



Research Paper

Comparative analysis of Greenhouse Gas Emissions from Biological Wastewater Treatment Processes: A Case Study in Gyeongsangbuk-do, Korea

Kisung Park¹ · Wontae Lee^{2†}

¹ Division of Environment, Gumi Urban Corporation

² Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received October 25, 2023; Revised February 25, 2024; Accepted February 26, 2024)

Objectives: This study compared greenhouse gas emissions from various biological treatment processes at wastewater treatment plants in City A, Gyeongsangbuk-do.

Methods: Four wastewater treatment plants were selected by size and treatment process, and flow rate and water quality parameters from 2020 to 2022 were used. The amount of greenhouse gases such as methane, nitrous oxide, and carbon dioxide generated was calculated according to the IPCC and Ministry of Environment calculation formulas.

Results and Discussion: Regardless of the biological wastewater treatment processes, the greenhouse gas emissions of all plants were higher according to the Ministry of Environment standards than the IPCC method. However, this may be because it was not applied to variables that are difficult to confirm, such as correction coefficients. Among biological treatment processes, the greenhouse gas emissions of A2O were higher than those of SBR.

Conclusion: The results of this study can be used to calculate greenhouse gas emissions from biological wastewater treatment processes and prepare their reduction plans.

Keywords: Biological wastewater treatment, Greenhouse gas, A2O, SBR, IPCC

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† Corresponding author

E-mail: wtlee@kumoh.ac.kr

Tel: 054-478-7636

© 2024, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

생물학적 하수처리공법에 따른 온실가스 발생량 비교 분석: 경상북도 사례 연구

박기성¹ · 이원태^{2*}

¹ 구미도시공사 환경본부

² 금오공과대학교 환경공학과

목적: 본 연구는 경상북도 A시의 공공하수처리시설을 대상으로 생물학적 처리공법에 따라 발생하는 온실가스를 비교하였다.

방법: 공공하수처리시설 4개소를 규모 및 처리공법 별로 선정하여 2020년부터 2022년까지 유량, 수질인자 농도 등의 자료를 활용하여 IPCC 및 환경부 산정식에 따른 메탄, 아산화질소, 이산화탄소 등 온실가스 발생량을 계산하였다.

결과 및 토의: 생물학적 하수처리공법에 관계없이 모든 시설의 온실가스 배출량은 환경부 기준에 의한 값이 IPCC 방법보다 높았다. 다만, 이러한 결과는 보정계수 등 확인이 어려운 변수를 적용하지 못한 것 때문일 수 있다. 생물학적 하수처리공법 중 A2O 계열의 온실가스 배출량이 SBR보다 높았다.

결론: 생물학적 하수처리공법에 따른 온실가스 배출량을 산정하고 저감계획을 마련하는데 본 연구의 결과가 활용 가능할 것이다.

주제어: 생물학적 하수처리, 온실가스, A2O, SBR, IPCC

1. 서론

전 지구의 평균기온은 지속해서 상승하고, 기후변화로 인한 폭염, 산불, 한파 등 기상이변이 발생하고 있다. 특히 자연적 요인보다 인간 활동으로 인한 인위적인 영향으로 인해 대기와 바다, 육지 온도가 상승하였다. 1850년부터 2019년까지 인간이 초래한 총 지구표면온도 상승 가능 범위는 1.07°C로 추정된다. 1950년대 이후 대부분의 육지 지역에서 고온 폭염 현상은 더 증가하였고, 한랭 현상은 감소·약화되었다. 그리고 폭우의 빈도와 강도는 증가했으며, 일부 지역의 농업 및 생태계의 가뭄빈도 상승을 초래하였다.¹⁻³⁾

우리나라는 1993년 12월경에 기후변화협약 당사국으로 가입하여 국가적으로 온실가스 배출량을 산정하여 국가보고서로 보고하고 있다. 이를 통해 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 기후변화의 과학적 근거, 기후변화의 영향과 위험, 기후변화에 적응하고 기후변화를 완화하려는 방안 등을 다루고 있다.⁴⁻⁵⁾ IPCC 가이드라인은 각 부문별로 배출계수, 방법론 등을 통해 메탄(CH₄) 및 아산화질소(N₂O) 등 온실가스 발생량을 산정하는 방법을 제시한다.⁶⁻⁹⁾

공공하수처리시설에서는 유입수에 포함된 유기물을 생물 화학적으로 처리하는 과정에서 온실가스인 메탄(CH₄)이나 아산화질소(N₂O)가 배출된다. 메탄(CH₄)의 경우 주로 하수의 혐기성 처리 과정에서 배출되고, 아산화질소(N₂O)는 질산화 및 탈질화 과정을 포함하는 고도처리 과정에서 주로 배출된다.¹⁰⁻¹²⁾ 지구온난화에 미치는 영향을 기준으로 볼 때 이산화탄소(CO₂)의 지구온난화지수(Global Warming Potential)가 1인데 반해, 메탄(CH₄)은 21배, 아산화질소(N₂O)는 310배로 높다.¹³⁻¹⁶⁾

하수처리시설에서 발생하는 온실가스를 연구한 선행연구들은 주로 처리시설의 용량과 공법별로 진행되었고 공공하수도 운영실태 결과 등의 데이터를 이용하였다.¹⁷⁻²⁴⁾ 다만, 대부분의 연구들이 환경부 고시에 의한 지침을 활용하여 진행되었다. 농업 등 다른 분야에서는 IPCC 가이드라인 등 다른 산정 방법을 활용한 온실가스 발생연구가 수행되고 있다.²⁵⁾ 이에 본 연구에서는 경상북도 A시에 위치한 공공하수처리시설 4개소를 대상으로 IPCC 및 환경부의 방법을 활용하여 온실가스 발생량을 산정하고 비교하였다. 하수처리시설의 온실가스 발생에 가장 많은 부분을 차지하는 생물학적처리 공법을 비교하

Table 1. Summary of wastewater treatment plants investigated

Plant	Capacity (m ³ /day)	Biological treatment process	Type of influent
A	330,000	DNR ^[1]	Sewage+IWW ^[4]
B	50,000	DNR	Sewage
C	40,000	A2O ^[2]	Sewage+IWW
D	750	SBR ^[3]	Sewage

^[1] DNR(Daewoo Nutrient Removal), ^[2] A2O(Anaerobic-Anoxic-Aerobic), ^[3] SBR(Sequencing Batch Reactor), ^[4] IWW(Industrial Wastewater)^[4]

여 각 처리시설별 온실가스 저감계획을 마련하는데 본 연구의 결과를 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 공공하수처리시설 선정

본 연구를 위해 경상북도 A시에 위치한 공공하수처리시설 4개소(A, B, C, D)를 선정하였다. 각 처리시설별 용량과 생물학적처리공정은 **Table 1**에 정리되어 있다. A시설과 B시설의 생물학적처리공정은 DNR(Daewoo Nutrient Removal) 공법으로 포기조에 혐기와 무산소 조건을 추가하여 미생물의 특성을 이용하여 질소와 인을 처리한다. C시설(40,000 m³/day)은 A2O(Anaerobic-Anoxic-Aerobic) 공법으로 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 질소와 인을 제거한다. D시설(750 m³/day)은 SBR(Sequencing Batch Reactor) 공법으로 전형적인 연속회분식 공법과 유사하지만 유입되는 유량을 저장하기 위한 유량조정조 등을 요구하지 않는다. 유입수가 계속해서 채워지기 때문에 Fill이나 Idle 단계로 분리되지 않아 공정을 최소화한 장점이 있다.

2.2. 조사 및 분석 방법

온실가스 발생량 산정을 위한 인자로 공공하수처리시설별로 2020년 1월부터 2022년 12월까지 3년간 수집된 유입수, 방류수 등에 대한 수질자료와 운영자료를 활용하였다. 온실가스 배출량은 IPCC 2006 가이드라인과 환경부 고시의 두 가지 방법으로 산정하여 비교하였다. IPCC 산정식은 5권 6장의 폐

수 처리와 배출 부분에서 메탄 및 아산화질소의 배출량 산정에 대한 방법을 활용하였다. IPCC 산정식의 메탄(CH₄) 배출량은 인구에 따른 1인당 일일 생물화학적산소요구량(BOD) 배출량 산정이 중요하며, 배출계수는 혐기적 처리공정을 고려하여 0.48로 산정하였다. 또한 아산화질소(N₂O)는 인구에 따른 1인당 단백질 비율이 중요하며, 배출계수는 혐기적 처리공정을 고려하여 0.005로 산정하였다. 한편, 환경부 산정식은 제 2016-255호 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침의 하·폐수 처리에 대한 산정방법을 이용하여 메탄(CH₄) 및 아산화질소(N₂O)를 계산하였다. 메탄(CH₄) 배출량은 BOD 및 유량을 곱하여 배출계수를 곱하고 메탄(CH₄) 회수량을 제외하였다. 아산화질소(N₂O)는 총질소(TN) 및 유량을 곱하고 배출계수 0.005를 사용하여 1.571을 곱하였다.

하수처리에 의한 메탄(CH₄) 및 아산화질소(N₂O)의 직접배출에 의한 온실가스 배출량을 계산하기 위해 이산화탄소량(CO₂)으로 환산하여 산정하였다. 지구온난화지수(Global Warming Potential)를 적용하여 메탄은 21, 아산화질소는 310의 값을 적용한 뒤 각 하수처리량으로 나누어 배출량을 산정하였다. 전력 사용에 따른 이산화탄소 간접배출량은 하수도정보시스템의 TOE(Ton of oil equivalent) 값을 활용하여 각 하수처리시설에서 전력 사용량에 따라 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 처리시설 유량 및 수질 변화

2020년부터 2022년까지 경상북도 A시에 위치한 공공하수처리시설 총 4곳에 대한 운영현황 및 수질 자료 등을 통해 유입수 및 방류수에 대한 유량과 BOD 및 TN 항목에 대한 유입 및 방류 농도 데이터에 대한 각각의 평균값을 산출하여 **Table 2**에 정리하였다. BOD 제거율은 모든 시설에서 99%를 나타냈고, TN 제거율도 74~80%로 공정별로 큰 차이를 보이지 않았다.

A 시설의 유입수 유량은 평균 267,761 m³/day, 방류수는 164,096 m³/day로 유입수 대비 방류수 양은 61%이었다. 유입수의 BOD 평균농도는 137.6 mg/L, 방류수의 BOD 평균농도

Table 2. Flow rates and water quality of four wastewater treatment plants (average of year 2020~2022 data)

Plant		Flow rate(m ³ /day)	BOD(mg/L)	TN(mg/L)
A	Influent	267,161	137.6	32.4
	Effluent	164,096	1.9	8.2
B	Influent	35,138	188.6	56.7
	Effluent	30,425	1.6	11.8
C	Influent	30,249	143.9	27.0
	Effluent	27,092	0.9	5.7
D	Influent	584	108.2	26.1
	Effluent	555	1.6	6.4

는 1.9 mg/L로 약 99% 제거되었다. TN은 유입수 32.4 mg/L, 방류수 8.2 mg/L로 75% 제거되었다.

B시설의 유입수 유량은 평균 35,138 m³/day, 방류수는 30,425 m³/day로 유입수 대비 방류수 양은 87%이었다. 유입수의 BOD 평균농도는 188.6 mg/L, 방류수의 BOD 평균농도는 1.6 mg/L로 약 99% 제거되었다. TN은 유입수 56.7 mg/L, 방류수 11.8mg/L로 80% 제거되어 다른 비교 대상 시설보다 높았다.

C시설의 유입수 유량은 평균 30,249 m³/day, 방류수는 27,092 m³/day로 유입수 대비 방류수 양은 90%이었다. 유입수의 BOD 평균농도는 143.9 mg/L, 방류수의 BOD 평균농도는 0.9 mg/L로 약 99% 제거되었다. TN은 유입수 27.0 mg/L, 방류수 5.7 mg/L로 79% 제거되었다.

D시설의 유입수 유량은 평균 584 m³/day, 방류수는 555 m³/day로 유입수 대비 방류수 양은 95%이었다. 유입수의 BOD 평균농도는 108.2 mg/L, 방류수의 BOD 평균농도는 1.6 mg/L로 약 99% 제거되었다. TN은 유입수 26.1 mg/L, 방류수 6.4 mg/L로 74% 제거되었다.

3.2. 온실가스 배출량 산정

온실가스 배출량은 각 시설의 유량으로 나누어 처리시설 규모에 따른 영향이 없도록 하였다. 먼저 하수처리시설별 메탄(CH₄) 배출량을 비교하였다. A하수처리시설(DNR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 0.07 kgCH₄/m³, 환경부 고시 산정식은 0.11 kgCH₄/m³이었다. B하수처리시설(DNR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 0.09 kgCH₄/m³, 환경부 고시 산정식은 0.10 kgCH₄/m³로 배출되었다. C하수처리시설(A2O)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 0.07 kgCH₄/m³, 환경부 고시 산정식은 0.08 kgCH₄/m³이었다. 마지막으로 D하수처리시설(SBR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 0.05 kgCH₄/m³, 환경부 고시 산정식은 0.06 kgCH₄/m³이었다. 메탄(CH₄) 발생량은 환경부 고시에 의한 산출량이 IPCC 가이드라인에 의한 산출량보다 높게 나타났다. 메탄(CH₄) 발생량을 공정별로 비교하면 DNR이 가장 높았으며, 다음이 A2O이고, SBR 공정이 가장 낮은 발생량을 보였다. 이에 대해서는 다음 절에서 더 자세히 논하기로 한다.

다음으로 하수처리시설별 아산화질소(N₂O) 배출량을 비교하였다. A하수처리시설(DNR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 6.46×10⁻⁵ kgN₂O/m³, 환경부 고시 산정식은 3.52×10⁻⁵ kgN₂O/m³이었다. B하수처리시설(DNR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 9.20×10⁻⁵ kgN₂O/m³, 환경부 고시 산정식은 4.21×10⁻⁵ kgN₂O/m³으로 배출되었다. C하수처리시설(A2O)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 4.43×10⁻⁵ kgN₂O/m³, 환경부 고시 산정식은 1.92×10⁻⁵ kgN₂O/m³이었다. D하수처리시설(SBR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 5.41×10⁻⁵ kgN₂O/m³, 환경부 고시 산정식은 1.80×10⁻⁵ kgN₂O/m³이었다. 아산화질소

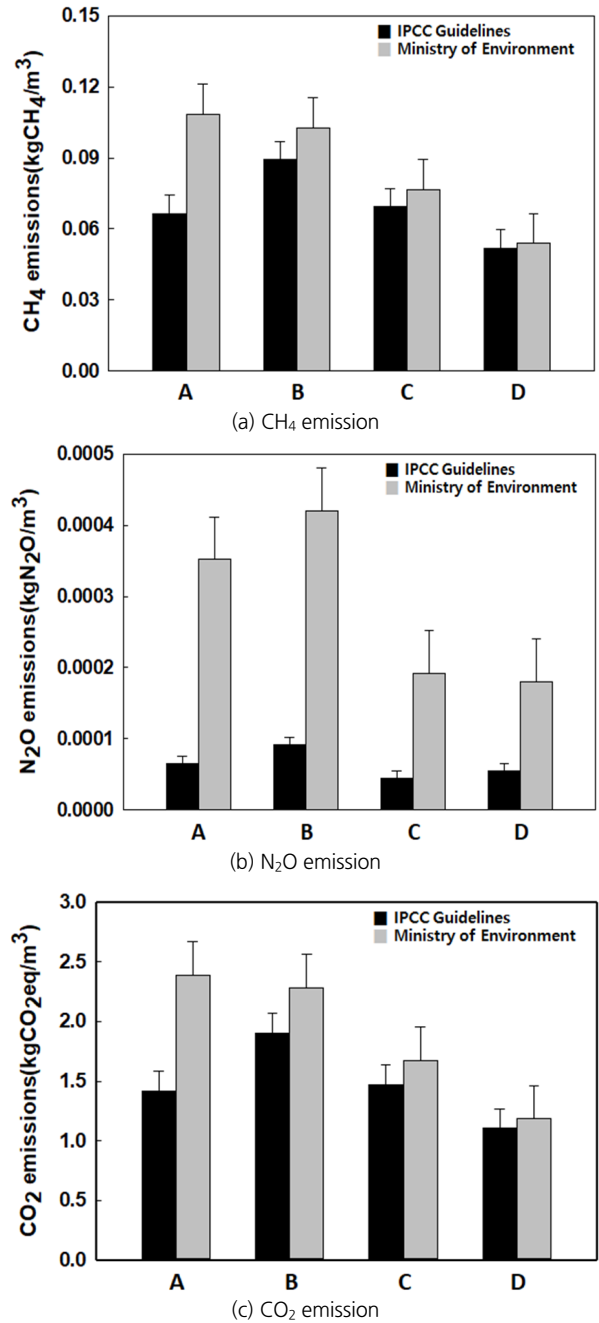


Fig. 1. Emissions of (a) CH₄, (b) N₂O, and (c) CO₂ from four wastewater treatment plants (A, B, C, and D) based upon IPCC and MOE guidelines.

발생량은 IPCC 가이드라인에 의한 산출량이 환경부 고시에 의한 산출량보다 높게 나타났다. 아산화질소(N₂O) 발생량을 공정별로 비교하면 DNR이 가장 높았으며, A2O와 SBR 공정은 큰 차이를 나타내지 않았다. 이에 대해서는 다음 절에서 더 자세히 논하기로 한다.

세 번째로 하수처리시설별 이산화탄소(CO₂) 배출량을 비교하였다. 4개 시설 모두 메탄 발생량이 아산화질소 발생량 대비 월등히 높았으므로 이산화탄소 배출량은 메탄 배출량의

경향과 유사하게 나타났다. A하수처리시설(DNR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 1.42 kgCO₂eq/m³, 환경부 고시 산정식은 2.39 kgCO₂eq/m³이었다. B하수처리시설(DNR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 1.90 kgCO₂eq/m³, 환경부 고시 산정식은 2.29 kgCO₂eq/m³으로 배출되었다. C하수처리시설(A2O)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 1.47 kgCO₂eq/m³, 환경부 고시 산정식은 1.67 kgCO₂eq/m³이었다. D하수처리시설(SBR)의 경우 IPCC 가이드라인 산정식은 1.10 kgCO₂eq/m³, 환경부 고시 산정식은 1.18 kgCO₂eq/m³이었다.

전력 사용에 따른 이산화탄소의 평균 간접배출량은 A하수처리시설(DNR) 0.10 kgCO₂eq/m³, B하수처리시설(DNR) 0.13 kgCO₂eq/m³, C하수처리시설(A2O) 0.08 kgCO₂eq/m³, D하수처리시설(SBR) 0.21 kgCO₂eq/m³로 SBR 공정의 전력사용에 따른 간접배출량이 DNR이나 A2O 공정 대비 높았는데, 이는 처리량에 비해 전기 사용량이 많다는 것으로 판단하였다.

3.3. 산정식에 따른 온실가스 배출량 비교

하수처리시설별 하수처리량 대비 총 온실가스 발생량을 2020년부터 2022년까지 연도별로 산정하였다(Fig. 2). 모든 하수처리시설에서 2021년에 배출량이 가장 높게 나타났고 특

히 A하수처리시설에서 차이가 컸다. 이것은 2021년 A하수처리시설의 유입수 오염물질 부하량이 다른 해에 비하여 높았는데 반해 처리효율은 좋아서 CH₄와 N₂O의 배출량이 높았기 때문으로 사료된다. 특히 환경부 산정방식의 경우 유입대비 유출의 부하량을 고려하기 때문에 이 차이가 더욱 크게 나타난 것으로 판단된다.

모든 하수처리시설에서 환경부 산정식에 의한 유입 유량 대비 총 온실가스 배출량이 IPCC 산정식 배출량 대비 높았는데, 그 차이는 A하수처리시설에서 1.49 kgCO₂eq/m³로 가장 컸다. IPCC 가이드라인에서는 배출량 산정에 있어 당해년 인구비율, 하수관거로 추가되는 산업폐수의 보정계수, 폐수에 추가되는 비 소비되는 단백질에 대한 변수, 연간 1인당 단백질 소비량 등 확인이 어려운 변수들에 대해 적용하지 못했던 점에서 차이가 있다고 판단하였다. 본 연구에서는 두 가지 산정식을 비교하였으나, Jeong²⁵⁾의 연구에서는 IPCC 가이드라인의 1996과 2006을 비교하였을 때 2006 산정방식의 온실가스 배출량이 약 26~29%의 배출량이 감소되었다. 이러한 배출량 차이에 대한 주요 원인은 일부 배출원 항목에 대한 삭제 및 배출계수의 차로 나타난 것으로 판단된다.

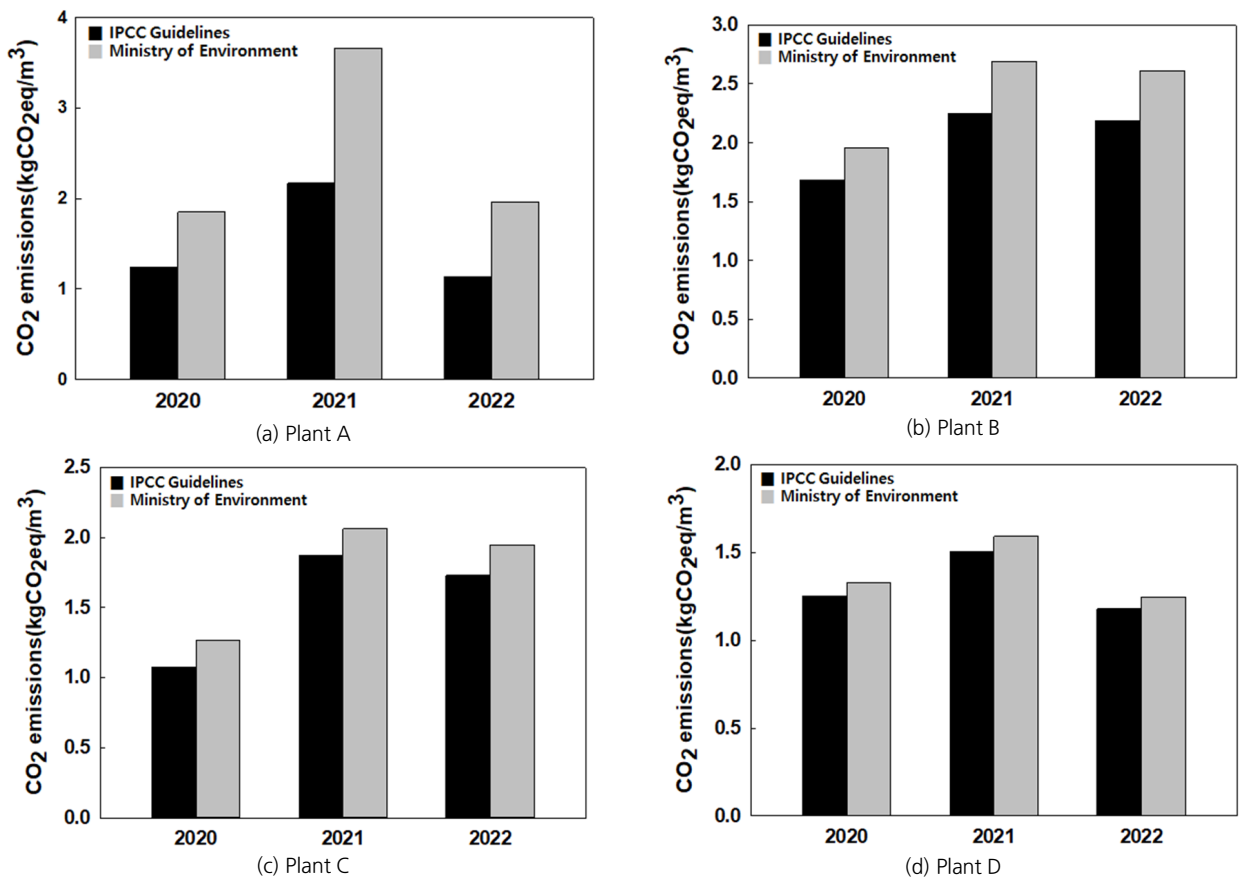


Fig. 2. Emission of carbon dioxide per year (2020~2022) from four wastewater treatment plants based upon IPCC and MOE guidelines.

3.4. BOD 및 TN 부하량에 따른 온실가스 배출량

하수처리시설의 유입 BOD 및 TN 부하량을 근거로 처리시설별 연간 온실가스 발생량 원단위를 산정하고 이전 Im¹⁾의 연구와 비교하였다. 비교를 위해 이전 연구와 같은 방법인 환경부 산정식을 기준으로 2020~2022년 연 평균 배출량을 산정하였다. A하수처리시설(DNR)의 연간 온실가스 배출량은 149,144 tonCO₂eq/yr이었고, BOD에 의한 온실가스 발생량 원단위는 22.58 tonCO₂eq/kg-BOD, TN에 의한 온실가스 발생량 원단위는 5.32 tonCO₂eq/kg-TN이었다.

B하수처리시설(DNR)과 C하수처리시설(A2O)은 시설용량과 처리량은 비슷하지만 B시설의 유입수 오염물질 부하량이 C시설 보다 높아(BOD 1.3배, TN 2.1배) 온실가스 발생량도 B시설이 높게 나타났다. 부하량의 차이는 B시설과 C시설의 유입수 성상의 차이에 의한 것이다. B하수처리시설의 유입수는 하수가 90% 이상이고, C시설의 경우 하수와 폐수가 각각 50% 정도로 혼합되고 있다. B시설의 연간 온실가스 배출량은 26,877 tonCO₂eq/yr이고, BOD에 의한 온실가스 발생량은 5.74 tonCO₂eq/kg-BOD, TN에 의한 온실가스 발생량은 1.73 tonCO₂eq/kg-TN이었다. C시설의 연간 온실가스 배출량은 17,364 tonCO₂eq/yr이고, BOD에 의한 온실가스 발생량은 3.90 tonCO₂eq/kg-BOD, TN에 의한 온실가스 발생량은 0.73 tonCO₂eq/kg-TN이었다. D하수처리시설(SBR)의 연간 온실가스 배출량은 281 tonCO₂eq/yr이고, BOD에 의한 온실가스 발생량은 21.92 tonCO₂eq/kg-BOD, TN에 의한 온실가스 발생량은 5.29 tonCO₂eq/kg-TN이었다.

Im¹⁾의 연구에는 TN에 의한 온실가스 발생량 자료가 없어 BOD에 의한 온실가스 발생량만 본 연구의 결과와 비교하였다. 온실가스 발생량을 정확히 산정하기 위해서는 시설용량보다는 처리용량을 사용하는 것이 더 정확할 수 있으나 비교대상 연구에서 시설용량을 사용하여 본 연구와 비교에도 시설용량을 이용하여 비교하였다. 또한 본 연구의 DNR은 사실상 A2O와 유사한 공정이므로 DNR은 A2O와 비교하였다. Im의 연구에서 시설용량 100,000 m³/d이상 500,000 m³/d 미만 A2O공법의 BOD에 의한 온실가스 발생량은 7.26 tonCO₂eq/kg-BOD이었고, 본 연구의 A시설(시설용량 330,000 m³/d)은 22.58 tonCO₂eq/kg-BOD로 3.1배 높았다. Im¹⁾의 연구에서 50,000 m³/d이상 100,000 m³/d미만 A2O공법의 BOD에 의한 온실가스 발생량이 2.82 tonCO₂eq/kg-BOD로 본 연구 B시설이 2.03배 높게 나타났다. Im¹⁾의 연구에서 10,000 m³/d이상 50,000 m³/d미만 A2O공법의 BOD에 의한 온실가스 발생량이 1.83 tonCO₂eq/kg-BOD로 본 연구 C시설이 2.13배 높게 나타났다. 따라서 A2O 공정의 경우 큰 차이를 보이지 않았다.

그러나, SBR 공법을 사용한 D시설의 경우 Im의 연구에서 5,000 m³/d미만 SBR 공법의 BOD에 의한 온실가스 발생량 0.84 tonCO₂eq/kg-BOD이었던 것에 반해 본 연구에서는 D시설이 26배 높게 나타났다. 이러한 차이가 공정의 차이인지 소

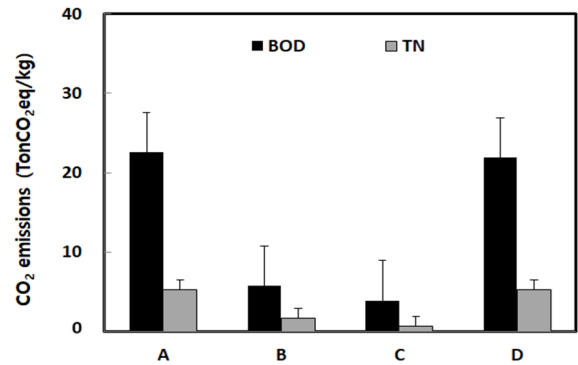


Fig. 3. Comparison of carbon dioxide emission per the BOD and TN loads on the wastewater treatment plants.

규모시설의 운영상 여러 인자가 큰 영향을 미칠 수 있기 때문 인지는 명확하지 않다. SBR 공정의 경우 다양한 방식이 채택되고 있어 전기 사용량 등도 큰 차이를 보일 수 있다.

공법에 관계없이 전반적으로 본 연구의 온실가스 발생량이 Im¹⁾의 연구 대비 다소 높게 나타났다. 본 연구는 4개의 개별 시설을 대상으로 한 것에 반해 Im¹⁾의 연구에서는 공정별로 여러 시설의 배출량을 합산하고 평균 배출량으로 산정하여 차이가 많이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 하수처리시설의 경우 평균적인 값보다는 각 시설이 가지는 특성(유입 BOD량, 방류 BOD량, 유입 TN량, 방류 TN량, 유입유량, 방류유량 등)을 반영한 개별 발생량을 산정하는 것이 중요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 경상북도 A시에 위치한 공공하수처리시설 4개소를 대상으로 산정방법 및 생물학적처리공법에 따른 온실가스 발생량을 분석하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 생물학적 하수처리시설의 온실가스 배출량은 환경부 산정식에 의한 값이 IPCC 산정식 대비 높았으나 인구비율, 산업폐수 보정계수, 폐수의 비소비 단백질 변수, 연간 1인당 단백질 소비량 등 확인이 어려운 변수들을 정확히 산출·적용하지 못했기 때문에 판단된다.
- 2) 메탄(CH₄) 발생량은 환경부 고시에 의한 산출량이 IPCC 가이드라인에 의한 산출량 보다 높게 나타났다. 공정별로 비교하면 DNR이 가장 높았으며, 다음이 A2O이고, SBR 공정이 가장 낮은 발생량을 나타냈다. 아산화질소(N₂O) 발생량은 IPCC 가이드라인에 의한 산출량이 환경부 고시에 의한 산출량 보다 높게 나타났다. 공정별로 비교하면 DNR이 가장 높았으며, A2O와 SBR 공정은 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 3) 하수처리시설의 온실가스 발생량 산정은 여러 시설의 수치를 종합한 평균치보다는 각 시설이 가지는 특성(유입 BOD량, 방류 BOD량, 유입 TN량, 방류 TN량, 유입유량,

방류유량 등)을 반영해 개별 발생량을 산정하는 것이 중요하다.

References

1. K. H. Im, J. Y. Kim, Y. S. Jang, S. Y. Kwon, Comparison of unit greenhouse gas emissions of public sewage treatment plant in Korea, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, KSWE, Kwangju, pp. 739-740(2017).
2. H. S. Kim, Greenhouse Gas Mitigation Policies and National Emission Targets of Korea, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 32(9), 809-817(2010).
3. Y. J. Kang, Y. C. Jang, A Study on Estimation of Energy Recovery Potentials and Greenhouse Gas Reduction from Unutilized Energy Sources from Municipal Wastewater Treatment Plant in City S, *J. Korean Soc. Waste Management*, 36(1), 41-48(2019).
4. T. S. Oh, M. J. Kim, J. J. Im, Y. S. Kim, C. K. Yoo, Estimate and Environmental Assessment of Greenhouse Gas(GHC) Emissions and Sludge Emissions in Wastewater Treatment Processes for Climate Change, *J. Korean Chemical. Eng.*, 49(2), 187-194(2011).
5. Y. H. Yoon, J. H. Park, J. H. Kang, J. S. Choi, J. S. Park, P. J. Kwak, Analysis on the Utilization of Renewable Energy for Carbon Neutralization in Sewage Treatment Facilities, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 44(12), 543-551(2022).
6. E. M. Lee, J. S. Kim, W. J. Chang, B. H. Lee, Mass Balance-Based Model for the Emission of Greenhouse Gas from Biological Wastewater Treatment Process, *J. Korean Soc. Water. Science and Technology*, 20(1), 11-19(2012).
7. M. S. Kim, W. J. Lee, N. S. Park, I. S. Seo, J. H. Kim, Selection of Emission Factors for Estimating the Greenhouse Gas Emission from Wastewater Treatment Plant, *J. Korean Soc. Waste Quality, KISS, Goyang*, pp. 83-84(2010)
8. Chen, Renjie, Yuan, Shijie, Chen, Sisi, Ci, Hanlin, Dai, Xiaohu, Wang, Xiankai, Li, Chong, Wang, Dianchang, Dong, Bin, Life-cycle assessment of two sewage sludge-to-energy systems based on different sewage sludge characteristics: Energy balance and greenhouse gas-emission footprint analysis, *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES BEIJING*, 111(1), 380-391(2022).
9. Heffeman, B., Blanc, J., Spanjers, H., Evaluation of greenhouse gas emissions from municipal UASB sewage treatment plants, *JOURNAL OF INTEGRATIVE ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 9(1), 127-137(2012).
10. M. S. Yang, S. K. Choi, J. Y. Shin, Y. M. Kim, Nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants, *J. Korean Soc. Waste Management*, KSWM, Jeju, pp. 129-129(2019).
11. H. J. Choi, J. W. Kim, K. H. Kyung, M. S. Jang, D. S. Woo, The Study of N₂O Emission Characteristics by Wastewater Treatment Process Parameters, *SCVT*, 7(1), 33-39(2019).
12. Piippo, Sari, Lauronen, Maria, Postila, Heini, Greenhouse gas emissions from different sewage sludge treatment methods in north, *Journal of Cleaner Production, Elsevier Science B.V., Amsterdam*.
13. H. J. Yang, J. M. Park, M. J. Kim, Estimate of Nitrous Oxide Emission Factors from Municipal Wastewater Treatment Plants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 30(12), 1281-1286(2008).
14. I. C. Jeon, J. H. Kim, M. J. Song, Estimate of GHG Emissions From Wastewater Treatment System of (Kwang ju Chollanado), *J. Environ. Res.*, 5(1), 15-30(2000).
15. J. B. Kim, J. W. Chung, S. W. Suh, S. H. Kim, H. S. Park, Comparison of Direct and Indirect CO₂ Emission in Provincial and Metropolitan City Governments in Korea: Focused on Energy Consumption, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(12), 874-885(2011).
16. H. J. Yang, J. M. Park, S. H. Kim, O. S. Kwon, S. J. Lee, M. J. Yeom, Estimate of greenhouse gas emission factors from municipal wastewater treatment plants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 30(12), 289-300(2008).
17. K. C. Lee, Y. J. Park, G. H. Kang, M. O. Jung, D. H. Ryu, S. S. Jeong, W. T. Lee Characteristics of Organic Matter in Influent and Effluent of Public Sewage Treatment Facilities in Gyeongsangbuk-do, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 43(5), 367-376(2021).
18. S. B. Lee, J. H. Lim, Y. S. Lyu, S. Y. Yeo, Y. D. Hong, Analysis of Greenhouse Gas Emissions by Region and Sector Using GHG-CAPSS, *J. Climate Chan. Res.*, 2(2), 69-77(2011).
19. D. H. Moon, J. Y. An, S. J. Lee, S. Y. Jang, A Study on the Energization of Byproduct Gas in Sewage Treatment Plant Using CO₂ Methodation Reaction. *J. Korean Soc. Waste Management, KoreaScholar, Daejeon*, pp. 123-123(2017).
20. Singh, Vipin, Phuleria, Harish C., Chandel, Munish K., Greenhouse Gas Emissions from Sewage Treatment Plants Based on Sequential Batch Reactor in Maharashtra, *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY LIBRARY, Springer, Bhopal, India*, pp. 157-164(2016).
21. Piippo, Sari, Lauronen, Maria, Postila, Heini, Greenhouse gas emissions from different sewage sludge treatment methods in north, *Journal of Cleaner Production, Elsevier Science B.V., Amsterdam*.
22. Masuda, Shuhei, Sano, Itsumi, Hojo, Toshimasa, Li, Yu-You, Nishimura, Osamu, The comparison of greenhouse gas emissions in sewage treatment plants with different treatment processes, *Chemosphere*, 193(2), 581-590(2018).
23. Park Soo-Hyung, Kim Jae-Hoon, Lee Won-Tae, Sampling and investigation of hazardous water pollutants in industrial wastewater treatment plants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(10), 590-595(2015).
24. Kwak Myeong-ryul, Lee Won-tae, Effects of Water Temperature and pH on the Water Purification Ability of Complex Beneficial Microorganisms, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 40(1), 1-6(2018).
25. Hyun-Cheol Jeong, Gun-Yeob Kim, Deog-Bae Lee, Kyo-Moon Shim, and Kee-Kyung Kang, Assessment of Greenhouse gases Emission of Agronomic Sector between 1996 and 2006 IPCC Guidelines, *J. Korean Soil Sci. Fert.* 44(6), 1214-1219 (2011).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Kisung Park

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Research Engineer, ORCID[®] 0009-0008-0422-9343: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing - original draft.

Wontae Lee

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor, ORCID[®] 0000-0001-9660-4455: Conceptualization, Data analysis, Validation, Writing - review and editing.