

# 각종 질소·인 제거공정에서 도출된 미생물 성장 동역학 계수 비교 분석

임세호<sup>†</sup> · 고흥백 · 오영기

연세대학교 공과대학 토목환경공학과 환경공학연구소

## A Comparative Analysis of the Bacterial Growth Kinetic Parameters for Various Biological Nutrient Removal Processes

Se-Ho Lim<sup>†</sup> · Kwang Baik Ko · Young-Khee Oh

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

(Received 1 September 2004, Accepted 10 October 2004)

**Abstract** : In this study, some of bacterial growth kinetic parameters were delineated and evaluated for the biological nutrient removal processes such as the A<sup>2</sup>/O, 4stage-BNR, Intermittent Cycle Extended Aeration System(ICEAS) and Intermittently Aerated Cylindrical Oxidation Ditch(IACOD) processes. Y<sub>H</sub> values for the ICEAS process ranged from 0.71 to 0.74, and were higher than those for the other processes. It seems to indicated that organic carbons uptaked by microorganism were more used up for cell synthesis rather than for energy components in the ICEAS process. b<sub>H</sub> for the ICEAS and IACOD processes were lower than those for A<sup>2</sup>/O and 4stage-BNR processes. The μ<sub>max</sub> · A for the ICEAS was higher than those for the other processes, which indicated that desirable operating conditions for nitrifying bacteria's growth were established.

**keywords** : Y<sub>H</sub>, b<sub>H</sub>, μ<sub>max</sub> · A, A<sup>2</sup>/O process, 4stage-BNR process, ICEAS process, IACOD process

### 1. 서론

하수처리장에 질소·인 제거공정을 도입하기 위해서는 Pilot Plant의 운전을 통해 공정의 적응가능성 및 운전조건을 도출하는 것이 좋은 방법이다. 해외에서는 복잡하고 다양한 하수처리장의 설계나 운영을 위한 공정해석을 하기 위하여 수학적 모델을 흔히 적용하고 있다. 수학적 모델은 반응조 내부에서 오염물질의 거동과 유출수의 오염물질 농도를 예측할 때에 매우 유용하고, 이를 설계시 적용하면 많은 시간과 비용을 절약할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 매우 제한적이기는 하지만 현재 국내에서 가동 중인 질소·인 제거공정을 대상으로 수학적 모델의 근간이 되는 미생물 성장 동역학 계수를 추정하여 비교 분석하고자 한다.

생물학적 하수처리 공정 내에는 박테리아 등을 포함한 다양한 미생물군이 성장하며 이들 간에 매우 복잡한 상호작용이 발현되는 독특한 생태계라고 할 수 있다. 처리공정의 물리적인 특징과 운전조건에 따라 이 생태계내 미생물군의 구성뿐만 아니라 미생물군의 생리적 상태(physiological state)가 결정된다. 다시 말하면 이러한 생태계의 고유한 특성과 생태계내 서식하는 미생물의 복합적인 상태에 따라 독특하고 고유한 성장 동역학이 각 생물반응조에 나타나게 된다(Gray et al., 1999).

이러한 성장동역학은 각종 동역학 계수(kinetic parameters) 및 화학양론적인 상수(stoichiometric coefficients)가 포함된 성장동역학식인 수학적 모델로 표시할 수가 있다. 본 연구에서 제시한 5가지 동역학계수는 연구대상 공정의 특징을 나타내는 매우 중요한 인자로서 상호 비교가 가능하기는 하지만 어느 한 공정이 타 공정에 비하여 처리효율이 우수한지의 여부를 판단하는 지표로서는 사용하지 않는다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 실험장치

##### 2.1.1. A<sup>2</sup>/O 공정

A<sup>2</sup>/O공정은 Lab-scale로 제작하여 전체 유량은 28.8L/d, 총 HRT는 6.5hr, SRT는 약 15day로 운영하였다. 각 반응조의 전체 용적은 7.8L(혐기조: 1.8L, 무산소조: 1.2L, 포기조: 4.8L, 침전지: 3.6L)가 되도록 구성하였다. 유입하수를 기준으로 하여 내부반송은 200%, 슬리지 반송은 100%, MLSS는 2,500mg/L, SRT는 15day, pH는 6.2~6.9, 호기조의 DO는 1.9~3.5mg/L 그리고 수온은 25℃를 유지하였다.

##### 2.1.2. 4단계 BNR 공정

4단계 BNR 공정은 경기도 B사에서 운영중인 실제 하수처리장을 대상으로 실험을 실시하였다. 전체 유량은 127,000m<sup>3</sup>/d, 총 HRT는 6.5hr, SRT는 약 15~30day로 운영하였다. 반응조의 전체 용적은 약 6만m<sup>3</sup>(전무산소조 :

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
bullx@hanmail.net

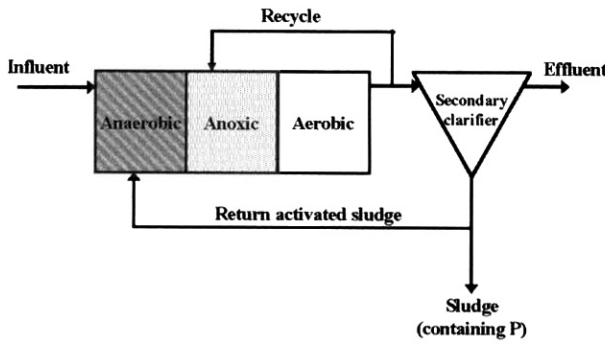


Fig. 1. Schematic diagram of the A<sup>2</sup>O process.

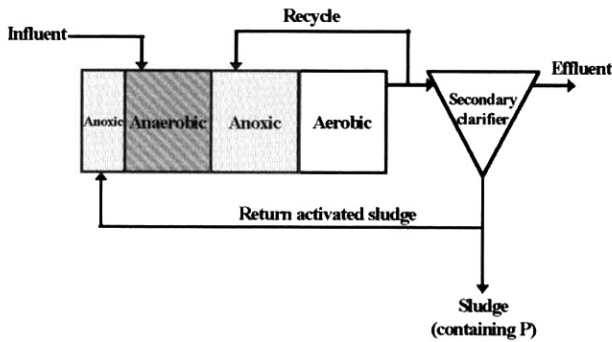


Fig. 2. Schematic diagram of the 4stage BNR process.

238.68m<sup>3</sup> 8개, 혐기조 : 238.68m<sup>3</sup> 24개, 무산소조 : 238.68m<sup>3</sup> 64개, 포기조 : 4,608m<sup>3</sup> 8개)로 구성되어 있다. 유입하수를 기준으로 하여 내부반응은 100%, 슬러지 반응은 100% 그리고 MLSS는 2,000~3,000mg/L를 유지하였다.

2.1.3. ICEAS 공정

ICEAS공정은 Lab-scale로 제작하여 전체 유량은 30L/d, 총 HRT는 15hr, SRT는 약 12day로 운영하였다. 각 반응조의 전체 용적은 30.64L로 전처리조, 주반응조의 HRT는 각각 2.2hr, 13.2hr가 되도록 구성하였다. 주반응조는 Fig. 4와 같은 방식으로 포기/비포기 7단계, 침전단계, 유출단계 순으로 운전되었다. 주반응조의 MLSS는 2,500mg/L, SRT는

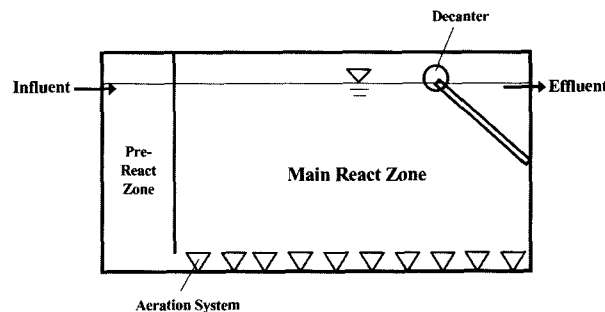


Fig. 3. Schematic diagram of the ICEAS process.

On	Off	On	Off	On	Off	On	Settle	Decant
24	24	24	24	24	24	24	60	60 (min)

Fig. 4. The operating condition of the ICEAS process.

15day, pH는 6.5~7.5 그리고 수온은 25°C를 유지하였다 (고 등, 2002).

2.1.4. IACOD 공정

간헐포기식 원형산화구(IACOD) 공정은 서울시 T 하수처리장에 설치된 Pilot Plant를 대상으로 실험을 실시하였다. 유입 유량은 50m<sup>3</sup>/d, 총 체류시간은 34.9hr, SRT는 약 25~35day로 운영하였다. 혐기조, IACOD 반응조 및 순환반응조의 체류시간은 각각 1.5~2hr, 24hr, 2.8hr으로 유지하였다. 슬러지반송량은 유입유량의 40~50%, MLSS농도는 약 2500mg/L정도로 유지하였다(임 등, 2004).

Lab-scale에서 실증 플랜트까지 대상 공법들의 scale에서는 차이가 나지만, 동역학 계수 추정실험은 모든 공법들이 안정된 효율을 나타내 정상상태에 가깝다고 판단될 때를 선택하여 실시하였다.

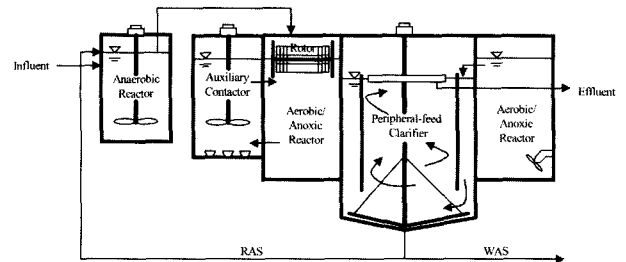


Fig. 5. Schematic diagram of the pilot plant for the IACOD process.

2.2. 실험방법

2.2.1. 종속영양 미생물의 생산계수(Y<sub>H</sub>)

여과한 유입원수와 미생물을 혼합하여 회분식 반응조로 운영하였다. 여과한 유입원수를 사용하였으므로, 이 때의 biomass COD는 TCOD와 SCOD의 차이로 구할 수 있으며, Y<sub>H</sub>는 식 (1)과 같이 ΔBiomassCOD와 ΔSolubleCOD의 비로 계산할 수 있다(Ong, 1990).

$$Y_H = \frac{\Delta BiomassCOD}{\Delta SolubleCOD} \tag{1}$$

2.2.2. 종속영양 미생물의 사멸계수(b<sub>H</sub>)

Y<sub>H</sub>의 값이 측정되었으므로, 식 (2)를 이용하여 b<sub>H</sub>값을 구할 수 있다(Berthouex et al., 1991).

$$\frac{S_{CO} - S_C}{f_A \cdot X_T \cdot \tau} = \frac{b_H}{Y_H} + \frac{1}{Y_H} \cdot \frac{1}{\theta_c} \tag{2}$$

여기서,

S<sub>co</sub> = 유입수의 SCOD (mg/L)

S<sub>c</sub> = 반응조의 SCOD (mg/L)

f<sub>A</sub> = 미생물의 active fraction

X<sub>T</sub> = 반응조의 총미생물 COD (mg/L)

τ = 반응조의 수리학적 체류시간 (hr)

θ<sub>c</sub> = 미생물 체류시간 (day)

2.2.3. 종속영양 미생물의 최대 비성장률 ( $\mu_{max \cdot H}$ )

추정된  $Y_H$ 와 OUR의 측정값을 식 (3)~(5)에 적용하여  $\mu_{max \cdot H}$ 를 계산할 수 있다(Ekama et al., 1986).

$$\mu_{max \cdot H} = K_{ms} \cdot Y_H \quad (3)$$

$$K_{ms} = \frac{\{1/(1-f_{cv} \cdot Y_H)\} \cdot OUR_1 \cdot 24}{(f_A \cdot X_v \cdot V_{mi})} \times (V_{ww} + V_{mi}) \quad (4)$$

여기서,

$f_{cv}$  = sludge의 COD/VSS 비율 (mgCOD/mgVSS)

$OUR_1$  = 초기 최대 산소 섭취율 (mgO/L · hr)

$X_v$  = 회분식 반응조에 첨가된 MLVSS 농도 (mgVSS/L)

$V_{ww}$  = 회분식 반응조에 첨가된 유입원수의 부피 (L)

$V_{mi}$  = 회분식 반응조에 첨가된 미생물 혼합액의 부피 (L)

$$f_A = \frac{X_{vi} - X_{v\infty}}{X_{vi}(1-f_p)} \quad (5)$$

여기서,

$X_{vi}$  = 회분식 실험초기 MLVSS 농도 (mgVSS/L)

$X_{v\infty}$  = 회분식 실험종료시 MLVSS 농도 (mgVSS/L)

$f_p$  = 미생물이 사멸해 형성되는 입상상 생성물질의 비율

2.2.4. 종속영양 미생물의 반포화상수( $K_S$ )

$b_H$ 와  $\mu_{max \cdot H}$ 값이 결정되고, 반응조내  $S_s$ 를 측정하면 식 (6)에 의해  $K_S$ 를 구할 수 있다(Cech et al., 1985; Dold et al., 1986).

$$S_s = \frac{K_S(1/\theta_c + b_H)}{\mu_{max \cdot H} - (1/\theta_c + b_H)} \quad (6)$$

2.2.5. 독립영양 미생물의 최대 비성장률 ( $\mu_{max \cdot A}$ )

독립영양 미생물의 최대 비성장률 값은 하수 성상에 따라 다양한 값을 가지며 식 (7)~(9)을 통해 구할 수 있다(Dritil et al., 1993; Oribon et al., 1994).

$$\mu_{max \cdot A} = \frac{\gamma_{NA} \cdot Y_A}{X_A} (d^{-1}) \quad (7)$$

여기서,

$\gamma_{NA}$  = 질산화 박테리아에 의한 질산화율 (mg NO<sub>3</sub>-N/L/d)

$Y_A$  = 질산화 박테리아의 생산계수

$X_A$  = 반응조내 질산화 박테리아의 VSS농도 (mgVSS/L)

유입수 1L당 생성되는 질산성 질소의 농도( $N_{ng}$ )는 식 (8)로 결정된다(Henze et al., 1987).

$$N_{ng} = N_{ti} - N_{te} - N_s \quad (mgN/L) \quad (8)$$

여기서,

$N_{ng}$  = 유입수 1L 당 생성되는 질산성 질소 (mg NO<sub>3</sub>-N/L)

$N_{ti}$  = 유입수의 TKN 농도 (mgN/L)

$N_{te}$  = 유출수의 TKN 농도 (mgN/L)

$N_s$  = 슬러지 생산에 요구되는 질소 (mgN/L influent)

$$= f_n \frac{V_P \cdot X_V}{Q \cdot R_S} \quad (mgN/L)$$

$f_n$  = VSS내 질소농도 (mgN/mgVSS)

$V$  = 반응조의 부피 (L)

$X_v$  = 실험기간의 평균 VSS농도 (mgVSS/L)

$Q$  = 유입유량 (L/d)

$R_s$  = 슬러지 연령 (d)

$N_{ng}$ 가 결정되면,  $X_A$ 는 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$X_A = \frac{Y_A (N_{ng}) R_S}{(1 + b_{AT} R_S) R_{hn}} \quad (mgVSS/L) \quad (9)$$

여기서,

$R_{hn}$  = 수리학적 체류시간 (d)

3. 결과 및 고찰

3.1. 종속영양 미생물의 생산계수( $Y_H$ )

$Y_H$ 값은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 일반적인 활성슬러지 공정의 생산계수 범위로 알려진 0.46~0.69mgCOD/mgCOD 내외에서 다양한 양상을 나타냈다(Henze et al., 2000).  $Y_H$  값의 크기는 ICEAS, 4단계 BNR, A<sup>2</sup>/O, IACOD 공정의 순으로 높았다. 상대적으로 높은 값을 나타낸 ICEAS 공정은 다른 공정에 비하여 섭취한 유기물을 에너지원으로 이용하기 보다는 세포합성에 더 많이 이용하고 있는 것으로 판단된다. IACOD 공정의  $Y_H$ 값이 가장 낮게 추정된 이유는 장기폭기법의 일종인 산화구법의 변형이기 때문인 것으로 사료되며, 낮은  $Y_H$ 값은 결국 적은 슬러지 생산량으로 이어짐으로써 본 공정의 장점으로 부각될 수도 있다.

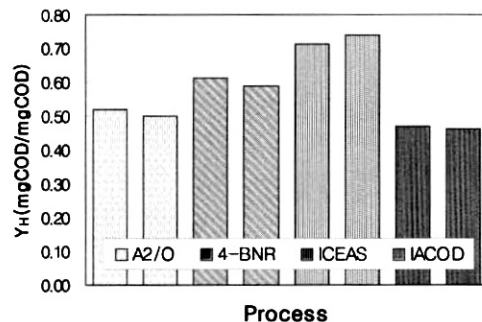


Fig. 6. Variation of  $Y_H$  in each processes.

3.2. 종속영양 미생물의 사멸계수( $b_H$ )

각 공정별  $b_H$ 값은 Fig. 7과 같이 도식화된다.  $b_H$ 값의 크기는 4단계 BNR, A<sup>2</sup>/O, ICEAS, IACOD 공정의 순으로 높

았다. A<sup>2</sup>/O 공정과 이의 변법인 4단계 BNR 공정은 약 0.20day<sup>-1</sup>값을 나타냈으나, ICEAS와 IACOD 공정은 보다 낮은 값들을 나타내 상대적으로 사멸되는 양이 작았음을 보여주었다.

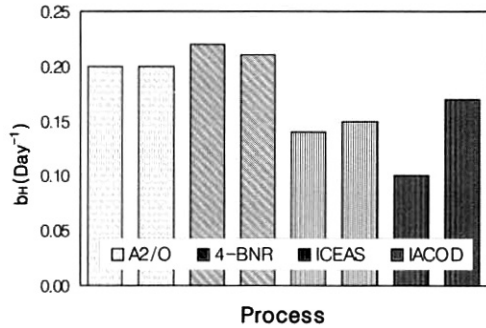


Fig. 7. Variation of  $b_H$  in each processes.

3.3. 종속영양 미생물의 최대 비성장률 ( $\mu_{max} \cdot H$ )

각 공정별  $\mu_{max} \cdot H$  값은 Fig. 8과 같이 도식화될 수 있다.  $\mu_{max} \cdot H$  값은 활성슬러지 공정에서 일반적으로 알려진 범위인 2.4~5.0day<sup>-1</sup>(Dold et al., 1986)내외에서 다양한 양상을 나타냈다.  $\mu_{max} \cdot H$  값의 크기는 4단계 BNR, A<sup>2</sup>/O, ICEAS, IACOD 공정의 순으로 높았다.

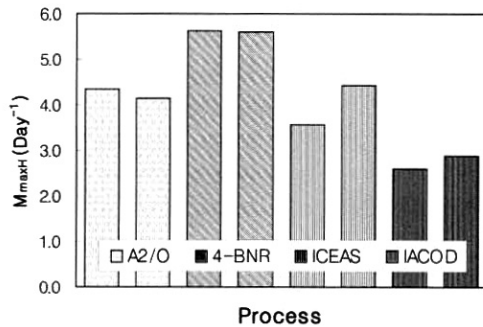


Fig. 8. Variation of  $\mu_{max} \cdot H$  in each processes.

$Y_H$ 에서와 동일하게 IACOD 공정이 가장 낮게 추정되었으며, 이 또한 IACOD 공정이 장기폭기법의 일종인 산화구법의 변법이기 때문인 것으로 사료된다.

3.4. 종속영양 미생물의 반포화상수 ( $K_s$ )

각 공정별  $K_s$  값은 Fig. 9과 같이 도식화될 수 있다.  $K_s$  값의 크기는 ICEAS, IACOD, A<sup>2</sup>/O, 4단계 BNR 공정의 순으로 점차 작게 추정되었다.

최대비성장률과 직접적으로 연관이 있는 반포화상수는 기질 친화도를 보여주는 것으로 SBR 및 산화구변법인 A<sup>2</sup>/O 변법보다 기질 친화도가 높음을 알 수 있다.

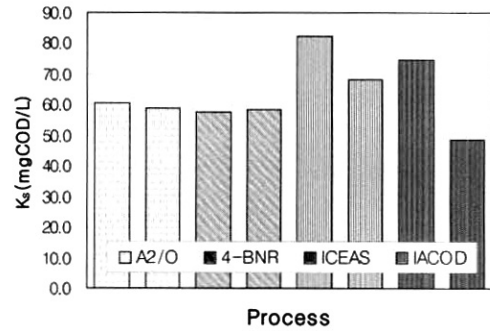


Fig. 9. Variation of  $K_s$  in each processes.

3.5. 독립영양 미생물의 최대 비성장률 ( $\mu_{max} \cdot A$ )

각 공정별  $\mu_{max} \cdot A$  값은 Fig. 10와 같이 도식화될 수 있다. 일반적으로  $\mu_{max} \cdot A$  값은 하수처리장별로 상당히 큰 차이를 나타낸다고 알려져 있다.  $\mu_{max} \cdot A$  값의 크기는 ICEAS, IACOD, 4단계 BNR, A<sup>2</sup>/O 공정의 순으로 높았다.

ICEAS 공정의  $\mu_{max} \cdot A$  값이 다른 공정들에 비해 상대적으로 높게 나타났는데, 이를 통해 타공정에 비하여 질산화 박테리아의 성장에 유리한 환경조건이 ICEAS 공정에서 수립되었음을 추정해 볼 수 있다. 작은 값을 나타내는 다른 공정들도 SRT의 조절을 통해  $\mu_A$  값을 어느 정도 변화시킬 수 있다. 이상과 같이 질소·인 제거공정에서 추정된 미생

Table 1. 질소·인제거 공정에 따른 미생물 성장 동역학 계수

Biomass	Parameters	Units	A <sup>2</sup> /O		4stage-BNR		ICEAS		IACOD	
			1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Heterotrophs	Yield, $Y_H$	mgCOD/mgCOD	0.52	0.50	0.61	0.59	0.71	0.74	0.47	0.46
	Decay coefficient, $b_H$	Day <sup>-1</sup>	0.20	0.20	0.22	0.21	0.14	0.15	0.10	0.17
	Max. specific growth rate, $\mu_{max} \cdot H$	Day <sup>-1</sup>	4.34	4.13	5.63	5.59	3.58	4.44	2.61	2.88
	Half-saturation coefficient, $K_s$	mgCOD/L	60.4	58.7	57.5	58.5	82.5	68.4	74.8	48.6
Autotrophs	Max. specific growth rate, $\mu_{max} \cdot A$	Day <sup>-1</sup>	0.15	0.14	0.18	0.23	0.39	0.42	0.17	0.28

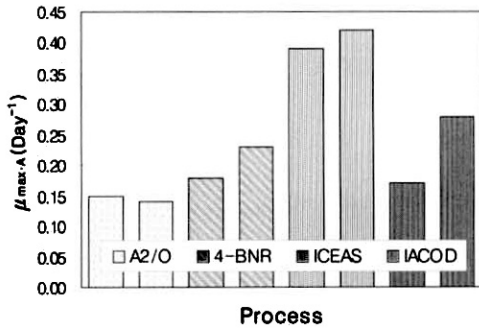


Fig. 10. Variation of  $\mu_{max} \cdot A$  in each processes.

물 성장 동역학 계수를 요약하면 Table 1과 같다.

#### 4. 결론

질소·인 제거공정에 따른 동역학계수를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. IACOD 공정의  $Y_H$ 와  $\mu_{max \cdot H}$ 가 타공정에 비해 낮게 추정된 이유는 장기폭기법의 일종인 산화구법의 변법이기 때문인 것으로 사료되며, 낮은  $Y_H$ 값은 결국 적은 슬러지 생산량으로 이어짐으로써 본 공정의 장점으로 부각될 수도 있다.
2.  $b_H$ 값은  $A^2/O$  공정과 이의 변법인 4단계 BNR 공정에서 약  $0.20\text{day}^{-1}$ 값을 나타냈으나, ICEAS과 IACOD 공정은 이보다 낮은 값을 나타냄으로써 상대적으로 사멸되는 양이 적음을 보여주었다.
3. 최대비성장율과 직접적으로 연관이 있는 반포화상수는 기질 친화도를 보여주는 것으로 ICEAS와 IACOD 공정이  $A^2/O$ , 4단계 BNR 공정보다 기질 친화도가 높음을 알 수 있다.
4. ICEAS 공정의  $\mu_{max \cdot A}$ 값이 다른 공정들에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 이를 통해 이 ICEAS 공정은 질산화 박테리아의 성장에 유리한 환경조건에서 운영되었음을 추정해 볼 수 있다.

#### 참고문헌

고광백, 임세호, 강동한, 정수영, 간헐포기 연속회분식 하수 처리공정에서 운전조건의 변화가 처리효율 개선에 미치는 영향, *대한토목학회지*, **22**(5-B), pp. 739-736 (2002).

임세호, 고광백, 오영기, 윤혜정, 신동현, 간헐포기 원형산화구 공정에서 IACOD 반응조의 HRT 변화에 따른 영양염류 제거, *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동출판회 학술발표회 논문집*, pp. 299-302 (2004).

Berthouex, P.M. and Gand, D.R., A comparison of estimates of kinetic constants for a suspended growth treatment system from various linear transformations, *Water Pollution Control Federation*, **63**, pp. 820-823 (1991).

Cech, J.S., Chudoba, J. and Grau, P., Determination of kinetic constants of activated sludge microorganism, *Water Science and Technology*, **17**(2) pp. 259-272 (1985).

Dold, P.L. and Marais, G.v.R., Evaluation of general the activated Sludge model proposed by IAWPRC task group, *Water Science and Technology*, **18**(6), pp.63-89 (1986).

Dold, P.L. and Marais, G.v.R., Evaluation of general the activated sludge model proposed by IAWPRC task group, *Water Science and Technology*, **18**(6), pp. 63-89 (1986).

Drtilil, M., Nemeth, P. and Bodik, I., Kinetic constants of Nitrification, *Water Research*, **27**, pp. 35-39 (1993).

Ekama, G.A, Dold, P.L. and Marais, G.v.R., Procedures for Determining influent COD fractions and maximum specific growth rate fo hetrotrophs in activated sludge systems, *Water Science and Technology*, **18**(6), pp. 91-114 (1986).

Gardy, Jr. C.P.L., Daigger, G.T. and Lim, H.C., *Biological Wastewater Treatment*, Second Editon, Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc., New York, pp.295-341 (1999).

Henze, M., Grady, C.P.L.Jr., Gujer, W., Marais, G.v.R. and Matsuo, T., A general model for single-sludge wastewater treatment system, *Water Research*, **21**, pp. 505-515 (1987).

Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M.v., *Activated sluded models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London, England, pp.23-25 (2000).

Ong, S.L., A comparison of estimates of kinetic constants for a suspended growth treatment system form various linear transformations, *Water Pollution Control Federation*, **62**, pp.894-900 (1990).

Oribon, D. and Artan, N., *Modeling of activated sludge systems*, Technical publishing, Lansaster, PA, pp.96-103 (1994).