

부상여재반응기에서 ASM3를 이용한 질산화 공정 모사

Modelling of Nitrogen Oxidation in Aerated Biofilter Process with ASM3

전 병 희[†]

Jun, Byonghee

ABSTRACT : Process analysis with ASM3 (Activated Sludge Model3) was performed to offer basic data for the optimization of aerated biofilter (ABF) process design and operation. This study was focused on the simulation of the nitrification reaction in ABF which was a part of the advanced nutrient treatment process using bio-adsorption. The ABF process has been developed for the removal of suspended solids and nitrification reaction in sewage. A GPS-X (General Purpose Simulator-X) was used for the sensitivity analysis and operation assessment. Sensitivity of ASM3 parameters on ABF was analysed and 4 major parameters (Y_A , k_{sto} , μ_A , $K_{A,HN}$) were determined by dynamic simulation using 70 days data from pilot plant operation. The optimized values were 0.14 for Y_A , 3.5/d for k_{sto} , 2.7/d for μ_A and 1.1 mg/L for $K_{A,HN}$, respectively. Simulation with optimized parameter values were conducted and TN, NH_4^+-N and $NO_3^- -N$ concentrations were estimated and compared with measured data at the range of 10 min to 4 hrs of hydraulic retention time (HRT). The simulated results showed that optimized parameter values could represent the characteristics of ABF process. Especially, the ABF showed relatively high nitrification rate (60%) under very short HRT of 10 min. As a consequence, the ABF was thought to be successfully used in the site which having high variation of influent loading rate.

Keywords : Aerated biofilter (ABF), ASM3, Nitrification, Sensitivity analysis

요 지 : 하폐수의 생물학적 고도처리 공정의 설계와 운전 최적화에 필요한 자료를 제공하기 위하여 ASM3를 이용하여 부상여재반응기(ABF)에 대한 해석을 수행하였다. 대상 반응기로서는 수중의 부유물질 제거와 질산화 반응을 위해 이용되는 호기적 부상여재반응기로 하였다. 본 연구에서는 하폐수 고도처리공정 중 활성슬러지의 생흡착반응을 이용한 전체 시스템 중에 흡착조를 거친 유출수를 부상여재를 이용하여 질산화시키는 공정에 대한 해석을 목적으로 하였다. 민감도 분석과 영향평가를 위해서 상용 수치리 공정 해석 프로그램인 GPS-X(V 5.0)을 이용하였다. 민감도 분석을 통해 공정거동에 영향이 큰 매개변수(Y_A , k_{sto} , μ_A , $K_{A,HN}$)가 결정되었고, 70일간의 pilot plant 운전자료를 이용한 동적 시뮬레이션을 통해 최적화하였다. 최적화된 매개변수 값들은 Y_A 가 0.14, k_{sto} 는 3.5/d, μ_A 는 2.7/d, $K_{A,HN}$ 는 1.1mg/L로 결정되었다. 최적화된 매개변수 값을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 부상여재반응기의 수리학적 체류시간(HRT)을 10분에서 4시간으로 변화시키면서 TN, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ 의 변화를 예측하여 실험값과 비교한 결과 HRT가 10분 정도로 매우 짧은 운전조건에서도 60%에 가까운 질산화율을 보여주고 있었다. 짧은 HRT에서 우수한 질산화 능력을 보인 부상여재의 특성을 이용하여 유량변동이 매우 큰 현장에 부상여재반응기가 효과적으로 적용될 수 있다고 판단되었다.

주요어 : 부상여재반응기, 민감도 분석, 질산화, ASM3

1. 서 론

국내 하수처리장은 유기물, 질소와 인을 주로 처리대상 물질로 하고 있다. 이 중 질소는 생물학적 질소 제거기작을 주로 이용하며, 호기성 조건에서 암모니아가 질산염으로 산화되는 질산화 반응과 무산소 조건에서 질산염이 질소가스로 환원되는 탈질반응을 통해 제거된다. 전체적인 질소제거 과정에서 질산화 반응이 제한인자로 작용하는 경우가 많아 성공적인 질산화 반응을 위해서는 부유상 미생물을 이용한 완전혼합 반응기의 경우 4시간 정도의 긴 수리학적 체류시간(HRT)이 필요하며, 이는 질산화균의 성

장속도가 낮아 슬러지 체류시간(Solid Retention Time, SRT)을 길게 유지할 필요가 있기 때문이다(Mishima 등, 1996; Chuang 등, 1997).

최근 질소제거에 대한 제한인자로 작용하는 반응기내 질산화균의 농도를 높이기 위한 방법으로 미생물 부착성 여재를 이용하는 기술이 이용되고 있다(신항식 등, 2001). 또한 부상여재를 충전하여 부유물질 제거와 유기물, 질소를 동시에 제거하는 공법들도 보고되고 있다. 부상여재반응기(Aerated BioFilter, ABF)는 유량 및 농도 변화의 대응성이 크고 유지관리가 간편하며 수질안정성이 우수한 장점을 가지고 있어 고도처리공정에서 질산화조로서 효과적

[†] 정희원, 강원대학교 소방방재학부 전임강사(E-mail : bhjun@kangwon.ac.kr)

으로 이용되고 있다(류흥덕 등, 2006).

본 연구에서는 고도처리공정으로서 변형 Dephanox 공법에서 부상여재반응기의 질산화 특성에 대해 조사하였다. Dephanox 공법(Fig. 1)은 질산화공이 독립된 반응조에서 질산화를 수행하기 때문에 전체공정의 제한인자로서 작용하는 질산화 반응에 소요되는 수리학적 체류시간(HRT)을 줄일 수 있으며(Hu 등, 2003), 공정에 필요한 산소의 대부분을 질산화에만 이용할 수 있기 때문에 공급되는 공기 양을 줄일 수 있다.

또한 유기물을 활성슬러지에 흡착시켜 탈질에 이용할 수 있기 때문에 유기물 손실을 최소화 할 수 있고 우리나라의 하수와 같이 낮은 C/N비를 가진 하수처리시 이용하기에 매우 적절한 공법이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 부상여재를 이용한 생물막 여과공법의 제거특성에 대해 조사하고, GPS-X를 이용하여 ASM3 모델의 매개변수를 최적화하고 질산화 반응을 중심으로 수리학적 체류시간과 유입농도의 영향에 대해 조사하였다.

2. 연구방법

2.1 부상여재반응기(Aerated BioFilter) 운전

본 연구에서는 경기도 남양주시에 A하수처리장내에 하루 처리규모 60m³의 pilot plant를 설치하여 이용하였다. Fig. 2에 나타난 전체 공정은 유기물 흡착 및 분리를 통해

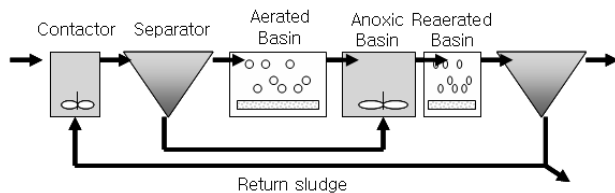


Fig. 1. Schematic diagram of Dephanox process

중속영양미생물과 독립영양미생물의 분리성장과 질산화미생물의 우점화를 근간으로 한 Dephanox 공법의 변법으로서 혐기접촉조, 최초침전지, 부상여재반응기, 무산소조(I), 간헐폭기조, 무산소조(II), 재폭기조, 침전조의 순서로 이루어졌으며 무산소(I)에서 무산소(II)로의 내부반송(1-2Q)과 침전지에서 혐기접촉조로 슬러지 반송(0.5-2Q), 외부반송(0.5-2Q)이 이루어졌다. Table 1에서는 각 반응기의 수리학적 체류시간(HRT)을 나타내었다.

유입하수의 성상은 평균농도와 접촉조를 거친 후 부상여재반응기에 유입되는 하수의 평균농도를 Table 2에 나타내었다. 각 수질에 대한 분석은 수질오염공정시험법에 따랐다. ASM3 모델에서 민감도 분석을 위한 유기물의 성분분류는 부상여재반응기 유입수의 평균농도를 초기조건으로 하여 GPS-X에서 제공하는 Influent Advisor를 이용하였다.

유입하수는 접촉조로 유입되며, 접촉조의 유입수내 유기물의 대부분은 활성슬러지의 플럭(floc)에 흡수 및 흡착된다. 자연유하방식에 의해 접촉조를 거친 하수는 분리조로 유입되며 분리조로부터 유기물을 흡착한 활성슬러지와 암모니아가 농축된 상등수를 분리하게 된다. 암모니아가

Table 1. Reactor size and HRTs in modified Dephanox process

Process	Dimension	HRT (min)
접촉조	W800×L800×H2,000=1.3m ³	25
분리조	Φ2,400×H2,700=9.8m ³	240
부상여재조	W1600×L1,700×H2,000=5.4m ³ EPS 여재 충전(약 45%)	120
무산소조(I)	W800×L2,900×H2,000=4.6m ³	100
간헐폭기조	W800×L2,100×H2,000=3.3m ³	70
무산소조(II)	W800×L800×H2,000=1.3m ³	30
재폭기조	W800×L500×H2,000=0.8m ³	15
최종침전지	Φ2,400×H2,700=9.8m ³	240
총	36.3m ³	0.58 day

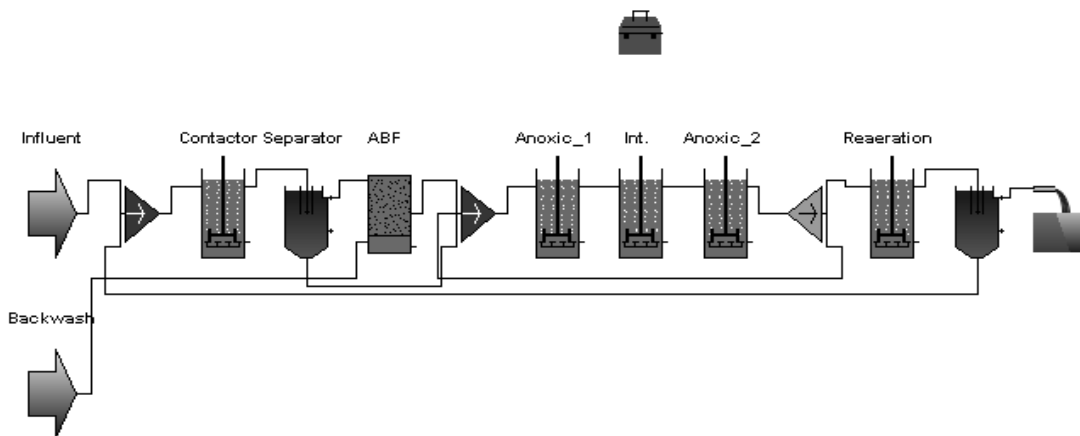


Fig. 2. Schematic diagram of modified Dephanox process

Table 2. Average water quality in raw water and ABF influent (mg/L)

		BOD ₅	COD _{Cr}	COD _{Mn}	SS	T-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	T-P	PO ₄ ³⁻ -P
원수	평균	96.4	141.4	36.2	96.8	23.5	15.5	0.2	3.1	2.7	1.3
	범위	20.9-419	82-759	10-180	20-700	11-56.7	2.2-28.2	0-1.9	0.4-15.3	0.9-10.6	0.4-3.3
ABF 유입수	평균	20.4	82.8	10.7	18.0	13.4	10.4	0.2	2.2	1.7	1.6
	범위	10.8-85.8	15.1-98.7	5.4-18.4	3-28	4.5-20	1.1-23.4	0-2.1	0.2-7.3	0.6-5.3	0.7-8.6

농축된 상등수는 부상여재반응기로 유입이 되어 질산화가 수행되며, 유기물을 흡착한 활성슬러지는 부상여재반응기를 거치지 않고 무산소(I) 반응조로 유입되어 부상여재반응기로부터 질산화된 하수와 혼합된다. 무산소(I) 반응조에서 질산염은 탈질 박테리아에 의해 제거되며 이후 간헐폭기조와 무산소(II) 반응조, 재포기조를 거치면서 잔여 질소 성분에 대한 처리를 수행한다.

전체공정에서 질산화반응은 부상여재반응기에서 주로 일어나고 있기 때문에 부상여재반응기의 질산화거동을 조사하고 공정모형을 구축하는 것은 전체공정의 유지관리에 매우 중요하다고 할 수 있다.

2.2 ASM3(Activated Sludge Model 3)

Gujer 등(1999)은 생물학적 질소와 유기물질의 제거를 수학적으로 표현하기 위해 ASM1(Activated Sludge Model1) 모델의 사용시에 나타났던 많은 제한점을 극복하기 위해 ASM3를 개발하였다. ASM1과 ASM3의 가장 큰 차이점은 ASM3에서는 중속영양미생물이 세포 내부에 탄소원을 저장하는 반응을 포함시켰다는 것이다. ASM3에서는 생물학적으로 분해가 쉬운 유기기질(S_s)이 일차적으로 미생물에 의해 흡수되어 세포 내 저장물질(Cell internal storage product, X_{sto})으로 저장되고 그 후에 미생물 성장이나 유지를 위해 사용된다고 표현하고 있다.

두 모델의 또 다른 차이점은 ASM3의 경우가 ASM1의 경우보다 모델 매개변수의 추정이 쉽다는 것이다. 이것은 이 두 모델에서 채택하고 있는 미생물의 성장과 사멸에 대한 개념의 차이에 의한 것이다. ASM1의 경우에는 성장-사멸-생산의 순환고리의 형태인 사멸-재생산 구조를 가지고 있고 ASM3의 경우에는 성장-내생 호흡 모델을 가지고 있다. ASM1의 경우 모든 상태변수들이 매개변수 값에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 ASM3의 경우에는 직접적인 영향이 적어 매개변수 각각의 값에 대한 추정이 용이하다. Koch 등(2000)은 ASM3가 하수처리장에 대한 모델링에 비록 구간간의 예측이나 생물학적으로 분해 가능한 기질의 흡수 반응에 대한 공정결과를 더 잘 예측하지만 일반적인 도시 하수 처리장의 동적거동을 나타내는데 ASM1 또한 성능이 우수하다고 보고했다. ASM3 모델의 생물학적 인 제거 반

응의 포함은 bio-P 모듈(Ky 등, 2001; Rieger 등, 2001)을 사용하여 확장할 수 있다. 이러한 새로운 모듈의 첨가에 의한 확장은 ASM1에서 인을 고려하기 위해서는 ASM2 또는 ASM2d라는 새로운 모델을 사용하는 것에 비해 모델의 확장성을 크게 향상시켰다고 판단된다.

본 연구에서 사용된 simulation tool은 상용 시뮬레이터인 GPS-X(Hydromantis, Canada)로 수행되었다. GPS-X는 “General Purpose Simulator for X-Windows”의 약자로 실제 규모의 폐수처리장 모델링 및 시뮬레이션을 위한 상용 프로그램으로 세계적으로 널리 사용되고 있는 강력한 시뮬레이터이다. 다양한 공정 모델(완전혼합 반응기, 연속회분식 반응조, 산화지, 살수여상 등)에 대한 방대한 라이브러리를 포함하고 있으며, 또한 여러 기능들이 도구 상자 형태로 구성되어 있어 사용이 편리하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 민감도 분석

전체 공정 중 대부분의 반응기는 부유상 미생물을 이용하는데 반해 부상여재반응기는 주로 고정상 미생물을 이용한 특징이 있다. 따라서 모델링을 수행함에 있어서 고정상 반응기내의 미생물 활성을 나타내는 변수들에 대한 최적화가 우선적으로 이루어질 필요가 있다.

민감도 분석에 사용된 유입수 자료는 pilot plant에서 얻어진 70여 일의 부상여재반응기의 유입수 농도의 평균자료 (Table 2)를 이용하여 TCOD, SCOD, BOD₅, T-N, NH₄⁺-N을 GPS-X에서 제공하는 Influent Advisor를 이용하여 유입수중 유기물 성분을 S_s, S_i, X_s, X_i로 분할하여 분석을 하였다. 모델의 라이브러리는 CN 라이브러리를 이용하였으며, Influent model로서는 COD fractions를 이용하였다. 모델에서 유출수 중의 SCOD는 유입수의 S_i에 해당되며, S_s는 SBOD_u가 되며 여기에 f_{bod}의 인자를 이용하여 BOD₅가 계산될 수 있으며 이 계산된 값과 실측값을 비교하여 보정한다. 이러한 과정을 통해 결정된 유기물의 분류는 S_s가 22.3mg/L, S_i가 6.7mg/L, X_s가 48.4mg/L, X_i가 5.4mg/L였다.

모델에 사용된 각 성분의 기본값(default value)을 Table 3에 자세히 나타내었다.

매개변수의 변화에 대한 유출수 변화의 정도를 파악하기 위한 민감도 분석은 각 모델의 개발시 제시했던 문헌에 나타난 매개변수 기본값을 이용한 시뮬레이션 결과가 기준값으로 사용되었고, 유입수는 pilot plant에서 측정된 성분들의 평균값을 기준으로 하였다. 유출수에 대한 영향을 평가하기 위한 오차값의 계산은 아래에 나타낸 WSSNE (Weighted Sum of Squared Normalized Error)로 수행하였다. 민감도 분석을 위해 매개변수들을 기준값의 50~150 범위에서 변화시키면서 시뮬레이션을 수행한 반응기 내 농도 및 유출수 농도와 기준값을 사용하였을 때의 농도 값들과 오차를 계산하였다. 오차 값 계산에서 질소에 대해서는 가중치가 적용되었다.

$$WSSNE = w_{f_1} \cdot w_{f_2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{(C_{i,j,Calc. \text{ with model default parameters}} - C_{i,j,Calc. \text{ with changed parameters}})}{C_{i,j,Calc. \text{ with model default parameters}}} \right]^2$$

여기서,

$C_{i,t}$ = 시간 t에서 각 반응기내 i 성분의 농도

I = TN, BOD, S_{NH} , S_{NO}

w_{f_1} = 유출수질의 가중치(TN 및 BOD의 경우 1)

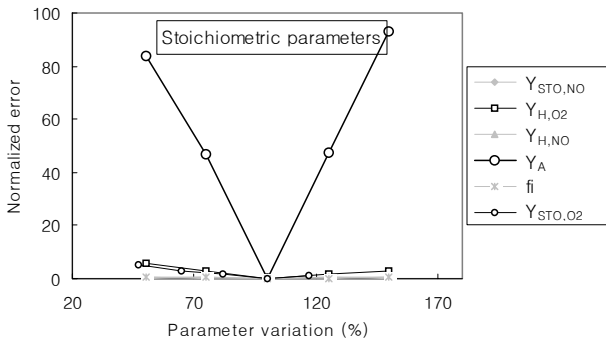
w_{f_2} = 질소성분에 대한 가중치(암모니아와 질산염의 경우 5)

Fig. 3은 매개변수값을 변경하면서 수행된 시뮬레이션에서 계산된 WSSNE를 나타낸 것이다.

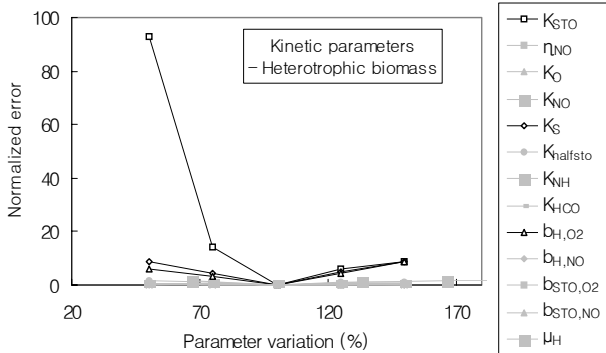
이상의 결과로부터 Y_{STO,O_2} , Y_{H,O_2} , Y_A , k_{sto} , K_S , b_H , μ_A , $K_{A,NH}$, $K_{A,O}$, $K_{A,HCO}$, b_A 등의 변수가 비교적 큰 영향을 주며 그중에서도 영향이 큰 Y_A , k_{sto} , μ_A , $K_{A,NH}$ 를 중요 매개변수로 선정할 수 있었다. 선정된 매개변수는 대부분 질산화 균의 성장과 질산화속도에 관여하는 것들이며, 유기물의 체내 저장에 영향을 주는 동역학계수로서, 질산화반응을 주로 하는 ABF 반응기의 특성을 반영하고 있다고 판단되었다.

Table 3. Stoichiometry and kinetic parameter default values in ASM3

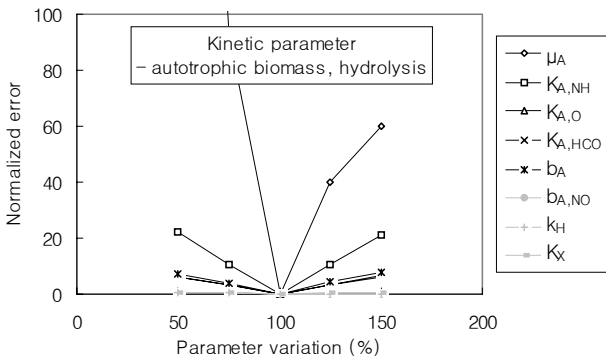
Model Stoichiometry		Default	Unit
Heterotrophic Biomass	Y_{STO,O_2}	aerobic yield for storage of soluble substrate	0.85 gCOD/gCOD
	$Y_{STO,NO}$	anoxic yield for storage of soluble substrate	0.80 gCOD/gCOD
	Y_{H,O_2}	aerobic yield for growth on storage product	0.63 gCOD/gCOD
	$Y_{H,NO}$	anoxic yield for growth on storage product	0.54 gCOD/gCOD
Autotrophic Biomass	Y_A	autotrophic yield	0.24 gCOD/gN
Hydrolysis	f_I	fraction of particulate inert material produced from endog. resp.	-
	f_{SI}	fraction of soluble inert material produced in hydrolysis	0.00
Kinetic			
Heterotrophic Biomass	μ_H	heterotrophic maximum growth rate	2.00 1/d
	k_{sto}	storage rate constant	5.00 1/d
	η_{NO}	anoxic reduction factor	0.60 -
	K_O	oxygen half saturation coefficient	0.20 gCOD/m ³
	K_{NO}	nitrate half saturation coefficient	0.50 gN/m ³
	K_S	readily biodegradable substrate half saturation coefficient	2.00 gCOD/m ³
	$K_{halfsto}$	storage product half saturation coefficient	1.00 gCOD/gCOD
	K_{NH}	ammonia (as nutrient) half saturation coefficient	0.01 gN/m ³
	K_{SPO_4}	phosphorous (as nutrient) half saturation coefficient	0.01 gP/m ³
	K_{HCO}	alkalinity half saturation coefficient	0.10 mole HCO ₃ ⁻ /m ³
	b_H	Maximum endogenous respiration rate of Xh	0.20 1/d
	b_{STO}	respiration rate for Xsto	0.20 1/d
	$\eta_{NO,end}$	anoxic reduction factor for endogenous respiration	0.50 -
Autotrophic Biomass	μ_A	autotrophic maximum growth rate	1.00 1/d
	$K_{A,NH}$	ammonium (as substrate) saturation coefficient	1.00 gN/m ³
	$K_{A,O}$	oxygen half saturation coefficient	0.50 gO ₂ /m ³
	$K_{A,HCO}$	alkalinity half saturation coefficient	0.50 mole HCO ₃ ⁻ /m ³
	K_{A,PO_4}	phosphorus half saturation coefficient	0.01 gP/m ³
	b_A	maximum aerobic respiration rate of Xa	0.15 1/d
$\eta_{NO,end,A}$	anoxic reduction factor for endogenous respiration	0.33 -	
Hydrolysis	k_H	hydrolysis rate constant	3.00 1/d
	K_x	hydrolysis saturation constant	1.00 gCOD/gCOD



(a) stoichiometric



(b) kinetic-heterotrophs



(c) kinetic-autotrophs

Fig. 3. Sensitivity of ASM3 parameters on ABF process

3.2 매개변수 최적화와 검증

위에서 선정된 민감한 매개변수들에 대한 최적화 작업을 수행하였다. 수학적인 매개변수 추정 방법은 Gauss-Jordan 법에 근거하였으며, GPS-X의 Optimizer 기능을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 70일 동안의 pilot plant 운전 자료가 매개변수 추정에 사용되었다. 목표 변수(target variables)는 각 반응조와 유출수의 BOD, TN, ammonia (S_{NH}), nitrate + nitrite (S_{NO}) 농도였으며, 민감도 분석에서와 같은 가중치가 사용되었다.

$$\min_{P_{mat}} J(P_{mat}) = wf_1 \cdot wf_2 \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(C_{i,t,measured} - C_{i,t,predicted})}{C_{i,t,measured}} \right]^2$$

여기서,

$C_{i,t}$ = 시간 t에서 각 반응기내 i 성분의 농도

i = TN, BOD, S_{NH} , S_{NO}

wf_1 = 유출수질의 가중치(TN 및 BOD의 경우 1)

wf_2 = 질소성분에 대한 가중치(암모니아와 질산염의 경우 5)

Gauss-Jordan법을 이용하여 공정거동에 큰 영향을 미치는 4개의 매개변수에 대해 최적화를 수행한 결과 Table 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 독립영양 미생물의 수율(Y_A)이 기본값인 0.24보다 작은 값 0.14를 가지는데, 이것은 부착상태의 생물막이 가지는 긴 SRT로 인해 미생물 수율이 낮은 점이 매개변수에 반영된 것으로 판단된다. 그리고 질산화 미생물의 최대비성장율(μ_A)도 기본값보다 조금 높게 나타났다. 이것은 원수중의 유기물이 접촉조에서 활성슬러지에 흡착된 상태에서 무산소조로 이동되었기 때문에 부상여재반응기에서는 질산화에 대한 유기물의 저해현상이 비교적 감소하여 질산화 미생물의 활성이 높게 나타난 결과로 판단된다. 나머지 매개변수들에 대해서는 IWA (International Water Association)에서 제시한 기본값을 그대로 사용하였다.

3.3 공정거동 해석

70일간의 pilot plant 운전결과를 이용하여 동적시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4에는 부상여재반응기의 유출수 내 암모니아성 질소, 질산성질소 농도의 결과를 나타내었다. 부상여재반응기에 유입되는 유입수 중에는 평균농도로서 TN 13.4mg/L, NH_4^+-N 10.4mg/L, $NO_3^- -N$ 2.2mg/L로 유입

Table 4. Optimized ASM3 parameter values for ABF

Parameter	Default	Optimized	Unit
Y_A	0.24	0.14	gCOD/gN
k_{sto}	5	3.5	1/d
μ_A	1.5	1.6	1/d
$K_{A,NH}$	1	1.1	gN/m ³

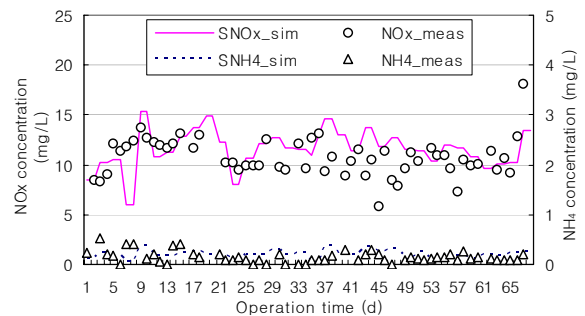


Fig. 4. Simulation results in ABF

되었으며, 암모니아성 질소는 대부분 질산화반응에 의해 질산성 질소 형태로 유출된 것을 볼 수 있다. 운전 초기에 유입수의 성상변화가 비교적 컸으며, 운전 7일째에 유입원수 중의 암모니아 농도가 5.5mg/L 정도로 매우 낮게 유입되어 예측된 질산염의 농도가 낮은 값으로 예측되었으나 실제 현장에서는 질산염의 감소는 보이지 않았다. 운전 19일 전후로 현장에서의 유출수 중의 질산염 농도는 얻어지지 못했으며, 현장에서의 질산염 농도 변화가 다소 큰 반면 예측결과는 10~15mg/L의 범위에서 비교적 일정하게 나타났다. 유출 암모니아 농도는 비교적 잘 표현하고 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 5는 수리학적 체류시간(HRT) 변화에 따른 유출수의 변화에 대한 시뮬레이션 결과들을 나타낸 그림이다. HRT를 10분에서 4시간으로 변화시켰을 때 부상여재에 의한 BOD와 질소의 변화를 보면 BOD의 제거는 HRT 10분의 조건에서도 매우 양호하게 제거되는 것을 볼 수 있다. 질소성분의 변화를 보면, 유입수 중에 포함된 암모니아는 외부반응수에 의해 접촉조에서 희석되어 부상여재반응기에는 12mg/L 정도 유입된다. 이 암모니아는 질산화 반응을 거쳐 HRT 1시간에서는 유출수 중에 1mg/L 정도 포함된 것을 볼 수 있다. 체류시간이 더욱 짧아지면 유출수 중에 농도가 증가하여 HRT 10분에서는 5mg/L까지 증가하였다. Fig. 6은 유입암모니아에 대한 유출농도의 비로서 질산화율을 구하여 나타낸 것이다. HRT 1시간일 때 90%의 질산

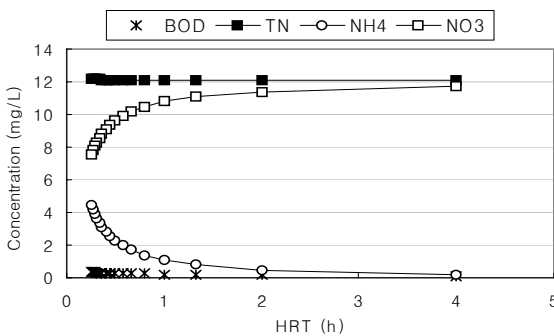


Fig. 5. Predicted effluent quality according to HRT variation

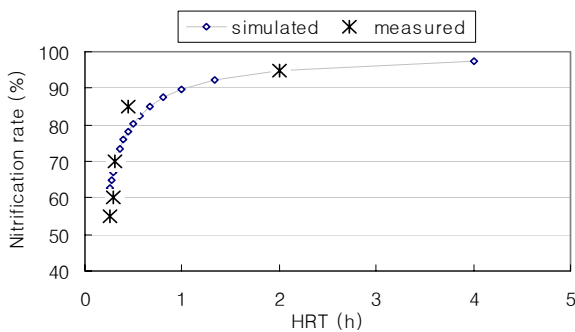


Fig. 6. Predicted nitrification rate according to HRT variation

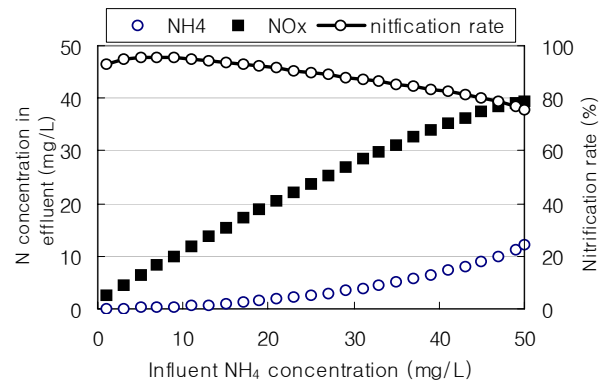


Fig. 7. Predicted nitrification rate and effluent quality according to ammonia concentration

화율을 보이며 이것은 기존의 활성슬러지 공정에 비해 매우 짧은 시간에도 우수한 질산화율을 얻을 수 있음을 보여 준다. 이러한 시뮬레이션 결과는 실측값과도 잘 일치하고 있으며 이런 결과들로부터 부상여재반응기의 제거특성을 모델화하고 매우 짧은 체류시간에도 질산화반응을 유지할 수 있었다.

Fig. 7은 HRT 2시간의 조건에서 유입수 중 암모니아 농도 변화에 따른 유출수의 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 그림이다. 암모니아 농도를 1-50mg/L로 변화시켰을 때 질소의 변화를 보면 유입 암모니아가 10mg/L미만에서는 거의 완벽하게 질산화가 일어나 질산염으로 산화되었으나 유입농도가 증가함에 따라 점차 증가하여 50mg/L 조건에서는 유출 암모니아는 10mg/L를 초과하게 된다. 암모니아 농도증가에 따른 질산화율의 변화를 보면, 유입농도 25mg/L까지는 90%의 질산화율을 유지하며, 유입농도 50mg/L에서 75%의 질산화율을 보인다. 이것은 일반적인 하수의 농도범위에서는 80%이상의 질산화율을 유지할 수 있음을 보여주며, 유량과 부하량 변동이 현장에서의 질소 제거에 매우 유용하게 이용될 수 있다고 판단되었다.

4. 결 론

하폐수의 생물학적 고도처리 공정의 설계와 운전 최적화에 필요한 자료를 제공하기 위하여 GPS-X를 이용하여 변형 Dephanox 공정 중 접촉조를 거친 유출수를 부상여재를 이용하여 질산화시키는 호기적 부상여재반응기에 대한 해석을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 부상여재반응기에 대한 민감도 분석을 통해 공정거동에 영향이 큰 매개변수(Y_A , k_{sto} , μ_A , $K_{A,NH}$)가 결정되었고, 최적화된 매개변수 값들은 Y_A 는 0.14, k_{sto} 는 3.5/d,

μ_A 는 2.7/d, $K_{A,NH}$ 는 1.1mg/L로 결정되었다.

- (2) 최적화된 매개변수 값들을 이용하여 동적 시뮬레이션을 수행하였고, 부상여재반응기의 수리학적 체류시간(HRT)을 10분에서 4시간으로 변화시키면서 TN, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ 의 변화를 예측하여 실측값과 비교한 결과 HRT가 10분 정도로 매우 짧은 운전조건에서도 60%에 가까운 질산화율을 보여주고 있었다.
- (3) HRT 2시간의 조건에서 유입수 중 암모니아 농도 변화에 따른 유출수의 변화에 대한 시뮬레이션 결과, 암모니아 농도를 1-50mg/L로 변화시켰을 때 유입암모니아가 10mg/L 미만에서는 유입 암모니아 대부분이 질산화에 의해 질산염으로 산화되었으나 유입농도가 증가함에 따라 점차 증가하여 50mg/L 조건에서는 유출 암모니아는 10mg/L를 초과하게 되었다. 유입농도 25mg/L까지는 90%의 질산화율을 유지하며, 유입농도 50mg/L에서 75%의 질산화율을 보였다.

참 고 문 헌

1. 류홍덕, 민경국, 이정훈, 최경영, 임현은, 김철환, 이상일(2006), Expanded Polystyrene (EPS) 여재를 이용한 BNR (Biological Nutrient Removal) 공정 개발, *대한환경공학회지*, Vol. 28, No. 1, pp. 1~6.

2. 신항식, 이상형, 남세용, 박명균(2001), 폴리스티렌 여재가 주입된 생물학적 질소, 인 동시제거 공정에서 HRT 및 C/N비에 따른 변화 연구, *대한환경공학회지*, Vol. 23, No. 4, pp. 623~629.
3. Chuang, S. H., Ouyang, C. F., Yuang, H. C. and You, S. J.(1997), Effect of SRT and DO on Nutrient Removal in a Combined as-biofilm Process, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 36, No. 12, pp. 19~27.
4. Gujer, W., Henze, M., Mino, T. and van Loosdrecht, M. C. M.(1999), Activated Sludge Model No. 3. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 39, No. 1, pp. 183~193.
5. Hu, Z. R., Wentzel, M. C. and Ekama, G. A.(2003), Modelling of Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems - a Review, *Wat. Res.*, Vol. 37, No. 14, pp. 3430~3444.
6. Koch, G., Kuhn, M., Gujer, W. W. and Siegrist, H.(2000), Calibration and Validation of Activated Sludge Model No. 3 for Swiss Municipal Wastewater. *Water. Res.*, Vol. 34, No. 14, pp. 3580~3590.
7. Ky, R. C., Comeau, Y., Perrier, M. and Takacs, I.(2001), Modelling Biological Phosphorus Removal from a Cheese Factory Effluent by an SBR. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, No. 3, pp. 257~264.
8. Mishima, K., Nishimura, T., Goi, M. and Katsukura, N.(1996), Characteristics of Nitrification and Denitrification of the Media Anaerobic-anoxic-oxic process, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, No. 1-2, pp. 137~143.
9. Rieger, L., Koch, G., Kuhn, M., Gujer, W. and Siegrist, H. (2001), The EAWAG bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3. *Wat. Res.*, Vol. 35, No. 16, pp. 3887~3907.

(접수일: 2007. 4. 10 심사일: 2007. 4. 20 심사완료일: 2007. 7. 16)