

소규모 오수처리를 위한 A₂O SBR과 A₂O SBBR에서 유입 유기물 농도변화에 따른 영양염류 제거 특성 비교

박영식 · 정노성* · 김동석*†

대구대학교 보건과학부, *대구가톨릭대학교 환경과학과

A Comparison of Nutrients Removal Characteristics by the Variation of Organics in A₂O SBR and A₂O SBBR for the Small Sewerage System

Young-Seek Park · No-Sung Jeong* · Dong-Seog Kim*†

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

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

(Received August 10, 2006/Accepted October 23, 2006)

ABSTRACT

Laboratory scale experiments were conducted to study the conversion of sludge from conventional activated sludge to nitrogen-phosphorus removal sludge using two types of sequencing batch reactor (SBR) systems, a conventional SBR and sequencing batch biofilm reactor (SBBR). The nitrogen and phosphorus removal characteristics were similar between SBR and SBBR and the removal efficiencies were very low when the influent TOC concentrations were low. The nitrogen and phosphorus removal efficiencies in SBR were 96% and 77.5%, respectively, which were higher than those in SBBR (88% and 42.5%) at the high influent TOC concentration. In SBBR, the simultaneous nitrification-denitrification was occurred because of the biofilm process. The variations of pH, DO concentration and ORP were changed as the variation of influent TOC concentration both in SBR and SBBR and their periodical characteristics were clearly shown at the high influent TOC concentration. Especially, the pH, DO concentration and ORP inflections, were clearly occurred in SBR compared with SBBR.

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

I. 서 론

생활오수의 처리는 하수관거를 통하여 하수종말처리 시설로 유입·처리되는 종말처리 체계와, 발생원에 오수처리시설을 설치하여 하수종말처리시설과 비슷한 수준으로 처리하는 개별처리체계로 구분할 수 있다. 우리나라는 1990년대 초 맑은물 공급 종합대책의 수립추진과 더불어 하수종말처리시설 설치 사업을 본격적으로 시작하여 2004년 말 현재에는 하수종말처리시설에 의한 하수도 보급률이 약 81.4%에 이르고 있다.¹⁾ 그러나 농어촌 지역 등 오염원이 산재되어 있는 지역은 하수

관거의 설치에 대한 타당성이 떨어져 생활오수 등의 처리를 하수종말처리시설에만 전적으로 의존할 수 없는 실정이다.

2004년 말 현재 하수처리구역의 지역에 설치·운영 중인 오수처리시설은 245,313개소로 설치의무가 강화된 2002년부터 매년 80% 정도의 오수처리시설이 급격히 증가하고 있어, 이들에 대한 효율적인 유지관리시스템의 구축이 필요하게 되었다. 이에 따라 환경부에서는 오수처리시설의 전문업체 위탁관리 의무화, 오수처리시설 설치시 전문업체 시공의무화 등 오수처리시설 설치 및 유지관리상의 제도 개선방안을 마련할 계획에 있으나, 현실적으로는 어려움이 많은 실정이다.

새로 설치하는 대규모 하수종말처리장은 호소 등의 부영양화를 방지하기 위하여 우선적으로 질소·인 처리 위주로 설치하고, 또한 하수처리수에 함유된 대장균

†Corresponding author : Department of Environ. Sci., Catholic University of Daegu
Tel: 82-53-850-3250, Fax: 82-53-850-3247
E-mail : kimds@cu.ac.kr

을 처리하기 위하여 2003년부터 소독시설을 설치토록 하고 있으나, 소규모 오수처리시설에 있어서는 질소·인 처리나 소독에 대해서는 아직 무관심한 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 오수처리시설에 적용할 수 있는 시스템의 형태로서 연속 회분식 반응기(sequencing batch reactor, SBR)와 연속 회분식 생물막 반응기(sequencing batch biofilm reactor, SBBR)를 수중의 질소와 인의 제거에 적용하였다.

SBR은 연속 흐름 활성슬러지 공법의 공간 개념이 각 단계 공정의 시간 개념으로 전환된 공정으로서, 하나의 반응기에서 처리가 가능하기 때문에 다른 처리공법에서 가장 큰 비용을 차지하는 부지 소요비용이 적으며 구조가 단순하여 건설비용 등이 적게 소요되며, 호기·혐기 시간을 적절히 조절할 수 있어 시간배분에 있어서 융통성을 가진다. 그러므로 소규모 오수처리시설에는 매우 적합한 처리공정이라 할 수 있다. 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 SBBR의 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)} 또한, 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.^{4,5)}

소규모 오수처리시설의 중요한 특징 중의 하나는 대규모 하수종말처리장과 달리 시설을 관리하는 인원이 상주할 수가 없어 지속적인 운전관리의 어려움이 있고, 초기 오수처리시설 start-up시 유기물 및 질소·인의 효율적인 처리가 제대로 이루어지지 않는다는 것이다. 그러므로 초기 오수처리시설의 start-up시 안정적인 질소·인의 제거 방안에 대한 연구가 매우 중요한 부분으로 인식되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 일반적인 활성슬러지를 이용하여 질소와 인을 처리할 수 있는 슬러지로의 전환과정을 빠르게 하기 위한 연구의 일환으로서, anaerobic(anoxic)-oxic-anaerobic(anoxic) A₂O SBR과 A₂O SBBR에서 유기물, 질소 및 인의 제거 특성과 미세거동을 비교 관찰하였다. 특히, 유입 유기물의 농도를 변화시킨 조건에서 유기물과 질소·인의 제거특성을 효과적으로 조사함으로써 일반 활성슬러지의 질소·인 제거 활성슬러지로의 전환과정을 보다 정확하고 구체적으로 비교·고찰하였다. 또한, 활성슬러지의 변환과정에 따른 SBR과 SBBR내의 pH, DO 농도, 산화환원전위(oxidation reduction potential, ORP)를 실시간으로 측정함으로써 활성슬러지 변환과정과 운전조건인자의 연계성을 함께 고찰하였다.

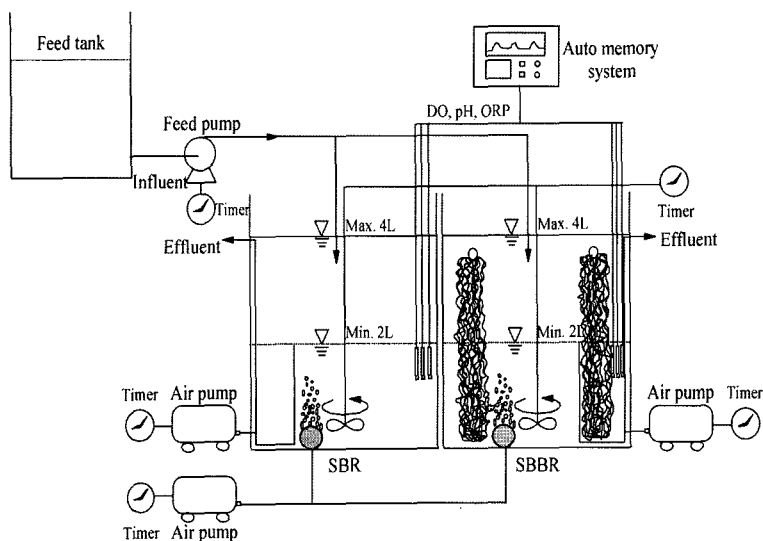


Fig. 1. Schematic diagram of SBR and SBBR systems.

II. 연구방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 2조의 반응조를 설치하여 운전하였는데, 크게 부유하는 미생물을 이용하는 A₂O SBR과 생물막을 도입한 A₂O SBBR으로 대별할 수 있는데, 비포기-포기-비포기의 3단계 반응으로 구성하였다. 각 반응조는 15×15×25 cm로 제작하여, 유입후 최대 유효 용적을 4l, 유출 후 최소 용적을 2l로 하였다. 전체 운전 주기는 12시간으로 하여 1일 2주기로 반복 운전하였다.

사용된 여재는 polyethylene 재질로서 비표면적이 3.0~7.0 m²/m³이며, 공극율이 0.93인 수세미 형태로써, 0.5×2×20 cm의 크기로 잘라 걸보기 용적으로 반응기 최대 유효용적의 약 25%가 되도록 동일하게 충전시켰다.

폐수는 정량펌프를 이용하여 반응기 상부에서 매 주기마다 2ℓ씩 유입시켰으며, 처리수는 침전시간 30분 후 정량펌프를 이용하여 최대 유효 용적의 50%인 2ℓ를 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, 온도는 온도조절기를 반응기에 설치하여 20±1°C로 일정하게 유지하였다. 슬러지의 식종은 유기물 처리가 목적인 G시 하수처리장의 반송 슬러지를 채취하여 35 mesh의 체를 이용하여 헹갈물을 제거하고, 2~3일 정도 포기시키면서 슬러지 상부에 발생하는 스크(scum)을 완전히 제거한 다음, 3~4차례의 수세과정을 거친 후, 포기시 MLSS가 2,500~3,000 mg/l가 되도록 각 반응기에 동일하게 주입

시켰다. 전체적인 반응기의 슬러지 체류시간(sludge residence time, SRT)은 20~30일 정도로 유지하기 위해 일정 양의 슬러지를 매일 침전 시간 직전에 제거하였다.

본 실험에 사용된 합성폐수는 Table 1에 나타난 것과 같이 탄소원은 glucose, 질소원은 (NH₄)₂SO₄, 인원은 K₂HPO₄이며, 기타 각종 미량원소를 첨가하였다.

2. 운전조건 및 분석방법

각 공정별 운전조건은 다음과 같다. 1주기는 12시간으로 하였으며, 전체적인 구성은 유입(30분), 1차 비포기(3시간 30분), 1차 포기(3시간 30분), 2차 비포기(3시간 30분), 침전(30분), 배출 및 휴지기간(30분)으로 하였다. 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. NH₄⁺-N와 MLSS는 Standard Methods⁶⁾에 따라 분석하였으며, 유기물의 농도는 TOC를 지표로 하여 TOC Analyzer(Schimidzu, 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. pH, DO 농도, ORP는 실시간 자동 측정기(Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 분석하였다. 유입되는 폐수 중의 TOC 농도는 실험 목적에 따라 약 30 mg/l, 75 mg/l, 225 mg/l로 변화시키면서 실험하였고, NH₄⁺-N 농도는 15 mg/l, PO₄³⁻-P 농도는 16 mg/l로 일정하게 유지하였다.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Compound	Concentration, mg/l
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

III. 결과 및 고찰

1. 생물학적 질소제거

유입 TOC의 농도를 30, 75, 225 mg/l로 변화시키면서 A₂O SBR과 A₂O SBBR에서 NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N의 1주기내 변화를 분석·관찰하였다(Fig. 2). 유입 TOC 농도를 30 mg/l로 저농도로 유지한 경우에는 의사 정상상태에 도달하는데 약 20일 정도가 소요되었고, 유입 TOC 농도를 증가시켜 75 mg/l로 유지시켜 실험한 경우는 약 45일이 경과되었으며, 유입 TOC

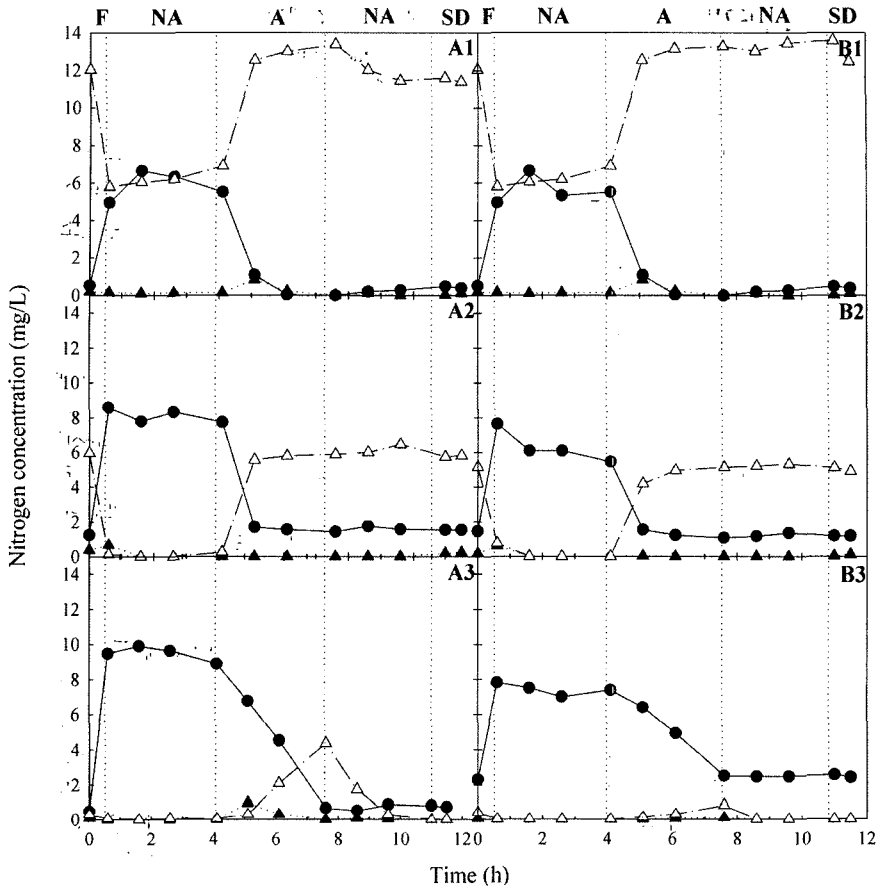


Fig. 2. Typical profiles of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (▲), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (△) concentrations by the variation of influent TOC concentrations (1, 30 mg/l; 2, 75 mg/l; 3, 225 mg/l) in (A) SBR and (B) SBBR. (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

농도를 225 mg/l로 높게 유지한 경우에는 32일 정도의 기간이 의사 정상상태에 도달하기 위해 필요하였다.

유입 TOC 농도 30 mg/l는 COD 값으로 환산하면 약 42 mg/l이고 BOD 값으로는 약 60 mg/l 정도로서 일반 하수 조건에 비해 상대적으로 매우 낮은 농도라고 할 수 있다. 그러나 초기 적응도를 살펴보고 낮은 유기물 농도에서의 질소·인 제거 거동을 살펴보기 위해서는 필요한 실험이라고 판단되었다. 이 경우 질소 제거 거동을 살펴보면, A_2O SBR과 A_2O SBBR 모두에서 큰 차이를 나타내지는 않았다(Fig. 2A1, B1). 앞 주기에서 미처리된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 중 상당량의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 유입 시간 30분 동안 탈질화에 의해 감소하였으나 유기물 부족으로 인하여 완전히 제거되지는 못하였다. 포기 기간 중 활발한 질산화가 발생하였으나, 2차 비포기 기간 중 부족한 유기물로 인하여 탈질화는 거의 발

생되지 않아 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 감소 폭은 매우 적었다. 그러므로 유입 TOC 농도를 30 mg/l로 매우 낮게 유지하여 운전한 경우에는 질산화는 매우 활발하게 발생하였으나, 탈질화는 초기 유입 기간을 제외하고는 거의 발생하지 않아서, 유출수중에 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 거의 없고, 대부분의 질소는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 차지하였으며, 유출수중의 총 질소 농도는 12~13 mg/l로 나타나 전체적인 질소 제거효율은 약 40%에 불과하였다.

유입 TOC 농도를 75 mg/l로 증가시킴에 따라 질소 제거 거동은 30 mg/l의 유입 TOC 농도일 때와 매우 다른 거동을 보였다(Fig. 2A2, B2). 그러나 전체적으로 A_2O SBR과 A_2O SBBR에서 큰 차이를 나타내지는 않았다. 유입 기간 중 앞 주기에서 잔존하였던 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 탈질화에 의해 완전히 제거되었으며, 유입이 끝난 시점에서의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 유입 TOC 농도가 저농도

일 때에 비해 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 유출수 중의 미처리된 NH₄⁺-N가 반응기내에 잔존하였기 때문인 것으로 판단되었다. 포기 기간에는 30 mg/l의 유입 TOC 농도일 때와 마찬가지로 활발한 질산화가 발생하였으나, 이 기간 중에 NH₄⁺-N가 완전히 제거되지는 않았다. 2차 비포기 기간 중에는 부족한 유기물로 인하여 탈질화가 발생하지 못하여 NO₃⁻-N의 농도는 거의 변화가 없었다. 유입 TOC 농도가 30 mg/l로 낮을 경우와 비교해 볼 때, 전체적으로 질산화에 있어서는 큰 변화는 없으나, 초기 탈질화가 매우 활발해 졌다는 것을 알 수 있다. 그러므로 유출수 중의 질소는 NH₄⁺-N 농도가 약 2 mg/l로 나타났고, NO₃⁻-N 농도가 약 5-6 mg/l로 나타났다. 전체적인 잔존 질소의 농도는 7-8 mg/l로 나타나 약 60% 정도의 질소 제거효율을 나타내었다. 그러나 여전히 탈질화가 부족하다는 것을 알 수 있었다.

유입 TOC 농도를 225 mg/l로 증가시킨 경우에서의 질소 제거 거동은 유입 TOC 농도가 저농도일 때와 확연한 차이를 나타낼 뿐만 아니라, SBR과 SBBR간의 질소 제거 거동의 차이도 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2 A3, B3). 유입 TOC가 저농도인 경우들과는 달리, 반응기간 중 활발한 탈질화가 발생함으로써 유출수중 잔존하는 NO₃⁻-N나 NO₂⁻-N가 거의 없어서, 유입기간 중 탈질화는 거의 발생되지 않았다. 포기 기간에는 활발한 질산화가 발생하였으나, 질산화 속도는 저농도의 유입 TOC에 비해 매우 느리게 나타났다. 이는 유입 TOC 농도가 증가할수록 autotroph인 질산화 미생물에 비해 heterotroph의 활동이 활발해짐으로써 질산화 활동이 상대적으로 어려워지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 NH₄⁺-N 제거량과 제거속도에 있어, SBR과 SBBR은 큰 차이를 나타내었는데; SBR에서는 8.2 mg/l의 NH₄⁺-N가 이 기간 동안 제거되었고 제거속도는 9.4 mg/h로 나타났으나, SBBR에서는 4.9 mg/l의 제거량과 5.6 mg/h의 제거속도를 나타내었다. 유입 TOC 농도가 증가할수록 SBBR의 생물막 두께가 2 mm 정도로 두꺼워짐으로써 생물막 내부로의 산소 전달이 어려워지고 생물막 외부에만 일부 질산화 미생물이 존재함으로써 질산화가 현저하게 저해되었기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 또한 SBBR에서 NH₄⁺-N 제거량에 비해 NO₃⁻-N의 발생량이 현저하게 적은 것은 생물막이 두꺼워 생물막 내부에 무산소 영역이 존재함으로써 생성된 NO₃⁻-N가 바로 탈질화에 의해 제거되었기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 2차 비포기 중 SBR에서는 완전한 탈질화가 발생하였고, SBBR에서는 포기 후 잔존하는 NO₃⁻-N가 적어 쉽게 탈질화되었다. 전체적으로 SBR의 유출수에

잔존하는 질소는 NO₃⁻-N는 0 mg/l이고 NH₄⁺-N는 0.8 mg/l로서 96%의 질소제거효율을 보였고, SBBR에서는 각각 0 mg/l와 2.4 mg/l를 나타냄으로써 88%의 질소 제거효율을 나타내었다.

2. 생물학적 인 제거

유입 TOC 농도를 변화시키면서 SBR과 SBBR 내의 인 농도 변화를 관찰하였다(Fig. 3). 유입 TOC 농도가 비교적 낮은 30 mg/l와 75 mg/l에서는 65일 정도 경과된 시점인데도 불구하고, SBR과 SBBR 모두에서 혐기 상태에서 인 방출과 호기 상태에서의 인 섭취 현상이 나타나지 않았다. 이는 생물학적 질소제거 공정중 발생된 NO₃⁻가 완전히 제거되지 못하고 유입기간에 잔존하여 인의 방출을 방해하였고, 이는 인의 제거에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 유입 TOC 농도가 30 mg/l인 경우에는 10-12 mg/l의 NO₃⁻-N가 존재하였고, 유입 TOC 농도가 75 mg/l일 때는 약 16 mg/l의 NO₃⁻-N가 잔존함으로써 인의 방출에 영향을 미쳤다는 것은 매우 자명한 사실이다. NO₃⁻나 NO₂⁻가 존재하는 무산소 상태에서 *Acinetobacter* 등과 같은 인

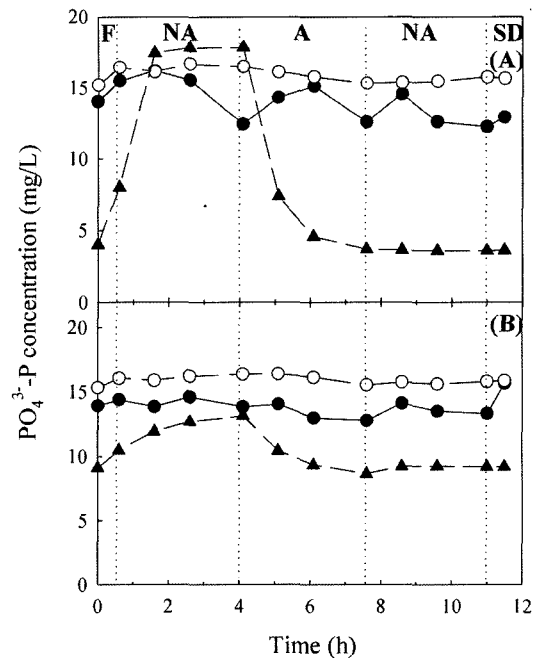


Fig. 3. Typical profiles of PO₄³⁻-P concentration by the variation of influent TOC concentrations (●, 30 mg/l; ○, 75 mg/l; ▲, 225 mg/l) in (A) SBR and (B) SBBR. (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

제거 미생물들은 인 방출에 크게 저해 받는 것으로 알려져 있다.

EBPR(enhanced biological phosphorus removal)에서 NO_3^- 가 인의 제거에 미치는 영향에 대해서는 아직 상반된 주장이 나오고는 있지만, 혐기성 반응에서 NO_3^- 가 유입될 경우에는 인의 방출을 저해함으로써 인 제거공정에 악영향을 미친다는 주장이 설득력을 얻고 있다. Hascoet 등⁷⁾은 단쇄 지방산이 주입되고 NO_3^- 가 존재하는 무산소 조건에서 초기 NO_3^- 농도가 높을수록 인의 방출속도는 작아져서 전체적인 인의 방출량이 감소하였다고 보고하였다. 그러므로 NO_3^- 의 농도가 높을수록 인의 방출이 감소되는 것은, 탈질화 미생물에 의해 소모되는 유기물량이 많아져서 상대적으로 인 제거 미생물(phosphorus accumulating organisms, PAOs)들이 유기물을 이용할 기회가 감소되었을 뿐만 아니라, NO_3^- 를 전자수용체로 하여 무산소 기간 중 인의 방출이 일어나는 것이 아니라 오히려 인의 섭취가 발생하기 때문인 것으로 설명할 수 있다. Kern-Jespersen과 Henze⁸⁾는 무산소 기간중의 인의 섭취 또는 방출은 NO_3^- 를 전자수용체로 이용가능한 미생물(denitrifying phosphorus accumulating organisms, dPAOs)에 의한 인의 섭취와 NO_3^- 를 전자수용체로 이용할 수 없는 순수 PAOs에 의한 인 방출의 차이에 의해 결정된다고 판단하였다. 박과 김⁴⁾은 저농도의 유입 TOC에서 SBR과 SBBR의 인 제거경향을 비교 실험한 결과, SBR에서는 본 연구에서와 비슷하게 인의 제거가 거의 발생하지 않았으나 SBBR에서는 인의 방출과 섭취가 다소 발생한 것으로 발표한 바 있는데, 이는 SBBR에서 내생호흡에 의한 유기 탄소원 공급으로 인하여 인의 방출이 발생할 수 있었다고 판단하였다. 그러나 박과 김⁴⁾의 결과를 자세히 살펴보면, SBR에서는 활발한 질산화와 부족한 탈질화로 인하여 NO_3^- -N이 7 mg/l로 높게 존재하였고 그에 비해 SBBR에서는 NO_3^- -N이 3 mg/l로 낮게 존재함으로써 SBR에서는 인의 방출이 어려웠으나 SBBR에서는 인의 방출이 가능하였던 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서와 같이 유입 TOC 농도가 낮은 경우에는, 유기물을 차지하기 위한 탈질화 미생물과 PAOs의 직접적인 경쟁관계로 보는 것보다는 낮은 유기물 농도로 인하여 탈질화가 제대로 발생되지 못함으로써 NO_3^- 가 유입기간과 비포기 기간 중 잔존하고, 잔존하는 NO_3^- 에 의한 인 방출 억제 또는 저해로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다.

유입 TOC 농도를 225 mg/l로 증가시킴에 따라 32일이 경과된 시점에서 SBR과 SBBR의 인 방출과 인 섭

취가 나타났다. 이는 유기물 농도가 증가함으로써 인 방출에 필요한 유기물 농도가 충분하였기 때문인 것으로 볼 수 있으나, 그보다는 2차 비포기 단계의 탈질화 과정에 필요한 충분한 유기물이 공급됨으로써 반응기 내 잔존하는 NO_3^- 가 탈질화에 의해 제거되었고, 그럼으로써 초기 유입 단계와 1차 비포기 단계에서 인의 방출에 저해 작용을 하는 NO_3^- 가 없어 인의 방출이 자유로웠기 때문인 것으로 판단된다.

Glucose를 탄소원으로 이용한 상태에서 EBPR이 발생되는 데 소요되는 시간을 다른 문헌의 결과들과 비교해 보면, 활성슬러지를 이용한 경우 60~80일 정도의 기간이 필요한 것으로 보고되었으며,^{9,10)} 젓소 분변 슬러지를 이용한 경우에는 36일 정도인 것으로 발표된 바 있다.¹¹⁾ 그러므로 본 연구에서와 같이 32일 정도에서 EBPR이 가능하게 된 것은 다소 적응기간이 짧았다고 볼 수도 있으나, EBPR이 발생하지는 않았으나 저농도에서의 운전기간인 65일을 포함시키게 되면 다른 문헌에서의 결과와 유사하였다. 그러므로 다른 문헌에서는 단순히 적용된 탄소원과 슬러지의 종류 및 주기에 따라 EBPR 적응기간을 비교하고 있으나, 본 연구의 결과를 볼 때 탄소원의 종류뿐만 아니라 농도에 따라 EBPR이 발생할 수 있는 기간의 차이가 매우 상이하게 나타나므로 탄소원 농도도 슬러지 적응 기간의 단축에 매우 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

SBR에서 1차 비포기 기간 중 방출된 인의 양은 9.84 mg/l이고 포기 기간 중 섭취된 인의 양은 14.2 mg/l로 나타났다. 이에 비해 SBBR에서는 1차 비포기 기간 중 2.7 mg/l의 인이 방출되었고 포기 기간 중에는 4.5 mg/l의 인이 섭취되었다. 전체적으로 SBBR에 비해 SBR에서 인의 섭취와 방출이 활발하게 일어났으며, SBR에서의 인 제거효율은 77.5%로 SBBR의 42.5%에 비해 월등히 높게 나타났다. 1차 비포기 기간 중 SBR에서 glucose 섭취량에 대한 인 방출량의 비는 0.075 P-mol/C-mol으로 나타났고, SBBR에서는 0.022 P-mol/C-mol으로 나타났다. 탄소원으로 glucose가 아닌 acetate를 이용한 경우에는 0.25~0.75 P-mol/C-mol의 값¹²⁾으로 훨씬 높은 값을 나타내었는데, 이는 acetate를 탄소원으로 이용할 경우 glucose를 이용할 때보다 많은 ATP를 이용할 수 있기 때문에 보다 많은 인의 방출이 가능한 것으로 생각된다. 또한, Kumar과 Chaudhari¹¹⁾는 glucose를 이용한 SBR과 SBBR의 실험에서 0.035 P-mol/C-mol에서 0.043 P-mol/C-mol로서 SBR과 SBBR에 있어 큰 차이가 없다고 보고한 바 있다. 본 연구 결과와 비교해 보면, SBR의 경우에는 다소 큰 값을 나타내었으나, SBBR에서는 적은 것으로 나

타났다. 그러므로 SBBR에서는 탄소원의 이용에 있어 PAOs에 의한 탄소원 이용비율이 다소 적은 것으로 생각되며, 이는 생물막의 증가에 따라 각종 유기물 및 영양염류의 확산저항이 발생함으로써 PAOs보다는 인을 이용하지 않는 GAOs(glycogen accumulating organisms)가 보다 활발하게 성장하기 때문¹²⁾인 것으로 판단된다. 생물막 공정은 확산저항으로 인하여 인의 제거에 제한점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

3. 생물학적 유기물 제거

유입 TOC 농도변화에 따른 각 구간별 TOC 농도변화를 관찰하여 Fig. 4에 나타내었다. 유입 TOC 농도를 30 mg/l와 75 mg/l로 낮게 유지한 상태에서는, SBR과 SBBR 모두에서 유출수의 TOC 농도는 4~8 mg/l의 범위로 나타나, SBR과 SBBR에 따른 큰 차이가 나타나지 않았으며 전체적으로 질소와 인을 적절하게 처리하기에는 부족한 상태라는 것을 알 수 있었다.

유입 TOC 농도를 225 mg/l로 증가시킴에 따라 각 반응영역별 TOC의 농도변화는 뚜렷한 차이를 나타내기 시작하였다. SBR에서는 유입 TOC 농도를 30, 75,

225 mg/l로 증가시킴에 따라 TOC 제거효율은 71%, 92%, 94%로 증가하였으며, SBBR에서는 각각 85%, 89%, 90%로 증가하는 것으로 나타나 TOC 농도가 높을수록 TOC 제거효율은 증가하는 것으로 나타났다.

TOC의 변화는 1차 비포기 기간에 가장 많이 발생하였으며, 이는 대부분 인의 방출에 이용된 것으로 생각된다. 또한 2차 비포기 기간 중 SBR에서 TOC의 감소는 탈질화에 따른 TOC 소모에 의한 것으로 판단된다.

4. pH, DO 농도 및 ORP의 변화

pH, DO 농도 및 ORP는 on-line에 의해 측정되는 값으로서 각 유입 TOC 농도 변화에 따라 실시간으로 측정되었다(Fig. 5).

SBR과 SBBR 모두에서 유입 TOC 농도가 30 mg/l와 70 mg/l로 비교적 낮게 유지된 상태에서는 유입 TOC 농도가 225 mg/l로 높은 상태와 비교해 볼 때 pH의 변화도 크게 발생되지는 않았다.

유입 TOC 농도를 225 mg/l로 유지한 상태에서, SBR에서의 pH 변화는 매우 뚜렷하게 나타났고, 전체적인 pH는 유입 TOC 농도가 낮을 때에 비해 감소하였으며 pH 변화폭도 크게 나타났다. 1차 비포기 초기에는 pH의 급격한 감소가 관찰되었는데(Fig. 5A1), 이는 주로 인의 방출과 발효 부산물에 의한 것으로 판단된다. 이러한 대표적인 경향은 Chang과 Hao¹⁵⁾와 Lee 등¹⁶⁾ 여러 연구자에 의해서도 관찰된 바 있다. Jeon과 Park¹⁰⁾은 SBR에서 glucose를 이용한 인 제거 실험에서 초기 pH가 감소하는 것은 PAOs의 인 방출 전에 lactic acid producing organisms(LPOs)에 의해 glucose가 lactic acid로 전환되기 때문에 pH가 감소한다는 이론을 제시하기도 하였다. 또한 이 기간 동안의 pH 감소는 탈질화에 따른 pH 감소로 보는 시각도 있으나,¹⁷⁾ 대부분 다른 연구자들의 결과에 의하면 탈질화에 의해서는 pH가 증가하거나 변화가 없는 것으로 보는 견해가 대부분이며, 본 연구에서는 초기 유입 기간 동안에 탈질화가 완료되므로 1차 비포기 기간 중의 pH 감소를 탈질화에 의한 영향으로 보는 것은 적절하지 않다고 생각된다. 1차 비포기 초기에 pH가 감소한 이후로는 pH의 변화가 거의 없는 것으로 보아 인의 방출이 종료되었다는 것을 의미한다. 그러므로 실제 인의 방출은 유입 기간과 초기 1차 비포기 기간 중 매우 짧은 시간 내에 일어난다는 것을 알 수 있었고, 1차 비포기 기간을 3시간 30분 정도로 길게 유지할 필요가 없었던 것으로 판단된다.

포기 기간에는 질산화와 PAOs에 의한 인의 섭취가 발생되며 이 기간 중 유기탄소의 이용은 불필요한 것

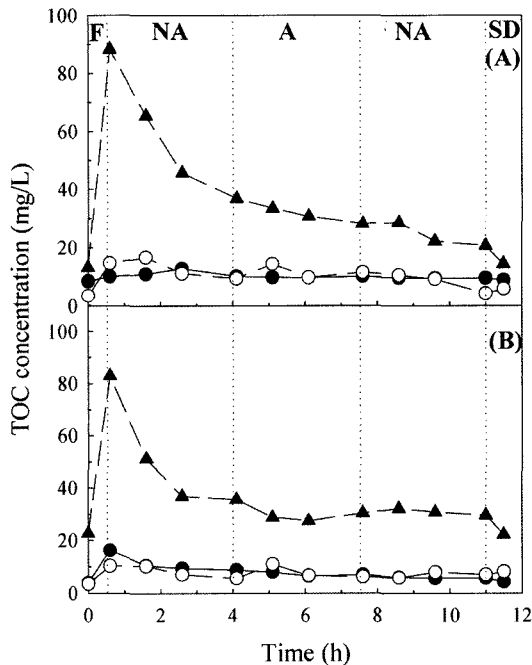


Fig. 4. Typical profiles of TOC concentration by the variation of influent TOC concentrations (●, 30 mg/l; ○, 75 mg/l; ▲, 225 mg/l) in (A) SBR and (B) SBBR. (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

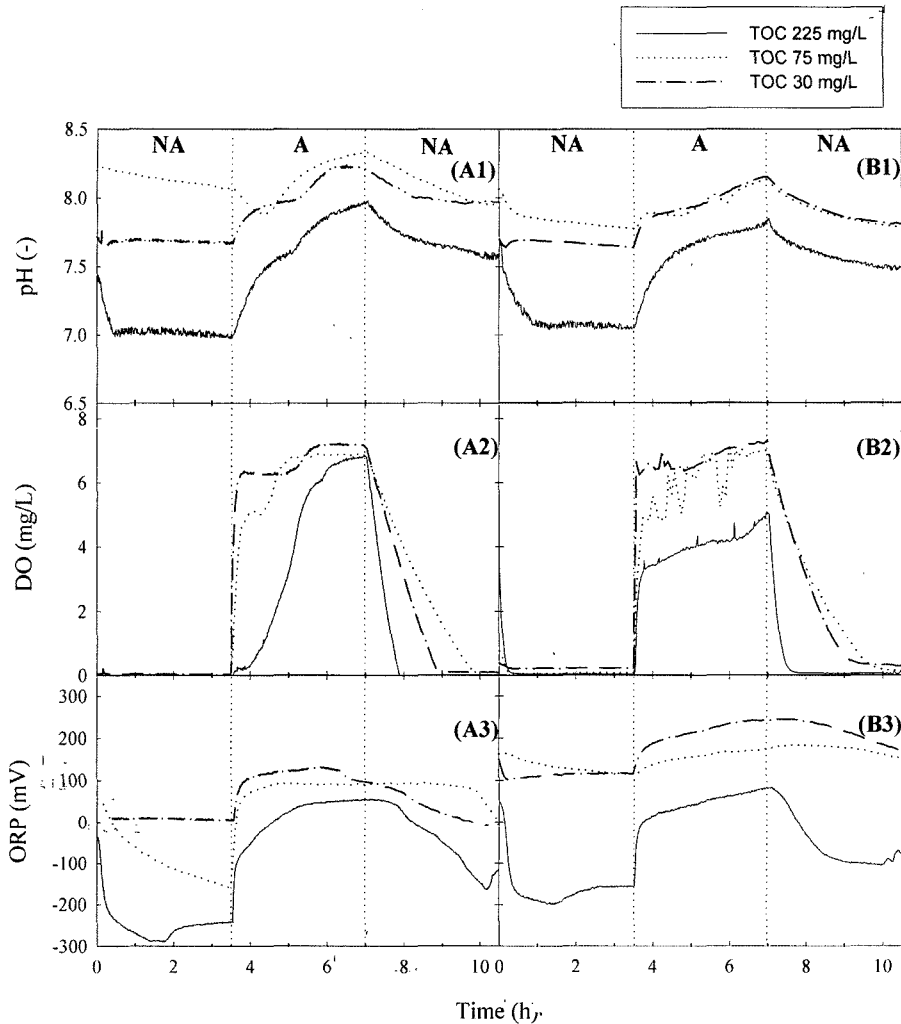


Fig. 5. Typical profiles of (1) pH, (2) DO concentration and (3) ORP by the variation of influent TOC concentrations in (A) SBR and (B) SBBR. (F, feeding period; NA, non-aeration period; A, aeration period; SD, settling and drawing period).

으로 알려져 있다. 1차 포기 단계에서 초기에 pH는 급격하게 상승하였는데, 이는 1차 비포기 동안 형성된 CO₂를 탈기시킴으로써 발생된 것으로 볼 수 있다.¹⁶⁾ 이후 지속적인 포기를 하면 질산화의 영향으로 H⁺가 방출되어 pH는 감소한 다음 평탄해지거나 계곡(valley)의 변곡점을 나타내는 것으로 보고되거나,¹⁶⁾ 초기 포기 시작부터 질산화의 영향으로 급격한 pH 감소를 나타낸 다음 질산화가 완료되면 pH가 다시 급격하게 상승하게 되는 암모니아 계곡(ammonium valley)을 나타낸다는 보고도 있었다.^{17,18)} 그러나 이 등¹⁹⁾과 Marsili-Libelli²⁰⁾는 본 연구에서와 같이 pH가 증가하다가 pH 변곡점을 거친 다음 지속적인 증가를 하는 것으로 발표하였다.

이렇게 연구자들 간의 결과가 상이하게 나타나는 것은 질소와 인의 제거과정에서 주제거 대상물질이 무엇인가에 따라 달라지는 것으로 판단된다. 질소제거만을 대상으로 하거나 인의 제거에 비해 질소의 제거가 상대적으로 많이 발생할 경우에는 상대적으로 Lee 등¹⁶⁾, Akin 등,¹⁷⁾ Kim 등¹⁸⁾과 같은 pH 경향을 나타내고 질소와 인의 동시제거가 비교적 잘 발생하는 경우에는 이 등¹⁹⁾과 Marsili-Libelli²⁰⁾의 결과와 비슷하게 나타나는 것으로 조사되었다. 1차 포기 기간에는 질산화, 인 침취 및 CO₂ 탈기가 발생하는데, 초기 짧은 시간 내의 pH 증가는 CO₂ 탈기에 의한 것으로 보는 견해가 지배적이며, 암모니아 산화가 지배적일 경우에는 pH가 감

소하며 인의 섭취가 지배적일 경우에는 pH가 증가한다. 만약 인의 섭취가 완료되기 전에 질산화가 종료된다면, ammonia-valley는 발생되지 않으며, 반대로 인의 종료가 먼저 발생하고 그 이후로 계속적인 암모니아 산화가 발생된다면 pH 감소가 발생하게 되고 그에 따라 ammonium-valley가 발생하는 것으로 판단된다. 그러므로 초기 짧은 시간 내에는 CO₂ 탈기, 인의 섭취와 암모니아 산화가 동시에 발생하나 상대적으로 CO₂ 탈기가 지배적인 역할을 하다가, 암모니아 산화가 증가함에 따라 발생된 H⁺와 소모된 알칼리도에 의해 pH의 증가는 둔화되어서 pH 변곡점에 이르게 된다. 다른 연구자들^{19,21)}의 결과에 의하면 이 점이 질산화의 완료시점으로 보고 있으나, 본 연구의 결과를 보면 질산화의 완료시점으로 보는 것보다는 암모니아 산화에 따른 NO₂⁻의 최대 형성 시점으로 보는 것이 적절할 것으로 보인다. 왜냐하면 암모니아 산화에 따른 NO₂⁻ 형성과정에서 소모되는 알칼리도의 양이 전체 질산화 과정 중 소모되는 알칼리도의 대부분을 차지하기 때문이다. 이 변곡점 이후에는 암모니아 산화는 줄어들고 인의 섭취는 계속 발생하기 때문에 pH는 다시 증가하는 것으로 판단된다.

2차 비포기 과정 중 pH가 감소되는 것은 발효 부산물에 따른 영향으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다.

유입 TOC 농도를 낮게 유지한 경우, SBBR에서는 SBR에서와 유사한 pH 변화 과정을 가졌다(Fig. 5B1). 그러나 유입 TOC 농도가 225 mg/l로 높은 경우, 비포기 기간동안의 pH 변화 과정은 SBR과 큰 차이가 없었으나 포기 기간에서는 SBR에서와 같은 뚜렷한 변곡점을 나타내지는 않았다. 이는 이 기간 중 질산화만 발생하는 것이 아니라 생물막에 의해 질산화와 탈질화가 동시에 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

DO 변화 특성에 있어서도 유입 TOC 농도를 변화시키며 따라 상당한 차이를 나타내었다. 유입 TOC 농도가 30 mg/l와 75 mg/l로 비교적 낮은 경우에는 최대 DO 농도에서 큰 차이를 나타내지 않았고 공기를 공급함에 따라 DO 농도도 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 75 mg/l의 유입 TOC 농도에서 DO 변곡점이 보다 빠르게 나타났으며, 공기 공급에 따른 DO 농도의 증가 속도는 다소 느리게 나타났다. 이는 산소를 필요로 하는 질산화 미생물과 PAOs의 활동이 활발해졌기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있었다. 그러나 유입 TOC 농도를 변화시키며 따라 인 제거는 변화가 거의 없으나(Fig. 3) 질산화 속도는 증가하는 것으로 보아(Fig. 2), 이 기간 중의 DO 소모의 상당량은 질산화 미생물에 의해 이루어지는 것으로 생각해 볼 수

있었다.

유입 TOC 농도를 225 mg/l로 증가시키며 따라 완전히 달라진 DO 농도 변화를 관찰할 수 있었다. 초기 30분 정도에는 DO 농도가 0.3 mg/l로 매우 낮게 유지되었는데, 이는 유입 TOC 농도가 낮을 때에 비해 상대적으로 DO를 소모하는 PAOs의 개체수와 활동이 활발해졌기 때문이라고 판단된다. 그 이후 DO 농도는 급격하게 증가하였으나 최대 DO 농도는 유입 TOC 농도가 낮을 때에 비해 낮게 유지되었으며 정상상태에서의 유지기간도 짧았다. 그러므로 유입 TOC 농도가 높아 질수록 유지할 수 있는 최대 DO 농도가 낮아지고, 최대 DO 농도 유지기간도 짧아질 뿐만 아니라, DO 농도가 변화하는 전이 구간이 길어진다는 것을 알 수 있었다.

SBBR에서는 SBR과는 상당히 다른 DO 농도 변화를 나타내었다(Fig. 5B2). 유입 TOC 농도가 30 mg/l로 낮은 상태에서는 SBR과 큰 차이를 나타내지 않았으나, 유입 TOC 농도가 높아질수록 차이가 뚜렷하게 나타났다. 유입 TOC 농도가 225 mg/l인 경우, SBBR에서는 초기부터 DO 농도는 증가하였으나 그 이후 완만한 증가 경향을 나타내었으며, 최대 DO 농도도 유입 TOC 농도가 낮을 때에 비해 낮은 값을 나타내었다. 이는 생물막에 의한 특성 때문인 것으로 판단된다.

ORP는 무산소 상태에서 pH보다 많은 정보를 제공하는 것으로 알려져 있다.²⁰⁾ SBR에서 유입 TOC 농도가 30 mg/l로 매우 낮은 경우에는 1차 비포기 기간 중 ORP의 변화가 거의 없다가 포기 기간 중 약간의 ORP 증가 후 2차 비포기 기간 중 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 5C1). 유입 TOC 농도가 증가함에 따라 ORP 변화가 크게 나타나기 시작하였다. 유입 TOC 농도가 30 mg/l에서는 -8 mV~130 mV의 ORP 범위를 나타내었으며, 75 mg/l에서는 -160 mV~95 mV, 225 mg/l에서는 -290 mV~55 mV의 범위로 변화하였다. 그러므로 유입 TOC 농도가 증가할수록 산화-환원 전위차가 커진다는 것을 알 수 있었다. 또한 유입 TOC 농도가 30 mg/l와 75 mg/l로 그다지 높지 않은 상태에서는 그다지 뚜렷한 ORP 변화를 나타내지 못하다가 유입 TOC 농도를 225 mg/l로 높임에 따라 ORP는 구간별로 뚜렷한 변화를 나타내기 시작하였다. 1차 비포기 상태에서 기질 소모와 함께 탈질화 과정은 환원과정이며 ORP가 감소하는 것으로 볼 수 있으나, 본 연구에서는 탈질화가 유입 단계에서 거의 완료되므로 탈질화에 의한 ORP 감소로 보기는 곤란할 것으로 판단되며, 오히려 DO 변화 곡선과 인 변화 곡선을 볼 때, ORP 감소가 끝나는 시점이 TOC 감소가 둔해지는 시

점과 인 방출이 줄어드는 시점이 거의 일치하는 것으로 보아 ORP 변화는 인 방출과 밀접한 상관관계가 있는 것으로 판단된다. Marsili-Lebelli²⁰⁾에 의하면 무산소 혐기 과정 중 탈질화 종료 시점에서 ORP의 변곡점이 발생하고 그 이후에는 발생하는 변곡점은 인 방출의 종료에 의한 것으로 발표하였다. 또한 Lee 등¹⁶⁾은 인 방출이 종료되는 시점과 혐기상태에서의 ORP 변곡점이 일치한다고 보고하였다. 또한 pH 변화 곡선은 탈질화의 종료시점을 정확하게 표현하지 못하므로 pH를 SBR에서 조절인자로 이용한다는 것은 무리가 있다고 보는 시각이 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서도 이와 마찬가지로 탈질화 및 인의 방출 종료시점을 pH 변화 곡선에서 찾는 것은 곤란하였으며, 오히려 pH 곡선보다는 ORP 곡선이 1차 비포기 기간의 조절 인자로 이용하는 것이 적절할 것으로 판단되었다.

포기 상태에서 ORP는 증가하기 시작하였는데, 이는 DO 증가에 따른 산화과정의 영향으로 볼 수 있다. 포기 시작 후 2시간 정도 경과하게 되면 ORP는 증가하다가 완만한 곡선을 나타내었는데, 이 시점은 pH의 변곡점과 DO 농도 곡선에서의 변화 시점과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 이 시점을 ORP 변화 곡선에서 명확하게 찾는 것은 어려운 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾ 부 등²²⁾은 암모니아 산화 종료 시점에서 ORP 변곡점이 나타나고 ORP 곡선이 평탄해진다고 보고하였다.

SBBR의 1차 비포기 단계에서는 SBR에서와 비슷한 경향을 나타내었으나, 포기 단계에서는 ORP의 급격한 증가 후 완만한 증가를 나타냄으로써 SBR의 경향과 상당한 차이를 나타내었다. 이는 pH와 DO 농도 변화에서와 비슷한 경향을 나타내었다.

그러므로 SBBR에서는 SBR에 비해 전체적인 pH, DO, ORP의 변화에 있어 상당한 차이점이 있었으며 탈질화 완료시점, 질산화 완료 시점, 인 방출 및 인 섭취 완료 시점을 명확하게 구분하기가 곤란하였다. 이는 생물막에 따른 영향으로 볼 수 있으며 지속적인 연구의 필요성이 있다고 생각되었다.

IV. 결 론

SBR과 SBBR을 이용하여 일반적인 활성슬러지의 질소·인 제거 슬러지로서의 전환과정을 살펴보기 위하여 유입 TOC 농도를 변화시키면서 실험하였다. 유입 TOC 농도의 변화에 따른 질소·인 제거 특성의 전환과정을 각 반응별로 상세히 관찰하였고 각 반응별 운전조절인자들(pH, DO 농도, ORP)을 연계하여 조사하

여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

생물학적 질소제거에 있어 유입 TOC 농도가 낮은 경우에는 SBR과 SBBR에서 큰 차이가 나타나지 않았으나, 유입 TOC 농도가 높은 경우에는 각 구간별 질소제거 거동에 있어 상당한 차이를 나타내었다. 특히, SBBR에서는 동시 질산화-탈질화에 의해 질소가 제거되는 특징을 나타내었는데, 전체적인 질소 제거효율에 있어서는 SBR 96%와 SBBR 88%를 나타내었다.

인 제거에 있어 유입 TOC 농도가 낮은 경우에는 SBR과 SBBR 모두에서 인 제거 효과는 관찰되지 않았다. 유입 TOC 농도가 높은 경우 SBR에서의 인 제거효율은 77.5%이고 SBBR에서는 42.5%로 나타나, 질소와 인의 제거효과는 SBR의 경우가 높은 것으로 관찰되었다.

유입 TOC의 농도가 증가할수록 pH, DO 농도, ORP의 변화가 뚜렷하게 나타났으며, SBBR에 비해 SBR의 경우에서 각 조절인자들의 구간별 특성(탈질화 완료시점, 질산화 완료 시점, 인 방출 및 인 섭취 완료 시점)이 뚜렷하게 표현되었다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (KRF-2005-D00084).

참고문헌

1. 환경부 : 환경백서. 533-540, 2005.
2. 신행식, 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. *Water Science and Technology*, **35**(1), 199-206, 1997.
4. 박민정, 김동석 : 연속회분식 생물막 반응기(Sequencing Batch Biofilm Reactor)를 이용한 수중의 유기물, 질소 및 인의 동시 제거 관한 연구. 한국환경보건학회지, **30**(2), 84-91, 2004.
5. 박영식, 김동석 : 연속 회분식 반응기와 연속 회분식 생물막 반응기의 유기물, 질소 및 인의 동시 제거에 관한 비교 연구. 한국환경보건학회지, **31**(2), 152-159, 2005.
6. APHA, AWWA and WPCF : Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th, 1992.
7. Hascoet, M. C., Florentz, M. and Granger, P. : Biochemical aspects of enhanced biological phosphorus removal from wastewater. *Water Science and Technology*, **17**, 23-41, 1985.

8. Kern-Jespersen, J. P. and Henze, M. : Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition. *Water Research*, **27**(4), 617-624, 1993.
9. Shin, H. S. and Park, H. S. : Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor (PBCSBR). *Water Science and Technology*, **23**(4-6), 719-728, 1991.
10. Jeon, C. O. and Park, J. M. : Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor supplied with glucose as a sole carbon source. *Water Research*, **34**(7), 2160-2170, 2000.
11. Kumar, B. M. and Chaudhari, S. : Evaluation of sequencing batch reactor (SBR) and sequencing batch biofilm reactor (SBBR) for biological nutrient removal from simulated wastewater containing as carbon source. *Water Science and Technology*, **48**(3), 73-79, 2003.
12. Smolders, G. J. F., Van der Mehi, J., Van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J. : Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence. *Biotechnology & Bioengineering*, **43**, 461-470, 1994.
13. Falkentoft, C. M., Müller, E., Arnz, P., Harremoës, P., Mosbæk, H., Wilderer, P. A. and Wuertz, S. : Population changes in a biofilm reactor for phosphorus removal as evidenced by the use of FISH. *Water Research*, **36**, 491-500, 2002.
14. Falkentoft, C. M., Arnz, P., Henze, M., Mosbæk, H., Müller, E., Wilderer, P. A. and Harremoës, P. : Possible complication regarding phosphorus removal with a continuous flow biofilm system: diffusion limitation. *Biotechnology & Bioengineering*, **76**(1), 77-85, 2001.
15. Chang, C. H. and Hao, O. J. : Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **67**, 27-38, 1996.
16. Lee, D. S., Jeon, C. O. and Park, J. M. : Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system. *Water Research*, **35**(16), 3968-3976, 2001.
17. Akin, B. S. and Ugurlu, A. : Monitoring and control of biological nutrient removal in a sequencing batch reactor. *Process Biochemistry*, **40**, 2873-2878, 2005.
18. Kim, J. H., Chen, M., Kishida, N. and Sudo, R. : Integrated real-time strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors. *Water Research*, **38**, 3340-3348, 2004.
19. 이관용, 최창석, 이자명, 이태진 : 연속회분식반응기에서 용존산소의 변화를 이용한 포기 및 비포기 구간의 산정. *대한환경공학회지*, **25**(8), 1032-1037, 2003.
20. Marsili-Libelli, B. : Control of SBR switching by fuzzy pattern recognition. *Water Research*, **40**, 1095-1107, 2006.
21. 박영식, 우형택, 김동석, (AO)₂ SBR과 A₂O SBR의 유기물, 질소 및 인의 제거에 관한 연구. *한국환경보전학회지*, **31**(4), 340-348, 2005.
22. 부경민, 배 현, 서현용, 심문용, 전병희, 우혜진, 김성신, 김창원 : 질소 제거를 위한 SBR에서 ORP와 DO를 이용한 호기기간 제어와 원격 모니터링 시스템. *대한환경공학회 2003 춘계학술연구발표회*, 1535-1541, 2003.