

연속 회분식 반응기와 연속 회분식 생물막 반응기의 유기물, 질소 및 인의 동시 제거에 관한 비교 연구

박영식 · 김동석*†

대구대학교 보건과학부, *대구가톨릭대학교 환경과학과

A Comparison Study on the Simultaneous Organic, Nitrogen and Phosphorus Removal in Sequencing Batch Reactor and Sequencing Batch Biofilm Reactor

Young-Seek Park · Dong-Seog Kim*†

Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea
*Department of Environ. Sci., Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

(Received March 8, 2005; Accepted April 6, 2005)

ABSTRACT

Laboratory scale experiments were conducted to study the applicability, and to compare the performance of two types of sequencing batch reactor (SBR) systems, a conventional SBR and sequencing batch biofilm reactor (SBBR) on the biological nitrogen and phosphorus removal. The nitrification rate in SBR was higher than that in SBBR both in high influent TOC concentration. The denitrification was completed at the first non-aeration period in SBR, however, the additional non-aeration period should be installed or the first aeration period should be extended more in order to complete the nitrogen removal in SBBR. The time at the first aeration period was more needed as about 4-5 h in order to uptake all the released $PO_4^{3-}-P$ at the first non-aeration period. SBBR needed more operation time, especially the first aeration time, than SBR at the high influent TOC concentration in order to complete nitrogen and phosphorus removal.

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

I. 서 론

현재까지 하수처리시설은 시단위 이상의 대규모 처리 시설에 편중되어 건설되어 왔으며, 이로 인해 읍면 단위의 소규모 지역에서 하수는 제대로 처리되지 않은 채 방류되어 수자원 관리에 많은 어려움을 겪고 있다. 과거에는 소규모의 오수처리를 위하여 분뇨 정화조를 이용하였으며 수세식 화장실의 보급으로 인하여 합병 정화조라는 형태의 처리시설이 보급되었다. 그러나 재래식 화장실에서 사용되는 분뇨 정화조에 비해 오수와 분뇨를 통하여 처리하는 합병 정화조의 운영상의 문제점과 설계상의 문제점들로 인하여 오히려 소하천의 오염

은 더욱 심한 지경에 이르게 되었다. 현재는 합병 정화조라는 용어 대신에 오수처리시설이라는 용어를 사용하고 있다.

읍면 단위 등의 소규모 지역에서 발생하는 생활하수와 축산폐수는 하폐수처리시설의 미비, 혹은 부재로 인해 수계로 바로 배출되고 있으며, 엄격한 규제를 받고 있는 상수원 보호구역의 하폐수처리시설 또한 미흡한 실정이다.¹⁾

이와 같은 여러 문제점들 때문에 농촌 및 상수원 보호구역내의 오수와 분뇨들을 발생원에서 처리하기 위한 소규모 오수처리시설의 필요성이 부각되어, 환경부는 97년 7월부터 생활오수를 발생원에서 직접 처리하기 위해 오수처리장이 설치되지 않은 농어촌, 하천상류 및 소하천 인근 지역(유하거리 500 m내)의 숙박업, 음식점, 목욕탕업 등에서 발생하는 오수와 생활잡배수를 동시에 처리할 수 있는 오수처리시설을 의무적으로 설

†Corresponding author : Department of Environ. Sci., Catholic University of Daegu
Tel: 82-53-850-3250, Fax: 82-53-850-3458
E-mail : kimds@cu.ac.kr

치하도록 법규를 강화시켰다.¹⁾

우리나라 오수처리시설의 경우, 약 80% 이상이 표준 활성슬러지법을 사용하고 있으며, 그밖에 회전원판법이나 실수여상법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 공법은 고도의 처리기술이 필요할 뿐 아니라, 건설비와 유지관리비가 많이 소요된다는 문제점이 있다. 이에 비해 한 반응기 내에서 시간별로 혐기, 무산소 및 호기 조건을 형성시킴으로써 질소와 인을 동시에 제거하는 방법인 연속 회분식 공정(sequencing batch reactor, SBR)은 연속 흐름 활성슬러지 공법의 공간 개념이 각 단계 공정의 시간 개념으로 전환된 공정이라 할 수 있다. 하나의 반응기에서 처리가 가능하기 때문에 다른 처리공법에서 가장 큰 비용을 차지하는 부지 소요비용과 구조가 단순하여 건설비용 등이 적게 소요되며, 호기-혐기 시간을 적절히 조절할 수 있어 시간배분에 있어서 융통성을 가진다. 그러나 SBR 공정은 모든 단위공정 및 조작을 하나의 반응조에서 이루어지기 때문에 처리수량에 따라 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 연속회분식 생물막 반응기(sequencing batch biofilm reactor, SBBR)의 처리효율의 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.^{2,3)}

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.⁴⁾

기존 하수처리장의 활성슬러지를 이용하여, 저농도의 유입 유기물 조건에서 SBR과 고정 생물막을 복합적으로 접목시킨 연속 회분식 생물막 반응기를 기존의 SBR 공정과 비교하여 유기물과 질소 및 인의 제거 특성을 비교하는 연구가 보고된 바 있다.⁵⁾

그러므로 본 연구에서는 기존의 SBR과 동일한 운전 조건을 갖춘 SBBR의 유기물, 질소 및 인의 제거 특성과 미세거동을 비교 관찰하였다. 특히, 유입 유기물의 농도를 증가시켜 질소와 인의 제거가 원활하게 발생할 수 있는 조건에서 유기물과 질소인의 제거특성을 효과적으로 조사함으로써 보다 정확하고 실질적인 비교연구가 가능하게 하였다. 또한, SBR과 SBBR내의 DO 농도와 pH 농도를 실시간으로 측정하여 운전조절인자로서의 가능성을 살펴보았다.

II. 연구방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 2개의 반응조를 설치하여 운전하였는데, 크게 부유하는 미생물을 이용하는 SBR과 생물막을 도입한 SBBR로 대별

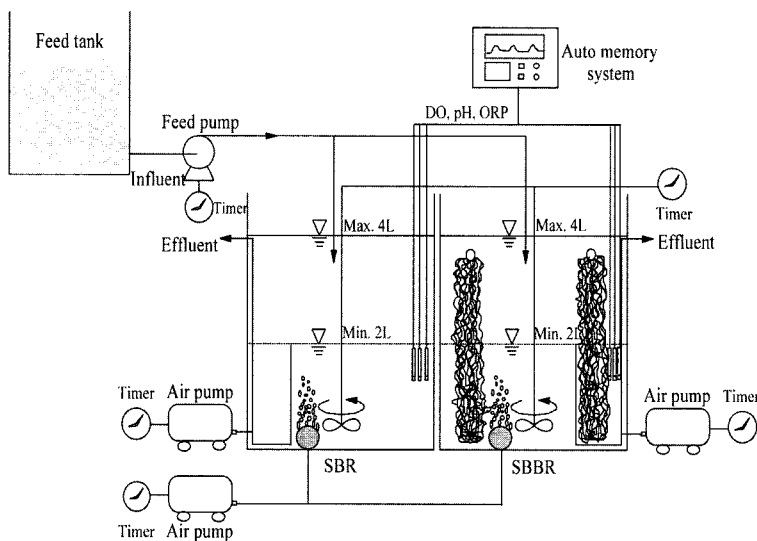


Fig. 1. Schematic diagram of SBR and SBBR system.

할 수 있다. 각 반응조는 5 mm 두께의 투명아크릴로 16×21×25 cm로 제작하여 유입 후 최대 유효 용적을 4 l, 유출 후 최소 유효 용적을 2 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 주입시켰다. 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 airlift 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 헝잡물을 제거하고, 2~3 일 정도 포기시키면서 슬러지 상부에 발생하는 스크(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 bacto-peptone과 glucose를 탄소원으로 사용하였으며, 주요 질소와 인은 각각 (NH₄)₂SO₄과 K₂HPO₄에 의해 구성되었으며, 기타 각종 미량원소로 구성되어졌다.

본 실험에 사용된 매디아는 비표면적이 89~223 m²/m³인 polyvinylchloride 재질의 그물상 여재(단위 직경: 0.5 mm)로서 5×18×20 cm의 크기로 잘라서 겉보기 용적으로 반응기 용적의 약 20%가 되도록 충전시켰다.

2. 운전조건 및 분석방법

각 공정별 운전시간은 유입(30분), 1차 비포기 혼합(2시간), 1차 포기(2시간), 2차 비포기 혼합(3시간 30분), 2차 포기(3시간), 침전(30분), 배출(30분)으로 배분하였다. 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 정상상태에 도달한 다음 이루어졌고, 각 반응기내의 시료 채취는 30분 또는 1시간 간격으로 하였으며, 시료 채취 후 즉시 0.22 μm membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하

는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다. NH₄⁺-N과 MLSS는 Standard Methods⁶⁾에 따라 분석하였으며, 유기물의 농도는 TOC를 지표로 하여 TOC Analyzer (Schimadzu, TOC-5000A, Japan)를 이용하여 분석하였다. NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P의 농도는 Ion chromatography (Metrohm, Ion analysis version 2.0, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. DO, pH는 실시간 자동 측정기(Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 분석하였다. 유입되는 폐수 중의 TOC 농도는 일반 하수의 평균농도보다 높은 약 210 mg/l로 하였고, NH₄⁺-N 농도는 20 mg/l, PO₄³⁻-P 농도는 16 mg/l로 일정하게 유지하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 생물학적 유기물제거

유입 TOC의 농도를 210 mg/l로 유지한 상태에서 약 90일 정도 운전한 결과, 정상상태에 도달하였으며, 그때의 SBR과 SBBR의 유출수 TOC 농도는 각각 20 mg/l와 18 mg/l로 비슷한 값을 나타내었다. 그러나 정상상태에서 1주기 내에 측정된 반응기내 TOC의 값은 약간의 변화차이를 나타내었다.

Fig. 2는 1 cycle 내 측정된 SBR과 SBBR 내 TOC 변화를 나타낸 것이다. SBR과 SBBR의 경우 동일하게 30분 동안 합성폐수를 유입시킨 다음, 2시간의 비포기 기간 동안 TOC가 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. SBR 내에서 1차 비포기 기간중 제거된 TOC의 양과 TOC 제거속도는 각각 29.4 mg/l와 58.9 mg/h

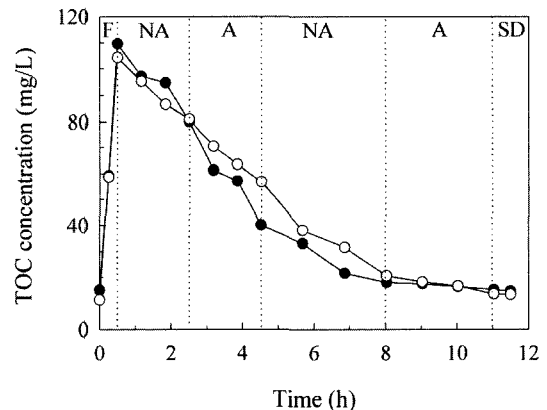


Fig. 2. Typical profiles of TOC concentration at the high influent TOC concentration in SBR (●) and SBBR (○). (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

이었으나, SBBR의 경우에는 23.3 mg/l와 46.5 mg/h로 나타나, SBR에서의 유기물 제거가 약간 활발한 것으로 나타났다. 저농도 유입 TOC의 경우와 비교해 보면,⁵⁾ SBR과 SBBR의 두 반응기 모두에서 TOC 제거량과 제거속도의 증가를 나타내었다.

SBR에서 1차 비포기 기간 중 TOC 제거량은 전체 1주기 중에 제거된 TOC 양에 대해 약 31%를 차지하였는데, 저농도일 때의 12.2%에 비해⁵⁾ 상당한 증가를 나타내었다. SBBR에서는 그 비율이 13.3%에서 25.6%로 증가하였다. 이는 저농도에서는 유기물의 농도가 충분하지 않아 탈질화를 유발시키는 탈질화 미생물(denitrifiers)이나 인을 방출하는 인 제거 미생물(phosphorus accumulation organisms, PAOs)의 활동이 활발하지 못하였으나, 유입되는 유기물의 농도가 증가함에 따라 denitrifiers와 PAOs의 활동도가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

1차 포기 기간 중 SBR의 TOC 제거량과 TOC 제거속도는 각각 40 mg/l와 80 mg/h로 나타났으며, SBBR에서는 24.2 mg/l와 48.4 mg/l이었다. 저농도에서 실험한 결과와 비교해 보면,⁵⁾ 유입되는 TOC의 농도가 증가할수록 TOC 제거량과 TOC 제거속도는 모두 증가하였다. 그러나 SBR에서 이 기간 중 제거된 양을 전체 1 주기 동안 제거된 양과 비교해 볼 때, 유입 TOC의 농도를 증가시키기에 따라 70%에서 42.1%로 감소하였으며, SBBR의 경우에는 45%에서 26.6%로 감소하였다. 이는 포기기간 중 유기물 제거의 대부분을 차지하는 호기성 heterotrophs의 활동이 위축되거나 감소되었다는 것을 의미하며, 간접적으로 질산화 미생물(nitrifiers)의 활동이 증가되었음을 추측해 볼 수 있다.

2차 비포기 기간중 TOC 제거량과 제거속도는 SBR에서는 각각 25.1 mg/l와 50.2 mg/h이었으며, SBBR에서는 36.2 mg/l와 72.4 mg/h로 나타나, SBBR에서 약간의 높은 유기물 제거량과 제거속도를 보였다. 그리고 이 기간 중의 제거량을 전체 1주기 동안의 제거량과 비교해 보면, 저농도의 SBR에서는 12.5%였으나 고농도에서는 26.5%로 증가하였으며, SBBR에서는 16.4%에서 39.8%로 차이를 보였다. 이 또한 유입 TOC 농도가 증가함에 따라 denitrifiers와 PAOs의 활동이 증가하였다는 것을 의미한다.

SBR에서 2차 포기 기간 중의 TOC 제거량과 TOC 제거속도는 각각 0.1 mg/l와 0.15 mg/h로 나타났으며, SBBR에서는 이 기간 중 각각 7.1 mg/l와 9.5 mg/h이었다. 전체 제거량에 대한 이 기간 중 제거된 양의 비율도 유입 TOC 농도가 증가함에 따라 SBR에서는 0.02%로 저농도의 13.7%에 비해 매우 낮았고, SBBR

에서는 7.8%로 저농도의 20.5%에 비해 큰 차이를 나타내었다.

전체적으로 SBR과 SBBR 모두에서, 유입 TOC 농도가 증가함에 따라 포기 기간 중 제거되는 유기물 비율이 감소하고 비포기 기간 중 제거되는 유기물 비율이 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 고농도의 유입 TOC 농도의 경우, SBR에서는 1차 포기 기간 중 유기물의 제거(42.1%)가 여전히 가장 활발한 것으로 나타났다. SBBR에서는 2차 비포기 기간 중의 유기물 제거(39.8%)가 가장 높은 유기물 제거량을 나타내어, 활발한 탈질화 반응이 발생하였다는 것을 간접적으로 알 수 있었다.

2. 생물학적 질소제거

정상상태에서 12시간 동안 SBR과 SBBR내의 질소 변화를 관찰하였다(Fig. 3). 폐수 유입기간 동안 각 반응기는 비포기 상태로 유지하였다. 1차 비포기 기간중 SBR에서는 그다지 큰 NH₄⁺-N의 변화는 관찰되지 않았으나, SBBR에서는 약간의 NH₄⁺-N 변화가 나타났다.

1차 포기 기간 중, SBR에서의 초기 질산화 속도는

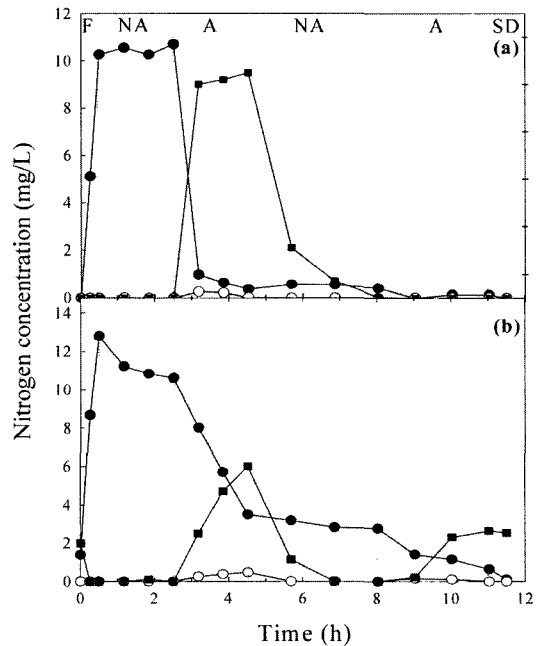


Fig. 3. Typical profiles of NH₄⁺-N (●), NO₂⁻-N (○), NO₃⁻-N (■) concentrations at the high influent TOC concentration in (a) SBR and (b) SBBR. (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

20.7 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 로 매우 빠르게 나타났다. 이는 저농도일 때 초기 질산화 속도가 15.0 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 인 것⁵⁾에 비하면 매우 빠른 질산화 속도이다. 일반적으로 질산화 미생물은 autotrophs로서 유기물의 농도에 무관하거나, 오히려 유기물 농도가 높을 경우 산소를 소비하는 호기성 heterotroph와의 경쟁관계에서 뒤집으로써 유기물 농도가 증가할수록 질산화 속도가 감소하는 경향이 있다. 그러나 적절한 DO, pH, 온도 조건에서는 유기물이 질산화를 증진시킬 수 있다는 보고도 있었고,⁷⁾ 본 연구에서는 연속적인 비포기-포기 단계를 수행함으로써 질산화 미생물이 질소 제거 공정에 적응함으로써 활발한 질산화를 나타낸 것으로 판단된다. SBR에서는 아주 짧은 시간 내에 질산화가 완료되는 것으로 나타났다. 그러나 SBR에서의 질산화 속도는 14.0 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 로서 SBR의 질산화 속도보다 매우 느리게 나타났다. 그리고 이 기간 중 제거된 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 양은 SBR의 경우는 10.35 mg/l이고 SBR의 경우는 7.12 mg/l이었다. 이들 결과로부터 SBR에서의 질산화가 SBR에서의 질산화보다 활발하게 발생하였다는 것을 알 수 있었는데, 그 이유는 SBR이 SBR에 비해 부유 미생물 공정이므로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 수중의 산소와 접할 수 있는 기회가 충분하였기 때문인 것으로 판단된다.⁸⁾ 생물막에서 유기물이 많을 경우 heterotrophs는 주로 생물막 표면에 존재하고 autotrophs는 생물막 내부에 존재하는 경우가 많다. 이는 유기물 농도가 높은 표면에서 heterotrophs가 더 높은 성장속도와 번식할 수 있는 기회를 가지게 되고, 결과적으로 nitrifiers는 생물막 내부로 밀려나기 때문이다. 그러므로 nitrifiers는 이렇게 성층화된 구조로 인하여 내부 산소 전달에 많은 제약을 받기 마련이다. 결국 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 전환은 높은 유기물 농도와 부하에서는 저해를 받을 수밖에 없다.

2차 비포기 기간 중 SBR과 SBR의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 감소하는 경향을 나타내었다. SBR에서 초기 탈질화 속도와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 제거량은 각각 25.3 mg $\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 와 9.4 mg $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{L}$ 이었다. 이는 유입 TOC 농도가 62 mg/l로 저농도일 경우,⁵⁾ 탈질화는 거의 발생하지 않은 것과 비교해 볼 때 매우 상이한 결과이다. 이 활발한 탈질화는 고농도의 유기물로 인하여 이를 적절하게 이용할 수 있었기 때문인 것으로 생각된다. 대부분의 탈질화가 이 기간 중에 이루어졌으나, SBR의 탈질화 속도는 16.7 mg $\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 이고 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 제거량은 6.2 mg/l로서 SBR에 비해 탈질화 속도도 느리고 제거량도 적었다. 그러므로 SBR에서는 전단계인 1차 포기 기간에서 완전한 질산화가 일어났고 뒤이은 2차 비포기

기 기간에서 충분한 유기물 농도로 인하여 탈질화도 완성되었기 때문에 2차 포기 기간은 불필요한 것으로 판단되었다. 그러나 SBR에서는 1차 포기 기간만으로는 질산화가 완료되지 않았기 때문에 2차 포기 기간이 필요하였다.

SBR에서는 2차 포기 기간 중 추가적인 질산화가 발생하였으나, SBR에서는 대부분의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 전 단계에서 제거되어 질산화가 발생하지 않았다. SBR에서 이 기간 동안의 질산화 속도는 2.84 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{removed}}/\text{h}$ 로서 1차 포기 기간 중의 질산화 속도에 비하면 매우 느린 속도였다.

결과적으로 SBR에서는 모든 종류의 질소가 제거되었다. SBR의 유출수 중에는 2.5 mg $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{L}$ 정도의 미량 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 잔존하였으나, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 는 존재하지 않았다. 그러므로 SBR에서는 완전한 질소 제거를 이루기 위해서는 1차와 2차 비포기 기간외에 추가적인 비포기 기간이 필요하거나 1차 포기 기간을 늘려주어 완전한 질산화를 유발시키는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3. 생물학적 인 제거

SBR과 SBR에서 1주기 동안의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 변화를 Fig. 4에 나타내었다. PAOs에 의한 비포기시 인의 방출과 포기시 인의 과잉 섭취를 SBR과 SBR 모두에서 관찰할 수 있었다. 유입 기간 중, 반응기에 이미 잔존하는 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도는 3~4 mg/l이고 유입수중의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 16~18 mg/l이었다. 그러므로 유입기간이 끝난 다음 반응기내 인의 농도는 이론적으로 9.5~11 mg/l이어야 한다. 그런데 유입이 끝난 후 SBR내의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

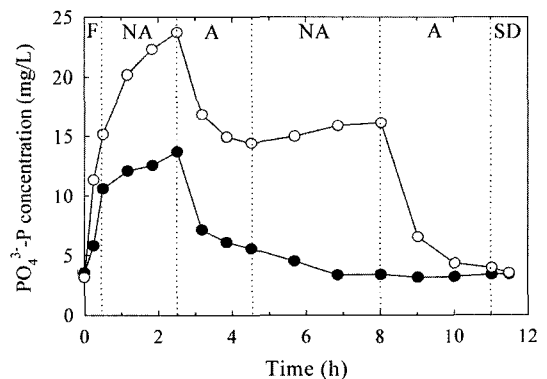


Fig. 4. Typical profiles of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration at the high influent TOC concentration in SBR (●) and SBR (○). (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

농도는 이론적인 계산치와 유사하게 나타났으나, SBBR 내의 PO_4^{3-} -P 농도는 15 mg/l 정도로 이론적인 값보다 높게 나타났다. 이는 유입 기간에도 비포기가 유지됨으로써 인의 방출이 발생하였다는 것을 보여준다. 그러므로 유입 기간에서는 SBBR 내에서의 PO_4^{3-} -P 방출이 SBR보다 원활하다는 것을 알 수 있었다.

저농도의 TOC가 유입되었을 때와 비교해보면,⁹⁾ PO_4^{3-} -P 방출에 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 저농도의 경우 SBR에서는 PO_4^{3-} -P의 방출을 거의 관찰할 수 없었고, SBBR에서는 2.8 mg/l의 낮은 PO_4^{3-} -P 방출이 나타났다. SBR에서는 낮은 유기물 농도와 NO_3^- -N의 저해 작용으로 인의 방출이 발생하지 않았으나, SBBR에서는 비교적 낮은 NO_3^- -N 농도로 인하여 저해 작용이 적었고 생물막의 특징으로 인하여 생물막 내부에서 세포분해로 인하여 발생하는 유기물을 이용할 수 있어 PO_4^{3-} -P의 방출이 발생하였던 것으로 보인다. 그러나 높은 유기물 농도에서는 SBR의 경우 1차 비포기 기간 중에 PO_4^{3-} -P의 농도가 10.6 mg/l에서 13.7 mg/l로 증가하여 3.1 mg/l의 PO_4^{3-} -P 방출이 발생하였다. 그러나 SBBR에서는 보다 많은 8.6 mg/l의 PO_4^{3-} -P 방출이 있었다. 이 기간동안의 TOC 제거량은 서로 유사하였으므로 이러한 PO_4^{3-} -P 방출의 차이는 단순히 이용된 유기물의 농도 차이로 볼 수 없었다. 그러므로 SBBR에 존재하는 PAOs의 활동도나 균수가 SBR의 경우보다 높았기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있었다. PAOs가 다른 heterotrophs나 denitrifiers에 비해 열세에 있는 미생물이기는 하지만 SBBR은 생물막 공정이므로 외부로 wash-out되지 않고 생존하여 활성을 가지게 된 것으로 생각할 수 있다. 그러나 이 점은 앞으로 계속 조사연구해 보아야 할 부분이라 판단된다.

1차 포기 기간동안, SBR과 SBBR에서 제거된 PO_4^{3-} -P 양은 각각 8.2 mg/l와 9.3 mg/l로 나타났다. 1차 비포기 기간동안 방출된 PO_4^{3-} -P 양과 비교해 볼 때, PAOs에 의한 PO_4^{3-} -P의 과잉섭취 현상을 관찰할 수 있었다. SBBR의 경우 1차 포기 시간을 2시간 이상으로 길게 설정할 경우, 보다 많은 PO_4^{3-} -P의 섭취가 발생하였을 것으로 예상된다.

1차 비포기 기간에서, SBR과 SBBR은 인의 방출에 있어 상당한 차이를 나타내었다. SBR에서는 비포기 기간임에도 불구하고 PO_4^{3-} -P 농도가 5.6 mg/l에서 3.4 mg/l로 감소하여 계속적인 PO_4^{3-} -P의 섭취가 발생하였다. 이는 6 mg/l의 비교적 높은 NO_3^- -N 농도와 40 mg/l의 낮은 TOC 농도에 기인한 것으로 볼 수 있다.^{9,10)} 그러나 이 기간 중 SBBR에서는 2차 PO_4^{3-} -P 방출이 발생하여 PO_4^{3-} -P 농도가 14.4 mg/l에서 16.1

mg/l로 증가하였다. 이는 SBBR에서 NO_3^- -N의 농도가 그다지 높지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이 이간 동안 방출된 PO_4^{3-} -P의 양은 낮은 TOC 농도로 인하여 1차 비초기시 방출된 양과 비교할 때 매우 적은 값이었다.

2차 포기시, SBBR에서는 2차 PO_4^{3-} -P의 섭취가 발생하였으나, SBR에서는 그다지 큰 변화가 관찰되지 않았다. SBBR에서 1차 포기시의 초기 PO_4^{3-} -P 섭취속도는 41.2 mg PO_4^{3-} -P/h로서 2차 포기시의 초기 PO_4^{3-} -P 섭취 속도인 38.1 mg PO_4^{3-} -P/h와 유사하게 나타났다. 그러나 2차 포기시의 PO_4^{3-} -P 섭취량은 12.2 mg/l로서 1차 포기시의 PO_4^{3-} -P 섭취량인 9.3 mg/l보다 많았는데, 이는 2차 포기기간이 1차 포기기간보다 1.5시간 정도 길었고 TOC의 농도가 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 2차 포기 기간동안의 PO_4^{3-} -P 섭취는 2차 비포기 기간 동안 방출된 PO_4^{3-} -P을 섭취하는 것이라기보다는 1차 비포기 기간동안 방출되었으나 1차 포기 기간동안 섭취되지 못한 PO_4^{3-} -P을 이 기간동안 섭취한 것으로 생각된다. 그러므로 SBBR에서 PO_4^{3-} -P의 섭취를 원활하게 하기 위해서는 1차 포기기간을 4~5시간 정도로 늘려 1차 비포기 기간 중 방출되는 PO_4^{3-} -P를 모두 섭취할 수 있도록 하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

전체적으로 PO_4^{3-} -P의 방출과 섭취에는 SBBR이 유리한 것으로 나타났다. SBR에서는 1차 비포기 기간 중에 적은 양의 PO_4^{3-} -P 방출이 발생하였으므로 아주 짧은 시간내에 PO_4^{3-} -P의 섭취가 이루어질 수 있었으나, 1차 비포기 기간중 많은 양의 PO_4^{3-} -P가 방출되는 SBBR에서는 방출된 많은 PO_4^{3-} -P를 섭취하기 위해서 보다 긴 기간의 포기 기간이 필요하였다.

많은 연구자들은 본 연구에서 사용한 glucose를 유기물로 이용할 경우, 고도 생물학적 인 제거 공정 (enhanced biological phosphorus removal)에서 실패할 가능성이 높다고 보고한 바 있다.¹¹⁾ 그러나 본 연구에서는 glucose를 주 탄소원으로 이용하여 유입 TOC의 농도가 높은 경우에는 성공적인 EBPR 공정이 가능하였다. 또한, Wang 등¹²⁾도 긴 혐기 조건과 높은 초기 glucose 농도는 성공적인 EBPR 공정을 이루는 데 매우 중요한 인자라고 보고한 바 있다.

4. DO와 pH의 변화

일반적으로 SBR과 SBBR 모두에서 pH는 포기 조건에서 증가하였고 비포기 조건에서 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 5). 그리고 1차 포기 기간중의 최대 DO 농도는 2차 비포기 기간중의 최대 DO 농도에 비해 낮

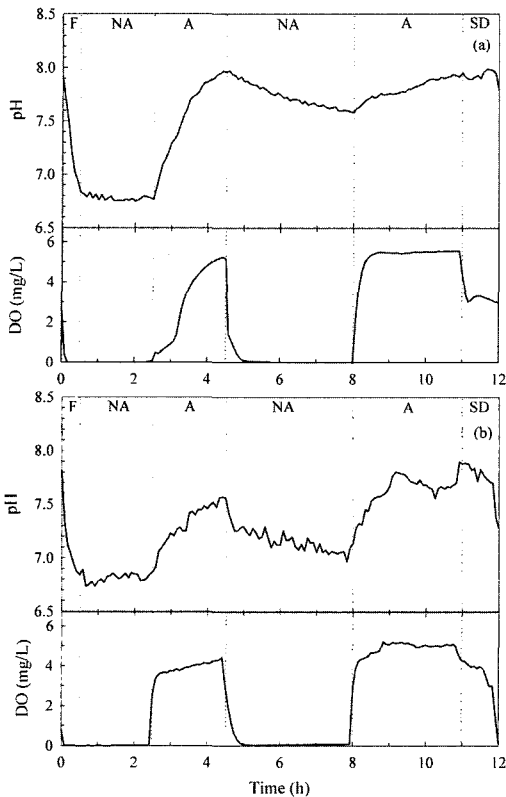


Fig. 5. Typical profiles of DO concentration and pH at the high influent TOC concentration in (a) SBR and (b) SBBR. (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

었는데, 이는 1차 포기 기간 중에 높은 TOC, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 및 방출된 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도로 인하여 호기성 heterotroph, nitrifier 및 PAOs에 의한 DO 섭취가 보다 원활하였기 때문인 것으로 판단된다. 저농도의 유입 TOC 상태에서는⁹⁾ 질소와 인 제거를 위한 미생물들의 활동이 활발하지 않아서 SBR과 SBBR 모두에서 그다지 큰 pH 변화를 보이지 않았다. 그러나 유입 TOC 농도가 높은 본 연구에서는 pH의 변화가 크게 나타났다. 특히, SBR에서는 DO를 소비하는 미생물들(호기성 heterotrophs, nitrifiers, PAOs 등)의 활동이 활발하여 1차 포기 기간 중 초기 30분 이내에 DO 증가에 대한 지체 효과가 명확하게 나타났다.

SBR의 경우, 1차 포기 기간 중의 pH 증가 기울기가 2차 포기 기간 중의 증가 기울기에 비해 크게 나타났는데, 이는 1차 포기 기간 중의 질산화와 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 섭취가 2차 기간에 비해 활발하게 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 SBBR에서는 1차 포기 기간 중

의 pH 증가 기울기가 2차 포기 기간에 비해 약간 적게 나타났는데, 이는 2차 포기 기간 중의 질산화와 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 섭취가 보다 활발하였다는 것을 의미한다. 그런데 이 기간 중의 질산화 속도와 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거량은 2차 포기 기간에 비해 매우 큰 것으로 나타났고(Fig. 3), 1차 포기 기간 중의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 섭취량은 2차 포기 기간에 비해 약간 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4). 그러므로 SBBR에서 2차 포기 기간중의 pH 변화는 질산화보다는 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 섭취에 기인하는 것으로 판단된다. 그리고 높은 TOC 농도 조건에서 완전한 질소인 제거를 위해서는 SBBR은 SBR에 비해 보다 긴 운전 기간이 필요한 것으로 생각된다. 특히 1차 포기 기간을 적절하게 조절할 필요성이 있다고 판단되었다.

IV. 결 론

고농도의 유입 TOC 조건에서 SBR과 SBBR의 질소인 제거거동을 비교관찰하였다. 질소와 인의 제거 거동은 유입 TOC가 저농도인 경우와 비교해 볼 때 상당한 차이를 나타내었다. 또한 질소와 인의 제거 거동은 TOC의 제거 거동 및 DO와 pH의 변화를 통해 설명가능하였다.

210 mg/l의 높은 유입 TOC 조건에서 SBR은 1차 포기 기간을 통하여 완전한 질산화가 이루어 졌으나, SBBR은 질산화가 불충분하였다. 그러므로 SBR에서는 질산화가 1차 포기 기간 중 완전하게 이루어짐으로써 2차 포기 기간이 불필요하였으나, SBBR에서는 1차 포기 기간 중의 불완전한 질산화로 말미암아 2차 포기 기간이 반드시 필요하거나 1차 포기기간을 늘려야 할 필요성을 인식하게 되었다.

고농도의 TOC 농도에서, 1차 비포기 기간 중 SBBR의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 방출은 SBR의 경우보다 활발하였으나, 1차 포기 기간 중 완전한 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 섭취가 이루어 지지는 않았다. SBBR에서 2차 포기 기간 중의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 섭취는 2차 포기 기간에서의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 방출에 따른 결과라기보다는 1차 포기 기간 중 방출된 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 를 추가로 섭취한 결과인 것으로 판단되었다. 질소 제거의 경우와 마찬가지로 SBBR에서는 1차 비포기 기간중 방출된 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 를 원활하게 제거하기 위해 1차 포기 기간을 4~5시간 이상으로 유지할 필요성이 있었다.

감사의 글

본 연구는 2005학년도 대구가톨릭대학교 일반연구비 지원에 의한 연구이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부 : 환경백서. 526-535, 2002.
2. 신항식, 박홍식 : 미디어를 함유한 연속 회분식 반응기를 이용한 폐수처리(I). 대한환경공학회, **12**(3), 73-82, 1990.
3. Woolard, C. R. : The advantages of periodically operated biofilm reactors for the treatment of highly variable wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, **35**(1), 199-206, 1997.
4. Hascoet, M. C., Florentz, M. and Granger, P. : Biochemical aspects of enhanced biological phosphorus removal from wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, **17**, 23-41, 1985.
5. 박민정, 김동석 : 연속회분식 생물막 반응기(Sequencing Batch Biofilm Reactor)를 이용한 수중의 유기물, 질소 및 인의 동시 제거 관한 연구. 한국환경위생학회지, **30**(2), 84-91, 2004.
6. APHA, AWWA and WPCF : Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th, 1992.
7. Hockenbury, M. R. : Factor affecting nitrification. *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, **103**, 9-19.
8. 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.
9. Kern-Jespersen, J. P. and Henze, M. : Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition. *Wat. Res.*, **27**(4), 617-624, 1993.
10. Schon, G. S. Gfywitz, S. and Mertens, F. : Influence of dissolved oxygen and oxidation and oxidation-reduction potential on phosphate release and uptake by activated sludge from sewage plants with enhanced biological phosphorus removal. *Wat. Res.*, **27**(3), 349-354, 1993.
11. Cech, J. S. and Hartman, P. : Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria biological phosphorus removal systems. *Wat. Res.*, **27**, 1219-1225, 1993.
12. Wang, N., Peng, J. and Hill, G. : Biochemical model of glucose induced enhanced biological phosphorus removal under anaerobic condition. *Wat. Res.*, **36**, 49-58, 2002.