

Modelling of effluent and GHGs for wastewater treatment plants using by MS Excel simulator(PKES)

MS Excel 시뮬레이터(PKES)를 이용한 하수처리장 유출수 및 온실가스 모델링

Jung-In Bin · Byung-Hun Lee*

빈정인 · 이병헌*

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

부경대학교 환경공학과

Abstract : This paper presents PKES(PuKyung -Excel based Simulator) for WWTPs(wastewater treatment plants) by using MS Excel and VBA(Visual Basic for Application). PKES is a user-friendly simulator for the design and optimization of the whole plant including biological and physico-chemical processes for the wastewater and sludge treatment. PKES calculates the performance under steady or dynamic state and allows changing the mathematical model by the user. Mathematical model implemented in PKES is a improved integration model based on ASM2d and ADM1 for simulation of AS(activated sludge) and AD(anaerobic digestion). Gaseous components of N_2 , N_2O , CO_2 and CH_4 are added for estimation of GHGs(greenhouse gases) emission.

The simulation results for comparison between PKES and Aquasim(EAWAG) showed about the same effluent concentrations. As a result of verification using by measured data of BOD, TSS, TN and TP for 2 years of operation, calculated effluent concentrations were similar to measured effluent concentrations. The values of average RMSE(root mean square error) were 1.9, 0.8, 1.6 and 0.2 mg/L for BOD, TSS, TN and TP, respectively. Total GHGs emission of WWTP calculated by PKES was 138.5 ton- CO_2 /day and GHGs emissions of N_2O , CO_2 and CH_4 were calculated at 21.7, 28.9 and 87.9 ton- CO_2 /day, respectively. GHGs emission of activated sludge was 32.5 % and that of anaerobic digestion was 67.5 %.

Key words : PKES, MS Excel, simulator, WWTP, GHGs

주제어 : 부경엑셀시뮬레이터, 엑셀, 시뮬레이터, 하수처리장, 온실가스

1. 서론

도시화와 산업발달로 인한 물 사용량과 하·폐수 발생량의 증가로 인해 하천과 연안해역의 관리가 지속적으로 요구되며, 국내의 경우 1996년부터 하수처리시설의 강화된 질소·인 제거를 위해 고도처리공법이 도입되었다. 하지만 고도처리공법의 적용은 하수처리장의 에너지 사용량뿐만

아니라 온실가스(GHGs; greenhouse gases) 발생량이 증가하는 문제점을 초래하고 있다(Kim et al., 2010; KEI, 2011).

최근에는 수학적 모델이 하수처리장의 설계, 개선 및 운전 조건 변화에 따른 유출수 수질 평가 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. 또한 수학적 모델의 연속적인 계산과 많은 입출력 데이터 처리를 위한 시뮬레이터(simulator)가 개발되었으며, BioWin, GPS-X, WEST, EFOR 등과 같은 상용 시뮬레이터들은 사용자 인터페이스(UI; user interface), 적용분야, 유연성 및 난이도와 같은

* Received 03 November 2014, revised 08 December 2014, accepted 10 December 2014.

* Corresponding author: Tel : +82-51-629-6525 Fax : +82-51-629-6523 E-mail : bhlee@pknu.ac.kr

측면에서 각각의 장단점이 있으므로 사용 목적에 맞게 사용되어야 한다(Ruano et al., 2012; Jung, 2013). MS Excel(Microsoft Office Excel)은 스프레드시트 프로그램으로써 데이터 관리와 연산 및 표와 그래프를 작성할 수 있는 소프트웨어이다. 하수처리 공정을 설계함에 있어 단순한 계산뿐만 아니라 물질수지 작성이나 정상상태(steady state) 모델링에도 사용되어 왔다. 최근에는 MS Excel에 내장된 VBA(visual basic for application)를 이용하여 설계·계산 자동화 프로그램 작성뿐만 아니라 도시침수해석(Han et al., 2005), 수질오염총량관리를 위한 장기유출 모형 개발(GRI, 2010), SBR 공법 시뮬레이터 개발(KIWE, 2006) 등과 같은 환경 분야의 수학적 모델링의 도구로써 활용되고 있다. MS Excel은 하수처리 공정 모의에 필요한 많은 양의 입·출력 데이터 저장 및 처리가 가능하고 VBA는 비전문가의 프로그램 작성이 상대적으로 쉽기 때문에 보다 광범위한 활용이 가능할 것이다(Kim et al., 2012).

최근 지구온난화는 기후변화와 맞물려 국내·외에서 큰 이슈가 되고 있다. 지구온난화는 점차 가속화되고 있는데 이는 지구온난화에 영향을 주는 GHGs 배출량이 현저하게 증가하기 때문이다. CH_4 와 N_2O 는 하·폐수분야에서 발생하는 온실가스로 IPCC 가이드라인의 폐기물분야에 속하며, 운영조건에 따라 배출량 조절이 가능한 특징이 있다. 하수처리장의 혐기성 처리공정에서 CH_4 와 CO_2 가 배출되고 질소제거 공정에서 일부가 N_2O 로 배출되며, CH_4 와 N_2O 의 지구온난화지수(GWP; global warming potential)는 CO_2 의 각각 23배, 296배로 그 효과가 매우 크기 때문에 단순히 CBOD에 대한 GHGs 배출량을 평가할 경우 과소평가될 수밖에 없다(IPCC, 2006; O et al., 2009; Shahabadi et al., 2010; Oh et al., 2011).

본 연구에서는 하수처리장 유출수 및 온실가스 모델링을 위해 MS Excel과 VBA를 이용하

여 사용자 편의성과 유연성을 갖춘 시뮬레이터를 구축하였으며, 가스 성분을 포함하고 활성슬러지와 혐기성소화에 대해 동시에 모델링할 수 있는 개선된 통합모형을 제시하였다. 또한 구축된 시뮬레이터를 기존 시뮬레이터와의 비교를 통해 검증하였으며, 실제 운전 중인 하수처리장의 실측 자료들을 이용하여 모델링한 결과로부터 유출수 수질 및 소화가스 발생량에 대해 검증하고 GHGs 배출량을 계산함으로써 GHGs 저감방안 수립에 기여하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 하수처리장 시뮬레이터와 통합모형

하수처리장에 대한 수학적 모델링을 수행하기 위한 시뮬레이터는 Microsoft Office Excel 2013을 이용하여 구축하였으며, 구축된 시뮬레이터는 EAWAG(Swiss federal institute for environmental science and technology)에서 개발한 Aquasim(Ver.2.1) 시뮬레이터를 이용하여 검증하였다.

본 연구에서는 표준 활성슬러지 공법의 하수처리장을 대상으로 하였으며, 하수 처리용 활성슬러지(AS; activated sludge) 공정은 ASM2d(Henze et al., 2000), 슬러지 처리용 혐기성소화(AD; anaerobic digestion) 공정은 ASM2d와 ADM1(Batstone et al., 2002)을 기반으로 수정된 통합모형을 적용하였다. 표준 활성슬러지 공법에서는 적용되지 않는 발효 및 인 제거 관련 부분은 삭제함으로써 모델을 간소화하였다. 화학적 처리 공정은 적용하지 않았으며, 물리적 처리 공정은 최초침전지, 최종침전지, 농축조 및 탈수조로 구성하였다. 슬러지 처리를 위한 농축조와 탈수조의 효율은 대상 하수처리장의 실제 운전 자료로부터 계산된 77과 97 %의 슬러지 회수율을 각각 적용하였다. 최초 및 최종 침전지의 침전 효율은 수온, 유입 TSS 농도와 표면적부하를 변수로 하는 경험식을 일부 수정하여 적용하였다(Christoulas et al., 1998).

$$E_s = \frac{S_{Inf} - S_{Eff}}{S_{Inf}} = \exp\left(-\frac{a + bT}{S_{Inf}} - cq\right) \quad (1)$$

여기서, E_s 는 TSS 제거율(-), S_{Inf} 와 S_{Eff} 는 유입과 유출 TSS 농도(mg/L), $q(=Q/A)$ 는 침전지 표면적부하(m/day)이고 a, b, c 는 상수이다. 대상 하수처리장의 실제 운전 자료로부터 각각 계산된 상수 값은 최초 침전지의 경우 $a=130, b=3.5, c=1.5 \times 10^{-3}$, 최종 침전지의 경우 $a=3.6, b=0.15, c=4.0 \times 10^{-5}$ 이었다.

2.2 대상 하수처리장

설계유량이 340,000 m³/day인 대상 하수처리장에서 유입 하수는 침사지, 최초침전지, 포기조, 최종침전지를 거쳐 방류되며, 이 때 발생된 슬러지는 농축 및 혼합되고 혐기성 소화 후 탈수되어 슬러지 케이크로 반출된다. 그리고 농축조, 소화조, 탈수조로부터 발생된 반류수는 최초침전지로 유입된다. 주요 공정에 대한 설계인자는 Table 1에 나타내었으며, 공정도는 Fig. 1과 같다.

대상 하수처리장의 공정별 HRT, 유량과 수온, 유입수와 유출수의 수질 분석 자료(BOD, TSS, TN, TP) 및 혐기성 소화조의 가스발생량 등의 실측 자료를 사용하여 모델링하였다. 운전인자 및 수질항목에 대한 2년간의 실측 자료 평

균값과 범위는 Table 2에 나타내었으며, 유입수 유량은 323,000 m³/day, 온도는 19.2℃이였으며, 포기조 MLSS 농도는 1,736 mg/L이고 반송비는 24.1%이었다. 수질에 대한 유입 및 유출 농도는 각각 BOD 94.5, 7.2 mg/L, TSS 86.9, 2.5 mg/L, TN 28.0, 15.4 mg/L, TP 2.8, 1.6 mg/L이었다. 대상 하수처리장의 운전특성을 살펴보면 연간 변화는 크지 않지만 일간 및 계절에 따른 변화는 큰 경향을 나타내고 있다. 시뮬레이터 내에서는 일일 단위의 유입수 수질자료

Table 1. Design condition of the wastewater treatment plant

Unit process	Volume (m ³)	HRT (hr)
Primary settler	21,375	1.5
Aeration tank	86,625	6.1
Final settler	43,560	3.1
Anaerobic digester	21,000	-

Table 2. Operating data of the wastewater treatment plant

Item	Range	Avg.
Flow rate (10 ³ m ³ /day)	237 ~ 438	323
Temperature (℃)	10.5 ~ 28.0	19.2
MLSS (mg/L)	960 ~ 2,480	1,736
RAS (%)	18.9 ~ 33.1	24.1
Influent BOD (mg/L)	62.3 ~ 139.6	94.5
Influent TSS (mg/L)	40.0 ~ 151.3	86.9
Influent TN (mg/L)	15.3 ~ 34.9	28.0
Influent TP (mg/L)	1.1 ~ 3.8	2.8

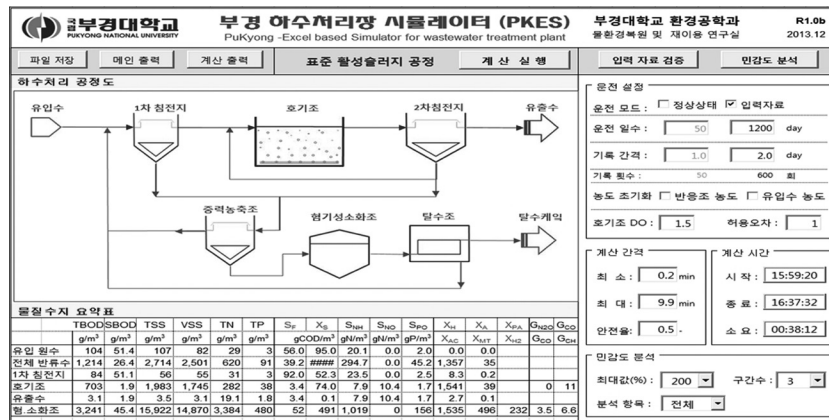


Fig. 1. Screen-shot of "Main Menu" worksheet in PKES.

를 입력한 후 이들을 상태변수(stats variables)로 각각 변환하여 모델링하게 되며, 이 때 사용된 전환계수(conversion factor)는 Henze et al.(2000)과 Rieger et al.(2001)에 의해 제시된 값들을 활용하였다. 2년간의 평균 유입수 수질자료에 대한 상태변수와와의 관계는 Table 3과 같으며, 유입수 내 미생물은 없는 것으로 가정하였고 TSS 중 분해 불가능한 무기입자성 물질(X_{II})은 반응에 관여하지 않으므로 모델에서는 제외되었다.

Table 3. State variables as input data of model

Variables (g/m ³)	S_F	S_I	S_{NH}	S_{PO}	X_I	X_S
COD	221	84	22		29	86
TSS*	87				19	56
TN	28.0	2.5	0.4	21	1.2	2.6
TP	2.8	0.0	0.0		1.5	0.9

*included X_{II} (inert inorganic particulate substrate)

3. 결과 및 고찰

3.1 MS Excel 시뮬레이터(PKES)와 통합모델

3.1.1 하수처리장 시뮬레이터(PKES)의 구축

MS Excel은 하수처리 공정의 설계 및 운영에 필요한 물질수지를 작성하는데 이용되고 있지만 이들은 정적 상태(steady state)에서 단위 공정의 일정한 처리효율을 갖는 단순한 스프레드시트 물질수지로서 여러 가지 운전조건의 변화가 단위 공정에 미치는 영향을 확인하고 이에 따른 대응책을 수립하는데 어려움이 있다(Shin,

2006). 따라서 본 연구에서는 하수처리 전 공정을 동적 상태(dynamic state)로 모델링하기 위해 MS Excel 및 VBA를 이용한 부정역셀시뮬레이터(PKES; PuKyung -Excel based Simulator for wastewater treatment plant)를 구축하였다.

PKES는 몇 개의 작업시트(worksheet)들로 구성되어 있다. '메인화면'시트에는 시뮬레이터의 설정 및 실행 기능, 하수처리 공정도와 물질수지요약표가 있으며, 그 구성 화면은 Fig. 1과 같다. '공정계산'시트에는 하수처리 전 공정에 대한 물질수지표와 통합모델에 대한 매트릭스가 작성되어 있으며, '설계자료'시트에는 통합모델에 사용되는 화학양론 및 동역학 매개변수 값들이 입력되어 있다. '입출력'시트에는 일일단위 유입 자료를 입력하고 유출 결과를 저장하며, 결과기록 시트들은 주요 공정별 계산 결과를 저장한다. VBA 프로그램은 설정 및 입력된 자료를 이용하여 시뮬레이터를 구동하는 기능을 한다.

3.1.2 하수처리장 통합모델의 구축

하수처리의 생물학적 공정에 대한 통합모델은 ASM2d(Henze et al., 2000)와 ADM1 (Batstone et al., 2002)을 기반으로 작성되었으며, PKES에 적용된 통합모델 매트릭스(matrix) 구성 화면은 Fig. 2와 같다. 통합모델은 활성슬러지와 혐기성소화 공정에 사용되는 상태변수(state variables)를 동일하게 구성함으로써 동시에 두 공정을 모의할 수 있는 수학적 모델은

i Variable →		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Reaction rate	
j	Process ↓	S_{O_2}	S_F	S_{AC}	S_I	S_{NH}	S_{NO}	S_{PO}	S_{AK}	S_{H_2}	X_I	X_S	X_H	X_A	X_{AC}	X_{UAC}	X_{MH_2}	G_{H_2}	G_{N_2O}	G_{CO}	G_{CH}	D_i [(g/m ³ -min)]	
1	Hydrolysis of X_S		0.18		0.00	0.00		0.00	0.00				-0.18										0.178
2	Aero. growth of X_H on S_S	-0.12	-0.33			-0.02		0.00	0.00				0.21								0.00		0.205
3	Anox. growth of X_H on S_S		-0.03			0.00	0.00	0.00	0.00				0.02					0.00	0.00	0.00			0.021
4	Lysis of X_H					0.01		0.00	0.00		0.03	0.08	-0.10								0.00	0.00	0.101
5	Aerobic growth of X_A	-0.11				-0.03	0.03	0.00	0.00					0.01					0.00	0.00			0.006
6	Lysis of X_A					0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00									0.003
1	Hydrolysis X_S		1.02		0.00	0.02		0.01	0.00				-1.02										1.024
2	Lysis of X_H					0.03		0.00	0.00		0.12	0.36	-0.48										0.482
3	Lysis of X_A					0.00		0.00	0.00		0.00	0.01		-0.01									0.012
4	Growth of X_{AC}			-1.02	0.66	0.01		0.00	0.00	0.26					0.10						0.00		1.020
5	Growth of X_{UAC}				-0.66	0.00		0.00	0.00							0.03					0.01	0.63	0.659
6	Growth of X_{MH_2}					0.00		0.00	0.00	-0.26							0.02			0.00	0.24		0.257
7	Lysis of X_{AC}					0.00		0.00	0.00		0.01	0.02			-0.02								0.021
8	Lysis of X_{UAC}					0.00		0.00	0.00		0.00	0.01				-0.01							0.007
9	Lysis of X_{MH_2}					0.00		0.00	0.00		0.00	0.00				0.00							0.003

Fig. 2. Model matrix for activated sludge and anaerobic digestion process in PKES.

의미하며, 미생물의 성장은 사멸-재생산 모델 (death-regeneration model)로 표현하였다 (Henze et al., 2000; Ruano et al., 2012). 통합모델에 사용된 상태변수(state variables) 즉, 성분(components, i)은 용해성(soluble, S) 성분 9개, 입자상(particulate, X) 성분 7개와 GHGs 발생량 계산을 위한 가스(gaseous, G) 성분 4개(G_{N_2} , G_{N_2O} , G_{CO_2} 과 G_{CH_4})를 적용하였다.

동역학적 공정(kinetic processes, j)은 활성슬러지(포기조) 대한 6개의 공정과 혐기성소화에 대한 9개의 공정을 적용하였다. 먼저 활성슬러지(AS) 공정은 입자상 유기물의 가수분해(hydrolysis) 공정, 호기(aerobic)와 무산소(anoxic) 조건에서의 종속영양 미생물(heterotrophs)의 성장(growth) 공정, 질산화공정인 독립영양 미생물(autotrophs)의 성장 공정과 각 미생물의 분해(lysis) 공정으로 구성하였다. 혐기성소화(AD) 공정은 입자상 유기물의 가수분해 공정, 종속영양과 독립영양 미생물의 분해 공정, 산생성 공정인 아세트산생성 미생물(acetogens)의 성장 공정, 아세트산과 수소를 이용한 메탄 생성 공정인 메탄생성 미생물(methanogens)의 성장 공정과 각 미생물의 분해 공정으로 구성하였다.

통합모델에 사용된 화학양론 매개변수(stoichiometric parameters)와 동역학적 매개변수(kinetic parameters)들은 ASM과 ADM에 대한 기존 연구에서 제시된 값들을 활용하였다 (Henze et al., 2000; Batstone et al., 2002; Rieger et al., 2001). GHGs 발생량 계산을 위한 가스 성분들은 각 동역학적 공정별 화학양론에 근거하여 통합모델을 작성하였다(Snowling et al., 2006). IPCC(2006)에서는 N_2O 배출계수로서 질소성분의 0.5%로 제안하고 있으나 실제 하수처리장에서의 N_2O 의 발생량은 공정과 운전상태에 따라 매우 다르며, Van Hulst 등(2012)의 조사에 의하면 유입 TN의 1 ~ 15%가 N_2O 로 발생되고 대체로 3% 이하인 것으로 나타났다. 따라서 호기조에서 더 많은 N_2O 가

발생하는 점을 고려하여 식(2)의 질산화공정에서 2%, 식(3)의 탈질공정에서 1%가 중간생성물으로써 N_2O 가 발생하는 것으로 계산하였다. CH_4 의 경우 식(4)의 아세트산과 식(5)의 수소를 이용한 메탄생성공정으로부터 계산되었으며, CO_2 의 경우 성분별 탄소 함유율을 이용한 연속방정식(continuity equation)으로 계산하였다. 이들 가스 성분들은 20℃, 1 atm에서의 부피발생량(m^3/day)으로 재계산하였다.

$$(1/Y_H)S_F + ((1/Y_H-1)/2.86)S_{NO_3} \rightarrow X_H + ((1/Y_H-1)/2.86-a)G_{N_2} + (a)G_{N_2O} \quad (2)$$

$$(4.57/Y_A-1)S_{O_2} + (v_{6,CO_2})G_{CO_2} + (1/Y_A)S_{NH_4} \rightarrow X_A + (1/Y_A-b)S_{NO_3} + (b)G_{N_2O} \quad (3)$$

$$S_{AC} \rightarrow (Y_{MAC})X_{MAC} + (v_{5,CO_2})G_{CO_2} + (1-Y_{MAC})G_{CH_4} \quad (4)$$

$$S_{H_2} + (v_{6,CO_2})G_{CO_2} \rightarrow (Y_{MH_2})X_{MH_2} + (1-Y_{MH_2})G_{CH_4} \quad (5)$$

여기서, Y는 각 미생물의 수율(yield coefficient), a와 b는 N_2O 발생에 대한 양론계수(a=0.02, b=0.01)이며, $v_{j,i}$ 는 j공정에서의 i성분에 대한 양론계수이다.

3.1.3 PKES 시뮬레이터의 검증 및 민감도 분석

본 연구에서 구축된 하수처리장 시뮬레이터인 PKES에는 많은 입출력 자료를 엑셀 수식으로 연결되고 이들은 다시 자체 개발된 VBA 프로그램에 의해 동적상태로 계산이 수행되므로 이들 수식과 프로그램의 객관적인 유효성을 확보하기 위해 EAWAG에서 개발한 텍스트기반 시뮬레이터인 Aquasim과 비교 모델링을 수행하였으며, 모든 설계 및 매개변수 값과 모델 매트릭스를 동일하게 적용하여 이로 인한 오차는 없도록 하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 유입수 조건은 처음 120 일 동안은 40 일 간격으로 유입 농도를 단계적으로 증가시켰으며, 마지막 80

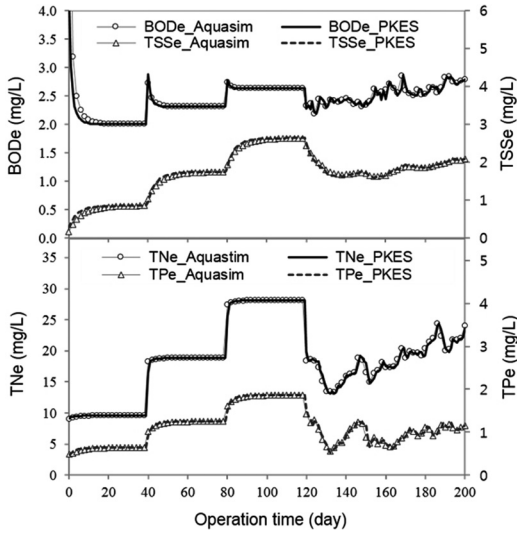


Fig. 3. BOD, TSS, TN and TP effluent concentration for comparison between PKES and Aquasim.

Table 4. Simulation results for comparison between PKES and Aquasim

Simulator	Concentration (mg/L)			
	BOD	TSS	TN	TP
Aquasim	2.53	1.85	18.39	0.96
PKES	2.53	1.84	18.36	0.96
RMSE	0.07	0.04	0.60	0.06

일 동안은 대상 하수처리장의 실제 운전 자료로 모델링하였다. Table 4는 두 시뮬레이터로 계산된 마지막 80일 동안의 평균 유출농도와 이들간의 RMSE(root mean square error) 값을 나타내었으며, RMSE 값은 다음 식으로 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

여기서, n은 데이터수이고 y_i 와 \hat{y}_i 는 각각 i번째 실제 값과 계산 값이다. 다만 시뮬레이터 간 검증 결과는 y_i 와 \hat{y}_i 를 PKES와 Aquasim으로 계산한 유출수 농도 값으로 계산하였다. 모델링 결과 PKES와 Aquasim 모두 단계적인 유입 농도 증가에 대해 빠른 시간 내 안정화 되었으며, BOD, TSS, TN과 TP의 평균 유출농도가 거의

동일한 값을 나타냄으로써 PKES의 유효성을 검증하였다.

PKES에는 통합모델에 사용되는 매개변수들에 대한 민감도분석 기능을 VBA 프로그램으로 구축하였으며, 이를 이용하여 통합모델의 수질항목별 매개변수들에 대한 민감도를 분석함으로써 이후 매개변수 추정 및 검증에 필요한 기초 자료로 활용하였다. 각 매개변수 초기 값의 50, 100, 200%에 대해 모델링한 후 결과는 WSANE(weighted sum of absolute normalized errors)로 나타내었으며, WSANE는 다음 식으로 계산하였다.

$$WSANE = wf \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_{i,Def.} - C_{i,Chg.}}{C_{i,Def.}} \right| \quad (7)$$

여기서, wf는 성분별 가중치(GHGs=2, 그 외=1), i는 성분(n=8; BOD, TSS, TN, NH₄-N, NO₃-N, TP, PO₄-P, GHGs)이고 C_{i,Def.}와 C_{i,Chg.}는 각각 초기 값과 변경 값에 대한 i성분의 유출수 농도(mg/L)이다. 매개변수의 민감도 분석 결과 Table 5에 표시한 바와 같이 WSANE값이 높은 계수들은 $\mu_A, b_A, \mu_H, K_{A,NH}, b_H, K_{A,O_2}, K_{BM,SF}, K_{A,Aik}, \eta_H, K_{BM,O_2}$ 의 순으로 나타났다. Lee 등(2008)의 연구결과와 유사하게 종속영양 및 독립영양 미생물의 비성장속도와 분해속도가 가장 민감하였으며, 독립영양 미생물의 경우 이로 인하여 질산화속도가 결정되고 유출수 NH₄⁺-N의 농도가 가장 크게 변화였다.

Table 5. Results of parameter sensibility analysis using by PKES

Parameter	WSANE	Parameter	WSANE
μ_A	7.02	K_{A,O_2}	1.03
b_A	3.88	$K_{BM,SF}$	0.83
μ_H	1.24	$K_{A,Aik}$	0.82
$K_{A,NH}$	1.09	η_H	0.39
b_H	1.04	K_{BM,O_2}	0.32

3.2 PKES 시뮬레이터와 통합모형을 이용한 모델링

대상 하수처리장의 공정별 설계자료 및 2년간 실측된 유입수의 유량, 포기조의 수온, 수질분석 결과와 혐기성소화조 가스발생량 등을 이용하여 본 연구에서 구축한 PKES 시뮬레이터와 통합모형을 검증하였다. 본 연구에서 구축한 하수처리장 통합모형은 활성슬러지(AS) 공정과 혐기성소화(AD) 공정을 동시에 모델링할 수 있기 때문에 슬러지처리 공정으로부터의 반류수로 인한 유출수 수질에 대한 영향 분석뿐만 아니라 하수처리장 전 공정에서 발생하는 GHGs 발생량을 계산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 민감도분석을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 통합모형의 매개변수 값들에 대한 다양한 평가를 통해 최적화를 진행한 후 최종적으로 모델링한 하나의 결과로부터 하수처리장 유출수와 혐기성소화조 가스발생량에 대한 검증 뿐만 아니라 GHGs 발생량에 대해서도 평가하였다.

3.2.1 하수처리장 유출수 검증

대상 하수처리장의 2년간 평균 유입수의 유

량은 323,000 m³/day, 포기조의 운전온도는 19.4℃, 유입수의 BOD, TSS, TN 및 TP는 각각 94.5, 86.9, 28.0 및 2.8 mg/L이었다. 또한 실측된 BOD, TSS, TN 및 TP의 평균 제거효율은 각각 92.4, 97.1, 44.5 및 41.5%로 계산되었다. 모델링한 결과 중에서 유출수 수질에 대한 부분은 Table 6와 Fig. 4 ~ 5에 나타내었으며, 전체적으로 유출수의 실측 농도와 계산 농도가 비교적 근사하게 나타났다.

하수처리장의 유출수와 같이 질산화 미생물이 포함되어 있는 경우 5일 BOD 내에 약 15% 정도의 NH₄-N가 질산화되는 것으로 알려져 있

Table 6. Simulation results of BOD, TSS, TN and TP using by PKES.

Item		Range	Avg.	RMSE
BOD (mg/L)	Measured	2.9 ~ 10.9	7.2	1.9
	Calculated	3.4 ~ 12.3	7.2	
TSS (mg/L)	Measured	1.0 ~ 5.0	2.5	0.8
	Calculated	1.0 ~ 4.8	2.8	
TN (mg/L)	Measured	8.7 ~ 20.0	15.4	1.6
	Calculated	8.1 ~ 20.0	15.4	
TP (mg/L)	Measured	0.8 ~ 1.8	1.6	0.2
	Calculated	0.6 ~ 2.1	1.6	

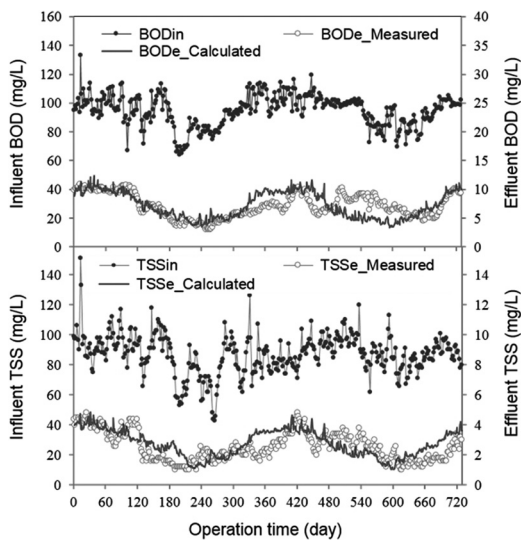


Fig. 4. Simulation results of BOD and TSS concentration in the WWTP using by PKES.

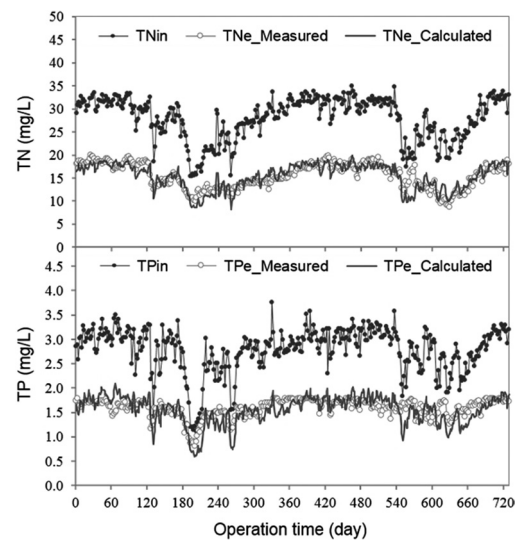


Fig. 5. Simulation results of TN and TP concentration in the WWTP using by PKES.

으며, 이를 NBOD(nitrification BOD)라 한다 (Metcalf & Eddy Inc., 2003). 본 연구에서도 모델링한 결과에 대한 BOD 계산에 있어 질산화 되지 않고 유출수에 남아 있는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 를 반영하였다. 그 결과 BOD의 경우 실측된 평균 유출농도가 7.2 mg/L이었으며, 계산된 평균 유출농도도 7.2 mg/L로 동일하게 나타났다. BOD에 대한 RMSE 값은 1.9 mg/L이었다. TSS의 경우 실측된 평균 유출농도가 2.5 mg/L이었으며, 계산된 평균 유출농도는 2.8 mg/L로 조금 높은 결과를 보였다. TSS에 대한 RMSE 값은 0.8 mg/L이었다. TN의 경우 실측과 계산된 평균 유출농도가 모두 15.4 mg/L이었으며, TN에 대한 RMSE 값은 1.6 mg/L이었다. TP의 경우 실측과 계산된 평균 유출농도가 모두 1.6 mg/L이었으며, TP에 대한 RMSE 값은 0.2 mg/L이었다.

실제 운전된 포기조 내 평균 MLSS 농도는 1,736 (960 ~ 2,480) mg/L이었으며, 모델링한 결과에 의하면 평균 MLSS 농도는 1,731 (1,217 ~ 2,251) mg/L로 거의 동일하면서도 좀 더 안정적인 것으로 나타났다. 본 연구와 동일한 하수처리장에 대해 Aquasim으로 모델링한 Jung(2013)의 연구 결과에서 RMSE 값은 BOD, TSS, TN과 TP에 대해 각각 2.2, 1.1, 2.2와 0.3 mg/L로 나타났다. 본 연구의 결과에서 이보다 낮은 RMSE 값을 나타냄으로써 보다 실측 농도에 근접할 뿐만 아니라 PKES 시뮬레이터와 개선된 하수처리장 통합모델이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 혐기성 소화조 가스발생량 검증

모델링한 결과 중에서 혐기성 소화조 가스발생량에 대한 부분은 2년 동안 일일단위 소화조 가스발생량에 대한 실측값과 모델링한 계산 값을 Fig. 6에 나타내었다. 대상 하수처리장의 슬러지 처리공정은 일정하게 연속 운전되지 않고 슬러지 발생량이나 휘발성 고형물 비율 등과 같은 슬러지 성상이 일정하지 않기 때문에 실측값

의 변화가 심한 것을 알 수 있었다. 이에 반해 모델링에서는 연속 운전되는 것으로 계산되기 때문에 가스 발생량이 보다 안정적으로 나타났다. 실측된 평균 소화조 가스발생량은 약 9,000 m^3/day 이었으며, 모델링 결과는 약 8,790 m^3/day 로 약간 낮게 계산되었다. 모델링 결과에서 가스 성분별로 살펴보면 CH_4 가 약 5,740 m^3/day , CO_2 가 약 3,050 m^3/day 발생하였으며, CH_4 가 약 65.3%를 차지함으로써 실측결과와 유사하고 Metcalf & Eddy Inc.(2003)가 제시한 CH_4 의 부피비 65 ~ 70% 범위를 만족하는 것으로 나타났다.

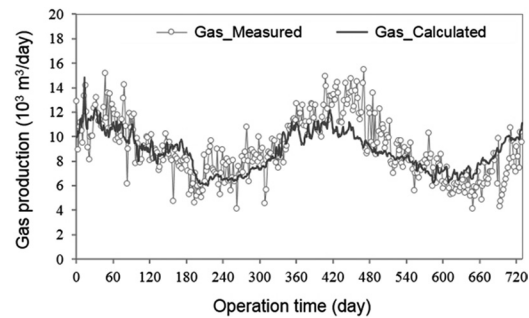


Fig. 6. Simulation results of gas production in the WWTP using by PKES.

3.2.3 하수처리장 GHGs 발생량 평가

동일한 모델링 결과로부터 활성슬러지(AS) 공정(포기조)에서 발생하는 CO_2 와 N_2O 및 혐기성소화(AD) 공정에서 발생하는 CO_2 와 CH_4 에 대한 GHGs 배출량을 계산한 결과를 Table 7과 Fig. 7에 나타내었다. 활성슬러지 공정에서 발생하는 CO_2 와 N_2O 는 각각 12,750과 40 m^3/day 이었으며, 혐기성소화 공정에서 발생하는 CO_2 와 CH_4 는 각각 3,050과 5,740 m^3/day 로 계산되었다. 하수처리 전 공정에서 발생하는 전체 가스 발생량에 대해 CO_2 가 73.2%로 가장 많았으며, CH_4 와 N_2O 가 각각 26.6과 0.2%를 차지하는 것으로 계산되었다. 하지만 GHGs 배출량은 가스별 지구온난화지수를 곱한 값($\text{ton-CO}_2/\text{day}$)으로 평가해야 하며, CO_2 , CH_4 와 N_2O 의

Table 7. Simulation results of gas production and GHGs emission as CO₂

Gas production (10 ³ m ³ /day)				GHGs emission (ton-CO ₂ /day)						
AS process		AD process		AS process			AD process			Total
N ₂ O	CO ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	Total	
0.04	12.75	3.05	5.74	21.7	23.3	45.0	5.6	87.9	93.5	138.5

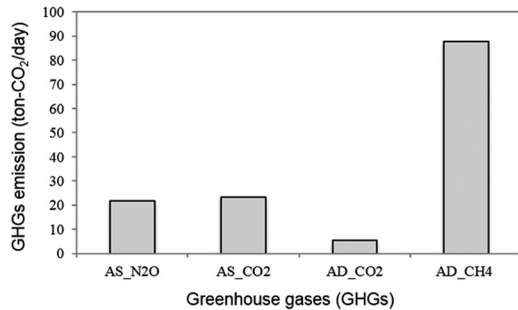


Fig. 7. Simulation results of GHGs emission as CO₂ in the WWTP using by PKES.

지구온난화지수는 각각 1, 23과 296으로 알려져 있다(IPCC, 2006). Table 7에 나타난 바와 같이 N₂O의 가스 발생량은 매우 적지만 높은 지구온난화지수로 인해 GHGs 배출량은 평균 21.7 ton-CO₂/day로 높게 나타났다. CO₂의 경우 가스 발생량은 전체의 3/4정도를 차지하지만 지구온난화지수가 1이기 때문에 GHGs 배출량은 활성슬러지와 혐기성소화 공정에서 각각 23.3과 5.6 ton-CO₂/day로 계산되었다. CH₄의 경우 가스발생량도 많고 지구온난화지수도 23으로 높기 때문에 GHGs 배출량이 평균 87.9 ton-CO₂/day로 가장 많은 것으로 계산되었다. 전체 GHGs 배출량인 138.5 ton-CO₂/day 중에서 활성슬러지 공정에서 45.0 ton-CO₂/day로 32.5 %, 혐기성소화 공정에서 93.5 ton-CO₂/day로 67.5 %를 배출하며, 가스별로는 N₂O, CO₂와 CH₄가 각각 15.6, 20.9와 63.5%를 차지하는 것으로 계산되었다.

본 연구와 동일한 하수처리장을 대상으로 한 Lee(2011)의 연구 결과에 의하면 전체 GHGs 배출량은 154.8 ton-CO₂/day이었으며, 활성슬러지 공정에서 66.6 ton-CO₂/day로 본 연구

보다 많았고 혐기성 공정에서 88.2 ton-CO₂/day로 본 연구와 거의 유사하였다. Lee(2011)의 경우 화학양론식에 의한 물질수지를 이용하여 계산함으로써 N₂O 발생량이 높게 평가되었다. MLE 공법 하수처리장을 대상으로 연구한 O 등(2009)의 결과에 의하면 유입 BOD부하량에 대한 CH₄ 발생원단위는 0.109 kg-CH₄/kg-BOD이었으며, 본 연구 결과는 0.126 kg-CH₄/kg-BOD로 다소 높게 계산되었다. 이는 MLE 공법에서의 탈질에 의한 유기물 소모가 대상 하수처리장에서는 없기 때문에 더 많은 CH₄가 발생된 것으로 사료된다. Van Hullea 등(2012)은 유입 TN부하량에 대한 N₂O 발생원단위로서 0.030 kg-N₂O/kg-TN 이하인 것으로 제시하였으며, 본 연구에서는 대상 하수처리장에서의 질산화가 완전히 일어나지 않고 탈질 공정이 없기 때문에 0.008 kg-N₂O/kg-TN로 낮게 나타났다. 결과적으로 하수처리장에서의 GHGs 배출량 저감을 위해서는 전체 GHGs 배출량의 2/3 정도를 차지하는 CH₄의 회수 및 자원화가 가장 중요한 요소임을 확인할 수 있었으며, N₂O의 경우 적은 발생량에도 불구하고 CO₂와 유사한 GHGs 배출원으로 계산됨으로써 특히 유입수 내 TN의 농도가 높거나 고도처리공법을 도입할 경우 N₂O 발생 억제 또는 발생량 감시와 제어가 하수처리장 설계 및 운전 시에 고려되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 활성슬러지 공정과 혐기성소화 공정을 포함하는 하수처리 전 공정에 대한 통합 모델을 구축하였으며, GHGs 발생량 평가를 위

한 가스 성분을 추가하였다. 또한 MS Excel과 VBA를 이용하여 동적 모델을 구동할 수 있는 부경엑셀시뮬레이터(PKES)를 구축하였다. 이들에 대한 검증 및 GHGs 배출량 평가 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 본 연구에서 구축한 시뮬레이터인 PKES와 기존 시뮬레이터인 Aquasim의 모의 결과 두 시뮬레이터로부터 계산된 유출수 농도가 거의 동일하게 나타남으로써 PKES의 수식과 개발된 VBA 프로그램이 하수처리장 모의에 유효함을 검증하였다.
2. 본 연구에서 제안된 하수처리장 통합모델에 대해 표준활성슬러지 공법으로 운전 중인 하수처리장의 실제 운전 자료에 대한 장기 연속 모델링을 통한 검증 결과 전체적으로 유출수의 실측 농도와 계산 농도가 비교적 근사하게 나타났으며, BOD, TSS, TN 및 TP에 대한 RMSE 값은 각각 1.9, 0.8, 1.6 및 0.2 mg/L로 기존 연구보다 낮게 나타나 하수처리장 통합모델의 활용성이 검증되었다.
3. 소화조 가스발생량은 약 8,790 m³/day로 실측값인 약 9,000 m³/day와 유사하게 계산되었으며, CH₄의 부피비도 65.3%로 실측치와 유사하였다. 또한 모델링 결과로부터 가스발생량과 지구온난화지수를 이용한 GHGs 배출량은 138.5 ton-CO₂/day로 계산되었다. 이중 활성슬러지와 혐기성 소화 공정에서 각각 32.5와 67.5%를 배출하였으며, 가스별로는 N₂O, CO₂와 CH₄가 각각 15.6, 20.9와 63.5%를 차지하는 것으로 계산되었다. 따라서 하수처리장에서의 GHGs 배출량 저감을 위해서는 CH₄의 회수 및 자원화가 가장 중요하며, 높은 지구온난화지수를 가지는 N₂O의 발생 억제 또는 발생량 감시와 제어가 하수처리장 설계 및 운전 시에 고려되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2011학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (C-D-2011-0851)

References

- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., and Vavilin, V. A. (2002) *Anaerobic Digestion Model No.1 (ADMI)*, IWA Scientific and Technical Report No. 13, IWA Publishing, London.
- Christoulas, D. G., Yannakopoulos, P. H., and Andreadakis, A. D. (1998) An Empirical Model for Primary Sedimentation of Sewage, *Environment International*, 24(8), pp.925~934.
- GRI (2010) *Application of Watershed Model in Total Maximum Daily Load*, Gyeonggi Research Institute(GRI), Suwon.
- Han, K. Y., Kim, J. S., Choi, H. G., and Kim, D. I. (2005) Analysis of Urban Inundation using Excel-VBA, *Korean Society Civil Engineers Annual Conference*, pp.2652~2655.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht M. V. (2000) *Activated sludge models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Scientific and Technical Report No.9, IWA Publishing, London.
- IPCC (2006) *Guideline for National Greenhouse Gas Inventories*, The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama.
- Jung, C. W. (2013) *Plant-wide model(Pukyong plant-wide model No.1) for Wastewater Treatment Plants*, Ph. D. thesis, Pukyong National University, Busan.
- KEI (2011) *A Study on the Improvement of Energy Management for Wastewater Utilities*, Korea Environment Institute(KEI), Seoul.
- Kim, S. H., Lee, D. W., and Kim, D. H. (2012) Performance Evaluation of Hybrid SBR Aerobic Digestion Combined with Ultrasonication by Using a Mathematical Model, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 26(6), pp.897~905.

- Kim, Y. J., Lee, J. Y. and Kang, Y. T. (2010) Study on Energy Independence Plan for Sewage Treatment Plant, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 22(1), pp.49~55.
- KIWE (2006) *Development of Advanced Treatment Process for Biosolids Reduction and Self-diagnosis and Management System in Sewage Treatment Plant*, Korea Institute of Water and Environment(KIWE), Daejeon.
- Lee, E. M. (2011) *Mass Balance-based Model for the Emission of Greenhouse Gas from Biological Wastewater Treatment Process*, Master's thesis, Pukyong National University, Busan.
- Lee, W. Y., Kim, M. H., Kim, Y. W., Lee, I. B., and Yoo, C. K. (2008) Sensitivity Analysis and Parameter Estimation of Activated Sludge Model Using Weighted Effluent Quality Index, *J. of Institute of Control, Robotics and Systems*, 14(11), pp.1174~1179.
- Metcalf & Eddy Inc. (2003), *Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse*, 4th edition, revised by George Tchobanoglous, McGraw-Hill Inc., New York.
- O, W. K., Choo, Y. Y., Jung., Y. M., Kim, K. K., and Jin, B. B. (2009) Estimating the Greenhouse Gases Emission Rates and Their Emission Factors of a Wastewater Treatment Plant with an MLE Process, *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, 12(2), pp.87~95.
- Oh, T. S., Kim, M. J., Lim, J. J., Kim, Y. S., and Yoo, C. K. (2011) Estimate and Environmental Assessment of Greenhouse Gas(GHG) Emissions and Sludge Emissions in Wastewater Treatment Processes for Climate Change, *Korean Chemical Engineering Research*, 19(2), pp.187~194.
- Rieger, L., Koch, G., Kuhni, M., Gujer, W., and Siegrist, H. (2001), "The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No.3," *Water Research*, 35, p.3887~3903.
- Ruano, M. V., Serralta, J., Ribes, J., Garcia-Usach, F., Bouzas, A., Barat, R., Seco, A. and Ferrer, J. (2012) Application of the General Model 'Biological Nutrient Removal Model No. 1' to Upgrade Two Full-scale WWTPs, *Environmental Technology*, 33(9), pp.1005~1012.
- Shahabadi, M. B., Yerushalmi, L., and Haghghat, F. (2010) Estimation of Greenhouse Gas Generation in Wastewater Treatment Plants -Model Development and Application, *Chemosphere*, 78, pp.1085~1092.
- Shin, K. S. (2006) *Evaluation Methodology of Mass Balance Analysis for Wastewater Treatment Plants*, Master's thesis, Donkuk University, Seoul.
- Snowling, S., Monteith, H., Schraa, O., and Andres, H. (2006) Modeling Greenhouse Gas Emissions from Activated Sludge Processes, *The Water Environment Federation's 79th Annual Technical Exhibition & Conference (WEFTEC, 06)*, pp.7206~7212.
- Van Hullea, S. W. H., Callensa, J., Mampaeyb, K. E., van Loosdrehtc M. C. M., and Volckeb, E. I. P. (2012) N₂O and NO Emissions during Autotrophic Nitrogen Removal in a Granular Sludge Reactor -a Simulation Study, *Environmental Technology*, 33(20), pp.2281~2290.