

(AO)₂ SBBR에서 운전주기에 따른 질소와 인 제거 특성 비교

박 영 식 · 김 동 석*

대구대학교 보건과학부, *대구가톨릭대학교 환경과학과
(2005년 11월 7일 접수; 2006년 11월 22일 채택)

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal According to the Variation of Operating Cycles in (AO)₂ SBBR

Young-Seek Park and 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

(Manuscript received 7 November, 2005; accepted 22 November, 2006)

This study was carried out to investigate the variation of organic, nitrogen and phosphorus in (AO)₂ SBBR process according to the variation of operating cycle at the high TOC concentration. The operation time in anoxic (anaerobic) time to oxic time was 1:1. Three lab-scale SBBRs were fed with synthetic wastewater based on glucose as carbon source. The variation of total TOC removal was similar each other irrespective of operation time, however, the TOC concentrations in SBBRs showed a little difference according to the operating condition. In SBBR, complete nitrification was not occurred at all reactors, however, R3 showed a higher nitrification than R2. And in SBBR, the variation of operating time more affected at phosphorus removal than nitrogen removal. R2 which had the shortest time at the 1st aeration time showed the lowest phosphorus release and uptake efficacy.

Key Words : (AO)₂ SBBR, Operation time, Nitrogen removal, Phosphorus removal, High TOC concentration

1. 서 론

하·폐수중의 질소와 인이 적절하게 제거되지 않은 채 방류될 경우, 수중 생태계의 부영양화에 따른 여러 문제들이 발생될 수 있다. 그러므로 수중의 질소와 인을 적절하게 처리하기 위하여 여러 가지 방법들이 이용되고 있으나, 생물학적 처리방법이 적절한 것으로 알려져 있다.

연속 회분식 반응기(sequencing batch reactor, SBR)는 생물학적 처리가 주기에 맞추어 일어나는 형태로서, 비교적 소규모의 하·폐수 처리 공정에 성공적으로 적용되고 있다. SBR에서 각 처리 주기는

유입(fill), 반응(reaction), 슬러지 침전(settle), 처리수의 배출(draw) 등으로 구성되어 있으며, SBR의 가장 큰 장점은 하나의 반응기에서 전체 반응이 연속적으로 유발될 수 있다는 것이다.

그러나 다른 여러 종류의 미생물들이 공존할 경우, 산소에 대한 질산화 미생물과 인 제거 미생물(phosphorus accumulating organisms, PAOs)의 경쟁적인 관계가 발생될 수 있다. Rusten과 Eliassen¹⁾은 이러한 경쟁적인 관계가 부유 biomass를 이용하는 SBR에서 발생할 경우 인의 제거가 활발하게 되면 질산화가 불완전해지거나 또는 그 반대의 현상이 일어날 수 있다고 보고하였다. 이에 비해 연속 회분식 생물막 반응기(sequencing batch biofilm reactor, SBBR)를 이용할 경우 효과적인 인 제거와 완벽한 질산화가 가능하다고 발표된 바 있다^{2,3)}.

SBBR은 SBR과 생물막(biofilm)이 복합적으로 적

Corresponding Author : Dong-Seog Kim, Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea
Phone: +82-53-850-3250
E-mail: kimds@cu.ac.kr

용된 반응기로서, 최근 하·폐수 중의 영양염류를 효과적으로 제거하기 위한 연구에 응용되고 있다^{4~6)}. SBBR은 biomass를 반응기내에서 높은 농도와 체류시간으로 유지시킬 수 있고, 기존 SBR과는 달리 긴 체류 시간을 줄이거나 없앨 수 있을 뿐만 아니라, 생물막 내에 공존하는 호기-무산소 생태계로 인하여 호기와 무산소 반응을 함께 유발시킬 수 있는 장점들이 있다⁷⁾. 그러나 Falkentoft 등⁸⁾은 생물막내에서 확산저항에 의해 생물학적 인 제거가 저해될 수 있는 가능성에 대해 언급하기도 하였다. 그러므로 생물막은 질소를 제거하는데 이점을 가지고 있지만 인의 제거하는 데에는 제한점을 가지고 있는 것으로 보인다. 이에 비해 Kumar와 Chaudhari⁹⁾는 SBR과 SBBR을 비교한 결과, 인 제거효율은 비슷하고 질소제거효율은 SBBR이 SBR에 비해 다소 높다고 발표한 바 있다.

본 연구에서 이용한 SBBR은 활성슬러지 공정이나 SBR 공정에서 질소와 인을 제거하는 공정을 기초로 하여 크게 4가지의 반응 단계로 구성되어 있다. 1단계는 유입 후 비포기 단계로서 biomass 내의 인을 폐수로 방출하고 폐수 중에 있는 유기 오염물을 biomass 내로 축적하는 단계이다. 2단계는 포기 단계로서 폐수 중에 방출되어 있는 인을 섭취하여 biomass 내의 다중인산염(polyphosphate)의 형태로 축적하고 질산화가 유발되는 단계이다. 다음은 비포기 단계로서 무산소 상태로서 질산성 질소를 환원

시키고 일부 인이 재방출할 수 있는 단계이다. 마지막 단계는 호기 상태를 유지하는 포기 단계로서 폐수 중의 미처리된 인을 biomass에 의해 섭취·제거하고 세포내의 유기물질을 동화하는 단계이다.

그러므로 본 연구의 주요 목적은 비교적 높은 농도의 유기물이 공급되는 조건에서 SBBR내의 탄소, 질소 및 인의 동시 제거를 유발하기 위한 최적의 운전 조건을 확립하기 위한 것으로서, 비포기-포기-비포기-포기의 4단계를 가지는 (AO)₂ SBBR을 이용하여 전체적인 포기와 비포기 시간을 1:1로 유지한 상태에서 포기 시간의 변화에 따른 유기물, 질소 및 인에 대한 제거 과정을 각 단계별로 조사하였으며, 이를 용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도와 pH의 변화와 연계하여 고찰하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 3개의 (AO)₂ SBBR을 설치하여 운전하였는데, 크게 비포기-포기-비포기-포기의 4단계 반응으로 구성하였다. 각 반응조는 15X15X25 cm로 제작하여, 유입후 최대 유효 용적을 4 L, 유출 후 최소 용적을 2 L로 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 형태로

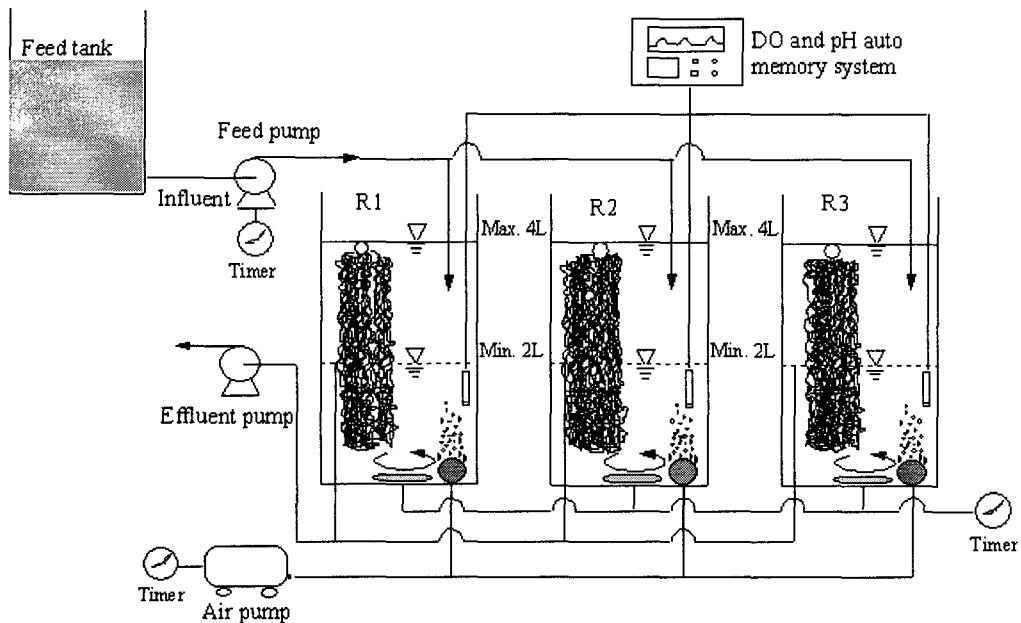


Fig. 1. Schematic diagram of R1, R2 and R3 systems.

(AO)₂ SBBR에서 운전주기에 따른 질소와 인 제거 특성 비교

써, 5x14x20 cm의 크기로 잘라 겉보기 용적으로 반응기 최대 유효용적의 약 25%가 되도록 동일하게 충전시켰다.

폐수는 정량펌프를 이용하여 반응기 상부에서 매 주기마다 2 L씩 유입시켰으며, 처리수는 침전시간 30분 후 정량펌프를 이용하여 최대 유효 용적의 50%인 2 L를 유출시켰다. 비포기시 반응기 내의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석교반기를 설치하여 약 200 rpm으로 교반시켰다. 포기시 공기 펌프를 이용하여 반응기 하부에 설치된 환형 공기 분산기를 통하여 공기를 주입시켰으며, rotameter를 설치하여 공기 주입량을 5 L/min로 유지하였다. 기질 공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은 timer를 이용하여 제어하였으며, 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)은 20~30일 정도로 유지하기 위해 일정 양의 슬러지를 매일 침전 시간 직전에 생물막을 약간 털어서 제거하였다.

본 실험에 사용된 합성폐수는 Table 1에 나타난 것과 같이 탄소원은 bacto-peptone과 glucose, 질소원은 (NH₄)₂SO₄, 인원은 K₂HPO₄이며, 기타 각종 미량원소를 첨가하였다. 농도는 실험목적에 따라 조절하여 사용하였다.

2.2. 운전조건 및 분석방법

각 공정별 운전조건은 Fig. 2와 같다. 1주기는 12시간으로 하였으며, 전체적인 구성은 유입, 1차 비포기, 1차 포기, 2차 비포기, 2차 포기, 침전, 배출

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

및 휴지기간으로 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 포기 시간은 5시간이 되도록 하여 비포기와 포기 시간 배분이 약 1:1이 되도록 하였다. 1차 비포기 시간은 2시간, 2차 비포기 시간은 3시간 30분으로 항상 일정하게 유지하였으나, 1차와 2차 포기 시간의 배분을 다르게 설정하여 포기 시간 배분에 따른 영향을 살펴 보았다. R1에서는 1차 포기 시간을 2시간, 2차 포기 시간을 3시간으로 하였고, R2에서는 1차 포기 시간과 2차 포기 시간을 각각 1시간과 4시간으로 하여 전반부의 포기 시간을 짧게 하고 후반부의 포기 시간을 길게 하였으며, R3에서는 1, 2차 포기 시간을 각각 3시간과 2시간을 하여 전반부의 포기 시간을 길게 하고 후반의 포기 시간을 짧게 유지하였다.

각 성분의 분석은 실험이 90일 정도 경과되어 충분한 질소·인의 제거가 확인되고 정상상태에 도달된 다음 실시하였다. 각 반응기 내의 시료 채취는 약 1시간마다 채취하여 각각의 유입, 비포기 및 포기 등의 시간조건에서 3~4 회 정도가 되도록 조절

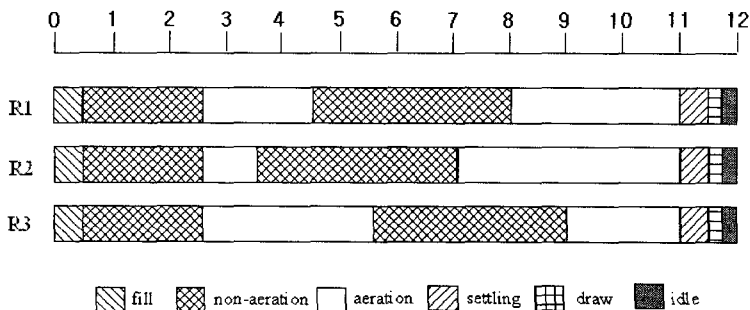


Fig. 2. Operation conditions in R1, R2, R3, respectively.

하여 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 Methods¹⁰⁾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. $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도는 Ion Chromatography (Metrohm, Ion analysis version 2.0, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. DO 농도와 pH는 실시간 자동 측정기 (Inolab Multi-Parameter Level 3)를 사용하여 측정하였다. 반응기에 유입되는 폐수의 TOC 농도는 일반 하수의 평균농도보다 높은 약 210 mg/L로 하였고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 20 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 16 mg/L로 일정하게 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물의 제거

식중한 활성 슬러지는 실험 시작 후 약 2일 이내에 여재에 부착되었으나, 여재가 스펀지 형태여서 내부의 생물막 두께나 생물막 특성을 측정하기는 매우 곤란하였으며, 전체적인 여재 표면의 바깥에 부착된 외형상의 생물막만을 관찰할 수 있었다.

SBBR의 운전조건의 변화에 따른 유기물 제거효과를 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 포기 시간의 배분을 다르게 한 상태에서 실험하였다. 특성상 생물막의 유입되는 폐수의 TOC 농도를 210 mg/L로 유지한 상태에서 약 3~4개월 정도 운전한 결과 정상상태에 도달하였으며, 각 반응기의 유출 TOC 농도는 R1은 13.5 mg/L, R2는 15.0 mg/L, R3는 16.5 mg/L로 나타났고 유입 TOC 농도 대비 TOC 제거효율은 각각 93.6%, 92.9%, 92.1%로서 모든 반응기에서 92% 이상의 TOC 제거효율을 나타내었다. 전체적인 TOC 제거에 있어서 각 반응기의 차이는 크지 않았으나, 세부적인 TOC 농도는 각각의 운전 조건 및 운전 시간에 따라 약간의 차이를 나타내었다 (Fig. 3).

유입 기간 30분을 거치면서 각 반응기내 TOC 농도는 13.5~16.5 mg/L에서 104.3~110.6 mg/L로 증가하였다. 유입 폐수의 TOC 농도가 평균 210 mg/L 이고 반응기내 잔존하는 폐수의 TOC 농도가 평균 15 mg/L 정도인 것을 감안하면 유입이 완료된 시점에서의 반응기 내 TOC 농도는 112.5 mg/L 정도는 되어야 하나 그에는 약간 못 미치는 농도로 측정되었다. 이는 유입 기간 30분 동안에도 비포기 상태로 운전됨으로써 무산소 또는 혐기 반응에 의해 유기

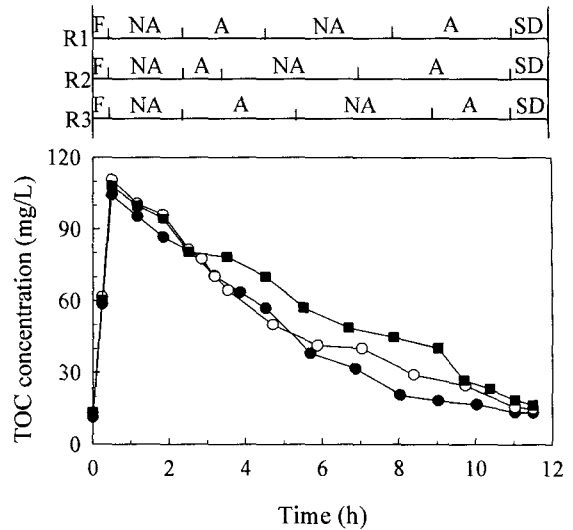


Fig. 3. Typical profiles of TOC concentration in R1 (●), R2(○), R3(■).

물이 일부 소모되었기 때문인 것으로 판단된다.

R1에서 1차 비포기 기간 중 TOC 제거량과 TOC 제거속도는 각각 23.3 mg/L와 46.6 mg/h로 나타났으며, R2의 경우에서는 각각 29.3 mg/L와 58.6 mg/h였고, R3에서는 각각 27.8 mg/L와 55.6 mg/h로 관찰되었다. 이 결과를 볼 때, R2에서의 TOC 제거가 가장 활발하고 다음으로 R3와 R1의 순서로 나타났으나, 그 영향은 다른 운전 기간에서의 TOC 제거와 비교해 볼 때 그다지 크지 않은 것으로 판단되었다. 또한, 1차 비포기 기간 중의 TOC 제거량은 전체 1주기 동안의 TOC 제거량에 대해 R1에서 약 25.6%, R2에서는 30.6%, R3에서는 30.3%로 나타나, R1에 비해 R2와 R3에서 전체 반응기간 중 1차 비포기 기간이 TOC 제거에 미치는 영향이 다소 큰 것으로 생각된다.

이 기간 동안의 TOC 제거는 대부분 탈질 과정과 인의 방출 과정에 의한 TOC 소모로 예측되어, 비교적 TOC 소모가 많은 R2와 R3에서 탈질과 인 방출이 R1에 비해 보다 활발할 것으로 예상되었다. 세 반응기 모두 1차 비포기 기간 동안 잔존하는 NO_3^- 가 거의 없어(Fig. 4, 5, 6), 이 기간 중 탈질화에 따른 유기물 소모는 무시할 수 있었다. 그러므로 이 기간 중 대부분의 TOC 제거는 인 방출에 이용된 것으로 판단할 수 있는데, 이 기간 중 인의 방출량은 각각 R1은 8.5 mg/L, R2는 4.8 mg/L, R3는 9.4 mg/L로 나타나(Fig. 7) TOC 제거량과 명확한 상관관계를 찾을 수는 없었다.

1차 포기 기간 중 R1의 TOC 제거량과 TOC 제거 속도는 각각 24.2 mg/L와 48.4 mg/h였고, R2에

(AO)₂ SBBR에서 운전주기에 따른 질소와 인 제거 특성 비교

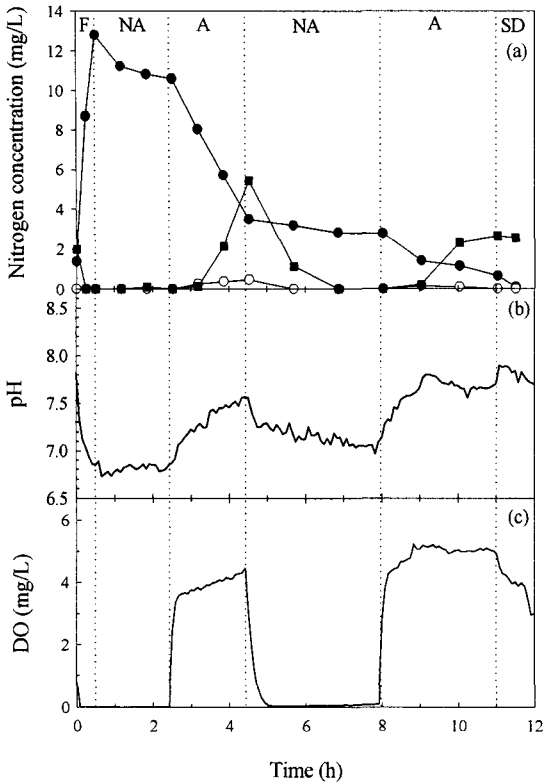


Fig. 4. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (○), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (■)], (b) pH and (c) DO concentration in R1.

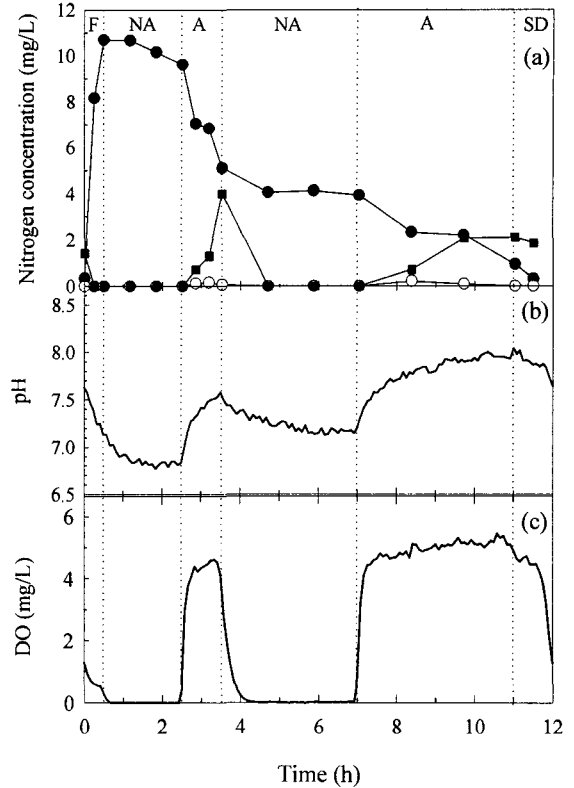


Fig. 5. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (○), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (■)], (b) pH and (c) DO concentration in R2.

서는 각각 17.0 mg/L와 68.2 mg/h로 나타났으며, R3에서는 각각 23.2 mg/L와 30.9 mg/h로 관찰되었다. 포기 시간을 1시간으로 가장 짧게 유지한 R2에서 TOC 제거량은 가장 적었으나 상대적으로 가장 빠른 TOC 제거속도를 나타내었다. R1에서 1차 포기 기간 동안 제거된 TOC량은 전체 1주기 동안 제거된 TOC량에 대해 약 26.6%를 차지하였고, R2에서는 17.7%, R3에서는 25.3%를 차지하여, 전체적으로 이 기간동안 제거된 TOC량이 비교적 큰 것으로 나타났다. 그러나 선행 연구결과와 비교해 볼 때, 유입 TOC 농도가 62 mg/L로 낮은 경우에서 각각의 TOC 제거 비율이 43.8%, 21.2%, 51.9%인 것과 비교해 보면 상대적으로 낮은 TOC 제거 비율을 나타내었다¹¹⁾. 이는 포기 기간 중 유기물 제거의 대부분을 차지하는 heterotroph의 활동이 위축되었거나 개체수가 상대적으로 감소하였다는 것을 의미하며, 간접적으로 autotroph인 질산화 미생물(nitrifiers)의 활동이 활발해졌을 것으로 추측해 볼 수 있다.

2차 비포기 기간 중 R1의 TOC 제거량과 제거 속도는 각각 36.1 mg/L와 41.3 mg/h이었으며, R2의

경우는 각각 24.2 mg/L와 27.7 mg/h이었고, R3에서는 각각 16.9 mg/L와 19.3 mg/h로 측정되었다. 또한 이 기간동안 제거된 TOC 비율은 각각 39.7%, 25.3%, 18.4%로 나타남으로써 각 반응 조건에 따라 다소 차이는 있었으나 비교적 활발한 TOC 제거가 발생하였다는 것을 알 수 있었다.

R1에서 2차 포기 기간 중의 TOC 제거량과 TOC 제거 속도는 각각 7.2 mg/L와 9.6 mg/h였고, R2의 경우는 각각 24.5 mg/L와 24.5 mg/h로 나타났으며, R3에서는 각각 21.7 mg/L와 43.4 mg/h로 관찰되었다. 특히 R1에서는 매우 낮은 TOC 제거량을 보였는데, 이는 R1의 경우 TOC가 전 단계에서 활발하게 이용됨으로써 상대적으로 이용가능한 TOC량이 적었기 때문인 것으로 생각된다. R2에서는 가장 긴 2차 포기 기간을 유지함으로써 가장 높은 TOC 제거량을 보였다. R3는 2시간의 가장 짧은 포기 기간에도 불구하고 R1에 비해 높은 TOC 제거량을 보였을 뿐만 아니라 가장 빠른 TOC 제거속도를 나타내었는데, 이는 전 단계에서 TOC가 충분히 이용되지 못하고 상대적으로 높은 농도로 잔존하였기 때문인

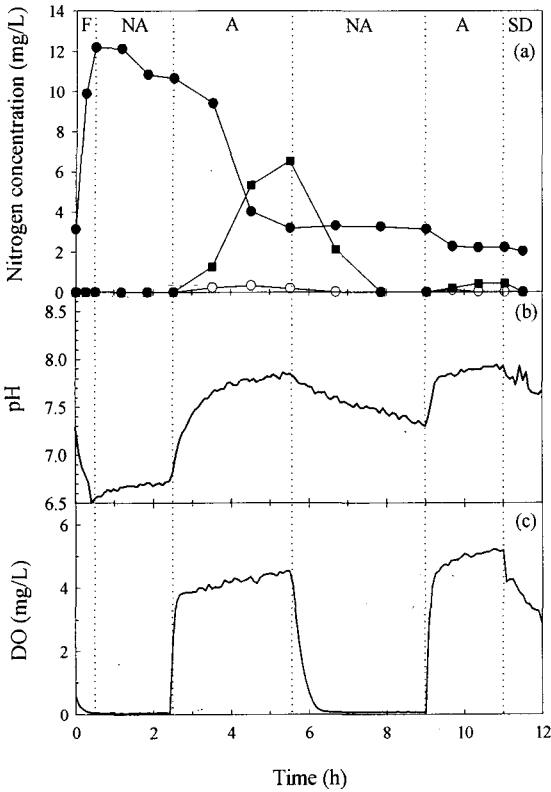


Fig. 6. Typical profiles of (a) nitrogen concentrations [$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (●), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (○), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (■)], (b) pH and (c) DO concentration in R3.

것으로 판단된다.

전체적으로 비포기 기간 중 제거된 TOC 양을 전체 TOC 제거량과 비교해 보면 R1에서는 59.5 mg/L로서 전체 TOC 제거량의 65.4%를 차지하였고, R2에서는 53.5 mg/L로서 55.90%, R3에서는 44.7 mg/L로서 48.8%로 나타났다. 이 결과로 볼 때, R1의 경우가 비포기 기간 중 TOC를 가장 활발하게 이용하였고, 그 다음으로 R2와 R3 순서로 TOC 이용율을 나타내었다. 비포기 기간 중의 TOC 이용율이 높다는 것은 탈질화 및 인의 방출에 유기물의 이용이 많았다는 의미로 해석할 수 있다. 박과 김¹¹⁾은 저농도의 유입 TOC 조건에서 SBBR의 포기 기간중 TOC 이용율이 60%이상으로 나타나, 상대적으로 비포기 조건에서의 TOC 이용율이 저조함으로써 질소와 인의 제거 효과가 크지 않았다고 보고한 바 있다.

3.2. 질소 제거

R1, R2, R3에서 1 cycle에 걸쳐 발생한 질소들 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$)의 농도 변화와 pH 및 DO 농도 변화를 각각 Fig. 4, 5, 6에 나타내었다.

유입 기간 중 R1과 R2(Fig. 4, 5)에서는 앞 주기의 마지막 단계인 2차 포기단계에서 발생하여 미처리된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 로 인하여 2 mg/L와 1.4 mg/L의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 측정되었으며 이는 유입 기간 30분 동안 완전히 제거되었다. 비록 적은 양의 탈질화가 발생하기는 하였으나, 이 단계에서 잔존하는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 그 자체로 인의 방출을 저해할 뿐만 아니라 denitrifiers와 PAOs와의 유기물에 대한 경쟁을 유발시켜 인의 방출을 방해하는 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. R1과 R2에서는 2차 포기 기간이 각각 3시간과 4시간으로 길어서 질산화가 비교적 활발하게 발생하였고 그에 따라 상당량의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 미처리된 상태로 반응기 외부로 방출되거나 잔존하여 다음 주기로 넘어갔으나, R3에서는 2차 포기 기간이 2시간으로 짧게 유지됨으로써 발생하는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 적어 다음 주기에 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 잔존하지 않음으로써 탈질화 및 인의 방출에 미치는 영향이 적었던 것으로 예상되었다.

1차 비포기 기간 중 모든 반응기들에서 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 거의 0 mg/L로 변화가 없었으나, R1에서는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 12.8 mg/L에서 10.6 mg/L로 감소함으로써 2.2 mg/L의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거량을 보였으며, R2와 R3에서는 각각 1.1 mg/L와 1.5 mg/L의 제거량을 나타내었다. 이 기간 동안은 비포기 상태로 유지되어 각 반응기 모두 거의 0 mg/L의 DO 농도를 나타냄으로써 질산화가 발생할 수 없는 조건이므로 미생물의 동화작용에 따른 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 소모로 보는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

1차 포기 기간 중 질산화로 인하여 모든 반응기에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 제거되기 시작하였고 그에 따라 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 증가하였고, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 는 약간 발생하다가 감소하기 시작하였다. 그러나 어느 반응기에서도 완전한 질산화는 이루어지지 않았다. 이는 전형적인 SBR 공정과는 비교되는 현상으로서 질산화가 이루어지는 데 필요한 산소전달이 생물막 내부까지 이루어지지 못하여 질산화 미생물의 활동이 활발하지 못하였기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 현상으로부터 전형적으로 '질산화 과정 중 발생할 수 있는 DO의 변곡점이 발생하지 않은 것으로 생각된다. DO는 10분 이내에 급격하게 증가한 다음 그 이후 완만한 증가 경향을 나타내었는데, 이는 질산화에 따른 영향으로 볼 수 있다. 또한 포기 시간이 긴 R3에서 가장 많은 양의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거가 발생하였고, 포기 시간이 가장 짧은 R2에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거량이 가장 적게 나타났다. 일반적으로 질산화로 인하여 pH가 감소되는 결과와는 달리, 각 반응기에서 pH의 변화는 어느 정도 증가하다가 완만해지는 경향을

나타내었는데, 이는 폐수 중에 존재하는 알카리도가 높아서 pH의 저하를 막았기 때문인 것으로 판단된다.

2차 비포기 과정으로 넘어감에 따라 각 반응기에서는 활발한 탈질화가 발생하기 시작하였다. 1차 포기 기간 중 발생한 NO₃⁻-N의 양이 적은 R2에서 가장 빨리 질산화가 완료되었고, NO₃⁻-N 발생량이 비슷하였던 R1과 R3에서는 탈질화 완료 시점도 비슷하게 나타났다. pH는 각 반응기에서 모두 감소하는 경향을 나타내었고, DO는 30분 정도 경과 후 0 mg/L에 가깝게 떨어져 유지되었다.

2차 포기 기간 중에는 앞의 1차 포기과정 중 미처리된 NH₄⁺-N가 질산화되기 시작하였다. 특히, R2에서는 1차 포기가 시간이 짧아 미처리된 NH₄⁺-N의 양이 많아 제거되는 NH₄⁺-N의 양도 많았고 그에 따라 생성되는 NO₃⁻-N의 양도 많았다.

전체적으로 본 연구에서 (AO)₂ 공정을 선택하여 2차 포기기간을 둔 것은 2차 포기 기간 중 미처리된 유기물을 처리하거나 2차 비포기 기간 중 인의 2차 방출이 발생할 경우 이를 적절하게 처리하기 위한 목적으로 설치하였으나, 본 연구에서 의도한 바와는 달리 1차 포기 기간 중 질산화가 완전하게 발생하지 않음으로써 2차 포기 과정 중 의도하지 않았던 질산화가 발생하였다. 이 때 발생한 NO₃⁻-N는 유입기간이나 1차 비포기 기간 중 인의 방출을 저해할 소지가 있어 가능한 발생을 억제시키는 것이 인의 제거에는 유리할 것으로 생각된다.

최종 유출수 중의 질소는 대부분 NO₃⁻-N의 형태로 나타났으며, 각 반응기에 따른 유출수 중의 NO₃⁻-N 농도 변화는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 그러므로 (AO)₂ SBBR에서 운전 시간의 변화에 따른 반응기내 질소농도의 변화는 반응기별로 큰 차이를 나타내지는 않았으나, R2의 경우는 1차 포기 시간이 너무 짧아 2차 포기가 이루어지지 않았을 경우에는 NH₄⁺-N 제거효율이 매우 저조해지는 문제점을 가지고 있었다. 그러므로 1차 포기 시간을 1시간 정도로 짧게 유지하는 것은 질소의 제거에 도움이 되지 않으므로 최소한 R1에서와 같이 2시간 이상으로 유지하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 그러나 1차 포기 시간을 3시간으로 유지시킨 R3에서도 질산화 효율이 그다지 높지 않은 것으로 보아 생물막에 따른 산소의 확산 저항이 질산화를 방해하는 것으로 생각해 볼 수 있고, 이를 해결하기 위한 여러 방안을 고려해 보아야 할 것으로 판단된다.

3.3. 인 제거

인 제거 미생물은 혐기 조건에서 세포 외부에 있는 유기물을 흡수하기 위한 기작의 일환으로 체내에 있는 다중 인산염을 소모하는데, 이 때 인의 체외 방출

이 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 과정 중 방출된 인을 최대한 과잉 섭취(luxury uptake)하게 됨으로써 수중의 인을 제거하는 것으로 알려져 있다¹²⁾.

Fig. 7은 유입 인 농도를 16 mg/L 정도로 일정하게 유지한 상태에서 1주기 동안의 인 농도 변화를 나타낸 것으로, 2시간 동안의 1차 비포기 기간 중 활발한 인의 방출이 관찰되었다. R3에서는 9.4 mg/L의 인이 방출됨으로써 가장 높은 인 방출량을 나타내었으나, R1과는 그다지 큰 차이를 나타내지는 않았다. 그러나 R2에서는 R1과 R3와는 달리 상당히 적은 인 방출량을 나타내었다.

1차 포기 기간 중에는 인의 섭취가 활발하게 발생되었다. 1차 포기 기간이 가장 긴 R3에서 인의 섭취량은 12.9 mg/L로 가장 높게 나타났으며, R2와 R3에는 그다지 큰 차이를 보이지 않았다. 인의 섭취 경향을 보면 초기 1시간 이내에 급격한 인의 섭취가 발생된 후 완만한 변화를 보임으로써, R2와 같이 포기 시간이 짧은 경우라도 인의 섭취에 크게 불리하지 않은 것으로 판단된다. 1차 비포기 기간 중의 인 방출량에 대한 1차 포기 기간 중의 인 섭취량을 백분율로 표시하면 R2가 21%로서 R1(108%)과 R3(138%)에 비해 월등히 높은 것을 알 수 있다.

2차 비포기 기간(3시간 30분)에는 잔존 유기물로 인하여 약간의 인 방출을 관찰할 수 있었다. R3의 경우 3.4 mg/L의 인 방출량을 보임으로써 R1과 R2의 인 방출량(1.7 mg/L)에 비해 다소 높게 나타남으로써, 1차와 2차 비포기 기간 모두에서 가장 높은 인 방출량을 보였다. 이 기간 중 제거된 유기물량이 1차 비포기 동안 제거된 유기물 량과 비슷한 것으로 보아, 이 기간 중에도 인의 방출이 적절하게 발생할 수도 있으나, 이 기간 중 존재하는 NO₃⁻에 의해 인의 재섭취가 발생하여 인의 방출을 저해했을 가능성이 있어 실제 방출된 인의 양은 크지 않았던 것으로 생각된다.

포기 시간을 달리한 2차 포기 기간 중, R1(3시간)에서는 12.2 mg/L, R2(4시간)는 4.2 mg/L, R3(2시간)는 8.0 mg/L의 인 섭취량을 보임으로써 인 섭취량에 있어서는 R1이 가장 우수한 것으로 나타났으나, 시간당 인 섭취속도에 있어서는 R1과 R3는 유사한 인 섭취속도를 나타내었다. 또한, 2차 비포기 기간 중의 인 방출량에 대한 2차 포기 기간 중의 인 섭취량을 비교해 보면 R1은 710%, R2는 120%, R3는 470%를 차지하였다. 이를 1차 비포기-1차 포기 기간에서의 인 방출-섭취량과 비교해 볼 때 상당한

차이를 나타내었다. 1차 비포기-1차 포기 기간에서는 R2(210%) > R3(138%) > R1(108%)로 나타났으나, 2차 비포기-2차 포기기간에서는 R1(710%) > R3(470%) > R2(120%)로서 완전히 다른 경향을 나타내었다.

2차 비포기 기간 중 방출된 인의 양에 비해 2차 포기 기간 중 섭취된 인의 양이 많았던 것은 순수하게 2차 비포기 기간 중 방출된 인에 의한 섭취라기 보다는 1차 포기기간 중 미섭취된 인을 2차 포기 기간 중에 섭취한 것으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그런 의미에서 1차 포기기간을 길게 하면 인의 섭취에 유리할 것으로 생각할 수도 있지만, R1과 R3에서 포기 시간 2시간 경과 후부터는 인의 섭취속도가 완만해 지는 것으로 나타남으로써, 단순히 1차 포기 시간을 길게만 유지함으로써 1차 포기기간중의 인 섭취량을 높일 수 있을지에 대해서는 논란의 여지가 있다. 그러므로 1차 포기기간 중의 인 섭취량을 높일 수 있는 방안에 대해서는 계속적인 연구와 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

그러나 전기간을 통하여 비포기기간 중의 인 방출량은 R1에서는 10.2 mg/L, R2는 8.2 mg/L, R3는 11.1 mg/L로서 나타났고, 포기 기간 중의 인 섭취량은 R1에서는 21.4 mg/L, R2는 14.3 mg/L, R3는 20.9 mg/L를 나타내었다. 그러므로 1차 포기시간을 1시간 정도로 짧게 유지하고 2차 포기시간을 4시간으로 유지한 R2에서 가장 낮은 인 방출량과 인 섭취량을 보였다. 1차 포기시간과 2차 포기시간을 2:3 또는 3:2로 유지한 R1과 R3에서는 R2에 비해 상당히 높은 인 방출량과 인 섭취량을 보였으며, 인 방출에 있어서는 1차 포기시간이 긴 R3가 다소 유리하였으며, 인 섭취에 있어서는 2차 포기시간이 긴 R1이 약간 유리한 것으로 나타났으나, 그 차이는 그다지 크지 않았다. Choi와 Yoo¹³⁾는 *Staphylococcus auricularis*를 이용한 회분식 SBR에서 혐기-호기 시간 비율을 2:4, 3:3, 4:2로 변화시키면서 인의 변화를 살펴 본 결과, 혐기-호기 시간비를 2:4로 유지시킨 상태에서 최적의 인 제거효과를 얻을 수 있었다고 발표한 바 있다. 본 연구에서는 전체적인 비포기-포기 시간을 1:1로 유지한 상태에서 실험한 결과 전반부의 포기시간을 길게 유지하는 것이 인 제거에 유리한 것으로 나타났다.

전체적으로 인의 방출량과 인의 섭취량은 다른 연구자들의 결과^{14,15)}들과 비교해 볼 때 다소 적은 것으로 나타났는데, 이는 탄소원으로 glucose를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다. 탄소원으로 glucose를 사용한 결과와 비교해 보면 비슷한 결과치를 나타내었다.

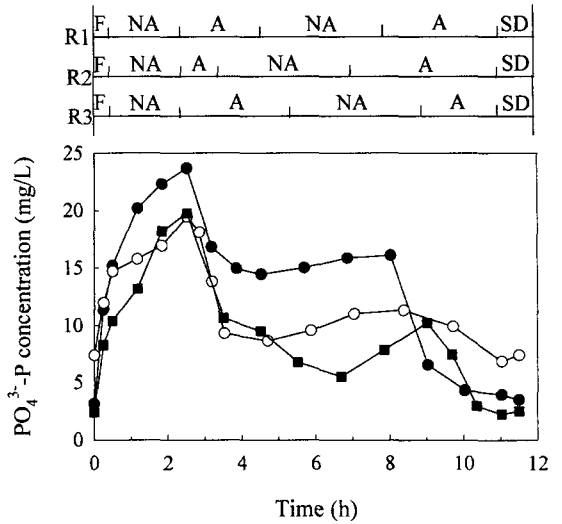


Fig. 7. Typical profiles of PO_4^{3-} -P concentration in R1 (●), R2(○), R3(■).

4. 결론

(AO)₂ SBBR 공정에서 운전주기 변동에 따른 유기물, 질소 및 인의 변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 포기시간 변동에 따른 TOC 변화는 반응기별로 거의 비슷하였으나, 세부적인 TOC 농도는 운전 조건 및 상태에 따라 약간의 차이를 나타내었다.
- 2) 운전주기의 변화에 관계없이 SBBR에서는 1차 포기 동안 완전한 질산화는 발생하지 못하였다.
- 3) 1차 포기 기간 중, 포기 시간이 긴 R3에서 가장 많은 양의 NH_4^+ -N의 제거가 발생하였고, 포기 시간이 가장 짧은 R2에서 NH_4^+ -N의 제거량이 가장 적게 나타났다. R2의 경우는 1차 포기 시간이 너무 짧아 2차 포기가 이루어지지 않았을 경우에는 NH_4^+ -N 제거효율이 매우 저조해지는 문제점을 가지고 있었다.
- 4) SBBR에서 운전시간에 따른 변화는 질소의 제거보다는 인의 제거에 큰 영향을 미쳤다.
- 5) 1차 포기시간이 가장 짧은 R2에서 가장 낮은 인 방출량과 인 섭취량을 보였고, 1차 포기시간과 2차 포기시간을 2:3 또는 3:2로 유지한 R1과 R3에서는 R2에 비해 상당히 높은 인 방출량과 인 섭취량을 보였다. 인 방출에 있어서는 1차 포기시간이 긴 R3가 다소 유리하였으며, 인 섭취에 있어서는 2차 포기시간이 긴 R1이 약간 유리한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산학협동재단 학술연구비 지원사업에 의한 연구이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Rusten, B. and H. Eliassen, 1993, Sequencing batch reactors for nutrient removal at small wastewater treatment plants, *Wat. Sci. Tech.*, 28(10), 233-242.
- 2) Gonzales-Martines, S. and A. Wilderer, 1991, Phosphate removal in a biofilm reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 23(7/9), 1405-415.
- 3) Morgenroth, E. and P. A. Wilderer, 1998, Modeling of enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch biofilm reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 39(7), 33-40.
- 4) Shin, H. S. and H. S. Park, 1991, Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor (PBCSBR), *Wat. Sci. Tech.*, 23, 719-728.
- 5) Arnold, E., B. Bohm and P. A. Wilderer, Application of activated sludge and biofilm sequencing batch reactor technology to treat reject water from sludge dewatering systems: a comparison, *Wat. Sci. Tech.*, 41(1), 115-122.
- 6) 박민정, 김동석, 2003, SBR을 이용한 소규모 오수처리시설에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 12(4), 427-437.
- 7) Iwai, S. and T. Kitao, 1994, Wastewater treatment with microbial films, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, Pennsylvania.
- 8) Falkentoft, C. M., P. Arnz, M. Henze, H. Mosbaek, E. Muller, P. A. Wilderer and P. Harremoës, 2001, Possible complication regarding phosphorus removal with a continuous flow biofilm system: diffusion limitation, *Biotechnol. Bioeng.*, 76(1), 77-85.
- 9) Kumar, B. M. and S. Chaudhari, 2003, Evaluation of sequencing batch reactor (SBR) and sequencing batch biofilm reactor (SBBR) for biological nutrient removal from simulated wastewater containing glucose as carbon source, *Wat. Sci. Tech.*, 73-79.
- 10) APHA, AWWA and WPCF, 1985, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th ed., Washington D.C., USA, pp.92-100.
- 11) 박영식, 김동석, 2005, (AO)₂ 연속 회분식 생물막 반응기에서 포기 시간 배분에 따른 유기물 및 질소와 인의 동시 제거에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 14(9), 861-871.
- 12) Saito, T., D. Brdjanovic and M. C. M. van Loosfrecht, 2004, Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms, *Wat. Res.*, 38, 3760-3768.
- 13) Choi, S. S. and Y. J. Yoo, 2000, Removal of phosphate in a sequencing batch reactor by *Staphylococcus auricularis*, *Biotechnol. Lett.*, 22, 1549-1552.
- 14) Brdjanovic, D., S. Logemann, M. C. M. Van Loosdrecht, C. M. Hooijmans, G. J. Alaerts and J. J. Heijnen, Influence of temperature on biological phosphorus removal: process and molecular ecological studies, *Wat. Res.*, 32(4), 1035-1048.
- 15) Merzouki, M., N. Bernet, J. P. Delgenes, R. Moletta and M. Benlemlih, 2001, Effect of operating parameters on anoxic biological phosphorus removal in anaerobic anoxic sequencing batch reactor, *Env. Tech.*, 22, 397-408.