

(AO)₂ 연속 회분식 생물막 반응기에서 포기 시간 배분에 따른 유기물 및 질소와 인의 동시 제거에 관한 연구

박 영 식 · 김 동 석*

대구대학교 보건과학부, *대구가톨릭대학교 환경과학전공
(2005년 6월 2일 접수; 2005년 8월 14일 채택)

A Simultaneous Removal of Organic, Nitrogen and Phosphorus According to the Distribution of Aeration Time in (AO)₂ SBBR

Young-Seek Park and Dong-Seog Kim*

Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongsan 712-830, Korea

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

(Manuscript received 2 June, 2005; accepted 14 August, 2005)

This study was carried out to get more operational characteristics of Anoxic(anaerobic)-Oxic-Anoxic-Oxic (AO)₂ sequencing batch biofilm reactors (SBBRs) at the low TOC concentration. The operating time in anoxic (anaerobic) time to oxic time was 1 : 1. Experiments were conducted to find the effects of the aeration time distribution on the organic matters and nutrients removal. Three lab-scale reactors were fed with synthetic wastewater based on glucose as carbon source. During studies, the operation mode was fixed. The first aeration time to the second aeration time in SBBR-1 was 2 : 3, and those in SBBR-2 and SBBR-3 were 1 : 4 and 3 : 2, respectively. The organic removal efficiency didn't show large difference among three reactors of different aeration time distribution. However, from these study results, the optimum aeration time distribution in the first and the second aeration time for biological nutrient removal was shown as 3 : 2. The release of phosphorus was inhibited at the second non-aeration period because of the low TOC concentration and the nitrate produced by the nitrification at the first aeration period.

Key Words : (AO)₂ SBBR, Aeration time, EBPR, DO, PH

1. 서론

우리나라에 설치된 하수종말처리시설의 2차 처리 공정은 80%가 표층활성슬러지공정을 채택하고 있다. 그러나 수중에 존재하는 유기물과 부유 고형물의 처리뿐만 아니라 부영양화의 주요 원인 물질로 인식되고 있는 질소와 인 등과 같은 영양염류는 거의 처리되지 않아 이의 처리를 위해 3차 처리공정을 신설하거나 처리장 운영방법의 변형을 통한 영양염류 제거방법을 모색하고 있다.

영양염류인 질소와 인의 처리방법 중 생물학적 처리방법이 물리·화학적 방법에 비해 경제적이며, 공정의 안전성이 높을 뿐만 아니라 슬러지 발생과 같은 2차 오염물질 발생의 위험 부담이 적어, 생물학적 처리방법이 영양염류의 처리방법으로 선호되고 있다. 생물학적 영양염류의 제거 공정으로는 이미 오래 전에 외국에서 검증된 바 있는 A₂/O 공정, 5단계 Bardenpho 공정, UCT 공정, VIP 공정 등이 있으나, 이들 공정들은 국내에서는 잘 적용되지 못하고 있는데, 그 이유는 국내의 하수 배제 방식이 대부분 합류식으로 되어 있어 외국의 하수 원수에 비해 유기물질의 농도는 낮은 반면 질소의 농도는 오히려 높은 하수 원수의 특성 때문인 것으로 판단된다¹⁾.

특히, 생활오수의 경우 약 78%는 하수처리구역 내

Corresponding Author : Dong-Seog Kim, Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea
Phone: +82-85-850-3250
E-mail: kimds@cu.ac.kr

에서 발생하고 있으나, 하수관거 정비 미흡, 하수처리시설의 시설용량 부족 등으로 인하여 실제 하수처리시설로 유입처리되는 생활오수량은 이보다 적을 것으로 추정된다. 또한 읍·면 단위 등의 소규모 지역에서 발생하는 생활하수와 축산폐수는 하·폐수처리시설의 미비, 혹은 부재로 인해 수계로 바로 배출되고 있으며, 엄격한 규제를 받고 있는 상수원 보호구역의 하·폐수처리시설 또한 미흡한 실정이다²⁾.

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 발생되는 오수와 생활잡배수를 동시에 처리할 수 있는 오수처리시설을 의무적으로 설치하도록 법규를 강화시켰다²⁾.

우리나라에서 가장 많이 이용하고 있는 표준활성슬러지공정은 고도의 처리기술이 필요할 뿐 아니라, 건설비와 유지관리비가 많이 소요된다는 문제점 등이 있어 대규모 하수처리공정에는 적합하나 소규모의 오수처리시설에는 부적합하다는 평가를 받고 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 소규모 오수 처리공정에 적합한 것으로 인식되고 있다. SBR 공정은 연속흐름 활성슬러지 공정의 공간 개념이 각 단계공정의 시간 개념으로 전환된 공정이라 할 수 있다. 하나의 반응기에서 처리가 가능하기 때문에 다른 처리공정에서 가장 큰 비용을 차지하는 부지 소요

비용과 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^{3,4)}.

따라서 본 연구에서는 비포기-포기-비포기-포기(AO)₂ SBBR 공정의 운전에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 비포기-포기의 배분에 있어 포기시간의 배분에 따른 유기물, 질소 및 인의 변화를 미시적 관점에서 관찰하고 아울러 각 SBBR 공정에서의 DO 농도와 pH 변화를 함께 살펴봄으로써 SBBR에서의 공정 자동화 가능성을 알아보고 SBBR 운전의 최적화에 대한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 반응

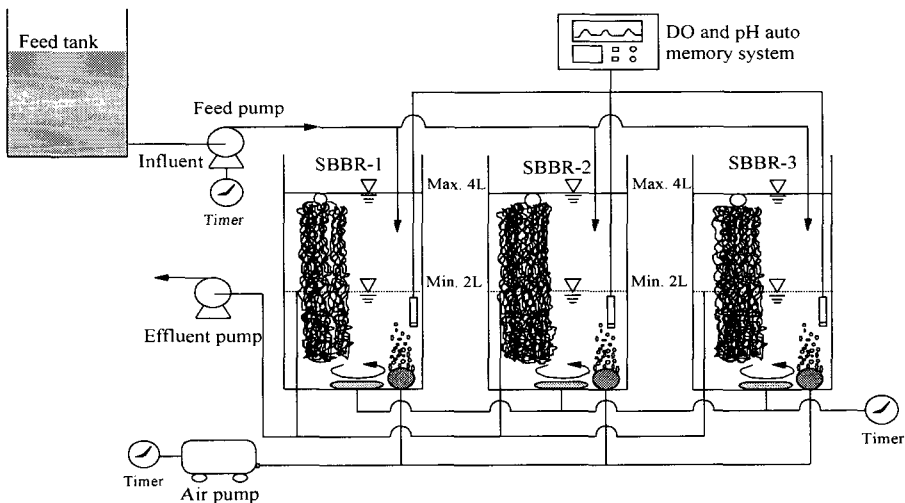


Fig. 1. Schematic diagram of SBBR-1, -2 and -3 systems.

(AO)₂ 연속 회분식 생물막 반응기에서 포기 시간 배분에 따른 유기물 및 질소와 인의 동시 제거에 관한 연구

조는 3개를 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 polythylenemine 재질로 비표면적이 3.0~7.0 m²/m³이며, 공극률이 0.93인 수세미 형태로써 5×14×20 cm의 크기로 잘라 걸보기 용적으로 반응기 최대유효 용적의 약 25 %가 되도록 각각 충전시켰다. 처리수는 30분간의 침전시간이 지난 다음 최대 유효 용적의 50% 인 2 L를 정량펌프를 이용하여 유출시켰다. 비포기시 반응기의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석교반기(Gowon GW-92HS)를 설치하여 약 200~250 rpm으로 교반시켰다. 포기시 공기 펌프를 이용하여 반응기 하부에 설치된 환형 공기 분산기를 통하여 공기를 주입시켰으며, 이 때 rotameter를 설치하여 공기량을 0.5 L/min으로 일정하게 유지하였다. 기질공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은 timer를 이용하여 시간대에 따른 제어가 가능하도록 하였으며, 온도는 온도조절기를 반응기 상부에 설치하여 20±1℃로 일정하게 유지하였다. 슬러지의 식종은 유기물 처리가 목적인 G시 하수처리장의 반송 슬러지를 채취하여 35 mesh의 체를 이용하여 헹잡물을 제거하고, 2~3일 정도 포기시키면서 슬러지 상부에 발생하는 스크(scum)을 완전히 제거한 다음, 3~4차례의 수세과정을 거친 후, 포기시 MLSS가 3,500 mg/L가 되도록 각 반응기에 동일하게 주입시켰다. 전체적인 반응기의 슬러지 체류시간(sludge residence time, SRT)는 20~30일 정도 유지되도록 일정 양의 슬러지를 매일 침전 시간에 생물막을 털어서 제거하였다. 본 실험에 사용된 합성폐수는 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	4.35
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. 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. 전체적인 비포기-포기에 소요되는 시간은 10시간 30분이고, 비포기에 5시간 30분을 할당하였고 포기시간은 5시간이 되도록 하여 비포기와 포기시간 배분이 약 1:1이 되도록 하였다. 1차 비포기시간은 2시간, 2차 비포기시간은 3시간 30분으로 항상 일정하게 유지하였으나, 포기 시간을 1차와 2차를 다르게 설정하여 포기시간 분배에 따른 영향을 살펴보았다. SBBR-1에서는 1차 포기시간을 2시간, 2차 포기시간을 3시간으로 하였고, SBBR-2에서는 1차 포기시간과 2차 포기시간을 각각 1시간과 4시간으로 하여 전반부의 포기시간을 짧게 하고 후반부의 포기시간을 길게 하였으며, SBBR-3에서는 1, 2차 포기시간을 각각 3시간과 2시간을 하여 전반부의 포기시간을 길게 하고 후반의 포기시간을 짧게 유지하였다.

각 성분의 분석은 실험이 90일 정도 경과되어 충분한 질소·인 제거가 확인되고 정상상태에 도달된 다음 이루어졌고, 각 반응기내의 시료 채취는 약 1시간마다 채취하여 각각의 유입, 비포기 및 포기 등의 시간조건에서 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 Methods⁵⁾에 따라 측정하였고, NH₄⁺-N의 측정은 UV/VIS (Shimadzu, UV-1601)를 이용하여 분석하였다. 유기물의 농도는 TOC (Total Organic Carbon)를 지표로 이용하여 TOC Analyzer (Shimadzu, 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. 용존산소 (Dissolved Oxygen, DO) 농도와 pH는 실시간 자동 측정기 (Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 분석하였다.

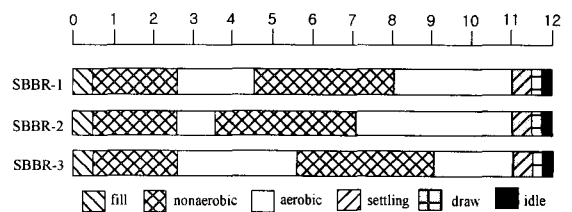


Fig. 2. Operating conditions in SBBR-1, 2, 3.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물의 제거

유입 TOC의 농도를 70 mg/L로 유지한 상태에서 약 90일 정도 운전한 결과, 정상상태에 도달하였으며 각 반응기의 유출 TOC 농도는 8~11 mg/L로 나타나 전체적인 TOC 제거효율은 84~89% 였다. 그러나 정상상태에서 1주기 내에 측정된 TOC 값은 각 운전 시점에서 약간의 차이를 나타내었다.

최초 투입 슬러지의 색깔은 옅갈색이었으나, 계속적인 비포기/포기의 반복으로 슬러지의 색깔은 밝은 갈색으로 전환되었다. 이 색깔의 변화가 질소 제거 미생물에 기인한 것인지, 아니면 인 제거 미생물에 기인한 것인지는 명확하지는 않지만, 질소와 인의 제거가 어느 정도 이루어지기 시작하면서 색깔의 변화가 관찰되었다. Hu 등⁶⁾은 무산소/호기 SBR을 이용한 질소와 인의 제거 실험에서 실험 시작 약 64일 경에 밝은 갈색으로 슬러지가 바뀌었다고 보고한 바 있다.

Fig. 2는 포기시간의 배분을 각각 다르게 운전한 SBBR-1, 2, 3의 1주기(12시간)내 측정된 TOC 변화를 나타낸 것이다.

각 반응기 모두 동일하게 비포기기간 30분 동안 약 2 L의 합성폐수를 유입시켰다. 우리나라 하수의 특징 중 하나로서 유기물 농도가 낮은 것을 고려하여, 유입되는 TOC 농도는 약 70 mg/L로 하였다.

2시간의 1차 비포기기간 동안 TOC가 감소되는 것을 관찰할 수 있었다. SBBR-1에서 1차 비포기기간 중 제거된 TOC의 양과 TOC 제거속도는 각각 3.5 mg/L와 7.0 mg/h로 나타났으며, SBBR-2의 경우에는 각각 2.4 mg/L와 4.8 mg/h였고, SBBR-3에서는 각각 3.2 mg/L와 6.4 mg/h로 관찰되었다. 이 결과를 볼 때, SBBR-2에서의 TOC 제거에 비해 SBBR-1과 SBBR-3에서의 TOC 제거가 다소 활발하게 나타난 것으로 생각되나, 그 차이는 그다지 크지 않았다. SBBR-2에서 1차 비포기기간 중의 TOC 제거량은 전체 1주기 동안의 TOC 제거량에 대해 약 9.6% 정도였으나, SBBR-1과 SBBR-3에서는 각각 13.3%와 12.4%를 나타내어 SBBR-2에 비해 다소 높게 나타났다.

이 기간 동안의 TOC 제거는 대부분 탈질 과정과 인의 방출 과정에 의한 TOC 소모로 예측되어, SBBR-1과 SBBR-3에서 탈질과 인 방출이 SBBR-2에 비해 보다 활발할 것으로 예상된다. SBBR-1과 SBBR-2에서는 1차 비포기기간 동안 잔존하는 NO_3^- 으로 인하여 탈질화가 발생하였으나(Fig. 4, 5), NO_3^- 의 저해 작용으로 인하여 인의 방출은 원활하지 못하였다(Fig. 7). 그러므로 이 기간 동안 SBBR-1과

SBBR-2에서 제거된 상당량의 TOC는 탈질화에 이용된 것으로 짐작할 수 있다. 그러나 SBBR-3에서는 잔존하는 NO_3^- 가 거의 없어 탈질화는 발생되지 않았으며(Fig. 6), 인의 방출이 활발하게 발생하는 것으로 보아(Fig. 7), 이 기간 동안 SBBR-3에서 제거된 대부분의 TOC는 인의 방출에 이용된 것으로 판단된다. 1차 포기기간 중 SBBR-1의 TOC 제거량과 TOC 제거 속도는 각각 11.5 mg/L와 23.0 mg/h였고, SBBR-2의 경우에는 각각 5.3 mg/L와 21.2 mg/h로 나타났으며, SBBR-3에서는 각각 19.4 mg/L와 25.9 mg/h로 관찰되었다. SBBR-2의 경우 SBBR-1과 SBBR-3에 비해 포기기간이 1시간으로 매우 짧아 TOC 제거량은 적었으나, 짧은 포기기간에 비해 TOC 제거 속도는 큰 차이를 나타내지 않았다. SBBR-1에서 1차 포기기간 동안 제거된 TOC 량은 전체 1주기 동안 제거된 TOC 량에 대해 약 43.8%를 차지하였고, SBBR-2에서는 21.2%, SBBR-3에서는 51.9%를 차지하여, 전체적으로 이 기간동안 제거된 TOC 량이 많은 것으로 나타났다. 포기기간 중의 TOC 제거는 대부분 호기성 heterotroph에 의한 것으로 판단되므로, 이 기간 중의 TOC 제거는 2차 비포기기간 중의 탈질화에 있어 유기물 부족을 유발시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로 부족한 유입 유기물 농도로 인하여 아직 탈질화 미생물이나 인 제거 미생물의 출현이 충분히 발생하지 못하였거나 보다 긴 적응기간이 필요한 것으로 판단된다. 특히, SBBR-2에서는 이 기간 동안 제거된 TOC 량이 전체 TOC 제거량의 21.2%로 낮게 나타남으로써 2차 비포기기간에서의 활발한 탈질화나 높은 인의 방출량을 기대할 수 있었으나, 결과는 그에 미치지 못하였다(Fig. 5, 7).

2차 비포기기간 중 TOC 제거량과 제거 속도는 SBBR-1에서 각각 4.3 mg/L와 4.9 mg/h이었으며, SBBR-2의 경우 각각 8.1 mg/L와 9.3 mg/h로 나타났고, SBBR-3에서는 각각 6.6 mg/L와 7.5 mg/h로 측정되었다. SBBR-2에서는 짧은 1차 포기기간으로 인하여 TOC의 제거가 상대적으로 적었기 때문에 2차 비포기기간 동안 유기물의 제거가 상대적으로 증가한 것으로 판단된다. 그러나 이 기간동안의 유기물 제거가 탈질과 인 방출에 미치는 영향에 대해서는 앞의 1차 포기기간 동안의 TOC 결과에서 고찰한 바와 같이 만족할 만한 수준이 되지 못하였다.

SBBR-1에서 2차 포기기간 중의 TOC 제거량과 TOC 제거 속도는 각각 5.4 mg/L와 7.2 mg/h였고, SBBR-2의 경우는 각각 9.2 mg/L와 9.2 mg/h로 나타났으며, SBBR-3에서는 각각 3.5 mg/L와 7.0 mg/h로 관찰되었다. SBBR-2에서는 가장 긴 포기기간으로

(AO)₂ 연속 회분식 생물막 반응기에서 포기 시간 배분에 따른 유기물 및 질소와 인의 동시 제거에 관한 연구

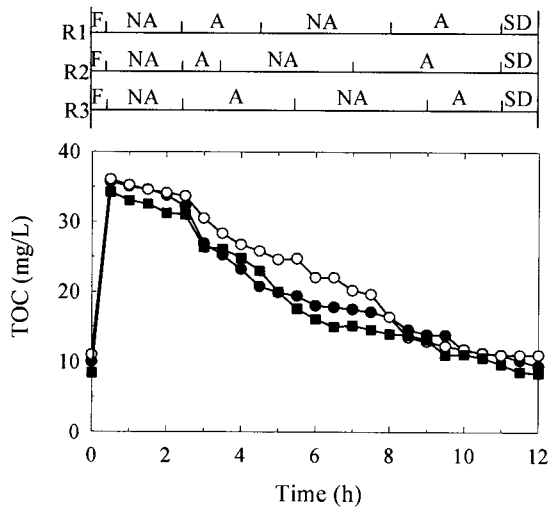


Fig. 3. Typical profiles of TOC concentration in SBBR-1(●), -2(○), -3(■).

로 인하여 가장 높은 TOC 제거량을 보였고, SBBR-3는 2시간의 가장 짧은 포기기간으로 인하여 가장 낮은 TOC 제거량을 보였다. 이 기간동안 제거된 TOC 량은 전체 1주기 동안 제거된 TOC 량에 대해 SBBR-1에서는 20.6%, SBBR-2에서는 36.8%, SBBR-3에서는 13.6%를 차지함으로써, SBBR-1과 SBBR-3에서는 1차 포기기간 중의 결과에 비해 월등히 감소되었으나, SBBR-2에서는 오히려 증가되는 결과를 나타내었다.

전체적으로 포기기간 중 제거된 TOC 량을 전체 TOC 제거량과 비교해 보면 SBBR-1에서는 16.9 mg/L로서 전체 TOC 제거량의 68.4%를 차지하였고, SBBR-2는 14.5 mg/L로서 58.0%, SBBR-3에서는 16.9 mg/L로서 63.3%로 나타났다. 이 결과로 볼 때, 비포기시간과 포기시간을 1:1 정도로 배분할 경우 포기기간 중 제거되는 TOC 량이 월등히 높았으며, 이는 호기성 heterotroph의 활동이 여전히 활발하여 비포기기간 동안의 탈질화 미생물(denitrifiers)와 인을 제거할 수 있는 미생물(phosphorus accumulating organisms, PAOs)들의 활동이 상대적으로 저조하다는 것을 간접적으로 판단할 수 있었다. 특히, SBBR-1과 SBBR-3에서는 1차 포기시간을 각각 2시간과 3시간으로 길게 유지함으로써 2차 포기기간에 비해 2배 이상 높은 TOC 제거량을 나타내었으나, SBBR-2에서는 1차 포기시간을 1시간으로 유지하여 이 기간 중의 TOC 제거량을 줄임으로써 2차 비포기기간 중의 탈질화 미생물이나 인 제거 미생물에 의한 TOC 제거를 유도할 수 있을 것으로 기대하였으나, 그 효과는 그다지 크지 않았고, 오히려 2차 포기기간 중의 TOC 제거량이 1차 포기기간

중의 TOC 제거량의 약 2배 정도 나타남으로써 여전히 일반 호기성 heterotroph에 의한 TOC 제거가 활발한 것으로 판단되었다.

3.2. 질소 제거

포기기간의 배분을 달리하여 운전한 SBBR-1, SBBR-2, SBBR-3에서 1 cycle에 걸쳐 질산화 반응과 탈질화 반응이 일어나는 과정과 pH 및 DO 변화를 Fig. 4, 5, 6에 각각 나타내었다. 유입 기간 30분 동안에는 교반과 함께 비포기 상태로 유지되며, 처리수 배출 후 반응기내 남아 있는 시료량과 거의 동일한 양이 유입되기 때문에 유입 기간 동안 반응기내 잔존해 있는 여러 가지 성분과 희석작용이 발생하게 된다.

유입 기간 중 SBBR-1(Fig. 4)에서 발생한 질소, pH 및 DO의 변화를 살펴보면, NH₄⁺-N의 농도가 0.2 mg/L에서 10.2 mg/L로 증가하였으며, NO₃⁻-N의 농도는 3.1 mg/L에서 0.4 mg/L로 감소하였고, SBBR-2(Fig. 5)의 경우에서 유입기간 중의 NH₄⁺-N 농도는 0.0 mg/L에서 10.5 mg/L로 증가하였으며, NO₃⁻-N 농도는 5.3 mg/L에서 0.8 mg/L로 감소하였다. 또한 SBBR-3의 경우에서는 NH₄⁺-N 농도는 각각 3.1 mg/L에서 12.2 mg/L로 변화하였고, NO₃⁻-N 농도는 0.0 mg/L로 변화가 없었다. 이 기간동안의 NO₃⁻-N 농도의 감소는 반응기내 DO 농도의 변화

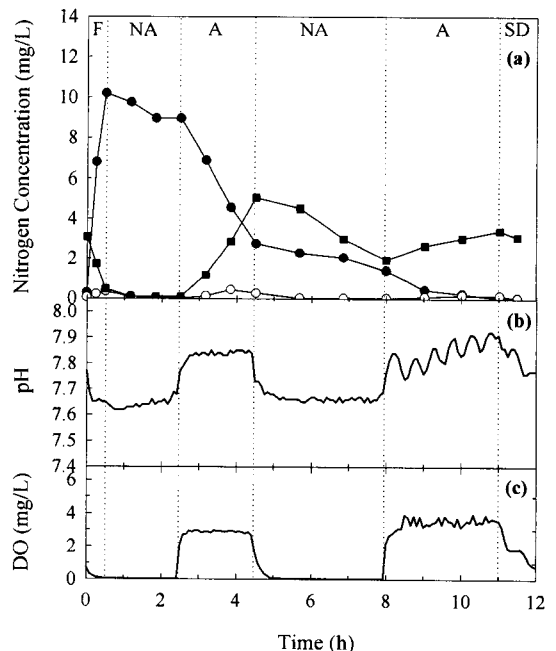


Fig. 4. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [NH₄⁺-N(●), NO₂⁻-N(○), NO₃⁻-N(■)], (b) pH and (c) DO concentration in SBBR-1.

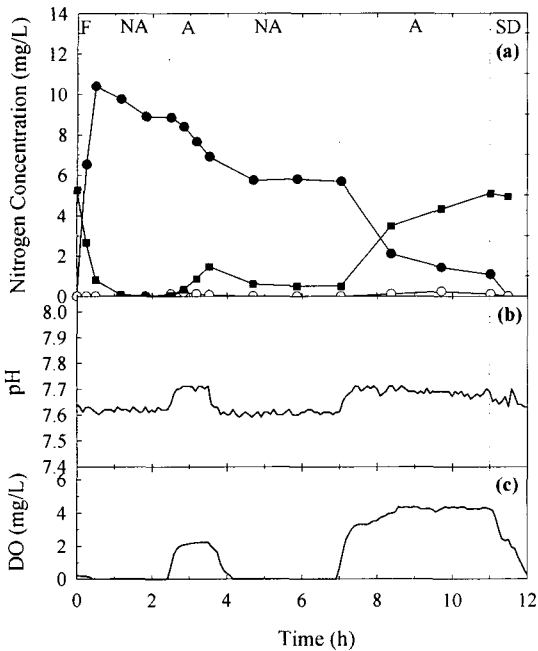


Fig. 5. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (○), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (■)], (b) pH and (c) DO concentration in SBBR-2.

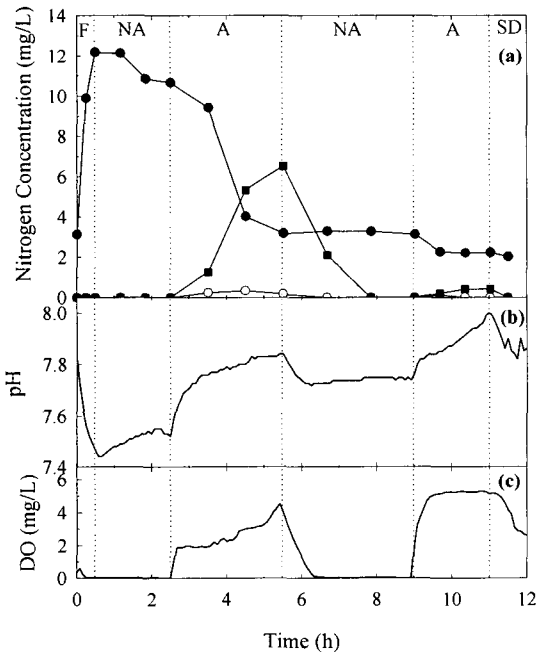


Fig. 6. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (○), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (■)], (b) pH and (c) DO concentration in SBBR-3.

와 TOC 농도 변화(Fig. 3)를 살펴볼 때 비포기에 따른 탈질화 반응에 기인한 것으로 판단되었다. 순

수한 희석효과에 의한 영향을 볼 때 SBBR-1에서 유입이 완료된 상태에서의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 1.55 mg/L로 계산되므로 추가적인 1.15 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도의 감소는 탈질화에 의한 감소량으로 계산되었다. 마찬가지로 SBBR-2에서는 유입 완료 시점에서의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 2.65 mg/L이므로 탈질화에 의해 1.80 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 제거가 이루어졌다. SBBR-3에서는 탈질화가 완료된 상태에서 유입이 이루어짐으로써 유입 완료 시점에서의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 0 mg/L였고, 이 과정에서 탈질화에 의한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 감소는 발생하지 않았다. 유입 기간 중의 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 모두 0~0.1 mg/L로 매우 낮은 것으로 나타났다.

1차 비포기기간 중 SBBR-1에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 10.2 mg/L에서 8.9 mg/L로 감소하여 1.3 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 감소하였으며, SBBR-2에서는 10.4 mg/L에서 8.9 mg/L로 변화하여 1.5 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 감소를 보였고, SBBR-3에서는 12.2 mg/L에서 10.7 mg/L로 감소됨으로써 1.5 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 제거되는 결과를 나타내었다. 그러므로 1차 비포기기간 동안 SBBR-1, 2, 3 모두에서 1.3~1.5 mg/L $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 비슷한 감소 경향을 보였는데, 이 기간 중의 DO 농도가 전체적으로 0.05 mg/L 이하로 유지되고 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도가 변화가 없거나 오히려 감소하는 것으로 보아, 질산화에 의한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 감소로 보기는 힘들 것으로 판단되었다. 이러한 현상은 생물막을 이용하여 영양염류를 제거하는 공정에서 자주 발생하는 것으로 생물막에 의한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 흡착현상으로 설명할 수 있다⁷⁾.

이 기간 중 SBBR-1에서 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 0.4 mg/L에서 0.04 mg/L로 감소하여, 이 기간동안 감소된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 0.36 mg/L였고, SBBR-2에서는 0.8 mg/L에서 0.03 mg/L로 감소하여 0.77 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 감소를 보였으며, SBBR-3에서는 유입 기간에 이어 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 0 mg/L로서 변화가 관찰되지 않았다. 이 기간동안 제거된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 양을 유입 기간동안 제거된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 양과 비교해보면, 유입 기간동안 감소된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도보다 적은 것을 알 수 있다. 그러므로 대부분의 유입 기간에서 DO가 적절하게 낮게 유지되고 적절한 유기물의 공급이 발생함으로써 탈질화 반응이 발생한 것으로 판단할 수 있었다. 그러므로 유입 기간을 1차 비포기기간의 연장으로 생각해 볼 수도 있었다.

이 기간 동안 SBBR-1에서 pH는 7.65에서 7.77로 증가하였고, SBBR-2에서는 7.61에서 7.64로 미소한 pH 증가 변화를 보였으며, SBBR-3에서는 pH가 7.46에서 7.52로 증가하였다. 세 반응기 중 SBBR-3에서 가장 큰 pH 변화를 보였다. 또한 이 기간 중의 DO 농도는 세 반응기 모두 0.05 mg/L를 나타내었다.

초기 혐기 반응기간에는 인의 방출로 인하여 급격한 pH 감소가 발생하는 것으로 알려져 있으므로⁸⁾, 초기 유입 기간에서 급격한 pH의 변화가 관찰되었으므로 유입 기간이 혐기 반응 기간으로 인의 방출이 발생하였을 것이란 짐작을 할 수 있었다. 또한, SBBR-1에서는 유입 기간 중 pH가 7.77에서 7.65의 감소가 있었으나, SBBR-2에서는 pH의 7.64에서 7.61의 미소한 감소 변화가 발생하였다. 그리고 SBBR-3에서는 pH가 7.82에서 7.46으로 pH의 변화를 나타내었다. 그러므로 SBBR-3에서 가장 큰 pH의 감소를 나타내어 가장 인의 방출이 많을 것으로 예측할 수 있었다. 그러나 유입 기간이 지난 후 초기 1차 비포기기간 중의 급격한 pH 증가는 인의 방출이 완료된 것으로 판단하기에는 상당한 무리가 따를 것으로 판단되므로 이에 대해서는 명확한 설명이 곤란하였다. 다만 Kishida 등⁹⁾의 연구 결과를 보면 본 연구 결과와 유사하게 유입 기간을 지난 후 급격한 pH의 변화가 발생하였으나, 이에 대한 명확한 설명을 하지 않고 있다. 1차 비포기기간 중 탈질화의 완료에 따른 pH 변화의 변곡점이 나타나는 것으로 알려져 있어⁹⁾, SBBR-1과 SBBR-2에서는 명확하지는 않으나 1차 비포기 시작 후 30분이 경과된 시점에서 pH 변화의 변곡점이 발생하였으나, 이를 명확한 탈질화 반응의 완료에 따른 pH 변곡점으로 보기는 어려웠다. 본 연구에서 탈질화 반응의 완료에 따른 pH 변곡점을 찾기 어려운 것은 이 기간 동안의 NO₃⁻-N의 농도가 너무 낮아서 탈질화에 따른 pH 변화를 관찰하기가 어려웠던 것으로 판단된다. 그러나 대체적으로 무산소 상태에서는 pH 변화보다는 ORP의 변화를 관찰하는 것이 보다 효과적인 것으로 알려져 있으므로⁹⁾, ORP에 대한 관찰이 추가되어야 할 것으로 생각된다.

이어지는 1차 포기기간에서는 원활한 질산화 반응을 보이기 시작하였는데, SBBR-1에서는 포기가 시작되면서 NO₂⁻-N 농도는 증가하여 약 1시간 30분 정도에서 최대 농도 0.41 mg/L에 도달한 다음 다시 감소하는 것으로 나타났다. SBBR-2에서는 포기기간이 1시간으로 매우 짧게 설정하였으므로 포기 시작 30분 정도에서 최대 0.2 mg/L의 NO₂⁻-N 농도를 나타내었다. 상대적으로 포기기간을 3시간을 가장 길게 유지한 SBBR-3에서는 포기 시작 2시간이 경과된 시점에서 최대 0.325 mg/L의 NO₂⁻-N 농도를 나타내고 이후 감소하는 경향을 나타내었다. 이 기간 중 SBBR-1에서 NH₄⁺-N 농도는 8.94 mg/L에서 2.72 mg/L로 감소하였으며, 이 때의 NH₄⁺-N 제거량과 제거 속도는 각각 6.22 mg/L와 12.43 mg/h로 나타났다. 포기기간이 짧은 SBBR-2에서는 NH₄⁺-N

제거량과 제거 속도는 각각 1.95 mg/L와 7.8 mg/h로 관찰되었으며, 포기기간이 긴 SBBR-3에서는 7.49 mg/L와 9.99 mg/h로 나타났다. 이 결과를 볼 때 NH₄⁺-N 제거량은 SBBR-3>SBBR-1>SBBR-2의 순서로 포기기간이 길수록 증가하는 것으로 나타났으나, NH₄⁺-N 제거 속도는 SBBR-1>SBBR-3>SBBR-2의 순서로 나타남으로써 포기기간을 지나치게 길게 유지하는 것은 오히려 NH₄⁺-N 제거속도를 감소시킨다는 것을 알 수 있었다. 또한 이 기간 중의 NO₃⁻-N 생성량과 생성속도는 SBBR-1의 경우에는 각각 5.00 mg/L와 10.00 mg/h로 측정되었고, SBBR-2에서는 각각 1.41 mg/L와 5.64 mg/h로 나타났고, SBBR-3에서는 각각 6.52 mg/L와 8.69 mg/h로 관찰되었다. 이 결과로 볼 때 NO₃⁻-N 생성량과 생성속도는 NH₄⁺-N 제거량과 제거 속도에 밀접한 상관관계를 가진다는 당연한 결과를 도출할 수 있었으며, 모든 반응기에서 NH₄⁺-N 제거량과 제거 속도가 NO₃⁻-N 생성량과 생성속도에 비해 15~38% 정도 큰 것으로 나타났는데, 이는 NH₄⁺-N가 순수하게 질산화에 의해서만 제거된 것이 아니라 미생물의 동화 작용에도 이용되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 1차 비포기기간 중에 발생한 것과 같은 생물막에 의한 NH₄⁺-N의 흡착 현상에 의한 영향도 무시할 수 없을 것으로 생각된다.

이 기간 중 DO 농도는 초기 10~15분 내에 최대 농도에 도달하였으며, 그 최대 DO 농도는 SBBR-1에서는 3.0 mg/L였고 SBBR-2에서는 2.24 mg/L로 나타났다. 특히 SBBR-3에서는 2시간이 경과된 시점에서는 최대 3.0 mg/L의 DO 농도를 나타내었으나, 그 이후 급격하게 증가하여 4.51 mg/L까지 증가하여 DO에 대한 변곡점이 명확하게 나타났다.

마찬가지로 pH의 경우에서도 포기를 시작한 후 초기 30분 내에 급격하게 증가한 다음 완만한 증가 경향을 나타내었는데, 이는 포기에 따른 CO₂ 탈기의 영향으로 볼 수 있다⁸⁾. 지속적인 포기를 하면 질산화의 영향으로 H⁺가 방출되어 pH는 감소한 다음 평탄해지거나 계곡(valley)의 변곡점을 나타내는 것으로 보고되거나⁸⁾, 초기 포기 시작부터 급격한 pH 감소를 나타낸 다음 급격하게 pH가 증가하여 큰 계곡(valley)을 나타낸다는 결과도 있다⁹⁾. 이는 유입되는 NH₄⁺-N의 농도가 60~80 mg/L로 본 연구의 20 mg/L 보다 3~4배 이상으로 높아서 질산화에 따른 H⁺ 방출이 크게 났으나, 본 연구에서는 포기에 따른 CO₂ 방출 효과가 적절하게 나타남으로써 초기 pH는 급격하게 증가하였으나, 질산화에 따른 H⁺ 방출 효과가 적어 pH의 감소 현상은 관찰되지 않은 것으로 판단된다.

SBBR-1에서는 최대 7.85의 pH를 나타내었고 SBBR-2에서는 7.71으로 관찰되었다. SBBR-3에서는 SBBR-1이나 SBBR-2와는 약간 다른 pH 변화 곡선을 나타내었는데, 초기 30분 이내 pH가 급격하게 증가된 다음 완만한 증가 경향을 나타내다가 2시간 정도에서 pH 변곡점을 나타내었다.

그러므로 NH_4^+ -N과 NO_3^- -N의 변화를 DO와 pH 변화와 연관시켜 고찰해 보면, SBBR-1과 SBBR-2에서는 계속적인 NH_4^+ -N의 감소와 NO_3^- -N의 증가가 나타났으며 그에 따라 뚜렷한 DO와 pH 변곡점을 관찰할 수 없었다. 그러나 SBBR-3에서는 2시간 이후에 명확하지는 않지만 NH_4^+ -N의 감소 추세와 NO_3^- -N의 증가 추세에 있어 뚜렷한 둔화를 관찰할 수 있었으며 이는 DO와 pH의 변곡점과 비교적 일치하는 것을 볼 수 있었다. SBBR-1, -2, -3에서 이러한 차이가 나타난 것은 포기시간의 차이에 따른 것으로 볼 수 있는데, SBBR-1과 SBBR-2에서는 포기시간이 짧아 질산화의 완료시점인 DO 및 pH 변곡점을 관찰하기 어려웠으나, SBBR-3에서는 포기시간을 길게 유지함으로써 질산화가 완료되거나 질산화 속도가 완만해지는 지점까지 도달함으로써 DO와 pH에 대한 변곡점을 관찰할 수 있었던 것으로 판단된다.

이 기간 중에는 잔존하는 TOC의 농도가 20~30 mg/L가 존재하므로 autotroph인 nitrifier의 활동이 어려울 것으로 판단되나, 세 반응기 모두에서 질산화가 뚜렷하게 관찰되었다. 일반적으로 유기물이 존재하는 조건에서는 유기물을 탄소원으로 이용할 수 있는 heterotroph가 autotroph와의 경쟁에서 우세하여 우점종을 차지함으로써 수중의 산소 소비를 지배하고, 유기물의 농도가 매우 낮은 상태에서만 autotroph가 활발하게 활동하는 것으로 알려져 있으나¹⁰⁾, 본 연구에서는 비록 유기물 농도가 그다지 높지는 않았지만 어느 정도 존재하는 조건에서도 질산화가 발생하였다. 그러므로 이는 autotrophic nitrifier에 의한 질산화뿐만 아니라 heterotrophic nitrifier에 의한 질산화가 병행되었을 것으로 판단된다. 대부분의 생태계에서 heterotroph가 우점종인 경우에는 heterotrophic nitrification이 암모니아의 산화에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다^{11,12)}. 일반적으로 autotrophic nitrifiers에 비해 heterotrophic nitrifiers는 더 높은 수율로 인하여 더 빨리 증식하고, 더 낮은 농도에서도 활발한 활동이 가능할 뿐만 아니라, 보다 산성적 환경에서도 잘 견디는 것으로 알려져 있다^{12,13)}.

2차 비포기기간에는 NO_3^- -N의 탈질화가 뚜렷하게 관찰되었고 일부 NH_4^+ -N의 감소도 나타났다. SBBR-1에서 NH_4^+ -N 농도는 2.72 mg/L에서 1.38

mg/L로 감소하여 1.34 mg/L의 제거를 보였고, SBBR-2에서는 1.2 mg/L의 NH_4^+ -N 제거량을 보였는데, 이 또한 생물막에 의한 흡착이나 동화작용의 영향으로 볼 수 있으나, SBBR-3에서는 NH_4^+ -N 농도의 변화가 없어 명확한 설명이 어렵다.

이 기간 중 SBBR-1에서 NO_3^- -N의 농도는 3시간의 비포기기간 동안 5.04 mg/L에서 1.92 mg/L로 감소하여 3.12 mg/L의 NO_3^- -N 제거량을 보였고 이때의 NO_3^- -N 제거속도는 4.16 mg/h로 나타났다. 1차 포기기간 중 NO_3^- -N의 생성량과 생성속도가 각각 5.00 mg/L와 10.00 mg/h를 볼 때, NO_3^- -N 생성에 비해 제거가 적게 발생했다는 것을 알 수 있었으며, NO_3^- -N 제거량은 생성량의 75%에 불과하여 25%의 NO_3^- -N는 미처리된 상태로 잔존하였다. SBBR-2에서의 NO_3^- -N 제거량은 0.95 mg/L로서, 1차 포기기간 중 생성된 NO_3^- -N의 1.41 mg/L와 비교할 때 67%로 나타났다. SBBR-1과 SBBR-2와는 달리 SBBR-3에서는 2시간 30분 내에 완전한 탈질화가 발생하여 6.52 mg/L의 NO_3^- -N 제거량을 보였다. 이는 매우 특이한 현상으로 SBBR-2의 TOC 농도가 비포기 시작 시점에서 가장 높은 28 mg/L를 보이고 이 기간동안 제거된 TOC 량도 8.1 mg/L로 다른 반응기에 비해 가장 높아서 가장 활발한 탈질화를 보일 것으로 예상했으나 가장 낮은 탈질화를 나타내었다. 이는 1차 비포기기간이 짧음으로서 질산화가 적게 일어났기 때문인 것으로 설명할 수도 있으나, 적게 발생된 NO_3^- -N도 완전히 제거되지 못한 것은 설명하기 곤란하였다. 또한 SBBR-1에 비해 SBBR-3의 경우에서 탈질화에 의한 NO_3^- -N 제거량이 큰 것은 단순히 1차 포기기간에서 질산화에 의한 NO_3^- -N 생성량이 많았기 때문인 것으로 보는 것도 상당한 무리가 따르는 것으로 판단된다. 그러므로 단순히 탈질화를 이 기간 동안 제거된 TOC 량이나 질산화와 연관시켜 생각하는 것은 한계가 있을 것으로 예상되므로 이 부분에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 판단되지만, 운전 주기에 따른 미생물 종의 활동도 및 구성 미생물 종의 변화가 발생하여 이러한 결과가 발생한 것으로 가정할 수도 있다. 본 결과는 단순히 1일의 실험 결과가 아니라 90일 이상으로 운전함으로써 운전 주기에 따라 미생물 종의 분포가 각 반응기 별로 상당히 달라 졌을 것으로 가정할 수 있으며, 이에 따라 SBBR-3에서 가장 많은 탈질화 미생물이 발생하였거나 활동도가 높을 것으로 예상된다.

이 기간 중 DO 농도는 30분 내에 거의 0 mg/L에 근접하게 감소하였다. pH는 초기 30분 내에 급격하게 감소하였는데, 이는 잔존하는 DO를 이용한 호흡활동으로 인하여 CO_2 가 축적되어 발생한 것으

(AO)₂ 연속 회분식 생물막 반응기에서 포기 시간 배분에 따른 유기물 및 질소와 인의 동시 제거에 관한 연구

로 볼 수 있다⁸⁾. 계속적인 비포기 과정에서는 무산소 상태에서의 인 섭취에 의해 H⁺를 제거함으로써 pH가 급격하게 증가하는 것으로 알려져 있으나⁸⁾, 본 실험에서는 무산소 상태에서의 인 섭취가 발생하지 않은 것으로 생각되어 pH의 증가 현상은 발생하지 않은 것으로 판단된다.

전체적으로 이러한 pH의 거동은 NH₄⁺-N와 NO₃⁻-N가 축적되었을 때 나타나는 현상들로서⁹⁾, 유기물의 부족으로 인하여 탈질화가 원활하지 않았기 때문인 것으로서, 추가적인 유기물의 공급이 필수적인 것으로 판단된다. 특히, SBBR-2에서는 유기물이 부족한 상태에다가 부적절한 포기시간 배분으로 말미암아 전체적인 탈질화와 질산화가 원활하지 않아 pH의 변화가 적절하게 나타나지 않았을 뿐만 아니라 변곡점을 찾기도 어려웠다. 이에 비해 SBBR-1은 유기물은 부족하였으나, 비교적 적절한 포기시간 배분으로 인하여 pH의 변화폭이 비교적 크게 나타났고, SBBR-3는 유기물이 부족한 실험 상태에서 가장 적절한 포기시간 배분으로 생각되며, 가장 큰 pH의 변화 폭을 나타내었을 뿐만 아니라 명확하지는 않지만 pH 변곡점도 일부 관찰되었다. 그러므로 유기물이 부족한 상태에서 비포기와 포기를 1:1로 운전한 경우, 1차 포기시간을 2차 포기시간보다 길게 유지하는 것이 질소와 인을 제거하는 데에는 가장 적절한 포기시간 배분이 될 것으로 판단된다.

2차 포기기간 중 모든 반응기에서는 추가적인 질산화가 발생하였는데, SBBR-1에서는 1.38 mg/L의 NH₄⁺-N 제거량을 보였고, SBBR-2와 SBBR-3에서는 각각 4.62 mg/L와 0.9 mg/L의 NH₄⁺-N 제거량을 보였다. 이 기간 중 SBBR-1과 SBBR-3는 1차 포기기간 중 제거된 NH₄⁺-N 량에 비해 월등히 적은 NH₄⁺-N 제거량을 보였다. 이에 비해 SBBR-2의 경우는 1차 포기기간 중의 NH₄⁺-N 제거량에 비해 2차 포기기간 중에 훨씬 높은 NH₄⁺-N 제거량을 보였으며, 이 기간 중의 SBBR-1과 SBBR-3에서의 NH₄⁺-N 제거량에 비해 가장 높은 NH₄⁺-N 제거량을 보였는데, 이는 2차 포기기간이 4시간으로 가장 길었고 1차 포기 단계에서 질산화되지 못한 NH₄⁺-N의 농도가 가장 높게 잔류하고 있었기 때문인 것으로 판단된다. SBBR-3에서는 2차 포기기간이 2시간으로 가장 짧아 NH₄⁺-N 제거량이 적은 것은 충분히 예상 가능한 현상이나, SBBR-1에 비해서도 너무 낮은 NH₄⁺-N 제거량은 앞으로 계속 연구해 봐야 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

2차 포기기간 중 pH와 DO 농도는 1차 포기와 유사한 경향을 나타내었으나, 2차 포기의 DO 농도는 1차 포기의 DO 농도에 비해 높게 나타났다. 이는 1차 포기기간 중 heterotroph에 의해 이용되는

TOC 농도와 nitrifier에 의해 이용되는 NH₄⁺-N 농도에 비해 2차 포기기간 중 이용할 수 있는 TOC와 NH₄⁺-N가 월등히 적음으로써 산소를 적극적으로 소모하는 heterotroph와 nitrifier의 활동이 억제되었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Lee 등⁸⁾의 연구 결과에서도 유사하게 관찰된다. SBBR-3에서 2차 포기기간 중의 pH 증가 속도도 1차 포기기간의 pH 증가 속도에 비해 월등히 떨어지는 데, 이것도 nitrifer의 활동 억제에 따른 영향으로 볼 수 있다.

4. 인 제거

인 제거 미생물은 혐기 조건에서 세포 외부에 있는 유기물을 흡수하기 위한 기질의 일환으로 체내에 있는 다중 인산염을 소모하는데, 이 때 인의 체외 방출이 발생하게 되면서 체내에 polyhydroxyalkanoates (PHAs)와 같은 저장물질로 전환된다. 만약 호기 조건으로 바뀌면 산소나 NO₃⁻를 전자 공여체로 이용하면서 축적되었던 PHAs를 산화하여 ATP를 생성하는 경로를 경유하고, 혐기 과정중 방출된 인을 최대한 과잉 섭취(luxury uptake)하게 됨으로써 수중의 인을 제거하는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾.

Fig. 7은 유입 PO₄³⁻-P 농도를 20 mg/L 정도로 일정하게 유지한 상태에서 1주기 동안의 PO₄³⁻-P 농도 변화를 나타낸 것으로, 전반적으로 SBBR-1과 SBBR-2에서는 전 운전기간 동안 큰 변화를 보이지 않았으나, SBBR-3에서는 운전 조건에 따라 상당한 변화를 보이고 있다. 전반적인 인 제거 거동이 활발하지 못하여 인 제거 효율은 매우 낮았는데, 이는 인 제거 미생물이 질산화 및 탈질화 미생물에 비해

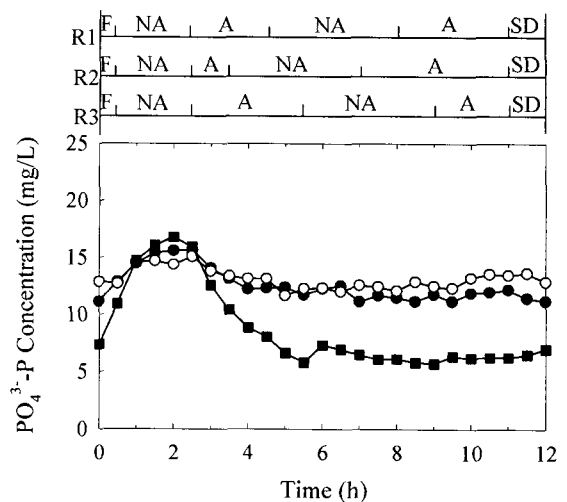


Fig. 7. Typical profiles of PO₄³⁻-P concentration in SBBR-1(●), 2(○), 3(■).

적용 기간이 많이 소요되어 적응 능력이 상대적으로 떨어지거나, 비포기 상태에서 탈질화 미생물과의 유기물 경쟁에서 뒤져 인의 방출이 원활하지 못하고 또 포기 상태에서 일반 heterotroph나 nitrifier와의 산소 경쟁에서 뒤져 인의 섭취 활동이 잘 일어나지 못한 것으로 생각된다. 그러므로 인 제거 미생물들의 보다 활발한 활동을 위해서는 적응 기간을 늘리거나 질산화 및 탈질화 미생물과의 경쟁에서 우위를 차지할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

유입 기간 중 SBBR-1과 SBBR-2에서 인의 방출 현상은 거의 관찰되지 않았다. 그러나 SBBR-3에서는 유입 폐수에 의한 회석효과에 의하면 유입이 끝난 후 PO_4^{3-} -P 농도는 7.5 mg/L 정도가 되어야 하나 유입 후 PO_4^{3-} -P 농도가 10.5 mg/L로 증가된 것으로 보아 3mg/L 정도의 인 방출이 발생한 것으로 생각된다.

1차 비포기기간 동안 각 반응기의 PO_4^{3-} -P 농도의 변화를 관찰해 보면, SBBR-1에서는 2.79 mg/L의 PO_4^{3-} -P 방출량을 보였고, SBBR-2에서는 2.4 mg/L의 방출량을 나타내었으며, SBBR-3는 5.01 mg/L의 가장 큰 PO_4^{3-} -P 방출량을 보였다. 이 기간 중 각 반응기내 TOC의 변화에 있어 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 보아(Fig. 3), 본 실험에서는 인 방출량의 차이를 이용할 수 있는 유기물 농도의 차이로 보기는 곤란하였다. 따라서 이러한 각 반응기별 차이는 운전 주기별 차이에 따라 인 제거 미생물의 활동도 및 균수가 차이가 나기 때문인 것으로 생각되나, 비포기기간동안 존재하는 NO_3^- -N의 농도에 의한 영향으로 볼 수도 있다. SBBR-1에서는 초기 비포기기간 중 잔존하는 NO_3^- -N의 농도가 0.5 mg/L이고, SBBR-1에서는 1mg/L인데 반해, SBBR-3에서는 0 mg/L(Fig. 4, 5, 6)로 1차 비포기기간 동안 NO_3^- 에 의한 인 방출 저해작용이 발생하지 않은 것으로 나타났다. NO_2^- 나 NO_3^- 와 같은 전자 수용체가 존재하는 무산소 조건에서 *Acinetobacter* 등과 같은 인 제거 미생물들은 인 방출에 크게 저해를 받는 것으로 알려져 있다^{15,16)}. EBPR (enhanced biological phosphorus removal) 시스템에서 NO_3^- 의 전체적인 영향에 대해서는 아직 일치된 의견이 없지만, 혐기성 반응조에서 NO_3^- 의 유입이 인 제거 공정에 저해작용을 한다고 받아들여지고 있다. Hascoet 등¹⁵⁾은 단쇄 지방산이 주입되고 NO_3^- 가 존재하는 무산소 조건에서 초기 NO_3^- 농도가 높음에 따라 PO_4^{3-} -P의 방출량이 감소하는 것을 관찰하였다. 이와 같이 초기 NO_3^- 의 농도가 높음에 따라 PO_4^{3-} -P 방출의 감소는 탈질화 미생물에 의해 소비되는 유기물량이 많아져서 인 제거 미생물들이 인 방출을 위해 유기

물을 제대로 이용하지 못했을 뿐만 아니라, NO_3^- 를 전자 수용체로 하여 오히려 PO_4^{3-} -P의 섭취가 일어났기 때문이라고 설명할 수 있다. Kern-Jespersen과 Henze¹⁶⁾는 NO_3^- 를 전자수용체로 이용가능한 미생물에 의한 PO_4^{3-} -P의 섭취와 NO_3^- 를 전자수용체로 이용할 수 없는 미생물에 의한 PO_4^{3-} -P의 방출의 차이로 PO_4^{3-} -P의 섭취 또는 방출이 결정되는 것으로 판단하였다.

1차 포기기간 중 PO_4^{3-} -P의 섭취에 있어 각 반응기에서는 상당한 차이를 나타내었다. SBBR-1에서는 3.3 mg/L의 PO_4^{3-} -P의 섭취량을 보였고, SBBR-2는 1.74 mg/L, SBBR-3에서는 10.12 mg/L의 PO_4^{3-} -P의 섭취량을 나타내었다. SBBR-2에서는 1차 비포기기간 중 PO_4^{3-} -P의 방출량도 적었고 1차 포기기간도 1시간으로 매우 짧았기 때문에 1차 포기기간 중 PO_4^{3-} -P의 섭취량도 상대적으로 가장 적었다. SBBR-1에서는 SBBR-2에 비해 1차 포기기간을 2시간을 증가시키기는 하였으나, 1차 비포기기간 중 방출된 PO_4^{3-} -P의 방출량이 SBBR-2의 경우와 유사하였으므로 섭취된 PO_4^{3-} -P의 양은 약간의 증가를 보였다. 그러나 SBBR-3에서는 SBBR-1과 SBBR-2에 비해 1차 포기기간을 3시간을 가장 크게 하였고 1차 비포기기간 중의 PO_4^{3-} -P 방출량도 가장 많았기 때문에 1차 포기기간 중의 PO_4^{3-} -P 섭취량도 가장 많았던 것으로 판단된다.

SBBR-1과 SBBR-2에서는 2차 비포기와 2차 포기기간을 통하여 추가적인 PO_4^{3-} -P의 방출과 섭취를 관찰할 수 없었다. SBBR-3에서는 2차 비포기 초기에 PO_4^{3-} -P의 2차 방출이 조금 관찰되었으나, 그 양은 그다지 많지 않았다. 이러한 현상은 PO_4^{3-} -P 방출에 필요한 유기물이 1차 포기 및 비포기기간에서 대부분 소비되어 PO_4^{3-} -P 방출에 필요한 유기물이 부족하였을 뿐만 아니라, 2차 비포기기간 중 높은 농도로 존재하는 NO_3^- 의 존재로 인하여 PO_4^{3-} -P 방출이 저해되었기 때문인 것으로 추측된다.

5. 결 론

전체적인 비포기와 포기의 시간 비율은 1:1로 유지한 (AO)₂ SBBR 공정에서 포기 시간의 배분이 유기물 및 질소와 인의 제거에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) SBBR-1과 SBBR-2에서는 유입 기간동안 전단계의 반응에서 완전히 처리되지 못한 NO_3^- -N으로 인하여 탈질화 반응이 일어났으며, SBBR-3에서는 유입 기간동안 탈질화 반응이 발생하지 않았다. 이 기간 중 SBBR-3에서는 유입 기간임에도 불구하고 인의 방출이 발생하였다.
- 2) 1차 비포기기간 동안 제거된 NH_4^+ -N는 생물막

(AO)₂ 연속 회분식 생물막 반응기에서 포기 시간 배분에 따른 유기물 및 질소와 인의 동시 제거에 관한 연구

에 의한 흡착으로 판단되었으며, 이 기간 동안의 TOC 소비는 대부분 PAOs에 의한 인 방출에 의해 소모되었다.

- 3) 1차 포기기간에는 SBBR-3에서 가장 활발한 질산화 반응과 인의 방출이 발생하였으며, 2차 비포기기간에는 SBBR-3에서 가장 활발한 탈질화 반응이 발생하였다. 이 기간중에는 모든 반응기에서 부족한 TOC 농도와 NO₃⁻의 강한 저해 작용으로 인하여 인의 방출이 발생하지 않았으며, 따라서 2차 포기기간에도 인의 섭취 현상을 관찰할 수 없었다.
- 4) 1차 포기시간을 2차 포기시간보다 길게 유지한 SBBR-3에서 가장 원활한 질산화, 탈질화 및 인 제거 효과가 나타났다.
- 5) 유입 TOC 농도가 낮은 (AO)₂ SBBR에서 2차 비포기와 2차 포기기간은 인의 제거에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 1) Choi, E. S., H. S. Lee, M. G. Park and Y. S. Chang, 1995, Selection of nutrient removal process for low strength municipal wastewater, Proc. 5th IAWQ Asia Conference on Water Quality and Pollution Control, 382-397pp.
- 2) 환경부, 2002, 환경백서, 526-535pp.
- 3) 신항식, 박홍식, 1990, 미디어를 함유한 연속 회분식 반응기를 이용한 폐수처리(I), 대한환경공학회, 12(3), 73-82.
- 4) Woolard, C. R., 1997, The advantages of periodically operated biofilm reactors for the treatment of highly variable wastewater, Wat. Sci. Tech., 35(1), 199-206.
- 5) APHA, AWWA and WPCF, 1985, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th ed., Washington D.C., USA, 92-100pp.
- 6) Hu, Z., R. A. Ferraina, J. F. Ericson, A. A. McKay and B. F. Smets, 2005, Biomass characteristics in three sequencing batch reactors treating a wastewater containing synthetic organic chemicals, Wat. Res., 39, 710-720.
- 7) Wilderer, P. A., P. Arnz and E. Arnold, 2000, Application of biofilms and biofilm support materials as a temporary sink and source, Water Air Soil Pollut., 123(1-4), 147-158.
- 8) Lee, D. S., C. O. Jeon and J. M. Park, 2001, Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system, Wat. Res., 35(16), 3968-3976.
- 9) Kishida, N., J. H. Kim, M. Chen, H. Sasaki and R. Sudo, 2003, Effectiveness of oxidation-reduction potential and pH as monitoring and control parameters for nitrogen removal in swine wastewater treatment by sequencing batch reactors, J. Biosci. Bioeng., 96(3), 285-290.
- 10) Gieseke, A., P. Arnz, R. Amann and A. Schramm, 2002, Simultaneous P and N removal in a sequencing batch biofilm reactor: insight from reactor- and microscale investigation, Wat. Res., 36, 501-509.
- 11) Robertson, L. A. and J. G. Kuenen, 1992, Nitrogen removal from water waste, In Microbial control of pollution, ed. Fry, J. C., G. M. Gadd, R. A. Herbert, C. W. Jones and I. A. W. Craik, Cambridge University Press, Cambridge.
- 12) Zhao, H. W., D. S. Mavnic, W. K. Oldham and F. A. Koch, 1999, Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage, Wat. Res., 33(4), 961-970.
- 13) Akin, B. S. and A. Ugurlu, 2005, Monitoring and control of biological nutrient removal in a sequencing batch reactor, Process Biochemistry, 40, 2873-2878.
- 14) Saito, T., D. Brdjanovic and M. C. M. Loosfrecht, 2004, Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms, Wat. Res., 38, 3760-3768.
- 15) Hascoet, M. C., M. Florentz and P. Granger, 1985, Biochemical aspects of enhanced biological phosphorus removal from wastewater, Wat. Sci. Tech., 17, 23-41.
- 16) Jespersen, J. P. K. and M. Henze, 1993, Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition, Wat. Res., 27(4), 617-624.