

## 하·폐수처리장에서의 생물학적 질소제거 프로그램 검증

이병대·김희선<sup>†</sup>

위덕대학교 보건학부

<sup>†</sup>안동대학교 전자정보산업학부

(2007년 8월 5일 접수 ; 2007년 12월 7일 채택)

### Verification of biological nitrogen removal program in sewage or wastewater treatment plants

Byung-Dae Lee · Hee-Sun Kim<sup>†</sup>

*Division of Health, Uiduk University, Gyeongju 780-713, Korea*

<sup>†</sup>*School of Electronic & Information Industrial Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea*

*(Received August 5, 2007 ; Accepted December 7, 2007)*

**Abstract** : Based on the experiment results of laboratory scale modified anoxic-oxic process for leachate treatment, biological nitrogen removal program was verified in terms of SS, COD, and TN concentration. These measured water qualities concentration could be predicted by biological nitrogen removal program with  $R^2$  of 0.994, 0.987, 0.990, respectively. No error was occurred between water qualities concentration and quite wide range of water qualities concentration (i.e., 50-4200 mg/L) during the modelling. Each unit and final effluent of simulated concentration was kept good relationship with that of measured concentration therefore this biological nitrogen removal program for sewage or wastewater treatment plants has good reliance.

**Keywords** : Sewage, wastewater, internal recycling, nitrification, denitrification, anoxic tank, oxic tank, nitrogen removal, verification.

### 1. 서 론

지난 30년간 하·폐수 중의 질소를 생물학적으로 제거하는 기술들이 많이 개발되어 왔고 AO, A2O공법 등을 비롯한 실용화에 성공한 공법들이 도입되고 있다[1-3]. 이러한 공법들의 대부분은 생물학적 질소제거를 위해 무산소

(anoxic)조와 호기조(oxic)의 적절한 조합으로 이루어져있다. 호기조에서 암모니아성 질소를 질산성 질소로 산화시킨 후, 무산소조에서 질산성 질소가 질소가스로 탈질이 일어나는 원리를 이용한 공법이다. 일반적으로 탈질에 필요한 탄소원은 유입수 중의 유기물을 이용하거나 외부 탄소원(메탄올 등)을 이용하기도 한다[4-5]. 생물학적 질소제거 메커니즘을 수리적으로 계산하는 모델도 ASMI를 시작으로 많이 개발되어

<sup>†</sup>주저자 (e-mail : hskim@andong.ac.kr)

왔다[6-8]. 본 연구의 선행연구로 무산소-호기 공법[9] 및 step-feed공법[10]을 대상으로 하여 기존 문헌에 보고된 하·폐수처리장의 운전 및 수질 데이터를 이용하여 하·폐수처리장에서의 생물학적 질소제거 모델의 안정성을 평가한 결과, 시뮬레이션 도중에 error나 bug가 발생하지 않았다. 그러나 앞의 선행연구에서 나타난 문제점으로는 최종유출수의 표준편차가 무산소-산소공법인 경우  $\pm 4.1\text{mg/L}$ , step-feed공법인 경우  $\pm 6.0\text{mg/L}$ 로서 비교적 컸었다. 이러한 원인으로 는 선행연구에서는 하·폐수처리장의 운전 및 수질 데이터를 문헌에서 발췌하여 사용한 관계로 시뮬레이션의 입력항목인 수질 데이터 및 계산에 사용된 질화/탈질 반응식의 파라미터 값 등이 문헌에 없는 경우가 많아 임의로 가정한 값을 입력한 관계로 계산이 정확하게 못했기 때문이라고 판단된다[11-12].

그러므로 본 연구에서는 포항시 A매립장의 침출수를 대상으로 무산소-호기 변형공법을 적용하고 실측한 수질데이터 및 파라미터를 본 모델의 입력항목을 적용하여 본 프로그램의 신뢰성을 검증 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 처리장 개요 및 운전자료

본 연구에서 고려한 무산소-호기 변형공법을 Fig. 1에 나타내었다. 첫 번째와 네 번째 반응조는 탈질을 위한 무산소조로 운전하고 두 번째, 세 번째, 다섯 번째, 여섯 번째 반응조는 질화를 위해 호기조로 운전하는 공정이다. 무산소조에서 용이하게 탈질이 일어나게 하기위해 유입수 일부는 네 번째 무산소조로 분배시켰다. 일반적으로 생물학적 질화 및 탈질에 의한 질소제거 효율이 높지 않기 때문에 호기조로부터 무산소조로 내부 순환을 시켜 탈질 및 질화의 효율을 극대화시킨 공법이다.

실제 Lab. scale의 각 반응조의 운전 자료는 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 모델 파라미터

본 연구에 사용된 모델은 Quick Basic(ver. 4.5)으로 만들어 졌으며, 프로그램에 대한 설명은 선행 연구[9-10]를 참조하기 바란다. 새롭게

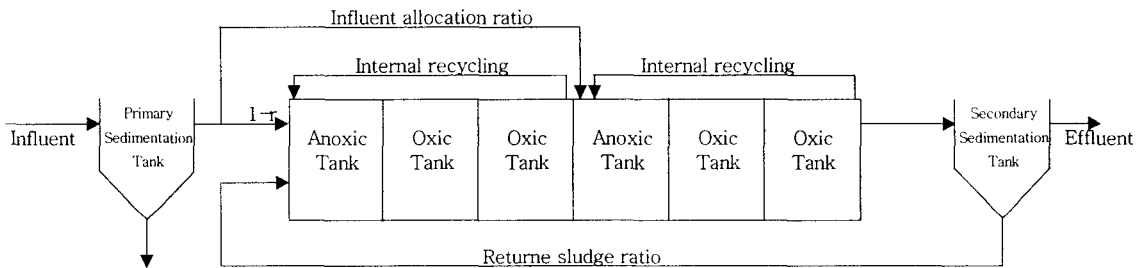


Fig. 1. Typical configuration of anoxic-oxic-oxic-anoxic-oxic-oxic process.

Table 1. Operation Conditions and Dimension

Reactors	Volume of tank(m <sup>3</sup> )	Flow rate (m <sup>3</sup> /d)	HRT (hr)	MLSS (mg/L)	DO Conc. (mg/L)	Temperature(°C)	Internal recycling ratio	Return sludge ratio	Influent allocation ratio*
First anoxic	4.1	8.3	10.5	2800	< 0.3	21	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7
Second oxidic			11.6	2500	< 0.3	22	-	0.3	-
Third oxidic			11.7	2500	4-5	22	-	0.3	-
Fourth anoxic			11.7	2800	3-4	21	0.3-0.5	0.5-0.7	0.3
Fifth oxidic			9.9	2500	3-4	22	-	0.3	-
Sixth oxidic			9.9	2500	2-3	22	-	0.3	-

수정된 모델의 입력 파라미터를 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 입력 파라미터는 유기물 변수로서 먼저 크게 생물학적으로 분해하기 쉬운 물질과 어려운 물질로 나누고, 이를 다시 부유성 물질과 용해성 물질로 나누어 4가지 변수로 하여 SHBOM, SEBOM, PHBOM 그리고 PEBOM로 표시하였다. 미생물 변수로는 중속영양 미생물 및 독립영양 미생물을, 질소 변수로는 아질산성 질소, 질산성 질소, 암모니아성 질소를 선정하였다. 한편 본 모델에서의 무산소조 또는 호기조에서 일어나는 8개 항목의 미생물 반응식을 Table 3에 정리하였다. Table 3에 사용된 반응식은 기존의 문헌에서 신뢰성이 검증된 반응식들을 이용하였다 [13-18].

### 3. 결과 및 고찰

본 모델이 필요로 하는 유입 수질데이터 및 운전인자는 포항시 A매립장의 침출수를 대상으로 Lab. scale의 장치를 운전하여 얻은 실측치를 사용하였다[19]. 모든 시뮬레이션은 3회씩 실시하여 시뮬레이션 결과의 재현성을 확인하였다. 실제 실측치와 시뮬레이션 결과를 Table 4에 나타내었다.

SS의 제거 패턴을 Fig. 2에 나타내었다. 유입 SS의 1차 침전지와 첫 번째 무산소조 그리고 최종침전지에서 대부분이 제거됨을 알 수 있었고 모델에서도  $R^2$  값이 0.99 정도로 실측치와 일치하는 것으로 나타났다. 다만 Fig. 2에서도 알 수 있듯이 모든 측정위치에서 모델치가 실측치보다 낮은 농도로 조사되었다. 이러한 원

Table 2. Influent Parameters

Influent data	Influent component	Unit
Total COD	SHBOM + SEBOM + PHBOM + PEBOM + Heterotrops biomass + Autotrops biomass	mgCOD/L
Soluble COD	SHBOM + SEBOM	mgCOD/L
Total BOD	0.7SEBOM + 0.5PEBOM + 0.5Heterotrops biomass + 0.5Autotrops biomass	mgBOD/L
Soluble BOD	0.7 SEBOM	mgBOD/L
VSS	(PHBOM + PEBOM + Heterotrops biomass + Autotrops biomass)	mgVSS/L
SS	VSS+ Inert SS	mgSS/L
Soluble nitrogen	$i_1$ SHBOM + $i_2$ SEBOM + $\text{NO}_x^-$ -N + $\text{NH}_4^+$ -N	mgN/L
Total nitrogen	$i_1$ SHBOM + $i_2$ SEBOM + $i_3$ PHBOM + $i_4$ PEBOM + $\text{NO}_x^-$ -N + $\text{NH}_4^+$ -N + $i_5$ Heterotrops biomass + $i_6$ Autotrops biomass	mgN/L

COD: Chemical oxygen demand

BOD: Biochemical oxygen demand

VSS: Volatile suspended solid

SS: Suspended solid

SHBOM: Soluble hard biodegradable organic matter

SEBOM: Soluble easily biodegradable organic matter

PHBOM: Particulate hard biodegradable organic matter

PEBOM: Particulate easily biodegradable organic matter

Table 3 Process Kinetics and Stoichiometry for Carbon Oxidation, Nitrification and Denitrification

k	Variable (x,t) →		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Process Rate · ρ <sub>k</sub> (ML <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> )
	Process	(v, t, s)											
1	Aerobic Decomposition of Soluble Substrate		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	$K_{300} \cdot \theta_5^{T-20} \cdot \frac{X_9}{K_5 + X_2} \cdot \frac{K_7}{K_{OS} + X_7} \cdot X_5$
2	Anoxic Decomposition of Soluble Substrate	-1					Y <sub>M</sub>		Y <sub>H-1</sub>	$\delta_2(Y_{H-1})$	$\frac{Y_{Hf5}}{Y_{Hf5} - 1}$	$\delta_1 (i_2 - Y_{Hf5})$	$K_{300} \cdot \theta_5^{T-20} \cdot \frac{X_9}{K_5 + X_2} \cdot \frac{K_{OS}}{K_{OS} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{SV} + X_8} \cdot \eta_8 \cdot X_5$
3	Aerobic Decomposition of Particulate Substrate								Y <sub>H-1</sub>		$i_4 - Y_{Hf5}$	$\delta_1 (i_1 - Y_{Hf5})$	$K_{330} \cdot \theta_7^{T-20} \cdot \frac{X_4}{K_7 + X_1} \cdot \frac{X_7}{K_{OA} + X_7} \cdot X_5$
4	Anoxic Decomposition of Particulate Substrate				-1					$\delta_2(Y_{H-1})$	$\frac{Y_{Hf5}}{Y_{Hf5} - 1}$	$\delta_1 (i_4 - Y_{Hf5})$	$K_{120} \cdot \theta_7^{T-20} \cdot \frac{X_4}{K_7 + X_1} \cdot \frac{K_{OAT}}{K_{OAT} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{TV} + X_7} \cdot \eta_8 \cdot X_5$
5	Aerobic Self-Decomposition of Heterotrops		f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	-1		f <sub>1</sub> +f <sub>2</sub> +f <sub>3</sub> +f <sub>4</sub> -1		$i_5 - \sum f_{11}$	$\delta_1 (i_5 - \sum f_{11})$	$b_{H20} \cdot \theta_H^{T-20} \cdot \frac{X_7}{K_{OH} + X_7} \cdot X_5$
6	Anoxic Self-Decomposition of Heterotrops									$\delta_2(\sum f_{11})$	$\sum f_{11}$	$\delta_1 (i_8 - \sum f_{11})$	$b_{H20} \cdot \theta_H^{T-20} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{TV} + X_8} \cdot \eta_H \cdot X_5$
7	Nitrification of Ammonium Nitrogen							Y <sub>A</sub> / <i>i</i> <sub>6</sub>	$-\delta_3(1 - Y_A) + Y_A/i_3$	1-Y <sub>A</sub>	-1	$\delta_1 (Y_A - 2)$	$K_{330} \cdot \theta_N^{T-20} \cdot \frac{K_9}{K_{NH} + X_9} \cdot \frac{K_7}{K_{ON} + X_7} \cdot [1 - 0.833 \cdot (7.2 - \frac{7.1 \cdot X_{10}}{K_{4L} + X_{10}})] \cdot X_6$
8	Self-Decomposition of Autotrops		f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>		-1	f <sub>1</sub> +f <sub>2</sub> +f <sub>3</sub> +f <sub>4</sub> -1		$i_6 - \sum f_{11}$	$\delta_1 (i_6 - \sum f_{11})$	$b_{120} \cdot \theta_A^{T-20} \cdot \frac{X_7}{K_{OA} + X_7} \cdot X_6$
Observed Conversion Rates (H L <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> ) $r_1 = \sum v_{ik} \cdot \rho_k$													
Stoichiometric Parameters Heterotrophic Yield: Y <sub>M</sub> (COD/COD) Autotrophic Yield: Y <sub>A</sub> (N/N) Mass N/Mass COD in i Component (i=1-6) : i <sub>2</sub> , i <sub>3</sub> , i <sub>4</sub> , i <sub>5</sub> , i <sub>6</sub> Fraction of Biomass Yielding i Component (i=1-4): f <sub>1</sub> , f <sub>2</sub> , f <sub>3</sub> , f <sub>4</sub> Alkalinity Change by NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (CaCO <sub>3</sub> /N) : δ <sub>1</sub> =3.56 DO Equivalent on Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -H/O): δ <sub>2</sub> =0.35 DO Consumption Ratio by Nitrification(O/N): δ <sub>3</sub> =4.57													
Reaction rate coefficients at 20°C(1/day): K <sub>320</sub> , K <sub>X20</sub> , b <sub>H20</sub> , K <sub>N20</sub> , b <sub>N20</sub> Thermal effect coefficients: θ <sub>5</sub> , θ <sub>7</sub> , θ <sub>N</sub> , θ <sub>H</sub> , θ <sub>A</sub> Half-saturation coefficients(mg/L): K <sub>5</sub> , K <sub>OS</sub> , K <sub>SV</sub> , K <sub>8</sub> , K <sub>OA</sub> , K <sub>ON</sub> , K <sub>OH</sub> , K <sub>NH</sub> , K <sub>4L</sub> , K <sub>ON</sub> Correction factor for anoxic reaction: η <sub>8</sub> , η <sub>H</sub> Temperature(°C): T													
AlkalinityM(CaCO <sub>3</sub> )L <sup>-3</sup>													
Amonium nitrogenM(N)L <sup>-3</sup>													
Oxidized nitrogenM(N)L <sup>-3</sup>													
Oxygen (negative COD)M(COD)L <sup>-3</sup>													
Autotrophic biomassM(COD)L <sup>-3</sup>													
Heterotrophic biomassM(COD)L <sup>-3</sup>													
PEBOMM(COD)L <sup>-3</sup>													
PHBONM(COD)L <sup>-3</sup>													
SEBOMM(COD)L <sup>-3</sup>													
SHBOM M(COD)L <sup>-3</sup>													

Table 4. Water Qualities of Measured or simulated Value in WWTPs(Unit: mg/L)

Date	Influent quality items		Plant influent*	First anoxic	Second oxic	Third oxic	Fourth anoxic	Fifth oxic	Sixth oxic	Plant effluent
	SS	M* S**								
2004. 3.15 - 5.19	SS	M*	241.3	140.9	129.2	120.8	111.2	108.9	107.6	49.7
		S**		168.1	140.1	134.5	121.8	115.1	117.5	51.4
	COD	M*	4160.2	1976.1	1640.2	1481.1	1359.6	1259.0	1185.9	695.1
		S**		2104.8	1721.5	1444.5	133.5	1140.8	997.8	675.4
	TN	M*	2012.5	776.8	495.6	408.9	292.4	270.4	250.9	249.9
		S**		8.25.1	511.8	448.1	312.5	295.1	244.5	236.1

\* : Measured Value  
 \*\*: Simulated Value

인은 anoxic, oxic 반응조에서 미생물에 의한 SS 제거 반응식의 정확성이 아직 높지 못한 것에 기인하는 것으로 추측된다. 향후 이 부분 대한 추가연구가 이루어져야 할 것이다.

에 의한 질소제거 경향을 보이고 있다. 무산소조에서의 탈질반응이 산소조에서의 질화반응보다 상대적으로 과대평가되는 경향을 보이고는 있으나 모델치와 실측치가 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다.

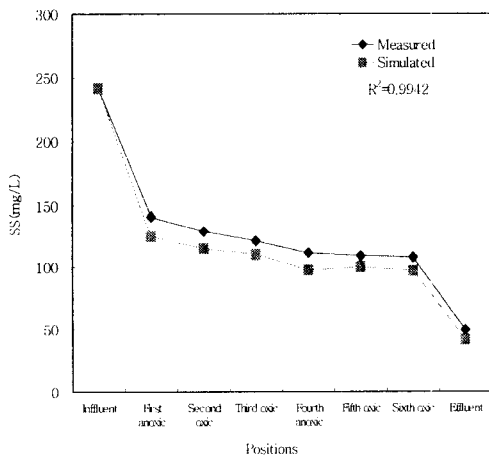


Fig. 2. Comparison of simulated and measured SS concentration in each reactor

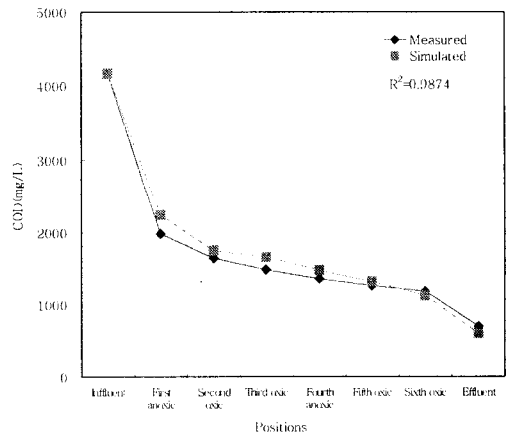


Fig. 3. Comparison of simulated and measured COD concentration in each reactor

유기물의 지표인 COD의 제거 패턴을 Fig. 3에 나타내었다. 첫 번째 무산소조에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 탈질반응에 의한 다량의 유기물 소비로 인해 COD농도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 모델치와 실측치 사이에 전반적으로 양호한 관계를 보여주고 있다.

TN의 경우에는 Fig. 4에 나타난 것처럼 첫 번째 무산소조에서 탈질에 의해 대부분의 질소 제거가 일어나고 네 번째 무산소조에서도 탈질

Fig. 5에는 유입수, 유출수, 첫 번째 및 네 번째 무산소조, 두 번째, 세 번째, 다섯 번째, 여섯 번째 산소조에서의 SS, COD, TN에 대한 실측농도와 모델농도와와의 상관관계를 나타내고 있다. 수질항목에 따른 실측농도와 모델농도 간의 오차는 거의 없었으며, 50mg/L~4200mg/L의 넓은 농도 범위에서 R<sup>2</sup>값이 0.989이상으로 나타나, 전체적으로 좋은 상관성을 나타내어 본 모델의 신뢰성이 검증 되었다고 판단된다.

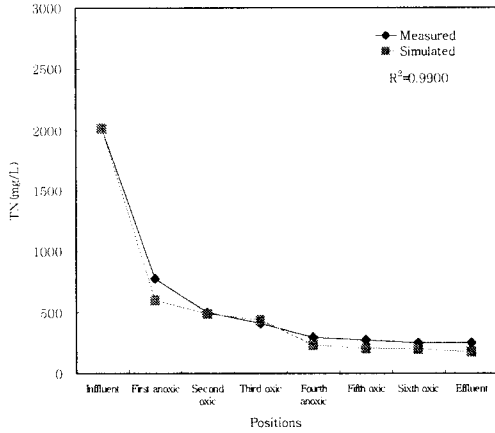


Fig. 4. Comparison of simulated and measured TN concentration in each reactor

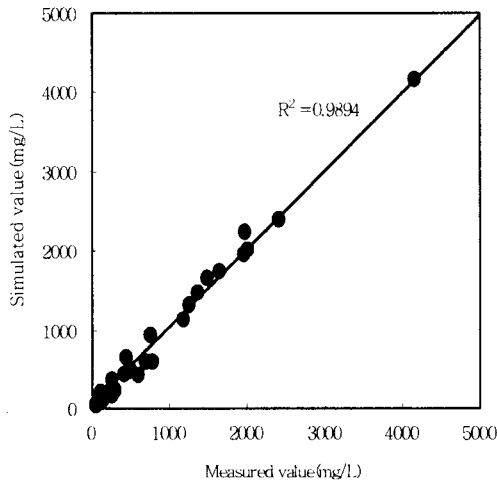


Fig. 5. Comparison of various simulated and reported value in final effluent.

#### 4. 결론

실제 매립장 침출수를 대상으로 무산소-호기 변형공법을 Lab. scale로 운전하여 얻은 실측치와 모델치를 비교하여 하·폐수처리장의 생물학적 질소제거 프로그램의 신뢰성을 검증한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. SS 및 COD의 경우 모델치와 실측치의  $R^2$  값이 0.994, 0.987로 나타나 비교적 좋은 상관성을 나타내었고, TN의 경우에는  $R^2$  값이

0.990으로 이전의 연구결과보다 개선된 상관성을 나타내었다.

2. 수질항목(SS, COD, TN)에 따른 실측농도와 모델농도 간의 오차는 거의 없었으며, 수질항목의 농도가 50mg/L-4200mg/L의 넓은 농도 범위에서  $R^2$ 값이 0.989이상으로 좋은 상관성을 나타내었다.
3. 각 반응조 유출수 중의 SS, COD, TN 실측농도와 모델치가 좋은 상관성을 나타내었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2006년도 안동대학교 특성화 추진 지원사업에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

1. R. He, X.-W. Liu, Z.-J. Zhang, and D.-S. Shen, Characteristics of the Bioreactor Landfill System using an Anaerobic-aerobic Process for Nitrogen Removal, *Bioresource Tech.*, **98**(13), 2526 (2007)
2. G. Zhu, Y. Peng, S. Wang, S. Wu, and B. Ma, Effect of Influent Flow Rate Distribution on the Performance of Step-feed Biological Nitrogen Removal Process, *Chem. Eng. J.*, **131**(1-3), 319 (2007)
3. J. Guo, Q. Yang, Y. Peng, A. Yang, and S. Wang, Biological Nitrogen Removal with Real-time Control using Step-feed SBR Technology, *Enzyme Microbial Tech.*, **40**(6), 1564 (2007)
4. U.S. EPA, "Manual Nitrogen Control", U.S. EPA, Washington (1993)
5. N. J. Joran, P. Lowe, and ED I. Stentiford, "Nutrient Removal from Wastewaters", Technomic, Lancaster (1994)
6. M. Henze, C. P. L. Grady, W. Gujer, GvR. Marais, and T. Matsuo, "Activated Sludge Model No. 1. IAWQ Scientific and Technical Report No.1," P. 33, IAWQ, London (1987)
7. M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo,

- M. Wentze, GvR. Marais, and MCM. Loosdrecht, Activated Sludge Model No. 2d., *Wat. Sc. Tech.*, **39**(1), 165 (1999)
8. J. S. Huang, C. C. Tsai, H. H. Chou, and W. H. Ting, Simulation Modeling for Nitrogen Removal and Experimental Estimation of Mass Fractions of Microbial Groups in Single-sludge System, *Chemosphere*, **62**(1), 61 (2006)
  9. B.-D. Lee, and K.-H. Cheong, Verification of Biological Nitrogen Removal Model in Anoxic-oxic Process, *J. Environ. Sci.*, **14**(12), 1155 (2005)
  10. B.-D. Lee, Modeling for Biological Nitrogen Removal in Step-Feed Process, *J. Kor. Oil Chem. Soc.*, **22**(1), 62 (2005)
  11. M. A. Z. Coelho, C. Russo, and O. Q. F. Araújo, Optimization of a Sequencing Batch Reactor for Biological Nitrogen Removal, *Wat. Res.*, **34**(10), 2809 (2000)
  12. G. Koch, M. Kühni, and H. Siegrist, Calibration and Validation of an ASM3-based Steady-state Model for Activated Sludge Systems—part I: Prediction of Nitrogen Removal and Sludge Production, *Wat. Res.*, **35**(9), 2235 (2001)
  13. J. Makinia, and S. A. Wells, A General Model of the Activated Sludge Reactor with Dispersive Flow—I. Model Development and Parameter Estimation, *Wat. Res.*, **34**(16), 3987 (2000)
  14. S. C. F. Meijer, M. C. M. van Loosdrecht and J. J. Heijnen, Modelling the Start-up of a Full-scale Biological Phosphorous and Nitrogen Removing WWTP, *Wat. Res.*, **36**(19), 4667 (2002)
  15. J. Carrera, J. A. Baeza, T. Vicent, and J. Lafuente, Biological Nitrogen Removal of High-strength Ammonium Industrial Wastewater with Two-sludge System, *Wat. Res.*, **37**(17), 4211 (2003)
  16. B.S. Akin, and A. Ugurlu, Monitoring and Control of Biological Nutrient Removal in a Sequencing Batch Reactor, *Process Biochem.*, **40**(8), 2873 (2005)
  17. S. Chakraborty, and H. Veeramani, Effect of HRT and Recycle Ratio on Removal of Cyanide, Phenol, Thiocyanate and Ammonia in an Anaerobic - anoxic - aerobic Continuous System, *Process Biochem.*, **41**(1), 96 (2006)
  18. G. Ruiz, D. Jeison, O. Rubilar, G. Ciudad, and R. Chamy, Nitrification - denitrification via Nitrite Accumulation for Nitrogen Removal from Wastewaters, *Bioresource Tech.*, **97**(2), 330 (2006)
  19. Taelim Industry Co., "Biological Nitrogen Removal Process for Hodong Landfill Leachate", Pohang, (2003)