

NADH 센서를 이용한 생물학적 동시 탈질·질산화공정에서 질소, 인 제거 영향인자 및 거동 평가

김한래·이시진[†]

경기대학교 환경공학과

(2008. 9. 17. 접수/2008. 9. 30. 수정/2008. 10. 15. 채택)

Evaluation of Affecting Factors on N and P removal in Biological SND (Simultaneous Nitrification and Denitrification) Process with NADH Sensor

Han-Lae Kim · Si-Jin Lee[†]

Department of Environmental Engineering, Kyonggi University

(Received September 17, 2008/Revised September 30, 2008/Accepted October 15, 2008)

ABSTRACT

In this study, the factors affecting biological N and P removal using SND (simultaneous nitrification and denitrification) process were investigated and evaluated to examine the possibility of treating N and P through SND with NADH by surveying N and P traces in an aeration tank. Variations of $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration were used to estimate the degree of SND in each point (P2, P3, P4, P5) of the aeration tank and these variations showed that denitrification efficiency in P2 (front zone), nitrification and denitrification efficiencies in P4 (middle zone) were 67%, 86% and 39%, respectively. When $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration was analyzed in each point of the aeration tank, it was shown that $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration coming into P2 was 1.25 mg/L, which increased to 2.22 mg/L by P release in P2 zone and then decreased to 0.74 mg/L by P uptake in P4. Consequently, we were able to estimate which high P removal efficiency observed in this study was caused by biological phosphorus removal. To determine the operating factors affecting effluent T-N, we analyzed the correlation among FN/M ratio, C/N ratio, Temp., SRT etc and these results showed that the correlation among FN/M ratio, C/N ratio and Temp was not high. However, the relationship of SRT and other parameters (effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and effluent BOD) and the short SRT could have an affect on effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and so effluent BOD could be increased. Thus, SRT operation should be controlled over 10 days. The results for analyzing the correlation between SRT and influent $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in order to investigate the operating factors affecting effluent T-P showed that T-P or $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was not highly correlation with SRT, whereas $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration increased along with increasing $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration into P2. Based on these results, we concluded, using regression analysis ($R^2=0.97$), that effluent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration depends on $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration into P2.

Keywords: SND, NADH, N and P removal, simultaneous removal

I. 서 론

최근 강화된 수질기준으로 인해 하·폐수처리장을 대상으로 생물학적 질소, 인 제거가 가능한 고도처리공정의 도입이 활발하게 이루어지고 있는 실정이다. 생물학적 질소제거과정은 질산화(nitrification)와 탈질(denitrification)

로 구성되며, 인 제거과정은 인방출(release)과 인섭취(luxury uptake)를 거치게 되는데 이에 대한 연구는 생물학적인 질소제거를 연구하는 중에 인 제거와 질산성 질소와의 상관관계를 주목한 Bamard¹⁾에 의하여 인 제거를 위한 혐기성지역의 필요성이 제기되었다. 그 후에 Fuhs와 Chen²⁾은 저급지방산(Short Chain Fatty Acid), 특히 아세테이트를 이용하여 미생물을 배양한 경우 *Acinetobacter ssp*에 의한 인 과잉 축적을 확인하였다. Nicholl과 Osborn³⁾은 아세테이트와 같은 저급지방산은 혐기성조건에서 발효반응의 결과로서 생성되고, Cell에

[†]Corresponding author : Environmental Engineering, Kyonggi University
Tel: 82-31-255-9739, Fax: 82-31-254-4905
E-mail: sjlee@kyonggi.ac.kr

서 PHB(poly-β-hydroxybutyrate)로 저장되며 이러한 기작은 *Acinetobacter*에 의한다고 설명하였다. 최근 인의 생물학적 제거에 대한 모델 중 가장 일반적으로 받아들여지는 것은 Comeau *et al.*⁴⁾의 모델로 혐기 조건에서 다중인산염은 ATP합성 또는 세포막을 통한 양자의 방출을 위하여 쓰여지는 반면, 호기(Aerobic)조건에서는 PHB가 인산염의 축적과 다중인산염으로 대사하는데 이용된다. 이러한 Comeau *et al.*의 모델은 Wentzel *et al.*⁵⁾에 의하여 변형되어 제안되었는데, 이들의 주장에 의하면 ATP/ADP와 NADH/NAD⁺ 비가 다중인산염과 PHB의 합성과 분해를 결정한다는 것이다.

즉, NADH/NAD⁺ 비는 혐기조건에서 최종전자수용체의 부족으로 상승하고 반면에 산화적 인산화의 역제는 ATP/ADP비를 저하시키므로 결국 TCA cycle과 PHB합성을 제한한다. 그러나 외부 탄소원이 결핍된 상태인 호기조건하에서는 NADH/NAD⁺비의 하락에 의해 PHB분해가 제어되며, PHB분해는 세포에 에너지를 제공하고 ATP/ADP비의 결과적인 상승은 다중인산염의 합성을 강화시키게 된다.

그 동안 이와 같은 질소와 인의 제거를 위해 적용되어온 기존 고도처리공정의 경우 환경조건이 다른 각각의 반응조가 필요하였다. 이로 인해 소요부지 면적이 커지고, 각 반응조의 운전조건이 상당히 달라 내부반송 등에 의해 미생물이 다른 반응조로 이송될 경우 활성을 유지하는 데 어려움을 겪게 된다. 특히 질소제거에 있어서는 질산화를 유도하기 위해 충분한 DO농도(2.0 mg/L 이상)를 유지해야 하므로 소요 공기량이 많을 뿐만 아니라 내부반송에 따른 동력비의 증가되는 단점을 가지고 있다. 또한 공정의 제어방법으로 실제 미생물의 상태와는 직접적인 관계가 없는 DO, pH, ORP를 활용하여 제어하므로써 공정제어의 한계점을 가지고 있어 보다 정확한 공정제어지표가 필요한 실정이다. 따라서 최근에는 Fig. 1과 같이 슬러지 플럭내부에 호기, 무산소, 혐기영역이 공존하도록 운전조건을 수립하

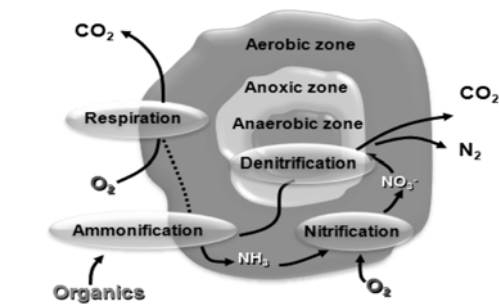


Fig. 1. Schematic of inner floc.

므로써 단일반응조내에서 탈질, 질산화, 인방출, 인흡수가 가능하여 질소와 인의 동시 제거가 가능토록 한 사례가 보고되고 있다.⁶⁾

하지만 이와 같은 경우는 대부분 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)가 길어 질소와 인의 제거를 위한 충분한 체류시간이 확보된 경우로서 국내 처리장과 같이 HRT가 짧은 경우에는 그에 대한 가능성을 재검토할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 미생물의 대사과정에 따라 변화되는 NADH값을 토대로 공정을 제어하므로써 질소와 인을 슬러지플럭내에서 제거하는 고도처리공정을 HRT가 5 hr정도로 짧은 하수처리장에 적용한 후 조내에서의 동시 질소, 인제거 가능성에 대해 살펴보고, 처리수 질소, 인농도와 운전인자간의 상관관계를 조사하므로써 주된 영향인자를 파악하여 적절한 공정제어방향을 수립하기 위한 실험을 수행하였다.

II. 연구방법

1. 실험장치

본 연구는 실규모의 하수처리장을 대상으로 이루어졌다. 하수고도처리공정의 생물반응조는 Fig. 2와 같이 탈질조와 질산화조, 혐기조의 구분이 없는 단일반응조(포기조)로 구성되어 있으며, 공정제어를 위한 운전지표로는 NADH측정장치, DO 및 pH센서가 활용되었다. NADH

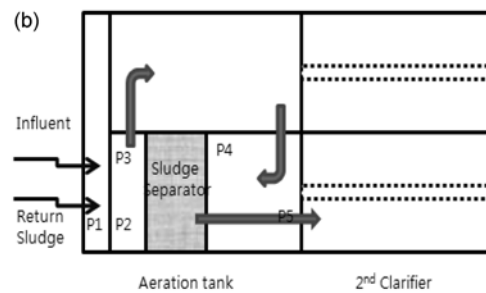
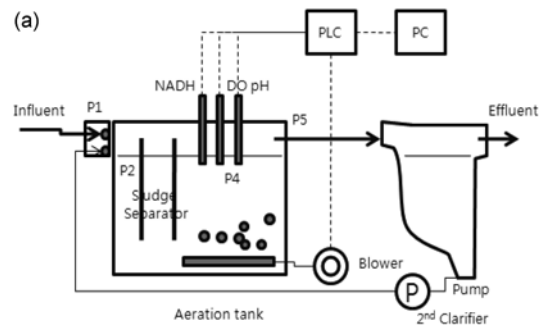


Fig. 2. Basic scheme of SND process with short HRT.

측정장치는 원통형으로 수중침적이 가능한 AquaTech사의 센서(ATNS-AS02)를 활용하였으며, 센서로부터의 측정값은 PLC(Programmable Logic Controller)로 전달되어 제어프로그램에 의해 적정 설정범위가 유지될 수 있도록 송풍량이 조절되었다.

2. 실험방법

본 연구에서는 1차 침전지 상등수를 대상으로 하절기에서 동절기까지 약 180일간 실험을 실시하였다. 포기조내 적정 미생물 농도를 유지시키기 위해 2차 침전지로부터 반송을 실시하였으며 잉여슬러지 펌프에 의해 슬러지 인발이 이루어졌다. 포기조의 MLSS는 하절기의 경우 다소 낮은 농도인 2,000 mg/L 전후에서 운전하였으나 동절기로 갈수록 수온이 저하됨에 따라 MLSS 농도의 증대를 피하여 안정된 처리수질이 확보될 수 있도록 조절하였다.

포기조내에는 Fig. 2의 (b)에서 볼 수 있듯이 질소, 인 제거 필요한 미생물을 확보하기 위한 슬러지분리조가 설치되었으며, 슬러지분리조 하부에 슬러지가 퇴적되어 부패되는 것을 방지하기 위하여 프로펠라형 내부순환펌프를 설치하여 내부순환량을 약 2~3Q 정도로 운전하였다. 1차 침전지 상등수와 반송슬러지는 유입분배조(P1)로 유입된 후 포기조 유입부인 P2에서 내부순환액과 혼합되었으며, 내부순환펌프에 의해 P3, P4로 이송된 후 슬러지분리조의 하부를 거쳐 상부의 유출수로(P5)를 통해 2차 침전지로 이송되었다. 포기조내의 각 지점(P1~P5)미생물에 공기를 공급하기 위한 설비로는 봉형멤브레인 산기관과 단단터보형 송풍기가 설치되었다. 포기조내에서의 질소, 인 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 2와 같이 총 5개소(P1~P5)의 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, PO₄⁻³-P를 HACH사의 DR-2000을 이용하여 흡광도법으로 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 포기조내 질소 및 인 거동

1) 질소거동

포기조내 질소거동을 살펴보기 위해 각 지점별 NH₄⁺-N와 NO₃⁻-N, NH₄⁺-N+NO₃⁻-N 농도를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 포기

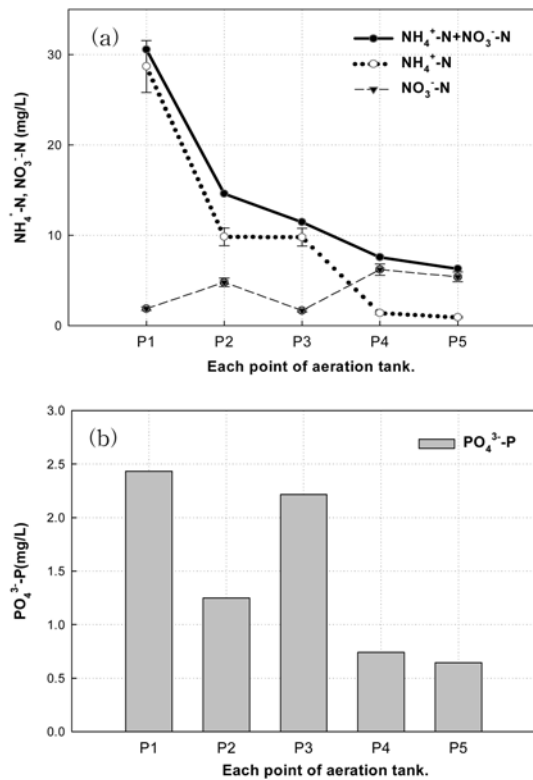


Fig. 3. N, P trace in each part of aeration tank. (a) NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N+NO₃⁻-N, (b) PO₄⁻³-P.

Table 1. Operating conditions of this study

Item	Operating Condition[Min~Max(Average)]	Remarks
Q _n (m ³ /d)	45,244~63,084(56,783)	Flowrate into aeration tank
RAS (%)	20~40(31)	Flowrate of return activated sludge
HRT (hr)	4.9~6.9(5.5)	HRT of aeration tank
NADH (BPA)	6.7~10.9(9.4)	Middle point of aeration tank
MLSS (mg/L)	1,570~2,730(2,213)	-
BOD (mg/L)	47~190(116)	Influent of aeration tank
COD _{Mn} (mg/L)	39~89(67)	Influent of aeration tank
SS (mg/L)	32~136(72)	Influent of aeration tank
T-N (mg/L)	22~48(37)	Influent of aeration tank
T-P (mg/L)	1.9~4.6(3.6)	Influent of aeration tank

조 유입부인 P2에서 말단부인 P5로 갈수록 질산화에 따라 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도가 감소되고 상대적으로 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 증가됨을 알 수 있다. 본 연구에 적용된 고도처리공정은 하나의 포기조내에서 탈질과 질산화를 꾀하는 공정이므로 동시 탈질 및 질산화의 정도를 파악하기 위해 각 지점에서의 $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도 변화를 살펴보았다. 그 결과 유입부 P2에서는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도가 4.77 mg/L에서 1.67 mg/L로 감소됨에 따라 탈질효율이 67%를 나타내었다. 또한, P4에서는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 9.8 mg/L에서 1.4 mg/L로 감소됨에 따라 질산화효율은 86%를 나타내었으며, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 P4에서 질산화가 이루어지는 것을 감안하면 10.1 mg/L에서 6.2 mg/L로 감소됨에 따라 탈질효율은 39%를 나타내었다. 이는 기존 연구가 HRT가 긴 산화구를 통해 동시 탈질 및 질산화가 가능하였음을 보고한 것과 비교할 때, HRT가 5.2 hr정도로 짧음에도 불구하고 높은 질산화효율을 얻을 수 있으며, 또한 동시 탈질 및 질산화에 의한 질소 제거가 가능함을 보여주는 결과라 할 수 있다. 하지만 P4지점에서의 탈질효율은 질산화효율에 비해 다소 낮게 나타났는데 이는 본 연구대상시설이 질산화에 필요한 체류시간이 짧음에도 불구하고 유입부하의 변동이 큰 특징을 가지고 있어 이에 대처하고 원활한 질산화를 유도하기 위해 충분한 공기량을 공급함으로써 DO 농도가 다소 높게 유지되었기 때문인 것으로 판단된다.

2) 인거동

본 연구에서는 인제거를 위한 별도의 혐기조가 구성 되어 있지 않음에도 높은 T-P제거효율을 나타냄에 따라 포기조내 각 지점별 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 P2로 유입된 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 1.25 mg/L이었으나 P2에서의 인방출로 인해 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도가 2.22 mg/L로 증가하였다가 후단 P4에서는 인흡수에 의해 0.74 mg/L로 감소됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 토대로 살펴볼 때, 본 연구에서의 높은 인제거 효율은 생물학적 인제거에 기인한 것으로 판단된다.

그러나 기존의 생물학적 인제거공정이 인방출을 위한 별도의 혐기조를 구성하는데 반해, 본 연구에 적용된 공정에서는 혐기조가 별도로 설치되어 있지 않다. 이는 혐기조가 별도로 설치되지 않은 동시 탈질 및 질산화 공정에서도 운전조건에 따라 슬러지플록내부의 무산소 영역안쪽에 혐기영역이 존재하게 되어 인제거가 가능하다고 보고한 Trivedi와 Hiren⁷⁾의 주장을 뒷받침하는 결과라 할 수 있다. 이에 본 연구에서의 슬러지플록내 혐기성영역의 생성은 유입부인 P2에서 산소소비에 따

라 발생한 것으로 예측된다. 하지만 이와 같은 무산소존에서의 인방출 효율은 혐기조가 전단에 설치된 것에 비해 다소 낮는데, 이는 혐기영역이 슬러지플록의 중심부에 위치해 있어 인제거미생물이 유기물을 섭취하는데 한계가 있고 내부순환에 의해 미제거된 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 성분이 무산소조로 유입됨에 따라 인제거미생물의 활성을 저하시켰기 때문으로 사료된다.

2. 운전인자와 처리수 질소, 인의 상관관계

유기물만을 제거하던 기존 표준활성슬러지공정의 경우 유기물과 미생물의 비 즉, F/M비가 중요한 운전지표로 활용되어 왔으나, 질소와 인을 제거하는 고도처리공정의 경우 목표한 질소농도를 확보하기 위해서는 다른 운전지표를 설정하거나 Kim과 Cho⁸⁾와 같이 질산화효율의 향상을 위해 담체를 사용할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 운전지표로 유입수의 질소부하와 미생물량의 비인 F_N/M 비가 처리수 T-N농도에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 본 연구에서는 운전기간동안의 유입질소부하를 나타내는 F_N/M 비와 처리수 T-N농도의 상관관계를 살펴봄으로써 F_N/M 비가 질소제거공정의 운전지표로 활용될 수 있는지를 살펴보았으며, 그 외 운전인자로서 C/N비, 수온, SRT와의 상관관계를 조사하였다. 또한 인제거에 영향을 미치는 운전인자로 SRT와 포기조 전단부의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도를 대상으로 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도와의 상관관계를 조사하였다.

1) F_N/M 비와 처리수 T-N농도의 상관관계

운전기간동안의 F_N/M 비는 0.046~0.132 kgT-N/kg MLSS · d의 범위를 나타내었으며, 평균 F_N/M 비는 0.074 kgT-N/kgMLSS · d를 나타내었다. 이와 같은 F_N/M 비의 변화에 따른 처리수 T-N 농도의 변화를 살펴보면, 하절기인 8월과 9월, 10월의 경우 비교적 F_N/M 비의 변화가 크에도 불구하고 처리수 T-N의 농도는 10 mg/L 이하의 안정된 처리수질을 나타내었으며, 동절기인 12월과 1월에도 처리수 평균 T-N의 농도는 각각 10.0 mg/L와 9.7 mg/L의 양호한 처리수질을 나타내었다. F_N/M 비와 처리수 T-N 농도의 상관관계는 Fig. 4의 그래프를 통해서 살펴볼 수 있는데, 안정적인 T-N 수질을 확보하는 데 있어 F_N/M 비의 영향은 크지 않음을 보여주고 있다.

2) C/N비와 처리수 T-N농도의 상관관계

생물학적 질소제거공정에 있어 원활한 탈질을 위해서는 유입수중의 탄소원과 질소성분의 비가 중요한 운전인자가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고도처리시

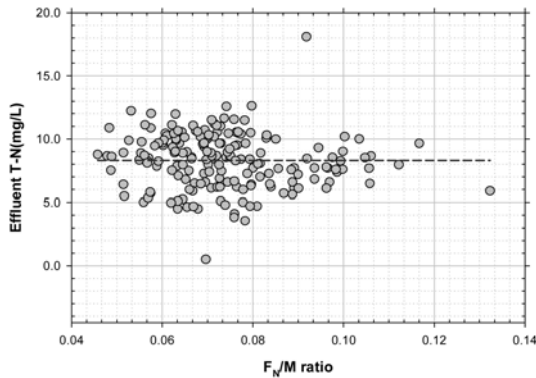


Fig. 4. Correlation of F_N/M ratio and effluent T-N.

설 포기조 유입하수의 C/N비와 처리수 T-N 농도간의 상관관계를 살펴봄으로써 C/N비가 본 고도처리공정에 있어 주요한 운전지표가 될 수 있는지를 파악하였다. 운전기간동안의 C/N비는 1.3~5.1(평균 3.2) kgBOD/kgT-N의 범위를 나타내었으며, 처리수의 T-N농도는 0.5~18.1(평균 8.3)mg/L, 처리효율은 53.9~98.6(평균 78.2)%로 운전되었다. 또한 C/N비는 하절기에서 동절기로 갈수록 약간 증가하는 추세를 나타내었으나 그 차이는 크지 않았으며, 처리수 T-N 농도는 하절기에서 동절기로 갈수록 다소 농도가 증가하는 추세를 나타내었다.

C/N비가 낮게 운전된 기간동안의 처리수 T-N 농도를 살펴보기 위해 운전기간 중 유입 BOD 농도가 다소 낮게 유입되어 탈질을 위한 충분한 탄소원의 확보가 어려울 것으로 예상된 8월의 운전특성을 조사하였다. 조사결과, 8월의 C/N비 범위는 1.6~4.6(평균 2.9)kgBOD/kgT-N이고 처리수 T-N 농도는 0.5~7.1(평균 5.4)mg/L의 범위를 나타내었다. 이와 같은 결과는 Barth *et al.*⁹⁾이 탈질을 위해 요구되는 적정 C/N비로 제시한 4보다 낮은 상태에서도 양호한 처리수질의 확보가 가능함을 보여주고 있으며, 본 고도처리공정에 있어 C/N비가 처리수 T-N 농도를 결정하는 주요 변수는 되지 않는 것으로 판단된다.

또한 포기조 유입수 C/N비와 처리수 T-N 농도와의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었는데, 그림에서 볼 수 있듯이 C/N비의 변화와 처리수 T-N 농도와의 상관성은 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 본 고도처리공정의 경우 안정적인 T-N 수질을 확보하는 데 있어 C/N비의 변화는 크게 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다.

3) 포기조 수온과 처리수 T-N 농도의 관계

수온은 질산화공정의 주요 영향인자로서 국내와 같이 계절별 변화가 심한 지역의 경우에는 수온변화가 다른

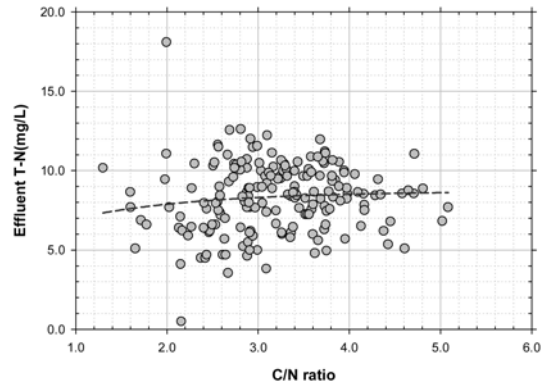


Fig. 5. Correlation of C/N ratio and effluent T-N.

영향인자에 비해 질소제거공정의 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 수온의 저하는 질산화 효율을 저하시켜 처리수의 T-N농도를 증가시킬 수 있으며, 일반적으로 10°C 증가함에 따라 질산화율이 2배가 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 포기조 수온과 처리수 T-N 농도간의 관계를 살펴보고자 하였다. 운전기간동안 유지된 수온은 13.8~26.6(평균 20.9)°C의 범위를 나타내었으며, 20°C 이상으로 유지된 경우 10 mg/L 이하의 T-N 농도 유지가 가능하였고, 그 이하로 수온이 저하되더라도 처리수 T-N 농도는 10 mg/L전·후의 값을 나타내었다. 특히, 연구기간 중 수온이 가장 높게 유지된 8월의 경우 평균수온이 25.7°C이었으며, 이때 처리수 T-N 농도와 처리효율은 각각 5.4 mg/L, 88.2%를 나타내었다. 이와 반대로 가장 수온이 낮게 유지된 1월의 경우 평균수온이 14.3°C이었으며, 이때 처리수 T-N 농도와 처리효율은 각각 9.7 mg/L, 80.6%를 나타내었다.

본 연구기간 동안의 최저 수온은 13.8°C로 다소 높게 유지된 관계로 수온의 변화에 따른 처리수 T-N 농도의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

4) SRT와 포기조 NH_4^+-N 의 상관관계

SRT는 질소제거공정에 있어 증식속도가 느린 질산화 미생물의 확보를 가능케 하는 조절인자중 하나이다. Grady *et al.*¹⁰⁾은 완전질산화를 위한 적정 SRT값의 범위는 3~18 d라 하였는데, 수온이 13°C 이하로 저하되는 동절기의 경우 충분한 미생물량을 확보하기 위해 SRT를 증가시켜 운전하여야 한다. 이에 본 연구에서는 질산화과정의 주요인자인 SRT와 포기조 NH_4^+-N 의 상관관계를 살펴보고자 하였다. 운전기간동안 유지된 SRT는 2.9~42.2(평균 10.0) d의 범위를 나타내었으며, SRT가 10일 이하로 유지된 경우 포기조 NH_4^+-N 의 농도는 6 mg/L 이상을 나타내었다. 포기조 NH_4^+-N 의 농도가

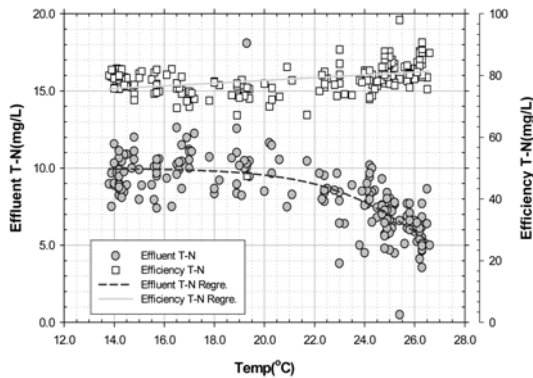


Fig. 6. Correlation of effluent T-N and T-N removal efficiency according to water temperature.

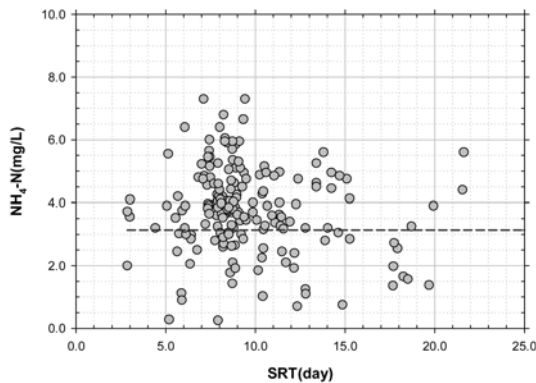


Fig. 7. Correlation of SRT and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ within aeration tank.

6 mg/L 이상을 유지할 경우 2차 침전지에서의 처리수 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도는 2 mg/L 이상을 나타내어 잔류 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 의한 산소소비가 이루어질 수 있으므로 안정된 BOD 농도의 확보를 위해서는 포기조내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도를 6 mg/L 이하로 유지하는 것이 바람직하다. 실제로 Jang *et al.*¹¹⁾은 하수처리장 방류수 BOD 농도에 있어 잔류 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 질산화에 따른 NOD의 비중이 77%로 상당히 큰 영향을 미치고 있다고 지적하였다. 또한 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 SRT가 10일 이상으로 운전된 경우에는 6 mg/L 이하의 농도 유지가 가능함을 알 수 있다. 따라서 SRT의 경우 처리수의 T-N 농도 보다는 처리수의 BOD 농도에 영향을 미칠 수 인자로 판단할 수 있으며, 고도처리공정의 운전에서 주된 운전지표로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

5) SRT와 처리수 T-P 농도와의 상관관계

질소와 인을 제거하는 고도처리공정에 있어 SRT는 주요한 공정제어인자이며, 질산화를 위해 SRT를 너무

길게 유지할 경우 잉여슬러지 인발량이 감소되어, T-P의 제거효율은 감소될 수 있다. Chuang *et al.*¹²⁾은 생물막공정에서 충분한 질소제거를 위해서는 SRT가 10일 이상되어야 하며, 완전한 인제거를 위해서는 12일 이내여야 한다고 주장하였다. 이처럼 SRT는 질산화와 더불어 인제거에도 영향을 미치게 된다.

환경부¹³⁾의 하수종말처리시설 운영관리 실태분석자료에 따르면 2005년 기준 국내 하수처리장 유입수 T-P 농도는 조사대상 29개소 중 19개소만을 제외한 나머지 처리장에서 5 mg/L 이하를 나타내었으며, 2008년 이후 강화되는 수질기준인 2 mg/L 이하로 유입되는 하수처리장이 78개소로 27%의 비율을 차지하는 것으로 조사되었다. 또한 이와 같은 처리장의 상당수가 별도의 인제거설비를 갖추지 않았음에도 불구하고 1.0 mg/L 이하의 처리수 T-P 농도를 나타내었다. 본 연구대상시설의 경우에도 하수의 T-P 농도가 낮게 유입되었으므로 인제거를 위한 별도의 혐기조는 설치하지 않고 운전실시하였다. 연구기간동안 본 연구대상시설로 유입된 T-P 농도는 2.56~8.73(평균 4.82)mg/L의 범위를 나타내어, 국내 하수처리장 평균 유입 T-P 농도인 3.4 mg/L보다 높은 특징을 나타내었다. 이와 같은 SRT에 따른 처리수 T-P 농도 및 처리효율변화를 파악하기 위해 Fig. 8과 같이 SRT와 T-P 제거효율간의 상관관계를 조사하였다. 운전기간동안의 포기조 SRT는 2.9~42.2(평균 10.0) d로 운전되었으며, 처리수 T-P 농도는 0.15~1.69(평균 0.7)mg/L로 나타났다. SRT의 변화가 심함에도 불구하고 T-P 처리효율은 최소 52.3%, 최대 94.9%, 평균 81.5%로 상당히 높은 것으로 나타나, SRT와 처리수 T-N 농도간의 뚜렷한 상관성은 나타나지 않았다.

6) 질산성질소에 따른 처리수 인산염 인의 변화
질소제거과정에서 미처 제거되지 못한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 성분

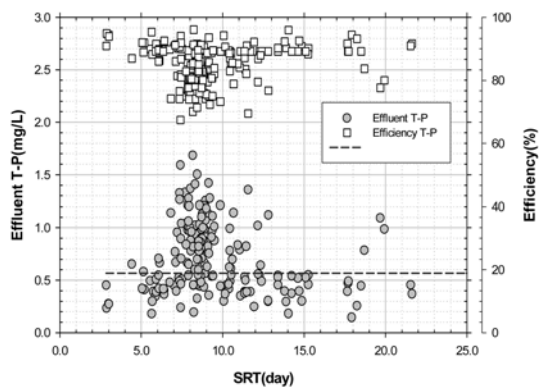


Fig. 8. Correlation of SRT and effluent T-P.

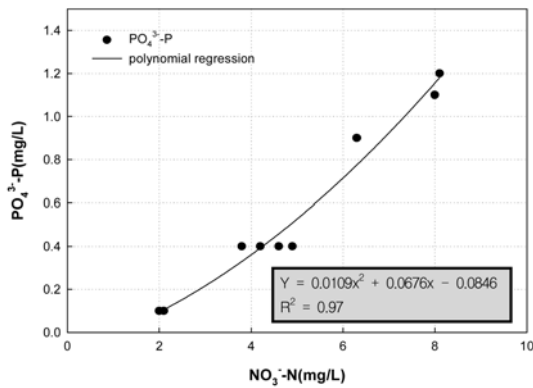


Fig. 9. Regression of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ of effluent and $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ concentration into P2.

이 혐기조로 유입될 경우 인제거미생물의 활성을 저하시켜 인제거효율을 낮추는 원인이 된다(Henze *et al.*¹⁴, Zhao *et al.*¹⁵, Siebritz *et al.*¹⁶). 이는 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 성분이 존재할 경우 이의 탈질을 위해 유입수중 탄소원이 먼저 이용되기 때문인데, Bundgaard와 Petersen¹⁷)은 보통 혐기조에서의 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도가 2 mg/L 이하인 경우 원활한 인제거가 가능한 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 포기조 유입부인 P2로 유입되는 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도와 처리수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 분석하여 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 이 인방출에 미치는 영향을 조사하였다. 분석결과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 유입되는 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도가 증가할수록 처리수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 또한 증가하는 것으로 나타났으나, 이는 Giedre와 Algirdas¹⁸)이 혐기조에서 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도가 1 mg/L일 때 T-P 농도가 0.25~1.6 mg/L라고 보고한 결과에 비해 1차 침전지 상등수와 포기조 내부 순환액이 혼합된 P2 유입수의 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도가 5 mg/L로 높음에도 0.5 mg/L 이하의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 이때의 유입 및 처리수 T-P 농도는 각각 3.2 mg/L, 0.6 mg/L를 나타내어 81.2%의 처리효율을 보였다. P2 유입수 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도(x)와 처리수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도(Y)를 토대로 회귀분석을 실시한 결과 회귀식의 결정계수 R^2 값은 0.97로 높게 나타났으며, 도출된 수식은 다음과 같다.

$$Y = 0.0109x^2 + 0.0676x - 0.0846 \quad (1)$$

IV. 결 론

본 연구는 기존 표준활성슬러지공정으로 운전되던 하수처리시설을 NADH 측정장치를 이용한 고도처리공정으로 개량할 경우 질소, 인제거에 영향을 미치는 운전

인자를 파악하고 포기조내의 질소, 인 거동을 살펴봄으로써 단일반응조내에서 동시 탈질 및 질산화에 의한 질소제거와 인제거의 가능성을 평가하기 위한 것으로 연구수행의 결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 동시 탈질 및 질산화의 정도를 파악하기 위해 각 지점에서의 $\text{NH}_4^{+}\text{-N} + \text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도 변화를 살펴본 결과, 유입부 P2에서의 탈질효율은 67%를 나타내었으며 P4에서의 질산화효율은 86%, 탈질효율은 39%를 나타내는 것으로 조사되었다. 이를 통해 낮은 DO 농도로 운전되는 동시 탈질 및 질산화공정의 경우 HRT가 5.2 hr 정도로 짧음에도 불구하고 높은 질산화효율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 동시 탈질 및 질산화에 의한 질소제거가 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

2) 질소제거에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 F_N/M 비, C/N비, 포기조 수온, SRT 등과 처리수 T-N의 상관관계를 분석한 결과, 서로간에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나지 않았으나 SRT의 경우에는 포기조 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 에 영향을 미칠 수 있으며, 이로 인해 처리수 BOD에도 영향을 미칠 수 있는 인자임을 확인할 수 있었다.

3) 본 연구에 적용된 공정이 인제거를 위한 별도의 혐기조가 구성되어 있지 않음에도 불구하고 높은 T-P 제거효율을 나타내는 원인을 파악하기 위해 포기조내 각 지점별 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 분석한 결과, P2로 유입된 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도는 1.25 mg/L이었으나 이곳에서의 인방출로 인해 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도가 2.22 mg/L로 증가하였다가 후단 P4에서는 인흡수에 의해 0.74 mg/L로 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 관찰된 높은 인제거효율은 생물학적 인제거에 기인한 것으로 판단된다.

4) 인제거에 있어 유입 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도가 처리수 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도에 미치는 영향을 조사한 결과, 유입되는 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도가 증가할수록 처리수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 또한 증가하는 것으로 나타났으나, 이는 기존 연구자료에서 제시된 것보다 높은 5 mg/L 정도의 유입 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도에서도 0.5 mg/L 이하의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도를 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 이와 같은 자료를 토대로 추세선 분석을 실시한 결과, 처리수의 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도와 P2 유입 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 농도의 회귀식에 대한 결정계수 R^2 값은 0.97로 높게 나타났다.

5) 본 연구의 결과들은 그동안 긴 HRT(10 hr 이상)를 가진 하수처리장을 개량하는 데 제한적으로 이용되어 온 NADH 센서를 이용한 생물학적 동시 탈질·질산화공정이 짧은 HRT(5 hr)를 가진 하수처리장의 질소, 인처리에도 적용가능함을 보여주고 있다. 또한 도출된 질소 및 인제거 효율은 향후 유사처리장의 고도처리개

량에 NADH 센서를 이용한 고도처리방식을 적용할 경우 적정 설계지침으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Barnard, J. : Biological nutrient removal without addition of chemicals, *Water Research*, **9**, 485-490, 1975.
- Fush, G. W. and Chen, M. : Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of wastewater, *Microb Ecol.*, **2**, 119-138, 1975.
- Nicholls, H. A. and Osborn, D. W. : Bacteria stress: prerequisite for biological removal of phosphorus, *J Water Pollut Control Fed.*, **51**, 557-569, 1979.
- Comeau, Y., Hall, K. J., Hancock, R. E. W., and Oldham, W. K. : Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal, *Water Resource*, **20**(12), 1511-1521, 1986.
- Wentzel, M. C., Lotter, R. H., Loewenthal, R. E. and Marais, G. V. R. : Metabolic behaviour of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphorus removal a biochemical model, *Wat. SA* **12**, 209-224, 1986.
- <http://enviroquip.com>.
- Trivedi, Hiren, K. : Sewage treatment process with phosphorus removal, US Patent 6712970, 2002.
- Kim, Y. G. and Cho, I. H. : A Study on the Removal of Nitrogen and Phosphorus of Municipal Wastewater with Biological Coated Media, *Kor. J. Env. Hlth.*, **32**(1), 27-35, 2006.
- Barth, E. F., Brenner, R. G. and Lewis, R. F. : Chemical-Biological Control of Nitrogen and Phosphorus in Waste Water Effluent, *JWPCF*, **40**(12), 2040, 1968.
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T. and Lim H. C. : "Biological Wastewater Treatment," 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 1999.
- Jang, S. J., Lee, S. H., Park, H. S., Park, C. K. : Effect of NOD on BOD test for the effluents of biological treatment plant, Academic Conference, Korean Society on Water Quality. *Korean Society of Water and Wastewater*, 1379-1388, 2006.
- Chuang, S. H., Ouyang, H. C. and You, S. J. : Effects of SRT and do on nutrient removal in a combined as biofilm process, *Water Science and Technology*, **36**, 19-27, 1997.
- Korean ministry of environment : Analysis of operating state in municipal wastewater treatment plant, 2006.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. C. and Arvin, C. E. : Wastewater Treatment. Biological and Chemical Process, Springer Verlag, 383, 1995.
- Zhao, H. W., Mavinic, D. S., Oldham, W. K. and Koch F. A. : Factors affecting phosphorus removal in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage, *Water Science and Technology*, **38**(1), 115-122, 1998.
- Siebritz, P., Ekama, G. A. and Marais, G. V. R. : A parametric model for biological excess phosphorus removal, *Water Science and Technology*, **15**(3-4), 127-152, 1983.
- Bundgaard, E. and Petersen, G. : Methods for improving biological phosphorus removal, Kriiger, Copenhagen, Denmark, 148, 1993.
- Giedre, V. and Algirdas, B. M. : Investigation into biological nutrient removal from wastewater, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, **8**(4), 177-181, 2005.