

기후변화를 고려한 하수처리공법별 온실가스 및 슬러지 배출량 산정 및 환경성 평가

오태석 · 김민정 · 임정진 · 김용수 · 유창규[†]

경희대학교 환경학 및 환경공학과/환경연구센터
446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지
(2010년 8월 17일 접수, 2010년 12월 15일 채택)

Estimate and Environmental Assessment of Greenhouse Gas(GHG) Emissions and Sludge Emissions in Wastewater Treatment Processes for Climate Change

Tae Seok Oh, Min Jeong Kim, Jung Jin Lim, Yong Su Kim and Chang Kyoo Yoo[†]

Center for Environmental Studies / Green Energy Center, Dept. of Environmental Science and Engineering, College of Engineering,
Kyung Hee University, 1 Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-701, Korea
(Received 17 August 2010; accepted 15 December 2010)

요 약

최근 국제법에 의해 하수처리장에서 발생하는 슬러지의 해양투기가 금지됨에 따라 하수처리 과정 중 발생한 슬러지의 처리방법이 문제가 되고 있다. 일반적으로 하수 및 슬러지는 혐기성조건에서 최종처리되며, 이과정 중 메탄(CH_4) 및 아산화질소(N_2O)가 배출되어 하수처리장은 지구온난화가스의 배출원으로 알려져 있다. 따라서, 하수처리장에서 발생하는 지구온난화 가스 배출량을 고려할 필요가 있으며, 지구온난화 가스 배출을 최소화할 수 있는 최적의 하수처리 공정 및 슬러지처리에 대한연구 필요성이 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 주요생물학적 하수처리공정에 따른 온실가스 발생량 및 슬러지 배출량을 계산하며, 이에 따라 온실가스 배출을 최소화하는 하수 및 슬러지처리방법을 제시하고자 한다. 생물학적 하수처리공정으로는 Anaerobic/Anoxic/Oxidation(A_2O), Bardenpho, Virginia Initiative Plant (VIP), University of Cape Town(UCT)을 이용하였으며, 동력학적 하수처리모델링 프로그램인 GPS-X를 이용해 본 공정의 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 하수처리과정에서 발생하는 온실가스 및 슬러지 배출량을 계산하며, 이를 통해 온실가스 배출을 최소화하는 공정을 선택하였다. 온실가스 및 슬러지 배출량은 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 식을 통해 계산되었다. 또한 다양한 슬러지 처리 시나리오(퇴비화, 소각, 매립)에 대한 환경성평가를 수행하였으며, 이를 통해 각 시나리오의 결과를 하나의 지표로써 비교·평가하였다. 본 연구결과, 4가지 하수처리공법 중 Bardenpho 공법에서 환경성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 슬러지 처리 시나리오 중 퇴비화가 온실가스를 가장 적게 배출하였다.

Abstract – In compliance with an international law about the ocean dumping of the sludge, the proper sewage treatment process which occurs from the wastewater treatment process has been becoming problem. Generally the sewage and the sludge are controlled from anaerobic condition when the sewage is treated and landfilled, where the methane(CH_4) and the nitrous oxide(N_2O) from this process are discharged. Because these gases have been known as one of the responsible gases for global warming, the wastewater treatment process is become known as emission sources of green house gases(GHG). This study is to suggest a new approach of estimate and environmental assessment of greenhouse gas emissions and sludge emissions from wastewater treatment processes. It was carried out by calculating the total amounts of GHG emitted from biological wastewater treatment process and the amount of the sludge generated from the processes. Four major biological wastewater treatment processes which are Anaerobic/Anoxic/Oxidation(A_2O), Bardenpho, Virginia Initiative Plant(VIP), University of Cape Town(UCT) are used and GPS-X software is used to model four processes. Based on the modeling result of four processes, the amounts of GHG emissions and the sludge produced from each process are calculated by Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) 2006 guideline report. GHG emissions for water as well as sludge treatment processes are calculated for environmental assessment has been done on the scenario of various sludge treatments, such as composting, incineration and reclamation and each scenario is compared by using a unified index of the economic and environmental assessment. It was found that Bardenpho process among these processes shows a best process that can emit minimum amount of GHG with lowest impact on environment and composting emits the minimum amount of GHG for sludge treatment.

Key words: Green House Gases(GHG) Emission, Environmental Assessment, Wastewater Treatment Process, Activated Sludge Model(ASMs), Optimal Sludge treatment strategy

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ckyoo@khu.ac.kr

1. 서 론

지난 수백년 동안, 지구의 표면 온도는 꾸준히 상승하여 왔으며, 이러한 현상을 지구 온난화라 한다. 지구 온난화의 영향으로 눈과 얼음의 비율이 점차 감소하고 있으며, 그 영향으로 해수면의 상승 또한 일차하여 일어나고 있다. 또한, 지구온난화에 의하여 장마와 가뭄이 잦아졌으며, 큰 태풍이 자주 발생하는 문제점이 발생하는 등 전 세계적으로 지구 온난화에 대한 관심이 집중되어 왔다. 이 지구 온난화의 주요 원인 중 하나는 온실가스이며, 온실가스 배출량은 1970년~2004년 사이, 70% 증가하였다[1]. 주요 온실가스로는 이산화탄소(CO_2), 아산화질소(N_2O), 메탄(CH_4) 등이 있으며, 주요 온실가스의 배출량을 감축하기 위해 온실가스의 배출원에 대한 관리의 중요성이 증가하고 있다.

최근 도시화 및 인구 증가와 함께 생활 수준의 향상으로 도시하수와 산업폐수의 발생량과 오염 부하량이 증가하고 있으며, 생물학적 영양염류인 질소와 인의 과도한 유입으로 수질이 악화되어 부영양화 현상을 초래하고 있다. 이에 국내 다수의 하폐수 처리장은 효과적인 질소 및 인의 제거를 위해 고도처리공법을 이용하고 있으나, 일반적으로 이러한 공법은 하수를 혐기적으로 처리하므로 이 과정에서 메탄 및 아산화질소를 발생하여 많은 양의 지구온난화 가스가 대기 중으로 배출된다[2]. 특히, 하수처리 중에 발생하는 아산화질소는 적은 양이 배출되지만 하수처리과정 전체의 지구 온난화 기여도를 결정할 만큼의 잠재량이 크다고 보고됐다[2]. 또한, 하수처리장에서 발생하는 슬러지의 해양 투기가 금지됨에 따라 국내에서 발생한 슬러지 처리 방법에 많은 관심이 집중되고 있으며, 하수처리장에서 슬러지가 혐기적으로 처리될 경우 이는 주요한 온실가스의 배출원이 될 수 있다[3]. 따라서 하폐수처리장에서 발생하는 주요 온실가스의 배출량 산정 및 슬러지 처리 방법에 대한 연구가 진행되어 왔다. Margarita 등[3]의 연구에서는 하수처리공법 별 시나리오를 나눠 하수처리 상에서 발생하는 온실가스 발생량을 산출한 후 최적의 하수처리 시나리오를 찾는데 중점을 두었다. 이 연구에서는 호기조와 혐기조의 비율을 9:1로 하고 바이오 가스의 재사용을 한 시나리오에서 가장 적은 양의 온실가스가 배출되었다. 또한 하수처리과정 중에 발생하는 아산화질소는 다른 가스들에 비해서 비교적 적은 양이 배출되지만 하수처리과정 전체의 지구온난화 기여도를 결정할 만큼의 잠재량이 있다는 사실을 증명하였다[3].

Hong 등[4]은 슬러지 처리에 대한 여러 가지 시나리오를 마련하여 환경적인 측면과 경제적인 측면을 고려하여 평가하였으며, 슬러지를 용융로를 통해 처리하는 방법과 소각 후에 용융로를 통해 처리하는 방법이 가장 효율적이라는 결론을 내렸다.

그러나 위의 선행연구는 하수처리공정과 슬러지 처리 방법에서 발생하는 온실가스를 기준으로 하여 환경성 평가를 각각 적용했다는 한계점을 갖는다[4]. 따라서 본 연구에서는 하수 및 슬러지 처리 과정에서 발생하는 온실가스에 대해 동시에 환경성 평가를 수행하며, 이를 통해 온실가스 배출을 최소화시킬 수 있는 하수처리공법과 슬러지 처리 방법을 찾는 것을 목적으로 한다. 하수처리공정에 따른 온실가스 발생량을 비교하기 위해 하수처리 시스템의 주요 생물학적 공정인 A_2O , Bardenpho, VIP, UCT 공정에 대한 모델링을 수행하며, 이를 바탕으로 하수처리 중 발생하는 온실가스와 슬러지 배출량을 IPCC를 통해 계산하여 하수처리공법 별 비교를 수행하였다. 또한, 4가지 하수처리공법에서 발생한 슬러지에 대해 퇴비화, 소각,

매립 등의슬러지 처리 시나리오를 적용하며, 각각의 처리과정 중 배출되는 온실가스량을 계산하였다. 궁극적으로이러한 하수 및 슬러지 처리에 대한 시나리오의 비교를 통해 최소의 온실가스를 배출하는 최적의 시나리오를 선택하며, 환경성 평가를 통해 하수처리의 전 과정을 비교 연구하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 하수처리장에서 발생하는 온실가스와 슬러지의 배출량을 계산하고, 온실가스 배출을 최소화시킬 수 있는 하수처리공법과 최적의 슬러지 처리 방법을 찾는 것을 목적으로 한다. 본 연구는 Fig. 1과 같이 진행하였고, 첫 번째 단계로 하수처리 공정을 선정하여 연구의 목적에 맞는 비교 분석이 가능한 공정들을 선택하게 된다. 그 후 하·폐수 처리공정 모사 프로그램인 GPS-X를 통해 공정을 모사 및 시뮬레이션하여 연구에 필요한 자료들을 수집하며, 이 모델링 결과를 바탕으로 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 온실가스 배출량 산정식과 COD 물질수지식을 이용하여 하수처리공정별 온실가스를 계산한다. 네 번째 단계로각 공정에서 발생된 온실가스 배출량을 지구온난화 지표인 GWP로 환산하여 지구온난화에 미치는 기여도를 비교해 본다. 다섯째, 하수처리공법에 따른 슬러지 발생량을 계산하며, 발생된 슬러지를 처리하는 시나리오에 따라 배출되는 온실가스량을 계산한다. 마지막으로 각 공법 별 하수처리 전 과정에 걸친 환경성을 평가하고 공정 성능 평가 및 경제성 평가를 수행하여 최적의 공법을 찾아낸다.

2-1. 대상공정 선정 및 운전조건 설정

본 연구에서는 질소와 인 제거를 목적으로 하는 생물학적 고도처리 공법의 대표적 공정인 A_2O , Bardenpho, VIP, UCT 공정을 선정하였다. 또한, 하수처리공정별 유입수조건은 Table 1과 같이 설정하

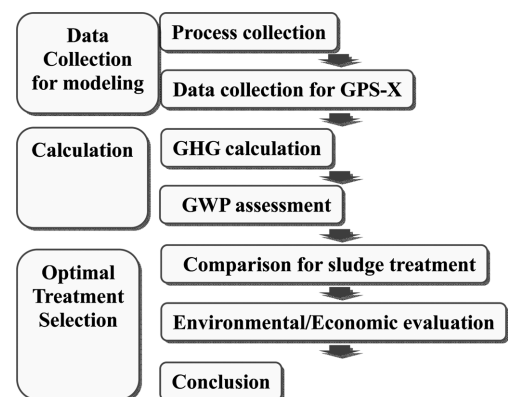


Fig. 1. The overall procedure for selection of wastewater treatment process and optimal sludge treatment.

Table 1. Influent conditions of four major wastewater treatment processes [5]

Influent conditions	
Flow	100,000 m ³ /d
BOD	220 mg/L
TSS	220 mg/L
TN	40 mg/L
Soluble TP	4 mg/L
Alkalinity	5 mole/m ³

Table 2. Design of operational conditions in four major wastewater treatment processes[5]

		A ₂ O	Bardenpho	VIP	UCT
Volume (m ³)	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 ³ /d)		1550	2000	1775	2000
Recycle(m ³ /d)		34000	55000	75000	60000
Internal 1(m ³ /d)		230000	180000	125000	100000
Internal 2(m ³ /d)		-	-	150000	150000
Settler area(m ²)		5000	4500	4900	5000

였으며, 설계 및 운전 조건으로 Kim and Yoo[5]에서 제시한 각 공정 별 최적화된 반응조크기, 침전조 면적, 내부 반송을 등을 적용하였다(Table 2).

2-1-1. A₂O(Anaerobic/Anoxic/Oxidation) 공정

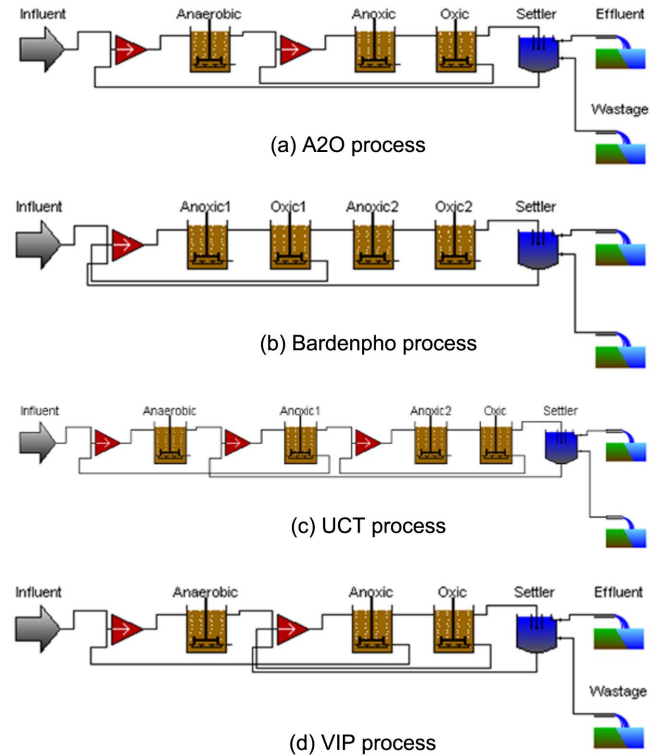
Fig. 2(a)와 같이 A₂O 공정은 혐기성조, 무산소조, 호기성조로 구성되어 있으며, BOD와 질소, 인 제거를 목표로 하는 대표적인 하수 처리공법이다. 하수 안에 있는 질소는 질산화가 일어난 후 탈질화를 통해 대기 중으로 제거해야 한다. 따라서 A₂O 공법에서는 호기성조에서 질산화를 통하여 생성된 질산성 질소를 내부 반송을 통하여 무산소조로 반송한 뒤 탈질화를 거쳐 질소를 제거(총질소 제거율 40~70%)할 수 있으며, 인 방출에 대한 질산성 질소의 영향을 감소시킨다. 또한 하수에 있는 인의 제거는 혐기성반응조에서 인을 방출시키고, 호기성 반응에서 그 인을 과잉 섭취함으로써 인이 제거된다[5].

2-1-2. Bardenpho(4단계) 공정

Fig. 2(b)의 4단계 Bardenpho 공정은 무산소조-호기조-무산소조-호기조로 구성되어 있는 하수처리공법이다. Bardenpho 공정의 질소 제거는 A₂O 공정과 마찬가지로 무산소조로의 내부 반송에 의하여 제거되며, 인의 경우는 잉여 슬러지의 폐기에 의하여 이루어진다. 본 공정에서의 인 제거는 과잉의 인을 섭취하고 있는 슬러지를 폐기함으로써 이루어지며, 효과적인 인 제거를 위해서는 혐기성조에 질산성 질소가 유입되지 말아야 하는데 만약 최종 침전지의 슬러지 내에 질산성 질소의 농도가 높다면 혐기성조로의 반송을 줄여야 하므로 반응조 내의 MLSS 농도 등에 문제가 생기게 된다. 또한 인을 1 mg/L 이하로 방류시키기 위해서는 alum, 철염 등을 첨가하거나 여과장치가 필수적이다[5]. 그럼에도 불구하고 Bardenpho 공정은 질소를 우선시로 제거하는 공법으로 인의 제거 효율은 다른 공법의 비하여 낮다. 따라서 이를 보완하기 위해서 5-stage Bardenpho process인 기본 공정의 앞부분에 혐기조를 추가함으로써 인의 제거 효율을 높이는 변형된 Bardenpho 공정도 개발되었다. 유입수의 T-P의 농도가 높지 않고 4 단계의 Bardenpho 공정의 시뮬레이션 결과의 유출수의 T-P 또한 기준치에 부합하기 때문에 본 연구에서는 기존의 4 단계 Bardenpho 공정을 사용하였다.

2-1-3. UCT(University of Cape Town) 공정

Fig. 2(c)의 UCT 공정은 혐기성조-무산소조-무산소조-호기조로 구성되며 2번의 내부반송으로 운영된다. UCT 공정은 5-stage Bardenpho process를 변형시킨 공법으로써, A₂O 공정과 유사하나 A₂O 공정은 2차 침전지의 반송슬러지를 혐기성조로 직접 반송시키

**Fig. 2. Layout of four major wastewater treatment processes.**

는 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 최대로 증가시킬 수 있게 한 공정이다[5].

2-1-4. VIP(Virginia Initiative Plant) 공정

VIP 공정은 UCT 공정과 유사하나 약간의 차이점이 있다. 혐기성조-무산소조-호기성조에 대해 한 개의 반응조로 구성되어 있으며 Fig. 2(d)와 같이 각각의 조건에 대하여 최소한 2개 이상의 완전 혼합조를 직렬로 사용하여 첫 번째 호기성조에서 잔류 유기물농도를 높게 유지하여 인의 과잉 섭취 능력을 증가시켰다. 호기성조에서 질산화된 혼합액은 반송 슬러지와 함께 무산소조의 입구로 순환되며 무산소조의 혼합액은 혐기성조로 반송된다[5]. 이로써 VIP 공정은 고율로 운영되어 활성미생물량을 증가시킴으로써 반응조의 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 다량의 내부순환이 펌프에너지와 유지관리를 증가시킬 수 있다는 단점도 있다.

2-2. GPS-X를 이용한 고도처리공법 모델링 및 시뮬레이션

2-2-1. 활성슬러지공정모델(Activated sludge model, ASMs)

물학적 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 전산 모사를 가능하게 한다[5]. 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,

합하지 않는다.

본 연구에서는 하수처리장 모델링 프로그램으로써 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPS-X(Hydromantis, Canada)를 이용하였다. GPS-X는 생활하수 및 산업폐수 처리장을 모델링 및 시뮬레이션할 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[12]. GPS-X는 활성슬러지공정모델(Activated sludge model, ASMs)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[12].

GPS-X 프로그램을 이용하여 하수처리공법들을 Fig. 2와 같이 공정모사하고, 수리학적 계산을 통해 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다. 본 과정 중, 각각의 반응조는 활성슬러지공정모델 중에서 질소와 인의 동시 제거가 가능한 ASM2d를 이용했으며 혐기성 소화 모델에서는 ADM1을 사용하였다. 이러한 조건으로 모델링된 하수처리공법들을 시뮬레이션하여 각각의 온실가스 발생량을 산출하였다.

2-3. 온실가스 발생량 산출

2-3-1. 아산화질소(N_2O) 가스량 산출

아산화질소(N_2O) 배출은 처리 시설로부터의 직접적인 배출로써 일어나거나, 또는 수로, 호수, 바다 유출수의 처리 후 폐수로부터의 간접적인 배출로 인해 발생할 수 있다. 하수처리 시설에서 질산화 및 탈질화로부터의 직접적인 배출은 두 번째 원인으로 고려될 수 있다. 전형적으로 이러한 배출량은 유출수로 인한 배출량보다 훨씬 적고, 질소 화합 작용과 탈질화 단계를 가진 고도의 중앙집중화 하수 처리 시설을 많이 가지고 있는 국가에서만 중요하게 취급된다[2].

본 연구에서는 2006 IPCC 가이드라인 보고서에서 제시하는 방법을 사용하여 하수처리장의 유출수로 인한 N_2O 를 산정하여, 수자원 환경에 배출된 하수처리 유출수로 인한 간접적인 N_2O 배출량에 대해 설명하고자 한다. 단순화된 배출량 식은 다음과 같다.

$$N_2O \text{ 배출량} = N_{\text{유출수}} \times EF_{\text{유출수}} \times \frac{44}{28} \quad (1)$$

본 식에서 N_2O 배출량은 인벤토리 연도의 N_2O 배출량(kg/yr)이고, N 유출수는 수환경으로 방류된 유출수 내 질소(kg N/yr)이며, $EF_{\text{유출수}}$ 는 하수로 방류된 유출수로부터의 N_2O 배출에 대한 배출계수(kg-N/kg N)이다. 또한 $4/28$ 은 kg N_2O -N를 kg N_2O 로의 변환계수이다.

2-3-2. 메탄(CH_4) 및 이산화탄소(CH_2) 가스량산출

폐수로부터 배출된 이산화탄소는 생물학적 발생에 기원을 두기 때문에, 국가 총 배출량에 포함시키지 않으며 따라서 IPCC 가이드라인에서도 그 발생량 계산은 다루지 않는다[2]. 따라서 본 연구에서는 온실가스 중 대표적인 탄소가스인 메탄(CH_4)과 이산화탄소(CO_2)를 다음과 같은 COD 물질수지 식을 통해 계산된다(Fig. 4).

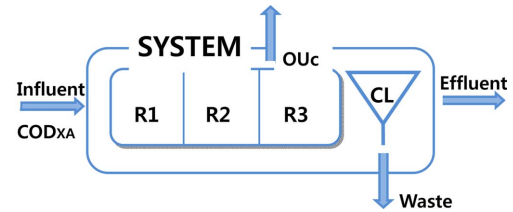


Fig. 4. Material balance of COD in WWTP.

$$COD_i + COD_{XA} = COD_o + COD_w + OUC \quad (2)$$

본 식에서 반응조로 유입되는 COD(COD_i)와 배출되는 COD(COD_o), 슬러지로 배출되는 COD(COD_w)는 모델 프로그램으로 간단히 구할 수 있으며, 미생물의 성장으로 인해 생성된 COD(COD_{XA})는 아래의 식을 통해 계산된다.

$$COD_{XA} = N_{OX} \times Y_A \quad (3)$$

$$N_{OX} = TKN_{in} - TKN_{out} - N_{waste} \quad (4)$$

즉 COD_{XA} 는 N_{OX} 라는 산화된 질소의 양과 Y_A 라는 질산화 미생물의 수율 계수($Y_A=0.24$ g COD/g N oxidised)의 곱으로 구할 수 있다[10]. 이 값들을 통해 탄소가스(OUC)의 값을 구할 수 있고 이 탄소가스를 이용해 하수처리장에서 발생하는 이산화탄소와 메탄 가스를 구할 수 있다. 본 연구에서는 탄소가스는 이산화탄소와 메탄 가스로만 배출된다고 가정하였고, IPCC 가이드라인 보고서에 의한 CH_4 의 배출계수가 0.25인 것에 의거하여, 각각의 이산화탄소와 메탄 가스는 75%와 25%의 비율로 배출된다고 가정하였다[2].

2-4. Global Warming Potentials(GWP) 계산

온실가스 별 지구온난화에 대한 기여도는 다르기 때문에, 이산화탄소를 기준으로 각각 온실가스 별 기여도를 명시한 지구온난화지수(GWP)로 측정된다. 기후변화협약에서의 지구온난화지수는 1995년도를 기준으로 하고 있으며, 각 온실가스별 지구온난화지수는 $CO_2=1$, $CH_4=21$, $N_2O=310$ 과 같다[2]. 본 연구에서는 A_2O , Badenpho, UCT, VIP의 4가지 하수처리공법에서 각각 발생하는 온실가스량을 다음의 GWP 식을 통하여 산출하여 비교하였다.

$$GWP = E_{CO_2} \times GWP_{CO_2} + E_{CH_4} \times GWP_{CH_4} + E_{N_2O} \times GWP_{N_2O} \quad (5)$$

본 식에서 E_{CO_2} , E_{CH_4} , E_{N_2O} 는 해마다 발생하는 온실가스의 양을 의미하며 GWP_{CO_2} , GWP_{CH_4} , GWP_{N_2O} 는 지구온난화지수를 의미한다[3].

2-5. 공정 성능 평가

하수처리 공정의 성능을 평가하기 위해서는 무수히 많은 데이터가 필요하다. 하지만현재 이 수많은 데이터를 평가하기 위해서는 아직까지 지표가 부족하다는 문제점이 있다.따라서, 하수처리 공정의 평가 과정을 돕기 위한 성능 지표를 개발하고 이 지표들을 이용하여 동역학적 반응을 비교분석하고 제어전략을 선정하는 과정이 필요하다. 이러한 성능지표로써 본 연구에서는유출수 중 COD, T-N, T-P, TSS와 같은 여러 가지 변수들을 결합하여 하나의 독립된 지표인 Effluent Quality Index(EQI)로 계산하며, 또한 운전 비용으로써 유출수질, 펌핑 에너지량, 폭기에너지량, 슬러지 생산량의 측정치를 포함한다[5]. 이를 통해 하수처리 공정 별로 유출수의 수질을 평가해 보고 각 각의 운전비용을 계산해 공정 별 경제성 평가를 한다.

2-5-1. 유출수질지표(Effluent Quality Index, EQI(kg/d))

한 공정의 환경성 평가를 내리기 위해 이와 같은 여러 항목의 비교분석을 쉽게 하고 이해를 돕기 위하여 간단화하여 하나의 새로운 지표를 만드는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 IWA에서 제시한 유출수질지표인 Effluent Quality Index(EQI)개념을 이용하였다[13]. EQI는 하수처리장에서 배출되는 유출 오염물질들의 부하를 하나의 단일 지표로 정량화한 것을 나타낸다[5]. 유출수에서 환경성 평가와 관련된 항목들은 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 유출수 수질의 많은 영향을 끼치는 TSS, BOD₅, T-N, COD이 4가지 항목을 EQI의 항목으로 선정하였다. 이러한 EQI를 통해 유출수의 상태를 한눈에 파악하고 각 각의 네가지 하수처리공정들을 비교할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서의 시스템은 정상상태로 가정하였으며, EQI는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기에서, β 는 각 항목들의 따른파라미터의 가중치이며 각 값은 Vanrolleghem and Gillot(2002)에 의해 제시된 실험계수인 $\beta_{TSS}=2$, $\beta_{COD}=1$, $\beta_{BOD}=2$, $\beta_{TN}=20$ 을 적용하였다.

2-5-2. 운전비용

하수처리공정을 비교할 때는 점점 강화되는 방류수 수질기준에 맞추기 위한 유출수 수질의 비교가 중요하지만 하수처리장을 건설하고 운영하는데 드는 비용, 경제성에 대해서 무시할 수 없는 일이다. 따라서 하수처리장의 경제성에 대한 평가 역시 수행되어야 하며, 이러한 운전비용 산출 과정에서 고려할 사항으로는 폭기, 펌핑, 혼합 등의 에너지비용과 슬러지 생산과 처리 비용, 시설비용, 화학약품 구입비용, 인건비용, 토지비용, 운송비용, 기타 유지비용 및 세금 등이 포함된다. 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[5].

2-5-2-1. 슬러지 생산량(Sludge production, SP)

최종 침전지로부터 하루 생산되는 슬러지 발생량은 아래의 식과 같이 나타낼 수 있고, 최종 침전지에서 발생하는 부유물질(TSS) 양과 최종 침전지에서 버려지는 폐 유량을 측정함으로써 계산된다[5].

$$SP(kg/d) = TSS_w \times Q_w \quad (7)$$

여기에서, TSS_w 은 침전지에서의 폐 유량 1 m³당 발생하는 폐 슬러지 양(kgTSS/m³)이고, Q_w 은 최종 침전지에서의 폐 유량(m³/d)을 의미한다.

2-5-2-2. 펌핑 에너지량(Pumping energy, PE)

대부분의 하수처리공정은 그 처리효율을 높이고 반응조의 크기를 줄이기 위해 각 반응조 간에 내부반송을 이용하고 있다. 이러한 내부반송과 침전지에서 발생하는 슬러지 및 유량의 반송 등은 펌핑이 동하여 적용하였고, 펌핑 에너지량을 줄이기 위하여 대부분의 하수처리장에서는 각반응조 간에 자유낙하로 이동하도록 설계되어 있다. 하루 동안 소비되는 펌핑 에너지량은 아래의 식과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 최종 침전지에서의 반송, 내부 반송, 폐슬러지에 대한 유량의 합에 변환 인자를 곱하여 계산된다[5].

$$PE(kWh/d) = 0.04 \times (Q_{ir} + Q_r + Q_w) \quad (8)$$

Table 4. Effluent results of four major wastewater treatment processes

	A ₂ O	Bardenpho	UCT	VIP
BOD	5.4	5.015	5.5	17.26
COD	46.78	41.37	50.5	77.06
TSS	16.8	12.03	12.6	13.1
TN	11.78	11.21	34.94	14.2

Table 5. Cost factors in EQI calculation [5]

Cost factors	WEIGHT
Effluent fines	50
Sludge treatment costs	75
Energy costs	25

본 식에서, Q_{ir} 은 슬러지 내부 반송 유량(m³/d)이고, Q_r 은 슬러지 반송 유량(m³/d)이며, Q_w 은 최종 침전지에서의 폐 유량(m³/d)을 의미한다.

2-5-2-3. 폭기량(Aeration energy, AE)

본 연구에서 비교 연구한 하수처리공법들은 활성슬러지공법, 즉 모든 공법에서 질소를 제거하기 위해 호기성 반응조가 모두 쓰였으며 이곳의 산소는 미생물의 호흡작용과 고형물을 부유시킬 수 있도록 반드시 공급되어야 하고 혼합이 이루어져야 한다. 이러한 전달과 혼합은 산기식 압축공기, 기계적폭기 또는 기계적 교반으로 순수 산소를 공급함으로써 이루어진다. 이렇게 하루 동안 호기성조에 주입되는 폭기량은 아래의 식과 같이 계산될 수 있다[5].

$$AE(kWh/d) = 0.4032 \times K_{La}^2 + 7.8408 \times K_{La} \quad (9)$$

여기에서, $K_{La}(h^{-1})$ 는 호기성조에서의 시간당 산소전달계수를 의미한다.

2-5-2-4. 전체 운전비용으로 전환

위의 식에 의해서 EQI(kg/d), 슬러지 생산량(SP, kg/d), 펌핑 에너지량(PE, kWh/d), 폭기량(AE, kWh/d)을 계산할 수 있었다. 각 항목 별 나타내는 단위가 모두 다르기 때문에 이를 한꺼번에 비교하고 운전 비용을 계산하기 위해서는 Table 5의 각 항목에 해당되는 cost factors를 곱하여 유로단위(€)로 변환하였다. 변환된 각각의 유로단위의 비용을 더하여 총 비용(total COST)을 산출하였다. 이 값을 우리나라 비용 산출에 맞추도록 원(W)단위로 환산하였고, 1€=1,300W를 적용하였다. 이 후 각 하수처리공정들 간의 경제성 평가를 내려 보았다.

3. 결 과

3-1. 하수처리공법별 온실가스 량 비교

각 하수처리 공법에서 발생하는 온실가스 배출량을 비교하기 위하여, 4가지의 생물학적 하수처리 공법인 A₂O, Bardenpho, VIP, UCT 공법에서 발생하는 온실가스 배출량을 산출하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 이산화탄소의 경우, UCT 공법에서 그 양이 가장 적게 발생하였으며 VIP 공법에서 이산화탄소 양이 가장 많이 발

Table 6. Greenhouse gases of wastewater treatment plants

	A ₂ O	Bardenpho	UCT	VIP
CO ₂ (kg/yr)	6,160,327	6,130,855	6,072,383	9,797,515
CH ₄ (kg/yr)	2,124,489	2,135,962	2,101,219	3,344,222
N ₂ O (kg/yr)	181,306	103,644	100,289	147,609
GWP	196,207,994	172,826,101	169,538,770	266,242,291

Table 7. GWP for sludge treatment

	A ₂ O	Bardenpho	UCT	VIP
Sludge(kg/yr)	8,152,458	7,606,600	6,556,860	7,314,509
Composting(kg/yr)	3,326,203	3,103,493	2,675,199	2,984,320
Incineration(kg/yr)	14,555,485	13,580,905	11,706,688	13,059,402
Landfill(kg/yr)	1,462,795,583	1,364,852,279	1,176,497,425	1,312,442,389

Table 8. Total EQI and total COST with cost factors

	A ₂ O	Bardenpho	UCT	VIP
EQI(€/y)	2,016,267	1,543,665	5,260,169	2,491,055
SP(€/y)	541,434,350	510,495,000	491,764,500	508,588,175
PE(€/y)	265,550	137,000	162,000	201,775
AE(€/y)	4,025	8,051	4,025	4,025
Total(won/y)	7.97836E+11	6.65E+11	6.763E+11	7.167E+11

생하였다. 또한 메탄 배출량의 경우, UCT 공법에서의 발생량이 가장 적으며 VIP 공법에서 가장 많은 양이 배출됨을 확인할 수 있었다. 아산화질소의 경우, UCT 공법에서 가장 적은 양이 배출되었고 A₂O 공법에서 가장 많은 양의 아산화질소가 배출되었다. 이 값을 바탕으로 GWP의 값을 계산한 결과, UCT 공법이 가장 적은 값을, VIP 공법이 가장 큰 GWP 값을 나타내었다. 따라서 하수처리공법에 따른 지구온난화 기여도는 VIP 공법이 가장 높음을 확인할 수 있었으며, UCT 공법이 가장 낮은 기여도를 보였다. 이러한 결과는 하수처리 과정 중 처리되는 질소로 인한 결과로 생각되며, 이는 유출수질지표인 EQI(Table 8)의 결과를 통해 유추해 낼 수가 있다. 각 하수처리 공법 별 방류수 농도를 비교한 결과(Table 4), UCT 공법은 다른 공법에 비해 방류되는 질소 농도가 높았으며 이에 따라 EQI 역시 높은 값을 나타내었다. 즉, UCT 공법은 반응조 내에서 질소가 잘 처리되지 않아 대기 중으로 질소가스 또는 아산화질소 가스로 방출되지 않고 그대로 유출수로 방류되었기 때문에 하수처리 중 적은 양의 아산화질소가 방출되었음을 의미한다. 일반적으로 하수처리장에서의 지구온난화 지수는 온난화의 기여도가 높은 아산화질소에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로, UCT 공법이 다른 공법들에 비해 온실가스에 의한 지구온난화의 기여도가 낮음을 확인할 수 있다.

3-2. 슬러지처리방법에 따른 온실가스 배출량 비교

슬러지 처리방법에 따른 온실가스 발생량을 비교하기 위해 4가지 주요 하수처리공법 별로 발생하는 슬러지 양을 계산하였다. 본 연구에서는 슬러지 처리를 위한 기본 시나리오로써 침전지로부터의 슬러지 농축 후 혐기성 소화의 방법을 이용하였다. 이러한 폐슬러지는 소각, 매립, 퇴비화 등의 방법으로 후 처리되었으며, 이러한 슬러지 처리 방법에 따라 발생하는 온실가스의 GWP를 Table 7과 같이 계산하였다. 슬러지 발생량은 UCT 공법에서 가장 적었으며, 이에 따라 슬러지를 처리하는 과정에서 발생하는 온실가스의 양도 UCT 공법에서 가장 적었다. 반면 A₂O 공법에서는 가장 많은 양의 슬러지가 방출 되었고, 이에 따라 슬러지를 처리하면서 발생하는 온실가스 또한 A₂O 공법에서 가장 많은 양이 발생되었다.

슬러지 처리 방법에 따른 GWP를 비교한 결과, 슬러지를 퇴비화로 처리할 시 가장 적은 GWP 값을 나타냈으며, 매립을 할 경우 가장 많은 온실가스를 방출하였다. 슬러지는 일반적으로 혐기성 조건에서 매립됨에 따라 다른 슬러지 처리 방법에 비해 상당한 양의 메탄 가스가 발생된다. 따라서 매립에 의한 슬러지 처리에서 가장 많은 양

의 온실가스가 방출되었을 것으로 사려된다. 소각의 경우, 다른 온실가스들은 적은 양이 발생되지만 그에 반해 이산화탄소의 배출이 많으므로 제법 큰 값의 GWP를 나타냈다. 따라서 퇴비화가 다른 슬러지 처리 방법들에 비해 상대적으로 적은 양의 GWP값을 나타냈으며, 퇴비화를 통한 폐슬러지를 농경지에 화학 비료 대신에 사용함으로써 추가적으로 경제적인 이익을 도모할 수 있다.

3-3. 공정 성능 평가

Table 8은 하수처리공법 별로 계산된 EQI와 슬러지생산량, 펌핑 에너지량, 폭기량의 값을 동일한 단위로 맞추기 위하여 cost factor(Table 5)를 곱하여 계산된 각 항목별 총 소요비용에 관한 것이다. Table 8에서 처럼, 유출수 수질 지표인 EQI 항목에서는 Bardenpho 공법의 유출수질이 가장 좋게 나타나 수질오염물질 처리효율이 가장 좋은 공법으로 선정되었으며, A₂O, VIP, UCT 공법의 순으로 나타났다. 또한 전체적인 하수 및 슬러지 처리비용, 에너지 소비량 등의 비용적인 측면에서 Bardenpho 공법에서의 총 운전비용이 가장 적었으며, UCT, VIP, A₂O 공법의 순으로 운전비용이 증가하였는데, 이는 Bardenpho 공법이 무산소조와 산소조를 하나씩 더 추가함으로써 다른 공법에 비해 질소 제거 효율을 강화했기 때문에 Bardenpho 공법에서 유출수 수질 지표인 EQI가 가장 적은 값을 나타내었다. 내부 반응율이 Bardenpho 공법에서 가장 적기 때문에 펌핑 에너지에 드는 비용 또한 다른 공법에 비해서 적게 드는 것으로 확인되었다. 따라서 Bardenpho 공법이 다른 공법에 비해 경제적인 측면에서 효율성이 좋은 공법임을 확인할 수 있었다.

3-4. 유출수질지표와 지구온난화 기여도에 따른 하수처리공법별 환경성 평가

본 연구에서는 각 하수처리공법 별 GWP와 유출수 수질 지표, 즉

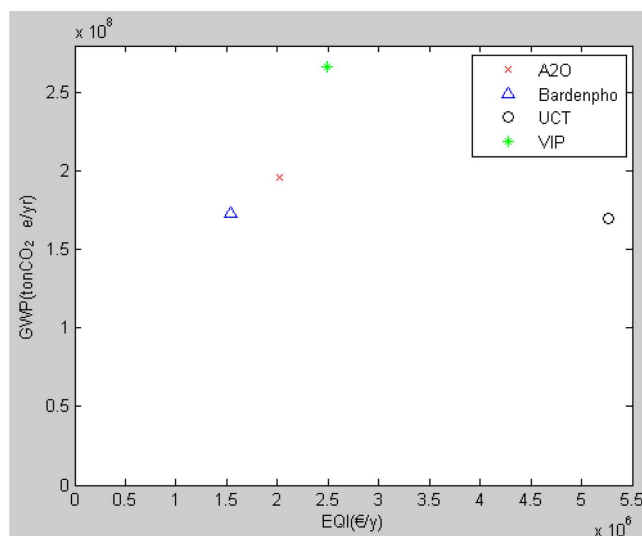


Fig. 5. The EQI – GWP result of four major wastewater treatment processes.

EQI를 통해 환경성평가를 해보았다. 먼저 EQI에서는 Bardenpho 공법이 가장 낮은 값을 나타내 다른 공법에 비해 유출수 수질이 좋은 반면, GWP에서는 UCT 공법의 온실가스 배출량이 제일 낮아 환경 부하가 낮은 공법이었다. 이러한 EQI와 GWP를 통한 환경성 평가를 동시에 나타내기 위해 Fig. 5와 같이 시뮬레이션 결과값의 EQI와 GWP를 한 평면 상의 그래프로 나타내었다. Fig. 5를 보면 가로축에는 EQI를, 세로축에는 GWP를 나타내었는데, 그 값들이 원점에 가까울수록 환경적인 부하가 적음을 알 수 있다. 따라서 그래프를 보면 Bardenpho 공법이 다른 공법들에 비해 가장 원점에 가까운 곳에 있는 것을 알 수가 있다. 즉, Bardenpho 공법이 다른 공법들에 비해 환경부하가 가장 적은 공법임을 확인할 수가 있다. 또한 시뮬레이션 결과를 통해 UCT 공법은 가장 적은 값의 GWP의 값을 내지만 EQI에서는 가장 좋지 않은 효율을 나타냈기 UCT 공법에서 환경적으로 가장 좋은 공법이 아닌 것으로 생각된다. 그러나 Bardenpho 공법에서는 EQI에서 가장 좋은 효율을 낼 뿐만 아니라 GWP의 값도 다른 공법들에 비해서 비교적 적은 값을 나타냈다. 따라서 EQI와 GWP에 따른 환경성 평가에서는 Bardenpho 공법이 가장 효율이 좋은 것을 확인할 수가 있었다.

4. 결 론

본 연구는 온실가스의 배출을 최소화하는 하수 및 슬러지 처리방법을 제시하기 위해 수행되었으며, 이를 위해 주요 생물학적 하수처리 공정(A_2O , VIP, UCT, Bardenpho)과 슬러지 처리방법(퇴비화, 소각, 매립)에서 발생하는 슬러지 및 온실가스의 배출량을 계산하였다. 배출된 온실가스의 계산방법으로는 2006 IPCC 가이드라인 보고서에서 제시된 온실가스 계산식과 COD 물질수지식을 이용하였으며, 각 하수처리공정 별 성능평가를 위해 경제성 평가 역시 수행하였다. 본 연구 결과, UCT 공법에서 가장 적은 양의 온실가스를 발생한 반면, Bardenpho 공법은 낮은 EQI 값을 보이며 가장 높은 처리효율을 나타냈다. 또한 공정성능을 통한 경제성 평가에서는 Bardenpho 공법에서 가장 경제성이 좋은 공법임을 알 수가 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 GWP와 EQI를 종합한 환경성평가에서 Bardenpho 공법이 경제적인 동시에 환경적인 공법임을 확인할 수 있었다. 슬러지 처리에 대한 연구 결과, 퇴비화 방법에서 가장 적은 양의 지구온난화 가스를 방출하였으며 이를 통해 퇴비화에 의한 슬러지 처리 방안이 지구 온난화에 적게 기여하는 현실적인 방안을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 경제성 평가를 위해 cost 계산 시 운전비용의 각 항목별 cost factors를 유럽에서 제시한 기준으로 사용하였기 때문에, 국내에 이 값들을 적용했을 때 오차가 많이 발생할 수 있다. 따라서, 국내의 실정에 맞는 적합한 cost factors에 대한 연구가 진행될 필요가 있다. 또한 IPCC 가이드라인을 통한 GHG 계산 시 우리나라에 맞는 배출계수가 따로 존재하지 않으므로 실측을 통하여 명확한 배출계수를 계산하여 적용할 필요가 있다. 그러나본 연구를 통하여 각 공법에서 배출되는 온실가스 양을 계산하여, 각 하수처리공법별 비교를 수행할 수 있는 새로운 방법론을 제시하는 데에 본 연구의 의의가 있으며, 국내의 하수처리장에서 고도처리 공법으로의 전환이

이루어지는 현 시점에서 볼 때, 본 연구에서 제안된 방법에 입각하여 경제적이면서도 지구 온난화에 적게 기여하는 공법을 제시할 수 있을 것이다.

감 사

이 논문은 2010년 한국연구재단 일반연구과제(KRF-2009-0076129)와 환경부의 폐기물에너지화 자원화 전문인력양성사업으로 지원되었습니다.

참고문헌

1. Ministry of Education, Science and Technology, TRM of the reduction and treatment technologies of CO_2 (2006).
2. IPCC, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(2006).
3. Margarita, P., Scarlette, L.G., "Application of Strategies for Sanitation Management in Wastewater Treatment Plants in Order to Control Reduce Greenhouse Gas Emissions," *J. Environ. Manage.*, **88**(4), 658-664(2007).
4. Hong, J., Hong, J., Otaki, M. and Joliet, O., "Environmental and Economic Life Cycle Assessment for Sewage Sludge Treatment Processes in Japan," *Waste Management*, **29**, 696-703(2009).
5. Kim, M. H. and Yoo, C. K., "Design and Environmental/Economic Performance Evaluation of Wastewater Treatment Plants Using Modeling Methodology," *Korean Chem. Eng. Res.(HWA-HAK KONGHAK)*, **46**(3), 610-618(2008).
6. 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).
7. 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).
8. Hwang, E. J., "Appication of Combined Model of Activated Sludge Model and Anaerobic Digestion Model to Wastewater Treatment Plant," Ph. D. thesis, the Univ of Pukyong, Korea(2007).
9. Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., Vavilin, V. A., Anaerobic Digestion Model No. 1 ADM1, *IWA Scientific and Technical report No.13*, IWA, UK(2002).
10. Nowak, O., Franz, A., Svandal, K., Muller, V. M. and Kuhn, V., "Parameter Estimation for Activated Sludge Models with the Help of Mass Balances," *Wat. Sci. Tech.*, **39**(4), 113-120(1999).
11. Hydromantis, Inc., GPS-X Tutorial Guide, Hydromantis(2004).
12. 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).
13. Copp, J. B., The COST-simulation benchmark: description and simulator manual, COST 'Simulation Benchmark' Manual(2001).