



A₂O공정 운전인자 조정에 대한 연구

유호식[†], 이병희

경기대학교 환경에너지공학과

(2015년 8월 10일 접수, 2015년 8월 26일 수정, 2015년 8월 31일 채택)

A Study on Adjustment of Operational Factor in A₂O process

Ho-Sik Yoo[†], Byonghi Lee

Department of Environmental and Energy Eng., Kyonggi University

ABSTRACT

An alternative was investigated to maximize the treatment efficiency of wastewater treatment plant without large scale expansion. 79% of detention time was required for enough nitrogen control. As aeration time was extended, nitrification was processed, but opposite trend was seen in phosphorus. High concentration of NO₃-N interrupted PAOs activity not to absorb phosphorus. An alternative was devised for selective use of anaerobic or anoxic zone. Trisection was suggested for alternative use of center room. The result was relatively successful. The concentration of phosphorus was reduced with reduction of nitrogen. Extended anaerobic condition seemed to stimulate denitrification. Valve connection of internal return from aeration tank will make it possible to use middle room alternatively. This method will be a good alternative for seasonal variation of water temperature.

Keywords : A₂O process, Operating factor, wastewater treatment, simulation

초 록

대규모 시설확장 없이 기존하수시설의 운영 방식개선으로 처리효율을 극대화할 수 있는 방법을 찾아 보고자 하였다. 충분한 질소제거를 위해 체류시간 79%는 호기조에 할애할 필요가 있었다. 포기시간이 길어질수록 질산화가 많이 진행되었는데 인 농도는 반대의 경향을 보여주었다. 긴 포기시간에서 높은

[†]Corresponding author(hsyoo@kgu.ac.kr)

농도의 인 배출을 보여주고 있었다. 높아진 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 방해로 PAOs의 활동이 저하되어 TP 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 흡수가 저조해지는 현상으로 추정되었다. 충분한 질소제거를 위해 긴 포기시간을 선택해야 하지만 TP 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도를 낮출 수 있는 방법도 강구해야 할 필요성이 생겨 혐기조 체류시간을 가변적으로 확장하는 방법을 고안하였다. 혐기조와 무산소조를 두 칸으로 하지 않고 3등분하여 중앙 칸을 가변적으로 사용하는 경우를 설정해 보았다. 중앙 칸을 무산소 또는 혐기조로 사용하는 경우로 설정한 것이다. TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 등은 충분히 낮추면서 TP 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도를 더욱 낮출 수 있었다. 혐기조 체류시간이 증가되어 탈질촉진이 생긴 것으로 판단되었다. 중앙 칸을 가변적으로 사용할 수 있는 방법으로는 호기조에서 오는 내부반송수를 두 번째와 세 번째 칸으로 밸브 연결하여 두 번째 칸을 선택적으로 혐기조로 운영하는 방법이다. 이러한 방식은 계절에 따라 수온변화에 대응하는 우수한 대안이 될 것으로 사료되었다.

주제어 : A_2O 공정, 운전인자, 하수처리, 시뮬레이션

1. 서론

국내에서 2012년부터 시행된 법적 방류수 수질기준 강화¹⁾ 정책으로 전국의 하수처리 시설들은 공정개선이나 시설확장을 추진하고 있다. 고도처리시설을 추가하거나 처리공정을 변경하는 방법으로 배출기준을 준수하려고 하는 것이다. 서울지역의 A처리장은 생물반응조를 표준활성슬러지공정에서 MLE (Modified Ludzac-Ettinger) 공정으로 개선하는 사업을 추진하였고, B처리장은 표준활성슬러지와 MLE로 운영되던 생물반응조를 A_2O 공정으로 추진하고 있다. 시뮬레이션의 기본이 되는 생물학적 반응에 대한 모델을 이용한 시뮬레이션은 남아프리카 공화국의 Water Research Commission²⁾에서 시작하여 International Water Association에서 ASM (Activated Sludge Model) 1, 2, 2D and 3³⁾가 발표되었다. 그리고 이 모델을 수치해석 프로그램에 적용하여 software package가 개발되었는데⁴⁾, 일부 회사가 이를 상용화하였다⁵⁾.

상용화된 package는 하수처리장에서 발생하는 생물학적 반응뿐만 아니라 물리화학적 반응을 포함하여 수처리 공정 및 고형물 처리 계통을 포함하는 하수처리장 전 공정에 대한 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 이 같은 시뮬레이션은 기존 처리장의 공정을 다른 공정으로 변경시키는 경우에

있어서 발생하는 문제점 및 처리수 성상 파악을 가능하게 하였다. 시뮬레이션을 이용한 실 처리장 운영 효율 개선에 대한 사례는 여러 문헌⁶⁾에서 제시되었는데, 네덜란드의 실 처리장에서는 COD, 질소 및 인 제거에 대한 연구가 수행되었다⁷⁾, 국내에서는 통합 모델의 하수처리장 적용에 대한 연구 결과⁸⁾가 제시되었으며, 이와 더불어 시뮬레이션을 통한 C하수처리장 공정 변환⁹⁾ 및 석유화학폐수 처리공정에 대한 연구¹⁰⁾가 수행되었다. 또한 시뮬레이션을 통해 외부탄소원 적용성을 평가하였고¹¹⁾, 동절기 질소제거를 위한 최적 운전조건 도출¹²⁾에 대한 연구가 수행되었다. 하수처리장 생물학적 고도처리 upgrade를 위한 공정 최적화¹³⁾ 및 A_2O 공법에 있어서의 미생물 거동에 대한 연구¹⁴⁾가 수행되었다. 이 같이 하수처리장을 시뮬레이션할 수 있는 software는 여러 분야에서 응용되고 있는데, 본 연구에서는 서울 특별시에 위치한 B하수처리장의 공정개선을 시뮬레이션 해보고자 하였다. 기존 처리장의 공정개선이나 시설확장에는 막대한 비용이 소요되는데 시뮬레이션을 통해 최적의 공정운영 조건을 찾아낸다면 비용절감이나 수질개선 뿐 아니라 여타의 처리장에도 많은 참고가 될 것으로 기대한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 시뮬레이션 적용을 위한 방법

연구대상으로 서울지역 대형 하수처리장인 B처리장을 선정하였는데 현재 표준활성 슬러지공정으로 운영되는 계열과 MLE공정으로 운영되는 계열이 혼합되어 있다. 겨울철 수온이 내려가면 처리효율저하로 용존성 질소의 배출이 늘어날 뿐 아니라 공정의 특성상 인 제거에 취약하다. 본 연구는 기존 공정을 A₂O로 개선하는 방법을 찾아보았다. 본 연구에서는 표준활성 슬러지조 1지와 이차침전지 2지를 공정개선 검토에 이용하였다. 시뮬레이션을 위해 하수처리 공정 소프트웨어인 GPS-X(General Purpose Simulator, Hydromantis, Inc)를 이용하였다.¹⁵⁾ 이 소프트웨어는 다른 연구에서도 활용된 바 있다.^{11,16)}

[Table 1]에 B처리장 생물반응조의 운영특성을 나타내었다. 현재의 운전조건을 참고하여 [Table 2]와 같은 유입수질을 사용하였다. 활성 슬러지공정모델로 ASM2d 이용하였고 모델계수는 [Table 3]와 같이 ASM2d default 수치를 사용하였다. 생물반응조와 이차침전지의 규격은 [Table 4]와 같으며 A₂O 모형 및 Case 설정은 [Table 5]와 같고 반응조별 시간 옆에 백분율도 표시하였다. 처리효율이 떨어져 문제가 되는 계열은 겨울철이므로 수온을 11℃로 설정하여 분석하였다.

2.2 사용된 생물반응조 모형

생물반응조의 모형은 기존처리장의 형태를

[Table 1] Bioreactor Operating Characteristics

Itme	MLSS Conc. (mg/L)	Waste sludge TS Conc. (TS %)	Wste Sludge (kg/day)	SRT (day)	HRT (hrs)	Effluent DO (mg/L)	RAS ratio (%)
Average	2,429	0.5	419.4	12.5	9.6	2.2	62

Note : SRT=Sludge Retention Tim, HRT=Hydraulic Retention Time
RAS = Return Activated Sludge

[Table 2] Influent Water Quality

Division	Unit	Bioreactor influent	Note
Flow	m ³ /day	26,567	
BOD	mg/L	131.1	
sBOD	mg/L	86.6	soluble BOD
CODcr	mg/L	245.0	
sCODcr	mg/L	153.2	soluble COD
bCODcr	mg/L	198.6	biodeg. COD
rbCODcr	mg/L	131.2	readily biodeg. COD
TSS	mg/L	75.0	
VSS	mg/L	51.0	
TN	mg/L	37.7	
NH ₃ -N	mg/L	30.4	
TP	mg/L	3.7	
PO ₄ -P	mg/L	1.5	
C/N	BOD/TN	3.5	

[Table 3] ASM2d Model Coefficient

	Model coefficient	Unit	Value
Y_H	Yield for heterotrophs	mgCOD/mgCOD	0.625
μ_{maxH}	Maximum specific growth rate for heterotrophs	day ⁻¹	6.0
b_H	Decay coefficient for heterotrophs	day ⁻¹	0.4
K_S	Half-saturation coefficient for heterotrophs	mgCOD/L	4.0
Y_A	Yield for autotrophs	mgCOD/mgN	0.24
μ_{maxA}	Maximum specific growth rate for autotrophs	day ⁻¹	1.0
b_A	Decay coefficient for autotrophs	day ⁻¹	0.15
K_A	Half-saturation coefficient for autotrophs	mgCOD/L	1.0
Y_{PAO}	Yield for PAOs	mgCOD/mgCOD	0.625
$\mu_{max,PAO}$	Maximum specific growth rate for PAOs	day ⁻¹	1.0
b_A	Decay coefficient for PAOs	day ⁻¹	0.2
K_A	Half-saturation coefficient for autotrophs	mgCOD/L	1.0

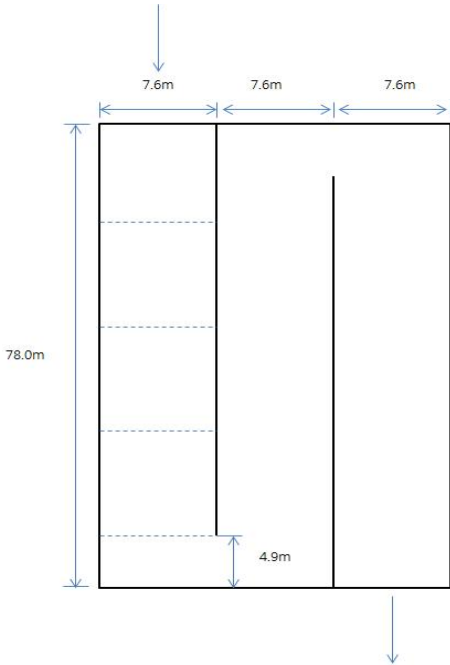
[Table 4] Bioreactor and Settling Basin Standard Set-up

Item	Inflent flow (m ³ /d)	Temp. (°C)	Bioreactor	Secondary Clarifier
Model set-up	26,567	11	7.6mW×234mL×6mHe×1basin	11.2mW×75mL×3mHe×2basin

[Table 5] A₂O Model and CASE Set-up

Division	HRT, hr (%)				Note	
	Anaerobic	Anoxic	Aerobic	Total		
Conventional Activated Sludge	–	–	9.6	9.6	Existing	
MLE	–	1.6	8.0	9.6	"	
A ₂ O	CASE1	1.5 (15.6)	1.5 (15.6)	6.6 (68.8)	9.6	Model
	CASE2	1.0 (10.4)	2.0 (20.8)	6.6 (68.8)	9.6	"
	CASE3	1.0 (10.4)	1.5 (15.6)	7.1 (74.0)	9.6	"
	CASE4	0.5 (5.2)	1.5 (15.6)	7.6 (79.2)	9.6	"
	CASE5	0.5 (5.2)	2.0 (20.8)	7.1 (74.0)	9.6	"
	CASE6	1.0 (10.4)	1.0 (10.4)	7.6 (79.2)	9.6	"

[Fig. 1] 처럼 그대로 사용하였다. (Plug flow 서 혐기조와 무산소조의 형태로 모형화) 형태로서 3개 이송 수로로 나누어 전단 78m에



[Fig. 1] Bioreactor configuration - Top View.

3. 결과 및 고찰

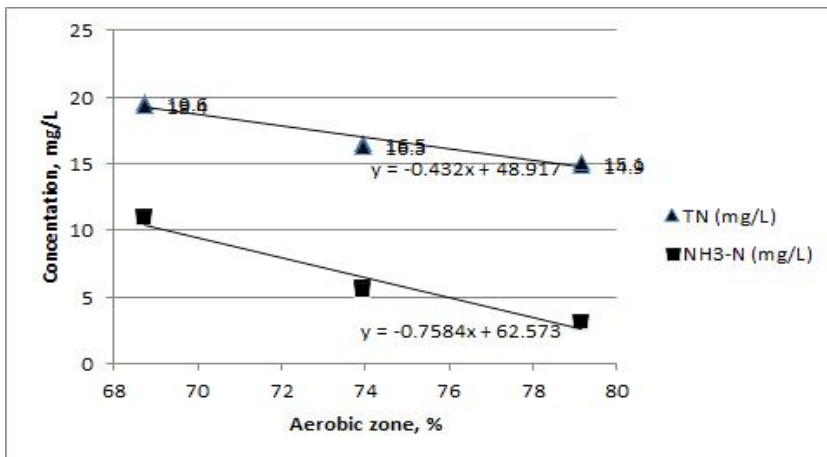
3.1 호기조 체류시간이 TN 및 NH₃-N 농도에 미치는 영향

반응조별 체류시간이 질소와 인 농도의 변화에

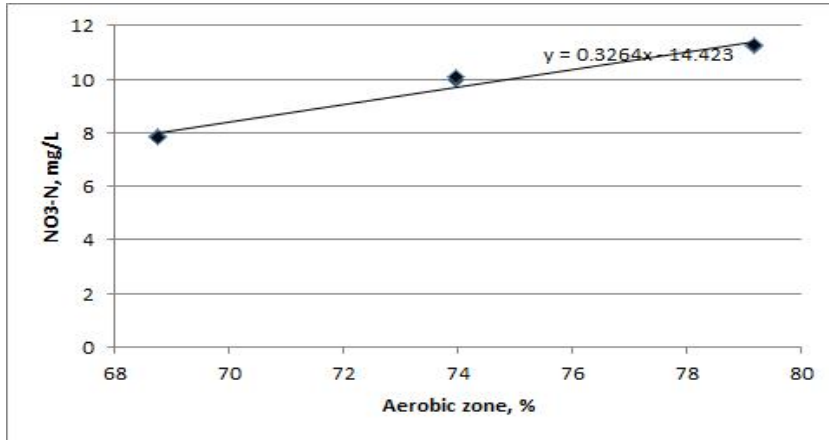
주는 영향을 살펴보았다. [Table 5]에 백분율로 나타낸 호기조 체류시간별(백분율) TN과 NH₃-N의 배출농도를 [Fig. 2]에 나타내었다. 추세선도 그렸는데 호기조 체류시간 증가에 따라 감소하는 것은 당연하였고 기울기는 NH₃-N가 가파르게 감소하였다. 여섯 개의 Case중 Case 4와 6이 충분한 감소효과를 보여 체류시간 79%는 호기조에 할애할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2 호기조 체류시간이 NO₃-N 및 인 농도에 미치는 영향

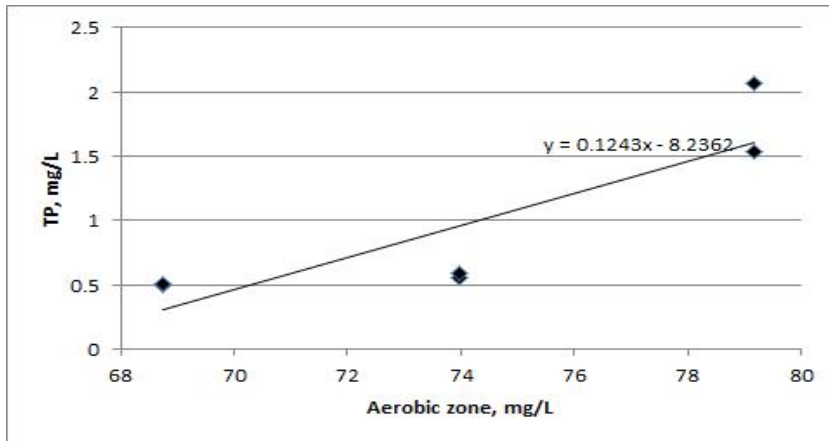
다음은 NO₃-N을 살펴보았다. 포기시간이 길어질수록 질산화가 많이 진행되어 [Fig. 3]같은 기울기를 보여주고 있었다. 그러나 인 농도는 반대의 경향을 보여준다. [Fig. 4]에 그 결과를 표시하였다. 추세선 주위로 많이 분산된 형태지만 긴 포기시간에서 높은 농도의 인 배출을 보여주고 있다. 이러한 결과를 설명할 수 있는 원인을 추정해보면 높아진 NO₃-N 농도를 생각해 볼 수 있다. 높아진 NO₃-N의 방해로 PAOs의 활동이 저하되어 TP 및 PO₄-P의 흡수가 저조해지는 현상을 추정해 볼 수 있다. [Fig. 5]에 NO₃-N와 TP 농도의 관계를 나타내 보았다. 정확한 함수관계라고 할 수는 없지만 반비례하는 것은 분명해 보인다.



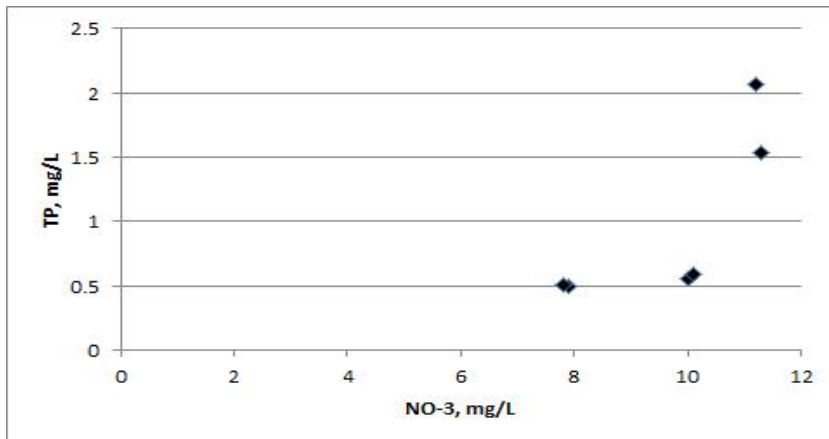
[Fig. 2] Nitrogen concentrations with regard to aerobic zone percentages.



[Fig. 3] Nitrate concentrations with regard to aerobic zone percentages.



[Fig. 4] TP concentrations with regard to aerobic zone percentages.



[Fig. 5] TP concentrations with respect to nitrate concentrations.

3.3 인 농도 제어를 위한 대안

충분한 질소제거를 위해 Case 4,와 6를 선택해야 하지만 TP 및 PO_4-P 의 농도를 낮출 수 있는 방법도 강구해야할 필요성이 생긴다. Case 4,와 6를 비교해보면 혐기조 체류시간이 30분 더 긴 Case 6에서 그나마 인 농도가 낮아진 것을 볼 수 있다.

혐기조와 무산소조를 두 칸으로 하지 않고 3등분하여 중앙 칸을 가변적으로 사용하는 Case를 설정하여 보았다. [Table 6]에 각 생물반응조의 할당시간을 표시하였다. Case 4, 6 에서의 호기조 7.6시간에서 0.1시간을 떼어 혐기조와 무산소조를 삼등분하기 쉽도록 2.1 시간으로 하였다. 중앙칸을 Case7은 무산소로 Case8은 혐기조로 사용하는 경우로 설정한 것이다. [Table 7]에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. TN, NH_3-N , NO_3-N 등은 Case 4, 6와 유사하게 배출하면서 Case 8의 경우 TP 및 PO_4-P 의 농도를 더욱 낮출 수 있었다. 혐기조 체류시간이 증가되어 탈질 촉진이 생긴 것으로 판단된다. 중앙 칸을 가변적으로 사용할 수 있는 방법으로는 호기조에서 오는 내부반송수를 두 번째와 세 번째 칸으로 밸브 연결하여 두 번째 칸을 선택적으로 혐기조로 운영하는 방법이다. 이러한 방식은 계절에 따라 수온변화에 대응하는 우수한 대안이 될 것으로 사료된다.

4. 결론

대규모 시설확장 없이 기존시설의 운영 방식개선으로 처리효율을 극대화할 수 있는 방법을 찾아보고자 하였다.

1. 호기조 체류시간 증가에 따라 TN과 NH_3-N 의 감소정도를 살폈는데 NH_3-N 가 가파르게 감소하였다. 조사한 Case중 Case 4,와 6이 충분한 감소효과를 보여 체류시간 79%는 호기조에 할애할 필요가 있는 것으로 판단되었다.
2. 포기시간이 길어질수록 질산화가 많이 진행되었는데 인 농도는 반대의 경향을 보여주었다. 긴 포기시간에서 높은 농도의 인 배출을 보여주고 있었다. 높아진 NO_3-N 의 방해로 PAOs의 활동이 저하되어 TP 및 PO_4-P 의 흡수가 저조해지는 현상으로 추정되었다.
3. 충분한 질소제거를 위해 Case 4,와 6를 선택해야 하지만 TP 및 PO_4-P 의 농도를 낮출 수 있는 방법도 강구해야 할 필요성이 생겨 혐기조 체류시간을 가변적으로 확장하는 방법을 고안하였다. 혐기조와 무산소조를 두 칸으로 하지 않고 3등분하여 중앙 칸을 가변적으로 사용하는 Case를 설정하여 보았다. 중앙 칸을 Case7은 무산소로 Case8은 혐기조로 사용하는 경우로 설정한 것이다. TN, NH_3-N , NO_3-N 등은 Case 4, 6와

[Table 6] Case 7 and 8 set-up

Division		HRT (hr)				
		Anaerobic	swing	Anoxic	aerobic	Total
A_2O	CASE7	0.7	0.71)	0.7	7.5	9.6
	CASE8	0.7	0.72)	0.7	7.5	9.6

Note : CASE7 : swing zone → Anoxic, CASE8 : swing zone → Anaerobic

[Table 7] Effluent Concentrations from Secondary Settling Basin

구분		TN (mg/L)	NH_3-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	TP (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
A_2O	CASE7	15.1	3.3	11.0	1.3	1.1
	CASE8	15.9	3.9	11.3	0.6	0.3

유사하게 배출하면서 Case 8의 경우 TP 및 PO₄-P의 농도를 더욱 낮출 수 있었다. 혐기조 체류시간이 증가되어 탈질축진이 생긴 것으로 판단되었다. 중앙 칸을 가변적으로 사용할 수 있는 방법으로는 호기조에서 오는 내부반송수를 두 번째와 세 번째 칸으로 밸브 연결하여 두 번째 칸을 선택적으로 혐기조로 운영하는 방법이다. 이러한 방식은 계절에 따라 수온변화에 대응하는 우수한 대안이 될 것으로 사료되었다.

사사

본 연구에 많은 도움과 자료를 제공해 주신 (주)수엔지니어링엔컨설팅 안세영 대표께 깊은 감사사를 표합니다.

References

- [하수도법 시행규칙 - 공공하수처리시설의 방류수수질기준<개정 2011.2.17.>] Sewerage Act & Regulations - Effluent Water Quality Standards of Domestic Wastewater Treatment Plants<Revised 2011.2.17.>
- Ekama G. A. and Marais G.v.R, The dynamic behaviour of the activated sludge Process, Research Report W27, Dept. of Civil Eng., University of Cape Town, Rondebosch, 7701, RSA. (1978).
- International Water Association, Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3, Scientific and Technical Report No. 9, IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment. (2000).
- Byonghi Lee, Partial nitrification of high nitrogen wastewater in the contact stabilization process, University of Florida, Ph. D. Thesis. (1992).
- CDM Smith, <http://cdmsmith.com/en/Insights/Viewpoints/P>
- process - Modeling - Simulates - Wastewater - Treatment - System - Behavior.aspx, (June, 2015)
- Metcalf & Eddy/Aecom Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery, McGraw-Hill, NY, USA, pp. 742-751. (2014).
- Brdjanovic D., Loosdrecht M C.M. VAN, Versteef P, Hooijman C. M. Alaerts G. J. and Heijen J. J., "Modeling COD, N and P Removal in a Full-Scale WWTP Haarlem Waarderpolder," Water Research, 34(3), pp.846-857. (2000).
- [황은주, 이창근, 이병현, "하수처리장에서 ASM3와 ADM1의 통합모델의 적용," 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집] EunJu Hwang, ChangGeun Lee, ByungHun Lee "Application of the integrated model of ASM3 and ADM1 in Wastewater Treatment Plant," Korean Society of Water&Wastewater · Korean Society on Water Environment, Proceedings of 2007 KSWW & kSWE Fall Meeting, Ilsan, pp. F-102 - F-103. (2007).
- [안세영, 김정주, "중량하수처리장 활성슬러지 공정 컴퓨터 모델링," 대한환경공학회 춘계학술연구발표회] SeYeong An, JeongJoo Kim, "Computer Modeling of Activated Sludge Process in Jungnang Municipal Wastewater Treatment Plant," Korean Society of Environmental Engineers, Proceedings of 2004 KSEE Spring Meeting, Busan, pp. 358-361. (2004).
- [백병천, 진현진, "컴퓨터 모델을 이용한 석유화학폐수 처리공정 설계 연구," 한국도시환경학회지] Byeong-Cheon Paik, Hyun-Jin Jin, "A Study on The Design of Petrochemical Wastewater Treatment Process by Computer Simulation," Journal of Korea Society of Urban Environment/Korea Society of Urban Environment, 8(1), pp. 29-36

- (2008).
11. [정창화 심유섭 김태형 박철휘, “GPS-X 시뮬레이션을 이용한 2단탈질 공정에서 외부탄소원 적용성 평가,” 상하수도학회지] ChangHwa Jeong, YuSeob Sim, TaeHyeong Kim, CheolHwi Park “Evaluation of External Carbon Source on the 2 stage Denitrification Process by Simulation of GPS-X,” Journal of Korea Society of Urban Environment Korean Society of Water&Wastewater, 18(1), pp. 37-48. (2004).
 12. [이운길, 길경익, 한중욱, 고주형, “동절기 하수처리장에서 효율적인 질소제거를 위한 최적 운전조건 도출에 관한 연구,” 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집] Un-Gil Lee, Kyung-Ik Gil, Jong-Ok Han, Joo-Hyung Ko, “A Study on Optimum Operating Condition for Efficient Nitrogen removal at WWTP in Winter days,” Korean Society of Water&Wastewater · Korean Society on Water Environment, Proceedings of 2006 KSWW & kSWE Fall Meeting, Deagu, pp. A-47 - A-53. (2006).
 13. [김민정, 김민한, 김용수, 유창규, “하수처리장의 고도처리 upgrading 설계와 공정 최적화를 위한 다변량 통계분석,” 화학공학회지] MinJeong Kim, MinHan Kim, YongSu Kim and ChangKyoo Yoo, “Design of a Wastewater Treatment Plant Upgrading to Advanced Nutrient Removal Treatment Using Modeling Methodology and Multivariate Statistical Analysis for Process Optimization,” Journal of Korea Society of Urban Environment Korean Chemical Engineering Research, 48(5), pp. 589-897. (2010).
 14. [윤현식, 김덕진, 최봉호, 김문일, “활성슬러지 모델을 이용한 A_2O 공법 영양염류 제거 및 미생물 거동,” 상하수도학회지] Hyunsik Yoon, Dukjin Kim, Bongho Choi, Moonil Kim, “Nutrients removal and microbial activity for A_2O Process Using Activated Sludge Models,” Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 26(6), pp. 889-896. (2012).
 15. “Hydromantis”, <http://www.hydromantis.com/GPS-X.html>, (June, 2015)
 16. [안세영, “하수처리장 에너지자립화사업에서 혐기성소화공정으로부터 용출되는 용존성질소(NH_3-N)의 처리 필요성 연구,” 유기물 자원화] SeYong An, “The Study of the Need to Remove Soluble nitrogen (NH_3-N) Generated from Anaerobic digester Retrofitted in Municipal Wastewater Treatment Plants”, Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 22(3), pp. 68-75. (2014). 