Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 32(2), pp.37-48 (2024)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2024.32.2.37

Original Paper

시뮬레이터(EQPS)를 이용한 탄소발자국 최소화 운전 방안에 대한 연구

한지수[a], 이제승[a], 이병희[b†]

A study to find the operation conditions to minimize carbon footprint using a simulator(EQPS)

Jisoo Han[a], Jeseung Lee[a], Byonghi Lee[b†]

(Received: Apr. 25, 2024 / Revised: Jun. 21, 2024 / Accepted: Jun. 21, 2024)

ABSTRACT: Wastewater treatment plants (WWTPs) are obligated to reduce carbon emissions as a part of public sector greenhouse gas (GHG) emission reduction targets. However, Sewage Statistics(2022) shows that CO_2 emissions per wastewater treatment volumes have decreased by only 3.03 % compared to 2020, which is far from enough to meet the Nationally Determined Contribution (NDC) targets. This study aimed to find operational conditions of biological reactors that minimize total carbon footprint (CFP). Total CFP considers both direct emissions from biological processes and indirect emissions from energy consumption. A study was conducted using a computer simulation program which is called as EQPS for a 4-stage BNR WWTP. The results showed that total CFP was reduced by 10.97% compared to the design condition when the mixed liquor recirculation (MLR) was set to 100 % of the influent flow. The N_2O emission factor (EF) of the target WWTP was calculated to be 0.138-0.199 %, which is significantly lower than the IPCC default value of 1.6 %. This study proposes a method to minimize total CFP in WWTPs by optimizing biological reactor operation and emphasizes the need for further research on N_2O emission reduction.

Keywords: Biological Nutrient Removal(BNR), Carbon Footprint(CFP), Emission Factor, Nitrous Oxide, Simulator

초 록: 하수처리장은 공공부문 온실가스 목표 관리제 대상 시설로 탄소 배출량 감축이 시급하다. 하지만 최근 하수도 통계에 의하면 하수처리량에 대한 CO_2 배출량은 2020년 대비 3.03 % 감소하였으며 이는 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 충족하기에는 상당히 부족한 수치이다. 생물반응조에서 발생하는 직접 배출 온실가스와 하수처리과정에서 이용되는 에너지로 인한 간접배출 온실가스 두 가지를 모두 고려한 총 CFP (Carbon Footprint)를 최소화하는 생물반응조 운전 조건을 찾기 위해 EQPS라는 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 연구를 수행하였다. 4-stage BNR 공법 하수처리장 생물반응조 내부반송율을 유입 수량의 100 %로 설정했을 때 총 CFP가 설계 운전 조건 대비 약 10.97 % 감소함을 확인하였다. 또한 대상 처리장의 N_2O EF(Emission Factor)를 계산한 결과 0.138~0.199 %로 IPCC에서 제시한 기본값 1.6 %보다 낮은 값임을 파악하였다. 본 연구는 생물반응조 운전 조건 최적화를 통해 하수처리시설의 총 CFP를 최소화하는 방안을 제시하며, N_2O 배출 감소를 위한 추가 연구의 필요성을 강조하고 있다.

주제어: 배출계수, 생물학적 고도 처리, 시뮬레이터, 아산화질소, 탄소발자국

[a] 경기대학교 대학원 환경에너지공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University)
[b] 경기대학교 사회에너지시스템공학과 교수 (Professor, Department of Civil & Energy System Engineering, Kyonggi University)
† Corresponding author(e-mail: bal@kgu.ac.kr)

1. 서 론

2023년 국가 온실가스 감축목표 (NDC, Nationally Determined Contribution) 종합 보고서에 의하면 지구 온난화로 인한 온도 상승을 1.5 °C 이하로 유지하기 위해서는 2035년까지 온실가스 배출량을 2019년 대비 60% 감축해야한다[1]. 우리나라는 2030년까지 2018년 대비 40 % 감축한 436.6 millitCO_2eq를 배출하겠다는 목표를 세워 2020년 12월 30일 유엔기후변화협약 사무국에 제출했는데, 이는 보고서에서 제시한 감축 목표치를 달성하기엔 부족한 수준이다[2]. 공공부문 온실가스 목표 관리제 대상 시설 중 하나인 공공하수처리시설은 에너지 다소비 시설로 온실가스 저감이 수행되어야하는데[3], 하수도 통계에서 제시한 최근 3년간 공공하수처리시설의 하수처리량에 따른 CO_2 배출량은 2020년 0.231 kgCO_2/m^3, 2021년 0.248 kgCO_2/m^3 그리고 2022년 0.224 kgCO_2/m^3이다. 2022년 0.224 kgCO_2/m^3은 2020년 0.231 kgCO_2/m^3 대비 약 3.03 % 감소한 수치로 2018년 대비 2030년 국가온실 가스 40 % 감축 목표 충족하기에 매우 미흡한 것으로 확인되었다[4].

하수처리시설에서 발생하는 온실가스는 생물학적 처리과정에서 발생하는 직접배출 온실가스인 N_2O, CH_4와 에너지 사용에 의한 간접배출 온실가스 CO_2가 있다. 생물학적 질소 제거 과정에서 발생하는 N_2O의 지구온난화 지수(GWP, Global Warming Potential)는 CO_2의 약 273배로 이는 하수처리시설 탄소발자국(CFP, Carbon Footprint)에 매우 큰 영향을 미친다[5]. 하수처리시설에서 발생하는 CFP를 감축하기 위해서는 하수처리과정에서 사용되는 에너지 효율을 향상시킴과 동시에 N_2O 생성을 최소화하는 전략을 동시에 고려해야 한다.

N_2O는 불완전한 질산화 과정에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있으며[6], 또한 낮은 DO(Dissolved Oxygen) 농도와 많은 공기주입량이 N_2O 생성을 증가시킨다는 연구가 있어 적정 수준의 공기를 주입하는 것이 중요하다[7,8]. 또한 생물반응조 호기조의 송풍량은 처리장 전력량의 50 % 이상을 차지한다는 연구 결과가 있어[9], 반응조 공기주입량을 조정하여 적정 DO 농도를 유지하면 처리장 CFP 최소화에 도움이 될 것이다.

본 연구는 하수처리시설 생물반응조에서 발생하는 CFP를 파악하기 위해 시뮬레이션 프로그램인 EQPS (Effluent Quality Prediction Program)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다[10]. 이 프로그램은 CFP를 하수처리 생물학적 처리 과정에서 발생하는 직접 배출 온실가스 N_2O, CH_4와 에너지 사용으로 인한 간접배출 온실가스 CO_2를 구분하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 직접 배출 온실가스와 간접배출 온실가스를 모두 고려한 총 CFP와 생물학적 처리 과정에서 발생하는 N_2O만 고려한 N_2O CFP로 구분하였고 이를 tCO_2eq/day로 나타냈다. 발생량을 보다 정확하게 계산하기 위해 반류수의 영향이 포함된 생물반응조 유입수 특성을 시간대별로 파악하였는데, N_2O 발생량에 영향을 주는 생물반응조의 운전 조건인 DO 농도, 내부반송율 (Mixed Liquor Recirculation) 및 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) 농도를 변경하여 생물반응조 총 CFP가 최소화된 운전 방안을 제시하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 생물반응조가 복개되어 배출가스 포집이 용이한 경기도 남부에 위치한 하수처리시설을 연구대상으로 지정하였다. 연구대상 처리시설에 대한 설계 및 운전에 관한 자세한 사항은 참고문헌에 제시되어있다[11]. 연구 대상 처리시설의 생물학적 처리 공정은 일차침전지-전무산소조-혐기조-무산소조-호기조-이차침전지로 구성되어있고 생물반응조 유입수는 전무산소조, 혐기조로 1:9의 비율로 주입된다. 연구대상 처리시설에 있어서 하절기 유입 부하는 설계 부하의 90 % 이하이고 호기조 말단의 NH_3-N (암모니아성 질소)의 농도는 0.5 mg/L 이하로 질산화가 정상적으로 이루어지고 있다. 일반적으로 생물반응조 설계는 동절기 반응조 수온을 기준으로 하므로 질산화가 원활한 하절기에는 생물반응조 운전 인자를 조정하여도 질산화에 대한 영향을 적게 주어 T-N (총 질소) 방류수 수질 기준을 준수할 것이며 이를 통한 에너지 감축 효과가 있을 것으로 기

대된다.

대상 연구 시설의 생물반응조 설계 운전 조건은 호기조 DO 농도는 2.0 mg/L, 내부반송율은 유입 하수량의 285 % 그리고 MLSS 농도는 3,200 mg/L이다. 시뮬레이션에서는 각 생물반응조 운전 조건을 변경하였다. Case 1은 내부반송율과 반응조 MLSS 농도를 설계 운전 조건인 285 %와 3,200 mg/L로 각각 고정하였고 호기조 DO 농도를 변경하였다. 호기조 DO 농도는 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 그리고 3.0 mg/L로 설정하였는데, 질산화를 위한 최소 DO 농도는 1.0 mg/L로 설정하였다. Case 2는 호기조 DO 농도와 반응조 MLSS 농도를 설계 운전 조건인 2.0 mg/L와 3,200 mg/L로 각각 고정하고 내부반송율을 조정하였다. 내부반송율은 내부반송 펌프를 가동하지 않은 경우를 포함하여 유입 수량의 0, 100, 200, 285 % 그리고 펌프 최대 가동 용량인 300 %를 최대치로 설정하였다. 마지막으로 Case 3은 호기조 DO 농도와 내부반송율을 설계 운전 조건 2.0 mg/L와 유입 수량의 285 %로 고정하고 반응조 MLSS 농도를 변화시켰는데 2,000, 2,500, 2,800, 3,200 그리고 3,500 mg/L로 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 하수처리시설의 이차침전지는 호퍼가 전단에 위치하여 MLSS 농도 상승 시 슬러지 부상으로 SS (Suspended Solid) 유출이 발생해서 방류수 수질 악화를 초래하기 때문에 시뮬레이션 최대 MLSS 농도는 3,500mg/L로 설정하였다[12].

각 Case의 세부적인 운전 조건과 반응조 조건은 Table 1에 제시하였다. 이차침전지 외부반송율(RAS, Return Activated Sludge)은 설계 운전 조건인 67 %로 고정하였으며 반응조 온도는 수분석 일자 평균 수온인 22.3 °C로 설정하였다. 시뮬레이션을 수행하여 각 Case 별 배출수 NH_3-N 및 T-N 농도와 N_2O/CO_2 CFP 그리고 생물반응조 총 CFP를 파악하였다.

2.1. 연구대상 처리시설 생물반응조 유입수 분석

생물반응조 유입수인 일차침전지 처리수 특성을 파악하기 위해 화학적 산소요구량(COD, Chemical Oxygen Demand), 질소 및 인 농도를 측정하였다. COD는 화학 산화제를 사용하기 때문에 가장 정확도 높은 유기물 총량을 제시할 수 있어 생물학적 하수처리 모델링에서 유기물의 지표로 이용된다[13]. 본 연구에서는 유기물 분획을 물리 화학적 방법 (Chemical-Physical Method)을 이용하여 파악하였다[14]. 해당 분석법에서는 COD를 tCOD (total COD), fCOD (Filtered COD) 그리고 ffCOD (Filtered Flocculated COD) 세 가지로 구분한다. 각 성분이 차지하는 비율에 의해 유기물과 영양염류의 제거 정도에 차이가 있어 정확한 시뮬레이션을 위해서는 COD 분획을 파악해야 한다. 생물반응조 유입수 수분석은 2023년 6월 8~9일, 18~19일 그리고 7월 3~4일 오전 08:00부터 익일 오전 07:00까지 매시간 1회씩 24개의 시료를 채취했으며 분석은 총 3회에 걸쳐 진행되었다. 유입수 특성 파악을 위한 수분석 항목 및 분석 횟수는 Table 2에 제시했다.

2.2. 시뮬레이션 프로그램 모델 설정

본 연구는 생물학적 처리 모델링이 가능한 시뮬레이션 프로그램 EQPS를 사용하였다. 생물학적 모델 ASM (Activated Sludge Model) No. 1은 IWA (International Water Association)의 전신인 IAWPRC

Table 1. Bioreactor Operation Conditions in each Simulation Case

Bioreactor Operation Conditions	Case 1 (DO)					Case 2 (MLR)					Case 3 (MLSS)				
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
DO concentration (mg/L)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0						2.0				
MLR ratio (%)			285			0	100	200	285	300			285		
MLSS concentration (mg/L)						3200					2000	2500	2800	3200	3500
RAS ratio (%)															
Temperature (°C)															

Note: RAS is Return Activated Sludge

(International Association on Water Pollution Research and Control)에서 1987년에 출간한 Scientific and Technical Report에서 처음 소개되었는데[13], 이는 유기물과 질소 성분을 생물학적으로 제거하는 단순한 모델이다. 이후 모델링에 대한 다양한 연구가 진행되고 계산 속도가 향상되며 시간이 오래 걸리는 복잡한 수식을 포함한 전체 처리장 시뮬레이션도 가능해졌다. 온실가스 발생량에 대한 관심이 높아진 2010년도에는 온실가스 발생량 계산이 가능한 모델이 개발되었는데[15], EQPS의 Sumo 4N 모델도 이 중 하나이다. 이 모델은 생물반응조에서 직접 배출되는 온실가스와 간접 배출되는 온실가스를 이산화탄소 환산 계수로 계산할 수 있고, 4단계 질산화와 4단계 탈질 과정 등 현재까지 N_2O 발생 기작에 대한 최신 연구가 반영된 114개의 반응과 86개의 구성요소로 이루어져있다[16,17]. EQPS는 온실가스 배출량 산정에 대한 연구 및 서울시 4개 처리장 용량 산정에 사용되었다[18,19].

간접배출 온실가스 환산 계수는 2021년 기후 투명성 보고서에 제시된 값 416 gCO_2eq/kW를 이용하였다[20]. 펌프 효율은 연구대상 처리시설 실시설계 보고서(부록)에 제시된 내부반송 펌프 35.0 %, 외부반송 펌프는 47.5 % 그리고 그 외 값은 모델 기본 값을 사용하였다.

2.3. 생물반응조 시뮬레이션 입력값

Fig. 1은 연구 대상 처리시설 생물반응조 EQPS

Table 2. Primary Effluent Analysis Plan under Study

Parameter		Analytic Method	Frequency	Note
Total Suspended Solid (TSS)		The water pollution standard method ES 04303.1b	every 1 hour	VSS: every 4 hours
Biochemical Oxygen demand (BOD_5)		The water pollution standard method ES 04305.1c	every 1 hour	
Chemical Oxygen Demand	tCOD	Hach Method 8000	every 1 hour	
	fCOD		every 2 hour	
	ffCOD			
Total Nitrogen (T-N)		Hach Method 10072	every 1 hour	
Total Phosphorus (T-P)		Hach Method 10127	every 1 hour	
Ammonia (NH_3-N)		Hach Method 8038	every 1 hour	
Phosphate (PO_4-P)		Hach Method 8048	every 2 hour	

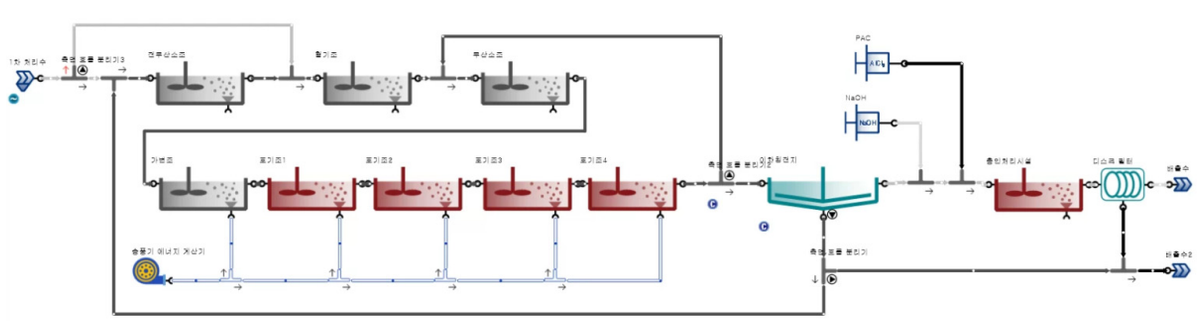

Fig. 1. Schematic diagram of the 4-stage BNR configuration bioreactor in EQPS.

공정도이다. 생물반응조 운전에서 발생하는 온실가스를 계산하기 위해 일차침전지, 농축기, 탈수기와 같은 단위 공정은 제외하였다. 농축 및 탈수 과정에서 발생한 여액 등의 반류수는 생물반응조 유입수 수분석에 포함이 되어있으므로 시뮬레이션에서는 이를 고려하지 않았다. 각 단위 공정의 반응조 및 이차침전지 제원은 Table 3에 제시하였다.

Table 4는 시뮬레이션에 입력한 시간대별 생물반

Table 3. Physical Characteristics of Reactors and Secondary Clarifier

Type		Volume	Tank depth	Surface Area
Unit		m^3	m	m^2
Bioreactor	Preanoxic	990	5.5	-
	Anaerobic	1,980	5.5	-
	Anoxic	5,610	5.5	-
	Aerobic	10,230	5.5	-
Secondary clarifier		8,664	3.8	2.280

Table 4. Dynamic Input Values of Influent to Bioreactors under Study

Name	Characteristics						Fraction				
	Flow rate	TCOD	TSS	T-N	T-P	Temp.	VSS/TSS	fCOD/tCOD	ffCOD/tCOD	NH_X-N/TN	PO_4-P/TP
Unit / Time	m^3/d	$gCOD/m^3$	mg/L	gN/m^3	gP/m^3	°C	%	%	%	%	%
8:00	42,087	131.2	50.8	30.2	2.8	22.3	85	45.4	37.6	76.4	71.4
9:00	43,296	147.3	55.2	34.7	2.9	22.3	85	47.2	37.5	75.0	79.3
10:00	44,208	164.7	60.6	39.0	3.6	22.3	85	48.3	37.2	77.2	72.2
11:00	45,041	190.8	70.2	45.0	4.2	22.3	85	48.3	40.3	68.9	66.7
12:00	45,113	211.9	76.4	44.3	4.0	22.3	85	49.4	43.6	65.8	72.5
13:00	45,736	213.5	77.6	35.2	3.9	22.3	85	48.9	44.1	73.9	71.8
14:00	43,897	213.8	77.9	30.5	3.6	22.3	85	48.8	44.8	80.7	72.2
15:00	43,824	220.7	76.4	32.3	3.6	22.3	85	51.6	43.9	68.7	69.4
16:00	43,361	244.5	86.3	31.0	3.4	22.3	85	50.5	40.0	69.7	67.6
17:00	43,160	239.2	82.4	31.5	3.1	22.3	85	51.8	42.9	61.6	65.6
18:00	42,767	235.0	79.2	28.8	3.0	22.3	85	53.0	45.7	70.9	63.3
19:00	43,863	233.7	77.9	28.0	2.9	22.3	85	53.6	44.5	70.4	62.1
20:00	44,472	234.7	78.1	26.8	3.0	22.3	85	53.6	42.9	74.6	56.7
21:00	45,135	240.7	80.8	26.7	2.9	22.3	85	53.2	42.4	71.6	56.9
22:00	43,256	249.0	85.0	28.7	2.8	22.3	85	52.3	41.6	65.6	57.1
23:00	43,928	247.8	85.2	27.3	2.7	22.3	85	51.9	41.2	66.4	57.4
0:00	42,553	239.7	80.8	27.0	2.8	22.3	85	53.0	41.9	67.7	53.6
1:00	42,784	223.7	73.9	25.7	2.6	22.3	85	54.0	42.9	69.9	57.7
2:00	42,455	213.5	71.0	26.7	2.6	22.3	85	53.6	42.9	70.1	57.7
3:00	38,553	205.8	73.2	32.0	2.7	22.3	85	50.1	41.4	60.2	55.6
4:00	35,865	187.3	68.0	31.2	2.6	22.3	85	49.0	42.0	61.3	57.7
5:00	34,816	173.7	64.5	24.2	2.5	22.3	85	47.7	42.6	78.0	56.0
6:00	40,431	152.7	56.0	24.3	2.4	22.3	85	48.5	45.4	75.8	54.2
7:00	42,600	137.7	48.6	31.3	2.3	22.3	85	50.5	48.6	63.2	54.3

응조 유입수 농도와 COD 분획이다. 유입수 농도와 COD 분획은 생물반응조 유입수의 수분석을 3회 수행한 값의 평균을 입력하여 계산하였다. 그 중 TSS는 수분석 결과값이 아닌 COD 분획으로 계산된 값이다. 수분석 TSS 값은 해당 값이 맞는지 이중으로 확인하기 위한 용도로 사용하였다. 유량은 연구 대상 처리시설 유입수 유량계와 반류수 유량계 합이다.

3. 연구결과

3.1. 연구대상 처리시설 생물반응조 유입수 수분석 결과

연구대상 하수처리시설의 생물반응조 유입수를 24시간동안 매시간 채수를 진행하였다. 채수는 총 3회 진행되었으며 건기에 수행하였다. Fig. 2는 연구대상 처리시설 생물반응조의 유기물질 수분석 평균값을 시간대별로 나타냈다. 유기물 성분은 24시간동안 농도 변동 폭을 보이는데 저녁 시간대에 증가하는 경향을 확인할 수 있다. tCOD 농도는 08:00에 131.2 mg/L 상대적으로 저농도이고 22:00에 249.0 mg/L로 상대적으로 고농도이다. BOD_5는 이와 유사한 패턴을 보이며, 09:00에 54.7 mg/L로 저농도이고 이는 점차 증가하여 23:00에 126.4 mg/L로 고농도이다. 반면 TSS 농도는 앞서 확인한 유기물 농도 변화와 비교해 변동 폭이 적고 다른 경향을 띄고 있는데, 07:00에 저농도 59.0 mg/L, 12:00에 고농도 84.0 mg/L임을 확인하였다. 이는 생물반응조 유입수가 일차침전지에서 고형물이 제거된 처리수이기 때문이라 판단된다.

영양염류 성분의 수분석 평균값은 Fig. 3에서 확인할 수 있는데, 11:00에 T-N, T-P가 각각 45.0 mg/L, 4.2 mg/L로 하루 중 가장 고농도임을 인하였다. 유기물 성분과 영양염류 성분의 피크 시간대는 각각 22:00~23:00와 11:00로 큰 차이가 있는데, 이러한 현상이 발생하는 이유는 해당 하수처리시설 반류수가 유입되는 시간을 통해 확인할 수 있었다. 대상 처리시설은 반류수의 일평균 유량은 63.9 m^3/h이나 영양염류 성분의 농도가 상대적으로 높은 12:00~13:00 시간대에는 91.0~118.7 m^3/h로 일평균 이상의 반류수가 유입되는 것을 확인하였다.

3.2. 생물반응조 운전 조건 변경에 따른 시뮬레이션 결과

3.2.1. 배출수 질소 성분 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 계산된 배출수 T-N 농도를 확인하였을 때, 생물반응조 설계 운전 조건(호기조 DO 농도 2.0 mg/L, 내부반송율 유입 수량의 285 % 그리

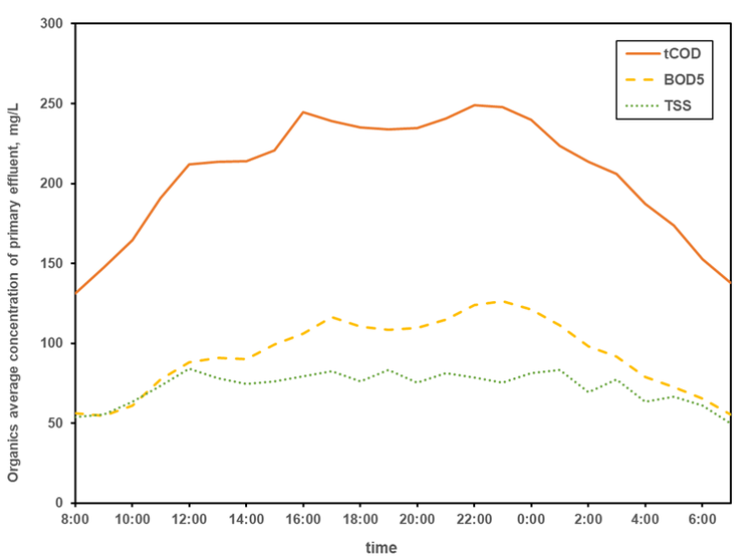

Fig. 2. Time series primary effluent average organics(tCOD, BOD_5, TSS) concentration under study.

고 MLSS 농도 3,200 mg/L)에서 호기조 DO 농도를 변화시킨 Table 1의 Case 1과 반응조 MLSS 농도를 변화시킨 Case 3은 배출수 T-N 농도에 큰 영향이 없음을 확인하였다. 모든 Case에서 NH_3-N의 농도는 0.2 mg/L 이하로 안정적인 질산화가 이루어졌다. Fig. 4는 설계 운전 조건에서 내부반송율에 변화를 준 Case 2의 시간대별 배출수 T-N 시뮬레이션 결과를 제시했다. 내부반송율이 0 %인 경우를 제외하고는 모두 방류수 배출수 기준 20 mg/L 이하를 만족하였다. 07:00~12:00까지는 내부반송율이 유입 수량의 100 %일 때, 그 외 시간대는 내부반송율이 최대치인 유입 수량의 300 %일 때 배출수 T-N 농도가 가장 낮았다.

수분석 결과 생물반응조 유입수 영양염류의 농도가 높은 시간대인 11:00에 배출수 T-N 농도가 가장 높았으며 해당 시간대의 생물반응조 유입수 질소 제거 효율은 58~60 %이다. 고농도의 유기물 성분이 유입되는 시간대인 22:00~23:00은 69~82 %로 제거 효

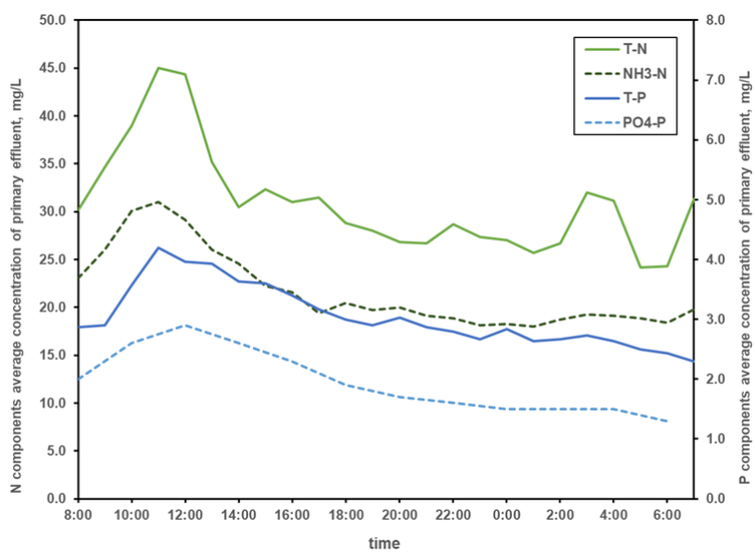

Fig. 3. Time series primary effluent average nutrients(T-N, T-P, NH_3-N, PO_4-P) concentration under study.

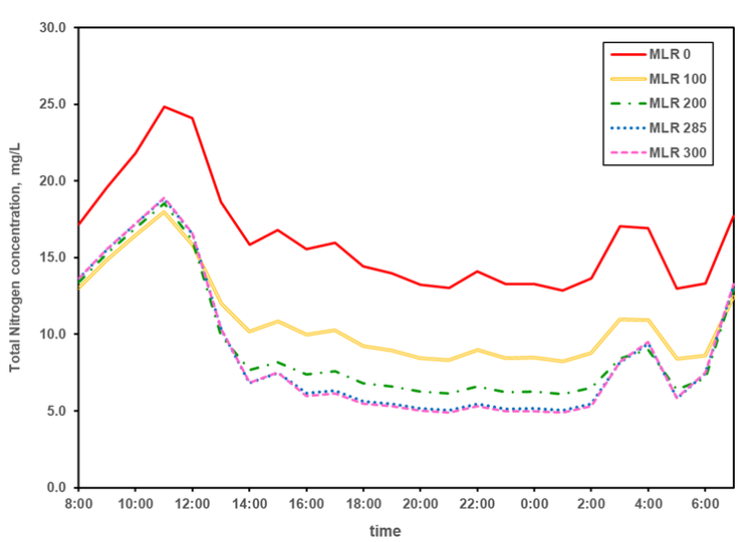

Fig. 4. Time series effluent T-N concentration simulation results according to MLR change.

율에 차이가 있음을 파악하였다. 생물반응조 반류수 유입 시간대를 고농도의 유기물이 유입되는 22:00~23:00 시간으로 바꾸어 가동한다면 공정이 운영되는 모든 시간동안 안정적인 질소 제거 효율을 유지 할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2.2. 생물반응조 운전 조건 변경에 따른 N_2O 발생량 계산 결과

N_2O EF (Emission Factor)는 처리 공정, 수온 등 다양한 인자에 영향을 받기 때문에 동일한 공정임에도 처리장 별 편차가 상당한 것으로 알려져 있다. 이는 대상하수처리시설 유입수 T-N 농도 대비 일평균 생물반응조 발생 N_2O 총량 (kg/day)으로 계산한다[21,22]. Fig. 5는 앞서 파악한 생물반응조 운전 조건별 시뮬레이션을 통해 파악한 생물반응조 N_2O 발생량 (kg/day)과 N_2O EF를 제시하였다. 본 연구에서 유입수 T-N 농도는 일차침전지 처리수가 아닌 연구 대상 처리시설 유입수 채수 일자 수분석 값의 평균을 이용하여 계산하였는데, 이는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시된 EF 값이 하수처리장 유입하수 T-N 총량을 기준으로 하기 때문이다. 설계조건 (DO 농도 2.0 mg/L, 내부반송율 285 %, MLSS 농도는 3,200 mg/L)으로 시뮬레이션을 수행시 계산된 생물반응조 N_2O 발생량은 3.269 kg/day, N_2O EF는 0.139 %이다. 이는 2019년 IPCC에서 제시한 하수처리시설 N_2O EF 기본 값인 1.6 %보다 상당히 낮은 값이다[21].

Case 1에선 DO 농도를 1.5 mg/L로 낮추어 시뮬레이션을 수행하였을 때 생물반응조 N_2O 일일 발생량이 3.254 kg/day로 가장 낮았다. 일일 N_2O 발생량은 DO 농도가 증가할수록 점차 증가함을 확인하였는데, 이는 반응조에 액체상으로 존재하는 N_2O가 폭기 과정에서 기체상으로 변환되고 대기 중으로 배출되기 때문이라 판단했다[23]. 이를 통해 적정량의 공기 공급량이 직접 배출 N_2O를 줄일 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

Case 2에서는 방류수 T-N 법적 기준을 만족하지 못한 내부반송율이 유입 수량의 0 %인 경우를 제외하고 결과를 확인하였다. N_2O EF는 내부반송율이 유입 수량의 100 %일 때 0.199 %로 가장 높고, 300 %인 경우가 0.138 %로 가장 낮았는데, 이는 내부반송율 증가에 따라 질소 제거량이 많아지고 이에 따라 발생되는 N_2O 총량이 감소되어 발생된 현상으로 파악된다. MLSS 농도 변화에 의한 N_2O EF 변화는 본 연구에서 미비함을 확인하였다. 이는 대상 하수처리시설이 질산화가 원활하였기 때문에 MLSS 농도가

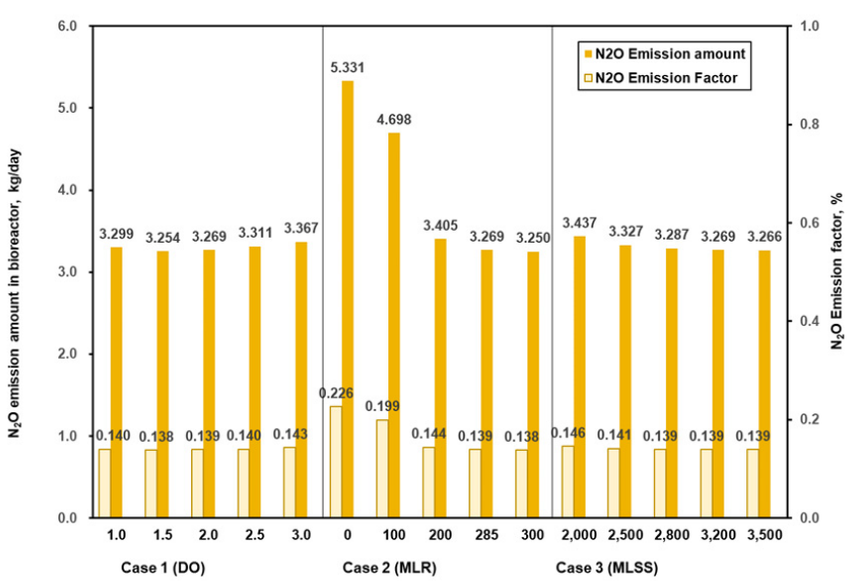

Fig. 5. N_2O emission amount in bioreactor and emission factor in each cases.

N_2O 생성에 큰 영향을 주지 못하였던 것으로 판단된다. 추후 수온이 낮아 질산화에 어려움을 겪는 동절기에 있어서 MLSS 농도 변화에 의한 CFP 변화에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3.2.3. 생물반응조 CFP 시뮬레이션 결과

Table 5는 생물반응조 운전 조건 변화에 대한 각 Case 별 CFP 시뮬레이션 결과를 직접배출 온실가스인 N_2O/CH_4와 간접배출 온실가스 CO_2 그리고 이를 모두 합친 총 CFP로 구분하여 제시하였다. 설계 운전 조건인 MLSS 농도 3,200 mg/L, DO 농도 2.0 mg/L, 유입수에 대한 내부반송율 285 %로 시뮬레이션을 수행하였을 때, N_2O CFP는 1.460 tCO_2eq/day, 생물반응조 총 CFP는 5.268 tCO_2eq/day임을 확인하였다.

N_2O CFP는 설계 운전 조건에서 호기조 DO 농도를 1.5 mg/L, 유입수에 대한 내부반송율을 300 % 그리고 MLSS 농도 3,500 mg/L로 바꾸었을 때 각각 1.453, 1.452 및 1.457 tCO_2eq/day로 각 Case 별 운전 조건에서 N_2O 발생량이 낮음을 확인하였다. 간접배출 CO_2까지 모두 고려한 총 CFP 시뮬레이션 결과는 호기조 DO 농도가 1.0 mg/L, 내부반송율 100% 그리고 MLSS 농도 2,000 mg/L일 때 각각 5.092, 4.698 및 5.142 tCO_2eq/day이었고, 총 CFP가 최소화되는 운전 조건은 N_2O CFP와는 다름을 확인하였다. 이를 통해 하수처리시설의 CFP를 줄이기 위해서는 단순히 직접배출 N_2O 발생량을 감축하는 것이 아닌 간접배출 온실가스 CO_2를 모두 고려한 총 CFP가 최소화된 운전 방안이 제시되어야 함이 확인 되었다.

이 때 총 CFP가 최소화된 운전 조건인 내부반송율 100 %인 경우, 설계 운전 조건과 비교해 생물반응조 총 CFP를 약 10.82 % 감축할 수 있을 것으로 기대된다. DO 농도를 1.0 mg/L로 조정한 경우 약 3.34 %, MLSS 농도를 2,000 mg/L로 조정한 경우 약 2.39 %의 총 CFP를 감축할 수 있어 내부반송 펌프 유량비를 조정하는 것에 비해서는 CFP 감축 효과가 미비함이 확인되었다.

Table 5. N_2O, CH_4, CO_2 and Total CFP Simulation Results in Bioreactor at each Simulation Case

Case	Bioreactor conditions		CFP per day (unit: tCO_2eq/day)			
			Direct emission		Indirect Emission	total
			N_2O	CH_4	CO_2	
1-1	DO (mg/L)	1.0	1.473	0.126	3.493	5.092
1-2		1.5	1.453	0.116	3.590	5.160
1-3		**2.0***	**1.460**	**0.112**	**3.697**	**5.268**
1-4		2.5	1.476	0.109	3.818	5.403
1-5		3.0	1.500	0.107	3.959	5.566
2-1	MLR (%)	0	2.292	0.224	2.842	5.357
2-2		100	1.669	0.137	2.892	4.698
2-3		200	1.512	0.122	3.182	4.816
2-4		**285***	**1.460**	**0.112**	**3.697**	**5.268**
2-5		300	1.452	0.110	3.819	5.381
3-1	MLSS (mg/L)	2,000	1.540	0.102	3.499	5.142
3-2		2,500	1.484	0.107	3.580	5.171
3-3		2,800	1.469	0.109	3.629	5.208
3-4		**3,200***	**1.460**	**0.112**	**3.697**	**5.268**
3-5		3,500	1.457	0.113	3.746	5.317

Note: * indicates design condition

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 하수처리 시뮬레이션 프로그램인 EQPS를 이용하여 4-stage BNR 공법 생물반응조에서 발생하는 직접 배출 온실가스와 전력사용량 간접 배출 온실가스를 모두 고려한 생물반응조 총 CFP 최소화 운전 방안을 파악하였다. 이를 위해 대상 하수처리시설 생물반응조 유입수 특성을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 생물반응조 운전 조건은 N_2O 생성에 영향을 주는 인자로 알려진 호기조 DO 농도, 내부반송율 그리고 MLSS 농도에 변화를 주었다. 시뮬레이션 결과로 배출수 T-N 농도와 각 Case 별 CFP를 파악해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 연구대상 처리시설 생물반응조 유입수의 유기물 성분은 tCOD가 08:00에 131.2 mg/L, BOD_5가 09:00에 54.7 mg/L로 상대적으로 저농도이고 tCOD는 22:00 249.0 mg/L, BOD_5는 23:00 126.4 mg/L로 고농도임을 확인하였다. 이와 다르게 영양염류 성분 T-N, T-P는 11:00에 각각 45.0, 4.2 mg/L로 고농도인데 이는 반류수 유입 시간으로 인해 발생한 차이로 확인되었다. 유기물이 고농도인 시간대와 영양염류 농도가 고농도인 시간대의 질소 제거 효율은 각각 69~82 %. 58~60 %로 큰 차이가 있는데 반류수 펌프의 가동 시간을 유기물이 고농도인 시간대 22:00~23:00로 변경한다면 질소 제거 효율 변화 폭이 줄어들 것으로 기대된다.
2) 설계 조건(MLSS 농도 3,200 mg/L, DO 농도 2.0 mg/L, 유입수에 대한 내부반송율 285 %)으로 시뮬레이션을 수행시 생물반응조 총 CFP는 5.268 tCO_2eq/day으로 나타났다. 내부반송율을 100 %로 시뮬레이션을 수행하였을 때 총 CFP는 4.698 tCO_2eq/day로 최소화할 수 있었다. 설계 조건과 비교해 10.97 % 감축 효과가 있을 것으로 기대된다. 연구대상 처리시설에서는 DO 농도, MLSS 농도 변화로 인한 총 CFP 감축 효과는 크지 않음이 확인되었다.
3) 총 CFP는 내부반송 펌프 유량비 100 %의 조건으로 시뮬레이션을 수행하면 4.698 tCO_2eq/day로 최소화되었으나, N_2O CFP는 내부반송 펌프 유량비 300 %로 시뮬레이션 시 1.452 tCO_2eq/day로 최소화할 수 있음을 확인하였다. 하수처리시설의 탄소배출량을 감축하기 위해서는 직접 배출되는 N_2O를 감축함과 동시에 간접배출 CO_2를 모두 고려한 포괄적인 운전 전략이 필요하다.
4) IPCC에서 제시한 하수처리시설의 N_2O EF는 1.6 % (2016)로, 본 시뮬레이션 결과를 바탕으로 계산한 N_2O EF는 0.138~0.199 %로 이는 IPCC에서 제시한 값과 비교해 낮은 수치이다. 장기적인 N_2O 현장 실측 및 검증을 통해 하수처리시설의 고유 배출계수를 개발하고 이를 적용하여 하수처리시설 온실가스 배출량을 산정하면 국가 온실가스 배출량 감축 및 온실가스 인벤토리 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 시뮬레이션을 통해 실제 현장에 적용할 수 있는 총 CFP 최소화 운전 전략을 강구할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 환경산업기술원의 지원을 받은 상하수도 혁신 기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. (과제번호: 2020002700010)

References

1. UNFCCC CMA, “Nationally determined contributions under the Paris agreement”, Synthesis report by the secretariat, UNFCCC, pp. 6. (2023).
2. Republic of Korea Ministry of Environment, The Republic of Korea's enhanced update of its first nationally determined contribution, pp. 2. (2021).
3. Korean Ministry of Environment, “Framework act on carbon neutrality and green growth for coping with climate crisis - Article 26 (Greenhouse gas target control in public sector)”, https://www.law.go.kr/법령/기후위기 대응을 위한 탄소중립・녹

색성장 기본법/(19208,20221231) [Accessed date; April 20, 2024]
4. Korean Ministry of Environment, “2022 Sewage Statistics”, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%ED%86%B5%EA%B3%84&menuId=10264&orgCd=&condition.toInpYmd=null&condition.fromInpYmd=null&condition.orderSeqId=6671&condition.rnSeq=26&condition.deleteYn=N&condition.deptNm=null&seq=8191 [Accessed date; April 20, 2024]
5. Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., and Zhang, H., “The earth’s energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity”, in Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp. 1017~1018. (2023).
6. Lv, Y., Zhang, S., Yang, Y., Liu, Y., Xie, K. and Zhong, J., “N2O emission and control strategy in different wastewater treatment processes”, E3S Web Conf., 118, pp. 1~4. (2019).
7. Massara, T. M., Malamis, S., Guisasola, A., Baeza, J. A., Noutsopoulos, C., and Katsou, E., “A review on nitrous oxide (N2O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water”, Science of The Total Environment, 596-597, pp. 106~123. (2017).
8. Law, Y., Lant, P., and Yuan, Z., “The confounding effect of nitrite on N2O production by an enriched ammonia-oxidizing culture.”, Environmental Science & Technology, 47(13), pp. 7186~7194. (2013).
9. Cho, H. M., and Yoo, S. H., Energy self-sufficient in environmental facilities of Seoul metropolitan government, The Seoul Institute, pp. 16~21. (2012).
10. HEPS, “Effluent quality prediction program”, http://www.heps4.com/default/business/sbu06.php [Accessed date; June 19, 2024]
11. Suwon Special City, Performance evaluation of the Suwon city public sewerage system management outsourcing contract report (2023).
12. Lee, B. H., “Comparison of effluent suspended solid concentrations from two types of rectangular secondary clarifiers”, Water, 14(10), pp. 1577~1596. (2022).
13. Henze, M., Grady, L., Gujer, W., Marais, G. V. R., and Matsuo, T., Activated Sludge Model No 1., IAWPRC, pp. 4~11. (1987).
14. Mamais, D., Jenkins, D., and Pitt. P., “A rapid physical-chemical method for the determination of readily biodegradable soluble COD in municipal wastewater”, Water Research, 27(1), pp. 195~197. (1993).
15. Mannina, G., Ekama, G., Caniani, D., Cosenza, A., Esposito, G., Gori, R., Garrido-Baserba, M., Rosso, D., and Olsson, G., “Greenhouse gases from wastewater treatment — A review of modelling tools”, Science of The Total Environment, 551-552, pp. 254~270. (2016).
16. Pocquet, M., Wu, Z., Queinnec, I., and Spérandio, M., “A two pathway model for N2O emissions by ammonium oxidizing bacteria supported by the NO/N2O variation”, Water Research., 88, pp. 948~959. (2016).
17. Dynamita, Dynamita wiki-Mechanisms of focus models (Sumo4N), https://wiki.dynamita.com/en/biokinetic_process_models [Accessed date; April 20, 2024]
18. Han, J. S., Kim, M. C., and Lee, B. H., “Finding the operation conditions to minimize nitrous oxide emission from MLE configuration wastewater treatment plant using computer simulation program”, Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 31(2), pp. 19~38. (2023).
19. DONGHAE Engineering & Consultants co., Ltd, Korean Society of Water & Wastewater, Water treatment Function Reinforcement and Facility Capacity recalculation of water reuse center report,

pp. 6-1~6-38. (2021).
20. Climate Transparency, “The climate transparency report 2021-South Korea”, https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2021/10/CT2021SouthKorea.pdf [Accessed date; April 20, 2024]
21. Bartram, D., Short, M. D., Ebie, Y., Farkaš, J., Gueguen, C., Peters, G. M., Zanzottera, N. M., and Karthik, M., 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Volume 5), IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, pp. 6.36~6.39, 6.61. (2019).
22. Vasilaki, V., Massara, T. M., Stanchev, P., Fatone, F., and Katsou, E., “A decade of nitrous oxide (N2O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: A critical review.”, Water Research, 161, pp. 392~412. (2019)
23. Haas, D. D., and Ye, L., “Better Understanding Wastewater Treatment’s Nitrous Oxide Emissions”, Water e-Journal, 6(2), pp. 1~15. (2021).