Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 23, No. 2, pp.206-215 (2007)

시공간 동시분할 공정 시뮬레이션을 통한 질소 및 인 제거 최적화 방안

유동진 · 장 덕*,† · 신형수 · 박상민 · 홍기호 · 김수영 · 김명준

건국대학교 공과대학 환경공학과
*건국대학교 공과대학 환경공학과/차세대환경기술센터

Optimization of Nitrogen and Phosphorus Removal of Temporal and Spatial Isolation Process by Model Simulation System

Dongjin Ryu · Duk Chang*,† · Hyungsoo Shin · Sangmin Park · Kiho Hong · Sooyoung Kim · Myoungjun Kim

Department of Environ. Engineering, Konkuk University
**Department of Environ. Engineering, Konkuk University/Innovative Environmental Technology Center*
(Received 6 September 2006, Accepted 18 January 2007)

Abstract

The objective of this study was to establish the optimal system operating strategies for nitrogen and phosphorus removal through model simulation system built for advanced wastewater treatment targeting on simultaneous temporal/special phase isolation BNR process. The simulation system was built with unit process modules using object modules in GPS-X code. The system was well verified by field experiment data. Simulation study was carried out to investigate performance response to design and operation parameters, i.e. hydraulic retention time (HRT), solids retention time (SRT), and cycle time. The process operated at HRTs of 10～15 hours, longer SRTs, and cycle time of 2 hours showed optimal removal of nitrogen. The HRTs of 10～15 hours, SRTs of 20～25 days, and longer cycle time was optimal for phosphorus removal. Both simulation and field studies showed that optimal operating strategies satisfying both the best nitrogen and phosphorus removals include HRTs ranged 10～15 hours, SRTs ranged 20～25 days, and cycle times of 4～8 hours. The simulation system with modularization of generalized components in BNR processes was, therefore, believed to be a powerful tool for establishing optimal strategies of advanced wastewater treatment.

keywords : Alternating flow, ASM, Intermittent aeration, Nutrient removal, Optimization, Simulation

1. 서 론

고도 하 · 폐수처리공법의 하나인 생물학적 영양염류제거(biological nutrient removal : BNR)공법에서는, 반드시 그 시스템내에서 질산화, 탈질, 인 방출 및 축적, 유기물 산화 반응 등이 함께 달성되어야 하며, 관여미생물들의 특성에 맞는 시간적 또는 공간적 상분할이 이루어져야 한다. 특히 우리나라와 같이 유입유기물 농도가 낮은 경우, 질소 · 인 제거 모두가 만족스럽지 못한 경우가 많으므로, 공법에 따라 유입수의 분할주입, 운전융통성을 위한 다단배플식 혐기조분할방법이나, 외부탄소원주입 또는 일차슬러지 산발효공정을 추가하는 탄소원보충방법 등 실제현장에서는 최적화가 힘들거나 비경제적인 방법들에 대한 복잡하고도 어려운 검토를 하여야만 하는 실정이다.

실제현장에서의 최적운전을 위한 복잡하고도 어려운 검토는 실험실규모 실험과 현장에서의 파일럿규모 실험을 통하여 도입하고자 하는 공정의 적용 가능성과 설계 · 운전 인자들을 도출하는 것이 바람직하나, 이를 통하여 모든 조건을 탐색하는 것은 많은 시간과 비용이 소모되는 비효율적인 면이 존재한다. 따라서 실험적인 연구의 한계를 보완하기 위해 최근 시뮬레이션을 통하여 생물학적 공정을 분석하고자 하는 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다(Casellas et al., 2002; Hao et al., 2001; Nuhoglu et al., 2005; Vrecko et al., 2001).

실제현장에서 시뮬레이션의 적용은 질소 및 인 제거에 미치는 시스템 주요 설계 · 운전 인자들의 영향과 내부 반응 거동 등을 알아보고, 그 시스템 고유 특성을 파악하여 시스템을 최적화하는데 매우 용이하다. 또한 각 설계 및 운전 인자들의 복합적인 상호영향을 파악할 수 있으며, 특히 실험적 방법으로는 분석하기 난해한 각 인자간의 민감도 분석이 가능하여 그 시스템에서의 주요 인자 도출이 용이할 뿐 아니라, 시뮬레이션을 통한 시스템의 성능을 예측할 수 있는 큰 장점을 가지는 등(Abusam et al., 2002; Hvala et al., 2002) 하 · 폐수처리시설에의 모델 시뮬레이션 적용은 앞으로 필수적인 공정선정, 설계 및 운전 수단이 될 정도로 그 중요성이 증대되고 있다.

† To whom correspondence should be addressed.
dchang@konkuk.ac.kr

그러나, 현재까지 하·폐수처리장에의 모델 시뮬레이션 적용은 대부분 기존 공간적 분할(spatial isolation)방식의 BNR공정들, 즉 내부순환을 포함하는 다단 완전혼합형의 BNR공정들이나, SBR 계열의 시간적 분할(temporal isolation)방식의 BNR공정들에 국한되어왔다. 또한 극히 일부, 시공간 동시분할방식의 BNR공정을 대상으로 모델링 연구가 발표되기도 하였으나(Stamou et al., 1999), 이는 IAWPRC (International association on water pollution research control)의 ASM1(Activated sludge model No.1)을 이용한 유기물 및 질소 제거에 국한되었으며, 현장 시설에도 적용되지 않는 수준에 머물고 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 공간적 분할방식 및 시간적 분할방식 BNR공정들의 동시 구현이 가능할 뿐만 아니라 이들 공정의 장·단점을 수정·보완할 수 있으며, 그 구축 과정 및 해석방법이 가장 복잡하다고 할 수 있는 시공간 동시분할 BNR공정을 대상으로 하·폐수처리공정 시뮬레이션 코드인 GPS-X(general purpose simulator)를 이용하여 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템을 구축하였다. 구축한 공정 시뮬레이션 시스템의 실시설 적용성 검증을 위하여 반응조 내부거동에 대한 시뮬레이션을 수행하여 현장 실측값과 비교 검증하였으며, 현장시설의 운전 수질과 시뮬레이션 예측값을 비교·분석하였고, 이를 기반으로 현장시설의 상세한 공정 내부 특성 및 각 인자별 영향을 파악함으로써 대상공정의 최적 설계 및 운전 전략을 모색하고자 하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 대상 하·폐수처리공정

시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템의 실시설 적용성 검증을 위하여 동절기를 포함한 2년간에 걸쳐 경기도 소재 K환경사업소내에 설치·운전한 파일럿규모 시스템을 대상공정으로 하였다.

대상공정은 유효용량 8.1 m^3, 규격 1.3 mW×5.7 mL×1.8 mH, 유효수심 1.5 m의 산화구반응조 2기로 구성되고, 간헐폭기 및 유로변경 방법을 동시에 조합하여 네개의 반응단계로 변환시킬 수 있는 공정으로, 각 단위반응조는 시간에 따라 무산소, 혐기, 호기 단계를 거치게 된다.

Fig. 1은 대상공정의 운전모식도를 나타낸 것으로, 사이클주기 4시간의 경우 Step A는 지속시간이 1.5시간이며, 유입수는 초기 무산소조건의 단위반응조로 유입되어 유기물제거와 동시에 전단계에서의 질산화수가 탈질되고, 탈질 후에는 인의 방출이 일어나는 혐기조건이 형성된다. 탈질 및 인방출 후 호기조건인 다음 반응조로 유입되어 잔류 유기물 제거와 질산화 및 인섭취를 수행한 후 침전지를 통하여 처리수가 유출된다.

Step B는 유입 유로가 변경되어 호기조건의 반응조로 유입되어 유기물제거 및 질산화 후 유출되며, 반응시간은 0.5시간이다. 이때 다른 반응조는 독립적으로 공폭기를 실시하여 Step C로 전환하기 전에 인섭취와 아울러 잔류유기물 제거와 잔류 TKN을 질산성질소로 전환시키게 된다.

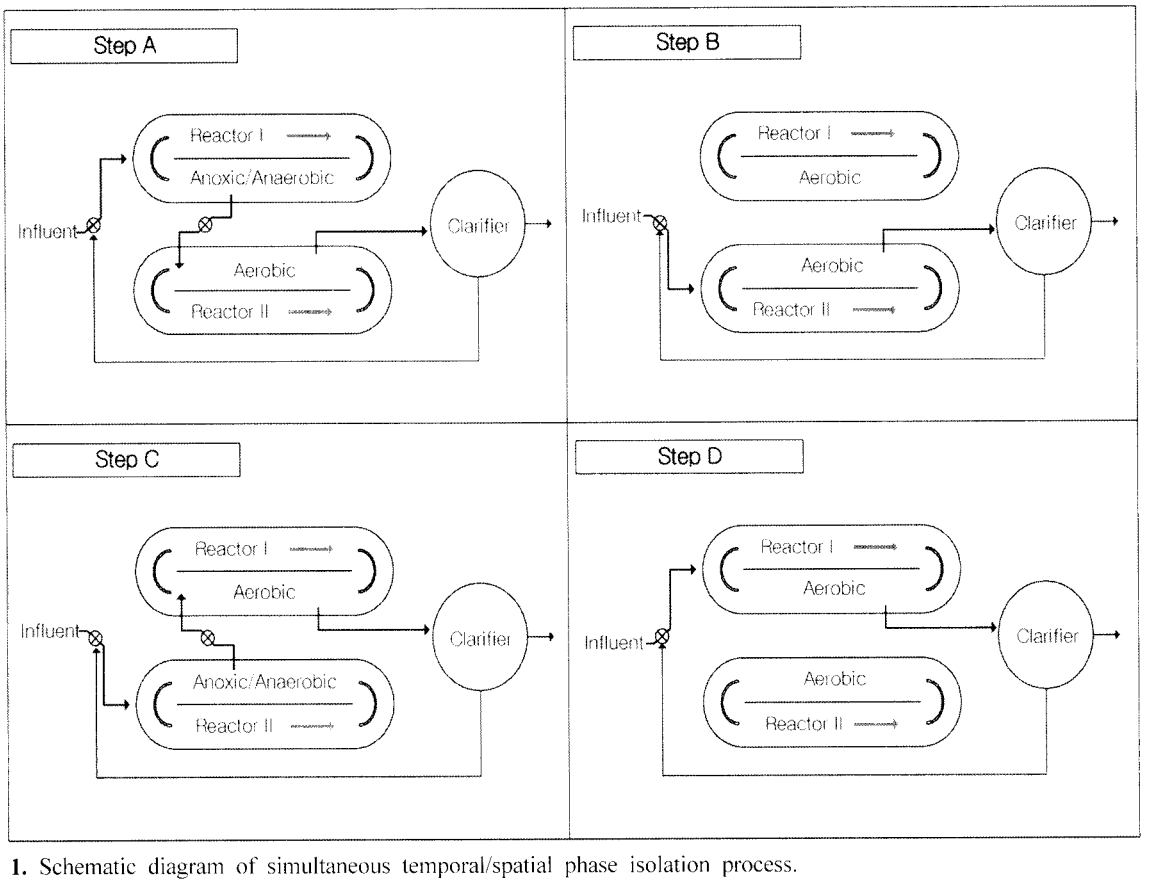


Fig. 1. Schematic diagram of simultaneous temporal/spatial phase isolation process.

Step C 및 Step D는 유로만이 교차된 채 Step A 및 Step B와 동일한 과정이다. 이상의 네 단계를 한 사이클이라 하며, 한 사이클 주기 4시간을 기준으로, 하나의 반응조에 대해서는 무산소 및 혐기 1.5시간, 호기 2.5(0.5+1.5+0.5)시간으로 구성된다.

대상공정은 별도의 온도조절 없이 반응조 수온(혼합액 수온) 5~30°C, 사이클주기 2, 4 및 8시간, 시스템 HRT 10, 14 및 21시간, 시스템 SRT 16~34일의 다양한 조합의 조건하에서 운전되었으며, MLDO(Mixed liquor dissolved oxygen)는 폭기시 2 mg/L이하, 비폭기시 0.5 mg/L이하로 유지되었다.

2.2. 시뮬레이션 프로그램 코드 및 공정 모델

시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템 구축을 위하여 본 연구에서는 GPS-X 5.0 코드를 사용하였다. GPS-X는 도시하수 및 산업폐수 처리공정에 대한 시뮬레이션을 위한 프로그램 코드로서, 하·폐수처리 각 단위 공정을 조합하여 시스템을 구성할 수 있으며 각각의 처리공정을 수치적으로 모형화 할 수 있는 여러 가지 모델을 장착하고 있을 뿐 아니라, 조합된 단위공정을 연동하여 시스템의 정적 및 동적 시뮬레이션이 가능한 강력한 시뮬레이션 엔진을 보유하고 있다(Hydromantis, 2001).

시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템을 구현하기 위하여 생물학적 유기물, 질소 및 인 제거를 고려하며 Denitrifying PAOs를 포함시킨 ASM2d(Henze et al., 1999)를 적용하였다.

동력학 및 양론 계수들은 생물학적 고도처리공정 거동에 영향이 큰 계수들을 선정 및 추정한 기존 연구(이 등, 2004; 정 등, 2005; Manga et al., 2003)들을 바탕으로 모델에 민감한 주요 9개 변수를 선정하였으며, GPS-X에서 사용되는 Nelder-Mead의 다변수 함수 최소값을 구하기 위한 심플렉스(simplex)법을 병행하여 동력학 및 양론 계수를 추정하였고, 그 외의 계수들은 ASM2d의 default값을 사용하였다. Nelder-Mead의 심플렉스법은 N개의 변수를 가진 함수의 최소값을 구하기 위한 것으로, 심플렉스란 주어진 변수보다 하나가 더 많은 점에 의해 정의되는 기하학적 도형을 의미한다. 변수가 두 개인 경우 심플렉스는 삼각형이고, 이 삼각형의 세 꼭지점에서 구한 함수값을 비교하여 최소값을 위한 탐색을 진행한다. 이때 함수 값이 가장 커지는 꼭지점을 새로운 꼭지점으로 바꾸어 삼각형을 구성한 다음 탐색을 계속하며, 이 과정에서 다른 모양을 가진 삼각형의 수열이 만들어 질 수 있다. 이러한 과정을 통하여 꼭지점에서 구한 함수값의 크기가 작아지고, 삼각형의 크기도 작아지므로, 결국에는 최소값을 갖는 점의 좌표를 구할 수 있다(Nelder et al., 1965).

본 연구에서 동력학 및 양론 계수 추정을 위한 목적함수는 다음 식과 같이 계산하였으며(Hydromantis, 2001), 반응조 유출수의 SCOD, 질산성질소, 암모니아성질소 및 인산염인 농도를 최적화 대상 변수(target variables)로 사용하였다.

$$\text{Objective Function} = \sqrt{\sum_{i=1}^{4}(\text{Composit}_{\text{Eff.Cal.i}}/\text{Composit}_{\text{Eff.Mea.i}} - 1)^2/4}$$

여기서, $\text{Composit}_{\text{Eff.Cal.i}}$: i번째 유출수 계산값

$\text{Composit}_{\text{Eff.Mea.i}}$: i번째 유출수 측정값

또한 목적함수를 구하기 위하여 대상공정의 유입수 및 유출수 자료를 ASM2d의 상태변수로 환산하여 적용하였으며, 최적화 대상인 9개의 동력학 및 양론 계수에 대한 목적함수를 최소화하는 최적 계수값을 추정하였다. Table 1은 대상공정을 대상으로 한 민감도 분석 및 보정을 통하여 선정 및 최적화한, default값 이외의 동력학 및 양론 계수 값들이다.

2.3. 시뮬레이션 시스템 구축 및 시뮬레이션 수행

본 연구에서는 시간 또는 공간 분할방식 고도 하·폐수처리공정들의 동시 구현이 가능할 뿐만 아니라, 그 구축과정 및 해석방법이 복잡한 시공간 동시분할 공정의 모델 시뮬레이션 시스템을 구축하기 위하여, 먼저 GPS-X상의 40여가지 객체(object)를 각각의 사용 목적 및 방법에 따라 10가지 객체로 분류하여 객체모듈(object module)을 작성하였다. 작성된 객체모듈을 조합하여 influent, alternating flow, biological reactors, intermittent aeration, sedimentation, tertiary treatment, sludge treatment 및 discharge 단위공정모듈(unit process module)을 작성하였다.

특히 alternating flow 단위공정모듈은 biological reactors 단위공정모듈과 더불어 공간적 상분할을, intermittent aera-

Table 1. Optimized sensitive model parameters for simulation

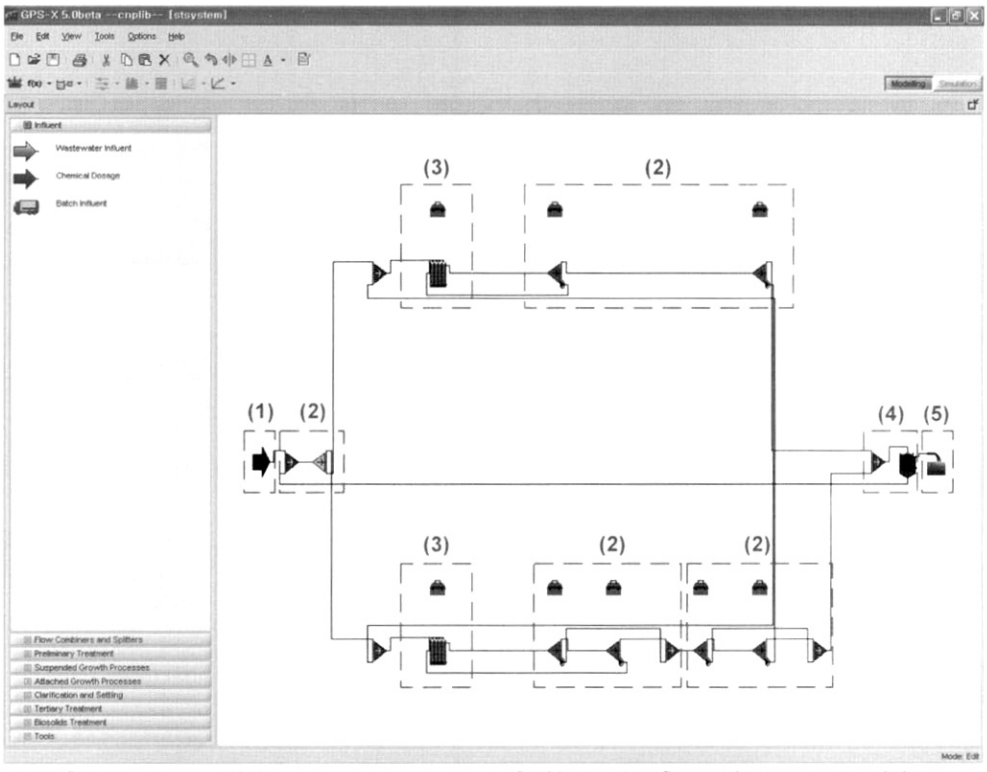
Parameters		Values		Unit
		Default	Optimized	
Y_H	Heterotophic yield	0.63	0.45	gCOD (gCOD)$^{-1}$
Y_{PAO}	Yield coefficient (biomass, PHA)	0.63	0.51	gCOD (gCOD)$^{-1}$
Y_{PO4}	Poly-phosphate requirement (PO_4 release) per PHA stored	0.4	0.34	gP (gCOD)$^{-1}$
q_{PP}	Rate constant for storage of X_{PP}	1.5	0.95	gX_{PP} (gX_{PAO})$^{-1}$
μ_{PAO}	Maximum growth rate of PAO	1.0	1.23	d^{-1}
b_{PAO}	Rate for lysis of X_{PAO}	0.2	0.09	d^{-1}
μ_{AUT}	Maximum growth rate of X_{AUT}	1.0	1.43	d^{-1}
b_{AUT}	Decay rate of X_{AUT}	0.15	0.025	d^{-1}
K_{O_2}	Saturation/inhibition coefficient for oxygen	1.0	0.32	gO_2 m^{-3}

tion 단위공정모듈은 시간적 상분할을 가능하게 하는 모듈로서, 이들 단위공정모듈의 조합을 통하여 Fig. 2와 같은 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템을 용이하게 구축할 수 있었다. 구축한 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템은 현장시설과 동일한 physical parameter를 사용하였으며, 대상공정의 처리특성에 미치는 침전효율의 간섭을 배제하고 시스템 고유의 내부 생물학적 반응특성 파악을 위하여 용존성 성분에 대한 정상상태 시뮬레이션(steady state simulation)을 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 정상상태 조건하에서의 시뮬레이션 예측값 및 실측값의 비교·분석을 통하여 단위반응조 내부 질소·인 거동과 더불어 설계 및 운전 인자별 질소·인 제거특성을 파악하였다.

2.4. 대상 하수 성상 및 분석방법

연구대상 공정으로 유입되는 하수는 분류식하수배제지역의 K하수처리장 침사지 유출수로서, 대상공정에 적용된 유입하수의 주요 성상은 Table 2와 같다.

본 연구에서 측정된 모든 이화학적 분석은 미국 공중보건협회의 표준시험법(APHA, 2005) 및 우리나라 수질공정시험방법(환경부, 2000)에 따라 수행하였다.



(1) Influent object module
(2) Alternating flow unit process module
(3) Intermittent aeration unit process module
(4) Sedimentation object module
(5) Discharge object module

Fig. 2. Simulation system of simultaneous temporal/spatial phase separation process.

Table 2. Characteristics of influent wastewater for field plant

Components	Range	Mean	Components	Range	Mean
Water temp. (°C)	5~30	-	SS (mg/L)	80~280	110
pH	6.7~8.1	7.3	Ammonia (mg/L)	16.3~37.7	23.5
Alkalinity (mg $CaCO_3$/L)	105~240	169	NO_2^--N (mg/L)	-	0.00
BOD_5 (mg/L)	95~340	150	NO_3^--N (mg/L)	-	0.00
TCODcr (mg/L)	135~430	285	SP (mg/L)	1.05~5.14	2.54
TKN (mg/L)	16.8~52.1	33.9	BOD/TKN ratio	2.3~5.5	4.0
TP (mg/L)	1.5~7.7	5.1	BOD/TP ratio	15~59	31

하수내의 유기물은 X_S(입자상 생분해성 유기물), X_I(입자상 난분해성 유기물), X_H(미생물), S_S(용존 생분해성 유기물), S_I(용존 난분해성 유기물)로 나눌 수 있으며(US EPA., 1993), 유입하수에 따라 다른 값을 갖게 된다. 모델의 유입수 자료는 ASM2d의 상태변수들로 적절히 변경되어야 하므로, 이를 위해 본 연구에서는 마이크로소프트 엑셀 기반의 Influent advisor를 이용하여 변경하였다. 이는 측정된 BOD, COD, TKN 등과 같이 측정된 합성변수들을 이와 관련된 양론비를 조절함으로써 모델의 유입수 자료인 상태변수들로 변환하여 적용할 수 있는 기능을 수행(Hydromantis, 2001)하며, 이를 통하여 시뮬레이션에 적용한 유입수 성상은 Table 3과 같다.

한편, 대상공정은 시간의 흐름에 따라 유입유로가 변경되고 하나의 반응조내에서 상전환이 이루어진다는 특성상 처리수의 시간적 거동변화가 불가피하다. 따라서 대상공정의 처리수 농도는 시뮬레이션 예측값의 경우 Fig. 1의 시스템 운전모식도중 유출이 이루어지는 반응조를 대상으로 즉, Step C 및 D에서 두 개의 반응조중 상단 반응조에서의 최대 및 최소, 그리고 시간가중평균값을 기준으로 산출하였다. 한편 현장실측값의 경우에는 처리수의 시간적 거동변화를 고려하여 Step C의 호기단계 말기에서 샘플링하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 상분리에 따른 단위반응조 내부 질소 · 인 거동

본 연구 대상공정의 주요 특징은 기본적으로는 연속류형이지만, 시간의 흐름에 따라 하나의 반응조내에서 호기 · 무산소 · 혐기조건이 분리되는 상전환형 시스템이라는 점과, 시간에 따라 유입유로가 변경되는 시스템이라는 점이다. 따라서 고효율의 질소 · 인 동시제거를 위해서는 원활한 상전환이 매우 중요하다. 이에 대상공정의 상분리 특성을 명확하게 파악하고, 본 연구에서 구축한 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템의 실시설 적용성 검증을 위하여, 일정 운전조건(HRT 14시간, SRT 25일, 수온 26°C)의 정상상태 하에서 운전되고 있는 대상공정내 하나의 반응조에 대하여 사이클주기 4시간에 걸친 질소 및 인 내부거동을 추적하였으며, 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템의 구동 결과와 비교 · 평가하였다.

Fig. 3은 Fig. 1의 운전모식도상에서 두 개의 반응조중 상단의 것을 대상으로 사이클주기 4시간 동안의 질산성질소 및 인산염인의 내부거동에 대한 시뮬레이션 예측값과 실측값을 나타낸 것이다.

시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템을 통하여 예측된 질산성질소농도의 변화는 시스템내로 하수가 계속 유입되는 상황에서 무산소조건에서의 탈질반응에 의한 감소와 호기조건으로의 상전환 직후 질산화에 의해 증가되는 경향을 보이고 있으며, 실측값 역시 탈질 반응에 따른 알칼리도의 증가 및 질산화에 의한 알칼리도의 상대적 감소 경향과 더불어 예측된 질산성질소농도와 동일한 경향을 나타내었다. 또한 인산염인에 대한 내부거동의 경우, 시뮬레이션 예측값 및 실측값 모두, 무산소 · 혐기조건에서 인섭취미생

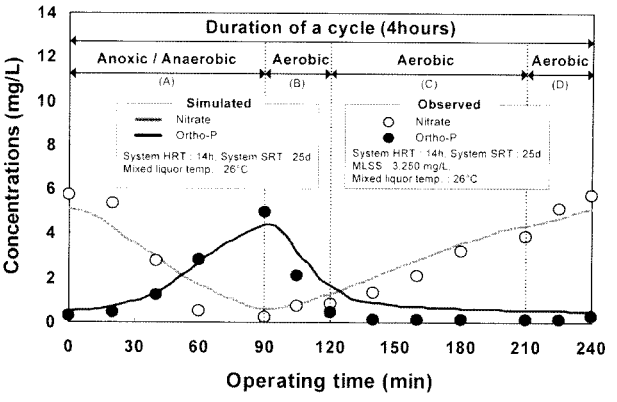


Fig. 3. Simulated and observed profiles of nitrate and ortho-P during a cycle in a reactor at a cycle time of 4 hours.

Table 3. Characteristics of influent wastewater for simulation

Components		Conc.	Unit
Dissolved components :			
S_S	Readily biodegradable substrate	106.11	$gCOD/m^3$
S_A	Volatile acids	0	$gCOD/m^3$
S_{NH4}	Ammonium nitrogen	23.50	gN/m^3
S_{NO3}	Nitrate plus nitrite nitrogen	0	gN/m^3
S_{PO4}	Phosphate phosphorus	2.54	gP/m^3
S_I	Inert, nonbiodegradable organics	39.24	$gCOD/m^3$
S_{ALK}	alkalinity	1.69	$mole/m^3$
Particulate components :			
X_S	Slowly biodegradable substrate	124.29	$gCOD/m^3$
X_H	Heterotrophic biomass	0	$gCOD/m^3$
X_{PAO}	Phosphorus-accumulating organism	0	$gCOD/m^3$
X_{PP}	Stored poly-phosphate phosphorus in PAO	0	gP/m^3
X_{PHA}	Stored poly-hydroxy-alkanoate	0	$gCOD/m^3$
X_{AUT}	Autotrophic, nitrifying biomass	0	$gCOD/m^3$
X_I	Inert, nonbiodegradable organics	15.36	$gCOD/m^3$

물이 세포저장물질인 polyphosphate를 에너지원으로, 휘발산을 기질로 섭취하여 인산염을 방출함(Randall et al., 1992)으로써 인농도가 증가하며, 호기조건에서 미생물이 수중의 인산염을 섭취하여 폴리인산의 형태로 체내에 저장함(Randall et al., 1992)으로써 인농도가 감소하게 되는 경향을 보이고 있다. 이때 무산소·혐기 조건으로의 상전환 초기 인방출 저해현상은 탈질반응이 완료되지 않아 시스템내에 남아있는 질산성질소의 영향이며, 무산소조건에서 탈질반응 완료 후부터 원활한 인방출이 관찰되어, 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템의 예측값이 대상공정의 실측값을 잘 모사하고 있음을 보여 주고 있다.

결국 Fig. 3의 단위반응조 내부거동은, 대상공정이 시간분할에 의해 단일 반응조내에서 완벽한 상분리에 따른 질산화·탈질 및 인의 방출·섭취 등 각 반응의 극대화를 가능하게 한다는 것을 보여주는 것으로, 이를 통해 본 연구에서 구축한 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템이 실시설에 적용 가능함을 확인, 검증할 수 있었다.

3.2. 시스템 HRT에 따른 질소·인 제거특성

대상공정의 시스템 HRT에 따른 질소·인 제거특성을 알아보기 위하여 수온 20°C, SRT 25일, 사이클주기 4시간 하에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 예측값을 수온 5~30°C 범위, 시스템 SRT 16~34일 범위, 사이클주기 4시간 하에서 장기간 적용한 정상상태에서의 현장 실측값과 비교하였다. Fig 4 및 Fig. 5는 시스템 HRT에 따른 처리수 질소농도 변화와 예측된 질산성질소 및 암모니아성질소의 농도변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과치에서 평균값(시간가중평균값)이외에 최대, 최소값이 존재하는 이유는, 시간에 따른 유로변경 및 간헐폭기를 조합한 공정특성상 시간에 따라 처리수의 농도가 불가피하게 변하기 때문인데, 시뮬레이션 연구에서는 시간에 따른 처리수 농도변화를 면밀하게 추적하였다.

본 연구에서 구축·검증한 시뮬레이션 시스템을 통해 예측된, 시스템 HRT 증가에 따른 처리수 질소농도는 시스템 HRT 10시간 부근까지 감소하다가 그 이상의 시스템 HRT에서는 증가하는 경향을 보여, 처리수농도를 최소화할 수 있는 최적의 시스템 HRT가 존재함을 밝힐 수 있었다. 또한 현장 실측값에서도 10시간 이상의 시스템 HRT에서 처리수 질소농도가 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 그때도 시뮬레이션 예측값 및 실측값 모두 양호한 처리수 질소농도가 10 mg/L 수준 또는 그 이하로 유지됨을 확인할 수 있었다. 처리수 질소농도에 미치는 시스템 HRT의 영향을 보다 상세히 파악하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 시스템 HRT에 따른 처리수 질산성질소 및 암모니아성질소의 농도변화에 대한 시뮬레이션 예측값을 살펴보면, 시스템 HRT가 길어질수록 질산성질소는 증가하는 반면 암모니아성질소는 감소하였다. 이는 시스템 HRT가 증가함에 따라, 원활한 질산화가 달성되는 반면 상대적으로 저유기물부하가 초래되어 종속영양미생물에 의한 탈질 반응에 악영향을 미침으로써 처리수 질산성질소농도가 증가하기 때문으로 설명

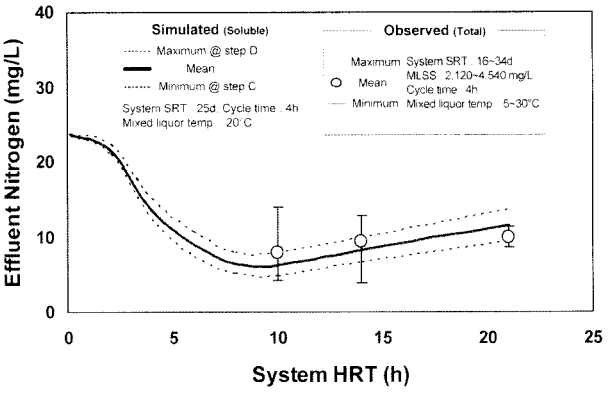


Fig. 4. Effect of system HRT on effluent nitrogen.

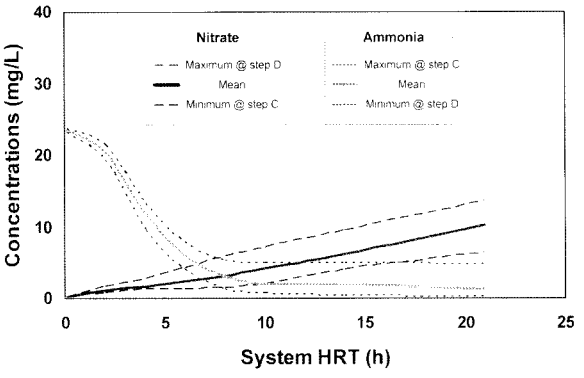


Fig. 5. Effect of system HRT on effluent nitrate and ammonia.

될 수 있다. 한편, 시스템 HRT 10시간 미만에서 암모니아성질소 감소 경향이 뚜렷한 반면에 그 이상의 시스템 HRT에서는 질산성질소 증가 경향이 상대적으로 뚜렷함을 볼 수 있는데, 이는 대상공정이 짧은 시스템 HRT에서는 질산화에 큰 영향을, 긴 시스템 HRT에서는 탈질반응에 큰 영향을 받고 있음을 의미한다. 따라서 처리수 질산성질소 및 암모니아성질소 농도를 고려한 대상공정의 최적 질소제거를 위해서는 시스템 HRT를 10~15시간 부근으로 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

또한 대상공정의 시스템 HRT에 따른 처리수 인농도 변화를 Fig. 6에 나타내었는데, 현장 실측값에서는 전반적으로 시스템 HRT에 따른 인제거상의 뚜렷한 일관성은 관찰되지 않았지만, 본 연구에서 구축·검증한 시뮬레이션 시스템을 통해 예측된 처리수 인농도 변화는 Fig. 4에서의 질소농도 변화의 경우와 유사한 경향 즉 처리수질을 최소화할 수 있는 최적의 시스템 HRT가 존재함을 보여주었다. 먼저 시스템 HRT 10시간 미만에서의 시스템 HRT 감소에 따른 처리수 인농도 증가 경향은, 너무 짧은 시스템 HRT에 의해 시스템 내에서 인 방출 및 섭취를 위한 충분한 혐기 및 호기 시간 확보가 어렵기 때문(전 등, 1995)으로 설명될 수 있다. 한편, 상대적으로 긴 시스템 HRT에서 처리수 인 농도 역시 다소 증가하는 경향을 나타내었으며, Manga 등(2003)도 이러한 경향을 보고한 바 있다. 이는 시스템 HRT에 따른 질소 제거특성에서 살펴본 바와 같이 시스템 HRT가 길어질수록 시스템내에 존재하는 질산성질소

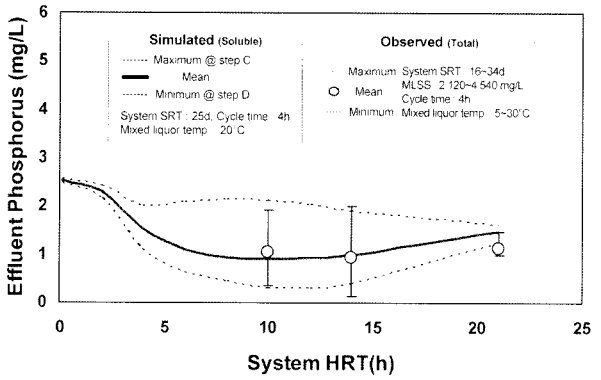


Fig. 6. Effect of system HRT on effluent phosphorus.

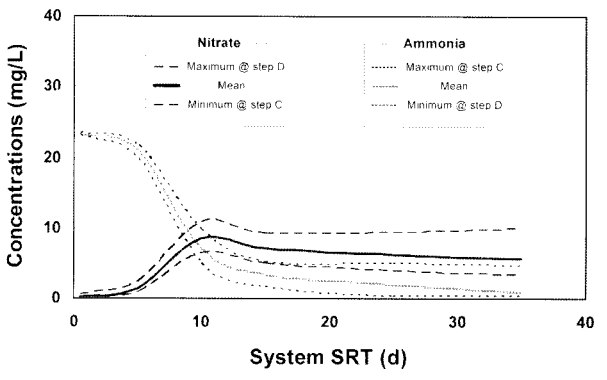


Fig. 8. Effect of system SRT on effluent nitrate and ammonia.

농도가 증가하며, 그 결과 효율적인 인제거에 필요한 탈질 반응후의 혐기 반응시간의 확보가 어려웠기 때문이다. 따라서 충분한 인의 방출 및 섭취를 위한 혐기 · 호기 시간 확보가 어려운 짧은 시스템 HRT 또는 상대적 저유기물부하 및 질산성질소에 의한 인방출 저해 현상을 초래할 가능성이 있는 긴 시스템 HRT에서보다는 시스템 HRT 10~15시간 부근에서 최적의 인 제거효율을 달성할 수 있었다.

3.3. 시스템 SRT에 따른 질소 · 인 제거특성

BNR시스템에서는 질소 및 인 제거에 관여하는 미생물의 성장조건과 특성이 다르기 때문에 각각의 고효율제거를 위한 최적 HRT와 SRT가 서로 상충될 수 있는 가능성이 존재한다. 따라서 시스템 HRT와 시스템 SRT의 복합적 영향을 배제하고 시스템 SRT의 영향만을 분리, 파악하기 위하여 수온 20°C, 시스템 HRT 14시간 및 사이클주기 4시간에서 질소 및 인 제거에 미치는 시스템 SRT의 영향에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 예측값을 수온 5~30°C 범위, 시스템 HRT 14시간 및 사이클주기 4시간 하에서 장기간 적용한 정상상태에서의 현장 실측값과 비교 · 분석하였다.

먼저 시스템 SRT의 질소제거에 미치는 영향을 상세히 알아보고자 시스템 SRT에 따른 처리수 질소농도 변화와 예측된 질산성질소 및 암모니아성질소의 농도 변화를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다.

시스템 SRT에 따른 처리수 질소농도 예측값의 경우, 시스템 SRT 증가에 따라 처리수 질소농도가 감소하는 경향이 뚜렷하였으며, 저수온시의 질산화 저해 가능성이 있는 수온 10°C미만의 결과를 제외하면 현장 실측값에서 역시 이와 동일한 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 Fig. 8과 같은 시스템 SRT에 따른 처리수 질산성질소 및 암모니아성질소 농도 변화에 대한 시뮬레이션 예측값을 통해 보다 자세히 알아 볼 수 있는데, 10일 미만의 시스템 SRT에서 시스템 SRT가 길어질수록 질산화미생물의 확보가 가능하여 암모니아성질소농도는 감소하고 질산성질소농도는 증가하는 경향을 보였으며, 10일 이상의 시스템 SRT에서는 전반적으로 시스템 SRT가 길어질수록 처리수 질산성질소 및 암모니아성질소 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 10일 이상의 시스템 SRT에서 시스템 SRT 증가에 따른 처리수 암모니아성질소농도 감소가 뚜렷했는데, 이는 시스템 SRT가 길어질수록 상대적으로 성장률이 느린 질산화미생물 확보에 유리하여 시스템내의 질산화 효율이 증가하기 때문이다. 한편, 시스템 SRT에 따른 처리수 질산성질소 농도의 감소 경향이 암모니아성질소농도에 비하여 상대적으로 크지 않았는데, 이는 시스템 SRT 증가에 따른 처리수 질소농도의 감소 경향이 시스템 내의 탈질효율 증가보다 질산화효율의 증가가 더 크기 때문임을 의미한다.

또한, 시스템 SRT가 처리수 인농도 변화에 미치는 영향을 알아보면 Fig. 9와 같다. 시스템 SRT 증가에 따라 예측된 처리수 인농도는 시스템 SRT 15일 부근까지는 급격히 감소하다가, 그 이상에서는 SRT 증가에 큰 영향 없이 양호한 인제거가 가능함을 보여주었으나, 30일 이상의 상대적으로 긴 시스템 SRT에서 다소 증가하는 경향을 보였다. 시스템 SRT가 길어짐에 따라 인제거를 위한 시스템내 충분

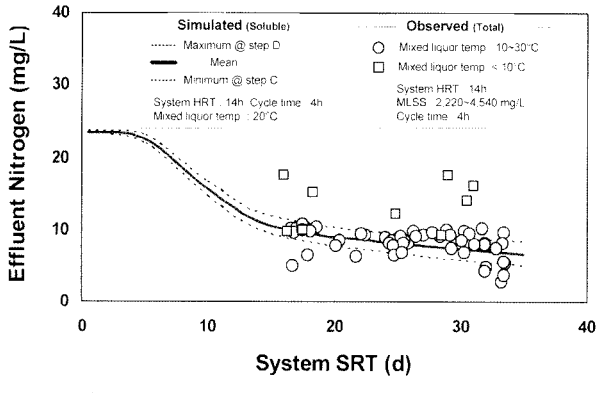


Fig. 7. Effect of system SRT on effluent nitrogen.

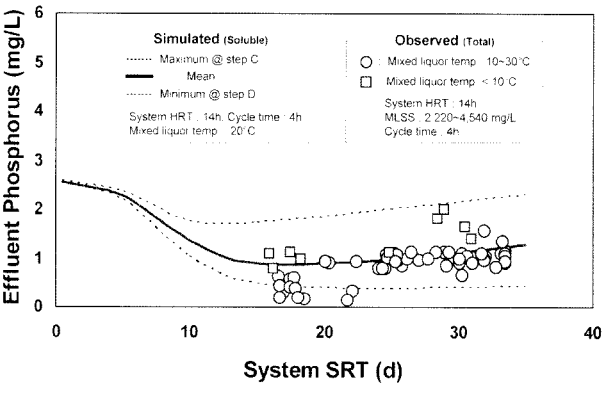


Fig. 9. Effect of system SRT on effluent phosphorus.

한 인축적미생물의 확보가 가능하여 원활한 인의 방출 및 섭취를 통해 양호한 인제거가 가능하나, 이후 인축적미생물의 체내에 저장 가능한 인농도가 제한되어 있기 때문(Reddy, 1991)에 상대적으로 긴 시스템 SRT에서 인의 방출 및 섭취가 활발히 일어남에도 불구하고 처리수 인농도가 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

한편 현장 실측값을 살펴보면, 적용 시스템 SRT 16~36일 범위에서 전반적으로 시스템 SRT가 증가함에 따라 처리수 인농도가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 수온 10°C 이상에서 그 경향이 보다 뚜렷해졌다. 이러한 경향은 SRT가 감소할수록 폐슬러지로 배출되는 인의 양이 증가(Mamais et al., 1992)되는 한편, SRT 감소에 따른 슬러지 생산량의 증가와 충분한 C/P비는 슬러지내 인함량을 상대적으로 감소시키면서도, 결과적으로는 처리수 인농도를 저하시키게 되기 때문(Randall et al., 1992)이라고 생각된다. 따라서 대상공정의 최적 인제거측면에서 시스템 SRT를 15~20일 부근으로 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 특히 처리수의 질소 및 인 최소화 조건을 모두 만족할 수 있는 시스템 SRT는 20일 부근이라고 할 수 있다.

3.4. 사이클주기에 따른 질소·인 제거특성

본 연구대상 공정은 시·공간에 따른 상전환 및 상분리형 공정으로서, 혐기조, 무산소조 및 호기조를 각각 따로 두어 상을 구분하는 공간에 따른 상분리형 공정의 특징과 시간의 흐름에 따라 무산소, 혐기 및 호기를 분리하는 시간에 따른 상전환형 공정의 특징을 동시에 가지고 있다. 단, 상을 구분하는 방법적인 측면에서는 일정 주기를 두고 간헐적으로 폭기하는 시간에 따른 상전환형 공정의 측면이 강하다. 따라서 일정 주기 즉, 사이클주기는 대상공정에서 매우 중요한 운전인자이며, 현장에서 운전자가 가장 용이하고 능동적으로 수행할 수 있는 운전 대응방안으로서 간단한 조작으로 큰 효과를 기대할 수 있다. 이에 사이클주기에 따른 질소·인 처리특성을 알아보고자 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템을 기반으로 수온 20°C, 시스템 HRT 14시간, 시스템 SRT 25일에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 예측값을 수온 5~30°C 범위, 시스템 HRT 및 SRT를 각각 14시간 및 16~34일 범위하에서 장기간 적용한 정상상태에서의 현장 실측값과 비교·분석하였다.

먼저 사이클주기가 질소제거에 미치는 영향을 상세히 알아보고자 사이클주기에 따른 처리수 질소농도 변화와 예측된 질산성질소 및 암모니아성질소의 농도 변화를 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다.

사이클주기가 길어질수록 예측된 처리수 질소농도는 사이클주기 2시간 부근까지 급격히 감소하다가, 그 이상의 사이클주기에서는 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 사이클 주기를 2시간, 4시간 및 8시간으로 운전한 현장 실측값에서 역시 이와 유사한 경향을 보여 처리수 질소농도를 최소화할 수 있는 최적의 사이클주기가 존재함을 밝힐 수 있었다.

처리수 질소농도에 미치는 사이클주기의 영향을 보다 자세히 파악하기 위하여 Fig. 11과 같이 사이클주기에 따른 처리수 질산성질소 및 암모니아성질소의 농도 변화에 대한 시뮬레이션 예측값을 살펴보면, 먼저 질산성질소의 경우 사이클주기 증가에 따라 한 사이클주기내 무산소 및 혐기 시간 확보로 인하여 원활한 탈질반응이 수행될 수 있음을 확인할 수 있었다. 반면, 사이클주기 2시간 이상에서 사이클주기가 길어짐에 따른 처리수 질산성질소농도 증가 경향은, 대상공정의 특성상 유입수내 암모니아성질소의 지속적인 유입으로 인해 시스템내 질소부하가 증가하기 때문이며, 더불어 한 사이클주기내 무산소 및 혐기 시간 증가로 인해 시스템내로 유입된 암모니아성질소의 축적량 증가 및 호기시간의 증가 때문으로 설명될 수 있다. 한편, 사이클주기에 따른 처리수 암모니아성질소농도 변화 역시 사이클주기가 길어짐에 따라 처리수 암모니아성질소농도가 증가하는 경향을 나타내었으나, 질산성질소에 비하여 증가하는 경향은 크지 않아 처리수의 암모니아성질소농도는 질산성질소에 비하여 사이클주기에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 사이클주기 2시간 이상에서 사이클주기에 상관없이 처리수 질소농도를 양호하게 유지할 수 있었으나, 대상공정에서의 최적 질소제거 측면에서는 사이클주기를 2시간 부근으로 유지하는 것이 바람직하다.

한편, 처리수 인농도 거동에 미치는 사이클주기의 영향은 Fig. 12와 같다. Fig. 10에서 살펴본 질소의 경우와는 달리 사이클주기에 따른 처리수 인농도는 시뮬레이션 예측값과 사이클 주기를 2, 4 및 8시간으로 운전한 현장 실측값 모

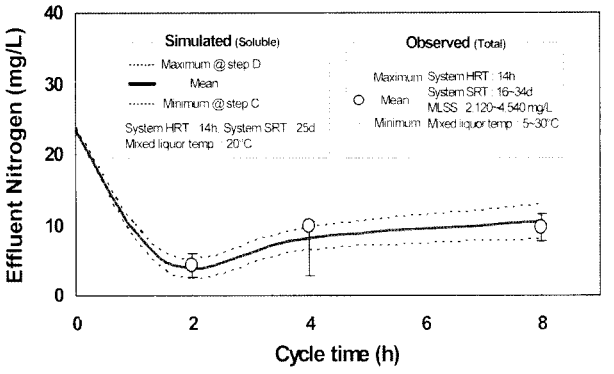


Fig. 10. Effect of cycle time on effluent nitrogen.

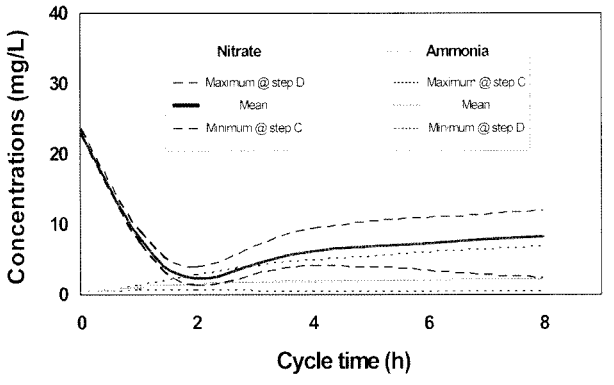


Fig. 11. Effect of cycle time on effluent nitrate and ammonia.

두, 사이클주기가 길어짐에 따라 처리수 인농도는 감소하는 경향이 뚜렷하였다. 사이클주기를 2시간(무산소 및 혐기조건 0.75시간, 호기조건 합 1.25시간)으로 운전한 경우, 한 사이클내에서 무산소/혐기시간이 45분에 불과하여 탈질이 완료된 후 인방출에 필요한 충분한 혐기시간이 유지되지 못하였고, 이로 인해 인방출이 원활히 일어나지 않았다. 또한 호기조건에서도 인의 과잉섭취가 충분히 일어나지 못하여 전체적인 인의 제거효율이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 사이클주기가 길어짐에 따라 완화되었으며, 현장실측값 및 시뮬레이션 예측값 모두에서 볼 수 있듯이 사이클주기가 8시간(무산소 및 혐기조건 3시간, 호기조건 합 5시간)인 경우에는 충분한 혐기조건 및 호기조건의 형성을 바탕으로 원활한 인방출 및 과잉섭취가 일어나 인의 제거효율이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 대상공정의 인제거 극대화에 중점을 둘 경우 사이클주기를 길게 하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 특히 사이클주기 4~8시간 부근에서 처리수의 질소 및 인 최소화 조건을 동시에 만족할 수 있을 것이다.

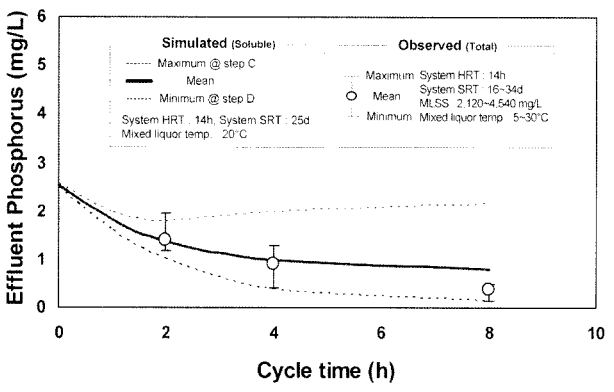


Fig. 12. Effect of cycle time on effluent phosphorus.

4. 결 론

본 연구에서는 생물학적 반응기에 대한 실험적인 연구를 보완하여 BNR공정에 대한 보다 경제적이고 효과적인 연구수단의 하나인, 공정 시뮬레이션 시스템을 통하여 대상공정에서의 질소 및 인 제거 최적화 방안을 모색하고자 하였으며, 주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 공정 시뮬레이션 분석기구로 선정한 GPS-X 객체의 모듈화를 통하여 시공간 동시분할 공정 시뮬레이션 시스템을 성공적으로 구축하였으며, 이를 현장시설에 적용하여 항목별 내부거동에 대한 실측값과 시뮬레이션 예측값이 부합함을 확인함으로써 현장시설에의 그 적용가능성을 검증할 수 있었다. 또한 공간에 따른 상분리형 공정의 특징과 시간에 따른 상전환형 공정의 특징을 동시에 가지고 있는 대상공정이 시간분할에 의해 단일 반응조내에서 원활한 상분리가 가능함을 확인할 수 있었다.
2) 연구대상 간헐폭기 및 유로변경 조합 시공간 동시분할 BNR공정에서 처리수 질소 및 인 농도를 최소화할 수 있는 최적의 시스템 HRT가 존재함을 밝힐 수 있었다. 적정 수준 이상의 긴 시스템 HRT는 상대적 저유기물부하로 인한 탈질반응 저해 가능성이 있으므로, 처리수 질산성질소 및 암모니아성질소 농도를 고려한 최적의 질소 제거를 위해서는 시스템 HRT를 10~15시간 부근으로 유지하는 것이 바람직하다. 또한 인의 경우 역시 긴 시스템 HRT에서는 상대적 저유기물부하와 상대적으로 높은 질산성질소농도로 인한 인방출저해를 초래할 가능성이 있기 때문에, 시스템 HRT 10~15시간 부근에서 최적의 인 제거효율을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.
3) 대상공정에서 질소 및 인 제거를 위한 시스템 SRT의 경우, 질소제거 극대화를 위해서는 상대적으로 성장률이 느린 질산화 미생물 확보에 유리한 긴 시스템 SRT가 바람직하였으나, 반면에 최적의 인 제거에는 시스템 내의 인축적미생물 확보 및 안정적인 인 제거가 가능한 15~20일 부근의 시스템 SRT가 최적임을 확인할 수 있었다.
4) 연구대상 시공간 동시분할 BNR공정에서, 처리수내 질소 및 인 농도를 최소화할 수 있는 최적의 사이클주기가 존재함을 밝힐 수 있었다. 질소제거 측면에서 긴 사이클주기는 한 사이클주기내 무산소 및 혐기시간 증가로 인한 암모니아성질소 축적량 증가 및 불필요하게 긴 호기시간을 초래할 수 있으므로, 대상공정에서의 최적 질소제거를 위해서는 사이클주기를 2시간 부근으로 유지하는 것이 바람직하다. 반면, 인제거 극대화 측면에서는 충분한 혐기 및 호기 조건의 형성을 바탕으로 원활한 인 방출 및 과잉섭취가 가능한 긴 사이클주기가 최적임을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 서울지역환경기술개발센터 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

이성학, 박종복, 고주형, 임정훈, 우혜진, 김창원, 변형 생물학적 고도처리공정에서 ASM2d를 이용한 민감도 분석 및 온도/SRT 영향 평가, *대한환경공학회지*, **26**(1), pp. 83-88 (2004).

전항배, 신항식, 생물학적 과잉 인제거 특성 발현 및 영향인자에 대한 연구, *대한환경공학회지*, **17**(1), pp. 77-84 (1995).

정형석, 이상형, 임재림, 신항식, 인 제거 모델 분석을 통한 매개 변수 추정방법의 제시, *대한토목학회지*, **25**(1B), pp. 59-67 (2005).

환경부, *수질오염공정시험방법*, 서울 (2000).

Abusam, A., Keesman, K. J., Spanjers, H., van Straten, G. and Meinema, K., Evaluation of Control Strategies Using an Oxidation Ditch Benchmark, *Water Science and Tech-*

nology, **45**(4-5), pp. 151-158 (2002).

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th edition, APHA, Washington, D.C. (2005).

Casellas, M., Dagot, C., Stelmach, S., Pons, M. N. and Baudu, M., Setting-up a Control Simulation Strategy for a Sequencing Batch Reactor(SBR): Application to Municipal Wastewater, *Water Science and Technology*, **47**(1), pp. 297-302 (2002).

Hao, X., van Loosdrecht, M. C. M., Meijer, C. F., Heijnen, J. J. and Qian, Y., Model-based Evaluation of Denitrifying P Removal in a Two-Sludge System, *Journal of Environmental Engineering*, **127**(2), pp. 112-118 (2001).

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. C., Marais, G. v. R. and van Loosdrecht, M. C. M., Activated Sludge Model No. 2, *Water Science and Technology*, **39**(1), pp. 61-68 (1999).

Hvala, N., Vrecko, D., Burica, O., Strazar, M. and Levstek, M., Simulation Study Supporting Wastewater Treatment Plant Upgrading, *Water Science and Technology*, **46**(4-5), pp. 325-332 (2002).

Hydromantis, *GPS-X Technical Reference*, Hydromantis, Canada (2001).

Mamais, D. and Jenkins, D., The Effects of MCRT and Temperature on Enhanced Biological Phosphorus Removal, *Water Science and Technology*, **26**(5), pp. 955-965 (1992).

Manga, J., Ferrer, J., Seco, A. and Garcia-Uasch, F., Design of Nutrient Removal Activated Sludge Systems, *Water Science and Technology*, **47**(11), pp. 115-122 (2003).

Nelder, J. A. and Mead, R., A Simplex Method for Function Minimization, *Computer Journal*, **7**, pp. 308-313 (1965).

Nuhoglu, A., Keskinler, B. and Yildiz, E., Mathematical Modeling of the Activated Sludge Process-the Erzincan case, *Process Biochemistry*, **40**, pp. 2467-2473 (2005).

Randall, C. W., Barnard, J. L. and Stensel, H. D., *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster (1992).

Reddy, M., The Concept of Phosphorus Storage Capability and its Implications for Design of Systems for Enhanced Biological Uptake of Phosphate, *Water Science and Technology*, **23**, pp. 577-584 (1991).

Stamou, A., Katsiri, A., Mantziaras, I., Boshnakov, K., Koumanova, B. and Stoyanov, S., Modeling of an Alternating Oxidation Ditch System, *Water Science and Technology*, **39**(4), pp. 169-176 (1999).

U.S. Environmental Protection Agency, *Process Design Manual for Nitrogen Control*, EPA/625/R-93/010, Washington, D.C., pp. 211-247 (1993).

Vrecko, D., Hvala, N., Kocijan, J. and Zec, M., System Analysis for Optimal Control of a Wastewater Treatment Benchmark, *Water Science and Technology*, **43**(7), pp. 199-206 (2001).