

시뮬레이션 기법을 이용한 기존 BNR공정의 C/N비 변화에 따른 운전조건 최적화

노해연 · 길경익[†]

서울산업대학교 토목공학과

Optimization of Operational Conditions of Existing BNR Process with Various C/N Ratio using Simulation Method

Rho, Hae-Yeon · Gil, Kyung-Ik[†]

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Technology

(Received 20 November 2006, Accepted 11 April 2007)

Abstract

Numerous sets of simulation were conducted in order to find out the optimum operational conditions of the existing BNR process using GPS-X program. The model of ASM3 and modified Bio-P module were applied for simulations. From the result of this study, effluent quality was closely related with the step feeding rate and influent C/N ratio. The effluent TN concentration seemed to be significantly affected by step feeding rate at the low C/N condition. But at the high C/N condition, the effluent concentration of TP rather than that of TN was affected by the control of step feeding rate.

keywords : ASM3, Bio-P module, BNR, C/N ratio, GPS-X, step-feed

1. 서론

국내 하수는 C/N, C/P비가 상대적으로 낮은 특징을 가지고 있다(환경부, 2005). 이는 생물학적으로 영양염류를 제거하는데 불리한 조건으로서, 외부탄소원을 이용하거나, step-feed 방식으로 유입수 내 탄소원을 이용하여(Fujii, 1996) 이러한 문제를 해결하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 시간과 경제적 제약이 많은 실험적 방법보다는 수학적 활성슬러지 모델을 이용하려는 연구가 이루어지고 있다. 수학적 모델을 통한 생물학적 공정의 해석은 짧은 시간에 최적 운전조건을 도출할 수 있으며, 반응기를 적절하게 운전하기 위한 비용도 불필요하게 된다(정 등, 2004).

이와 같이 활성 슬러지 모델이 발전하고 점점 복잡해짐에 따라 SSSP, EFOR, ASIM, GPS-X, SBRSIM 및 Bio-Win 등과 같이 활성슬러지 모델을 편리하게 사용하기 위한 상용화 프로그램들이 개발되었다.

생물학적 질소·인 동시제거를 모사할 수 있는 모델로는 IWA Task Group에서 1995년에 발표한 Activated Sludge Model No.2와 ASM 2의 확장 모델인 ASM 2d가 있다. 또한 생물학적 유기물 및 질소제거 모사를 위한 ASM 3와 생물학적 인 제거 모사를 위한 EAWAG의 Bio-P module을 같이 이용하는 방법이 있다. 그러나 이러한 모델들은 PAOs

(phosphate accumulating organism)의 혐기성 인방출 반응에 대해서 NOx의 존재가 저해 반응을 일으킨다는 것을 고려하지 않았다(Lee et al., 2005). 이러한 모델은 혐기조 앞에 전탈질조를 두며, 유입수를 step-feed하는 대상처리장의 BNR공정을 잘 모사할 수 없다고 판단하여, 이에 대해 보정한 ASM3+modified Bio-P 모델을 적용하였다.

본 연구에서는 활성슬러지 모델인 ASM3와 modified Bio-P 모델을 이용하여 기존 step-feed BNR공정을 모사하였다. 이를 통하여 C/N비와 step-feed량 변화가 질소와 인의 처리 효율에 미치는 영향을 조사하여, 유입수 특성에 따라 영양염류 처리효율을 높이는 적절한 유입수 운전인자를 모색하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상공정

생물학적으로 안정적인 질소·인 처리를 위해서 탄소원이 충분히 공급되어야 하는데 국내 하수처리장처럼 유입수의 C/N+P비가 낮은 하수의 경우는 외부탄소원을 공급함으로써 운전비용이 증가하게 된다(오 등, 2000). 이러한 문제를 해결하기 위해 유입수의 탄소원을 최대한 활용하기 위한 step-feed 공정이 개발되었다. step-feed BNR 공정은 기존의 혐기조로 모든 유입수가 공급되는 공정 대신에 무산소조로 분할 주입하여 탈질에 필요한 탄소원을 공급하는 방식이다. 따라서 유입수의 특성에 따라 주입량과 주입위치를 선정함으로써 생물학적 질소·인 처리에 효율을 향상시킬 수 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
kgil@snut.ac.kr

본 연구에서는 step-feed BNR 공정이 적용된 J하수처리장을 선정하여 365일 운전 data와 시설용량을 모델에 적용하였으며, J하수처리장의 운전조건을 Table 1에 나타내었다. J하수처리장의 365일 유입수질에 대해서는 Table 2에 나타내었고, 이를 바탕으로 GPS-X simulator에 layout과 data를 적용하였다.

2.2. ASM3+ modified Bio-P

IWA에 의해 2000년에 발표된 ASM 3는 미생물 대사에 있어 용존 기질이 미생물 체내에 우선 저장되었다가 성장에 이용되는 2단계 성장으로 접근하였다. 그러나 ASM 3에는 인 제거 모델이 포함되어 있지 않았고, 이에 EAWAG에서 ASM 3를 사용하며 인 제거를 고려하는 경우 이용할 서브 모델로 Bio-P module을 개발하였다. 그러나 이 모델에서는 PAOs에 의해 혐기조건에서 인방출 반응이 일어날 때 NOx가 일정농도 이상 존재할 경우 인방출에 저해 효과가 발생하는 것이 고려되어 있지 않았다. 이는 질소와 인의 농도를 예측하는데 있어 영향을 끼칠 것이고, 이에 대해 보정한 모델을 적용하였다(Lee et al., 2006). 연구에 이용된 ASM3+Bio-P의 혐기성 조건에서 PAOs가 PHA(polyhydroxy alkanotate)를 저장하면서 인방출 반응을 일으키는 역학식을 다음에 나타내었다.

$$q_{PHA} = \frac{S_S}{K_{SS,PAO} + S_S} \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP,PAO} + X_{PP}/X_{PAO}} \frac{K_{I,NO,PAO}}{K_{I,NO,PAO} + S_{NO}} X_{PAO} \quad (1)$$

이 식은 NOx에 의해 혐기조건이 만족되지 않을 때는 PAOs의 인방출에 저해 효과가 작용하는 것을 고려하고 있다.

2.3. 유입수 성상 및 매개변수

모델에 적용하기 위한 유입수의 유기물은 TCOD를 각각 Ss(용존 생분해성), Si(용존 난분해성), Xs(입자성 분해성),

Xi(입자성 난분해성)의 4가지 성분으로 구분하여야 한다(Grady et al., 1999). 이는 생물학적으로 분해가능여부와 분해속도여부로 나눈 것이며, 처리장의 유입수마다 특성이 다르기 때문에 실험을 통한 측정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 J하수처리장의 유입수와 반송슬러지를 이용하여 미생물 호흡율에 기초한 OUR test를 시행하여 모델에 적용하였으며, 적용된 유입수 성상을 Table 3에 나타내었다. 또한 모델의 정확성을 높이기 위해서는 매개변수의 추정을 통한 보정이 필요하며 이는 GPS-X simulator의 optimizer 기능을 이용하였다. 유출수질을 모사하기 위해 추정된 매개변수는 Y_{STO,O2}, Y_{STO,NO}, Y_{H,O2}, Y_{H,NO}, Y_{PO4}, μ_H, b_H, μ_A, q_{PHA}, q_{PP}, μ_{PAO}가 각각 0.7, 0.64, 0.61, 0.48, 0.31, 3.9, 0.1, 1.35, 4.98, 1.8, 0.59로 나타났다.

2.4. 공정 시뮬레이터 구축 및 모델링

활성슬러지 공정 모델링을 위한 다양한 프로그램이 개발되었다. 이러한 simulation program은 plant를 운전하고 설계하는데 기본이 되는 유입조건, 공정운전, 활성슬러지의 침전특성 등의 많은 parameter를 이해하는데 가장 강력한 tool이 되고 있다(Hydromantis Inc., 2001). 본 연구에서는 활성슬러지 모델을 기초로 한 프로그램 중 GPS-X를 이용하여 J하수처리장의 step-feed BNR 공정을 모사하고자 하였으며 layout을 Fig. 1에 나타내었다.

2.5. C/N 변화에 따른 step-feed ratio 조절

J하수처리장 특성을 파악하기 위해 1년간 운전 data를 분석한 결과 TCOD/TKN비가 0.8~5.3으로 비교적 큰 폭으로 변화하며 유입되는 것을 알 수 있었고, 이를 Table 2에 나타내었다. 이러한 조건을 모델을 이용한 시뮬레이션에 적용하고자 하였으나 실제 생물학적 반응에 이용되는 COD는 TCOD가 아닌 BDCOD이기 때문에 시뮬레이션 조건은 BDCOD로 적용하였다. 대상처리장의 유입수를 이용하여 유기물 분율 실험을 한 결과 BDCOD는 TCOD의 85.1%를 차지하는 것으로 나타났으며, 따라서 TCOD/TKN비가 0.8~5.3

Table 1. Operation conditions

Items	Pre-Anoxic	Anaerobic	Anoxic 1	Anoxic 2	Aerobic
HRT	0.2	1.5	2.0	1.0	7.5
Flow rate(m ³ /d) (Step feed ratio,%)	2,380 (10%)	14,280 (60%)		7,140 (30%)	
	· Sludge recycle · Denitrification	· P-release	· Denitrification	· Denitrification	· Nitrification · P-uptake

Table 2. Characteristics of influent wastewater

Parameters	SS	BOD ₅	COD _{Cr}	T-N	T-P	Alkalinity	pH	TCOD/TKN
Range	24~186	21.8~158	64~310.4	9.13~50.53	1.22~7.27	70~105	6.7~7.2	0.8~5.3
Average	60.3	70.9	136.0	23.58	2.81	75.0	7.0	2.3

Table 3. Model compounds and wastewater compositions

Model compounds	TCOD	S _i	S _s	X _i	X _s	X _H	NH ₄ -N	PO ₄ -P
Application	136	10.34	40.4	9.9	75.34	0	21.93	1.74

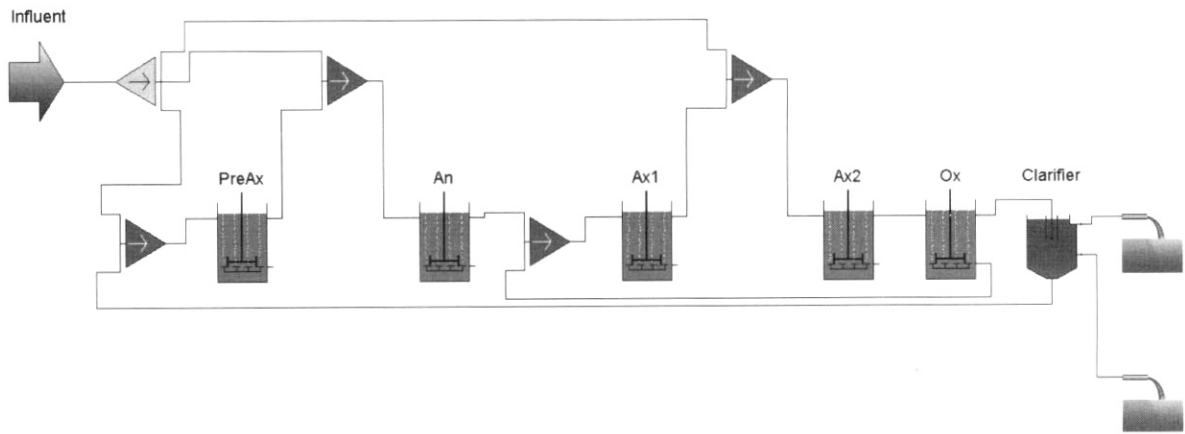


Fig. 1. Schematic diagram for modeling.

으로 변화하는 동안 BDCOD/TKN비는 0.68~4.51만큼 변화했다고 할 수 있다. 실제 시뮬레이션 과정에서는 BDCOD/TKN비를 2~7범위까지 변화시키며 시뮬레이션을 하였다. 유입조건인 BDCOD/TKN비가 각각 2, 5, 7로 변화할 때 운전조건인 유입수 분할 주입비를 A~R의 조건으로 변화시켜 유출수 TN, TP의 농도를 보았으며, 이러한 조건을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Simulation condition of each C/N and step-feed ratio
*(Pre-Anoxic/Anaerobic/Anoxic2)

Step-feed rate	BDCOD/TKN ratio		
	2	5	7
A (0.1/0.8/0.1)*	2A	5A	7A
B (0.1/0.7/0.2)	2B	5B	7B
C (0.1/0.6/0.3)	2C	5C	7C
D (0.1/0.5/0.4)	2D	5D	7D
E (0.1/0.4/0.5)	2E	5E	7E
F (0.1/0.3/0.6)	2F	5F	7F
G (0.2/0.7/0.1)	2G	5G	7G
H (0.2/0.6/0.2)	2H	5H	7H
I (0.2/0.5/0.3)	2I	5I	7I
J (0.2/0.4/0.4)	2J	5J	7J
K (0.2/0.3/0.5)	2K	5K	7K
L (0.2/0.4/0.6)	2L	5L	7L
M (0.3/0.6/0.1)	2M	5M	7M
N (0.3/0.5/0.2)	2N	5N	7N
O (0.3/0.4/0.3)	2O	5O	7O
P (0.3/0.3/0.4)	2P	5P	7P
Q (0.3/0.2/0.5)	2Q	5Q	7Q
R (0.3/0.1/0.6)	2R	5R	7R

3. 결과 및 고찰

C/N비를 2~7까지 변화할 때 유입수 Step-feed량을 다양하게 변화시키면서 유입수 성장과 유입수 운전인자와의 관계를 파악하였다. Fig. 2와 Fig. 3에 각각 C/N비가 2, 5인 경우에 step-feed량 변화에 따른 유출수 T-N, T-P농도를 나타내었다.

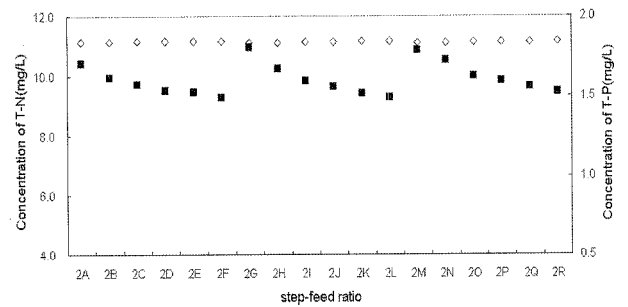


Fig. 2. T-N and T-P concentration of effluent with operation condition ; C/N=2.

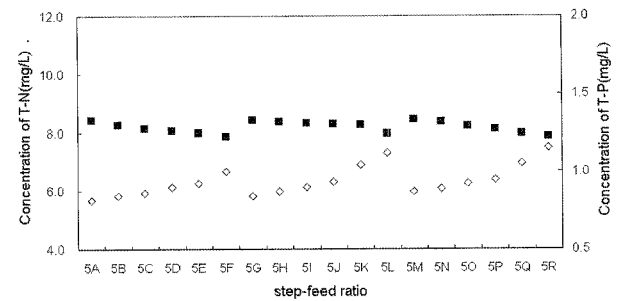


Fig. 3. T-N and T-P concentration of effluent with operation condition ; C/N=5.

3.1. C/N비 변화와 step-feed ratio 조절에 따른 T-N 유출수질 변화

Fig. 2에서 보면 C/N비가 낮은 경우, 유출수 T-N 농도는 step-feed량에 의한 영향을 많이 받았다. 이는 탈질에 이용할 탄소원이 충분하지 않아 제2무산소조로 유입되는 유입량에 비례하여 질소제거 효율을 나타내는 것으로 사료된다.

반면 Fig 3에 나타난 C/N비가 비교적 높은 경우, step-feed량에 의한 농도변화가 거의 나타나지 않았다. 특히 C/N비가 5인 경우에는 제2무산소조로 유입수량이 유출 T-N농도에 거의 영향을 끼치지 않았다. 이는 탈질에 이용될 탄소원이 제2무산소조로 직접적으로 공급되지 않더라도 C/N비가 높은 경우에는 충분한 탄소원의 공급으로 혐기조에서 인방출에 이용되고 남은 탄소원이 무산소조로 유입되어 탈질에 이용되기 때문인 것으로 사료된다.

3.2. C/N비 변화와 step-feed ratio 조절에 따른 T-P 유출수질 변화

T-P의 경우, Fig 2에 나타난 바와 같이, C/N비 2일 때, step-feed량에 의한 유출수 T-P의 농도변화량이 거의 없었다. 이는 C/N비가 낮을 경우 전무산소조에서 탈질이 원활하게 이루어지지 않아 NOx-N이 혐기조로 유입되기 때문에 유입량과 무관하게 인방출이 원활하게 이루어지지 않는 것으로 사료되었다.

반면 Fig. 3과 같이 C/N비가 5이상 이 되면 전무산소조의 탈질이 거의 이루어지고 따라서 혐기조에서의 인방출은 유입되는 유입수량 즉, 탄소원에 비례하여 일어나기 때문에 step-feed량에 의한 T-P 유출수질 변화가 큰 것으로 사료된다.

3.3. C/N비가 높은 경우, step-feed ratio 조절에 따른 T-N 및 T-P 유출수질 변화

Fig. 4에서와 같이 C/N비가 7이상인 경우에는 유출수 T-N, T-P의 농도변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 유입수 중의 탄소원이 충분하여 질소·인의 생물학적 처리에 있어서 step-feed량과 상관없이 일정하게 양호한 처리효율을 보이는 것으로 나타났다.

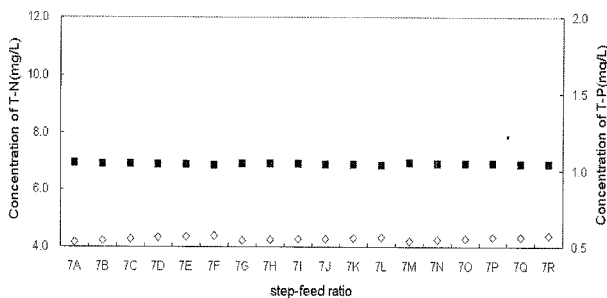


Fig. 4. T-N and T-P concentration of effluent with operation condition ; C/N=7.

4. 결론

- 1) 유입조건인 C/N비와 운전조건인 step-feed량의 관계를 살펴본 결과 C/N비가 2~3으로 낮은 경우 유출 T-N의 경우 큰 변화폭을 보이며 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 반면 C/N비가 4~5로 비교적 안정적인 경우, T-N의 농도도 변화를 보이지만 그 폭이 미비했고, 오히려 T-P의 농도가 더 큰 영향을 받는 것으로 판단하였다. 따라서 C/N비가 4~5인 경우, 인방출이 일어나는 혐기조로의 유입량을 많이 유지하여도 질소와 인 모두 제거가 양호할 것으로 사료된다.
- 2) C/N비가 7이상인 경우에는 유입수의 탄소원이 충분하기 때문에 질소·인의 생물학적 처리에 있어서 step-feed량과 상관없이 일정하게 양호한 처리효율을 보이는 것으로 사료된다.

Nomenclature

$Y_{STO,O2}$	Aerobic yield of stored product per Ss
$Y_{STO,NO}$	Anoxic yield of stored product per Ss
$Y_{H,O2}$	Aerobic yield of heterotrophic biomass
$Y_{H,NO}$	Anoxic yield of heterotrophic biomass
Y_{PO4}	requirement of X_{PP} per X_{PHA} storage (PO ₄ release)
μ_H	Heterotrophic max. growth rate of X_H
$b_{H,O2}$	Aerobic endogenous respiration rate of X_H
μ_A	Autotrophic max. growth rate of X_A
q_{PHA}	Rate constant for storage of X_{PHA}
q_{PP}	Rate constant for storage of X_{PP}
$\mu_{max,PAO}$	Saturation Constant for Ss (X_{PAO})

참고문헌

박종복, 이재진, 이원권, 유대환, DBP를 포함한 5-stage BNR 공정을 이용한 생물학적 질소·인 제거, *한국물환경학회지*, **17**(1), pp. 99-107 (2001).

오영기, 오성민, 황연상, 이경수, 박노연, 고희백, 선단무산소조를 이용한 영양소제거공정(Bio-NET)의 질소·인 제거 특성, *대한환경공학회지*, **22**(1), pp. 121-132 (2000).

정창화, 심유섭, 김태형, 박철휘, GPS-X 시뮬레이션을 이용한 2단탈질 공정에서 외부탄소원 적용성 평가, *상하수도학회지*, **18**(1), pp. 37-48 (2004).

환경부, 하수도 통계 (2005).

Fujii, S., Theoretical analysis on nitrogen removal of the step-feed anoxic-oxic activated sludge process and its application for the optimal operation, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1) pp. 459-466 (1996).

Grady, L. C. P. Jr., Glen, T. Daigger, Henry C. Lim., *Biological Wastewater Treatment 2nd Edition*, Marcel Dekker, Inc. (1999).

Hydromantis Inc., GPS-X technical reference, p. XVIII (2001).

Lee, S. H., Ko, J. H., Kim, J. R., Kim, Y. J., Lee, J. J., Kim, C. W. and Lee, T. H., Identification of the Adverse Effect of Nitrate on the Phosphate Release Rate and Improvement of EBPR Process Model, *Wat. Sci. Tech.*, **53**(4-5), pp. 115-123 (2006).

Lee, S. H., Ko, J. H., Park, J. B., Im, J. H., Kim, J. R., Lee, J. J. and Kim, C. W., Practice of ASM3 and EAWAG Bio-P module for simulation five-stage step-feed EBPR process comparing with ASM2d, the 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation (2005).