

국내 내륙습지 부문 온실가스 배출량 산정을 위한 추진 방안 연구 - 분류체계 및 배출·흡수계수를 중심으로 -

이정민* · 김형섭** · 최솔이*** · 이영진**** · 추연수***** · 이우균***** · 손요환*****†

*고려대학교 환경생태공학과 석박사통합과정생, **고려대학교 생명자원연구소 연구교수, ***국립산림과학원 산림ICT연구센터 박사연구원, ****고려대학교 환경생태공학과 석사과정생, *****국립생태원 습지연구팀 전임연구원, 인하대학교 바이오시스템융합학과 박사과정생, *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Strategies for estimating greenhouse gas emissions in inland wetlands: Classification systems and emission factors

Lee, Jeong-Min* · Kim, Hyung-Sub** · Choi, Sol-E*** · Lee, Youngjin**** · Chu, Yeonsu***** · Lee, Woo-Kyun***** and Son, Yowhan*****†

*Integrated M.S./Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Research Professor, Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul, Korea

***Postdoctoral Fellow, Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

****M.S. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

*****Junior Researcher, Wetlands Research Team, National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

*****Ph.D. student, Dept. of Biological Sciences and Bioengineering, Inha University, Incheon, Korea

*****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Wetlands store carbon in vegetation and soils, while also emitting greenhouse gases such as methane and nitrous oxide. However, there is a lack of research on estimation of greenhouse gas emissions from wetlands, leading to high uncertainty and low accuracy of quantification in national greenhouse gas inventories. To improve the accuracy of assessment, it is necessary to develop country-specific emission factors that account for unique environments. This study aimed to propose a classification system for wetlands and establish an emission factor development plan. We assessed wetlands based on wetland type (vegetation, bare ground, agricultural land, water body, etc.) using data from the 4th General Survey on National Inland Wetlands (2020) and Basic Survey on Inland Wetlands (2022). We also identified a methodology for quantifying emissions in wetlands by reviewing the IPCC guidelines. Furthermore, we analyzed national inventory reports (NIRs) from major Annex I countries to evaluate the current tier levels and the application of emission factors. We proposed classification system based on the presence of water and vegetation. Also, we established goals for developing country-specific emission factors and described the data required for the development process. These findings will contribute to the development of a framework for accurate and reliable estimation of greenhouse gas inventories in wetlands for governments and other management agencies.

Key words: Climate Change, Wetland, National Greenhouse Gas Inventory, Emission Factor, Classification System

†Corresponding author : yson@korea.ac.kr (Room No. 318, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea. Tel: +82-2-3290-3018)

ORCID 이정민 0000-0002-6730-6034
최솔이 0000-0002-9465-8174
추연수 0000-0002-8323-0746
손요환 0000-0001-5621-9894

김형섭 0000-0003-1447-0620
이영진 0009-0002-5202-0938
이우균 0000-0002-2188-359X

1. 서론

습지 생태계는 식생과 토양에 많은 양의 탄소를 저장한다(Poulter et al., 2021). 한편 기후변화에 의해 기온이 높아지고 토양의 수분 조건이 변화함에 따라 습지 토양에서의 탄소 배출이 가속될 것으로 예측되어 습지의 온실가스 배출량을 정량화하는 것의 중요성이 강조되고 있다(Carnell et al., 2018; Poulter et al., 2021). 그러나 습지의 온실가스 배출량은 침수 시간, 식생 유형 및 미생물 군집, 토양 특성 등 다양한 요인의 영향을 받으므로 추정치의 불확실성이 크다(Tangen and Bansal, 2020). 습지 생태계의 복잡성과 더불어 다양한 습지 유형에서 수행된 온실가스 배출량 관련 연구의 부족으로 인하여 국가 온실가스 인벤토리 상에서도 습지 부분의 산정 수준이 타 부문에 비하여 일반적으로 낮다.

2022년 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면 우리나라 침수지의 CH₄ 배출량은 2006 IPCC 가이드라인의 부록에 제시된 산정방법론에 따라 기본 배출·흡수계수와 인공 침수지(구거, 유지, 양여장) 면적을 활용하여 도출되었다(GIR, 2022; IPCC, 2006). 그러나 IPCC 가이드라인에서 제공하는 기본 배출·흡수계수는 국내 유역과 댐 저수지 특성을 반영하기 어려운 동시에 탄소 배출 경로를 종합적으로 고려하지 않으므로 산정에 활용할 경우 추정치의 불확실성이 높다는 한계를 가진다(Min et al., 2022). 한편, 국내 연안습지(갯벌)와 저수지 주변에 조성된 인공 내륙습지의 온실가스 배출량을 추정한 연구가 일부 수행된 바 있으나(Kim, 2007; Kim and Na, 2013), 소규모 지역을 대상으로 하여 국가 단위의 배출량 산정에 활용되기 어렵다.

국가 온실가스 인벤토리는 온실가스 배출량 파악뿐만 아니라 온실가스 감축 목표 설정 및 정책 수립을 위한 근거자료로 활용될 수 있으므로 정확하고 신뢰성 있게 추정해야 한다(GTC, 2022). 온실가스 인벤토리 산정의 정확성을 높이기 위해서는 국내 내륙습지의 온실가스 배출 특성을 반영할 수 있는 국가 온실가스 배출·흡수계수(이하 국가 배출·흡수계수) 개발이 필요하다. 2022년 연안습지의 2개 항목(해초대 토양유기탄소 흡수계수, 해초대 토양탄소 저장량)에 대한 국가 배출·흡수계수가 승인된 바 있으나 내륙습지의 산정에 활용할 수 있는 국가 배출·흡수계수는 개발되지 않았다.

습지는 하천, 저수지, 수변부의 식생이 있는 지역 등 다양한 유형으로 구분되는데 각 유형의 수문학적, 생태학적 특

성의 차이로 인하여 온실가스 배출양상 또한 다르다(Sharma et al., 2021). 따라서 습지 부문의 산정에 활용할 국가 배출·흡수계수를 개발하기에 앞서 국내 습지의 유형별 온실가스 배출 특성을 적절히 반영할 수 있는 분류체계를 정립하고 단계별 개발 목표를 수립하는 과정이 필요하다.

국가 배출·흡수계수 개발에는 많은 시간과 인력이 소모되므로, 온실가스 배출 비중이 큰 항목을 먼저 개발하고 배출 비중이 크지 않은 항목을 순차적으로 개발하여 산정의 완전성을 높여 나가야 한다(Han et al., 2017). 그러나 내륙습지의 경우 전국 단위로 온실가스 배출량을 추정한 연구가 미비하여 산정항목별 배출량을 파악하기 어려우며, 국외 온실가스 인벤토리 보고 사례에서도 일부 항목(바이오매스, 침수지 온실가스 배출 등)에 대해서만 온실가스 배출량을 추정하고 있기 때문에 배출 비중에 기반한 우선순위 도출에 활용하기 어렵다. 따라서 본 연구는 국내 내륙습지의 유형별(하천, 저수지, 식생 등) 면적 비중을 파악하고자 전국 내륙습지 일반조사를 통해 구축된 내륙습지 면적을 검토하였다. 또한 온실가스 인벤토리 산정의 지침인 IPCC 가이드라인과 국외 온실가스 인벤토리 보고 사례를 바탕으로 산정항목별 산정 수준 및 국가 배출·흡수계수 활용 여부를 파악하였다. 그리고 이러한 결과를 종합하여 국내 온실가스 인벤토리 산정에 적용할 수 있는 내륙습지 분류체계 및 단계별 국가 배출·흡수계수 개발 목표를 제안하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 국내 내륙습지 유형별 면적

국내 내륙습지 유형별 면적은 제4차 전국내륙습지 일반조사(2020)와 내륙습지 기초조사(2022) 자료를 바탕으로 도출하였다(National Institute of Ecology, 2020, 2022). 이때 제4차 전국내륙습지 일반조사는 환경부의 토지피복도 작성지침을 토대로 권역별(한강권역, 영산강권역, 낙동강권역, 금강권역, 강원권역 등)로 내륙습지 면적을 분류하였다(대분류: 식생, 비식생, 중분류: 인공나지, 자연나지, 농경지, 수역 등, 세분류: 목본 우점, 초본 우점, 제방, 농경지, 댐, 하천, 산지 등). 본 연구는 전국 내륙습지의 세분류 면적의 비중을 비교하기 위하여 권역별로 도출된 면적을 종합하였다. 내륙습지에 분포하는 식생 영역 중 식물 군락별(갈대군락, 버드나무군락 등) 면적은 내륙습지 기초조사(2022) 자료를 바탕으로 도출하였다.

2.2. 습지 부문 IPCC 가이드라인 분석

습지 부문 산정 가이드라인을 제공하는 2006 IPCC 가이드라인(2006 가이드라인), 2006 IPCC 가이드라인 국가 온실가스 인벤토리 습지 부문에 대한 보충서(2013 습지 보충서), 2006 가이드라인 2019 IPCC 지침 개선보고서(2019 가이드라인)에 제시된 CO₂ 및 CH₄ 배출·흡수량 산정식 및 산정에 필요한 배출·흡수계수를 파악하였다(IPCC, 2006, 2014, 2019). IPCC 가이드라인은 습지 세부 유형을 침수지, 이탄지, 연안습지, 내륙습지, 폐수처리 목적으로 형성된 습지 등으로 구분하여 산정방법론을 제공하나, 본 연구에서는 국내 이탄지 면적이 극히 작아 국가 온실가스 인벤토리 산정에서 제외되고 있음을 고려하여 분석 범위를 이탄지를 제외한 내륙습지로 한정하였다.

2.3. 주요 부속서 I 국가 산정 사례

기후변화협약(UNFCCC)에 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR; National Inventory Report)를 제출하는 부속서

I 국가(44개국) 중 내륙습지 부문의 온실가스 인벤토리 산정에 자국의 환경을 반영하여 도출한 국가 배출·흡수계수를 적용한 국가(노르웨이, 독일, 미국, 스위스, 캐나다 등)의 2022년 국가 온실가스 인벤토리 보고서를 분석하였다. 이를 바탕으로 국가별 내륙습지의 하위 분류체계, 산정방법론 및 산정 수준, 산정에 활용된 배출·흡수계수 등을 파악하였다.

3. 결과

3.1. 국내 내륙습지 유형별 면적

제4차 전국내륙습지 일반조사(2016 ~ 2020)에서 도출된 국내 내륙습지 유형별 면적에 따르면 수역(58.6%)과 식생이 있는 지역(33.9%)이 내륙습지의 대부분을 차지하였으며, 강원 지역에서는 식생이 있는 지역이 전체 내륙습지 면적의 40% 이상을 차지하였다(Table 1). 금강권역 및 한강, 낙동강 권역 일부를 대상으로 수행된 내륙습지

Table 1. The area of wetlands classified by wetland types derived from the 4th general survey on national Inland wetlands (2016 ~ 2020).

		Area (km ²)						Sum	Percentage (%)
		Han river	Youngsan river	Nakdong river	Geum river	Gangwon			
Vegetation	Non-woody vegetation	218.07	188.50	240.41	313.18	246.80	1206.96	31.4	
	Woody vegetation	20.15	13.10	24.44	14.45	23.81	95.95	2.5	
Artificial bare ground	Ecological park	0.27	0.51	0.98	0.13	0.88	2.77	0.1	
	Parking lot	0.23	0.05	0.09	0.24	0.15	0.76	0.0	
	Levee	6.26	3.61	0.00	7.14	9.29	26.30	0.7	
	Greenhouse cultivation area	0.37	0.01	0.85	0.05	0.00	1.28	0.0	
	Dam / Weir	1.09	0.81	0.96	1.18	1.51	5.55	0.1	
	Etc.	5.53	4.07	6.02	7.80	5.23	28.65	0.7	
Natural bare ground	Sand	19.97	6.82	15.50	18.23	43.24	103.76	2.7	
	Gravel	6.39	11.34	7.47	4.91	17.89	48.00	1.2	
	Clay	7.87	0.72	0.54	1.46	0.09	10.68	0.3	
	Etc.	5.53	7.35	0.00	0.00	4.62	17.50	0.5	
Agricultural land	Paddy field	1.58	2.57	0.50	17.18	0.89	22.72	0.6	
	Upland field	1.27	3.76	5.11	5.67	1.72	17.53	0.5	
Water body	River	301.27	179.88	337.63	289.58	173.17	1281.53	33.3	
	Lake	129.04	261.38	164.76	296.06	122.45	973.69	25.3	
Sum		724.89	684.48	805.26	977.26	651.737	3843.627	100	

기초조사(2022)에 따르면 식물군락 중에는 달뿌리풀군락 (107.8 km²)이 가장 넓은 면적을 차지하였으며, 갈대군락 (64.1 km²), 버드나무군락(17.4 km²) 순으로 넓은 면적을 차지하였다.

3.2. 습지 부문 IPCC 가이드라인

일반적으로 AFOLU(Agriculture, Forstry, and Other Land Use) 분야는 2006 가이드라인의 산정방법론과 기본 배출·흡수계수를 2019 가이드라인에서 최신화하는 것이 일반적이나, 습지 부문의 경우 2006 가이드라인에서 산정 방법론이 명확하게 제시되지 않아 2013 습지 보충서, 2019 가이드라인에서 전반적인 개정이 이루어졌다. 각 가이드라인은 습지의 세부 유형 및 산정항목별 산정식과 기본 배출·흡수계수를 제공한다.

IPCC 가이드라인에 따라 산정의 수준(Tier)은 산정방법론과 배출·흡수계수의 고도화된 정도에 따라 세 단계로 구분되는데 Tier 1은 IPCC 가이드라인에서 제공하는 기본 배출·흡수계수를 적용하는 가장 간단한 방법론이며, Tier 2는 국가에서 개발된 국가 고유의 배출·흡수계수를 적용하는 방법론이고, Tier 3는 모델링 등을 활용하여 전국 단위의 탄소 저장량 변화량을 추정하는 가장 고도화된 방법론이다. 또한, IPCC 가이드라인은 토지 전용에 의해 발생하는 온실가스 배출량을 산정에 포함하기 위하여 습지를 20년 전부터 현재까지 습지로 유지된 습지(습지로 유지된 습지)와 20년 전에는 습지가 아니었지만 타토지에서 전용된 습지(타토지에서 전용된 습지)로 구분한다.

2006 가이드라인은 습지를 관리되는 이탄지와 침수지로 구분하였다. 2006 가이드라인은 침수지의 CH₄ 배출량 산정에 대한 공식적인 방법론을 제공하지 않으나, 부록(Appendix 3)에 CH₄ 배출량 산정식과 기본 배출·흡수계수를 제공하였다(Eq. 1).

2013년 습지 보충서에서는 침수된 내륙 유기 토양, 재침수된 유기 토양, 연안습지, 내륙습지 무기 토양, 폐수 처리 목적으로 형성된 습지에 대한 산정방법론을 제시하였다. 연안습지에 대해서는 바이오매스, 고사유기물(Dead Organic

Matter; DOM), 토양 탄소 축적 변화량 산정방법론을, 유기 및 무기 토양에 대해서는 CO₂ 및 CH₄ 배출량 산정방법론을 제공하였다. 바이오매스 및 고사유기물 탄소 축적 변화량은 2006 가이드라인의 산정방법론인 획득손실법(gain-loss method) 또는 축적차이법(stock-difference method)을 적용하여 산정하도록 명시하였다(Eq. 2, Eq. 3, and Eq. 4). 2013 습지 보충서는 습지에서 자라는 식생에 의한 바이오매스 및 고사유기물 탄소 축적 변화량의 산정 방법론을 제시한 첫 지침이며 기본 배출·흡수계수로 연안습지의 맹그로브류의 지상부 바이오매스 생장률, 탄소 분율, 지상부-지하부 비율, 목재기분밀도, 고사유기물 탄소 축적량 등을 제공하였다.

2019 가이드라인은 침수지를 저수지와 기타 수역(연못, 도랑 등)으로 구분하여 산정방법론 및 기본 배출·흡수계수를 제시하였다. 또한, 2006 가이드라인의 부록에 제시된 침수지의 CH₄ 배출량 산정방법론 및 기본 배출·흡수계수를 최신화하여 제공하였다(Eq. 5, Eq. 6, and Eq. 7). 2019 가이드라인의 부록은 개별 저수지의 유역 특성 및 환경 조건을 고려하여 온실가스 배출량을 추정하는 모델인 G-res Tool을 바탕으로 배출·흡수계수를 도출하는 방법론을 제시하였다.

3.3. 주요 부속서 I 국가 산정 사례

각 국가는 온실가스 인벤토리 산정에 활용할 수 있는 면적자료를 고려하여 습지의 세부 분류체계를 구축하였으며, 산정에 활용할 수 있는 국가 배출·흡수계수가 있는 경우 Tier 2 수준으로, 없는 경우 IPCC 가이드라인의 기본 배출·흡수계수를 적용하여 Tier 1 수준으로 산정하였다(Table 1). 미국, 독일 등 습지 부문에서의 고도화된 산정을 하는 국가는 습지를 침수지와 육상 습지(연안 및 내륙)로 구분하여 CO₂ 및 CH₄ 배출량을 추정하였다. 이는 침수지에서는 확산, 탈기, 기포 배출 등을 통한 온실가스 배출이 일어나지만, 육상 습지에서는 식생의 광합성, 토양의 미생물 호흡 등을 통한 온실가스 흡수 및 배출이 발생하므로, 서로 다른 온실가스 배출 기작을 반영할 수 있는 활동자료와 배출·흡수계수가 요구되기 때문이다. 그러나

$$CH_4emissions_{WWflood} = P \cdot E(CH_4)_{diff} \cdot A_{flood_total_surface} \cdot 10^{-6} \quad (Eq. 1)$$

$CH_4emissions_{WWflood}$ = total CH₄ emissions from flooded land, Gg CH₄ yr⁻¹

P = ice-free period, days yr⁻¹

$E(CH_4)_{diff}$ = averaged daily diffusive emissions, kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹

$A_{flood_total_surface}$ = total flooded surface area, including flooded land, lakes and rivers, ha

Gain-loss method: $\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L$ (Eq. 2)

Stock-difference method: $\Delta C_B = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{t_2 - t_1}$ (Eq. 3)

$C = A \cdot V \cdot BEF \cdot D \cdot (I+R) \cdot CF$ (Eq. 4)

ΔC_B = annual change in carbon stocks in biomass/dead organic matter, ton C yr⁻¹

ΔC_G = annual increase in carbon stocks, considering the total area, ton C yr⁻¹

ΔC_L = annual decrease in carbon stocks, considering the total area, ton C yr⁻¹

C_{t_2} = total carbon in biomass/dead organic matter, ton d.m. ha⁻¹

C_{t_1} = total carbon in biomass/dead organic matter, ton d.m. ha⁻¹

C = total carbon in biomass for time t_1 to t_2

A = area, ha

V = merchantable growing stock volume, m³ ha⁻¹

R = ratio of below-ground biomass to above-ground biomass

CF = carbon fraction of dry matter, ton C (ton d.m.)⁻¹

BEF = biomass expansion factor

D = basic wood densities, ton d.m. m⁻³

$F_{CH_4tot} = F_{CH_4res} + F_{CH_4downstream}$ (Eq. 5)

$F_{CH_4res} = \alpha(EF_{CH_4} \cdot A)$ (Eq. 6)

$F_{CH_4downstream} = \alpha(EF_{CH_4} \cdot A) \cdot R_d$ (Eq. 7)

F_{CH_4tot} = total annual emission (removal) of CH₄, kg CH₄ yr⁻¹

F_{CH_4res} = annual reservoir surface emissions of CH₄, kg CH₄ yr⁻¹

$F_{CH_4downstream}$ = annual emissions of CH₄ originating from the reservoir but emitted downstream of dam, kg CH₄ yr⁻¹

A = total area of reservoir water surface for reservoir, ha

EF_{CH_4} = emission factor for CH₄ emitted from the reservoir surface for reservoir, kg CH₄ yr⁻¹

R_d = a constant equal to the ratio of total downstream emission of CH₄ to the total flux of CH₄ from the reservoir surface, dimensionless

α = emission factor adjustment for trophic state in reservoir, dimensionless

미국, 독일 등의 국가를 제외한 대부분의 국가는 IPCC 가이드라인의 기본 배출·흡수계수를 적용하여 Tier 1 수준으로 침수지의 온실가스 배출량을 추정하였다.

침수지 외 습지 유형(식생이 있는 내륙습지 및 연안습지)의 탄소 축적 변화량은 미국, 독일과 같이 국가 단위의 조사 체계가 구축되어 있거나, 활용할 수 있는 국가 배출·흡수계수가 있는 국가만 Tier 2 수준으로 보고하였다. 타 토지에서 전용된 습지는 토지 침수에 따라 전용 전 토지에 저장되어 있던 바이오매스, 고사유기물 탄소 축적량이 전용 첫해에 모두 손실된다는 가정(IL; Immediately Lost)을 적용하는 것이 일반적이었다.

아래는 주요 Annex I 국가 중 Tier 2 이상의 방법론에 따라 습지 부문에서 온실가스 배출량을 산정한 국가의 NIR에 제시된 습지 하위 분류체계, 산정 수준(Tier), 계산에 적용된 배출·흡수계수를 분석한 내용이다(Table 2).

3.3.1. 노르웨이

노르웨이는 교목이 자라는 습지와 이탄 추출 지역의 탄소 축적 변화량을 산정하였으며, 이 밖의 유형은 산정하지 않음(NE; Not Estimated)에 따라 습지의 하위 유형 분류 체계를 NIR 보고서에 명시하지 않았다. 교목이 자라는 습지는 국가산림자원조사(NFI; National Forest Inventory)

에 포함되므로, 해당 자료를 기반으로 Tier 3 방법론에 따라 산정하였다. 습지로 유지된 습지의 고사유기물과 무기 토양 탄소 축적 변화량은 일어나지 않음(NO; Not Occuring)으로 보고하였으며, 산림지에서 전용된 습지의 고사유기물 및 무기 토양 탄소 축적 변화량은 Tier 1 방법론을 따라 전용 전 토지의 고사유기물 탄소 축적량은 전용 첫해에 모두 배출되는 것으로, 무기 토양의 탄소 축적 변화는 없는 것으로 가정하였다.

3.3.2. 독일

독일은 습지의 하위 유형을 육상 습지, 이탄지, 그리고 수면부(water)로 구분하였으며, 국가산림자원 인벤토리, Color-InfraRed 자료, Basis-DLM 등을 활동자료로 활용하였다. 바이오매스, 고사유기물, 유기 토양, 무기 토양의 탄소 축적 변화량을 보고하였다. 독일은 초지 부문의 산정 방법론 및 배출-흡수계수를 활용하여 바이오매스와 토양 탄소 축적 변화량을 산정하였다. 육상 습지에 교목 또는 관목이 1/3, 초본류가 2/3의 비율로 분포한다고 가정하여 바이오매스 탄소 축적량을 도출하였으며, 토지 전용 이후 12년 동안 탄소 축적량이 증가하다가 평형상태에 도달한다고 가정하였다. 무기토양의 탄소 축적 변화량은 타토지에서 전용된 습지에 대해서만 산정하였으며 전용 전 토양 탄소 축적량과 전용 후 탄소 축적량의 차이를 전용 기간(20년)으로 나누어 계산하였다. 그 결과, 농경지, 정주지, 목본 식생이 없는(non-woody) 습지에서는 토지 전용에 따라 탄소 흡수가 발생하는 것으로, 산림지와 목본 식생이 있는(woody) 습지에서는 토지 전용에 따른 탄소 배출이 발생하는 것으로 나타났다.

3.3.3. 미국

미국은 습지의 하위 유형을 이탄지, 연안습지, 침수지로 구분하였으며, 활동자료 구축에는 농무부의 국가 자원 인벤토리, 산림청의 산림 인벤토리, 다해상도 토지특성 컨소시엄의 국가 토지피복 데이터셋 등의 자료를 활용하였다. 그리고 미국은 습지의 하위 유형 간의 토지이용 변화에 따른 탄소 축적 변화량도 산정하였다. 식생이 있는 연안습지의 바이오매스 탄소 축적량은 현장조사 데이터와 원격 탐사에 의한 지상 바이오매스 매핑을 결합한 국가 조사를 통해 도출하였다. 수고가 작아 산림으로 분류되지 않는 맹그로브류의 지상 바이오매스 탄소 축적량은 Lu and Megonigal (2017)의 메탄분석에서 도출된 값을 활용

하였으며, 지상부-지하부 비율은 IPCC 기본값(IPCC, 2014)을 적용하였다. 그리고 고사유기물 탄소 축적량은 아열대 하구 산림 습지에 대해서만 IPCC 기본값(IPCC, 2014)를 활용하여 산정하였다. 토양 탄소 축적 변화량은 기존 연구 문헌들을 종합하여 5가지 습지 유형별(연안-관목, 연안-산림, 하구-산림, 하구-관목, 하구-정수식물)로 도출하였다(Lu and Megonigal, 2017). 미국의 인벤토리 산정 결과에 따르면 농경지, 초지, 정주지, 기타토지에서 식생이 있는 연안습지로 전용될 때는 탄소가 흡수되지만, 산림지에서 식생이 있는 연안습지로 전용될 때는 탄소가 배출되는 것으로 나타났다. 침수지의 CH₄ 배출량은 2019 가이드라인의 Tier 1 방법론에 따라 추정되었으며, 각 주의 CH₄ 배출량을 종합하여 국가 총배출량을 산출하였다.

3.3.4. 스위스

스위스는 습지의 하위 유형을 호수 및 강을 포함하는 수면부(surface water)와 소택지, 해안 식생 등을 포함하는 비생산 습지로 구분하였으며, 활동자료 구축에는 스위스 연방 통계청의 스위스 토지 이용 통계를 활용하였다. 관리되는 초지, 관목류 및 교목류 등으로 구성된 비생산 습지의 고사유기물 탄소 축적량은 0으로 가정하였으며, 바이오매스 탄소 축적량은 6.50 ton C ha⁻¹, 유기 토양 탄소 축적량은 240 ton C ha⁻¹ (0-30 cm)로 추정되었다(Mathys and Thürig, 2010). 습지로 유지된 습지에서 바이오매스, 고사유기물, 무기 토양 내 탄소 축적량이 변화하지 않는다고 가정하였으며, 비생산 습지의 유기 토양 탄소 축적 변화량은 Tier 2 방법론에 따라 산정하였다. 타토지에서 전용된 습지의 탄소 축적 변화량은 전용 전과 후의 탄소 축적량 차이를 전용 기간(20년)으로 나누어 추정하였다. 침수지의 CH₄ 배출량은 습지 세부 유형별로 조사된 배출량에 습지 세부 유형별 면적을 고려하여 도출하였다(Hiller et al., 2014).

3.3.5. 캐나다

캐나다는 습지의 하위 유형을 침수지와 이탄지로 구분하였으며, 활동자료 구축에는 캐나다 저수지 데이터베이스(Canadian Reservoir Database) 자료를 이용하였다. 캐나다는 1993년 이후부터 수행된 저수지의 CO₂ 배출량에 관한 연구를 종합하여 CO₂ 배출 곡선을 도출하고 이를 배출량 산정에 활용하였다. 기존의 연구 자료 총 측정 방법과 비교 가능성을 고려하여 25개 저수지의 측정값 총 34

Table 2. Wetland greenhouse gas inventory of Annex I countries (2022)

Nation	Land-use class	GHG category	Pool	Method applied	EF	Reference
Canada	Land converted to flooded land	CO ₂	Forest biomass removal prior to flooding	Tier 3	M	Environment and Climate Change Canada, 2022
	Flooded land		Surface of reservoirs	Tier 2	CS	
Germany	Terrestrial wetlands	CO ₂	Biomass	Tier 2	CS	Federal Environment Agency, 2022
			DOM	Tier 2 & IL	-	
			Mineral soils	Tier 2	CS	
	Waters	CO ₂	Biomass	Tier 2 & IL	-	
			DOM	Tier 2	CS	
			Mineral soils	NO	-	
Norway	Wetlands remaining wetlands	CO ₂	Living biomass	Tier 3	M	The Norwegian Environment Agency, 2022
			DOM and mineral soil	NO	-	
			Mires with ditches - organic soil	Tier 1	D (IPCC, 2014)	
			Unmanaged wetlands - organic soil	NA	-	
	Land converted to wetlands	CO ₂	Living biomass - NFI recorded	Tier 3	-	
			Living biomass - grassland to wetlands	Tier 1 & IL	D (IPCC, 2006)	
			Dead organic matter	Tier 1 & IL	D (IPCC, 2019)	
			Mineral soil	Tier 1	D (IPCC, 2019)	
			Organic soil	Tier 1	D (IPCC, 2014)	
Switzerland	Wetlands remaining wetlands	CO ₂	Living biomass	NE	-	Federal Office for the Environment, 2022
			DOM	NE	-	
			Mineral soil	NE	-	
	Wetlands remaining wetlands - Unproductive wetland	CO ₂	Organic soil	Tier 2	CS	
	Flooded lands	CH ₄	Reservoir	Tier 2	CS	

Table 2. Wetland greenhouse gas inventory of Annex I countries (2022) (Continued)

Nation	Land-use class	GHG category	Pool	Method applied	EF	Reference
US	Vegetated coastal wetlands remaining vegetated coastal wetlands	CO ₂	Biomass	Tier 2	CS	Environmental Protection Agency, 2022
			Soil organic carbon	Tier 2	CS	
		CH ₄	Net CH ₄ flux	Tier 1	D (IPCC, 2014)	
	Vegetated coastal wetlands converted to unvegetated open water coastal wetlands	CO ₂	Biomass	Tier 2	CS	
			DOM	Tier 1	D (IPCC, 2014)	
			Soil organic carbon	Tier 2	CS	
	Unvegetated open water coastal wetlands converted to vegetated coastal wetlands	CO ₂	Biomass	Tier 2	CS	
			DOM	Tier 1	D (IPCC, 2014)	
			Soil organic carbon	Tier 2	CS	
	Flooded land remaining flooded land	CH ₄	Reservoir	Tier 1	D (IPCC, 2019)	
			Other constructed waterbodies	Tier 1	D (IPCC, 2019)	
	Land converted to vegetated coastal wetlands	CO ₂	Biomass	Tier 2	CS, D (IPCC, 2006; IPCC, 2019)	
			DOM	Tier 2	CS, D (IPCC, 2014)	
			Soil organic carbon	Tier 2	CS	
		CH ₄	Soil Methane Emissions	Tier 1	D (IPCC, 2014)	
	Land converted to flooded land	CO ₂	Reservoir	Tier 1	D (IPCC, 2019)	
Tier 1				D (IPCC, 2019)		
CH ₄		Other constructed water bodies	Tier 1	D (IPCC, 2019)		
			Tier 1	D (IPCC, 2019)		

D: IPCC Default value
 DOM: Dead Organic Matter
 CS: Country Specific
 EF: Emission Factor
 M: Model
 NA: Not Applicable
 NE: Not Estimated
 NO: Not Occurring
 IL: Immediately Lost

개를 선정하였으며, 침수 이후 경과된 기간과 CO₂ 배출량 사이의 비선형 회귀 분석을 바탕으로 CO₂ 배출 곡선을 도출하였다.

3.4. 내륙습지의 세부 분류체계 및 단계별 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발 목표

3.4.1. 내륙습지의 세부 분류체계

본 연구는 습지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위하여 내륙습지를 침수지(water body)와 침수되지 않은 토지(non-water body)로 구분하고 침수되지 않은 토지를 식생 유무에 따라 식생이 있는 지역과 식생이 없는 지역으로 구분하는 것을 제안한다(Figure 1). 내륙습지를 침수지와 침수되지 않은 토지로 구분하는 것은 가장 단순한 대분류 체계로 식생에 의한 탄소 흡수 및 배출량을 산정에 포함하고 있는 미국, 독일 등 국가에서도 동일한 분류체계를 적용하였다. 식생이 있는 지역의 하위 분류체계는 목본류와 초본류로 구분하였는데, 이는 현재 전국 내륙습지 일 반조사에서 식생이 있는 지역을 목본우점 및 초본우점으로 구분한 것을 반영한 것이다. 면적 비중이 약 7.4%인 침수되지 않은 토지의 식생이 없는 지역은 나지와 농경지로 구분하였다. 나지의 토양 탄소 축적 변화량은 '0'으로 가정할 수 있으며, 습지 내 농경지로 분류되는 토지의 온실 가스 배출량은 농경지 부문의 배출·흡수계수를 활용하여 산정할 수 있다. 그러나, AFOLU 분야 중 하나인 농경지 부문과 이중 산정 및 누락을 방지하고 산정 체계를 명확

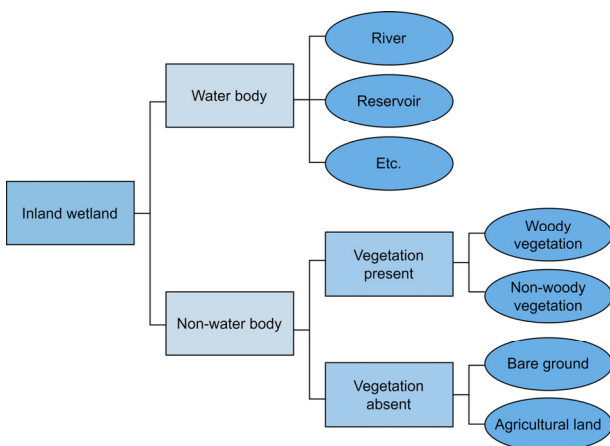


Fig. 1. The detailed classification system of inland wetlands for national greenhouse gas inventory.

히 하기 위해서는 습지 부문으로 분류되는 농경지를 농경지 부문에 편입시키기 위한 토지 구분 방안을 모색해야 한다.

3.4.2. 단계별 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발 목표

1단계 목표는 2019 가이드라인 부록에 제시된 기본 배출·흡수계수 도출 방법을 바탕으로 국내 저수지에 적용할 수 있는 Tier 1 수준의 배출·흡수계수를 개발하는 것이다 (Table 3). 해당 방법론은 경험적 모델인 G-res 모델 (Prairie et al., 2017)을 적용하여 도출한 것으로 연간 온실 가스 배출량과 환경 변수 간의 관계를 바탕으로 배출량을 추정하며, 필요한 입력자료로는 저수지 조성 이후 경과된 기간, 기온, 저수지 면적 등이 요구된다. 이를 활용하면 저수지 조성 이후 경과 연도, 면적, 기온 등을 반영한 배출·흡수계수를 도출할 수 있으므로 2006 가이드라인에 제시된 기후대별 기본 배출·흡수계수를 적용하는 것보다 산정의 정확도를 높일 수 있다. 더 나아가, G-res Tool을 직접 운용하여 국내 저수지의 CO₂ 및 CH₄ 배출량(averaged daily CO₂ emissions, averaged daily CH₄ emissions)을 직접 도출할 수 있다. 실제로 국내에서 G-res Tool을 적용하여 대청댐 저수지의 온실가스 배출량을 추정한 연구의 경우, 모델 구동에 필요한 입력자료(저수 면적, 인구, 연간 유출량, 위도/경도, 저수지 체적, 인 농도, 수위 등)를 한국 수자원공사 자료, 환경부 수질 측정망 자료, Google Earth Engine 등을 통해 확보하였다(Min et al. 2022). 이처럼 G-res Tool을 활용한다면 기존에 구축된 자료를 기반으로 배출량 추정의 정확도 및 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

2단계 목표는 식생이 있는 습지의 바이오매스 탄소 축적량(C_{after biomass})과 토양 탄소 축적량(C_{after soils})을 국가 배출·흡수계수로 개발하는 것이다(Table 3). 해당 배출·흡수계수는 타도지에서 전용된 내륙습지의 탄소 축적 변화량 추정에 활용되는 값으로 전용 전(산림지, 농경지 등)의 탄소 축적량(C_{before})이 전용 기간에 걸쳐 전용 후(내륙습지) 탄소 축적량에 도달한다는 가정하에 활용될 수 있다. 전용 기간은 IPCC 가이드라인에 제시된 전용 기간인 20년을 적용할 수 있으며, 독일과 같이 자체적인 전용 기간(예: 12년)을 도출하여 산정에 활용할 수 있다. 내륙습지의 바이오매스 탄소 축적량을 국가 배출·흡수계수로 개발하기 위해서는 내륙습지의 주요 수종의 바이오매스확장 계수, 부리함량비, 목재기본밀도 등의 항목에 대한 국가 배출·흡수계수 개발과 전국 단위의 식생 조사 및 토양 조

Table 3. Emission factor development plan for national greenhouse gas inventory in wetlands

Step	Pool	Emission factor	Methods	Required data
1	Water body	Averaged daily CO ₂ emissions	G-res model adaptation	Reservoir age since construction (yr) Temperature factor derived from air temperature (°C) Surface area of reservoir (km ²) Soil organic carbon from 0-30 cm (kg m ⁻²)
		Averaged daily CH ₄ emissions	G-res model adaptation	Reservoir age since construction (yr) Temperature factor derived from air temperature (°C) Percentage of reservoir area, surface area of reservoir < 3 m deep (%) Mean daily solar irradiance (kWh m ⁻² d ⁻¹)
2	Terrestrial wetland	Biomass Biomass carbon stock per area (C _{after_biomass})	Field measurement	Woody vegetation Biomass allometric equations of major species Tree inventory data (species, DBH, height, etc.) Woody vegetation area (ha)
		Soils Soil carbon stock per area (C _{after_soils})	Field measurement	Non-woody vegetation Non-woody vegetation area (ha) Terrestrial wetland area (ha) Soil sampling data (carbon fraction, bulk density, etc.)

사가 필요하다. 단위 면적당 바이오매스 탄소 축적량은 독일의 보고 사례와 같이 전체 식생 면적 중 목본류와 초본류가 차지하는 비율을 조사하고, 목본류와 초본류의 단위 면적당 바이오매스 탄소 축적량에 해당 비율을 적용하여 도출할 수 있다. 이때, 목본류의 바이오매스 탄소 축적량은 산림지에서 개발된 상대생장식을 적용하거나 버드나무와 같은 습지의 주요 수종을 대상으로 새로운 상대생장식을 개발·적용하여 도출할 수 있다. 초본류의 바이오매스 탄소 축적량은 초지에서 개발된 값을 차용하거나 보수적 관점에서 '0'으로 가정할 수 있다. 더 나아가 내륙습지 식생 면적에서 가장 큰 비중을 차지하는 달뿌리풀군락과 갈대군락의 단위 면적당 바이오매스 탄소 축적량을 초본류의 배출·흡수계수로 도출하여 산정에 활용할 수 있다. 식생이 있는 습지의 토양 탄소 축적량을 국가 배출·흡수계수로 개발하기 위해서는 국내 내륙습지를 대표할 수 있는 값을 도출하기 위한 표본 설계가 필요하다. 내륙습지 토양의 탄소 축적량은 식생 유형(목본, 초본 등), 지역, 기후, 함수율 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로 이를 고려한 표본 설계가 필요하다(Uhran et al., 2021; Xia et al., 2022; Yoo et al., 2022).

2단계 개발 목표인 바이오매스 탄소 축적량과 토양 탄소 축적량은 한 시점의 탄소 축적량을 나타내는 배출·흡수계수이다. 더 나아가 바이오매스 및 토양 탄소 축적량

을 주기적으로 조사한다면 측정 시점 간의 축적량 차이를 바탕으로 축적 변화량을 추정하는 축적차이법을 이용해 연간 탄소 축적 변화량을 도출할 수 있다. 일정 주기를 가진 조사를 전 국토에 걸쳐 수행하는 것에는 많은 인력과 시간이 소모되므로 5년 주기로 수행되는 내륙습지 기초·정밀조사에 수목 조사(흉고직경, 수고 등) 또는 토양 조사를 추가하여 수행하는 방법을 고려할 수 있다.

4. 결론

습지는 탄소 저장 및 흡수에 기여함과 동시에 온실가스 배출원이므로 습지 부문의 정확한 온실가스 인벤토리 산정은 기후변화 대응 정책의 수립 및 시행에 있어 핵심적인 요소이다. 특히 습지 유형을 세분화하고 국가 배출·흡수계수를 개발하여 국내 배출량을 추정하는 것은 온실가스 인벤토리의 산정 수준 및 정확도 향상에 있어 필수적이며, 장기적 관점에서 습지의 탄소 축적량 및 온실가스 배출량을 지속적으로 모니터링 하는 것은 모델을 활용한 Tier 3 수준의 산정으로 나아가는 데 필요한 과정이다.

본 연구는 IPCC 가이드라인과 주요 부속서 I 국가의 온실가스 인벤토리 보고서를 검토하여 습지 부문 산정방법론 및 산정에 활용된 배출·흡수계수를 파악하였으며 국내 내륙습지 유형별 면적을 도출하였다. 이를 바탕으로

내륙습지의 세부 분류체계와 단계별 국가 배출·흡수계수 개발 목표를 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 내륙습지 부문 분류체계 및 단계별 배출·흡수계수 개발 목표는 정부 및 관련 기관에서 습지 부문 온실가스 인벤토리 산정을 위한 체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 습지 부문 온실가스 흡수량 산정 연구(NIE-B-2023-04), 온실가스 저감을 위한 국토도시공간 계획 및 관리기술 개발 사업(23UMRG-B158194-04), 산림청 탄소흡수원 특성화 대학원 사업, 정인옥학술진흥재단의 지원에 의한 연구 결과의 일부로 작성되었습니다.

References

- 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
- Environmental and Climate Change Canada. 2022. National inventory report 1990-2020: Greenhouse gas sources and sinks in Canada.
- Environmental Protection Agency. 2022. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks.
- Federal Environment Agency. 2022. National inventory report for the German greenhouse gas inventory 1990-2020.
- Federal Office for the Environment. 2022. Switzerland's greenhouse gas inventory 1990-2020.
- GTC(Green Technology Center). 2022. Current status and implications of the LULUCF inventory system for the establishment of greenhouse gas inventory.
- Han SH, Lee SJ, Chang H, Kim S, Kim R, Jeon EC, Son Y. 2017. Priority for developing emission factors and quantitative assessment in the forestry sector. *J Clim Change Res* 8(3): 239-245 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2017.8.3.239
- Hiller RV, Bretscher D, Delsontro T, Diem T, Eugster W, Henneberger R, Hobi S, Hodson E, Imer D, Kreuzer M, Künzle T, Merbold L, Niklaus PA, Rihm B, Schellenberger A, Schroth MH, Schubert CJ, Siegrist H, Stieger J, Buchmann N, Brunner D. 2014. Anthropogenic and natural methane fluxes in Switzerland synthesized within a spatially explicit inventory. *Biogeosciences* 11(7): 1941-1960. doi: 10.5194/bg-11-1941-2014
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Kim DS. 2007. Greenhouse gas (CH₄, CO₂, N₂O) emissions from estuarine tidal and wetland and their characteristics. *J Korean Soc Atmos Environ* 23(2): 225-241 (in Korean with English abstract). doi: 10.5572/KOSAE.2007.23.2.225
- Kim DS, Na US. 2013. Characteristics of greenhouse gas emissions from freshwater wetland and tidal flat in Korea. *J Korean Soc Atmos Environ* 29(2): 171-185 (in Korean with English abstract). doi: 10.5572/KOSAE.2013.29.2.171
- Lee CS, Cho KJ, Lim JC, Yoon JD, Choo YS, Kim MJ, Yoon KS, Kwon JY, Shin YH, Kim HA, Jang DH, Lee YS, Lee SH, Yoon HY. 2020. The 4th general survey on national inland wetlands('20). Seocheon, Korea: National Institute of Ecology. NIE-Legal Research-2020-13.
- Lee CS, Park JH, Lee HC, Cho KJ, Lim JC, Shin HS, Yeo IA, Choo YS, Kim PB, Han SW. 2022. Basic survey on inland wetlands('22). Seocheon, Korea: National Institute of Ecology. NIE-A-2022-18 (in Korean with English abstract).
- Lu M, Megonigal JP. 2017. Final report for RAE baseline assessment project.
- Mathys L, Thürig E. 2010. Baumbiomasse in der

- Landschaft.
- 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 (in Korean with English abstract). doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.10.785
- 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. p. 3-20.
- Prairie YT, Alm J, Harby A, Mercier-Blais S, Nahas R. 2017. *The GHG reservoir tool (G-res tool)*. London, UK: International Hydropower Association. Technical documentation v2.1.
- Seo HW, Choi HW, Kim JY, Kim DW, Lee HH, Park SK, Kim SH, Lee SH, Kim MJ, Min SY, Park JA. 2022. 2022 National greenhouse gas inventory report of Korea. Cheongju, Korea: Greenhouse Gas Inventory & Research Center. 11-1480906-000002-10.
- Sharma SK, Phartiyal M, Madhav S, Singh P. 2021. Global wetlands. In: Sharma S, Singh P (eds). *Wetlands conservation: Current challenges and future strategies*. New Jersey: Wiley. p. 1-16.
- Tangen BA, Bansal S. 2020. Soil organic carbon stocks and sequestration rates of inland, freshwater wetlands: Sources of variability and uncertainty. *Sci Total Environ* 749: 141444.
- The Norwegian Environment Agency. 2022. *Greenhouse gas emissions 1990-2020. National Inventory Report M-2268*.
- Uhran B, Windham-Myers L, Bliss N, Nahlik AM, Sundquist ET, Stagg CL. 2021. Improved wetland soil organic carbon stocks of the conterminous U.S. through data harmonization. *Front Soil Sci* 1: 706701. doi: 10.3389/fsoil.2021.706701
- Xia S, Song Z, Van Zwieten L, Guo L, Yu C, Wang W, Li Q, Hartley IP, Yang Y, Liu H, Wang Y, Ran X, Liu CQ, Wang H. 2022. Storage, patterns and influencing factors for soil organic carbon in coastal wetlands of China. *Glob Chang Biol* 28(20): 6065-6085. doi: 10.1111/gcb.16325
- Yoo J, Kim J, Kim J, Lim J, Kang H. 2022. Soil carbon storage and its economic values of inland wetlands in Korea. *Ecol Eng* 182: 106731. doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106731