

ASM3+Bio-P module을 이용한 기존 BNR공정 모사

노해연 · 길경익[†]

서울산업대학교 토목공학과

Modeling of Existing BNR Process using ASM3 and Modified Bio-P Module

Rho, Hae-Yeon · Gil, Kyung-Ik[†]

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Technology

(Received 25 October 2006, Accepted 11 April 2007)

Abstract

In Activated Sludge Model, COD fraction of primary settled municipal wastewater was a very important parameter. In this study, the COD fraction was determined using the oxygen utilization rate experiments. Readily biodegradable COD (S_s) fraction was observed about 29.7% of influent TCOD. S_i , X_i , and X_s were analyzed to be 7.6%, 7.3%, and 55.4% of TCOD, respectively. The model used in this study was developed based on ASM3 and modified Bio-P module in order to simulate the existing BNR process. Parameter estimation results showed that Y_{STO,O_2} , $Y_{STO,NO}$, Y_{H,O_2} , $Y_{H,NO}$, Y_{PO_4, μ_H} , b_H , μ_A , q_{PHA} , q_{PP} and μ_{PAO} were 0.7, 0.64, 0.61, 0.48, 0.31, 3.9, 0.1, 1.35, 4.98, 1.8 and 0.59, respectively. Using the presented model and the estimated parameters, the simulation of the existing BNR process was successfully conducted.

keywords : ASM3, Bio-P module, COD fraction, GPS-X, Sensitive analysis

1. 서론

하천 및 호소로 유입되는 질소와 인이 용존산소를 고갈시키고, 부영양화를 초래하여 수질을 악화시키는 원인이 되고 있다. 이러한 질소·인을 제거시키고자 다양한 생물학적 영양소제거(Biological Nutrient Removal)공정이 개발되었다. BNR공정에 적용된 복잡한 생물학적 반응의 실험적 연구에는 많은 시간과 비용이 소모된다. 이러한 실험적 연구의 단점을 극복하고자 생물학적 공정의 수학적 모델을 통한 연구가 활발히 진행되고 있다.

수학적 모델 개발의 필요성에 따라 1987년 IAWPRC(현재, IWA) Task Group에서 활성슬러지공정의 해석과 예측을 위한 국제적인 통용모델인 Activated Sludge Model No.1을 소개하였다. ASM 1은 C, N을 제거하는 미생물 heterotrophs와 autotrophs의 거동을 수학적으로 기술하였고, 이 후 1995년에는 PAOs에 의한 생물학적 인 제거와 화학적 침전의 영향을 고려한 ASM 2를 제시하였다. 1999년에는 ASM 2의 확장 모델인 ASM 2d를 발표하였고, 2000년에 발표된 ASM 3은 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 module

을 개발하였다(Rieger et al., 2001).

이러한 활성슬러지모델은 유기물을 하나의 성분으로 간주하지 않고, S_s (용존 생분해성), S_i (용존 난분해성), X_s (입자성 분해성), X_i (입자성 난분해성)으로 나누어 인식한다. 이 구성비는 하수의 발생원과 차집관거의 종류 등에 따라 특성을 갖게 된다. 따라서 하수처리 시스템의 정확한 모델링을 위해서는 모델에 입력하는 유입수의 성상을 분석할 필요가 있다. 또한 공정에 따라 알맞은 모델의 선택과 모델 매개변수의 민감도 분석 및 추정도 모델링을 통한 공정 거동 해석 및 규명을 위해서 반드시 필요하다.

본 연구에서는 이러한 활성슬러지 모델을 이용하여 J하수처리장의 BNR 공정을 모사하기 위해 선행적으로 이루어져야 하는 모델보정을 실시하고자 하였다. 본 연구의 목적은 대상처리장인 J하수처리장의 모델링을 통하여 유입수와 운전조건과의 관계를 파악하는 연구를 위한 전 단계 연구로써, 현장 데이터를 예측하는데 이용하기 위해 필요한 모델의 보정이 주목적이라 할 수 있다. ASM3+ modified Bio-P를 적용하여 대상 BNR공정을 모사하기 위해 유입수의 성상을 분석하고, 민감도 분석 및 매개변수 추정을 수행하여 모델을 보정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상공정

본 연구에서는 기존 BNR 공정이 적용된 J하수처리장의 300일 운전data와 시설용량을 모델에 적용하였으며, J하수

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

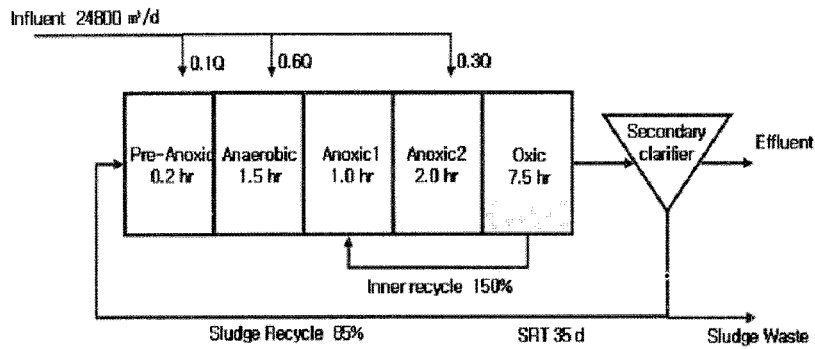


Fig. 1. Diagram of step-feed BNR process.

처리장의 공정개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 BNR공정은 혐기조건에서 일어나는 PAOs의 인방출 반응이 무산소성에서는 저해를 받기 때문에 반응슬러지 내 잔류하는 NOx를 제거하여 인방출 효과를 높이고자 전탈질조를 두었으며, 유입수 내 탄소원을 효과적으로 이용하기 위하여 유입수를 분할주입하는 것이 특징이다. J하수처리장의 평균 유입유량은 24,800 m³/d, 내부반송율 150%, 슬러지 반송율 85%, SRT 35 d, MLSS 2,500 mg/L, 운전온도는 13~28°C 였다.

2.2. EAWAG Bio-P module

ASM2d와 비교했을 때 Bio-P module의 중요한 차이점은 내생호흡 process를 이용한 것과 호기성 decay process와 비교했을 때 무산소의 decay process의 비율이 낮다는 것에 있다. 또 다른 차이점은 혐기성 반응조에서 무기성갈슘-인

침전은 생물학적으로는 발생하지만 모델에는 고려하지 않았다는 것과 인의 화학적 침전을 Bio-P module은 포함하지 않은 것이다(Rieger et al., 2001). 이러한 EAWAG Bio-P module의 동역학식에 대한 표현을 Table 1에 나타내었다. Table 1의 P1을 보면 혐기성 조건에서 PAOs가 PHA를 저장하면서 인방출 반응을 일으키는 역학식을 나타내었고, 이 식은 NOx에 의해 혐기조건이 만족되지 않을 때는 PAOs의 인방출에 저해 효과가 작용하는 것을 고려하지 않았다. 따라서 이러한 모델은 대상처리장의 BNR공정을 잘 모사할 수 없다고 판단하여, 이에 대해 보정한 모델을 적용하였다 (Lee et al., 2006).

2.3. 유입하수 성상 분석

모델에 적용되는 유입수는 처리장의 특성에 따라 각각 다른 성상을 보이기 때문에 OUR실험을 통해 유입수 성상

Table 1. Kinetic rate expression for EAWAG Bio-P module

NO.	Process	Process rate equation
Phosphorus accumulating organisms		
P1	Storage of XPHA	$q_{PHA} \frac{S_S}{K_{SS,PAO} + S_S} \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP,PAO} + X_{PP}/X_{PAO}} X_{PAO}$
P2	Aer. storage of XPP	$q_{PP} \frac{S_O}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4,PP} + S_{PO_4}} \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \frac{K_{max,PAO} - (X_{PP}/X_{PAO})}{K_{iPP,PAO} + K_{max,PAO} - (X_{PP}/X_{PAO})} X_{PAO}$
P3	Anox. storage of XPP	$q_{PP}^{NO,PAO} \frac{K_{O,PAO}}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO,PAO} + S_{NO}} \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4,PP} + S_{PO_4}} \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} \frac{K_{max,PAO} - (X_{PP}/X_{PAO})}{K_{iPP,PAO} + K_{max,PAO} - (X_{PP}/X_{PAO})} X_{PAO}$
P4	Aer. growth of XPAO	$\mu_{PAO} \frac{S_O}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{NH}}{K_{NH,PAO} + S_{NH}} \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4,PAO} + S_{PO_4}} \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} X_{PAO}$
P5	Anox. growth of XPAO	$\mu_{PAO}^{NO,PAO} \frac{K_{O,PAO}}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO,PAO} + S_{NO}} \frac{S_{NH}}{K_{NH,PAO} + S_{NH}} \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4,PAO} + S_{PO_4}} \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} X_{PAO}$
P6	Aerobic endog. respiration	$b_{PAO} \frac{S_O}{K_{O,PAO} + S_O} X_{PAO}$
P7	Anoxic endog. respiration	$b_{PAO} \eta_{NO,end,PAO} \frac{K_{O,PAO}}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO,PAO} + S_{NO}} X_{PAO}$
P8	Aerobic lysis of XPP	$b_{PP} \frac{S_O}{K_{O,PAO} + S_O} X_{PP}$
P9	Anoxic lysis of XPP	$b_{PP}^{NO,lys,PP} \frac{K_{O,PAO}}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO,PAO}} X_{PP}$
P10	Aerobic resp. of XPHA	$b_{PHA} \frac{S_O}{K_{O,PAO} + S_O} X_{PHA}$
P11	Anoxic resp. of XPHA	$b_{PHA} \eta_{NO,resp,PHA} \frac{K_{O,PAO}}{K_{O,PAO} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO,PAO}} X_{PHA}$

을 분석하였다. 실험장치는 3 L의 폭기조와 0.5 L의 DO측정조로 구성하여, 혼합액을 5분 간격으로 반송 및 중지시키며, DO meter(YSI-550A)를 이용하여 측정된 DO농도의 감소율로 OUR을 계산하였다. DO측정조는 표면폭기 방지를 위해 상부를 밀봉하였고, 포기조는 질산화를 방지하기 위해 ATU(1-Allyl-2-thiourea)의 농도가 15 mg/L가 되게 주입하였다. OUR실험결과, 3 단계로 구분되어 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이 때 처음 변곡점이 나타나는 초기 약 1.5 시간까지 나타난 부분이 RBCOD(S_s)의 소모에 따른 OUR 변화로, RBCOD는 (1)을 통하여 산출될 수 있다.

$$RBCOD = \frac{Q_A}{1 - Y_H} \left(\frac{V_{AS} + V_{WW}}{V_{WW}} \right) \quad (1)$$

Where, Q_A = oxygen consumed in area, mg/L
 Y_H = synthesis yield coefficient for heterotrophic bacteria, g cell/g COD used
 V_{AS} = volume of activated sludge used in test, mL
 V_{WW} = volume of wastewater sample, mL

2.4. 민감도 분석

민감도 분석은 ASM3 및 EAWAG Bio-P module에서 제시하는 default값의 50~200%까지 각 매개변수를 변화시키면서 default 값과의 차이를 구하였다. (2)에 나타난 WSSNE (Weighted Sum of Squared Normalized Error)식을 통하여 민감도분석을 실시하여, 그 값이 큰 것을 선정하여 매개변수를 우선적으로 추정하고자 하였다.

$$WSSNE = w_{f1} \cdot w_{f2} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \left[\frac{C_{i,t, \text{de fault parameters}} - C_{i,t, \text{changed parameters}}}{C_{i,t, \text{de fault parameters}}} \right]^2$$

Where, $C_{i,t}$ = Conc. of i at time t in effluent and in-process
 i = Components (TSS, BOD, TN, TP, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$, or $PO_4^{3-}-P$)
 w_{f1} = Weighting factor; 5 for effluent and 1 for in-process
 w_{f2} = weighting factor; 2 for TN, TP, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ and $PO_4^{3-}-P$; 1 for TSS, BOD

2.5. 공정 시뮬레이터 구축 및 모델링

본 연구에서는 BNR공정을 효과적으로 모델링하기 위하여 직접 수정을 통하여 사용자가 개발한 모델의 적용이 가능하고, 그래픽 기반으로 사용이 편리한 GPS-X simulator를 이용하였다.

모델에 필요한 유입수 성상은 실험을 통해 구한 유기물 성상 및 질소·인 성상을 적용하였으며, 생물학적 반응기의 모델은 ASM3+modified Bio-P module을 직접 입력하여 사용하였다. 침전지 모델은 1 dimensional settling velocity model을 이용하였고 공정 Layout 구성과 반응기 체적, 공정흐름과 유입수 분할 주입은 운전인자를 토대로 구성하였다. 이러한 모델링을 통하여 J하수처리장의 BNR 공정을 모사하기 위한 매개변수 추정을 실시하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입수 성상

3회 실시한 OUR실험을 통해 얻은 유입수 COD분율 평균값과 TKN/ NH_4-N 비 및 TP/ PO_4-P 비를 ASM2 및 ASM3에서 제시한 유입수 분율과 비교하여 Table 2에 나타내었다. COD분율은 ASM3에서 제시한 값보다 S_s 와 X_s 가 비교적 높게 나타났으며, 이는 J하수처리장 유입수 중 분뇨가 포함되어있기 때문인 것으로 판단된다. NH_4-N 의 경우는 유입 TKN의 대부분을 차지하였으며, PO_4-P 의 유입 T-P 중 비율은 ASM3에서 제시한 것과 비슷한 비율을 보였다.

Table 2. Model compounds and wastewater compositions

Model compounds	ASM2	ASM3*	This study
TCOD (gO ₂ /m ³)	260 (100%)	260 (100%)	162 (100%)
S_i	30 (11.54%)	30 (11.54%)	12.3 (7.6%)
S_s (S_f+S_A at ASM2)	50 (19.2%)	60 (23.08%)	48.1 (29.7%)
X_i	25 (9.7%)	25 (9.7%)	11.8 (7.3%)
X_s	125 (48%)	115 (44.23%)	89.8 (55.4%)
X_H	30 (11.54%)	30 (11.54%)	0
TKN (gN/m ³)		25 (100%)	32.7 (100%)
S_{NH_4} (gN/m ³)		16 (64%)	30.4 (93%)
T-P (gP/m ³)	6 (100%)		3.8 (100%)
S_{PO_4} (gP/m ³)	3.6 (60%)		2.28 (62%)

*Typical wastewater composition for ASM3 (IWA, 2000)

3.2. 매개변수 추정

민감도분석 결과 WSSNE값이 가장 큰 것부터 순서대로 Fig. 2에 나타내었다. 그 값이 큰 매개변수를 민감한 매개변수로 선정한 결과 인제거 관련 양론계수 1개(Y_{PO_4}), 동역학계수 3개(q_{PHA} , q_{PP} , μ_{PAO}), 탈질 관련 양론계수 2개($Y_{STO,NO}$, $Y_{H,NO}$), 질산화 관련 동역학계수 1개(μ_A), 종속영양미생물 관련 양론계수 2개(Y_{STO,O_2} , Y_{H,O_2}), 동역학계수 2개(μ_H , b_H)로 나타났다. 11개의 민감한 매개변수 중 질소와 인에 관련된 매개변수가 7개로 비교적 영양염류에 관련된 매개변수가 민감한 것으로 나타났다. 이 매개변수의 최적값은 GPS-X의 optimizer기능을 이용하여 매개변수 값을 변화시키면서 시뮬레이션한 결과와 100일 동안의 J하수처리장 운전data를 비교하여 오차가 가장 적은 매개변수의 조합을 선정하였다. 추정된 매개변수와 IWA 및 EAWAG에서 제시한 매개변수의 default 값을 Table 3에 나타내었다.

3.3. 추정된 매개변수를 이용한 모델의 검증

추정된 매개변수가 J하수처리장을 잘 모사하는지 검증하기 위해 200일간의 J하수처리장 운전data와 추정된 매개변수 값을 입력한 모델의 결과를 비교하였다. default 매개변수 값을 변화시키지 않고 시뮬레이션한 결과와 추정된 매개변수로 시뮬레이션한 결과, 현장 data를 Fig. 3에 나타내었다. (a)의 BOD의 경우 1~140일간의 결과에 대해서는 추정된 매개변수에 의한 시뮬레이션 결과가 default값으로

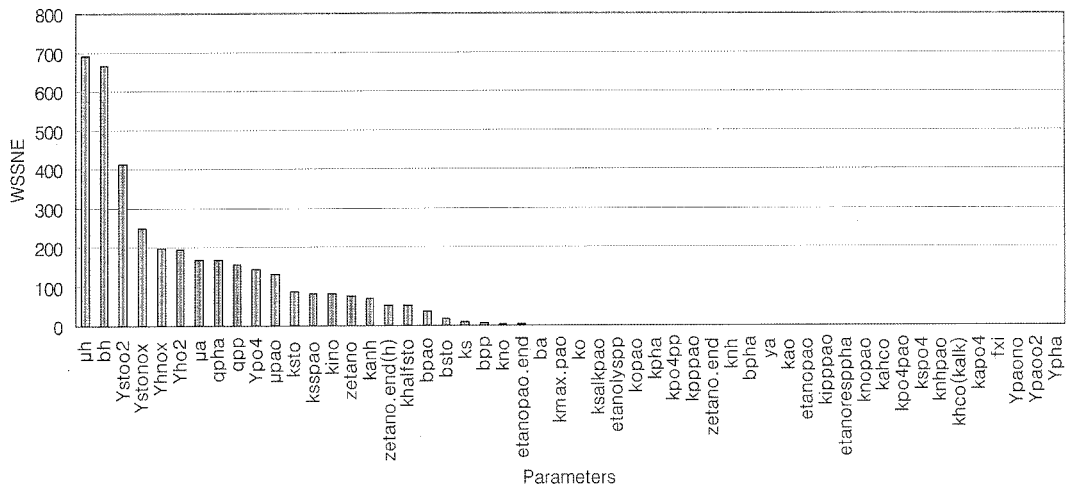
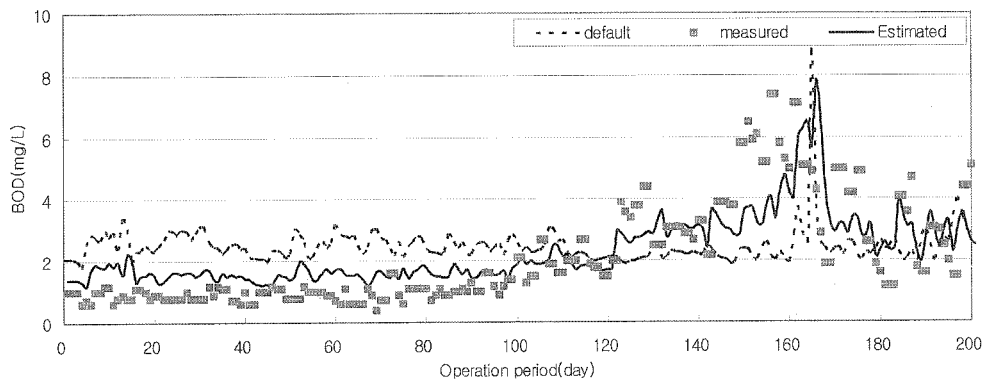
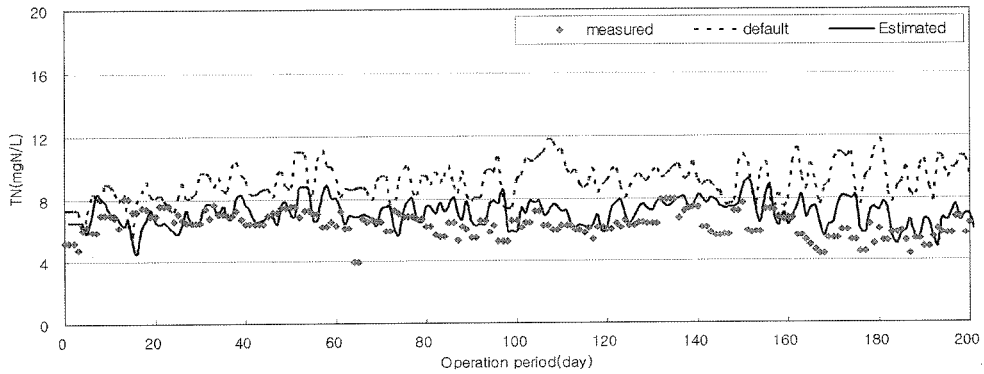


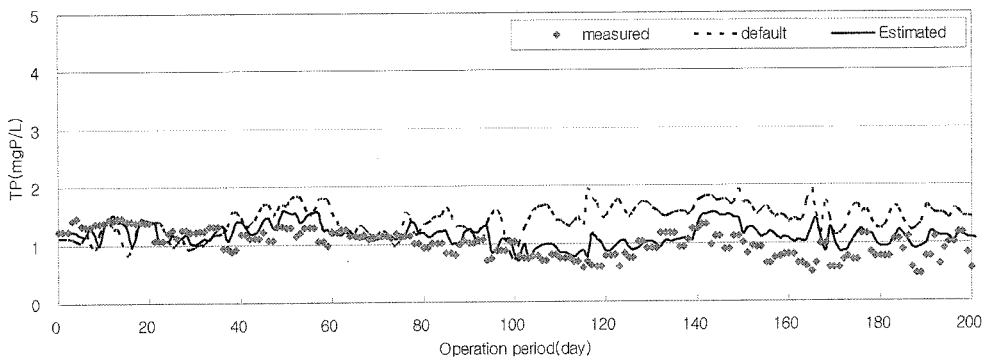
Fig. 2. WSSNE from the sensitivity analysis.



(a) BOD



(b) T-N



(c) T-P

Fig. 3. Verification of estimated parameters.

Table 3. Estimated sensitive parameter value of ASM3+Bio-P

Parameters	Default	Estimated
$Y_{STO,O2}$	0.85	0.7
$Y_{STO,NO}$	0.8	0.64
$Y_{H,O2}$	0.63	0.61
$Y_{H,NO}$	0.54	0.48
Y_{PO4}	0.35	0.31
μ_H	2.0	3.9
b_H	0.2	0.1
μ_A	1.0	1.35
q_{PHA}	6.0	4.98
q_{PP}	1.5	1.8
$\mu_{max,PAO}$	1.0	0.59
SSNE	881.49	264.4

simulation한 결과보다 운전 data를 잘 예측하였다. 그러나 운전 data의 변화폭이 큰 140일 이후의 경우는 두 경우의 시뮬레이션 결과 모두 운전 data를 잘 예측하지 못하였다. (b)의 T-N과 (c)의 T-P의 경우는 추정된 매개변수에 의한 시뮬레이션 결과가 운전 data를 잘 예측하는 것을 볼 수 있었다.

4. 결론

J하수처리장의 수학적 모델링을 위하여 유입수 성상을 분석한 결과 TCOD 중 S_i 7.6%, S_s 29.7%, X_i 7.3%, X_s 55.4% 비율을 나타냈다.

대상 처리장의 BNR공정을 모사하기 위하여 적합하다고 판단한 ASM 3+ modified Bio-P모델의 동역학계수 및 양론계수에 대한 민감도분석을 실시한 결과 $Y_{STO,O2}$, $Y_{STO,NO}$, $Y_{H,O2}$, $Y_{H,NO}$, Y_{PO4} , μ_H , b_H , μ_A , q_{PHA} , q_{PP} , μ_{PAO} 가 민감한 것으로 나타났고, 매개변수를 추정한 결과 각각 0.7, 0.64, 0.61, 0.48, 0.31, 3.9, 0.1, 1.35, 4.98, 1.8, 0.59의 값을 얻을 수 있었다.

Nomenclature

$Y_{STO,O2}$	Aerobic yield of stored product per S_s
$Y_{STO,NO}$	Anoxic yield of stored product per S_s
$Y_{H,O2}$	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 S_s (X_{PAO})

참고문헌

- Ekama, G. A., Dold, P. L. and Marais, G. V. R., Procedures for Determining Influent COD Fractions and The Maximum Specific Growth Rate of Heterotrophs in Activated Sludge System, *Wat. Sci. Tech.*, **18**, pp. 91-114 (1986).
- Gujer, W., Henze, M., Mino, T. and Loosdrecht, M. C. M. V., Activated Sludge Model No. 3, *Wat. Sci. Tech.*, **39**(1), pp. 183-193 (1999).
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. C., Marais, G. v. R. and Loosdrecht, M. C. M. V., Activated Sludge Model No. 2d, ASM 2d, *Wat. Sci. Tech.*, **39**(1), pp. 165-182 (1999).
- IWA Task Group on Matheamtical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment, Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA publishing (2000).
- 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 Aadverse Effect of Nitrate on the Phosphate Release Rate and Improvement of EBPR Process Model, *Wat. Sci. Tech.*, **53**(4-5), pp. 115-123 (2006).
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering 4th Edit*, Mcgraw Hill (2001).
- Rieger, L., Koch, G., Kuhni, M., Gujer, W. and Siegrist, H., The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3, *Water Research*, **35**(16), pp. 3887-3903 (2001).