

(AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR에서 영양염류 제거 특성 비교

박영식 · 김동석^{*†}

대구대학교 보건과학부

*대구가톨릭대학교 환경과학과

A Comparison of Nutrient Removal Characteristics between (AO)₂ SBBR and A₂O SBBR

Young-Seek Park · Dong-Seog Kim^{*†}

Division of health Science, Daegu University

*Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu

(Received 20 June 2005, Accepted 8 March 2006)

Abstract

This study was carried out to compare the performance of two types of sequencing batch biofilm reactors (SBBRs), anoxic-oxic-anoxic-oxic (AO)₂ SBBR and anoxic-oxic-anoxic A₂O SBBR, on the biological nutrient removal. The TOC removal efficiency in A₂O SBBR was higher than that in (AO)₂ SBBR. At the 1st non-aeration period, the release of PO₄³⁻-P in A₂O SBBR was higher than that in (AO)₂ SBBR because of the high TOC removal. At the 1st aeration-period, the nitrification was not completed in (AO)₂ SBBR, however, it was completed in A₂O SBBR and the nitrification rate in A₂O SBBR was higher than that in (AO)₂ SBBR. The release and uptake of PO₄³⁻-P in A₂O SBBR was much higher than in (AO)₂ SBBR. Also, the profiles of DO and pH in reactors were used to monitor the biological nutrient removal in two SBBRs. The break point in DO and pH curves at the aeration period coincided with the end of nitrification.

keywords : (AO)₂ sequencing batch biofilm reactor, A₂O sequencing batch biofilm reactor, Biological nutrient removal, DO, pH

1. 서론

연속 회분식 활성 슬러지 공정은 하나의 연속 회분식 반응조(sequencing batch reactor, SBR)에 일정시간 간격으로 폐수를 유입, 반응, 침전, 유출시킴으로써 쉽게 혐기 및 호기 조건을 변경할 수 있는 특징이 있다. SBR은 연속 흐름 활성 슬러지 공법의 공간 개념이 각 단계 공정의 시간개념으로 전환된 공정이라 할 수 있으며, 회분식 반응조를 연속적으로 운전할 수 있도록 변형한 것으로 intermittent 반응조, fill and draw 반응조라고 부르기도 한다(Irvine et al., 2001).

질소나 인의 생물학적 제거 방법의 하나로 사용되는 SBR은 한 반응기 내에서 시간별로 혐기, 호기 및 무산소 조건을 형성시킴으로써 반응기 용적을 줄일 수 있는 것은 물론이고 질소와 인을 동시에 제거할 수 있는 특징이 있다. 아울러 SBR은 운전조건에 별로 구애를 받지 않으면서 높은 처리효율을 나타내고, 일반 활성 슬러지 공정의 문제점으로 지적되고 있는 슬러지 팽화나 슬러지의 부상 현상 등을 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다(Irvine et al., 1988; 김 등, 1992).

또한, 폐수가 유입되어 방출될 때까지를 1주기로 하며 간헐적으로 처리수를 한꺼번에 방류시키므로 처리수 전부를 대상으로 수질상태를 조사할 수 있다. 따라서 방류수의 규제치에 만족하지 않는 경우에는 처리수의 방류를 중지하고, 반응 시간에 여유가 있는 경우에는 규제치가 만족할 때까지 처리시간을 연장할 수 있고 수질을 확인하면서 방류할 수 있으며, 연속적인 폐수처리보다 간헐적인 폐수처리에 적절하고 저농도 폐수보다 고농도 폐수처리에 적합하다(하 등, 1999).

그러나 SBR 공정은 모든 단위공정 및 조장이 하나의 반응조에서 이루어지기 때문에 처리수량이 증가할 경우 반응기의 용량이 커져 추가 건설비의 문제가 발생할 수 있으며, 슬러지 침전을 위해 긴 시간이 필요하다는 단점이 있다. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 SBR에 생물막을 포함한 고정화 기법을 도입시켜 반응기 내의 처리효율을 증대시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 생물막을 적용시킨 연속 회분식 생물막 반응기(sequencing batch biofilm reactor, SBBR)의 우수성은 많은 연구자들에 의해서 보고되고 있는데, 기존의 SBR 공정에 비해 높은 미생물 농도를 유지할 수 있으며, 고농도 기질의 충격부하에 대한 대처능력이 탁월하다는 연구 결과가 나오고 있다(Irvine et al., 1988; Gieseke et al., 2002).

[†] To whom correspondence should be addressed.
nierpsk@hanmail.net

따라서 본 연구에서는 SBBR의 운전 및 설계 조건을 확립하기 위한 연구의 일환으로서 SBBR의 운전 주기에 따른 유기물, 질소 및 인의 제거특성을 조사·비교하였다. 비포기-포기-비포기-포기의 네가지 반응단계로 구성된 (AO)₂ SBBR 공정과 비포기-포기-비포기의 세단계로 구성된 A₂O SBBR의 비교·연구를 통하여 각 단계의 특징을 미시적인 관점에서 관찰하였다. 또한, 각 SBBR 공정에서의 단계별 DO 농도와 pH의 변화를 질소와 인의 변화와 함께 비교·고찰함으로써 SBBR에서의 공정 자동화 가능성을 알아보고, SBBR 운전의 최적화에 대한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 반응조는 2개를 설치하여 운전하였으며, 각 반응조는 5 mm 두께의 투명 아크릴로 15×15×25 cm로 제작하여 유입 후 최대 유효 용적을 4 L, 유출 후 최소 유효 용적을 2 L로 하였다. 1주기를 12시간으로 하여 1일 2주기로 반복 운전하였다. 사용된 여재는 polyethylene 재질로 비표면적이 3.0~7.0 m²/m³이며, 공극률이 0.93인 수세미 형태로써 5×14×20 cm의 크기로 잘라 겉보기 용적으로 반응기 최대유효 용적의 약 25%가 되도록 각각 충전시켰다. 처리수는 30분간의 침전시간이 지난 다음 최대 유효 용적의 50%인 2 L를 정량 펌프를 이용하여 유출시켰다. 비포기 시 반응기의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석교반기를 설치하여 약 200~250 rpm으로 교반시켰다. 포기 시 공기 펌프를 이용하여 반응기 하부에 설치된 환형 공기 분산기를 통하여 공기를 주입시켰으며, 이 때 rotameter를 설치하여 공기량을 0.5 L/min으로 일정하게 유지하였다.

기질 공급, 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 유기물 처리가 목적인 G시 하수처리장

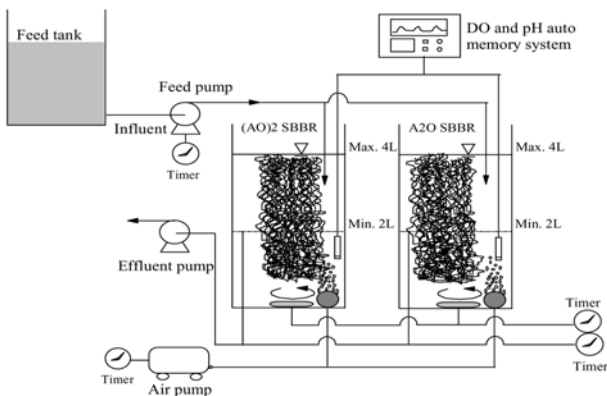


Fig. 1. Schematic diagram of (AO)₂ SBBR and A₂O SBBR systems.

의 반송 슬러지를 채취하여 35 mesh의 체를 이용하여 험잡물을 제거하고, 2~3일 정도 포기시키면서 슬러지 상부에 발생되는 스컴(scum)을 완전히 제거한 다음, 3~4차례의 수세 과정을 거친 후, 포기 시 MLSS가 3,500 mg/L가 되도록 각 반응기에 동일하게 주입시켰다. 전체적인 반응기의 슬러지 체류시간(sludge residence time, SRT)은 20~30일 정도로 유지되도록 일정 양의 슬러지를 매일 침전 시간 직전에 생물막을 털어서 제거하였다. 본 실험에 사용된 합성 폐수는 Table 1에 나타난 것과 같이 bacto-peptone과 glucose를 탄소원으로 사용하였으며, 주요 질소와 인은 각각 (NH₄)₂SO₄과 K₂HPO₄에 의해 구성되었으며, 기타 각종 미량원소로 구성되어졌다.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

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

2.2. 운전조건 및 실험방법

각 공정별 운전조건은 Fig. 2와 같다.

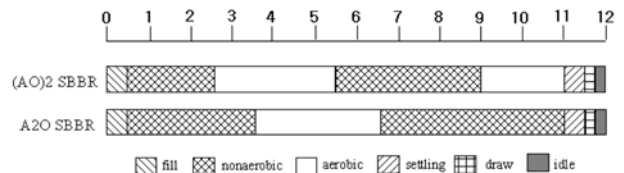


Fig. 2. Operation conditions in (AO)₂ SBBR and A₂O SBBR, respectively.

1주기는 12시간으로 하였으며, 전체적인 구성은 유입, 1차 비포기, 1차 포기, 2차 비포기, 2차 포기, 침전, 배출 및 휴지시간으로 하였다. 유입에 소요되는 시간은 30분, 배출 및 침전에 소요되는 시간은 각각 30분으로 각 반응기에 관계없이 일정하게 고정하였다. (AO)₂ SBBR은 1차 비포기 2시간, 1차 포기 3시간, 2차 비포기 3시간 30분, 2차 포기 2시간으로 구성되어, 전체적인 비포기-포기에 소요되는 시간은 10시간 30분이고, 비포기에 5시간 30분을 할당하였고 포기 시간은 5시간이 되도록 하여 비포기와 포기 시간 배분이 약 1:1이 되도록 하였다. A₂O SBR에서는 1차 비포기 혼합 3시간, 포기 3시간, 2차 비포기 혼합 4시간 30분으로 운전하여 비포기와 포기의 비율은 2.5:1이었다.

각 성분의 분석은 실험이 90일 정도 경과되어 충분한 질소·인의 제거가 확인되고 정상상태에 도달된 다음 이루어

졌고, 각 반응기 내의 시료 채취는 약 30분~1시간마다 채취하여 각각의 유입, 비포기 및 포기 등의 시간 조건에서 3~4 회 정도가 되도록 맞추어 채취하였다. 시료 채취 후 즉시 pore size가 0.2 μm 인 membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다. MLSS는 Standard Methods(APHA, AWWA, WPCF, 1992)에 따라 측정하였고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 측정은 UV/VIS (Shimadzu, UV-1601)를 이용하여 분석하였다. 유기물의 농도는 TOC (total organic carbon)를 지표로 이용하여 TOC Analyzer (Schimadzu, TOC-5000A, Japan)를 이용하여 분석하였다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 등의 음이온 농도 분석은 Ion Chromatography (Metrohm, Ion analysis version 2.0, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. 반응기 내 용존산소 (Dissolved Oxygen, DO) 농도와 pH는 실시간 자동 측정기 (Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 반응기내에서 직접 측정하였다.

TOC 제거 속도와 질산화 속도는 각각 다음과 같은 식 (1)과 (2)에 의해 계산하였다.

$$\frac{\text{TOC 제거량 (mg/L)} \times \text{반응기 부피 (L)}}{\text{포기 또는 비포기 운전 시간 (h)}} \quad (1)$$

$$\frac{\text{NH}_4^+\text{-N 제거량 (mg/L)} \times \text{반응기 부피 (L)}}{\text{포기 또는 비포기 운전 시간 (h)}} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 생물학적 유기물 제거 특성

반응기 내로 유입되는 TOC의 농도를 약 70 mg/L 정도로 일정하게 유지한 상태에서 약 90일 정도 운전한 결과의 사 정상상태에 도달하였다. 유출수 중의 TOC 농도는 (AO)₂ SBBR에서 8.0 mg/L로 나타났고, A₂O SBBR에서는 5.0 mg/L 정도로 나타났다.

Fig. 3은 운전주기를 각각 다르게 운전한 (AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR에서 1주기(12시간)내에 측정된 TOC 농도의 변화를 나타낸 것이다.

유입 기간이 끝난 시점에서 (AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR의 TOC 농도는 각각 34.2 mg/L와 32.0 mg/L로 증가하였다.

2시간의 1차 비포기 기간 동안, (AO)₂ SBBR의 TOC 농도는 34.2 mg/L에서 31.0 mg/L로 감소하여 3.2 mg/L의 TOC 제거량을 나타내었고, 이 기간 동안의 TOC 제거 속도는 6.4 mg/h 였다. 그러나 3시간의 1차 비포기 기간 중 A₂O SBBR에서 TOC 농도는 32 mg/L에서 22.1 mg/L로 감소하여 9.9 mg/L의 TOC 제거량을 보여, (AO)₂ SBBR에 비해 월등히 많은 TOC 제거량을 나타내었다. 또한 이 기간 중 TOC 제거속도도 13.2 mg/h로 (AO)₂ SBBR에 비해 빠른 제거속도를 나타내었다. 1차 비포기 기간 중의 TOC 제거는 탈질화 및 인의 방출과 밀접한 관계를 가지는 것으로, 이 기간 중의 TOC 제거가 원활한 A₂O SBBR에서 탈

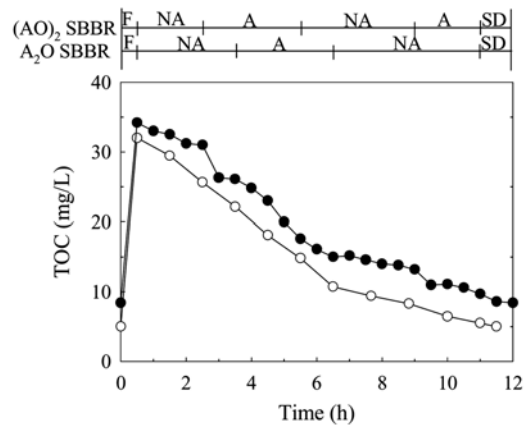


Fig. 3. Typical profiles of TOC concentration in (AO)₂ SBBR(●) and A₂O SBBR(○). (F: feeding period; NA: non-aeration period; A: aeration period; SD: settling and drawing period).

질화와 인 방출이 보다 활발하였을 것으로 예상할 수 있다.

1차 포기 기간 중 (AO)₂ SBBR에서의 TOC 농도는 31 mg/L에서 17.6 mg/L로 감소하여 13.4 mg/L의 TOC 제거량과 17.8 mg/h의 TOC 제거 속도를 나타내었다. 이 기간 중의 TOC 제거량은 전체 TOC 제거량의 52%를 차지함으로써, 1차 포기 기간 동안의 TOC 제거가 매우 활발하다는 것을 알 수 있다. 이는 호기성 heterotroph에 의한 영향으로 볼 수 있으며, 이 기간 동안에 많은 유기물이 제거됨으로써 상대적으로 탈질화 및 인의 방출에 이용될 유기물이 부족할 것으로 예상된다. A₂O SBBR에서는 같은 기간과 조건에서 11.4 mg/L TOC 제거량과 15.2 mg/h의 TOC 제거 속도를 보여 (AO)₂ SBBR에 비해 낮은 TOC 제거량과 낮은 TOC 제거 속도를 나타내었다.

3시간 30분의 2차 비포기 기간 중 (AO)₂ SBBR의 TOC 농도는 17.6 mg/L에서 13.2 mg/L로 감소하였고, 그에 따라 TOC 제거량과 TOC 제거 속도는 각각 4.4 mg/L와 5.0 mg/h로 나타났다. 또한, 4시간 30분의 비포기 기간을 가진 A₂O SBBR에서 TOC 농도는 10.7 mg/L에서 5.5 mg/L로 감소하였고, 5.2 mg/L의 TOC 제거량과 4.6 mg/h의 TOC 제거속도를 나타내어, TOC 제거량에 있어서는 비포기 시간을 길게 유지한 A₂O SBBR가 유리하였으나 TOC 제거속도에 있어서는 비포기 시간을 짧게 유지한 (AO)₂ SBBR이 유리한 것으로 나타났다. 또한, (AO)₂ SBBR에서는 1차 비포기 기간에 비해 TOC 제거량은 많았으나, TOC 제거 속도는 감소하였다. 이에 비해 A₂O SBBR에서는 1차 비포기 기간에 비해 낮은 TOC 제거량과 느린 TOC 제거 속도를 나타내었다. 이 기간은 1차 포기 기간중 질산화에 의해 발생한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 을 탈질화시키고 인의 방출을 유도하는 기간이나, 질산화에 의해 생성된 NO_3^- 의 인 방출 저해 작용으로 말미암아 인의 방출은 제대로 일어나지 않을 것으로 판단된다. 그러므로 이 기간 중의 TOC 제거는 대부분 탈질화에 이용되는 것으로 생각해 볼 수 있다. 또한, (AO)₂ SBBR에 비해 A₂O SBBR에서 다소 큰 TOC 제거속도를 보이는 것으로 보아 탈질화가 보다 활발하게 일어날 것으

로 예상할 수 있었다.

2차 포기 기간은 (AO)₂ SBBR에만 설정되어 있는 반응 기간으로서, 주로 잔존하는 TOC를 제거하거나 NH₄⁺-N을 질산화하는 기간이다.

(AO)₂ SBBR에서 TOC 농도는 13.2 mg/L에서 9.7 mg/L로 감소하여 3.5 mg/L의 TOC 제거량과 7.0 mg/h의 TOC 제거 속도를 나타내었다. 이는 1차 포기 기간의 13.4 mg/L의 TOC 제거량과 17.8 mg/h의 TOC 제거 속도에 비해 매우 적은 TOC 제거량과 낮은 TOC 제거 속도를 나타내었다.

3.2. 생물학적 질소 제거 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 (AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR에서 1주기(12시간) 동안의 질소 성분(NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N)의 변화와 pH 및 DO 농도의 변화를 나타낸 것이다.

(AO)₂ SBBR에서 유입 기간 중 앞 단계에서 잔존한 NO₃⁻-N은 2.7 mg/L에서 0.6 mg/L로 감소하여 2.1 mg/L의 NO₃⁻-N 제거량을 나타내어 활발한 탈질화가 발생하였다는 것을 알 수 있었다. A₂O SBBR에서는 보다 많은 NO₃⁻-N가 잔존함에 따라 NO₃⁻-N 농도는 5.0 mg/L에서 0.7 mg/L로 감소하여 4.3 mg/L의 NO₃⁻-N 제거량을 나타내었다. 이는 유입 기간 중의 비교적 높은 유기물 농도로 인하여 활발한 탈질화가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

(AO)₂ SBBR에서 유입 기간 중 초기 DO 농도는 유입 폐수에 잔존하는 DO로 인하여 0.6 mg/L였으나, DO 농도는 15분 이내에 급격하게 감소하여 0.1 mg/L 이하로 유지

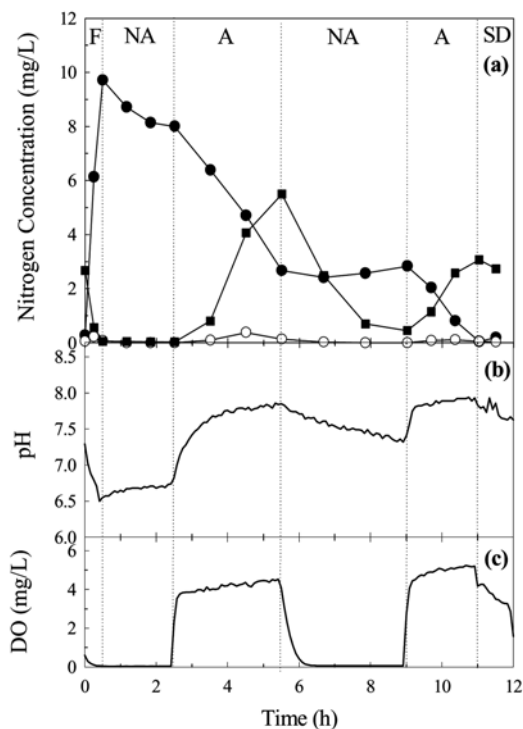


Fig. 4. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [NH₄⁺-N (●), NO₂⁻-N(○), NO₃⁻-N(■)], (b) pH and (c) DO concentration in (AO)₂ SBBR. (F: feeding period; NA: non-aeration period; A: aeration period; SD: settling and drawing period).

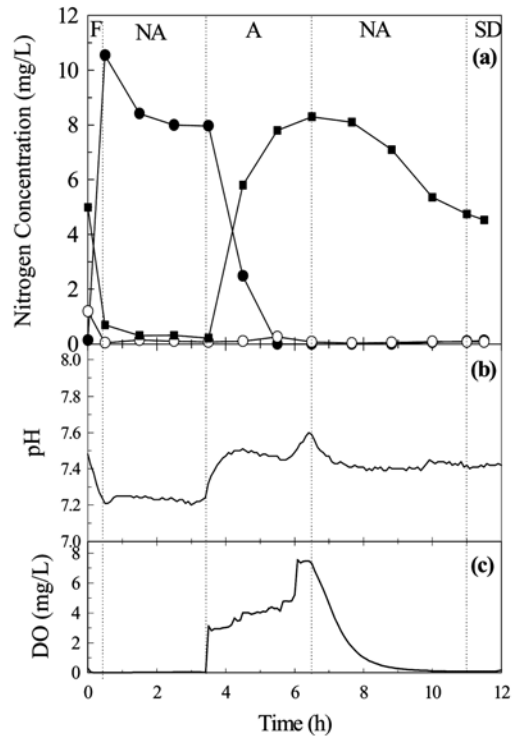


Fig. 5. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [NH₄⁺-N (●), NO₂⁻-N(○), NO₃⁻-N(■)], (b) pH and (c) DO concentration in A₂O SBBR. (F: feeding period; NA: non-aeration period; A: aeration period; SD: settling and drawing period).

되었다. A₂O SBBR에서 초기 DO 농도는 0.3 mg/L이었으나 10분 이내에 0.04 mg/L로 감소하였다. 또한 이 기간 중 (AO)₂ SBBR에서 pH는 7.29에서 6.50으로 급격하게 감소하였는데, 이는 유입수의 pH에 의한 영향과 탈질화 및 인 방출에 따른 영향이 복합적으로 나타난 것으로 판단된다. 비포기 기간 중 탈질화가 발생하게 되면 pH가 증가되고 (Kim et al., 2001), 인 방출이 발생되면 pH가 감소된다.

그러므로 이 기간 중 pH가 감소하는 것으로 보아 탈질화의 영향보다는 인 방출에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 생각할 수 있으나, 유입 폐수의 pH가 6.5~6.8의 범위로 나타남에 따라 유입 폐수의 pH에 따른 영향으로 보는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 이 기간 중 pH는 약 20분 정도에서 미소한 pH 변화에 따른 변곡점이 나타났다.

A₂O SBBR에서도 pH는 7.48에서 7.21로 감소하였으나, 그 변화 폭은 (AO)₂ SBBR에 비해 훨씬 적었다. 그 이유는 탈질화의 반응이 크게 발생함으로써 탈질화에 의해 발생하는 OH가 pH의 감소를 완화시킨 것으로 생각된다.

유입 기간 중 (AO)₂ SBBR에서는 탈질화가 거의 완료되어서 1차 비포기 기간 중의 NO₂⁻-N과 NO₃⁻-N의 농도는 0.02 mg/L 이하로 거의 변화가 없이 낮게 나타났다. A₂O SBBR에서는 추가적인 탈질화에 의해 0.6 mg/L에서 0.2 mg/L로 NO₃⁻-N의 농도 변화가 발생하였으나, 그 양은 매우 적었다. (AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR에서 NH₄⁺-N 농도는 각각 9.7 mg/L과 10.5 mg/L에서 8.0 mg/L와 7.9 mg/L로

감소하는 특이한 현상을 나타내었는데, 이 현상은 DO 농도가 거의 0 mg/L로 유지된 상태에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 감소함으로써 질산화에 따른 영향으로 보기는 곤란하였다. 그러므로 이 기간 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 감소는 동화 작용에 의한 영향으로 볼 수도 있으나, 동화 작용에 의한 영향으로 보기에 너무 많은 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 감소로 판단되었다. 이 현상을 설명할 수 있는 또 하나의 영향은 생물막에 의한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 흡착의 가능성으로 생각해 볼 수도 있다. Wilderer 등(2000)은 생물막을 이용하여 영양염류를 제거하는 공정에서 자주 발생하는 현상 중 하나는 생물막에 의한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 흡착 현상이라고 발표한 바 있다.

1차 비포기 기간 중 $(\text{AO})_2$ SBBR과 A_2O SBBR 모두 DO 농도는 0.03~0.04 mg/L로 유지되었다. $(\text{AO})_2$ SBBR에서 pH는 6.5에서 6.74로 미소한 변화를 나타낸 후 거의 일정하게 나타났다. A_2O SBBR에서는 pH가 7.21에서 7.25로 미소 변화가 발생한 다음, 점진적으로 7.21까지 다시 감소하는 경향을 나타내었는데, 비포기 초기에 pH가 미소 증가한 것은 탈질화에 따른 영향으로 볼 수 있으며, 그 이후 pH가 약간 감소하는 것은 인의 방출에 따른 결과에 기인하는 것으로 판단되었다.

1차 포기 기간 중 $(\text{AO})_2$ SBBR에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 8.0 mg/L에서 2.7 mg/L로 감소하여 5.3 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거량을 나타냈고, 그에 따라 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 0.1 mg/L에서 5.5 mg/L로 증가하여 5.4 mg/L $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 생성량을 나타냄으로써 활발한 질산화 반응을 보였다. 이 기간 중 A_2O SBBR에서는 7.96 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거량을 나타내었고, 초기 질산화 속도($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거 속도)는 10.6 mg/h로 $(\text{AO})_2$ SBBR의 7.1 mg/h에 비해 빠르게 나타났다. 이는 A_2O SBBR에서 1차 비포기 기간 동안의 TOC 농도가 상대적으로 낮아서 autotroph인 nitrifier의 활동이 활발하였기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다.

한편, $(\text{AO})_2$ SBBR과 A_2O SBBR 모두에서 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 이 기간 중 최대 0.38 mg/L와 0.25 mg/L까지 각각 증가한 다음 감소하는 경향을 나타내었다. 그러므로 nitrite에 의한 저해 현상은 일어나지 않은 것으로 볼 수 있었다. 이 기간 중의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 생성량과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거량이 비교적 일치하는 것으로 보아 NO_3^- 를 전자 수용체로 이용하는 인의 섭취는 발생하지 않은 것으로 생각된다.

그러나 $(\text{AO})_2$ SBBR에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도가 2.7 mg/L로 잔존하고 있는 것으로 보아 완전한 질산화가 이루어진 것으로 보기는 어려웠다. 그러므로 1차 비포기 기간을 추가로 증가시킨다면 질산화 효율을 증대시킬 수 있을 것으로 생각된다. 이에 비해 A_2O SBBR에서는 질산화가 활발하게 발생함으로써 초기 2시간 이내에 질산화가 완료되었다. 이러한 질산화의 차이를 단순히 유기물 농도의 차이로 볼 수도 있으나, 운전주기의 차이에 따른 질산화 미생물의 개체 수나 활성화에 차이가 있는 것으로 예측되어 이에 대한 계속적인 고찰이 필요할 것으로 판단되었다. 또한, 이 기간 중의 TOC 농도가 최소 10 mg/L 이상으로 유지되고 있고 TOC의 제거도 계속적으로 발생하는 것으로 보아 autotrophic

nitrification뿐만 아니라 heterotrophic nitrification의 발생 가능성도 있는 것으로 판단되었다. 일반적으로 heterotroph가 우점종인 경우에는 heterotrophic nitrification이 암모니아의 산화에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Robertson et al., 1992; Zhao et al., 1999).

이 기간 중 $(\text{AO})_2$ SBBR과 A_2O SBBR에서 각각 초기 pH는 6.74에서 7.60으로, 7.24에서 7.49로 증가하였는데, 이는 공기 탈기에 의해 수중의 CO_2 가 대기 중으로 방출되고, 비포기 기간 중 형성된 휘발성 유기산이 급격하게 소모된 것에 기인한 것으로 보는 견해가 있다(Cheng et al., 2000; Ra et al., 1998). A_2O SBBR에서 초기 30분간의 급격한 pH 증가 후 pH가 미세하게 감소하여 $(\text{AO})_2$ SBBR과 약간의 차이를 나타내었는데, 이는 $(\text{AO})_2$ SBBR에 비해 질산화가 활발하게 발생함으로써 H^+ 의 발생이 많았기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 포기 시작 후 약 2시간이 경과되어 질산화가 거의 완료되는 시점에서는 pH가 다시 급격하게 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 질산화의 완료에 따라 인의 섭취가 보다 활발해졌기 때문인 것으로 생각된다. 이 시점에 맞추어 DO 농도도 급격하게 증가하는 경향을 나타냄으로써, 질산화 완료시점을 pH 및 DO 농도로도 확인 가능하였다. $(\text{AO})_2$ SBBR과 A_2O SBBR의 pH 및 DO 농도 profile의 차이는 질산화 완료 여부에 따라 극명한 차이를 나타내었다. 이 기간 중 $(\text{AO})_2$ SBBR에서 DO 농도는 초기 20분 이내에 3.7 mg/L로 증가된 후, 점진적으로 4.5 mg/L까지 증가하였다. 그러나 A_2O SBBR에서는 2단계의 DO 농도 profile을 나타내었다. 초기 10분 이내에 DO 농도가 3 mg/L 정도로 급격하게 증가한 다음 질산화가 완료되는 2 시간까지는 4.3 mg/L까지 완만하게 증가하다가 그 이후 7.4 mg/L까지 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 초기 2시간 이내에는 autotrophic nitrifier, heterotrophic nitrifier 및 일반적인 호기성 heterotroph에 의해 DO의 소모가 많아서 DO 농도가 낮게 나타났으나, 그 이후 질산화가 완료됨에 따라 DO의 소모가 줄어들어 DO 농도가 급격하게 증가한 것으로 볼 수 있었다. 2차 비포기 기간 중 $(\text{AO})_2$ SBBR에서는 탈질화에 의해 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 5.5 mg/L에서 0.5 mg/L까지 감소하여 5.0 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 제거량을 나타내어 초기부터 비교적 활발한 탈질화가 발생한 것을 볼 수 있었다. 이에 비해 A_2O SBBR에서 초기 1시간 30분정도까지는 탈질화의 속도가 느리다가 그 이후 빨라지는 것을 관찰할 수 있었다. 두 반응기의 이러한 차이는 DO 농도의 차이로 볼 수 있다. $(\text{AO})_2$ SBBR에서는 1차 포기 기간 동안에 질산화가 완료되지 않음으로써 급격한 DO 농도의 증가가 없었고 그러므로 DO 농도를 4.5 mg/L 정도로 낮게 유지할 수 있었다. 그에 따라 2차 비포기 기간에는 DO 농도가 30분 이내에 급격하게 0.4 mg/L까지 감소되어 탈질화가 발생될 수 있는 환경이 조성되었다. 그러나 A_2O SBBR에서는 활발한 질산화로 인하여 수중의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 완전히 질산화되었고 추가적인 공기 공급에 따라 DO 농도가 7.4 mg/L까지 증가하였다. 그러므로 1차 포기 기간 중 DO 농도가 높아짐에 따라 2차 비포기 기간 중

DO가 소모되는데 많은 시간이 소요되고 그 만큼 탈질화가 느리게 진행되었다. 그러므로 A₂O SBBR에서 탈질화가 빨리 진행되기 위해서는 1차 포기 기간 중 신속하게 질산화 완료 시점을 파악해서 과잉의 산소가 공급되지 않도록 차단하는 것이 중요할 것으로 생각된다. 그러므로 호기 기간에는 pH 및 DO 농도 profile을 이용한 자동제어 시스템을 가동하는 것이 잉여 공기 공급을 차단하여 에너지적인 절감 효과뿐만 아니라 다음 단계의 탈질화 속도를 높이는 것에도 기여하는 바가 크다는 것을 알 수 있었다.

(AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR 모두 2시간 30분 정도 경과된 시점에서 모두 탈질화 속도가 완만해 지는 것을 볼 수 있었으나, 그 원인은 두 반응기의 경우에서 상이한 것으로 판단된다. (AO)₂ SBBR에서 이 시점의 TOC 농도는 15 mg/L이고 NO₃⁻-N 농도는 0.7 mg/L로 나타났는데, TOC 농도가 부족하기보다는 NO₃⁻-N 농도가 낮아서 탈질화 속도가 느려진 것으로 생각된다. 그러나 A₂O SBBR에서는 NO₃⁻-N 농도가 5.8 mg/L로 비교적 높은데도 불구하고 탈질화 속도가 느려진 것은 탈질화에 필요한 유기물 농도가 낮았기 때문인 것으로 보이며, 이 시점에서의 TOC 농도는 7 mg/L였다.

이 기간 중 (AO)₂ SBBR에서 pH는 7.84에서 7.32로 완만하게 감소하였다. A₂O SBBR에서는 잔존하는 DO로 인하여 DO가 감소되는 것과 일치하여 pH도 감소하는 경향을 나타내었고 그 이후 완만한 감소세를 나타내었다. 이 기간 중 탈질화에 의해 pH의 증가가 예상되었다. 그러나 오히려 pH가 감소함으로써 탈질화의 영향보다는 발효 부산물과 인의 방출에 의한 결과로 볼 수 있으나, 이 기간 중 잔존하는 TOC의 농도가 낮아서 인의 방출을 유발시키기에는 부족할 것으로 판단되어 발효 부산물에 의한 영향인 것으로 생각되었다. 그러나 이에 대한 해석이 불명확하여 계속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. (AO)₂ SBBR에서 DO 농도는 초기 30분 동안은 4.5 mg/L에서 0.4 mg/L로 급격하게 감소한 다음 0.05 mg/L까지 완만하게 감소하였다. 또한 A₂O SBBR에서는 1차 포기 기간 동안 과잉으로 공급한 산소로 인하여 DO 농도가 감소하는 데 상당한 시간이 소요되었다.

2차 포기 기간에는 잔존하는 NH₄⁺-N를 제거하는 질산화 반응이 발생하였다. 이 기간 중 (AO)₂ SBBR에서 NH₄⁺-N 농도는 2.8 mg/L에서 0.1 mg/L까지 감소하여 2.7 mg/L의 NH₄⁺-N 제거량을 보였으며, NO₃⁻-N 농도는 0.45 mg/L에서 3.1 mg/L로 증가됨에 따라 2.65 mg/L의 NO₃⁻-N 생성량을 나타내었다. 그러므로 질산화에 따른 NH₄⁺-N 제거량과 NO₃⁻-N 생성량은 일치하였다. 그러나 1차 포기 기간 중의 NH₄⁺-N 제거량과 NO₃⁻-N 생성량에 비하면 상대적으로 매우 낮은 값이고, 만약 1차 포기 기간을 연장하여 완전한 질산화가 이루어졌다면 불필요한 질산화 과정이라고 생각된다. 또한 1차 포기 기간이 길어서 완전한 질산화가 이루어졌다면 잔존하는 NO₃⁻-N가 없어 완전한 질소 제거가 이루어졌을 것으로 예상된다. DO 농도는 5.1 mg/L로 1차 포기 기간에 비해 높게 나타났다. 이렇게 DO 농도가 1차

포기 기간에 비해 높은 것은 이 기간 중 TOC와 NH₄⁺-N의 농도가 낮아서 수중의 산소를 소모하는 호기성 heterotroph와 nitrifier의 활동이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 생물학적 인 제거 특성

(AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR에서 1주기 동안의 PO₄³⁻-P 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 비포기시 PAOs(phosphorus accumulating organisms)에 의한 인의 방출과 포기시 인의 과잉 섭취 현상을 두 반응기에서 모두 관찰할 수 있었다.

1차 비포기 기간 중, (AO)₂ SBBR에서 PO₄³⁻-P 농도는 10.9 mg/L에서 15.9 mg/L로 증가함으로써 5.0 mg/L의 PO₄³⁻-P를 방출하였다. 한편, 이 기간 중 A₂O SBBR에서 PO₄³⁻-P 농도는 14.4 mg/L에서 41.4 mg/L로 증가하여 27.0 mg/L의 PO₄³⁻-P가 방출되었다. A₂O SBBR의 경우 유입 기간에서부터 인의 농도가 높은 것으로 보아 인의 방출이 활발하게 진행되고 있다는 것을 알 수 있었고, 1차 비포기 기간 중 pH 감소(Fig. 5(b))를 통해서도 (AO)₂ SBBR에 비해 인의 방출이 활발하게 발생하고 있다는 것을 예상할 수 있었으며, 이 기간 동안 A₂O SBBR의 활발한 TOC 제거 경향(Fig. 3)으로부터도 인의 방출에 대한 근거를 찾을 수 있었다. 그러나 이에 대한 근본적인 원인은 PAOs의 개체수와 활동도에 있을 것으로 판단되어 이에 대한 계속 연구의 필요성을 인식하게 되었다.

1차 포기 기간 중 두 반응기 모두에서 인의 섭취 현상이 발생하였으나, 그 양에 있어서는 상당한 차이가 있었다. (AO)₂ SBBR에서 PO₄³⁻-P 농도는 15.9 mg/L에서 5.8 mg/L로 감소하여 10.1 mg/L의 낮은 PO₄³⁻-P 섭취량을 보인 반면, A₂O SBBR에서는 41.4 mg/L에서 12.1 mg/L로 감소하여 29.3 mg/L의 높은 PO₄³⁻-P 섭취량을 나타내었다. 이는 인의 방출량의 차이에 기인하는 결과로 볼 수 있었다.

(AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR에서 1차 포기 기간 이후에는 인에 있어 큰 변화가 발생하지 않았다. 이는 인의 방출에 필요한 유기물이 부족하였고, 1차 포기 기간 중 발생한 많

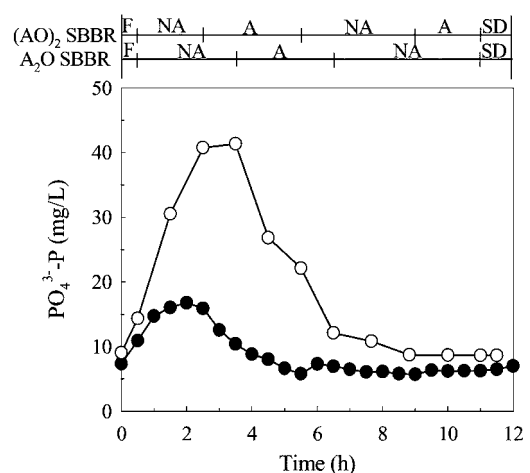


Fig. 6. Typical profiles of PO₄³⁻-P concentration in (AO)₂ SBBR(●) and A₂O SBBR(○). (F: feeding period; NA: non-aeration period; A: aeration period; SD: settling and drawing period).

은 양의 NO_3^- 에 의해 인의 방출이 저해되었기 때문이다. 다만 (AO)₂ SBBR에서 이 기간 중 약간의 인 방출이 관찰되었으나, 그 양은 무시할 수 있을 정도로 적었다.

2차 비포기 기간 중 인의 방출이 거의 발생하지 않음에 따라 2차 포기 기간 중 인의 섭취현상도 관찰할 수 없었다.

본 연구와 같이 낮은 유입 TOC 농도에서는 부족한 TOC로 인하여 (AO)₂ SBBR의 2차 포기 기간은 불필요할 것으로 판단된다. 그러므로 인의 제거를 위해서는 전체적으로 포기 기간보다는 비포기 기간을 늘려주는 것이 적절하며, 특히 2차 비포기 시간을 늘려 주는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 또한 2차 비포기 기간 중 완전한 탈질화를 이루게 되면 유입 기간 중 인의 방출이 원활해짐으로써 보다 활발한 인의 제거가 일어날 수 있을 것으로 예상되므로, 2차 비포기 기간 중 탈질화를 완성할 수 있는 방안에 대한 연구도 함께 추진되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

수중에 존재하는 유기물, 질소 및 인을 제거하기 위하여 생물막과 SBR이 복합된 SBBR을 이용하였으며, 운전주기에 따른 영양염류의 제거 효과를 알아보기 위하여 (AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR을 비교 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) (AO)₂ SBBR과 A₂O SBBR의 TOC 제거효율은 각각 88.0%와 93.5%로 A₂O SBBR의 경우가 높게 나타났다.
- 2) (AO)₂ SBBR에 비해 A₂O SBBR에서는 1차 비포기 기간 중 TOC 제거 효과가 높았으며 인의 방출도 원활하였다.
- 3) 전체적인 질소의 제거효율을 볼 때, (AO)₂ SBBR와 A₂O SBBR의 경우는 각각 85.3%와 76.8%로 나타났으며, A₂O SBBR의 경우 유기물 부족으로 인하여 탈질화가 부족하였기 때문이다.
- 4) (AO)₂ SBBR에서는 1차 포기 기간 중 완전한 질산화가 발생되지 않았으나, A₂O SBBR에서는 완전한 질산화가 유발되었고, 질산화 속도도 A₂O SBBR의 경우가 빠르게 나타났다.
- 5) A₂O SBBR에서는 완전한 질산화가 발생함에 따라 산소가 과잉으로 공급되었고, 다음 비포기 단계에서 DO를 적절하게 제거되는 데 소요되는 시간이 길어서 탈질화가 불완전하였다. 이 결과를 통하여 적절한 공정제어를 통한 포기 시간의 제어 필요성을 인식하게 되었다.
- 6) (AO)₂ SBBR에 비해 A₂O SBBR의 경우에서 인의 방출 및 섭취 효과가 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 2006학년도 대구가톨릭대학교 일반연구비 지원에 의한 연구입니다.

참고문헌

- 김동한, 정태학, SBR 공정에서 온도가 처리효율에 미치는 영향, *상하수도학회지*, **1**, pp. 11-24 (1992).
- 하청근, 최충식, 연속회분식공법에 의한 도축장 폐수 처리, *환경관리학회지*, **5**(2), pp. 369-375 (1999).
- APHA, AWWA and WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th (1992).
- Cheng, N., Lo, K. V. and Yip, K. H., Swine Wastewater Treatment in a Two Stage Sequencing Batch Reactor using Real-Time Control, *J. Environ. Sci. Health*, **B35**(3), pp. 379-398 (2000).
- Gieseke, A., Arnz, P., Amann, R. and Schramm, A., Simultaneous P and N Removal in a Sequencing Batch Biofilm Reactor: Insights from Reactor- and Microscale Investigation, *Water Research*, **36**, pp. 501-509 (2002).
- Irvine, R. L. and Ketchum, L. H., Sequencing Batch Reactors for Biological Wastewater Treatment, *Crit. Rev. Envir. Engrg.*, **18**, pp. 255-294 (1988).
- Irvine, R. L., Wilderer, P. A. and Flemming, F. C., Controlled Unsteady State Processes and Technologies- An Overview, *Water Sci. Tech.*, **35**(1), pp. 1-10 (2001).
- Kim, H., Hao, O. J. and McAvoyn, T. J., SBR System for Phosphorus Removal: ASM2 and Simplified Linear Model, *J. Environ. Eng.*, Feb., pp. 98-104 (2001).
- Ra, C. S., Lo, K. V. and Mavinic, D. S., Real-time Control of Two-Stage Sequencing Batch Reactor System for the Treatment of Animal Wastewater, *Environ. Technol.*, **19**, pp. 343-356 (1998).
- Robertson, L. A. and Kuenen, J. G. : Nitrogen Removal from Water Waste. In *Microbial control of pollution*, ed. Fry, J. C., Gadd, G. M., Herbert, R. A., Jones, C. W. and Watson-Craik, I. A., Cambridge University Press, Cambridge (1992).
- Wilderer, P. A., Arnz, P. and Arnold, E., Application of Biofilms and Biofilm Support Materials as a Temporary Sink and Source, *Water Air Soil Pollut.*, **123**(1-4), pp. 147-158 (2000).
- Zhao, H. W., Mavinic, D. S., Oldham, W. K. and Koch, F. A., Controlling Factors for Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Two-Stage Intermittent Aeration Process Treating Domestic Sewage, *Wat. Res.*, **33**(4), pp. 961-970 (1999).