

# Step-Feed 공정에서의 생물학적 질소제거 Modeling

이 병 대<sup>†</sup>

위덕대학교 보건학부  
(2004년 12월 15일 접수 ; 2005년 2월 16일 채택)

## Modeling for Biological Nitrogen Removal in Step-Feed Process

Byung-Dae Lee<sup>†</sup>

Division of Health, Uiduk University, Gyeongju 780-713, Korea  
(Received December 15, 2004 ; Accepted February 16, 2005)

**Abstract** : Step-feed process for biological nitrogen removal were analyzed numerically for the each unit and final total nitrogen(TN) effluent by water quality management(WQM) model and the results were compared data from these 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 as this model has become good reappearance. It was concluded that most of nitrogen removal occurred in the first oxidic tank. Thus the controlling of the first anoxic tank may be more important in term of nitrogen removal. Also each unit of simulation result was kept good relationship with that of measured data. Accordingly this WQM model has good reliance. Finally, WQM model can predict final TN effluent within  $\pm 6.0$  mg/ℓ.

**Keywords** : step-feed process, biological nitrogen removal, modeling.

### 1. 서론

질소는 공기 중에 78%를 점하고 있고, 우리 주변에 산재해 있는 물질이지만 생물권(biosphere)에서는 인과 칼륨 등과 같이 생물의 성장을 제한하는 물질이다. 1913년에 Haber·Bosch법에 의해 질소가스로부터 직접 암모니아를 생성하는 방법이 공업적으로 확립되면서 질소의 생물권으로의 공급이 증가하였다. 특히 녹색혁명이 일어난 1960년대부터 질소의 생물권으로 공급은 급증하고 있다. 1960~2000년 사이에

인구는 2배 증가한데 비해 질소비료는 약 10배 증가하였고, 2000년에는 약  $9 \times 10^{10}$  kg/year의 질소가 세계에서 생산되었다[1]. 이러한 양은 생물에 의한 질소고정의 37%에 달하고 인간 활동이 물질순환에 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 질소의 증가에는 녹조 등의 유해 시아노박테리아의 증가로 인한 상수도 피해, 어업피해, 암모니아 공급에 의한 빈 산소수의 증가, NO·N<sub>2</sub>O 등의 지구 온난화 가스의 증대, 질산성 질소의 증가에 따른 청색증(블루베이비병) 등의 여러 가지 문제를 일으킨다[1]. 이러한 인간 활동에 의해 사용된 질소가 모이는 곳은 하·폐수 처리장이고, 여기서 질소를 비롯한 영양 물질[2] 및

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

중금속[3] 등의 제거가 중요하므로 하·폐수 처리장 방류수 중의 이러한 물질 규제가 강화되고 있는 실정이다. 유입 하·폐수 중의 질소제거를 위한 처리방법은 1950년대 유럽에서 시작되었다. Wuhrman[4]이 폭기 후 탈질조에서 탈질을 실시한 이후, Barnard process, Bardenpho process, 내부순환을 포함한 무산소조(anoxic)와 산소조(oxic)를 조합한 공정, 탈질을 위하여 유입수 중의 탄소원을 공급하는 step-feed process 등이 개발되어 현재 실제 하·폐수 처리장에 적용되고 있다[5].

한편 1987년 IAWPRC(현 IWA) 연구진에 의해 개발된 활성슬러지 model No. 1(ASM 1)[6]를 비롯하여 현재까지 몇몇 모델들이 개발되어 질소 제거들을 위한 생물학적 모델링에 이용되고 있다[7-9]. 그러나 실 처리장에서 적용 가능한 질소 제거 모델의 개발을 위해 복잡한 생물학적 반응, 유입수중의 여러 가지 독성 물질 및 난분해성 물질들이 고려되어야 하며, 이러한 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[10]되고 Puvinyagam에 의해 2계열의 시스템과 full-down menu가 첨가[11]되었으며 Lee[12]에 의해 mass balance와 logic error가 검증되고 디버깅(프로그램의 잘못을 찾아내어 수정)되었다.

본 연구에서는 문헌의 step-feed 하·폐수 처리장 수질 데이터와 WQM 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하여, 본 모델의 step-feed 공정에 대한 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험

본 연구에서 고려한 step-feed 공정을 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 다음 각 절에 WQM 모델에서 사용한 유입 수질항목, 대표적인 호기성과 혐기성 미생물 반응 8가지 그리고 동력학 모델을 설명하였다.

Fig. 1에서와 같이 step-feed 공정은 무산소조에서 유입수 중의 유기물질을 이용하여 탈질이 일어나고 후단의 산소조에서 질산화가 일어나는 공정으로 통상적으로는 무산소-산소-무산소-산소 공정이 많이 사용되고 있다. 두 번째 무산소조에서 탈질이 일어나기 위해서는 유입수 중의 유기물질이 필요하므로 유입수중의 일부를 두 번째 무산소조로 유입시키는 공정이다.

### 2.1. 유기물 지표 인자

본 WQM 모델에서는 문헌의 자료를 시뮬레이션하기 위해 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 종속영양 미생물 및 독립영양 미생물을, 질소 변수로는 아질산성 질소, 질산성 질소, 암모니아성 질소를 선정하였다. 기타 수질항목으로는 용존산소, 알칼리도 그리고 무기 부유물로서 총 11가지의 모델유입수질을 선정하였고, Table 1에 나타내었다. 또한 본 모델에서는 유입수 중의 유기질소는 미생물 반응에 의해 질산성 질소 및 암모니아성 질소로 전환된다고 가정하였다.

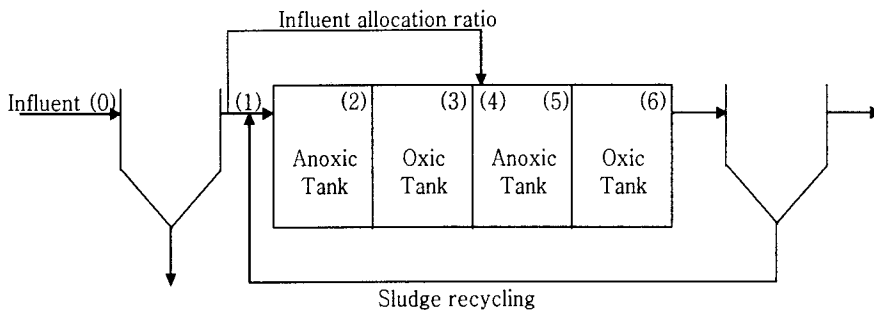


Fig. 1. Typical configuration of step-feed process.

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

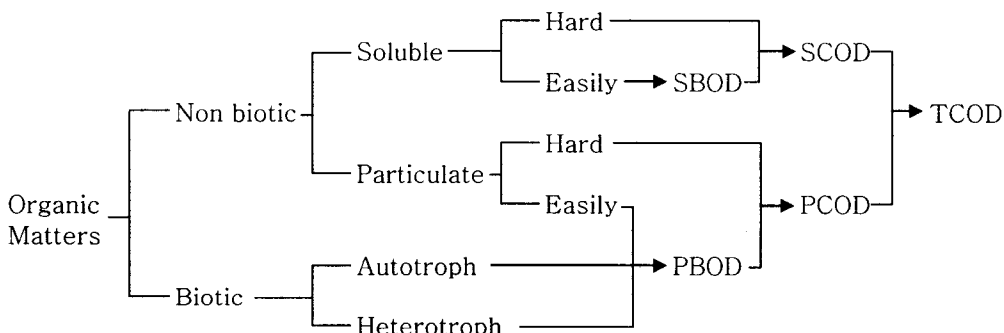


Fig. 2. Organic parameters.

유입수 변수의 상관관계를 그림으로 나타내면 위 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

### 2.2. 생물학적 반응식

본 모델에서는 무산소조와 산소조에서 일어나는 8개항의 미생물 반응식이 고려되었고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서의 식들은 두 가지 형태의 미생물, 네 가지 형태의 유기물질, 두 가지 형태의 질소, 알칼리도, 그리고 용존 산소로 구성되어 있다. 이 8개의 생물 반응 중에 P<sub>1</sub> ~ P<sub>4</sub>는 유기물질의 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 본 WQM 모델의

P<sub>2</sub>(X<sub>2</sub>분해), P<sub>4</sub>(X<sub>4</sub>분해), 그리고 P<sub>6</sub> 반응에서 고려되고 있다. 또한 수집된 문헌에는 미생물 반응계수를 포함하고 있지 않음으로 Fujii의 실험결과[10]를 인용하였고, 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

Fig. 3에 본 WQM 모델에 사용된 유기적인 동력학을 제시하였고, 무산소 및 산소조건에서 각각의 독립영양 미생물 및 종속영양 미생물의 유기물 섭취와 자기분해 등에 관련된 상호반응을 나타내었다. 특히 본 모델은 기존의 모델 [6-9]에서는 고려되지 않았던 종속영양 미생물에 의한 유기물 섭취 및 자기 산화 시 관계하는 암모니아성 질소, 질산성질소, 용존산소, 이산화탄소, 알칼리도 상호반응을 도입하였다.

Table 2. Biological Reactions

Reactions (mg/ℓ/day)	Description
P <sub>1</sub>	$K_{S20} \cdot \theta_S^{T-20} \cdot \frac{X_2}{K_S + X_2} \cdot \frac{K_7}{K_{OS} + X_7} \cdot X_5$
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>	$K_{X20} \cdot \theta_X^{T-20} \cdot \frac{X_4}{K_X + X_4} \cdot \frac{X_7}{K_{OX} + X_7} \cdot X_5$
P <sub>4</sub>	$K_{X20} \cdot \theta_S^{T-20} \cdot \frac{X_4}{K_X + X_4} \cdot \frac{K_{OX}}{K_{OX} + X_7} \cdot \frac{X_8}{K_{XN} + X_8} \cdot \eta_X \cdot X_5$
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 coefficients at 20°C(1/day): $K_{S20}, K_{X20}, b_{H20}, K_{N20}, b_{A20}$ Thermal effect coefficients: $\theta_S, \theta_X, \theta_N, \theta_H, \theta_A$ Half-saturation coefficients(mg/ℓ): $K_S, K_{OS}, K_{SN}, K_X, K_{OX}, K_{XN}, K_{OH}, K_{NH}, K_{OA}, K_{AL}, K_{ON}$ Correction factor for anoxic reaction: $\eta_s, \eta_X, \eta_H$ Temperature(°C) : T

Example:

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.

Table 3. Parameters and Coefficients of Biological Reaction

Types of coefficient and factor	Symbol	Value	Symbol	Value
Reaction rate coefficients 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	$\eta_k$	0.5
	$\eta_1$	0.5		

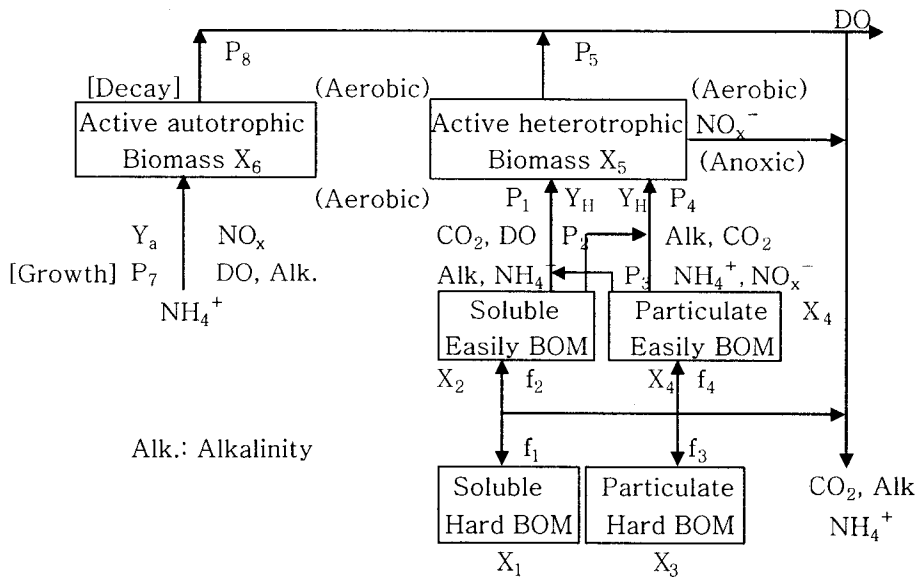


Fig. 3. Schematic diagram of kinetic model.

2.3. 처리장 수질 및 운전자료

본 모델을 검증하기 위해서 실제 처리장 운전 조건에 따른 유입 수질을 모델에 입력하여 시뮬레이션 결과수질을 처리장 각 단위 공정의 유출 수질과 비교하였다. Table 4에 하·폐수처리장

4곳의 운전 조건과 제원을 제시하였고, 각 처리장에서 운전조건을 달리한 두 가지 경우의 자료를 나타내었다. Table 5에는 각 하·폐수처리장의 유입수, 각 공정 유출수, 최종 유출수 수질을 나타내었다.

Table 4. Operation Conditions and Dimension

Plant No.	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)	MLSS (mg/l)	Return sludge ratio	Mixed recycling ratio	allocation ratio*	Reference No.
Plant 1-1	0.0768 <sup>#</sup> /0.115 <sup>##</sup>	0.115 <sup>&amp;</sup> /0.173 <sup>&amp;&amp;</sup>	0.06	15.7	-	2500	0.5	0	0.5	13
Plant 1-2	0.0768/0.115	0.1115/0.173	0.06	15.7	-	2500	0.5	0	0.5	
Plant 2-1	1240/1240	2480/1240	390	20.6	-	2950	0.5	1.2	0.3	14
Plant 2-2	1240/1860	2380/620	380	20.6	-	2640	0.5	1.5	0.2	
Plant 3-1	600/1522	1522/1522	1875	22.3	12	1870	0.3	0	0.3	4
Plant 3-2	600/1522	1522/1522	1875	14.2	12	2260	0.3	0	0.35	
Plant 4-1	540/540	1620/1620	264.7	19.8	13.3	2670	0.66	0	0.23	15
Plant 4-2	540/540	1620/1620	302.1	25.3	12.43	2580	0.5	0	0.17	

Example:

\*:Influent allocation ratio to the second anoxic tank

-: data not given <sup>##</sup>: 2<sup>nd</sup> anoxic tank

<sup>#</sup>: 1<sup>st</sup> anoxic tank <sup>&&</sup>: 2<sup>nd</sup> oxic tank

<sup>&</sup>: 1<sup>st</sup> oxic tank

Table 5. Water Qualities of Measured Value in WWTPs

Plant No.	Influent quality items	Plant inf.	PST eff.	Anoxic tank eff. 1 <sup>st</sup> /2 <sup>nd</sup>	Oxic tank eff. 1 <sup>st</sup> /2 <sup>nd</sup>	Plant eff.	Plant No.	Plant. inf.	PST eff.	Anoxic tank eff 1 <sup>st</sup> /2 <sup>nd</sup> .	Oxic tank eff. 1 <sup>st</sup> /2 <sup>nd</sup>	Plant eff.	
Plant 1-1	TBOD	-	231	-	-	17.1	Plant 1-2	152	-	-	-	11.7	
	TN	-	-	-	-	8.8		-	-	-	-	-	4.4
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	18.2	-	-	-	4.4		-	-	-	-	-	3.7
	NOx-N	-	-	-	-	4.4		-	-	-	-	-	7
	SS	234	-	-	-	13.6		97	-	-	-	-	10.2
Plant 2-1	TBOD	-	112	-	-	3.3	Plant 2-2	-	112	-	-	-	
	TN	-	28.4	6.6/6.5	7.2/7.0	7.2		-	28.4	5.9/3.5	6.1/4.5	4.7	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-	18.1	3.8/0.7	0.1/0.1	0.0		-	18.1	3.9/0.8	0.1/0.0	0.1	
	NOx-N	-	0.1	1.1/4.3	5.5/5.3	5.7		-	0.1	0.4/1.5	4.5/2.0	3.2	
	SS	-	69	-	-	1.3		-	69	-	-	-	
Plant 3-1	TBOD	-	126	-	-	5.6	Plant 3-2	-	92	-	-	4.5	
	TN	-	24.1	-	-	8.5		-	23.3	-	-	9.5	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-	15.2	-	-	0.0		-	15.6	-	-	0.0	
	NOx-N	-	0.13	-	-	7.91		-	0.1	-	-	7.76	
	Alkalinity	-	120	-	-	50		-	130	-	-	50	
	SS	-	48	-	-	5.0		-	59	-	-	6.0	
Plant 4-1	TBOD	153	-	-	-	5	Plant 4-2	101	-	-	-	2.5	
	TN	35.1	38.1	-	-	21.4		33.8	37.1	-	-	19.8	

Example:

-: data not given

### 3. 결과 및 고찰

시뮬레이션 도중에는 별다른 error나 bug가 발생하지 않았다. 그리고 모든 시뮬레이션은 2회씩 실시하여 시뮬레이션 결과의 재현성을 확인하였다. 모든 결과는 60일 동안 처리장을 운전했을 경우를 시뮬레이션 하였으므로 시뮬레이션 결과는 충분히 정상상태의 최종유출수라고 판단된다. Table 6은 문헌에 보고된 실제 처리장과 시뮬레이션한 후의 TN 농도를 정리하였다. Plant 2-1 및 plant 2-2의 경우에는 각 공정 유출수 중의 TN값이 보고돼 있었고 다른 plant의 경우에는 최종 유출수 중의 TN 농도만이 보고되어 있었다.

먼저 plant 2-1 및 plant 2-2의 경우 각 공정별 TN 농도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서

도시한 각 공정별 유출수 중의 TN농도와 시뮬레이션 결과 TN농도가 매우 유사함을 알 수 있어 본 모델이 step-feed 공정의 각 공정별 TN농도 추정에 높은 신뢰성이 입증되었다. 또한 Fig. 5에 나타나 있는 것처럼 첫 번째 무산소조에서 유입수 중의 질소가 대부분 제거되는 것을 알 수 있다. 그러므로 step-feed 공정에서 질소제거를 위해서는 첫 번째 무산소조의 운전이 중요하다는 것이 판명되었다. 한편 Fig. 6에 각 처리장의 공정별 유출수 및 최종 유출수 중의 TN농도와 시뮬레이션 결과 TN 농도를 비교하였다. 전반적으로 좋은 상관( $R^2 = 0.78$ )을 보였고 표준편차는 6.0mg/l로 나타났다. 그러므로 본 모델이 실제 step-feed 공정에서 각 공정별 유출수와 최종유출수 중의 TN농도를  $\pm 6.0\text{mg/l}$  이내에서 예측 가능성이 증명되었다.

Table 6. Summary of Simulation and Measured TN Value(Unit: mg/l)

Plant No.		Influent	Unit effluent				Removal efficiency(%)
		(0)	(2)	(3)	(5)	(6)	
Plant 1-1	R	34.7	-	-	-	8.8	74.6
	S		14.3	12.1	11.6	12.5	53.9
Plant 1-2	R	27.8	-	-	-	4.4	84.2
	S		12.1	8.5	8.2	9.0	61.0
Plant 2-1	R	28.4	6.6	7.2	6.5	7.0	75.4
	S		8.2	7.4	7.1	7.7	72.9
Plant 2-2	R	24.1	7.3	8.1	7.2	8.2	66.0
	S		9.1	7.9	8.0	6.9	71.4
Plant 3-1	R	23.3	-	-	-	8.5	64.7
	S		7.86	12.8	12.9	13.9	42.4
Plant 3-2	R	29.2	-	-	-	8.9	67.5
	S		8.1	9.3	10.1	10.7	69.5
Plant 4-1	R	35.1	-	-	-	21.4	39.0
	S		31.2	19.7	21.5	19.5	44.4
Plant 4-2	R	33.8	-	-	-	19.8	41.4
	S		34.0	23.9	24.1	24.2	28.6

Example:

R: reported data, S: simulated data, (0): Influent, (2): Effluent of first anoxic tank, (3): Effluent of first oxic tank, (5): Effluent of second anoxic tank, (6): Effluent of second oxic tank, -: Data not give.

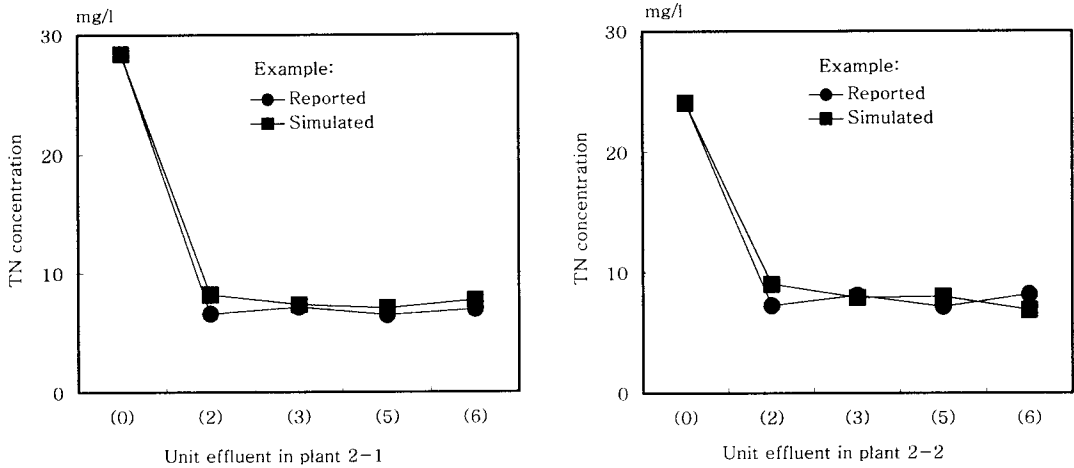


Fig. 5. Comparison of simulated and reported each unit TN concentration in Plant 2-1 and Plant 2-2.

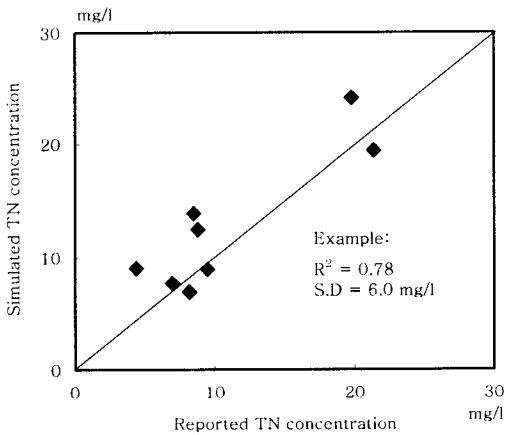


Fig. 6. Comparison of simulated and reported TN concentration in final effluent.

**4. 결론**

1. 시뮬레이션 하는 도중에는 별다른 error나 bug가 발생하지 않았고, 시뮬레이션 결과 재현성이 우수한 것으로 조사되었다.
2. 실제 처리장 유출수 중의 TN농도와 시뮬레이션 후의 TN농도가 전반적으로 좋은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 또한 공정의 각 위치에서의 측정치 TN농도와 시뮬레이션 결과 TN농도가 유사한 상관관계를

보이고 있어, 본 모델의 신뢰성이 높은 것으로 조사되었다.

3. WQM모델을 이용할 경우 step-feed 공정 유출수 중의 TN농도는 편차(S.D)±6.0mg/l 내에서 예측 가능한 것으로 판단되었다.

**참고문헌**

1. J. G. Huub, The Nitrogen Cycle out of Balance, *Water21*, August, 65 (2001).
2. 환경부, 총인·총질소의 방류수수질기준 및 배출허용기준 적용지역 (1995).
3. 배장순, 박찬교, 성기천, 이석우, 황용현, “접토를 이용한 폐수 중 중금속 흡착에 관한 연구”, *한국유화학회지*, 21(2), 124 (2004).
4. Y. Sakai, H. Hikami, and Y. Kawata, Step-feed and Anoxic-oxic Activated Sludge Process, *27th Annual Conference of Japan Sewage Work Association*, 381 (1990).
5. 村田恒雄, “下水の高度處理技術,” pp. 201-203, 理工図書, 東京 (1992).
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. C. Wentzel, G. A. Ekama, and GvR. Marais, Process and Modelling of Nitrification Denitrification Biological Excess Phosphorus Removal Systems. A Review, *Water Sci. Tech.*, **25**(6), 59 (1992).
  8. M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. Wentze, GvR. Marais, and MCM. Loosdrecht, Activated Sludge Model No. 2d., *Water Sci. Tech.*, **39**(1), 165 (1999).
  9. P. S. Barker and P. L. Dold, General Model for Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems: Model Presentation, *Water Environ. Res.*, **69**(5), 969 (1997).
  10. S. Fujii and I. Somya, 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 (1990).
  11. S. G. Puvinyagam, "Development of Water Quality Management System in Sewage treatment Plant," AIT Master Thesis (1992).
  12. B. D. Lee, "A Study of the Optimal Conditions for Biological Nitrogen Removal in Activated Sludge Process by Theoretical Analysis and Numerical Calculation," AIT Master Thesis (1994).
  13. T. R. Bridle, D. C. Climenhage, and A. Stelzing, Operation of Full-scale Nitrification-Denitrification Industrial Waste Treatment plant, *Wat. Poll. Cont. Fed.*, **51**, 47 (1979).
  14. T. Murase, T. Takahashi, and T. Mori, 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 (1991).
  15. T. Hattori, S. Nakayama, and H. Watazu, Promotion of Nitrogen Removal by Change of Operational Conditions in the Dual Recycling Method, *28th Annual Conference of Japan Sewage Work Association*, 499 (1991).