

호기 조건에서 DPAOs (Denitrifying Phosphorus Accumulation Organisms)에 의한 인 제거

정노성¹ · 박영식² · 김동석^{3*}

¹낙동강물환경연구소 담수생태연구과, ²대구대학교 보건과학부, ³대구가톨릭대학교 환경과학과

Phosphorus Removal by DPAOs (Denitrifying Phosphorus Accumulating Organisms) in Aerobic Condition

Nosung Jeong¹, Youngseek Park², and Dongseog Kim^{3*}

¹Freshwater Ecology Research Lab, Environmental Researcher, Nakdong River Environment Research Center, Gyeongbuk 717-870, Korea

²Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea

³Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

Abstract This study was carried out to get phosphorus uptake rate in aerobic condition with nitrate and nitrite. Nitrate and nitrite inhibited phosphorus accumulating organisms' (PAOs) luxury uptake in aerobic condition. Nitrite awfully decreased the phosphorus uptake rate in aerobic condition. At the influent of 10 mg NO₃⁻-N/L, the phosphorus uptake was decreased to 52% comparing that at no influent of nitrate. And at the influent of 10 mg NO₂⁻-N/L, the phosphorus uptake was decreased to 28% comparing that at no influent of nitrite. At the influent of 20 mg NO₃⁻-N/L, nitrite and nitrate were co-existed and the phosphorus uptake rate was decreased to 16% comparing that at no influent of nitrite and nitrate. Also, the denitrification was occurred by denitrifying glycogen accumulating organisms (DGAOs)/denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs) in spite of aerobic condition, and the phosphorus uptake rate was increased by the decrease of influent nitrate concentration at the aerobic condition. The inflection point in the phosphorus uptake rate was shown at the nitrite concentration of 1.5~2 mg/L.

Keywords: DPAOs, P removal, N removal, nitrate, nitrite

서 론

인은 질소와 더불어 부영양화 제한요소로서 수계에 부영양화를 일으킬 수 있는 중요한 영양염류이다. 정상적인 호수나 강, 바다에서는 영양분의 역할을 하는 질소와 인이 부족하기 때문에 수계 내의 미생물이 일정수준 이상으로 번식하지 않는다. 그러나 과량의 질소와 인이 유입되면 각종 미생물들이 폭발적으로 번식하게 된다. 그 결과 물속의 용존산소가 급격히 고갈되어 수중 생물이 집단적으로 폐사하게 되고,

결국 수중 생태계가 완전히 파괴되는 것이다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 하수 및 폐수 내의 질소와 인을 제거하는 고도폐수처리에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 질소의 경우 질소고정 박테리아에 의해 공기 중의 질소가 수계로 유입되는 경우도 있어, 부영양화를 방지하는데 질소보다는 인을 확실하게 처리하는 것이 보다 효과적이라고 알려져 있다. 이러한 추세에 따라 이미 스위스나 미국을 비롯한 세계의 여러 나라에서는 질소와 인의 배출규정을 강화하였고 그에 따라 하수 내의 질소와 인을 효율적으로 제거하는 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1].

EBPR (enhanced biological phosphorus removal)은 PAOs (phosphorus accumulating organisms)의 반응을 이용한 공정으로 PAOs가 포함된 슬러지를 사용함으로써 인의

*Corresponding author

Tel: +82-53-850-3250, Fax: +82-53-850-3250

e-mail: kimds@cu.ac.kr

luxury uptake를 통해 효과적으로 영양염류를 제거한다 [2]. 기존의 활성 슬러지는 유기물과 암모니아 제거에는 뛰어난 반면, 인 흡수 능력에는 저조한 효율을 나타내었으나, PAOs가 포함된 활성 슬러지는 인 흡수에도 뛰어난 효율을 나타내는 특징이 있다.

EBPR 시스템에서 질산염의 영향에 대해서는 아직 일치하지 않고 있지만, 혐기 조건에서는 질산염의 유입이 인 제거 공정에 결정적인 저해 역할을 한다고 알려져 있다. 또한 여러 연구자들은 혐기 조건에서 nitrate가 증가할 때 redox potential을 증가시키고, 인 방출을 촉진시키는 anaerobic stress를 감소시키며, nitrate가 존재하면 인 제거에 필요한 유기물질이 탈질반응에 소모되기 때문에 인의 방출량이 감소하는 것으로 알려져 있다 [3,4]. 또한 혐기 조건 중에 질산염이 존재하여 완전혐기조건이 아닌 무산소 조건이 되면 인 제거 효율에 악영향을 끼친다고 알려져 있다 [5].

위와 같이 혐기 조건에서의 NO_x-N가 인 제거에 미치는 영향은 많이 연구되었으나, 호기 조건에서 NO_x-N가 인 제거에 미치는 영향은 구체적으로 연구되어 있지 않은 실정이다. 호기 조건에서 NO_x-N의 농도가 DPAOs (denitrifying phosphorus accumulating organisms)와 DGAOs (denitrifying glycogen accumulating organisms)에 의해 변화될 수 있으므로, 본 연구에서는 호기 조건에서 NO_x-N의 존재량 변화에 따른 PAOs의 인 흡수 속도 변화를 중점적으로 조사하였다.

실험재료 및 방법

실험재료

본 연구의 실험재료인 합성폐수는 Table 1과 같은 성분으로 제조하여 사용하였다.

Table 1. Composition of the synthetic wastewater

Compounds	mg/L
Glucose	600
MgSO ₄ · 7H ₂ O	50
MnSO ₄ · 7H ₂ O	55
FeSO ₄ · 7H ₂ O	2.22
KCl	7
(NH ₄) ₂ SO ₄	188.4
K ₂ HPO ₄	84.2
NaHCO ₃	300
CaCl ₂	3.76

실험방법

반응기는 Fig. 1과 같이 제작하였으며, 유입 30분을 포함한 3시간 30분의 1차 비포기 구간, 3시간 30분의 호기 구간, 3시간 30분의 2차 비포기 구간, 각각 30분의 침전, 유출,

휴지 시간을 거쳐 총 12시간 주기로 운영하였다. 한 주기 운전 후에 2 L는 같은 양의 유입수로 대체되었고, HRT는 24시간으로 운전되었다. pH는 인위적으로 조절하지 않았으나 운전기간 동안 pH는 6.5~8.0로 유지되었다.

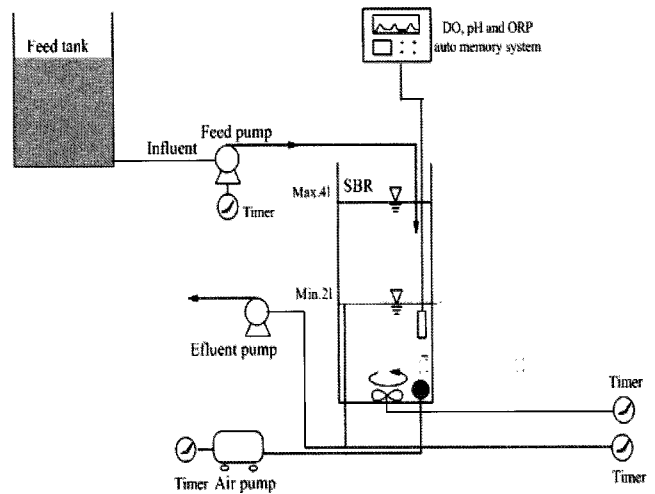


Fig. 1. SBR with BNR sludge.

MLVSS (mixed liquor volatile suspended solids)는 인위적으로 4,000 ± 100 mg/L를 유지하였다. 실험에 사용된 슬러지는 Fig. 2와 같이 BNR (biological nutrient removal)이 잘 이루어지는 SBR (sequencing batch reactor)에서 채취하여, 회분식 실험에서 사용하였다. 1차 비포기 구간에는 인의 방출이 원활하게 발생하였고 이에 따라 TOC (total organic carbon)의 제거가 급격하게 발생하였다. 호기 구간에는 인의 재흡수가 효율적으로 이루어졌고 질산화에 따른 NH₄⁺-N의 NO₃⁻-N로의 전환이 원활하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 2차 비포기 구간에는 NO₃⁻-N의 제거가 발생하였는데, 이는 이 구간 중 인의 감소와 TOC의 감소가 없는 것으로 보아 일반적인 탈질화가 발생한 것으로 보기 어렵고 DGAOs에 의한 탈질로 보는 것이 타당할 것으로 보인다.

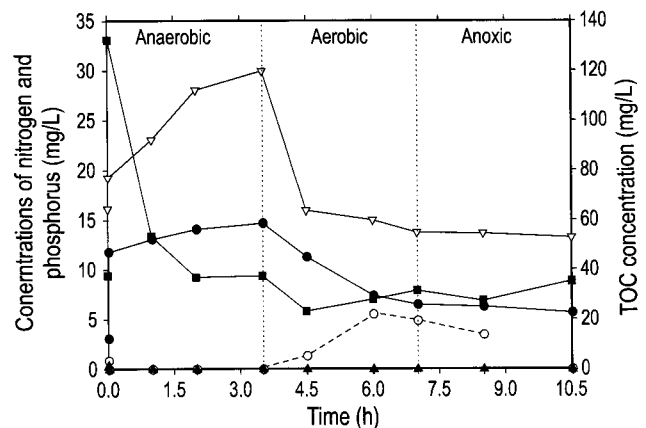


Fig. 2. Nutrient concentration of BNR sludge (■ TOC, ● ammonia, ○ nitrate, ▲ nitrite, △ phosphorus).

분석방법

각 반응기 내의 시료 채취는 약 30분내지 1시간 간격으로 채취하였으며, 시료 채취 후 즉시 0.22 μm 인 membrane filter로 여과하여 시료 내 존재하는 미생물을 완전히 제거한 다음 분석에 들어갔다. SVI (sludge volume index)와 MLVSS는 Standard Methods [6]를 통하여 측정하였고, 유기물 농도는 TOC를 지표로 이용하여 TOC analyzer (TOC-5000A, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. NO_2^- -N, NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P은 ion chromatograph (Metrohm, Switzerland)를 이용하여 측정하였다. NH_4^+ -N는 HS 3100 Water Analyzer (HumaS, Korea)를 이용하여 측정하였다. pH, DO, ORP는 실시간 자동 측정기 (Ino lab multi level 3, WTW, Germany)를 사용하여 측정하였다.

회분식 실험

회분식 실험에 사용된 활성 슬러지는 SBR의 2차 비포기 구간이 끝난 시점에서 채취하였으며, 회분식 실험을 시작하기 전에 활성 슬러지 내에 NH_4^+ -N와 같이 잔존하는 성분이 남아 있지 않도록 초순수를 사용하여 두 번 세척하였다. 회분식 실험은 크게 세 부분으로 나누어 실험이 이루어졌다.

첫 번째는 NH_4^+ -N이 포함되지 않은 합성폐수를 유입하고, 비포기/포기로 각각 3.5 h씩 운전하였으며, 포기 구간에서 산기관을 통하여 0.5 L/min의 공기를 공급하면서 PAOs의 인 흡수량과 속도를 측정하였다.

두 번째는 동일한 폐수와 공기를 공급하되 3.5 h 동안 비포기 운전을 하며, 이후 3.5 h 동안의 포기 구간에서는 공기 유입과 함께 인위적으로 NO_3^- -N과 NO_2^- -N을 각각 10 mg/L로 유입하였다.

세 번째는 동일한 폐수를 사용하여 3.5 h의 비포기 운전을 한 다음, 3.5 h의 포기 구간에서는 공기 유입과 함께 NO_3^- -N 20 mg/L를 유입하였다.

각 회분식 실험에서 NO_2^- -N과 NO_3^- -N은 각각 비포기 구간이 끝난 직후에 유입하였다.

결과 및 고찰

포기 조건에서 NO_x^- -N에 따른 인 제거량 및 제거속도 변화

포기 상태에서 NO_3^- -N와 NO_2^- -N 유입에 따른 인 제거량과 탈질화 량의 변화를 Table 2에 정리하여 나타내었다. NH_4^+ -N이 전혀 포함되지 않은 폐수를 유입하고, 비포기 구간 이후 포기 기간 중 공기를 공급함으로써 PAOs에 의해서만 인 흡수가 이루어지도록 하였다. 이때 반응기의 슬러지를 실험 전에 두 번의 세척으로 인해 NH_4^+ -N을 포함하고 있지 않아 포기 구간 동안 NO_2^- -N과 NO_3^- -N가 전혀

생성되지 않음으로써, 포기 기간 동안 NO_x^- -N에 의해 방해받지 않은 PAOs만의 인 흡수량을 측정하였다.

Table 2. Phosphorus removal and denitrifying amounts in aerobic states

	Phosphorus removal amounts (mg/g VSS)	Denitrifying amounts (mg/g VSS)
Aerobic	54.10	-
Aerobic + NO_3^- -N 10 mg/L	28.30	5.21
Aerobic + NO_2^- -N 10 mg/L	15.61	9.24
Aerobic + NO_3^- -N 20 mg/L	8.93	7.20

포기 상태에서의 순수 PAOs에 의한 인 흡수량은 54.10 mg/gVSS를 나타내었다. 포기 구간에 NO_3^- -N 10 mg/L이 유입된 실험에서는 28.30 mg/gVSS의 인 흡수량을 나타내었으며, NO_3^- -N 10 mg/L이 유입되지 않은 PAOs의 인 흡수량에 비해 52%의 인 흡수량을 나타내었다 (Table 2).

인의 흡수에 영향을 미치는 미생물은 크게 PAOs와 DPAOs로 구분할 수 있다. 본 실험에 사용한 슬러지에서는 포기 구간 중 질산화가 발생함으로써 PAOs와 DPAOs가 공존하여 함께 인 제거에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그러므로 회분식 실험에서도 인의 방출은 PAOs와 DPAOs 모두에서 발생하였으나, NO_3^- 가 존재할 경우 탈질화 되는 NO_3^- -N은 5.21 mg/gVSS이고 인의 흡수량이 감소하는 것으로 보아 DPAOs에 의해 제거되는 인 흡수량이 일부 있었다고 가정해 보면, 인 흡수량은 NO_3^- -N를 유입하지 않았을 때에 비해 매우 감소한 것으로 알 수 있다. 그러므로 NO_3^- 는 공기가 있는 상태에서도 PAOs의 인 흡수에 저해 작용을 한다는 것을 알 수 있다. 이는 유입 NO_3^- -N 농도를 20 mg/L로 증가시킬 경우 명백하게 나타났다. 유입 NO_3^- -N 농도를 10 mg/L에서 20 mg/L로 증가시켰을 때, 인 흡수량은 28.3 mg/gVSS에서 8.93 mg/gVSS로 1/3 정도로 감소함으로써, 포기 구간 중 PAOs의 인 흡수에 대한 NO_3^- -N의 저해 작용을 명백하게 확인할 수 있었다.

포기 구간에 공기와 함께 NO_2^- -N 10 mg/L이 유입된 실험에서는 NO_3^- -N 10 mg/L이 유입된 실험과는 매우 다른 결과를 나타내었다. NO_2^- -N 10 mg/L이 유입된 실험에서는 인 흡수량이 15.61 mg/gVSS로 NO_3^- -N 10 mg/L이 유입된 실험에서의 인 흡수량 28.30 mg/gVSS과 비교해 볼 때 절반 정도의 저조한 인 흡수량을 나타내었다. 그러나 탈질화되어 제거되는 량은 NO_3^- -N 10 mg/L이 유입되었을 때의 5.21 mg/gVSS에 비해 NO_2^- -N 10 mg/L이 유입되었을 때의 탈질화 량은 9.24 mg/gVSS로 약 2배 가까이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

위의 결과들을 볼 때, PAOs의 인 흡수에 미치는 저해 작용은 NO_2^- -N가 NO_3^- -N에 비해 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 그러나 DPAOs에 의한 탈질화는 NO_2^- -N를 유입한 경우가 더 높은 것으로 보아, DPAOs에 의한 탈질화에서는 NO_3^- 보다는 NO_2^- 가 선호된다는 것을 알 수 있었다. 이는 일반적인 탈질화 과정과는 매우 차별화되는 것으로

계속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

또한 NO_3^- -N의 농도를 10 mg/L에서 20 mg/L로 증가시켰을 경우, 탈질화량은 5.21 mg/gVSS에서 7.20 mg/gVSS로 증가하였으나, 인 흡수량은 28.3 mg/gVSS에서 8.93 mg/gVSS로 감소하는 것으로 보아, NO_3^- 농도의 증가가 DPAOs에 의한 인 제거에는 긍정적인 영향을 미칠 수 있으나, 인 제거에 있어서 DPAOs보다는 많은 인 제거를 분담하는 PAOs에 의한 인 제거에는 악영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

또한 포기 조건에서 NO_x^- -N 유입 유무에 따른 인 제거 속도의 변화 및 NO_x^- -N의 변화를 미시적인 관점에서 관찰하였다 (Fig. 3). 3.5 h의 비포기 구간동안 인의 방출이 발생하였으며 비포기 구간의 마지막에서는 약 30 mg/L의 인 농도로 측정되었다 (Fig. 3(a)). 그러나 이어지는 포기 구간 중 2시간 이내에 방출된 인이 모두 재흡수됨으로써 인의 최종 농도는 거의 0 mg/L에 도달하였다. 이 때 제거된 인은 모두 순수 PAOs에 제거된 것으로 볼 수 있으며, 초기 인 흡수 속도는 약 140 mg/h로 나타났다.

3.5 h의 비포기 후 포기과 동시에 NO_2^- -N를 유입된 경우 (Fig. 3(b)), 초기 인의 제거가 발생하였으나 약 30분 후에는 인의 제거가 정지되는 것처럼 보였다. 그러나 그 이후 다시 인의 급격한 제거가 발생하는 모습을 보여 주었다. 이러한 인 제거 형태는 DPAOs와 PAOs의 연속적인 활동에 기인한 것으로 볼 수 있다. 초기 NO_2^- -N가 존재할 경우에는 PAOs의 활동은 저해됨으로써 이 기간 중의 인 제거는 DPAOs에 의한 것으로 볼 수 있다. 그 이유는 NO_2^- -N의 제거가 이 기간 중 활발하게 이루어지고 있기 때문이다. NO_2^- -N가 거의 제거된 30분 후부터 지속적인 포기에 의해 PAOs에 의한 본격적인 빠른 인 제거 (46 mg/h)가 이루어진 것을 볼 수 있다.

NO_3^- -N 10 mg/L이 유입된 경우 (Fig. 3(c))는 NO_2^- -N 10 mg/L이 유입된 경우 상당히 다른 모습을 나타내었다. NO_3^- -N가 DPAOs에 의해 신속하게 됨으로써 NO_3^- -N에 의한 인 제거에 대한 저해 현상이 적게 발생하였고, NO_3^- -N가 신속하게 제거된 30분 후부터는 PAOs에 의한 인의 제거가 원활하게 발생하였다. 이 때 초기 인 제거속도는 153 mg/h로서 NO_2^- -N 10 mg/L이 유입된 경우에 비해 매우 빠르게 나타났다.

NO_3^- -N 20 mg/L이 유입된 경우 (Fig. 3(d))에는 앞의 여러 경우와 상당한 차이를 나타내었다. 특히 NO_3^- -N가 탈질화됨과 동시에 NO_2^- -N가 생성되는 특징을 나타내었다. 그러므로 초기 인 제거는 DPAOs에 의해 발생하였으며, 계속해서 반응기내에서 NO_3^- -N와 NO_2^- -N이 잔존함으로써 순수 PAOs에 의한 인 제거는 발생하지 않은 것으로 볼 수 있다. 그러므로 이 경우의 인 제거는 DPAOs에 의해 발생한 것으로 생각할 수 있으며, 추가적으로 계속 인의 제거가 발생하지 않은 것은 DPAOs 내에서 인의 제거에 중요한 역할을 하는 PHA와 같은 저장물질들이 소모되어 부족하였기 때문인 것으로 생각되나, 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 매우 필요한 것으로 판단된다.

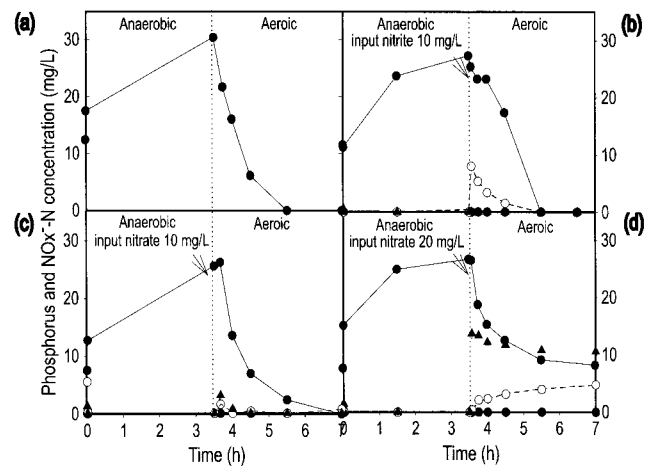


Fig. 3. Change of nitrogen and phosphorus removal with NO_x^- -N in aerobic condition (● PO_4^{3-} -P, ○ NO_2^- -N, ▲ NO_3^- -N).

탈질화에 따른 NO_2^- -N 농도 변화에 의한 인 흡수 속도의 변화

실험에 사용된 슬러지에는 외부 탄소원 없이도 세포내 glycogen을 사용하여 탈질화가 가능한 미생물들이 포함되어 있어, NO_x^- -N의 탈질화 정도에 따른 인 흡수 속도의 변화를 관찰하였다 (Fig. 4).

포기 조건에서 NO_2^- -N 농도에 따른 인 흡수 속도 변화는 NO_2^- -N의 농도가 3.4 mg/L 이하로 감소함에 따라 그 속도가 크게 변화하였다. 유입된 10 mg/L의 NO_2^- -N이 3.4 mg/L로 감소할 때까지는 33 mg/h의 인 흡수 속도를 보인 반면, NO_2^- -N의 농도가 3.4 mg/L 이하로 감소함에 따라 인 흡수 속도는 46 mg/h로 증가하였으며, NO_2^- -N의 농도가 1.5 mg/L 이하로 감소할 경우에는 인 흡수 속도가 70 mg/h로 증가하였다.

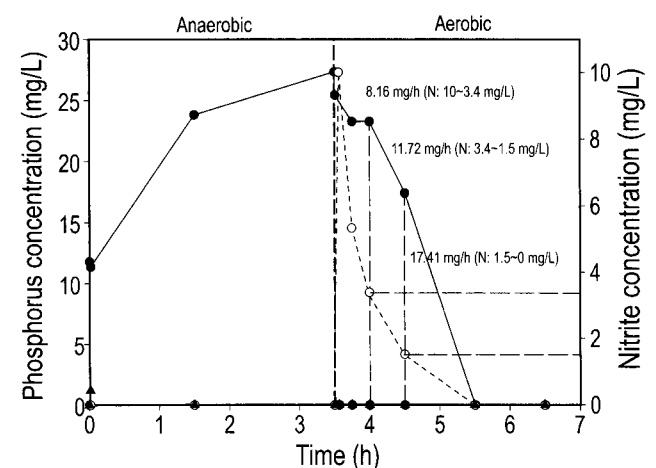


Fig. 4. Change of phosphorus removal rate with nitrite (● PO_4^{3-} -P, ○ NO_2^- -N, ▲ NO_3^- -N).

NO_3^- -N 20 mg/L이 유입된 Fig. 5에서는 유입 직후 인 흡

수 속도가 31.77 mg/h로 $\text{NO}_x\text{-N}$ 이 유입되지 않은 호기 조건의 인 흡수 속도에 비해 매우 낮았으며, $\text{NO}_3\text{-N}$ 10 mg/L이 유입된 호기 조건의 인 흡수 속도보다 높은 값을 나타내었다. 탈질화가 진행됨에 따라 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 감소되고 $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 농도가 증가하여 $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 농도가 2 mg/L 이상 3 mg/L 이하 일 때 8.3 mg/h의 인 흡수 속도를 나타냈으며, $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 농도가 3 mg/L 이상을 유지할 시에는 호기 조건임에도 불구하고 3.41 mg/h의 저조한 인 흡수 속도를 나타내었다. Pijuan 등 [7]은 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도 2 mg/L 전후로 하여 인의 흡수 속도 저하가 나타나며 6 mg/L 이상에서부터 거의 완전한 인 흡수 방해를 일으킨다고 설명한 바 있다.

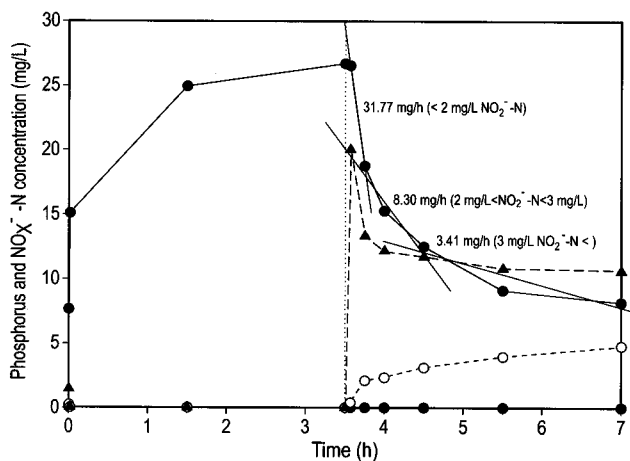


Fig 5. Change of phosphorus removal rate with nitrate (● $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, ○ $\text{NO}_2\text{-N}$, ▲ $\text{NO}_3\text{-N}$).

요약

호기 상태에서 $\text{NO}_x\text{-N}$ 이 PAOs에 의한 인 흡수 속도에 미치는 영향을 각기 세 가지 조건의 회분식 실험을 통하여 관찰하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 인 과잉 흡수가 이루어지는 호기 상태에서 PAOs는 $\text{NO}_x\text{-N}$ 에 의해 인 흡수에 방해를 받는 것으로 나타났다.
- 2) 인 흡수 속도에 있어 $\text{NO}_3\text{-N}$ 보다 같은 농도의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 가 PAOs의 인 흡수 속도를 저하시키는 결과를 나타내었다. 10 mg/L의 같은 농도로 유입되었음에도 불구하고 $\text{NO}_2\text{-N}$ 에 의한 인 흡수 속도는 15.61 mg/gVSS로 10 mg/L의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 공급된 실험에서의 인 흡수 속도 28.30 mg/gVSS보다 낮은 속도를 나타냈다.

- 3) 반응기내의 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도가 2 mg/L 이상으로 존재할 시 PAOs의 인 흡수 속도는 $\text{NO}_x\text{-N}$ 가 존재하지 않는 조건에서 인 흡수 속도의 24%를 나타냈으며, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 3 mg/L 이상으로 존재할 경우 $\text{NO}_x\text{-N}$ 가 존재하지 않는 조건에서 인 흡수 속도의 17% 이하로 감소하는 것으로 나타나 $\text{NO}_2\text{-N}$ 가 PAOs의 인 흡수에 심각한 저해를 미치는 것으로 나타났다.
- 4) 반응기내에 $\text{NO}_2\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 함께 존재할 시에는 $\text{NO}_x\text{-N}$ 가 존재하지 않는 조건에서 인 흡수 속도의 6% 이하로 감소하는 것으로 나타났다.
- 5) $\text{NO}_2\text{-N}$ 는 EBPR의 붕괴에 영향을 미치는 중요한 요소로 판명되었다.

접수 : 2009년 11월 2일, 게재승인 : 2009년 11월 24일

REFERENCES

1. Park, J. P. and S. K. Park (2005) The present condition and development line in biological phosphorus removal research. *DICER Techinfo* Part I, 4: 53-64.
2. Seviour, R. J., T. Mino, and M. Onuki (2003) The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems. *FEMS Microbiology Reviews* 27: 99-127.
3. Barnard, J. L. (1976) A review of biological phosphorus removal in activated sludge. *Water SA* 2: 136-144.
4. Randall, A. A. and Y. H. Liu (2002) Polyhydroxyalkanoates form potentially a key aspect of aerobic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal. *Water Res.* 36: 3473-3478.
5. Jeon, C. O., D. S. Lee, and J. M. Park (2001) Enhanced biological phosphorus removal in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor: characteristics of carbon metabolism. *Water Environ. Res.* 73: 295-300.
6. Eaton, A. D., L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg (1995) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington D.C., USA.
7. Pijuan, M., A. Guisasola, J. A. Baeza, J. Carrera, C. Casas, and J. Lafuente (2006) Net P-removal deterioration in enriched PAO sludge subjected to permanent aerobic conditions. *J. Biotechnol.* 123: 117-126.