

SBR과 SBBR에서 유입 인 농도 감소에 따른 인과 질소의 제거 특성 변화

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과 · ¹⁾대구대학교 보건과학부
(2010년 1월 18일 접수; 2010년 2월 11일 수정; 2010년 2월 23일 채택)

Variation of Phosphorus and Nitrogen Removal Characteristics According to the Decrease of Influent Phosphorus Concentration in SBR and SBBR

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park^{1)*}

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

¹⁾Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea

(Manuscript received 18 January, 2009; revised 11 February, 2010; accepted 23 February, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of influent phosphorus concentration on the nitrogen and phosphorus removal in sequencing batch reactor(SBR) and sequencing batch biofilm reactors(SBBRs) in order to recover the enhanced biological phosphorus removal (EBPR) capacity at the sludge of the deterioration of EBPR capacity. In SBBRs, comparing to SBR, the organic removal was occurred actively at the 1st non-aeration period because of the active phosphorus release at this period. However, the variation of TOC removal according to the decrease of influent phosphorus concentration was not clearly shown both in SBR and SBBRs. In case of SBR losing EBPR capacity, the EBPR capacity was not recovered by the decrease of the influent phosphorus concentration from 7.5 mg/L to 0.9 mg/L. The nitrogen removal increased by the decrease of influent phosphorus concentration both in SBR and SBBRs.

Key Words : Phosphorus removal, Influent phosphorus concentration, SBR, SBBR

1. 서 론

수중의 질소와 인을 제거하기 위하여 물리화학적 방법과 생물학적 방법이 많이 사용되고 있다. 물리화학적 방법으로 암모니아 탈기, 염소 산화, 이온 교환 등의 방법이 질소 제거에 이용되고 있으나, 생물학적

방법이 질소 제거에 있어 보다 경제적이고 효과적인 것으로 알려져 있다(EPA, 1993). 인 처리의 경우에는 화학 첨가제를 이용하는 물리화학적 방법이 이용되고 있는데, 이 방법은 과다한 약품비와 다량의 슬러지 발생에 따른 처리가 문제점으로 지적되고 있다. 그러므로 수중의 질소와 인을 동시에 제거하기 위한 적절한 방법은 생물학적 처리로 인식되고 있다.

생물학적 질소 제거는 유입 하수 중의 암모니아와 유기 질소가 일정 조건하에서 질산화 과정(nitrification)과 탈질화 과정(denitrification)을 통하여 완전한 치

*Corresponding Author : Young-Seek Park, Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea
Phone: +82-53-650-8043
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

리가 가능하다. 최근 들어 새롭고 경제적인 생물학적 질소 제거 공정으로 partial nitri-tation, nitrifier denitrification, anaerobic ammonium oxidation (Anammox) 등이 개발되었으며, aerobic denitrification, lithoautotrophic denitrification, combined autotrophic nitrogen removal에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다(Anh, 2006).

생물학적 인 제거 시스템으로 명명되는 EBPR (enhanced biological phosphorus removal) 공정은 여러 가지 이유로 인하여 악화되는 것으로 알려져 있는데, 가장 대표적인 예들은 유입 기질의 종류(Carucci 등, 1999; Jeon 등, 2001), 과포기(Brdjanovic 등, 1997) 및 협가-호기시간의 부적절한 배분으로 알려져 있고(Matsuo, 1994; Wang, 2001) 이러한 운전 조건이 형성되면 PAOs(phosphorus accumulating organisms)와 경쟁 관계에 놓이는 GAOs(glycogen accumulating organisms)가 과다 번식하기 때문이다.

EBPR 공정의 악화에 관한 연구는 비교적 많이 수행되고 있으나, 악화된 EBPR 공정의 회복에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 악화된 EBPR 공정을 회복하기 위한 연구의 일환으로 SBR(sequencing batch reactor)과 SBBR (sequencing batch biofilm reactor)에서 인 부하를 감소시키기 위하여 유입되는 인의 농도를 감소시키면서 질소와 인 제거 거동을 살펴보았다.

SBR은 소규모 오수처리 시설에 매우 적합한 공정으로 알려져 있고, SBBR은 SBR에 생물막 공정을 도입한 공정으로서 적은 슬러지 발생량과 간편한 반응기 설계로 인하여 많은 장점이 있는 것으로 알려져 있어(White 등, 2000; Zhang 등, 2006), 질소와 인 동시 제거 공정을 관찰하기에는 가장 적합한 것으로 판단되며, 본 연구에서는 SBR과 SBBR의 비교 관찰과 동시에 SBBR에서 1차와 2차 비포기 기간의 변화에 따른 질소와 인 제거 거동의 변화를 함께 관찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 1조의 SBR과 3조의 SBBR을 설치하여 운전하였는데, 크게

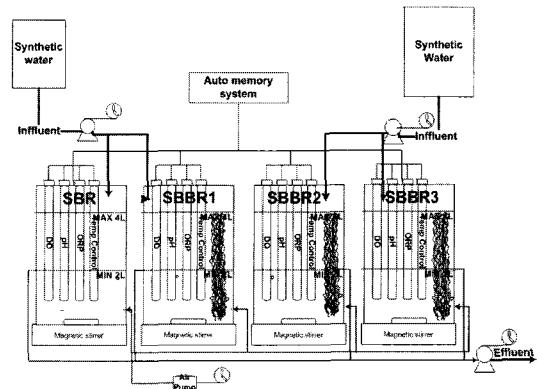


Fig. 1. Schematic diagram of SBR and SBBRs.

비포기-포기-비포기의 3단계 반응으로 구성하였다. 각 반응조는 $15 \times 15 \times 25$ cm³로 제작하여, 반응조 내에 폐수를 유입한 후 최대 유효 용적을 4 L로 하였고, 처리수를 유출한 후 최소 용적을 2 L로 하였다. 전체 운전 주기는 12시간으로 하여 1일 2주기로 반복 운전하였다.

SBBR에 사용된 여재는 polyethylene 재질로서 비표면적이 $3.0 \sim 7.0 \times 10^4$ m²/m³이며, 공극율이 0.93인 수세미 형태로써, $0.5 \times 2 \times 20$ cm인 크기로 잘라 겉보기 용적으로 반응기 최대 유효용적의 약 25%가 되도록 동일하게 충진시켰다.

폐수는 정량펌프를 이용하여 반응기 상부에서 매주기마다 2 L씩 유입시켰으며, 처리수는 침전시간 30분 후 정량펌프를 이용하여 최대 유효 용적의 50%인 2 L를 유출시켰다. 비포기시 반응기 내의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석교반기를 설치하여 약 100~150 rpm으로 교반시켰다. 포기시 공기 펌프를 이용하여 반응기 하부에 설치된 환형 공기 분산기를 통하여 공기를 주입시켰으며, rotameter를 설치하여 공기 주입량을 0.5 L/min로 유지하였다. 기질 공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은 timer를 이용하여 제어하였으며, 온도조절기를 반응기에 설치하여 반응기 내부의 온도를 20 ± 1 °C로 일정하게 유지하였다. 슬러지의 식종은 유기물 처리가 목적인 G시 하수처리장의 반송 슬러지를 채취하여 35 mesh의 체를 이용하여 협잡물을 제거하고, 2~3일 정도 포기시키면서 슬러지 상부에 발생되는 스cum(scum)을 완전히 제거하였다.

거한 다음, 3~4차례의 수세과정을 거친 후, 포기시 MLSS가 2,500~3,000 mg/L가 되도록 각 반응기에 동일하게 주입시켰다. 전체적인 반응기의 슬러지 체류 시간(sludge residence time, SRT)은 20~30 일 정도로 유지하기 위해 일정 양의 슬러지를 매일 침전 시간 직전에 제거하였다.

본 실험에 사용된 합성폐수는 Table 1에 나타난 것과 같이 탄소원은 glucose, 질소원은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 인원은 K_2HPO_4 이며, 기타 각종 미량원소를 첨가하였다.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Compound	Concentration, mg/L
Glucose	500
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50.0
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	55.0
$\text{FeSO}_4 \cdot 7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.22
KCl	7.00
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	47.1
K_2HPO_4	13.7
NaHCO_3	300
CaCl_2	3.76

2.2. 실험 방법

각 공정별 운전조건은 다음과 같다. 1주기는 12시간으로 하였으며, 전체적인 구성은 Table 2와 같이 배분하였다. 전체적인 비포기-포기에 소요되는 시간은 10시간 30분이고, 비포기에 7시간을 할당하였고 포기 시간은 3시간 30분이 되도록 하여 비포기와 포기 시간 배분이 약 2:1이 되도록 하였다.

분석은 실험이 각 유입 유기물 농도에서 의사 정상

상태(pseudo steady state)에 도달한 다음 이루어졌고, 각 반응기내의 시료 채취는 30분 또는 1시간 간격으로 하였으며, 시료 채취 후 즉시 0.22 μm membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다.

NH_4^+ -N과 MLSS는 Standard Methods(APHA, AWWA, WEF, 1992)에 따라 분석하였으며, 유기물의 농도는 TOC를 지표로 하여 TOC Analyzer (Schimadzu, TOC-5000A, Japan)를 이용하여 분석하였다. NO_2^- -N, NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P의 농도는 ion chromatography (Metrohm, Ion analysis version 2.0, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. pH, DO 농도, ORP는 실시간 자동 측정기(Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 분석하였다.

유입되는 폐수 중의 PO_4^{3-} -P농도는 실험 목적에 따라 약 7.5 mg/L, 3.8 mg/L, 1.9 mg/L 및 0.9 mg/L로 변화시키면서 실험하였고, NH_4^+ -N 농도는 30 mg/L, TOC 농도는 200 mg/L로 일정하게 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. TOC 농도 변화

본 실험에 사용된 슬러지는 다음과 같은 특성을 가지고 있었다. 과도한 NH_4^+ -N의 유입에 따라 pH가 감소하였고, 그에 따라 인 제거 미생물이 가장 큰 충격을 받아 SBR에서는 인 제거 능력을 거의 상실하였고, SBBR에서는 인 제거 능력을 그대로 유지하였(Kim 등, 2008). 그러므로 본 연구에서는 SBR과 같이 인 제거 능력을 상실한 슬러지의 인 제거능을 회복시키기 위하여 1차적으로 인의 부하를 감소시키면서 실험하였다.

Table 2. Operation time schedule in SBRs

Influent	1st non-aeration	Aeration	2nd non-aeration	Settle	Draw	Idle
SBR	3.5 h		3.5 h			
SBBR1	0.5 h	3.5 h	3.5 h	0.5 h	0.5 h	0.5 h
SBBR2		2.0 h	5.5 h			
SBBR3		5.0 h	2.0 h			

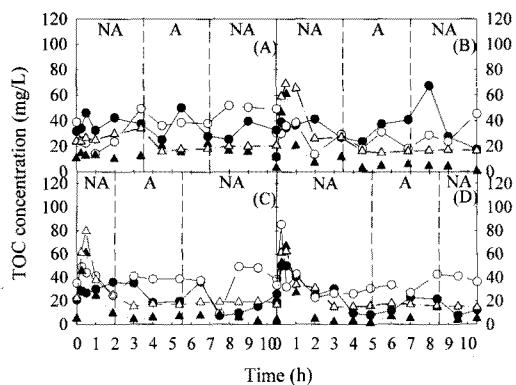


Fig. 2. Typical variation of TOC concentration according to the decrease of influent phosphorus concentration (\bullet 7.5 mg/L, \circ 3.8 mg/L, \blacktriangle 1.9 mg/L, \triangle 0.9 mg/L) in SBR (A) and SBBRs (B, C, D). (NA : non-aeration, A : aeration)

유입되는 합성폐수 중 PO_4^{3-} -P를 제외한 다른 성분의 농도는 일정하게 고정한 상태에서, 유입 PO_4^{3-} -P의 농도를 초기 7.5 mg/L에서 3.8 mg/L, 1.9 mg/L, 0.9 mg/L로 감소시키면서 TOC 농도 변화를 관찰하였다(Fig. 2).

SBR의 경우(Fig. 2(A)), SBBR들의 경우와 달리 초기 1차 비포기 구간에서 유기물의 급격한 감소가 관찰되지 않았는데, 그 이유는 인 제거 미생물에 의한 유기물 소모가 거의 없었기 때문인 것으로 판단된다. 인 제거가 원활하게 발생될수록 초기 비포기 구간에서 급격한 유기물의 감소가 관찰되는 것으로 보고되고 있다(박 등, 2007). 유입 인 농도가 7.5 mg/L 와 3.8 mg/L로 비교적 높은 상태에서는 유입 TOC 농도 120 mg/L에서 유기물의 제거 효율이 60~70%에 불과하였으나, 유입 인 농도를 1.9 mg/L 이하로 감소시킴에 따라 전 공정내의 TOC 농도는 감소하여 최종 TOC 제거효율은 80~90%로 나타났다.

본 연구에서는 인의 제거도 원활하지 못하고 전 주기에서 미처리된 NO_3^- -N의 농도도 그다지 높지 않아 인 제거 미생물과 탈질화 미생물에 의한 유기물 소모보다는 일반적인 종속영양 미생물 (ordinary heterotrophic organisms, OHOS)에 의한 유기물 소모로 보는 것이 적절한 것으로 판단된다.

SBBR들(Fig. 2(B),(C),(D))의 경우에는 1차 비

포기 단계에서 뚜렷한 유기물 제거 현상이 관찰되었는데, 이는 전 주기 중 미처리된 NO_3^- -N가 거의 존재하지 않으므로(Fig. 5(B), Fig. 6) 탈질화에 의한 유기물 소모로 볼 수는 없었다. 또한 Fig. 3(B)와 Fig. 4를 볼 때 1차 비포기 단계에서 인의 방출이 원활하게 발생되는 것을 관찰할 수 있으므로, SBBR의 1차 비포기 단계에서 발생되는 유기물 제거는 인의 방출을 위해 소모된 유기물량으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다. 포기 단계나 2차 비포기 단계에서는 약간의 유기물 변화가 있기는 하였으나, 전체적으로 볼 때 큰 유기물의 변화는 발생되지 않았다.

또한, 인의 농도를 변화시키면서 TOC 농도 변화를 관찰한 결과, SBBR들 모두에서 인의 농도가 1.9 mg/L 정도일 때 TOC 제거 효과가 가장 높은 것을 볼 수 있었다.

SBBR에서 1차 비포기 기간의 변경에 따라 TOC 제거 특성은 약간의 차이를 나타내었으나 그 차이는 크지 않았다. 유입 인 농도가 1.9 mg/L일 때, 1차 비포기 기간이 5시간으로 가장 긴 경우, 이 기간 중 TOC 농도는 5 mg/L 정도로 가장 낮게 나타났으나, 최종 유출 TOC 농도에 있어서는 1차 비포기 기간의 변경에 따른 큰 차이 없이 거의 비슷하게 나타났다.

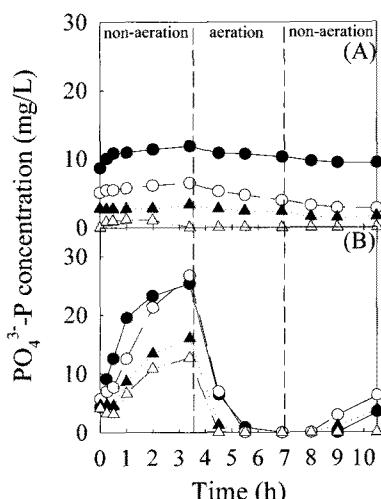


Fig. 3. Typical variation of PO_4^{3-} -P concentration according to the decrease of influent phosphorus concentration (\bullet 7.5 mg/L, \circ 3.8 mg/L, \blacktriangle 1.9 mg/L, \triangle 0.9 mg/L) in SBR (A) and SBBR1 (B).

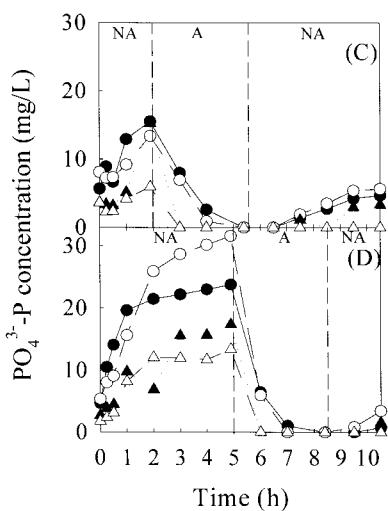


Fig. 4. Typical variation of PO_4^{3-} -P concentration according to the decrease of influent phosphorus concentration (\bullet 7.5 mg/L, \circ 3.8 mg/L, \blacktriangle 1.9 mg/L, \triangle 0.9 mg/L) in SBBR2 (C) and SBBR3 (D). (NA : non-aeration, A : aeration)

3.2. 유입 인 농도변화에 따른 반응기내 인 농도 변화

인 제거능을 상실한 SBR과 인 제거능을 보유하고 있는 SBBR을 이용하여 동일한 운전 주기에서, 유입 인 농도를 7.5 mg/L, 3.8 mg/L, 1.9 mg/L, 0.9 mg/L로 감소시키면서 각 반응기 내 인 농도 변화를 미시적으로 관찰하였다.(Fig. 3, Fig. 4).

SBR의 경우(Fig. 3(A)), 유입 인 농도가 7.5 mg/L 일 때 1차 비포기 기간 중 반응기내 인 농도는 8.7 mg/L에서 11.8 mg/L로 약간 증가하였고, 포기 기간 중에서 11.8 mg/L에서 10.3 mg/L로 약간 감소함으로써 혼기 기간 중 인의 방출과 호기 기간 중 인의 섭취가 일부 발생하였으나 그 변화는 그다지 크지 않게 나타났다. 또한 유입 인 부하를 감소시켜 인 제거능의 회복을 유도하기 위해, 유입 인 농도를 감소시키면서 각 단계별 인 농도의 변화를 관찰하였다. 유입 인 농도를 감소시킴에 따라 전제적으로 마지막 단계인 2차 비포기 기간 끝에서의 인 농도는 감소하였으나, 1차 비포기 단계에서의 인 방출이 발생하지 않았고 이어지는 포기 단계에서도 인 섭취는 거의 발생되지 않았다. 전체 실험 기간이 약 90일 정도로 비교적 길게 SBR을 운전했음에도 불구하고 인 제거능이 회

복되지 않았다. 그러므로 자체적으로 SBR 내에서 인 제거능이 회복되기를 기대한다는 것은 무의미한 것으로 판단되었다. 그 이유는 SBR은 부유 성장 공정이므로 인 제거 미생물이 성장하기 어려운 환경에 있을 경우 반응기 외부로 유실되기 쉬우며, 또한 인 제거 미생물이 부족한 상태에서는 인 제거 미생물에 유리한 환경이 조성되더라도 부족한 미생물량으로 인하여 최적의 상태로 전환되기 곤란하거나 불가능해 질 수 있는 것으로 보인다.

SBBR1에서는 SBR과는 완전히 다른 인 제거 양상을 관찰할 수 있었다.(Fig. 3(B)). 1차 비포기 단계에서 인의 방출이 원활하게 발생하였으며, 포기 단계에서는 인의 원활한 섭취가 발생하였다. 또한, 본 실험에서 나타난 특이한 결과는 2차 비포기 단계에서 인의 재방출이 발생하였다는 것이다. 2차 비포기 단계에서의 인 방출은 외부에서 공급되는 유기물에 기인 하기 보다는 생물막 내부가 혼기화되고 유기물의 공급이 제한됨으로써 생물막 내 자산화가 발생하고 자산화에 의해 생성된 유기물을 이용하여 인 방출이 발생된 것으로 볼 수 있다. 이 때 생물막 두께를 정화하게 측정하기는 곤란하였으나 대략적인 두께가 1,000 μm 이상으로 관찰하였다.

초기 인 농도를 7.48 mg/L와 3.74 mg/L로 유지한 경우에는 혼기상태에서 인의 방출량도 최대 27 mg/L로 높게 나타났으며 호기 상태에서 인의 섭취도 빠르게 나타났다. 그러나 유입되는 인의 농도를 1.87 mg/L로 감소시킴에 따라 혼기상태에서 방출된 인 농도는 17 mg/L로 낮아졌으며, 유입 인 농도를 0.94 mg/L로 감소시킨 경우에는 방출된 인 농도가 12 mg/L로 급격하게 감소하였다. 그러므로 본 실험을 통하여 인의 방출량이 유기물의 농도에만 의존하는 것이 아니라 유입되는 인의 농도에도 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 유입되는 유기물 농도는 일정한 상태에서 유입 인 농도가 감소함으로써 인 제거 미생물내 인 방출 능력의 변화, 즉 폴리 인산염의 농도가 감소한 것으로 생각해 볼 수도 있고, 인 제거 미생물 수의 감소로 볼 수도 있으므로 이에 대해서는 보다 많은 실험과 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 유입되는 인 농도가 감소함에

따라 방출되는 인 농도는 감소하였고 흡수되는 인 섭취속도도 감소하였으나, 유출수 중의 인 농도는 거의 0 mg/L에 근접하였다.

1차 비포기 단계를 2시간으로 감소시킨 SBBR2에서도 SBBR1과 비슷한 현상이 발생하였다. 그러나 1차 비포기 단계를 감소시킴에 따라 충분한 인 방출이 발생할 기회가 주어지지 않음으로써 인 방출 농도는 SBBR1에 비해 현저히 감소하였다. 포기단계에서 인의 섭취가 원활하게 발생하여 인 농도는 거의 0 mg/L에 근접하였으나, 인의 방출량이 적어짐에 따라 섭취 속도도 SBBR1에 비해 매우 느린 것으로 나타났다. SBBR2에서의 또 다른 특징은 SBBR1에 비해 2차 비포기 단계에서의 2차 인 방출이 많다는 것이다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 2차 비포기 기간이 5시간으로 길어짐에 따라 생물막내 자산화가 많이 발생함으로써 인의 재방출이 활발하게 발생한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 SBBR 공정에서 2차 비포기 기간을 길게 한다는 것은 인의 재방출을 유도할 수 있으므로, 2차 비포기 기간을 짧게 하는 것이 인 제거에 유리할 것으로 판단된다.

SBBR3에서는 1차 비포기 기간을 5시간으로 늘리고 2차 비포기 기간은 2시간으로 감소시키면서 인의 제거 과정을 관찰하였다. 1차 비포기 기간을 증가시킴에 따라 다른 SBBR에 비해 가장 높은 인 방출량을 보였으며, 포기단계에서도 가장 원활한 인 섭취속도와 인 섭취량을 나타내었다. 또한, 2차 비포기 기간이 짧게 유지함에 따라 2차 인 방출도 거의 발생되지 않아, 가장 효율적인 인 제거 양상을 나타내었다. SBBR1이나 SBBR2의 결과와 마찬가지로, 유입 인 농도를 감소시킴에 따라 인 방출량도 감소하였고 인의 섭취량도 감소하는 경향을 나타내었다.

본 연구에서는 유입되는 인의 농도가 부하로 작용함으로써 인 제거 기작에 악영향을 미칠 수 있다고 판단되어, 인 제거 능력이 상실되었다고 판단되는 SBR에 유입 인 부하를 감소시켰으나 인 제거 능력이 회복되지 않는 것으로 판단되었다. 그러므로 인 부하를 감소시키면서 SBR을 오랜 시간 동안 운전하였음에도 불구하고 인 제거 능력이 회복되지 않았다는 것은 인 제거 미생물이 상대적으로 열세의 상태에 놓임

으로써 SBR과 같은 부유 상태에서는 쉽게 wash-out 되어 인 제거 미생물의 수가 절대적으로 감소되었기 때문인 것으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.

또한 인 제거를 방해하는 기작의 대부분을 PAOs와 GAOs와의 경쟁관계로 보고 PAOs보다 GAOs의 수가 월등하게 많아질 경우 EBPR의 파괴가 발생한다고 보는 견해가 대부분 이었으나(Mino 등, 1998), 최근 들어 EBPR이 파괴된 상태에서는 유기물의 섭취도 없었다는 연구가 보고됨으로써(Fang 등, 2002), 기존 GAOs에 의한 인 저해 모델이 적용되지 않는 예들이 나타나기 시작하였다. 본 연구에서도 Fig. 2에서 보는 바와 같이 SBR의 경우에는 1차 비포기 기간 중 급격한 TOC의 변화가 발생하지 않음으로써 GAOs에 의한 인 저해 모델이 적용되지 않는 것으로 판단해 볼 수 있다. 왜냐하면 GAOs에 의한 인 저해가 발생하였다고 하면 1차 비포기 기간 중 TOC 농도 변화가 PAOs가 우세한 경우와 마찬가지로 활발하게 발생하여야 하고 이 때 제거된 TOC는 PAOs가 아닌 GAOs가 이용하는 것으로 판단할 수 있으나, 본 연구의 SBR에서는 급격한 TOC의 변화가 발생하지 않음으로써 GAOs의 인 저해 작용이 발생하였다고 판단하기 어려울 뿐만 아니라, SBR에서의 유기물의 변화가 SBBRs의 경우들과 확연하게 차이가 나는 것으로 보아, 앞에서 언급한 바와 같이 앞선 실험(Kim 등, 2008)의 초기 유입 암모니아 부하 증가에 따른 pH 변화에 의해 PAOs 뿐만 아니라 GAOs도 큰 충격을 받아 성장률이 저하되었고 또한 부유 상태에서 미생물의 wash-out이 많이 발생한 것으로 생각해 볼 수 있다. Okunuki 등(2004)도 인 제거 기작이 파괴된 상태에서는 혼기 기간 동안 기질의 섭취가 발생하지 않았다고 발표함으로써, GAOs에 의한 인 저해 모델의 문제점을 지적한 바 있다.

3.3. 유입 인 농도변화에 따른 반응기내 질소 농도 변화

유입 인 농도를 변화시키면서 SBR과 SBBR들에서 질소 농도의 변화를 관찰하였다(Fig. 5, 6). 전체적으로 볼 때 SBR(Fig. 5(A))에서는 유입되는 암모니아성 질소의 질산화와 탈질화가 비교적 원활하게 발생됨으로써 질소의 제거가 적절하게 일어났으나, SBBR들에서는 암모니아 질소의 질산화가 잘 발생되

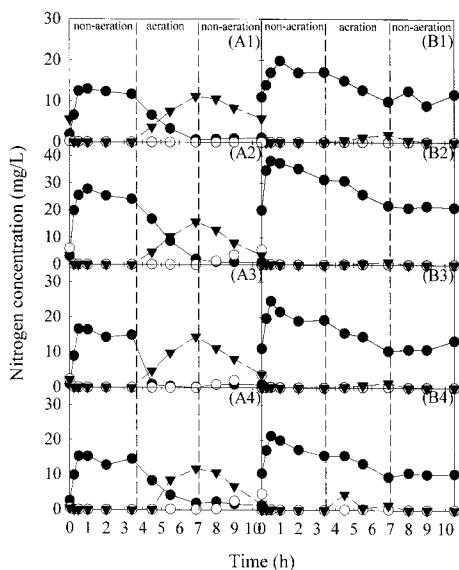


Fig. 5. Typical variation of nitrogen ($\bullet \text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\blacktriangledown \text{NO}_3^- \text{-N}$, $\circ \text{NO}_2^- \text{-N}$) concentration according to the decrease of influent phosphorus concentration ((1) 7.5 mg/L, (2) 3.8 mg/L, (3) 1.9 mg/L, (4) 0.9 mg/L) in SBR (A) and SBBR1 (B).

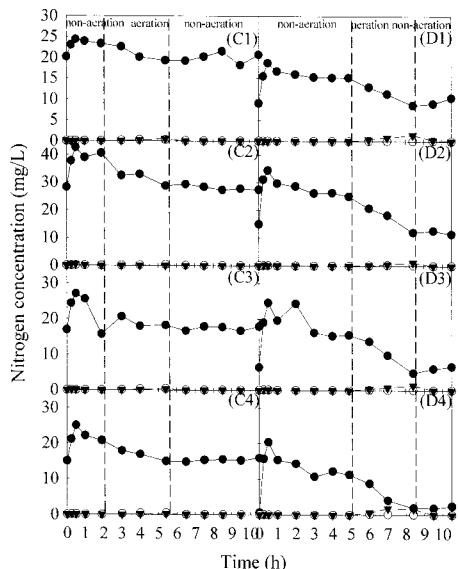


Fig. 6. Typical variation of nitrogen ($\bullet \text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\blacktriangledown \text{NO}_3^- \text{-N}$, $\circ \text{NO}_2^- \text{-N}$) concentration according to the decrease of influent phosphorus concentration ((1) 7.5 mg/L, (2) 3.8 mg/L, (3) 1.9 mg/L, (4) 0.9 mg/L) in SBBR2 (C) and SBBR3 (D).

지 않았으며 그에 따라 질소의 제거도 원활하지 않은 것으로 나타났다.

이는 Fig. 3과 4에서 SBR의 경우에는 인의 제거가 거의 발생하지 않았고 SBBR들에는 인의 제거가 비교적 원활하게 발생하였다는 점을 보면 매우 흥미가 있는 결과라 할 수 있다.

1차 비포기 단계에서는 유기물에 대한 탈질화 미생물과 인 제거 미생물이 경쟁관계에 놓이게 되는데, 이 때 인 제거 미생물이 우세하면 인의 방출이 원활하게 발생하거나 탈질화 조건(무산소 상태)이 우세하면 오히려 인 방출은 위축될 수 있다. 본 실험에서는 Fig. 2를 볼 때 유기물의 제거가 SBBR들에서 비교적 원활하게 발생함으로써 SBBR들에서 인 제거 미생물의 활동이 활발하다는 것을 알 수 있었다.

또한, 포기 단계에서는 용존 산소에 대해 질산화 미생물과 인 제거 미생물이 경쟁 관계에 있게 된다. SBR에서는 부유 성장 상태에 있으므로 질산화 미생물의 활동이 활발하여 질산화가 원활하게 발생할 수 있으나, SBBR에서는 부착성장 상태이므로 용존산소의 생물막 내부로의 전달이 제약을 받아서 질산화 미생물이 활동이 적을 수 있고 그에 따라 질산화가 잘 일어나지 못할 수가 있다. Fig. 5와 6을 볼 때, SBR에서는 질산화가 원활하게 발생하나, SBBR들에서는 질산화가 원활하지 못하다는 것을 알 수 있었다.

2차 비포기 단계에서는 다시 유기물에 대해 탈질화 미생물과 인 제거 미생물이 경쟁관계에 놓여 있다는 것을 알 수 있다. SBR에서는 탈질화 미생물이 원활하여 유기물을 이용하고 인 제거 미생물은 유기물을 이용할 수 없으나, SBBR에서는 질산화에 포기 단계에서 생물막 내부에서의 탈질화로 인해 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 이 거의 잔존하지 않아 탈질화가 일어 날 수가 없었고 오히려 유기물의 잔존으로 인해 인의 2차 방출이 발생하는 현상이 일어난 것을 알 수 있다.

그리므로 질소 제거와 인 제거가 동시에 원활하게 발생하는 생물학적 운전 조건을 형성한다는 것은 매우 어려운 조건이라는 것을 알 수 있었고, SBR에서는 비교적 질소의 제거가 원활하게 발생하고 SBBR들에서는 인의 제거가 활발하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5와 6을 볼 때, 전체적으로 인의 농도를 감소

시킴에 따라 질산화와 탈질화가 잘 일어남으로써 질소 제거가 더 잘 되는 것으로 나타났다.

그러므로 인의 제거가 원활하게 일어나지 못하는 슬러지에서 인의 농도를 감소시키는 것은 오히려 인의 제거가 더 발생하지 못하고 오히려 질소의 제거가 원활하게 일어나게 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

질소의 제거는 잘 발생하나 인 제거가 원활하지 못한 SBR과 질소 제거는 원활하지 못하나 인의 제거는 비교적 원활한 SBBR들에서 유입 인 농도의 변화에 따른 각 반응기내 질소와 인 농도의 변화를 비교 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) SBR에 비해 SBBR들에서는 1차 비포기 기간에 유기물의 제거가 원활하게 발생하였는데, 이는 인의 방출에 유기물이 활발하게 이용된 것으로 볼 수 있다. 유입 인 농도의 감소에 따른 TOC 농도의 변화는 SBR과 SBBR들 모두에서 뚜렷하게 나타나지는 않았다.

- 2) 인의 제거 능력을 상실한 SBR의 경우, 인의 농도를 감소시키더라도 인의 제거 능력이 회복되지는 않았다. 그러므로 이러한 경우에는 외부에서 인 제거 미생물이나 인 제거 능력이 있는 슬러지를 석종하는 것이 효과적일 것으로 생각된다.

- 3) SBBR의 경우, 인의 방출량이 유기물의 농도에 만 의존하는 것이 아니라 유입되는 인의 농도에도 많은 영향을 받았다.

- 4) SBBR 공정에서 2차 비포기 기간을 길게 한다는 것은 인의 재방출을 유도할 수 있어, 2차 비포기 기간을 짧게 하는 것이 인 제거에 적절하였다.

- 5) 유입 인 농도를 감소시킬 경우, SBR과 SBBR들 모두에서 질소의 제거가 원활하게 발생하였다.

참 고 문 헌

- 박영식, 정노성, 김동석, 2007, A₂O SBBR에서 비포기 시간 배분에 따른 질소-인 제거 특성 비교, 한국환경과학회지, 16(7), 813-821.
 Anh, Y. H., 2006, Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review, Process Biochem., 41, 1709-1721.

- APHA, AWWA, WEF, 1992, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed.
 Brdjanovic, D., Slamet, A., van Loosdrecht, M. C. M., Hooijmans, C. M., Alaerts, G. J., Heijnen, J. J., 1997, Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater, Wat. Res., 32, 200-208.
 Carucci, A., Lindrea, K. C., Majone, M., Ramadori, R., 1999, Different mechanisms for the anaerobic storage of organic substrates and their effect on enhanced biological phosphate removal (EBPR), Wat. Sci. Technol., 39, 21-28.
 EPA, 1993, Process design manual of nitrogen control, EPA 625/r-93/010, Cincinnati, Ohio, USA.
 Fang, H. P. Zhang, H. T., Liu, Y., 2002, Characterization of an acetate-degrading sludge without intracellular accumulation of polyphosphate and glycogen, Wat. Res., 36(13), 3211-3218.
 Jeon, C. O., Lee, D. S., Lee, M. W., Park, J. M., 2001, Enhanced biological Phosphorus removal in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor, Wat. Environ. Res., 73, 301-306.
 Kim, D. S., Jung, N. S., Park, Y. S., 2008, Characteristics of nitrogen and phosphorus removal in SBR and SBBR with different ammonium loading rates, Korean J. Chem. Eng., 25(4), 793-800.
 Matsuo, Y., 1994, Effect of the anaerobic solids retention time on enhanced biological phosphorus removal, Wat. Sci., Technol., 30, 193-202.
 Mino, T., van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., 1998, Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process Wat. Res., 32 (11), 3193-3127.
 Okunuki, S., Kawaharasaki, M., Tanaka, H., Kanagawa, T., 2004, Changes in phosphorus removing performance and bacterial community structure in an enhanced biological phosphorus removal reactor, Wat. Res., 38, 2433-2439.
 Wang, J. K., 2001, Effect of anaerobic-aerobic contact time on the change of internal storage energy in two different phosphorus-accumulating organisms, Wat. Environ. Res., 73, 436-443.
 White, D. M., Pilon, T. A., Woolard, C., 2000, Biological treatment of cyanide containing wastewater, Wat. Res., 34(7), 2105-2109.
 Zhang, Z., Zhou, J., Wang, J., Guo, H., 2006, Integration of nitrification and denitrifying dephosphatation in airlift loop sequencing batch biofilm reactor, Process Biochem., 41, 599-608.