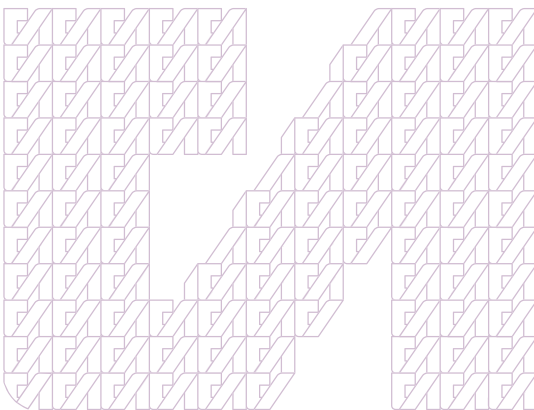


대전시 하수관로 온실가스 배출 현황 및 저감 방안

문충만



정책연구 2022-44

대전시 하수관로 온실가스 배출 현황 및 저감 방안

문충만

연구책임

- 문충만 / 지속가능연구실 책임연구위원

공동연구

- 이재근 / 지속가능연구실 책임연구위원
- 송양호 / 세종연구실 연구위원
- 김혜영 / 상생협력단 전문연구원
- 김동훈 / 인하대학교 사회인프라공학과 부교수

정책연구 2022-44

대전시 하수관로 온실가스 배출 현황 및 저감 방안

발행인 박 노 동

발행일 2022년 11월

발행처 대전세종연구원

34051 대전광역시 유성구 전민로37(문지동)

전화: 042-530-3524 팩스: 042-530-3575

홈페이지 : <http://www.dsi.re.kr>

인쇄 : 디자인U TEL: 042-526-9993

ISBN : 979-11-6075-330-1(93350)

이 보고서의 내용은 연구책임자의 견해로서 대전광역시와 세종특별자치시의 정책
입장과는 다를 수 있습니다.

출처를 밝히는 한 자유로이 인용할 수 있으나 무단 전재나 복제는 금합니다.

요약 및 정책건의

■ 연구 배경 및 필요성

- 기후위기의 심각성을 인식한 전세계 주요국에서 “탄소중립” 목표를 선언하였고, 미국에서도 향후 파리협정에 재가입하고, 2050년까지 탄소 배출 “0”을 목표로 하였음
- 정부는 에너지전환, 산업, 건물, 수송, 폐기물 등의 각 부분에 대하여 탄소중립 시나리오를 제시하고 이를 바탕으로 대전시를 비롯한 각 광역지자체는 현재 탄소중립 시나리오 계획을 수립하고 있음
- 대전광역시도 건물, 수송, 에너지, 시민협력과 도시숲으로 인한 4+1전략을 세우고 탄소중립계획을 마련하고 있음
- 다만 폐기물부문 같이 공공에서 감당하는 영역에 대해서는 온실가스 배출량 등이 다른 부문에 비해 비교적 적은 이유로 구체적인 계획을 수립하기 어려움
- 대전시에서는 폐기물 부문의 환경기초시설에 대해서는 배출권거래제를 통하여 국가 계획과 연계하여 온실가스 감축을 진행하고 있으나, 최근에 연구로 입증된 하수관거 등의 하수처리장을 위한 기반시설 등에서 온실가스가 배출되고 있는 것이 확인되고 있지만 다른 광역시와 마찬가지로 여기까지 온실가스 감축 계획이 미치지 못하고 있음
- 하수관로는 필수적인 도시기반 시설로 시민 생활환경 개선과 공공수역의 수질개선 역할을 하고 있으나, 하수관로에 유입된 오수나 분뇨 등에서 하수처리장으로 이동하는 동안의 상당한 양의 온실가스(CH₄, N₂O)를 배출하고 있으나 아직까지 명확히 연구가 진행되지 못했음
- 따라서 본 연구에서는 대전시 하수처리장에 유입되는 하수관로 등을 조사하여 온실가스 배출 실태와 현황을 분석하고 대전시 내 하수관로에서 온실가스를 저감할 수 있는 방안을 검토하고자 하며 대전시에 적용할 수 있는 방안들을 제시하고자 함

■ 연구결과

□ 대전시 하수관거 내 온실가스 배출량

- 하수관거 유래 온실가스 배출량을 산정하기 위해 IPCC에서 제시된 가이드라인 및 산정식은 아직 존재하지 않음
- 본 연구에서는 IPCC의 하수처리 분야에서 일반적으로 사용되는 방법과 유사한 접근 방법을 이용하여 대전시 하수로부터 배출되는 총 COD(chemical oxygen demand, 화학적산소요구량) 양을 식을 이용하여 산정하여 예상 온실가스 배출량을 산정
- 연간 하수의 유기물 배출량(TOPR)은 환경부에서 발표한 일일 하수 배출량인 약 21,000,000 t/d, 하수의 유기물 농도는 일반적인 COD농도 범위를 고려하여 0.2-0.5 kgCOD/tonsew를 이용하여 유기물량을 산정하였음
- 국내 하수관거 유래 온실가스 잠재량을 식(3)을 이용하여 계산하였으며, 하수관거에서 분해되는 COD의 양인 TODR_{sew}는 본 연구에서 가변 인자로 설정한 하수의 COD 농도, 하수관거에서의 COD 분해율에 따라 계산될 수 있음
- 그 후 메탄 생성량은 계산된 TODR_{sew}에 유기물이 미생물에 의해 완전히 사용되어 메탄을 생성할 때의 이론적 수율인 0.25 gCH₄/gCOD를 이용해 산정하였음
- 산업부문의 경우 ‘승용차요일제’의 참여율이 낮아 다른 부문에 비해 다소 낮게 평가됨

■ 연구결과

□ 하수관거 내 온실가스 배출 저감 방안

- 하수관거로부터 발생하는 온실가스 배출량을 줄이기 위해 현재까지 연구된 하수관거 유래 온실가스 저감 기술을 크게 화학적 방법과 물리적 방법 등으로 구분할 수 있음
- 현재까지 가장 많이 연구된 화학적 방법은 약품을 투입한 것으로서 대체 전자수용체 첨가, pH 조절, 금속 이온 첨가 등으로 나타남
- 다만 현재까지 연구된 화학적 방법을 이용한 온실가스 저감 연구는 효과적인 결과를 도출하였지만 짧은 지속 시간과 현장 적용의 어려움으로 실제로 적용되는 사례가 드물며 실험실 규모 연구 단계에 머물러 있음
- 화학약품과 같이 직접적으로 메탄 생성 또는 미생물 활성을 조절하는 방법 이외에도 하수관거 벽면에 부착된 바이오필름의 생성 억제 및 탈락 유도도 하나의 메탄 생성 및 배출 저감 접근 물리적 방법이 될 수 있음
- 하수가 하수관거를 따라 흐르는 과정에서 하수와 관 벽 사이에 발생하는 전단력은 바이오필름이 벽에 부착되는 것을 방해하는 요소임
- 즉, 큰 전단력을 형성하는 요인인 높은 하수관거 경사 또는 빠른 유속과 같은 조건은 하수관거 표면에 바이오필름의 생성 억제 및 탈락을 유도하여 결과적으로 온실가스 생성을 저감할 수 있음
- 최근에는 하수관 내 침전물에 초음파처리를 해 초음파가 전파되는 동안 미세기포를 형성하고 기포가 터지면서 주변에 전단력을 생성하는 원리를 이용한 연구도 진행된 바 있음
- 초음파를 통해 생성된 전단력은 직접적으로 미생물을 죽이거나 온실가스 및 악취물질을 저감시키지는 않지만, 수리학적 저감 기술과 유사하게 간접적으로 하수관 벽에 형성된 바이오필름을 탈락시키거나 하수 흐름을 통해 자가 세척이 가능하도록 유도하여 온실가스의 생성 및 배출을 억제하는 방법임

■ 정책건의

- 공공부문의 대표적인 온실가스 배출원 중의 하나는 하수처리시 발생되는 것으로 현재는 하수처리장에서의 온실가스 배출은 관리하고 있지만 앞으로 IPCC에서 언급한 숨은 메탄 배출원 중 하나인 하수관거에서의 온실가스 배출 관리도 필요할 것으로 사료
- 하수관거로부터 다량의 온실가스 배출을 억제하기 위해서 크게 화학적, 물리적 방법을 적용한 기술들이 연구되고 있으며 추가적으로 하수관거 코팅과 같은 다른 분야의 연구를 하수관거 온실가스 배출 저감에 접목시키는 방법도 함께 고려해보는 것이 필요
- 또한, 정확한 온실가스 배출량 산정을 위해 실제 배출량에 대한 데이터 베이스 구축과 데이터베이스를 기반으로 한 Tier2 이상의 온실가스 배출량 산정 방법의 국내화를 위한 꾸준한 연구 수행이 필요
- 앞으로 IPCC 국가 온실가스 배출량 산정에서 하수관거 내 온실가스 배출을 인정할 경우, 국가에서는 이를 관리할 의무가 생기며 이러한 의무는 지자체에서 책임을 갖고 수행할 가능성이 있음
- 하수관거에서의 온실가스 배출량은 아직 연구할 부분이 많고 또한 IPCC에서 정한 산정 방법을 따를 필요가 있기 때문에 아직 준비할 부분은 많지 않지만 감축 부분에 있어서는 앞으로 고민할 여지가 있음
- 현재 연구되는 하수관거에서의 온실가스 감축 방안인 물리적, 화학적 방법들은 현실적으로 하수관거 운영에 반영하기에는 무리가 있음
- 지금까지의 연구로 생각할 수 있는 지자체에서의 적용 방안은 관거 자체가 바이오필름이 생성되기 어렵게 하여 하수관거 내에서 미생물의 활성을 억제하는 것으로 이러한 방법들은 지자체에서 고려할 수 있다고 생각됨
- 하수관거 전체를 한번에 교체하기에는 어렵지만, 앞으로 노후된 하수관거를 정기적으로 교체할 때에 이를 한번 고려할 수가 있음
- 다만 앞서 언급하였듯이, 하수관거 내 온실가스 배출 저감은 하수처리장 내 유기물 농도를 변화시키고 이는 하수처리장 온실가스 배출량 증가와 연계되기 때문에 이러한 상관관계를 고려하여 검토하는 것이 반드시 필요

차 례

1장 서론	1
1절. 연구의 배경 및 필요성	3
2절. 연구의 목적 및 방법	5
2장 하수처리를 통한 온실가스 배출	7
1절. 하수처리장 온실가스 배출 산정	9
2절. 하수관로 유래 온실가스 배출량 산정	29
3장 대전광역시 하수처리 및 하수관거 현황	35
1절. 대전광역시 하수관거 현황	37
2절. 대전하수처리장 현황 및 온실가스 배출	46
4장 하수처리에서 발생하는 온실가스 저감 방안	51
1절. 하수관거 내 온실가스 저감 방안	53
2절. 하수처리시 온실가스 저감 방안	59
5장 정책 제언	65
1절. 기존 연구 한계점	67
2절. 정책 제언	69

표 차례

[표 2-1] 활성슬러지 공정의 장·단점	13
[표 2-2] 한국표준산업분류에 따른 수도사업(36)	19
[표 2-3] 한국표준산업분류에 따른 하수폐수 및 분뇨처리업(37)	19
[표 2-4] 한국표준산업분류에 따른 폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업(38)	20
[표 2-5] 한국표준산업분류에 따른 환경 정화 및 복원업(39)	21
[표 2-6] 폐기물부문 보고대상 시설	21
[표 3-1] 대전광역시 행정구역별 하수도보급률	37
[표 3-2] 대전광역시 행정구역별 하수관로 보급 현황	38
[표 3-3] 대전광역시 행정구역별 하수관로 하수처리시설별 설치현황	39
[표 3-4] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황_대전광역시	40
[표 3-5] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황_동구	41
[표 3-6] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황_중구	42
[표 3-7] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황_서구	43
[표 3-8] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황_유성구	44
[표 3-9] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황_대덕구	45
[표 3-10] 수처리 공정	46
[표 3-11] 대전하수처리장 슬러지처리시설 현황	47
[표 3-12] 대전하수처리장 수처리시설 현황	47
[표 3-13] 하수처리공정 배출량	50

[표 3-14] CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 평균 배출량	50
[표 3-15] 전력사용량 및 전력배출량	50
[표 4-1] GHG reduction technologies in sewer pipelines	53
[표 4-2] 부산광역시 남부사업소 바이오가스 판매 사례	60
[표 4-3] 부산광역시 남부사업소 바이오가스 판매 투자 효과	60
[표 4-4] 천안시 제3공단 폐수종말처리장 노후송풍기 교체 사례	61
[표 4-5] 천안시 제3공단 폐수종말처리장 노후송풍기 투자효과	61
[표 4-6] 서울특별시 서남물재생센터 소화조 운영 개선 사례	62
[표 4-7] 서울특별시 서남물재생센터 소화조 운영 개선 투자효과	62
[표 4-8] 인천광역시 남항하수처리장 생물반응조 폭기방법 변경 사례 ...	62
[표 4-9] 인천광역시 남항하수처리장 생물반응조 폭기방법 변경 투자 효과	62
[표 4-10] 대구환경공단 생물반응조 수중포기기 교체 사례	63
[표 4-11] 대구환경공단 생물반응조 수중포기기 교체 투자 효과	63

그림 차례

[그림 1-1] 대전광역시 탄소중립 전략	3
[그림 2-1] 압출류 공정(위), 완전혼합 공정(중간) 및 장기포기 공정 흐름도	10
[그림 2-2] 산화구의 흐름 공정도	11
[그림 2-3] 단계적 주입(위), 접촉안정화 공정(아래) 흐름도	12
[그림 2-4] MLE 공정	15
[그림 2-5] A/O 공정(위), A ² /O 공정(중간), DNR(아래) 공정 모식도	15

[그림 2-6] CNR(Cilium Nutrient Removal) 공정	16
[그림 2-7] UCT 및 VIP 공정 모식도	17
[그림 2-8] SBR(Sequencing Batch Reactor) 공정	18
[그림 2-9] 일반적인 하수처리 시설	23
[그림 2-10] 슬러지 반출 공정	24
[그림 2-11] 반출슬러지 유량 및 BOD 산정 예시	25
[그림 2-12] 하수처리장 공정배출 산정을 위한 가정	26
[그림 2-13] 하수처리장 공정배출 산정 예시	27
[그림 2-14] 하수관거 유래 온실가스 배출 잠재량 산정	32
[그림 2-15] GHG emission potential in the sewer pipelines using GWP100.	33
[그림 2-16] GHG emission potential in the sewer pipelines using GWP20.	33
[그림 2-17] 대전시 하수관거 내 온실가스 예상 배출량 산정	34
[그림 3-1] 대전하수처리장 전경	46
[그림 3-2] 대전하수처리장 공정도(대전광역시시설관리공단)	49
[그림 3-3] 대전하수처리장 모니터링 도식도	49
[그림 4-1] 하수관거 유래 메탄 및 황화수소 배출 억제 접근 방법	54
[그림 4-2] 하수관거 악취 제거를 위한 화학약품의 메커니즘	56
[그림 4-3] 초음파처리의 메탄 배출 저감 메커니즘 및 실험 결과	58
[그림 4-4] 하폐수 처리공정의 감축 지점	59

서론

1절 연구의 배경 및 필요성

2절 연구의 목적 및 방법

1장

1장 서론

1절. 연구의 배경 및 필요성

- 2021년 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 총회에서는 산업화 이전(1850-1900) 대비 지구의 평균 온도 상승 폭이 1.5℃에 도달할 시점을 2040년 이전으로 전망하였으며, 이 시점은 불과 3년 전 예측하였던 것 대비 10년 이상을 앞당긴 것
- 이는 지구온난화 진행 정도의 심각성을 의미하며, 현재 전 세계적으로 가뭄, 홍수, 산불 등의 기후 재난 현상이 기하급수적으로 늘어나고 있음
- 이에 대한 해결을 위해 우리나라를 포함한 대부분의 유럽 국가들과 중국, 일본 등 주요국에서 “탄소중립” 목표를 선언하였고, 미국에서도 향후 파리협정에 재가입하고, 2050년까지 탄소 배출 “0”을 목표로 하였음
- 정부는 에너지전환, 산업, 건물, 수송, 폐기물 등의 각 부분에 대하여 탄소중립 시나리오를 제시하고 이를 바탕으로 대전시를 비롯한 각 광역지자체는 현재 탄소중립 시나리오 계획을 수립하고 있음



[그림 1-1] 대전광역시 탄소중립 전략

- 대전광역시도 건물, 수송, 에너지, 시민협력과 도시숲으로 인한 4+1전략을 세우고 탄소중립계획을 마련하고 있음
- 다만 폐기물부문 같이 공공에서 감당하는 영역에 대해서는 온실가스 배출량 등이 다른 부문에 비해 비교적 적은 이유로 구체적인 계획을 수립하기 어려움
- 대전시에서는 폐기물 부문의 환경기초시설에 대해서는 배출권거래제를 통하여 국가 계획과 연계하여 온실가스 감축을 진행하고 있으나, 최근에 연구로 입증된 하수관거 등의 하수처리장을 위한 기반 시설 등에서 온실가스가 배출되고 있는 것이 확인되고 있지만 다른 광역시와 마찬가지로 여기까지 온실가스 감축 계획이 미치지 못하고 있음
- 하수관로는 필수적인 도시 기반 시설로 시민 생활환경 개선과 공공수역의 수질개선 역할을 하고 있으나, 하수관로에 유입된 오수나 분뇨 등에서 하수처리장으로 이동하는 동안의 상당한 양의 온실가스(CH₄, N₂O)를 배출하고 있으나 아직까지 명확히 연구가 진행되지 못했음
- 따라서 본 연구에서는 대전시 하수처리장에 유입되는 하수관로 등을 조사하여 온실가스 배출 실태와 현황을 분석하고 대전시 내 하수관로에서 온실가스를 저감할 수 있는 방안을 검토하고자 하며 대전시에 적용할 수 있는 방안들을 제시하고자 함

2절. 연구의 목적 및 방법

- 본 연구에서는 하수처리에서 발생하는 온실가스를 하수처리장 및 하수관거로 구분하여 배출 실태와 현황을 분석하였음
- 하수처리장은 현재 국가에서 실시하는 온실가스 배출권거래제 제도를 통해 온실가스 배출 관리를 하고 있으며 이에 따른 방법을 조사하였음
- 하수관거는 대부분 맨홀 및 틈새 주변을 제외하고는 제한적인 공기 유입 및 순환으로 인해 혐기성 조건을 형성하고 있으며 이에 따라 “메탄”은 하수관거에서 발생 되는 주요 온실가스로 보고되고 있으며, 생물학적 반응에 의해 생성되고 있어 이에 대한 내용을 검토하였으며, 국내 하수관거 유래 메탄 배출량을 유기물의 농도 및 분해율 변화에 따라 추정해보았으며, 더불어 GWP 주기도 함께 고려하여 장·단기적인 온실효과를 산정
- 또한 현재까지 하수관거 유래 온실가스 저감 관련 선행 연구 기술에 대해 알아보고, 한계점 및 보완점을 통해 후속 연구 주제의 방향성을 제안하고자 함

하수처리를 통한 온실가스 배출

1절 하수처리장 온실가스 배출 산정

2절 하수관로 유래 온실가스 배출량 산정

2장

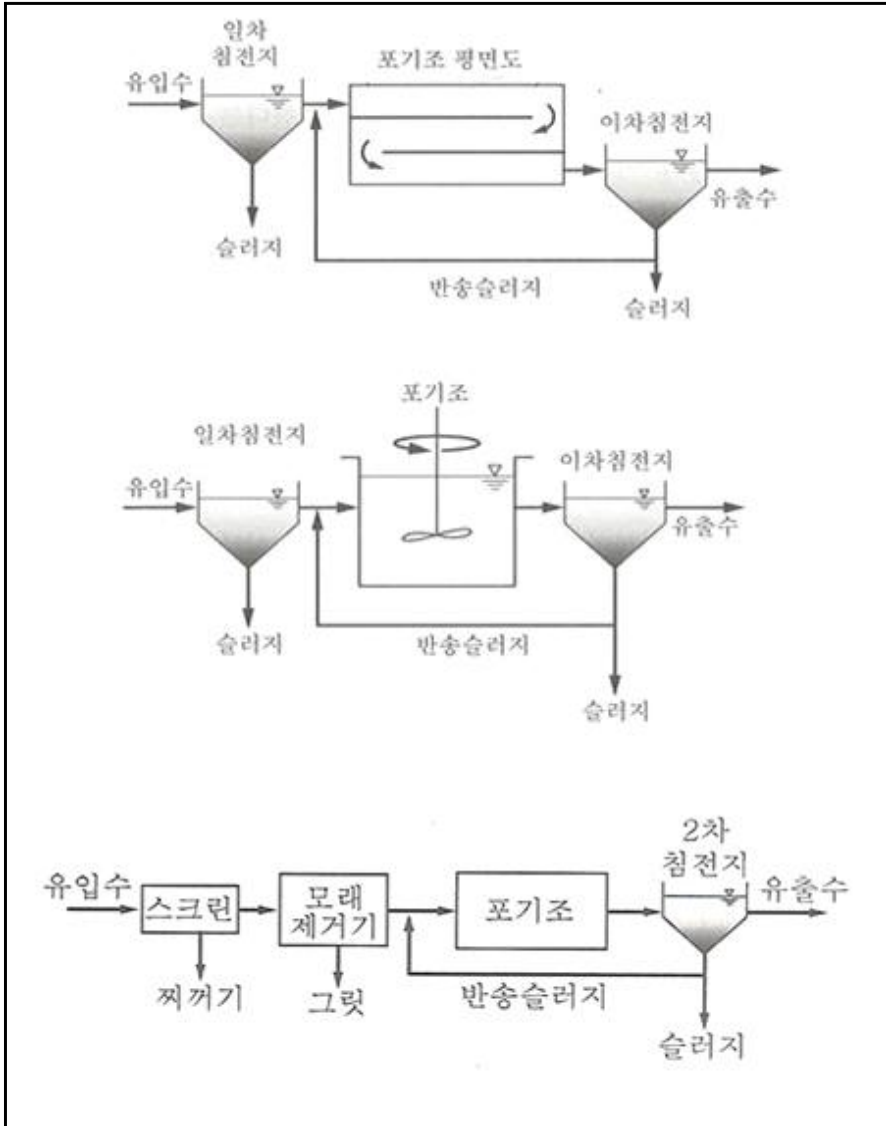
2장 하수처리를 통한 온실가스 배출

1절. 하수처리장 온실가스 배출 산정

1. 일반적인 하수처리 공정

1) 활성슬러지 공정

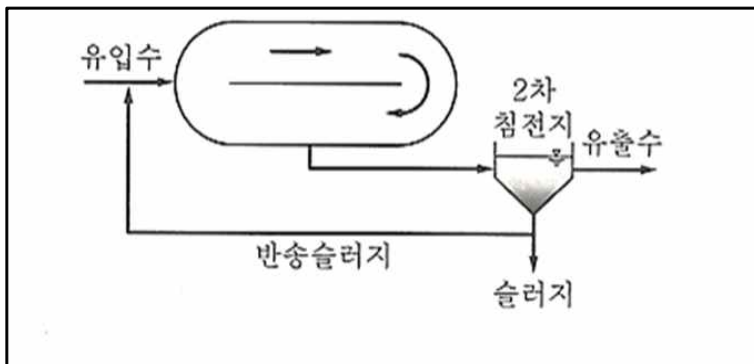
- 1910년대에 개발된 공법이며 같은 반응조 안에서 유기물과 접촉한 호기성 미생물이 유기물을 분해하고 고액분리공정을 통해 무거워진 미생물이 제거함
- 1970년대까지는 흔히 관 흐름(plug-flow) 형태로 사용되었으나, 1980년대부터 산업폐수의 양이 증가함에 따라 희석을 위해 McKinney(1982)에 의한 완전혼합반응조의 형태로 사용됨
- 압출류 공정은 포기조의 앞단으로 침전된 하수 반송슬러지를 유입시켜 포기장치에 의해 교반되는 방식임
- 완전혼합방식은 혼합반응조의 연속적인 흐름 방식을 응용한 것이며, 침전된 반송슬러지와 하수는 포기조의 여러 지점으로 유입됨
 - 공정을 운전하기에는 간단하나 유기물부하가 낮게 발생하는 경향이 있으며 슬러지 침전성이 낮아지는 슬러지 팽화 문제가 발생할 가능성이 있음
- 장기포기 공정은 완전혼합방식의 문제를 보완하고자 적용하였으며 이는 긴 포기시간과 낮은 유기물부하라는 특징을 가지고 있음
 - 1차 침전지를 사용하지 않고 2차 침전지는 하수 변화량에 대응하기 위해 활성슬러지 침전지에 비해 낮은 표면 부하율을 가짐



[그림 2-1] 압출류 공정(위), 완전혼합 공정(중간) 및 장기포기 공정 흐름도

(1) 산화구

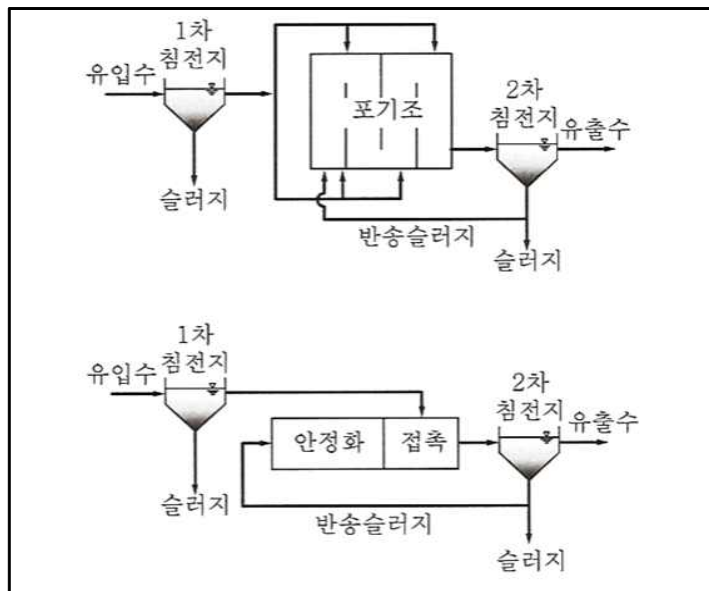
- 기계적인 교반장치와 포기장치로 이루어진 타원형의 수로 형태로 구성되어 있으며, 2차 침전지에서 반송된 반송슬러지와 스크린을 거친 하수가 혼합되어 유입됨
- 한 방향으로만 수로가 흐르고 포기를 위해 사용된 에너지가 반응조 내의 충분한 교반에 사용됨
- 유입수와 반송슬러지 혼합액은 반응조를 15분 내로 완전 순환함에 따라 유입하수를 20~30배까지 희석이 가능함
- 반응조의 형태는 압출류에 가까우나 반응속도는 완전혼합 반응조에 가까움
- 포기조에서 반응이 끝나면 2차 침전지로 이송됨



[그림 2-2] 산화구의 흐름 공정도

(2) 단계적 주입 및 접촉안정화

- 단계적 주입 공정은 일반적인 공정을 수정한 것으로 침전된 하수의 P/M비 (먹이/미생물)를 동일하게 하기 위해 포기조를 3~4개 지점으로 나누어 하수를 주입하는 방식
- 운전의 유동성으로 유입하수의 분배가 운전조건에 맞게 조절된다는 것이 장점으로 확인
- 미생물 농도가 평균 7,000mg/L 정도로 높으며 유입수가 공급되므로 순차적으로 다음 주입구에서는 희석되어 농도가 낮아짐
- 접촉안정화 공정은 안정화조의 접촉조로 반응조를 구분하고 안정화된 활성슬러지는 접촉조에 위치함
- 유입되는 하수가 접촉조로 유입되고 반송슬러지는 안정화조로 포기되는 방식
- 접촉조의 미생물 농도는 안정화조보다 낮으며, 체류시간은 0.5~1.0시간으로 다소 짧은 편



[그림 2-3] 단계적 주입(위), 접촉안정화 공정(아래) 흐름도

(3) 활성슬러지 공정의 장·단점

- 안정적인 운전이 가능하고 일부 독성부하와 충격 부하에도 큰 희석능력을 갖추었으며, 설계가 덜 복잡하다는 장점이 있음
- 추가적인 단위 공정의 적용, 비교적 큰 포기조를 운영하기 때문에 공기공급에 에너지가 많이 소비되고 이로 인한 슬러지 생산량이 많다는 단점이 있음

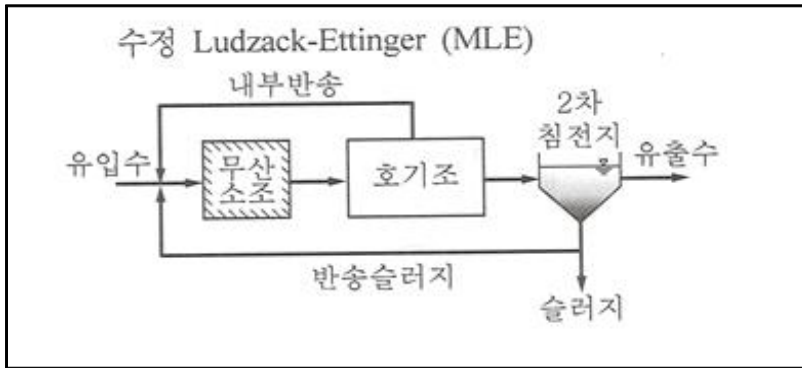
[표 2-1] 활성슬러지 공정의 장·단점

공정	장점	단점
완전혼합	여러 형태의 하수에 적용이 가능하고 안정적인 운전가능 충격부하와 독성부하에 큰 희석능력 일정한 산소 요구량 설계가 덜 복잡함	슬러지 팽화가 발생하기 쉬움
압출류	안정적인 운전이 증명되었음 완전혼합공정에 비해 암모니아 제거율이 더 높음 단계적 주입, 선택조 설계 등 다양한 공정에 적용 가능	포기조의 설계와 운전이 약간 복잡함 산소 요구량에 맞는 산소 공급이 어려움(첫번째 수로)
접촉안정화	포기조 소요용량 감소 MLSS 손실 없이 비가 오는 경우에도 유량 조절이 수월함	질산화 능력이 적거나 없음 운전이 비교적 복잡함
단계주입	융통성있는 운전이 가능 무산소/호기 공정을 포함한 다양한 공정에 적용이 가능	운전이 비교적 복잡함 유입수 분배를 정확하게 하기 어려움
장기포기	높은 수준의 유출수 획득 가능 공정의 설계와 운전이 쉬움 슬러지 안정화가 좋음 미생물 생산량이 적음	포기에 사용되는 에너지가 높음 비교적 큰 포기조시설

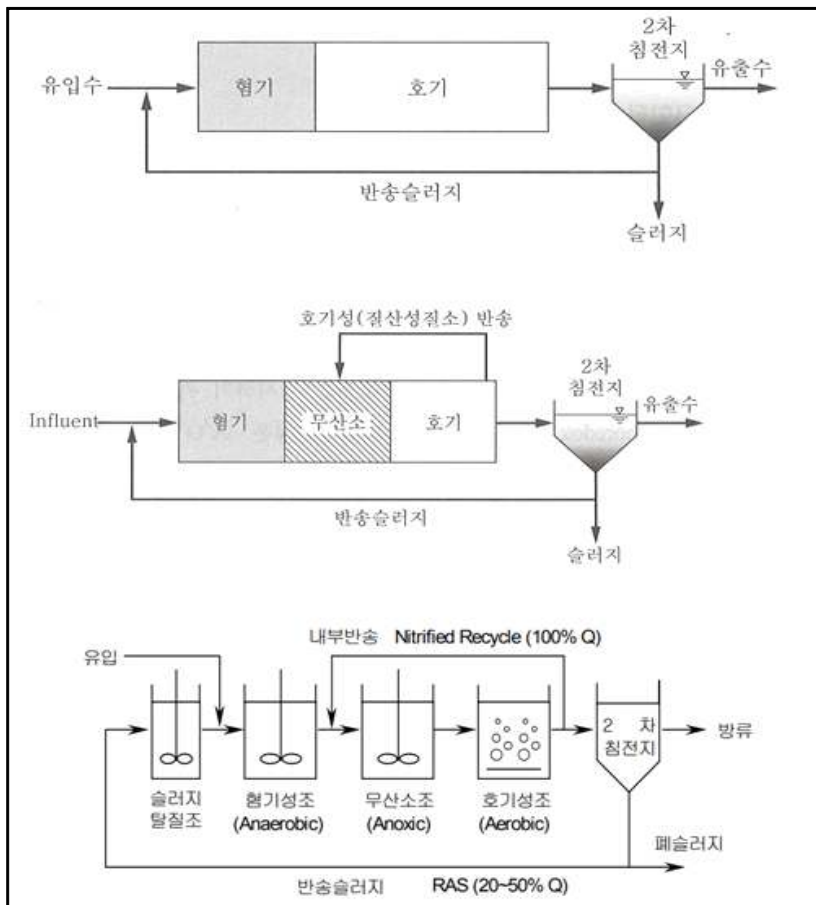
2) 하수처리장에서 적용되는 적용공법

(1) A²O 계열 및 MLE 공정

- A²O 공법은 기존의 A/O 공정에 인과 질소를 동시에 제거하기 위해 무산소조가 추가된 변형공법임
- 하수에 포함된 유기물을 제거하기 위한 호기조와 그 앞에 인 제거를 위해 혐기조가 설치됨
- 혐기조, 무산소조, 호기조의 순서로 구성되어 질소 및 인을 동시에 처리함
 - 호기성조에서 질산화 미생물에 의해 질산화가 일어나게 되며 호기조의 내부반송수를 무산소조로 이송하여 질산염을 탈질시킨 후 질소를 제거함
- DNR 공정은 대우에서 개발한 질소·인 제거 공정으로 유기물을 제거하는 호기성조 앞단에 슬러지 탈질조, 혐기성조, 무산소조로 배치함
- 질산성 질소를 제거하고자 내부 반송과 슬러지 반송을 실시하여 혐기성조와 호기조를 통해 인을 제거함
 - A²O 공정과는 슬러지 탈질조를 유입수 앞에 두어 질산성 질소를 제거한다는 점에서 차이점이 있음
- MLE 공정은 가장 일반적으로 사용되는 생물학적 질소 제거 공정으로 기존 무산소조-호기조의 순서로 개발되었던 Ludzack-Ettinger 공정을 수정한 공정임
- MLE 공정은 호기조에서 더 많은 질산성 질소를 공급하기 위해 내부 반송을 실시하여 바로 무산소조로 공급함
 - 탈질율과 총질소 제거율 증가



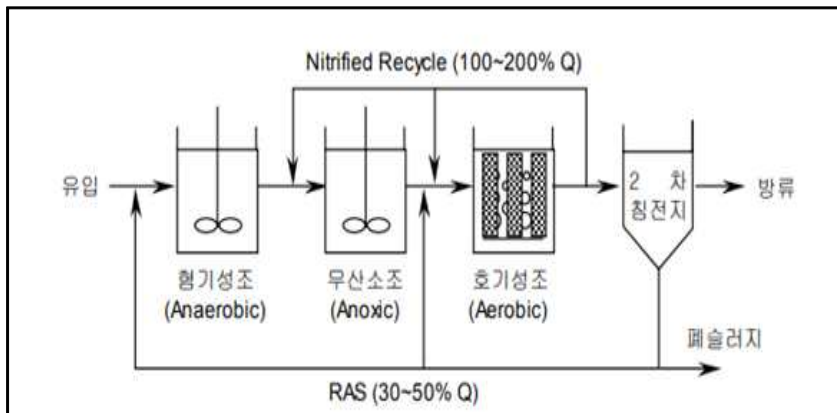
[그림 2-4] MLE 공정



[그림 2-5] A/O 공정(위), A²/O 공정(중간), DNR(아래) 공정 모식도

(2) Media(담체) 계열 공정

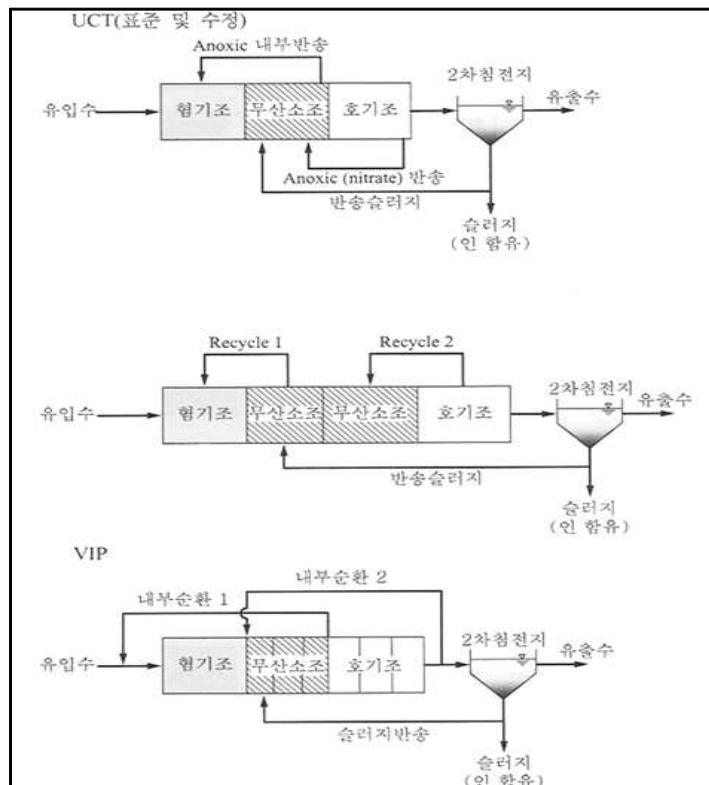
- NPR(Nitrogen&Phosphorus Removal) 공정은 A^2/O 공정의 변형으로 반응조의 배치는 A^2/O 와 동일하게 혐기조-무산소조-호기조-2차 침전조로 구성
- 혐기조와 무산소조에 유입수를 나눠서 유입시켜 무산소조의 탈질에 필요한 유기탄소원을 일부 공급하고 호기조 내에 다공질의 담체(BioCube)를 두어 질산화 미생물이 담체 내에 고정되게 하여 슬러지 체류시간(SRT)를 길게 하여 처리효율을 높임
- CNR(Cilium Nutrient Removal) 공정 또한 A^2/O 공정의 변형이나 NPR 공정과 유사하게 호기조에서 내부 반응을 통해 무산소조로 탈질하고 섬모상의 담체를 호기조에 넣어 호기성 미생물의 부착성장을 통해 질산화 및 인 제거 효율을 높임



[그림 2-6] CNR(Cilium Nutrient Removal) 공정

(3) UCT 및 VIP 공정

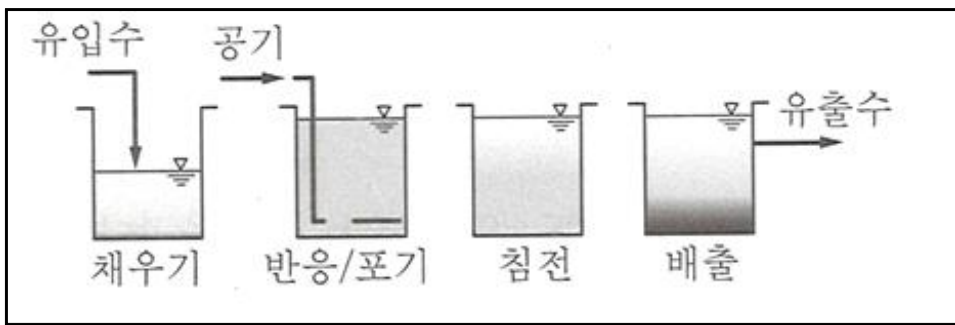
- UCT 공정은 혐기성 접촉조로 유입되는 저농도 하수의 질산성질소의 영향을 최소화하고자 개발됨
- 반송슬러지는 호기조가 아닌 무산소조로 반송, 내부 반송은 무산소조에서 혐기조로 반송
- 활성슬러지가 무산소조로 유입되면서 혐기조의 질산염 유입을 차단하고 이로 인해 혐기조에서 인 방출 향상, 내부 반송은 혐기조의 미생물들의 유기물 이용을 증가
- 혐기조 체류시간은 통상 1~2시간 정도이며 유입 유량의 2배 가량 반송하는 것으로 확인



[그림 2-7] UCT 및 VIP 공정 모식도

(4) SBR 공정

- 완전혼합반응조에서 활성슬러지 공정의 모든 과정이 이루어짐
- 유입, 반응/포기, 침전, 유출의 모든 공정이 하나의 반응조에서 이루어지기 위해 주기를 달리하여 공정 진행
- 1주기를 6시간으로 하여 진행할 경우 유입(3시간), 포기(2시간), 침전(0.5시간), 배출(0.5시간)의 순서로 유기물을 제거하여 2차 침전조가 따로 필요 없다는 장점이 있음



[그림 2-8] SBR(Sequencing Batch Reactor) 공정

2. 하수처리장 온실가스 배출 산정

1) 배출권거래제 폐기물부문 현황

- 온실가스 배출권거래제 폐기물부문은 한국표준산업분류 기준에 의해 업종별로 구분되며 폐기물부문은 수도사업(36), 하수·폐수 및 분뇨 처리업(37), 폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업(38), 환경 복원업(39)이 이에 해당
- 폐기물부문은 폐기물 감량화 및 재활용, 가연성 폐기물 에너지화, 매립 가스 회수 및 발전 등을 통해 목표관리제를 수행

[표 2-2] 한국표준산업분류에 따른 수도사업(36)

분류명	분류코드	내용
생활용수 공급업	36010	- 수요자에게 생활용수를 공급하기 위하여 취수, 집수, 정수 및 급수를 하는 산업활동으로서 이러한 생활용수는 배관시설에 의하여 공급됨
산업용수 공급업	36020	- 수요자에게 공업용수 및 상업용수를 공급하기 위하여 취수, 집수, 정수 및 급수를 하는 산업활동으로서 이러한 산업용수는 산업용수용 배관시설에 의하여 공급됨

자료: 통계분류포털

[표 2-3] 한국표준산업분류에 따른 하수폐수 및 분뇨처리업(37)

분류명	분류코드	내용
하수 처리업	37011	- 하수를 하수도관에 의해서 수집하고, 수집된 하수를 처리하는 하수도관시설 및 하수처리 시설을 운영하는 산업활동
폐수 처리업	37012	- 산업폐수를 폐수 수집관에 의해서 수집하고, 수집된 폐수를 처리하는 폐수도관시설 및 폐수처리 시설을 운영하는 산업활동
분뇨처리업	37021	- 분뇨의 수집운반, 처리 및 처분을 수행하는 산업활동
축산분뇨 처리업	37022	- 가축 사육장에서 배출되는 액체성 또는 고체성 오염물질의 수집운반, 처리 및 처분을 수행하는 산업활동

자료: 통계분류포털

[표 2-4] 한국표준산업분류에 따른 폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업(38)

분류명	분류코드	내용
지정의 폐기물 수집운반업	38110	- 가정 및 사업장에서 발생하는 무해폐기물(지정의 폐기물)을 수집운반하는 활동
지정폐기물 수집운반업	38120	- 사업장 폐기물 중 주변환경을 오염시킬 수 있는 유해물질로서 특별관리되는 폐기물을 수집운반하는 산업활동
건설 폐기물 수집운반업	38130	- 건설관련 폐기물(건물 해체물 등)을 수집운반하는 활동
지정의 폐기물 처리업	38210	- 가정 및 사업장에서 발생하는 무해폐기물(지정의 폐기물)을 매립, 소각 등의 방법으로 처리하는 시설을 운영하는 산업활동 - 부수적으로 처리과정에서 열과 증기를 생산
지정폐기물 처리업	38220	- 유기성폐기물, 병원폐기물 등의 유해폐기물(지정 폐기물)을 처리하는 시설을 운영하는 산업활동
건설폐기물 처리업	38230	- 건설관련 폐기물(건물 해체물 등)의 처리시설을 운영하는 산업활동 - 처리과정에서 재활용이 가능한 골재를 부수적으로 얻을 수 있음 - 광재 및 폐주물사를 처리하는 산업활동
방사성 폐기물 수집운반 및 처리업	38240	- 폐기대상인 방사성폐기물을 수집운반, 처리 및 처분하는 산업활동
금속원료 재생업	38301	- 폐기물, 스크랩, 기타 폐품 등을 처리하여 재생용의 금속원료 물질로 전환하는 산업활동 - 연속적으로 투입되는 재활용이 가능한 폐기물로부터 금속원료 물질을 분리 및 분류하여 회수하는 산업활동이 포함됨
비금속원료 재생업	38302	- 폐기물, 스크랩, 기타 폐품 등을 처리하여 재생용의 비금속원료 물질로 전환하는 산업활동 - 연속적으로 투입되는 재활용이 가능한 폐기물로부터 비금속 원료물질을 분리 및 분류하여 회수하는 산업활동이 포함됨

자료: 통계분류포털

[표 2-5] 한국표준산업분류에 따른 환경 정화 및 복원업(39)

분류명	분류코드	내용
토양 및 지하수 정화업	39001	- 기계적, 화학적 또는 생물학적 방법을 이용하여 오염된 지역의 토양 및 지하수를 정화하는 산업활동 - 정화활동은 오염 현장에서 할 수도 있고, 오염 현장 이외의 장소에서 할 수도 있음
기타 환경 정화 및 복원업	39009	- 토양 및 지하수 정화활동 이외의 오염된 건물, 지역, 지표수, 대기 등을 정화하여 복원하는 활동

자료: 통계분류포털

[표 2-6] 폐기물부문 보고대상 시설

폐기물 처리방법	보고대상 배출시설	보고대상 온실가스
고형폐기물의 매립	차단형 매립시설	CH ₄
	관리형매립시설	
	비관리형매립시설	
고형폐기물의 생물학적 처리	사료화·퇴비화·소멸화·부숙토생산시설	CH ₄ , N ₂ O
	혐기성 분해시설	
하수처리	가축분뇨공공처리시설	CH ₄ , N ₂ O
	공공하수처리시설	
	분뇨처리시설	
	기타 하수처리	
폐수처리	폐수종말처리시설	CH ₄
	기타 폐수처리	
폐기물 소각	소각보일러	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	특정폐기물 소각시설	
	일반폐기물 소각시설	
	폐가스 소각시설	
	적출물 소각시설	
	폐수소각시설	

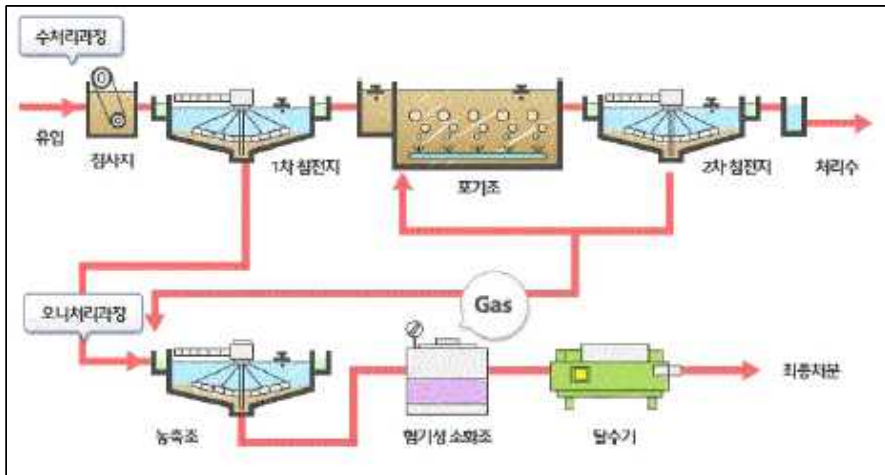
자료: 한국환경공단(2016)

2) 하수처리장 온실가스 배출 산정 방법

(1) 배출권거래제 내 하수처리의 정의

- 하·폐수처리 과정은 가정, 산업, 상업, 공업시설 등에서 발생하는 수질 오염물질을 처리하여 수중 생태계를 파괴하거나 수자원 이용에 저장을 유발하지 않도록 하는 것임
- 현재 실정은 하·폐수처리시설 내 고도처리 공정이 확대됨에 따라 BOD, SS뿐 아니라 영양염류(질소, 인 등) 제거율도 높아지고 있음
- 하수처리 과정은 경제활동이나 사람의 생활 등으로부터 발생하는 수질 오염물질을 처리하는 것이며, 가축분뇨공공처리시설, 하수종말처리시설, 수질오염 방지시설, 마을하수도 및 오수처리시설 등이 이에 해당함
- 하수처리과정은 처리유형에 따라 두 가지(물리·화학적 처리, 생물학적 처리)로 구분하며 그중 생물학적 처리는 호기성 처리와 혐기성 처리로 구분됨
- 통상적으로 스크린, 침사지와 같은 기계적 장치로 수중의 부유물, 고형물 등을 제거한 이후 미생물을 이용해 잔존하는 용존 유기물과 입자성 부유물질을 제거하는 과정을 거침
- 하수처리 과정 시 발생하는 온실가스에는 CO₂, CH₄, N₂O가 있으나, 이중 CO₂는 생물 기원이므로 배출량 산정에서 제외함
- 하수처리 과정에서 산정 및 보고하는 온실가스에는 CH₄, N₂O가 있으며, 이중 N₂O는 폐수가 아닌 요소, 질산염 등의 질소성분을 포함한 하수처리 과정에서 배출됨
- 하수처리의 온실가스 공정 배출 과정에서 다루는 활동자료는 BOD, 유량, T-N농도가 있고, 이중 BOD는 CH₄의 배출량 산정, T-N농도는 N₂O 배출량을 산정할 시에 이용됨
- 하수처리 공정 중 혐기성 처리(소화조)는 바이오가스 생산과 슬러지 감량을 목적으로 하며, 산소가 없는 밀폐된 공간에서 미생물에 의해 유기물을 메탄과 이산화탄소로 분해시키는 공정을 의미함

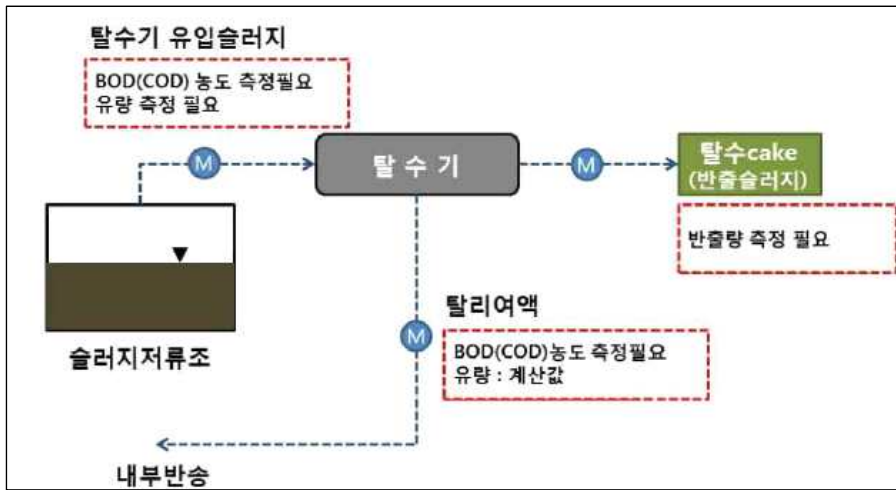
- 혐기성 처리공정을 할 경우 CH_4 배출계수는 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006IPCC 가이드라인에 따라 CH_4 발생 수용량 기본값인 0.6과 MCF값인 0.8을 곱한 0.48이며 그 외의 경우 온실가스 배출계수는 0.01532로 하여 값을 산정함



[그림 2-9] 일반적인 하수처리 시설

(2) 하수처리 배출량 산정 시 유의사항

- 하수 처리시설에서 온실가스 배출량을 산정할 때 우선적으로 확인해야 할 사항은 유입형태와 유입물질의 종류이며, 하수 단일유입인지, 하수를 포함한 타물질이 연계처리 되는지에 대한 여부를 먼저 파악해야 함
- 연계유입일 경우에는 유입된 물질이 병합되는 위치에서 농도와 유량을 측정해야 하며, 개별 측정이 가능한 경우 해당 값을 가중평균하여 농도와 유량을 산정함
- 「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 별표 16」에 따라 하수처리시설에 유입되는 폐수의 배출량은 하수처리 배출량 산정식을 적용
- 산정방법론의 메탄회수량(R)은 회수하는 바이오가스의 유량과 메탄농도를 실측하지 않을 경우에 '0'으로 간주함
- 슬러지의 농도와 반출량을 측정한 자료가 있을 경우 산정방법론에 반영



[그림 2-10] 슬러지 반출 공정

- 탈수기를 기준으로 하여 탈리여액의 BOD부하량과 탈수기 유입슬러지의 BOD부하량의 차이로 탈수케익의 BOD부하량을 산출함
- 위 산정을 위해서는 우선적으로 탈수기 유입슬러지에 대한 BOD, 탈수케익의 유량 측정, 유량 측정, 탈수케익의 유량 측정을 실시해야 함
- 결과적으로 반출슬러지의 BOD부하량을 적용하기 위해서는 3개의 신규 모니터링 포인트를 추가해야 하며, TN농도 역시 동일한 방법으로 적용이 가능함
- 탈리여액의 유량은 탈수케익과 탈수기 유입슬러지 유량정보를 통하여 계산하며 탈수기 유입슬러지의 유량, 탈리여액의 유량, BOD 측정농도를 통해 각각의 BOD 부하량을 산정함
- 탈수케익의 BOD 부하량을 연간 반출량으로 나눌 경우 BOD 농도를 산정할 수 있으며, 반출슬러지의 TN농도 역시 같은 방법으로 적용할 수 있음

구분	활동자료	
	유량(Qm ³)	BOD농도 (mg-BOD/L)
탈수기 유입 슬러지(in)	430,000	8,000
탈수 cake(반출슬러지)	30,000	계산값
탈리여액	계산값	300
반출슬러지 BOD 농도 산정		
탈리여액 유량	유입 슬러지량 - 반출 슬러지량 430,000 - 30,000 = 400,000	
탈수 cake BOD부하량 산정 (kg BOD)	유입 슬러지 BOD부하량 - 탈리여액 BOD부하량 = (430,000×8,000) - (400,000×300) = 3,320,000 kg BOD	
탈수 cake BOD 농도(mg/l)	3,320,000 ÷ 30,000 × 10 ³ = 110,666mg/l	

[그림 2-11] 반출슬러지 유량 및 BOD 산정 예시

- 하수처리시설에 대하여 다음과 같이 가정하였을 때 산정한 예시는 아래와 같음

일반 현황			
보고대상 배출시설	공공하수처리시설	처리시설유형	혐기성 처리(소화조)
처리대상 폐기물	하수	반출슬러지 유무	X
연계처리 여부	O	연계처리 대상	분뇨처리수
매개변수 정보			
CH ₄ 배출계수	0.48 kgCH ₄ /kgBOD	바이오가스 회수량(m ³)	920,000
N ₂ O 배출계수	0.005 gN ₂ O-N/kg-T-N	바이오 가스 중 메탄함유율(%)	65
메탄 환산계수 (m ³ /ton)	0.7156×10 ⁻³	회수량/발생량 75% 초과 여부	75% 이하
구분	활동 자료		
	유량(Qm ³)	BOD농도 (mg-BOD/L)	T-N 농도 (mg-T-N/L)
하수 유입수(in)	15,000,000	112	40
연계수(분뇨처리수) 유입수(in)	5,000,000	240	100
하수 방류수(out)	18,000,000	4	13

[그림 2-12] 하수처리장 공정배출 산정을 위한 가정

- 위 가정에 따른 사업장의 하수처리 공정배출에 대한 온실가스 배출량 산정 결과는 21,426.889 tCO₂eq 이며, 하수처리장 전체 사업장의 배출량은 여기에 이동연소, 고정연소, 전력사용을 포함한 간접배출 등 온실가스 배출량을 산정하여 합산하는 것으로 얻을 수 있음

가중평균	
산정식	유입수의 BOD농도 = $\frac{Q_1 \times BOD_1 + Q_2 \times BOD_2}{Q_1 + Q_2}$
	Q_1 하수의 유입용량(m ³)
	Q_2 분뇨처리수의 유입용량(m ³)
	BOD_1 하수의 유입 BOD(mg-BOD/L)
BOD_2 분뇨처리수의 유입 BOD(mg-BOD/L)	
BOD 농도(mg/l)	$= \frac{(15,000,000 \times 112 + 5,000,000 \times 240)}{(15,000,000 + 5,000,000)} = 144$
산정식	유입수의 TN농도 = $\frac{Q_1 \times TN_1 + Q_2 \times TN_2}{Q_1 + Q_2}$
	Q_1 하수의 유입용량(m ³)
	Q_2 분뇨처리수의 유입용량(m ³)
	TN_1 하수의 유입 TN(mg-T-N/L)
TN_2 분뇨처리수의 유입 TN(mg-T-N/L)	
TN 농도(mg/l)	$= \frac{(15,000,000 \times 40 + 5,000,000 \times 100)}{(15,000,000 + 5,000,000)} = 55$
보고대상 온실가스	
산정식	$\frac{R}{(BOD_{in} \times Q_{in} - BOD_{out} \times Q_{out} - BOD_{sl} \times Q_{sl}) \times 10^{-6} \times EF_i} \leq 0.75$
	$CH_4 Emissions = (BOD_{in} \times Q_{in} - BOD_{out} \times Q_{out} - BOD_{sl} \times Q_{sl}) \times 10^{-6} \times EF - R$
	$CH_4 Emissions$ 하수처리에서 배출되는 CH ₄ 배출량(tCH ₄)
	BOD_{in} 유입수의 BOD농도 (mg-BOD/L)
	BOD_{out} 방류수의 BOD농도 (mg-BOD/L)
	BOD_{sl} 반출 슬러지의 BOD농도 (mg-BOD/L)
	Q_{in} 유입수의 유량(m ³)
	Q_{out} 방류수의 유량(m ³)
	Q_{sl} 슬러지의 유량(m ³)
	EF 배출계수(kgCH ₄ /kg-BOD)
R 메탄회수량(tCH ₄)	
메탄회수량(tCH ₄)	연간 바이오가스 회수량(m ³)×바이오가스의 연평균 메탄농도(%)×0.7156×10 ⁻³
75% 초과여부 확인	$\frac{427.928}{(144 \times 20,000,000 - 4 \times 18,000,000 - 0) \times 10^{-6} \times 0.48} = \frac{427.928}{1,347.840} = 0.317$

총 CH ₄ 배출량		$= (144 \times 20,000,000 - 4 \times 18,000,000 - 0) \times 10^{-6} \times 0.48 - 427.928$ $= 919.911 tCH_4$		
산정식	$N_2OEmissions = (TN_{in} \times Q_{in} - TN_{out} \times Q_{out} - TN_{sl} \times Q_{sl}) \times 10^{-6} \times EF \times 1.571$			
	$N_2OEmissions$	하수처리에서 배출되는 N ₂ O 배출량(tN ₂ O)		
	TN_{in}	유입수의 BOD농도 (mg-T-N/L)		
	TN_{out}	방류수의 BOD농도 (mg-T-N/L)		
	TN_{sl}	반출 슬러지의 BOD농도 (mg-T-N/L)		
	Q_{in}	유입수의 유량(m ³)		
	Q_{out}	방류수의 유량(m ³)		
	Q_{sl}	슬러지의 유량(m ³)		
	EF	아산화질소 배출계수(kgN ₂ O-N/kg-T-N)		
1.574	N ₂ O의 분자량(44.013)/N ₂ 의 분자량(28.013)			
총 N ₂ O 배출량		$= (55 \times 20,000,000 - 13 \times 18,000,000 - 0) \times 10^{-6} \times 0.005 \times 1.571$ $= 6.802 tN_2O$		
각 온실가스별 배출량		총 온실가스별 배출량(GWP적용)		
tCH ₄	tN ₂ O	tCH ₄ _GWP	tN ₂ O_GWP	tCO ₂ eq
919.911	6.802	(919.911 × 21)	(6.802 × 310)	21,426,889

[그림 2-13] 하수처리장 공정배출 산정 예시(한국환경공단, 2016)

2절. 하수관로 유래 온실가스 배출량 산정

1. 총 유기물 배출량 산정

- 하수관거 유래 온실가스 배출량을 산정하기 위해 IPCC에서 제시된 가이드라인 및 산정식은 아직 존재하지 않음
- 그러나 IPCC의 하수처리 분야에서 일반적으로 사용되는 방법과 유사한 접근 방법을 이용하여 국내의 하수로부터 배출되는 총 COD(chemical oxygen demand, 화학적산소요구량) 양을 식(1)을 이용하여 산정하였음
- 연간 하수의 유기물 배출량(TOPR)은 환경부에서 발표한 일일 하수 배출량인 약 21,000,000ton/d, 하수의 유기물 농도는 일반적인 COD농도 범위를 고려하여 0.2 ~ 0.5kg COD/tonsew를 이용하여 유기물량을 산정하였음

$$\text{TOPR} = \text{PR}_{\text{sew}} \times \text{COD}_{\text{sew}} \quad (1)$$

여기서,

TOPR : Total Organics Production Rate (ton COD/yr)

PR_{sew} : Sewage Production Rate (ton/yr)

COD_{sew} : COD Concentration of Sewage (ton COD/tonsew)

2. 유기물 분해량 산정

- 앞서 계산된 TOPR 중 메탄 생성에 사용된 COD 양(TODR_{sew})은 하수관거 이동과정에서의 COD 분해율을 기반으로 식(2)에 적용하여 계산하였음
- 하수관거에서 COD 분해도는 바이오필름내에 존재하는 미생물의 군집, 활성도가 큰 영향을 미치나, 그 외에도, 관거내 용존산소량, 하수체류시간, 관거의 경사도 등 다양한 물리화학적 인자 등에 의해 결정됨
- 선행 연구들의 실험 결과를 기반으로 COD의 분해율을 30 ~ 40%로 추정할 수 있으며 많게는 50%까지 확인되기도 함
- 본 연구에서는 30 ~ 50%의 다양한 COD 분해율을 적용하여 메탄 생성량을 산정하였음

$$\text{TODR}_{\text{sew}} = \text{TOPR} \times \text{R}_{\text{sew}} \quad (2)$$

여기서,

TODR_{sew} : Total Organic Degradation Rate in Sewage
(ton COD/yr)

R_{sew} : Organic Removal Rate in Sewer Pipelines (%)

3. 메탄 배출 잠재량 산정

- 국내 하수관거 유래 온실가스 잠재량을 식(3)을 이용하여 계산하였으며, 하수관거에서 분해되는 COD의 양인 $TODR_{sew}$ 는 본 연구에서 가변 인자로 설정한 하수의 COD 농도, 하수관거에서의 COD 분해율에 따라 계산될 수 있음
- 그 후 메탄 생성량은 계산된 $TODR_{sew}$ 에 유기물이 미생물에 의해 완전히 사용되어 메탄을 생성할 때의 이론적 수율인 $0.25 \text{ gCH}_4/\text{gCOD}$ 를 이용해 산정하였음
- 또한, 장·단기적인 측면의 메탄 배출 영향을 확인하기 위해 100년, 20년 주기의 GWP를 적용하여 CO_2 당량으로 변환하였고 결과를 그림 [2-15], [2-16]에 제시하였음
- 생성된 메탄 중 일부는 용존 상태로 존재할 수 있으나, 하수처리시설에서 처리 및 배출될 수 있으므로 이에 대한 양은 고려하지 않았음
- [그림 2-14]과 같이 100년 주기의 GWP를 적용한 하수관거 유래 온실가스의 양은 2절 1장과 2절 2장에서 설정한 일반적인 하수의 COD 농도 및 COD 분해율의 조건에서 약 3.2백 만 ~ 13.4백 만 $\text{tCO}_2\text{eq/yr}$ 의 온실가스 배출 잠재량을 확인하였음
- 하수의 농도 증가, 관거 내 유기물 분해율 증대에 따라 온실가스 배출량은 증가하였음
- 최대 잠재량인 13.4백 만 tCO_2eq , 배출량은 국내 2019년 총 메탄 배출량인 약 27.5백 만 tCO_2eq 의 약 49%를 차지하는 양이며, 기존 CO_2 대비 4.3%였던 메탄의 배출 비율은 하수관거 유래 온실가스 배출량을 함께 고려하게 되면 약 6.4%까지 증가할 수 있음
- 메탄의 영향력은 20년 주기 GWP값을 고려 시 더욱 커질 수 있게 됨
- [그림 2-15]와 [그림 2-16]에서 보이는 바와 같이 약 9.7백 만 ~ 40.2백 만 $\text{tCO}_2\text{eq/yr}$ 의 온실가스가 하수관거로부터 배출될 수 있는 것으로 계산되었음

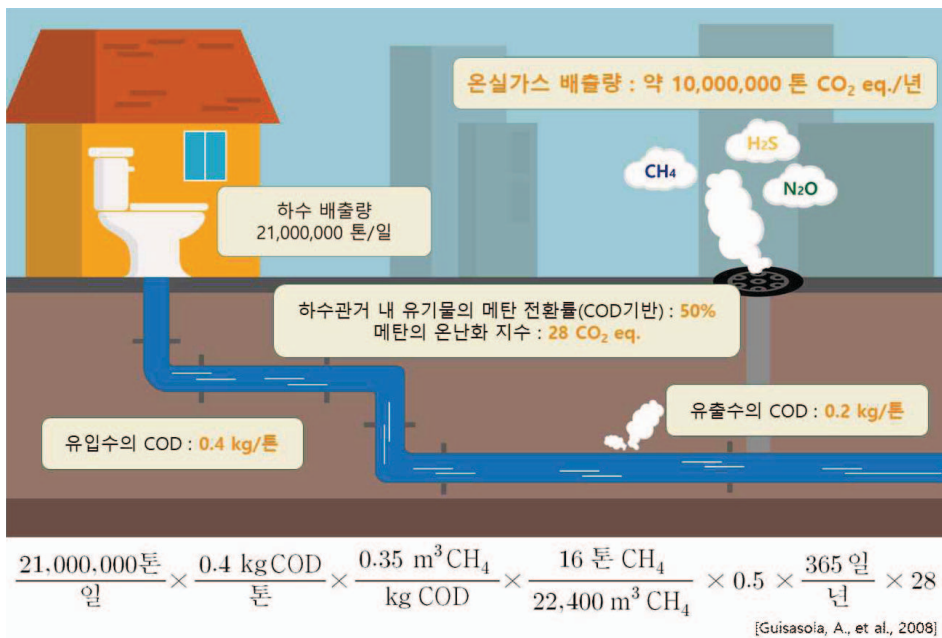
- GWP에 대한 영향력을 확인하기 위해 GWP20을 적용할 경우, 2019년 메탄 배출량은 82.5백 만tCO₂eq로 추정할 수 있음
- 하수관거 유래 온실가스를 함께 고려할 경우 GWP100 적용 시 4.3%였던 CO₂ 대비 메탄의 비율은 19.1%까지 증가할 수 있음
- 즉, 단기적인 측면에서 메탄 배출의 영향력은 4배 이상 커져 메탄 저감에 대한 중요성이 증가할 수 있음을 의미함

$$\text{GHG}_{\text{sew}}(\text{tCO}_2\text{eq}/\text{y}) = \text{TODR}_{\text{sew}} \times 0.25 \times \text{GWPCH}_4 \quad (3)$$

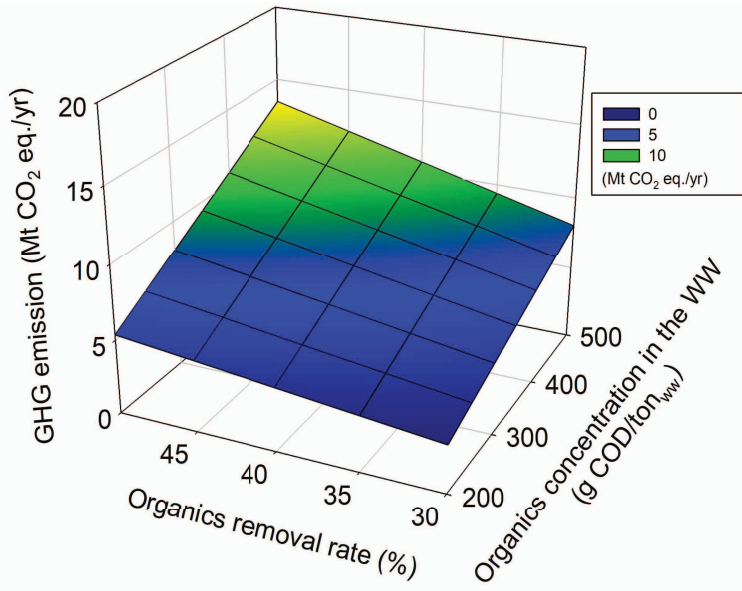
여기서,

0.25 : Theoretical CH₄ yield (g CH₄/g COD)

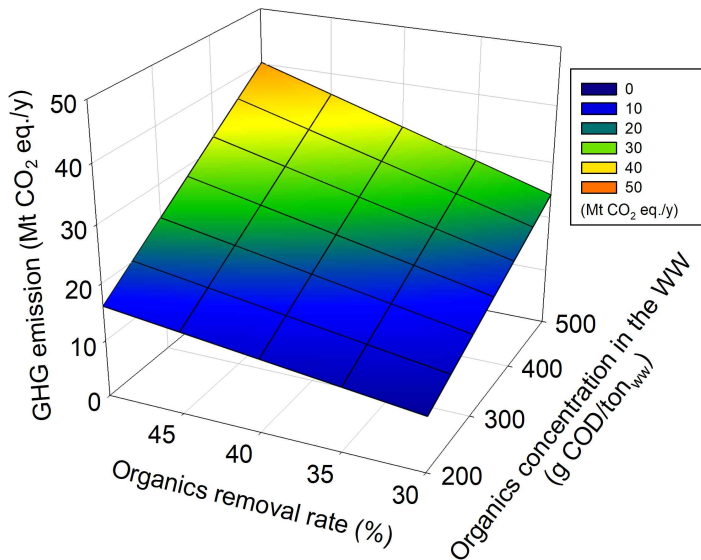
GWPCH₄ : Global Warming Potential of CH₄



[그림 2-14] 하수관거 유래 온실가스 배출 잠재량 산정



[그림 2-15] GHG emission potential in the sewer pipelines using GWP100.



[그림 2-16] GHG emission potential in the sewer pipelines using GWP20.

- 대전시 하수관거를 통한 예상 온실가스 배출량을 산정한 결과 하수 발생량 646,668 톤/일에 의해 온실가스 330,447 tCO₂eq/년이 발생할 것으로 예상
- 이는 2장 1절 ~ 3절 연구 결과를 기반으로 하수관거 내 유기물의 메탄 전환율(COD기반) 50%, 메탄 온난화 지수 28 CO₂eq, 유입수의 COD 0.4 kg/톤, 유출수의 COD 0.2 kg/톤 적용하여 산정된 값임
- 다만, 하수의 유기물 농도 범위 적용값에 따른 유기물량과 COD 분해율 등 여러 인자의 적용 값에 따라 온실가스 배출량은 달라질 수 있음

$$\frac{646,668 \text{ ton}}{\text{day}} \times \frac{0.4 \text{ kgCOD}}{\text{ton}} \times \frac{0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kgCOD}} \times \frac{16 \text{ tCH}_4}{22,400 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} \times 0.5 \times \frac{365 \text{ day}}{\text{yr}} \times 28$$



[그림 2-17] 대전시 하수관거 내 온실가스 예상 배출량 산정

대전광역시 하수처리 및 하수관로 현황

1절 대전광역시 하수관로 현황

2절 대전하수처리장 현황 및 온실가스 배출

3장

3장 대전광역시 하수처리 및 하수관로 현황

1절. 대전광역시 하수관로 현황

1. 하수도 관련 통계 조사

- 대전시 행정구역별 하수도보급률을 살펴보면 대전시 전체에 대한 하수도 설치율은 96%이며 총 1,451,556명에게 보급되고 있음
- 그중 중구와 서구가 99%로 하수도 설치율이 가장 높으며, 유성구와 대덕구는 각각 94%, 95%로 대전시 전체 설치율에 미달함

[표 3-1] 대전광역시 행정구역별 하수도보급률

행정 구역	합계 (명)	하수처리구역 내						하수처리구역 외				하수도 설치율 (%)	
		공공하수처리인구(명)			폐수처리인구(명)			면적 (km ²)	마차리 인구 (명)	오수처리 인구 (명)	정화조 인구 (명)		면적 (km ²)
		물리적 처리	생물학적 처리	고도 처리	물리적 처리	생물학적 처리	고도 처리						
대전광역시	1,451,556	0	0	1,440,103	0	6,749	4,704	127	0	4,552	24,669	412	96
동구	225,569	0	0	225,569	0	0	0	19	0	1,534	323	118	96
중구	235,622	0	0	235,622	0	0	0	16	0	214	1,164	46	99
서구	477,791	0	0	477,791	0	0	0	28	0	1,713	1,603	67	99
유성구	334,831	0	0	330,127	0	0	4,704	40	0	861	21,046	136	94
대덕구	177,743	0	0	170,994	0	6,749	0	23	0	230	533	45	95

자료: 환경부(2021)

- 대전시 행정구역별 하수도관로 보급 현황을 살펴보면 대전시 전체에 대한 하수도관로 보급률은 98%에 달함
- 관로정비 계획면적은 합류식 55.250km², 분류식 95.290km²이며, 두 형식 모두 개거 형태로는 설치되어 있지 않음
- 하수도관로 모양으로 살펴보면 원형의 형태가 가장 많이 설치되어 있으며, 합류식에서는 58%, 분류식에서는 87%가 원형으로 설치되어 있음

[표 3-2] 대전광역시 행정구역별 하수도관로 보급 현황

행정 구역	하수 관로 보급률 (%)	합류식					분류식							
		관로정비 계획면적 (km ²)	암거		개거 (m)	측구 (m)	오수관로			우수관로				
			사각형 (m)	원형 (m)			관로정비 계획면적 (km ²)	암거		개거 (m)	측구 (m)			
								사각형 (m)	원형 (m)			관로정비 계획면적 (km ²)	사각형 (m)	원형 (m)
대전광역시	98	55.250	231,914	933,088	0	435,942	95.290	1,943	873,450	95.290	136,131	872,833	0	114,336
동구	96	14.800	38,932	251,669	0	98,721	7.600	0	101,952	7.600	12,766	71,184	0	23,178
중구	100	14.100	55,915	230,582	0	161,880	2.800	0	60,518	2.800	4,015	47,952	0	6,610
서구	99	10.400	59,034	172,892	0	63,843	18.200	1,943	212,055	18.200	27,487	202,134	0	18,351
유성구	100	2.840	35,267	153,194	0	24,146	55.200	0	320,658	55.200	72,359	405,809	0	45,003
대덕구	96	13.110	42,766	124,751	0	87,352	11.490	0	178,267	11.490	19,504	145,754	0	21,194

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 행정구역별 하수관로 하수처리시설별 설치현황을 살펴보면 하수처리장은 총 6곳으로 각 행정구역 당 1곳, 서구에는 2곳이 존재함
- 대전광역시 합류식 처리구역은 모두 대전하수처리장에서 하수를 처리하고 있으며, 분류식 0.37km²에 한해 흑석하수처리장으로 하수 이송처리

[표 3-3] 대전광역시 행정구역별 하수관로 하수처리시설별 설치현황

행정 구역	하수 처리장명	처리구역면적 (km ²)		배수설비(개소)		차집/오수간선 (m)		토실/토구(개소)			자선(m)			
		합류식	분류식	합류식	분류식 (연결)	차집	오수 간선	합류식		분류식		합류식	분류식	
								우수토실	우수 토실	우수 토구	합류식		우수	오수
대전 광역시	-	52.22	74.67	157,416	213,729	150,443	0	140	22	199	1,450,501	1,123,300	875,393	
동구	대전	15.30	3.70	16,637	5,812	31,002	0	55	0	135	358,320	107,128	101,952	
중구	대전	13.60	2.80	18,154	28,405	18,241	0	40	0	0	430,136	58,577	60,518	
서구	대전	8.17	19.46	17,284	20,121	35,000	0	35	0	37	260,769	241,272	205,598	
	흑석	0.00	0.37	0	1,255	0	0	0	0	0	0	6,700	8,400	
유성구	대전	2.27	37.93	3,001	29,891	66,200	0	0	22	27	146,407	523,171	320,658	
대덕구	대전	12.88	10.41	102,340	128,245	0	0	10	0	0	254,869	186,452	178,267	

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 2020년 하수관로 매설연장 길이는 30,892.5m
- 대전광역시에 설치되어 있는 하수관로는 원형 형태가 82.3% 설치되어 있으며, 그 중 300~500mm미만의 관경이 가장 많이 설치(36%)되어 있음
 - 원형 2,963,819m, 사각형 441,582m, 기타(측구 등) 194,236m 설치

[표 3-4] 2020년 대전광역시 하수관로 관경별 현황

관종	매설 연장 (m)	원형(m)					사각형 (m)	기타 (측구 개거 등)
		200mm 미만	200~300 mm미만	300~500 mm미만	500~800 mm미만	800mm 이상		
총계	30,892.5	220,781	366,440	1,311,084	689,580	375,934	441,582	194,236
흙관	0	36,414	200,345	932,897	532,425	223,208	85,040	1,058
PC관	0	0	0	3,711	0	333	0	0
VR관	0	0	5,175	10,096	7,083	3,496	0	0
PVC관	17,566	1,405	31,568	29,910	6,779	0	0	848
강회플라스틱 복합관	0	18,826	47,864	79,252	28,610	28,723	0	0
유리섬유 복합관	0	0	0	116	2,172	1,957	0	0
PE관	12,915.5	16,434	56,920	180,731	46,993	9,785	0	1,188
덕타일주철관	0	1,020	3,009	5,661	20,107	16	0	0
파형강관	0	42	0	259	1,303	328	0	0
레진 콘크리트관	0	0	0	0	0	0	0	0
철근콘크리트관 (BOX형)	411	0	0	0	0	26,389	233,265	0
합성수지계 기타관종	0	0	0	812	0	0	0	0
기타 관종	0	146,640	21,559	67,639	44,108	81,699	123,277	191,142

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 동구의 하수관로는 2020년에 478m 매설 연장하였음
- 동구에 설치되어 있는 하수관로의 관경을 살펴보면 원형 형태 관경이 설치된 관경의 75.6%를 차지하며 사각형 24.4%이나 기타(측구 개저 등) 형태는 설치되어 있지 않음
 - 원형 452,403m, 사각형 145,999m, 기타(측구 등) 0m

[표 3-5] 2020년 대전광역시 동구 하수관로 관경별 현황

관종	매설 연장 (m)	원형(m)					사각형 (m)	기타 (측구 개저 등)
		200mm 미만	200~300mm미만	300~500mm미만	500~800mm미만	800mm 이상		
총계	478	0	57,316	232,154	105,234	57,699	145,999	0
흙관	0	0	12,155	111,874	47,947	3,289	22,762	0
PC관	0	0	0	275	0	0	0	0
VR관	0	0	5,175	6,940	1,703	2,226	0	0
PVC관	0	0	6,656	24,512	3,172	0	0	0
강화플라스틱 복합관	0	0	0	0	0	0	0	0
유리섬유 복합관	0	0	0	0	2,106	1,957	0	0
PE관	478	0	12,656	22,428	8,372	1,540	0	0
덕타일주철관	0	0	0	0	0	0	0	0
파형강관	0	0	0	0	38	0	0	0
레진 콘크리트관	0	0	0	0	0	0	0	0
철근콘크리트관 (BOX형)	0	0	0	0	0	26,389	0	0
합성수지계 기타관종	0	0	0	0	0	0	0	0
기타 관종	0	0	20,674	66,125	41,896	22,298	123,237	0

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 중구의 하수관로는 2020년에 193m 매설 연장하였음
- 중구에 설치되어 있는 하수관로의 관경을 살펴보면 원형 형태 관경이 설치된 관경의 47.3%를 차지하며 기타(측구 개거 등), 사각형 순으로 설치되어 있음
 - 원형 268,448m, 사각형 125,335m, 기타(측구 등) 173,689m
- 대전광역시 전체에 설치되어 있는 측구, 개거 형태(194,236m)의 관경 중 89.4%(173,689m)가 중구에 설치되어 있음

[표 3-6] 2020년 대전광역시 중구 하수관로 관경별 현황

관종	매설 연장 (m)	원형(m)					사각형 (m)	기타 (측구 개거 등)
		200mm 미만	200~300mm미만	300~500mm미만	500~800mm미만	800mm 이상		
총계	193	1,041	76,916	82,590	78,022	29,879	125,335	173,689
흙관	0	0	48,325	61,863	69,460	25,551	62,278	1,058
PC관	0	0	0	0	0	0	0	0
VR관	0	0	0	0	0	0	0	0
PVC관	0	0	8,043	5,318	3,077	0	0	848
강화플라스틱 복합관	0	0	0	0	0	0	0	0
유리섬유 복합관	0	0	0	116	66	0	0	0
PE관	0	21	19,117	15,008	4,907	1,202	0	1,188
덕타일주철관	0	1,020	1,300	0	0	0	0	0
파형강관	0	0	0	200	24	36	0	0
레진 콘크리트관	0	0	0	0	0	0	0	0
철근콘크리트관 (BOX형)	193	0	0	0	0	0	63,057	0
합성수지계 기타관종	0	0	0	0	0	0	0	0
기타 관종	0	0	131	85	488	3,090	0	170,595

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 서구의 하수관로는 2020년에 218m 매설 연장하였음
- 서구에 설치되어 있는 하수관로의 관경은 대부분 원형(95%)으로 설치되어 있으며 기타(측구 개거 등), 사각형 순
 - 원형 719,871m, 사각형 17,321m, 기타(측구 등) 20,547m

[표 3-7] 2020년 대전광역시 서구 하수관로 관경별 현황

관종	매설 연장 (m)	원형(m)					사각형 (m)	기타 (측구 개거 등)
		200mm 미만	200~300mm미만	300~500mm미만	500~800mm미만	800mm 이상		
총계	218	201,880	120,364	159,095	144,369	94,163	17,321	20,547
흙관	0	36,414	72,828	91,936	115,748	64,237	0	0
PC관	0	0	0	0	0	0	0	0
VR관	0	0	0	0	0	0	0	0
PVC관	0	0	0	0	0	0	0	0
강화플라스틱 복합관	0	18,826	47,536	66,650	28,521	28,723	0	0
유리섬유 복합관	0	0	0	0	0	0	0	0
PE관	0	0	0	509	100	1,203	0	0
덕타일주철관	0	0	0	0	0	0	0	0
파형강관	0	0	0	0	0	0	0	0
레진 콘크리트관	0	0	0	0	0	0	0	0
철근콘크리트관 (BOX형)	218	0	0	0	0	0	17,321	0
합성수지계 기타관종	0	0	0	0	0	0	0	0
기타 관종	0	146,640	0	0	0	0	0	20,547

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 유성구의 하수관로는 2020년에 988m 매설 연장하였음
- 유성구에 설치되어 있는 하수관로의 관경 역시 서구와 같이 대부분 원형(91.4%)으로 설치되어 있으며 사각형 형태도 일부(8.6%) 설치되어 있으나 기타(측구 등) 형태는 설치되어 있지 않음
- 원형 966,088m, 사각형 90,348m, 기타(측구 등) 0m

[표 3-8] 2020년 대전광역시 유성구 하수관로 관경별 현황

관종	매설 연장 (m)	원형(m)					사각형 (m)	기타 (측구 개거 등)
		200mm 미만	200~300mm미만	300~500mm미만	500~800mm미만	800mm 이상		
총계	988	14,952	81,277	572,176	152,353	145,330	90,348	0
흙관	0	0	66,135	422,638	100,044	86,979	0	0
PC관	0	0	0	3,436	0	0	0	0
VR관	0	0	0	3,156	5,380	1,270	0	0
PVC관	988	1,043	28	0	0	0	0	0
강화플라스틱 복합관	0	0	328	12,602	89	0	0	0
유리섬유 복합관	0	0	0	0	0	0	0	0
PE관	0	13,909	12,323	123,760	27,810	4,958	0	0
덕타일주철관	0	0	1,709	4,644	16,065	16	0	0
파형강관	0	0	0	59	1,241	292	0	0
레진 콘크리트관	0	0	0	0	0	0	0	0
철근콘크리트관 (BOX형)	0	0	0	0	0	0	90,348	0
합성수지계 기타관종	0	0	0	812	0	0	0	0
기타 관종	0	0	754	1,069	1,724	51,815	0	0

자료: 환경부(2021)

- 대전광역시 대덕구의 하수관로는 2020년에 29,016m 매설 연장
- 대덕구에 설치되어 있는 하수관로는 원형 형태(89.9%)가 가장 많이 설치되어 있으며 사각형이 62,579m로 그 뒤를 이음
 - 원형 557,009m, 사각형 62,579m, 기타(측구 등) 0m

[표 3-9] 2020년 대전광역시 대덕구 하수관로 관경별 현황

관종	매설 연장 (m)	원형(m)					사각형 (m)	기타 (측구 개거 등)
		200mm 미만	200~300mm미만	300~500mm미만	500~800mm미만	800mm 이상		
총계	29,016	2,908	30,567	265,069	209,602	48,863	62,579	0
흙관	0	0	902	244,586	199,226	43,152	0	0
PC관	0	0	0	0	0	333	0	0
VR관	0	0	0	0	0	0	0	0
PVC관	16,578	362	16,841	80	530	0	0	0
강화플라스틱 복합관	0	0	0	0	0	0	0	0
유리섬유 복합관	0	0	0	0	0	0	0	0
PE관	12,438	2,504	12,824	19,026	5,804	882	0	0
덕타일주철관	0	0	0	1,017	4,042	0	0	0
파형강관	0	42	0	0	0	0	0	0
레진 콘크리트관	0	0	0	0	0	0	0	0
철근콘크리트관 (BOX형)	0	0	0	0	0	0	62,539	0
합성수지계 기타관종	0	0	0	0	0	0	0	0
기타 관종	0	0	0	360	0	4,496	40	0

자료: 환경부(2021)

2절. 대전하수처리장 현황 및 온실가스 배출

1. 대전하수처리장 현황



[그림 3-1] 대전하수처리장 전경

- 대전하수처리장은 대전광역시 유성구 엑스포로 326에 위치하고 있음
- 1처리장과 2처리장의 시설규모는 150,000m³/일, 3처리장과 4처리장의 시설규모는 300,000m³/일로 대전하수처리장의 총 시설규모는 900,000m³/일임
- 부지면적은 404,334m²이며, 건축면적은 63,795m²임
- 사업비는 약 2,978억 원임

[표 3-10] 수처리 공정

구분	내용
생물학적 질소, 인제거공법 + 화학적 인제거(공침) 병행	1, 2처리장 : NPR 공법 + Alum 약품투입 3처리장 : BIO-SAC 공법 + Alum 약품투입
생물학적 질소, 화학적 인제거(공침) 병행	4처리장 : MLE 공법 + Alum 약품투입
슬러지공정 : 혐기성 증온소화법(난형)	-

[표 3-11] 대전하수처리장 슬러지처리시설 현황

시설명	1처리장	2처리장	3처리장	4처리장
생슬러지저류조	-	∅ 15.5m × H3.0m × 2지	∅ 15.0m × H3.0m × 3지	∅ 15.0m × H3.0m × 3지
원심농축기	60m³/hr × 3대		60m³/hr × 6대	
소화조(난형)	-	∅ 17.9m × H25.2m (3,500m³) × 3지	∅ 22m × H32.6m (7,000m³) × 3지	∅ 22m × H32.6m (7,000m³) × 3지
소화슬러지저류조	-	∅ 11.5m × H4.0m × 2지	∅ 11.5m × H4.0m × 3지	∅ 11.5m × H4.0m × 3지
탈수기	40m³/hr × 4대(원심탈수기)		40m³/hr × 4대(원심탈수기)	
케익호퍼	75m³ × 3조	75m³ × 2조		

자료 : 대전시설관리공단

[표 3-12] 대전하수처리장 수처리시설 현황

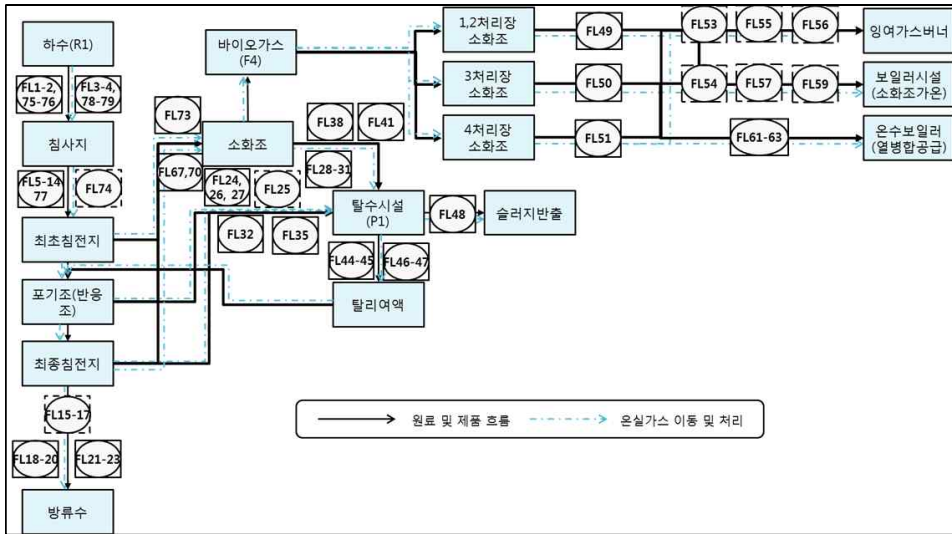
시설명	1처리장	2처리장	3처리장	4처리장	
유입침사지	W3.7m × L21.5m × H1.0m × 3지		W3.8m × L21.5m × H1.5m × 6지		
스크린설비	조목(수동) : 75mm × 3대 세목(자동) : 20mm × 3대 미세목(자동) : 5mm × 3대		조목(수동) : 75mm × 6대 세목(자동) : 20mm × 6대 미세목(자동) : 5mm × 6대		
유입펌프	100m³/min × H11.0 × 260kW × 4대 (인버터 2대)		50m³/min × H12.5 × 160kW × 2대 100m³/min × H12.5 × 350kW × 6대		
일차침전지	∅ 36.5m × H3.0m × 4지	∅ 36.5m × H3.0m × 4지	W14.1m × L37.0m × H3.0m × 16지	W9.0m × L40.0m × H3.0m × 24지	
생물반응조	NPR공법 (혐기조 → 무산소조 → 호기조) W8m × L78m × H5m × 24지		Bio-Sac공법 (혐기조 → 무산소조 → 호기조) W9.5m × L65m × H5m × 24지		MLE공법 (무산소조 → 호기조) W9m × L35m × H10m × 24지
이차침전지	∅ 43.0m × H3.2m × 4지	∅ 43.0m × H3.2m × 4지	∅ 43.6m × H3.2m × 8지	W9.0m × L56.0m × H3.6m × 24지	
송풍기	125m³/min × 6,000mmAq × 6대	125m³/min × 6,000mmAq × 6대	180m³/min × 6,500mmAq × 12대	135m³/min × 12,000mmAq × 9대 101m³/min × 6,500mmAq × 1대	

자료 : 대전시설관리공단

- 대전하수처리장은 침전지에서 큰 부유물을 침전시키고 포기조에서 생물학적 처리를 하며, 이때 N_2O 가 발생되고 최종침전지에서는 CH_4 와 N_2O 가 발생됨
- 최초침전지에서 침전된 부유물은 슬러지 저류조, 포기조에서 발생된 슬러지 또한 농축조를 통해 소화조로 이동되며, 발생하는 바이오가스로 보일러를 가동함
- 대전하수처리장에는 4개의 처리장이 있으며, 각 유량계를 통해 유량을 측정할 수 있음
- 메탄회수량의 경우 소화조에서 회수된 소화가스를 사용시설에서 유량계를 이용하여 측정해야 회수값으로 인정하고 있음(한국환경공단, 2016)
- 하지만 대전하수처리장의 경우 현재 가온보일러와 잉여가스버너에 유량계가 설치되어 있지 않아 가동시간×보일러용량으로 측정되고 있음
- 이는 모니터링 유형“D”에 해당하고, 유량계가 설치되지 않을 시 메탄회수량을 ‘0’으로 간주함
- 이와 같은 상황은 공정배출 산정시 변경된 혐기성 계수(환경부고시 제 2014-186호, 2014.10.10.)으로 산정하게 될 때 배출량을 급격히 증가시킬 수 있음
- LPG와 경유는 외부 주유소로부터 공급받으며 영수증으로 급유량을 수집함



[그림 3-2] 대전하수처리장 공정도(대전광역시시설관리공단)



[그림 3-3] 대전하수처리장 모니터링 도식도

2. 대전하수처리장 온실가스 배출량 산정

- 국가에서 개발한 하수처리공정의 CH₄ 배출계수 (0.01532 kgCH₄/kgBOD) 국가고유배출계수를 사용하여 대전하수처리장 하수처리공정에 의한 배출량 산정
- 대전하수처리장에 3개년(2019~2021)동안 유입 된 하수의 평균 유입 BOD는 167.147 mg/ℓ이며, 유입 된 하수에 의해 메탄이 585.620 tCH₄ 발생하여, 온실가스 배출량은 12,298 tCO₂eq으로 추정 됨

[표 3-13] 연간 하수처리공정 배출량

구분	하수처리공정 배출량		
	유입 BOD (mg/ℓ)	CH ₄ 발생량 (tCH ₄ /yr)	온실가스 배출량 (tCO ₂ eq)
하수처리공정	167.147	585.620	12,298

- 국가에서 공시한 전력배출계수를 사용하여 3개년(2019~2021) 평균 전력사용량(72,328.346 kWh)으로 간접배출량을 산정한 결과 온실가스 33,228.409 tCO₂eq 배출했을 것으로 추정 됨
- 따라서, 대전하수처리장 온실가스 배출량은 하수처리공정 배출량과 전력배출량을 합한 45,526 tCO₂eq으로 추정할 수 있음

[표 3-14] CO₂, CH₄, N₂O 전력배출계수

구분	CO ₂ (tCO ₂ /MWh)	CH ₄ (kgCH ₄ /MWh)	N ₂ O (kgN ₂ O/MWh)
3개년 평균('14~'16)	0.4567	0.0036	0.0085

[표 3-15] 연간 전력사용량 및 전력배출량

구분	전력사용량 (kWh)	전력배출량 (tCO ₂ eq)
간접배출량	72,328,346	33,228

하수처리에서 발생하는 온실가스 감 방안

1절 하수관거 내 온실가스 저감 방안

2절 하수처리시 온실가스 저감 방안

4장

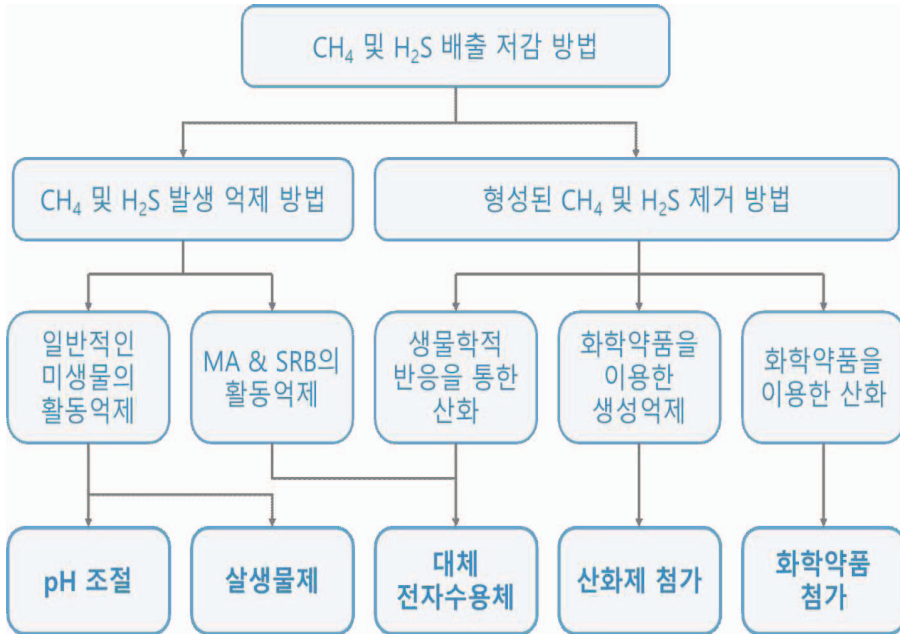
4장 하수처리에서 발생하는 온실가스 저감 방안

1절. 하수관거 내 온실가스 저감 방안

- 하수관거로부터 발생하는 온실가스 배출량을 감소시키기 위해 현 시점까지 연구된 하수관거 유래 온실가스 저감 기술은 크게 화학적 방법과 물리적 방법 등으로 구분할 수 있으며, 그 내용을 [표 4-1]에 나타냄

[표 4-1] GHG reduction technologies in sewer pipelines

Method	Technology	Mechanism	Ref.
Chemical method	Alternative electron acceptor	Preferential use of free electrons	Liu et al., 2015b Jiang et al., 2013
	pH adjusting	Inhibition of microbial activity	Gutierrez et al., 2014
	Iron ion	Antibacterial capability	Zhang et al., 2009
	Coating (Corrosion)	Antibacterial capability	Alsamuraee et al., 2011
Physical methods	High shear stress	Induction of biofilm detachment	Ai et al., 2016
	Ultrasonic treatment	Induction of biofilm detachment	Meng et al., 2020



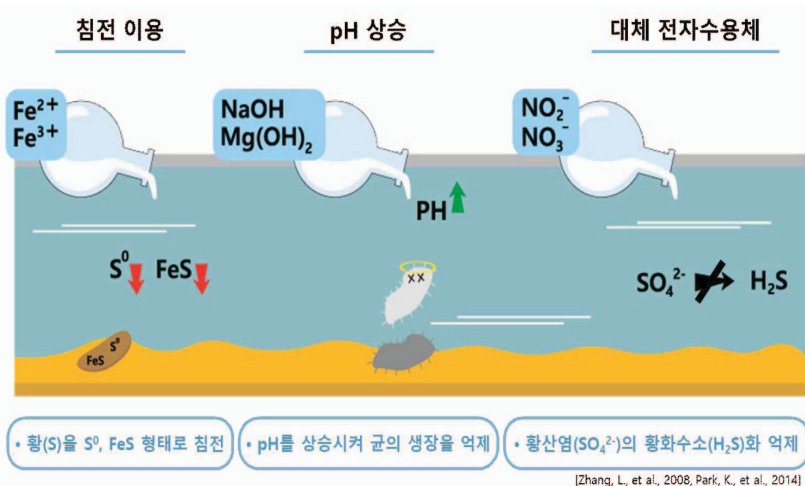
[그림 4-1] 하수관거 유래 메탄 및 황화수소 배출 억제 접근 방법

1. 화학적 방법

- 현재 가장 많이 연구된 화학적 방법은 대체 전자수용체 첨가, pH 조절, 금속 이온 첨가 등 약품 투입에 의한 방법
- 첫 번째로 질산염(NO_3^-), 아질산염(NO_2^-) 등의 대체 전자 수용체를 첨가하여 메탄 생성을 억제하는 기술이 있으며, 이는 메탄 생성 과정 대비 열역학적 우세라는 점을 바탕으로 함
 - 기존 연구에 의하면 실험실 규모의 하수관거 하수에 190일 이상 30mg N/L의 NO_3^- 를 투여한 결과 MA 활성 억제효율이 90%, 유출수에서 메탄 농도가 42% 가량 저감되는 효과를 보임
 - 2015년 호주에서는 소량의 NO_3^- 의 투여하여 장기적으로 온실가스 저감할 수 있는지 입증하기 위해 실험실 규모의 하수관거를 이용한 연구를 진행하였음

- 그 결과, 초기 50mg NO₃⁻-N/L의 투여 이후 110일간 질산염을 간헐적으로 투여하면서 메탄 생성 저감률이 27%까지 나타났으나 이를 후 메탄 생성량이 기존 수치로 회복되었음
- 질산염, 아질산염은 장기적인 온실가스 저감 효과는 없으며, 중력식 하수관거 용존산소에 의한 GWP값이 265인 아산화질소(N₂O) 생성에 관한 영향을 검토해볼 필요가 있음
- 두 번째로는 수산화나트륨(NaOH), 수산화마그네슘(Mg(OH)₂) 등을 첨가하여 MA의 활성화에 필요한 pH 5.5-9.0 조건을 충족시키지 않도록 하는 방법으로 메탄 생성을 억제하는 기술임
- 2009년 호주에서 진행된 연구에 따르면, 운전 기간 300일 이상 중 120일 동안 8.6-9.0으로 pH를 유지한 결과 메탄 생성률(<0.7 mg CH₄-COD/L/d)이 매우 낮았으며, 2014년에는 6시간 동안 하수관을 pH 11.5에 노출시킨 이후 2주 이상 대부분의 메탄 생성을 억제하였다는 실험 결과를 얻음
- 뿐만 아니라 MA는 높은 pH에 노출되면 성장 및 회복의 속도가 늦어져 약품을 투여한 지 17일이 지나도 약 5-15%의 회복성을 띠는 것이 확인돼 pH가 높을 경우 메탄 생성과 MA 회복에 억제 효과가 있음을 입증하였음
- 마지막으로 Fe²⁺, Fe³⁺ 와 같은 금속 이온인 철염을 투여하여 항균 효과를 이용하는 방법들이 연구되고 있음
- 하수관거에서 발생하는 악취의 원인 중 하나인 황화수소(H₂S)를 철염을 투여함으로써 황화철(FeS)로 침전시키는 악취 억제 방법이 연구되었음
- 2009년에 진행된 연구 결과에 따르면, 유출수에 21mg Fe³⁺/L의 철염을 투여하여 기존 대비 약 43%의 메탄 농도 저감 효과가 나타남
- 실제로 보고된 바에 따르면, Fe³⁺를 포함한 금속 이온은 황산염 환원균(Sulfate Reducing Bacteria, SRB)의 배양을 억제하는 데에 효과가 있으며, 혐기성 바이오필름에 서식하는 MA 역시 비슷한 억제 효과를 받는 것으로 보임

- 위에 언급된 방법 이외에도 다른 하수관거 분야와 관련된 연구의 결과를 메탄 생성 저감과 연계하는 것 역시 하나의 대안이 될 수 있을 것임
 - 예를 들자면, 하수관거에 금속 물질(아연(Zn), 주석(Sn), 납(Pb) 등)을 발라 하수관거의 균열을 억제하는 방법이 있음
- 앞선 내용과 같이, 아연, 니켈(Ni), 납, 철염을 포함한 구리(Cu) 등의 금속 이온에 의해 SRB의 배양이 억제되는 것을 알 수 있음
 - 음전하를 띠는 세포벽과 금속 이온이 만나면 금속 이온 반응을 일으켜 복합 화합물을 생성하며, 이는 효소의 필수 생명 활동을 억제하여 미생물에게 영향을 끼치며 세포의 삼투압을 방해해 세포 내 주요 구성성분의 배출을 초래함으로써 90% 이상의 정균 및 살생 효과가 확인된 바 있음
- 2011년에 진행된 실험에 의하면, 납, 아연, 주석 등을 코팅에 이용한 결과 균열 억제 효과가 각각 61%, 22%, 48%로 확인되었음
 - 위와 같이 코팅 실험 결과 SRB 활성을 억제하는 데에 있어 효과가 큰 것으로 예상되며, 유사한 MA에 대한 영향 또한 연구해 볼 필요가 있음
- 온실가스 저감을 위한 화학적 방법 연구는 효과적인 것으로 나타났으나 효과가 나타나는 시간이 짧고 현장에 적용하기 어려워 현재 연구 단계에 머물러 있음

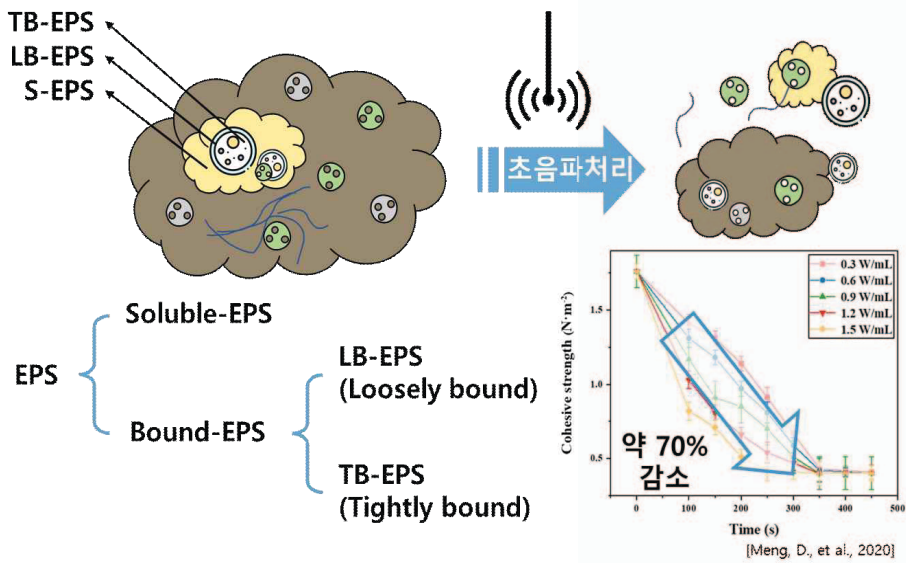


[그림 4-2] 하수관거 악취 제거를 위한 화학약품의 메커니즘

2. 물리적 방법

- 화학약품처럼 직접적으로 메탄 생성이나 미생물 활성을 조절하는 방법이 있으며, 또 하나의 메탄 생성 및 배출 저감 접근 방법으로는 하수관거 벽면에 붙은 바이오필름의 생성 억제 또는 탈락 유도가 있음
- 하수관거를 따라 하수가 흐르는 과정에서 하수와 관거의 벽면 사이에 발생하는 전단력이 벽에 바이오필름이 부착되는 것을 가로막는 요소임
- 즉, 하수관거의 경사가 높거나 유속이 빠를 경우 큰 전단력이 발생하는 요인이 될 수 있으며, 이는 하수관거 벽면에 바이오필름의 생성 억제 및 탈락을 유도하여 온실가스 생성을 저감 할 수 있음
- 2016년 중국에서는 하수관의 경사를 1.12, 1.29 1.49 Pa로 조절하고 각각의 조건에서 실험을 진행해 1.12 Pa에서 40%였던 COD 제거율이 1.49 Pa에서는 32%로 감소를 확인
- 위에서 언급된 COD 제거율을 포함해 바이오필름의 두께나 바이오필름 구성요소인 EPS 농도 변화에서도 전단력의 증가는 바이오필름 형성 억제라는 결과를 나타내어 최종적으로는 메탄 형성을 억제함
- 최근 진행된 연구에는 하수관 내 침전물에 전파시키는 동안 초음파처리로 인해 형성된 미세기포가 터지면서 주변에 전단력을 생성하는 원리를 이용한 사례가 있음
- 초음파에 의해 생성된 전단력은 미생물을 죽이거나 온실가스 및 악취 물질을 저감하는 등 직접적인 효과는 없으나, 하수 흐름을 통해 자가 세척이 가능하도록 유도하거나 하수관 벽면에 형성된 바이오필름을 탈락시키는 등 온실가스의 생성 및 배출 억제에 간접적인 효과를 보임
- 2020년 중국 통지대학에서 하수에 0.3-1.5 W/mL의 초음파를 450초 이상 처리한 결과 내부침전물 입자의 직경을 최대 71% 감소시키고 응집력 또한 약 77% 감소시켜 하수관거 내 형성된 바이오필름을 탈락시키는데 효과가 있음을 증명함

- 초음파는 Bound-EPS 농도를 감소시켜 하수 침전물의 입자 크기를 줄이고, 입자를 응집시키는 역할을 하는 트립토판 단백질의 구조를 파괴

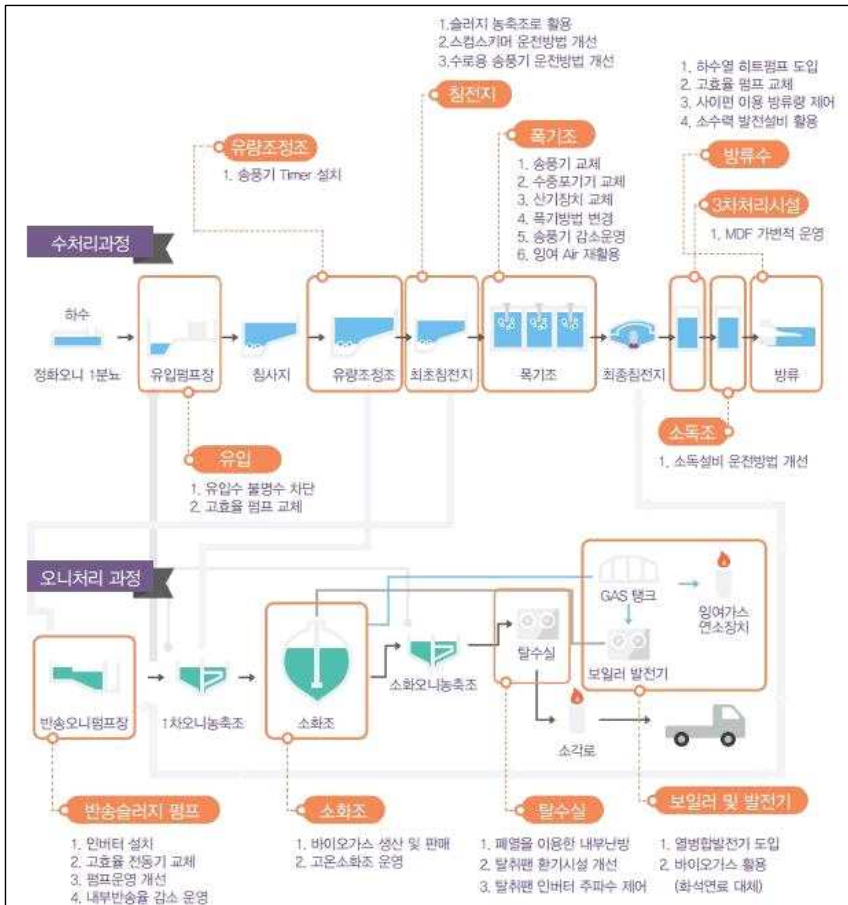


[그림 4-3] 초음파처리의 메탄 배출 저감 메커니즘 및 실험 결과

2절. 하수처리시 온실가스 저감 방안

1. 하수처리공정에서의 온실가스 감축활동

- 폐기물부문의 하폐수 처리공정의 온실가스 감축 지점 및 주요 활동 내용은 다음 [그림 4-4]과 같음
- 수처리과정과 오니처리과정의 감축 방안을 나타내었으며, 고효율 펌프와 송풍기 교체 등 설치기기를 변경하거나 운영 방법을 개선하는 등의 방법으로 나누어 볼 수 있음



[그림 4-4] 하폐수 처리공정의 감축 지점

1) 소화조 바이오가스 판매

- 기존에 바이오가스는 소화조 가온용 연료로 활용하고 잉여량은 소각했으나, 바이오가스 발생량이 증가함에 따라 잉여 바이오가스를 활용하여 온수를 생산하고 지역난방용수로 판매하거나 바이오가스를 판매함으로써 온실가스 감축효과를 봄
- 부산광역시의 남부사업소의 경우 잉여 바이오가스를 2014년 상반기에만 125,508㎥ 판매하여 온실가스를 138 tCO₂ 감축하였음
- 에너지비용 절감액은 연간 180백 만원 정도이며 투자금액인 550 백 만원을 회수하는데 3.1년 정도가 걸리는 것으로 볼 수 있음

[표 4-2] 부산광역시 남부사업소 바이오가스 판매 사례

구분	배출원	바이오가스 판매량	온실가스 감축량
사업 전	잉여바이오가스 소각		
사업 후	잉여바이오가스 판매	2011년 484,526 ㎥/년	615 tCO ₂
		2013년 118,050 ㎥/년	130 tCO ₂
		2014년 125,508 ㎥/6개월	138 tCO ₂
감축량	1,021 tCO ₂ /년		

[표 4-3] 부산광역시 남부사업소 바이오가스 판매 투자 효과

투자금액	에너지비용 절감액	정부 지원금	투자비 회수기간
550백 만 원	180백 만 원/년	-	3.1년

- 대전광역시의 경우에도 대전하수처리장의 바이오가스로 난방용수를 생산매각하여 에너지(65,891 TJ/년)와 온실가스(3,348 tCO₂/년)를 감축하여 한국환경공단으로부터 2013 폐기물우수사례에서 최우수상을 수상한 바 있음

2) 송풍기 교체

- 노후로 인한 효율저하 및 전력비가 과다하게 사용되는 노후 송풍기를 고효율 송풍기로 교체하여 전력사용량을 줄이고 효율을 높일 수 있음
- 2014년에 천안시 제3공단 폐수종말처리장의 경우 유량조정조와 폭기조에 설치되어 있던 노후 송풍기를 신규 송풍기로 교체한 후 351 tCO₂/년을 감축하였음
- 이로 인해 에너지비용이 60백 만원/년을 절감되었으며 투자금액(2 백 만원)을 0.03년만에 회수할 수 있는 것으로 나타남

[표 4-4] 천안시 제3공단 폐수종말처리장 노후송풍기 교체 사례

구분	시설	전력사용량	에너지사용량	온실가스발생량
사업 전	노후 송풍기 (유량조정조, 폭기조 등)	1,410 MWh/년	-	-
사업 후	신규공풍기	657 MWh/년	6,780,240MJ/년	351 tCO ₂ /년
감축량	351 tCO ₂ /년			

[표 4-5] 천안시 제3공단 폐수종말처리장 노후송풍기 투자효과

투자금액	에너지비용 절감액	정부 지원금	투자비 회수기간
2백 만 원	60백 만 원/년	-	0.03년

3) 고온소화조 운영

- 소화조 운영 방식을 기존 중온소화 방식에서 고온소화 방식으로 변경함으로써 증가된 바이오가스 생산량을 LNG의 대체 연료로 사용하여 온실가스 배출량이 감축되는 방법임
- 2011년 서울시 서남물재생센터에서 도입하여 896백 만원의 에너지비용이 절감되었으며, 바이오가스 발생량이 약 6.6% 증가하게 됨

[표 4-6] 서울특별시 서남물재생센터 소화조 운영 개선 사례

구분	소화조 운영	바이오가스 발생량
사업전(3년)	중온소화 35℃	24,951,951 Nm ³ /년
사업후(2년)	고온소화 55℃	26,605,215 Nm ³ /년

[표 4-7] 서울특별시 서남물재생센터 소화조 운영 개선 투자효과

투자금액	에너지비용 절감액	정부 지원금	투자비 회수기간
-	896백 만 원/년	-	-

4) 생물반응조 폭기방법 변경

- 하수처리시설은 송풍기가 전체 전력사용량의 약 40%를 차지하고 있으므로 DO 자동제어장치를 활용하여 부하량이 낮은 시간대는 DO 농도를 낮게 설정함으로써 송풍기 운전시간 및 운전 대수를 감소시켜 전력사용량을 절감시킴

[표 4-8] 인천광역시 남향하수처리장 생물반응조 폭기방법 변경 사례

구분	시설	에너지사용량	온실가스발생량
사업 전	송풍기 3대 가동	7,577 MWh/년	-
사업 후	송풍기 1대 가동	4,642 MWh/년	1,368 tCO ₂ /년
감축량		1,368 tCO ₂ /년	

- 인천광역시 남향하수처리장의 경우 2012년에 생물반응조 폭기방법을 변경(송풍기 3대 가동 → 송풍기 1대 가동)하여 전력사용량이 2,935 MWh/년 감소하였고, 온실가스가 1,368 tCO₂/년 감축되었음

[표 4-9] 인천광역시 남향하수처리장 생물반응조 폭기방법 변경 투자 효과

투자금액	에너지비용 절감액	정부 지원금	투자비 회수기간
-	452백 만원/년	-	-

5) 생물반응조 수중포기기 교체

- 기존 수중포기기를 압축형 교반기 및 무동력 산기장치로 개선하여 전력소비량을 저감할 수 있음
- 대구환경공단 서부공공하수처리장의 경우 2011년 압축형교반기와 무동력 산기장치로 수중포기기를 교체한 후 12,648 tCO₂/년의 온실가스를 감축하는 효과를 얻음

[표 4-10] 대구환경공단 생물반응조 수중포기기 교체 사례

구분	시설	에너지사용량	온실가스발생량
사업 전	수중포기기 11kW 96대 수중포기기 15kW 48대 수중포기기 22kW 48대		-
사업 후	압축형교반기 1.5kW 168대 무동력 산기장치	27,128 MWh/년	12,648 tCO ₂ /년
감축량	12,648 tCO ₂ /년		

[표 4-11] 대구환경공단 생물반응조 수중포기기 교체 투자 효과

투자금액	에너지비용 절감액	정부 지원금	투자비 회수기간
6,436백 만원	-	-	-

정책 제언

1절 기존 연구 한계점

2절 정책 제언

5장

5장 정책 제언

1절. 기존 연구 한계점

- 2000년대 후반 본격적으로 시작된 하수관거 유래 온실가스 관련 연구는 다른 분야에 비해 비교적 늦게 시작되어 현재까지도 보완과 후속 연구의 필요성이 중요한 분야
- 특히, 국내에서는 본 연구를 시작으로 지속적인 연구의 발전이 필요할 것으로 생각되며, 보다 정확한 온실가스 배출량, 온실가스 저감 기술 개발을 위해 현재 상황의 한계점과 향후 미래에 수행될 연구에서 고려해야 할 사항들이 필요
- 우선 본 연구를 통해 제시한 하수관거 유래 온실가스 배출 잠재량은 실제와 다를 수 있음
- 가장 정확한 온실가스 배출 산정 방법은 실제로 다양한 조건의 하수관거로부터 하·폐수 성상에 따라 발생하는 온실가스 배출량을 산정
- 하지만, 이를 현시점에서 수행하기는 불가능하나, 시민들의 주요 관심사인 악취와 함께 동시 측정하는 것은 가능할 것으로 판단됨
- 또한 악취의 발생 원인도 메탄의 발생 원인과 동일하며 비슷한 조건하에서 생성되어 악취 민원이 자주 발생하는 구역에 실시간 메탄 조성 측정기를 설치하는 등의 모니터링을 통해 점진적으로 데이터베이스를 구축해 나가는 것이 필요
- 향후에는 IPCC에서 하수관거 유래 온실가스 배출량을 고려할 경우를 대비해 국내적으로 연구 수행이 필요
- 본 연구에서는 대략적인 온실가스 배출량을 제시하였지만, 미래에는 상세한 온실가스 배출량 산정식 및 정확한 계수 개발이 요구될 것으로 사료

- 특히, 하수관거의 특성상 다른 조건을 지니고 있는 상황에서 정확도 높은 배출량 산정을 위해서 IPCC의 Tier 1 수준보다는 Tier 2, Tier 3의 도시별, 지역별 배출계수를 구축하는 방향이 바람직할 것으로 예상됨
- 하수관거로부터 배출되는 다량의 온실가스를 저감하기 위한 실질적인 대안 마련이 필요
- 앞서 소개한 화학적, 수리학적, 물리적 기술들은 경제성 부족, 적용의 어려움 등의 다양한 문제점들로 인해 현재 하수관거에 직접 적용하기는 어려운 상황
- 따라서, 각 기술들의 단점을 보완하거나 실제 적용에 적합한 기술의 개발이 필요하며, 제거 기술의 고도화 및 실증화 가능성을 염두한 연구가 수행될 필요가 있음
- 하수관거는 가정의 하수를 집수하여 하수처리시설로 이송시키는데 가장 큰 목적성을 지니고 있음
- 하수관거의 온실가스 저감 기술 적용은 현재에 비해 많게는 50%의 COD 분해율을 상당량 줄일 수 있으며 이는 반드시 하수처리시설의 변화를 유발하게 됨
- 따라서 하수관거의 온실가스 저감 기술 적용은 하수관거뿐 아니라 하수처리시설의 영향도 반드시 함께 고려해야 하며, 구체적으로 폭기량, 바이오가스 생산량, 에너지자립도 등에 어떠한 변화가 있을지에 대한 예측이 필요
- 마지막으로 미래사회의 하수관거에 하수 이외의 다른 유기성 폐기물의 유입을 예상해야 함
- 현재 국내의 음식물류 폐기물은 매립, 소각으로 처리되고 있지만 향후 다른 나라와 유사하게 분쇄 후 하수관거로의 직접 유입이 가능해질 수 있음
- 이미 홍콩, 호주 등 많은 나라에서는 하수관거에 음식물류 폐기물이 유입됨에 따라 발생할 수 있는 문제점과 변화를 연구하고 있으며 국내에서도 이러한 연구가 추진되어야 함

2절. 정책 제언

- 온실가스 배출에 따른 평균 기온 상승 등의 기후변화 또는 기후위기는 현재 진행 중에 있으며, 이에 따라 온실가스 감축에 대한 내용들이 사회적으로 많이 요구되고 있음
- 국가차원에서의 에너지 전환을 통해 요구되는 감축 부분도 있지만, 공공부분에서의 지자체 주도적인 온실가스 감축도 요구되고 있음
- 공공부분의 대표적인 온실가스 배출원 중의 하나는 하수처리시 발생되는 것으로 현재는 하수처리장에서의 온실가스 배출은 관리하고 있지만 앞으로 IPCC에서 언급한 숨은 메탄 배출원 중 하나인 하수관거에서의 온실가스 배출 관리도 필요할 것으로 사료
- 국내의 하수관거 온실가스 배출 잠재량은 하수의 COD 농도, 하수관거에서의 COD 분해율, GWP 설정 조건에 따라 약 3.2백 만 ~ 40.2백 만 tCO₂eq/yr로 추정되고 있음
- 하수관거로부터 다량의 온실가스 배출을 억제하기 위해서 크게 화학적, 물리적 방법을 적용한 기술들이 연구되고 있으며 추가적으로 하수관거 코팅과 같은 다른 분야의 연구를 하수관거 온실가스 배출 저감에 접목시키는 방법도 함께 고려해보는 것이 필요
- 또한 현재까지 연구된 하수관거 유래 온실가스 관련 연구들은 일부를 제외하고 하수관거만 고려하고 있지만, 하수관거에서의 감축은 하수처리하수처리시설의 변화를 유발하고 이에 따른 온실가스 배출에도 영향을 미침
- 또한, 정확한 온실가스 배출량 산정을 위해 실제 배출량에 대한 데이터베이스 구축과 데이터베이스를 기반으로 한 Tier 2 이상의 온실가스 배출량 산정 방법의 국내화를 위한 꾸준한 연구 수행이 필요
- 앞으로 IPCC 국가 온실가스 배출량 산정에서 하수관거 내 온실가스 배출을 인정할 경우, 국가에서는 이를 관리할 의무가 생기며 이러한 의무는 지자체에서 책임을 갖고 수행할 가능성이 있음

- 하수관거에서의 온실가스 배출량은 아직 연구할 부분이 많고 또한 IPCC에서 정한 산정 방법을 따를 필요가 있기 때문에 아직 준비할 부분은 많지 않지만 감축 부분에 있어서는 앞으로 고민할 여지가 있음
- 현재 연구되는 하수관거에서의 온실가스 감축 방안인 물리적, 화학적 방법들은 현실적으로 하수관거 운영에 반영하기에는 무리가 있음
- 지금까지의 연구로 생각할 수 있는 지자체에서의 적용 방안은 관거 자체가 바이오필름이 생성되기 어렵게 하여 하수관거 내에서 미생물의 활성을 억제하는 것으로 이러한 방법들은 지자체에서 고려할 수 있다고 생각됨
- 하수관거 전체를 한번에 교체하기에는 어렵지만, 앞으로 노후된 하수관거를 정기적으로 교체할 때에 이를 한번 고려할 수가 있음
- 다만 앞서 언급하였듯이, 하수관거 내 온실가스 배출 저감은 하수처리장 내 유기물 농도를 변화시키고 이는 하수처리장 온실가스 배출량 증가와 연계되기 때문에 이러한 상관관계를 고려하여 검토하는 것이 반드시 필요

참고문헌

대전시시설관리공단, 대전하수처리장 수처리시설, 2014
문충만, 대전광역시 2021 온실가스 배출권거래제 이행 용역, 2022
문충만, 배출권거래제 하수처리 공정운영에 따른 온실가스 배출 영향 조사, 2019
한국환경공단, 폐기물부문 온실가스 배출량 산정 매뉴얼, 2016
한국환경공단, 폐기물부문 온실가스에너지 우수 감축기술 편람, 2016
환경부, 2020 하수도통계, 2021

대전시시설관리공단 홈페이지, <https://www.djsiseol.or.kr>

통계분류포털, https://kssc.kostat.go.kr:8443/ksscNew_web/index.jsp

- A. Guisasola, K. R. Sharma, J. Keller, Z. Yuan, Development of a model for assessing methane formation in rising main sewers. *Water Research*, 43(1), 2874-2884(2009).
- A. Guisasola, D. de Haas, J. Keller, Z. Yuan, Methane formation in sewer systems. *Water Research*, 42(6-7), 1421-1430(2008).
- A. M. A. Alsamuraee, H. A. Ameen, The effect of zinc, tin, and Lead coating on corrosion protective effectiveness of steel reinforcement in concrete. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2(1), 89-98(2011).
- C. Di Iaconi, G. Del Moro, A. Lopez, M. De Sanctis, R. Ramadori, Municipal wastewater treatment by a periodic biofilter with granular biomass. *Water Science and Technology*, 58(12), 2395-2401(2008).
- C. Grengg, F. Mittermayr, N. Ukrainczyk, G. Koraimann, S. Kienesberger, M. Dietzel, Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: A review. *Water research*, 134, 341-352(2018).
- D. Adak, M. Sarkar, M. Maiti, A. Tamang, S. Mandal, B. Chattopadhyay, Anti-microbial efficiency of nano silver-silica modified geopolymer mortar for eco-friendly green construction technology. *RSC advances*, 5(79), 64037-64045(2015).
- D. Meng, W. Jin, K. Chen, C. Zhang, Y. Zhu, H. Li, Cohesive strength changes of sewer sediments during and after ultrasonic treatment: The significance of bound extracellular polymeric substance and microbial community. *Science of the Total Environment*, 723, 138029(2020).

- D. H. Nies, Microbial heavy-metal resistance. *Applied microbiology and biotechnology*, 51(6), 730-750(1999).
- F. Liu, J. Li, Study on the influencing factors of PAM dosage for sludge dewatering in municipal sewage treatment. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(3), 032010(2018).
- G. Jiang, K. R. Sharma, Z. Yuan, Effects of nitrate dosing on methanogenic activity in a sulfide-producing sewer biofilm reactor. *Water research*, 47(5), 1783-1792(2013).
- G. Jiang, O. Gutierrez, K. R. Sharma, Z. Yuan, Effects of nitrite concentration and exposure time on sulfide and methane production in sewer systems. *Water Research*, 44(14), 4241-4251(2010).
- H. Ai, J. Xu, W. Huang, Q. He, B. Ni, Y. Wang, Mechanism and kinetics of biofilm growth process influenced by shear stress in sewers. *Water Science and Technology*, 73(7), 1572-1582(2016).
- J. Cao, L. Zhang, J. Hong, J. Sun, F. Jiang, Different ferric dosing strategies could result in different control mechanisms of sulfide and methane production in sediments of gravity sewers. *Water Research*, 164, 114914(2019).
- J. Mohanakrishnan, O. Gutierrez, K. R. Sharma, A. Guisasola, U. Werner, R. L. Meyer, J. Keller, Z. Yuan, Impact of nitrate addition on biofilm properties and activities in rising main sewers. *Water research*, 43(17), 4225-4237(2009).
- K. S. Singh, T. Viraraghavan, Start-up and operation of UASB reactors at 20°C for municipal wastewater treatment. *Journal of fermentation and Bioengineering*, 85(6), 609-614(1998).
- L. Zhang, J. Keller, Z. Yuan, Inhibition of sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms by ferric iron dosing. *Water research*, 43(17), 4123-4132(2009).
- L. Zhang, J. Keller, Z. Yuan, Inhibition of sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms by ferric iron dosing. *Water research*, 43(17), 4123-4132(2009).
- O. Gutierrez, G. Sudarjanto, G. Ren, R. Ganigué, G. Jiang, Z. Yuan, Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems. *Water research*, 48, 569-578(2014).
- O. Gutierrez, D. Park, K. R. Sharma, Z. Yuan, Effects of long-term pH eleva

- tion on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms. *Water research*, 43(9), 2549-2557(2009).
- O. Gutierrez, G. Sudarjanto, G. Ren, R. Ganigué, G. Jiang, Z. Yuan, Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems. *Water research*, 48, 569-578(2014).
- P. Kaali, M. M. Pérez-Madrigal, E. Stromberg, R. E. Aune, G. Czel, S. Karlsson, The influence of Ag⁺, Zn²⁺ and Cu²⁺ exchanged zeolite on antimicrobial and long term in vitro stability of medical grade polyether polyurethane, (2011).
- R. Amiri, M. Ahmadi, H. Piri, The effects of temperature, mixed liquor suspended solids and velocity on the removal of organic pollutants and kinetic modelling in wastewater sewer systems. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(4), 1014-1028(2022).
- V. P. Utgikar, B. Y. Chen, N. Chaudhary, H. H. Tabak, J. R. Haines, R. Govind, Acute toxicity of heavy metals to acetate-utilizing mixed cultures of sulfate-reducing bacteria: EC100 and EC50. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 20(12), 2662-2669(2001).
- V. P. Utgikar, S. M. Harmon, N. Chaudhary, H. H. Tabak, R. Govind, J. R. Haines, Inhibition of sulfate-reducing bacteria by metal sulfide formation in bioremediation of acid mine drainage. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 17(1), 40-48(2002).
- X. Shi, L. Sang, X. C. Wang, P. Jin, Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems. *Chemical Engineering Journal*, 351, 240-247(2018).
- Y. K. Geng, Y. Zhou, Reduction of refractory Maillard reaction products by Fe³⁺ during thermal hydrolysis pretreatment and enhanced sludge biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 430, 128400(2022).
- Y. Liu, B. J. Ni, K. R. Sharma, Z. Yuan, Methane emission from sewers. *Science of the Total Environment*, 524, 40-51(2015).
- Y. Liu, K. R. Sharma, B. J. Ni, L. Fan, S. Murthy, G. Q. Tyson, Z. Yuan, Effects of nitrate dosing on sulfidogenic and methanogenic activities in sewer sediment. *Water Research*, 74, 155-165(2015).



대전세종연구원
DAEJEON SEJONG RESEARCH INSTITUTE

34051 대전광역시 유성구 전민로 37(문지동)
TEL. 042-530-3500 FAX. 042-530-3508
www.dsi.re.kr

ISBN 979-11-6075-330-1 93350