

GPS-X 시뮬레이션을 이용한 2단탈질 공정에서 외부탄소원 적용성 평가

Evaluation of External Carbon Source on the 2 Stage Denitrification Process by Simulation of GPS-X

정창화¹ · 심유섭¹ · 김태형¹ · 박철휘^{2,*}

Chung, Chang-Wha¹ · Shim, Yu-Seop¹ · Kim, Tae-Hyung¹ · Park, Chul-Hwi^{2,*}

1 (주)한국종합기술개발공사
2 서울시립대학교 환경공학부

(2003년 9월 24일 접수; 2003년 11월 26일 최종수정논문채택)

Abstract

The purpose of this study was to evaluate adaptability of external carbon source using GPS-X program in pilot plant composed with 2-stage denitrification process. The result from analysis of pilot plant operation and GPS-X simulation showed that effluent concentration could be simulated similarly by modifying operation conditions, such as DO concentration, C/N ratio and other calibrated parameter. In order to satisfy the standard of the effluent water quality on T-N of 20mg/L, it required approximately 3.1 of C/N ratio and 50% of nitrogen removal efficiency when influent T-N is 36.9mg/L. To maintain the stable water quality of the receiving water, the effluent T-N concentration should be less than 10-15mg/L and the appropriate C/N ratio to remove nitrogen was 4.27-6.82. The analysis of sensitivity to kinetic coefficient and reaction constant showed that Y_H and μ_{MAUT} were most sensitive to nitrate and ammonia nitrogen, relatively and sensitivity coefficient of their were 1.32, 1.98. It was concluded that as Y_H decreased and μ_{MAUT} increased, the reaction rates of denitrification and nitrification increased and the removal efficiencies of NO_3^- -N and NH_4^+ -N improved.

Key words: C/N ratio, 2-stage denitrification, GPS-X, External carbon source, Mecerlulose

주제어: C/N 비, 2단 탈질, GPS-X, 외부탄소원, 메셀로스페액

1. 서론

생물학적 반응기에 대한 여러 가지 실험적인 연구

에는 반응기를 정상운전 시키는 시간과 유지하기 위한 비용을 많이 필요로 하게 된다. 따라서 이러한 실험적인 연구의 단점을 보완하기 위해 최근 생물학적

*Corresponding author Tel: +82-2-2210-2176, Fax: +82-2-2244-2245, E-mail: chpark@uos.ac.kr (Park, C.H.)

공정을 모델링을 통해 분석하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 모델링으로 짧은 시간에 생물학적 반응기의 최적운전조건을 도출할 수 있으며, 반응기를 적절하게 운전하기 위한 비용도 불필요하게 된다. 또한 물리적으로 구현이 힘든 실험 조건에 대한 연구도 시뮬레이션을 통해 가능하다.

많은 시뮬레이션 프로그램들이 하수처리장 운전에 측을 위하여 사용되는 예가 증가추세에 있으나 현재 사용되고 있는 방법이 실제 운전결과를 정확히 예측하는 것은 현실적으로 매우 어렵다(정창화, 2003). 따라서 보다 경제적이며 합리적인 설계 운전인자를 적용하고 오염원의 특성에 적합한 하수처리 공정별 해석을 위하여 공정해석 프로그램 개발이 필요하였으며, IAWQ에서는 생물학적 하수처리 공정을 수치적으로 해석하기 위한 동력학적 반응식을 정리하여 Activated Sludge Model No. 1과 No. 2를 개발하였다(IAWQ, 1995; IAWPRC, 1987). 이들 모델을 기초로 하여 생물학적 처리에 대한 전산모형들이 많이 발전되었고, 최근에는 사용자들의 편의성을 높여 상용화된 것들이 많이 있다(Gujer et al., 1995; 윤석표, 1999).

ASM No.1은 고형물과 전자수용체(electron acceptor)의 양과 변화를 예측하거나 주요한 생물학적 공정을 조사하여 사용 가능한 간단한 반응식으로 특성화시키기 위한 것으로, 모델의 개념은 물질수지가 COD 기준이며, COD가 유기물질, 미생물, 전자수용체와 상호 연관되어 있다. 또한 유기물질 및 질소는 특성별로 범주를 구분하며, 미생물은 두 가지 형태, 즉 중속영양미생물, 독립영양미생물로 구분하고 있다. ASM No.2는 생물학적 인 제거를 추가시켜 ASM No. 1을 확장시킨 모델로 모델에 기술된 4가지 주요한 공정은 가수분해, 중속영양미생물, 독립영양미생물, 인 축적 미생물과 관련되어 있다. ASM No. 2d는 ASM No. 2에 탈질 가능한 인 축적 미생물에 대해 추가적으로 제시되어 있다(IAWPRC, 1986). 또한 여러 종류의 컴퓨터 프로그램들이 활성 슬러지 모델을 바탕으로 개발되어 사용되고 있으며, 대표적인 것으로는 부유성장 시스템에 대해 개발된 SSSP, ASIM, EFOR, GPS-X 등 상용화 프로그램들이다(US EPA, 1993).

GPS-X(General purpose simulator, Activated Sludge Model No. 1 plus clarifier)는 대형하수처리장의 처리공정을 정상상태 및 동적인 상태로 모사할 수 있는 강력한 프로그램으로, 1987년에 IAWQ에서 제시한 하수처리용 활성 슬러지 시스템에서 유기물 제거 및 질산화와 탈질을 예측할 수 있는 활성 슬러지 모델 I를 바탕으로 개발되었다(Henze et al., 1987). GPS-X 모델에는 공정 및 성분에 관계된 반응율 공식이 나와있어 설계자로 하여금 시뮬레이션을 통해 많은 종류의 운전형태를 경험하게 한다. 시뮬레이션은 수처리 공정에 대한 전반적인 이해를 넓히는 중요한 부분으로 자리잡고 있다. 시뮬레이션 도구의 특징은 유기물 제거, 질산화, 탈질, 탈인 등 영양염류 거동의 파악이 가능하며, 하수량, 유입수질의 영향과 운전조건(SRT, MLSS, RAS 등) 등에 따른 운전특성도 또한 파악할 수 있다. Modification을 통해 다양한 고도처리공법을 적용하여 설계인자를 도출함으로써 운전상의 문제점을 예측할 수 있다. 유입수 성상 및 각각의 단위 처리시설의 parameter를 입력한 후 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 처리장 운전에 대해 예측하도록 되어있다(GPS-X, 2001).

본 연구에서는 2단 탈질로 이루어진 pilot plant에서 저농도 하수의 질소제거를 위해 외부탄소원을 개발하기 위한 방안으로 수행되어, 활성 슬러지 모델을 기초로 개발된 상용프로그램인 GPS-X 고도처리 모델을 이용하여 pilot plant 운전조건 및 외부탄소원 적용 조건 등을 평가하였다. 또한 pilot plant 운전자료를 바탕으로 모델링을 수행하기 위하여 유입수 성상 조절, physical parameter 등 각종 설계인자를 조절하여 모델링을 수행하여 pilot plant 운전수질과 모델링 결과를 비교 분석하였다. 특히 반응조의 DO와 매개변수를 보정하고 C/N비 조절을 통해 최적 운전조건을 확인하고, 주요 반응계수에 대해 민감도를 분석하여 처리수질에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 평가하는 등 실제 현장에서의 적절한 DO 농도나 C/N비 등 운전인자를 도출하였다.

2. 연구방법

2.1. GPS-X 프로그램

GPS-X는 캐나다의 Hydromantis에서 SUNSPARC

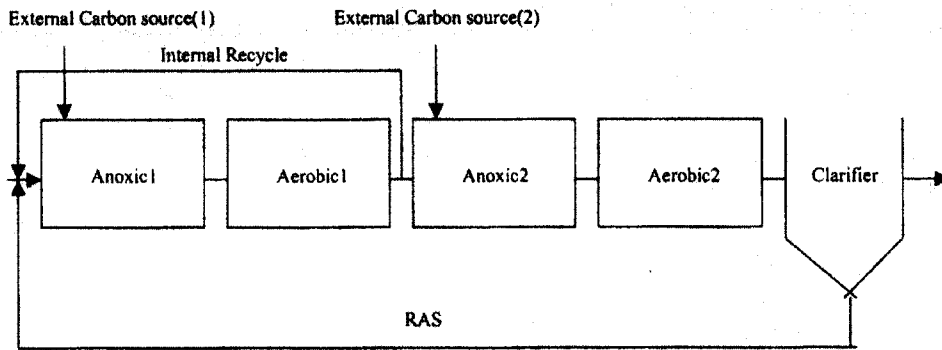


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant for modeling.

Table 1. Operation conditions of pilot plant

Reactor		Volume(m ³)	HRT(hr)
	Stabilization	1.94	-
Ax1	Preanoxic	2.00	1.50
Ox1	Aerobic 1	2.60	1.95
	Aerobic 2	2.60	1.95
Ax2	Alternate(anoxic)	0.80	0.60
	Postanoxic	2.00	1.50
Ox2	Stripping	1.20	0.90
Total reactor		11.20	8.40
2nd. settling		5.27	3.95

Table 2. Water quality of influent and effluent in pilot plant

Items	Water quality(mg/L)	
	Influent	Effluent
TCOD _{Cr}	269.7	59.6
SCOD _{Cr}	185.1	59.5
TBOD ₅	83.4	10.8
TSS	86.3	5.0
T-N	36.9	5.8
NH ₄ -N	28.1	0.5
T-P	2.2	0.9

station의 UNIX 환경으로 만들었으며 최근 Windows 환경에서도 사용이 가능하도록 개발속도가 빨라지고 있다. Simulation program은 plant를 운전하고 설계하는데 기본이 되는 유입조건, 공정운전, 활성 슬러지의 침전 특성 등의 많은 parameter들을 이해하는데 가장 강력한 tool이 되고 있다(GPS-X, 2001). 하·폐수 처리장 운전시 dynamic behavior와 운전시스템의 문제점을 검토해보는 것은 공정을 향상시키는데 중요한 역할을 할 수 있다. 몇몇 강력한 tool을 보면 동력학적인 수학적 모델과 computer simulation, 공정의 안정도 평가 등으로 구성되어 있으며, 운전특성에 대한 고려사항은 원수의 구성성분과 농도, 유량에 따라 일시적으로 변화되는 수많은 변수들에 대한 것이다. 이런 변수들을 이용하여 변화를 모사하며 공정에 악영향을 주는 시기를 미리 예측할 수 있는 감시시스템으로서의 기능도 갖추고 있다. 프로그램을 통해

dynamic simulation 기법의 신기술을 확보하고 하·폐수처리장의 운전특성을 파악하며 특히 활성 슬러지 공정 및 탈질·탈인 공정도 평가할 수 있게 되었다. 또한 하·폐수처리장 운전 및 증설 비용을 절감하는 이점과 운전인자, 설계인자 등의 공정 data 축적으로 인한 feedback 효과를 가져올 수 있는 장점도 있다.

2.2. Pilot plant 운전조건 및 모델 layout

Pilot plant 운전 모식도 및 조건은 각각 Fig. 1 및 Table 1과 같으며, 점용조는 무산소조로 이용하였다. Pilot plant 유입수는 국내 J하수처리장 유입수를 이용하였으며, 유량은 32m³/d, 내부반송율 200%, 슬러지 반송율 100%, SRT 17d, MLSS 3,400mg/L이었으며, 이때 운전온도는 18-25°C 범위였다. 탈질을 위한 전무산소조와 후무산소조 전단에 외부탄소원으로 효율이 확인된 메셀로스페액을 주입하였으며, 탄소원 주입량과 전/후무산소조 주입하였다(부산광역시, 2002). 모델에 적용된 pilot plant 유입 및 유출수질은 Table 2와 같으며, 이를 바탕으로 GPS-X simulator를

Table 3. General components of mecellulose wastewater (unit: mg/L)

Items	pH	TCOD _{Cr}	SCOD _{Cr}	TSS	T-N	Alk.
Characteristic analysis*	10.5	62,333	57,416	234	N.D	368
Lab-scale experiment**	10.4	60,000	53,000	210	N.D	300
Pilot plant experiment***	10.1	60,757	56,991	43	23	336
Demonstration test****	10.6	52,292	50,570	-	15	438
Average	10.4	58,846	54,494	162	19	361

* Characteristic analysis : avg. value on 3 times analysis (2001. 9)

** Lab-scale experiment : avg. value on 6 times analysis (2001. 11 ~2002. 1)

*** Pilot plant experiment : avg. value on 35 times analysis (2002. 3 ~ 2002. 6)

**** Demonstration test : avg. value on 12 times analysis (2002. 7)

Table 4. Characteristic of influent COD for modeling (unit : mg/L, (%))

Item	S _i	S _s	X _i	X _s	X _H
Modeling influent	94.4(35.0)	90.7(33.6)	3.2(1.2)	63.4(23.5)	17.9(6.6)
External carbon source	6,187(9.9)	55,683(89.3)	22.2(0.04)	347.5(0.6)	92.7(0.1)
General characteristic*	(12.5)	(20)	(12.5)	(45)	(10)

* General characteristic of domestic sewage of Korea(최의소, 1999)

이용하여 pilot plant 운전결과와 비교 검토하였다.

Layout은 모델링을 수행함에 있어 가장 기초적인 작업으로 모델링 수행의 바탕이 된다. Pilot plant와 동일하게 외부탄소원을 추가적인 유입수로 가정하여 무산소조 1 및 무산소조 2에 1:2의 유량비율로 주입하였다.

2.3. 메셀로스펙액

본 연구에서 대체 외부탄소원으로 사용된 메셀로스펙액은 S사의 U공장에서 배출되는 메셀로스제품 생산공정 폐액으로, 메셀로스는 천연고분자인 cellulose에 도입한 치환체에 따라 HPMC(hydroxypropyl methyl cellulose), HEMC(hydroxyethyl methyl cellulose), MC(methyl cellulose)로 구성되어 있다. 수용성 고분자인 메셀로스는 건축, 페인트, 화학산업, 의약품 등 다양한 분야에서 증점(thickening), 유화(emulsification), 분산(dispersion), 현탁(suspension), 보수성(water retention), 우수한 작업성(workability) 등이 요구되는 공정 중에 주첨가제로 사용되는 고기능 정밀화학 제품이다. 본 연구에서 적용한 메셀로스펙액은 분말활성탄으로 hemicellulose를 제거한 것을 사용하였으며, 성상은 Table 3과 같이 pH는 평균 10.4로 알칼리성을 띠고 있으며, TCOD_{Cr}가 평균

58,846mg/l, SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}은 0.93으로 높게 나타났다. TSS는 평균 162mg/l, T-N 성분도 평균 19mg/l로 유기물 농도에 비해 상대적으로 낮게 분석되었다.

2.4. 유입하수의 성상 및 운전 parameter

하수내의 유기물은 X_s(입자성 분해성), X_i(입자성 난분해성), X_H(미생물), S_s(용존 생분해성), S_i(용존 난분해성)으로 나뉘어지며, 유입하수에 따라 상이한 값을 갖게 된다(US EPA, 1993). 용존 생분해성 및 용존 난분해성 유기물 등을 분석하기 위해서는 유입 및 유출수의 용존성 COD 측정, aerobic batch test, anoxic batch test 등의 방법이 이용된다(Henze, 1992). 모델의 유입수 자료는 활성 슬러지 모델 No. 2d의 상태변수들로 적절히 변경되어야하며, GPS-X에서 제공하고 있는 Influent Advisor를 이용하여 변경하였다. 본 모델링에 사용된 유입하수의 성상은 Table 4와 같이 S_s가 35%, S_i가 33%로 용존성 유기물 비율이 높다. 우리나라 하수처리장의 일반적인 난분해성 유기물 비율 약 25%에 비하여 난분해성 비율이 36.2%(S_i+X_i)로 높은 편인데, 이는 J하수처리장 유입수에 공장폐수 비율이 높아 난분해성 유기물 비율이 높은 것으로 판단된다.

모델링에서 생물반응조 및 2차침전지의 운전성능

Table 5. Operation conditions of pilot plant and modeling

Items	Operation conditions			
DO concentration(mg/L)	Anoxic1	0.34	Anoxic 2	0.51
	Aerobic 1(1)	3.58	Aerobic 2	3.49
	Aerobic 1(2)	5.26		
MLSS(mg/L)	3,491			
SRT(day)	7.5			
Temperature(°C)	20			

Table 6. Kinetic parameter and reaction coefficient for modeling

Parameter	Symbol	Constant
Heterotrophic yield	Y_H	0.63
Autotrophic yield	Y_{AUT}	0.24
Heterotrophic maximum specific growth rate	μ_H	6/d
Autotrophic maximum specific growth rate	μ_{AUT}	1/d
Fermentable substrate half saturation coefficient	K_F	4g/m ³
Volatile fatty acids half saturation coefficient	K_A	4g/m ³
Maximum settling velocity	V	274m/d

을 분석하는데 중요한 요소는 HRT이며, HRT를 산정하기 위해서는 유입유량과 반응조의 용적이 필요하다. 모델링에도 반응조의 용적 및 기타 physical parameter를 입력하여야 하며, pilot plant의 구조물 크기와 같은 용적으로 모델링 반응조 입력값을 사용하였다. 또한, HRT와 더불어 반응조 내의 운전조건이 중요하며, 무산소 및 호기조건을 형성하는 근본적인 요소인 DO가 가장 중요한 요소라 할 수 있다. Pilot plant는 2조의 무산소조와 2조의 호기조로 구성되어 있으며, 실제 운전시의 DO 농도를 입력하여 종속영양미생물 및 독립영양미생물의 성장이 가능하도록 하였다.

모델링은 pilot plant와 대부분 같은 조건으로 설정하였으나, SRT의 경우 pilot plant의 경우보다 상당히 낮으며, 이는 모델에서의 SRT와 MLSS가 상관관계가 있어 MLSS를 실제 운전조건과 맞추기 위하여 낮은 SRT로 적용하였기 때문이다. 모델링에 사용된 운전조건은 Table 5와 같다.

2.5. 동력학계수 및 양론계수 추정

Pilot plant에 대한 모델링 입력 인자인 동력학계수 및 양론계수들에 대해서는 default값을 사용하여 simulation한 경우와 추정된 값을 사용하여 simulation

한 경우로 구분하였다. Default값으로 모델링에 사용된 주요 동력학계수 및 반응계수는 Table 6과 같다.

또한 운전조건 및 유입수 조건을 보정하는 것 외에 동력학계수 및 양론계수를 Nelder-Mead의 다변수 함수의 극소값을 구하기 위한 Simplex법에 의해 추정을 하였으며, 이 방법은 동력학계수 및 양론계수 추정을 위해 GPS-X 프로그램에서 사용하고 있다. 변수가 두 개인 경우에 심플렉스는 삼각형이고, 삼각형의 세 꼭지점에서 구한 함수값을 비교하여 탐색을 진행한다. 가장 나쁜 꼭지점을 새로운 꼭지점으로 바꾸는데, 여기서 가장 나쁘다는 것은 $f(x, y)$ 의 값이 가장 크다는 것을 의미한다. 이렇게 삼각형을 새로 구성한 다음에 탐색을 계속하여 이 과정에서 다른 모양을 가진 삼각형의 수열이 만들어질 수 있다. 그러나 꼭지점에서 구한 함수값의 크기는 점점 작아지고 삼각형의 크기도 작아지므로, 결국에는 최소값이 나오는 점의 좌표를 구할 수 있다. 이 알고리즘은 N개의 변수를 가진 함수의 최소값을 구하는 것이 목적이다. Nelder-Mead 방법은 효과적이고, 계산상으로도 매우 간결하다(Nelder et al., 1965).

활성 슬러지 모델 No. 1에 포함된 동력학 및 양론계수 19개 중 모델에 민감한 주요 5개 변수를 선정하여 파라미터를 동일한 방법으로 추정하였다. 추정을

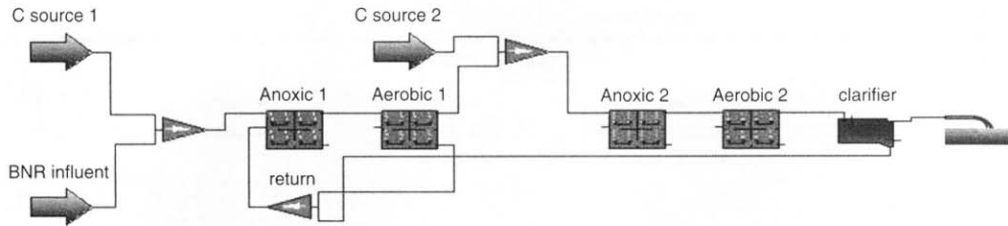


Fig. 2. Schematic diagram for modeling.

위한 비용함수(Cost Function)는 다음 식과 같이 계산되었다(GPS-X, 2001; Nelder et al., 1965).

$$\text{Cost Function} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\text{Composit}_{\text{Eff,Cat},i} / \text{Composit}_{\text{Eff,Mea},i} - 1)^2 / 4}$$

여기서, $\text{Composit}_{\text{Eff,Cat},i}$ 는 i 번째 유출수 계산값이며, $\text{Composit}_{\text{Eff,Mea},i}$ 는 i 번째 유출수 측정값이다. Composit 는 TCOD_{Cr} , TBOD_5 , TSS , T-N 으로 설정하였다.

2.6. 모델링 수행

모델링 수행 시는 예측된 유출수질과 실측자료를 비교·검토하고 모델링 상에서 유기물 및 질소 제거율을 평가하였다. 또한 pilot plant 반응조의 용존산소나 C/N비 등 반응조 운전조건 및 동력학계수 및 반응계수를 보정하여 모델링에 적용하여 유출수질을 예측하고, 반응계수의 민감도를 분석하여 가장 큰 영향을 미치는 인자를 평가하는 등 2단 탈질공정에 외부탄소원을 실제로 적용하기 위한 최적 운전조건과 현장 적용성을 검증하였다. 모델링에 사용된 GPS-X simulator의 구성화면은 Fig. 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델링에 의한 유출수질 비교

동력학계수를 default값으로 설정하여 모델링한 결과를 Table 7에 나타내었다. 모델링 결과 유출수의 COD_{Cr} , T-N , $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도는 각각 111.7mg/L, 11.0mg/L, 0.6mg/L로 실제 운전결과보다 높게 나타났다. 이처럼 모델링의 결과가 실제 pilot plant 운전결과보다 높게 나타나는 것은 모델링 입력조건과 반응조의 운전조건이 달라서 반응계수 즉, default값이 다르게 설정되어 제거율이 낮은 것으로 생각된다. 그러므로, pilot plant 운전결과와 simulation의 유출수질 차

Table 7. Quality of influent and effluent result as modeling (unit: mg/L)

Item	Influent (anoxic tank 1)	Effluent	
		Simulated	Observed
TCOD_{Cr}	393.6	111.7	59.6
TBOD_5	156.6	4.9	10.8
TSS	86.7	7.8	5.0
T-N	40.4	11.0	5.8
$\text{NH}_4\text{-N}$	27.8	0.6	0.5
T-P	3.6	2.6	0.9

이를 줄이기 위해서는 DO나 HRT, C/N 비 등 반응조 운전조건에 따른 모델링 입력조건을 조절을 통한 보정이 필요하다.

생물반응조의 각 반응조별 질소거동($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)을 평가한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 질산화반응은 pilot plant 운전과 모델링 자료가 유사하게 나타났으나, 탈질반응에 있어서는 다소간 차이를 보였다. 반응조별로 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 전반적으로 모델링 결과가 높게 나타났으며, 현재 운전조건처럼 무산소조에서 DO 농도가 높게 유지된다면 반응조 운전조건에 따라서 탈질이 저하되어 유출수의 질소농도가 높아질 가능성이 모델링 결과로부터 도출되었다. 모델링 결과 질산화 반응은 현재 운전조건에서 안정적으로 유지되고 있지만, 탈질효율은 낮게 나타나 무산소조의 DO 농도 등 운전조건의 조절이 필요한 것으로 판단된다.

3.2. 모델 보정에 의한 유출수질 예측

(1) DO의 영향

질소 농도에 있어서 pilot plant 운전자료와 모델링 결과가 차이가 크게 나타나므로 질소제거 효율에 영향을 많이 미치는 생물반응조 내의 DO를 적절한 범

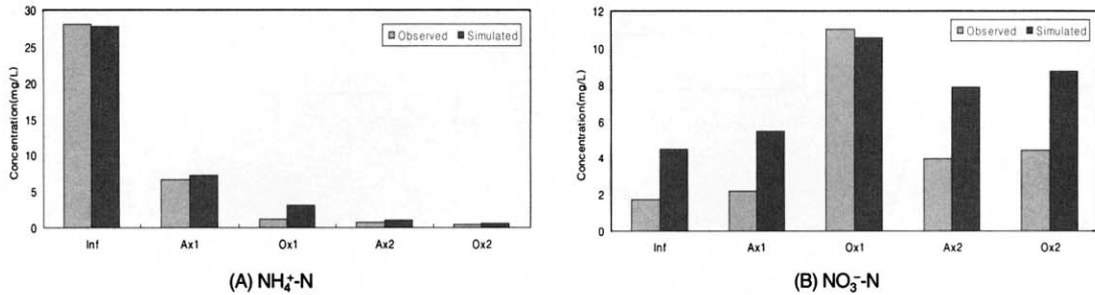


Fig. 3. Comparison of effluent nitrogen observed and simulated in each reactor.

Table 8. Modified DO concentration in each reactor

DO condition	Anoxic1	Aerobic1(1)	Aerobic1(2)	Anoxic2	Aerobic2
Simulated DO(mg/L)	0.34	3.58	5.26	0.51	3.49
Modified DO(mg/L)	0.25	1.58	1.76	0.42	1.49

Table 9. Concentration of nitrogen in effluent by DO modification

Item	Concentration of effluent nitrogen(mg/L)		
	Observed	Simulated	Modified simulation
NH ₄ -N	0.5	0.59	0.50
NO ₃ -N	4.26	8.42	4.24

위 내에서 조절하여 유출수의 NH₄-N 및 NO₃-N 농도가 pilot plant 운전 결과와 동일하도록 모델링을 수행하였다. Pilot plant 운전시 DO 농도와 모델링 상에서 조정된 DO 농도는 Table 8과 같다. 즉, 질산화 및 탈질반응은 DO 농도에 대한 영향이 크므로 호기조 및 무산소조의 DO 농도를 낮추어 유출수질을 예측하였다. 특히 호기조의 DO가 모델링시 3.58~5.26mg/L로 높았으나 실제 운전시 유출수질에 맞게 DO를 조정하였을 때는 1.58~1.76mg/L로 낮게 나타났다. 이러한 결과로부터 현재 생물반응조는 과폭기되며, 비경제적으로 운전되고 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 DO를 낮추어서 모델링하여도 Table 9에 나타난 것처럼 유출수의 질소농도를 pilot plant 운전수질과 비슷하게 유지할 수 있는 것으로 예측되었다.

DO 조절을 통해서 각 반응조의 질소거동을 예측하여 pilot plant 수질과 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 대부분의 반응조에서 pilot plant와 DO 조정

된 모델링의 수질이 유사하게 나타났지만, 제1호기조에서 NH₄-N는 DO를 조정하여 모사한 경우가, NO₃-N는 pilot plant 운전결과가 더 높게 나타났다. DO 조절을 통해 제1호기조의 DO를 3.58mg/L에서 1.58mg/L로 낮추었기 때문에 질산화율이 다소 낮아져 암모니아성 질소 농도가 높게, 질산성질소 농도가 더 낮게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 DO 조정에 의한 모델링으로 Fig. 4에 나타난 것처럼 유출수는 물론 전체적으로 pilot plant 각 반응조의 처리수질을 유사하게 모사한 것으로 나타났다. 이때 반응조(전무산소조, 호기조, 겸용조(호기조), 후무산소조, 탈기조(호기조))의 용존산소는 각각 0.25, 1.58, 1.76, 0.42, 1.49mg/L로 운전하여도 pilot plant의 유출수질과 유사하게 모사되었다.

(2) 동력학계수 및 양론계수의 추정 및 보정

시뮬레이션에서 활성 슬러지 모델의 파라미터를 추정하기 위한 최적화 방법은 GPS-X에 포함된 Nelder-Mead Simplex 방법에 의해 수행되었으며, 비용함수에 포함된 Composit항은 다음과 같이 계산되었다(Nelder et al., 1965).

$$Composit_{Eff,Cat,1} = TCOD_{Cr} = S_i + S_s + X_i + X_s + X_{bb} + X_{ba} + X_p$$

$$Composit_{Eff,Cat,1} = TBOD_5 = 0.25(S_s + X_s + (1 - f_p)(X_{bb} + X_{ba}))$$

$$Composit_{Eff,Cat,1} = TSS = 0.75(X_i + X_s + X_{bb} + X_{ba} + X_p)$$

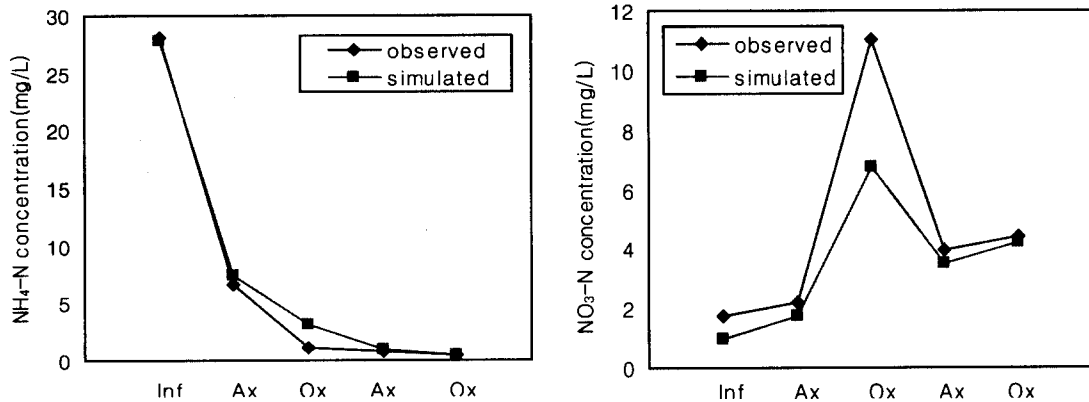


Fig. 4. Comparison of effluent nitrogen observed and modified simulation in each reactor

Table 10. Comparison of default and calibrated parameter in GPS-X program

Symbol	Default	Calibrated	Unit	Description
μ_{maxH}	6.0	11	1/day	Heterotrophic maximum specific growth rate
K_F, K_A	4	10	gCOD/m ³	Half saturation coefficient for heterotrophic growth
K_D	3.0	1.5	1/day	Hydrolysis rate
b_H	0.4	0.3	1/day	Lysis and decay rate constant
Y_H	0.63	0.78	-	Heterotrophic yield

Table 11. Calibrated simulation data compared with modified simulation (unit : mg/L)

Item	TCOD _{Cr}	BOD ₅	TSS	T-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	T-P
Observed	59.6	10.8	5.0	5.8	0.50	4.26	0.25
Modified simulation	111.7	4.9	7.8	6.3	0.50	4.24	2.61
Calibrated simulation	113.9	6.4	9.0	8.1	0.47	5.88	0.57

$$Composit_{Eff, Cal, 1} = T - N = S_{no} + S_{nb} + S_{nd} + X_{nd} + i_{xb}(X_{bb} + X_{bd}) + i_{xp}(X_i + X_p)$$

여기서, f_p 는 미생물 사멸에 의해 생성된 입자성 성분의 분율, i_{xb} 는 미생물 내에 COD대 N의 질량비, i_{xp} 는 미생물 사멸에 의해 생성된 생성물의 COD대 N의 질량비이며, 그 값은 각각 0.08, 0.086, 0.06으로 IWA Simulation Benchmark에서 제시한 값을 이용하였다. 비용함수를 이용하기 위하여 pilot plant의 유입, 외부탄소원, 유출자료를 활성 슬러지 모델의 유입자료로 환산하였으며, 비용함수를 최소화하는 파라미터 값을 추정된 결과는 Table 10과 같다. 시뮬레이션에 사용되었던 default 값(Table 5)과 비교할 때, K_F, K_A 는 4g/m³, Y_H 는 0.63이었지만 파라미터 추정으로 보정된 파라미터는 각각 10g/m³, 0.78로 더 크게 추정되

었다.

추정된 파라미터를 사용하여 시뮬레이션한 결과(calibrated simulation)와 DO를 조정하여 시뮬레이션한 결과(modified simulation)를 비교하여 Table 11, Fig. 5에 각각 나타내었다. Table 11에 제시되어 있는 각 시뮬레이션 경우에 대한 유출수질을 비교하면 T-P를 제외하고는 추정된 파라미터를 사용하여 시뮬레이션한 결과가 DO를 조정하여 시뮬레이션한 결과보다 조금 높게 나타났지만, 두 경우의 유출수질은 전체적으로 유사하였다. Fig. 5에 제시되어 있는 각 반응조의 농도에 있어서도 NH₄⁺-N의 농도는 두 가지 시뮬레이션의 경우에 있어 매우 유사하였고, NO₃⁻-N의 농도는 추정된 파라미터를 사용하여 시뮬레이션한 결과가 다소 높게 나타났다.

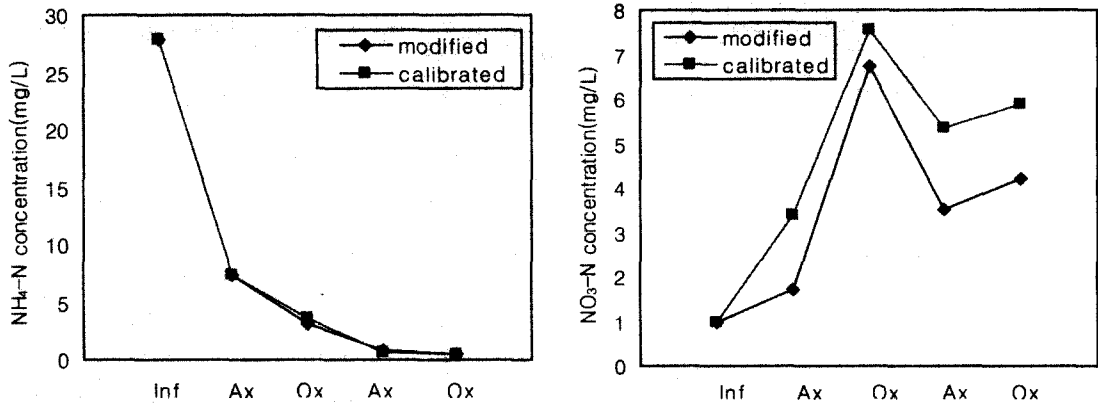


Fig. 5. Comparison of effluent nitrogen for modified simulation and calibrated simulation in each reactor.

Table 12. C/N ratio applied in modeling

Item	Influent of pilot plant		Influent of domestic STPs	
	w/ mecellulose	w/o mecellulose	Range	Average
BOD/T-N ratio	6.73	2.73	0.63~10.46	3.19

3.3. 최적 C/N 비의 결정

하수처리장 설계에 있어서 유입수질은 매우 중요하며, 특히 유입수의 C/N 비는 질소제거에 많은 영향을 미친다. C/N 비 변화에 따른 유출수질의 영향을 평가하기 위해 pilot plant 유입수(외부탄소원 포함 및 미포함)와 국내 하수처리장의 평균 C/N 비를 적용하였다. Pilot plant 유입수의 BOD/T-N 비는 Table 12와 같이 외부탄소원으로 메셀로스페액을 주입했을 때 6.73으로 탈질에 충분한 탄소원이 공급되나, 주입하지 않았을 때 2.73으로 국내 하수처리장의 평균 3.19에 비해 낮게 나타났다.

Table 12에 제시된 C/N 비에 따라 모델링을 통해 유출수질을 예측하여 Table 13에 나타내었다. Pilot plant에서 메셀로스페액을 주입하지 않았을 경우(C/N = 2.73) 유출 T-N의 농도가 방류수 수질기준인 20mg/L를 상회하므로 외부탄소원의 주입이 필수적이며, 메셀로스페액을 주입하였을 경우(C/N = 6.73) 유출 T-N이 6.3mg/L로 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 우리 나라 하수처리장의 C/N 비에 따라 모델링한 결과와 비교해보면 C/N 비가 높아질수록 T-N의 제거효율이 높아지는 것을 알 수 있다. 그러나 C/N 비가 10.46까지 높아지더라도 C/N 비 6.73인 경우에 비해 T-N의 유출수질이 많이 향상되지 않아

현재 주입되는 외부탄소원의 양보다 더 많이 메셀로스페액을 주입하는 것은 비경제적인 것으로 판단된다.

이러한 결과는 질소형태별로 C/N 비에 따른 유출수의 질소농도를 비교해보면 즉, C/N 비가 6.73 이상으로 탄소원 주입량이 증가되어도 유출수의 NO₃-N 농도가 높으므로 전체적인 유출수 T-N은 크게 감소하지 않는 사실에서 확인할 수 있다. C/N 비가 충분하여도 운전조건이나 반응조 여건 등 탈질효율 자체에 한계가 있으므로 안정적인 효율적인 탈질을 위해 적절한 C/N 비를 유지하기 위한 탄소원 공급만이 필요하다는 것을 알 수 있다.

모델링으로 예측된 C/N 비 변화에 따른 T-N 제거효율은 Fig. 6과 같이 로그함수식으로 표현된다. 이러한 함수식으로 추정되는 유출수의 T-N 농도를 유지하기 위한 C/N 비와 질소제거율의 관계를 보면, 현행 방류수 수질기준은 T-N 20mg/L이며, 본 연구에서와 같이 유입질소가 36.9mg/L일 때 이 기준을 만족하기 위해서는 C/N 비가 약 2.7, 질소제거율은 50% 정도가 필요하다. 그러나 수질기준이 점차 강화되고 있으며, 안정적인 유출수질 유지를 위해서는 유출 T-N이 10~15mg/L 이하로 처리되어야 하며, 이때의 유입하수의 C/N 비는 4.27~6.82가 적당하다. 즉, 적

Table 13. Prediction of effluent depending on C/N ratio (unit: mg/L)

C/N ratio	Water Quality	TCOD _{Cr}	TBOD ₅	TSS	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P
0.63	Influent	60	24.4	30	36.9	33.8	1	0.85
	Effluent	17.3	3.6	5.8	33.5	13.2	19.9	0.36
	Removal eff.(%)	71.2	85.3	80.7	9.2	-	-	-
2.73	Influent	269.7	100.8	86.3	36.9	27.8	1	2.52
	Effluent	72.9	4.4	7.0	22.1	4.47	16.48	0.47
	Removal eff.(%)	72.9	95.6	91.3	40.1	-	-	-
3.19	Influent	315	117.6	100	36.9	26.45	1	2.89
	Effluent	84.6	4.5	7.3	19.6	2.82	15.53	0.49
	Removal eff.(%)	73.1	96.2	92.7	46.9	-	-	-
6.73	Influent	393.6	156.6	86.7	40.4	27.8	1	3.6
	Effluent	111.7	6.4	9.0	6.3	0.5	4.24	2.61
	Removal eff.(%)	71.1	95.9	89.6	80.0	-	-	-
10.46	Influent	1030	386.7	350	36.9	4.61	1	8.88
	Effluent	310.3	43.0	17.0	10.3	6.8	0	1.69
	Removal eff.(%)	69.9	88.9	95.1	72.1	-	-	-

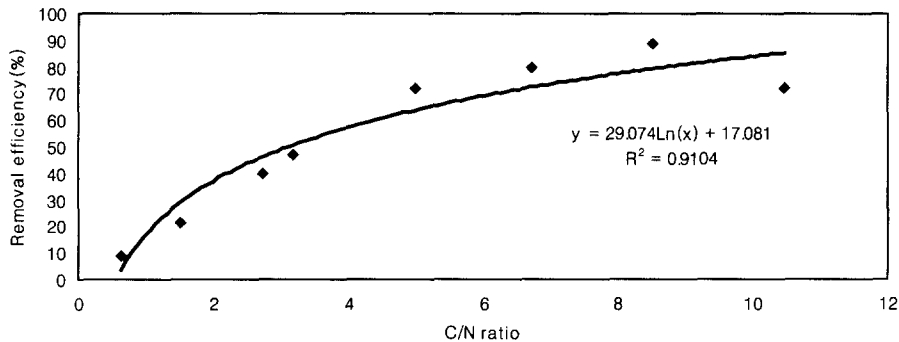


Fig. 6. Prediction of T-N removal efficiency as C/N ratio.

정 C/N 비에 따른 질소 제거효율은 BOD/T-N 비에 따라 질소제거효율을 4개 등급으로 분류하였을 때, BOD/T-N 비가 5 이상 유지해야 하며 이때 질소제거효율이 우수하다고 제안한 Grady 및 Daigger의 결과와 유사하게 나타났다(Grady et al., 1999).

3.4. 반응계수의 민감도 분석

동력학계수 및 반응계수의 변화에 대한 유출수질의 변화정도를 민감도로 분석하여 수치화 하였다. 각 수질농도 항목의 변화율을 동력학계수 및 반응계수의 변화율로 나눈 값을 민감도로 적용하였으며, **Table 14**에 제시한 것처럼 Y_H 는 총질소 및 질산성질소에서 각각 0.91, 1.32, μ_{mAUT} 값은 총질소 및 암모니아성질

Table 14. Sensitivity coefficient of kinetic and stoichiometric parameter

Item	Y_H	Y_{AUT}	μ_{mH}	μ_{mAUT}
T-N	0.91	0.025	0.097	1.385
NH ₄ -N	0.55	0.524	-	1.978
NO ₃ -N	1.32	0.057	0.122	-

소에서 각각 1.385, 1.978로 민감도 계수가 큰 것으로 나타났다.

민감도 계수가 큰 반응계수인 Y_H 와 μ_{mAUT} 값을 전형적인 값에서 하한값과 상한값으로 변화시켰을 경우 반응조에서 질산화 및 탈질 반응속도의 변화에 대하여 살펴보았다. **Table 15**에 나타낸 것처럼 Y_H 값이 작

Table 15. Variation of denitrification rate as change of Y_H

Item	$Y_H = 0.47$	$Y_H = 0.63$	$Y_H = 0.79$
Denitrification rate in Anoxic 1	10.23	8.53	5.76
Denitrification rate in Anoxic 2	11.30	8.41	5.03

Table 16. Variation of nitrification rate as change of μ_{MAUT}

Item	$\mu_{MAUT} = 0.27$	$\mu_{MAUT} = 1.0$	$\mu_{MAUT} = 1.20$
Nitrification rate in Oxid 1(1)	0.5	5.2	5.8
Nitrification rate in Oxid 1(2)	0.5	4.5	4.6

아질수속 탈질속도가 커지는 경향을 나타내었다. 즉, Y_H 값이 작아질수록 탈질속도가 커지고 반응조 유출수의 NO_3^- -N 제거효율은 향상되는 것으로 판단된다. 이와 같이 Y_H 값이 작아질수록 탈질속도가 커지는 이유는 탈질반응에 관련된 NO_3^- -N 값의 변화가 $1/Y_H$ 에 비례하므로 Y_H 값이 작아질수록 NO_3^- -N의 변화량이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Table 16에서 나타난 것처럼 μ_{MAUT} 값이 커질수록 질산화속도가 커져 반응조 유출수의 NH_4^+ -N 제거효율이 향상되는 것으로 판단된다. μ_{MAUT} 값이 커질수록 질산화속도가 커지는 것은 질산화미생물의 성장률이 커지기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 유기물 부하가 매우 낮은 하수처리장에서 탈질시 요구되는 대체 외부탄소원과 관련하여 2단 탈질공정으로 구성된 pilot plant 운전과 GPS-X 고도 처리 모델을 이용하여 메셀로스페액을 주입에 따른 반응조에서의 질소 거동을 예측하고 최적 운전조건 등 외부탄소원의 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

· GPS-X 모델을 이용하여 pilot plant 운전조건에 대해 시뮬레이션한 결과 실제 유출수 농도와 다소의 차이를 나타내고 있으나 반응조의 DO를 보정하고 동력학계수 및 반응계수를 추정하여 시뮬레이션한 결과 pilot plant 운전자료와 유사하게 모사하였다. 이때 반응조(전무산소조, 호기조 1, 호기조 2, 후무산소조, 탈기조)의 용존산소 농도는 각각 0.25, 1.58, 1.76, 0.42, 1.49mg/L로 운전하는 것이 적절한 것으로 나타났으며 또한 추정된 동력학계수 및 반응계수는 각각

μ_{MAUT} 11/day, K_F , K_A 10gCOD/m³, K_b 1.5/day, b_H 0.3/day, Y_H 0.78이었다.

· 메셀로스페액을 외부탄소원으로 이용시 강화되는 방류수 수질기준 총질소 20mg/L를 준수하기 위해서는 C/N비가 약 3.1, 질소제거율은 50% 정도가 필요하나 안정적인 유출수질 확보를 위해서는 T-N을 10~15mg/L 이하로 유지해야 하며, 이때 적절한 C/N 비는 4.27~6.82인 것으로 나타났다.

· 동력학계수 및 반응계수에 대한 민감도 계수를 분석한 결과 Y_H 는 질산성질소에 대해 1.32, μ_{MAUT} 는 암모니아성질소에 대해 1.98로 주요 인자 중에서 가장 민감도가 크게 나타났다. 또한 Y_H 값이 작을수록 탈질율은 커지고, μ_{MAUT} 값이 커질수록 질산화속도는 커져서 전체적으로 질소제거 효율이 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 부산광역시 (2002) 장림하수처리장 수질(공정)개선관련 대체약품개발, pp. 87-95, 부산광역시.
- 윤석표 (1999) Activated sludge model No. 2를 이용한 하수의 생물학적 질소·인 제거 공정의 처리성 평가, *대한환경공학회지*, 21(4), pp. 609-616.
- 정창화 (2003) 하수의 질소제거를 위한 대체 외부탄소원에 관한 연구, 서울시립대학교, pp. 61-71.
- 최의소 (1999) 상하수도공학, 청문각, 서울, pp. 199.
- 환경부 (2002) 하수도통계.
- GPS-X Technical reference (2001) Hydromantics, Inc., pp. XVIII.
- Grady, C.P.L, Jr., Daigger, G.T. and Lim, H.C. (1999) *Biological Wastewater Treatment*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc.
- Gujer, W. and Larsen, T. A.(1995) The implementation of

- biokinetics and conservation principles in ASIM, *Wat. Sci. & Tech.*, **31**(2), pp. 257-266.
- Henze, M. (1992) Characterization of wastewater for modeling of Activated Sludge Processes, *Wat. Sci. & Tech.*, **18**, pp. 91-114.
- Henze, M.C., Grady, P.L. Jr., Gujer, W., Marais, G.V.R. and Matsuo, T. (1987) Activated Sludge Model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1.
- IAWPRC task group on mathematical modeling for design and operation of biological wastewater treatment (1986) Final report: Activated sludge model, IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1.
- IAWPRC Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment processes (1987) Activated Sludge Model No. 1.
- IAWQ Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment processes (1995) Activated Sludge Model No. 2.
- Metcalf & Eddy (2003) Wastewater engineering: Treatment and reuse, 4th edition, pp. 704-705, McGraw Hill.
- Nelder, J. A. and Mead, R. (1965) A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, **7**, pp. 308-313.
- Randall, C.W., Barnard, J.L. and Stensel, H.D. (1992) Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal, Technomic, Pennsylvania, pp. 85-95.
- U.S. Environmental Protection Agency(1993) Manual nitrogen control, EPA/625/R-93/010, pp. 211-247.