

## 모델링 기법을 이용한 하수처리 공정 설계와 환경성 및 경제성 평가

김민한 · 유창규<sup>†</sup>

경희대학교 환경응용화학대학 그린에너지센터/환경연구센터  
446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1  
(2008년 2월 21일 접수, 2008년 4월 7일 채택)

### Design and Environmental/Economic Performance Evaluation of Wastewater Treatment Plants Using Modeling Methodology

MinHan Kim and ChangKyo Yoo<sup>†</sup>

College of Environmental and Applied Chemistry, Green Energy Center/Center for Environmental Studies, Kyung Hee University, Seocheon-dong 1, Giheung-gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do 446-701, Korea  
(Received 21 February 2008; accepted 7 April 2008)

#### 요 약

실제 하수 처리 시스템에서 유입조건, 공법, 다양한 운전조건과 복잡한 인자에 대하여 실험을 통하여 많은 처리공법을 비교하고 각 공정별 최적조건을 찾는 것은 쉽지 않은 일이며, 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 하수 처리 시스템의 주요 생물학적 하수처리 공정인 A<sub>2</sub>O(혐기/무산소/호기), Bardenpho(4단계), VIP(Virginia Initiative Plant), UCT(University of Cape Town) 공정의 활성오니공정모델을 이용한 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 공법별 환경성과 경제성 평가의 비교 분석을 수행하였다. 이를 위해 다양한 하수처리 공정의 처리 효율을 비교하고 새로운 지표로 나타낼 수 있는 환경성 평가 기준과 동시에 비용 산출을 고려한 평가 지표를 제시하였다. 제시된 지표를 바탕으로 통해 각 공정 최적화와 유입조건에 따른 고도처리공정의 공법 선정에 유용하게 쓰일 수 있음을 보였다. 또한 유입 유량과 호기조 부피의 변화에 따른 경제성과 환경성 지표의 변화를 파악하고, 나아가 다양한 운전 조건하에서의 최적 지표를 예측할 수 있었다.

**Abstract** – It is not easy to compare the treatment processes and find an optimum operating condition by the experiments due to influent conditions, treatment processes, various operational conditions and complex factors in real wastewater treatment system and also need a lot of time and costs. In this paper, the activated sludge models are applied to four principal biological wastewater treatment processes, A<sub>2</sub>O(anaerobic/anoxic/oxic process), Bardenpho(4 steps), VIP(Virginia Initiative Plant) and UCT(University of Cape Town), and are used to compare their environmental and economic assessment for four key processes. In order to evaluate each processes, a new assessment index which can compare the efficiency of treatment performances in various processes is proposed, which considers both environmental and economic cost. It shows that the proposed index can be used to select the optimum processes among the candidate treatment processes as well as to find the optimum condition in each process. And it can find the change of economic and environmental index under the changes of influent flowrate and aerobic reaction size and predict the optimum index under various operation conditions.

Key words: Activated Sludge Models(ASMs), Modeling Methodology, Process Design, Optimization, Environmental Performance, Economic Performance

#### 1. 서 론

최근 도시화 및 인구 증가와 함께 생활수준의 향상으로 도시하수와 산업폐수의 발생량과 오염 부하량이 증가되고 그 특성이 다양해지고 있다. 특히 질소와 인 등의 오염물질이 하천 유입으로 하천 수질이 악화되어 향후 용수원 확보에 큰 어려움을 겪을 것으로 예상

되고, 수질 관리의 중요성이 커지고 있다. 이에 정부는 1996년부터 질소와 인의 방류수 수질기준을 수질환경보전법에 명시하여 규제하기 시작하였고, 그 기준을 강화하도록 하였다. 이렇게 점차적으로 강화되는 규제에 맞춰 BOD, SS 제거에 주목적을 둔 표준 활성슬러지공정으로 건설된 하수 처리장은 질소 및 인을 제어할 수 있는 고도처리 공정으로 개보수 되어야 할 필요가 있었고, 고도처리시설의 처리 효율이 보다 높고, 그에 따라 미치는 영향을 정확하게 분석하기 위해 많은 연구가 진행되었다[1-2].

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: ckyoo@khu.ac.kr

특히 하수 처리 공정에서의 제어 전략을 평가할 때에는 모델 기반 시뮬레이션을 수행하는 것이 한 방법이 될 수 있다. IWA (International Water Association) 산하 Task Group과 European COST action 682와 624는 표준 실험 방법론을 제시하였고, 시뮬레이션 벤치마크(Simulation benchmark)라 불렀다[3]. Benchmark는 시뮬레이션 모델, 플랜트 레이아웃, 실제 유입 부하량과 실험 프로토콜을 정의 내리는 독립적 시뮬레이션 절차이다[4].

Activated sludge model (ASM) 모델은 IWA에서 1980년대 초반부터 제시한 방법으로 하수처리 모델링과 분석을 통하여 활성 오니 공정의 디자인과 운전을 위한 수학적 모델들을 제시하였다. ASM 모델은 하수처리 공정 내에서 일어나는 미생물 반응에 대한 수학적 모델은 이론적인 반응 속도식을 바탕으로 하여 여러 운전 변수에 대한 반응 결과를 제시해 주며, 복잡한 실험 과정을 거치지 않고도 하수처리 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 전산모사를 가능케 한다. 이러한 ASM 모델을 이용한 하수 처리 공정의 모델링, 제어, 최적화는 최근 고도처리를 위한 질소와 인 제거에 대해 많이 응용되고 있다[5-8].

하수 처리 시스템에서 생물학적 고도처리 공법을 이용하여 오염물질의 제거 효율을 평가하고 최적의 운전조건을 도출하기 위한 연구는 오래전부터 수행되었다. 기존의 하수 처리 시스템에서의 연구는 실험실 규모의 실험과 이를 바탕으로 한 파일럿 플랜트 운전을 통해서 이루어졌으나, 이와 같은 과정은 비용이나 시간적인 면에서 많은 문제점을 일으킨다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 대안으로 모델링 기법을 이용하여 다양한 조건에서 모사한 분석 및 모델링이 필요하다. 특히 모델링 기법을 사용한 시뮬레이션 방법은 이러한 문제점을 극복하고 경제적으로 제거 효율을 평가할 수 있는 하나의 좋은 대안이다[6]. 또한 국내에 현재 이러한 경제성과 환경성을 동시에 고려하는 예코지표가 없기 때문에, 다음과 목표를 제시하고자 본 연구를 수행하였다.

공정별 효율 비교로 새로운 지표로 나타낼 수 있는 환경성 평가 기준 제시

- 우리나라의 비용 산출을 고려한 경제성 평가 지표 제시
- 경제성과 환경성을 동시에 고려하는 물환경 지표 제시
- 새로운 처리장 건설의 최적 공법 선택 기준 개발
- 기존공정의 질소인 처리 고도처리로의 전환시 최적 운전조건과 retrofitting기법 개발

따라서 본 연구에서는, 하수처리 시스템의 질소와 인 제거를 위한 주요 하수처리 공정인 A<sub>2</sub>O, Bardenpho(4단계), VIP(Virginia Initiative Plant), UCT(University of Cape Town) 공정의 모델링을 수행하고, 각 모델을 바탕으로 각 공정별 처리효율과 환경성 및 경제성 평가의 비교 분석을 실시하였다.

## 2. 활성오니공정모델(Activated sludge models, ASMs)

생물학적 하수처리 공정에 대한 수학적 모델링은 1980년대 이후 많은 연구자들에 의해 시도되었다. 하수처리 공정 내에서 일어나는 미생물 반응에 대한 수학적 모델은 이론적인 반응속도식을 바탕으로 하여 여러 운전 변수에 대한 반응 결과를 제시해주며, 복잡한 실험 과정을 거치지 않고도 하수처리 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 전산모사를 가능하게 한다. 따라서 IAWQ(International Association in Water Quality) 산하 Task Group에서 1983년 이후 현

재까지 활성슬러지 공정에 대한 수학적 모델식을 정리하여 활성슬러지 모델(Activated sludge model, ASM) No. 1, 2, 2d, 3를 개발하였다[6]. 이후 ASM 모델을 이용한 생물학적 하수처리공정의 설계와 운전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 활성슬러지 모델은 유기물, 질소, 인 제거의 모델링에 효과적이고 모델링 기반 처리장 최적화는 하수 처리 공정에서 질소와 인 제거에 대해 최적 운전 조건을 찾는 데 사용 되어 왔다[5,9].

### 2-1. Activated sludge model no.1 (ASM1)

1987년 IAWQ 산하 Task Group에서 유기물 제거, 질산화, 탈질 등에 관여하는 활성슬러지의 모델들을 검토하고, 간단하고 사실적으로 반응을 예측할 수 있는 모델인 ASM1을 발표하였다. ASM1은 단일 미생물군으로 사용한 부유성장 미생물 공정에 대해 광범위한 적용이 가능한 것으로 알려지고 있으며 지금까지 알려진 여러 모델 가운데 실제 공정을 모사함에 있어서 가장 정확하고 응용성이 큰 것으로 알려져 있다. ASM1은 독립영양미생물과 종속영양미생물의 성장과 사멸, 가수분해 등 8개의 공정과 4종류의 유기물질과 질소성 물질 등의 13개의 성분으로 이루어져 있으며, 효과적으로 모델을 표현하기 위해서 Petersen 행렬을 사용하였고 각 반응은 식 (1)의 물질수지식에 기인한다[5].

$$\text{Accumulation} = \text{Input} + \text{Output} \pm \text{Reaction} \quad (1)$$

각 성분의 생성과 소멸에 대한 물질수지식은 Table 1로 나타낸 Petersen 행렬을 통해 쉽게 얻을 수 있고, Table 1의 각 성분은 행 성분(i), 공정은 열 성분(j)으로 표시되었고, 각 반응에 관련된 반응 속도식은 Monod 식의 형태로 표현되었다. 유입항과 유출항은 물질 전달과 시스템의 물리적 특성에 관련된 항이며, 반응 항은 Table 1에서 제시한 반응 속도식과 각 성분의 양론계수의 곱을 합한 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$r_i = \sum_j v_{ij} p_j \quad (2)$$

예를 들어, 용존산소 S<sub>o</sub>에 대한 반응식은 식 (3)과 같으며, 연속 반응기에서의 물질수지식은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$R_{S_o} = \frac{1-Y}{Y} \frac{\mu S_S}{K_S + S_S} X_B - b X_B Z \quad (3)$$

$$V \frac{dS_o}{dt} = QS_{O,input} - QS_{O,output} + VR_{S_o} \quad (4)$$

### 2-2. Activated sludge model no.3 (ASM3)

IAWQ에서는 1999년 ASM1의 단점을 보완하고자 ASM3를 개발하였다. ASM1과 ASM3의 가장 큰 차이점은 ASM3에서는 활성슬러지 공정 내 종속영양 변환에서 생성되는 폴리머 축적의 중요성을 인식하고 있다는 점이다. ASM3에서의 호기성 축적 과정은 빠르게 생분해되는 물질(S<sub>p</sub>)이 세포 내부 구성요소(X<sub>STO</sub>)로 축적되며, 미생물을 축적된 기질로 사용하여 성장한다[9]. 또한 ASM3에서는 사멸-재생 개념을 내생호흡 개념으로 대체하였다. 내생호흡에 관련된 속도상수는 회분실험으로 간단히 구할 수 있다. 마지막으로 ASM3에서는 호기 조건과 무산소 조건에서의 미생물 사멸반응을 구분하는데, ASM1에서는 미생물의 사멸, 재생 반응이 서로 연관되어 있는 반면, ASM3에서는 두 미생물(X<sub>A</sub>, X<sub>B</sub>)의 전환반응이 분리되어

Table 1. Petersen Matrix of ASM1 [5]

Component ① → ↓Process ①	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Process rate( $\rho_i$ )
	$S_I$	$S_S$	$X_I$	$X_S$	$X_{BH}$	$X_{BA}$	$X_p$	$S_O$	$S_{NO}$	$S_{NH}$	$S_{ND}$	$X_{ND}$	$S_{ALK}$	
1 Aerobic growth of heterotrophic biomass	$-\frac{1}{Y_H}$				1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$				$\mu_{maxH} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH}$
2 Anoxic growth of heterotrophic biomass	$-\frac{1}{Y_H}$				1					$-i_{XB}$				$\eta_g \mu_{maxH} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{K_{OH}}{K_{NO} + S_{NO}} \frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86 Y_H} \frac{i_{XB}}{14} X_{BH}$
3 Aerobic growth of autotrophic biomass						1		$-\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$				$\frac{2}{14 Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{maxA} \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{OA} + S_O} X_{BA}$
4 Decay of heterotrophic biomass			$1-f_p$	$-1$			$f_p$							$i_{XB} f_n i_{XB}$
5 Decay of autotrophic biomass			$1-f_p$	$-1$			$f_p$							$i_{XB} f_n i_{XB}$
6 Ammonification of soluble organic nitrogen										1	$-1$		$\frac{1}{14}$	$k_a S_{ND} X_{BH}$
7 Hydrolysis of slowly biodegradable substrate	1		$-1$											$k_h \frac{X_S/X_{BH}}{K_X + X_S/X_{BH}} X_{BH}$
8 hydrolysis of organic nitrogen												1	$-1$	$\rho_7 (X_{ND}/X_S)$

있고, 또한 ASM3에서는 가수분해 반응보다는 여러 연구자들에 의해 관찰된 유기물질의 저장 반응을 보다 중요시하였다[5].

### 2-3. Activated sludge model no.2d (ASM2d)

도시하수로부터 질소 및 인의 제거를 위한 생물학적 고도처리 기술은 이들 물질이 수중 생태계의 파괴현상인 부영양화의 주원인이 밝혀진 이후 이에 대한 다각적인 연구가 진행되어 왔다[5]. 이에 따라 IAWQ는 생물학적 질소 및 인 제거 공정을 모사할 수 있는 모델의 개발이 요구됨에 따라 Activated sludge model no.2(ASM2)를 개발하였고, 이후 여러 연구자들에 의해서 무산소 조건하에서도 인을 과량 섭취할 수 있는 DPAOs(denitrifying phosphorus accumulating organisms)의 존재가 확인됨에 따라 이러한 반응을 활성오니공정 모델에 도입하여 ASM2의 확장모델인 ASM2d가 개발되었다. ASM2d는 18개의 성분(용해성 성분과 입자성 성분)으로 나누어지며, 각 공정과 성분의 관계를 효과적으로 나타내기 위하여 Table 2와 같이 행렬의 형태로 표현하였다[10]. 본 논문에서는 모델링을 통한 고도처리공정들의 비교가 목적이므로 질소와 인을 포함하는 ASM2d를 기본모델로 사용하였다.

## 3. 연구방법

모델링 기법을 이용하여 하수처리 공정의 성능을 최적화 하고, 환경성 및 경제성 평가기준을 제시하기까지 이르는 연구 순서는 Fig. 1과 같다. 첫째, 공정을 선정한다. 연구의 목적에 맞는 비교 분석이 가능한 공정들을 선택하게 된다. 둘째, 설계 기준에 따라 공정별 반응조의 부피와 사이즈를 결정한다. 셋째, 모사 프로그램을 통하여 공정별 layout을 만들고, 각각의 운전조건을 설정한다. 넷째, 1차 설

계에 대하여 시뮬레이션을 하고, 다섯째, 설계 기준을 만족시키기 위하여 운전최적화 과정을 거쳐 최적운전조건을 도출한다. 여섯째, 각 공정의 성능을 평가하기 위하여 환경성 및 경제성 평가를 실시한다. 마지막으로, 이와 같은 순서로 도출한 결과를 통하여 공정별 비교하고, 연구 목적에 맞게 어떠한 공정이 가장 적합한지 선정한다[11]. 본 연구에서는 모델링 프로그램으로 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPS-X program(Hydromantis Inc, Canada)을 이용하여 하수처리공정의 운전을 모사하였다[12].

### 3-1. 공정 선정

본 연구에서 사용하기 위한 공정은 질소와 인 제거를 목적으로 하는 생물학적 고도처리의 대표적 공정인  $A_2O$ , Bardenpho, VIP, UCT 공정을 선정하였다.

#### 3-1-1. $A_2O$ 공정

Fig. 2(a)와 같이  $A_2O$  공정은 혐기성조, 무산소조, 호기성조로 구성되어 있으며, BOD와 질소, 인 제거를 목표로 한다. 호기성조에서 질산화를 통하여 생성된 질산성 질소를 무산소조로 반송하여 탈질함으로써 질소를 제거(총질소 제거율 40~70%)할 수 있으며, 인의 방출에 대한 질산성 질소의 영향을 감소시킨다. 또한 혐기성조에서 인을 방출하고, 호기성조에서 그 인을 흡수함으로써 인이 제거된다[13].

#### 3-1-2. Bardenpho(4단계) 공정

Fig. 2(b)의 4단계 Bardenpho 공정은 2개의 무산소조와 2개의 호기성조로 구성되어 있다. Bardenpho 공정의 질소 제거는  $A_2O$  공정과 마찬가지로 무산소조로의 내부 반송에 의하여 제거되며, 인의 경우는 인여 슬러지의 폐기에 의하여 이루어진다. 본 공정에서의 인 제

Table 2 Matrix representation in ASM2d [5].

Component ① → ↓Process ①	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	S <sub>O2</sub>	S <sub>P</sub>	S <sub>A</sub>	S <sub>NH4</sub>	S <sub>NO3</sub>	S <sub>PO4</sub>	S <sub>i</sub>	S <sub>ALK</sub>	S <sub>N2</sub>	X <sub>i</sub>	X <sub>S</sub>	X <sub>H</sub>	X <sub>PAO</sub>	X <sub>PP</sub>	X <sub>PHA</sub>	X <sub>AUT</sub>	X <sub>TSS</sub>
1 Aerobic hydrolysis		1-f <sub>si</sub>		$v_{i,NH4}$		$v_{i,PO4}$	$f_{Si}$					-1					$v_{1,TSS}$
2 Anoxic hydrolysis		1-f <sub>si</sub>		$v_{i,NH4}$		$v_{i,PO4}$	$f_{Si}$					-1					$v_{2,TSS}$
3 Anaerobic hydrolysis		1-f <sub>si</sub>		$v_{i,NH4}$		$v_{i,PO4}$	$f_{Si}$					-1					$v_{3,TSS}$
4 Aerobic growth on S <sub>P</sub>	1-(1/Y <sub>H</sub> )	-1/Y <sub>H</sub>											1				
5 Aerobic growth on S <sub>A</sub>	1-(1/Y <sub>H</sub> )		-1/Y <sub>H</sub>										1				
6 Anoxic growth on S <sub>P</sub>	1-(1/Y <sub>H</sub> )	-1/Y <sub>H</sub>			$-(1-Y_H)/2.86Y_H$				$(1-Y_H)/2.86Y_H$				1				
7 Anoxic growth on S <sub>A</sub>			-1/Y <sub>H</sub>		$-(1-Y_H)/2.86Y_H$				$(1-Y_H)/2.86Y_H$				1				
8 Fermentation		-1	1														
9 Lysis										$f_{Xi}$	1-f <sub>Xi</sub>	-1					
10 Storage of X <sub>PHA</sub>			-1			$Y_{PO4}$								-Y <sub>PO4</sub>	1		
11 Aerobic storage of X <sub>PP</sub>		-Y <sub>PHA</sub>				-1								1	-Y <sub>PHA</sub>		
12 Anoxic storage of X <sub>PP</sub>					$v_{12,NO3}$	-1			$-v_{12,NO3}$					1	-Y <sub>PHA</sub>		
13 Aerobic growth of X <sub>PAO</sub>	$v_{13,O2}$						$-i_{PBM}$						1		-1/Y <sub>H</sub>		
14 Anoxic growth of X <sub>PAO</sub>					$v_{14,NO3}$		$-i_{PBM}$		$-v_{14,NO3}$				1		-1/Y <sub>H</sub>		
15 Lysis of X <sub>PAO</sub>						$-v_{15,NO3}$				$f_{Xi}$	1-f <sub>Xi</sub>		-1				
16 Lysis of X <sub>PP</sub>							1							-1			
17 Lysis of X <sub>PHA</sub>			1												-1		
18 Aerobic growth of X <sub>AUT</sub>	$(4.57-Y_A)/Y_A$			$v_{18,NH4}$	1/Y <sub>A</sub>	$-i_{PBM}$											1
19 Lysis of autotrophs				$v_{19,NH4}$		$v_{19,PO4}$				$f_{Xi}$	1-f <sub>Xi</sub>						-1
20 Precipitation						-1		$v_{20,ALK}$									1.42
21 Re-dissolution						1		$v_{21,ALK}$									-1.42

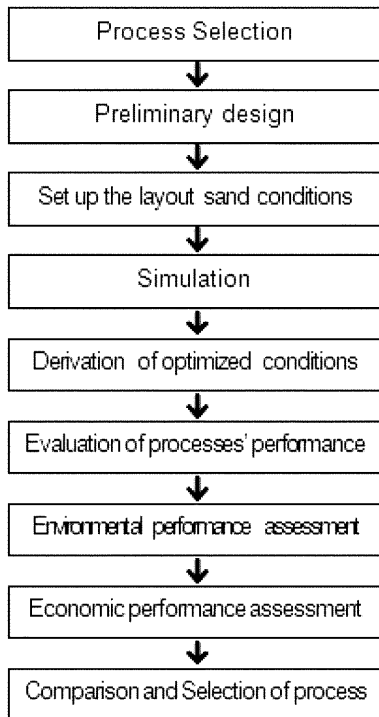


Fig. 1. Procedure of this study [11].

거는 과잉의 인을 섭취하고 있는 슬러지를 폐기함으로 이루어지며, 효과적인 인 제거를 위해서는 혐기성조에 질산성 질소가 유입되지 말아야 하는데 만약 최종 침전지의 슬러지 내에 질산성 질소의 농도

가 높다면 혐기성조로의 반송을 줄여야 하므로 반응조 내의 MLSS 농도 등에 문제가 생기게 된다. 또한 인을 1mg/L 이하로 방류시키기 위해서는 alum, 철염 등을 첨가하거나 여과장치가 필수적이다[13].

3-1-3. UCT(University of Cape Town) 공정

Fig. 2(C)의 UCT 공정은 혐기성조와 2개의 무산소조, 호기성조로 구성되며 2번의 내부반송으로 운영된다. UCT 공정은 A<sub>2</sub>O 공정과 유사하나 A<sub>2</sub>O 공정은 2차 침전지의 반송슬러지를 혐기성조로 직접 반송시키는 반면, UCT 공정은 반송 슬러지를 혐기성조에 유입시키지 않고 무산소조로 유입시킨다. 이렇게 함으로써 반송슬러지 내의 질소가 인의 방출에 나쁜 영향을 미치는 것을 방지하여 혐기성조에서 질산성 질소의 농도를 낮게 유지하고, 호기성조에서는 인의 흡수를 최대도 증가시킬 수 있게 한 공정이다[13].

3-1-4. VIP(Virginia Initiative Plant) 공정

VIP 공정은 UCT 공정과 유사하나 약간의 차이점이 있다. 혐기성조, 무산소조, 호기성조에 대해 한 개의 반응조를 사용하는 것이 아니라 Fig. 2(d)와 같이 각각의 조건에 대하여 최소한 2개 이상의 완전 혼합조를 직렬로 사용하여 첫 번째 호기성조에서 잔류 유기물 농도를 높게 유지하여 인의 흡수 속도를 증가시킨다. 호기성조에서 질산화된 혼합액은 반송 슬러지와 함께 무산소조의 입구로 순환되며 무산소조의 혼합액은 혐기성조로 반송된다[13].

3-2. 공정별 반응기 1차 설계

1차 설계는 모델링에 필요한 공정별 운전조건을 설정하는 것이다. 유입과 유출수 기준을 Table 3과 같이 하였고, 공정 설계의 기준 연

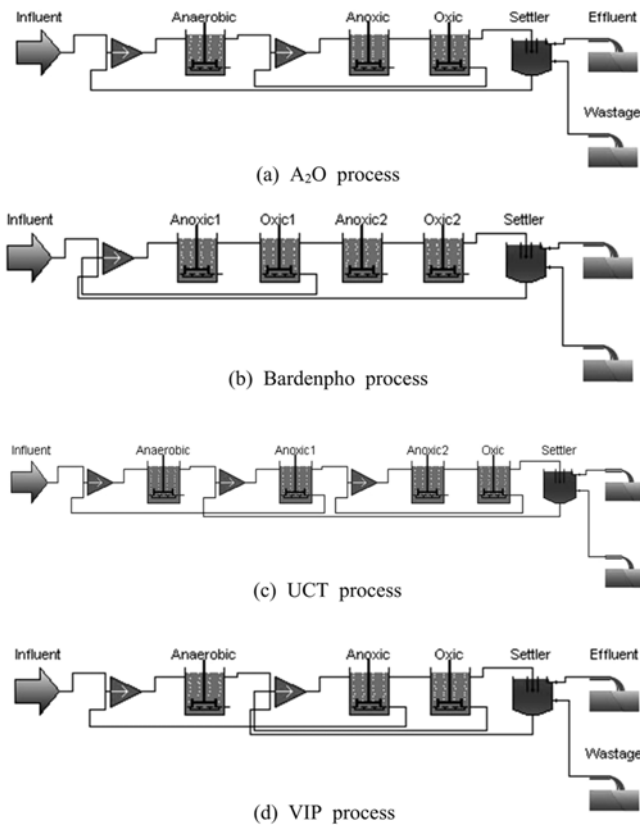


Fig. 2. Layout of 4 processes for advanced nutrient removal, (a) A<sub>2</sub>O process, (b) Bardenpho process, (c) UCT process, (d) VIP process [12].

Table 3. Influent conditions and effluent conditions

Influent conditions		Effluent conditions	
Flow	100,000 m <sup>3</sup> /d	BOD <sub>5</sub>	10 mg/L
BOD <sub>5</sub>	220 mg/L	TSS	15 mg/L
TSS	220 mg/L	T-N	20 mg/L
T-N	40 mg/L	T-P	2 mg/L
soluble T-P	4 mg/L		
Alkalinity	5 mole/m <sup>3</sup>		

구를 바탕으로 본 연구에서는 4개의 공정 설계를 위한 수력학적 체류시간(Hydraulic retention time, HRT)와 슬러지 체류시간(Solids retention time, SRT), 슬러지 반송율과 내부 반송율, 반응조별 부피, 폐슬러지 유량, 이차침전조의 표면적 및 수심 등을 Table 4와 같이 결정하였다[12,14].

GPS-X 프로그램을 이용하여 각 공정별 layout을 Fig. 2와 같이 설정하고, 1차 설계에 따른 수치와 유입수와 각 반응조, 침전조에 대한 모델을 선택하였다. 유입모델은 BOD based 모델(BOD 측정 자료는 있고 COD<sub>Cr</sub> 자료는 없는 경우), 각 반응조(혐기성조, 무산소조, 호기성조)는 ASM2d, 침전조는 Simple1d 모델을 사용하였다. 그리고 GPS-X program에 직접 입력한 1차 설계값에 대하여 시뮬레이션을 하여 그 결과를 도출하였다.

3-3. 최적운전조건 도출

1차 설계값에 대한 시뮬레이션 결과가 유출수질 기준을 만족시키지 못했기 때문에 민감도 분석(Sensitivity analysis)과 시행착오법에

Table 4. Primary design of operational conditions

	A <sub>2</sub> O	Bardenpho	VIP	UCT
Volume(m <sup>3</sup> )				
Anaerobic	4167	-	6250	5000
Anoxic1	3333	3500	6250	3500
Oxic1	17500	7500	12500	13000
Anoxic2	-	4000	-	3500
Oxic2	-	10000	-	-
total	25000	25000	25000	35000
Waste sludge(m <sup>3</sup> /d)	1250	3000	1667	10000
Recycle(m <sup>3</sup> /d)	35000	75000	75000	50000
Internal recycle 1(m <sup>3</sup> /d)	200000	200000	150000	150000
Internal recycle 2(m <sup>3</sup> /d)	-	-	150000	150000
Settler surface area(m <sup>2</sup> )	4167	4167	4167	4500

의해 최적운전조건을 도출하였다. 폐수처리공정이 비선형이고 모델 또한 비선형이라서 modern optimization방법을 적용결과 지역해(local optimization)에 빠지게 되어 좋은 최적운전조건을 찾지 못하였다. 이것을 보완하기 위해서 본 연구에서는 시행착오법으로 최적운전조건을 도출하였다. 민감도 분석에서 선정된 변수를 바꾸어가면서 각 항목에 해당되는 결과값이 유출수질 기준을 만족할 수 있도록 보정하였다. 예를 들어, 유출수의 총 질소(total nitrogen, T-N) 목표농도를 유출수질기준인 4 mg/L를 만족시키기 위하여 무산소조의 부피를 변화시키거나, 내부회송유량 또는 슬러지 반송유량을 변화시켜가며 유출수질 기준을 만족시키는 최적의 T-N 값을 찾는다. 이러한 운전 변수 변경을 통하여 최적의 유출수질 기준을 만족시키는 결과값과 이에 해당하는 설계값을 알 수 있었다.

3-4. 공정 성능 평가

하수처리 공정의 성능을 평가하기 위해서는 무수히 많은 데이터가 필요하다. 하지만 이렇게 많은 데이터를 어떻게 평가해야 하는지의 문제점이 있고, 평가 과정을 돕기 위해 성능 지표를 개발하고 이 지표들을 사용하여 동역학적 반응을 비교분석하고 제어전략을 선정하는 과정이 필요하다. 성능지표는 유출수 중 COD, T-N, T-P, TSS와 같은 여러 가지 변수들을 결합하여 하나의 독립된 지표로 계산된다. 여기서 또한 유출수질, 펌핑 에너지량, 폭기 에너지량, 슬러지 생산량의 측정치를 포함한다[3].

3-4-1. Effluent Quality Index, EQI(kg/d)

유출수에서 환경성 평가와 관련된 항목들은 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 유출수의 TSS, BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P를 선정하였다. 공정의 환경성 평가를 위해 이와 같은 여러 항목의 비교분석을 쉽게 하고 이해를 돕기 위하여 간단화하여 하나의 새로운 지표를 만드는 것이 필요하였다. Effluent Quality Index(EQI)는 유출 오염물질들의 부하를 하나의 단일 지표로 정량화한 것을 나타낸다[3]. 이러한 EQI를 통해 유출수의 상태를 한눈에 파악하고 비교할 수 있는 장점이 있다. 여기에서의 시스템은 정상상태로 가정하였고, EQI는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 하첨자 e는 유출수 농도를 나타낸다.

$$EQI = (\beta_{TSS}TSS_e + \beta_{COD}COD_e + \beta_{BOD}BOD_e + \beta_{TN}TN_e) * Q_e \quad (5)$$

여기에서,  $\beta_{TSS}=2, \beta_{COD}=1, \beta_{BOD}=2, \beta_{TN}=20$ 를 적용하였고,  $\beta$  factor는 유출 성분의 가중치를 나타내며, Vanrolleghem and Gillot(2002)에 의해 제시된 실험계수를 적용하였다.

3-4-2. 운전비용

하수 처리장의 운전비용에 대한 경제성 평가를 하기 위한 운전비용 산출 과정에서 고려할 사항으로는 폭기, 펌핑, 혼합 등의 에너지 비용과 슬러지 생산과 처리 비용, 시설비용, 화학약품 구입비용, 인건비용, 토지비용, 기타 유지비용 및 세금 등이 포함된다[14]. 하지만 비용 계산을 위한 각각의 구체적 지표들이 적용된 바가 없고, 개략적인 공정의 비교를 위함이기 때문에 본 연구에서는 슬러지 생산량, 펌핑 에너지량, 폭기량의 세 가지 인자를 고려하여 계산하였다.

3-4-2-1. 슬러지 생산량(Sludge production, SP)

최종 침전지로부터 하루 생산되는 슬러지량은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고, 최종 침전지에서 발생하는 TSS 양과 최종 침전지에서 버려지는 폐유량을 측정함으로써 계산된다.

$$SP(kg/d) = TSS_w * Q_w \tag{6}$$

여기에서,  $TSS_w$  = 침전지에서의 폐 유량 1m<sup>3</sup>당 발생하는 폐 슬러지량(kgTSS/m<sup>3</sup>)

$$Q_w = \text{최종 침전지에서의 폐 유량 (m}^3/d)$$

3-4-2-2. 펌핑 에너지량(Pumping energy, PE)

펌핑 에너지량을 줄이기 위하여 대부분의 하수 처리장에서는 각 반응조 간에 자유낙하로 이동하도록 설계되어 있다. 반응조 간의 내부 반송과, 침전지에서 발생하는 슬러지와 유량의 반송 등을 펌프를 이용하여 적용하고, 하루 동안 소비되는 펌핑 에너지량은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 최종 침전지에서의 반송, 내부 반송, 폐슬러지에 대한 유량의 합에 변환 인자를 곱하여 계산된다.

$$PE(kWh/d) = 0.04 * (Q_{ir} + Q_r + Q_w) \tag{7}$$

여기에서,  $Q_{ir}$  = 슬러지 내부 반송 유량(m<sup>3</sup>/d)

$Q_r$  = 슬러지 반송 유량(m<sup>3</sup>/d)

$Q_w$  = 최종 침전지에서의 폐 유량(m<sup>3</sup>/d)

3-4-2-3. 폭기량(Aeration energy, AE)

활성슬러지법, 호기성 소화법 등에서의 산소는 미생물의 호흡작용과 고형물을 부유시킬 수 있도록 반드시 공급되어야 하고 혼합이 이루어져야 한다. 이러한 전달과 혼합은 산기식 압축공기, 기계적 폭기 또는 기계적 교반으로 순수 산소를 공급함으로써 이루어진다[15]. 이렇게 하루 동안 호기성조에 주입되는 폭기량은 식 (8)과 같이 계산될 수 있다.

$$AE(kWh/d) = 0.4032 * K_{La}^2 + 7.8408 * K_{La} \tag{8}$$

여기에서,  $K_{La}(h^{-1})$  = 호기성조에서의 시간당 산소전달계수

3-4-2-4. 전체 운전비용으로 전환

위의 식 (5), (6), (7), (8)에 의해서 EQI(kg/d), 슬러지 생산량(SP, kg/d), 펌핑 에너지량(PE, kWh/d), 폭기량(AE, kWh/d)을 계산할 수 있었다. 각 항목별 나타내는 단위가 모두 다르기 때문에 운전 비용을 계산하기 위해서는 Table 5의 각 항목에 해당되는 cost factors를 곱하여 유로단위(€)로 변환하였다[4]. 변환된 각각의 유로단위의 비

Table 5. Cost multiplication factors

Cost factors	Multiplier	Units
Effluent fines	50	€/EQI (EQI=kg/d)
Sludge treatment costs	75	€/SP (SP=kgTSS/d)
Energy costs	25	€/PE or AE (PE=AE=kWh/d)

율을 더하여 총 비용(total COST)을 산출하였다. 이 값을 우리나라 비용 산출에 맞추도록 원(W)단위로 환산하였고, 1€=1300W를 적용하였다.

4. 결과 및 분석

1차 설계값과 그에 대한 시뮬레이션 결과값이 각각 Table 4와 Table 6로 나타났다. 시뮬레이션 결과값을 살펴보면 각 공정별 TSS, BOD<sub>5</sub>, TN, TP의 대부분의 값이 유출수질 기준을 만족시키지 못하는 것을 알 수 있으며, 이를 최적화시키기 위하여 운전최적화 과정을 수행하였다. A<sub>2</sub>O 공정의 혐기성조, 무산소조, 호기성조의 각 부피와 내부반송슬러지량, 반송슬러지량, 폐슬러지량을 기초변수로 삼아 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 3과 같다. 민감도 분석은 A<sub>2</sub>O

Table 6. Simulation result from primary design

(mg/L)	standard	A <sub>2</sub> O	BDP	VIP	UCT
TSS	15	22.4	14.2	10.6	10.8
BOD <sub>5</sub>	10	60	62	28	13.9
TN	20	15.9	32.1	12.9	26.7
TP	2	2.3	5.4	2.4	4

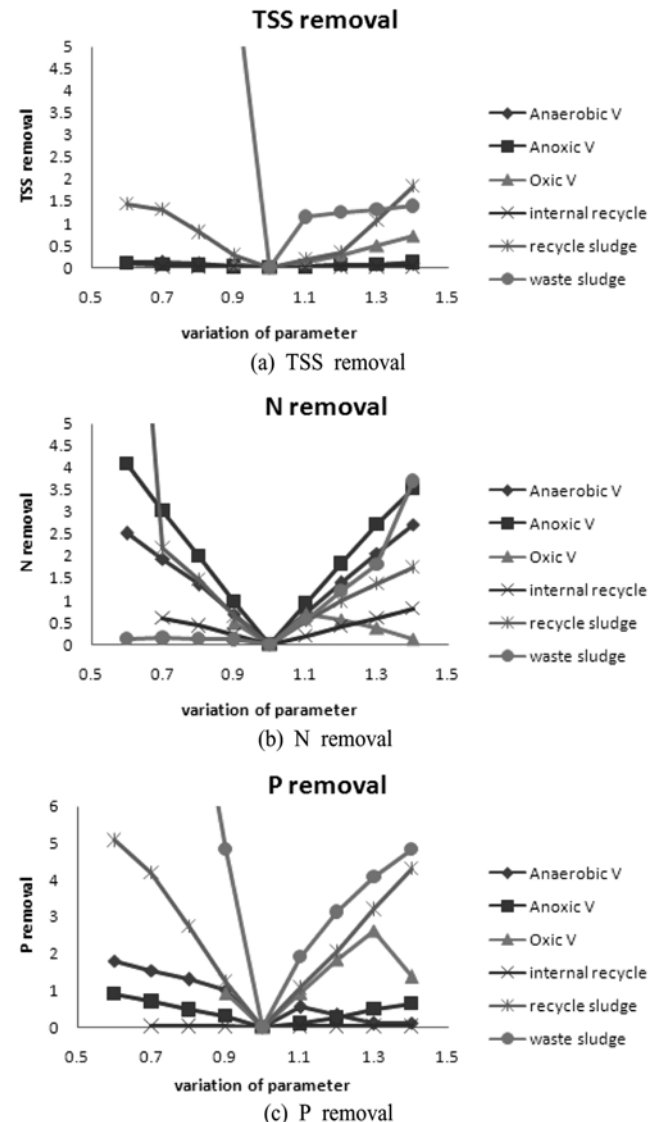


Fig. 3. Sensitivity analysis for each parameters in A<sub>2</sub>O process.

Table 7. Optimized operational conditions

	A <sub>2</sub> O	Bardenpho	VIP	UCT	
Volume(m <sup>3</sup> )	Anaerobic	5500	-	5250	5500
	Anoxic1	3000	3500	5250	2100
	Oxic1	19500	9000	15000	15000
	Anoxic2	-	3500	-	4000
	Oxic2	-	9000	-	-
	total	28000	25000	25500	26700
Waste sludge(m <sup>3</sup> /d)	1550	2000	1775	2000	
Recycle(m <sup>3</sup> /d)	34000	55000	75000	60000	
Internal recycle 1(m <sup>3</sup> /d)	230000	180000	125000	100000	
Internal recycle 2(m <sup>3</sup> /d)	-	-	150000	150000	
Settler surface area(m <sup>2</sup> )	5000	4500	4900	5000	

Table 8. Simulation result from the optimized design

(mg/L)	standard	A <sub>2</sub> O	Bardenpho	VIP	UCT
TSS	15	12.8	14.1	15.4	13.2
BOD <sub>5</sub>	10	5	5.5	5.8	5.4
TN	20	11	10.5	12.7	15.5
TP	2	1.3	1.8	0.8	0.7

공정의 유출수의 TSS와 T-N, T-P에 대한 민감도 분석을 실시하였고, 전체적으로 가장 민감한 변수로는 폐슬러지량으로 나타났으며, 내부반송슬러지량, 혐기성조 부피 등이 결과에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 1차 설계값의 시뮬레이션 결과의 대부분이 유출수질 기준의 대부분을 만족시키지 못하였기 때문에 운전최적화 과정을 수행하였고, 최적의 운전조건을 Table 7, Table 8과 같이 도출하였다. Table 4와 Table 7을 비교하면 운전 최적화 과정을 거친 후에 반응조의 사이즈나 폐슬러지량, 반송 슬러지량, 내부 반송량 등에 변화가 있는 것을 알 수 있다. Table 8에서는 운전최적화 과정을 거친 후에 모든 항목에서 유출수 기준을 만족 시키는 것으로 나타났다.

공정 각각의 최적화된 운전조건을 기초로 식 (5), (6), (7), (8)에 따라 계산된 EQI와 슬러지생산량, 펌핑에너지량, 폭기량의 값을 Table 9에 나타내었다. Table 10에서는 Table 9에서 계산된 값에 각 항목별 cost factors를 곱하여 유로단위로 환산된 값과 그의 합인 total COST(유로, 원 단위를 나타내었다).

Fig. 4는 1차 설계의 시뮬레이션 결과값과 운전최적화 과정을 거

Table 9. EQI and operational cost

	A <sub>2</sub> O	Bardenpho	VIP	UCT
EQI(kg/d)	29279.03	28655.20	33427.67	38161.20
SP(kg/d)	22459.5	21320	21974.5	22720
PE(kWh/d)	10622	9480	14071	12480
AE(KWh/d)	4816.08	9632.16	4816.08	4816.08

Table 10. Total EQI and total COST with cost factors

	A <sub>2</sub> O	Bardenpho	VIP	UCT
EQI(€/y)	1,464,000	1,433,000	1,671,000	1,908,000
SP(€/y)	1,684,000	1,599,000	1,648,000	1,704,000
PE(€/y)	266,000	237,000	352,000	312,000
AE(€/y)	120,000	241,000	120,000	120,000
Total COST(€/y)	3,534,000	3,510,000	3,792,000	4,044,000
Total COST(won/y)	4,595,000,000	4,562,000,000	4,929,000,000	5,258,000,000

친 후 최적화에 이르기까지의 시뮬레이션 결과값의 EQI와 total COST를 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. 전체적으로 환경성 및 경제성 부분에서의 효율이 좋아진 것을 알 수 있으며, EQI 효율의 경우 A<sub>2</sub>O가 48%, Bardenpho가 66.3%, VIP가 21%, UCT가 41% 좋아졌고, total COST는 A<sub>2</sub>O가 22%, Bardenpho가 53%, VIP가 8%, UCT가 29% 줄어들었다. Bardenpho 공정이 다른 공정들과 비교하여 가장 효율이 좋아진 것으로 나타났다.

연구 결과로 볼 때, 1차 설계에 대한 시뮬레이션 결과에서는 대부분이 유출수질 기준을 만족시키지 못한 반면 보정공정을 통한 모델링 후에는 유출수질 기준을 만족시킬 뿐만 아니라 환경성 및 경제성 부분에서 모두 좋아진 것을 알 수 있다. 제안된 환경성과 경제성 평가의 평가지표를 가지고 각 공법들에 대한 외란조건을 평가를 위해 다음의 3가지 사례연구를 수행하였다.

#### 4-1. 사례연구 1: 유입 유량이 100,000 m<sup>3</sup>/d

지금까지 언급한 연구 방법과 시뮬레이션 결과 값은 유입유량이 100,000 m<sup>3</sup>/d로써 사례연구 1에 해당된다. Fig. 5에 EQI-COST로 표현된 단일 지표로써 그래프를 나타내었다. EQI-COST 측면에서 A<sub>2</sub>O 공정과 Bardenpho 공정이 VIP와 UCT 공정에 비해 환경성 및 경제성의 효율이 좋은 것을 알 수 있고, UCT 공정이 EQI와 COST 모두 가장 낮은 효율을 보이는 것으로 나타났다.

#### 4-2. 사례연구 2: 유입 유량이 10,000 m<sup>3</sup>/d

사례연구 1에 적용된 조건 외에 다양한 조건 하에서의 결과는 어떻게 달라지는지 알아보기 위해서 사례연구를 수행하였고, 사례연구 2에서는 유입 유량을 제외한 모든 변수와 연구 방법 및 순서는 동일하게 적용하였으며, 단지 유입 유량만을 10,000 m<sup>3</sup>/d로 바꾸어 주었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, total COST가 일년에 5억 6천만원(A<sub>2</sub>O와 Bardenpho 공정)에서 6억 1천만원(VIP 공정)까지 분포하였고, Bardenpho 공정이 EQI 값이 가장 적은 것을 알 수 있다. A<sub>2</sub>O와 VIP, UCT 공정은 EQI는 비슷하나, COST가 차이가 많이 나는 것으로 VIP 공정이 경제성 평가에서 효율이 낮은 것으로 나타났다.

#### 4-3. 사례연구 3: 호기성조의 부피 변화

사례연구 3은 모든 조건은 사례연구 1과 동일하게 적용하고, 오직 호기성조의 부피만 ±2000 m<sup>3</sup> 범위 내에서 변화를 주어, 그에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 결과를 도출하였다. 그 결과 Fig. 7과 같이 호기성조의 부피가 커질수록 환경성 및 경제성 평가 부분에서의 효율이 모두 좋아지는 것을 알 수 있다. 유입수량과 호기성조 부피의 변화에 따른 경제성과 환경성 지표를 파악한 사례연구 1, 2, 3의 경우에는 A<sub>2</sub>O와 Bardenpho 공정이 VIP와 UCT 공정보다 환경성, 경제성 면에서 더 낫다는 것을 알 수 있었고, 다양한 운전 조건하에서 각각의 지표를 예측 할 수 있음을 보여주었다.

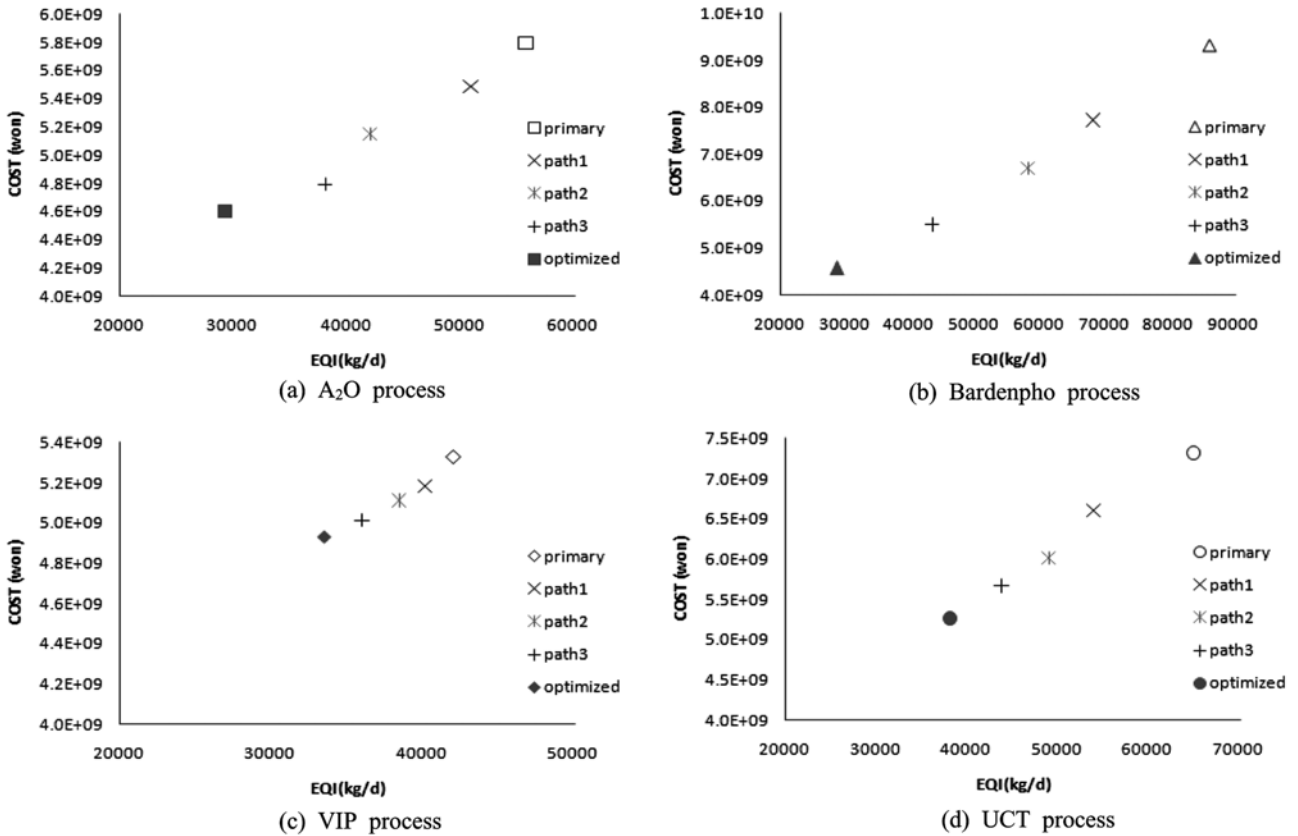


Fig. 4. EQI-COST graph for simulation result from primary design to optimized design.

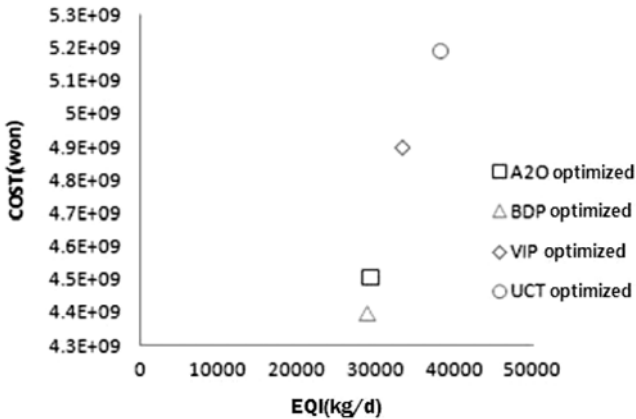


Fig. 5. EQI-COST graph for case 1.

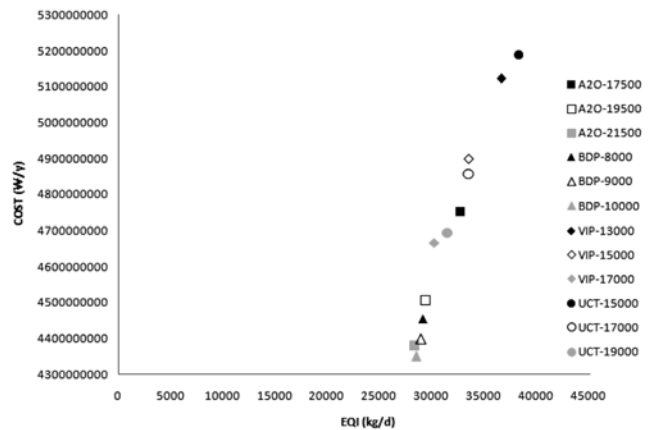


Fig. 7. EQI-COST graph for case 3.

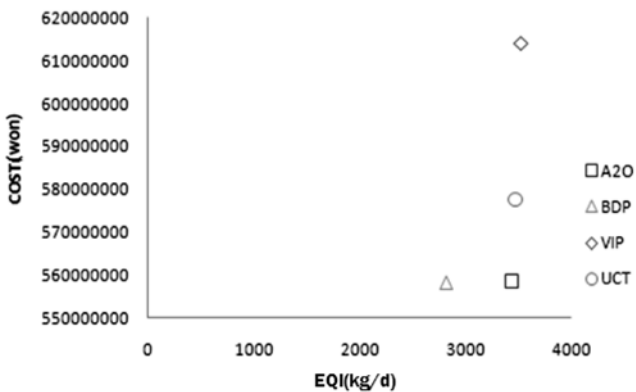


Fig. 6. EQI-COST graph for case 2.

### 5. 결 론

본 연구에서는 하수 공정 모델링 기법을 사용하여 처리공정을 설계하고 질소와 인 제거의 주요 공정인 A<sub>2</sub>O, Bardenpho, VIP, UCT 공정의 모델링을 통해 유출성상의 농도를 예측할 수 있었다. 이에 관하여 유출 기준에 맞게 재분석하여 최적의 운전조건을 도출하였고, 각 공정별 EQI와 COST를 계산하여 그 상관관계를 알 수 있었으며, 연구에 사용된 4개의 공정 외에 다른 공정들과의 비교를 가능하게 해 주어서 추후에 각 유입조건에 따른 고도처리공정의 공법 선정에 유용하게 쓰일 수 있음을 보였다. 더 나아가 유입 유량과 호기성조 부피의 변화에 따른 경제성과 환경성 지표의 변화를 파악하



고, 다양한 운전 조건하에서의 지표를 예측할 수 있었다. 본 연구 결과는 EQI와 COST의 단일화된 지표로써 질소와 인 제거를 위한 생물학적 영양물질 제거 공정들 중 공정을 선별하는 데에 있어서의 기준과 지표를 제시할 수 있게 되어서 새로운 처리장 건설의 최적 공법 선택시, 그리고 공정의 고도처리로의 전환시에 최적 운전 조건을 위한 표준화된 프로토클로서 사용될 수 있음을 보였다. 총 비용 계산시 운전비용의 각 항목별 cost factors를 유럽에서 제시한 기준으로 사용하였는데, 이후 국내의 실정에 맞게 수정이 필요하고 적합한 cost factors에 대한 연구를 진행할 필요가 있다. 또한 모델링 기법을 이용하여 ASM 모델의 표준화된 보정 프로토클에 대해 연구를 하고, 이것으로 생물학적 하수처리장을 위한 동적 모델링과 보정 그리고 모델기반 최적화의 원천 기술로써 사용될 수 있다. 실규모 하수처리장의 질소와 인의 최적화, 모듈기반 인터넷 리모트 감시 및 제어 시스템, 최종적으로는 통합 하수처리장의 관리 시스템에도 주요한 기술로써 사용될 수 있다.

## 감 사

본 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원을 한국학술진흥재단(KRF-2007-331-D00089)과 서울시정개발연구원의 산학협력과제(CS070160)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Heo, H. S., "Optimization of Advanced Sewage Treatment Process Treating High Fraction of Nondegradable Material," Ph. D. thesis, the Univ. of Seoul, Korea(2006).
2. Kim, J. R., "Model Optimization and Model Based Supervisory Local Control for Activated Sludge Process," Ph. D. thesis, Pusan univ, Korea(2006).
3. Copp, J. B., The COST-simulation benchmark : description and simulator manual, COST 'Simulation Benchmark' Manual(2001).
4. Vanrolleghem, P. A., Gillot, S., "Robustness and Economic Measures as Control Benchmark Performance Criteria," *Water Sci. Technol.*, **45**(4-5), 117-126(2002).
5. 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).
6. Olsson, G. Newell, B., *Wastewater Treatment System - Modeling, Diagnosis and Control*, IWA, UK(1999).
7. Sin, G., Insel, G., Lee, D. S. and Vanrolleghem, P. A., "Optimal But Robust N and P Removal in SBRs: A Model-based Systematic Study of Operation Scenarios," *Water Sci. Technol.*, **50**(10), 97-105(2004).
8. Artan, N., Wilderer, P., Orhon, D., Tasli, R. and Morgenroth, E., "Model Evaluation and Optimisation of Nutrient Removal Potential for Sequencing Batch Reactors," *Water SA.*, **28**(4), 423-432 (2002).
9. Petersen, B., "Calibration, Identifiability and Optimal Experimental Design of Activated Sludge Models," Ph. D.thesis, BIOMATH, Gent UNIV., Belgium(2001).
10. BIOMATH, Activated Sludge model Calibration-BIOMATH protocol(2001).
11. Kim, C. W., "The Way of Using GPS-X, The First Water Supply and Drainage Simulation Workshop," Pusan univ(2005).
12. Hydromantis, Inc., GPS-X Tutorial Guide, Hydromantis(2004).
13. Lee, S. W., "The Environmental Engineer for Water Quality," SeongAn-dang(2006).
14. Benedetti, L., "Probabilistic Design and Upgrade of Wastewater Treatment Plants in the EU Water Framework Directive Context," Ph. D.thesis, BIOMATH, Gent univ., Belgium(2006).
15. Reynolds, T. D., Richards, P. A., Unit operations and processes in environmental engineering, 2nd edition, BS:PWS publishing company(1996).