

## 연속회분식 생물막 반응기(Sequencing Batch Biofilm Reactor)를 이용한 수중의 유기물, 질소 및 인의 동시 제거에 관한 연구

박민정 · 김동석†

대구가톨릭대학교 응용과학부 환경과학전공

### A Study on the Biological Organic, Nitrogen and Phosphorus Removal in Sequencing Batch Biofilm Reactor

Min-Jeong Park · Dong-Seog Kim†

Dept. of Environ. Sci., Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702

(Received February 3, 2004; Accepted May 3, 2004)

#### ABSTRACT

Biological nutrient removal(BNR) from wastewater was performed by adopting various process configurations. The simultaneous biological organics, phosphorus and nitrogen removal of synthetic wastewater was investigated in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR). The other reactor was operating as a reference, without biofilm being added. The cycling time in SBR and SBBR was adjusted at 12 hours and then certainly included anaerobic and aerobic conditions. Both systems has been operated with a stable total organic carbon(TOC), nitrogen and phosphorus removal performance for over 90 days. Average removal efficiencies of TOC and total nitrogen were 83% and 95%, respectively. The nitrification rate in SBR was higher than that in SBBR. On the contrary, the denitrification rate in SBBR was higher than that in SBR. The phosphorus release was occurred in SBBR, however, not in SBR because of the inhibition effect of  $\text{NO}_3^-$ .

**Keywords:** biological nutrient removal(BNR), sequencing batch reactor(SBR), sequencing batch biofilm reactor(SBBR)

#### I. 서 론

사회의 급속한 산업화와 인구증가로 인해 생활오수, 공장폐수 등의 증가로 일부 상수원을 포함한 전국의 주요 하천이 오염되고 있다. 특히 오염물질 중에서 가장 많이 배출되는 고농도의 유기물질과 질소 및 인과 같은 영양염류가 하천과 호수에 유입되면 수계 생물상을 변화시켜 생태계 교란을 야기하는 부영양화를 초래한다. 이에 따른 대책으로 정부는 새로 설치하는 하수처리시설은 우선적으로 질소·인 처리 시설을 설치하고, 총 질소 60 mg/l와 총 인 8 mg/l 이하로 규정하던 현행 하수처리시설 방류수 수질기준을 2005년에는 각각 20 mg/l와 2 mg/l 이하로 강화할 계획이다.<sup>1)</sup>

현재 대규모 하수처리시설에는 Modified Bardenpho

공정, Phoredox 공정, UCT 공정, VIP 공정 등과 같은 질소·인 제거기술이 개발되어 설치·운영되고 있다. 그러나 이 공정들은 복잡한 공정의 배치와 고도의 기술을 필요로 하며, 그에 따른 설치비용이 많이 소요되기 때문에 소규모 오수처리시설에서는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

또한, 하나의 반응기 내에서 혐기, 호기, 무산소 조건을 변화시켜 유기물 및 질소·인의 제거효율을 향상시키기 위한 연속회분식 반응기(sequencing batch reactor, SBR)를 활용하려는 연구도 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 오수의 유입과 배출(fill-and-draw)형식에서 출발한 SBR에 대한 연구는 외국에서 1960년대에 산발적으로 진행되었으나, 운전상의 번거로움으로 인해 관심을 끌지 못하다가, 1970년대에 이르러 유압밸브, 솔레노이드 밸브(solenoid valve), 수위센서(level sensor), 유량계(flow meter), 마이크로 프로세서(microprocessor)와 같은 주변 기기 장치의 개발로 인하여 운전이 점차 용이해지자 본격적으로 연구가 이루어지기 시작하였다. Arora 등<sup>3)</sup>은

†Corresponding author : Department of Environmental Science Catholic University of Daegu  
Tel: 82-53-850-3250, Fax: 82-53-850-3449  
E-mail : kimds@cataegu.ac.kr

미국, 캐나다, 호주에서 설치·운영되고 있는 SBR의 현장을 방문하여 조사한 결과 다양한 처리목적에 맞게 성공적으로 운전되고 있음을 보여준 바 있다. 이 보고서에 나타난 자료에 의하면 하나의 반응기 내에서 호기 조건과 무산소 조건을 조성하여 유기물 뿐 아니라 질소 및 인 성분들의 제거가 가능하다는 것을 보여주고 있으며, 또한 외국의 경우 처리시설을 소규모화하고 분산화시키는 경향이 나타나면서 중소도시 등에서 SBR 공정을 많이 실용화하고 있다.

SBR 공정의 전형적인 운전형태는 유입-반응-침전-배출 및 휴지의 5가지 공정이 1주기로 반복되는 공정으로 하나의 반응기에서 운전이 가능하기 때문에 반응기 용적을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 구조가 단순하여 설비비 및 유지관리비가 적게 소요되는 장점이 있다. 또한 충격부하에 대한 적응력이 좋고, 슬러지 팽화현상이 없으며, 고농도의 MLSS 유지가 가능하다. 무엇보다 모든 단위공정 및 조작을 하나의 반응조에서 시간적으로 배열한 공정으로 포기 또는 교반의 시간 배분을 처리수량 및 목적에 따라 변화시킬 수 있는 융통성을 가지는 장점이 있다.<sup>3,4)</sup>

SBR 공정을 대상으로 한 기존의 연구들은 주로 질소와 인을 동시제거하기 위한 운전형태의 결정, 유기물 및 질소와 인의 부하영향, 인의 대사과정, 슬러지의 침전성 등을 중심으로 고찰되어 왔다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 기존 하수처리장의 활성슬러지를 이용하여, SBR 운전방식을 고정 생물막에 적용시킨 연구를 수행하였다. 고정 생물막 반응기의 경우 지지매체

(media)에 생물막이 형성되므로 부유성 활성슬러지 공정과는 달리 슬러지 팽화현상으로 인한 슬러지 부상이 없으며, 단위체적당 미생물 농도를 높게 유지할 수 있고, 슬러지 자기 산화가 촉진되기 때문에 슬러지 발생량이 적은 장점이 있다.<sup>6)</sup> 또한 소규모 오수처리시설에 적용시켰을 때 구조적 변경없이 생물막을 간단히 설치하여 운전이 용이할 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 유기물과 질소·인의 제거특성을 효과적으로 조사하기 위해 부유 방식의 SBR과 생물막 방식의 SBBR(sequencing batch biofilm reactor)의 2가지 운전 방식으로 실험하였고, 먼저 유기물 제거, 질산화 및 탈질, 인의 방출 및 섭취에 대한 비교 연구를 수행하여 SBBR의 오수처리에 대한 적용 가능성을 평가하였다.

## II. 연구방법

### 1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 반응조는 2개를 설치하여 운전하였는데, 크게 부유상 미생물을 이용하는 SBR공정과 생물막을 도입한 SBBR로 대별할 수 있다. 각 반응조는 5 mm 두께의 투명아크릴로 16×21×25 cm로 제작하여 유입 후 최대 유효 용적을 6 l, 유출 후 최소 유효 용적을 3 l로 하였으며, 1주기를 12시간으로 하여 1일 2주기로 반복 운전하였다. 정량펌프를 사용하여 합성폐수를 초기 30분간 반응기 상부로 주입하고, 포기시 공기펌프를 이용하여 반응기 하부에 설치된 공기 분산기를 통하여 공기를 주입

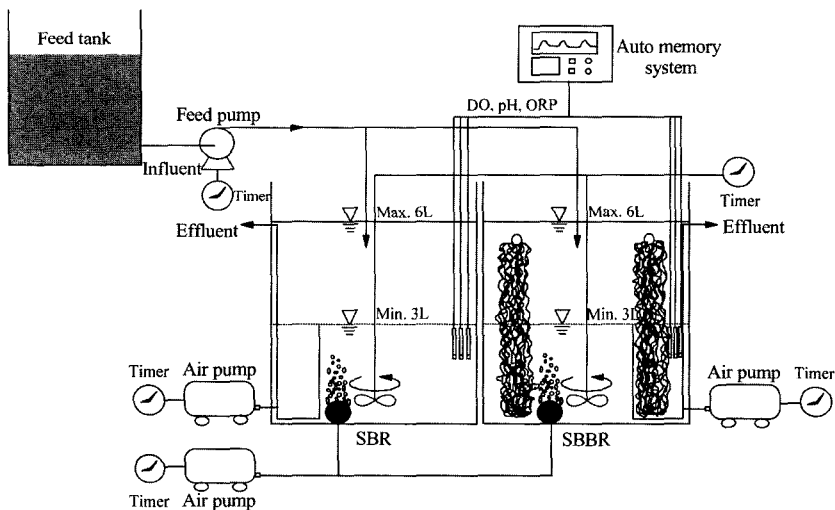


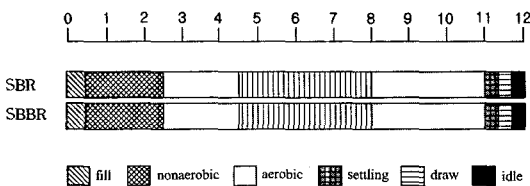
Fig. 1. Schematic diagram of SBR and SBBR system.

**Table 1.** Composition of synthetic wastewater

Compound	Concentration mg/l
Bacto-peptone	74.35
Glucose	79.7
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	50.0
MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	5.00
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2.22
KCl	7.00
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	47.1
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	84.2
NaHCO <sub>3</sub>	556.0
CaCl <sub>2</sub>	3.76

시켰다. 이때 rotameter를 설치하여 공기량을 0.5 l/min으로 일정하게 주입시켜, 포기시 반응기내의 용존산소 농도를 3.5~5.5 mg/l로 유지시켰다. 처리수는 30분간의 침전시간이 지난 다음 소규모 오수처리시설에 응용이 적합한 air-lift 방식으로 유출시켰다. 비포기시 반응기의 혼합을 위해 패들식 교반기를 반응기 상부에 설치하여 약 200~250 rpm으로 교반시켰다. 기질공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은 timer를 이용하여 시간대에 따른 제어가 가능하도록 하였으며, 온도는 온도조절기를 반응기 상부에 설치하여 20±1°C로 일정하게 유지하였다. 슬러지의 식종은 G시 하수처리장의 반송 슬러지를 채취하여 체를 이용하여 협잡물을 제거하고, 2~3일 정도 포기시키면서 슬러지 상부에 발생하는 스크럼(scum)을 완전히 제거한 다음 각 반응기에 MLSS가 3000 mg/l가 되도록 동일하게 주입시켰다. 전체적인 반응기의 SRT는 20~30일 정도 유지되도록 일정 양의 슬러지를 매일 침전시간에 제거하였다. 본 실험에 사용된 합성폐수는 Table 1에 나타난 것과 같이 bacto-peptone 과 glucose를 탄소원으로 사용하였으며, 주요 질소와 인은 각각 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>과 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>에 의해 구성되었으며, 기타 각종 미량원소로 구성되어졌다.

본 실험에 사용된 매디아는 비표면적이 89~223 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>인 polyvinylchloride 재질의 그물상 여재로 5×18×20 cm의 크기로 잘라서 걸보기 용적으로 반응기 용



**Fig. 2.** Operation conditions in SBR and SBBR.

적의 약 20%가 되도록 충전시켰다.

**2. 운전조건 및 방법**

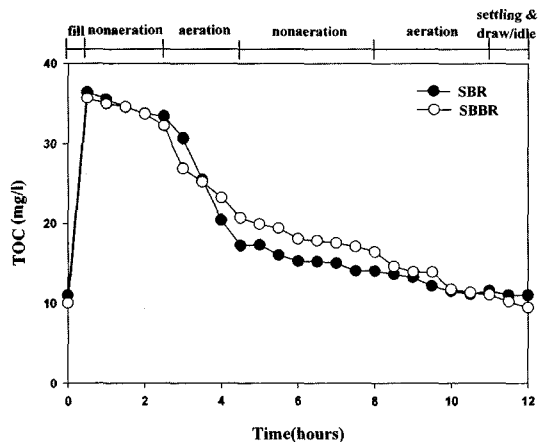
각 공정별 운전시간은 Fig. 2와 같이 운전하였다. SBR과 SBBR에서 운전조건은 동일하게 유지하였고, SBR에는 생물막은 도입시키지 않은 부유 미생물 상태로 운전하였고, SBBR에는 여재를 충전하여 생물막을 형성한 상태에서 운전하여 비교실험을 하였다.

분석은 실험이 90일 정도 경과되어 충분한 질소·인 의 제거를 확인한 다음 이루어졌고, 각 반응기내의 시료 채취는 30분 간격으로 하였으며, 시료 채취 후 즉시 0.2 μm membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 MLSS는 Standard Methods<sup>7)</sup>에 따라 분석하였으며, 유기물의 농도는 TOC를 지표로 하여 TOC Analyzer(Schimadzu, TOC-5000A, Japan)를 이용하여 분석하였다. NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 농도는 Ion chromatography(Metrohm, Ion analysis version 2.0, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. DO, ORP, pH는 실시간 자동 측정기(Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 분석하였다.

**III. 결과 및 고찰**

**1. 생물학적 유기물제거**

Fig. 3은 1 cycle 내의 TOC의 변화를 나타낸 것이다. SBR와 SBBR의 경우 동일하게 30분 동안 합성폐수를 유입시킨 다음, 2시간의 비포기기간 동안 TOC가 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 비포기 기간동안의



**Fig. 3.** Typical profiles of TOC concentration in SBR and SBBR.

유기물의 영향은 인 제거 미생물에 의한 인 방출이 일어나는 혐기성 단계에서 인 제거 미생물의 세포내로 유기물의 흡수 및 저장되는 기작과 함께 무산소 단계에서 일어나는 탈질 반응에 관여하는 탈질화 미생물의 유기물소비에 의한 것이다.<sup>8)</sup> 따라서 비포기상태에서 인 방출과 무산소 상태에서의 탈질 반응이 일어나 반응기내의 유기물을 섭취하여 유기물 농도가 감소한 것으로 판단된다. 또 다른 요인으로는 전 cycle을 거친 미생물들의 체내에 존재하는 유기물은 거의 없어 유입기의 고농도의 유기물과 접촉하게 되면 농도차에 의해서 체내로 유입되거나 세포표면에 유기물이 흡착되는 것으로 생각할 수도 있으나, 그 양은 매우 작을 것으로 추측된다.

SBR의 경우 포기가 시작되면서 TOC의 감소는 급격하게 이루어져 2시간의 포기 기간동안 33 mg/l에서 17 mg/l로 약 16 mg/l가 감소하여 48 mg TOC/h의 제거속도를 나타내었고, 전 cycle동안 TOC가 감소되는 양의 약 70% 가량을 차지하였다. 이는 일반 호기성 종속 영양 미생물(heterotrophic biomass)에 의한 유기물 소비에 의한 것으로 보여진다. 반면에 SBBR의 경우에는 32.5 mg/l에서 21 mg/l로 약 11.5 mg/l가 감소함으로써 제거속도가 34.8 mg TOC/h로 전 cycle동안의 TOC 농

도 감소의 약 45% 가량만이 감소하였다. 이것은 SBR 공정이 SBBR 공정에 비해 미생물이 부유됨으로써 유기물에 대한 미생물의 접촉기회에 있어서 우위를 차지하고 있기 때문인 것으로 생각된다.

또한, 이 결과로부터 비포기 상태에서 유기물의 제거가 많이 발생하지 못하고 포기 상태에서 유기물의 제거가 활발하게 일어나는 것으로 보아 90일 정도의 적응기간으로는 일부 질소와 인을 제거하는 미생물의 출현을 간접적으로 인식할 수는 있었으나 여전히 호기성 종속 영양 미생물들이 우점종을 차지하고 있어, 질소와 인을 제거하는 미생물들의 활동이 활발하지 못하였고 보다 긴 적응기간이 필요한 것으로 판단되었다.

SBR의 경우 2차 비포기 기간에서도 마찬가지로 유기물이 계속적으로 감소하는데 그 제거속도는 전 단계인 포기기간의 48 mg TOC/h와 비교해 볼 때 약 5 mg TOC/h로 매우 낮게 나타났다. SBBR의 경우에서도 마찬가지로 포기 기간의 34.5 mg TOC/h의 감소속도도 비해 약 매우 낮은 8.5 mg TOC/h로 나타났다. 이 기간동안에는 주로 탈질반응이 일어나므로 호기 상태의 종속 영양 미생물들에 비해 성장속도가 느린 탈질화 미생물들에 의해 유기물이 소모되기 때문으로 생각된다.

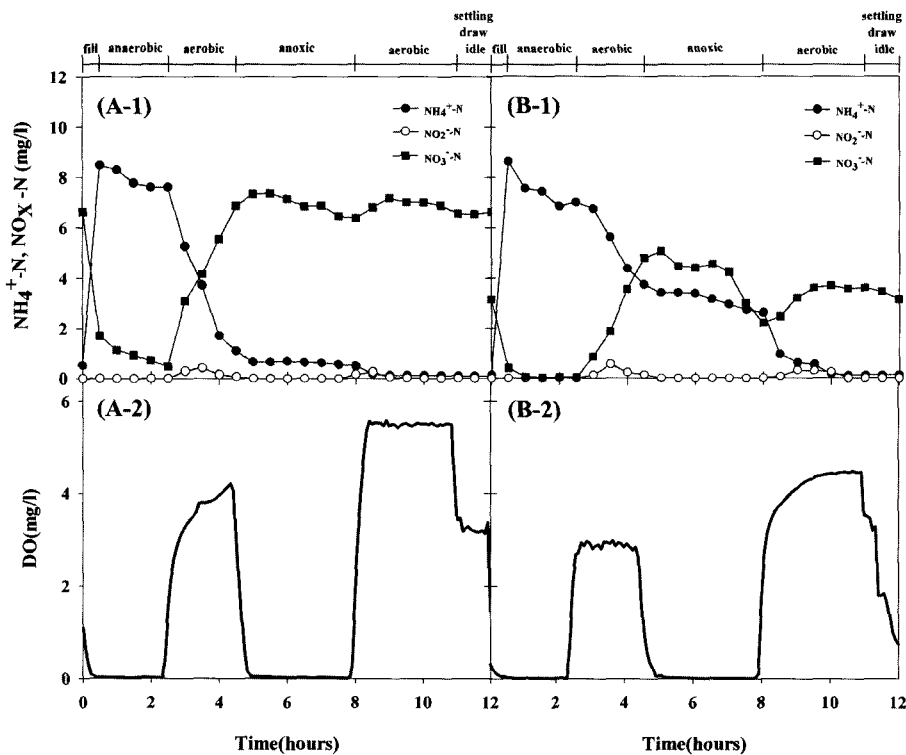


Fig. 4. Typical profiles of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and DO concentrations in SBR and SBBR.

그러나 SBR 공정에 비해 SBBR에서 유기물 소모속도가 보다 크게 나타남으로써 탈질화에 따른 유기물의 이동이 많은 것으로 생각된다.

마지막 포기기간에는 유기물의 제거속도가 SBR공정에서 5 mg TOC/h, SBBR 공정에서 10 mg TOC/h로 1단계의 포기기간의 유기물 제거속도와 비교해 보았을 때 매우 낮게 나타났다. 이는 전단계의 포기기간과 비포기 기간을 거치면서 미생물들에 의해 소모되기 쉬운 유기물 형태는 거의 모두 탈질화나 인 섭취에 이용되거나 종속영양 미생물에 의해 소모되고, 섭취하기 어려운 유기물 형태가 남아 미생물들에 의한 제거가 거의 일어나지 않은 것으로 생각된다. 전체적인 유기물 제거 효율은 SBR과 SBBR 모두 약 83%로 나타났다.

## 2. 생물학적 질소제거

1 cycle에 걸쳐 질산화 반응 및 탈질화 반응이 일어나는 대표적인 과정을 Fig. 4에 나타내었다. 유입기간 30분 동안에는 비포기 상태로 유지하였으며, SBR과 SBBR의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 변화를 살펴보면 유입기간동안 유입수에 의해 모두 약 8.5 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 로 농도가 급격히 상승하게 된다. SBR의 경우 초기 비포기 기간 동안  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거속도는 약 2.4 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/h}$ 로 나타났다. 이는  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 를 세포내 조직의 성장을 위한 동화작용에 이용한 것으로 생각된다. SBBR에서는 약 5.7 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/h}$ 의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  제거속도를 나타내어, SBR과 비교해 볼 때 약 2배 이상의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거속도를 나타내었다.

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 경우 유입수내에  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 거의 없기 때문에 유입기간동안 반응기 내 남아있는  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 희석 효과가 나타난다. 유입기간 30분동안 SBR은 1.7 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N/L}$ , SBBR은 0.2 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N/L}$ 로  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도가 감소하는데, 이는 순수한 희석효과에 의한 질산성 질소 농도 값인 SBR의 3.5 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N/L}$ 와 SBBR의 1.5 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N/L}$ 보다 더 낮은 값이다. 이것은 유입 기간동안에도 탈질화 반응이 일어났기 때문인 것으로 판단된다.

포기 기간동안 SBR과 SBBR 모두 원활한 질산화 반응을 보였는데, 포기가 시작되면서  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 가 증가되기 시작하여 1시간만에 최대 지점(0.7-0.8 mg  $\text{NO}_2^-\text{-N/L}$ )에 도달한 다음 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 SBR과 SBBR의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 로의 전환(생성)속도를 비교해 볼 때, SBR의 질산화 속도 19.8 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 가 SBBR의 질산화 속도 9.9 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 에 비해 2배 이상 정도 큰 것을 알 수 있는데, 이는 SBR이 SBBR에 비해 유기물과 용존산소의 접촉에 있어 훨씬

유리한 조건에 있기 때문인 것으로 판단된다.

SBR에서 1차 포기 기간동안의 DO 변화는 최대 4 mg/l로 상승했으며, 초기 30분 동안 DO 3.3 mg/l로 빠르게 상승하다가, 1시간 30분 동안에는 약 1 mg/l만 상승하는데 그쳤다. 이는 포기기간 초기에 질산화 미생물의 활발한 활동과 호기성 종속영양 미생물의 DO소비에서 비롯된 것으로 보여진다(Fig. 4(A-2)). 반면에 SBBR에서의 DO 변화는 SBR의 경우와는 달리 초기부터 약 3 mg/l 농도로 일정하게 유지되고 있다(Fig. 4(B-2)). 이 기간동안 DO의 증가경향이 다른 것은 SBR에서는 유기물을 소모하는 종속영양 미생물의 활동과 질산화 미생물의 활동에 의해 용존 산소의 소모가 많아 DO의 증가가 SBBR에 비해 완만한 것으로 판단되었다.

2시간의 포기가 끝난 후 SBR과 SBBR내의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 각각 1.0 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 와 3.5 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 로 나타났고,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 6.7 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 와 4.7 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 로 나타났다.

포기 기간이 끝난 다음, 30분간의 비포기 기간동안 SBR과 SBBR 모두 약 0.5 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N/L}$ 의  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도의 추가적인 증가가 나타났는데, 이는 반응기 내에 남아있는 용존산소를 질산화 미생물들이 소비하면서 질산화 반응이 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 이것은 포기기간이 끝난 후, 비포기 시작 약 30분 뒤에 용존산소가 0 mg/l로 감소하는 것으로 확인할 수 있었다. Glass 등<sup>9)</sup>과 Glass와 Silverstein<sup>10)</sup>은 탈질 반응시 질산성 질소와 산소가 동시에 공존하는 경우에 산소를 먼저 전자수용체로 이용하고 그 이후부터 결합산소인 질산성 질소나 아질산성 질소 혹은 황산염 등을 전자수용체로 이용하며, 일반적으로 DO 농도가 0.2 mg/l 이상에서는 탈질이 저해된다고 보고한 바 있다. 비포기가 시작된 후 약 30분이 경과되면 SBR의 경우 DO 농도가 완전한 0 mg/l로 떨어져 탈질반응이 시작된다. 반면에 SBBR의 경우 전 비포기기간 동안에 DO농도는 완전히 0 mg/l로 떨어지지 않고 0.01~0.3 mg/l로 유지되었다. SBR의 경우 미생물 접촉기회와 용존산소 투과율이 생물막을 이용한 SBBR보다 상대적으로 높게 유지된다. 그러므로 유기물과 용존산소의 접촉기회에 있어 훨씬 유리한 조건을 가지게 되며 결과적으로 용존산소 및 유기물의 소비속도가 빠르다. 그 반면에 SBBR의 경우에는 생물막 내부까지 용존산소가 투과하지 못하고 생물막 외부 미생물들에 의해서만 용존산소를 소비하게 되므로써 용존산소는 완전한 0 mg/l까지 떨어지지 못하는 것으로 생각된다. 그러나 비포기 기간 동안의 탈질속도에 있어서 SBR은 7.5~6.5 mg  $\text{NO}_3^-\text{-N}$

$N_{\text{removed}}/L \cdot h$ , SBBR은  $0.77 \text{ mgNO}_3^- \cdot N_{\text{removed}}/L \cdot h$ 로 SBBR이 상대적으로 높은 용존산소의 조건임에도 불구하고 오히려 SBR에 비해 보다 더 높은 탈질속도를 나타낸다. 이것은 더 높은 용존산소의 농도에도 불구하고 저해를 받지 않고 탈질을 기대할 수 있는 생물막의 큰 장점으로 보여진다. SBBR의 생물막 외부는 일부 용존산소가 잔존하고 있다하더라도 생물막 내부는 완전히 용존산소가 없는 상태를 유지하고 있고, 또한 생물막 내부는 내호흡에 따른 세포분해로부터 발생하는 유기탄소를 직접적으로 탈질화에 이용할 수 있으므로 탈질화 효율이 보다 증가된 것으로 생각된다. SBR의 경우 비포기 기간동안 잔존하는 TOC의 농도 범위는 12~17 mg TOC/L로서 약 3 mg TOC/L의 TOC 감소가 발생하였고 SBR의 경우에는 15~20 mg TOC/L로서 약 5 mg TOC/L의 TOC 감소가 발생하였다. 전체적으로 TOC의 농도는 SBBR이 SBR에 비해 높게 유지되었으나 비포기 기간동안 제거된 TOC의 양은 그다지 큰 차이가 없었다. 그러므로 이 기간동안의  $\text{NO}_3^- \cdot N$  변화가 단순히 외부 유기탄소원 농도의 차이에 기인하는 것은 아니라는 것을 판단할 수 있었다. 특히, SBBR의 경우에는 2차 비포기 후반에서  $\text{NO}_3^- \cdot N$ 의 변화가 많이 일어나 탈질화가 원활히 이루어졌다. 따라서 탈질화를 촉진시키기 위해서는 2차 비포기 기간의 연장이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

2차 포기 기간동안에는 잔류된  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 의 질산화반응이 일어났다. 이 기간에 일어나는 질산화 속도는 SBR과 SBBR 각각 1.2, 6.9 mg  $\text{NH}_4^+ \cdot N/h$ 로 1차 포기기간의 질산화속도 19.8, 9.9 mg  $\text{NH}_4^+ \cdot N/h$ 보다 매우 낮게 나타났고 전체적으로 SBBR의 질산화 속도가 SBR에 비해 높은 것으로 나타났는데, 이는 1차 포기 기간에 비해 2차 포기 기간중 반응기내에 잔존하는 전체  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 의 농도가 낮고, SBBR의 경우 SBR보다 상대적으로  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 의 농도가 높기 때문에 SBR보다 높은 질산화속도를 보인 것으로 판단된다.

SBR의 DO 변화에 있어서 DO 최대 상승 농도가 1차 포기기간보다 높은 약 5.7 mg/l로 나타났는데, 이는 낮은  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 의 농도로 질산화반응이 적게 일어나고 호기성 종속영양 미생물의 활동도 적었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 SBBR에서도 나타났는데, 1차 포기기간보다 2차 포기기간의 질산화 속도는 감소하였으나 오히려 DO의 최대 상승농도는 약 4.5 mg/l로 높게 나타났다. 이러한 현상으로 봤을 때, 질산화 속도가 증가함에 따라 DO도 동시에 증가하는 것으로 보이며, 이는 SBR과 SBBR 모두에서 공통적으로 나타났다. 그러나 SBR과 SBBR에서 DO의 최대값이 다르게 나타

나는 것은 rotameter나 공기분산기의 상태에 따른 실험적인 오차인 것으로 생각된다.

SBR과 SBBR을 비교해 볼 때, SBBR의 경우 2차 비포기 기간과 2차 포기 기간을 거친 후 마지막 침전 기간에 약간의  $\text{NO}_3^- \cdot N$  감소가 일어나는 것으로 보아 탈질화 반응이 진행되고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 이처럼 부족한 유기물의 조건에서도 탈질화 반응이 일어난 것은 생물막에서만 볼 수 있는 특이한 현상이라고 할 수 있다. 생물막내에서 생물막 바깥쪽에 서식하는 성장 속도가 빠른 일반 종속영양 미생물에 의해 유기물과 용존산소가 우선적으로 소비되면 상대적으로 생물막 안쪽의 미생물들의 유기물과 용존산소가 부족한 상태가 되어 세포분해(cell lysis)등에 의하여 세포내 미생물이 용출되는 현상이 일어난다.<sup>11)</sup> 이 세포분해현상으로 인해 발생하는 유기물을 탈질화 반응과 인 섭취 반응에 소모된 것으로 사료된다. 전 주기동안에 SBR과 SBBR 모두  $\text{NO}_2^- \cdot N$ 의 축적은 발견되지 않았다. 전체적인  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 의 제거효율은 SBR과 SBBR 모두 95% 이상의 높은 제거효율을 나타냈으나, 탈질화 반응은 SBBR이 SBR에 비해 높게 나타났다. SBR은 유기탄소원의 부족에 의해 탈질화 반응이 제대로 발생하지 못하여 최종 유출수의  $\text{NO}_3^- \cdot N$ 의 농도가 7 mg  $\text{NO}_3^- \cdot N/L$ 로 나타났으나,  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 와  $\text{NO}_2^- \cdot N$ 는 거의 검출되지 않았다. 그러나 SBBR의 내생호흡에 의한 유기탄소원 공급으로 인해 탈질화 반응이 적절하게 발생하여 유출수의  $\text{NO}_3^- \cdot N$ 의 농도는 3 mg  $\text{NO}_3^- \cdot N/L$ 로 SBR에 비해 낮게 나타났고,  $\text{NH}_4^+ \cdot N$ 와  $\text{NO}_2^- \cdot N$ 는 SBR과 마찬가지로 거의 검출되지 않았다.

### 3. 생물학적 인 제거

인 제거 미생물은 혐기조건에서 인의 방출을 통하여 섭취된 유기물질을 PHB(polyhydroxybutyrate)와 같은 저장물질로 전환하였다가, 호기조건으로 바뀌면 저장된 PHB를 산화하여 ATP를 생성하는 경로를 경유하고, 이때 방출된 인을 제거하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 5는 1 주기동안의  $\text{PO}_4^{3-} \cdot P$  농도 변화를 나타낸 것이다. SBR의 경우  $\text{PO}_4^{3-} \cdot P$  제거 기작이 생물막으로 구성된 SBBR과 뚜렷한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 전체적으로 전 운전기간 동안 거의 변화를 보이지 않는 SBR에 비해 SBBR의 경우 조건에 따라 변화를 보이고 있다.

전반적인 인 제거 거동은 SBR과 SBBR 모두에서 원활하지 못하여 인의 제거효율은 매우 낮았는데, 이는 인 제거 미생물들이 질산화 및 탈질화 미생물들에 비해 적응 능력이 떨어져 인 방출 및 섭취 활동이 잘 일

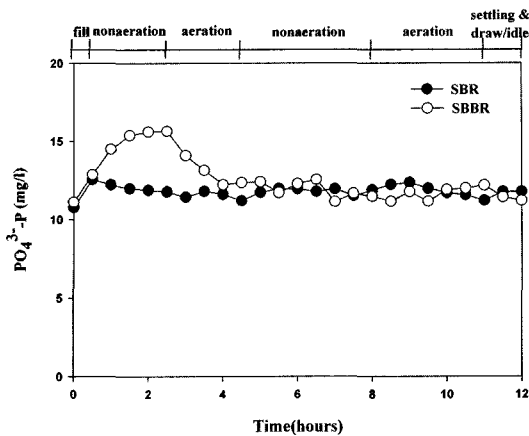


Fig. 5. Typical profiles of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentration in SBR and SBBR.

어나지 않은 것으로 판단된다. 그러므로 인 제거 미생물들의 보다 활발한 활동을 위해서는 적용기간을 늘리는 것과 같은 다양한 방법이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

1차 비포기 기간동안 SBR과 SBBR을 비교해 보면 SBR은  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 변화가 거의 없는 반면에, SBBR의 경우 약  $12.5 \text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P/L}$ 에서  $15.5 \text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P/L}$ 로 인의 농도가 증가하는 인 방출이 발생했다. 이것은 SBR의 경우  $\text{NO}_3^-$  농도에 있어 유입기간 후에도  $\text{NO}_3^-$ -N가 약  $2 \text{ mg/l}$  정도가 잔존하고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 반면에 SBBR의 경우 유입기간에서  $\text{NO}_3^-$ -N가 거의  $0 \text{ mg/l}$ 로 감소하여 1차 비포기 기간 동안의  $\text{NO}_3^-$ 에 의한 인 방출의 저해작용이 없었기 때문인 것으로 생각된다(Fig. 4).  $\text{NO}_3^-$ 이나  $\text{NO}_2^-$ 가 존재하는 무산소 상태에서 *Acinetobacter* 등과 같은 인 제거 미생물들은 인 방출에 있어서 크게 저해받는 것으로 알려져 있다. EBPR(enhanced biological phosphorus removal)시스템에서  $\text{NO}_3^-$  영향에 대해서는 아직 일치하지 않고 있지만, 혐기성 반응조에서는  $\text{NO}_3^-$ 의 유입이 인 제거 공정에 저해 역할을 한다고 받아들여지고 있다. Hascoet 등<sup>5)</sup>은 단쇄 지방산이 주입되고  $\text{NO}_3^-$ 이 존재하는 무산소 조건에서 초기  $\text{NO}_3^-$  농도가 높음에 따라  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 방출 속도는 작아져서 전체적인  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 방출량이 감소함을 관찰하였다. 이와 같이 초기  $\text{NO}_3^-$ 의 농도가 높음에 따라  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  방출의 감소는 탈질화 미생물에 의해 소비되는 유기물량이 많아져서 인 제거 미생물들이 인 방출을 위해 유기물을 제대로 이용하지 못했을 뿐만 아니라  $\text{NO}_3^-$ 를 전자수용체로 하여 오히려  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 섭취가 일어나기 때문이라고 설명할 수 있다. 또한

Kern-Jespersen과 Henze<sup>12)</sup>는  $\text{NO}_3^-$ 을 전자 수용체로 이용가능한 미생물에 의한  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 섭취와  $\text{NO}_3^-$ 을 전자수용체로 이용할 수 없는 미생물에 의한  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  방출의 차이로  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 섭취 또는 방출이 결정되는 것으로 판단하였다. SBBR의 경우 포기시  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 과잉 섭취가 발생하였으며 포기 마지막 단계에서  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  농도는  $12 \text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P/L}$ 로 나타났다. 이 기간동안 TOC 변화도 SBBR에 비해 큰 것으로 나타났으나, 그 차이는 그다지 크지 않고, 오히려 내생호흡에 의한 유기탄소원 공급량이 보다 많았던 것으로 판단된다.

2차 비포기기간과 포기기간동안 SBR과 SBBR 모두  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 방출과 섭취 반응이 일어나지 않았다. 이것은 유입시에 비해  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  방출에 필요한 유기물이 앞 단계에서 대부분 소비되어  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  방출에 필요한 유기물이 부족하였을 뿐만 아니라, 비포기 기간중 높은  $\text{NO}_3^-$ 의 존재로 인한 저해작용에 기인한 것으로 추측된다.

#### IV. 결 론

기존의 부유성 활성슬러지를 이용하는 SBR 운전방식에 고정식 생물막을 적용시킨 SBBR의 오수처리에 대한 적용가능성을 조사하기 위하여 기존의 SBR과 새로운 SBBR 내에서 유기물 및 질소·인에 대한 비교 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대부분의 유기물은 포기기간에 소비되었는데, 이는 일반 중속영양 미생물에 의한 유기물의 소비에 의한 것으로 생각되며, 중속영양미생물의 활동을 억제하여 이 유기물을 탈질화 미생물과 인 제거 미생물이 이용할 수 있는 방안을 연구할 필요성을 인식하게 되었다.

2. SBBR의 경우 부족한 유기물 조건에서도 원활한 탈질화 반응이 일어난 것을 볼 때, 유기물 농도가 낮은 우리나라의 하수에 적합한 공정으로 생각된다.

3. 질산화 속도에 있어서는 유기물과 용존산소의 접촉기회에 있어 유리한 조건을 가진 SBR이 더 크게 나타났다. 그러나 탈질화 반응에 있어서는 SBBR이 더 높은 것으로 나타났는데, 이는 생물막 내부에 존재하는 미생물들이 유기물과 용존산소가 부족한 상태에서 세포분해에 따른 세포내 유기물의 용출 현상으로 발생하는 유기물을 탈질화 반응과 인 섭취에 이용하였기 때문인 것으로 판단된다.

4. SBR의 경우 높은  $\text{NO}_3^-$ 의 존재로 인해 1차 비포기 기간중 인의 방출은 거의 발생하지 않았으나, SBBR의 경우 1차 비포기 기간에 인 방출과 1차 포기 기간에 인 섭취가 일어났다. 그러나 유기물의 부족과

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 저해작용으로 2차 비포기 기간과 2차 포기기간에서는 인 방출과 섭취가 발생하지 않았다. 그러므로 인의 방출과 섭취를 증진시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 2004학년도 대구가톨릭대학교 일반연구비 지원에 의한 연구이며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 환경부 : 환경백서, 2001.
2. Arora, M. L., Barch, E. F. and Umphres, M. B. : Technology evaluation of sequencing batch reactor. *J. WPCF*, **57**(8), 867-875, 1985.
3. 이태진, 안수정 : Pilot Scale 연속회분식 반응장치에서 내부순환에 따른 영양염류 제거 효율에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **24**(7), 1283-1290, 2002.
4. 문병현, 윤조희, 서규태, 김상수 : SBR에서 염분농도와 C/N비가 오염물질의 제거에 미치는 영향. *대한환경공학회지*, **24**(2), 251-260, 2002.
5. Hascoet, M. C., Florentz, M. and Granger, P. : Biochemical aspects of enhanced biological phosphorus removal from wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, **17**, 23-41, 1985.
6. 김동석 : 유기성 폐수처리를 위한 역 유동층 생물막 반응기의 연구. 부산대학교박사학위논문, 1994.
7. APHA, AWWA and WPCF : Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th, 1992.
8. 민경국, 원성연, 이상일 : 생물학적 인 방출시 유기물 및 질산염에 대한 영향. *대한환경공학회지*, **22**(1), 141-148, 2000.
9. Glass, C., Silverstein, J. and Oh, J. : Inhibition of denitrification in activated sludge by nitrite. *J. Wat. Env. Res.*, **69**(6), 1086-1093, 1997.
10. Glass, C. and Silverstein, J. : Denitrification kinetics of high nitrate concentration water : pH effect on inhibition and nitrite accumulation. *J. Wat. Res.*, **32**(3), 831-839, 1998.
11. Okabe, S., Hirata, K. and Watanabe, Y. : Dynamic change in spatial microbial distribution in mixed population biofilm : experimental result and model simulation. *Wat. Sci. Tech.*, **32**(8), 67-74, 1995.
12. Kern-Jespersen, J. P. and Henze, M. : Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition. *Wat. Res.*, **27**(4), 617-624, 1993.