수처리 효율을 높일 수 있는 이점이 있다. 하지만 Aerobic 기간의 질소제거 현상이 완전하게 규명되지 않아 BNR공정의 설계 및 운전에 요구되는 모델링에 어려움이 있다. 따라서 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3.3. SOUR을 이용한 미생물 특성분석

반응조내 다양한 미생물군의 역학관계를 파악하기 위하여 기존의 biotechnology 기법 이외에 SOUR을 사용하여 실험하였다.

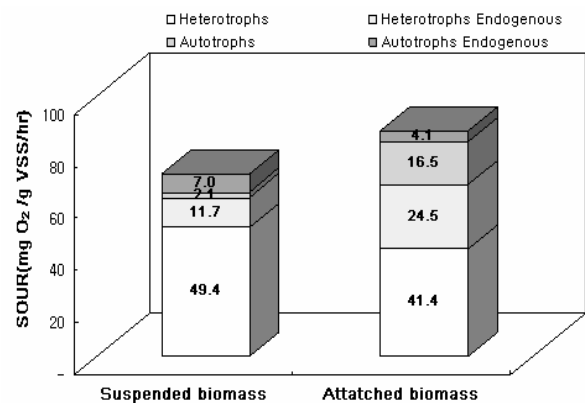


Fig. 5. SOUR test of suspended and attached biomass in SBBR.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 부착성 미생물의 산소소모율(86.5 mg O₂/g vss/hr)이 부유성 미생물의 산소소모율(70.2 mg O₂/g vss/hr)보다 높게 나타났다. Endogenous respiration도 부착성 미생물(33.1%)이 부유성 미생물(26.6%)에 비하여 약 1.5배 높았다. 질산화 미생물의 산소소모율은 부유성 부분에서 7.0 mg O₂/g vss/hr으로 전체 부유성 미생물의 산소소모율의 13%, 생물막 부분은 4.1 mg O₂/g vss/hr, 즉 전체 부착성 미생물의 산소소모율의 23.8%로 생물막에서의 질산화 미생물의 산소소모율이 더 높은 것으로 나타났다.

SOUR을 사용한 반응조 내 미생물의 활성 실험 결과 활성 미생물의 상당량이 생물막에 존재하였다.

3.4. SBBR의 문제점 및 개선점

탄소원이 충분히 공급된 조건에서 부유성 media를 사용한 SBBR은 높은 질산화율과 탈질율을 나타냈으며 동시에

인제거 효율도 높았다. 그러나 탄소원이 충분히 주입된 조건에서도 부유성 sponge 미디어 부상 특성에 의하여 유출수의 SS 및 유기물의 농도 변화가 심하였던 것으로 볼 때 media의 물리적 특성이 중요한 요소로 판단되었다. 따라서 SBBR의 운전시에는 ① media의 부상특성을 줄일수 있도록 media의 물리적 특성을 개선하고, ② SBBR에서의 탄소원 배분 적정화 방안을 강구하여야 하고, ③ media 충전률에 대한 추가연구가 필요하며, ④ Aerobic 기간에서의 반응조 내 DO농도의 조절이 중요하며, ⑤ 반응사이클의 sequence를 조절하여 질소, 인 제거효율을 최적화해야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

생물막을 이용한 SBBR 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 탄소원이 충분히 공급된 SBBR에서 유기물, 질소 및 인 제거는 최대 92%, 97% 82%로 높은 제거효율을 나타냈으나 운전환경에 상당히 민감한 것으로 관찰되었다.
- 2) 실험실 SBBR의 Aerobic 1 기간에서 질산화와 함께 질소제거가 관찰되었는데 이는 media 내부와 부유상태 슬러지상에서의 탈질 가능성, SND에 의한 질소 제거로 추정되었다. Aerobic 1 기간에서의 질소제거는 탄소원의 효율적 사용 가능성을 제시하며, C/N비가 낮은 국내 하수처리 효율을 높일 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) SOUR을 사용한 반응조 내 미생물의 활성 실험 결과 활성미생물의 상당량이 생물막에 존재하였다.
- 4) SBBR의 효율적인 운전을 위하여 ① media의 물리적 특성을 개선하고 ② 적정 탄소원 주입조건을 찾고 ③ media 충전률 조절, ④ 전체 반응의 sequence 조합이 중요하며, ⑤ Aerobic 기간에서 DO농도의 유지도 중요할 것으로 나타났다.

사 사

본 연구당시 한혜정은 고려대학교 대학원 환경공학과에 재학 중이었습니다.

참고문헌

- 김극태, BAF와 SBBR의 비교에 관한 연구, 고려대학교 석사학위 논문 (2000).
- 정호윤, MMSBR을 이용한 질소·인 제거, 고려대학교 석사학위 논문 (2000).
- 최의소, 유출수 저장조가 설치된 SBBR을 이용한 하수에서의 영양소 제거, *대한환경공학회지*, **24**(7), pp. 1227-1234 (2002).
- APHA, AWWA & WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., Washington D.C. USA (1998).
- Irvine, R. L. and Busch, A. W., Sequencing Batch Reactors - an Overview, *Journal Water Pollution Control Federation*, **51**, p. 235 (1979).
- Kern-Jespersen, J. P. and Henze, M., Biological Phosphorus Uptake under Anoxic and Aerobic Conditions, *Wat. Res.*, **27**, pp. 617-624 (1993).
- Kuba, T., Wachtmeister, A., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J., Effect of Nitrate on Phosphorus Release in Biological Removal Systems, *Wat. Sci. &Tech.*, **30**(6), pp. 263-269 (1994).
- Third, K. A., Sepramaniam, S., Tonkovic, Z., Newland, M. and Cord-Ruwisch, R., Optimization of Storage Driven Denitrification by Using On-line Specific Oxygen Uptake Rate Monitoring during SND in a SBR, *Wat. Sci. Tech.*, **50**(10), pp. 171-180 (2004).
- Wachtmeister, A., Kuba, T., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J., A Sludge Characterization Assay for Aerobic and Denitrifying Removing Sludge, *Wat. Res.*, **31**(3), pp. 417-418 (1997).
- Wilderer, P. A., Irvine, R. L. and Goronszy, M. C., *Sequencing Batch Reactor Technology*, IWA Publishing, London (2001).
- Wilderer, P. A., *Sequencing Batch Biofilm Reactor Technology, Harnessing Biotechnology for the 21st century*, Ladisch M.R, Bose A., Eds, *Amer. Chem Soc.*, pp. 475-479 (1992).