

선단무산소조를 이용한 영양소제거공정(Bio-NET)의 질소 · 인 제거 특성

오영기 · 오성민 · 황연상 · 이경수 · 박노연* · 고광백*

LG건설 기술연구소
*연세대학교 도시공학과

(1999년 6월 24일 접수, 1999년 10월 8일 채택)

Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of a New Biological Nutrient Removal Process with Pre-Denitrification by Pilot Scale and Computer Simulation Program

Young-Khee Oh · Sung-Min Oh · Yenug-Sang Hwang · Kung-Soo Lee ·
No-Yeon Park* · Kwang-Baik Ko*

Construction Technology Institute, LG E&C Corp.
**Department of Civil & Urban Engineering, Yonsei University*

ABSTRACT

This study is to investigate the performance of a new BNR process using pre-denitrification scheme focusing on nitrogen removal and the possibility of adapting a computer simulation scheme in BNR process development.

By using a pre-denitrification basin, higher COD/NO₃-N ratio could be sustained in this BNR process. The results of the investigation showed a SDNR value of 9.04mg/gMv/hr. In the anoxic tank, the average value of SPRR of 6.25mgP/gMv/hr was observed to be very sensitive to SCOD load of influents.

By calibrating internal parameters (stoichiometric and kinetic parameters) of the simulation model, the results of simulation for various BNR processes gave good agreement with observed data. The major adjustment was given with three parameters, maximum specific growth rate of heterotrophic biomass, short chain fatty acid (SCFA) limit, and phosphorous release rate. With the series of simulations on varying operational conditions, the simulation by computer program can be a useful tool for process selection, and design and operation of municipal wastewater treatment plant.

요약문

TCODcr 380mg/L이며 TKN이 65mg/L, TP 12mg/L가량인 도시하수의 질소, 인 제거를 위하여 13~28°C에서 선단무산소조를 설치한 영양소제거공정(Bio-NET)을 10m³/d 규모의 pilot plant를 설치하여 내부반송율과 SRT를 변화시켜 운전하여 질소, 인 제거 특성을 살펴 보고 이를 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 모사한 결과를 상호 비교하였다. SS, CODcr의 경우 각각 94%, 87%의 제거효율을 안정적으로 보였으며, 질소의 경우 52%~89%로 평균 75%의 제거효율을 보였다. 또한 인의 경우 안정적으로 평균 90% 이상의 높은 제거효율을 보여주었다. 또한 선단무산소조에서는 유입수내에 높은 COD/NO₃-N가 유지되어 비탈질속도는 평균 9.04mgN/gMv/hr로 분석되었다. 인의 거동은 유입수의 SCOD부하에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 비인용출속도는 평균 6.25mgP/gMv/hr를 보였다. 협기조에서 비인용출속도는 평균 1.0mgP/gMv/hr를 보였고 폭기조에서 비질산화속도는 평균 2.9mgN/gMv/hr로 분석되었다.

GPS-X 프로그램을 이용하여 모델의 내부인자 중 종속영양미생물군의 최대비증식속도, 인의 용출에 관련된 Short Chain Fatty Acid(SCFA) limit, 인의 섭취와 관련된 COD 이용당 인용출량을 반응조 특성에 맞게 보정하여 시뮬레이션을 실시한 결과와 pilot plant 실측치가 유사한 것으로 나타났다.

주제어 : 영양소제거공정, 선단무산소조, COD/NO₃-N비, 인용출속도, 시뮬레이션

1. 서 론

하천과 호소에 유입되는 영양소인 질소와 인은 하천의 용존산소 고갈, 호소의 부영양화를 초래하여 수질을 악화시키는 요인을 제공¹⁾하고 있으나 현재 국내에 가동중인 하수처리장은 유기물 제거를 위한 2차 처리만을 목표로 하고 있어, 질소와 인은 처리하지 못하고 방류하고 있는 실정이다. 1996년 1월 1일부터 하수처리장 방류수의 질소, 인 기준을 각각 60mg/L, 8mg/L 설정하여 적용하고 있으나 대부분의 처리장에서 유입하수의 질소, 인 농도가 기준보다 낮게 유입되고 있어 향후 기준의 강화가 예고되고 있다. 따라서 기존 처리장은 영양소제거를 위한 새로운 공정을 도입하거나 기존시설의 개조에 의한 처리방안을 마련해야 하는 시점에 있다.

또한 환경부의 97년 4/4분기 하수종말처리시설 지도점검 결과를 살펴보면 표준활성슬러지공법으로 운전되는 79개 하수처리장 중 방류수의 T-N농도가 20mg/L를 초과한 처리장이 23개이나 T-P농도가 2mg/L를 초과한 곳은 2곳에 불과하며 이는 대부분의 처리장이 유입 인 농도가 낮은 것에 기인하는 것

으로 보고하고 있다²⁾. 이러한 하수처리장의 운전현황은 질소제거에 주안점을 두고 인 제거를 보완하는 형태의 처리공정의 개발을 요구하고 있다.

본 연구는 선단무산소조와 step-feed를 설치하여 질소제거에 주안점을 두고 신설 및 기존처리장의 개보수에 즉각적인 적용이 가능한 영양소제거공정인 Bio-NET(Biological Nutrient Elimination Technique)의 pilot plant 운전을 통하여 공정의 적용가능성을 질소, 인 제거 효율 및 특성을 중심으로 모색하였다. 또한 국내에서의 영양소제거공정의 설계 및 운전을 위한 컴퓨터 프로그램을 이용한 모델의 적용가능성을 pilot plant의 운전결과와의 비교를 통한 내부인자를 보정하고 실측치와 비교하는 방법으로 모색하였다.

2. 실험방법 및 내용

2.1. 영양소 제거 특성 실험

Fig. 1은 10m³/d 규모의 pilot plant 처리공정을

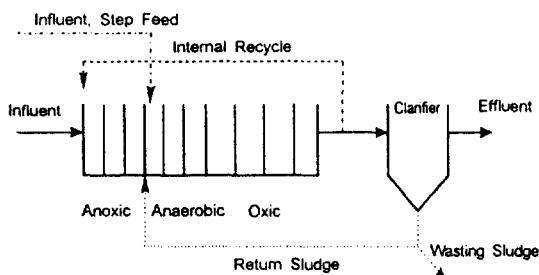


Fig. 1. Schematics of pilot plant (Bio-NET Process).

나타내고 있다. 본 공정의 특징은 무산소조를 선단에 설치하여 포기조에서 내부반송된 혼합액 내의 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 및 아질산성질소($\text{NO}_2\text{-N}$)를 탈질소화 반응에 의해 질소 가스로 제거시켜 대기 중으로 방출하는데 있다. 이러한 선단탈질소화반응(predenitrification)은 무산소조 유입수에 높은 COD/ $\text{NO}_x\text{-N}$ 비가 유지됨으로써 완전탈질소화 및 빠른 탈질속도를 얻을 수 있는 장점이 있다³⁾. 또한 반송슬러지를 혐기조로 유입시켜 무산소조에서 완전 탈질소화된 혼합액과 섞이게 함으로써 반송슬러지 내의 $\text{NO}_x\text{-N}$ 를 회석시키는 효과를 유발하여 새로운 반응조의 설치없이 $\text{NO}_x\text{-N}$ 에 의한 인 용출 저해 효과(nitrate stress)를 최소화하여 인체거미생물이 인을 유입농도의 2~4배까지 용출시키도록 한다. 또한 인 제거효율이 저하되거나 인의 목표수질이 강화될 경우에 대비하여 원수분배(step feed)를 설치함으로써 인 제거에 필요한 유기물의 분배가 가능하도록

되었다.

Table 1은 본 공정의 운전조건으로서 운전온도는 13~28°C였으며 MLSS는 2500~5000mg/L를 유지하였다. 반응조의 체류시간(유입유량기준)은 각 반응조별로 무산소조(Anoxic, Ax) 0.8~2시간, 혐기조(Anaerobic, An) 1.7~2시간, 폭기조(Oxic, Ox) 3.5~5시간으로 변화시켜 가며 운전하였으며 총 체류시간은 7~8.4시간으로 유지하였다. 슬러지 반송율은 유입유량 대비 30~50%로 운전하고 질산성 질소의 탈질을 위한 내부반송은 100~200%로 운전하였으며 Step Feed는 0~30%로 변화시켜 운전하였다. SRT는 6~15일이 되도록 반송슬러지를 인발하였다.

본 연구에 사용된 하수는 A하수처리장의 최초침전지 유출수를 사용하였고 그 성상은 Table 2에 나타냈다. A하수처리장으로 유입되는 하수차집관거는 분류식 관거로 정비되어 있고 슬러지 처리계통의 용량 부족으로 인해 1차 침전지가 과부하로 운전되고 있는 상황이어서 대상 시료는 평균 CODcr 385. TN 69, TP 13mg/L으로 국내 하수처리장의 평균 유입하수에 비해 매우 높은 것으로 분석되었다. 그러나 COD/TN 비는 2.0~9.8, COD/TP비는 16~57로 변화폭이 크며 평균 각각 5.9, 29인 것으로 분석되어 우리나라의 전형적인 하수성상인 COD/TN 비인 7.2, COD/TP비 45와⁴⁾ 유사하거나 낮은 값을 나타내고 있다.

Table 1. Operation condition for pilot plant

Item \ Phase	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV	Phase V	Phase VI	Phase VII
Operating HRT, hr	8	7	8.4	8.4	8.4	7.5	7.5
Ax/An/Ox HRT, hr	2/2/4	1.7/1.7/3.5	1.7/1.7/5	1.7/1.7/5	1.7/1.7/5	0.8/1.7/5	0.8/1.7/5
Step Feed Ratio, %*	-	-	-	-	-	-	30
Internal Recycle, %*	100	100	100	200	150	150	100
RAS ratio, %*	30~50	30~50	30~50	30~50	30~50	30~50	30~50
SRT, day	8	6	15	15	15	15	15
MLSS, mg/L	2500	3500	5500	5000	5000	5000	5000
Temp, °C	26~28	25~17	15~17	13~16	14~15	14~15	14~15

* Inflow basis

Table 2. Characteristics of influent wastewater

Parameters		Range	Average	Remarks
SS, mg/L	Total	74~980	360	VSS/TSS = 0.74
	Volatile	37~620	270	
BOD ₅ , mg/L	Total	75~380	150	
	Total	160~625	385	
CODcr, mg/L	Soluble	53~200	110	
	Total	39~99	69	
Nitrogen, mg/L	Soluble	34~56	45	
	NH ₄ -N	23~54	42	
	Total	5.6~20	13	
Phosphorus, mg/L	PO ₄ -P	4~11	7	
	Alkalinity, mg/L as CaCO ₃	200~280	240	
pH, Unit	6.64~7.76	7.3		
TCOD/TKN	2.0~9.8	5.9		
TCOD/TP	16~57	29		

Table 3. Development of models for biological nutrient removal

Model Name	Description	Researcher	Remarks
IAWPRC Model	COD Removal Nitrification Denitrification	Grady, 1986	IAWPRC Model Preliminary version
IAWPRC ASM1 Model	COD Removal Nitrification Denitrification	Dold and Marais, 1987	IAWPRC Model final version
General Model	COD Removal Nitrification Denitrification poly-P Organisms	Dold, 1991	phosphorus uptake by poly-p organism
IAWQ ASM2	COD Removal Nitrification Denitrification poly-P Organisms Chemical P removal	Henze, 1995	
IAWQ ASM2d	"	Henze, 1999	phosphorus uptake by poly-p organism
IAWQ ASM3	"	Gujer, 1999	Provide kinetic and stoichiometric parameter for 10 and 20 Lysis process is exchanged

2.2. 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션

생물학적 영양소제거공정은 유기물 제거를 위한 공정에 탈질 및 탈인 반응이 추가되어 설계 및 적정

운전을 위한 해석이 복잡하다. 이러한 영양소제거공정의 성능을 평가하는 방법은 pilot plant와 같은 실험적인 방법과 수학적인 모델을 이용하는 방법 등이 있는데, 이 중 pilot plant 등을 통하여 각종 인

자를 도출하는 방법은 많은 시간과 비용이 소모된다. 이러한 이유로 공정 해석을 위한 수학적 모델이 설계나 운영을 위한 유용한 방법으로 부각되어 그 사용이 증가 추세에 있다³⁾. 이러한 생물학적 영양소 제거공정의 해석을 위한 모델은 계속적인 발전을 해왔는데 그 현황을 Table 3에 나타냈다.

본 실험에서는 위의 모델 중 General Model을 각 반응조에 적용하였고 원수는 ASM2 모델⁵⁾에 의해 구분되었으며 simulation 적용을 위한 원수의 성상은 Table 4에 나타냈다. 원수의 성상은 난분해성 입자성유기물질(Inert, non-biodegradable organic, Xi)은 입자성유기물질(XCOD)의 15%로⁶⁾. 종속영양미생물군(heterotrophic biomass, Xbh) 부분은 입자성유기물질(XCOD)의 6%로 가정하였고 acetate로 표시되는 발효산물(volatile acid/fermentation product, Sa)은 ZnSO₄를 이용한 Flocculation method⁷⁾로, 나머지 항목은 실험 및 계산을 통하여 구하였다.

시뮬레이션 내부인자는 Ox SRT 8일, 내부반송율 150%로 운전한 pilot plant 각 반응조에서 분석된 질소, 인 실측치와 시뮬레이션 값은 비교하여 보정한 후 보정된 내부인자를 적용하여 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 내부반송율과 SRT를 변화시켜 운전

한 pilot plant 실측치와 상호 비교하여 시뮬레이션의 적용가능성을 살펴보았다. 이때 사용된 프로그램은 Hydromantis 사의 GPS-X™이며 온도는 15°C로 일정하게 하였다.

3. 결과 및 분석

3.1. 오염물 제거효율

Table 5에서 나타났듯이 SS, CODcr의 경우 유입수의 농도 변화와 큰 관계없이 각각 평균 94%, 87%의 제거효율을 안정적으로 보였으며 질소의 경우 유입수의 질소 농도 변화와 내부반송율, SRT의 변화에 따라 각 Phase 별로 68%~87%의 변화를 보였다. 특히 Phase II의 경우 질산화에 필요한 최소 SRT를 파악하기 위해 SRT 6일(Ox SRT 3일)로 운전한 결과, 완전 질산화가 진행되지 않은 것으로 나타나 질산화를 위한 최소 SRT는 8일 이상이 되어야 함을 알 수 있었다. 또한 인의 경우 유입수의 인의 농도변화와 큰 관계없이 안정적으로 평균 90% 이상의 높은 제거효율을 보여주었다.

Table 4. Influent wastewater concentration of input data in simulation

Parameters*		Symbols	Range	in Experiment	in Literature**	In Literature***
COD	Total COD	Sti	160~600	450	200	440
	Readily BD COD	Ss	30~90	70	20	30
			20~70	50	20	20
	Slowly BD COD	Xs		230	90	190
	Soluble inert COD	Si	10~40	25	25	30
	Microbial COD	Xbh		25	20	60
Nutrients	Particulate inert COD	Xi		50	25	50
	TKN	Nti	40~90	60	25	30
	sol-TKN	Snti	35~56	49	20	
	NH ₄ -N	Snh	23~54	42	17	16
	sol-BD organic N	Snd	2.4~8	6	2	
	sol-NBD organic N	Sni	0.5~1.5	1	1	
	S-P	Sp	4~11	7	3	3.6
	Alkalinity	Salk	200~280			

* All value are given in mg/L. Alkalinity is expressed as mg/L as CaCO₃. ** Ref. 4. *** Ref. 5

Table 5. Effluent quality and removal efficiency in pilot plant

Item* \ Phase	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV	Phase V	Phase VI	Phase VII
CODcr	55(77)**	54(84)	45(88)	36(90)	30(93)	33(93)	27(90)
SS	19(87)	25(91)	23(92)	18(94)	18(95)	16(96)	10(93)
T-N	13(70)	21(68)	15(78)	12(82)	10(87)	13(79)	12(82)
NH ₄ -N	2.2(91)	9.2(77)	3.8(91)	2.8(92)	0.6(98)	0.45(99)	0.1(99)
T-P	0.88(88)	1.1(91)	0.85(94)	1.08(91)	0.67(96)	1.1(92)	0.62(93)

*All values are given in mg/L (Effluent average conc.) **() removal efficiency, %

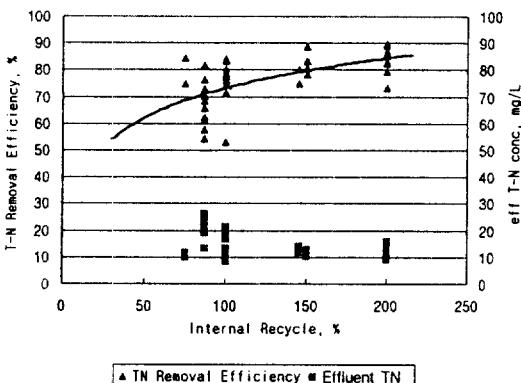


Fig. 2. Effluent concentration and removal efficiency of TN for internal recycle ratio.

Fig. 2는 내부반송율에 대한 TN제거효율을 나타낸 것으로 반송율을 100%에서 200%로 증가시켜 운전한 결과 TN제거효율이 평균 약 15% 정도 상승하였는데 이는 200%로 운전한 Phase IV의 유출수 SS농도가 100%로 운전한 다른 Phase보다 낮아 고형물 내의 질소(org-N)의 유출이 적었고 선단무산소조를 설치함으로써 원수 내의 유기물을 탈질반응에 먼저 사용할 수 있는 공정의 특징상 내부반송율의 증가는 탈질되는 NO₃-N 총량을 증가시켜 결과적으로 유출수의 T-N 제거효율이 상승하는 것으로 판단된다.

3.2. 질소제거특성

Fig. 3은 Ax에 유입하는 NO_x-N부하에 따른 비탈질속도(Specific DeNitrification Rate, SDNR)의 변화를 나타내고 있다. 기존의 연구에도 나타나

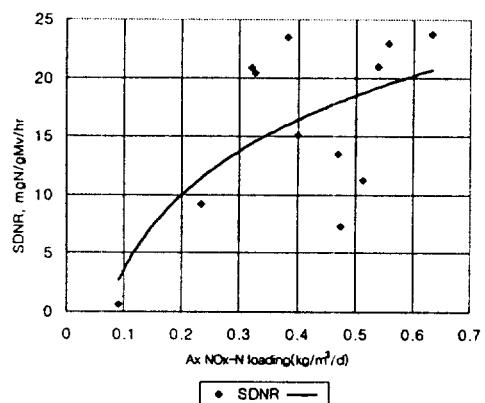


Fig. 3. NO_x-N loading effect on denitrification rates(at 20~25°C).

듯이 탈질반응조에서 유입수의 COD/NO₃-N비는 F/M비, 온도 등과 함께 SDNR을 결정하는 매우 중요한 요소이다. Carucci et al.⁸⁾의 실험에 의하면 20°C에서 유입원수의 COD/NO₃-N가 6.25~8.75 일 때의 SDNR이 약 4.17mgNO₃-N/gMv/hr인데 반해 COD/NO₃-N가 32.4일 때는 10.42mgNO₃-N/gMv/hr로 나타났고 Ekama et al.⁹⁾에 의하면 탈질반응을 위한 Batch 실험 결과 유기물과 NO₃-N의 비율에 따라 SDNR이 최소 4mgNO₃-N/gMv/hr에서 최대 40mgNO₃-N/gMv/hr의 차이를 보이며. 국내 하수를 대상으로 COD/NO₃-N비를 변화시켜 가며 실험한 천상욱 등¹⁰⁾의 연구에서는 28°C에서 COD/NO₃-N가 1만큼 늘어나면 SDNR이 1.2mgNO₃-N/gMv/hr 만큼 증가하고 32°C에서는 COD/NO₃-N가 1만큼 증가하면 SDNR이 2.2mgNO₃-N/gMv/hr 만큼 늘어나는 것으로 나타났다. Pilot plant 운전 결과 Ax조 유입 COD/NO₃-N는 2.3~56으로 평균 11.4로 높게 유지되었고 SDNR은 0.6~23.1

$\text{mgNO}_3\text{-N/gMv/hr}$ 의 범위로 평균 $9.04\text{mgNO}_3\text{-N/gMv/hr}$ 로 나타났다. 이는 Fig. 3에서 보듯이 NOx-N 유입부하가 클수록 SDNR이 커지는 것으로 나타나 Ax조는 COD/ $\text{NO}_3\text{-N}$ 비가 높게 유지되어 유입되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 양에 따라 탈질속도가 결정되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제한조건(non COD limited condition) 상태임을 알 수 있었다.

Fig. 4은 내부반송비 150%의 조건을 모사한 탈질반응에 대한 회분식실험 결과를 나타내었다. 탈질반응이 즉각적으로 일어나며 인의 용출은 탈질반응과 동시에 일어남을 알 수 있었으며, 이때의 ORP는 $-30\sim-70\text{mV}$ 의 범위를 보였다. 운전기간중의 탈질속도에 대한 온도영향은 Fig. 5에 나타낸 것처럼 비슷한 Ax조 NOx-N 부하($0.49\sim0.63\text{kg/m}^3/\text{d}$)에서, 온도가 낮을수록 탈질속도가 낮아지는 경향을 보이고 있으며 유입수의 COD/ $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 높게 유지됨으로써 15°C 에서도 SDNR이 $4\sim5\text{mgN/gMv/hr}$

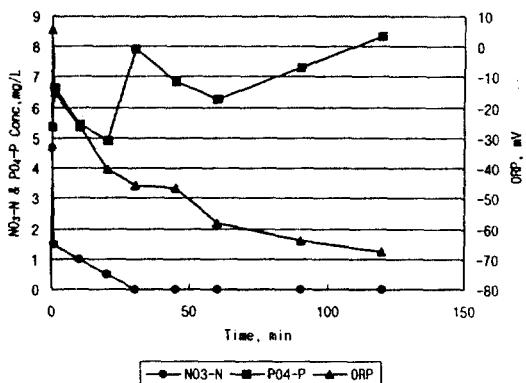


Fig. 4. Batch denitrification test with influent (internal recycle 150% at 16°C).

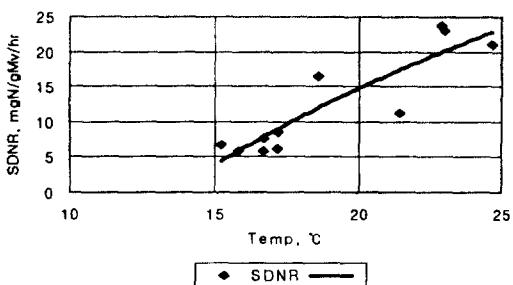


Fig. 5. Temperature effect on denitrification rates(at Ax NOx-N loading $0.49\sim0.63\text{kg/m}^3/\text{d}$).

값을 정도를 유지하였다.

Ox에서의 질산화시 암모니아성 질소 1mg당 평균 5.9mg 의 Alkalinity가 소모되는 것으로 나타났는데 이는 이론적인 값인 7.14mg 보다 작은 것으로 폭기조 내에서 호기성 탈질 등에 의해 Alkalinity가 보충된 것으로 판단된다. Ox 유출수의 pH는 $6.6\sim7.3$ 의 범위로 평균 6.9 정도를 유지하였고 유출수의 Alkalinity는 평균 78mg/L as CaCO_3 로서 질산화를 위한 원수 내의 Alkalinity는 충분한 것으로 나타났다. 한편 비질산화속도(Specific Nitrification rate, SNR)는 평균 2.9mgN/gMv/hr 로 분석되었으며 Fig. 6은 온도에 따른 SNR의 변화를 나타냈는데 온도가 10°C 저하될 경우 SNR이 $1/2$ 로 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 Ox조로 유입되는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 부하에 따른 $\text{NH}_4\text{-N}$ 제거효율을 나타낸 것으로 $\text{NH}_4\text{-N}$ 부하가 $0.4\text{kgN/m}^3/\text{d}$ 이상일 경우 $\text{NH}_4\text{-N}$ 제거효율이 60% 이하로 저하되는 경우도 있었는데 이는 질산화를 위한 체류시간의 부족으로 인한 것으로 판단되

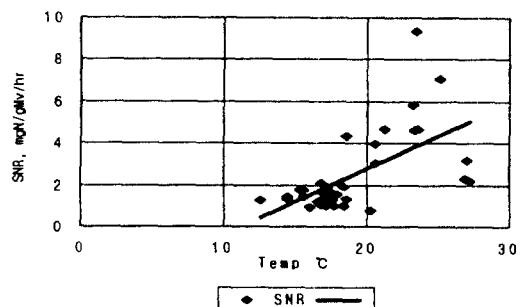


Fig. 6. Temperature effect on nitrification rates.

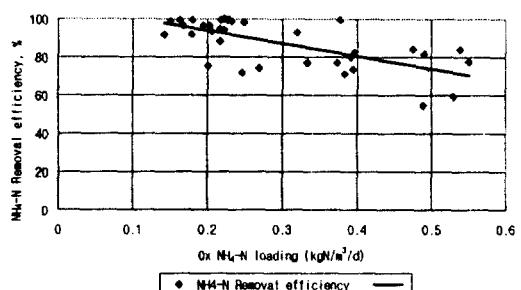


Fig. 7. Ox $\text{NH}_4\text{-N}$ loading vs. ammonia removal efficiency.

며, Ox조로의 유입 NH₄-N부하가 0.4kgN/m³/d 이상일 경우 완전질산화를 위해 체류시간을 늘려주는 것이 필요하다.

3.3. 인 제거특성

생물학적 인 제거공정은 PAO(Phosphate Accumulating Organism)가 협기-호기의 반복공정에 의한 인의 용출과 과잉섭취 원리를 이용한 것이다. 이러한 인제거 효율의 가장 중요한 요소는 원수의 성상이며 특히 VFA(Volatile Fatty Acid)의 존재, 종류 등의 영향이 크다. 이러한 인의 거동은 무산소조나 협기조에서 VFA의 종류, 반응조 내의 NO₃-N의 양에 따라 인의 용출 및 섭취, 용출속도의 변화 등의 현상이 다양한 형태로 나타나는 것으로 알려졌다^{11,12)}. Gerber et al.¹¹⁾에 의하면 동일한 유기물 조건의 무산소조에서 NO₃-N의 농도를 0~93mg/L로 변화시켜 가면서 실험한 결과 모든 반응조에서 초기에는 인의 용출과 탈질반응이 동시에 일어나며 이후 주입되는 NO₃-N의 농도가 21mg/L를 넘는 경우는 인의 섭취가 일어나고 그 이하일 경우에는 탈질반응이 끝난 후 인의 용출이 계속되는 것으로 나타났다. Chuang et al.¹³⁾에 의하면 무산소조건에서 인의 용출과 탈질반응은 substrate의 존재 조건에 따라 동시에 일어나는데 이는 substrate가 충분할 경우(releasable phosphorus limited condition) NO₃-N에 의한 인의 용출저해(nitrate stress)효과는 크지 않고 substrate가 제한되었을 경우(initial substrate limited condition) NO₃-N에 의한 인의 용출 저해 효과가 크다고 보고하고 있다. 이는 무산소조에서 유기물과 NO₃-N의 조건에 따라 인의 거동의 변화가 탈질반응과 동시에 일어날 수 있음을 말해준다. 본 pilot plant에서는 인의 용출기작이 일어났는데 Fig. 8에 나타냈듯이 Ax조의 인용출속도(Specific Phosphorus Release Rate, SPRR)는 0~19mgP/gMv/hr의 범위로 평균 6.25mgP/gMv/hr 보였으며 이를 결정하는 주요소는 유입 SCOD부하로 나타났다.

후단의 협기조에서는 반송슬러지를 반송시켜 무산소조보다 미생물을 고농도로 유지하는 데 이때 선단의 무산소조에서 완전탈질소화된 혼합액을 유입

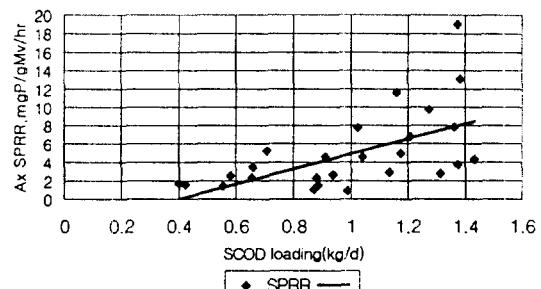


Fig. 8. Ax SCOD loading vs. Ax SPRR.

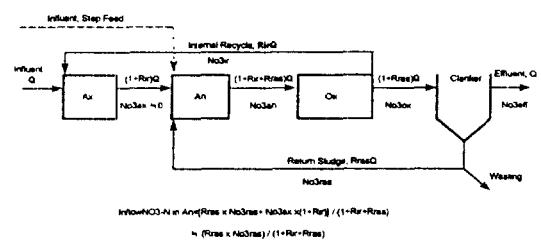


Fig. 9. NO₃-N mass balance in anaerobic basin.

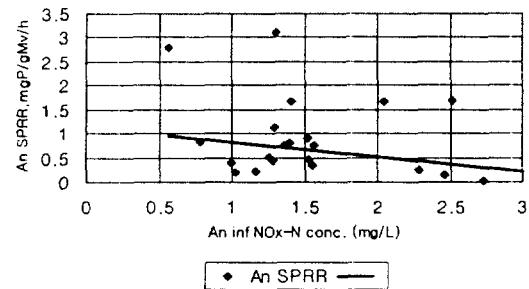


Fig. 10. Effect of initial nitrate concentration on An SPRR in anaerobic.

시킴으로써 Fig. 9와 같이 회석효과에 의해 반송슬러지 내의 NO₃-N의 농도를 낮추어 NO₃-N에 의한 인의 용출저해현상을 별도의 반응조 설치없이 저감하여 잔여의 유기물 등을 이용하여 인의 용출이 가능하도록 하였으나 Fig. 10에 나타냈듯이 무산소조에서 완전탈질소화가 이루어지지 않아 An조 유입 NO₃-N 농도가 2.5mg/L 이상으로 유입될 경우 SPRR이 지하되는 경향을 보여주었으며 SPRR이 0~3.4mgP/gMv/hr의 범위로 평균 1.0mgP/gMv/hr로 분석되었다.

3.4. 내부반송율에 따른 질소·인의 거동

유입유량대비 체류시간 기준으로 내부반송을 50%, 100%, 200%로 변화시켜 가면서 실험한 결과를 나타낸 것이 Fig. 11, 12이다. 인의 경우 내부반송율이 낮을수록 용출이 많이 일어나며 $P_{\text{uptake}}/P_{\text{release}}$ 는 1.3~1.5로 용출시킨 인의 양보다 30~50% 더 과잉 섭취하는 것으로 나타났다. 또한 슬러지 내 인 함량은 VS당 4~8%로 일반 활성슬러지의 인 함량인 1.5~2.5% 보다 높게 나타났다³⁾. 질소의 경우 반송율이 증가할수록 Ox조 유출수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 낮아지고 인 제거 효율에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

3.5. 시뮬레이션의 적용

3.5.1. 내부인자의 보정

내부인자는 양론식 계수(stoichiometric parameter)와 속도식 계수(kinetic parameter) 중 Ax조

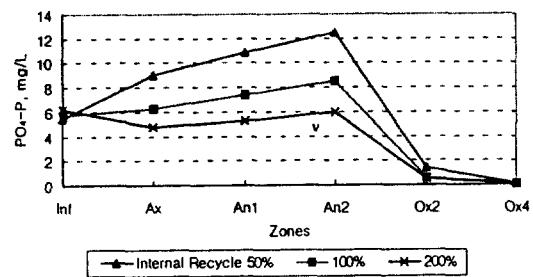


Fig. 11. $\text{PO}_4\text{-P}$ profile of pilot plant for internal recycle.

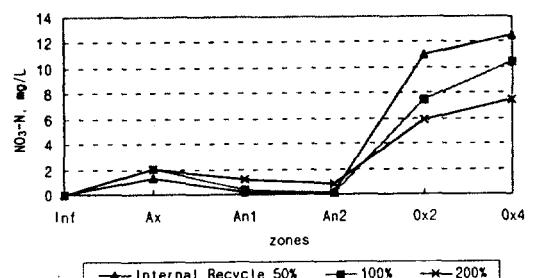


Fig. 12. $\text{NO}_3\text{-N}$ profile of pilot plant for internal recycle.

에서의 종속영양미생물군의 최대비증식속도(maximum specific growth rate, μ_{max})와 Ax조에서의 비탈질속도(SDNR)와의 관계를 시뮬레이션을 통하여 Fig. 13과 같이 설정한 후 보정하였고 변환함수 인자(switching function parameter) 중 인의 용출에 관련된 SCFA limit을 반응조의 특성에 맞게 재설정하였으며 Ox조에서 stoichiometric parameter 중 인의 섭취와 관련된 COD이용당 인용출량(phosphorus uptake/COD utilized in aerobic growth, $f_{\text{p,utl}}$)을 실제 인 섭취속도(Specific Phosphorus Uptake Rate, SPUR)와 유사하게 설정하였다. 보정한 내부인자를 Table 6에 나타냈다.

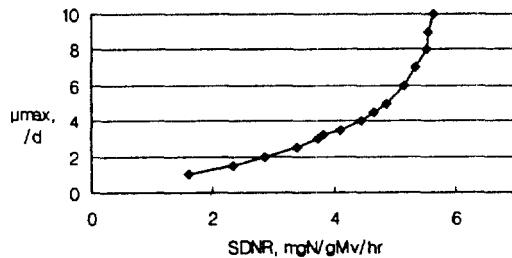


Fig. 13. Relation of SDNR and μ_{max} in simulation.

Table 6. Value of general model parameter for calibration

Parameter	Unit	Default	Calibrated	Remarks
μ_{max}	/d	3.2	Ax	5
SCFA limit	mg P/L	5	Ax	8
		5	An	1
$f_{\text{p,utl}}$	g P/g stored COD	1.0	Ox	1.2

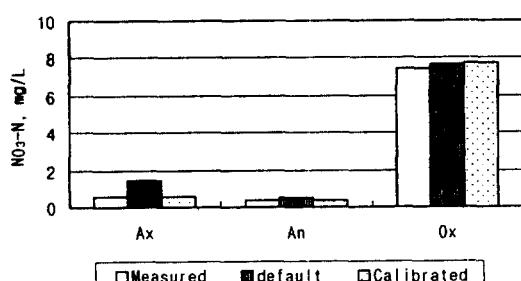


Fig. 14. Measured and simulated(default, calibrated) profile of $\text{NO}_3\text{-N}$.

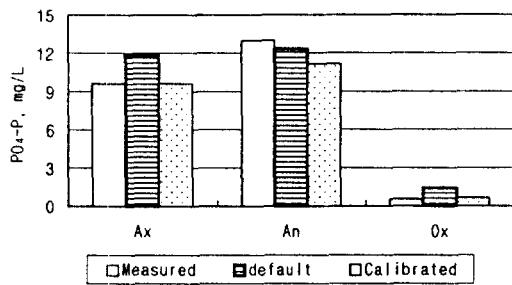


Fig. 15. Measured and simulated(default, calibrated) profile of PO₄-P

이러한 과정을 통해 실측치와 보정된 내부인자를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 14, 15에 나타냈다. 보정후 Ax조에서 탈질특성과 인의 거동이 실제 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.5.2. 시뮬레이션과 실측치의 비교

위에서 보정한 내부인자를 적용하여 시뮬레이션을 수행하여 유사한 원수조건의 실측치와 비교한 결과를 Table 7에 나타냈다. 이를 살펴보면 탈질반응의 경우 실측치와 시뮬레이션 값이 유사하게 나타났으나 실측치의 Ox조의 NO₃-N양이 시뮬레이션 값 보다 높게 나타나는 것은 시뮬레이션 값은 호기성 탈질로 인한 질소의 손실량이 적게 반영되었기 때문으로 판단된다. 인의 경우 Ax조나 An조에서 용출은 실측치가 시뮬레이션 값보다 적게 일어나는 것으로 나타났다. 이는 반송율의 영향을 파악하기 위해 원수 조건을 같이 설정하여 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 실측치의 원수 조건과 다소 차이가 발생하며 또한 인의 용출과 섭취는 원수 내의 VFA함량이나 Ax조나 An조로 유입되는 NO₃-N에 의해 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

Table 8에는 Ox SRT에 따른 영향을 실제 운전 결과와 시뮬레이션과 비교한 결과를 나타냈다. 본 공정의 대상하수에서 질산화를 위한 최소 SRT를 파악하기 위해 pilot plant를 Ox SRT 3일로 운전한 결과 Ox조에서 질산화가 발생하지 않았고 8일 이상 운전 후 완전질산화가 이루어졌다. 시뮬레이션 결과는 이와 유사한 경향을 보이고 있다. 시뮬레이션 결과와 실측치로 볼 때 질산화를 위해서는 Ox SRT가 5일 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

Table 7. Comparison of measured and simulation value for internal recycle ratio

Item	Reactor	IR=100%		IR=200%	
		Measured	Simulation	Measured	Simulation
NO ₃ -N	Ax	0.46	0.53	0.5	1.24
	An	0.89	0.52	0.5	0.6
	Ox	9.83	12.71	7	9.3
PO ₄ -P	Ax	8.9	15.35	6.75	8.82
	An	12.02	15.89	7	9.94
	Ox	0.47	0.39	0.2	0.47
NH ₄ -N	Ax	22.5	22.12	16	14.83
	An	17.9	17.59	11.6	12.68
	Ox	1.2	0.97	1	0.98

Table 8. Comparison of measured and simulation value for Ox SRT

Item	Reactor	Ox SRT=3d		Ox SRT=5d	
		Measured	Simulation	Measured	Simulation
NO ₃ -N	Ax	0.05	0.00	-	0.72
	An	0.45	0.00	-	0.76
	Ox	1.1	0.08	-	13.82
PO ₄ -P	Ax	17.93	17.18	-	11.62
	An	18.14	23.40	-	12.35
	Ox	0.45	0.37	-	0.36
NH ₄ -N	Ax	46.1	48.12	-	22.94
	An	38.9	49.45	-	18.76
	Ox	32.5	48.52	-	2.79

위에서 보는 것처럼 시뮬레이션값이 실측치와 유사한 결과를 보여주므로 원수 성상분석과 반응조 특성 분석을 통한 모델 내부인자의 적절한 보정이 이루어질 경우 선진 외국과 같이 국내에서도 생물학적 영양소제거공정의 설계 및 공정 선택에 있어 pilot plant의 설치없이 시뮬레이션 프로그램 적용이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결 론

12mg/L가량인 도시하수의 질소, 인 제거를 위하여 13~28°C에서 선단무산소조를 설치한 영양소제거 공정(Bio-NET)을 10m³/d 규모의 pilot plant로 설치하여 내부반송율과 SRT를 변화시켜 운전하여 질소, 인 제거 특성을 살펴본 결과와 이를 시뮬레이션 program을 이용하여 모사한 결과를 상호 비교한 결과는 다음과 같다.

- 1) SS, CODcr의 경우 유입수의 농도 변화와 큰 관계없이 각각 94%, 87%의 제거효율을 안정적으로 보였으며, 질소의 경우 유입수의 질소 변화와 내부반송율의 변화에 따라 52%~89%로 평균 75%의 제거효율을 보였다. 또한 인의 경우 유입수의 인의 농도변화와 큰 관계없이 안정적으로 평균 90% 이상의 높은 제거효율을 보여주었다.
- 2) 선단무산소조는 무산소조의 유입수내에 높은 COD/NO₃-N가 유지되어 SDNR이 평균 9.04 mgN/gMv/hr로 나타났으며 SDNR이 무산소조로의 유입 NO₃-N부하가 클수록 높아지는 non COD limiting 조건으로 나타났다.
- 3) 본 공정의 SNR은 평균 2.9mgN/gMv/hr로 폭기조 유입 NH₄-N부하가 0.4kgN/m³/d 이상일 경우 NH₄-N제거효율이 60% 이하로 저하되었다.
- 4) 선단무산소조에서 인의 거동은 유입수의 SCOD부하에 의해 큰 영향을 받으며 본 실험 결과 무산소조에서 SPRR은 평균 6.25mgP/gMv/hr를 보였으며 협기조에서 인의 거동은 협기조 유입수의 NO₃-N 농도와 유입원수의 SCOD에 의해 영향을 받으며 본 실험 결과 협기조에서 SPRR은 평균 1.0mgP/gMv/hr를 보였다. P_{uptake}/P_{release}는 1.3~1.5로 용출시킨 인의 양보다 30~50% 더 과잉 섭취하는 것으로 나타났고 슬러지내 인 함량은 VS당 4~8%로 분석되었다.
- 5) 대상하수를 본 공정에서 내부반송율 50, 100, 200%로 증가하여 실험한 결과 내부반송율의 증가에 따라 인제거효율은 큰 변화가 없으나 총질소제거효율은 다소 높아지는 것으로 나타났다.
- 6) Model의 내부인자인 양론식 계수(stoichiometric parameter)와 속도식 계수(kinetic

parameter)중 종속영양미생물군의 최대비증식속도, 인의 용출에 관련된 Short Chain Fatty Acid(SCFA) limit, 인의 섭취와 관련된 COD이용당 인용출량을 반응조 특성에 맞게 보정하여 시뮬레이션한 결과와 pilot plant 실측치가 유사한 것으로 나타났다.

- 7) 실제 pilot plant 운전결과와 보정한 내부인자로 내부반송율, SRT를 변화하여 시뮬레이션을 수행한 결과가 유사하여 원수성상과 반응조 특성 분석이 적절히 이루어질 경우 생물학적 영양소제거공정의 설계 및 운전을 위한 시뮬레이션 program의 적용가능성이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. US EPA, Manual Nitrogen Control, EPA/625/R93/010(1993).
2. 환경부, 하수종말처리시설 지도점검 분석결과, '97. 4/4분기 및 '97년 총괄(1998).
3. Movva Reddy, Biological and Chemical System for Nutrient Removal, WEF, pp 156~159(1998).
4. 최의소, "우리나라 환경기초시설의 문제점 및 개선 방향," 우리나라 하수관리정책의 바람직한 방향 특별세미나 자료집, 대한환경공학회, 서울 (1996).
5. Henze, M., W. Gujer, T. Mino, T. Mastuo, M. C. Wentzel and G. v. R. Marais, "Wastewater and Biomass Characterization for the Activated Sludge Model NO. 2: Biological Phosphorus Removal," *Wat. Sci. Tech.*, 31(2), 13~23(1995).
6. Shulan Xu and Bengt Hultman, "Experiences in Wastewater Characterization and Model Calibration for the Activated Sludge Process," *Wat. Sci. Tech.*, 33(12), 89~98 (1996).
7. Daniel Mamais, David Jenkins and Paul Pitt, "A Rapid Physical-Chemical Method

- for the determination of readily biodegradable soluble COD in municipal wastewater," *Wat. Res.*, **27**(1), 195~197(1993).
8. Caruuci, A., Ramodori, R., Rossetti, S. and Tomei, M. C., "Kinetics of Denitrification reaction in single sludge system," *Wat. Res.*, **30**(1), 51~56(1996).
 9. Ekama, G. A., G. v. R. Marais and I. P. Siebritz, "Biological Excess Phosphorus Removal," Chapter Seven, *Theory, Design and Operation of Nutrient Activated Sludge Process*, Water Research Commission, Pretoria S.A(1984).
 10. 천상욱, 최의소, "질산성 질소를 전자수용체로 이용한 활성슬러지의 탈질특성에 관한 연구," 한국수질보전학회 추계발표회 논문초록집, 광주과학기술원(1997).
 11. Gerber, A., E. S. Mostert, C. T. Winter and R. H. de Villiers, "Interactions between phosphate, nitrate and organic substrate in biological nutrient removal processes," *Wat. Sci. Tech.*, **19**, 183~194 (1987).
 12. Kuba, T. M. C. M Van Loosdrecht and J. J. Heijnen, "Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system," *Wat. Res.*, **30**(7), 1702~1710 (1996).
 13. Shun-Hsing Chuang, Chiao-Fuei Ouyang and Yeuh-Bin Wang, "Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition," *Wat. Res.*, **30**(12), 2961~2968(1996).