

하수처리장의 고도처리 upgrading 설계와 공정 최적화를 위한 다변량 통계분석

김민정 · 김민한 · 김용수 · 유창규[†]

경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과/환경연구센터
446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지
(2010년 4월 21일 접수, 2010년 6월 2일 채택)

Design of a Wastewater Treatment Plant Upgrading to Advanced Nutrient Removal Treatment Using Modeling Methodology and Multivariate Statistical Analysis for Process Optimization

MinJeong Kim, MinHan Kim, YongSu Kim and ChangKyo Yoo[†]

Center for Environmental Studies, Dept. of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University,
1 Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-Si, Gyeonggi 446-701, Korea
(Received 21 April 2010; accepted 2 June 2010)

요 약

하수처리 시스템에서의 생물학적 영양염류 기준이 강화됨에 따라, 표준활성슬러지공법으로 운전 중인 하수처리장의 고도처리 공법으로의 개보수 필요성이 증가하고 있다. 그러나 실제 하수처리 시스템에서의 다양한 유입조건 및 운전 조건의 복잡한 반응 구성으로 인해 실험을 통하여 개보수된 고도처리공법의 최적조건을 찾는 것은 쉽지 않은 일이며, 이는 많은 시간과 비용을 소모하여 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 활성슬러지공정모델(ASMs)을 기반으로 한 하수처리장의 모델링 및 시뮬레이션 기법을 통하여 하수처리장의 고도처리공법으로의 upgrading 설계를 수행하며, 이를 통계적이며 체계적으로 접근하기 위해 반응표면분석법(Response surface method)을 통한 고도처리공법의 설계 최적화를 수행하였다. 또한 실규모 하수처리장에서의 운전 최적화를 위해서는 하수처리의 동력학적 매개변수에 대한 정확한 분석이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 다변량 통계분석 기법인 부분최소승자법(PLS)을 통하여 하수처리 시스템의 동력학적 매개변수 간의 상관관계를 파악하며, 고도처리공법 하수처리장의 운전 결과에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수를 도출하였다. 본 연구를 통해 하수처리장의 고도처리공법 upgrading 설계 및 운전 최적화를 위한 방법론을 제시하였으며, 이를 통하여 설계시간 및 경비 절감 등 고도처리공법으로의 고효율적인 개보수가 가능할 것으로 예상된다.

Abstract – Strengthening the regulation standard of biological nutrient in wastewater treatment plant(WWTP), the necessity of repair of WWTP which is operated in conventional activated sludge process to advanced nutrient removal treatment is increased. However, in full-scale wastewater treatment system, it is not easy to fine the optimized operational condition of the advanced nutrient removal treatment through experiment due to the complex response of various influent conditions and operational conditions. Therefore, in this study, an upgrading design of conventional activated sludge process to advanced nutrient removal process using the modeling and simulation method based on activated sludge model(ASMs) is executed. And a design optimization of advanced treatment process using the response surface method(RSM) is carried out for statistical and systematic approach. In addition, for the operational optimization of full-scale WWTP, a correct analysis about kinetic variables of wastewater treatment is necessary. In this study, through partial least square(PLS) analysis which is one of the multivariable statistical analysis methods, a correlation between the kinetic variables of wastewater treatment system is comprehended, and the most effective variables to the advanced treatment operation result is deducted. Through this study, the methodology for upgrading design and operational optimization of advanced treatment process is provided, and an efficient repair of WWTP to advanced treatment can be expected reducing the design time and costs.

Key words: Repair to Advanced Treatment Process, GPS-X Modeling, Activated Sludge Model(ASMs), Response Surface Method, Optimization of Advanced Treatment Process, PLS Analysis

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ckyoo@khu.ac.kr or ChangKyo.Yoo@biomath.ugent.be

1. 서 론

최근 도시화 및 인구 증가와 함께 생활수준의 향상으로 도시하수와 산업폐수의 발생량과 오염 부하량이 증가하고 있으며, 생물학적 영양염류인 질소와 인의 과도한 유입으로 수질이 악화되어 부영양화 현상을 초래하는 등 수질에 악영향을 미침에 따라 생물학적 영양염류에 대한 관리의 중요성이 증가하고 있다. 이에 정부는 1996년부터 총질소(T-N)와 총인(T-P)의 방류수 수질기준을 수질환경보전법에 명시하여 규제하기 시작하였고, 2008년부터는 전국 하수종말처리시설의 방류수 수질기준을 강화하여 적용하도록 하였다[1,2].

그러나 국내 다수의 하폐수처리장은 생물학적 산소요구량(biochemical oxygen demand, BOD)과 부유물질(suspended solid, SS) 제거에 주목적을 둔 표준활성슬러지공법으로 설계가 되었으므로, 최근 효과적인 질소 및 인의 제거를 위해 고도처리 공법으로의 개보수 필요성이 점차 증가하고 있다. 이러한 고도처리 공법으로의 개보수를 위해서는 기존 하수처리장의 운전 실태 등을 분석하고 고도처리공정의 처리 성능에 대한 사전 검증을 통하여 과학적이고 효과적인 개선이 될 수 있도록 추진되어야 하며, 생물학적 영양염류 제거의 최적화를 위한 최적의 운전조건을 제시하는 방법론 역시 연구되어야 한다.

고도처리공법의 적용을 위해서는 실험실 규모 및 파일럿 규모의 실험을 통하여 도입하고자 하는 공정의 적용 가능성 및 설계 인자를 도출하는 것이 가장 좋은 방법이나, 이는 많은 시간과 비용을 소모하여 비효율적이다. 또한 다양한 설계 및 운전 인자의 복잡한 반응 구성으로 인해 실험의 결과를 통한 실제 공정의 최적화는 매우 어렵다. 이에 따라 이러한 실험적 연구의 단점을 극복하고자 생물학적 공정의 수학적 모델을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 이러한 모델링 기법을 이용하여 하수처리장의 다양한 조건에서의 모델링 및 시뮬레이션의 적용이 증가되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션의 적용은 실험적인 연구에서의 불가피한 비효율성을 보완할 수 있을 뿐만 아니라, 실험적으로 구현이 힘든 조건에 대한 연구가 가능하기 때문에 하수처리시설에 대한 모델링 및 시뮬레이션 적용의 중요성은 점차 증가하고 있다[3-5].

한편 실규모 하수처리공정을 운전함에 있어 많은 양의 현장 데이터가 축적됨에 따라, 하수처리장의 운전 최적화를 위한 현장 데이터의 적절한 분석방법의 필요성이 증대되고 있다. 다변량 통계분석 기법(Multivariate statistical analysis)은 데이터 분석 및 공정 진단에 사용되는 유용한 방법으로써, 이를 통해 실규모 하수처리장의 다차원 변수 사이의 관계를 해석하고, 모델링에 대한 각 변수의 영향을 효과적으로 분석하여 하수처리 시스템의 모델링과 동력학에 대한 이해방법을 제시할 수 있다[6].

본 연구에서는 표준활성슬러지공법으로 운전중인 하수처리장을 고도처리공법으로 전환할 때, 수처리 모델을 기초로 하여 통계적이며 체계적인 접근을 위해 반응표면분석법(Response surface method)을 이용하여 최적의 설계 조건을 찾는 것을 목적으로 한다. 또한 다변량 통계분석 기법을 이용하여 실규모 하수처리장의 운전변수 간 상관관계를 설명하며, 이를 통한 하수처리장의 동력학에 대한 이해방법을 제시하고자 한다. 궁극적으로는 이를 통해 실규모 하수처리장 운전에 가장 영향력 있는 운전변수를 찾아내며, 이를 통해 효율성 높은 하수처리장의 최적 운전방법 제시하고자 한다. 이러한 연구를 통해 하폐수 처리공정의 안정성 증대, 운전 시간 및 경비의 절감 등

의 효과가 기대되며, 새로운 하수처리장 건설 및 고도처리로의 전환이 필요한 현 하수처리장 설계에 용이한 적용이 기대된다.

2. 연구이론

2-1. 모델링에 기초한 환경시스템공학의 개념도

Fig. 1은 본 연구의 기반기술인 환경모델링 및 분석, 환경 모델링에 바탕을 둔 환경관리시스템의 문제 해석의 개념도를 나타낸다. 환경모델링 기법은 환경시스템의 상황을 수학/통계/데이터 방법과 컴퓨터 등의 장치를 이용하여 가상적인 환경시스템을 만들어내는 것이다. 이 모델을 바탕으로 환경정보 해석, 예측, 환경제어 및 시스템 최적화가 가능케 된다. 이러한 환경모델링 방법을 통해 하수처리공정으로부터 포함된 많은 정보를 얻어낼 수 있다면 하수처리공정의 상태를 파악하고 고도처리공법으로 upgrading을 효율적으로 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 더 나아가 질소 및 인 제거 공정의 최적 운영을 도모할 수 있다.

2-2. 활성슬러지공정모델(Activated sludge model, ASMs)

생물학적 하수처리 공정에 대한 수학적 모델링은 1980년 이후 많은 연구자들에 의해 시도되었다. 하수처리 공정 내에서 일어나는 미생물 반응에 대한 수학적 모델은 이론적인 반응 속도식을 기반으로 여러 운전 변수에 대한 반응 결과를 제시해주며, 복잡한 실험과정을 거치지 않고도 하수처리 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 전산모사를 가능하게 한다[7].

이에 IAWQ(International Association on Water Quality)는 1982년 활성슬러지공정의 운전과 설계를 위한 Task Group을 만들었으며, 이 그룹은 활성슬러지공정에 대한 수학적 모델을 확립하였다. 현재 활성슬러지공정모델(Activated sludge model, ASMs)은 1, 2, 2d, 3까지 개발되었으며, ASM1과 3은 유기물과 생물학적 질소 제거에, ASM2와 2d는 생물학적 질소와 인 제거에 관여하는 모델이다. 이 활성슬러지 모델들은 유기물, 질소, 인 제거 모델링에 효과적이며 하수 처리 공정에서 최적 운전조건을 찾는 데 사용된다[8].

본 논문에는 모델링을 통한 고도처리공정 upgrading 설계가 목적이므로, 생물학적 질소와 인 제거를 포함하는 ASM2d를 기본모델

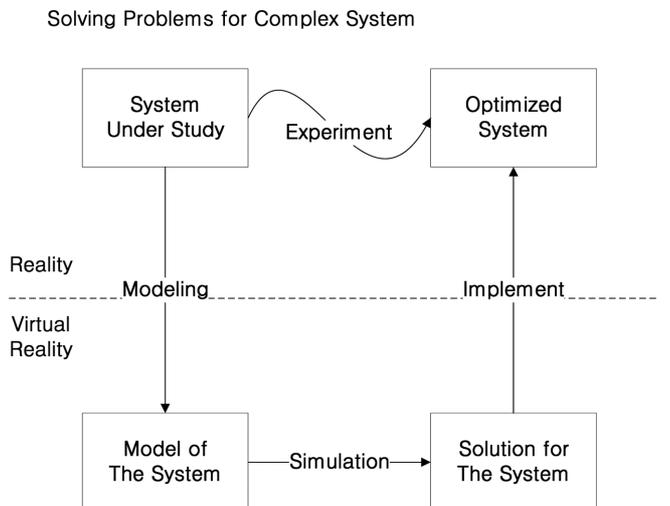


Fig. 1. Concept of environmental system engineering based on environmental modeling and process optimization.

Table 1. Matrix representation in ASM2d [7]

Component (i)→ ↓ Process (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	S _{O2}	S _P	S _A	S _{NH4}	S _{NO3}	S _{PO4}	S _i	S _{ALK}	S _{N2}	X _i	X _S	X _H	X _{PAO}	X _{PP}	X _{PHA}	X _{AUT}	X _{TSS}
1 Aerobic hydrolysis		1-f _{SI}		v _{i,NH4}		v _{i,PO4}	f _{SI}				-1						
2 Anoxic hydrolysis		1-f _{SI}		v _{i,NH4}		v _{i,PO4}	f _{SI}				-1						
3 Anaerobic hydrolysis		1-f _{SI}		v _{i,NH4}		v _{i,PO4}	f _{SI}				-1						
4 Aerobic growth on S _P	1-(1/Y _H)	1/Y _H										1					
5 Aerobic growth on S _A	1-(1/Y _H)		1/Y _H									1					
6 Anoxic growth on S _P	1-(1/Y _H)	1/Y _H							(1-Y _H)/286Y _H			1					
7 Anoxic growth on S _A			1/Y _H						(1-Y _H)/286Y _H			1					
8 Fermentation		-1	1														
9 Lysis										f _{Xi}	1-	-1					
10 Storage of X _{PHA}			-1			Y _{PO4}										1	
11 Aerobic storage of X _{PP}	-Y _{PHA}					-1								1	-Y _{PHA}		
12 Anoxic storage of X _{PP}					v _{12,NO3}	-1			v _{12,NO3}					1	-Y _{PHA}		
13 Aerobic growth of X _{PAO}	v _{β, O2}					-i _{PBM}							1		-1/Y _H		
14 Anoxic growth of X _{PAO}					v _{14,NO3}	-i _{PBM}			v _{14,NO3}				1		-1/Y _H		
15 Lysis of X _{PAO}										f _{Xi}	1-		-1				
16 Lysis of X _{PP}															-1		
17 Lysis of X _{PHA}			1													-1	
18 Aerobic growth of X _{AUT} (4.57-Y _A)/Y _A				v _{β, NH4}	1/Y _A	-i _{PBM}											1
19 Lysis of autotrophs				v _{β, NH4}		v _{β, PO4}				f _{Xi}	1-						-1
20 Precipitation						-1		v _{20, ALK}									1.42
21 Re-dissolution						1		v _{21, ALK}									-1.42

로 사용하였다. ASM2d는 활성슬러지 시스템 내의 화학적 산소 요구량(chemical oxygen demand, COD), 질소, 인 제거의 생물학적 공정에 대한 수학적 모델이며, 이 모델의 가장 큰 특징은 무산소 조건하에서도 인을 과량으로 섭취할 수 있는 DPAOs(denitrifying phosphorus accumulating organism)의 반응을 활성슬러지 모델에 도입하였다는 것이다. 또한 COD로만 표시되었던 입자성 유기물질과 활성슬러지의 농도 정량방법에 총 부유물질(total suspended solid, TSS)과 무기물질(mineral)을 포함시킴으로써, COD로는 확인할 수 없는 활성슬러지 내의 다인산염(poly-phosphate)의 영향을 파악할 수 있게 되었다. ASM2d는 9가지의 수용성 성분과 10가지의 입자성 성분과 독립영양생물, 종속영양생물의 성장과 사멸, 가수분해 등 21개의 공정을 포함하며, 각 공정과 성분의 관계를 효과적으로 나타내기 위하여 Table 1과 같이 행렬의 형태로 표현하였다. 또한 ASM2d의 반응식은 가수분해, 통성 종속영양미생물 반응, 인 축적 미생물(PAO) 반응, 미생물의 소멸, 화학침전 반응의 5가지로 정의된다[9,10].

2-3. 반응표면분석법(Response surface methodology)

반응표면분석법은 여러 개의 독립변수(process variables) X가 복합적인 작용을 하여 어떤 반응변수(response variable) Y에 영향을 주고 있을 때 두 변수간의 상관관계를 찾아내는 통계적인 분석방법이다. 이 방법은 다중변수 간의 상관관계를 파악하기 위해 수행되는 실험의 수를 줄임으로써 다른 접근법에 비해 시간 절약적이며, 또한 복잡한 공정의 최적화에 가장 효과적인 방법으로 고려된다[11].

일반적으로 반응표면분석법을 통해 반응변수를 최적화시키는 공정변수 또는 운전조건을 추정하게 된다. 공정변수의 변화에 따라 반응변수는 어떠한 반응표면(response surface)을 갖게 되며, 이 변수간의 반응을 아래의 식과 같이 설명된다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \tag{1}$$

본 식에서 y는 반응변수를, x는 독립변수를, f는 반응변수와 독립변수 간의 반응함수를, ε는 오차를 의미한다. 대부분의 경우, X와 Y의 관계식은 2차 회귀모형으로 표현되며, 이 회귀식에서 β₀는 절편을 β_i, β_{ii}, β_{ij}는 각각의 회귀계수를 의미한다[11].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{2}$$

이와 같이 회귀 모델식이 선정되면, 이를 통하여 매개변수의 다양한 조건에서 결과를 예측할 수 있으며, 여기서 얻어진 2차 회귀 모델식을 통하여 각 반응변수에 대한 선형관계를 분석하여 도출할 수 있다[12].

2-4. Partial least square (PLS)

PLS는 독립변수(X)와 종속변수(Y) 간의 상관관계를 분석하는 다변량 통계기법이다. PLS의 장점은 다차원인 독립변수와 종속변수의 차원 축소이며, 이는 두 변수 사이의 공분산 행렬을 최대화 할 수 있는 새로운 공간에 각 변수를 사영 시킴으로써 가능하게 된다[13].

일반적으로 새로운 공간 내에서 독립변수와 종속변수는 식 (3), (4)와 같다.

$$X = TP^T + E = \sum_{i=1}^m t_i p_i^T + E \tag{3}$$

$$Y = UQ^T + F = \sum_{i=1}^m u_i q_i^T + F \tag{4}$$

본 식에서 P와 Q는 각 변수간의 상관성을 설명하는 loading vector이며, T와 U는 score matrix를 의미한다. m은 새로운 공간 내에서 축소된 차원의 개수를, E와 F는 잔차를 나타낸다. PLS의 공간 내에서 변수 X는 아래의 식과 같이 표현될 수 있으며, B는 새로운 공간

상에서 독립변수와 종속변수 사이의 내부 유사성을 나타내는 행렬이다 [14].

$$X = TBQ^T \tag{5}$$

3. 연구방법

모델링 기법을 이용하여 하수처리장의 고도처리공법으로의 upgrading을 수행하고, 다변량 통계분석을 통해 운전 최적조건을 제시하기까지의 연구 순서는 Fig. 2와 같다. 첫 번째 단계로 본 연구의 대상이 되는 공정을 선택하여 본 대상에 대한 기본자료를 수집한 후, 고도처리공법의 설계 기준 및 수리학적 계산에 따라 공정의 반응조 부피 및 그 외의 물리학적 특성을 결정한다. 이 1차 설계를 바탕으로 대상 하수처리장의 모델링 및 시뮬레이션을 수행하며, 설계 기준을 만족시키기 위하여 운전조건 최적화 과정을 거쳐 최적인 운전조건을 도출한다. 마지막으로, 이와 같은 순서로 설계된 최적 하수처리장의 동력학적 매개변수 간의 상관관계를 도출하며 하수처리장 운전 최적화를 위한 변수를 규명하기 위하여 PLS 분석을 통한 다변량 통계분석을 수행한다. 본 연구에서는 하수처리장 모델링 프로그램으로 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPS-X(Hydromantis Inc, Canada)를 이용하여 하수처리공정의 운전을 모사하였다.

3-1. 대상공정 선정 및 데이터 수집

본 연구는 경기도 S시에 위치한 하수처리장을 대상으로 하였다. 이 하수처리장은 생물학적 영양염류 제거공법으로 운전되는 제1, 제2 처리장으로 구성되어 있으며, 하루 평균 하수처리량은 42만 m³이다. 현재 제 1처리장은 고도처리공법 적용을 위해 공사 중에 있

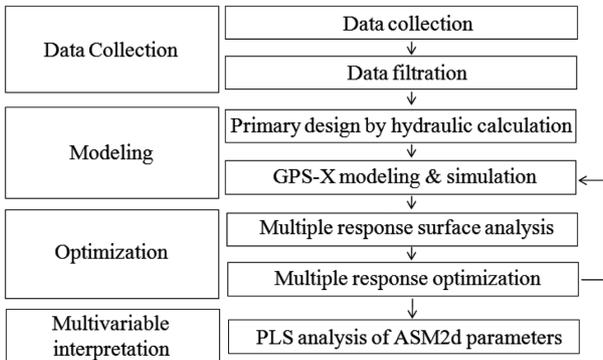


Fig. 2. The procedure of upgrading design for advanced nutrient removal treatment and process optimization.

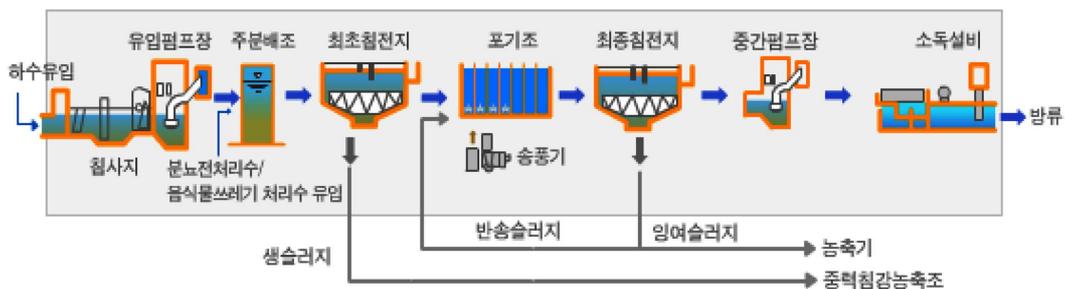


Fig. 3. Wastewater treatment process of a DNR WWTP in S-city.

Table 2. Physical conditions of a WWTP in S-City

Operation	Capacity	Unit
Grit chamber	765	m ³
First clarifier	30,240	m ³
Aeration	121,968	m ³
Second clarifier	83,520	m ³
Waste sludge	150	m ³ /day

Table 3. Influent and effluent conditions of a WWTP in S-City

	Influent	Effluent
BOD ₅	142	7.3
TSS	120	12.7
T-N	39.3	12.91
T-P	4.3	0.96

으므로, 본 연구에서는 아직 고도처리공법이 적용되지 않은 제 2처리장을 대상 공정으로 선택하였다. 본 대상공정의 수처리 계통도는 Fig. 3과 같으며, 하수처리장의 물리학적 조건 및 평균유입, 유출수 기준은 Table 2,3과 같다.

3-2. 고도처리공법 1차 설계 및 GPS-X 프로그램을 통한 하수처리장 모델링

본 연구에 적용될 공법으로써 질소와 인 제거를 주목적으로 하는 생물학적 고도처리의 대표 공정인 A₂O 공법을 선정하였다. 본 공법은 Badenpho, UCT공법 등 여러 고도처리공법의 근간일 뿐만 아니라, 현재 가장 널리 적용되는 고도처리공법이므로 본 연구에 대상공법으로 적용되었다. A₂O 공정은 혐기성조, 무산소조, 호기성조로 구성되며, 질산성 질소를 제거하기 위한 내부반송과 침전지의 외부반송으로 구성되어 있다. 혐기성조에서는 미생물 내의 인이 용해성 인으로 용출되며, 이 용출된 다량의 인은 호기성조에서의 과다인섭취(luxury uptake) 현상을 통해 제거된다. 또한 무산소조에서는 호기성조에서 질산화를 통해 생성된 질산성 질소를 탈질함으로써 총 질소의 40~70%를 제거하게 된다. A₂O공법은 기존의 하수처리장을 고도처리공정으로 변경할 때 적용이 용이하다는 장점이 있는 반면, 하수처리 시 외부 탄소원을 주입하여야 하며 수온이 저하하는 겨울철에는 질소와 인의 제거 효율이 다소 저하된다는 단점이 있다[15,16].

3-2-1. 수리학적 계산에 근거한 고도처리공법 1차 설계

1차 설계는 모델링에 필요한 공정의 운전조건 및 설계인자를 설정하는 것으로, 이는 하수처리장 설계 및 모델링에 관한 선행연구를 바탕으로 수행되었다. 고도처리공법은 온도의 영향을 크게 받

며, 특히 겨울철에는 낮은 온도의 영향으로 인해 미생물의 활동 및 생물학적 영양염류의 제거효율이 저하된다. 따라서 본 연구에서는 겨울철을 설계기준으로 하였으며, 이는 미생물의 활동이 저하된 극한 시기에도 유출수 수질기준을 달성할 수 있는 설계조건을 제시하기 위함이다. 실제 S시 하수처리장의 유입수, 유출수 기준(Table 3)을 바탕으로 1차 설계를 수행하였다. 각 반응조의 부피는 수리학적 체류시간(HRT)과 슬러지 체류시간(SRT)에 따라 정해졌으며, 호기조 내의 미생물의 농도(MLSS)는 3,000 mg/L로 유지하였다[17].

슬러지의 내외부 반송률, 폐슬러지 유량 등의 하수처리장 설계특성은 각 반응조 내의 BOD, TSS, T-N, T-P의 물질수지(mass balance)에 기초한 수리학적 모델식을 통해 도출되었다. 고도처리공정의 반응조는 완전혼합 반응조(Continuous stirred-tank reactor, CSTR)로 가정되며, 이러한 완전혼합 반응조 내의 물질수지는 식 (2), (3)과 같다.

$$[\text{축적량}] = [\text{유입량}] - [\text{유출량}] \pm [\text{반응에 의한 양}] \quad (2)$$

$$\frac{dC_{A1}}{dt}V = C_{A0}Q - C_{A1}Q - kC_{A1}V \quad (3)$$

이 식에서 C_{A0} 는 유입되는 물질의 농도를, C_{A1} 은 반응조 내의 물질 농도를, kC_{A1} 은 반응속도상수를 의미한다.

예를 들어, A_2O 공법의 내부반송 비율은 호기성조와 침전지 내의 T-N 물질수지(kg/d)에 의해 계산된다. 호기성조 내의 T-N 농도는 아래의 식과 같으며, 이 때 반응에 의해 감소하는 질소는 $Org-N, NH_4^+-N, NO_3^-N$ 이다.

$$[\text{TN in 호기성조}] = [\text{TN in 유입수}] - [\text{TN in 유출수}] \pm [\text{반응에 의한 TN 변화량}] \quad (4)$$

A_2O 공법에서 호기성조 내의 질소는 내부반송을 따라 무산소조로 이동된다. 따라서 호기성조 내의 질소 총량과 내부반송 슬러지 내의 질소 총량은 동일하며, 이는 식 (5)로 다시 정리될 수 있다.

$$[\text{TN in 호기성조}] = [C_{TN} \cdot Q_{\text{내부반송}}] \quad (5)$$

이 식에서 C_{TN} 은 내부반송 슬러지 내의 질소 농도를, $Q_{\text{내부반송}}$ 은 내부반송 유량을 의미한다. A_2O 공법에서 내부반송 슬러지 내 질소의 농도와 호기성조의 질소농도는 유출수의 질소농도와 동일할데, 이는 이차 침전지에서 질소의 농도를 변화시킬만한 반응이 일어나지 않기 때문이다. 따라서 식 (5)의 C_{TN} 에 방류수의 질소농도를 대입하면 T-N의 물질수지에 의해 내부반송 유량이 계산된다. 내부반송 유량 외 하수처리장의 설계특성 역시 이러한 물질수지에 기초한 수리

학적 모델식에 의해 계산될 수 있다[17,18].

3-2-2. GPS-X를 이용한 고도처리공법 모델링 및 시뮬레이션

본 연구에서는 하수처리장 모델링 프로그램으로써 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPS-X(Hydromantis, Canada)를 이용하였다. GPS-X는 생활하수 및 산업폐수 처리장을 모델링 및 시뮬레이션 할 수 있는 공정모사 프로그램으로써, 이는 하수처리장의 공정을 정적(steady-state) 및 동적(dynamic) 상태로 모사할 수 있는 프로그램인 동시에, 플랜트를 운전하고 설계하는데 기본이 되는 유입조건, 활성슬러지 특성 등 많은 parameter를 이해하는 가장 강력한 도구이다[19]. GPS-X는 활성슬러지공정모델(Activated sludge model, ASM)을 바탕으로 형성되었으며, 모델링에서의 반응은 크게 용존성 물질과 입자성 물질에 대한 반응으로 구분된다. 또한 모델링에는 가수분해, 중속영양미생물, 독립영양미생물, 인 축적미생물 등과 관련된 반응들이 포함되어 있다. GPS-X를 이용하면 유기물 산화, 질산화, 탈질화 같은 복잡한 시스템을 pilot plant의 설치 없이 운전할 수 있으며, 이를 통해 막대한 시간과 비용을 절감할 수 있다[20].

GPS-X 프로그램을 이용하여 A_2O 공법의 layout을 Fig. 4와 같이 설정하고, 수리학적 계산에 의한 고도처리공법 1차 설계인자에 따라 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다. 본 과정 중 각 반응조(혐기성조, 무산소조, 호기성조)는 생물학적 질소와 인 제거를 위한 ASM2d 모델을 사용하였다. 이러한 조건으로 모델링 된 A_2O 공법을 시뮬레이션 하여 본 연구대상의 유출 수질에 대한 결과를 도출하였다.

3-3. A_2O 공법 하수처리장의 운전조건 및 설계인자 최적화

위 과정을 통해 설계된 고도처리공법 하수처리장의 설계 및 운전 최적화를 위하여 반응표면분석법(Response Surface method, RSM)을 통한 최적의 운전조건 및 설계인자 도출을 수행하였다. 이는 A_2O (Anaerobic/Anoxic/Oxic) 공법 내의 TSS, BOD_5 , T-N, T-P의 제거 효율을 최대화시키는 것을 목적으로 하기 때문에, 설정된 영향변수(X)는 호기성조, 혐기성조, 무산소조 부피, 내부반송 유량, 외부반송 유량, 폐기 슬러지량, 침전지 면적의 7개 하수처리장 설계인자 및 운전조건이며, 반응변수(Y)는 GPS-X 시뮬레이션에 의해 도출된 4개의 유출 수질 지표이다.

반응표면분석을 위해 설계인자의 1차 설계값을 100%로 하였을 때, Table 4와 같이 1차 설계인자를 60~140% 범위 내에서 변화시켰으며, 이 설계인자의 시뮬레이션을 통해 운전 최적화를 위한 모델식을 산출하였다. 이때, 영향변수(X)와 반응변수(Y) 사이의 관계는 식 (1)과 같이 2차식 형태의 회귀식으로 표현되며, 이 회귀식에 의해 반응변수의 목표값을 만족시키는 최적의 영향변수를 예측하였다. 이 최적화 단계를 통해 방류수 수질기준 달성 및 수질개선을 위

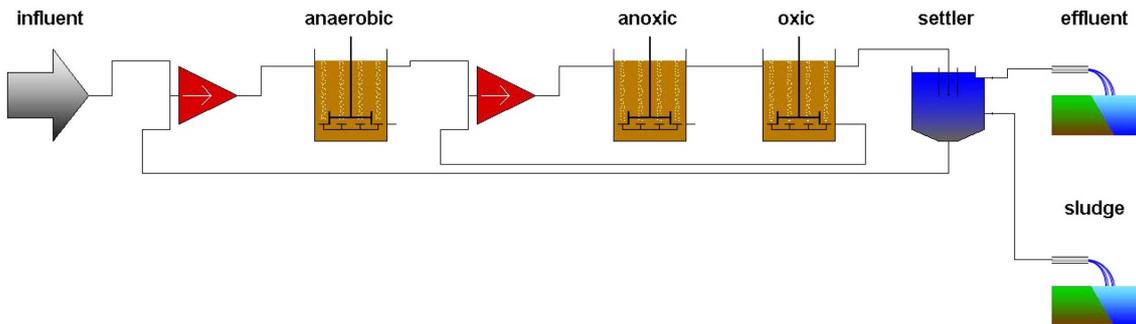


Fig. 4. Layout of A_2O process for advanced nutrient removal.

Table 4. Experimental ranges of independent variables (X) for response surface method (RSM)

Independent variables	Range and level			Unit
	60%	100%	140%	
Anaerobic (X ₁)	18,750	31,250	43,750	m ³
Anoxic (X ₂)	22,500	37,500	52,500	m ³
Aerobic (X ₃)	90,000	150,000	210,000	m ³
Settler surface (X ₄)	6,000	10,000	14,000	m ²
Waste sludge (X ₅)	7,764	12,940	18,116	m ³ /day
Recycle (X ₆)	54,000	90,000	126,000	m ³ /day
Internal (X ₇)	240,000	400,000	560,000	m ³ /day

한 하수처리장의 최적 설계인자 및 운전조건을 도출하였다.

또한 최적화 된 하수처리장의 공정성능을 기존의 하수처리장과 비교·평가하기 위해 EQI(Effluent quality index) 지표를 이용하였다. EQI는 유출 오염물질들의 부하를 하나의 단일 지표로 정량화한 것으로, 이를 통해 유출수의 상태를 한눈에 파악하고 비교할 수 있다는 장점이 있다. EQI는 식 (6)과 같이 나타내며, 하점자 e는 유출수를 나타낸다.

$$EQI = (\beta_{TSS} \cdot TSS_e + \beta_{COD} \cdot COD_e + \beta_{BOD} \cdot BOD_e + \beta_{TN} \cdot TN_e) \times Q_e \quad (6)$$

이 식에서 TSS는 반응조 내의 총 부유물질을, COD는 화학적 산소 요구량을, BOD는 생물학적 산소 요구량을, TN은 총 질소의 양을 나타내며, 각 성상 별 유출 성분의 가중치인 β 값은 $\beta_{TSS}=2$, $\beta_{COD}=1$, $\beta_{BOD}=2$, $\beta_{TN}=20$ 으로 적용되었다(Vanrolleghem and Gillot, 2002)[7].

3.4. PLS를 통한 ASM2d 모델 동력학적 매개변수의 다변량 통계분석

생물학적 질소와 인을 제거하는 모델인 ASM2d는 36개의 동력학적 매개변수로 구성되어 있으며, 이는 하수처리장 내 중속영양미생물의 반응, 독립영양미생물 반응, 인 축적 미생물(PAO)의 반응, 가수분해 등을 설명한다. 본 단계에서는 다변량 통계분석 방법 중 하나인 PLS를 이용하여 하수처리장 내 동력학적 매개변수의 변화에 따른 유출수 성상의 변화를 살펴보고, 이를 통해 ASM2d 변수 간의 상관관계 및 운전 최적화를 위한 매개변수를 도출하였다. PLS

분석을 위한 영향변수(X)로는 ASM2d 모델의 동력학적 매개변수가, 반응변수(Y)로는 GPS-X 시뮬레이션이 의해 도출된 4개의 유출수 성상이 이용되었다.

PLS 분석을 위해 Monte-Carlo simulation method에 따라 무작위적인 50개의 영향변수 조건을 만들었다. Monte-Carlo simulation method는 반복되는 무작위 표본 추출에 의해 다양한 실험조건을 설계하는 통계 기반의 컴퓨터 알고리즘이다. 이는 무작위적인 수 조합의 반복적 계산에 의존하므로, 이 방법은 확정적 알고리즘을 통한 정확한 결과의 계산이 불가능한 경우에 주로 이용되며, 유입변수의 불확실도가 높은 모델링 현상을 설명하는데도 널리 이용된다[21]. PLS 분석은 공학용 소프트웨어인 Matlab을 통하여 수행되었으며, 분석에 이용된 영향변수(X)는 Table 5에 정리하였다.

4. 결 과

본 연구는 표준화슬러지공법의 하수처리장을 고도처리공법인 A₂O공정으로 upgrading 설계하는 것을 목적으로 수행되었으며, Fig. 4는 동력학적 모델링 프로그램인 GPS-X를 통해 공정모사된 A₂O의 layout이다.

A₂O공법 하수처리장의 1차 설계인자 및 운전조건은 고도처리공법의 설계기준과 수리학적 계산을 바탕으로 설정되었다. 1차 설계값과 그에 대한 시뮬레이션 결과는 각각 Table 6과 7로 나타났다.

Table 5. Stoichiometric and kinetic variables of ASM2d

Variables	Definition	Variables	Definition
μ_H	Heterotrophic maximum specific growth rate	k_{NO}	Nitrate half saturation coefficient
b_H	Lysis and decay rate constant	k_{NH}	Ammonium half saturation coefficient
η_{NOs_HET}	Denitrification reduction factor	k_{PO_4}	Phosphate half saturation coefficient
k_f	Fermentable substrate half saturation coefficient	k_{alk}	Alkalinity half saturation coefficient
k_{f_HET}	Volatile fatty acids half saturation coefficient	μ_{aut}	Autotrophic maximum specific growth rate
q_{PHA}	Rate constant for storage of PHA	b_{aut}	Autotrophic decay rate
q_{PP}	Rate constant for storage of poly-P	k_{oa}	Oxygen half saturation coefficient for autotrophs
μ_{PAO}	Maximum specific growth rate of poly-P accumulating biomass	k_{NHa}	Ammonium half saturation coefficient for autotrophs
b_{PAO}	Poly-P accumulating biomass lysis rate	k_{alka}	Alkalinity half saturation coefficient for autotrophs
b_{PP}	Poly-P lysis rate	k_H	Hydrolysis rate
b_{PAO}	PHA lysis rate	η_{NOs_hydrol}	Anoxic hydrolysis reduction factor
η_{NOs_PAO}	Reduction factor for anoxic activity	η_{fe}	Anaerobic hydrolysis reduction factor
k_{f_PAO}	Volatile fatty acids for saturation coefficient	k_X	Slowly biodegradable substrate half saturation coefficient for hydrolysis
k_{ps}	Phosphorus half saturation coefficient for storage of poly-P	q_{fe}	Fermentation maximum rate
k_{pp}	Poly-phosphate half saturation coefficient for storage of PHA	k_{fe}	Fermentable substrate half saturation coefficient
k_{ipp}	Inhibition coefficient for poly-P storage	k_{pre}	Phosphorus precipitation with metal hydroxides rate
k_{PHA}	PHA half saturation coefficient	k_{red}	Redissolution of phosphates rate constant
k_O	Oxygen half saturation coefficient	k_{alk_pre}	Alkalinity half saturation coefficient for phosphates redissolution

Table 6. Primary design of operational condition and a capacity of A₂O process

	Anaerobic	Aerobic	Anoxic
SRT(day)	19.5	19.5	-
HRT(Hr)	4	12	2.5
Volume(m ³)	50,000	150,000	31,250
	Waste sludge	Recycle sludge	Internal sludge
Capacity(m ³ /day)	13,000	0.36Q	1.6Q

Table 7. Simulation results using a primary design

	Standard (Regulation)	Primary result
TSS	15	12.01
BOD5	10	7.7
T-N	20	9.1
T-P	2	5.5

시뮬레이션 결과를 살펴보면 A₂O공법의 TSS, BOD₅, Total-N(총 질소)은 유출수 수질기준을 만족하였으나, Total-P(총 인)의 경우 유출수의 농도가 5.5 mg/L로 수질기준인 2 mg/L를 초과하였다.

따라서 A₂O공법 하수처리장의 유출수 수질기준 달성 및 운전효율의 최적화를 위한 설계인자 및 운전조건의 보정이 필요하며, 이를 위해 반응표면분석법을 수행하였다. 반응표면분석법은 1차 설계값의 60~140% 내의 범위에서 수행되었으며, 하수처리장의 운전 최적화를 위한 유출수의 목표 수질기준은 국내 법적 규제치를 고려하여 TSS = 10, BOD = 7, TN = 10, TP=1로 설정하였다.

반응표면분석의 결과, 7개의 영향변수(X)와 4개의 반응변수(Y) 사이의 관계는 식 (7)과 같이 2차식 형태의 회귀식으로 도출되었다. 이 회귀식을 통한 A₂O공법 하수처리장의 최적 설계인자 및 운전조건은 Fig. 5와 Table 8로 나타냈다.

$$\begin{aligned}
 \text{TSS} = & 61.73 - \text{Anaerobic} \times 0.73 \times E^{-10} + \text{Anoxic} \times 1.37 \times E^{-6} \\
 & + \text{Oxic} \times 0.013 \times E^{-10} + \dots - \text{Anaerobic}^2 \times 2.91 \times E^{-11} - \text{Anoxic}^2 \\
 & \times 0.37 \times E^{-10} + \text{Oxic}^2 \times 0.61 \times E^{-9} + \dots + \text{Anaerobic} \times \text{Anoxic} \\
 & \times 0.0082 - \text{Anaerobic} \times \text{Oxic} \times 3.47 \times E^{-10} + \dots - \text{Surface} \\
 & \times \text{Internal} \times 0.0008 \quad (7)
 \end{aligned}$$

Fig. 5는 통계 소프트웨어인 Minitab(Minitab Inc., USA)을 사용하

Table 8. Optimized operational conditions and a capacity of A₂O process

	Anaerobic	Aerobic	Anoxic
SRT(day)	27	27	-
HRT(Hr)	4.2	11.5	3
Volume(m ³)	52,500	138,300	43,800
	Waste sludge	Recycle sludge	Internal sludge
Capacity(m ³ /day)	7,800	0.22Q	0.96Q

여 반응표면분석법을 수행하였을 때의 결과로서, 이는 영향변수의 설계 가능한 범위를 설정한 후 목표에 달성할 수 있는 설계조건을 찾는 방법을 나타낸 것이다. 예를 들어 호기조의 경우, 설계 가능한 호기성조 부피의 범위는 90,000 m³~210,000 m³이며 유출수의 목표 달성을 위한 최적의 부피는 138,300 m³이다.

A₂O공법 하수처리장의 최적화된 설계결과를 1차 설계와 비교했을 때, 반응조 중 무산소조와 혐기성조의 수리학적 체류시간(Hydraulic retention time, HRT)은 증가하며 이에 따라 두 반응조의 부피 역시 증가하였다. 혐기성조에서는 인의 제거 기작인 luxury uptake를 통해 제거되는 과량의 인이 용출되며, 무산소조에서는 탈질화를 통해 하수처리장 내의 질소가 제거되므로, 이 두 반응조의 부피 증가는 생물학적 영양염류의 제거 효율 증가에 직접적인 영향을 미칠 것으로 사려된다. 반면 호기성조는 전체적인 부피가 약 8% 감소되었으며, 폐슬러지 양, 내·외부 반송비율 등의 전반적인 하수처리장 특성 역시 1차 설계보다 감소하였다.

최적화된 A₂O공법 하수처리장의 처리 효율 및 성능을 평가하기 위하여 반응표면분석법의 최적화 결과를 이용한 GPS-X 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통한 시뮬레이션의 결과는 Table 9에 정리하였으며, 개선된 하수처리장의 효율 비교를 위해 방류수 수질기준,

Table 9. Comparison of simulation results based on an optimized design and an existing design

	Optimized design	Standard (limitation)	Existing design (S-city)	Primary design
TSS	10.5	15	12.7	12.01
BOD5	5.99	10	7.3	7.7
T-N	3.27	20	12.91	9.1
T-P	0.81	2	0.96	5.5

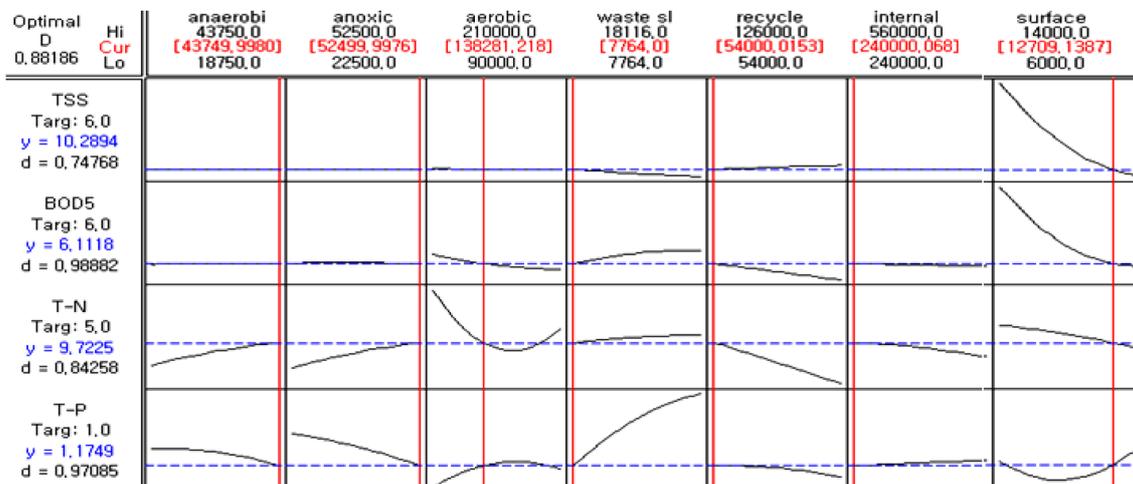


Fig. 5. Optimization of operational conditions and a design factor of A₂O process based on response surface method (RSM).

현재 S시 하수처리장의 유출수 수질, 1차 설계 시뮬레이션의 유출수 수질과 비교하였다. 운전 최적화를 통한 A₂O공법은 모든 항목에서 방류수 수질기준을 만족시켰으며, 표준활성슬러지공법의 S시 하수처리장에 비해 전반적으로 수질이 개선되었다. 인은 약 16% 정도 처리효율이 개선되었으며, 특히 질소의 경우에는 약 75% 처리효율이 증가하였다.

기존의 하수처리장과 고도처리공법으로 upgrading 설계한 하수처리장의 처리능력 및 효율을 정량적으로 비교하기 위해 EQI를 계산하였다. EQI는 유출 오염물질들의 부하를 단일 지표로 정량화한 것으로서, 이 값이 낮을수록 오염물질에 의한 하수처리장의 부하가 낮으며 효율적인 공법임을 의미한다. EQI 값의 비교 결과, 고도처리공법을 적용한 경우의 EQI는 21,438 kg/d로 EQI가 61,786 kg/d인 기존의 하수처리장에 비해 유출수의 오염물질 부하가 낮으며 처리효율이 개선된 것으로 나타났다.

하수처리장의 운전 최적화를 위해서는 하수처리장의 동력학적 매개변수와 유출수 간의 상관관계 파악 및 운전 최적화를 위한 매개변수의 규명이 수행 되어야 한다. 이는 다변량 통계분석 기법인 PLS를 통해 수행되었으며, X변수로는 ASM2d 모델의 동력학적 매개변수가, Y변수로는 GPS-X 시뮬레이션이 의해 도출된 4개의 유출수

성상과 EQI가 이용되었다. PLS 결과 하수처리장의 동력학적 매개변수는 15개의 주성분(Latent variable)으로 축약되었으며, 이 주성분은 X와 Y변수에 대해 각각 70.3과 83.6의 variance cumulative를 나타내었다. 이는 36차원인 동력학적 매개변수가 하수처리장 전체의 반응을 설명할 수 있는 15차원의 변수로 축약되며, 이 주성분은 전체 X와 Y변수의 거동의 약 70%와 84%를 설명할 수 있음을 의미한다.

PLS 분석의 지표로 이용되는 loading plot과 VIP(variance important project)는 Fig. 6(a)와 (b)에 각각 명시되었다. loading plot은 영양변수(X)와 반응변수(Y) 사이의 상관성을 나타내는 그래프로서, 근접한 위치에 있는 변수일수록 상관성이 높음을 의미한다. 영양변수의 경우, 중속영양미생물의 성장속도를 나타내는 μ_{aut} 를 제외한 대부분의 변수가 그래프의 중앙부에 밀집 되어 각각에 대한 상관성을 나타냈다. 또한 전반적으로는 BOD가 다른 유출수 성상에 비해 동력학적 매개변수와 밀접한 관계를 가지며, 이를 통해 BOD는 다른 유출수 성상에 비해 매개변수의 영향을 많이 받음을 유추할 수 있다.

VIP는 반응변수에 대한 영양변수의 기여도를 정량적으로 표현한 그래프로서, 그 값이 높을수록 반응변수에 대한 영향력이 높음을 의미한다. 36개의 ASM2d 동력학적 매개변수 중 κ_{pp} , q_{pp} , κ_{PHA} 의 VIP 값이 가장 높았으며, κ_{pp} 는 PHA 저장을 위한 poly-phosphate의 포화 계수를, q_{pp} 는 poly-P 저장을 위한 속도를, κ_{PHA} 는 PHA의 포화 계수를 의미한다. 이 변수는 모두 하수처리장 내의 인과 관련된 매개변수이며, 다른 변수에 비해 하수처리장의 유출수에 대한 영향력이 높다는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 하수처리장의 동력학적 매커니즘 중 인과 관련된 이 세 변수를 보정함으로써 A₂O공법의 효율적인 인 제거 모델링이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 생물학적 영양염류의 효율적인 제거를 위해 현재 표준활성슬러지공법으로 운전 중인 하수처리장의 고도처리공법으로의 upgrading 설계를 수행하였으며, 하수처리장의 운전 최적화를 위해 반응표면분석법과 PLS분석의 통계적인 기법을 이용하였다. A₂O공법을 적용했을 때, 인은 약 16%, 질소는 75%의 제거효율 증가를 보였으며, 이를 통해 본 연구에서 이용한 A₂O공법은 생물학적 영양염류 제거에 효과적이며 적용 가능성이 매우 큰 공법임을 알 수 있었다. 또한 다변량 통계분석을 통하여 하수처리장의 운전 최적화를 위한 동력학적 매개변수를 규명할 수 있었으며, 이 변수의 통제를 통하여 하수처리장의 전반적인 운전효율의 향상이 기대된다. 이러한 연구를 통하여 하폐수 처리공정의 안정성 증대, 운전 시간 및 경비의 절감 등의 효과가 기대되며, 새로운 하수처리장의 건설 및 고도처리로의 전환이 필요한 현 시점에 하수처리장의 생물학적 질소와 인 제거를 위한 고도처리 upgrading 설계 표준화에 대한 방법을 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

감 사

본 연구는 2010년 한국연구재단 일반연구과제(KRF-2009-0076129)와 서울시정개발연구원의 산학협력과제(CS070160)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

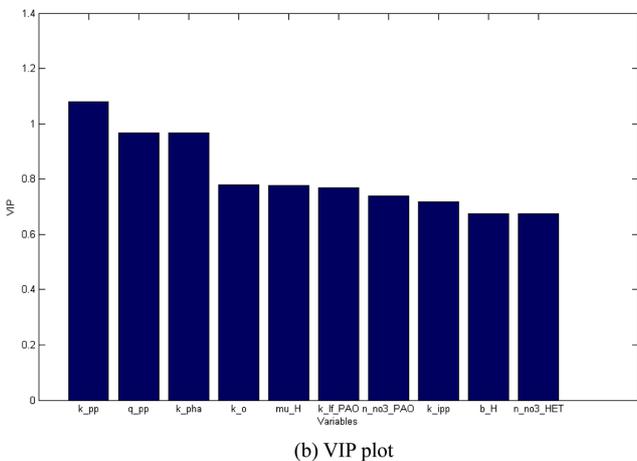
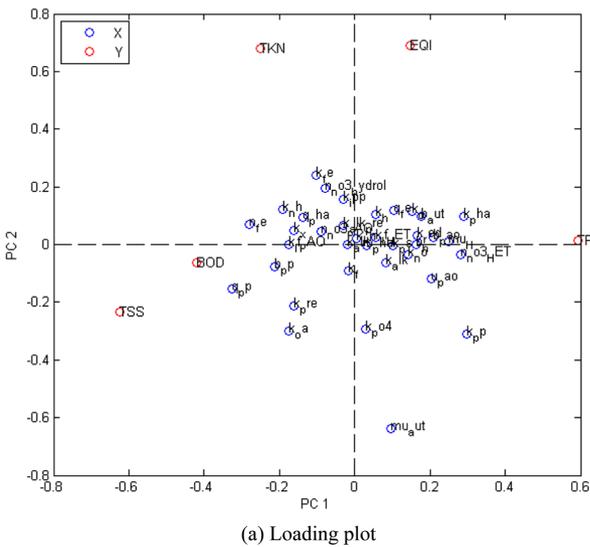


Fig. 6. PLS analysis of kinetic variables of A₂O process (a) loading plot, and (b) VIP plot.

참고문헌

1. Heo, H. S., "Optimization of Advanced Sewage Treatment process Treating High Fraction of Non Degradable Material," Ph. D. thesis, the Univ. of Seoul, Korea(2006).
2. Jin, H. J., "A Study on the Optimum Design of Petrochemical Wastewater Treatment Process Using a GPS-X Model," Ph. D. thesis, Chonnam national Univ., Korea(2007).
3. Lee, J. M., "A Study on Converting a Existing Activated Sludge Plant into Biological Nutrient Removal Plant Using a Computer Model," Ph. D. thesis, Kyung-gee Univ., Korea(2007).
4. No, Y. K., "A study on Optimization of Intermittently Aerated Contact Oxidation Process by Simulation," Ph. D. thesis, the Univ. of Seoul, Korea(2006).
5. Rho, H. Y. and Gil, K. I., "Modeling of Existing BNR Process using ASM3 and Modified Bio-P Module," *J. Korean Society on Water Quality*, **23**(3), 309-313(2007).
6. Park, J. M. and Lee, H. W., "The Monitoring of Biological Wastewater Treatment Plant Using Multivariate Statistical Analysis," *DICER Tech. Info Part 1*, **3**(10), 193-202(2004).
7. Kim, M. H. and Yoo, C. K., "Design and Environmental/Economic Performance Evaluation of Wastewater Treatment Plants Using Modeling Methodology," *Korean Chem. Eng. Red. (HWAHAK KONGHAK)*, **46**(3), 610-618 (2008).
8. Mogens, H., Willi, G., Takashi, M. and Mark, L., Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3., *IWA Publishing in its Scientific and Technical Report series*(2000).
9. Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M., Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, *IWA Scientific and Technical report No.9*, IWA, UK(1999).
10. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. C., Marais, G. v. R. and Loosdrecht, M. C. M., "Activated Sludge Model No. 2d," *Wat. Sci. Technol.*, **39**(1), 165-182(1999).
11. Kim, M. H., Rao, A. S. and Yoo, C. K., "Dual Optimization Strategy for N and P Removal in a Biological Wastewater Treatment Plant," *Ind. Eng. Chem. Res.* **48**(13) 6363-6371(2009).
12. Sung, S. Y., "Comparison of A Weight of Desirability Function for Multiresponse Optimization," Ph. D. thesis, Ewha womans Univ., Korea(2003).
13. Yamamoto, T., Shimameguri, A., Ogawa, M., Hashimoto, I. and Kano, M., "Application of Statistical Process Monitoring with External Analysis to an Industrial Monomer Plant," *IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*, 405-410(2004).
14. Rosen, C., "A Chemometric Approach to Process Monitoring and Control with Applications to Wastewater Treatment Operation," Ph. D. thesis, Lund Univ., Sweden(2001).
15. Lee, S. W., "The Environmental Engineer for Water Quality," SeongAn-dang(2006).
16. Park, S. H., "The Application of Media to Enhance Phosphorus Removal Efficiency in A₂O Process of Wastewater Treatment Plant," Ph. D. thesis, Kyungnam national Univ., Korea(2008).
17. Reynolds, T. D. and Richards, P. A., "Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 2nd Edition," BS:PWS publishing company(1996).
18. Syed, R. Q., "Wastewater Treatment Plants(Planning, Design, and Operation), 2nd Edition," University of Texas at Arlington (1998).
19. Hydromantis, Inc., GPS-X Tutorial Guide, Hydromantis(2004).
20. Lee, C. H., "Determination of the Optimal Design Parameters of Advanced Wastewater Treatment Process with Acid Fermentation using GPS-X Model," Ph. D. thesis, the Univ. of Hanyang, Korea(2006).
21. Kurt, B., "The Monte Carlo Method in Condensed Matter Physics," Springer, New York(1995).