국내 농업용 저수지의 연중 저수율 변화에 따른 실제 수표면적으로 산출한 CH₄ 배출량 비교

지달님* · 남귀숙* · 이동근**⁺

*한국농어촌공사 수자원관리부 **서울대학교 조경·시스템공학부

Comparison of CH₄ Emissions Based on Actual Water Surface Area Reflecting Seasonal Water Level Fluctuations in Agricultural Reservoirs in Korea

Dal Lim Ji^{*} · Gui Sook Nam^{*} · Dong Kun Lee^{**}

^{*}Korea Rural Community Corporation, Republic of Korea **Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Republic of Korea

(Received : 20 March 2025, Revised : 24 April 2025, Accepted : 13 May 2025)

요 약

저수지의 온실가스(GHG) 배출량을 정확하게 산정하는 것은 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR) 작성에 있어 필수적인 요소이다. 그러나 현재 NIR에서 사용되는 산정법은 농업용수 수요에 따른 계절적 수위 변동을 반영하지 못하고, 만수위 기준의 지적 통계상 면적 자료에 의존하고 있어 실제 배출량과 차이가 있다. 본 연구에서는 저수지의 실제 수표면적을 기반으로 월별 메탄(CH4) 배출량을 분석하였다. 이를 위해 국내 저수지를 형태지수를 이용해 분류하고, 저수율 변화에 따른 수표면적의 변동 양상을 추정하였다. 분석 결과, 얕은 저수지는 깊은 저수지에 비해 저수율 변화에 따른 수표면적의 변동성이 크게 나타났으며, 이를 국내 농업용 저수지에 적용한 결과, 실제 메탄 배출량은 기존 NIR 보고치보다 약 2,999.12tCO₂-eq(7.37%) 낮은 것으로 추정되었다. 이는 NIR 산정의 정확성을 높이기 위해 저수율 변화에 따른 수표면적 반영이 필수적임을 시사한다. 핵심용어 : 농업용 저수지, 연중 저수율 변화, 실제 수표면적, CH4 배출량, 저수지 온실가스 배출량 산정

Abstract

Accurately estimating greenhouse gas (GHG) emissions from reservoirs is essential for the compilation of the National Greenhouse Gas Inventory Report (NIR). However, the current estimation methodology used in the NIR relies on cadastral statistics based on full water level conditions, which do not account for seasonal fluctuations in water levels caused by agricultural water demand. As a result, discrepancies may arise between eported and actual emissions. This study analyzes monthly methane(CH₄) emissions from reservoirs based on their actual water surface area. To estimate surface area variations corresponding to storage rates, domestic reservoirs were classified using shape indices. The results indicate that shallow reservoirs exhibit greater variability in surface area with changes in water storage compared to deep reservoirs. When this approach was applied to agricultural reservoirs in Korea, the actual methane emissions were estimated to be approximately 2,999.12tCO₂-eq(7.37%) lower than those reported in the NIR. These findings suggest that incorporating water surface area changes due to reservoir storage variations is critical for improving the accuracy of GHG estimations in national inventories.

Key words : Agricultural reservoirs, Seasonal water storage rate, Water surface area, Methane emissions (CH₄), Reservoir-based greenhouse gas estimation

*To whom correspondence should be addressed

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea E-mail : dklee7@snu.ac.kr

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

[•] Dal Lim Ji Korea Rural Community Corporation, Gangwon Regional Headquarter, Department of Water Resources Management /Deputy Director(landscapeluv@ekr.or.kr)

[•] Gui Sook Nam Korea Rural Community Corporation, Chungbuk Regional Headquarter, Department of Water Resources Management/Deputy Director(leo612@ekr.or.kr)

[•] Dong Kun Lee Seoul National University, Seoul, Republic of Korea/Professor(dklee7@snu.ac.kr)

1. 서 론

습지는 전 지구 표면의 5%~8%를 차지하며 물질순환, 생 물 다양성 등의 차원에서 지구 생태계에 매우 중요한 역할 을 하는 육상 생태계의 주요 탄소 흡수원이자 배출원으로 알려져 있으며(Poulter et al., 2021), 기후변화로 기온이 높 아지고 토양의 수분 조건이 변함에 따라 습지 토양에서의 탄소 배출이 가속될 것으로 예측되어 습지의 온실가스 배출 량을 정량화하는 것의 중요성이 강조되고 있다(Carnell et al., 2018; Poulter et al., 2021). 하지만 습지의 온실가스 배 출량은 저수지의 연령, 침수 이전의 토지이용도, 기후, 관리 방법(IPCC, 2006) 등 다양한 요인의 영향을 받으므로 추정 불확실성이 크다. 습지 생태계의 복잡성과 더불어 다양한 국내 습지 유형에서 수행된 온실가스 배출 관련 연구의 부 족으로 인해 국가 온실가스 인벤토리의 습지 부문의 산정 수준이 타부문에 비하여 낮다(Lee et al, 2023).

저수지는 탈기(Degassing), 확산(Diffusive), 기포(Ebullition) 등의 다양한 온실가스 배출경로를 가지고 있고, 이는 저수 지가 위치한 기후대, 풍속, 수질, 저수지가 침수지로 된 이후 경과 연도 등 다양한 환경요인에 영향을 받는다(Bridget R. Deemer et al., 2016; David Bastviken et al., 2004; Lee et al., 2023; Min et al., 2022). 이러한 배출경로와 환경요인 을 반영한 배출량 산정에 관한 연구로는 전지구적 단위에서 의 배출량을 파악한 연구(Bridget R. Deemer et al., 2016; David Bastiken et al., 2004)와 특정 기후대의 저수지 온실 가스 배출량을 구체적으로 산정한 연구(Min et al., 2022; Jake J. Beaulieu, 2020; Matthew S. Johnson, 2021; Huai Chen et al., 2013) 등이 있다. IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 이러한 연구 결과를 바탕 으로 기후대별 메탄 확산계수 등을 적용하여 저수지에서의 메탄 배출량을 산출(IPCC, 2006)하도록 하고 있다. 대부분 의 선행 연구들이 저수지에서의 온실가스 배출 경로, 영향 요인 및 전지구적 단위 또는 기후대 구분에 따른 온실가스 배출량 산정에 치우쳐 이루어졌다. 한편 저수지는 여러 인 위적·자연적 요인에 의해 수위변동이 크며 이러한 특성으로 인한 수질 및 수위의 변화 등으로 온실가스 배출량 및 배출 경로에 영향을 받을 수 있다(Bridget R. Deemer et al., 2016; John A. Harrisonet al., 2017). 인공위성 영상 이미 지를 분석을 통해 저수지의 온실가스 배출량 산정에 영향을 주는 수표면적의 변화를 다룬 연구로 지구적 단위의 저수지 의 30년 간의 저수지 표면적 감소 및 저수지의 수위 변동의 공간적, 시간적 변화 패턴과 그에 따른 배출량을 산정한 연 구가 있다(Pilipp. S. Keller et al., 2021).

국내 습지의 온실가스 배출량 산정에 대한 연구는 아직 초 기의 단계로 주요 Annex 1 국가 중에서 Tier 2 이상의 방법 론에 따라 습지의 하위 분류체계를 참고하여 발전시킬 필요 가 있다. 먼저 주요 Annex 1 국가의 분류체계에 따라 침수 지(water body)와 침수되지 않은 토지(non-water body)로 구분하고, 침수되지 않은 토지를 다시 식생의 유무에 따라 구분이 필요하다(Lee et al., 2023). 하지만 국내 습지의 온 실가스 배출량 산정 시 습지를 내륙과 해안으로만 구분하고 Tier 1 수준의 방법론으로 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (NIR; National Inventory Report)를 작성하고 있다. 본 연 구에서는 다루고 있는 저수지는 침수지에 해당되며 침수지 의 경우, 식생이 존재하는 습지와는 달리 온실가스 배출원 으로 침수지의 주요 배출경로인 수표면적을 정확히 측정해 야한다. 수표면적은 저수지에서의 온실가스 배출량 산정에 있어서 가장 큰 불확도를 가지는 요소(IPCC, 2006)로 이에 대한 신뢰할 만한 활동자료의 수준을 높이는 것이 필요하 다. 특히, 국내 농업용 저수지의 경우 농업용수 공급시기와 맞물려 그 변동성이 크지만(RRI, 2020), 현재 국가 온실가 스 인벤토리 산정 시 「지적통계(국토교통부, 1990-2021)」 에서 유지의 지목으로 수집된 면적을 기초자료로 사용하고 있기 때문에 실제 수표면적과 차이가 있다.

본 연구에서는 저수지의 온실가스 배출량 산정 시 국가 통 계자료를 활용하는 대신 실제 농업용 저수지의 저수율 변화 에 따른 수표면적의 변화값을 반영한 온실가스 배출량을 구 하여 이를 비교하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 국내 농업용 저수지 3,412개소를 대상으로 지역별 저수율을 구하여 그에 따른 수표면적을 산정하여 저 수지에서의 온실가스 배출량을 구하고자 한다. 이를 위해 먼저 습지 부문 산정 가이드라인을 제공하는 2006 IPCC 가 이드라인, 2006 IPCC 가이드라인 국가 온실가스 인벤토리 습지 부문에 대한 보충서에 제시된 배출량 산정식 및 산정 에 필요한 배출계수를 파악하였다. IPCC 가이드라인은 습 지 세부 유형을 침수지, 이탄지, 연안습지, 내륙습지, 폐수처 리 목적으로 형성된 습지 등으로 구분하여 산정 방법론을 제공하나 본 연구에서는 분석 범위를 침수지로 유지된 침수 지에 해당되는 저수지에 한정하고 타토지에서 전용된지 10 년 이내의 저수지에서만 산정하는 CO₂ 배출량은 본 연구 대상지에서 89개소(2.61%)로 제외하였다. 다음으로 국내 농업용 저수지의 형태, 저수량, 유역면적, 만수면적, 수혜면 적 등 제원 분석을 통해 국내 저수지의 제원 특성을 파악하 고 농업용수 공급이 활발한 급수기를 포함한 연중 지역별 저수지의 저수율 변동을 파악하였다. 다음으로 저수율에 따 른 수표면적을 산정하기 위해 한국농어촌공사 농업기반시 설관리시스템(RIMS; Rural Infrastructure Management System)에서 제공하는 내용적 조견표를 활용하여 관계식을 도출하였다. 이를 통해 저수율에 따른 수표면적을 구할 수 있다. 하지만 이러한 관계식을 도출하기 위해서는 개별 저 수지의 내용적 조견표에 대한 정보가 필요하기 때문에 수표 면적, 저수량, 유역면적, 수심 등 일반적으로 제공되는 저수 지 제원에 관한 정보를 활용하여 구하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 저수지의 형태지수의 개념을 적용하여 저수지 를 유형분류하고 그에 따른 저수율 대비 수표면적의 증감의

크기와 경향성을 파악하여 저수지 유형별 저수율에 따른 온 실가스 배출량의 추이를 살펴보았다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 습지부문 IPCC 가이드라인 분석

토지이용, 토지이용의 변화 및 임업(LULUCF)부문에서의 습지에 해당되는 농업용 저수지는 2006 IPCC GL의 Vol.4 Appendix 3의 계산법(Tier 1)을 따른다(NIR, 2023). 습지 (인공침수지)로 유지된 습지에 해당되는 저수지의 CH4 배 출량은 연중 비결빙일수(P)에 일일 평균 확산 CH4 배출량 및 저수지 수표면적을 곱하여 산정한다(Eq.1).

(Eq.1)

 CH_4 emissionwwflood = P x E x A x 10^{-6} CH_4 emissionwwflood : total CH₄ emissions from flooded land, Gg $CH4/yr^{-1}$

P: ice-free period, days yr⁻¹ $E(CH_4)diff$: average daily diffusive emissions, Kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹

A flood, total surface area : total flooded surface area, ha

이때 저수지의 면적은 「지적통계(국토교통부, 1990-2021)」 에서 유지(댐·저수지·호수·소류지(沼溜地)·호수·연못)의 지 목으로 수집된 면적을 기초자료로 한다.



Fig. 1. Distribution of Agricultural Reservoirs in Korea, RAWRIS

Table 1. Statistics by Reservoir Specification (n=3,412)

따라서 NIR에 산정되는 저수지의 면적은 저수지의 지목 이 변경되지 않는 이상 일정하며 연중 저수율 변화에 의한 수표면적은 반영되지 않는다. CH4 배출량에 직접적인 영향 을 주는 수표면적을 고려하기 위해 저수지의 일단위 저수율 데이터를 바탕으로 월단위 평균 저수율 데이터를 구축하고 (RAWRIS, 2023) 이를 근거로 저수지의 수표면적을 추정하 였다. CH4 배출을 0으로 가정한 결빙기(IPCC, 2006)에 해 당되는 1월과 12월은 저수율이 높고, CH4 배출이 되는 비 결빙기에 해당되는 나머지 시기에는 저수율 변동이 크다. 따라서 저수율을 활용한 저수지의 수표면적을 산출하여 활 동자료에 반영할 필요가 있다.

3.2. 국내 저수지 기술통계 결과

본 연구에서 다루고 있는 국내 농업용 저수지의 지역별 분 포는 다음과 같다(Fig. 1).

지역별로 보면 전남, 경북, 경남, 전북 지역 순으로 그 수 가 많으나 전체적으로 경기, 강원 등 중부지역의 밀도가 낮 고 전남, 전북 및 경남, 경북 등의 남부지역에 밀도가 높다. 국내 농업용 저수지의 기본적인 제원 및 특징은 다음과 같 다(Table 1). 저수지에서의 CH₄ 배출량과 관계된 수표면적 의 경우, 평균값이 12.75ha이며 중간값이 3.36ha으로 작은 규모의 저수지가 상대적으로 많음을 알 수 있다. 저수지 조 성 경과 연도는 평균62년으로 전반적으로 노후화되었다. 타 토지에서 전용된 습지의 경우 조성 후 10년까지

CO2 배출량을 추가적으로 산정해야 하지만

(2006 IPCC GL, Vol.4 Appendix 2) 본 연구에서 다루는 국내 농업용 저수지 중 10년 내 조성된 저수지가 89개소로 전체의 2.61%로 CO₂ 배출량에 대해서는 다루지 않았다.

3.3. 국내 저수지의 형태지수

저수지의 저수율에 따른 수표면적의 증감의 변화량은 저 수지 단면의 형상과 관계가 깊다. 따라서 단면 형상에 따른 구분을 통해 전국 단위의 저수지 저수율 변화에 따른 CH₄ 배출량을 산정하고자 하였다. 국내 저수지의 유형을 구분하 기 위해서 형태지수의 개념을 사용하였는데, 형태지수를 구 하기 위해서는 저수지의 평균수심과 만수면적이 필요하며 형태지수를 구하는 식은 다음과 같다(Eq.2).

(Eq.2)

Morphology Index = $1,000 \times \text{mean depth}(\text{m}) \times \text{surface area}(\text{m}^2)^{-0.5}$

,,,,,,,										
Reservoir specifications	Unit	Mean	Median	(S.D.)	Max	Min				
surface area	ha	12.76	3.36	(59.99)	2,651	0.1				
water storage	1,000 m ³	502.64	48.40	(4,158.35)	258,562	0.1				
basin area	ha	438.59	112.00	(1789.81)	76,200	1				
beneficial area	ha	68.99	9.90	(482.22)	30,266	0.1				
year after reservoir construction	year	62.92	68.00	(21.81)	115	1				

본 연구에서 다루고 있는 국내 농업용 저수지의 형태지수 를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 2). 저수지는 형태지수에 따 라 얕은(0.5이하), 보통(0.6이상~10.4이하), 깊은(10.5이상) 저수지로 구분이 된다(Pourriot R and Meybeck M(eds), 1995; Leonard and Crouzet, 1999; You and Park, 2007).

깊은 저수지가 2,533개소, 보통 저수지가 865개소, 얕은 저수지가 3개소 분포한다.

국내 농업용 저수지는 대부분의 깊은 저수지(74.23%)와 보통 저수지(25.09%)에 해당된다. 깊은 저수지의 경우 저수 량 대비 수표면적이 작은 편이며, 보통 저수지의 경우

저수량 대비 수표면적이 넓은 편이다. 형태지수에 관한 기 술통계를 살펴보면 3,412개소의 저수지의 평균 형태지수는 21.49로 국내 저수지는 대부분 깊은 저수지에 해당된다. 국 내 18,060개의 저수지를 동일한 저수지 형태지수 산정식으 로 분석한 연구에서도 저수지의 형태지수의 평균값이 24.6 으로(Yoo and Park, 2007) 국내 농업용 저수지의 깊은 저 수지 비율이 높음을 알 수 있다. 면적의 비율로 비교해 본다 면 보통 저수지의 수표면적이 26,834.97ha(61.38%)로 보통 저수지의 개수인 865개소(25.09%) 대비 높다. 이는 깊은 저 수지의 대부분이 수표면적이 작은 저수지에 해당되고(Fig. 2), 수표면적이 커짐에 따라 대부분의 저수지가 보통 저수지로 분 류되어(Yoo and Park, 2007) 생기는 결과로 해석된다. 지역에 따라 깊은 저수지와 보통 저수지의 비율에 차이가 있었다. 경기, 충남, 제주지역에서는 보통 저수지와 깊은 저 수지의 분포 비율이 비슷했으며 그 외 강원, 충북, 전남, 전 북, 경남, 경북지역에서는 깊은 저수지의 비율이 우세했다. 특히 경북의 경우 총 633개의 저수지 중에서 18개 저수지만 보통 저수지이고 그 외 깊은 저수지에 해당되어 깊은 저수 지의 비율이 상당히 높았다. 그러나 수표면적에 있어서는 충북, 경남, 경북을 제외한 지역에서 보통 저수지의 면적 비 율이 높았으며 강원의 경우 보통 저수지와 깊은 저수지의 비율이 비슷했다(Fig. 3).



Fig. 3. Number and area of reservoir(ha) type distribution by region

Table 2. Descriptive statistics of reservoir morphology index

Variables	Definition	Mean	(S.D.)	Min	Max
Morphology Index(n=3,412)		21.49	(15.71)	0.17	167.71
Shallow reservoir(n=3)	0.5 or less	0.30	(0.15)	0.17	0.46
Normal reservoir(n=865)	0.6 or more \sim 10.4 or less	6.38	(2.50)	0.64	10.39
Deep reservoir(n=2,533)	10.5 or more	26.73	(14.96)	10.50	167.71



Fig. 2. Distribution chart of the relationship between reservoir surface area and morphology index

3.4. 지역별 저수지의 저수율 변화

지역별 저수지의 일단위 저수율 데이터를 바탕으로 월단 위 평균 저수율 데이터를 구축하였다(RAWRIS, 2023). 그 결과 전남과 제주를 제외한 대부분의 지역이 1월~3월 및 11월~12월에 비해 4월~10월의 기간 동안 저수율이 낮으 며, 저수율 변동이 컸다(Fig. 4). 이러한 저수율 변화는 농업 용수의 공급을 주요 요인으로 보았다. 일반적으로 저수지는 자연 호수보다 수위 변동이 빈번하지만(Philipp S. Keller et al., 2021; Bridget R. Deemer et al., 2016) 특히 농업용 저 수지는 용수 공급이 활발한 급수기에 수위변동이 크다 (Philipp S. Keller et al., 2021). 이는 중부지방의 벼 생육기 별 농업용 저수지 저수율 운영현황 연구에서도 저수율은 강 우량 등과 같은 기상조건 보다 급수기의 농업용수 공급으로 인해 더 많은 영향을 받았다(RRI, 2020). 지역별 저수율의 변화는 저수지의 수표면적에도 영향을 미치기 때문에 저수 지 내용적 조견표를 토대로 도출한 저수율-수표면적 간의 관계식으로 저수지의 수표면적을 구하고자 하였다.

3.5. 저수지 유형에 따른 저수율과 수표면적 관계식 도출

저수지의 저수율은 수표면적에 영향을 주며 저수율에 따 른 수표면적의 변화량은 저수지의 형상에 영향을 받는다. 따라서 저수지 형태지수의 개념을 사용하여 저수지의 유형 을 구분하고 각 유형의 평균값에 해당되는 저수지의 저수율 에 따른 수표면적을 산정하였다. 먼저 저수지의 유형에 따 른 저수율-내용적 조견표를 기반으로 저수지 유형별 결정 계수(R square)값이 1에 가까운 다항식을 도출하여 저수율 에 따른 수표면적을 추정하였다(Fig. 5.).

본 연구에서 다루는 저수지는 한국농어촌공사 관리 대상 저수지로 최저 허용 저수율 40%까지 관리되기 때문에 40% ~100%의 범위에서의 저수율 변화에 따른 수표면적의 변화 량을 구했다. 그 결과, 얕은 저수지의 경우 저수율이 10% 줄어든 경우, 수표면적이 6.49%, 보통 저수지는 4.43%, 깊 은 저수지는 1.28%의 비율로 줄었다. 이는 얕은 저수지의 경우 저수율에 따른 수표면적의 변화량이 크다는 것을 의미 하며 깊은 저수지의 경우 저수율에 따른 수표면적의 변화량 이 얕은 저수지에 비해 작음을 의미한다.



Fig. 5. The relationship between reservoir storage rate and surface area according to Reservoir Type



Fig. 4. Changes in annual storage rates by region(2023)

3.6. 저수지 유형에 따른 월별 메탄 배출량

수표면적은 CH₄ 배출량과 양(+)의 상관관계(Eq.1)를 갖 기 때문에 저수지의 CH₄ 배출량의 산정에 있어서 수표면적 의 정확한 추정은 필수적으로 요구된다. 2023년도 NIR의 습지에서의 CH₄ 배출량 산정 시 사용한 비결빙기(295일)를 적용하여 저수지의 유형별 대표 저수지의 월별 저수율에 따 른 수표면적의 변화 대비 CH₄ 배출량을 산출하였다(Fig. 6.). 그 결과 보통 저수지와 얕은 저수지의 경우 저수율-수 표면적의 관계식에서 나타난 것처럼 저수율 변화에 따른 수 표면적의 변화량이 깊은 저수지보다 크게 나타났다.

영농기로써 본격적인 농업용수 공급이 시작되는 4월부터 10월까지의 저수율에 따른 수표면적을 적용한 결과 국가 통 계자료를 사용하여 연중 저수지의 수표면적을 고정된 값(만 수위 적용)으로 계산한 것과 비교했을 때 CH₄ 배출량이 작 아졌다. 깊은 저수지의 경우 영농기간 동안 평균 저수율이 90.48%, 보통 저수지의 경우 74.44%, 얕은 저수지의 경우 80.23%였다. 이를 저수율-수표면적 관계식에 적용하여





Fig. 6. Monthly CH₄ Emissions from Different Types of Reservoirs Based on Storage Rate Variations

저수지 유형별 4월~10월 기간의 수면적 계수를 적용한다면 깊은 저수지는 NIR 대비 수표면적을 -1.21% 적용하고 보 통, 얕은 저수지는 각각 -11.32%, -12.83% 적용하여 계산 할 수 있다. 그 외 비영농기로써 수표면적의 변화량이 크지 는 않으나 비결빙일에 해당되어 CH4 배출량 산정에 포함되 는 2월, 3월, 11월의 경우 깊은 저수지는 평균 저수율이 95.58%, 보통 저수지의 경우 85.02%, 얕은 저수지의 경우 89.44%였다. NIR 대비 수표면적을 -0.57% 적용하고 보 통, 얕은 저수지는 각각 -6.64%, -6.85% 적용하여 계산할 수 있다.

3.7. 국내 저수지 메탄 배출량 산정 비교

국내 저수지 중에서 얕은 저수지로 분류되는 저수지 3개 소의 저수율 변화에 따른 CH4 배출량을 살펴본 결과 얕은 저수지가 2개소 위치한 전남(16.99%), 1개소 위치한 경남 (6.27%)의 순으로 NIR에서 사용하고 있는 저수지 수표면 적 자료 대비 CH4 배출량 차이가 있었다. 전체적으로는 16.75%(7.01tCO2-eq) 과대 산정되었음을 확인할 수 있었 다. 보통 저수지로 분류되는 저수지 865개소의 저수율 변화 에 따른 CH4 배출량은 보통 저수지의 면적 비율이 높았던 전남(15.83%), 경기(12.50%), 전북(10.87%)의 순으로 NIR 에서 사용하고 있는 저수지 수표면적 자료 대비 CH4 배출량 차이가 있었다. 전체적으로는 10.23% (2,551.54tCO₂-eq) 과대 산정되었음을 확인할 수 있었다. 깊은 저수지로 분류 되는 저수지 2,533개소의 저수율 변화에 따른 CH4 배출량은 깊은 전남(5.39%), 경기(4.74%), 전북(2.94%)의 순으로 배 출량 차이가 컸다. 전체적으로는 2.81% (440.58tCO2-eq) 과대 산정되었음을 확인할 수 있다(Fig. 7.).

국내 농업용 저수지의 저수율 변화에 따른 수표면적을 반영 한 CH4 배출량을 비교한 결과 전남(12.12%, 1,131.77tCO2-eq), 전북(8.71%, 704.99tCO2-eq), 경기(10.74%, 316.36tCO2-eq), 충북(4.83%, 315.09tCO2-eq)의 순으로 발생량 차이가 크 며 이러한 결과에는 깊은 저수지보다 저수율 변화에 따른 수표면적의 변화량이 큰 보통 저수지의 면적 비율의 영향이 가장 크고 지역에 따른 저수율의 차이에 의한 결과로 해석 된다. 농업용 저수지 수표 면적의 61.32%를 차지하는 보통 저수지의 경우 깊은 저수지보다 저수율에 따른 수표면적의 증감이 크기 때문에 지역에 따른 보통 저수지의 분포가 저 수지에서의 CH4 배출량의 차이에 영향을 주었다. 또한 보 통지의 개수 및 면적 분포가 높은 전남, 전북 지역에서 중요 한 시사점을 갖는데 기후변화가 진행됨에 따라 가장 먼저 아열대구에 포함될 가능성이 높은 지역인 전남, 전북(Korea Meteorological Administration, 2018)의 배출계수가 상향 조정될 경우 면적의 정확한 산정이 현재보다 온실가스 감축 에 더 크게 기여할 수 있기 때문이다.

국가 통계자료를 면적 자료로 활용했을 때 농업용 저수지 3,214개소에서 연간 배출되는 CH4 배출량(40,679.94tCO₂-eq) 과 본 연구에서 실제 수표면적을 반영한 CH4 배출량 (37,680.82tCO₂-eq)은 2,999.12tCO₂-eq (7.37%)가 차이

Fig. 7. Comparison of CH₄ emissions from agricultural reservoirs of domestic

난다. 이는 저수지의 면적을 3,225.31ha 과대 산정한 것과 같은 결과이다. 면적상으로는 전체 습지의 면적(320천ha) 중 저수지가 포함되는 유지의 면적이 143천ha이고(NIR, 2023), 본 연구에서 다룬 농업용 저수지의 면적이 43,726ha (30.57%)로 국내 전체 농업용 저수지의 수가 약 1만 7천 개 소임을 고려할 때 저수율에 따른 저수지의 수표면적을 활동 자료에 반영하는 것은 습지부문에 있어서 보다 신뢰도 높은 국가 온실가스 인벤토리 구축을 위해 반드시 필요하다.

4. 결 론

국내 온실가스 인벤토리는 온실가스 배출량 파악뿐만 아니라 온실가스 감축 목표설정 및 정책 수립을 위한 근거자 료로 활용될 수 있으므로 정확하고 신뢰성 있게 추정해야 한다(GTC, 2022). 기존의 LULUCF부문에 대한 활동자료 가 단순 가감법에 의존해 면적 변화를 파악하는데 그쳤다면 (Park et al., 2018) 본 연구에서는 국내 저수지의 연중 저수 율 변화 추이를 바탕으로 국가 온실가스 인벤토리 구축에 필요한 활동자료의 정확도를 높일 수 있는 방법을 제시하였 다는 점에서 의미가 있다. 특히 저수지의 구체적인 내용적 조견표가 부재할 경우에도 저수량과 수표면적으로 저수지 의 형태지수를 통해 전국 단위의 농업용 저수지의 저수율 변화에 따라 수표면적의 변화량을 계산하여 CH₄ 배출량을 산정할 수 있는 방안을 제시하였다. 이는 현재 저수지에서 의 온실가스 배출량 산정에 관해 범용성을 갖추면서도 정확 도 및 신뢰도가 높은 경험적 모델인 G-res Tool(Lee et al., 2023; Min et al., 2023; Prairie et al., 2017)에서도 고려하 지 않은 요소로 향후 이를 보완하여 적용한다면 저수지에서 의 온실가스 배출량 추정에 있어서 정확도 및 신뢰성을 높 일 수 있을 것이다.

한편 자연적으로 형성된 습지, 호수의 경우도 형태지수 구 분으로 얕은 저수지에 포함될 가능성이 높다. 이들 역시 농 업용 저수지만큼은 아니지만 강수량, 증발산 등의 기상조건 에 의해 수표면적이 달라질 여지가 크기 때문에(Pillipp. S. Keller et al., 2021) 저수지와 마찬가지로 수표면적 산정방 법에 대한 후속 연구가 필요하다. 또한 저수율이 낮아질 때 공기 중에 드러나는 바닥 퇴적층에서 CO2가 배출되는 점을 (Pillipp. S. Keller et al., 2021)고려한다면 저수지 수표면적 에서의 CH4 배출량뿐만 아니라 수위 변화로 인해 간헐적으 로 노출되는 퇴적층 및 노출지에서의 CO2 배출량 등 통합 적인 배출원 및 배출계수에 대한 연구가 필요하다. 향후 국 내에서 Tier 2 수준의 배출계수가 개발되어 수심이 낮은 저 수지 가장자리에서 발생하는 기포 배출과 그 외 저수지 표 면적에서 배출되는 확산 배출을 구분해서 산정하거나 Tier 3 수준의 모델링 등을 활용한 전국 단위의 온실가스 배출량 을 추정할 때 역시 배출경로 및 배출경로 구분에 따른 해당 면적 산정 등 다각적인 면을 고려해야 할 때 본 연구가 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

저수지의 단면은 저수율 변화에 따른 수표면적에 영향을 주는 요인으로 향후 형태지수와 수표면적의 범위 등을 보다 세분화하여 반영한 후속 연구가 필요하다. 이를 통해 정확 도 높은 저수율 대비 수표면적 관계식을 도출하여 보다 완 결성 높은 저수지에서의 온실가스 배출량을 산정할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Bridget R. Deemer, John A, Harrison, Siyue Li, Jake J. Beaufieu, Tonya Delsontro, Natha Barros, Josef. Bezerra-neto, Stephen M. Powers, Marco A. Dos Santos, and J. Arie Vonk.. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces : A New Global Synthesis. *BioScience*, 66(11): 949–964. https://doi: org/10.1093/biosci/biw117
- Carnell PE, Windecker SM, Brenker M, Baldock J, Masque P, Brunt K, Macreadie PI. (2018). Carbon stocks, sequestration, and emissions of wetlands in South Eastern Australia. *Glob Change Biol* 24(9): 4173–4184. doi: 10.1111/gcb.14319
- Choi SE, Ham BY, Song CI, Park EB, Kim JW, Lee WK. (2020). Pilot Study and Development of Activity Data for Greenhouse Gas Inventory of Settlement Categories in Korea: A Case of Incheon Seo-gu. *Journal of Climate Change Research*, 11(3): 187– 196.



https://doi: 10.1186/s13021-023-00223-3

- David Bastviken et al., (2004). Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 18. https://doi: 10.1029/2004 GB002238
- GTC(Green Technology Center). (2022). Current status and implications of LULUCF inventory system for establishment of greenhouse gas inventory.
- Lee HJ, Nam WH, Yoon DH, Jang MY, Hong EM, Kim TG, Kim DE. (2020). Estimation of Water Storage in Small Agricultural Reservoir Using Sentinel-2 Satellite Imagery. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers*, 62(6): 1–9. https://doi.org/ 10.5389/KSAE.2020.62.6.001
- Lee HS, Jeong HC, Lee SI, Park HR, Lee MJ, Lee JM, Park DG, Jang EB, Oh TK. (2024). 2006 IPCC guideline application: Analysis of greenhouse gas methodology and emissions in the rice cultivation and agricultural soil. *Journal of Climate Change Research*, 15(1): 047–055. https://doi: 10.15531/ KSCCR.2024.15.1.047
- Lee JM, Kim HS, Choi SE, Lee YJ, Chu YS, Lee WK, Son YH. (2023). Strategies for estimating greenhouse gas emission in inland wetlands: Classification system and emission factors. *Journal of Climate Change Research*, 14(6–1): 715–726. https://doi: 10.15531/ KSCCR.2023.14.6.715
- Leonard, J and Crouzet, P. (1999). Lakes and reservoirs in the EEA area, Topoc Report No. 1/1999, European Environment Agency(EEA).
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center. (2023). National greenhouse gas inventory report of Korea (NIR). Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Ministry of Environment.
- Ham BY, Song CH, Park EB, Choi SE, Lee WK. (2020). Development of Forest Activity Data and Forest Management Rate for National Greenhouse Gas Inventory in the Forest Sector. *Journal of Climate Change Research*, 11(1): 187–196. https://doi:10. 15531/ksccr.2020.11.1.53
- Huai Chen, Qiuan Zhu, Changhui Peng, Ning Wu(2013). Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: Synthesis new estimate. *Global Change Biology*, 19(1):19–32. DOI:10.1111/ gcb.12034
- IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

- IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands.
- IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Jake J. Beaulieu, Rebecca L. Smolenski, Christopher T. Nietch, Amy Townsend-Small and Michael S. Elovitz. (2014). High Metnane Emissions from a Midlatitude reservoir Draining and Agricultural Watershed. *Environmental Science and Technology*, 48(19)
- Jeong HC, Choi EJ, Lee JS, Kim GY, Lee SI. (2017). The Analysis of Differences by Improving GHG Emission Estimation Methodology for Agricultural Sector in Recent 5 Years. *Journal of Climate Change Research*, 8(4): 347–355. https://doi: 10.15531/ksccr.2017. 8.4,347
- John A, Harrison, Bridjet. Deemer, M. Keith Birchfield and Maria T. O'Malley. (2017). Reservoir Water– Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methanes Emission. *Environmental Science and Technology*, 51(3): 1267–1277. doi.org/10.1021/acs.est.6b03185
- Korea Runral Community Corporation (2023). Republic of Korea. accessed 17 March 2025. https://rims.ekr.or.kr/main.do
- Kim DU.(2020). Preparation of standards for management of water reserve rates in consideration of drought and flood in agricultural reservoirs. Rural Research Institude, Ansan, Republic of Korea, pp. 78-83.
- Kim SH, Jeon HJ, Choi JY, Seo IH, Jeon JB, Kim TG. (2023). Estimating GHG Emissions from Agriculture at Detailed Spatial-scale in Geographical Unit. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers*, 65(5): 69–80. https://doi.org/10.5389/KSAE.2023. 65.5.069
- Korea Meteorological Administration. (2018). Analysis of the Climate Change Prospects on the Korean Peninsula 2018, Korea Meteorological Administration, Republic of Korea, pp. 65–74.
- Matthew S. Johnson, Elaine Matthews, David Bastviken, Bridget Deemer, Jinyang Du, Vanessa Genovese. (2021). Spatiotemporal Methane Emission From Global Reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.* pp.1–19.
- Min KS, Chung SW, Kim SJ, Kim DK. (2022). Assessing greenhouse gas footprint and emission pathways in Daecheong Reservoir. J. *Korea Water Resour Assoc*, 55(10): 785–799. https://doi.org/10.3741/JKWRA.

2022.55.10.785

- Nicolas Soumis, Eric Duchemin, Rene Canuel and Marc Lucotte, (2004), Greenhouse gas Emissions from reservoirs of the western United States. *Global Biogeochemical Cycles*, (14). https://doi.org/10.1029/2003GB002197
- Park JW, Na HS, Yim JS. (2017). Comparison of Land-use Change Assessment Methods for Greenhouse Gas Inventory in Land Sector. *Journal of Climate Change Research*, 8(4): 329–337. https://doi: 10.15531/ksccr.2017.8.4.329
- Park JS, Jang SJ, Kim HJ, Hong RK, Song IH. (2020). Application of Drone Images to Investigate Biomass Management Practices and Estimation of CH4 Emissions from Paddy Fields. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers*, 62(3): 39–49. https://doi.org/10.5389/KSAE.2020.62.3.039
- Park SJ, Lee CH, Kim MS. (2018). The Analysis of Greenhouse Gases Emission of Cropland Sector Applying the 2006 IPCC Guideline. *Journal of Climate Change Research*, 9(4): 445–452. https://doi:10. 15531/ksccr.2018.9.4.445
- Philipp. S. Keller, Rafael Marce, Biel Obrador and Matthias Koschorreck. (2021). Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas. *Nature Geoscience*, 14(6): 1–7. https://doi: 10.1038/s41561–021–00734–z

- Pourriot R&Meybeck M(eds), (1995), sous la direction de, Limnologie générale. Collection d'écologie 25, Masson, Paris.
- Poulter B, Fluet-Chouinard E, Hugelius G, Koven CD, Fatoyinbo L, Page S, Rosentreter JA, Smart LS, Taillie PJ, Thomas N, Zhang Z, Wijedasa LS. 2021. A review of global wetland carbon stocks and management challenges. In: Krauss KW, Zhu Z, Stagg CL (eds). Wetland carbon and environmental management. New Jersey: Wiley. pp. 3–20.
- Stephan Hilgert, Klajdi Sotiri, Lediane Marcon, Liu Liu, Tobias Bleninger, Michael Mannich, Stephan Fuchs. (2019). Resolving spatial heterogeneities of methane ebullition flux from a Brazilian reservoir by combining hydro-acoustic measurements with methane production potential. IAHR World Congress, 2019(38). https://doi: 10.3850/38WC092019-0866
- Tsioptsias C., Samiotis G., Kaklidis N., Pekridis G. Amanatidou E. (2019). Greenhouse Gas Emissions from Natural and Artificial Lakes in Western Maccedonia, Greece. 16th International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes, Greece.
- Yoo and Park. (2007). Analysis of Morphological Characteristics of Farm Dams in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 42(6): 940–954.