

모델링기법을 이용한 A₂O 하수처리공정에서 주요 공정관리에 관한 연구

박정수¹ · 김성덕^{2*} · 도현승³

¹청주대학교 토목환경공학과 연구원, ²청주대학교 토목환경공학과 강사, ³청주대학교 토목환경공학과 교수

The Process Control Using Modeling Technique in A₂O Sewage Treatment Process

Jung Soo Park¹, Sung Duk Kim^{2*}, and Dho Hyon Seung³

¹Researcher, Dept. of Civil & Environment Engineering, Cheongju Univ.

²Lecturer, Dept. of Civil & Environment Engineering, Cheongju Univ.

³Professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Cheongju Univ.

요약

본 연구에서는 A₂O 공정을 적용하여 운영중인 하수처리시설의 운영데이터를 바탕으로 현재 운영중인 하수처리장의 효율성을 통계적기법을 이용하여 분석하였으며, GPS-X 공정모델프로그램을 활용하여 최적의 운영조건을 도출하였다. 하수처리장의 운영인자는 기초통계분석과 상관관계분석, 일원분산분석을 실시하였다. 기초통계 분석결과 연구대상 하수처리장의 유입량은 여름철에 가장 높게 분석되었으며, 다른 계절에 비해서 유입량의 변동성이 가장 크게 나타났다. 다원변량 분석의 결과 유출 T-N 및 NH₄⁺-N은 C/N비와 통계적으로 유의한 수준이 도출되지 않았다(p-value : > 0.05). A₂O하수운영의 각 영향인자중에서 질소 성분의 제거는 유입 수온, HRT, SRT, DO에 주로 영향을 받고, BOD의 경우 모든 운영 인자, COD는 항목은 HRT, SRT, DO 운영인자에 영향을 받았다. GPS-X를 A₂O 공정의 이용한 시뮬레이션에서 매개변수는 최대 침전 속도, 종속영양미생물 수율(무산소성), 인 반포화계수, 종속영양미생물 사멸율, 종속영양미생물 최대 성장률, 독립영양미생물 최대 성장률, 최대 침전 속도로 나타나 이러한 매개변수가 시뮬레이션에 주요 영향을 미치는 인자로 확인되었다.

핵심용어: A₂O 공법, 하수처리공정, 통계분석, GPS-X 시뮬레이션

ABSTRACT

The efficiency of sewage treatment was analyzed selecting a sewage treatment plant in Gyeonggi-do where A₂O process was applied. Statistical techniques based on the operation data of the sewage treatment were used. The main factors directly affecting the efficiency of the treatment process were analyzed using a GPS-X model. The correlation analysis and one-way ANOVA were performed. The T-N and NH₄⁺-N values of the effluent did not generate statistically significant level (p-value:>0.05) when compared with C/N ration values. Removal of nitrogen components form sewage treatment plants were affected by temperature, HRT, SRT and DO. In the case of BOD, all operating factors were affected, while COD was affected by factors of HRT, STR and DO. In simulations using GPS-X, the parameters that greatly influence was included the maximum sedimentation rate, the dependent nutrient microbial yield (anoxic), the phosphorus saturation coefficient, the dependent nutrient microbial killing rate, the dependent nutrient microbial maximum growth rate, and the independent trophic microorganisms. The maximum growth rate and the maximum setting rate were identified.

Keywords: A₂O process, Wastewater treatment plant, Statistical analysis, GPS-X Simulation

*Corresponding author: Sung Duk Kim, soundoug@hanmail.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7548-4474>

Received: 4 May 2020, Revised: 10 June 2020, Accepted: 12 June 2020



1. 서론

국내외적으로 점차강화되는 수질기준을 달성하기 위하여 다양한 수처리 공법이 개발되어 오고 있다. 우리나라의 생활하수는 단백질, 탄수화물, 유지 등이 다량 함유되어 있는 유기물질이 대부분을 차지하고 있으며, 수질오염의 원인 중 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 그러나 단순한 생물학적 처리공정은 수계 부영양화의 주요 원인인 질소 및 인을 적절히 제거 할 수가 없다. 또한, 특히, 인구가 밀집된 대도시에서는 하수의 발생량과 유기물의 농도가 높고 질소와 인의 농도가 계속 높아지고 있으며, 불특정장소에서 배출되는 비점오염도 주변 수역의 수질을 악화시키는 주요 요인으로 작용한다(Chang and Kim, 2019; Jeon et al., 2005) 이러한 생활하수는 대부분 공공하수처리시설로 유입되고 있는데 안정적이고 효율적인 하수처리시설의 관리 및 운영의 강화가 필요하다. 2000년대 이전의 국내 하수처리공정은 BOD, COD 등의 유기물질과 SS등의 입자상 물질의 제거에 초점이 맞추어진 반면, 2000년대 이후부터는 하천 및 호수의 부영양화 중 원인물질인 T-N과 T-P의 저감에 집중되었고, 법적 방류수질의 기준농도가 강화되었다(MOE, 2016). 현재 국내의 대부분 하수처리시설에서는 생물학적 고도처리공정이 도입되어 운영중이며, 기존의 표준활성슬러지 공법이 생물학적 고도처리공법으로 개량 또는 증설되고 있다(NSTINS). 현재까지 국내 및 해외 하수처리시설에서 많이 운영하고 있는 고도처리공법은 A₂O(anaerobic/anoxic/oxic)계열, SBR(sequencing batch reactor)계열, MBR(membrane bioreactor)계열, 담체(media) 및 특수 미생물계열 등이 있다(National Sewage Treatment Information System, 2019).

생물학적 고도처리공법은 무산소반응조, 혐기성반응조, 호기성반응조의 단위 반응조를 적절히 조합 배열하고, 반응조 사이에서 순환시킴으로서 유기물 그리고 영양염류 인 질소 및 인의 제거를 시도하는 다단 완전혼합 및 내부 순환형 생물학적 영양염류 제거 처리시스템이 대부분을 차지하고 있다.

그러나, 국내에서 운영 중인 대부분의 처리시설에서는 인구의 증가에 따른 유입부하의 변동성이 심해 처리장의 설계시 방류수질의 기준을 만족시키지 못하고 있는 처리장이 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 추가적인 전처리 시설, 약품 주입의 증가, 후 처리시설을 하고 있으나, 이는 경제적으로 많은 투자와 시간을 필요로 한다(Ahm, 2010). 또한 일일 500톤 이상 공공하수처리시설은 매일 1회 BOD, COD, SS, TN, TP를 수질검사를 하여 설계수질과 비교하도록 하고 있으나 고도의 기술과 경험을 지닌 엔지니어나 할 수 있다. 이와 같은 하수처리공정에서 발생하는 문제점을 극복하기 위해 선진국에서는 모델링과 같은 시스템을 도입하여 처리시설의 최적화를 달성하고 있다. 모델링을 통해 제어하게 되면 운영 중인 처리시설과 신설 처리시설의 다양하고 복잡한 운영조건 및 데이터를 수집·분석한 것을 토대로 시뮬레이션하여 최적의 운전효율을 달성할 수 있는 조건을 도출할 수 있는 장점이 있다. 특히 비용 절감 효과 및 운영의 안정성 확보 측면에서 현장에서 적용하기 위해 많은 노력을 하고 있다(Nasr et al., 2011). 그러나, 국내에서는 아직 공정상의 문제점에 대한 시스템의 분석능력 및 공정개선에 관한 예측기술과 운전효율 분석의 기초연구가 선진국과 비교하면 다소 미진한 상황이다.

본 연구에서는 국내 처리시설에 많이 적용되어 있는 A₂O의 운영 데이터를 A 처리장으로부터 확보하였다(Park, 2019). 이를 바탕으로 운영의 과학적인 분석을 위하여 통계기법중 하나인 일원분산분석(Aanalysis of variance(ANOVA))을 실시 하였으며, 또한, 운영상의 주요 영향인자를 동적(dynamic state), 정적(steady state)으로 모사할 수 있는 모델링 프로그램 GPS-X를 활용하여 최적 운영인자를 도출하여 하수처리 운영의 기초자료를 사용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상 처리시설 개요

연구대상의 공공하수처리시설은 대한민국 Y시에 위치하였으며, 대표적 고도처리공법인 A₂O공정으로 운전되고 있다. HRT(Hydraulic Retention Time, 수리학적 체류시간)는 6.5시간이었으며, SRT(Solid Retention Time, 고형물 체류시간)은

연평균 9.5일로 조사되었다. 그 외 구체적 운전정보를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Normal operation status of study plant

Treatment process		A ₂ O Process
Type of raw water		Municipal sewage
Processing capacity (m ³ /day)		280,000
Influent temperature, °C	Range	11.7-28.7
	Mean	20.3±5.1
DO, mg/L	Range	2.4-4.2
	Mean	3.0±0.5
SRT, d	Range	6.3-16.1
	Mean	9.5±1.8
HRT, hr	Range	5.9-7.1
	Mean	6.5±0.3
MLSS, mg/L	Range	3,400-6,460
	Mean	4,575±549
Influent BOD, mg/L	Range	53.8-250.2
	Mean	129.5±33.7
Influent COD, mg/L	Range	59.8-304.8
	Mean	144.8±34.8
Influent TN, mg/L	Range	8.2-48.9
	Mean	30.4±6.4
Influent NH ₄ +N, mg/L	Range	7.3-41.5
	Mean	24.3±5.6
C/N ratio	Range	1.8-10.7
	Mean	4.4±1.3

또한, 연구대상 처리시설의 처리계통도 및 시설제원을 Fig. 1에 나타내었으며, 총 2단계로 구성된 반응조는 혐기조 18.6%, 무산소조 23.3%, 호기조 58.1%의 부피비를 보이고 있다.

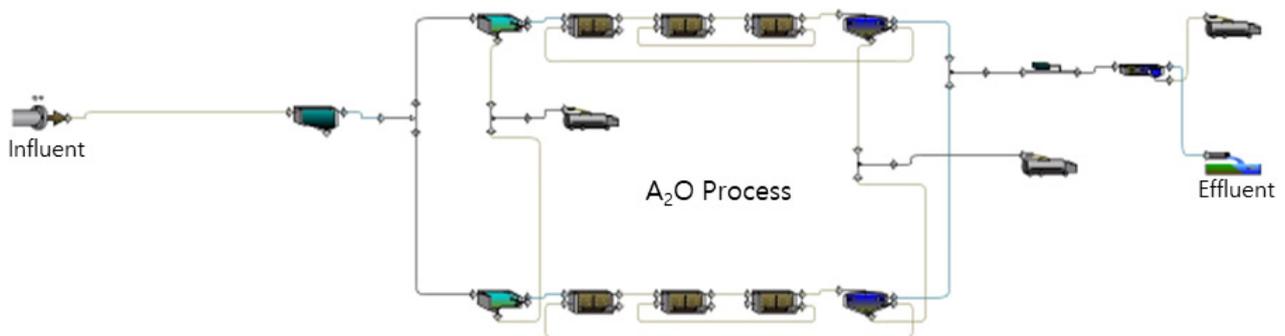


Fig. 1. Schematic layout of A₂O Process Simulation

2.2 통계분석을 이용한 분석

Analysis of variance(ANOVA)을 실시하여, 주요 공정인자가 방류수 수질에 영향을 주는지 검토하였다. 일반적인 운영 조건에서 운영인자가 방류수 수질에 미치는 영향평가를 위해 유입수질의 통계적 이상치($\text{mean} \pm 3\sigma$)를 평가하였다. 이상치의 수질이 유입했던 시기는 외부요인이 크게 작용한 것으로 판단하여 발생 기간을 제외하고 ANOVA test를 실시하였다. ANOVA 결과는, $p\text{-value} < 0.05$ 를 만족 할 경우 독립변수(공정인자)와 종속변수(방류수질)의 관계가 통계적으로 유의한 수준을 보인다고 해석 할 수 있다.

2.3 GPS-X를 이용한 모델링 및 시뮬레이션

본 연구에서는 GPS-X 7.0(hydromantis Co. Ltd, Canada)의 Carbon - Nitrogen - Phosphorus (CNP) library를 적용하여 모델을 구동하였다. 또한 Analyze mode를 이용하여 유출수의 BOD, COD, SS, T-N, T-P인자에 영향을 미치는 인자들을 도출하였다. 또한, 연구대상 처리시설의 처리계통도 및 시설제원을 Fig. 1에 나타내었으며, 총 2단계로 구성된 반응조는 혐기조 18.6%, 무산소조 23.3%, 호기조 58.1%의 부피비를 보이고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 운영자료 분석

연구대상 처리시설의 운영 데이터 중 유입수 및 방류수 주요 수질항목(BOD, COD, TN, $\text{NH}_4\text{-N}$) 측정 값을 Fig. 2에 나타냈으며, 이 자료를 바탕으로 기초 통계분석을 진행하였으며 Table 2에 나타내었다. 통계분석 결과, 본 연구에서 선정한 처리 시설의 운영 data가 정규분포 범위에서 벗어나지 않았다. 따라서, 수집한 운영자료를 모델 최적화를 위한 대상인자 값으로 적용하는 문제가 없는 것으로 판단된다. 분석기간 동안, A_2O 의 유입 C/N은 연평균 4.4로 조사되었으며, 하절기 평균 5.0, 동절기 평균 3.9로 나타났다. BOD와 COD는 계절에 따른 수질의 차이가 크게 나타나지 않았다. 반면, T-N 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 같은 질소 성분은 유입수온이 낮아질수록 제거효율도 낮아지는 현상을 보였다. 질산화 및 탈질미생물은 낮은 수온에서 활성도가 저감된다고 알려져 있는데[7] 유입수온이 낮은 동절기에 질소 성분의 제거효율이 떨어진 것으로 판단된다. 하수처리시설에서 질소 성분 제거에 미치는 주요 인자는 HRT, SRT, Temperature, DO 농도, pH range, C/N비 등이 있다(Scrinsae and Lester, 2002). C/N비는 autohydrogenotrophic bacteria의 성장뿐만 아니라 탈질률에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나로 알려져 있는데(Naugen et al., 2017), 본 실험결과에 따르면 C/N비가 높을수록 질소 성분 처리가 용이한 것으로 나타났다. 제거 효율에 주요 영향을 미치는 매개변수와 유출수 요인 사이의 다원변량분석결과는 Table 3에 나타내었으며, 유출수의 T-N 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 C/N과 통계적으로 유의한 수준(Significance level)이 도출되지 않았다($p\text{-value} : > 0.05$). 이는 공정에서 이미 질소 성분 항목제거를 위한 충분한 C/N비가 확보 되어있음을 의미한다. 반면, 유입 수온, HRT, SRT, DO 인자와는 유의수준 < 0.05 를 만족하였다. BOD항목은 모든 대상인자와 통계적 유의수준을 만족하고, COD항목은 HRT, SRT, DO인자와 통계적 유의수준을 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 질소 성분 제거는 유입 수온, HRT, SRT, DO인자에 영향받으며, BOD 항목의 경우 모든 운영인자, COD 항목은 HRT, SRT, DO 운영인자에 영향을 받는 것을 확인 할 수 있었다.

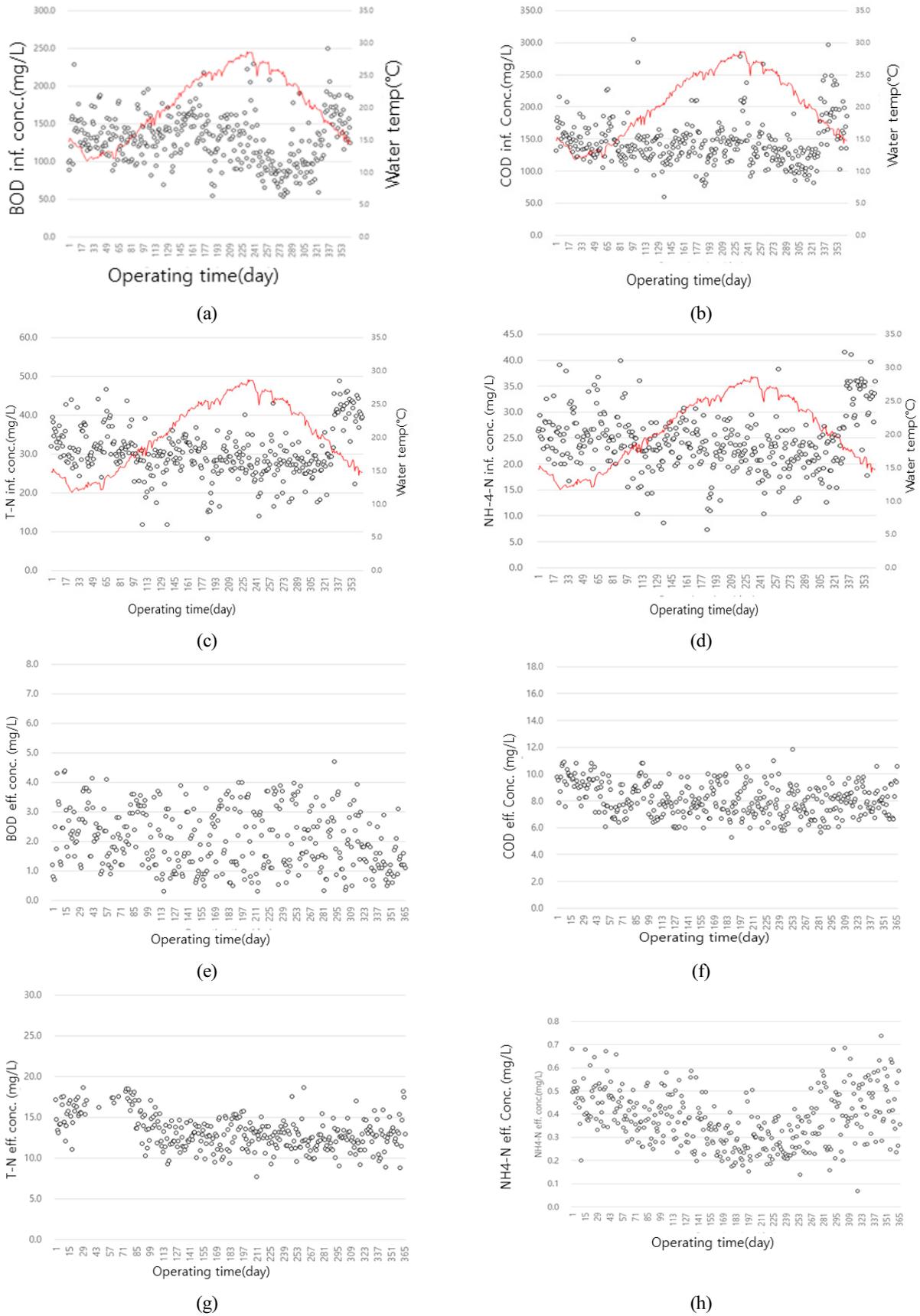


Fig. 2. Water quality of influent and effluent on A₂O process. Red line: water temperature; (a) Influent BOD; (b) Influent COD; (c) Influent T-N; (d) Influent NH₄⁺-N; (e) Effluent BOD; (f) Effluent COD; (g) Effluent T-N; (h) Effluent NH₄⁺-N

Table 2. Basic statistical analysis of influent and effluent on A₂O (W: Winter, Sp: Spring, Sm: Summer, F: Fall)

Parameter		Influent		Effluent	
		Range	Mean	Range	Mean
Q (m ³ /d)	W	146,417-191,043	173,365±10,377	-	-
	Sp	125,203-299,914	168,792±25,370	-	-
	Sm	165,077-597,163	280,702±94,249	-	-
	F	168,055-255,336	182,272±20,563	-	-
Temp. (°C)	W	9.8-13.2	11.4±0.8	-	-
	Sp	11.7-24.8	17.8±3.4	-	-
	Sm	23.0-27.1	26.1±0.9	-	-
	F	14.9-26.1	21.3±3.2	-	-
BOD (mg/L)	W	118.8-343.4	174.8±44.9	4.4-7.0	5.7±0.6
	Sp	118.5-255.8	185.1±16.2	6.0-9.5	7.0±0.9
	Sm	72.2-207.8	129.7±30.0	2.1-9.9	4.9±1.6
	F	117.9-248.3	174.4±28.5	2.6-6.0	3.6±0.7
COD (mg/L)	W	60.6-180.1	97.5±26.3	8.8-12.7	11.2±0.8
	Sp	77.8-139.2	105.3±11.1	10.3-14.7	12.7±1.1
	Sm	50.4-111.0	76.0±14.4	5.1-13.9	8.2±2.0
	F	68.5-151.3	99.1±16.8	7.3-11.3	9.1±0.9
T-N (mg/L)	W	88.0-336.7	135.3±50.4	3.7-8.2	6.0±1.2
	Sp	92.4-317.6	158.3±37.9	2.8-10.7	6.4±1.4
	Sm	66.5-204.0	134.1±35.8	1.3-9.5	4.2±2.0
	F	96.3-283.2	144.8±27.0	2.1-5.0	3.2±0.6
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	W	25.6-57.4	37.9±6.4	10.4-16.9	14.0±2.0
	Sp	31.0-50.5	40.4±4.2	6.9-16.6	12.8±2.6
	Sm	17.4-44.1	28.9±6.6	2.9-13.3	6.4±2.6
	F	27.6-47.0	32.7±4.5	4.2-10.1	6.7±1.5
T-P (mg/L)	W	19.4-48.7	28.2±5.3	0.5-0.9	0.7±0.1
	Sp	25.1-41.2	30.1±3.2	0.3-0.9	0.6±0.1
	Sm	14.2-38.2	22.2±5.6	0.1-0.6	0.3±0.1
	F	20.6-36.6	27.0±3.9	0.2-0.5	0.3±0.1

Table 3. Multi-way ANOVA analysis of parameter and effluent factor

Effluent factor	Intervening variable	p-value
BOD	Temp.	0.0049
	HRT	0.0141
	SRT	0.0015
	DO	0.0003
	C/N	0.0496
COD	Temp.	0.1274
	HRT	0.0002
	SRT	0.0059
	DO	0.0097
	C/N	0.7923

Table 3. Multi-way ANOVA analysis of parameter and effluent factor (Continued)

Effluent factor	Intervening variable	p-value
T-N	Temp.	0.0004
	HRT	0.0082
	SRT	0.0149
	DO	0.0208
	C/N	0.1939
NH ₄ ⁺ -N	Temp.	0.0019
	HRT	0.0004
	SRT	0.0072
	DO	0.0221
	C/N	0.1874

3.2 일원분산 분석

방류수질이 계절적으로 어떠한 영향을 받는지 파악하기 위해 방류 BOD, COD, SS, T-N, T-P항목을 계절을 독립변수로 하여 일원분산분석(ANOVA test)으로 분석하였다. 일원분산분석 결과는 Table 4와 같으며, 방류수질항목과 계절에 대한 분산분석결과 p-value < 0.05를 만족하여 모든 방류수질의 항목이 계절적인 영향을 받는 것이 확인하였다.

Table 4. One-way ANOVA analysis of parameter and effluent factor

Effluent quality	Source	DF	SS	MS	F value	P value
BOD	Treatment	3	412.5	121.2	130.7	<0.001
	Error	240	241.2	1.21		
COD	Treatment	3	584.3	201.6	109.1	<0.001
	Error	240	415.2	2.01		
T-N	Treatment	3	392.3	116.5	56.48	<0.001
	Error	240	481.6	2.16		
T-P	Treatment	3	2852	898.1	204.2	<0.001
	Error	240	974	4.6		

3.3 유입수 특성 분석

생물학적 고도처리방법으로 영양염류를 제거하기 위한 하수처리 공정의 설계시 하수의 유기물농도는 매우 중요한 고려 인자이다. 또한, 질소 및 인의 고효율처리를 위해서는 하수내 유기물 중 특히 생분해 가능한 유기물이 충분하게 존재하여야 하며, 이는 유기물의 성상 및 특성에 많은 영향을 미친다(Krist et al., 2004). 연구대상 처리장은 주로 가정하수가 유입되는 되며, 유입수의 특성을 파악하기 위하여 유입수의 유기물 성상을 파악 및 분석하여 공정 모델을 위한 기초 인자로서 사용하였다.

A₂O 공법으로 운영 중인 처리시설의 초침 유출수를 대상으로 계절별 유입하수 유기물 특성을 Table 5에 정리하였다. TCOD 대비 각각의 구성성분(Ss, Xs, SI, XI)별 분율은 계절별로 약간의 차이를 보이고 있으나, 구성비의 크기는 각각의 성분별로 큰 차이없이 비슷한 비율을 나타내고 있다.

Table 5. COD of influent on A₂O process

Parameter	A ₂ O				
	Sp	Sm	F	W	
TCOD, mg/L	204.1	156.7	184.2	181.5	
SS	Conc. mg/L	72.0	55.5	70.5	71.5
	SS / TCOD, %	35.6	34.1	35.7	36.7
XS	Conc. mg/L	48.2	34.1	52.8	42.8
	XS / TCOD, %	23.9	22.4	26.2	23.1
SI	Conc. mg/L	20.8	14.7	16.4	18.5
	SI / TCOD, %	9.8	9.7	8.1	9.7
XI	Conc. mg/L	59.3	49.6	53.5	49.8
	XI / TCOD, %	27.1	30.4	27.0	28.0
XBH	Conc. mg/L	6.7	3.7	4.1	3.9
	XBH / TCOD, %	3.3	2.3	2.2	2.1

3.4 GPS-X 시뮬레이션

Table 5와 Table 6의 결과에서 보았듯이 기존 운영자료 적용이 통계적으로 유의하기 때문에 최근 1년치 유입유량 및 유입 수질(BOD, COD, SS, T-N, T-P를 대상으로 최적의 운영조건을 찾기위해 GPS-X로 시뮬레이션을 수행하였다. 이와는 별개로, GPS-X의 layout은 기존 처리시설의 공정도와 같이 구성하였다(Fig. 1).

GPS-X에서 유출인자에 영향을 미치는 변수값들은 매우 다양하지만, 모든 인자를 대상으로 최적화를 진행할 경우, 최적화 진행에서 상당한 시간이 소요되고, 최적화의 정밀도가 떨어진다고 알려져 있다(Vanrolleghem, 2014). 따라서, 각 단계에서 목표로하는 유출인자에 주요 영향을 미치는 변수값들을 민감도 분석을 통해 도출하고, 주요 인자들을 대상으로 최적화를 진행하였다. 민감도 분석의 목적은 시뮬레이션의 전후 관계에서 시뮬레이션 모델의 출력 변수(종속 변수)의 민감도를 매개 변수(독립 변수)의 변경에 대해 결정 하였다(Hvala et al., 2002). 이는 모델의 동작에 대한 통찰력을 제공하고 모델에 가장 큰 영향을 미치는 매개 변수를 식별하는데 도움을 준다. 따라서, 최적화를 수행하기 위한 계산과정에서 신뢰성을 높이기 위해 민감도 대상 매개변수 및 범위를 최소화하여야 한다(Pereira, 2014). 이에 따라, 계절별 유입인자와 민감도 분석을 수행한 결과, 각 단계별로 방류수 수질에 영향을 미치는 인자를 도출하여 Table 6에 정리하였다. 또한, 계절별 최적값을 Table 7에 정리하였다.

Table 6. Model parameter of influent quality for unit process

Step	Parameter	Unit
Primary clarifier	Maximum settling velocity	m/d
	Heterotrophic yield	gCOD/gCOD
Anoxic	Phosphorus half saturation coefficient	mgP/L
	Heterotrophic decay rate	1/d
Aerobic	Heterotrophic maximum specific growth rate	1/d
	Autotrophic maximum specific growth rate	1/d
Secondary clarifier	Maximum settling velocity	m/d

Table 7. Variable of optimization for season

Parameter		Variable	Value
Sp	Primary clarifier	Maximum settling velocity	70.74
		Heterotrophic yield	0.26
	Anoxic	Phosphorus half saturation coefficient	3.81
		Heterotrophic decay rate	0.02
	Aerobic	Heterotrophic maximum specific growth rate	1.72
		Autotrophic maximum specific growth rate	3.63
Secondary clarifier	Maximum settling velocity	78	
Sm	Primary clarifier	Maximum settling velocity	82.98
		Heterotrophic yield	0.16
	Anoxic	Phosphorus half saturation coefficient	0.01
		Heterotrophic decay rate	0.01
	Aerobic	Heterotrophic maximum specific growth rate	1.8
		Autotrophic maximum specific growth rate	6.7
Secondary clarifier	Maximum settling velocity	50	
F	Primary clarifier	Maximum settling velocity	76.47
		Heterotrophic yield	0.19
	Anoxic	Phosphorus half saturation coefficient	0.01
		Heterotrophic decay rate	0.01
	Aerobic	Heterotrophic maximum specific growth rate	1.8
		Autotrophic maximum specific growth rate	4.01
Secondary clarifier	Maximum settling velocity	50	
W	Primary clarifier	Maximum settling velocity	98.74
		Heterotrophic yield	0.58
	Anoxic	Phosphorus half saturation coefficient	0.01
		Heterotrophic decay rate	0.01
	Aerobic	Heterotrophic maximum specific growth rate	1.8
		Autotrophic maximum specific growth rate	6.06
Secondary clarifier	Maximum settling velocity	49.99	

최적화 오차 평가결과, 여름철을 제외한 타 절기의 방류수질항목 실측값 대비 모의값의 오차(%error)는 10% 내외를 만족하여 모델이 최적화과정을 적절히 수행한 것으로 판단되며, 그결과를 Table 8에 정리하였다. 하지만, 여름철 모의 결과에서 14.4~16.2%의 오차를 보여 절기중 가장 큰 오차값을 나타냈으며, 이는 강우로 인해 발생한 유입수질부하의 급격한 변화를 적절히 반영하지 못한 한계로 판단된다.

최적화 대상 인자를 최소화 하면서 다른 영향 변수들을 고려하지 못하였기 때문에, 일부 방류수질항목에서 10%를 초과하는 오차가 발생한 것으로 판단된다. 하지만, 전체적인 경향은 실측치와 계산값이 유사한 것으로 나타나 GPS-X 프로그램을 활용한 주요 영향인자 도출이 타당하다고 판단되며, 이러한 자료를 기초로 하여 향후 하수처리시설의 공정 운영 예측 및 최적운영인자 설정에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 8. The error analysis of model optimization for season

Item	W		Sp		Sm		F	
	RMSE	Error	RMSE	Error	RMSE	Error	RMSE	Error
BOD	0.32	6.8	0.56	7.8	0.83	15.6	0.34	9.5
COD	0.72	6.7	0.77	8.4	1.05	16.2	0.95	10.5
SS	0.40	7.2	0.48	7.7	0.73	15.3	0.32	9.5
T-N	1.04	6.7	0.84	8.1	1.07	14.4	0.77	9.5
T-P	0.01	7.0	0.02	7.9	0.03	15.2	0.01	9.6

4. 결론

본 연구에서는 A₂O 공정으로 운영 중인 공공하수처리시설의 운영데이터 및 기초 문헌을 기반으로 하여 기초통계분석 및 상관성분석, 일원분산분석 등을 실시하였다. 이러한 통계기법을 활용하여 운영 중인 처리장의 처리성능을 과학적으로 평가할 수 있었다. 또한, GPS-X를 활용하여 주요 영향인자를 파악하였으며, 실제 운영데이터와 비교하여 모델링의 타당성을 검토하였다. 본 연구결과를 통해 A₂O공정이 적용된 하수처리장 운영의 적성성을 평가하고 처리장의 효율을 과학적으로 분석하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

1. A₂O 공정 운전자료(방류량 및 수질)를 절기별로 구분하여 통계 분석한 결과, 방류수질 항목은 계절적 영향을 크게 받는 것으로 평가되었다. 특히 봄철기간이 다른 절기에 비해 BOD, COD, SS, T-N, T-P 항목의 방류농도가 높은 것으로 확인되었다.
2. 계절에 따른 운영자료 분석결과, 여름철에 가장 높은 유입유량을 보였으며, 다른 계절보다 변동성이 큰 것으로 나타났다. 이는 강우 유입 또는 여름철 물사용량의 증가 영향으로 파악된다.
3. 상관분석결과 BOD항목은 모든 대상인자와 통계적 유의수준을 만족하고, COD항목은 HRT, SRT, DO인자와 통계적 유의수준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 질소성분은 유입 수온, HRT, SRT, DO인자에 영향 받는 것으로 나타났다.
4. GPS-X를 이용한 시뮬레이션에서 A₂O 공정에 주요 영향을 미치는 매개변수는 최대 침전 속도, 종속영양미생물 수율(무산소성), 인 반포화계수, 종속영양미생물 사멸율, 종속영양미생물 최대 성장률, 독립영양미생물 최대 성장률, 최대 침전 속도로 나타나 이러한 매개변수가 시뮬레이션에 주요 영향을 미치는 인자로 확인되었다.

References

- Ahn, S. J., Park, T. S., and Cho, J. H. (2010). Validity Evaluation of Wastewater Treatment System Applying Advanced Treatment Processes. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 11(10): 4055-4068.
- Chang, H. J. and Kim, S. D. (2019). The Study on the Non-Point Pollutant Reduction Using Friendly Bank Protection Anaerobic/Aerobic Contact Filtraion Zon. *J Korean Soc Disaster Secur*. 12(1): 23-34.
- Choi, L. K. and Chung, J. D. (2019). Analytical Evaluation of Influent Depending on the Occurrence of Rainfall by Case Study of Wastewater Treatment Facility. *J Korean Soc Disaster Secur*. 12(3): 35-49.
- Germany, K. V., van Loosdrecht, M. C. M., Henze, M., Lind, M., and Jørgensen, S. B. (2004). Activated Sludge Wastewater Treatment Plant Modeling and Simulation : State of the Art. *Environmental Modeling & Software*, 19(9): 763-783.
- Hvala, N., Vrecko, D., Burica, O., Strazar, M., and Levstek, M. (2002). Simulation Study Supporting Wastewater Treatment Plant Upgrading, *Water Science and Technology*. 46(4-5): 325-332.

- Isaka, K., Sumino, T., and Tsuneda, S. (2007). High Nitrogen Removal Performance at Moderately Low Temperature Utilizing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactions. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 103(5): 486-490.
- Jeon, E. C., Sa. J. H., Kim. S. T., Hong. J. H., and Kim. K. H. (2005). Odorous Emmision from Household-related Sources: A Case Study on a Sewage Treatment Plat. *J. KOASE*. 22(3): 337-351.
- MOE (2016). Korean Sewage Plant Development. No. 1. Sejong: Korea Environment Corporation.
- Nasr, M. S., Moustafa, M. A., Seif, H. A., and El Kobrosy, G. (2011). Modelling and Simulation of German BIOGEST/EL-AGAMY Wastewater Treatment Plants – Egypt Using GPS-X simulator. *Alexandria Engineering Journal*. 50(4): 351-357.
- National Sewage Treatment Information System. <https://www.hasudoinfo.or.kr> (accessed 2019.3.11).
- Nguyen, T. N. P., Chao, S. J., Chen, P. C., and Huang, C. (2017). Effects of C/N Ratio on Nitrate Removal and Floc Morphology of Autohydrogenotrophic Bacteria in a Nitrate-containing Wastewater Treatment Process. *Journal of Environmental Sciences*. 69: 52-60.
- Park, J. S. (2019). Optimization of Sewage Treatment Plant Using Modeling and Statistical Analysis (focus on A₂O process). PhD Thesis. Cheongju University.
- Pereira, S. F. (2014). Modelling of a Wastewater Treatment Plant Using GPS-X. Doctoral Dissertation. Faculdade de Ciências e Tecnologia. 24-29.
- Scrimshaw, M. D. and Lester, J. N. (2002). Fate and Behaviour of Endocrine Disrupters in Sludge Treatment and Disposal. *Endocrine Disrupters in Wastewater and Sludge Treatment*. 145-176.
- Vanrolleghem, P., Flores-Alsina, X., Guo, L., Solon, K., Ikumi, D., Batstone, D., and Jeppsson, U. (2014). Towards BSM2-GPS-X: A Plant-Wide Benchmark Simulation Model Not Only for Carbon and Nitrogen, but Also for Greenhouse Gases (G), Phosphorus (P), Sulphur (S) and Micropollutants (X), All within the Fence of WWTPs/WRRFs. In *Proceedings 4th IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar (WWTmod)*. 30-03.

Korean References Translated from the English

- 국가하수도정보시스템. 하수처리공법. <http://www.hasudoinfo.or.kr> (accessed 2019.3.11.).
- 박정수 (2019). 통계분석과 모델링을 이용한 하수처리장의 최적화 연구(A₂O공법을 중심으로). 박사학위논문. 청주대학교.
- 장형준, 김성덕 (2019). 혐기/호기 접촉여과대를 이용한 자연형 하천호안공법의 비점오염 저감 특성연구. *한국방재안전학회지*. 12(1): 23-24.
- 전의찬, 사재환, 김선태, 홍지형, 김기현 (2006). 생활악취 배출원의 악취 배출 특성 연구. 하수처리를 중심으로. *한국대기환경학회지*. 22(3): 337-351.
- 최량규, 정진도 (2019). 하수처리시설 사례별 강우발생 유무에 따른 유입수 분석평가. *한국방재안전학회지*. 12(3): 35-49.
- 환경부 (2016). 한국 하수처리시설의 발전. No. 1. 세종: 환경부.