



Assessing greenhouse gas footprint and emission pathways in Daecheong Reservoir

Min, Kyeong Seo^a · Chung, Se Woong^{b*} · Kim, Sung Jin^c · Kim, Dong Kyun^d

^aMaster's Course Student, Department of Environment Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea

^bProfessor, Department of Environment Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea

^cPh. D Candidate, Department of Environment Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea

^dSenior Researcher, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

Paper number: 22-059

Received: 29 August 2022; Revised: 26 September 2022; Accepted: 28 September 2022

Abstract

The aim of this study was to characterize the emission pathways and the footprint of greenhouse gases (GHG) in Daecheong Reservoir using the G-res Tool, and to evaluate the GHG emission intensity (EI) compared to other energy sources. In addition, the change in GHG emissions was assessed in response to the total phosphorus (TP) concentration. The GHG flux in post-impoundment was found to be 262 gCO₂eq/m²/yr, of which CO₂ and CH₄ were 45.7% and 54.2%, respectively. Diffusion of CO₂ contributed the most, followed by diffusion, degassing, and bubbling of CH₄. The net GHG flux increased to 510 gCO₂eq/m²/yr because the forest (as CO₂ sink) was lost after dam construction. The EI of Daecheong Reservoir was 86.8 gCO₂eq/kWh, which is 3.7 times higher than the global EI of hydroelectric power, due to its low power density. However, it was remarkable to highlight the value to be 9.5 times less than that of coal, a fossil fuel. We also found that a decrease in TP concentration in the reservoir leads to a decrease in GHG emissions. The results can be used to improve understanding of the GHG emission characteristics and to reduce uncertainty of the national GHG inventory of dam reservoirs.

Keywords: Reservoir, Greenhouse gas footprint, Carbon emission, G-res tool, Carbon cycle

대청댐 저수지의 온실가스 발자국 및 배출 경로 평가

민경서^a · 정세웅^{b*} · 김성진^c · 김동균^d

^a충북대학교 환경공학과 석사과정, ^b충북대학교 환경공학과 교수, ^c충북대학교 환경공학과 박사수료, ^d한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원

요 지

본 연구의 목적은 대청댐 저수지(금강수계)를 대상으로 G-res Tool을 적용하여 배출 경로별 온실가스(Greenhouse Gas, GHG)의 배출 특성과 댐 건설에 따른 담수 전과 후의 GHG 순 배출량(온실가스 발자국)을 산정하는데 있다. 아울러, 단위전력 생산당 탄소배출량(GHG 배출강도)을 평가하고 저수지 부영양화 상태(총인 농도)에 따른 GHG 배출량 변화의 민감도를 분석하여 수질과 배출량의 관계를 해석하였다. 대청댐 건설 후 연간 GHG 배출 플럭스는 262 gCO₂eq/m²/yr이었으며, CO₂와 CH₄의 비율은 각각 45.7%와 54.2%이었다. 배출 경로별로는 CO₂ 확산이 가장 많았으며 다음으로 CH₄의 확산, 방류 시 탈기, 기포 배출 순으로 산정되었다. 댐 건설 전과 후의 GHG 순 배출량은 담수 전 산림지로 분류된 토지 피복이 담수 후 저수구역으로 변경됨으로써 탄소 흡수효과가 상실되어 510 gCO₂eq/m²/yr로 증가하였다. 대청댐의 GHG 배출강도는 전력밀도(저수면적당 발전용량)가 낮아 전세계 수력발전 중앙값보다 약 3.7배 많은 86.8 gCO₂eq/kWh로 산정되었다. 그러나 이 값은 화석연료인 석탄의 배출강도보다 9.5배 작은 값에 해당한다는 점은 주목할 만하다. 또한 저수지의 총인 농도가 감소함에 따라 GHG 배출량도 감소하는 것을 확인하였다. 연구 결과는 댐 저수지의 온실가스 배출 특성에 대한 이해를 높이고, 국가 온실가스 인벤토리의 불확실성을 개선하는데 활용될 수 있다.

핵심용어: 저수지, 온실가스 발자국, 탄소 배출량, G-res tool, 탄소 순환

*Corresponding Author. Tel: +82-43-261-3370

E-mail: chung@chungbuk.ac.kr (Chung, Se Woong)

1. 서론

댐을 이용한 수력 발전은 풍력, 태양광, 지열, 바이오와 같은 여러 신재생 에너지와 같이 탄소 배출 저감 측면에서 유리하며, 규모가 큰 하천에 건설된 다목적 댐 저수지는 수력에너지 생산뿐만 아니라 상수도 및 관개 용수 공급과 홍수 시 유량 조절 역할도 담당하는 장점이 있다. 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)는 온실가스(Greenhouse Gas, GHG) 감축을 위한 방법으로 태양광, 풍력, 수력 등의 신재생 에너지 및 재생 에너지 개발을 통한 화석 에너지 대체를 강조하고 있다(IEA, 2015). 이 중 댐 저수지를 이용한 수력 발전은 전세계 재생에너지의 61%(2021년 기준)를 차지하며, 연간 발전 보급용량은 1,195 GW로 재생 에너지 분야의 선두주자로서 역할을 하고 있다(REN21, 2021).

하지만 최근 연구에 따르면 댐 저수지는 육상 기원 유기물을 분해하여 GHG인 CO₂와 CH₄ 및 N₂O를 축적·저장하고 대기 중으로 배출하는 중요한 통로로서 작용한다는 보고가 증가하고 있다(Louis *et al.*, 2000; Deemer *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2022). 댐 건설로 인해 하천이 저수지로 변화되면 주변 지역의 토양과 식물이 침수되고 유기물이 미생물에 의해 분해되면 최종분해 산물에 해당하는 GHG를 발생시킨다(Prairie *et al.*, 2018). Räsänen *et al.* (2018)는 열대 지역에 위치한 수력발전 전용 댐과 관개용수 공급과 수력발전을 위한 다목적 댐을 대상으로 통계 모델을 이용하여 단위전력생산당 GHG 배출강도(emission intensity, EI)를 산정하였다. 그 결과, 다목적으로 건설된 댐 저수지의 GHG EI는 2,031 gCO₂eq/kWh로써 수력발전 전용 댐 저수지의 122 gCO₂eq/kWh보다 약 17배 큰 값을 보였으며, 화석 연료 발전소의 EI보다 더 큰 것을 확인하였다. 기존의 지구 규모 탄소 순환 연구에서는 해양과 육상의 산림, 초지, 농경지, 습지와 같은 토지 피복만을 고려하였으며 하천, 호수, 저수지와 같은 육상 담수가 차지하고 있는 비율은 지구 표면적에 비해 미미하여 간과되었다(Chung *et al.*, 2016). 그러나, 전 세계 댐 저수지의 GHG 배출량을 추정한 연구결과에 의하면, 100년 간 배출을 기준으로 0.8(0.5-1.2) Pg CO₂eq/yr로 산정되었으며, 이는 IPCC에서 보고한 CO₂, CH₄, N₂O의 총 인위적 CO₂ 증가 배출량의 약 1.5%에 해당한다(Deemer *et al.*, 2016). 또한 댐 저수지를 통한 연간 CH₄ 배출량(8.9-22.2 Tg CH₄-C/yr)은 IPCC에서 산정한 논에서 배출하는 양(21-30 Tg CH₄-C/yr)에 근접한 값에 해당하였다.

국내에서 산업별 GHG 배출량 산정은 환경부가 주관하여 기후변화에 관한 정부간 협의체 지침(1996 IPCC 지침)을 기반으로 계산하며, 일부 부문은 2006 IPCC 지침을 적용하여 국

가 온실가스 인벤토리를 제시하였다(ME, 2020). 한편, 국가 온실가스 인벤토리 보고서(ME, 2020)에서 댐 저수지의 GHG 배출량은 IPCC 지침의 분류기준에 따라 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF) 분야의 습지로 구분되어 Tier1 방법으로 산정하였다. 그러나, 2006 IPCC 지침의 Tier1에서 적용하는 댐 저수지 온실가스 배출계수는 국내 유역과 댐 저수지 특성에 맞지 않고 탄소 배출 경로가 종합적으로 고려되지 않아 불확도가 매우 크다. 또한 국내에서 댐 저수지의 GHG 배출량 연구는 몇몇 소수 연구자에 의해 진행되고 있으나, 수중 CO₂와 부분압(pCO₂) 측정결과를 활용한 수면-대기간 CO₂ 배출·흡수량 산정 값을 활용하고 있어 댐 건설로 인한 GHG 배출량 변화를 종합적으로 해석하는데는 한계가 있는 실정이다.

댐 저수지로부터 흡수 및 배출되는 GHG 양을 산정하기 위한 방법에는 현장 측정 방법(On-field measurement), 수치 모델링 방법 그리고 통계적 모델링 방법이 있다. 첫 번째, 현장 측정은 GHG 배출량을 직접 또는 간접 측정하여 수면-대기 간의 기체교환 이론과 경험식을 통해 확산 플럭스를 계산하는 방법으로 NDIR 센서, floating chamber, funnels, eddy covariance 방법 등을 이용한다(Goldenfum, 2018). 그러나 실험적 방법은 장비의 수명과 고비용으로 인해 특정 시점과 공간에서 측정하는 한계가 있으며, 이로 인해 시공간적으로 변동성이 큰 GHG 플럭스를 측정하는데 어려움이 있다. 또한, 분석 방법과 결과 산정에 있어서 불확실성이 매우 높다는 단점이 있다(Ballantyne *et al.*, 2015; Golub, 2016). 둘째, 수치 모델링 방법은 물리적 법칙과 역학적 이론에 근거한 수치모델을 사용하여 저수지 내 탄소 배출량의 변화를 시·공간적으로 예측 및 정량하는 방법이다. 그러나 이 방법은 모델의 보·검정을 위한 많은 입력자료를 요구하며, 시스템의 복잡도가 증가할수록 모델의 구조적 불확도와 입력자료 불확도가 증가하는 문제가 있다. 셋째, 통계적 모델링 방법은 자료의 특성과 패턴을 기반으로 다양한 통계기법과 기계학습 알고리즘(Machine learning)을 이용해 목표변수를 예측하며, 최근 다양한 수환경분야에서 문제 해결과 결과 예측에 활발히 적용되고 있다. 그러나 GHG 배출량은 댐 건설, 토지 이용, 혐기성 분해 등 다양한 요인에 영향을 받으며, 저수지 GHG 관련 프로세스의 복잡성, 배출 경로(Diffusion, Degassing and Bubbling)의 다양성으로 인한 계산과정의 어려움 등의 문제로 인해 정확히 정량화하기 어렵다(Prairie *et al.*, 2021).

GHG 발자국이란 인간의 활동에 의해 배출되는 탄소의 양의 규모를 측정하는 통계 도구로서(WWF-Korea, 2016), 구체적인 GHG 배출량을 정량화 하기 위한 수단이다(Choi *et al.*,

2015). 이러한 정의를 따른 경우, 댐 저수지의 GHG 발자국 평가는 댐 건설 전과 후의 하천 환경변화와 댐 건설단계에서의 탄소배출량을 종합적으로 정량화하여 인간의 개입에 따른 순 GHG 배출량 증가를 평가하는 것에 해당한다. UNESCO/IHA는 댐 건설 전과 후의 환경 변화를 고려하고 저수지로부터 흡수 및 배출되는 순 GHG 배출량(net GHG emissions)을 산정할 수 있는 온라인 기반 플랫폼인 G-res Tool을 2017년에 개발하였다. G-res Tool은 IPCC (2013)에서 정의한 전 지구적 탄소 순환의 원칙과 IPCC (2011)에서 정의한 순 GHG 배출량의 정의를 기반으로 개발되었다. 그리고 GHG의 배출 경로별 상대적 기여도와 시간이 지남에 따른 변화를 정량화 하며 저수지 건설 전후의 GHG 배출량을 산정하여 최종적으로 순 GHG 발자국을 산정한다(World Bank, 2017).

본 연구의 목적은 금강수계에 위치한 대청댐 저수지를 대상으로 G-res Tool을 이용하여 CO₂와 CH₄의 주요 배출 경로별 배출특성과 GHG 발자국을 정량적으로 산정하고, 단위전력 생산당 탄소 배출량을 평가하는데 있다. 연구결과는 동일한 온대 기후대에 위치한 저수지와 호수에서 산정된 탄소배출량과 비교하며, 화석연료 및 다른 신재생에너지원의 단위전력 생산당 탄소배출량과 비교 분석하였다. 아울러, 대청호의 부영양화 상태에 따른 배출량 변화의 민감도를 분석하여 수질과 탄소배출량의 관계를 해석하였다. 연구결과는 국내 다양

한 댐 저수지의 GHG 배출량 산정 및 탄소 발자국 평가에 활용 가능하며, 국가 온실가스 인벤토리에서 사용하고 있는 Tier1 방법의 불확도를 개선하는데 활용 가능하다. 또한 본 연구에 사용된 방법은 해외 수력발전 프로젝트 수행 시 탄소배출량 평가에도 활용될 수 있다.

2. 연구방법

2.1 연구 흐름도

연구의 진행 과정은 Fig. 1에 제시된 흐름도와 같이 단계별로 수행되었다. 1단계는 댐 저수지 GHG 배출량 산정과 발자국 평가를 위해 필요한 저수지와 유역 입력자료의 수집, 2단계는 공공 포털과 문헌조사를 통해 확보되지 않은 자료를 Google Earth Engine을 이용하여 생성, 3단계는 G-res Tool을 이용하여 GHG 배출량을 산정하고, 4단계는 결과 분석 및 해석으로써 배출 경로별 배출량 분석, 전 세계 다른 저수지와 비교 분석, 댐 건설 전과 후의 변화 분석, 수질 영향 분석을 포함하였다. 마지막으로 대청댐 저수지 수력발전 단위 전력 생산당 GHG 배출량을 산정하고 다른 에너지원(예로써 풍력, 태양광, 천연가스, 석탄)과 비교 분석하였다.

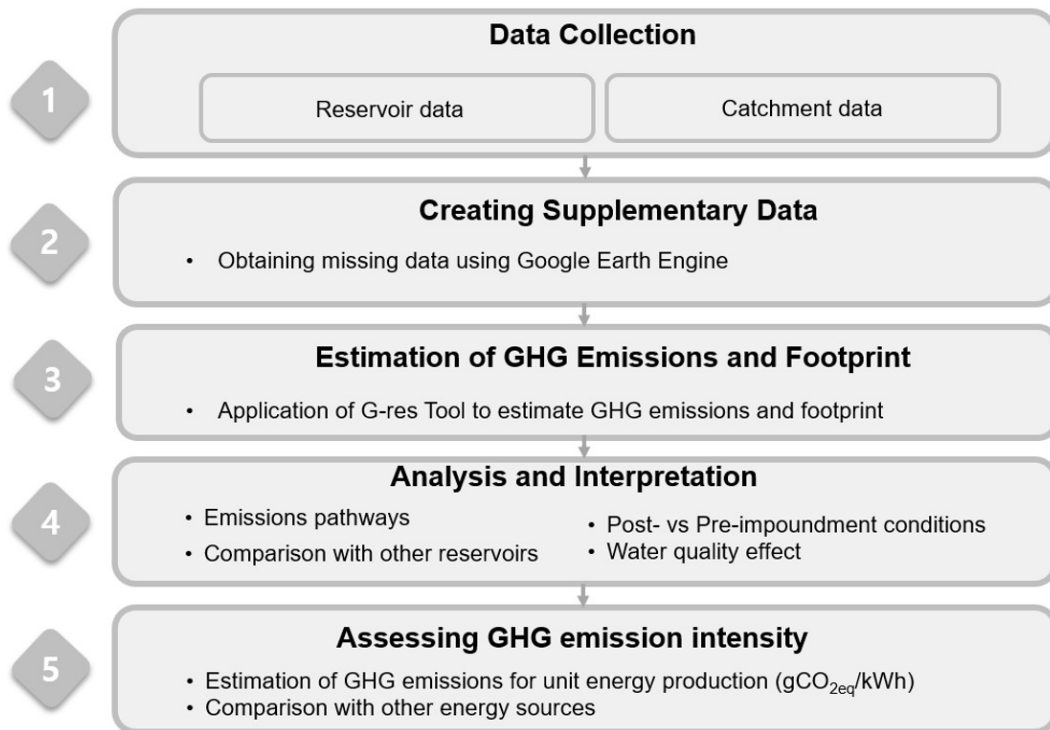


Fig. 1. A flow chart that outlines the progress of this study

2.2 연구 대상 지역

본 연구의 대상지역인 대청댐은 금강하구로부터 약 150 km 지점에 위치하여 1980년 12월에 준공된 다목적 인공 저수지이다(Fig. 2). 총 유역면적은 금강 상류에 위치한 용담댐 유역면적 930 km²을 포함하여 4,314 km²로 전체 금강수계 중 41.8%를 점유하며 저수지 면적은 72.8 km²이다. 총 저수용량은 1.49 km³이며 연간 용수공급량은 1.65 km³으로서 그 중 생활 및 공업용수로 79%를 사용하며 대전과 청주를 포함한 충청 지역과 일부 전북 지역의 물을 공급하고 있다(K-water, 2016). 용수 공급 외에도 대청댐은 수력 발전, 홍수 조절, 관개 용수 공급을 목적으로 하여 금강 유역과 인근 지역 도시의 최대 상수원으로 역할을 한다. 대청댐은 시설 용량 9만 kW의 수력발전소를 통해 연간 171 GWh를 생산하고, 2006년 12월 설치한 태양광 발전 장치(30 kW)를 이용하여 자체 전원으로 사용하고 있으며 수온차 냉난방 설비를 갖추고 있다(K-water, 2006).

저수지의 상시만수위는 EL. 76.5 m이며, 호내 취수를 하기 위한 2개(문의, 추동)의 취수탑(EL. 57 m)과 홍수조절을 위해 본 댐 여수로와 비상여수로를 갖추고, 발전 방류구를 통해 중층 방류(EL. 52 m)를 한다. 대청댐은 6개 지점(추동, 댐앞, 문의취수탑, 장계, 회남, 대정리)에서 환경부 정기수질측정망을 운영하고 있으며 수온, pH, 용존 산소(DO), 전기전도도(EC), 총유기탄소량(TOC), 클로로필a(Chl-a), 총질소(TN), 총인(TP) 등의 수질 항목을 주간 또는 월단위로 측정하고 있다. 대청댐의 TOC는 2020년, 2021년 각각 2.9, 2.8 mg/L로 ‘중음’ 등급(2mg/L 이상 3 mg/L 미만)에 해당한다(ME, 2009).

호 내 TP 농도는 평상시 0.02 mg/L 미만의 중영양상태이나, 강우가 발생하는 여름철의 경우 유역으로부터 영양염류가 유입되어 부영양양화 되어 녹조 현상이 주기적으로 발생한다(Chung *et al.*, 2016). 대청댐 저수지는 온대기후대에 위치하여 여름철 저수지 내에서 뚜렷한 성층 구조를 이루며 이로 인해 심층수의 DO가 고갈되어 수질 환경이 악화되고 강우 시 유입되는 탁수 밀도류 형성으로 인한 영향을 받는다(Chung *et al.*, 2005).

2.3 탄소배출량 산정 방법

2.3.1 G-res Tool

본 연구에서 대청댐 저수지의 탄소 배출량과 발자국 평가는 UNESCO/IHA에서 개발한 G-res Tool을 사용하였다. G-res Tool은 개별 댐의 유역 특성과 저수지 환경 조건을 고려하여 CO₂ 및 CH₄의 배출량을 예측하는 모델이며 온라인 플랫폼에서 운용된다(<http://g-res.hydropower.org/>; Prairie *et al.*, 2017b). G-res tool은 다양한 환경적 요인과 GHG 배출량 사이의 관계를 전 세계 댐 저수지 메타 데이터를 이용하여 개발한 통계적 모델로써 가장 쉽고 광범위하게 댐 저수지의 GHG 플렉스를 산정하는 도구이다(Ion and Ene, 2021). G-res Tool은 댐 저수지에서 GHG의 주요 배출 경로를 세분하고 주어진 댐의 예상 수명을 100년으로 가정하여 GHG 플렉스 변화를 특성화한다. 또한 저수지 시스템의 영향을 결정할 때 순 GHG 배출량을 평가하여야 한다는 IPCC (2011)의 권장사항을 기반으로 댐의 생성을 통한 순 GHG 발자국을 산정한다(Prairie *et al.*, 2017a).

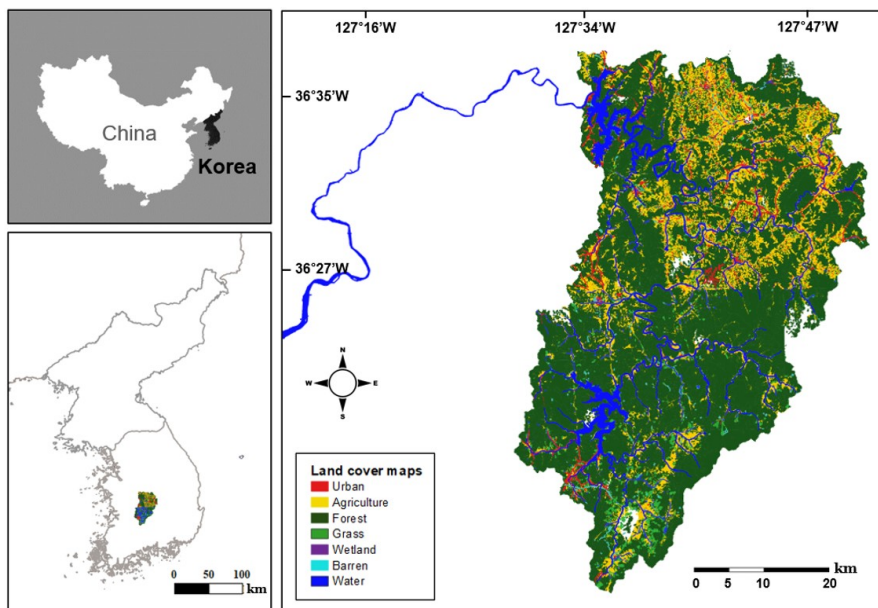


Fig. 2. Location of study site and land cover characteristics of the Daecheong Dam basin

저수지 건설로 인한 GHG 배출량만을 반영하기 위하여 각 저수지의 특정 기후, 지리학적, 토양 및 수리학적 환경을 입력 변수로 사용하였고, GHG 배출의 시간적 변화와 댐 저수지 유역 내에서 발생하는 인간 활동에 의한 유기물 부하(UAS)도 고려하였다. 그리고 댐 기반 시설 건설과정에서 제조, 운송 및 설치로 인한 간접 GHG 배출량을 포함시켜 평가가 가능하다 (Prairie *et al.*, 2017a). 그러나, 건설 과정에서 발생한 GHG 배출량과 자재 사용량 및 거리에 관한 정보는 수집하는데 어려움이 있어 G-res Tool을 이용한 연구 중 18%만이 건설 정보를 입력하였다. 예로써, 열대 기후에 위치한 다목적댐 저수지인 Kiri댐의 경우 순 GHG 배출량 265,419 tCO₂eq/yr 중 건설 과정에서 발생한 GHG 배출량은 약 12.5% (33,060 tCO₂eq/yr)를 차지하였다(Yuguda *et al.*, 2020). 본 연구에서는 건설 과정에서 발생한 GHG 배출량은 자료의 불확실성 때문에 고려하지 않았으며, 저수지 건설 이후(Post-impoundment)의 GHG 배출량과 저수지 건설 이전(Pre-impoundment) GHG 배출량을 각각 계산한 뒤 빼 주어 순 GHG 발자국을 산정하였다(Eq. (1)).

Net GHG footprint =

$$\begin{aligned}
 & [\text{Post-impoundment GHG balance of the reservoir}] \\
 & - [\text{Pre-impoundment GHG balance of the reservoir area before its introduction}] \\
 & - [\text{Emissions from the reservoir due to unrelated anthropogenic sources (UAS)}] \\
 & + [\text{GHG due to construction}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

저수지 담수 이전(Pre-impoundment) 상태는 댐이 건설되기 이전의 저수지 위치에서의 토지 피복에 대한 배출 계수 (Pan *et al.*, 2011; IPCC, 2006, 2014)와 자연하천의 규모를 고려한 기체교환계수(Vachon and Prairie, 2013; Rasilo *et al.*, 2014)를 기반으로 계산되며, 저수지 담수 이후(Post-impoundment) 상태는 댐 건설 이후 저수지로부터 배출되는 탄소의 분자 확산(Diffusion), 기포 발생(Bubbling), 탈기(Degassing) 배출 경로에 대해 산정한다(Fig. 3). 배출 경로별 CO₂ 및 CH₄ 배출량은 다변량 Elastic Net 회귀모델(Elastic Net Regression Model, ENRM)을 이용하며, 모델에 사용된 독립변수는 전 세계 223곳의 댐 저수지들에서 측정된 GHG 플럭스 데이터베이스를 기반으로 한다(Barros *et al.*, 2011; Prairie *et al.*, 2017a). ENRM은 다변량회귀분석을 기반으로 한 통계모형이지만, 과도한 변수선택에 의한 모델의 복잡성 증대와 예측력의 과적합(Overfitting)을 방지하기 위해 모델의 예측력을 적절한 수준까지 조절함(Regularization)으로써, 댐 저수지에서의 GHG

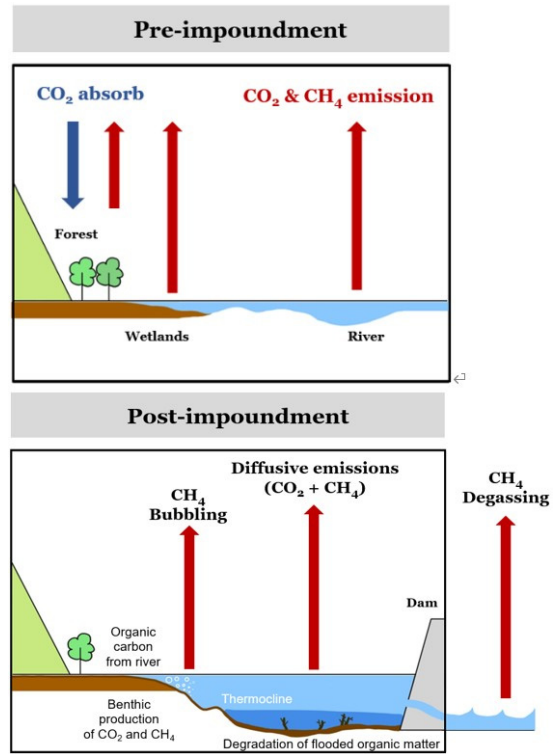


Fig. 3. Comparison of different GHG emission pathways under (top) pre-impoundment and (bottom) post-impoundment conditions

배출량 산정과 같은 설명변수가 많은 반면 자료수가 제한적인 경우 유용한 방법이다(Zou and Hastie, 2005; Prairie *et al.*, 2017a). 따라서, ENRM은 다양한 유역과 저수지 특성에 대한 후보 설명 변수 중에서 탄소 배출량을 예측하는데 유용한 변수를 최적으로 선택할 수 있게 한다. 연간 배출량 예측 ENRM은 댐 예상수명을 100년으로 예상하였으며 일반적으로 Eq. (2)을 기반으로 배출 경로에 따라 Eqs. (3)~(6)로 개발되었다. ENRM의 예측 성능은 CO₂ Diffusive emissions (n=169, R²=0.36, RMSE=0.39), CH₄ Diffusive Emissions (n=160, R²=0.51, RMSE=0.52), CH₄ Bubbling Emissions (n=46, R²=0.26, RMSE=0.80), CH₄ Degassing Emissions (n=38, R²=0.68, RMSE=0.81)와 같다.

$$\log_{10} \text{ Annual } CO_2 \text{ or } CH_4 \text{ flux} = f(\text{predictor variables}) \quad (2)$$

G-res tool에서 산정한 GHG 배출량은 배출경로별 경험적 회귀모델을 사용하므로 불확실성을 가지고 있다. 따라서 4개의 배출경로별 배출량 합계의 불확실성을 정량화 하기 위해 각 배출경로별 회귀모델에 사용된 자료 수(n)와 RMSE (Root Mean Square Error)를 사용한다(Prairie *et al.*, 2017b). 그리

고 배출경로별로 Box-Muller 알고리즘을 이용하여 선택변수의 정규분포에 따라 1000번 무작위 선택한 후 4개의 배출경로별 배출량을 합산하여 1,000개의 저수지 GHG 배출량을 산정하고, 이 분포를 이용하여 95% 신뢰구간을 결정한다.

2.3.2 탄소 배출 경로별 회귀모델

토지 피복은 산림, 습지, 농지, 정착지, 호수, 개울 및 강과 같은 다양한 형태로서 생태계를 구성하며 각 특징에 따라 GHG 흡수 및 배출 경로를 나타낸다. 일반적으로 산림은 광합성을 통해 대기로부터 CO₂를 흡수하고, 습지는 탄소를 퇴적할 뿐만 아니라 CH₄를 방출하며, 강 및 호수는 CO₂와 CH₄ 모두 방출하는 경향이 있다. 저수지를 통한 탄소 배출 경로는 크게 저수지 수면을 통한 CO₂와 CH₄의 확산(Diffusion), 수심이 얇은 수변부에서 일어나는 CH₄의 기포 배출(Bubbling), 수력발전 등을 통해 방류 시 일어나는 탈기(Degassing)가 포함된다. CO₂와 CH₄의 확산은 풍속이 클수록 수체 내 큰 난류가 발생하여 확산이 더욱 더 활발해진다. Barros *et al.* (2011)은 저수지의 확산 배출에 대해 저수지 나이(age)와 위도 및 평균 수심이 민감도가 높은 매개변수임을 확인하였다. 이를 기반으로 G-res tool은 CO₂와 CH₄의 확산 배출량을 산정하기 위해 저수지의 나이, 평균 연간 온도, 토양에 함유된 탄소 함량, 총인 농도, 수변부 면적 백분율을 변수로서 만들어진 회귀식을 이용한다(Eqs. (3) and (4)). 그리고 CO₂ 확산 회귀식 Eq. (3)에서는 저수지 담수 이전의 하천 면적비율을 입력하여 하천 상태에서의 배출량을 배제함으로써 댐 건설에 따른 순 배출영향만을 고려한다.

CH₄는 CO₂에 비해 용해도가 낮아 기포를 생성하여 과포화 수준에 도달할 수 있고 물에 잘 용해되지 않는 소수성 가스이다 (Eq. (5)). 일반적으로 CH₄의 Bubbling은 주로 수심이 10 m 이하의 수변부에서 발생하는데, 물이 얇은 경우 더 낮은 압력이 가해져 기포의 크기가 커지는 경향이 있기 때문이다. G-res Tool에서는 연안지대를 3 m 미만의 깊이로 제한하였고 전체 저수지의 단위 표면적당 비율로서 CH₄ 배출 플럭스를 산정하였다(Prairie *et al.*, 2017a). 또한 해당 지역의 일사량이 강할수록 수중 침전물의 온도가 높아지는데 이로 인해 유기물의 분해가 활발해져 기포 발생이 더 활성화된다. CH₄의 확산 배출량을 CO₂eq로 환산하기 위해 100년 동안의 지구 온난화 지수(GWP100) 34배를 곱하여 준다.

물이 저수지에 머무르는 체류시간이 길수록 표면 온도는 높아지지만 바닥 온도는 상대적으로 낮은 상태로 유지된다. 이때 이 온도 구배에 의해 CO₂와 CH₄ 같은 기체의 수직 혼합을 방해하는 물리적 장벽역할을 하는 수온약층이 생성된다. 수온약층 상부에서는 용존 산소가 풍부하여 호기성미생물에 의해

유기물이 분해되어 최종산물인 CO₂가 생성되고, 심수층에서는 무산소 환경에서 혐기성미생물에 의한 유기물 분해 최종산물인 CH₄가 축적될 수 있다(IHA, 2021).

CO₂ Diffusive Emissions Flux (g CO₂eq/m²/yr)

$$= \left[\left(10^{\left(\frac{1.860 + 0.0332 * T_{CO_2} + 0.0799 * \log_{10}(A)}{100} + 0.0155 * SC + 0.2263 * \log_{10}(TP) \right)} \right) * \frac{100^{(-0.330 + 1)} - 0.5^{(-0.330 + 1)}}{(-0.330 + 1)} * \frac{365}{1000} * \frac{44}{12} * \left(1 - \frac{\%RA}{100} \right) - \left(10^{\left(\frac{1.860 - 0.330 * \log_{10}(Age) + 0.0332 * T_{CO_2}}{100} + 0.0799 * \log_{10}(A) + 0.0155 * SC + 0.2263 * \log_{10}(TP) \right)} \right) * \frac{365}{1000} * \frac{44}{12} * \left(1 - \frac{\%RA}{100} \right) \right] \tag{3}$$

CH₄ Diffusive Emissions Flux (g CO₂eq/m²/yr)

$$= \frac{10^{\left(\frac{0.8032 + 0.4594 * \log_{10}\left(\frac{\%LA}{100}\right) + 0.04819 * T_{CH_4}}{100} \right) * \left(1 - 10^{(-100 * 0.01419)} \right)}}{(100 * 0.01419 * \ln(10))} * \frac{365}{1000} * \frac{16}{12} * 34 \tag{4}$$

CH₄ Bubbling Emissions Flux (g CO₂eq/m²/yr)

$$= 10^{\left(\frac{-1.3104 + 0.8515 * \log_{10}\left(\frac{\%LA}{100}\right) + 0.05198 * (CR)}{100} \right)} * \frac{365}{1000} * \frac{16}{12} * 34 \tag{5}$$

여기서 T는 온도 보정 계수로서 Barros *et al.* (2011)의 연구 결과 온도가 증가함에 따라 CO₂, CH₄ 생성 속도가 증가하는 것을 반영하며(Harrison *et al.*, 2021), A (km²)는 저수지 면적, SC (kgC/m²)는 저류 지역(impounded area)의 지표 아래 최대 30 cm까지의 토양 탄소 함유량 임계값, %RA는 저수 이전의 토지 피복 중 수체가 차지하고 있던 면적의 비율, Age는 댐 저수지 나이, %LA는 저수지 수변부의 면적 비율, CR은 저수지 누적 일사량(kWh/m²/period)이다.

수력 발전을 하는 댐 저수지는 물의 낙하를 통한 위치 에너지와 운동에너지의 전환 현상을 통하여(Kim *et al.*, 2019) 전기를 생성하기 때문에 방류 설비를 댐의 최하단부에 설치하여 낙차를 최대화한다(Park *et al.*, 2022). 방류구가 수온약층 아래에 있어 물이 방출될 때의 급격한 압력강하로 인해 대기 중으로 직접 방출되는데 이것이 CH₄의 Degassing 현상이다(Eq. (6)). CH₄의 탈기 현상을 통한 배출량은 수온약층의 위치와 수력발전 방류구(penstock)의 수심에 의해 결정되며, 수력발전 전용 댐과 같이 심층방류를 하는 저수지에서 크게 나타난

다. 이 때 G-res Tool은 방류구가 수운약층 아래에 있을 경우만을 탈기로서 추정하였다(Prairie et al., 2021).

$$CH_4 \text{ Degassing Emissions Flux (g CO}_2\text{eq/m}^2\text{/yr)} = \frac{10^{(-6.9106 + 2.950 * \log_{10}(CH_4 \text{ Diffusive Emissions Flux}) + 0.6017 * \log_{10}(WRT)) * 1000}}{1,000,000,000} \quad (6)$$

$$* CA * 1,000,000 * \frac{Q}{1,000} * 0.9 * \frac{16}{12} * \frac{34}{A}$$

여기서 WRT는 물 체류 시간(Water Retention Time)이며, CA는 유역 면적(km²), Q는 연간 방류량(mm/yr)이다.

2.3.3 Earth Engine

G-res Tool은 순GHG 배출량을 산정하기 위해 저수지의 물리적, 지리적, 기후, 토양 및 토지 피복 등 다양하고 많은 정보를 필요로 한다. 이 때 일관된 출처로부터 정확한 정보를 추출하여 입력 자료를 구축할수록 더 정확한 결과값이 산정된다. 하지만 입력 자료 정보를 추출하는데 시간이 오래 소요되고 요구하는 입력 자료를 전부 확보하기에 한계가 있으며 정보의 불일치나 오류가 발생할 수 있다. G-res Tool은 누락된 정보를 일정한 출처를 통해 보완하여 입력할 수 있도록 Google이 개발한 Earth Engine 플랫폼(<https://earthengine.google.com/>)을 이용하도록 도구 내에서 제공한다(Prairie et al., 2017c; Gorelick et al. 2017a). 본 연구에서는 G-res Tool의 입력자료 중 수집이 어려운 저수지 건설 이전 토지피복, 토양 정보와 탄소 함유량, 연평균 국부 일사량(Mean Global Horizontal Radiance) 등 일부 데이터를 Earth Engine을 통해 추출하였다. Earth Engine은 삼림 벌채, 가뭄, 재난, 질병, 식량 안보, 수자원 관리, 기후 관측과 환경 예측 등 영향력이 강한 다양한 사회적 문제를 해결하기 위해 Google의 방대한 계산 기능을 활용하는 지구 규모의 지리 공간 분석을 위한 클라우드 기반 플랫폼이다(Gorelick et al., 2017b). Earth Engine의 데이터 카탈로그에는 다양한 위성과 항공 영상 시스템의 관측 자료, 환경변수, 날씨 및 기후 자료, 토지 피복, 지형 및 사회경제적 데이터를 포함한 공개적으로 사용가능한 지리공간 데이터 저장소가 있다.

2.4 입력자료 구성

G-res Tool 구동에 필요한 입력자료는 크게 유역(Catchment) 관련 입력변수와 저수지(Reservoir) 관련 입력변수로 나뉘어진다. 유역 관련 입력변수에는 저수지 면적, 인구, 연간 유출량, 하폐수 인부하량과 산업 하수 방출량, 토지 피복 비율이 있으

며 저수지 관련 입력변수에는 댐이 위치한 위도, 경도, 저수지 체적, 수위, 최대 깊이 및 기상 관련 항목 등이 있다.

2.4.1 유역 관련 입력변수

대청댐 유역 면적은 4,134 km²로 2021년 기준 행정구역별 인구를 연구대상 지역 내 면적 비율로 재계산한 결과 287,485 명으로 산정되었다. 연간 방류량은 874 mm/yr로 지역 폐수처리와 산업 폐수처리는 모두 고도처리(2차)로 처리되고 있으며 대청댐 유역의 지역사회 및 산업의 인 방출량은 각각 연간 72,963, 4,051 kgP만큼 배출된다(ME, 2021). 국가수자원관리 종합정보시스템(ME, 2004)로부터 대청댐 유역 토지 피복 비율을 추출하였고 산림 68%, 경작지 13%, 초지 및 관목지 10%, 수체 3%, 나지와 정착지 2%, 습지와 배수 이탄지 1%로 구성되었다.

저수지 건설 이전 토지 피복에 관한 정보는 Google Earth Engine을 이용하여 얻은 결과를 입력하였고 산림 75%, 경작지 15%, 초지 및 관목지 7%, 정착지 1%, 나지와 습지 0.01%로 나타났다. 토양은 크게 토양 내 유기물질 함유량에 따라 유기 토양(Organic soil)과 광물성 토양(Mineral soil)으로 나뉘어 지는데 우리나라의 경우 대부분 광물성 토양에 해당한다. 유기 토양은 12%(중량 기준)이상의 유기 탄소를 함유하며 광물성 토양(직경 2.0 mm미만)은 12% 미만의 유기 탄소를 함유한다(USDA, 2014). G-res Tool은 IPCC지침에 따라 기후대별로 유기 토양과 광물 토양의 배출계수를 적용하는데 대청댐은 온대기후대를 적용하였다.

Google Earth Engine을 이용하여 대청댐 유역을 지정했을 때 수체 끝 부분부터 댐까지의 길이를 Google Earth를 이용하여 측정한 결과 45.2 km로 나타났고 저수 이전 강의 길이(River length before impoundment, m)에 적용하였다. 해당 저수 이전 강 면적(River Area before Impoundment)은 저수 이전 강의 길이와 유역 면적을 매개변수로 하여 G-res tool에 포함되어 있는 계산식을 이용하여 5.3 km²로 산정되었다.

2.4.2 저수지 관련 입력변수

대상지역인 대청댐 저수지는 1981년 건설된 온대 기후에 위치한 다목적 댐 저수지로 저수지 관련 매개변수와 각 출처는 아래 Table 1에 나타냈고, 기상자료는 대상지역인 대청댐과 가까운 위치에 있는 대전 기상대를 이용하여 10년 간의 월별 기온을 입력하였으며 평균 13.7°C로 계산되었다. 저수 지역 토양 내 탄소 함유량(Soil carbon content under impounded area)과 연평균 국부 일사량(Reservoir mean global horizontal radiance)는 Google Earth Engine을 이용하여 얻은 결과값을

입력하였다. 그리고 G-res Tool 내에 포함되어 있는 식을 이용하여 자동 산출되는 항목에는 저수지 평균 수심(m), 수변부 면적비율(%), 수온 약층 깊이(m), 체류 시간(years), 인 농도($\mu\text{g/L}$) 등이 포함된다. 본 연구에서는 대청호의 부영양화를 나타내는 지표인 인 농도는 자동으로 생성된 인 농도를 사용하지 않고 환경부 수질측정망 자료에서 대청호 내 6개 조사지점의 총인 농도를 입력하였다.

G-res tool은 댐 저수지 GHG 발자국 평가에서 8가지로 구분된 댐의 다양한 서비스별로 배출량을 할당하는 기능이 포함되어 있다. 다목적 댐의 경우, 이러한 기능을 사용하기 위해서 사용자는 각 기능의 중요성을 기준으로 1순위(Primary), 2순위(Secondary), 3순위(Tertiary)를 구분해 주어야 한다. 대청댐은 용수공급, 수력발전, 홍수조절, 관개용수 공급을 목적으로 건설된 댐이므로 저수용량의 비용배분을 고려하여 각 순위별 중요도를 입력하였다. 용수 공급과 수력 발전은 1순위로서 각각 40%로 입력하였고, 홍수 조절과 관개는 부차적으로 7.5%, 하천유지용수는 3순위로서 5%로 입력하였다. 그리고 대청댐 저수지의 설비 용량은 90 MW, 연간 총 발전량은 171 GWh/yr

로 입력하였다(K-water, 2021).

2.4.3 총인 농도

댐 저수지에서 GHG 배출 특성은 식물플랑크톤의 광합성에 의한 유기물의 내부생성과 침강, 사멸, 퇴적, 분해 과정에 저층 빈산소층 형성에 따른 CH_4 생성 등에 크게 영향을 받는데, 이러한 영향을 고려하기 위해 G-res Tool에서는 부영양화 평가의 중요한 영양염인 인의 농도를 고려한다. 저수내 인 농도는 인 부하량과 체류시간을 이용하여 간접적으로 계산하는 방법과 실측 자료가 있는 경우에는 직접 입력하는 방법을 선택할 수 있다. 본 연구에서는 물환경정보시스템(ME, 2009)에서 제공하는 대청호 내 6개 수질측정망 지점의 최근 11년(2011년~2021년) 평균 TP 농도를 산정하여 입력하였다(Table 2). 그리고 저수지의 부영양화 정도가 GHG 배출량에 미치는 민감도를 분석하기 위해 TP 농도의 증감에 따른 배출량을 추가로 산정하였다. 대청댐의 11년 평균 총인 농도는 $21.761 \mu\text{g/L}$ 였으며, 민감도 분석에 사용한 총인 농도는 Table 3에 제시된 바와 같이 $4.352\sim 108.806 \mu\text{g/L}$ 의 범위로 설정하였다. 표에서

Table 1. Reservoir data used for estimating GHG emission in Daecheong Reservoir

Item	Unit	Data	Source
Longitude of dam	DD	127.48	Google maps
Latitude of dam	DD	36.48	Google maps
Reservoir area	km^2	72.8	K-water (2016)
Reservoir volume	km^3	1.49	K-water (2016)
Water level	EL. m	76	K-water (2016)
Maximum depth	m	51	K-water (2016)
Mean depth	m	20	Calculated automatically in G-re Tool
Littoral area	%	8.647	Calculated automatically in G-re Tool
Thermocline depth	m	0.7	Calculated automatically in G-re Tool
Water intake depth	m	24	Calculated automatically in G-re Tool
Water intake elevation	EL. m	52	Lee <i>et al.</i> (2011)
Soil carbon content under impounded area	kg C/m^2	20	Google Earth Engine
Annual Wind Speed	m/s	1.40	KMA (2015)
Wind measurements height	m	10	KMA (2015)
Water residence time	years	0.2781	Calculated automatically in G-re Tool
Annual discharge from Main Intake	m^3/s	166	K-water (2016)
Trophic level	-	Mesotrophic	Calculated automatically in G-re Tool
Reservoir mean global horizontal radiance	$\text{kWh/m}^2/\text{d}$	4.2	Google Earth Engine

Table 2. Mean annual phosphorous concentration of Daecheong Reservoir for 11 years

Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
TP Conc. ($\mu\text{g/L}$)	31.167	20.167	20.833	17.667	15.167	26.500	22.833	32.333	21.333	18.167	15.500

Table 3. Scenarios of total phosphorus concentration for evaluating GHG emission flux changes

Scenarios	-5x	-4x	-3x	-2x	-1.5x	1.5x	2x	3x	4x	5x
TP Conc. ($\mu\text{g/L}$)	4.352	5.440	7.254	10.881	14.507	32.642	43.522	65.284	87.045	108.806

시나리오의 숫자는 평균 총인 농도에 대한 배수를 나타내며 음의 값은 농도 감소를 양의 값은 농도 증가를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배출 경로별 플럭스 평가

댐 건설 이후 담수 상태에서 대청댐 저수지의 연간 탄소 배출 플럭스는 $262 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 로 산정되었다. 배출 경로별로는 전체 탄소 배출량 중 대기-수면 경계면을 통한 CO_2 확산 배출량이 $109 \text{ g CO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 로써 가장 많았으며 전체 배출량의 45.7%를 차지하였다. 그 다음은 CH_4 의 확산(Diffusion), 방류시 탈기(Degassing), 수변부 기포 배출(Bubbling)이 각각 74, 48, 31 $\text{gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 순서로 많았다. 배출 경로 중 CO_2 와 CH_4 의 분자확산이 전체의 70%를 차지하는 것은 대청호의 수심이 깊고 전체 저수면적 대비 수변부 면적이 작은 것이 원인으로 사료된다. 일반적으로 CH_4 의 확산 배출은 저수지 수명이 오래 될수록 감소하며, 연평균 수온과 수변부 면적 비율이 클수록 증가하며, Bubbling을 통한 배출은 수변부 면적과 누적 총수평 복사량이 클수록 증가한다. Bubbling을 통한 배출은 주로 수심이 10 m 이하의 수변부에서 발생한다. 그리고 CH_4 의 Degassing을 통한 배출량은 수온약층의 위치와 수력발전 방류구의 수심에 의해 결정되며, 수력발전 전용 댐과 같이 심층방류를 하는 저수지에서 크게 나타난다. 반면, 대청댐은 수력 발전뿐만 아니라 용수공급과 홍수조절을 하는 다목적댐이므로 발전 방류구의 위치가 중층(EL. 52 m)에 위치하고 있어 Degassing을 통한 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 대청댐과 유사한 기후대에 속한 중국의 Sinan 강에 위치한 수력발전댐에서 Jiang *et al.* (2018)이 G-res tool을 이용하여 산정한 GHG 배출량은 $367 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 였으며, 대청댐 보다 40% 정도 높게 나타났다. 그러나 배출 경로별 분석에서 CO_2 확산이 39%로 가장 기여도가 컸으며, 다음으로 CH_4 확산, 탈기, 기포 배출이 각각 40, 36, 24 $\text{gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 로 순으로 산정되어 대청댐과 유사한 결과를 보였다.

3.2 연간 GHG 발자국 산정

대청댐 연간 배출량은 댐 건설 이후(Post-impoundment)의 배출량에서 건설 이전(Pre-impoundment)의 값을 빼 주어

산정한다. G-res tool을 이용하여 산정한 결과 대청댐 건설 이후 $262 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 이 배출되었고 댐 건설 이전에는 $-248 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 로 최종적으로 순 GHG 발자국이 $510 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 로 산정되었다(Table 4). 이 때, 댐이 건설되기 전의 배출량이 음의 값으로 산정된 것은 댐 건설 전 토지 피복 중 75.3%가 산림으로 구성되어 GHG 흡수원으로서 역할을 했기 때문이다. 반면, 댐 건설 이후는 총 배출량 대비 CO_2 와 CH_4 의 비율은 각각 41.6%와 58.3%로써 CH_4 배출량($153 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$)이 CO_2 ($109 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$) 보다 $36 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 더 많았다. 이러한 결과는 전 세계 저수지를 대상으로 GHG 배출량을 산정한 결과, CH_4 의 영향이 크다는 Deemer *et al.* (2016)의 연구 결과와 잘 일치한다.

Louis *et al.* (2000)은 대청댐 저수지와 동일한 기후대에 속한 온대 습윤 기후대의 최소 0.2 km^2 에서 최대 2500 km^2 규모의 16개의 댐 저수지를 대상으로 CO_2 배출 플럭스를 직접 측정하는 연구를 수행하였다. 그 결과 CO_2 와 CH_4 의 총합 배출 플럭스는 $518 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$ 로 산정되었고, 이는 금번 연구에서 대청댐 저수지에서 산정된 순 GHG 배출량과 유사한 결과이다.

현재 국가 온실가스 인벤토리(ME, 2020)에서 댐 저수지의 GHG 배출량은 IPCC 2006년 지침에 제시된 Tier 1 방법에 따라 산정하고 있으며, 개별 댐의 유역과 저수지 특성을 반영하지 않고 모든 댐에 일정한 배출계수($186 \text{ gCO}_2\text{eq/m}^2/\text{yr}$)를 적용하고 있다. 금번 연구에서 Tier 3 수준에 해당하는 G-res Tool을 적용한 결과와 비교할 경우, 기존 방법은 대청댐의 GHG 배출량을 약 40% 정도 과소평가하는 것을 알 수 있다. IPCC는 2006년 지침의 불확실성을 개선하기 위해 2019년 수정 지침에서는 저수지의 부영양상태를 추가적으로 고려하고 있다.

Fig. 4는 G-res tool을 이용하여 산정한 대청댐 저수지의 순 GHG 배출량과 전세계 4,786개 댐 저수지와 이 중 동일한 기후대에 속한 댐 저수지에서 산정한 결과값을 히스토그램으로 비교한 그래프이다. 전 세계 댐 저수지 데이터는 G-res team이 보유하고 있는 데이터에서 제공된 것이다. 비교 결과, 대청댐 저수지의 GHG 순 배출량은 중앙값 보다 높은 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 대청댐 저수지의 규모, 수질, 그리고 유역의 토지이용 특성과 관련이 있을 것으로 유추된다. Ion and Ene (2021)은 온대기후인 루마니아의 Stánca-Costesti 저수지를 대상으로 G-res tool을 이용하여 GHG 발자국을 산정하였다.

Table 4. Net reservoir footprint of Daecheong Reservoir

Predicted emissions	Post-impoundment	Pre-impoundment	Net GHG footprint	95% confidence intervals
Total emission flux (gCO ₂ eq/m ² /yr)	262	-248	510	(481-542)
Emission flux of CO ₂ (gCO ₂ eq/m ² /yr)	109	-249	358	N/A*
Emission flux of CH ₄ (gCO ₂ eq/m ² /yr)	153	~0	152	N/A
Annual emission (tCO ₂ eq/yr)	20,529	-18,025	37,113	(35,031-39,443)
Lifetime emission (tCO ₂ eq)	2,052,859	-1,802,495	3,711,262	(3,503,136-3,944,304)

*Not available

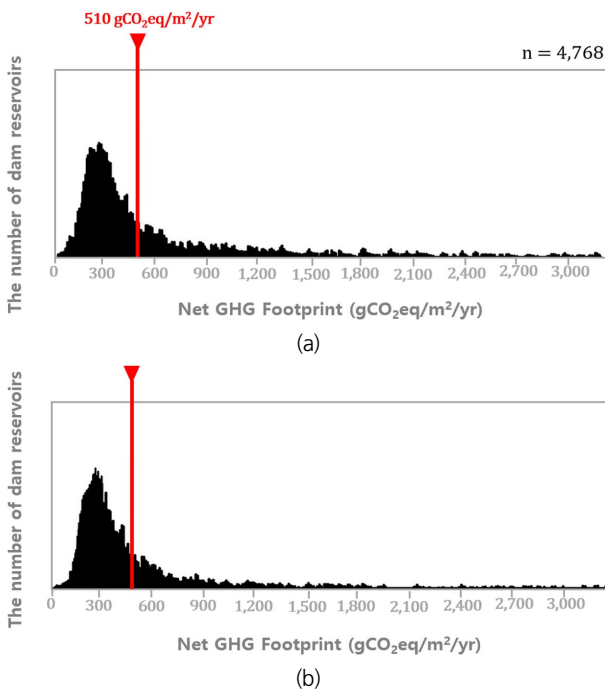


Fig. 4. Net GHG footprint of Daecheong Reservoir compared to (a) worldwide reservoirs and (b) other reservoirs located in the same climate region

유역면적은 12,000 km²로 대청댐에 비해 약 2.9배 큰 규모이며, 저수 면적은 59 km²로 대청댐보다 1.2배 작다. 하지만 토지 피복율을 비교하였을 때 Stânca-Costesti 저수지는 건설 전후 산림의 비율은 동일하게 16%인 반면, 대청댐은 건설 전후 산림의 토지 피복비율이 각각 75.3%와 68.5%로써 감소하였다. 댐 건설 전에 산림지역은 탄소를 흡수하는 기능을 한 반면, 댐 건설 후 저수지로 변하면서 탄소 배출원으로 작용하였다. Table 4에 제시된 Pre-impoundment 조건에서 탄소 흡수 플럭스 -248 gCO₂eq/m²/yr를 배제할 경우, Post-impoundment 조건에서 탄소 배출 플럭스 262 gCO₂eq/m²/yr는 동일한 기후대에 속한 저수지 순 플럭스와 유사한 값에 해당한다.

본 연구에서 산정한 CO₂ 배출 플럭스를 Chung *et al.* (2016)의 선행 연구결과와 비교하였다. Chung *et al.* (2016)은 대청

댐 저수지를 대상으로 수온, pH, 알칼리도, Chl-a, 풍속을 독립 변수로 사용하여 다중회귀 모델을 개발하였다. 모델을 이용하여 2012년과 2013년을 대상으로 일별 CO₂ 배출량과 흡수량을 산정하였다. 일별 CO₂ 배출량은 강수량과 계절의 영향으로 시간적 변동성이 크게 나타났으며, 식물플랑크톤의 1차생산성이 높은 여름철에는 감소하였다. 특히, 풍수년에 해당하는 2012년(연강수량 1,522.3 mm)은 945±1141 gCO₂eq/m²/yr로써 평수년인 2013년(연강수량 1,125.9 mm)의 281±592 gCO₂eq/m²/yr 보다 3배 이상 크게 산정되었다. 본 연구에서 산정한 CO₂ 배출 플럭스와 Chung *et al.* (2016)에서 산정한 값이 큰 차이를 보이는 이유는 산정 기간과 방법의 차이에 있다. G-res Tool은 100년간의 탄소배출량 플럭스를 고려하는 반면, 선행연구는 특정 해에 대한 산정결과에 해당한다.

3.3 단위 전력 생산당 배출량 평가

전력밀도(Power density)란 저수지의 단위 표면적당 발전 용량으로, 일반적으로 전력밀도가 낮을수록 수력용량 대비 저수지 면적이 커 단위 전력생산당 탄소배출 양이 커진다. 한편, GHG 배출강도(Allocated GHG emissions intensity)는 생산된 에너지 단위당 배출되는 GHG의 양으로 정의되며(IHA, 2021), 배출강도의 값이 클수록 탄소 함유량이 높은 에너지를 사용했다는 것을 의미한다(KEA, 2015). G-res tool에서 산정된 대청댐의 전력밀도는 1.2 W/m²로 나타났고 GHG 배출강도는 86.8 gCO₂eq/kWh였다(Fig. 5). 이 값은 연간 순 GHG 배출량(37,113 tCO₂eq/yr)중 수력발전 서비스(40%) 부분 배출량을 연간 발전량 171 GWh로 나누어 산정된 값이다. IHA가 전세계의 500 여개의 댐 저수지를 대상으로 G-res Tool을 이용하여 산정한 연구에 따르면 수력발전의 GHG 배출강도 중앙값(median)은 23 gCO₂eq/kWh로써 대청댐의 배출강도는 약 3.7배에 해당한다. 다른 재생 에너지원과 비교했을 때 풍력 발전(12 CO₂eq/kWh)만이 수력발전보다 더 낮았으며 태양광에너지는 48 g CO₂eq/kWh, 가스와 석탄은 각각 490 및 820 g CO₂eq/kWh였다(IPCC, 2019). 대청댐 수력발전의 배출강도는 태양광에너지보다 약간 높은 GHG 배출강

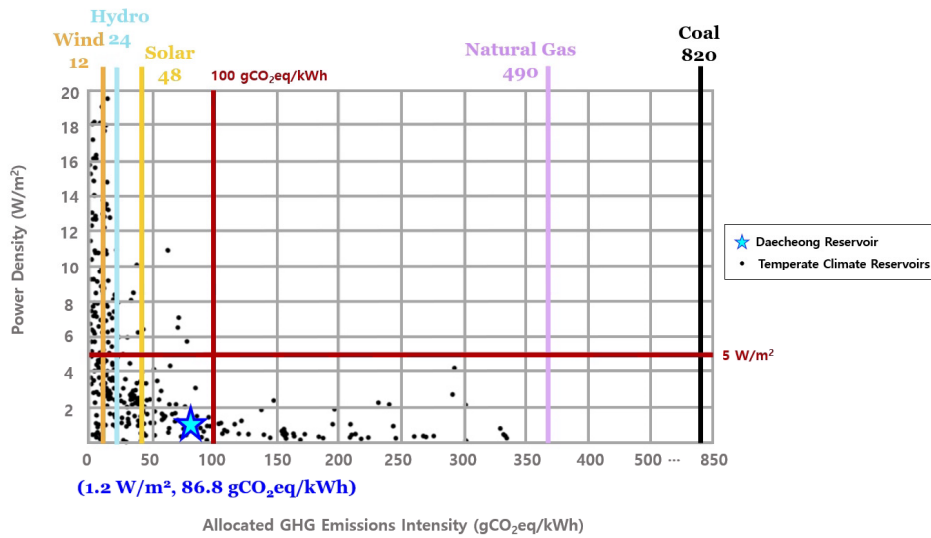


Fig. 5. Power density and GHG emissions intensity of Daecheong Reservoir along with other dam reservoirs (IHA, 2021)

도를 나타내며 석탄을 사용할 때보다 9.5배의 GHG 저감 효과를 가진다. 교토의정서에서 제시된 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM)란 선진국과 개발도상국에 공동으로 추진되고 있는 감축사업이다(Kim, 2021). CDM 집행 위원회는 수력 발전의 탄소 배출량에 대한 불확실성으로 인해 전력밀도가 4 W/m^2 미만인 댐 저수지의 경우 탄소 배출 저감 인증에서 제외시켰다. IHA (2021)가 제시한 조사결과에 따르면, 전 세계 400여개의 저수지를 대상으로 전력밀도를 산정하였을 때 대부분이 4 W/m^2 미만에 해당하였으며, 전력 밀도가 5 W/m^2 이상일 때 GHG 배출강도는 $100 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}$ 를 넘을 수 없다는 상관관계를 제시하였다(Fig. 5).

3.4 수질에 따른 GHG 배출량 민감도 분석

댐 저수지의 수질 개선에 따른 GHG 배출량 저감 효과는 저수지 운영자의 주요한 관심이 되고 있다. 부영양 저수지에서 자가영양생물인 조류(식물플랑크톤)는 광합성을 통해 수체와 대기의 CO_2 를 유기탄소로 전환하여 유기물을 생성하며(Whiting and Chanton, 1993), 조류의 사멸과 분해는 저수지 내 입자상과 용존상 유기물의 순환 구조에 영향을 준다(Bastviken *et al.*, 2011). 조류로 인해 생성된 내부기원 유기물은 호기성 및 혐기성 미생물에 의해 분해되어 최종적으로 CO_2 와 CH_4 을 전환된다. G-res tool에서는 CO_2 의 확산 배출 플럭스 산정 회귀모델에 TP 농도가 포함되어 부영양 저수지에서는 탄소 배출량이 증가한다. 따라서 TP 농도에 따른 GHG 배출량의 산정 결과의 민감도를 확인하기 위해 입력 TP 농도를 -5배에서 +5배(최소 $4.352 \mu\text{g/L}$ ~최대 $108.806 \mu\text{g/L}$)까지 다양하게 변화시켜 GHG 배출량 추이를 파악하였다(Fig. 6). 총 GHG 배출량

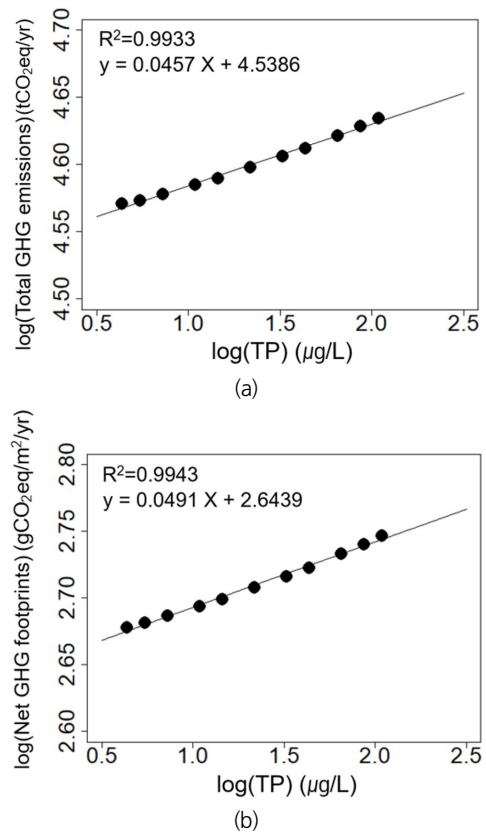


Fig. 6. (a) Total annual GHG emissions ($\text{tCO}_2\text{eq/yr}$) and (b) net GHG flux ($\text{gCO}_2\text{eq/m}^2\text{/yr}$) according to change in TP concentrations

($\text{tCO}_2\text{eq/yr}$)과 순 GHG 플럭스($\text{gCO}_2\text{eq/m}^2\text{/yr}$) 모두 총인 농도가 증가함에 따라 로그함수의 형태로 증가하는 추세를 보였다. 시나리오 평균 총인 농도($21.761 \mu\text{g/L}$)를 기준으로 볼때,

총인 농도 10 $\mu\text{g/L}$ 감소 시 GHG 플럭스는 대략 13.8 $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/\text{yr}$ 감소하였다. 이러한 결과는 댐 저수지의 수질개선이 탄소 배출저감에도 도움이 될 수 있다는 것을 의미한다.

일반적으로 총인과 총질소와 같은 영양물질의 부하량이 크고 조류의 1차 생산성(primary production)이 높은 부영양 저수지에서는 빈영양 및 중영양 저수지보다 단위면적당 CH_4 배출량이 더 높다고 보고되고 있다(Narvenkar *et al.*, 2013; Deemer *et al.*, 2016; Beaulieu *et al.*, 2019). 또한 호수 퇴적물을 사용한 실험실 분석에서도 1차 생산성과 CH_4 배출량 사이의 양의 상관관계가 입증되었다(West *et al.*, 2016). Deemer *et al.* (2016)의 연구결과에 의하면, 댐 저수지에서 CH_4 배출 플럭스와 Chl-a 농도는 강한 양의 상관관계가 있고 영양상태에 따라 통계적으로 유의미한 차이(Kruskal Wallis test, $x^2 = 16.8$, $p < .001$)를 보였다. 특히 부영양 저수지는 빈영양 저수지보다 단위면적당 CH_4 배출량이 약 10배 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 지역적으로 북미, 스웨덴, 캐나다 호수와 핀란드의 호수 및 저수지에서 관찰되었으며, 얕은 호수의 메소코즘(mesocosms) 실험에서 CH_4 배출량이 1차 생산과 관련된 요인에 의해 가장 잘 예측된다는 연구결과와 일치한다(Davidson *et al.*, 2015). 이러한 결과를 근거로 IPCC의 2019년 지침(IPCC, 2019)에서는 국가별 온실가스 인벤토리 산정(Tier 2)에서 댐 저수지의 CH_4 배출량을 산정하는 경우 저수지 영양상태를 고려해서 포함할 것으로 권장한다.

반면, 저수지의 부영양화가 CO_2 의 흡수와 저감을 향상시킬 수 있다고 주장한 경우도 있다(Pacheco *et al.*, 2015). 그러나 저수지 내 식물플랑크톤의 광합성에 의한 CO_2 의 흡수효과가 일관되게 발생한다는 증거는 부족하며, 비록 CO_2 의 흡수효과가 일어난다고 하더라도 부영양화에 의한 CH_4 배출량 증가 영향보다 훨씬 작을 것으로 추정된다(Deemer *et al.*, 2016). 즉, 부영양 저수지시스템에서 발생하는 낮은 용존 산소와 높은 용존 탄소 농도 조건이 빈영양 저수지시스템에 비해 CH_4 생성을 촉진하는 것이다. 또한 부영양 상태에서 조류에 의해 공급되는 생분해성 유기물은 외부에서 유입되는 난분해성 유기물보다 CH_4 를 생산하는 고세균(archaea)의 에너지 효율을 향상시켜 CH_4 생성율을 높이는 것으로 알려져 있다(West *et al.*, 2012).

4. 결론

본 연구에서는 대청댐 저수지를 대상으로 G-res Tool을 이용하여 GHG 배출량과 발자국을 산정하였다. 연구를 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

- 1) 대청댐 건설 후 저수지는 전체 탄소 배출 플럭스 중 경로별로 CO_2 확산(Diffusion)이 109 $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/\text{yr}$ 로 가장 많았으며, 다음으로 CH_4 확산(Diffusion), 방류 시 탈기(Degassing), 수변부 기포 배출(Bubbling)은 각각 74, 48, 31 $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/\text{yr}$ 순으로 많았다.
- 2) 댐 건설 전과 후의 환경변화를 고려한 순 GHG 배출 플럭스는 510(481-542) $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{m}^2/\text{yr}$ 로 산정되었고 총 배출량은 37,113 $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{yr}$ 로 동일한 온대 기후대에 위치한 저수지에서 산정된 탄소 배출량보다 높은 수치를 나타냈다. 이는 대청댐이 건설되기 전 토지이용에 산림 비율이 커 댐 건설 후 GHG 흡수 효과가 상실된 것이 원인으로 파악된다.
- 3) 전력밀도가 낮은 대청댐 저수지의 GHG 배출강도는 86.8 $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{kWh}$ 로 산정되었고, IHA가 전세계의 500 여개의 댐 저수지를 대상으로 G-res Tool을 이용하여 산정한 수력 발전 GHG 배출강도 중앙값(23.0 $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{kWh}$)의 약 3.7 배에 해당하였다. 그러나, 대청댐 저수지의 GHG 배출강도는 화석 연료의 배출강도(820 $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{kWh}$) 보다는 9.5 배 적은 값에 해당한다.
- 4) 대청댐의 부영양화 상태에 따른 GHG 배출량 변화의 민감도를 분석한 결과, 저수지의 TP 농도가 증가함에 따라 GHG 배출량도 동시에 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 댐 저수지의 수질 개선이 최종적으로 대기중으로의 GHG 배출량을 저감할 수 있음을 의미한다.

본 연구 결과는 국내의 다양한 댐 저수지의 GHG 배출량 산정 및 탄소 발자국 평가에 활용이 가능하며 현재 국가 GHG 인벤토리에서 사용하고 있는 방법의 불확실성을 개선(댐 저수지 수질상태와 배출경로 고려 등)하는데 활용될 수 있다. 또한 연구에 사용된 방법을 이용하여 해외 수력발전 프로젝트 수행 시 탄소배출량 평가에도 활용될 가능성이 있다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사(K-water)의 개방형 혁신 R&D (21-CP-001) 사업의 일환으로 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ballantyne, A.P., Andres, R., Houghton, R., Stocker, B.D., Wanninkhof, R., Anderegg, W., Cooper, L.A., DeGrandpre, M., Tans, P.P., Miller, J.B., Alden, C., and White, J.W.C. (2015). "Audit of the global carbon budget: Estimate errors and their impact on uptake uncertainty." *Biogeosciences*, EGU, Vol. 12, pp. 2565-2584.
- Barros, N., Cole, J.J., Tranvik, L.J., Prairie, Y.T., Bastviken, D., Huszar, V.L.M., del Giorgio, P.A., and Roland, F. (2011). "Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude." *Nature Geoscience*, NP, Vol. 4, No. 9, pp. 593-596.
- Bastviken, D., Tranvik, L.J., Downing, J.A., Crill, P.M., Enrich-Prast, A. (2011). "Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink." *Science*, AAAS, Vol. 331, pp. 50-56.
- Beaulieu, J.J., DelSontro, T., and Downing, J.A. (2019). "Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century." *Nature Communications*, NP, Vol. 10, No. 1, 1375. doi: 10.1038/s41467-019-09100-5
- Choi, S.W., Kim, H.Y., and Kim, J. (2015). "Development of 'Carbon Footprint' concept and its utilization prospects in the agricultural and forestry sector." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, KSAFM, Vol. 17, No. 4, pp. 358-383.
- Chung, S.W., Ko, I.H., and Oh, J.K. (2005). "Simulations of temporal and spatial distributions of rainfall-induced turbidity flow in a reservoir using CE-QUAL-W2." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 8, pp. 655-664.
- Chung, S.W., Yoo, J.S., and Park, H.S. (2016). "Estimation of CO₂ emission from a eutrophic reservoir in temperate region." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 32, No. 5, pp. 433-441.
- Davidson, T.A., Audet, J., Svenning, J.C., Lauridsen, T.L., Søndergaard, M., Landkildehus, F., Larsen, S.E., and Jeppesen, E. (2015). "Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming." *Global Change Biology*, Wiley, Vol. 21, No. 12, pp. 4449-4463.
- Deemer, B.R., Harrison, J.A., Li, S., Beaulieu, J.J., DelSontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J.F., Powers, S.M., Santos, M.A., and Vonk, J.A. (2016). "Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis." *BioScience*, AIBS, Vol. 66, No. 11, pp. 949-964.
- Goldenfum, J.A. (2018). *GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs*. The International Hydropower Association (IHA), London, UK, pp. 1-154.
- Golub, M. (2016). *Controls on temporal variation in ecosystem-atmosphere carbon dioxide exchange in lakes and reservoirs*, Department of Freshwater and Marine Sciences, Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, WV, U.S., pp. 1-152.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017a). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. Accessed 29 August 2022. <<https://earthengine.google.com/>>.
- Gorelick, N., Hancher, H., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017b). "Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone." *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, Vol. 202, pp. 18-27.
- Harrison, J.A., Prairie, Y.T., MercierBlais, S., and Soued, C. (2021). "Year-2020 global distribution and pathways of reservoir methane and carbon dioxide emissions according to the greenhouse gas from reservoirs (G-res) model." *Global Biogeochemical Cycles*, AGU, Vol. 35, No. 6, pp. 81-95.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, intergovernmental panel on climate change*. United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2011). *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*, Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *2014 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change. United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). *IPCC 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change. United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- International Energy Agency (IEA). (2015). *CO₂ emissions from fuel combustion*. Paris, France, pp. 1-548.
- International Hydropower Association (IHA) (2021). Carbon emissions from hydropower reservoirs: Facts and myths, Accessed 5 August 2022, <<https://www.hydropower.org/blog/carbon-emissions-from-hydropower-reservoirs-facts-and-myths>>.
- Ion, I.V., and Ene, A. (2021). "Evaluation of greenhouse gas emissions from reservoirs: A review." *Sustainability*, MDPI, Vol. 13, No. 21, 11621. doi: 10.3390/su132111621.
- Jiang, T., Shen, Z., Liu, Y., and Hou, Y. (2018). "Carbon footprint assessment of four normal size hydropower stations in China." *Sustainability*, MDPI, Vol. 10, No. 6. 2018. doi: 10.3390/su10062018
- Kim, S.C., Choe, B.G., Park, R.G., Jeong, Y.G., Park, J.H., and Lee, Y.J. (2019). "Classification criteria for the activation of small hydro power generation." *Water for Future*, KWRA, Vol. 52, No. 1, pp. 62-73.

- Kim, S.I. (2021) "Estimation of the marginal abatement costs of projects: Malaysia." *Journal of Climate Change Research*, KSCC, Vol. 12, No. 5-2, pp. 601-611.
- Korea Energy Agency (KEA) (2015). Weekly brief issues of energy. Vol. 19, No. 86, accessed 24 August 2022, <https://www.energy.or.kr/web/kem_home_new/info/mail/mail_list.asp?&str1=&str2=&page=23>.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2015). Korea meteorological administration weather data service, South Korea, accessed 24 August 2022, <<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>>.
- K-water (2006). *The report of sedimentation quantity*.
- K-water (2016). My-water, South Korea, accessed 24 August 2022, <<https://www.water.or.kr>>.
- K-water (2021). *Multi-purpose dam practical handbook*.
- Lee, H.S., Chung, S.W., Choi, J.K., Oh, D.G., and Heo, T.Y. (2011). "Analysis of spatial water quality variation in Daechung reservoir." *Journal of Korean Society on Water Quality*, KSWE, Vol. 27, No. 5, pp. 699-709.
- Louis, V.L., Kelly, C., Duchemin, É., Rudd, J., and Rosenberg, D. (2000). "Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate." *BioScience*, AIBS, Vol. 50, No. 9, pp. 766-775.
- Ministry of Environment (ME) (2004). Water resources management information system, South Korea, accessed 24 August 2022, <<http://www.wamis.go.kr>>.
- Ministry of Environment (ME) (2009). Water environment information system, South Korea, accessed 24 August 2022, <<https://water.nier.go.kr>>.
- Ministry of Environment (ME) (2020). *2020 National greenhouse gas inventory report*.
- Ministry of Environment (ME) (2021). *Daecheong Lake Basin organic matter balance analysis and TOC management plan*.
- Narvenkar, G., Naqvi, S.W.A., Kurian, S., Shenoy, D.M., Pratihary, A., Naik, H., Patil, S., Sarkar, A., and Gauns, M. (2013). "Dissolved methane in Indian freshwater reservoirs. Environmental monitoring and assessment." *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer, Vol. 185, No. 8, pp. 6989-6999.
- Pacheco, F.S., Soares, M.C.S., Assireu, A.T., Curtarelli, M.P., Roland, F., Abril, G., and Stech, J.L. (2015). "The effects of river inflow and retention time on the spatial heterogeneity of chlorophyll and water - air CO₂ fluxes in tropical hydropower reservoir." *Biogeosciences*, EGU, Vol. 12, No. 1, pp. 147-162.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., *et al.* (2011). "A large and persistent carbon sink in the world's forests." *Science*, AAAS, Vol. 333, No. 6045, pp. 988-993.
- Park, K.D., Jo, W.G., So, Y.H., and Kang, D.H. (2022). "Analysis of greenhouse gas research trends of hydropower dams: Focusing on foreign cases." *Journal of Environmental Science International*, KESS, Vol. 31, No. 2, pp. 195-213.
- Prairie, Y.T., Alm, J., Beaulieu, J. Barros, N., Battin, T., Cole, J., Giorgio, P., Delsontro, T., Guerin, F., Harby, A., Harrison, J., Mercier-Blais, S., Serca, D., Sobek, S., and Vachon, D. (2018). "Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: What does the atmosphere see?" *Ecosystems*, Springer, Vol. 21, No. 5, pp. 1058-1071.
- Prairie, Y.T., Alm, J., Harby, A., Mercier-Blais, S., and Nahas, R. (2017a). *The GHG Reservoir Tool (G-res) technical documentation v2.1 (2019-08-21)*. UNESCO/IHA research project on the GHG status of freshwater reservoirs. UNESCO/International Hydropower Association (IHA), London, UK.
- Prairie, Y.T., Alm, J., Harby, A., Mercier-Blais, S., and Nahas, R. (2017b). The GHG reservoir tool (G-res), UNESCO/IHA research project on the GHG status of freshwater reservoirs. Version 3.0. Accessed 09 August 2022, <<https://g-res.hydro.power.org/>>.
- Prairie, Y.T., Alm, J., Harby, A., Mercier-Blais, S., and Nahas, R. (2017c). *User guidelines for the Earth Engine functionality v2.2 (Updated 27-10-2021)*. UNESCO/IHA research project on the GHG status of freshwater reservoirs. UNESCO/International Hydropower Association (IHA), London, UK.
- Prairie, Y.T., Mercier-Blais, S., Harrison, J.A., Soued, C., del Giorgio, P., Harby, A., and Nahas, R. (2021). "A new modelling framework to assess biogenic GHG emissions from reservoirs: The G-res tool." *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, Vol. 143, 105117. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105117.
- Räsänen, T.A., Varis, O., Scherer, L., and Kumm, M. (2018). "Greenhouse gas emissions of hydropower in the Mekong River Basin." *Environmental Research Letters*, IOP, Vol. 13, No. 3, 034030. doi: 10.1088/1748-9326/aaa817.
- Rasilo, T., Prairie, Y.T., and del Giorgio, P.A. (2014). "Large-scale patterns in summer diffusive CH₄ fluxes across boreal lakes, and contribution to diffusive C emissions." *Global Change Biology*, Vol. 1, pp. 1-16.
- Renewables Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) (2021). *Renewables 2021 global status report*, Paris, France.
- U.S. Department of Agriculture (USDA) (2014). *Keys to soil taxonomy, 12th edition*, United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., U.S.
- Vachon, D., and Prairie, Y.T. (2013). "The ecosystem size and shape dependence of gas transfer velocity versus wind speed relationships in lakes." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, NSCC, Vol. 70, No. 12, pp. 1757-1764.
- West, W.E., Coloso, J.J., and Jones, S.E. (2012). "Effects of algal and terrestrial carbon on methane production rates and methanogen community structure in a temperate lake sediment." *Freshwater Biology*, Wiley, Vol. 57, No. 5, pp. 949-955.
- West, W.E., Creamer, K.P., and Jones, S.E. (2016). "Productivity and depth regulate lake contributions to atmospheric methane." *Limnology and Oceanography*, ASLO, Vol. 61, No. 1, pp. 51-61.
- Whiting, G.J., and Chanton, J.P. (1993). "Primary production control of methane emission from wetlands." *Nature*, NP, Vol. 364,

No. 6440, pp. 794-795.

- World Bank (2017). *Greenhouse gases from reservoirs caused by biogeochemical processes*. Washington, D.C., U.S.
- Worldwide Fund for Nature Korea (WWF-Korea) (2016). *Korea ecological footprint report 2016: Measuring Korea's impact on nature*.
- Yuguda, T.K., Li, Y., Luka, B.S., and Dzarma, G.W. (2020). "Incorporating reservoir greenhouse gas emissions into carbon footprint of sugar produced from irrigated sugarcane in north-eastern Nigeria." *Sustainability*, MDPI, Vol. 2020, No. 12, 10380. doi: 10.3390/su122410380.
- Zou, H., and Hastie, T. (2005). "Regularization and variable selection via the elastic net." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, RSS, Vol. 67, No. 2, pp. 301-320.