

SBR에서 포기기간 변경에 따른 질소·인 제거 특성

김동석·박영식*†

대구가톨릭대학교 환경과학과, *대구대학교 보건과학부
(2009. 3. 2. 접수/2009. 3. 18. 수정/2009. 4. 6. 채택)

Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics by the Variation of Aeration Time in SBR

Dong-Seog Kim · Young-Seek Park*†

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

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

(Received March 2, 2009/Revised March 18, 2009/Accepted April 6, 2009)

ABSTRACT

Laboratory scale experiments were conducted to investigate the removal characteristics of nitrogen and phosphorus by the variation of aeration time in four sequencing batch reactors (SBRs). In R1 which has the shortest aeration time as 1 h, MLVSS concentration in reactor decreased by the wash-out of biomass because of the poor sedimentation. The TOC removal efficiencies were almost similar in 3 reactors except R1. At the low aeration time as 1 h, the nitrification was severely inhibited by the deficiency of oxygen. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency was decreased by the decrease of aeration time. At the aeration time over 2 h, the phosphorus removal efficiency was not affected by the variation of aeration time. The nitrification was inhibited but the phosphorus release and uptake was not inhibited by the decrease of low aeration time. Therefore, we can see that the phosphorus removal microorganisms are superior to nitrification microorganisms in oxygen utilization.

Keywords: nitrogen, phosphorus, SBR, aeration time

I. 서 론

가정 하수, 산업 폐수 또는 축산폐수 등에 포함되어 있는 질소와 인은 가끔 호소나 내해와 같은 폐쇄성 수역에서 부영양화를 유발한다. 수중의 질소와 인은 화학적인 방법이나 생물학적인 방법에 의해 제거될 수 있으나, 경제적인 관점에서 볼 때 생물학적 방법이 가장 타당한 것으로 인식되고 있다.^{1,2)}

생물학적 질소 제거 공정으로는 기존의 단순한 질산화-탈질화 공정을 비롯하여, 최근 들어 새롭게 경제적인 생물학적 질소 제거 공정으로 partial nitrification, nitrifier denitrification, anaerobic ammonium oxidation (Anammox)³⁾ 등과 함께 aerobic denitrification, lithoautotrophic denitrification, combined autotrophic

nitrogen removal에 관한 연구도 이루어지고 있다.⁴⁾

생물학적 인 제거 공정은 생물학적 질소 제거 공정에 비해 보다 복잡한 것으로 알려져 있고, FISH (fluorescent *in situ* hybridization)와 같은 분자생물학적인 기법을 도입한 접근 방법이 많이 이루어지고 있다.^{5,6)} 최근에는 EBPR(enhanced biological phosphorus removal) 공정에서 PAOs(phosphorus accumulating organisms), DPAOs(denitrifying phosphorus accumulating organisms), GAOs(glycogen accumulating organisms) 등에 대한 상관관계에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁷⁾

생물학적 질소-인 제거 공정은 연속적인 혐기-호기 공정의 배열로 이루어져 있고, 혐기 공정은 호기 공정에 비해 공기 펌프의 미사용과 낮은 슬러지 발생량으로 인하여 경제적인 장점을 가지고 있다. 그러므로 생물학적 질소·인 제거 공정에서 포기기간의 조절은 경제적인 관점에서 매우 중요한 인자라고 할 수 있다.

소규모 오수처리시설의 경우, 오수는 유량의 변동이

†Corresponding author : Department of Health & Environment, Daegu University
Tel: 82-53-650-8043, Fax: 82-53-650-8049
E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr

심하고 C/N 비가 낮은 특성을 가지고 있고, 전문적인 관리 인력과 자동화 운전 설비의 부재로 인하여 pH나 DO와 같은 운전 인자의 조절이 어려울 뿐만 아니라 적절한 슬러지의 배출이 곤란하여 지조한 질소·인 처리효율을 나타내고 있다. 이러한 소규모로 운영되는 생물학적 질소·인 제거 공정으로는 SBR(sequencing batch reactor)이 자주 이용되고 있다.^{8,9)}

SBR 공정은 혐기, 호기, 무산소 단계를 거쳐 유기물과 질소, 인 등을 제거하고, 호기 과정에서 질산화와 인의 섭취를 하게 되므로, 질소·인 제거 공정에서 혐기, 호기 및 무산소 단계의 설정은 매우 중요한 운전 인자라고 할 수 있다. 특히, 호기 단계에서는 여러 다양한 미생물들에 의해 하수 내 유기물의 호기적 분해, 질산화, 인의 과잉 섭취 등이 발생하므로, SBR에서 호기 단계는 매우 중요한 단계라고 할 수 있다. 또한 호기 단계에서는 포기에 의해 사용되는 동력비가 전체 단계에서 가장 크므로, 호기 단계를 적절하게 조절하여 최적화할 수 있으면 전체적인 동력비의 절감을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 1차비포기-포기-2차비포기로 운영되는 SBR에서 포기기간의 절감에 따른 질소와 인 제거 효과의 변화를 알아보기 위하여, 초기 1차비포기 기간은 일정하게 유지한 상태에서 포기기간을 감소시켜 시간 경과에 따른 변화를 관찰하였다. 포기기간 변

화에 따른 SBR 내 유기물, 질소 및 인의 변화를 미시적 관점에서 관찰하였으며, 또한 이 변화를 SBR 운전 제어에 있어 매우 중요한 인자로 인식되고 있는 pH, DO 농도 및 ORP의 변화¹⁰⁻¹²⁾와 연계시켜 고찰함으로써 처리 공정 제어 자동화의 기초 자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 설계

본 연구를 위하여 재래식 활성 슬러지 처리 시설인 K시 하수처리장의 반송 슬러지를 이용하였다. 질소·인 제거 특성을 가지고 있는 BNR(biological nutrient removal) 슬러지를 확보하기 위하여 일반적인 활성 슬러지를 약 6개월 이상 합성 폐수를 이용하여 1차비포기-포기-2차비포기 상태의 SBR에서 운전하였다. 이때의 운전 조건은 1차비포기 3시간 30분, 포기 3시간 30분, 2차비포기 3시간 30분으로 하였다.

실험에는 Fig. 1과 같이 4개의 SBR을 설치하여 운전하였는데, 크게 1차비포기-포기-2차비포기 상태의 3단계 반응으로 구성하였다. 각 반응조는 아크릴을 사용하여 150×150×250 mm의 크기로 제작하였으며, 유입 후 최대 유효 용적량을 4L, 유출 후 최소 유효 용적량을 2L가 되도록 하였다. 실험에 사용한 폐수는 정

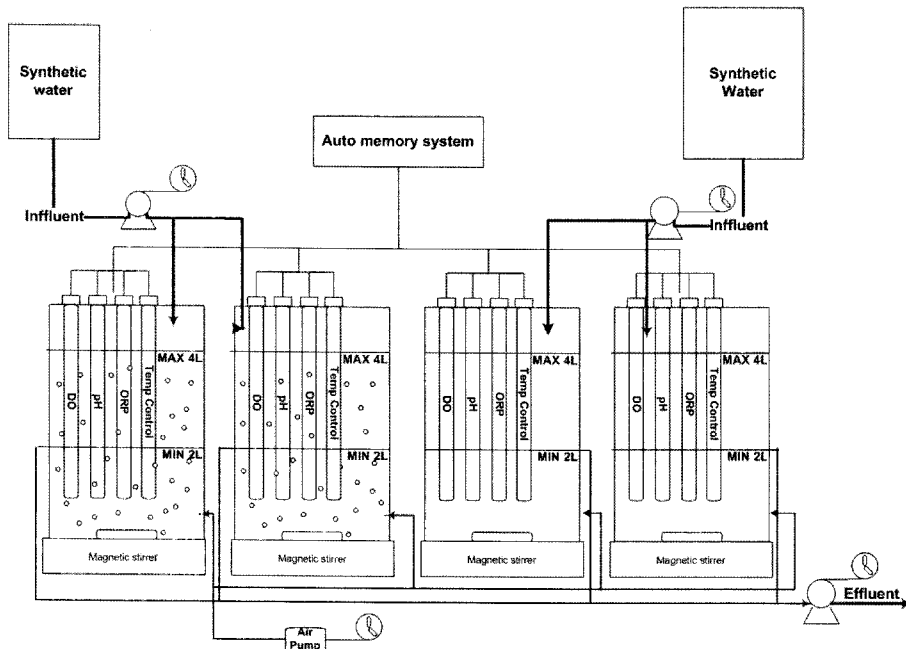


Fig. 1. Schematic diagram of sequencing batch reactors.

량펌프를 이용하여 반응기 상부에서 매 주기마다 2ℓ씩 유입시켰으며, 침전 시간 30분 후 정량펌프를 이용하여 반응기 최대 유효 용적의 50%인 2ℓ를 처리수로 유출하였다.

침전-배출 단계를 제외한 모든 단계에서 반응기 내의 혼합을 위해 반응기 하부에 자석 교반기를 설치하여 일정하게 100~150 rpm으로 교반시켰으며, 온도는 자동온도 조절기를 반응기에 설치하여 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였다. 포기 단계에서는 공기 펌프를 이용하여 0.5 l/min의 공기가 반응기 하부에 설치된 산기관을 통하여 주입되도록 하였다. 기질 공급, 처리수 배출, 포기 및 혼합 등의 조작은 timer를 이용하여 제어하였다. 반응 주기는 12 h/cycle로 하였다.

반응 단계는 유입, 1차비포기, 포기, 2차비포기, 침전, 배출, 휴지 단계가 이루어지도록 하였으며 유입 시간 30분을 포함한 1차비포기 단계를 3시간 30분, 포기 단계와 2차비포기 단계를 각각 3시간 30분으로 설정하였다. 또한 침전과 배출 단계를 합하여 1시간으로 하고 휴지 단계를 30분으로 설정하였다.

유입 폐수는 합성 폐수를 사용하였으며, 그 성분은 Table 1⁹⁾과 같다. 합성 폐수의 농도는 TOC(total organic carbon) 240 mg/l, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 20 mg/l, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 15 mg/l로 일정하게 유지하였다.

2. 실험 방법

질소와 인 제거 능력을 확인한 BNR 슬러지를 4개의

Table 1. Composition of the synthetic wastewater

Compounds	mg/l
Glucose	600
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	55
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.22
KCl	7
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	188.4
K_2HPO_4	84.2
NaHCO_3	300
CaCl_2	3.76

Table 2. Operation time schedule in SBRs

	Influent	1st non-aeration	Aeration	2nd non-aeration	Settle	Draw	Idle
R1			1.0 h	6.0 h			
R2	0.5 h	3.0 h	1.5 h	5.5 h	0.5 h	0.5 h	0.5 h
R3			2.0 h	5.0 h			
R4			2.5 h	4.5 h			

각 SBR에 동일하게 투입한 후 실험을 실시하였다. 각 SBR의 운전조건은 Table 2와 같다. 포기기간을 제외한 다른 운전시간은 동일하게 배분하고, 포기기간만을 1시간, 1시간 30분, 2시간, 2시간 30분씩 R1, R2, R3, R4 반응기에 각각 배분하였다. 반응기 내의 시료 채취는 약 30분에서 1시간 간격으로 채취하였으며, 시료 채취 후 즉시 0.22 μm 인 membrane filter(Advantec, mixed cellulose ester polymer)로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 수질 분석에 들어갔다.

3. 분석방법

SVI(sludge volume index)와 MLSS는 Standard Methods¹³⁾를 통하여 측정하였고, 유기물 농도는 TOC를 지표로 이용하여 TOC analyzer(TOC-5000A, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 은 ion chromatograph(Metrohm, Switzerland)를 이용하여 측정하였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 Water Analyzer(Humas HS 3100, Korea)를 이용하여 측정하였고 그 값은 Standard Methods¹³⁾를 통하여 측정된 값을 통하여 검정하였다. pH, DO, ORP의 측정을 위해 실시간 자동 측정기(inoLab multi level 3, WTW, Germany)를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 포기기간 변경에 따른 MLSS 변화

포기기간 변경에 따른 각 반응기내 MLSS의 변화는 Fig. 2와 같이 나타났다. 실험 초기 각 반응기의 MLSS 농도는 5300 ± 200 mg/l이었으나, 실험 시작 10여일이 경과함에 따라 각 반응기의 MLSS 농도가 변화하기 시작했다. 전체 포기기간의 단위 반응기 체적당 공기 공급량이 $7.5 \text{ m}^3 \text{ air/m}^3$ 로 가장 낮은 R1은 MLSS의 농도가 서서히 낮아지기 시작하여 실험 20일째는 4,765 mg/l로 나타났으며, 실험 최종 단계인 70일 경에는 2,370 mg/l로 크게 감소하였다. 실험 기간 70일 동안 약 0.18 g MLSS/day의 MLSS 농도의 감소율을 나타내었다.

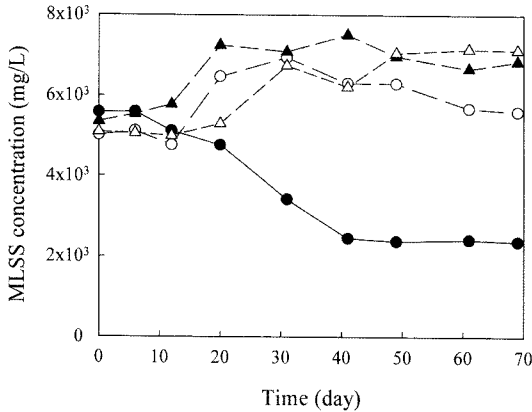


Fig. 2. The change of MLSS concentration by the variation of aeration time (●, R1; ○, R2; ▲, R3; △, R4).

전체 포기기간의 공기공급량이 11.25 m³ air/m³인 R2는 R1과는 달리 MLSS 농도가 다소 증가하는 모습을 보였다. 그러나 실험 40일이 경과되면서 MLSS 농도가 조금씩 감소하는 모습을 보였으며, 70일 경에는 5,600 mg/l의 MLSS를 나타내어 초기 MLSS 값인 5,100 mg/l에 비해서는 약간 증가한 것으로 나타났다.

전체 포기기간 내 공기 공급량이 15 m³ air/m³인 R3는 전체 포기기간의 공기 공급량이 18.75 m³ air/m³인 R4와 마찬가지로 지속적인 MLSS 농도의 증가를 나타내었고, MLSS 농도의 증가 경향도 거의 비슷하였다. R3와 R4의 실험 초기 MLSS 농도가 각각 5,352 mg/l와 5,091 mg/l이었으나, 49일 후에는 6,980 mg/l와 7,060 mg/l로 증가하였다. 이때 R3와 R4의 단위 MLSS당 공기 공급량은 2.1 ml/mg과 2.7 ml/mg으로 나타났으며, R2의 단위 MLSS당 공기공급량이 1.8 ml/mg을 나타내었다. 그러나 MLSS 농도가 낮은 R1의 경우, 단위 MLSS당 공기공급량이 3.2 ml/mg을 나타내 있음에도 불구하고 초기 1.3 ml/mg의 낮은 공기공급량으로 인하여 발생된 현상으로 생각된다.

그러므로 반응기내 미생물 농도를 적절하게 유지하기 위해서는 반응기내 포기기간을 2시간 이상 또는 포기기간 내 공기 공급량을 15 m³ air/m³ 이상으로 유지시켜 줄 필요가 있었으며, 전체 포기기간 대 비포기기간의 비는 적어도 2시간:8시간 즉 1:4의 시간비율 이상으로 유지시켜 줄 필요성을 인식하게 되었다.

2. 유기물 제거 변화

포기기간 변경에 따른 각 반응기내 유기물 제거 변화는 TOC 농도를 통하여 관찰하였으며, 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

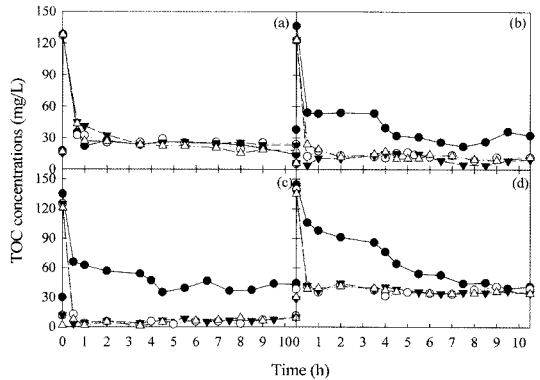


Fig. 3. The change of TOC concentration by the variation of aeration time after (a) 1day, (b) 12 days, (c) 20 days, (d) 53 days (●, R1; ○, R2; ▼, R3; △, R4).

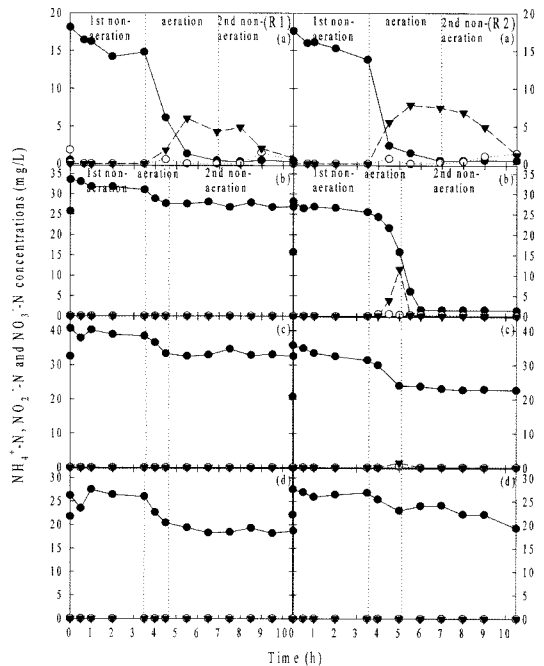


Fig. 4. The change of nitrogen (●, NH₄⁺-N; ○, NO₂⁻-N; ▼, NO₃⁻-N) concentration by the variation of aeration time after (a) 0 day, (b) 12 days, (c) 20 days, (d) 53 days.

초기 각 반응기의 유출 TOC 농도는 R1은 14.0 mg/l, R2는 23.8 mg/l, R3는 23.0 mg/l, R4는 17.93 mg/l로 나타났고, 유입 TOC 농도 대비 TOC 제거 효율은 각각 90%, 82%, 82%, 87%로 모든 반응기가 80% 이상의 TOC 제거 효율을 나타내었다. 53일째에는 각 반응기의 유출 TOC 농도가 R1이 41.3 mg/l, R2가 39.2 mg/l, R3가 34.5 mg/l, R4가 34.3 mg/l를 나타내어 약 70%의 TOC 제거 효율을 나타내었다. 실험 시작

12일경(Fig. 3(b)), R2, R3, R4의 TOC 제거가 대부분 유입 초기 30분 이내에 이루어진 반면, R1의 경우에는 혐기 단계에서 TOC가 완전히 제거되지 못하고 포기 단계에서 다시 감소하는 경향을 나타내었다. R2, R3, R4에서 초기 비포기기간 중의 TOC 이용율이 높다는 것은 탈질화 및 인의 방출에 유기물의 이용이 많았다는 의미로 해석할 수 있으므로, 15) 1차비포기기간의 반

응단계에 NO₃⁻-N가 검출되지 않고 있는 것으로 볼 때(Fig. 4, Fig. 5), 1차비포기기간에서 제거된 상당 부분의 유기물은 인의 방출에 주로 이용된 것으로 판단할 수 있다(Fig. 6).

마찬가지로 R1의 경우 실험이 경과됨에 따라 1차비포기기간 동안 제거되는 TOC의 양은 점점 더 줄어들고 포기기간 동안 제거되는 TOC 양은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 질소와 인의 제거에 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다. R1을 제외한 나머지 반응기에서는 TOC 제거 경향에 있어 큰 차이가 나타나지 않았으나, 실험 경과 70일 경에는 반응기내 TOC 농도가 40~50 mg/l로 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

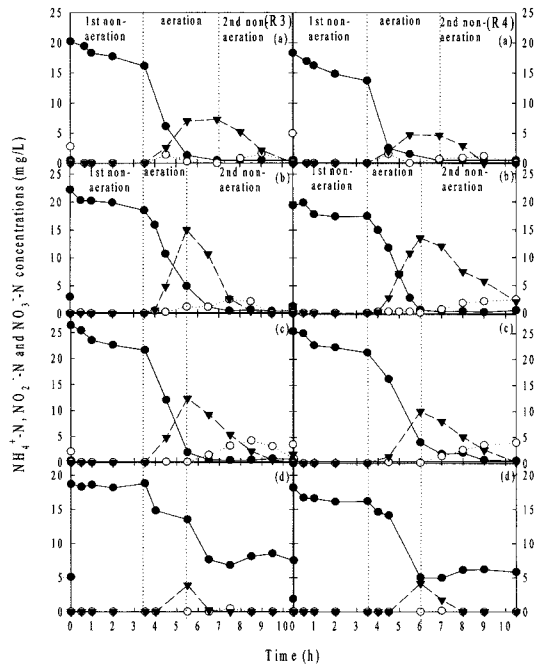


Fig. 5. The change of nitrogen (●, NH₄⁺-N; ○, NO₂⁻-N; ▼, NO₃⁻-N) concentration by the variation of aeration time after (a) 0 day, (b) 12 days, (c) 20 days, (d) 53 days in R3 and R4.

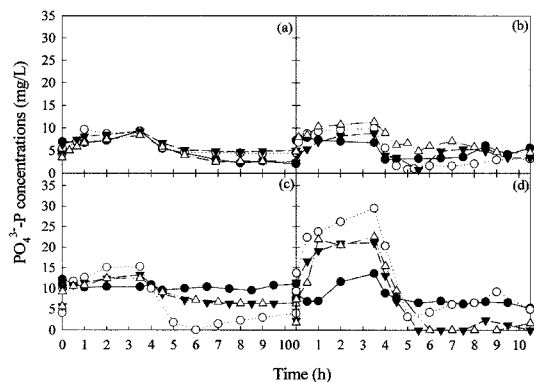


Fig. 6. The change of PO₄³⁻-P concentration by the variation of aeration time after (a) 0 day, (b) 12 days, (c) 20 days, (d) 53 days in R1(●), R2(○), R3(▼) and R4(△).

3. 질소 제거 변화

포기기간 변경에 따른 각 반응기내 질소 성분들(NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N)의 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 포기기간이 감소됨에 따라 NH₄⁺-N 제거 속도가 감소하는 것으로 나타났다. 초기 모든 반응기가 98% 이상의 NH₄⁺-N 제거 효율을 보였으나, 공기 공급량을 7.5 m³ air/m³로 줄인 R1은 초기 12일경부터 아질산화를 포함한 질산화 과정에 필요한 산소의 부족으로 인하여 암모니아 제거 효율은 40%로 급격히 감소하였다.

포기기간 내 공기 공급량을 11.25 m³ air/m³로 줄인 R2의 경우에서도 질산화 과정에서의 산소부족현상을 볼 수 있었다. 실험 시작 전(Fig. 4(R2-a))에는 포기과 동시에 초기 1시간동안 11.4 mg/l의 암모니아를 분해하는 급격한 질산화를 보였으나, 공기 공급량을 줄여 12일이 경과한 시점(Fig. 4(R2-b))에서는 포기 단계 초반의 암모니아 제거 속도가 매우 느려져 포기 초기 1시간동안 3.9 mg/l의 암모니아 제거 속도를 나타내었다. 그리고 21일이 경과한 시점(Fig. 4(R2-c)) 이후에는 질산화가 거의 발생하지 않고 있음을 알 수 있었다.

이에 비해 포기기간 내 공기 공급량이 각각 15 m³ air/m³과 18.75 m³ air/m³인 R3와 R4에서는 실험 21일째까지 약 98%에 달하는 질산화 효율을 보였으나(Fig. 5(R3-c)(R4-c)), 실험 53일째(Fig. 5(R3-d)(R4-d))에는 약 60% 정도의 질산화 효율을 나타내어 산소 부족에 의한 질산화 부족 현상이 발생하였다. 이는 지속적인 미생물 축적에 의해 산소를 소모하는 다른 미생물들의 양이 증가함으로써, 상대적인 산소 소모의 경쟁에 있어 질산화 미생물들이 뒤지기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 그러나 보다 정확한 결과는 지속적인 연구를 통하여 조사해 볼 필요가 있는 것으로 판단된다.

전체적으로 각 반응기의 암모니아 제거 효율이 포기기간을 변경하기 전의 98%에 비해 R1은 29%, R2는 20%, R3는 60%, R4는 69%로 감소하는 결과를 나타내었다. 타 연구자의 결과를 보면, 포기기간을 일정하게 하고 유입 공기량을 변화시킬 때에도 본 연구에서와 비슷한 질산화 부족 현상이 발생하였다.¹⁴⁾

4. 인 제거 변화

포기기간을 변경시킴에 따라 각 반응기에서의 인 제거 변화는 Fig. 6과 같이 나타났다. 7.5 m³ air/m³의 공기공급량을 가진 R1은 시간이 경과함에 따라 인 제거 능력이 감소하거나 변화가 없는 결과를 보인 반면, 그에 비해 R2, R3, R4는 상당히 증가되는 인 방출·섭취량을 보였다. 특히, R2는 공기 공급량이 11.25 m³ air/m³로 R1의 공기공급량과 비슷하나, 20일 경(Fig. 6(c))부터는 가장 높은 인 농도(16 mg/l)과 가장 낮은 농도(3 mg/l)를 나타내었다.

R3와 R4에서는 실험 20일까지 인 제거에 있어 별다른 차이점을 보이지 않았다가 53일째 두 반응조가 거의 동등한 인 방출·섭취량을 나타내었다. 또한 빠른 인 방출·섭취 경향을 보인 R2가 길어진 2차비포기 단계에서 5~6 mg/l의 인 재방출이 발생되는 데 비해, R3와 R4는 2차비포기 단계에서 인 재방출이 거의 발생되지 않아 보다 안정적인 인 방출·섭취 경향을 나타내었다. 실험 최종 단계인 53일 제에는 R1의 인 제거 효율이 62%, R2의 인 제거 효율이 70%인데 반해 R3와 R4에서는 97%와 100%에 달하는 인 제거 효율을 나타내었다.

본 실험에서는 전체 반응기들에서 과다한 포기 또는 2차비포기 단계에서의 부족한 탈질화에 따른 NO₂나 NO₃의 반응기내 잔존 현상이 발생하지 않았으므로, 잔존 NO₂나 NO₃에 의한 1차비포기 단계에서의 인 방출 방해 현상 등이 발생하지는 않았다. 그러므로 각 반응기에서의 인 제거효율의 변화 특히 인 방출 특성의 변화는 유기물 제거 변화와 밀접한 상관관계를 가진다는 것을 알 수 있다. R1에서는 Fig. 3(d)에서 보는 바와 같이 1차비포기 단계에서의 유기물 소모가 매우 부족하는데, 이는 인의 방출로 인한 유기물의 체내 흡수가 제대로 발생되지 못하였기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 이에 비해 R2, R3, R4에서는 모두 1시간 이내에 유기물의 제거가 원활하게 발생함으로써(Fig. 3), 인의 방출이 저해 받지 않았다는 것을 알 수 있었다.

또한 전체적인 SBR에서 질소와 인 제거를 볼 때, 질산화가 원활하게 발생하게 되면 인의 제거와 경쟁적인 관계에 놓이는 것으로 판단된다. 그 이유는 포기 단

계에서 산소 이용에 대해 호기성 미생물인 질산화 미생물과 인 축적 미생물이 경쟁하고 이 경우 종속 영양 미생물인 인 축적 미생물이 독립 영양 미생물인 질산화 미생물에 비해 상대적으로 우위에 놓일 것으로 생각된다. 그러므로 포기 단계에서 질산화가 활발하게 발생한 다음, 2차비포기 단계에서 탈질화에 이용할 유기물이 부족할 경우 NO₂⁻ 또는 NO₃⁻가 미처리된 상태에서 다음 주기의 1차비포기 단계에서 인의 방출을 방해할 가능성이 높다. 이 경우 NO₂⁻나 NO₃⁻를 전자 수용체로 이용하는 인의 흡수 현상이 발생할 수 있다.¹⁶⁾ 본 연구에서도 질산화가 비교적 활발한 R3와 R4(Fig. 5)의 2차비포기 단계에서 미처리된 NO₂⁻와 NO₃⁻가 존재하였고 이는 인의 방출에도 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 6(c)(d)). R2의 경우 부족한 포기기간으로 인해 질산화는 충분하게 이루어 지지 못하였으나, 부족한 질산화로 인해 NO₂⁻와 NO₃⁻의 생성이 적었거나 없어서 1차비포기 단계에서 인의 방출이 매우 활발하게 발생할 수 있었다.

그러므로 포기기간을 1시간 30분 이하로 단축시키는 것은 질산화를 감소시키는 요인은 되나, 인의 방출에 영향을 미치는 NO₂⁻와 NO₃⁻의 생성을 억제시킴으로써 인의 방출에는 도움이 되는 것으로 나타났다. 또한 포기 단계에서 부족한 포기기간으로 인하여 질산화는 이루어지지 못하더라도 인의 섭취는 비교적 원활하게 발생하는 것으로 보아 산소의 이용에 있어 질산화 미생물보다는 인 제거 미생물이 우위에 있는 것으로 생각된다.

또한 비교적 공기의 공급이 원활한 R3와 R4에서 질소를 제거할 경우, 제거된 NH₄⁺-N의 양에 비해 생성된 NO₂⁻-N과 NO₃⁻-N의 양이 적었는데, 이는 산소뿐만 아니라 NO₂⁻나 NO₃⁻를 전자 수용체로 이용할 수 있는 탈질화 인 제거 미생물에 의한 영향인 것으로 판단된다.

일정한 포기기간을 유지한 상태에서 질산화는 감소되나 인 섭취는 오히려 늘어나는 것으로 보아, 앞에서 설명한 바와 마찬가지로 질산화 미생물보다는 인 제거 미생물이 산소의 이용에 있어 앞서는 것으로 볼 수 있다.

5. 포기기간 변경에 따른 DO, pH, ORP 변화

DO, pH, ORP의 변화는 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 나타났다. pH profile을 볼 때, 시간이 경과함에 따라 모든 반응기의 포기 단계의 변곡점이 사라지거나 좀 더 늦게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히, 포기기간이 1시간으로 매우 짧은 R1의 경우(Fig. 7a)에서는 전체적으

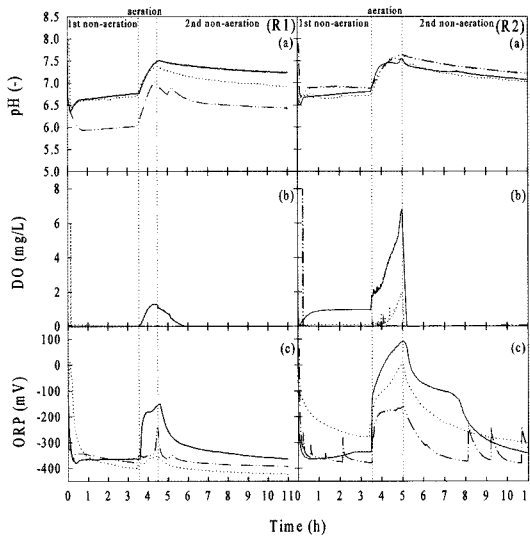


Fig. 7. The change of (a) pH, (b) DO concentration, (c) ORP by the variation of aeration time after 1 day (solid line), 20 days (dotted line), 53 days (dash-dot-dot line) in R1 and R2.

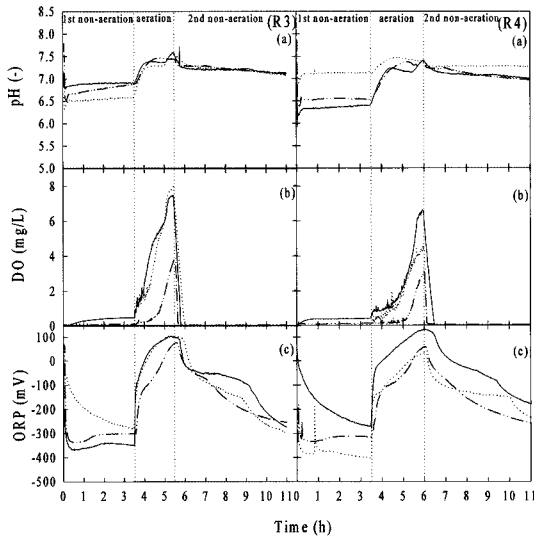


Fig. 8. The change of (a) pH, (b) DO concentration, (c) ORP by the variation of aeration time after 1 day (solid line), 20 days (dotted line), 53 days (dash-dot-dot line) in R3 and R4.

로 pH의 변곡점이 나타나지 않으므로써 질산화의 완료가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었는데, 이를 Fig. 4의 결과와 비교해 보면 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 25~38 mg/로 충분히 있는데도 불구하고 변곡점이 나타나지 않는다는 것은 공기공급량의 부족에 따른 질산화의 부족이 원인으

로 판단할 수 있다. 또한, 실험 기간이 경과됨에 따라 pH가 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 부족한 산소 공급으로 1차비포기 단계에서 형성된 산이 반응기내에 계속 축적되었기 때문인 것으로 판단된다. R2, R3, R4에서는 실험 초기에는 pH 변곡점이 나타남으로써 질산화의 완료지점을 알 수 있었으나, 20일 정도 경과된 시점에서는 변곡점이 관찰되지 않음으로써, 포기기간이 1시간으로 매우 짧은 R1의 경우와 마찬가지로 계속적인 운전과 미생물량의 증가로 인해 공기 공급량이 부족해짐으로써 질산화가 완료되지 못하고 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 R1과 같은 급격한 pH 저하는 관찰되지 않았다.

DO 농도에 있어, R1의 경우에는 초기 1일 쯤에는 포기기간 중 DO 농도의 증가가 관찰되었으나, 그 이후에는 DO 농도가 관찰되지 않음으로써 공기 공급이 부족하다는 것을 나타내고 있다. R2, R3, R4에서는 초기에는 DO 농도가 높았으나, 실험이 경과될수록 DO 농도가 전체적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 포기기간이 1.5시간으로 짧은 R2에서는 확실한 DO 부족 현상을 확인할 수 있었다. 포기 단계에서 공급되는 공기량이 일정함에도 불구하고 DO 농도가 전체적으로 낮아진 것은 공급되는 산소가 질산화 및 인의 흡수에 적극적으로 소모되고 있는 것으로 판단된다. 본 연구 결과와 마찬가지로 질산화시기를 DO 농도의 변화를 관찰함으로써 파악할 수 있다는 유사한 연구가 있다.¹⁴⁾ ORP profile에서는 포기량에 따라 ORP의 변동을 볼 수 있다. 포기기간이 길수록 ORP가 포기 단계에서 좀 더 높은 ORP 수치를 나타내었다. 실험이 경과됨에 따라 ORP도 전체적으로 값이 낮아지는 경향을 보였으나, 포기기간이 비교적 긴 R3와 R4에서는 감소 폭이 적은 것으로 나타났다.

IV. 결 론

SBR에서 포기기간 변경에 따른 영양염류 제거특성을 관찰하였으며, 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 충분하지 못한 산소의 공급은 슬러지의 침전성 불량을 초래하게 되었고, 이로 인한 미생물의 wash-out 현상을 발생시켰다. 포기기간 감소에 따른 유기물 제거 효율의 감소는 각 반응기에서 크게 나타나지 않았으나, 포기기간을 1시간으로 한 R1에서는 뚜렷한 유기물 제거효율 감소 현상이 발생하였다.
2. 포기기간을 감소시킴에 따라 질산화 효율은 급격하게 감소하였으며, 이는 pH 곡선에서도 관찰할 수

있었다. 포기기간을 1시간으로 한 R1에서 53일 간의 시간이 경과된 다음에도 인의 방출과 섭취에는 큰 변화가 없는 것으로 관찰되었다. 그러므로 포기기간의 감소는 인 섭취에 큰 악영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었으나, 포기기간을 적절하게 증가시킬 경우 원활한 인의 방출과 섭취가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

3. 최소한 단위 미생물당 1.5~1.8 ml/mg 이상의 공기 공급량이 인 흡수에 필요한 것으로 나타났다. 포기 단계에서 공급되는 산소를 이용하여 질산화와 인 흡수 과정이 경쟁할 경우, 질산화는 불량해지나 인 흡수는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러므로 질산화보다는 인 흡수 과정에서 산소를 더 쉽게 이용할 수 있는 것으로 관찰되었다.

참고문헌

- EPA US : Process design manual of nitrogen control. EPA 625/r-93/010, Cincinnati, Ohio, 1993.
- Kim, Y. G. and Cho, I. H. : A study on the removal of nitrogen and phosphorus of municipal wastewater with biological coated media. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(1), 27-35, 2006.
- Fux, C., Bohler, M., Huber, P., Brunner, I. and Siegrist, H. : Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. *Journal of Biotechnology*, **99**, 295-306, 2002.
- Anh, Y. H. : Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. *Process Biochemistry*, **41**, 1709-1721, 2006.
- Lee, J., Lee, H. W., Lee, S. Y., Kwon, S., Choi, E. and Park, Y. K. : Characteristics of biological nitrogen removal considering autotrophic denitrification and its microbial community. *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **25**(11), 1352-1358, 2003.
- Oehmen, A., Saunders, A. M., Vives, M. T., Yuan, Z. and Keller, J. : Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources. *Journal of Biotechnology*, **123**, 22-32, 2006.
- Seviour, R. J., Mino, T. and Onuki, M. : The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems. *FEMS Microbiology Reviews*, **27**, 99-127, 2003.
- 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.
- Kim, D. S. and Park, Y. S. : Nutrient removal characteristics by the addition ratio of BNR sludge in SBR. *Korean Journal of Environmental Health*, **34**(1), 76-85, 2008.
- Jun, B. H., Kim, D. H., Choi, E. H., Bae, H. and Kim, C. W. : Control of SBR operation for piggery wastewater treatment with DO and ORP. *Journal of Korean Society on Water Quality*, **18**(5), 545-551, 2002.
- Lee, K. Y., Choi, C. S., Lee, J. M. and Lee, T. : Control of the aeration and non-aeration periods by the utilization of dissolved oxygen profile at a sequence batch reactor (SBR). *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **25**(8), 1032-1037, 2003.
- Kim, J. R., Kim, S. H., Lee, S. H., Kim, C. W. and Woo, H. J. : Applicability of time series analysis and genetic algorithm for predicting behaviors of oxidation-reduction potential in sequencing batch reactor. *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **25**(8), 970-976, 2003.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1995.
- Hu, L., Wang, J., Wen, X. and Qian, Y. : Study on performance characteristics of SBR under limited dissolved oxygen. *Process Biochemistry*, **40**, 293-296, 2005.
- Park, Y. S., Jeong, N. S. and Kim, D. S. : A comparison of N and P removal characteristics by the variation of non-aeration time in an A₂O SBBR. *Journal of Environmental Sciences*, **16**(1), 813-821, 2007.
- Kishida, N., Tsuneda, S. and Sudo, R. : Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying phosphate-accumulating organisms. *Water Research*, **40**, 2303-2310, 2006.