

최종보고서

안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 산정 및 온실가스 감축방안 연구

2023.01

최 봉 호



환경부지정
안산녹색환경지원센터
Ansan Green Environment Center

연구결과보고서

2022년도 연구개발사업에 따라 연구중인 "안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 산정 및 온실가스 감축방안 연구"에 관한 연구의 최종보고서를 붙임과 같이 제출 합니다.

붙임 : 최종보고서 (15)부. 끝.

연구기관 : 한양대학교 에리카산학협력단

연구책임자 : 최 봉 호



연구기관장 : 박 태 준



안산녹색환경지원센터장 귀하

제 출 문

안산녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “안산지역 생물학적 하·폐수처리 시설의 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 산정 및 온실가스 감축방안 연구”에 관한 최종보고서를 제출합니다.

연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단

연구책임자 : 최 봉 호 (한양대학교 창의융합교육원)

연 구 원 : 김 도 균, 김 민 경

공동연구기관명 :

안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 CO₂, CH₄, N₂O
배출량 산정 및 온실가스 감축방안 연구

최 봉 호

안산녹색환경지원센터

요 약 문

I. 연구개요

본 연구는 안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량을 조사하고, 생물학적수처리 공정의 온실가스 배출량 산정 기법을 개발하여 안산지역의 온실가스 감축에 활용하는 것이다.

II. 연구의 필요성 및 목적

온실가스의 증가로 인한 기후변화는 갈수록 심각해지고 있으며 21세기에 인류의 생존과 발전을 위협하는 가장 중요한 환경 문제로 부각되었다. 지구와 인류의 지속가능성을 확보하기 위해 세계 각국은 기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)에 따라 온실가스 배출량 감축 목표를 설정하고 협력하여 이행하고 있다. 이에 순응하여 대한민국 정부는 탄소중립 선언 이후 심의를 거쳐 탄소배출량을 2018년 대비 2030년까지 40% 감축을 목표로 확정하여 유엔협약사무국에 제출하였다. 세계 온실가스 배출량 조사는 데이터베이스 기반으로 대응하고 있으며 지역별로 온실가스 배출을 조사한 자료와 경험이 기후변화와의 싸움에 도움이 된다고 믿는다. 따라서 온실가스 배출량을 산정한 정보가 투명하게 공개되면 이해 당사자들이 이에 힘입어 온실가스를 감축하기 위한 적절한 대응방안을 취할 수 있다.

안산시는 국가산업단지와 지방산업단지가 함께 자리하고 있어 온실가스가 다량 배출되고 있는 지역으로 주목받고 있다. 하지만 안산지역의 온실가스 배출 조사는 주로 에너지 사용과 산업생산의 영향에만 관심을 기울였고 생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 발생량에 대한 조사가 미비한 실정이다. 생물학적 하·폐수처리시설은 수질 보전을 위해 하수종말처리장 또는 산업체에서 필수적으로 가동되고 있으며 많은 양의 온실가스를 배출하고 있다. 하·폐수처리시설에서 발생하는 주요 온실가스는 CH_4 , N_2O , CO_2 가 있으며, 특히 CH_4 과 N_2O 의 지구온난화계수는 CO_2 의 각각 25배, 298배로 적은 양이라도 매우 높은 온실효과를 나타낸다. 또한, 하수, 축산분뇨, 혐기성소화 유출수 등의 처리는 생물학적인 질소제거 방법이 일반적이지만 질소제거 공정에서 대부분의 질소성분이 질소가스로 변환되는 과정에서 N_2O 가 생성될 우려가 있다.

환경부의 온실가스 배출량 산정지침은 2006 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인으로 국가 배출계수를 적용하고 있으나 각 처리방법(생물학적처리, 고도처리 등), 공법(표준활성슬러지법, 산화구법, A_2O 계열 등), 유입 유기물 등에 대한 구분이 없이 일괄 적용하는 수준이기 때문에 하·폐수처리시설의 운영 현황을 적절하게 반영하지 못할 수 있다. 또한, 총괄관리기관(환경부)에서 제시한 온실가스 산정법은 자료 취합과 국가 전체 배출량을 결정하기 위해 제한된 변수와 값으로 산정하기 때문에 특정 생물학적수처리공정의 온실가스 배출량 산정에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 하·폐수처리시설의 운영조건에 따라 차

등한 산정방식, 특화된 온실가스 산정법 개발, 고유배출계수 조사를 통하여 온실가스 배출량을 정확하게 평가하기 위한 개선방안이 필요하다.

생물학적 하·폐수처리시설은 운영 최적화와 기술 개선을 통하여 온실가스 배출을 감축할 수 있는 잠재력이 있다. 따라서 생물학적 하·폐수처리시설의 특성을 반영한 온실가스 발생량 산정 기법과 도구를 적용하여 온실가스 배출을 감축하기 위한 적절한 운영 방안을 도출하고 기술 조사 능력을 향상시켜야 한다.

본 연구의 궁극적인 목적은 안산지역의 생물학적 하·폐수처리시설에서 발생하는 CO₂, CH₄, N₂O 가스를 측정하고 생물학적수처리공정의 온실가스 발생량 산정법을 도출하여 효율적인 온실가스 배출량 평가 및 감축 방안을 제시하는 것이다.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 조사

- 현장 조사를 통한 안산지역 하·폐수처리시설 온실가스 배출 실태 조사한다.
- 하·폐수처리시설에서 채취한 폐수와 슬러지를 이용한 CO₂, CH₄, N₂O 가스 배출 실험을 수행하여 생물학적수처리 공정의 특성에 따른 온실가스 배출량 조사한다.
- 환경부의 온실가스 배출량 산정지침을 적용하기 위한 안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 배출계수를 조사한다.

IV. 연구결과

본 연구는 생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 측정 및 산정법 개발을 통하여 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

- 안산지역 생물학적 하·폐수처리 과정에서 발생하는 CO₂, CH₄, N₂O 가스의 배출량 산정기법을 개발하였고 온실가스 배출량을 조사하였다.
- 안산시 공공하수처리시설을 방문 및 조사하여 온실가스 배출량 산정에 적용하기 위한 자료를 수집하였다.
- 온실가스 배출량을 산정하는 GUI 소프트웨어를 개발하여 계산 효율과 접근성을 개선하였고 하·폐수처리시설의 운영조건을 적용한 온실가스 배출량 산정에 활용하였다.
- BMP 실험 데이터에 최소제곱법으로 Gompertz 모델을 곡선 적합하여 도출한 혐기성 소화조의 잠재적 최대 메탄가스 발생량(B₀), 최대 메탄 생성률(R_m), 지체 시간(λ)은 각각 422.6 CH₄ ml/g COD, 40.99 CH₄ ml/day, 0.1476 day 이고, 여기서 CH₄ 가스의 부피를 질량 단위로 환산하여 나타낸 최대 메탄가스 배출량은 0.3019 CH₄ kg/kg COD이다.
- 실증 플랜트의 운영을 모사한 Lab-scale 실험을 통하여 온실가스 배출량과 발생농도를 조사하였으며, 슬러지와 폐수가 발생하는 온실가스 수율을 도출하였다.
- 안산시 공공하수처리시설의 생물학적수처리공정(호기성 생물반응조, 혐기성소화조, 침전조, 슬러지저류조 등)에서 발생하는 평균 CO₂, CH₄, N₂O 농도는 각각 20%, 10%, 1053 ppm으로 나타났다.
- 혐기성소화조의 CH₄ 배출 계수는 0.339 kg CH₄/COD kg, N₂O 배출 계수는 0.0989 N₂O-N kg/kg N이며 CO₂ 배출 계수는 0.457 kg CO₂/COD kg이다.
- 생물반응조의 CH₄ 배출 계수는 0.005 kg CH₄/COD kg, N₂O 배출 계수는 0.0268 N₂O-N kg/kg N이며 CO₂ 배출 계수는 0.49 kg CO₂/COD kg이다.
- 화학양론 모델링 기법을 개발하였으며 폐수와 슬러지의 원소분석(C, H, O, N 백분율 분포) 결과를 모델에 적용하여 도출한 CH₄ 배출계수는 0.23 kg CH₄/COD kg이고 CO₂ 배출계수는 0.24 kg CO₂/COD kg이다.
- 생활하수처리계통의 총 탄소 배출량은 16588 t CO₂/yr이고 여기서 CH₄ 가스가 56%로 가장 높은 탄소 배출량을 나타냈으며, 이러한 지속적인 배출은 기후변화에 영향을 미칠 가능성이 있다.
- 생물학적수처리의 N₂O 가스 배출량은 4 t N₂O/yr이고 이를 CO₂ 상당량으로 환산하면 1192 t CO₂/yr 이며, N₂O 가스는 적은 양으로도 높은 탄소 배출량(총 탄소 배출량의 7%)을 나타낸다.
- 연구와 조사 결과를 근거로 온실가스 배출량을 감축하기 위한 하·폐수처리시설의 적절한 운영 방안을 제안하였다.
- 환경부가 추진하고 있는 Bottom-up 방식의 배출량과 배출계수를 조사하였으며, 이는 기존

에 추진하고 있는 Top-down 방식을 보다 더 신빙성 있게 보완하여 국가 온실가스 배출량 통계의 신뢰도를 높일 수 있는 것으로 판단된다.

V. 연구결과의 활용계획

- 안산지역 생물학적 하·폐수처리시설의 CO₂, CH₄, N₂O 가스 발생량 실측 데이터베이스 구축에 활용한다.
- 안산지역 하·폐수처리시설의 온실가스 발생에 관한 조사 데이터를 고찰하여 안산시 온실가스 관리를 위한 참고 자료로 제공한다.
- 조사한 온실가스 배출량 데이터와 산정 기법을 학계, 공공기관, 연구기관 등에 공유하여 이해 당사자들이 이에 힘입어 환경을 개선하는데 도움을 받게 한다.
- 현재 운영되고 있는 안산지역 하·폐수처리시설에 온실가스를 감축하기 위한 최적화 운영법과 적합 기술 제안한다.
- 자체로 개발한 온실가스 산정 기법과 플랫폼 특허의 출원 및 등록에 활용한다.
- 실험 데이터와 연구 결과를 고찰하여 국내외 학술지에 논문으로 게재한다.

목 차

제 1장 연구배경	1
1.1 온실효과와 기후변화	1
1.2 기후변화 문제에 대응하기 위한 국가 간 협력	3
1.3 하·폐수처리시설의 온실가스 발생	5
1.4 온실가스 배출량 산정	8
제 2장 연구방법	10
2.1 하·폐수 및 슬러지 샘플링	10
2.2 수질 및 슬러지 분석	12
2.3 원소분석	13
2.4 CO ₂ 및 CH ₄ 가스 분석	14
2.5 N ₂ O 가스 분석	16
2.6 배출계수 조사를 위한 BMP test 및 공정별 lab-scale 실험	18
2.7 온실가스 배출량 조사 체계	25
2.8 CH ₄ 배출량 산정	27
2.9 N ₂ O 배출량 산정	29
2.10 실측 온실가스 배출계수 산정	30
2.11 화학양론 모델을 이용한 온실가스 배출계수 산정	32
2.12 온실가스 배출량 산정을 위한 GUI 프로그램	35
제 3장 연구결과 고찰	37
3.1 하·폐수처리시설 운영 현황 조사	37
3.2 온실가스 측정 장비 및 분석 업체의 정도 보증(QC)	41
3.3 하·폐수의 수질 특성	44
3.4 온실가스 배출계수 조사	49
3.5 화학양론을 이용한 온실가스 배출계수 조사	54
3.6 온실가스 배출계수 및 적용방안	57
3.7 배출계수의 신뢰도	59

3.8 하·폐수처리시설의 CH4 배출량 산정-----	60
3.9 생물학적수처리의 종합적 온실가스 배출량 산정-----	62
3.10 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 감축 방안-----	63
제 4장 결론-----	67

목 차

<표 목차>

표 2.1 수질 및 슬러지 분석에 따른 항목별 표준물질-----	13
표 2.2 BMP test에 접종한 미생물 슬러지 특성-----	19
표 2.3 각 lab-scale 별 폐수 및 혐기성 미생물 주입량-----	21
표 2.4 슬러지 저류조 lab scale 반응조에 사용된 유입 슬러지 특성----	21
표 2.5 혐기 소화 lab-scale 반응조의 혐기성 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성-----	21
표 2.6 탈질 공정 lab-scale의 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성-----	23
표 2.7 질산화 공정 lab-scale의 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성----	25
표 3.1 안산시 공공하수처리장 방류수질-----	41
표 3.2 Gas-tiger2000의 정도 보증 결과-----	42
표 3.3 혐기성 소화조 유입 및 유출 폐수의 수질 특성-----	45
표 3.4 생활계 및 공장계 생물반응조 유입수, 생물반응조 유출수의 수질 특성-----	47
표 3.5 생활계 및 공장계의 1차 침전지와 2차 침전지의 수질 특성----	48
표 3.6 Lab-scale 공정별 가스 발생량 및 가스 조성-----	54

표 3.7 원소함율분석을 통한 폐수 유기물의 분자식 및 COD 비례-----	55
표 3.8 생물학적 하·폐수처리 공정의 화학양론 및 화학식량-----	56
표 3.9 조사방법의 차이에 따른 온실가스 배출계수-----	58
표 3.10 생활하수처리계통의 CH ₄ 가스 배출량을 조사하기 위해 설정한 운영조건-----	61
표 3.11 공장폐수처리계통의 CH ₄ 가스 배출량을 조사하기 위해 설정한 운영조건-----	61

<그림 목차>

그림 1.1 대기에 존재하는 온실가스에 의한 온실효과 원리-----	1
그림 1.2 산업화 기간 동안지구의 평균 복사 강제력-----	3
그림 1.3 지속 가능한 발전, 적응, 완화의 상호작용 시나리오-----	4
그림 1.4 세계 하·폐수처리시설의 온실가스 배출 추이-----	5
그림 1.5 혐기성소화 공정의 CH ₄ 생성 경로-----	6
그림 1.6 생물학적 질소 순환 과정 중 N ₂ O 생성 메커니즘-----	7
그림 1.7 온실가스 배출량의 기본 산정 가이드-----	8
그림 1.8 생물학적 하·폐수처리 공정들의 온실가스 배출계수 차이-----	9
그림 2.1 안산시 공공하수처리시설의 하·폐수처리계통 및 샘플링 지점 선 정-----	10
그림 2.2 생활하수 방류지점 채수 현장-----	11
그림 2.3 공장폐수 방류지점-----	11
그림 2.4 CH ₄ , CO ₂ 가스 측정 장비-----	15
그림 2.5 GC기기를 이용한 CH ₄ , CO ₂ 가스 분석 과정-----	15
그림 2.6 N ₂ O 가스 측정기-----	17
그림 2.7 N ₂ O 가스 측정 및 샘플 포집 과정-----	17
그림 2.8 BMP 실험법 및 실험에 사용한 serum bottle-----	19

그림 2.9 안산시공공하수처리시설의 온실가스 배출량을 조사하기 위한 로드맵-----	26
그림 2.10 생물학적 하·폐수처리의 CH ₄ 배출량을 산정하기 위한 GUI 프로그램-----	36
그림 3.1 안산시 공공하수처리장 하·폐수처리 공정 흐름도-----	37
그림 3.2 안산시 공공하수처리장의 공장폐수 펌프장-----	38
그림 3.3 안산시 공공하수처리장의 생활하수 펌프장-----	38
그림 3.4 안산시 공공하수처리장의 질산화 반응조-----	39
그림 3.5 안산시 공공하수처리장의 탈질 반응조-----	39
그림 3.6 안산공공하수처리장 생활하수 및 공장폐수 유입 BOD, TOC, TSS-----	40
그림 3.7 안산공공하수처리장 생활하수 및 공장폐수 유입 TN, TP-----	40
그림 3.8 CO ₂ 및 CH ₄ 측정 장비의 가스 분석 정도 보증 결과-----	42
그림 3.9 분석 업체의 정도 관리 검증서-----	43
그림 3.10 BMP 실험을 이용한 혐기성소화조 유입 슬러지(분뇨포함)의 잠재적 CH ₄ 가스 발생량 평가-----	49
그림 3.11 BMP 실험을 이용한 혐기성소화조 유입 음식물탈리액의 잠재적 CH ₄ 가스 발생량 평가-----	50
그림 3.12 BMP 실험을 이용한 유입 슬러지와 음식물탈리액 혼합 시료의 잠재적 CH ₄ 가스 발생량 평가-----	51
그림 3.13 혐기성소화조의 온실가스 배출계수를 평가하기 위한 BMP 실험 데이터에 대한 Gompertz model 분석(a)과 Batch 실험 데이터에 대한 선형회귀분석(b)-----	52
그림 3.14 온실가스 배출계수 조사에 사용한 실험 데이터의 신뢰도를 확인하기 위한 신뢰구간 및 정규분포 분석-----	59
그림 3.15 생활하수처리계통의 총 탄소배출량-----	62

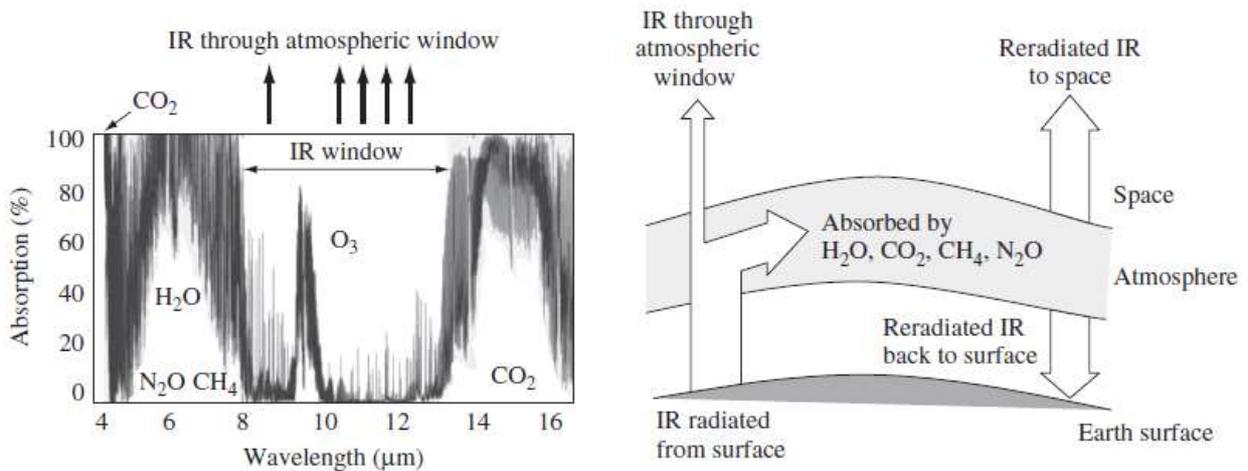
그림 3.16 생물학적 생활하수처리 공정의 CO₂, CH₄, N₂O 가스 배출량
-----63

그림 3.17 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 조사를 위한 하향식 및 상
향식 접근법-----66

제 1 장 연구배경

1.1. 온실효과와 기후변화

태양으로부터 지구 대기권 외부에 도달한 대부분 태양 에너지는 단파장(파장이 $3 \mu\text{m}$ 이하) 복사이며 지구에서 복사의 형태로 나가는 에너지는 대부분 장파장(파장이 $3 \mu\text{m}$ 이상) 복사이다. 이러한 2개의 복사 스펙트럼은 거의 겹치지 않으며 스펙트럼의 적외선(IR: infrared) 영역은 약 $0.7\sim 100 \mu\text{m}$ 범위이므로 태양으로부터 오는 복사의 일부와 밖으로 나가는 모든 열복사는 적외선이다. 복사 에너지는 대기를 통하여 나가므로 대기 중에 존재하는 기체와 에어로졸의 영향을 받는다. 기체 분자를 구성하는 원자들은 진동하거나 상호 원자들 주위를 회전하므로 특정 파장의 에너지를 흡수하거나 복사한다. <그림 1.1>은 주요 기체들에 대한 흡수 스펙트럼과 이들이 태양 복사파와 지구 표면이 방출하는 적외선에 미치는 영향을 보여주고 있다. $7\sim 13 \mu\text{m}$ 사이의 적외선 복사창을 통하여 지구 표면으로부터 우주로 복사되고 대부분 적외선은 온실가스에 의해 흡수된다. 지구에 의하여 복사되는 장파장 에너지를 흡수하는 기체들은 수증기(H_2O), 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 일산화질소(N_2O), 오존(O_3) 등이 있다. 여기서 $4 \mu\text{m}$ 이상의 복사 파장을 흡수하는 기체들을 온실가스라고 한다. 대기에 의하여 흡수된 에너지의 일부는 지구로 다시 복사되기 때문에 지구의 온도를 증가시키거나 우주 밖으로 재복사 된다. 따라서 온실가스들은 지구를 덮고 있는 담요와 같은 역할을 하며 비슷한 기능을 가지고 있는 유리 온실의 개념에 근거하여 온실효과라고 한다[1].



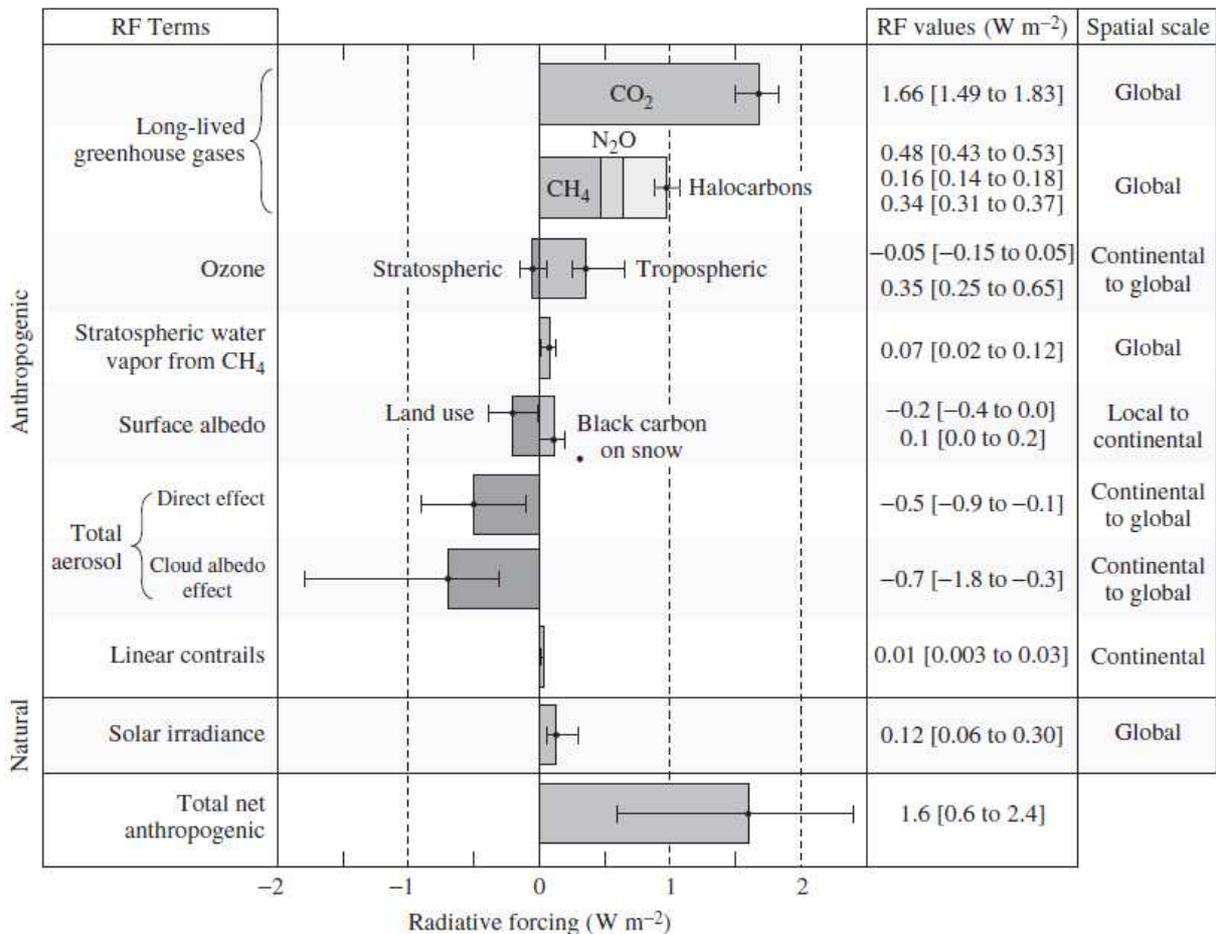
<그림 1.1> 대기에 존재하는 온실가스에 의한 온실효과 원리

지구에 온실효과가 없다면 지구의 평균 온도는 $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 될 것이지만 실제 지구의 온도가 288 K 이고 유효 온도는 254 K 이므로 온실 효과에 의하여 지표면의 온도는 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 증가되었

다. 하지만 인위적으로 배출되는 많은 기체와 에어로졸은 불확실한 지구 기후 변화를 야기하는 자연적인 온실 효과를 증대시키고 있다. 주요 온실가스로는 이산화탄소, 메탄, 일산화질소, 그리고 탄소에 할로겐족(불소, 염소, 또는 브롬) 원소가 더해진 할로카본 물질들이 있다. 일반적으로 가장 대표적인 이산화탄소를 포함하여 온실가스와 입자들에 대한 조사를 진행하며, 지구의 온도를 대기에 존재하는 이산화탄소 농도의 함수로 계산할 수 있다.

지구에 대한 에너지 평형 모델에 의하면 지구와 대기에 의하여 흡수된 입사 태양 에너지는 235 W/m^2 이며, 이는 장파장의 빛에 의하여 외부로 나가는 235 W/m^2 와 일치하다. 만일 외부에서 들어오는 에너지가 증가한다면 에너지 균형은 순간적으로 흐트러지게 될 것이다. 하지만 시간의 경과에 따라 지표면의 온도가 증가하거나 감소하여 지구의 기후가 변화하면서 새로운 균형이 이루어진다. 이 시스템에서 초기에는 에너지 균형이 이루어진 상태이므로 흡수되는 에너지의 양과 복사되는 에너지의 양이 같다. 시스템으로 들어오는 흡수 에너지에 복사 강제력(radiative forcing, W/m^2)이 추가로 더해지면 시스템 내에 혼란이 발생하게 되고 최종적으로 새로운 평형상태에 도달하게 될 것이다.

기후 변화에 대한 복사 강제력의 영향은 대기 내의 온실가스 축적, 자연적 또는 인위적으로 생성된 에어로졸의 변화, 성층권의 오존층 파괴, 대기권 내에서 광화학적으로 합성된 오존의 축적, 지구에 도달하는 태양 에너지의 변화 등에 적용될 수 있다. 양의 복사 강제력은 지구 온난화에 기여하는 반면 음의 복사 강제력은 지구의 냉각에 영향을 미친다. <그림 1.2>는 지구의 평균 복사 강제력의 변화를 보여주고 있다. 온실가스(CO_2 , CH_4 , CFC, N_2O), 에어로졸, 토지 사용의 변화와 연관된 지구의 평균 복사 강제력에 대한 추정 값과 이 기간 동안 일어난 태양광 세기의 증가량 추정 값을 나타내고 있다. CO_2 가 가장 큰 복사 강제력을 나타내고 있으며 다른 물질들도 큰 값을 가지고 있다. 에어로졸은 전체적으로 지구 온도를 냉각시키는 역할을 하는 것으로 추정된다. 2007 IPCC 보고서는 산업화 기간 동안 증가한 복사 강제력이 지구 온난화의 원인임을 확실하게 제시하고 있다[2].



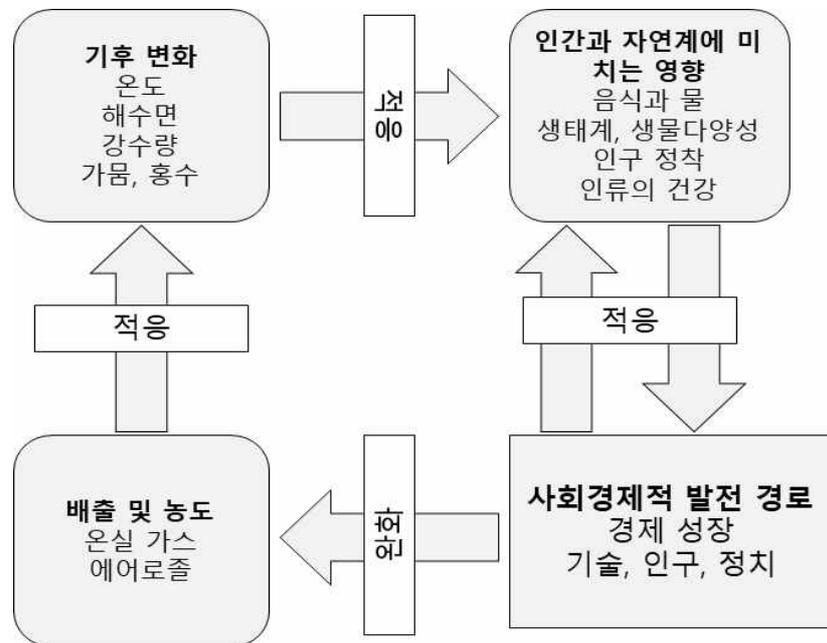
<그림 1.2> 산업화 기간 동안 지구의 평균 복사 강제력 (출처: 2007 IPCC 보고서)

1.2. 기후변화 문제에 대응하기 위한 국가 간 협력

기후를 연구하는 과학자들은 현재 발생하고 있는 지구 평균 온도의 급격한 상승은 인간 활동에 기인한 것이라는 판단에 대한 확신이 증가하고 있다. 지구 온난화와 성층권 오존 파괴는 지구 대기 변화에 대하여 상호 연관되어 있으며 이 문제들을 해결하기 위해서는 국가 간 협력이 필요하다. 세계기상기구 (WMO: World Meteorological Organization)와 유엔환경프로그램 (UNEP: United Nations Environment Program)에 의하여 설립된 IPCC는 기후 변화에 관한 이용 가능한 과학적 정보의 평가, 기후 변화가 환경, 사회 및 경제에 미치는 영향 평가, 적절한 대응 방안 제시 등을 목적으로 설립되었다. IPCC는 환경과 개발에 관한 UN 총회에서 150개 이상의 국가가 서명한 지구의 기후 변화에 대한 협약(UNFCCC)에 기술적인 자료를 제공한다. UNFCCC는 대기의 온실가스 농도를 현재의 기후에 위험한 영향을 미치지 않는 수준으로 안정화할 토대를 마련하고자 하는 기후 협약으로 50개 국가가 이 협약을 비준한 뒤 1994년에 협약이 발효되었다. 본 협약 자체는 각국의 온실 가스 배출에 대한 어떤 제약을 가하거나 강제성을 띠고 있지는 않다는 점에서 법적 구속력은 없다. 대신 협약은 시행령에 해당하는 의정서(protocol)를

통해 의무적인 배출량 제한을 규정하고 있다. 이는 세계의 국가들이 기후변화 문제에 함께 협력할 수 있다는 가능성을 보여 준다는 점에서 매우 중요하다.

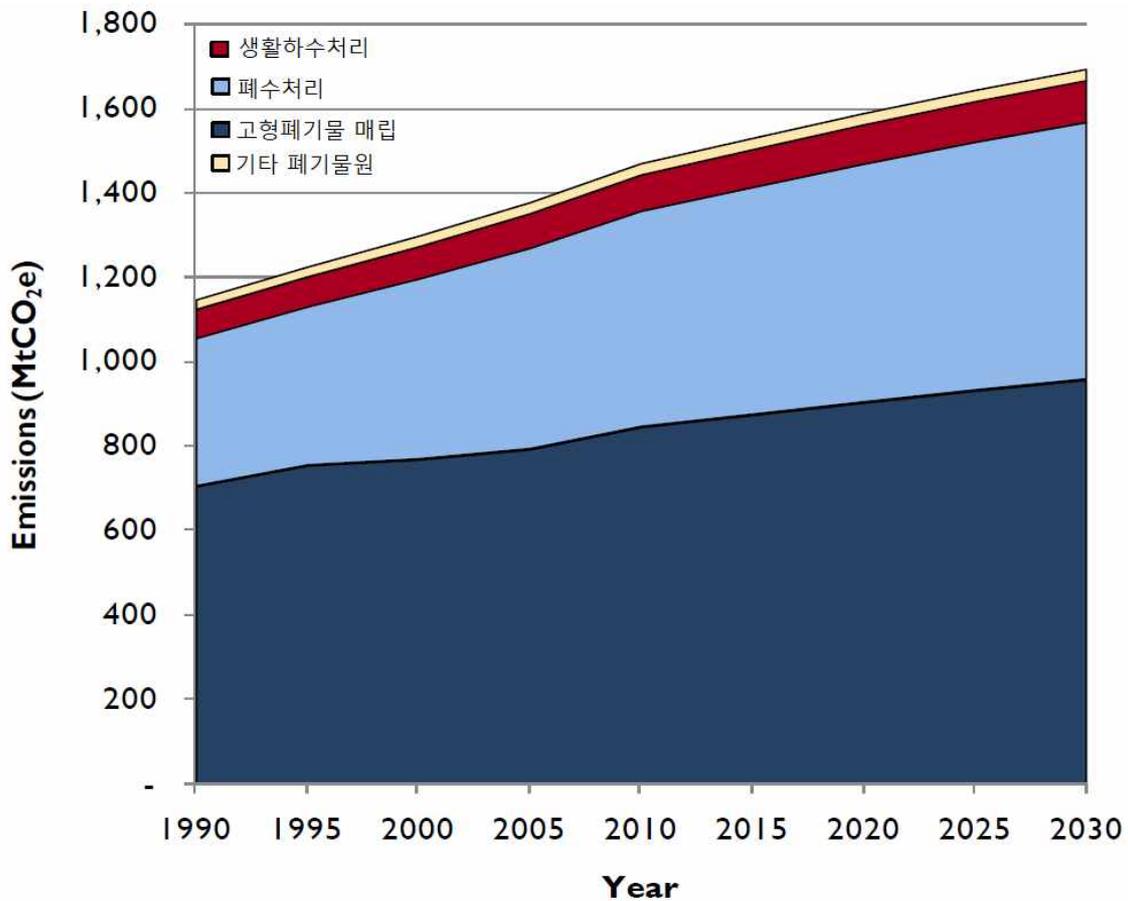
IPCC는 과학(Working Group I), 충격과 적응(Working Group II), 완화(Working Group III)로 구성된 세 개의 핵심 영역을 중심으로 조직되어 있다. 완화 그룹은 미래의 온실가스 배출에 영향을 미치는 인구, 경제 성장 및 기술 발전 사이의 상호 연관 가능성을 묘사하는 시나리오를 개발하고 있다. 이러한 온실가스 배출 시나리오는 기후를 모델링하는 기관에 전달되어 지구의 온도, 지역별 온도와 기후에 미치는 영향을 예측하게 된다. 이러한 결과들은 기후 충격을 완화하거나(온실가스 배출량 조절) 기후변화에 적응하는 방법을 모색하는 의사결정권자에게 정보를 제공할 수 있다. <그림 1.3>은 이러한 상호작용을 요약하여 보여주고 있으며 이는 지속가능한 개발과 환경문제를 함께 고려하여 기후문제를 해결하기 위한 전략을 세우는데 도움이 된다[3].



<그림 1.3> 지속 가능한 발전, 적응, 완화의 상호작용 시나리오
(출처: 2006 IPCC, TAR 보고서)

1.3. 하·폐수처리시설의 온실가스 발생

하·폐수처리시설은 운영 과정에 대량의 CO₂, CH₄, N₂O가 배출되기 때문에 중요한 인위적 온실가스 배출원으로 간주될 수 있다. 미국 환경보호국(EPA: Environmental Protection Agency)의 보고에 따르면 2005년 하수처리 산업에서 배출되는 온실가스는 세계 CO₂ 배출량의 5%를 차지했으며 2030년에는 27%에 이를 것으로 예상된다<그림 1.4> [4]. 전 세계 N₂O 발생원의 추정에 따르면 하수처리 과정에서 연간 배출되는 N₂O 가스는 $0.3 \times 10^{12} \sim 3.0 \times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 로 전 세계 N₂O 배출량의 2.5%~25%를 차지한다. IPCC 보고서에 따르면 하수처리시설과 하수처리과정에서 질소의 약 0.05~25%가 N₂O 가스로 전환되어 배출된다고 한다[2].

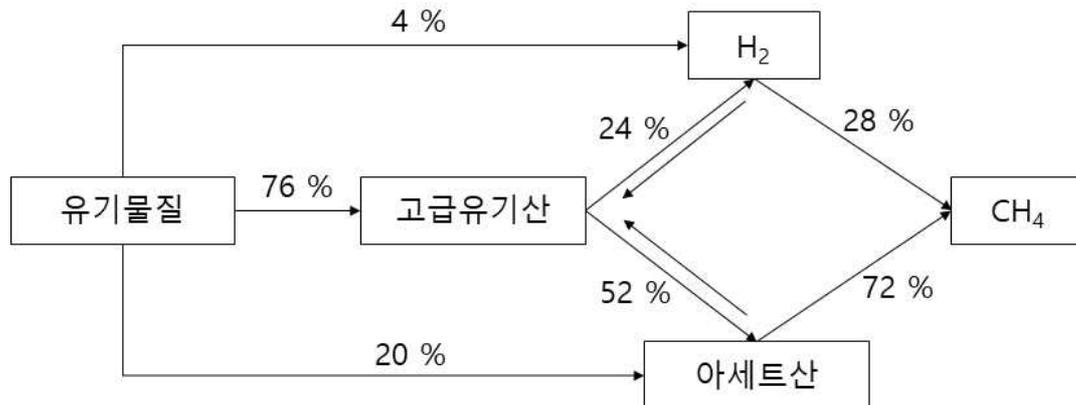


<그림 1.4> 세계 하·폐수처리시설의 온실가스 배출 추이

(출처: EPA 탄소배출량 조사 보고서, 2012)

하·폐수처리의 주된 목적은 유기오염물질을 CO₂와 H₂O로 완전히 분해시키는 것이므로 처리과정에서 발생하는 세 가지 온실가스 중 CO₂가 가장 많이 생산되고 온실효과에 가장 크게 기여하여 하·폐수처리로 인한 온실효과의 49.7~81.2%를 차지한다. 하수처리공정은 일반적으로 CH₄와 N₂O를 발생시키는 것을 목표로 하지 않기 때문 CH₄와 N₂O는 공정의 부산물로 간주된다.

CH₄는 주로 유기성 폐수 또는 폐기물의 혐기성 소화 공정에서 생산되며, 산소와 질산성 질소가 관여하지 않는 폐수의 생물학적 처리시스템에서 통성세균과 혐기성 세균을 이용하여 복잡한 유기화합물을 분해하여 간단한 화합물로 전환하며 동시에 에너지를 방출한다. 생활하수처리시설에서 혐기성 처리는 항상 전체 공정중의 일부이며 오염물질의 분해는 대부분 A₂/O, A/O 등과 같은 호기성 처리 공정에서 완성된다. 식품가공, 제지, 화학 등의 업종에서 주로 발생하는 고농도 유기성 폐수는 UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), EGSB(Expanded Granular Sludge Bed) 등 특정 혐기성 공정으로 처리하며, 유기성 오염물이 혐기성 미생물에 의해 분해되는 과정에서 대량의 CH₄ 가스가 생성된다. <그림 1.5>는 혐기성 조건에서 유기물질이 분해되어 CH₄를 생성하는 메커니즘을 보여주고 있다.

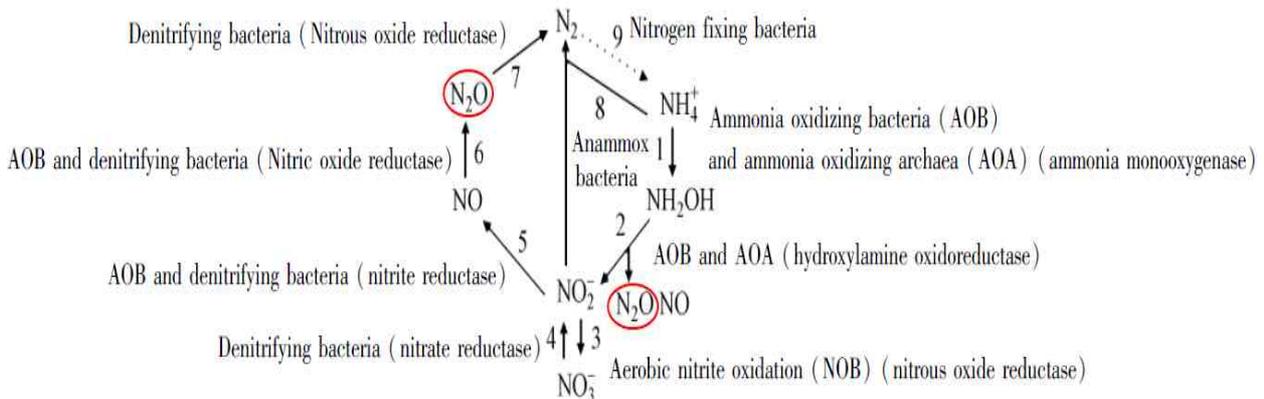


<그림 1.5> 혐기성소화 공정의 CH₄ 생성 경로

하·폐수처리시설의 목적은 수역의 오염 물질을 분해하는 것이지만 처리 과정에서 발생하는 많은 온실가스는 원래 설계에 어긋날 수 있다. 따라서 최근 여러 나라의 학자들이 폐수처리에서 발생하는 온실가스와 관련된 문제에 대해 많은 연구를 수행하고 있다. 현재 하·폐수처리시설에서 발생하는 온실가스의 통계적 산정 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째, 직접방출, 즉 처리과정에서 대기로 직접 배출되는 양을 산정하는 방법과, 두 번째, 하수처리장의 건설 및 사용의 전 주기 동안 발생하는 온실가스의 양을 포괄하는 에너지 소비, 화학약품, 건설공정 등을 종합적으로 고려하여 산정하는 방법이 있다. 현재 대부분의 학자와 기관은 통계자료 및 온실가스 생산 요인의 계산을 위해 주로 첫 번째 통계 방법을 사용한다.

<그림 1.6>은 생물학적 질소 전환의 경로를 보여주고 있다. 생물학적 탈질소화 과정에서의 질산화 반응과 탈질소 반응은 모두 N₂O 가스를 생성할 수 있다. 하·폐수처리시설에서 발생하는 온실가스 중 N₂O 가스의 온실효과 잠재력은 CO₂의 298배로 가장 높다. N₂O 가스는 발생량 변동 범위가 비교적 넓고, 매우 큰 감축 잠재력을 가지고 있지만 발생 원인이 복잡하다. N₂O는 질산화반응의 중간생성물도 최종생성물도 아니기 때문에 이 과정의 부산물로 추정되며, N₂O 생성은 주로 아질산화 과정에 집중되지만 아질산화 과정은 매우 복잡해 일부 중간생성물이 N₂O를 생산할 수 있는지에 대해서는 아직 논란이 있다.

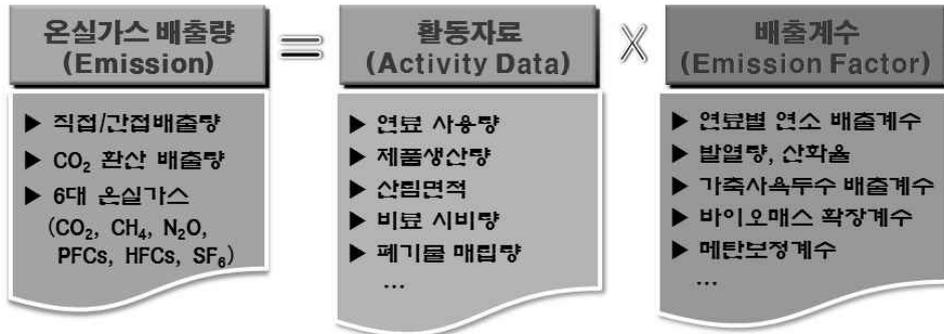
현재 질산화균의 탈질소 작용은 호기성 하·폐수처리과정에서 N₂O 가스의 주요 발생 경로로 간주되고 있다. 탈질소화는 무산소 또는 저산소의 조건에서 독립영양형 통성 혐기성 미생물이 질산 또는 N아질산을 N₂O와 N₂로 환원시키는 반응이다. 효소 촉매는 생물학적 탈질 과정에서 N₂O의 생성과 축적에 중요한 작용을 일으킨다. 탈질소화 과정에서의 N₂O 가스의 발생에 대해 주로 다음과 같은 두 가지 해석이 있다. 탈질소균에 의한 N₂O 활성 상실이 발생하여 N₂O를 더 이상 환원할 수 없게 되고, N₂O가 축적되어 수체에서 빠져나간다. 일부 탈질소균은 Nos(nitrous oxidoreductase) 계통을 가지지 않으며 그 최종 생성물은 N₂O뿐이다.



<그림 1.6> 생물학적 질소 순환 과정 중 N₂O 생성 메커니즘

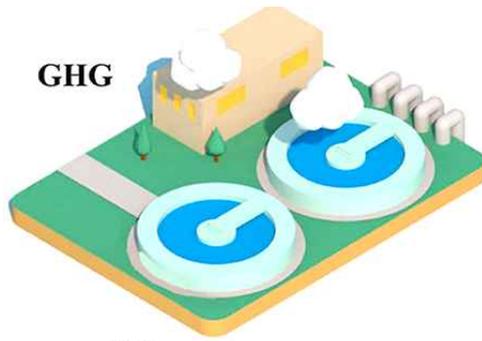
1.4. 온실가스 배출량 산정

온실가스 배출량 산정은 <그림 1.7>에서 보여준 것 과 같은 기본 방법에 출발한다. 한국환경 공단은 2015년부터 「지자체 온실가스 인벤토리 구축 사업」을 진행하여 매년 전국 243개 지자체의 온실가스 인벤토리를 구축하여 제공하고 있다<그림 1.7>. 현재 대부분의 국가들은 1996 IPCC Revised G/L과 2000 IPCC GPG를 많이 활용하여 온실가스 배출량을 산정하고 있으며, UNFCCC에서도 현재까지 두 지침서만을 공인하고 있다「5」.

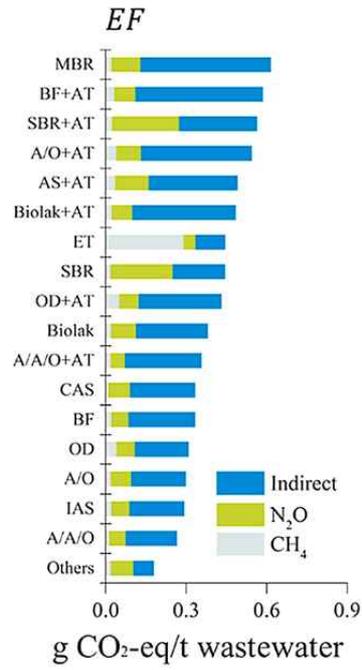


<그림 1.7> 온실가스 배출량의 기본 산정 가이드 (출처: 한국환경공단)

생물학적 하·폐수처리시스템은 사용되는 공정, 처리 대상 폐수의 특성, 운영 환경의 지리적 위치, 폐수처리 기자재의 정비 상태 등의 차이에 따라 온실가스 배출 계수가 다르게 나타난다<그림 1.8>. 다양한 생물학적 처리 공정에 대하여 온실가스 배출계수를 조사하였지만 각 연구에서 통일된 시료채취 및 분석방법이 적용되지 않아 측정값의 정확성을 확인할 수 없었으며, 전체 공정에 대하여 일부의 선택 공정에서만 온실가스를 측정하였기 때문에 제시된 배출계수를 서로 비교분석하는데 한계가 있다. 또한, 온실가스 발생량 산정은 수행기관, 방법별로 큰 차이를 보이고 있으며 해외 선진국의 연구결과와도 상당한 차이가 있으며, 이러한 데이터를 활용하여 실질적으로 온실가스 배출량을 정확하게 산정하는데 한계가 있다.



GHG: greenhouse gas
 EF: emission factor
 AT: advanced treatment
 CAS: conventional activated sludge
 IAS: improved activated sludge
 A/A/O: anaerobic-anoxic-oxic
 A/O: anaerobic-oxic
 OD: oxidation ditch
 SBR: sequencing batch reactor
 MBR: membrane bioreactor
 BF: biological film
 ET: ecological treatment

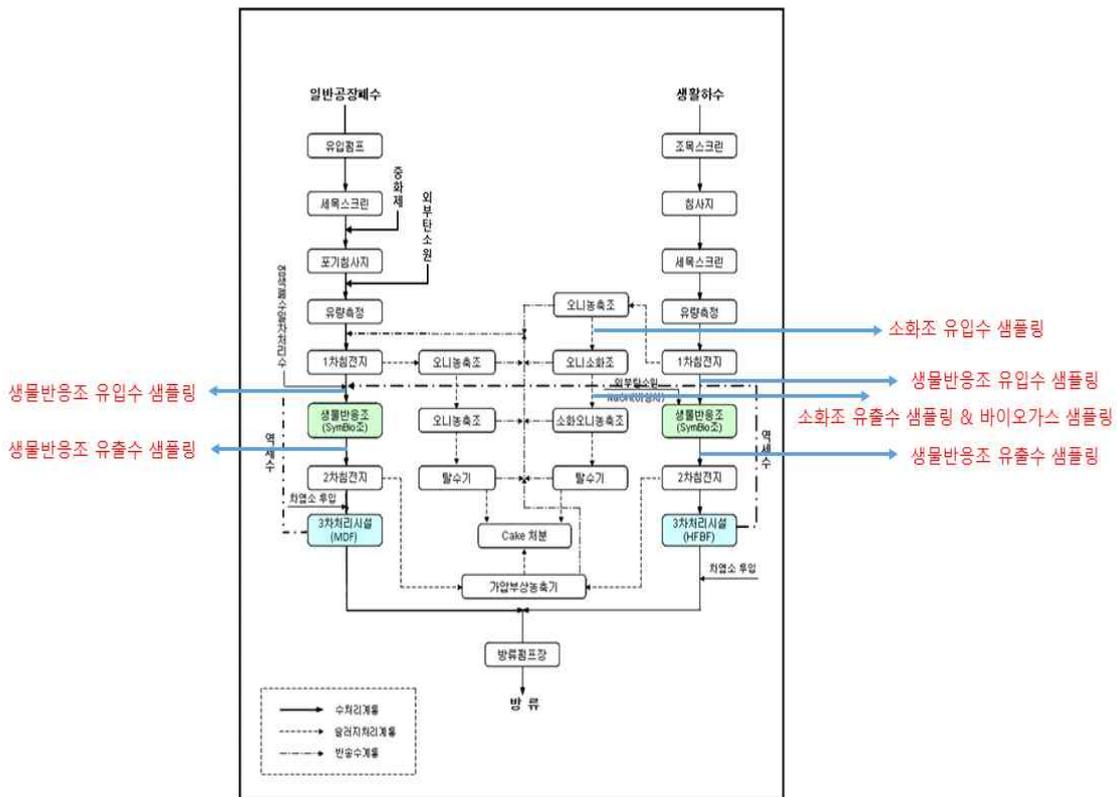


<그림 1.8> 생물학적 하·폐수처리 공정들의 온실가스 배출계수 차이[6]

제 2 장 연구방법

2.1. 하·폐수 및 슬러지 시료 채취

생물학적 하·폐수처리시설의 특성을 반영한 온실가스 발생량 산정법을 적용하기 위하여 현재 진행되고 있는 운영법과 기술 조사가 필요하여 현장 조사를 진행하였다. 안산시 내 생활하수와 공장폐수를 각각 처리하는 안산시 공공 하수처리장은 단계별 수처리를 거쳐 방류되고 있다. 또한 생물학적 처리과정 위주의 하·폐수 처리장이기 때문에 본 연구에 적합한 처리장이라고 판단하였다. 이 때, 발생된 천연 에너지자원인 메탄가스는 소화조 보일러 연료로 재활용 된다. 본 연구에서는 현장 답사, 조사 및 현장 내 유입되고 있는 하·폐수 및 각 수처리를 거친 처리수를 채수하는 과정을 진행하였다. 안산시 공공하수처리장의 하·폐수처리계통에 따른 조사 및 샘플링 포인트는 <그림 2.1>과 같다. <그림 2.2>, <그림 2.3>은 안산시 공공하수처리장 내 모든 처리공정을 거치고 방류되기 직전의 생활하수와 공장폐수 저류 및 방류 지점에서 샘플링을 진행하고 있는 과정을 보여주고 있다. 본 연구에 사용된 음식물류 폐기물은 안산시 음식물류 폐기물 자원화시설 집하 장치에서 채취하였다.



<그림 2.1> 안산시 공공하수처리시설의 하·폐수처리계통 및 샘플링 지점 선정

시료 채취는 수질오염공정시험방법 환경부 고시방법에 따라 진행하였으며 수동으로 시료를 채취할 경우, 30분이상 간격으로 2회이상 채취하여 일정량의 단일시료로 하였다. 수소이온농도 (pH)와 수온 등 현장에서 즉시 분석하여야 하는 경우, 30분 간격으로 2회 이상 측정 분석한 후 산술평균하여 측정 분석값을 산출하였다. 또한, 환경부 고시 방법 내 유의사항에 따라 시료는 목적 시료의 성질을 대표할 수 있는 위치에서 시료채취용기 또는 채수기를 사용하여 채취하였으며 채취용기는 시료를 채우기 전 시료로 3회 이상 씻은 다음 사용하였다. 2부유물질이 함유된 시료는 시료의 균질성이 유지될 수 있도록 채취하였으며 침전물 등이 부상하여 혼입되지 않게 하였다. 시료 채취 용기에 시료를 채울 때에는 어떠한 경우라도 시료의 교란이 일어나서는 안되며 가능한 공기와 접촉하는 시간을 짧게 하였다. 채취된 시료는 즉시 시험 분석에 사용하였으며, 그렇지 못한 경우 시료의 보존 방법에 따라 보존하고 규정된 시간 내에 분석을 수행하였다. 시료 채취량은 시험 항목 및 시험 횟수에 따라 3~5L 정도로 채취하였다.



<그림 2.2> 생활하수 방류지점 채수 현장



(A) 공장 폐수 방류 지점

(B) 공장 폐수 방류수 채수 현장

<그림 2.3> 공장폐수 방류지점

2.2. 수질특성, 슬러지농도 및 표준물질 분석

유입 하·폐수 및 각 처리조 유출수 및 방류 지점의 방류수 샘플을 채취하여 수질 및 슬러지 분석을 진행하였다. 수질 및 슬러지 성상 분석용 시료에 대하여 BOD(Biochemical Oxygen Demand), COD(Chemical Oxygen Demand), TSS(Total Suspended Solids), VSS(Volatile Suspended Solids), TS(Total Solids), VS(Volatile Solids), TN(Total Nitrogen), NO₂(Nitrogen dioxide), NO₃(Nitrates), NH₄⁺(Ammonium), pH 항목을 측정하였다. 모든 폐기물에 대해서는 실험의 정확성과 오차값을 최소화 하기 위하여 총 3회씩 측정하였다.

BOD의 경우 적정법으로 해양환경공정시험기준(2013) 해양폐기물편 제 3항 분석 방법을 참조하여 총 1회 측정된 값을 사용하였다. 실험 방법은 시료를 기포가 생기지 않도록 교반시켜주고 세척한 BOD bottle에 시료를 천천히 부어 채우며 초기 용존산소량을 측정 후 bottle 마개를 꼭 닫은 후 뚜껑 위에 물을 부어 마개 주위를 밀봉하고 para film을 이용하여 2차 밀봉을 진행한다. 이후 20℃에서 5일간 저장하고 5일 후 남아있는 용존산소량을 측정하여 BOD 계산식에 근거하여 보정 및 계산을 진행한다.

COD, TN, NO₂, NO₃, NH₄⁺ 항목은 standard method(APHA, 2005)와 HACH사 제품 내 실험방법을 참고하고 준하여 실시하였다[8]. TS, VS, TSS, VSS 또한 standard method(APHA, 2005)에 준하여 실험을 진행하였으며 TSS 및 VSS는 Whatman 여과지를 이용하여 실험을 진행하였다. 또한 각각의 항목에 대하여 분석을 실시하기 전, 표준물질을 통하여 실험에 오차율을 최소화 하였다. 본 실험에 사용된 항목별 표준물질은 <표 2.1>에 나타내었다.

<표 2.1> 수질 및 슬러지 분석에 따른 항목별 표준물질

Item	Standard substance	Error rate or Error range
CODcr	글루코스, 프탈산수소칼륨	유기물 산화율 95~100%
BOD	글루코스+글루타민산	220 ±20 mg/L 범위, 오차율 9%
T-N	질산칼륨	오차율 10%
NO ₂	페놀니트로프로지트나트륨 용액 차아산염소산나트륨 용액	
NO ₃		
NH ₄ ⁺		
TS	미세결정성 섬유소 (셀룰로오스)	기기오차 + 시험방법에서 기인하는 오차 반영하여 15%~30% (환경관리공단 2008)
VS		
TSS		
VSS		
pH	pH 4.0 : 프탈산 수소칼륨 pH 6.8 : 인산이수소 칼륨 pH 10.07 : 탄산수소 나트륨 + 무수탄산 나트륨	-

2.3. 원소분석

유기물의 분자식을 도출 한 후 유기물이 산소와 반응하여 산화되는 화학양론에 따라 유기물 질량당 생성하는 산소 요구량(COD' /W)을 결정하기 위하여 유입 하·폐수 및 각 처리조 유출수 및 방류 지점의 방류수 샘플을 채취하여 원소분석을 진행하였다. 폐수 유기물의 주요 구성 원소인 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N)의 백분율 분포를 파악하였으며 폐수 유기물의 분자식은 C, H, O, N의 분포에 따라 원자 수를 계산하여 도출하였다. 원소분석은 시료의 완전산화에 기초하고 있으며 모든 유기 물질을 연소산물로 전환시키며 연소 조건은 모든 시료에 대하여 탄소(C), 수소(H), 질소(N)가 이산화탄소, 수증기, 산화질소 또는 지소 원소로 변환되어야 하며 그 계산식은 다음과 같다.

$$\text{탄소(\%), } C_d = C_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

$$\text{질소(\%), } N_d = N_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

$$\text{수소(\%), } H_d = H_{ad} - \frac{M_{ad}}{8,937} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

d : 건시료 기준

ad : 측정값

M_{ad} : 분석된 일반 분석 시료의 수분(%)

2.4. CO₂ 및 CH₄ 가스 분석

유입 하·폐수 및 각 처리조 유출수 및 방류 지점의 방류수 샘플에서 발생한 가스 발생량을 측정하고 발생 가스 내 조성을 분석하기 위해서 BMP test와 슬러지 저류조, 혐기성 소화 반응조, 탈질 반응조에 대하여 lab-scale 규모의 실험을 진행하였다. 이 때, 발생한 가스 성분 중 CO₂ 및 CH₄ 가스 분석을 진행하기 위하여 Wet gas meter(W-NK-1, SHINAGAWA)를 이용하였으며 가스 포집을 진행하면서 자동으로 가스 내 조성 물질이 분석이 되는 장비를 사용하였다. 또한 정밀한 가스 조성 물질 분석을 위해 manometer 및 주사기를 이용하여 serum bottle 내의 압력과 대기압의 압력차를 측정하여 주사기로 압력차만큼 발생된 가스를 채취하는 형식을 추가적으로 실행하였다. 주사기 및 manometer로 포집한 가스는 가스포집 백(tedlar bag)에 옮겨 담았으며 슬러지 저류조, 혐기성 소화 반응조, 탈질 반응조의 경우 24시간 단위로 매일 포집된 가스를 분석에 사용하였다. 포집된 가스는 Wet gas meter와 G/C system (Agilent Technologies 7890A)를 사용하여 분석을 진행하였다<그림 2.4>.

BMP test의 경우, 더 이상 가스가 발생하지 않는 시점까지 진행하였다. <그림 2.5>는 GC 분석 과정을 나타낸다. G/C (가스크로마토그래피) 분석은 분석물을 기기의 시료수집 포트에 주입하면 분석물이 오븐으로 진입하여 기화되면서 carrier gas와 같이 분석 컬럼으로 이동하는 과정에서 분석물이 가지고 있는 고유한 검출 값에 의해 분석이 진행되며, 본 연구에서 CH₄ 분석을 정밀하게 분석하기 위해 GC기기로도 추가 분석을 진행하였다. 또한 각 기기의 정확한 정도 관리(QC)를 위하여 10%, 20%, 50%, 100% 함량의 CH₄ 가스를 각 장비에 주입하여 각 %별 측정값의 정확도를 검증 및 보정하였다.



(A) Gas meter



(B) 가스크로마토그래피(GC)

<그림 2.4> CH₄, CO₂ 가스 측정 장비



<그림 2.5> GC기기를 이용한 CH₄, CO₂ 가스 분석 과정

2.5. N₂O 가스 분석

N₂O 가스는 아산화질소의 화학식으로, 이는 상온에서는 안정한 무색무취의 비휘발성 기체이지만 고온과 같은 조건에서는 산소와 마찬가지로 강력한 산화제로 작용한다. 또한 아산화질소는 대기 중에 존재할 때, 오존층을 파괴하는 요인 중 하나로 환경 문제에 심각한 악영향을 끼칠 수 있는 유해인자이며 지구온난화 기여율이 CO₂에 비하여 298배 정도로 알려져 있다. 본 연구에서는 N₂O 가스 측정을 위하여 자동 흡입 센서식 장비(Gas-tiger2000)를 이용하여 측정을 진행하였다. 측정 방식은 자동 펌프 흡입식으로 내장 공기펌프를 이용하여 흡입 측정 방식이며 공기펌프 유량은 500 mL/min이다. 가스 측정 범위는 0~10,000 ppm까지 측정이 가능하며 최적 운전 환경은 -20 °C ~ +55 °C, 습도 10~95%로 권장된다. 가스의 측정 오차 범위는 $\leq \pm 3\%$ 이며 중복성은 $\leq \pm 1\%$ 로 매우 높은 측정 정확도를 나타낸다.

<그림 2.6>의 (A)는 측정 장비이며 (B)는 대기 중, 또는 측정하고자 하는 구역에서 가스를 흡입하는 유량을 정할 수 있는 유량계이다. 유입 하·폐수 및 각 처리조 유출수 및 방류 지점의 방류수 샘플에서 발생하는 N₂O 가스를 측정하기 위해 본 장비를 사용하였으며, 장비를 측정하고자하는 lab-scale 반응조 및 가스 포집 백(tedlar bag)에 연결 후 측정을 진행하였다. 가스 포집 백(tedlar bag)에 포집이 불가능하거나 너무 적은양이 포집되는 질산화 반응조, 탈질 반응조의 경우, 장비를 직접 장비에 연결 후 유입 가스를 흘려보내어 분석용 가스를 채취하였으며 혐기 조건을 유지하기 위해 직접 가스를 흘려보낼 수 없는 슬러지 저류조, 혐기성 소화 반응조와 같은 경우에는, 가스 포집 백(tedlar bag)에 가스를 포집하여 해당 장비로 유입시켜 측정하였다 <그림 2.7>. 또한 측정 후에는 장비 내 유량 호스 등을 세척하고 다른 샘플을 채취 및 측정하는 순서로 진행하였다. 또한 각 기기의 정확한 정도 관리(QC)를 위하여 5000 ppm 함량의 N₂O 가스를 장비에 주입하여 각 ppm별 측정값의 정확도 및 정밀도를 검증 및 보정하였다.



(A) N₂O 가스 측정기



(B) 가스 유량 조절기

<그림2.6> N₂O 가스 측정기



(A) 가스 샘플 포집 과정



(B) 포집 가스 측정

<그림2.7> N₂O 가스 측정 및 샘플 포집 과정

2.6. 배출계수 조사를 위한 BMP test 및 공정별 lab-scale 실험

2.6.1. BMP Test 실험 방법

혐기소화 반응조 내 유입 슬러지, 음폐수, 슬러지 및 음폐수의 병합 폐기물의 샘플에서 발생하는 가스량 및 최종적으로 분해 가능한 유기물 양을 산정하기 위한 실험으로 BMP test를 실시하였다. BMP 실험방법(Owen 등, 1979)은 125 mL serum bottle에 안산시 공공하수처리장 혐기 소화공정에 적용한 혐기성 미생물과 안산시 공공하수처리장에서 채수한 슬러지, 음식물류 폐기물 자원화시설에서 채취한 음폐수를 주입한 후 주사기와 manometer를 이용하여 가스발생량을 측정하는 것으로 <그림2.8>의 (A)와 같다. 완전 혐기성 상태를 위해 serum bottle을 밀폐하기 전, 질소가스를 충분히 purging하였다. 모든 실험의 정확성을 위해서 duplication으로 진행하였으며 측정기간 동안의 메탄 발생량은 Park 등(2015)의 계산 방법을 참조하였다. <그림2.8>의 (B)는 BMP test를 중온 온장고에 보관한 모습이다. 가스 측정은 반응기간 동안 하루 단위로 측정하였으며 중온(35℃) 상태에서 실험하였다. 또한 측정기간 동안의 메탄 발생량은 아래 식으로 계산하였다(Noha. 등 2012).

$$V_{CH_4} = C_1(V_1 + V_0) - C_0 V_0$$

where, V_{CH_4} = produced methane volume

C_1 = methane content(%) at sampling time

C_0 = methane content(%) at previous sampling time

V_1 = biogas volume measured by syringe(mL)

V_0 = gas phase volume of the reactor(mL)



(A) BMP TEST 실험 방법



(B) BMP 실험을 위한 serum bottle

<그림 2.8> BMP 실험법 및 실험에 사용한 serum bottle

혐기성 미생물은 90mL를 동일하게 주입하였으며 주입 폐수 및 폐기물은 단독 슬러지, 단독 음폐수, 음폐수와 슬러지 병합 폐기물로, 총 3가지를 실험에 사용하였으며 각 폐기물은 1, 2, 5, 10, 20 mL씩 주입하였다. 또한, 슬러지와 음식물 탈리액의 병합 폐기물 제조시 안산시 공공 하수처리장 내 유입되는 조건과 동일하게 제조하기 위해서 슬러지 87 %와 음식물 탈리액 13 %의 비율에 맞게 제조하였다. 혐기성 소화에서 분해 가능한 유기물 양 및 가스발생량을 평가하기 위해 실시한 BMP Test의 사용된 혐기성 미생물 분석 결과는 <표 2.2>과 같다.

<표 2.2> BMP test에 적용한 미생물 슬러지 특성

Item	Value (mg/L)
TCODcr	30,700
SCODcr	11,712
T-N	3,610
NO ₂	0.55
NO ₃	115
NH ₄ ⁺	1,885
TS	31,206
VS	20,316
TSS	23,000
VSS	20,750
pH	7.75

2.6.2 슬러지 저류조 및 혐기성 소화 공정 lab-scale 실험 방법

슬러지 저류조 내 발생하는 온실가스 발생량과 가스 발생량을 파악하기 위하여 하수처리장 내 혐기소화조에 유입되는 슬러지만을 주입하여 lab-scale을 수행하였다. 또한 혐기성 소화 공정에서 발생하는 온실가스 발생량과 가스 발생량을 파악하기 위하여 하수처리장 내 유입되는 슬러지, 음식물 탈리액, 유입 슬러지와 음폐수의 병합 폐수에 대한 BMP test 결과를 통해 가장 높은 가스발생량을 나타낸 유입 조건비에 따라 3가지 혐기 공정 lab-scale을 수행하였다. 또한, 슬러지와 음폐수의 병합 폐기물 제조시 안산시 공공하수처리장 내 유입되는 조건과 동일하게 제조하기 위해서 슬러지 87%와 음식물 탈리액 13%의 비율에 맞게 제조하였다.

두 가지 lab-scale 공정의 반응조는 모두 1L의 삼각플라스크에서 진행하였으며 각각의 주입 비율은 <표 2.3>와 같으며 슬러지 저류조와 혐기소화 공정의 lab-scale 반응조에 사용된 유입 슬러지 특성은 <표 2.4> <표 2.5>에 각각 나타나있다. 슬러지 저류조 lab-scale의 경우 600, 800, 1000mL씩 주입량을 달리하여 3가지 실험을 진행하였으며 하수처리장 슬러지 저류조와 같은 조건을 맞추기 위하여 별도의 혐기성 미생물을 주입하지 않고 저류조 형태로 온실가스 발생량과 가스 발생량을 매일 측정하였다. 혐기성 소화 공정 lab-scale의 경우 BMP와 비율을 같게 주입하기 위하여 125mL serum bottle과 1L lab-scale 반응조의 비율 변화를 통해 주입량을 산정하였으며 수리학적체류시간(Hydraulic retention time, HRT) 2일을 기준으로 하여 각 폐수를 유입 유출 진행하였다.

가스 발생량 및 가스 조성 분석을 매일 24시간을 기준으로 측정하였으며 가스 발생량의 경우, 설치되어 있는 가스 포집 백(Tedlar bag)에서 50mL 주사기를 통해 다른 가스 포집백으로 옮겨 담으며 수동으로 가스 발생량을 측정하였으며 이후 발생된 가스 내 조성 성분은 CH₄와 CO₂의 경우 Wet gas meter와 G/C system, N₂O 가스 측정의 경우 자동 흡입 센서식 장비 (Gas-tiger2000)를 이용하여 측정하였다.

<표 2.3> 각 lab-scale 별 폐수 및 혐기성 미생물 주입량

Item	Total volume (mL)	Wastewater Injection volume (mL)	Anaerobic microorganism Injection volume(mL)
슬러지 저류조 1	1000	600	0
슬러지 저류조 2		800	0
슬러지 저류조 3		1000	0
혐기소화 슬러지		160	720
혐기소화 음폐수		80	720
혐기소화병합폐수		80	720

<표 2.4> 슬러지 저류조 lab-scale 반응조에 사용된 유입 슬러지 특성

Item	Value (mg/L)
TCODcr	35,100
SCODcr	1,625
T-N	1600
NO ₂	0.45
NO ₃	500
NH ₄ ⁺	600
TS	17,270
VS	11,825
TSS	13,000
VSS	11,250
pH	6.85

<표 2.5> 혐기 소화 lab-scale 반응조의 혐기성 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성

Item	Value (mg/L)
TCODcr	30,700
SCODcr	11,712
BOD	1870
T-N	3,610
NO ₂	0.55
NO ₃	115
NH ₄ ⁺	1,885
TS	31,206
VS	20,316
TSS	23,000
VSS	20,750
pH	7.75

2.6.3. 탈질 공정 lab-scale 실험 방법

생물학적 하·폐수 처리에서 질산염(NO_3)이 미생물에 의해 환원되어 최종적으로 기체상태의 질소가스(N_2)가 되어 제거되는 것이 탈질이며 혐기성 조건에서 미생물이 최종 전자수용체로서 산소 대신 질산성 질소를 이용하여 탈질에 필요한 전자 공여체로서 유기물과 질소를 감소시키는 것으로 정의된다. 이 작용은 *Bacillus*, *Aerobactor*, *Lactobacillus*, *Spirillum*, *Pseudomonas*와 같은 박테리아에 의해 이루어진다. 이때 탈질에 관여하는 미생물 및 종별 특성을 살펴보면 다음과 같다. *Pseudomonas*는 탈질균 중 가장 일반적이며 폭넓게 분포하고 hydrogen, CH_3OH , 탄화수소, 유기산, 알콜, benzoates, 방향족 화합물 등 폭넓은 유기화합물을 기질로 이용한다. 이들 중 몇몇 종은 질산염을 환원시키지는 못하지만 아질산염을 탈질 시킬 수 있으며 특정한 종은 N_2 대신 최종생산물로 N_2O 를 생성한다.

안산시 하수처리장 탈질조에서의 온실가스 발생량 및 가스발생량 분석을 위하여 생물반응조에 유입되는 유입수를 채수하였으며 실험에 앞서 탈질 실험을 진행하기 위하여 생물반응조의 수질항목을 측정하였다. 그러나 질산염(NO_3) 및 아질산염(NO_2)의 농도가 너무 낮게 측정되어 정확한 실험을 위해 생물반응조의 유기물량인 400mg/L와 동일한 합성폐수를 제조하였고 유기물 농도와 맞춰 적정 탈질 농도 비율로 알려진 4:1에 맞춰 100mg/L의 질산염을 추가로 주입하였다. lab-scale 공정의 반응조는 10L 용량의 원형 반응조에서 진행하였으며 하수처리장에서 채취한 탈질미생물 10L를 주입하였다. 탈질 공정 lab-scale의 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성은 <표 2.6>에 나타나있다. 이후 혐기조건을 맞춰준 후 매일 24시간 기준으로 동일한 시간에 유입 유출을 100mL씩 진행하였다. 또한 탈질 반응조의 유출수는 질산화 반응조의 유입수로 사용되었다.

Lab-scale 탈질 반응조에서 발생하는 가스 발생량 및 가스 조성 분석을 매일 24시간을 기준으로 측정하였으며 가스 발생량의 경우, 설치되어 있는 가스 포집 백(Tedlar bag)에서 50mL 주사기를 통해 다른 가스 포집백으로 옮겨 담으며 수동으로 가스 발생량을 측정하였으며 이후 발생된 가스 내 조성 성분은 CH_4 와 CO_2 의 경우 Wet gas meter와 G/C system, N_2O 가스 측정의 경우 자동 흡입 센서식 장비(Gas-tiger2000)를 이용하여 측정하였다.

<표 2.6> 탈질 공정 lab-scale의 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성

Item	Value (mg/L)
TCODcr	7,227
SCODcr	1,590
BOD	1510.2
T-N	380
NO ₂	0.95
NO ₃	6.0
NH ₄ ⁺	60
TS	3,730
VS	3,103
TSS	3,350
VSS	2,877
pH	7.25

2.6.4 질산화 공정 lab-scale 실험 방법

생물학적 질산화는 NH_4^+ 를 최종 전자수용체로 O_2 를 이용하여 NO_2 와 NO_3 로 전환시키는 Chemoautotrophic 미생물에 의해 이루어진다. 이 과정에서 NH_4^+ 는 주로 Nitrosomonas와 Nitrospira와 같은 ammonium 산화 미생물에 의해서 NO_2 로 산화된다. 또한 NO_2 는 Nitrobacter 종에 의해 NO_3 로 산화된다. 또한 질산화 미생물은 DO농도에 매우 민감하므로 특별한 관리가 필요하며 DO농도 0.5mg/L에서도 완전한 질산화가 가능하지만(U.S.EPA, 1975) 실제 운전시 2.0mg/L 이상을 유지하는 것이 일반적이다. 또한 질산화공정은 산소가 풍부하고 유기물이 적을 수록 운전이 유리하기 때문에 탈질공정에서 유기물 제거가 이루어진 유출수를 질산화 반응조의 유입수로 사용하였다.

안산시 하수처리장 질산화조에서의 온실가스 발생량 및 가스발생량 분석을 위하여 lab-scale 공정을 설치 운전하였으며 반응조는 10L 용량의 원형 반응조에서 진행하였다. 하수처리장에서 채취한 질산화 미생물 10L를 주입하였다. 질산화 공정 lab-scale의 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성은 <표 2.7>에 나타나있다. 이후 폭기 조건을 맞춰준 후 매일 24시간 기준으로 동일한 시간에 유입 유출을 100mL씩 진행하였다. 유입수로는 탈질 반응조의 유출수를 사용하였다.

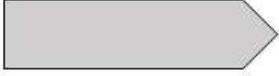
Lab-scale 탈질 반응조와 슬러지 저류조, 혐기 소화 반응조의 경우에는 발생하는 가스를 가스 포집 백(Tedlar bag)에 포집할 수 있었으나 질산화 공정의 경우 혐기 조건이 되면 운전 진행이 불가능하기 때문에 정확한 가스 발생량 및 가스 조성을 분석하지는 못하였다. 그러나 온실가스 중 N_2O 가스의 경우 측정시 반응조 뚜껑을 덮어준 후 뚜껑에 설치되어 있는 가스 유입구에 N_2O 장비 유입 호스를 연결하는 형태로 측정을 진행하였다. N_2O 가스 측정의 경우 자동 흡입 센서식 장비(Gas-tiger2000)를 이용하여 측정하였다.

<표 2.7> 질산화 공정 lab-scale의 미생물 접종에 사용한 슬러지 특성

Item	Value (mg/L)
TCODcr	4,480
SCODcr	1,330
BOD	1354.2
T-N	228
NO ₂	0.18
NO ₃	5.5
NH ₄ ⁺	27.5
TS	3,303
VS	2,690
TSS	2,947
VSS	2,352
pH	8.1

2.7. 온실가스 배출량 조사 체계

안산시공공하수처리시설의 생물학적 하·폐수처리 시스템에서 배출되는 온실가스의 배출량 조사는 <그림2.9>의 로드맵에서 보여준 것과 같은 체계로 수행하였다. 5월부터 11월까지 총 7개월에 걸쳐 공공하수처리시설에 대한 방문 조사를 수행하였으며 총 방문 횟수는 8회이다. 5월부터 7월 사이에는 주로 현장에서 운전전중인 실증 플랜트의 운영 및 관리 자료를 확보하였으며 온실가스 배출량을 산정하기 위한 실측 데이터는 9월부터 11월 사이에 총 5회의 현장 방문을 통하여 수집하였다. 9월부터 하수처리시설의 현장에서 채취한 폐수와 바이오매스 슬러지를 사용하여 Lab-scale 실험을 수행하였으며, 현장 운영 자료와 실측 온실가스 데이터를 결부하여 온실가스 배출량을 평가하였다.

조사 내용	추진일정(월)						
	5	6	7	8	9	10	11
하수처리시설 방문 횟수	1	1	1	0	1	2	2
실증 플랜트 운영 자료 조사 항목: 유량, 온도, HRT, SRT							
수질 분석 조사 항목: COD, BOD, TN, SS							
온실가스 측정 조사 항목: CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O							
Lab-scale 실험을 통한 온실가스 배출계수 및 배출량 평가							
현장 실측 데이터 분석을 통한 온실가스 배출계수 및 배출량 평가							

<그림 2.9> 안산시공공하수처리시설의 온실가스 배출량을 조사하기 위한 로드맵

2.8. CH₄ 배출량 산정

하수처리시설의 온실가스 배출량 산정은 한국환경공단의 “지자체 온실가스 배출량 산정지침”에 따라 2006 IPCC(Intergovernment Panel on Climate Change) G/L에서 제시한 방법론을 사용하였다[5,7]. 하수에 포함된 유기물과 질소화합물을 처리하는 과정에서 발생하는 CH₄ 와 N₂O 발생량을 산정하며, CO₂ 는 생물기원이므로 IPCC의 산정법에서 제외된다. 하수처리 후 발생한 하수슬러지가 매립, 소각 또는 해양배출 등으로 처리되는 경우의 배출량 산정은 고려하지 않는다. 하수처리에 의한 CH₄ 산정이 처리 시설별로 이루어져야 하므로 처리되는 총 유기물질 양은 해당 시설로 유입 처리되는 하·폐수 내 유기물질 양에 대한 자료를 확보하여 산정에 활용한다. 하수처리의 CH₄ 배출량을 산정하기 위한 계산식은 다음과 같다.

$$CH_4 Emission = \left[\sum_{i,j} (U_i \cdot T_{i,j} \cdot EF_j) \right] \cdot (TOW - S) \cdot 10^{-3} - R$$

CH₄ Emissions: 하수처리 시 CH₄ 배출량, t CH₄/yr

U: 해당 시설 유입 하수의 각 소득그룹별 이용 인구비율

T: 각 소득그룹 인구별(U) 하수처리시스템 유형별 이용률

TOW: 총 유기물질 부하량, kg BOD/yr

S: 슬러지로서 제거되는 유기물질, kg BOD/yr

EF: CH₄ 배출계수, kg CH₄/kg BOD

R: CH₄ 회수량, t CH₄/yr

i: 소득그룹(농촌, 도시 고소득, 도시 저소득)

j: 각 처리시스템 유형(중앙집중 호기처리, 슬러지 처리, 정화조 등)

하수처리에 의한 CH₄ 산정이 처리 시설별로 이루어져야 하므로 처리되는 총 유기물질 양(TOW)은 해당 시설로 유입 처리되는 하수 및 하수 내 유기물질 양에 대한 자료를 확보하여 산정에 활용할 수 있다. 하수 내 총 유기물질 부하량 TOW의 산정식은 다음과 같다.

$$TOW = \left[\sum_i (W_i \cdot BOD_i) \right] \cdot I \cdot Eff \cdot 365 \cdot 10^{-6}$$

TOW : 하수 내 총 유기물질 부하량(Total Organic Waste), t BOD/yr

W : 시설 내 유입 하수량, m³/day

I : 하수시설 내 산업폐수의 추가 유입에 대한 보정 계수

BOD : 유입 하수의 BOD 농도, mg/L

Eff : 시설의 하수처리 효율

i : 시설 내 연계 관거 하수별 분

유입 하수 내 총 유기물질이 시설 내 각 처리 공정별로 분리 산정이 가능한 경우 각 처리시스템별 이용률(T)을 구분하여 각각에 적절한 배출계수를 적용할 수 있으나 이러한 자료 확보가 어려운 경우 본 지침에서 제시하는 단일 배출계수를 적용한다. 배출계수는 CH₄ 최대 발생잠재량(B₀)에 각 처리시스템별 전환계수(MCF)를 곱하여 확보한다.

$$EF_j = B_0 \cdot MCF_j$$

EF: 하수처리 CH₄ 배출계수, kg CH₄/ kg BOD

B₀: CH₄ 최대 발생잠재량, (kg CH₄/kg BOD 또는 kg CH₄/kg COD)

MCF_j: 각 처리시스템별 CH₄ 전환계수, Factor

j : MCF 분류에 따른 하수처리시스템 종류

산업폐수의 CH₄ 배출량 산정방법은 하수부문 산정방법과 유사하게 폐수 내 분해 가능한 유기물질 부하량에 근거하여 산정한다. 폐수 내 유기물질의 농도는 일반적으로 산업유형별로 상이하므로 산업유형에 따라 활동자료 및 배출 계수를 분리 후 산정하는 것을 원칙으로 한다. 또한 이 부문 배출량 산정은 2006 IPCC G/L의 Tier2 방법을 따른다. 폐수처리를 위한 CH₄ 배출량 계산식은 다음과 같다.

$$CH_4 \text{ Emission} = \sum_i [(TOW_i - S_i) \cdot EF_i - R_i]$$

CH₄ Emissions : 폐수처리에 의한 CH₄ 배출량, t CH₄/yr

TOW_i : i 업종 폐수 내 총 유기물질, (t COD/yr 또는 t BOD/yr)

TOW유입(방류)_i : i 업종 폐수 처리시설 내 유입(방류)량 (t COD/yr 또는 t BOD/yr)

폐수처리량_i : i 업종 폐수 처리량(t/yr)

유기물농도유입(방류)_i : i 업종 폐수 내 유기물 농도(mg/L)

i : 산업부문(화학, 전기전자, 피혁·신발, 음식료품 등)

S_i : 슬러지로서 제거되는 유기물질, (t COD/yr 또는 t BOD/yr)

EF_i : 업종별 배출계수, (kg CH₄/kg COD 또는 kg CH₄/kg BOD)

R : CH₄ 회수량, t CH₄/yr

폐수의 최대 CH₄ 발생 잠재량(B₀)을 결정짓기 위해서는 가능한 범위까지 자료를 수집하였다. 따라서 MCF는 해당 시스템의 혐기성 정도를 나타내는 지표이다. 다음 식은 산업 폐수에 대한 CH₄ 배출계수 산정법을 나타내고 있다.

$$EF_j = B_0 \cdot MCF_j$$

EF_j: 각 처리/배출 경로 또는 시스템에 대한 배출계수, kg CH₄/kg COD

j: 각 처리/배출 경로 또는 시스템

B₀: 최대 CH₄ 발생 용량, kg CH₄/kg COD

MCF_j: 메탄 보정 계수

2.9. N₂O 배출량 산정

N₂O 배출량 산정은 하수처리시설별 직접배출량(고도하수처리 N₂O 배출 등)과 미차집/미처리 상태로 수계로 유입되어 자연 분해과정을 거쳐 배출되는 간접배출량을 모두 포함하고 있으며 간접배출량의 경우 하수관거로 차집되지 않거나 처리되지 않고 공공 수역으로 방류되는 양으로서 이들에 대한 중복산정은 일어나지 않는 것으로 간주한다. N₂O 배출량을 구하기 위한 단순화된 일반적인 계산식은 다음과 같다.

$$N_2O\text{Emission} = N_{\text{Effluent}} \cdot EF_{\text{Effluent}} \cdot 44/28$$

$$N_{\text{Effluent}} = (P \cdot \text{Protein} \cdot F_{\text{NRP}} \cdot F_{\text{NON-CON}} \cdot F_{\text{IND-COM}}) - N_{\text{Sludge}}$$

N₂O Emission: 인벤토리 연도의 N₂O 배출량, kg N₂O/yr

N_{Effluent}: 수환경으로 방류된 유출수 내 질소, kg N/yr

EF_{Effluent}: 폐수로 방류된 유출수로부터의 N₂O 배출에 대한 배출계수, kg N₂O-N/kg N
44/28은 kg N₂O-N를 kg N₂O로의 변환계수이다.

P: 인구수, Capita

Protein: 해당 지역 연간 1인당 단백질 소비량, kg/Capita/yr

F_{NRP}: 단백질 내 질소 비율, kg N/kg단백질

F_{NON-CON}: 소비되지 않고 하수에 추가되는 단백질 계수

F_{IND-CON}: 상·공업에서 하수관거로 추가되는 단백질 계수

N_{Sludge}: 슬러지와 같이 제거되는 질소, kg N/yr

N_{Effluent}에 의한 N₂O 배출량은 질소의 유입 경로에 따라 하수로 유입된 총 질소량에서 하수처리장에서 슬러지로 배출되는 양을 제하여 산정한다. 중앙집중식 고도 하수처리 시설에서의 N₂O 배출량의 경우는 질산화 또는 탈질화 공정을 가지고 있는 고도처리시설에 대하여만 산정한다.

2.10. 실측 온실가스 배출계수 산정

하·폐수처리시설의 생물학적수처리 과정에서 주로 발생하는 CH₄, CO₂, N₂O 가스의 실측 온실가스 배출계수를 조사하였다. 실측 온실가스 배출 계수는 하·폐수처리시설을 조사하여 수집한 현장 측정 데이터(폐수 유량, 바이오가스 배출량, 폐수 농도)와 바이오가스 발생 실험을 통하여 수집한 Lab-scale 실험 데이터를 활용하여 산정한다.

Lab-scale 배출 계수는 실험에서 발생한 온실가스의 질량과 바이오가스 발생 실험에 사용한 폐수의 질량 비율로 나타낸다. 생물학적 처리와 혐기성소화의 폐수는 COD 농도를 측정하여 대입하였고 질산화 및 탈질소화를 위한 폐수는 TN 농도를 측정하여 대입하였다. 백분율로 측정된 온실가스의 농도는 다음 식을 사용하여 부피당 질량 농도(mg/m³)로 전환한다.

$$C_g = \frac{C_{\%} \cdot 10^4 \cdot \text{mol wt}}{22.414} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{P}{1 \text{ atm}}$$

여기서 C_g: 기체의 질량당 부피 농도, mg/L

C%: 기체의 백분율 농도, %

mol wt: 기체의 몰질량, g/mol

T: 절대 온도, K

P: 절대 압력, atm

Lab-scale 실험 데이터를 적용하기 위한 온실가스 배출계수 산정 식은 다음과 같다.

$$EF_i = \frac{V_g \cdot C_i}{V_L \cdot C_L}$$

여기서 EF_i: 실측 온실가스 배출계수, kg gas/kg mass

V_g: 실험에서 발생된 바이오가스 부피, L

V_L: 실험에 사용한 폐수의 부피, L

C_i: 온실가스 농도, mg/L

C_L: COD 또는 TN 농도, mg/L

I: CH₄, CO₂, 또는 N₂O 가스

실증 플랜트의 실측 온실가스 배출계수는 하·폐수처리시설의 실제 운영 과정에서 수집한 유량 데이터와 수질 데이터를 적용하여 산정하였다. 밀폐된 공간(혐기성소화조, 슬러지 저류조)에서 바이오가스 배출구를 통해 지속적으로 배출되고 배출구의 가스 배출량을 측정할 수 있는 반응조의 온실가스 배출계수는 다음 식으로 산정한다.

$$EF_i = \frac{Q_g \cdot C_i}{Q_L \cdot C_L}$$

여기서 EF_i : 현장 실측 온실가스 배출계수, kg gas/kg mass

Q_g : 바이오가스 배출량, m^3/d

Q_L : 폐수 유입 유량, m^3/d

C_i : 온실가스 농도, g/m^3

C_L : COD 또는 TN 농도, g/m^3

i: CH_4 , CO_2 , 또는 N_2O 가스

열린 공간에서 발생된 바이오가스가 표면에서 넓은 범위로 확산되어 배출되는 반응조는 배출구를 통한 유량 측정이 불가능하기 때문에 표면발산량을 측정하여 가스 배출량을 확인한다. 표면발산량을 적용한 온실가스 배출계수의 계산식은 다음과 같다.

$$EF_i = \frac{E_i \cdot A}{Q_L \cdot C_L}$$

여기서 EF_i : 현장 실측 온실가스 배출계수, kg gas/kg mass

E_i : 온실가스이 표면발산량, $g/m^2/d$

Q_L : 폐수 유입 유량, m^3/d

A: 실증 반응조의 표면적, m^2

C_L : COD 또는 TN 농도, g/m^3

i: CH_4 , CO_2 , 또는 N_2O 가스

여기서 온실가스의 표면발산량은 실험실 측정 자료를 활용하여 다음과 같이 산정한다.

$$E_i = C_i \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Q_r}{A_r} \cdot \frac{298 K}{T+273 K} \cdot \frac{P}{1 atm}$$

여기서 Q_r : 반응기에서 배출되는 바이오가스 배출량, m^3/d

A_r : 반응기의 유효 표면적(수면 면적), m^2

2.11. 화학양론 모델을 이용한 온실가스 배출계수 산정

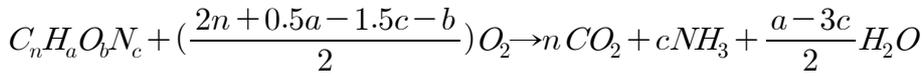
생물학적수처리 과정에서 유기물이 분해되어 바이오가스가 생성되는 생화학적 화학양론식을 도출하여 온실가스 배출계수를 산정에 적용한다. 화학양론으로 배출계수를 산정하려면 반응물과 반응산물의 분자식을 알아야 하고 물질수지에 따른 반응계수를 구해야 한다. 폐수 유기물의 분자식은 유기물을 구성하는 주요 원소 C, H, O, N의 원소분포 데이터를 활용하여 도출한다. 백분율로 나타내는 C, H, O, N의 원소분포(%)로 유기물 분자식 $C_nH_aO_bN_c$ 를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$T = \%C/12 + \%H + \%O/16 + \%N/14$$

$$n = \%C/T, a = \%H/T, b = \%O/T, c = \%N/T$$

여기서 %C, %H, %O, %N 은 유기물 분자를 구성하는 C, H, O, N의 백분율이고 n, a, b, c는 각각 C, H, O, N의 원자 수이다.

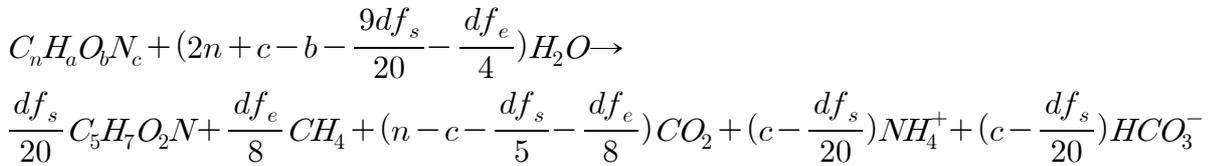
일반적으로 폐수의 유기물 농도는 유기물이 완전히 산화되는데 소모하는 산소의 양을 의미하는 COD로 나타낸다. 따라서 유기물이 산소와 반응하여 산화되는 화학양론식을 작성하여 유기물 질량당 발생하는 COD(COD' /W)의 양을 산정한다. COD' /W을 구하기 위한 화학양론 계산법은 다음과 같다.



$$COD/W = \frac{(2n + 0.5a - 1.5c - b)16}{12n + a + 16b + 14c}$$

여기서 W = 유기물의 화학식량

폐수처리에 사용되는 박테리아 세포의 분자식은 $C_5H_7O_2N$ 로 나타낸다. 혐기성소화 반응의 산물은 세포, CO_2 , CH_4 , NH_4^+ , HCO_3^- 이며 다음과 같은 화학양론으로 반응의 물질수지를 나타낼 수 있다.



여기서 $d = 4n + a - 2b - 3c$

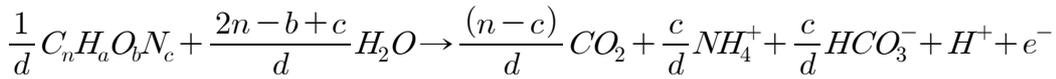
f_s 는 세포로 합성 또는 전환되는 유기물(전자 공여체)의 분율이고, f_e 는 유기물이 에너지로 전환 되는 분율이며, f_s 와 f_e 의 합은 1이다. f_s 는 세포의 에너지 생산과 합성 반응, 부패 속도 (b, 1/d), $SRT(\theta_x)$ 에 의해 결정되며 다음 식으로 평가한다.

$$f_s = f_s^0 \left[\frac{1 + (1 - f_d)b\theta_x}{1 + b\theta_x} \right]$$

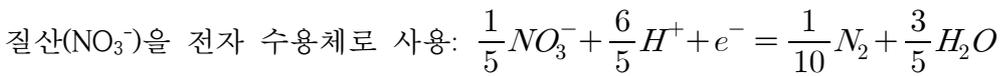
여기서 f_s^0 는 상수이고 하 · 폐수처리시설의 혐기성소화에 적용하는 값은 0.11이다.

생물반응조의 폐수처리 과정에는 유기물의 호기성 산화 반응, 질산화 반응, 탈질소화 반응이 있으며 전자 공여체, 전자 수용체, 및 세포합성의 반쪽반응으로 화학양론을 도출한다. 생물학적 폐수처리의 반쪽 반응식은 다음과 같이 분류하여 작성한다.

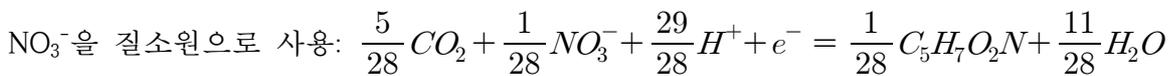
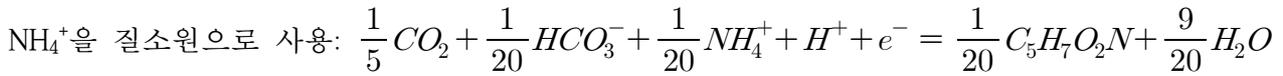
유기물을 전자 공여체로 사용하는 반쪽반응(R_d):



전자 수용체의 반쪽반응(R_a):



세포합성의 반쪽반응(R_c):



생물학적 공정의 특성에 따라 각각의 반쪽반응식을 적용하여 완성된 화학양론식(R)을 도출하였으며 산정법은 다음과 같다.

$$R = f_e R_a + f_s R_c - R_d$$

화학양론이 완성되면 물질수지 원리를 이용하여 반응산물의 온실가스 질량과 반응물의 유기물 질량 비율로 배출계수를 평가하며 산정법은 다음과 같다.

$$EF_s = \frac{G_i}{W \cdot COD/W}$$

여기서 G_i = 온실가스(CO_2 또는 CH_4)의 화학식량

2.12. 온실가스 배출량 산정을 위한 GUI 프로그램

온실가스 배출량 산정법 사용에 대한 접근성과 반복적인 계산의 효율 향상하기 위하여 MATLAB/App Designer를 이용한 프로그래밍을 통하여 온실가스 배출량 산정을 실행하는 GUI(Graphical User Interface) 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램은 2006 IPCC에서 제시한 온실가스 배출량 산정법을 적용하였고, 생활하수와 산업폐수로 구분하여 산정한다. 각 소득 그룹별 인구비율(U값), 하수처리시스템 유형별 이용률(T값), CH₄ 배출계수(EF 값), 총 유기물 부하량(TOW 값), 슬러지로 제거되는 유기물의 양(S값), CH₄ 회수량을 설정 또는 산정하여 입력하면 대상 시설의 연간 CH₄ 배출량이 산출된다. CH₄ 배출량을 등가의 CO₂ 배출량으로 전환하여 나타낼 수 있는 기능이 있다. 따라서 하·폐수처리시설의 운영 조건을 GUI 프로그램에 설정 및 입력하여 탄소 배출량을 용이하게 평가할 수 있다. 처리시설별로 산출된 CH₄ 및 CO₂ 배출량 데이터는 Excel 파일로 저장하여 데이터 관리가 용이하게 하였다.

<그림 2.10>는 온실가스 배출량 산정을 위해 개발한 인터페이스와 산정 매뉴얼을 보여주고 있으며, 프로그램의 사용법에 대한 설명은 다음과 같다. 1) 하수처리계통은 생활하수와 산업폐수로 구분되어 있으며 해당 폐수의 종류를 설정하고 시작한다. 2) 도시화에 따른 소득 그룹과 이용도에 따른 배출 경로를 선택하여 제안한 값을 적용한다. 3) 대상 폐수처리시설의 운영 자료(유량, 유입폐수 농도, 제거율)를 입력하여 총 유기물 부하량을 산정한다. 4) 슬러지로 제거되는 유기물의 양과 회수되는 메탄의 양을 입력하여 산정에 적용한다. 5) 폐수처리에 사용되는 단위 공정을 입력하면 해당하는 배출계수가 결정된다. 6) 5번까지 입력 및 설정한 내용에 따라 온실가스 배출량 산정 값이 출력 되며, 해당 처리 시스템의 이름을 입력한 후 확인 버튼을 클릭하면 7)에 기록된다. 8) 단위 공정별 산정된 값의 총 합을 탄소 배출량으로 나타낸다. 9) 산정 결과는 Excel 파일로 저장하여 보관 및 관리할 수 있다.

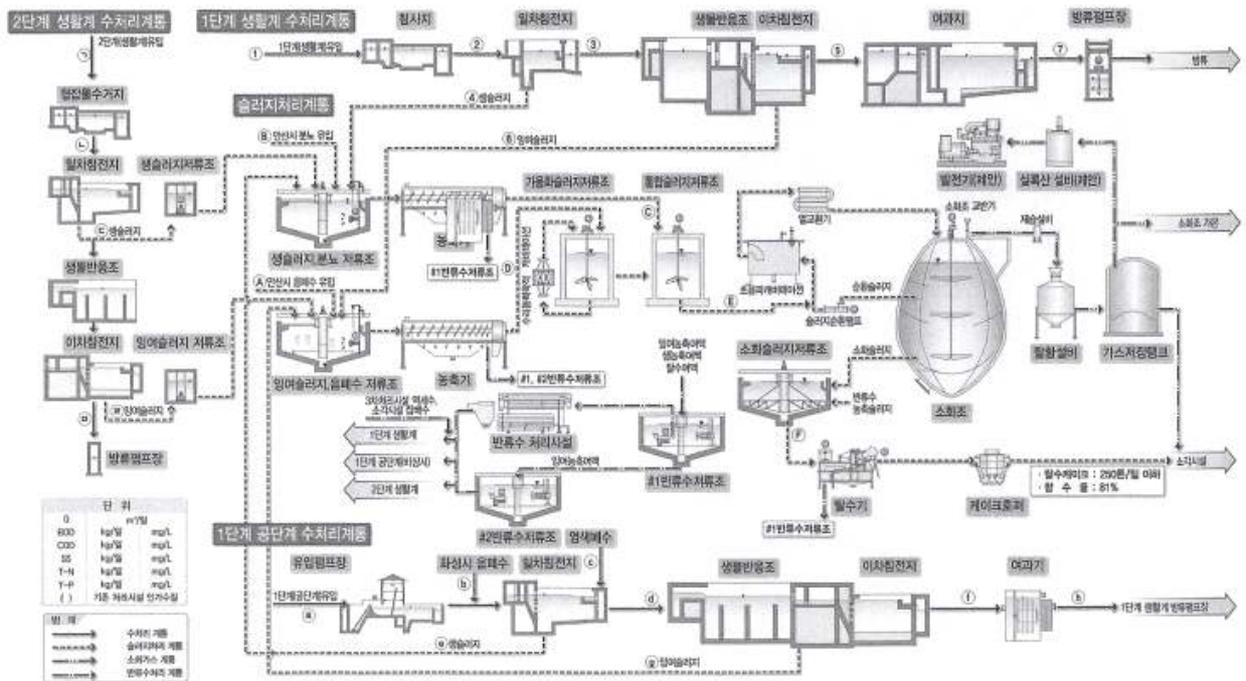


<그림 2.10> 온실가스 배출량 산정을 위한 GUI 프로그램 사용 매뉴얼

제 3 장 연구결과 고찰

3.1. 하·폐수처리시설 운영 현황 조사

<그림 3.1>은 안산시 공공하수처리장의 하·폐수처리 공정을 보여주고 있다. 안산시 공공하수처리장의 하·폐수처리과정은 생활하수 및 공장폐수가 유입 펌프장을 통해 유입되어 하·폐수 내 유입되어 들어온 비닐, 종이류와 같은 이물질은 스크린을 통하여 걸러내며 모래 등 상대적으로 무거운 물질은 침사지에서 분리시켜 1차 침전지로 이동하게 된다. 1차 침전지에서는 일정시간 체류하며 하·폐수 내 존재하는 부유물질들을 침전시켜 제거한 후 생물반응조 및 농축조로 이동하게 된다. 이후 생물반응조로 이동하게 된 하·폐수는 호기성 미생물을 이용하여 오염물질을 처리하고 2차 침전지로 이동시켜 고형물을 침전 제거하고 슬러지와 처리수를 분리하는 작업을 거쳐 처리수는 여과시설로 이동하여 소독과정을 거치고 최종 방류된다. 또한, 농축조로 이동하게 된 슬러지는 부피를 줄이기 위해 농축하고 탈수기를 통하여 수분 함량을 감소시키고 혐기성 미생물을 이용하여 유기물질을 제거하고 감량화 및 안정화한다.

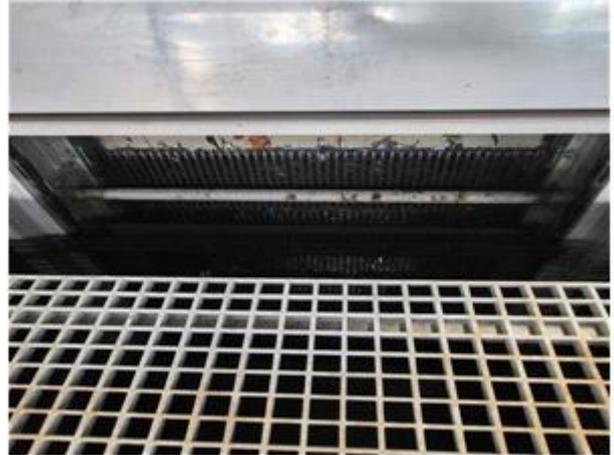


<그림 3.1> 안산시 공공하수처리장 하·폐수처리 공정 흐름도

안산시 공공하수처리장의 유입 하·폐수 처리장은 안산시 내 발생하는 생활하수와 인근 공업단지 내 발생하는 공장폐수가 각각 유입되어 들어온다. 부지면적은 약 12만평으로 1단계~3단계로 단계를 나누어 공장폐수와 생활하수를 처리하고 있다. 1단계에서 생활하수와 공장폐수를 각각 고도처리공법(Simbio)하며 2단계와 3단계에서는 각각 고도처리공법(BNR-C), 고도처리공법(SBR)로 처리하고 있다. 연간 소화조 투입량은 약 280만 톤으로 유입되며 일일 처리량은 평균 약 780톤을 처리하고 있다.



(A) 공장폐수 펌프장 및 채수 현장



(B) 공장폐수

<그림 3.2> 안산시 공공하수처리장의 공장폐수 펌프장



(A) 생활하수 펌프장



(B) 생활하수

<그림 3.3> 안산시 공공하수처리장의 생활하수 펌프장

질산화 반응조는 1차 침전지에서 처리한 하·폐수에 산소를 유입하여 호기성 미생물을 이용하여 오염물질을 처리하는 시설이며 하수처리장에서 가장 핵심 시설이며 이후 2차 침전지로 보내진다. 이 단계는 호기성 조건에서 암모니아성 질소를 아질산성 질소를 거쳐 질산성 질소로 산화시키는 단계이며 질산화 영향인자로는 산소농도(DO), 온도, pH 등이 있다.



(A) 질산화 반응조 현장



(B) 질산화 반응조 채수 현장

<그림 3.4> 안산시 공공하수처리장의 질산화 반응조

탈질 반응조는 충분한 양의 질산성 질소와 아질산성 질소가 무산소 조건에서 미생물에 의해 기체 질소 화합물로 전환되는 단계이다. 이 때, 무산소 조건에서는 미생물이 아질산성 질소나 질산성 질소를 질소가스(N_2)로 환원하여 대기 중으로 방출시켜 제거하는 단계이다. 이 단계는 2단계로 진행되며 첫 번째 단계는 질산성 질소가 아질산성 질소로 전환되는 단계, 두 번째 단계는 아질산성 질소가 질소가스로 전환되는 단계로 이루어져있다.



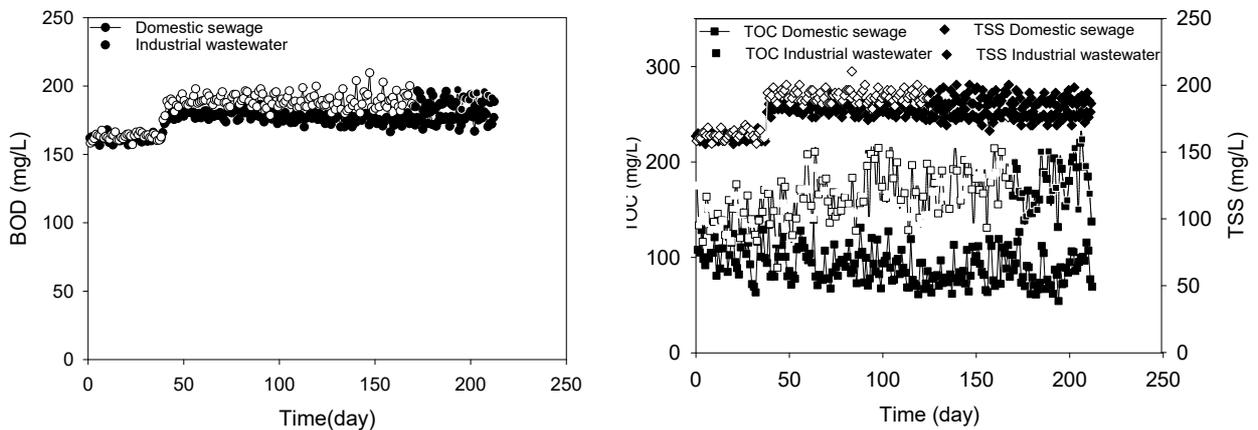
(A) 탈질 반응조 현장



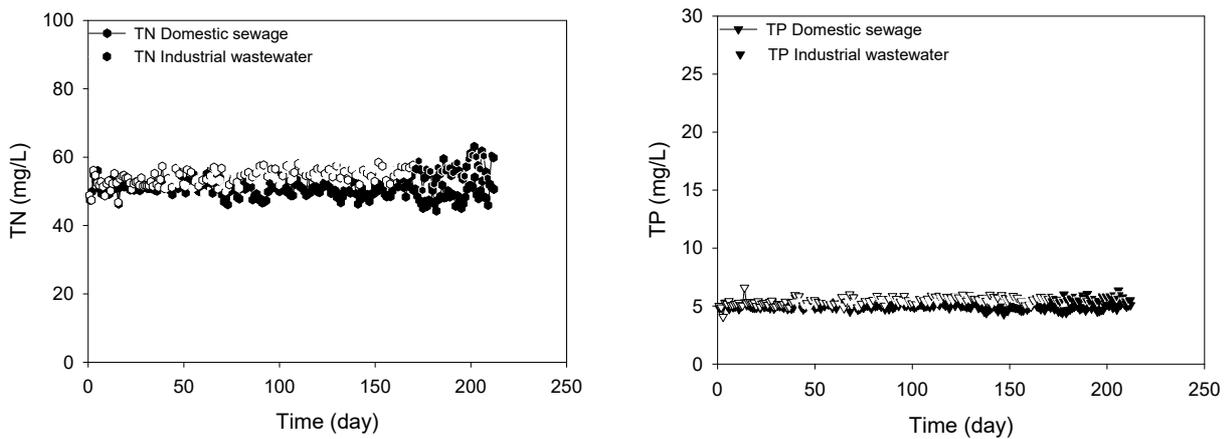
(B) 탈질 반응조 채수 현장

<그림 3.5> 안산시 공공하수처리장의 탈질 반응조

또한 <그림 3.6>와 <그림 3.7>은 안산공공하수처리장 유입 폐수의 농도 변화를 보여주고 있다. <그림 3.6>는 안산공공하수처리장의 유입 BOD 및 TOC, TSS의 농도 변화이며 <그림 3.7>은 안산공공하수처리장의 유입 TN, TP의 농도 변화를 나타낸다. 2022년 1월부터 7월까지 기준으로 안산시 평균 유입 수질은 생활하수에서 BOD와 TOC, TSS는 각각 174.15 mg/L, 92.06 mg/L와 175.88 mg/L로 나타났으며 TN과 TP는 각각 50.420 mg/L, 4.980 mg/L로 나타났다. 또한 공장폐수의 BOD와 TOC, TSS는 각각 184.16 mg/L, 167.07 mg/L와 185.88 mg/L로 나타났으며 TN과 TP는 각각 54.381 mg/L, 5.441 mg/L로 나타났다.



<그림 3.6> 안산공공하수처리장 생활하수 및 공장폐수의 유기물 농도 변화



<그림 3.7> 안산공공하수처리장 생활하수 및 공장폐수의 질소 및 인 농도 변화

다음으로, 2022년 7월 기준으로 안산시 공공하수처리장 내 방류수질은 <표 3.1>에서 보여준 것 과 같다. 생활하수의 방류 수질에서 BOD와 TN은 각각 3 mg/L, 7 mg/L로 나타났고, 공장폐수의 방류수질에서 BOD와 TN은 각각 4 mg/L, 9 mg/L로 나타났으며, 법정 기준보다 낮은 농도를 유지하고 있다.

<표 3.1> 안산시 공공하수처리장 방류수질

항목	법정 기준	생활하수	공장폐수
BOD (mg/L)	10	3	4
TOC (mg/L)	25	6	10
SS (mg/L)	10	3	4
T-N (mg/L)	20	7	9
T-P (mg/L)	2.0	0.3	0.9
대장균군 (개/mL)	3,000	11	30

음식물류 폐기물 자원화시설에 유입되는 음식물 폐기물의 양은 연간 3만6천 톤, 일일 평균 약 100톤의 양을 처리하고 있다. 음식물 쓰레기의 경우 가정, 식당 등 다양한 곳에서 배출되는 특성을 지니고 있으며 대부분 사료화 및 퇴비화 등 재활용 원료로도 사용되지만 그 효율은 좋지 않다. 이에 따라 고농도 유기물을 메탄 가스화를 위한 혐기성 소화가 각광 받고 있다.

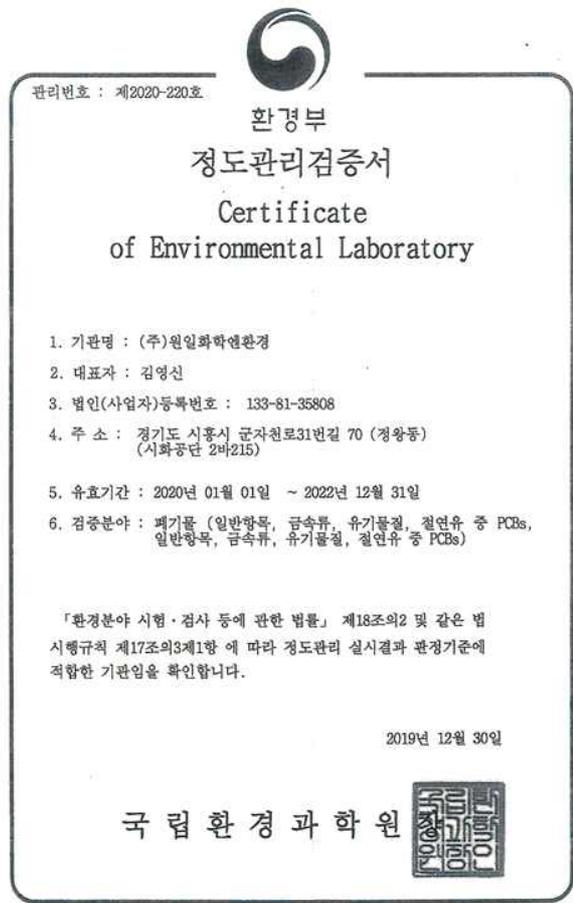
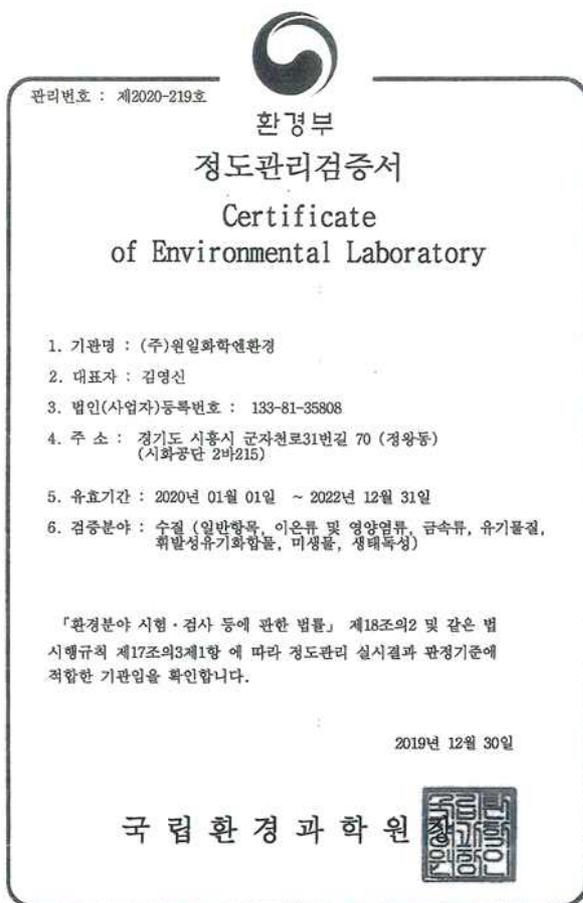
3.2. 온실가스 측정 장비 및 분석 업체의 정도 보증(QC)

3.2.1. CO₂ 및 CH₄ 측정 장비의 가스 분석 정도 보증 결과

하수처리장 및 lab-scale 반응조 내 발생한 온실가스의 정확한 측정을 위하여 온실가스 분석에 사용되는 장비인 Wet gas meter(W-NK-1, SHINAGAWA)와 G/C system (Agilent Technologies 7890A)의 정도 보증을 실시하였다. 10%, 20%, 50%, 100% 함량의 CH₄ 가스를 각 장비에 주입하여 각 %별 측정값의 정확도를 검증 및 보정하였으며 결과는 <그림 3.8>과 같다. R² 값은 결정계수로서 총 변동에서 회귀변동이 차지하는 비율을 뜻한다. 즉 회귀식이 얼마나 변수들의 관계를 잘 설명하는지, 정확한지를 나타내는 수치이며 이 수치가 1에 가까울수록 정확도가 높다고 판단할 수 있다. <그림 3.8>의 (a)와 (b)는 각각 0.98170, 0.9977의 R² 값을 나타내므로 본 연구에서 측정한 온실가스 측정량은 정확도가 높다고 판단할 수 있다.

3.2.3. 원소 분석 및 수질 분석 위탁 업체의 정도 보증 결과

본 연구에서는 생물학적 하·폐수처리에서 발생하는 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O의 발생량 산정에 필요한 수질 항목을 선정하여 조사하였으며 이에 대하여 각 하·폐수 별 원소 분석 및 연구실 내 정확한 측정값을 확인하기 위하여 분석 업체인 W화학에 분석을 의뢰하였다. 해당 업체에서 제시한 분석 데이터의 정확한 측정값 파악을 위하여 업체에서 보유하고 있는 정도 보증서를 요청하였으며 그 보증서는 아래의 <그림 3.9> 과 같다. <그림 3.9>의 (A)는 수질 검증 분야의 검증서이며 이는 일반 수질항목, 이온류 및 영양염류, 금속류, 유기물질, 휘발성 유기화합물, 미생물, 생태독성을 검증할 수 있는 증서이며 (B)의 경우, 폐기물 검증 분야의 검증서로서 일반 폐기물 항목, 금속류, 유기물질, 절연유 중 PCBs 등을 검증할 수 있는 증서이다.



(A) 수질 분야 정도 관리 검증서

(B) 폐기물 분야 정도 관리 검증서

<그림 3.9> 분석 업체의 정도 관리 검증서

3.3. 하·폐수의 수질 특성

본 연구에서는 생물학적 하·폐수처리에서 발생하는 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O의 발생량 산정에 필요한 수질 항목을 선정하여 조사하였다. 유기물의 농도(mg/L), COD, BOD, VS로 나타내고, 질소 화합물의 농도(mg N/L)는 TN으로 나타냈다. 고형물의 농도(mg/L)는 TS와 SS로 나타냈다. 호기성 처리조, 혐기성소화조, 질산화-탈질조, 침전조, 하수구로 유입 및 유출 되는 폐수의 농도를 조사하여 온실가스 발생량 산정에 필요한 데이터베이스를 구축하는 계획으로 진행하였다.

<표 3.3>는 혐기성 소화조로 유입되는 유입슬러지와 유입 음식물 탈리액과 유출되는 혐기성 소화조 유출수의 수질 특성을 나타내었다. 소화조로 유입되는 슬러지(분뇨포함)의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 4,389.9, 34,264, 18,013 mg/L이다. 총 질소의 농도는 3,994 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 24,860 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 26,800 mg/L이다. 소화조로 유입되는 슬러지의 평균 pH는 6.7로 분석되었다.

다음으로 혐기성 소화조로 유입되는 음식물 쓰레기 탈리액의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 74,600, 116,017, 86,700 mg/L이다. 총 질소의 농도는 5,692 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 78,600 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 94,600mg/L이다. 음식물 쓰레기 탈리액의 평균 pH는 3.9로 분석되었다. 혐기성 소화조 유출수의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 915, 22,704, 12,898 mg/L이다. 총 질소의 농도는 3,874 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 14,800 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 21,386 mg/L이다. 혐기성 소화조 유출수의 평균 pH는 7.5로 분석되었다.

<표 3.3> 혐기성 소화조 유입 및 유출 폐수의 수질 특성

수질 항목	농도 단위	분석값		
		소화조 유입슬러지	소화조 유입 음식물 탈리액	소화조 유출수
BOD	mg/L	4389.9	74,600	915
TCOD	mg/L	34,264	116,017	22,704
SCOD	mg/L	215.6	77,345	1,235
TSS	mg/L	24,860	78,600	14,800
TS	mg/L	26,800	94,600	21,386
VS	mg/L	18,013	86,700	12,898
TN	mg N/L	3,994	5,692	3,874
pH	-	6.7	3.9	7.5

다음으로 <표 3.4>은 하수처리장 내 질산화조와 탈질조로 유입 및 유출되는 생활계 및 공장계 생물반응조 유입수, 생물반응조 유출수의 수질 특성을 나타내었다. 생활계 생물반응조로 유입되는 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 106.3, 390, 403 mg/L이다. 총 질소의 농도는 44.2 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 175 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 480 mg/L이다. 또한 생활계 생물 반응조로 유입되는 폐수의 평균 pH는 6.9로 분석되었다.

생활계 생물반응조 유출수의 경우 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 3.2, 30, 20 mg/L이며 총 질소의 농도는 6.3 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 85 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 273 mg/L이다. 또한 생활계 생물 반응조로 유입되는 폐수의 평균 pH는 7.1로 분석되었다.

다음으로, 공장계 생물반응조로 유입되는 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 91.6, 270, 110 mg/L이다. 총 질소의 농도는 36.9 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 140 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 2,147 mg/L이다. 또한 생활계 생물 반응조소화조로 유입되는 폐수의 평균 pH는 6.8로 분석되었다.

공장계 생물반응조 유출수의 경우 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 5.2, 20, 10 mg/L이며 총 질소의 농도는 10.9 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 140 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 1,737 mg/L이다. 또한 공장계 생물 반응조로 유입되는 폐수의 평균 pH는 7.0으로 분석되었다.

<표 3.4> 생활계 및 공장계 생물반응조 유입수, 생물반응조 유출수의 수질 특성

수질 항목	농도 단위	생활계		공장계	
		생물반응조 유입	생물반응조 유출	생물반응조 유입	생물반응조 유출
BOD	mg/L	106.3	3.2	91.6	5.2
TCOD	mg/L	390	30	270	20
SCOD	mg/L	100	20	110	10
TSS	mg/L	175	85	140	65
TS	mg/L	480	273	2147	1737
VS	mg/L	403	267	360	320
TN	mg N/L	44.2	6.3	36.9	10.9
pH	-	6.9	7.1	6.8	7.0

<표 3.5>는 하수처리장으로 유입되는 생활계 및 공장계의 1차 침전지와 하수처리장의 처리과정을 거쳐 방류되는 2차 침전지의 수질 특성을 나타내었다. 생활계 1차 침전지로 유입되는 폐수의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 168.4, 450, 110 mg/L이다. 총 질소의 농도는 49.8 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 205 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 533 mg/L이다. 생활계 1차 침전지로 유입되는 폐수의 평균 pH는 6.9로 분석되었다.

생활계 2차 침전지로 유입되는 폐수의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 0.1, 20, 10 mg/L이다. 총 질소의 농도는 7.2 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 75 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 380 mg/L이다. 생활계 1차 침전지로 유입되는 폐수의 평균 pH는 6.8로 분석되었다.

공장계 1차 침전지로 유입되는 폐수의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 103, 220, 60 mg/L이다. 총 질소의 농도는 40.9 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나

타내는 SS의 농도는 205 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 1,853 mg/L이다. 공장계 1차 침전지로 유입되는 폐수의 평균 pH는 6.2로 분석되었다.

공장계 2차 침전지로 유입되는 폐수의 유기물 양을 나타내는 BOD, TCOD, VS의 농도는 각각 2.1, 10, 9.5 mg/L이다. 총 질소의 농도는 11.4 mg N/L로 분석되었다. 부유물질의 양을 나타내는 SS의 농도는 85 mg/L이고 총 고형물의 양을 나타내는 TS의 농도는 2,103 mg/L이다. 공장계 2차 침전지로 유입되는 폐수의 평균 pH는 6.6로 분석되었다.

<표 3.5> 생활계 및 공장계의 1차 침전지와 2차 침전지의 수질 특성

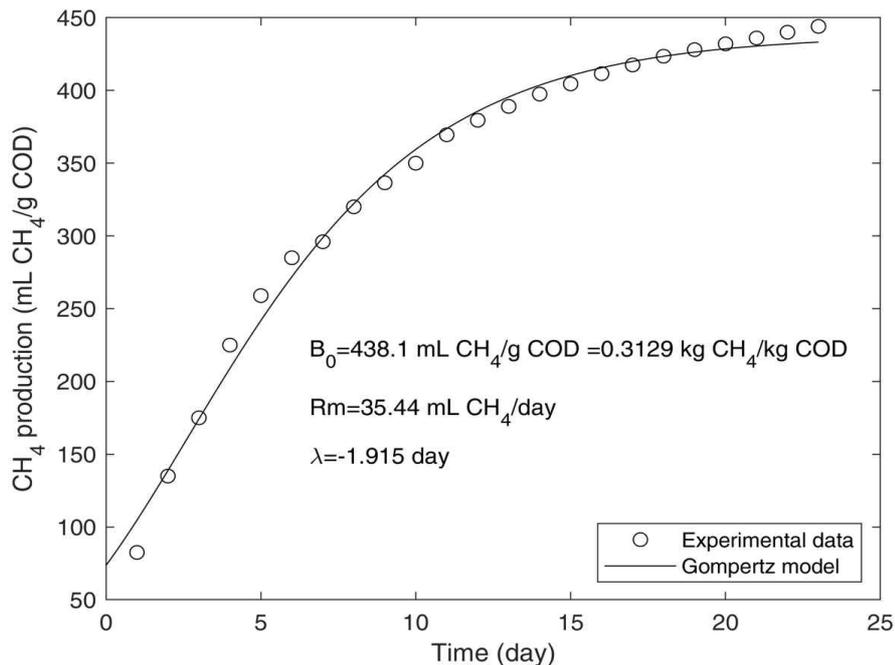
수질 항목	농도 단위	생활계		공장계	
		1차 침전지	2차 침전지	1차 침전지	2차 침전지
BOD	mg/L	168.4	0.1	103	2.1
TCOD	mg/L	450	20	220	10
SCOD	mg/L	110	10	60	9.5
TSS	mg/L	205	75	205	85
TS	mg/L	533	380	1853	2103
VS	mg/L	460	120	487	310
TN	mg N/L	49.8	7.2	40.9	11.4
pH	-	6.5	6.8	6.2	6.6

3.4. 온실가스 배출계수 조사

3.4.1. BMP test를 통한 온실가스 배출계수 조사

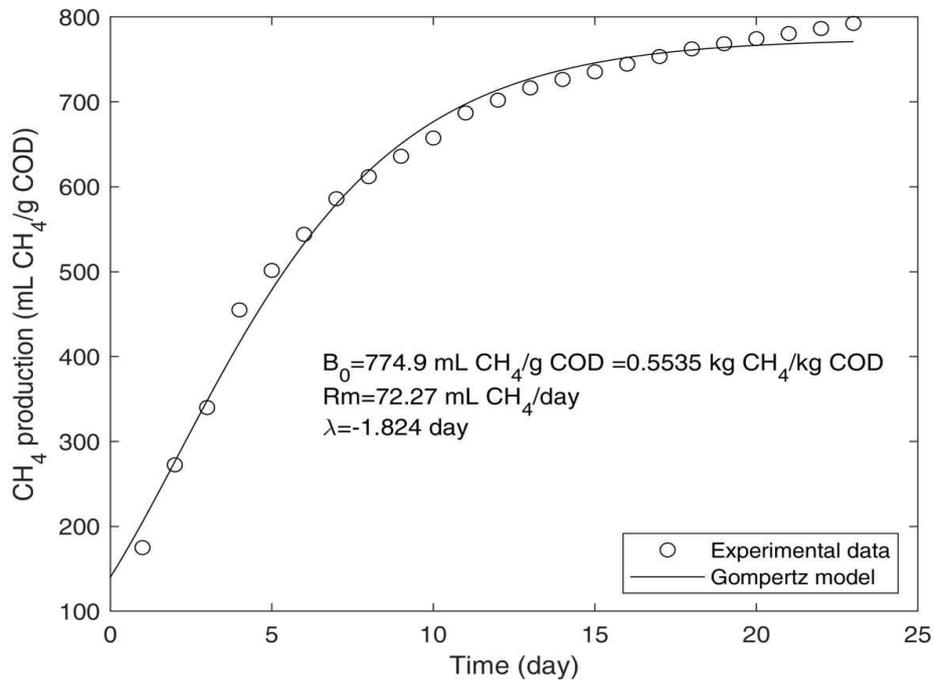
생물학적 하·폐수처리 시스템에 대한 CH₄ 배출계수는 최대 CH₄ 가스 발생 잠재량(B₀)과 하·폐수처리 및 배출 시스템에 대한 CH₄ 보정 계수(MCF) 간의 함수식으로 결정된다. B₀는 하·폐수의 유기물 양으로부터 발생할 수 있는 CH₄ 가스의 최대량을 나타낸다. MCF는 CH₄ 발생 용량이 공정별 처리 시스템에서 실현되는 범위를 나타낸다. 따라서 MCF는 하·폐수처리 시스템의 혐기성 정도를 나타내는 지표가 된다. B₀ 값은 BMP 테스트를 통하여 평가하였고, MCF 값은 Batch 테스트 또는 현장 가스 배출량 분석을 통하여 구한 배출계수(EF)에 B₀ 값을 나누어 구하였다.

<그림 3.10>은 혐기성 소화조로 유입되는 유입슬러지(분뇨포함)의 유기물 양을 COD로 나타내고, 현장에서 사용되고 있는 혐기성 미생물을 사용하여 분석한 BMP 테스트 결과를 보여주고 있다. BMP 실험 데이터에 최소제곱법으로 Gompertz 모델을 곡선 적합하여 도출한 잠재적 최대 메탄가스 발생량(B₀), 최대 메탄 생성률(R_m), 지체 시간(λ)은 각각 438.1 mL CH₄ /g COD, 35.44mL CH₄ mL/day, 1.915 day 이다. 여기서 CH₄ 가스의 부피를 질량 단위로 환산하여 나타낸 B₀ 값은 0.3129 CH₄ kg/kg COD이다.



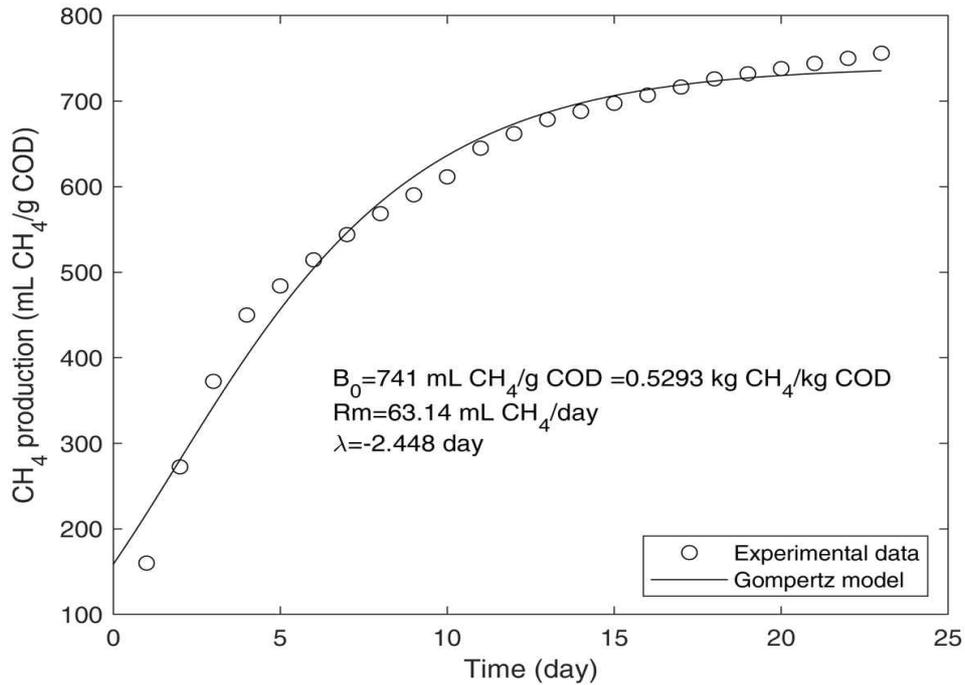
<그림 3.10> BMP 실험을 이용한 혐기성 소화조 유입 슬러지(분뇨포함)의 잠재적 CH₄ 가스 발생량 평가

<그림 3.11>은 혐기성 소화조로 유입되는 음식물 탈리액의 유기물 양을 COD로 나타내고, 현장에서 사용되고 있는 혐기성미생물을 사용하여 분석한 BMP 테스트 결과를 보여주고 있다. 잠재적 최대 메탄가스 발생량(B_0), 최대 메탄 생성률(R_m), 지체 시간(λ)은 각각 774.9 CH_4 mL/g COD, 72.27 CH_4 mL/day, 1.824 day로 나타났다. 여기서 CH_4 가스의 부피를 질량 단위로 환산하여 나타낸 B_0 값은 0.5535 CH_4 kg/kg COD이다.



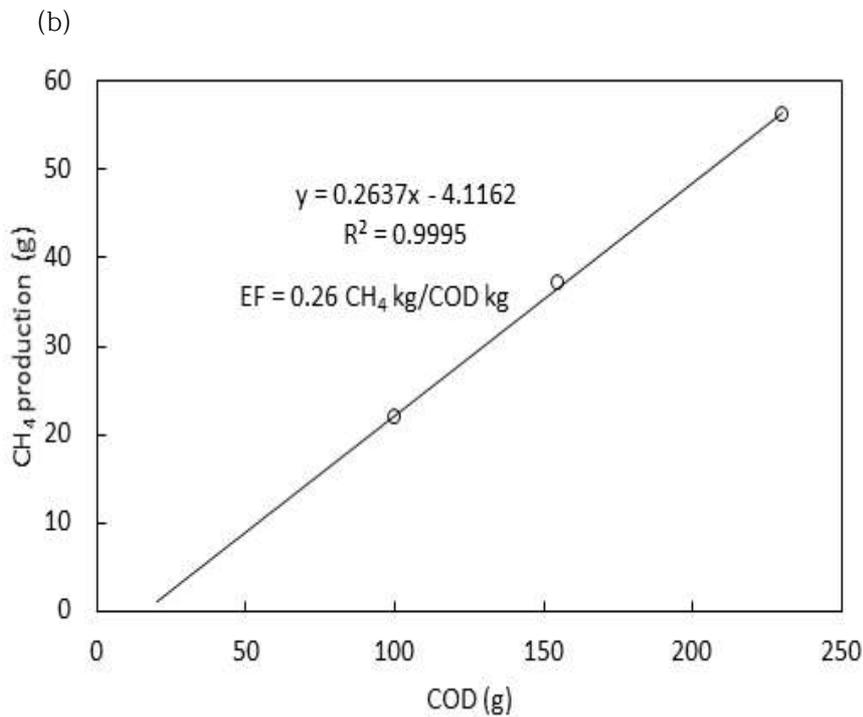
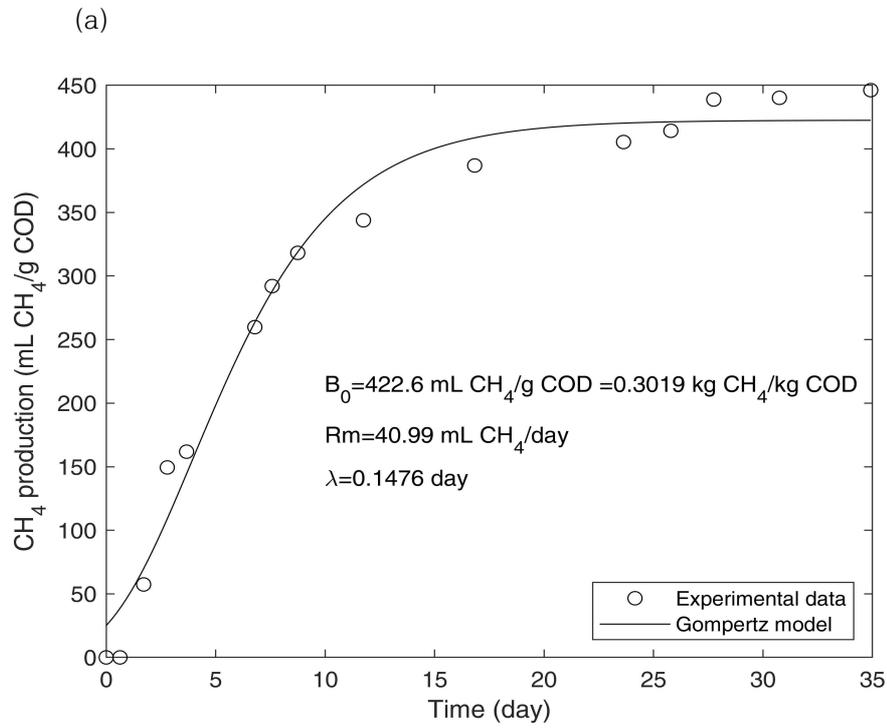
<그림 3.11> BMP 실험을 이용한 혐기성소화조 유입 음식물탈리액의 잠재적 CH_4 가스 발생량 평가

<그림 3.12>은 혐기성소화조로 유입되는 유입슬러지(분뇨포함)과 음식물 탈리액이 실제 공정에 유입되는 혼합비율을 산정하여 혼합시료를 제조한 후 평가한 결과이다. 잠재적 최대 메탄가스 발생량(B_0), 최대 메탄 생성률(R_m), 지체 시간(λ)은 각각 741 CH_4 mL/g COD, 63.14 CH_4 mL/day, 2.448 day로 나타났고, 여기서 CH_4 가스의 부피를 질량 단위로 환산하여 나타낸 B_0 값은 0.5293 CH_4 kg/kg COD이다.



〈그림 3.12〉 BMP 실험을 이용한 유입슬러지와 음식물탈리액 혼합 시료의 잠재적 CH₄ 가스 발생량 평가

〈그림 3.13〉는 혐기성 소화조의 유입 폐수(유기물 양을 COD로 나타냄)와 슬러지를 사용하여 나타낸 BMP 및 Batch 테스트 결과를 보여주고 있다. BMP 실험 데이터에 최소제곱법으로 Gompertz 모델을 곡선 적합하여 도출한 잠재적 최대 메탄가스 발생량(B_0)은 422.6 CH₄ ml/g COD, 최대 메탄 생성률(R_m)은 40.99 CH₄ ml/day, 지체 시간(λ)은 0.1476 day 이다. 여기서 CH₄ 가스의 부피를 질량 단위로 환산하여 나타낸 B_0 값은 0.3019 CH₄ kg/kg COD이다. 유기물 양의 변화에 따라 가스 발생량을 측정된 Batch 실험 데이터를 선형회귀분석으로 나타낸 배출계수의 값은 0.2637 이고 R^2 값은 0.9995 이다. 이 실험에서 도출한 EF값에 B_0 값을 나누어 구한 MCF 값은 0.87 이다.



<그림 3.13> 혐기성 소화조의 온실가스 배출 계수를 평가하기 위한 BMP 실험 데이터에 대한 Gompertz model 분석(a)과 Batch 실험 데이터에 대한 선형회귀분석(b)

3.4.2. Lab-scale 실험을 통한 온실가스 배출계수 조사

하수처리장에서 발생하는 온실가스 배출계수를 조사하기 위하여 하수처리장 내 1차침전조, 생물반응조, 슬러지 저류조, 혐기성 소화조, 2차침전지에 대하여 lab-scale 실험을 진행하였다. 가스 발생량은 매일 24시간 기준으로 측정하였으며 주사기를 이용하여 수동방식으로 측정하였다.

<표 3.6>는 1차 침전지, 생물반응조, 슬러지 저류조, 혐기성 소화조, 2차 침전지에 대한 평균적인 CH₄ 농도, CO₂ 농도, N₂O 농도, 가스발생량을 나타낸 표이다. 1차 침전지와 2차 침전지에서 발생하는 평균적인 가스농도 및 가스 발생량에 대하여 CH₄ 농도 모두 0%, CO₂ 농도는 각각 0.56, 0.43%를 나타내었다. 또한 N₂O가스는 각각 185, 160.1 ppm을 나타내며 온실가스에 있어서 높은 탄소배출량을 나타내는 N₂O가스가 지속적으로 배출되고 있음이 확인되었다. 또한 가스 발생량은 평균 0.0086L/d 를 나타내었다.

다음으로, 생물반응조에서 발생하는 평균적인 가스농도 및 가스 발생량에 대하여 CH₄ 농도는 1.27%를 나타내었으며 CO₂ 농도는 4.35%를 나타내었다. 또한 N₂O가스는 590.2 ppm을 나타내었으며 가스 발생량은 평균 0.2525L/d를 나타내었다. 혐기성 소화 공정에 유입되는 슬러지 저류조는 고농도 유기성 슬러지가 일정 기간 밀폐된 공정 내 체류하며 슬러지 자체에서 발생하는 CH₄ 및 CO₂가 있을 것으로 판단되었으며 일반적인 혐기성 소화 공정을 거치며 발생하는 CH₄ 및 CO₂ 비율이 6:4~ 7:3으로 알려져 있듯이 높은 CH₄ 및 CO₂을 배출하는 공정이다. 슬러지 저류조에서 발생하는 평균적인 가스농도 및 가스 발생량에 대하여 CH₄ 농도는 43.75%를 나타내었으며 CO₂ 농도는 19.36%, N₂O가스는 2047.8 ppm을 나타내었다. 또한 평균 가스발생량은 2.482L/d를 나타내었다. 혐기성 소화조의 lab-scale 실험에서 평균적인 가스농도 및 가스 발생량에 대하여 CH₄ 농도는 57.05%를 나타내었으며 CO₂ 농도는 25.42%, N₂O가스는 2279.8 ppm을 나타내었다. 또한 평균 가스발생량은 3.088L/d를 나타내었다.

<표 3.6> Lab-scale 공정별 가스 발생량 및 가스 조성

항목	단위	1차 침전지	생물반응조	슬러지 저류조	혐기성 소화조	2차 침전지
CH ₄	%	0	1.27	43.75	57.05	0
CO ₂	%	0.56	4.35	19.36	25.42	0.43
N ₂ O	ppm	185	590.2	2047.8	2279.8	160.1
가스발생량	L/d	0.0086	0.2525	2.482	3.088	0.0076
초기 폐수량	L	8	10	1	0.8	8
유입 폐수량	L/d	-	0.1	-	0.08	-
폐수 농도	mg/L	420	400	33,850	48,200	15

3.5. 화학양론을 이용한 온실가스 배출계수 조사

원소분석을 통하여 폐수 유기물의 주요 구성 원소인 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N)의 백분을 분포를 분석하였다. 폐수 유기물의 분자식은 C, H, O, N의 분포에 따라 원자 수를 계산하여 도출하였다. 유기물의 분자식을 도출 한 후 유기물이 산소와 반응하여 산화되는 화학양론에 따라 유기물 질량당 생성하는 산소 요구량(COD' /W)을 결정하였다. <표 3.7>는 생활하수, 혐기성 소화조 유입폐수 및 탈질소화 유기탄소원의 원소분포 백분율, 원자 수, 질량당 산소요구량 및 분자식을 보여주고 있다. 생활하수 유기물의 분자식은 C₈H₁₂O₃N₂, 혐기성 소화조 유입폐수의 분자식은 C₈H₁₇O₃N, 탈질소화 유기탄소원의 분자식은 C₇H₆O₂로 나타났다. 유기물 분자식에 따른 화학양론으로 산소요구량을 산정한 결과에서 생활하수 유기물, 혐기성 소화조 유입폐수, 탈질소화 유기탄소원의 질량당 산소요구량은 각각, 1.39, 1.83, 1.97로 나타났다. 생활하수의 유기물이 가장 높은 유기물 분자량 184 g/mol을 나타냈고, 생활하수와 혐기성 소화조 유입폐수의 유기물은 같은 탄소 함량을 나타냈다. 따라서 생활하수의 생물학적 처리 시스템에서 유기물이 산화되면 다량의 탄소를 배출하는 것으로 판단된다.

<표 3.7> 원소함율분석을 통한 폐수 유기물의 분자식 및 COD 비례

원소분석		생활하수	혐기성 소화조 유입폐수	탈질소화 유기탄소원
원소함율 (%)	C	52	55	69
	H	7	10	5
	O	26	27	26
	N	15	8	0
원자 수	n	8	8	7
	a	12	17	6
	b	3	3	2
	c	2	1	0
COD' /W		1.39	1.83	1.97
분자식		$C_8H_{12}O_3N_2$	$C_8H_{17}O_3N$	$C_7H_6O_2$

폐수 유기물의 분자식을 도입한 화학양론을 작성하여 물질수지에 따른 온실가스 배출량을 평가하였다. 생물학적수처리 공정의 특성에 따라 화학양론은 호기성 유기물 산화, 질산화, 탈질소화, 혐기성 소화로 구분하여 작성하였다. <표 3.8>은 하·폐수처리 공정의 화학양론 반응식과 화학식량으로 나타낸 물질수지를 보여주고 있다. 호기성 유기물 산화 공정에서는 184의 유기물이 산화되어 132의 CO₂가 생성되고 이를 환산하면 0.52 kg CO₂/COD kg의 CO₂ 배출계수를 나타낸다. 혐기성 소화 공정에서는 1093.8의 유기물이 분해되어 484의 CO₂와 460의 CH₄이 생성되며 이를 환산하면 0.24 kg CO₂/COD kg의 CO₂ 배출계수와 0.23 kg CH₄/COD kg의 CH₄ 배출계수를 나타낸다. 탈질소화 공정에서는 178.4의 유기탄소원이 산화되어 228.5의 CO₂가 생성되면 이를 환산하면 가장 높은 CO₂ 배출계수 0.52 kg CO₂/COD kg을 나타낸다. 질산화는 무기물 탄소원을 사용하여 세포를 합성하는 독립영양 반응이며, 질산화의 화학양론에서는 176의 CO₂가 소모되어 113의 박테리아 세포가 유기물 분자식으로 생성된다. 따라서 적절한 질산화 공정의 운전을 통하여 N₂O 가스의 발생을 방지할 수 있으며, 탄소 배출량을 감축하기 위한 생물학적 공정으로 활용할 수 있다.

<표 3.8> 생물학적 하·폐수처리 공정의 화학양론 및 화학식량

공정	화학양론						
호기성 유기물 산화	$C_8H_{12}O_3N_2 + 3O_2 \rightarrow C_5H_7O_2N + NH_3 + 3CO_2 + H_2O$						
	184	96	113	17	132	18	
질산화	$26NH_4^+ + 45O_2 + 4CO_2 + HCO_3^- \rightarrow C_5H_7O_2N + 25NO_3^- + 50H^+ + 24H_2O$						
	468	1440	176	61	113	1550	50 432
탈질소화	$1.7C_6H_5COO^- + 5.6NO_3^- + 5.6H^+ \rightarrow$						
	178.4	346.7	5.6				
	$C_5H_7O_2N + 2.3N_2 + 1.7HCO_3^- + 5.2CO_2 + 2.7H_2O$						
	113	32.1	103.6	228.5	48.5		
혐기성 소화	$6.3C_8H_{17}O_3N + 21H_2O \rightarrow$						
	1093.8	378					
	$C_5H_7O_2N + 28.8CH_4 + 11CO_2 + 5.3NH_4^+ + 5.3HCO_3^-$						
	113	460	484	94.5	320.3		

3.6. 온실가스 배출계수 및 적용방안

안산시하수처리시설 생활하수처리계통의 온실가스 배출계수를 조사하였으며 배출계수는 Lab-scale 실험, 실증 플랜트 조사, 화학양론 조사 값으로 구분하여 <표 3.9>에서와 같이 보여 주고 있다. 온실가스 배출계수 조사에 사용된 하수처리 단위 공정은 1차침전지, 생물반응조, 2차침전지, 슬러지저류조, 혐기성소화조이다. 하·폐수처리시설에 채취한 슬러지와 폐수의 바이오가스 배출 실험을 통하여 실증 플랜트의 운영을 모사한 실험실 운전 조건으로 Lab-scale 배출계수를 산정하였고, 실증 플랜트의 배출계수는 현장에서 운영하고 있는 실측 자료(유량, 농도, 가스 발생량 등)를 적용하여 산정하였다. 따라서 Lab-scale 값과 실증 플랜트 값은 적용된 실험 및 운영 조건의 차이로 인하여 다르게 나타난 것으로 판단된다.

화학양론 모델(이론 값)과 실측(실증 플랜트 측정 값) CO₂ 배출계수의 평균 오차율은 20%로 큰 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 혐기성소화조의 실측 CH₄ 배출계수는 화학양론 모델의 배출 계수와 유사하게 나타났다. 생물반응조의 CH₄ 배출계수는 호기성 및 혐기성 상태에 따라 최대가스발생량(B₀ 값)보다 작게 나타내는 전환계수로(MCF 값)로 보정되어 결정되기 때문에 생물반응조의 CH₄ 배출계수 값이 모델 값보다 작게 나타난 것으로 판단된다.

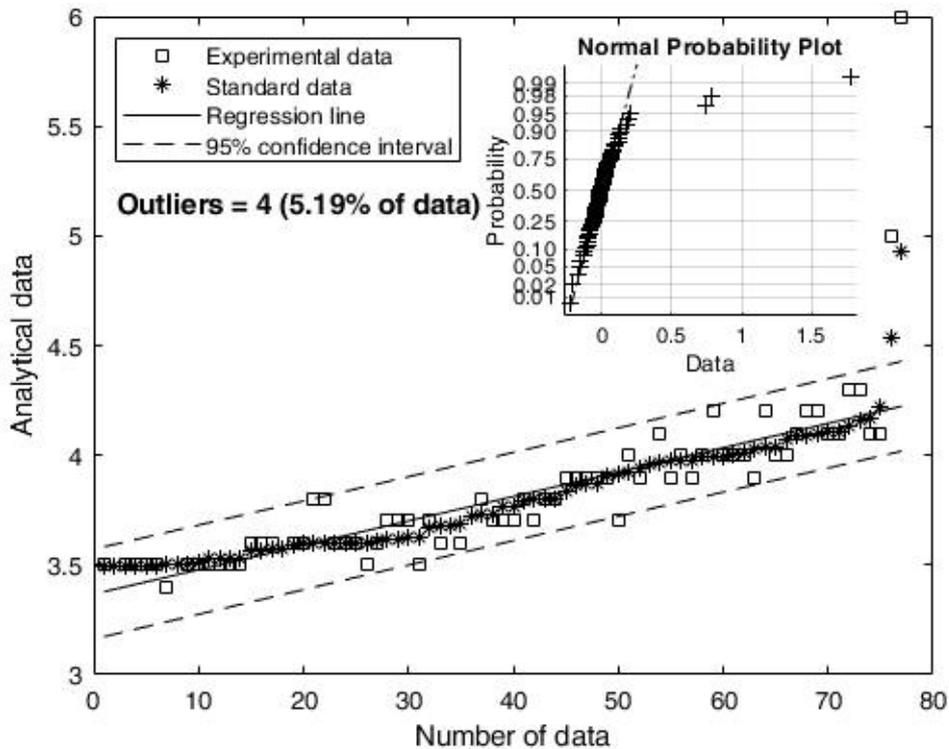
Lab-scale과 실증 플랜트의 배출계수는 본 연구의 조사기간에 도출한 값이기 때문에 연구기간에 수집한 운영 자료를 적용하여 온실가스 배출량 산정에 사용할 수 있다. Lab-scale과 실증 플랜트의 배출계수 값이 유사할 경우 실증 플랜트 배출계수를 사용하고, 값 차이가 많으면 Lab-scale 배출계수를 사용하는 것을 제안한다. 하·폐수처리시설의 온실가스 배출계수는 환경(폐수 특성, 온도, pH, 슬러지 체류시간 등의 변화)의 차이에 따라 변경될 수 있기 때문에 향후 온실가스 배출량 산정에는 운영 조건과 수질 특성을 확인하여 화학양론 배출계수 조사법을 적용하는 것이 바람직하다.

<표 3.9> 조사방법의 차이에 따른 온실가스 배출계수

조사방법	온실가스	공정별 배출계수				
		1차 침전지	생물 반응조	2차 침전지	슬러지 저류조	혐기성 소화조
Lab-scale 실험	CH ₄ (kg CH ₄ /kg COD)	0.0016	0.005	0	0.32	0.339
	N ₂ O (N ₂ O-N kg/kg N)	0.002	0.0268	0.000018	0.00717	0.0989
	CO ₂ (kg CO ₂ /kg COD)	0.025	0.49	0.00058	0.40	0.457
실증 플랜트	CH ₄ (kg CH ₄ /kg COD)	0.01	0	0.03	0.08	0.28
	N ₂ O (N ₂ O-N kg/kg N)	0	0	0	0	0
	CO ₂ (kg CO ₂ /kg COD)	0.30	0.61	0.41	0.33	0.22
화학양론 모델	CH ₄ (kg CH ₄ /kg COD)	0.28	0	0.28	0.23	0.23
	N ₂ O (N ₂ O-N kg/kg N)	-	-	-	-	-
	CO ₂ (kg CO ₂ /kg COD)	0.30	0.52	0.30	0.24	0.24

3.7. 배출계수의 신뢰도

온실가스 배출계수 조사에 사용한 수질과 온실가스 농도의 측정은 표준물질 시험법으로 분석기기와 분석 결과의 신뢰도를 평가하였다. 표준물질 데이터(Standard data)와 실험측정 데이터(Experimental data)를 비교하기 위한 결과는 그림 에서 보여준 것과 같이 선형회귀(Linear regression analysis)를 이용한 신뢰구간분석(confidence interval analysis)을 통하여 신뢰도를 확보하였다. 표준물질 데이터와 비교하여 95%의 신뢰도를 갖고 있는 실험 데이터의 범위를 나타내고 있다. 신뢰구간 분석결과에서 이상데이터(Outliers)의 출현 확률은 5.19%이며 대부분 실험 데이터는 95%의 신뢰도 범위 내에 있으며 정규분포를 나타내고 있다. 따라서 배출계수 조사에 사용한 실험 데이터는 통계학적으로 95%의 신뢰도를 갖고 있는 것으로 판단된다.



<그림3.14> 온실가스 배출계수 조사에 사용한 실험 데이터의 신뢰도를 확인하기 위한 신뢰구간 및 정규분포 분석

3.8. 하·폐수처리시설의 CH₄ 배출량 산정

생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량은 생활하수처리계통과 산업폐수처리계통으로 구분하여 산정하며, 여기서 산정법의 적용 대상과 범위는 다음과 같이 서술된다. 하·폐수는 가정, 상업, 산업 등 다양한 배출원을 통하여 발생될 수 있다. 발생한 폐수는 현장 처리되거나, 중앙집중화된 하·폐수처리시설의 하수도를 통해 배수되거나, 근처에서 처리되지 않은 상태로 배출될 수 있다. 생활하수는 사용된 가정의 물에 비롯된 폐수이며, 처리 및 배출 시스템은 처리시설마다 다르게 나타날 수 있다. 또한 처리 및 배출 시스템은 교외 및 도시의 사용자 간에 달라질 수 있으며, 도시의 고소득자와 저소득자 간에도 다르게 나타날 수 있다. 산업폐수는 지역에서 처리되거나 하수도로 배출될 수 있으며, 산업 폐수가 생활하수 시스템으로 배출될 경우 생활하수 배출량에 포함된다. CH₄ 가스는 폐수 중의 유기물이 혐기성 반응으로 분해되어 발생될 수 있으며, 분해 가능한 유기물질의 양, 온도, 처리 시스템의 유형에 따라 다르게 나타난다. N₂O 가스의 배출은 하·폐수시설의 직접적인 배출로 발생하거나, 처리 후 발생하는 유출 폐수의 간접적인 배출로 인해 발생할 수 있다. 전형적인 질산화-탈질 공정에서 발생하는 N₂O의 양은 유출수로 인한 배출량에 비해 매우 작기 때문에 고도의 중앙 집중화된 시설을 많아 가지고 있는 경우에만 중요하게 취급 된다.

안산시 공공하수처리시설에 대한 조사 결과와 기존 문헌 자료를 참고하여 CH₄ 가스 배출량을 산정하기 위한 매개변수들의 값을 설정하였다. CH₄ 가스가 발생할 수 있는 단위 공정들로 연계된 계통을 조사 대상으로 하였으며, 공공하수처리시설의 계통에는 일차침전지, 생물반응조, 이차침전지, 슬러지 저류조, 혐기성 소화조, 소화 슬러지 저류조가 포함된다. 생활하수처리계통과 공장폐수처리계통으로 구분하여 조사하였으며, 생활하수처리계통의 유기물은 BOD로 나타내고 공장폐수처리계통의 유기물은 COD로 나타낸다. <표 3.10>은 생활하수처리계통의 CH₄ 배출량을 산정하기 위해 설정한 유량, 유입수의 BOD 농도, 슬러지로 처리되는 유기성분(S), 회수된 CH₄(R)의 연간 평균값을 보여주고 있다. <표 3.11>는 공장폐수처리계통의 CH₄ 배출량을 산정하기 위해 설정한 유량, 유입수의 COD 농도, 슬러지로 처리되는 유기성분(S), 회수된 CH₄(R)의 연간 평균값을 보여주고 있다.

<표 3.10> 생활하수처리계통의 CH₄ 가스 배출량을 조사하기 위해 설정한 운영조건

단위공정	유량 (m ³ /day)	BOD (mg/L)	S (t BOD/yr)	R (t CH ₄ /yr)
일차침전지	115692	350	29.56	0
생물반응조	115692	350	2660	0
이차침전지	115692	30	2.53	0
슬러지 저류조	17900	100	1.31	0
혐기성 소화조	17900	60000	6664	79810
소화슬러지저류조	17900	1000	13.09	0

<표 3.11> 공장폐수처리계통의 CH₄ 가스 배출량을 조사하기 위해 설정한 운영조건

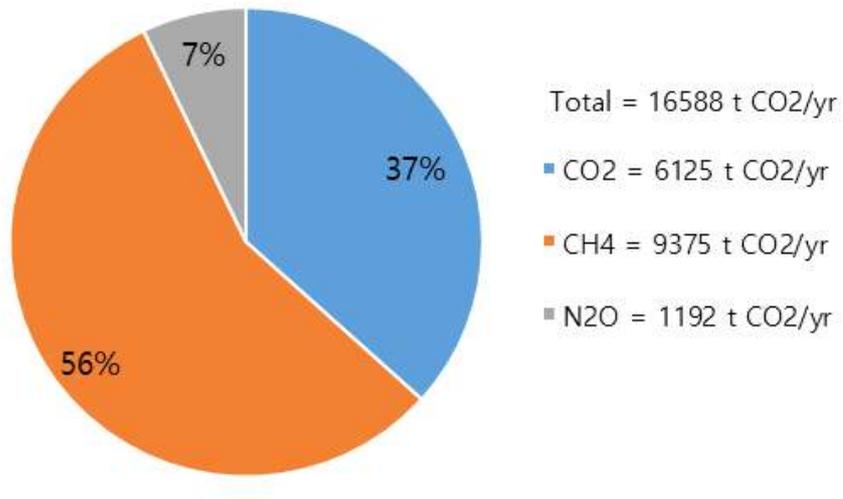
단위공정	유량 (m ³ /day)	COD (mg/L)	S (t BOD/yr)	R (t CH ₄ /yr)
일차침전지	162584	750	89.02	0
생물반응조	162584	750	8012	0
이차침전지	162584	70	8.31	0
슬러지 저류조	20600	100	1.5	0
혐기성 소화조	20600	120000	153388	116575
소화 슬러지 저류조	20600	1000	15.04	0

<표 3.10>, <표 3.11>에서 설정한 값들을 온실가스 배출량 산정을 위해 개발한 GUI 프로그램에 적용하여 연간 CH₄ 가스의 배출량을 평가하였다. 2006 IPCC 보고서에 제시한 도시-고소득의 처리, 배출 경로 및 이용도 값을 적용하였으며, 환경공단의 “지자체 온실가스 배출량 산정 지침”에 따라 산정결과를 반영하였다. 생물 반응조는 호기성 조건에서 안정적으로 운전되고 있기 때문에 CH₄ 가스가 발생하지 않는다. 혐기성 소화조에서 CH₄ 가스가 가장 많이 발생하며 연간 CH₄ 배출량은 4203 t CH₄/yr로 산정되었다. 생활하수처리계통의 총 CH₄ 배출량은 4234 t CH₄/yr이고 이는 105843 t CO₂/yr의 배출량에 상당한다.

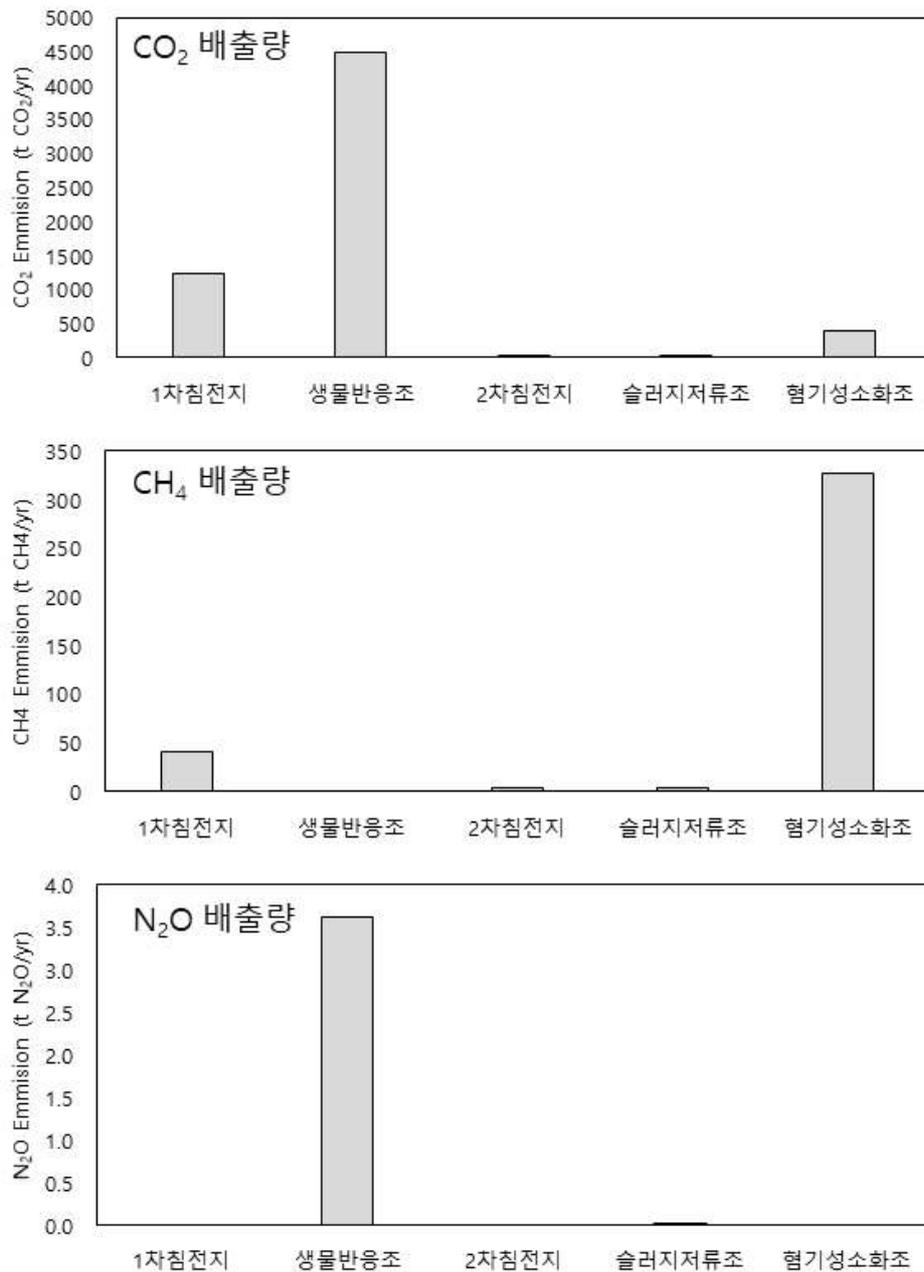
공장폐수처리계통은 높은 농도의 유기물 유입으로 인해 생물반응조가 과부하 될 수 있으며 이로 인해 용존산소 농도가 낮아지고 혐기성 조건이 형성되어 CH₄ 가스가 생성될 수 있다. 일차침전지, 생물반응조, 이차침전지, 슬러지저류조, 혐기성 소화조, 소화슬러지저류조에서 발생한 연간 CH₄ 배출량은 각각 45, 801, 4.2, 0.8, 6135, 7.5 t CH₄/yr으로 산정되었다. 공장폐수처리계통의 총 CH₄ 배출량은 6993 t CH₄/yr이고 이는 174826 t CO₂/yr의 배출량에 상당한다.

3.9. 생물학적수처리 공정의 온실가스 배출량 산정

<그림3.15>는 생활하수처리계통의 연당 총 탄소 배출량을 보여주고 있고, <그림3.16>은 1차침전지, 생물반응조, 2차침전지, 슬러지저류조, 혐기성 소화조에서 연당 발생하는 온실가스 배출량을 보여주고 있다. CO₂, CH₄, N₂O 가스의 연당 총 온실가스 배출량은 각각 6125 t CO₂/yr, 375 t CH₄/yr, 4 t N₂O/yr이다. 총 CH₄ 가스 배출량의 CO₂ 상당량(CO₂ equivalent)은 9375 t CO₂/yr 이고, 총 N₂O 가스의 CO₂ 상당량은 1192 t CO₂/yr 이다. 따라서 CH₄ 가스의 탄소 배출량이 전체 배출량의 56%로 차지하여 가장 높으며, N₂O 가스는 적은 양으로도 높은 탄소 배출량을 나타내고 있다. 생활하수처리계통의 총 온실가스 배출량은 16588 t CO₂/yr로 나타났으며, 이러한 지속적인 배출은 기후변화에 영향을 미칠 가능성이 있으며 온실가스 배출량 감축을 위한 적절한 대응 방안을 제시해야 하다.



<그림 3.15> 생활하수처리계통의 총 탄소배출량



<그림 3.16> 생물학적 생활하수처리 공정의 CO₂, CH₄, N₂O 가스 배출량

3.10. 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 감축 방안

3.10.1. 온실가스 감축을 위한 생물학적수처리 공정의 운영 방안

비용 측면에서 온실가스 배출을 감축하기 위한 가장 효율적인 방안은 하·폐수처리시설의 단위 공정별 운영조건(침전조, 생물반응조, 혐기성 소화조 등 생물학적 단위 공정의 운전 및 관리 조치)을 변경하는 것이다. 하지만 운전 중인 장치의 작동 제한 때문에 제한된 범위에서

적절한 운영조건을 설정해야 한다. 여기서 본 연구의 조사 결과에 근거하여 생물학적수처리 공정의 특성을 반영하여 실제 운영에 적용할 수 있는 조치를 제안한다.

대량의 슬러지가 체류되는 저장 탱크(농축조, 저류조, 침전조 등)는 두꺼운 재질로 밀폐하거나 뚜껑을 닫아 가스 누출을 방지해야 하며 후드를 설치하여 수집된 바이오가스를 연소하면 CH₄ 배출을 최소화할 수 있다. 생물학적 처리 시스템에서 자체로 생성되는 CH₄ 외에도 하수구에 CH₄이 함유되어 있기 때문에 외부에서 유입되는 CH₄의 영향을 받을 수 있다. CH₄ 부하는 유입폐수 COD부하의 1%로 추정되며 주로 호기성 생물학적 처리 공정(활성슬러지공법)에서 산화된다(대략 80%). 따라서 생물학적 처리조의 용존산소 농도와 수리학적 체류 시간을 적절하게 유지하여 CH₄ 배출을 감소하는 수단으로 이용할 수 있다. 이 외에 회수 시설을 정기적으로 점검 및 관리하여 높은 CH₄ 회수 효율(99% 이상)을 유지해야 한다.

하·폐수처리시설의 운전 데이터는 넓은 범위의 N₂O 배출량을 보여주었다. 이러한 변화는 하·폐수처리시설의 다양한 운영 조건과 관련이 있다. 따라서 생물학적 처리 공정에서 N₂O 배출을 유발할 수 있는 운영을 방지하여 개선 방안을 제시할 수 있다. N₂O 배출을 유발할 수 있는 경우는 (1) 질산화에 낮은 용존산소 농도가 유지되는 경우와 탈질소화에 산소가 존재하는 경우; (2) 높은 농도의 아질산이 질산화 및 탈질소화에 나타나는 경우; (3) 낮은 COD/N 비율로 탈질소화를 운영하는 경우; (4) pH, 용존산소, 암모니아와 질산의 농도가 급격하게 변화되는 경우; (5) 일시적인 무산소와 호기성 조건이 동시에 존재하는 경우 등이 있다. 이러한 경우들이 생물학적 처리에서 발생하지 않도록 수시로 모니터링이 하여 조치를 취하면 N₂O 배출을 차단하거나 줄일 수 있다. 또한 긴 고형물 체류시간(solid retention time, SRT)으로 운전하고 생물학적 반응조의 암모니아와 아질산의 농도를 낮게 유지하면 N₂O 배출을 최소화 할 수 있다.

생물학적 하·폐수처리에서의 유기물 산화와 CH₄ 연소는 직접적인 CO₂ 배출 원인이며 간접 배출은 하·폐수처리시설의 에너지 소비로 인한 것이다. 생물학적 하·폐수처리에 적용되는 SRT는 CO₂ 배출에 영향을 미치는 핵심 운영 요인이다. 높은 SRT로 생물학적 반응조를 운전하면 바이오매스의 내성 호흡을 촉진시켜 CO₂로 산화되는 COD의 양을 증가시키고 전체 슬러지 생산을 감소시킨다. 슬러지 생산량의 감소는 CH₄ 생산량의 감소를 의미하며, 따라서 연소로 배출되는 CO₂ 감소를 의미한다. 두 경향은 서로 상쇄되며 부가가치는 거의 일정하게 유지된다. SRT 감소는 또한 하·폐수처리시설의 에너지 효율의 증가와 함께 간접적인 CO₂ 배출의 감소를 동반한다. 따라서 하·폐수처리 효율에 부정적인 영향을 미치지 않는 운영 범위에서 적절한 SRT를 적용하여 CO₂ 배출을 최소화해야 한다.

3.10.2. 온실가스 배출량 감축을 위한 정책 지원

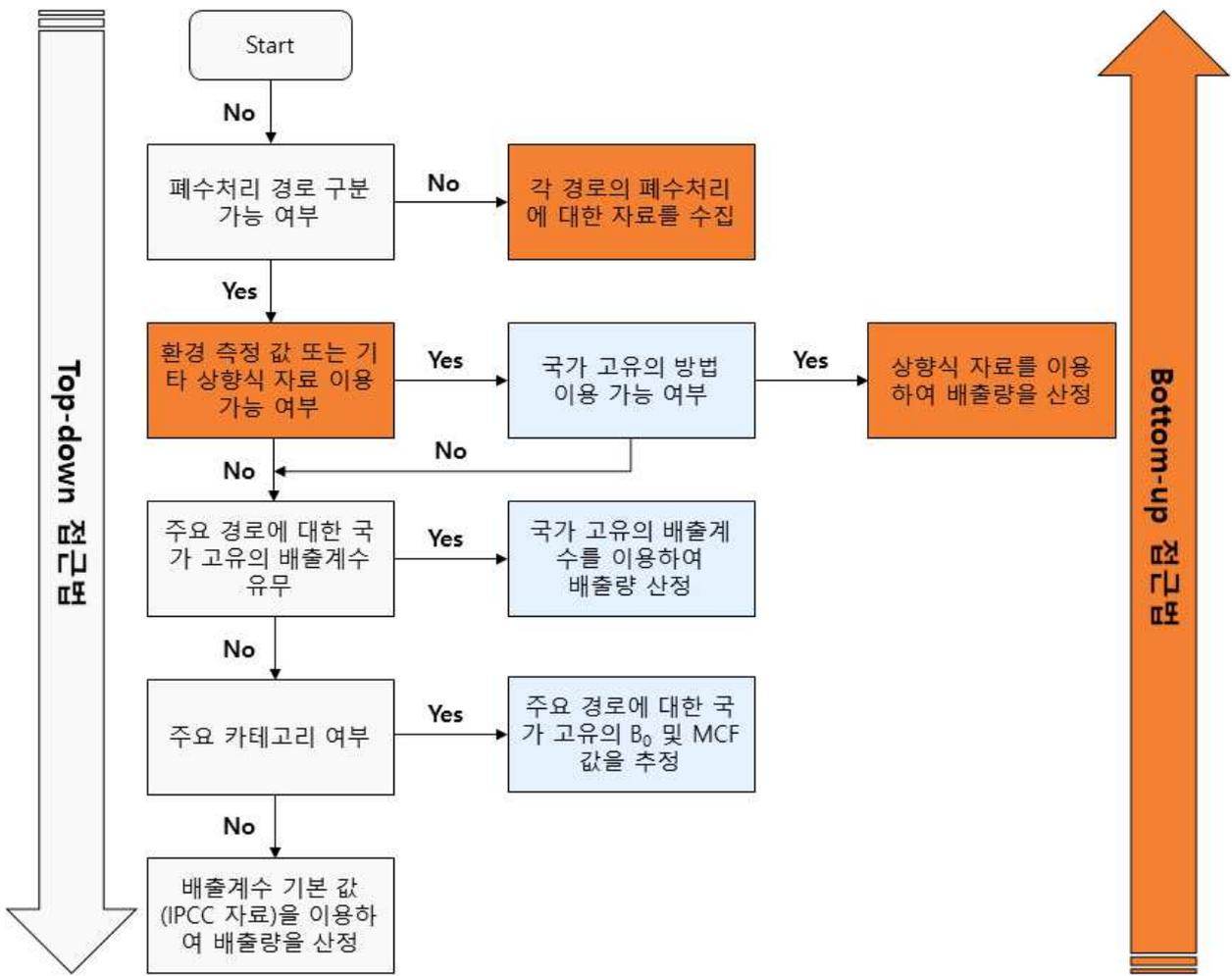
정부는 온실가스 감축 목표를 이행하기 위해 2016년 12월 ‘제1차 기후변화대응 기본계획’과 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵을 구축하였으며, 이는 국가 제1차 기후변화 대응 기본계획과 함께 확정되어 효율적으로 국가 온실가스 감축목표 예상배출량 대비 37%를 달성하기 위한 대안을 요구하고 있다. 정부는 국제 동향 및 국내 상황을 반영하여 매년 지속적으로 수정 및 보완하여 ‘국가 온실가스 감축 기여방안’을 구축해가고 있다.

환경부는 국내 온실가스 발생원별 배출량조사, 배출권거래제도 시범사업 실시 등을 기존 환경정책과 연계하여 추진하고 있으며, 관계부처의 기능적 특성을 고려한 온실가스 감축 대책을 추진하여 관련 정책간의 상호보완 및 협조를 모색하고 있다. 또한, 기후변화협약에 대한 국가협상전략은 국가 경제에 대한 영향을 최소화하고 국내 온실가스 감축대책은 적극적으로 추진하고 있으며, 실측 데이터를 활용한 기후변화 영향 평가와 적응기반구축을 통한 단계적 감축 전략을 추진하고 있다.

온실가스 감축을 보다 더 체계적으로 진행하고 국제 협상에 대비하기 위해 환경부는 실측 온실가스 배출량에 근거한 상향식 방식(Bottom-up methods)의 과학적이고 체계적인 온실가스 배출량 통계 및 배출계수의 개발을 추진하고 있다(그림 3.17). 또한, 교토의정서가 발효된 이후 그에 따른 영향과 대응에 대한 관심이 증가하고 있으며, 업종별 국가 온실가스 배출량 데이터의 통계학적 구축과 배출계수 개발은 앞으로 대안을 위한 기초자료로서 매우 중요한 역할을 한다.

IPCC는 세계 각국의 온실가스 배출량의 통계 자료를 신빙성 있게 작성하기 위해 국가 고유의 배출계수와 실측값을 사용하도록 권장하고 있다. 그동안 한국은 IPCC의 배출계수를 이용하여 연료투입량에 따라 배출량을 추정하는 방식을 국가 온실가스 배출량을 산정해 왔다. 기존의 온실가스 배출량 산정 방식은 하향식 접근법(Top-down methods)으로 총량을 산정할 수 있지만, 실제 활동량을 반영하지 않기 때문에 세분화된 배출 부문과 배출량을 확인할 수 없다. 본 연구에서는 환경부가 추진하고 있는 상향식 방식의 배출량과 배출계수를 조사하였으며, 통계적 자료가 작성되면 기존에 추진하고 있는 하향식 방식을 보다 더 신빙성 있게 보완하여 국가 온실가스 배출량 통계의 신뢰도를 높일 수 있다. 이는 과학적이고 체계적인 온실가스 통계를 근거로 하·폐수처리시설의 온실가스 감축을 위한 목표치의 설정을 가능하게 한다.

하·폐수처리시설의 온실가스 배출량과 배출계수를 측정하는 연구 결과와 데이터는 온실가스 배출량 감축 목표와 배출량 감축 잠재량 평가 및 배출권거래제도의 시행에도 참고자료로 제공되어 기여할 수 있다. 또한 단계별 온실가스 감축 전략을 수립하기 위한 자료로 활용할 수 있고 환경 및 기후변화 문제의 대책을 구체적으로 추진하는데 활용할 수 있다.



<그림 3.17> 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 조사를 위한 하향식 및 상향식 접근법

제 4 장 결 론

본 연구는 생물학적 하·폐수처리시설의 온실가스 배출량 조사를 통하여 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

- 생물학적 하·폐수처리 과정에서 발생하는 CO₂, CH₄, N₂O 가스의 배출량을 평가하기 위한 산정 기법을 도출하였다.
- 안산시 공공하수처리시설을 방문 및 조사하여 온실가스 배출량 산정에 필요한 자료를 수집하였다.
- 실증 플랜트의 실측 데이터, Lab-scale 반응기 운전 데이터 및 화학양론 모델을 적용한 접근법으로 온실가스 배출계수를 조사하여 적절한 배출계수를 도출하였다.
- 하·폐수처리시설의 운영조건을 적용하여 온실가스 배출량을 산정할 수 있는 GUI 프로그램을 개발하여 계산 효율과 산정 기법의 접근성을 개선하였다.
- 원소분석을 통하여 도출한 화학양론으로 조사한 혐기성 소화조의 CH₄ 배출 계수는 0.23 kg CH₄/COD kg이고 CO₂ 배출 계수는 0.24 kg CO₂/COD kg이다.
- Lab-scale 실험을 통하여 도출한 혐기성 소화조의 CH₄ 배출 계수는 0.339 kg CH₄/COD kg, N₂O 배출 계수는 0.0989 N₂O-N kg/kg N이며 CO₂ 배출 계수는 0.457 kg CO₂/COD kg이다.
- Lab-scale 실험을 통하여 도출한 생물반응조의 CH₄ 배출 계수는 0.005 kg CH₄/COD kg, N₂O 배출 계수는 0.0268N₂O-N kg/kg N이며 CO₂ 배출 계수는 0.49 kg CO₂/COD kg이다.
- 생활하수처리계통의 총 탄소 배출량은 16588 t CO₂/yr이고 여기서 CH₄ 가스가 56%로 가장 높은 탄소 배출량을 나타냈으며, 이러한 지속적인 배출은 기후변화에 영향을 미칠 가능성이 있다.
- 생물학적수처리의 N₂O 가스 배출량은 4 t N₂O/yr이고 이를 CO₂ 상당량으로 환산하면 1192 t CO₂/yr 이며, N₂O 가스는 적은 양으로도 높은 탄소 배출량(총 탄소 배출량의 7%)을 나타낸다.
- 연구조사 결과를 근거로 온실가스 배출량을 감축하기 위한 하·폐수처리시설의 적절한 운영 방안을 제안하였다.
- 환경부가 추진하고 있는 Bottom-up 방식의 배출량과 배출계수를 조사하였으며, 이는 기존에 추진하고 있는 Top-down 방식을 보다 더 신빙성 있게 보완하여 국가 온실가스 배출량 통계의 신뢰도를 높일 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Masters, G.M., Ela, W.P. 2014. Introduction to Environmental Engineering and Science. Pearson New International Edition. Pearson Education. London, UK.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006, IPCC Special Report: Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [4] Agency, US Environmental Protection. 2012. Summary report: global anthropogenic Non-CO₂ greenhouse gas emission: 1990-2030 [R]. Washington, D.C. 1-10.
- [5] 한국환경공단. 2017. 지자체 온실가스 배출량 산정지침. 기관 간행물 관리번호: K-eco(2017)-RF10-21.
- [6] Hua, H., Jian, S., Yuan, Z., Liu, X., Zhang, Y., Cai., 2022. Advancing greenhouse gas emission factors for municipal wastewater treatment plants in China. Environmental Pollution. 295, 118648.
- [7] Doorn, M.R.J., Towprayoon, S., Vieira, S.M.M., Irving, W., Palmer, Craig., Pipatti, R., Wang, C. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [8] APHA, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed; American Public Health Association: Washington DC, USA.

주 의

1. 이 보고서는 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.