

## 무산소-산소 공정에서 생물학적 질소 제거 모델의 검증

이 병 대 · 정 경 훈\*

위덕대학교 보건학부, \*조선대학교 환경공학과  
(2005년 2월 4일 접수; 2005년 11월 29일 채택)

### Verification of biological nitrogen removal model in anoxic-oxic process

Byung-Dae Lee and Kung-Hoon Cheong\*

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

\*Division of Environmental Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

(Manuscript received 4 February, 2005; accepted 29 November, 2005)

Anoxic-oxic process were analyzed numerically for the each unit and final TN effluent by Water Quality Management(WQM) model and the results were compared data from these sewage or wastewater treatment plants. No bugs and logic error were occurred during simulation work. All of the simulation results tried to two times were obtained and both results were almost same thus this model has good reappearance. A few of simulation results were deviated with measured data because lack of influent water qualities are reported however simulation results have wholly good relationship with measured data. Also each unit of simulation result was kept good relationship with that of measured data therefore this WQM model has good reliance. Finally, WQM model predicts final TN effluent within  $\pm 4.1$  mg/l.

Key Words : Simulation, Verification, Biological nitrogen removal, Anoxic-oxic process

#### 1. 서 론

하천과 호소에 질소가 다량 포함되어 있으면 용존산소의 결핍, 부영양화와 수초의 과대 증식을 유발하기 때문에 하·폐수처리장 방류수 중의 질소 규제가 강화되고 있는 실정이다. 유입수 중의 질소 제거를 위한 처리방법이 많이 개발되고 있고, 대표적인 예로 무산소조(anoxic)-산소조(oxic) 공정을 들 수 있다. 한편 1987년 IAWQ special group에 의해 개발된 활성슬러지 모델<sup>1)</sup>을 비롯하여 현재까지 The University of Cape Town model<sup>2)</sup>, 개량된 IAWQ activated sludge model(ASM2d)<sup>3)</sup>, Barker and Dold model<sup>4)</sup> 등이 개발되어 질소 제거를 위한 생물학적 모델링에 이용되고 있다. 그러나 실제 처리장에서 적용 가능한 질소 제거 모델의 개발을 위해 복잡한 생물학적 반응, 유입수 중의 여러 가지 독성물질 및 난분해성물질들이 고려되어야 하며 이

러한 항목까지 고려된 모델의 개발에는 미치지 못하고 있는 실정이다. 하·폐수 처리 공정의 수질 관리에 이용되는 모델의 하나인 Water quality management(WQM) 모델은 Fujii에 의해 개발<sup>5)</sup>되고 Puvinaayagam에 의해 2계열의 처리 시스템과 풀다운 메뉴가 첨가<sup>6)</sup>되었으며 이<sup>7)</sup>에 의해 물질수지와 논리에러가 검증되고 디버깅되었다.

본 연구에서는 WQM 모델을 이용하여 문헌의 하·폐수처리장(무산소-산소 공정)의 TN 데이터와 simulation TN 데이터를 비교하여 생물학적 질소제거를 위한 본 모델의 신뢰도 및 적용 가능성을 평가하였다.

#### 2. WQM 모델

본 연구에서 대상으로 한 무산소-산소 공정을 Fig. 1에 나타내었고, 시료 채취지점은 그림 속에 숫자로 나타내었다. 무산소-산소 공정은 질소제거를 목적으로 하는 가장 단순한 공정으로서 무산소 탱크에서 유입수 중의 유기물질을 이용하여 탈질이 일어나고 후단의 산소 탱크에서 질산화가 일어나는

Corresponding Author: Byung-Dae Lee, Division of Health, Uiduk University, Gyeongju 780-713, Korea  
Phone: +82-54-760-1702  
E-mail: bdlee@uu.ac.kr

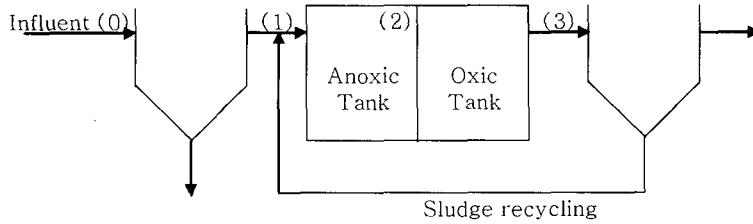


Fig. 1. Typical configuration of anoxic-oxic process.

공정이다.

다음 각 절에 WQM 모델에서 사용한 유입 수질 항목, 대표적인 산소와 무산소 미생물 반응 8가지, 유입 수 변동 그리고 부유물질의 침강인자를 설명하였다.

2.1. 유기물지표 인자

본 WQM 모델에서는 문헌의 자료를 simulation 하기 위해 유기물 변수로서 먼저 크게 생물학적으로 분해하기 쉬운 물질과 어려운 물질로 나누고 이를 다시 부유성 물질과 용해성 물질로 나누어 4가지 파라미터로 하여 SHBOM, SEBOM, PHBOM 그리고 PEBOM로 표시하였다. 미생물 파라미터로는 중속영양 미생물 및 독립영양 미생물을, 질소 파라미

터로는 산화질소 및 암모니아성 질소를 선정하였다. 기타 수질항목으로는 DO, 알칼리도 그리고 무기성 SS로서 총 11가지의 모델 유입수질을 선정하였고 Table 1 에 나타내었다. 또한 본 모델에서는 유입수 중의 유기 질소는 미생물 반응에 의해 산화질소가 되거나 암모니아성 질소로 전환된다고 가정하였다.

유입수 변수 상관관계를 그림으로 나타내면 아래 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

2.2. 생물학적 반응식

본 모델에서는 무산소와 산소 탱크에서 일어나는 8개항의 미생물 반응식이 고려되었고 Table 2에 나타내었다.

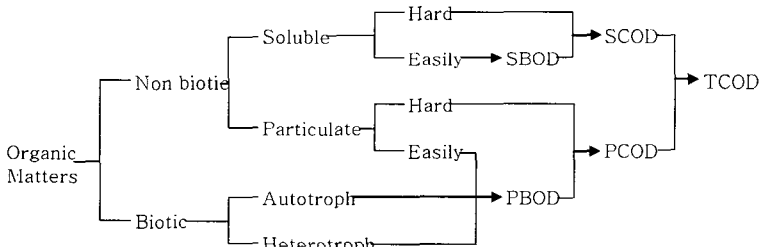


Fig. 2. Organic parameters.

Table 1. Influent parameters

Parameters	Description	Unit
X <sub>1</sub>	Soluble hard biodegradable organic matter (SHBOM)	mgCOD/ℓ
X <sub>2</sub>	Soluble easily biodegradable organic matter(SEBOM)	mgCOD/ℓ
X <sub>3</sub>	Particulate hard biodegradable organic matter(PHBOM)	mgCOD/ℓ
X <sub>4</sub>	Particulate easily biodegradable organic matter(PEBOM)	mgCOD/ℓ
X <sub>5</sub>	Heterotrophic biomass	mgCOD/ℓ
X <sub>6</sub>	Autotrophic biomass	mgCOD/ℓ
X <sub>7</sub>	Dissolved oxygen(DO)	mgCOD/ℓ
X <sub>8</sub>	Oxidized nitrogen	mgN/ℓ
X <sub>9</sub>	Ammonium nitrogen	mgN/ℓ
X <sub>10</sub>	Alkalinity	mgCaCO <sub>3</sub> /ℓ
X <sub>11</sub>	Inorganic particulate	mgSS/ℓ

Table 2. Biological reactions

Reactions (mg/ℓ/day)	Description
P <sub>1</sub>	$K_{S20} \cdot \theta_S^{T-20} \cdot \frac{X_2}{K_S + X_2} \cdot \frac{X_7}{K_{OS} + X_7}$
P <sub>2</sub>	$K_{S20} \cdot \theta_S^{T-20} \cdot \frac{X_2}{K_S + X_2} \cdot \frac{K_{OS}}{K_{OS} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{SN} + X_8} \cdot \eta_S \cdot X_5$
P <sub>3</sub>	$K_{X20} \cdot \theta_X^{T-20} \cdot \frac{X_1}{K_X + X_1} \cdot \frac{X_7}{K_{OX} + X_7} \cdot X_5$
P <sub>4</sub>	$K_{X20} \cdot \theta_S^{T-20} \cdot \frac{X_1}{K_X + X_1} \cdot \frac{K_{OX}}{K_{OX} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{XN} + X_8} \cdot \eta_X \cdot X_5$
P <sub>5</sub>	$b_{H20} \cdot \theta_H^{T-20} \cdot \frac{X_7}{K_{OH} + X_7} \cdot X_5$
P <sub>6</sub>	$b_{H20} \cdot \theta_H^{T-20} \cdot \frac{K_{OH}}{K_{OH} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{XN} + X_8} \cdot \eta_H \cdot X_5$
P <sub>7</sub>	$K_{N20} \cdot \theta_N^{T-20} \cdot \frac{K_9}{K_{NH} + X_9} \cdot \frac{X_7}{K_{ON} + X_7} \left[ 1 - 0.833 \cdot \left( 7.2 - \frac{7.1 \cdot X_{10}}{K_{AL} + X_{10}} \right) \cdot X_6 \right]$
P <sub>8</sub>	$b_{A20} \cdot \theta_A^{T-20} \cdot \frac{X_7}{K_{OA} + X_7} \cdot X_6$
Kinetic parameters	Reaction rate coefficient at 20°C(1/day): K <sub>S20</sub> , K <sub>X20</sub> , b <sub>H20</sub> , K <sub>N20</sub> , b <sub>A20</sub> Thermal effect coefficients: Θ <sub>S</sub> , Θ <sub>X</sub> , Θ <sub>N</sub> , Θ <sub>H</sub> , Θ <sub>A</sub> Half-saturation coefficients(mg/ℓ):K <sub>S</sub> , K <sub>OS</sub> , K <sub>SN</sub> , K <sub>X</sub> , K <sub>OX</sub> , K <sub>XN</sub> , K <sub>OH</sub> , K <sub>NH</sub> , K <sub>OA</sub> , K <sub>AL</sub> , K <sub>ON</sub> Correction factor for anoxic reaction :η <sub>S</sub> , η <sub>X</sub> , η <sub>H</sub> Temperature(°C) : T

Here,

Subscript: S20, X20, H20, N20, and A20 means substrate, biomass, heterotrophs, and alkalinity at 20°C, respectively.

P<sub>1</sub>: Aerobic decomposition of soluble substrate

P<sub>2</sub>: Anoxic decomposition of soluble substrate

P<sub>3</sub>: Aerobic decomposition of particulate substrate

P<sub>4</sub>: Anoxic decomposition of particulate substrate

P<sub>5</sub>: Aerobic self-decomposition of heterotrophs

P<sub>6</sub>: Anoxic self-decomposition of heterotrophs

P<sub>7</sub>: Nitrification of ammonium nitrogen

P<sub>8</sub>: Self-decomposition of autotrophs

이 식들은 두 가지 형태의 미생물, 네 가지 형태의 유기물질, 두 가지 형태의 질소, 알칼리도, 그리고 용존 산소로 구성되어 있다. 이 8개의 미생물 반응 중에 P<sub>1</sub> ~ P<sub>4</sub>는 유기물의 분해에 관한 반응이고 P<sub>7</sub>은 질산화 반응 그리고 P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub>, P<sub>8</sub>은 미생물의 자기 산화에 관계된 반응이다. 탈질 반응은 P<sub>2</sub>(X<sub>2</sub>분해), P<sub>4</sub>(X<sub>4</sub>분해) 그리고 P<sub>6</sub>에 의해 본 모델에서 고려되었다. 또한 수집된 문헌에는 미생물 반응계수를 포함하고 있지 않음으로 Fujii의 실험결과<sup>5)</sup>를 인용하였고 Table 3에 정리하였다.

Fig. 3에 본 모델의 유기적인 동력학적 모델을 보여주고 있다.

### 2.3. 유입유량 변동

보통의 경우 유입유량이 일변화를 하므로 본 모델에서는 유량변동의 표준편차(S.D)를 알면 유입유량변동을 아래와 같이 고려할 수 있다.

유량변동이 a × sin(t)으로 나타난다면

$$(S.D)^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a \times \sin(t))^2 dt$$

$$(S.D)^2 = \frac{a^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos(2t)}{2} dt$$

$$(S.D)^2 = \frac{a^2}{2}$$

그러므로 유량변동인자 a = √2 × (S.D)

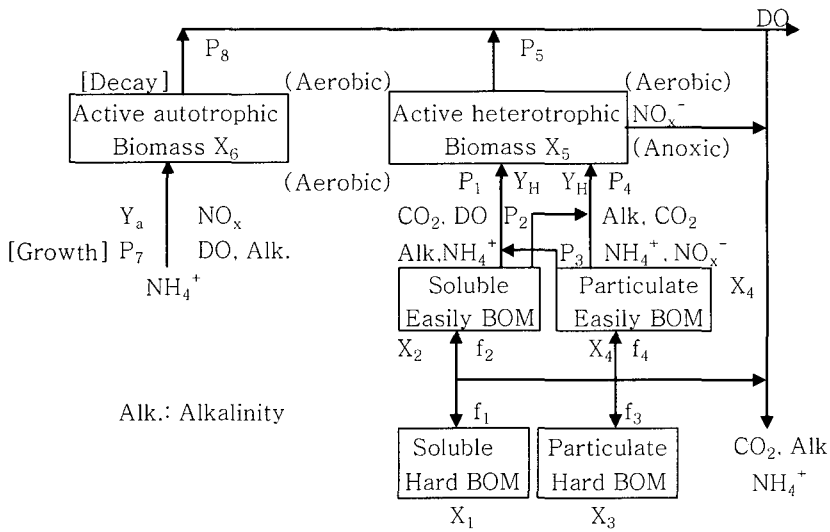


Fig. 3. Schematic diagram of kinetic model.

Table 3. Parameters and coefficients of biological reaction<sup>5)</sup>

Types of coefficient and factor	Symbol	Value	Symbol	Value
Reaction rate coefficient at 20°C(1/day)	$K_{S20}$	0.05	$K_{X20}$	0.009
	$b_{H20}$	0.005	$K_{N20}$	0.0182
	$b_{A20}$	0.0018		
Thermal effect coefficients	$\Theta_S$	1.037	$\Theta_X$	1.062
	$\Theta_N$	1.08	$\Theta_H$	1.046
	$\Theta_A$	1.046		
Half-saturation coefficients (mg/l)	$K_S$	71.4	$K_{OS}$	0.5
	$K_{SN}$	1	$K_X$	400
	$K_{OX}$	0.5	$K_{XN}$	1
	$K_{OH}$	0.2	$K_{NH}$	1
	$K_{OA}$	0.2	$K_{AL}$	2.245
	$K_{ON}$	1.3		
Correction factor for anoxic reaction	$\eta_s$	0.5	$\eta_x$	0.5
	$\eta_H$	0.5		

2.4. 침전지에서의 침강에 관한 인자 고려

침전지의 유입과 유출 SS농도를 알면 침강속도인자를 다음의 계산에 의해 본 모델에 적용할 수 있다. 먼저 침전지에서 개념적 구조를 Fig. 4에 나타내었다.

위의 Fig. 4에서  $V_1$ 과  $V_2$ 에서의 물질수지를 고려하면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = (1+R) \cdot Q \cdot (C_{inflow} - C_1) - d_p \cdot V_1 \cdot C_1$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = (1-W) \cdot Q \cdot (C_1 - C_2) - d_p \cdot V_2 \cdot C_2$$

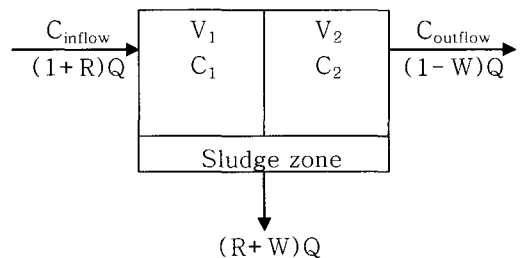


Fig. 4. Configuration of sedimentation tank.

침전조에서 정상상태를 고려하고 슬러지 폐기량을 무시하면

$$\frac{dC_1}{dt} = 0, \frac{dC_2}{dt} = 0. W = 0$$

그러므로 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>를 표시하면

$$C_1 = (1 + R) \cdot \frac{Q \cdot C_{inflow}}{d_p \cdot V_1 + (1 + R)Q}$$

$$C_2 = \frac{Q \cdot C_1}{d_p \cdot V_2 + Q}$$

위의 두 식을 풀면 아래의 식이 얻어진다.

$$\frac{C_{inflow}}{C_{outflow}} = \left(1 + d_p \frac{V_1}{(1 + R) \cdot Q}\right) \cdot \left(1 + d_p \frac{V_2}{(1 - W) \cdot Q}\right)$$

만약 V<sub>1</sub>=V<sub>2</sub>=V/2이고 슬러지 부분의 용적을 무시

하면 침강인자 d<sub>p</sub>는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d_p = \frac{[\sqrt{C_2 \cdot R^2 + 4R \cdot C_{inflow}} - (R + 2) \cdot \sqrt{C_2}]}{V \cdot \sqrt{C_2}} Q$$

### 3. 모델 검증용 처리장 수질 및 운전자료

본 모델을 검증하기 위해서 실제처리장 운전조건에 따른 유입수질을 모델에 입력하여 simulation 결과수질을 처리장 각 단위공정의 유출수질과 비교하였다. Table 4에 처리장의 수질을 Table 5에는 운전조건과 제원을 나타내었다.

### 4. 모델 검증 결과

Simulation하는 도중에는 별다른 에러나 버그가

Table 4. Water qualities of measured value in reported wastewater treatment plant<sup>8)</sup> (Unit: mg/ℓ)

Operation conditions	Volume of anoxic tank(m <sup>3</sup> )	Volume of oxic tank(m <sup>3</sup> )	Flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	Temp. (°C)	SRT (day)	MLVSS (mg/ℓ)	Return sludge ratio	Mixed recycling ratio
①	13	20.5	1.179	17	57	2171	17	0
②	13	20.5	1.146	21	35	1883	18	0
③	16.4	17.4	2.267	21	28	2866	11.5	0
④	21	12.9	2.171	22	14.9	2772	7.2	0
⑤	11.5	22.3	1.271	21	33	2014	14.7	0

Table 5. Operation conditions and dimension<sup>8)</sup>

Operation conditions	Influent water quality items	Plant influent	Anoxic tank effluent	Oxic tank effluent
①	SCOD	392	32	30
	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	53	-	-
	NOx-N	4.8	-	-
②	SOCD	392	17.3	15.3
	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	57.6	3.6	0.2
	NOx-N	4	0.5	3.9
③	SCOD	405	22.6	17.6
	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	56.6	3.4	0.6
	NOx-N	4.2	7.3	8.7
④	SCOD	377	18.1	16.8
	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	54.2	13.6	12
	NOx-N	4.1	4.3	7.4
⑤	SCOD	468	21.5	18.3
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	77.3	7.2	0.4
	NOx-N	2.1	0.3	3.3

-: data not given

\*: plant effluent

발생하지 않았다. 또한 모든 simulation은 2회씩 실시하여 simulation결과의 재현성을 확인하였다. 또한 모든 simulation 결과는 처리장을 60일 동안 운전하여 처리수질이 안정된 상태(정상상태)의 수질이다. Table 6에 실제 처리장 각 위치에서의 TN 데이터와 simulation 결과를 비교하였다.

운전조건 ①일 경우에 각 탱크의 TN 유출수 농도가 simulation한 값과 약간의 차이를 보이고 있다. 이러한 원인으로 운전조건 ①에서의 기온이 다른 운전조건에서 보다 낮아 thermal effect coefficients가 크게 반영되었기 때문이라고 추측된다. 향후 여기에 대한 추가 모델 수정이 있어야 할 것이다. 운전조건 ① 이외의 조건에서는 실측 TN 농도와 simulation 농도의 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. Fig. 5에 각 공정별(무산소조 혹은 산소조) 실

측 TN 농도와 simulation 농도를 비교하였다. Fig. 5로부터 본 WQM 모델을 이용하여 하·폐수처리장의 각 공정별 TN 농도를 표준편차(S.D)  $\pm 4.1\text{mg}/\ell$  안에서 예측 가능함을 알 수 있다. 그러므로 본 WQM 모델을 이용하여 목표 질소 처리농도를 설정하면 처리장 기본 설계제원에 관한 자료 획득에 활용될 수 있으리라 판단된다.

5. 결 론

- 1) 본 WQM 모델을 simulation하는 도중에는 별다른 에러나 버그가 발생하지 않았고 재현성이 높은 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 무산소-산소 공정에서 각 공정 유출수의 실측 TN 농도와 WQM 모델을 이용한 simulation 농도 사이에 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. 그러나 처리 온도가 낮은 경우에 실측 TN 유출수 농도가 simulation한 값과 약간의 차이를 보이고 있다. 이러한 원인으로 thermal effect coefficients가 낮은 온도에서의 영향이 너무 크게 계산되었기 때문이라고 추측된다. 다른 원인으로 보고된 처리장의 유입수질이 충분히 보고되어 있지 않은 관계로 미생물분해 가능한 물질로 분해 불가능한 물질이 만족할 만큼 고려되지 못했기 때문이라고 생각된다.
- 3) WQM 모델을 이용하면 유출수중의 TN농도를 표준편차(S.D)  $\pm 4.1\text{mg}/\ell$  안에서 예측 가능한 것으로 판단된다.
- 4) 본 WQM 모델을 이용하면 하·폐수처리장의 설계 시 처리장 기본 설계제원에 관한 자료 획득에 활용될 수 있으리라 판단된다.

Table 6. Summary of simulation and measured TN value (Unit:  $\text{mg}/\ell$ )

Operation conditions		Influent	Unit effluent		Removal efficiency(%)
		(0)	(2)	(3)	
①	R	57.8	5.7	4.9	91.5
	S		11.4	12.0	79.2
②	R	58.4	17.9	19.4	66.8
	S		14.5	15.0	74.3
③	R	61.6	5.1	5.1	91.7
	S		7.4	8.5	86.2
④	R	79.4	7.5	10.7	86.5
	S		10.9	11.5	85.5
⑤	R	60.8	10.7	9.3	84.7
	S		10.1	10.6	82.6

R: reported data  
S: simulated data

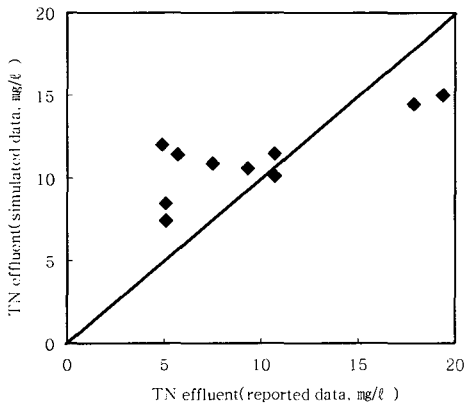


Fig. 5. Comparison of simulated and measured TN effluent in each unit.

참 고 문 헌

- 1) Henze, M., CPL. Jr. Grady, W. Gujer, GvR. Marais and T. Matsuo, 1987, Activated sludge model No. 1. IAWQ Scientific and Technical Report No.1, IAWQ, London, 33pp.
- 2) Wentzel, M. C., G. A. Ekama and GvR. Marais, 1992, Process and modelling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems, a review, Water Sci. Tech., 25(6), 59-82.
- 3) Henze, M., W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. Wentzel, GvR. Marais and M. C. M. Loosdrecht, 1999, Activated sludge model No. 2d., Water Sci. Tech., 39(1), 165-182.
- 4) Barker, P. S. and P. L. Dold, 1997, General model for biological nutrient removal activated

- sludge systems: model presentation, *Water Environ. Res.*, 69(5), 969-984.
- 5) Fujii, S. and I. Somiya, 1990, Simulation of nitrogen balance in large-scale domestic sewage treatment plant including the sludge treatment process, *Proceedings of the third KYOTO-KAIST joint seminar/workshop on civil engineering*, 803-806.
  - 6) Puvinaiyagam, S. G., 1992, Development of water Quality management system in sewage treat-ment plant, AIT master thesis.
  - 7) Lee, B. D., 1994, A study of the optimal conditions for biological nitrogen removal in activated sludge process by theoretical analysis and numerical calculation, AIT master thesis.
  - 8) Murase, T., T. Takahash and T. Mori, 1991, Nitrification-denitrification operation in a full-scale plant-utilization of step-feed and return sludge storage tank, 28th Annual Conference of Japan Sewage Work Association, 505-507.