

## TECHNICAL NOTE

# 수력발전댐에서 온실가스 연구 동향 분석 : 국외 사례를 중심으로

박경덕 · 조원기 · 소윤환 · 강동환\*

부경대학교 지질환경연구소

## Analysis of Greenhouse Gas Research Trends of Hydropower Dams: Focusing on Foreign Cases

Kyoung-deok Park, Won Gi Jo, Yoon Hwan So, Dong-hwan Kang\*

*Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

### Abstract

This research summarizes the generating factors of greenhouse gas (carbon dioxide, methane, nitrous oxide) in hydropower dams and related domestic/foreign researches. Microorganisms and eutrophication are the main factors in greenhouse gases in hydropower dam reservoirs. The greenhouse gas emission from the hydropower dam is affected by meteorological factors and dam operation periods, and greenhouse gases are also emitted from the outlets. The fluxes of greenhouse gas emission from the hydropower dams were  $-926\sim 180,806$  mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>,  $-0.19\sim 3800$  mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, and  $0.01\sim 16.1$  mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>. In South Korea, the study on the greenhouse gas emission from Korean hydropower dams has been rarely, and therefore it is inquired. This research suggested the methods on the greenhouse gas emission from Korean hydropower dams and flux calculation.

**Key words** : Greenhouse gas, Hydropower dam, Emission, Flux

### 1. 서론

온실가스는 지구에서 우주로 방출되는 태양 복사에너지의 일부를 흡수함으로써 지구 표면의 온도를 일정하게 유지한다. 그러나 인간 활동으로 다량의 온실가스가 방출되어 자연적인 온실효과를 심화시킴으로써 기온이 상승하고, 이로 인해 전지구적으로 발생된 온난화 현상은 다양한 환경 문제를 유발한다(OECD, 2020). 온실가스 감축은 1992년 유엔환경개발회의(UNCED)에서 기후변화협약(UNFCCC)이 채택된 이후 선진국을 중심으로

로 수행하였으나, 2016년에 발효된 파리기후변화협정에 전 세계 국가들이 참여하면서 온실가스 배출은 세계적인 이슈로 대두되었다.

온실가스는 주로 산업계, 교통계에서 주로 배출되며(OECD, 2020), 이들은 주로 화석연료에 기반을 두고 있다. 최근에는 온실가스 발생 감소를 위해 화석연료의 사용을 줄이고 대신 태양열, 풍력, 수력 등의 신재생 에너지로의 기술개발에 주력하고 있다. 댐은 하천수 저수 및 홍수 규제 등의 이유로 오래전부터 이미 건설되고 있으며(Gunkel, 2009; Ion and Ene, 2021), 댐에서의 수력발전은

Received 29 December, 2021; Revised 18 January, 2022;

Accepted 28 January, 2022

\*Corresponding author: Dong-hwan Kang, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea  
Phone : +82-51-629-7393  
E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

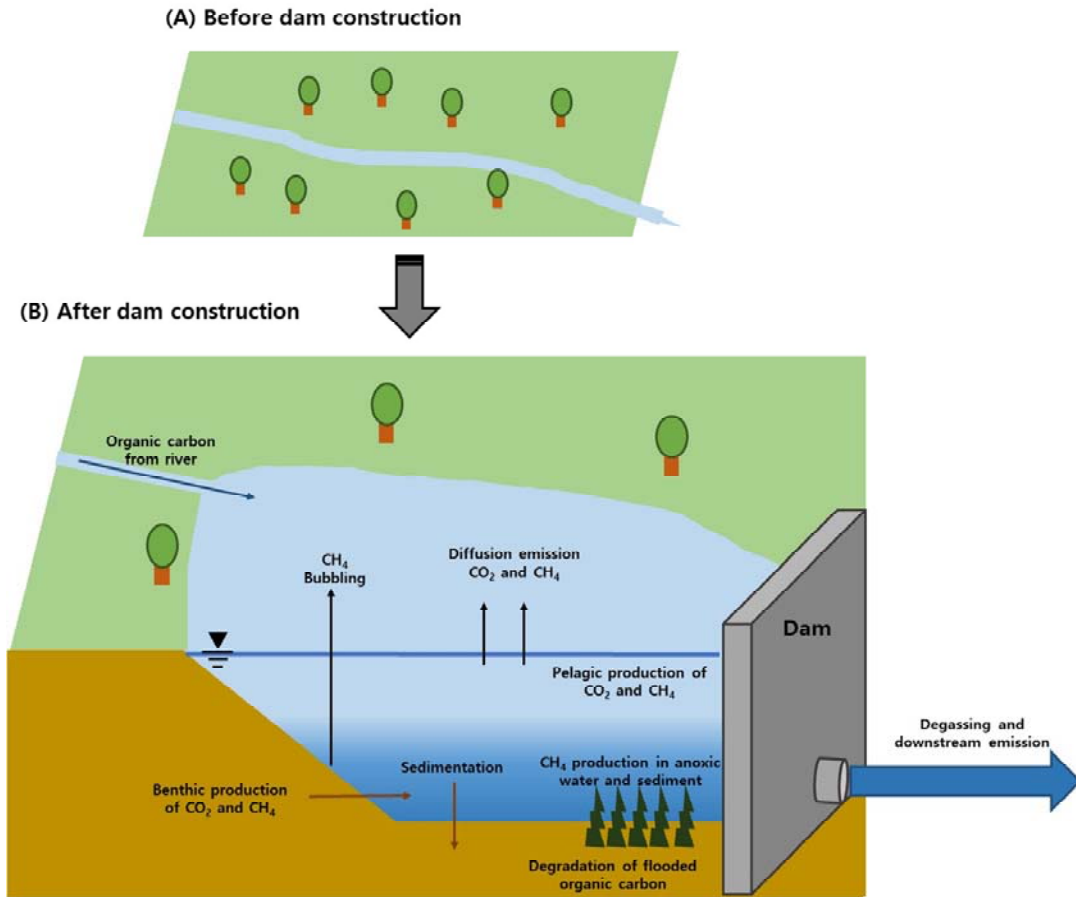


Fig. 1. Landscape transformation from a river to a dam reservoir. (A) before dam construction; (B) after dam construction.

저비용으로 오랜 시간 동안 전기 에너지를 생산할 수 있다는 점에서 지난 수십 년간 비존재 재생 에너지 (non-intermittent renewable energy)로서 각광받았다 (Bates et al., 2008). 또한 2020년 전세계 발전량의 1/6을 수력발전에서 공급하며, 풍력 및 태양광 등의 다른 재생에너지를 합친 것보다도 많은 양을 공급하는 등 수력발전의 입지는 화석연료를 대체할 수 있는 에너지 자원으로서의 가치가 크다고 볼 수 있다(IEA, 2021). 그러나 최근의 연구에서 댐에서도 온실가스인 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O가 배출되며, 열대지역의 댐에서 배출되는 온실가스는 화석 연료 사용 시 발생하는 온실가스 양과 비슷하거나 더 많다는 결과를 도출하게 됨에 따라 수력발전은 친환경 에너지로서의 효용성에 의심을 받고 있다(Giles,

2006; Rasanen et al., 2018; Song et al., 2018; St. Louis et al., 2000). 댐이 건설되면 상류에 저수지가 형성되어 주변 지역이 침수되면서 주변 식생이 사멸하여 유기물화되고, 이로 인해 기존에 존재하였던 하천에 비해 더 많은 양의 온실가스가 발생하게 된다(Fig. 1, Prairie et al., 2017). 이에 Mäkinen and Khan(2010)은 저수지에서 발생하는 온실가스 발생은 인공적인 요소에 해당하므로, 다른 온실가스 발생원과 마찬가지로 관리가 필요함을 강조하였다.

국내에서는 소양강댐, 대청댐, 남강댐 등과 4대강보에서도 수력발전을 운영하고 있으나 수력발전에서의 온실가스 발생에 관한 연구는 수행되지 않았다. 수력발전 운영과 저수지에서 발생하는 온실가스에 관한 연구는

향후 온실가스 발생 대응 측면에 있어 중요하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 국외의 사례를 정리하여 댐에서 발생하는 온실가스에 대한 발생 요인을 소개함으로써, 향후 국내 수력발전댐에서의 온실가스 조사 및 연구 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 수력발전댐에서의 온실가스 발생 인자

### 2.1. 댐 저수지에서의 온실가스 발생

#### 2.1.1. 미생물 반응에 의한 수중 온실가스 발생

가장 대표적인 온실가스인 CO<sub>2</sub>는 주로 호기성 미생물이 유기물을 분해하는 과정에서 생성된다. 반면 CH<sub>4</sub>는 산소가 거의 없는 환경에서 혐기성 미생물이 유기물을 분해하는 과정에서 생성된다(Fig. 2, Rudd and Hamilton, 1978). CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub> 모두 종속영양균이 유기물을 분해하는 과정에서 생성되므로, 저수지 내에 유기물질의 양이 많을수록 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 배출량도 함께 높아진다. 다만 CO<sub>2</sub>는 발생 과정에서 산소가 소모되므로 주로 산소가 풍부한 표층에서 주로 발생하며, CH<sub>4</sub>는 혐기성 세균에 의해 생성되므로 저층이나 퇴적물과 같이 산소가 거의 없는 환경에서 발생된다(Musenze et al., 2016; Li et al., 2018; Shi et al., 2021).

N<sub>2</sub>O는 질산화 또는 탈질 과정 중에 생성된다(Fig. 3, Richardson et al., 2009; Chen et al., 2020). 질산화 과정에서는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>로 변하는 과정에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 일부가 N<sub>2</sub>O로 변하며, 용존산소의 농도가 낮고 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 농도가 높을수록 더 많은 N<sub>2</sub>O가 생성된다(Goreau et al., 1980). 탈질 과정에서는 주로 산소의 농도가 낮은 환경에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 N<sub>2</sub>로 변하는 과정에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 일부가 N<sub>2</sub>O로 생성되며, 하천에서 생성되는 N<sub>2</sub>O의 약 26% 정도를 차지한다(Beaulieu et al., 2011). 종합하면, N<sub>2</sub>O의 생성은 주로 용존산소 농도가 적은 환경에서 생성되며, 외부에서의 무기질소의 유입량에 따라 N<sub>2</sub>O 발생량도 함께 증가하는 것으로 볼 수 있다(Richardson et al., 2009; Kahrl et al., 2010; Liu and Zhang, 2011).

#### 2.1.2. 부영양화로 인한 온실가스 발생

과도한 영양염의 유입으로 인해 발생하는 부영양화는 온실가스 발생에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 먼저, 조류와 같은 독립영양생물은 광합성을 통해 수체 및 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 유기탄소로 전환하여 다량의 조

류 기원 유기물이 생성되며(Whiting and Chanton, 1993; Yang et al., 2015), 조류의 사멸 또한 최종적으로 유기물을 공급하는 역할을 수행한다(Bastviken et al., 2011). 조류로 인해 발생한 다량의 유기물은 다시 종속 영양균에 의해 분해되어 CO<sub>2</sub>가 발생하게 된다. CO<sub>2</sub>는 조류가 광합성을 통해 재사용하지만(Tsai et al., 2017), 조류가 생산하는 유기물을 분해하는 과정에서 지속적으로 산소를 소모하게 되어 혐기성 환경이 조성되고 CH<sub>4</sub>가 생성된다(Huttunen et al., 2003; West et al., 2012; Yan et al., 2019). 수생 식물은 저층 퇴적물에서 발생하는 CH<sub>4</sub>를 CO<sub>2</sub>로 산화하는 데 일조하나(Calhoun and King, 1997; Laanbroek, 2010; Ai et al., 2019), 부영양화로 탁도가 증가하면 저층으로의 빛 투과율이 낮아져 수생생물의 생장이 억제된다(Dakos et al., 2019). 또한 조류 스컴(scum)의 발생으로 산소의 공급이 감소하여 혐기화가 가속화된다(Xing et al., 2011; Yan et al., 2019). 최근에는 남조류의 일종인 cyanobacteria가 산소가 존재하는 환경에서도 자체적으로 무기 탄소를 CH<sub>4</sub>로 전환한다는 연구가 발표되었다(Bizic et al., 2020).

N<sub>2</sub>O 또한 조류 활동에 의해서도 생성될 수 있다는 연구결과가 있다. Kamp et al.(2013)와 Weathers and Niedzielski(1986)의 연구에서는 산소가 거의 없는 어두운 환경에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>를 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>로 전환하는 이화작용의 결과로 N<sub>2</sub>O가 생성된다고 보고한 바 있으며, Burlacot et al.(2020)은 세포 내의 flavodiiron 단백질과 cytochrome p450 효소에 의해 수체 내의 NO를 N<sub>2</sub>O로 전환한다는 연구결과를 발표하였고, 조류로 인해 생성되는 N<sub>2</sub>O는 모든 강과 하구, 해안가에서 발생하는 N<sub>2</sub>O 총량의 18%를 차지하는 것으로 집계되었다(Plouviez et al., 2019). 이 외에도 cyanobacteria 중에서도 질소고정을 통해 수체로의 질소 공급에 일조하기도 한다(Bothe et al., 2010).

## 2.2. 기상변화가 온실가스 발생에 미치는 영향

### 2.2.1. 계절에 의한 영향

온대지역에 위치하면서 계절변화가 뚜렷한 지역에서는 계절적 특성에 따른 온실가스 배출량 변화에 대해서도 연구된 바 있다. 일반적으로 온실가스는 겨울보다는 여름에 더 많은 양이 배출되는데(Demarty et al., 2009; Mosher et al., 2015), 여름은 겨울에 비해 수온이 높아

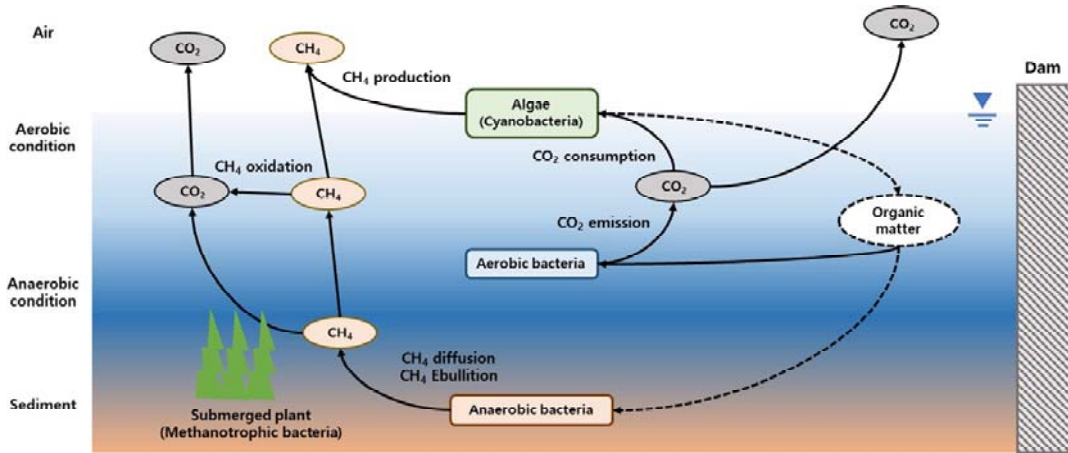


Fig. 2. Diagram of generating CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the dam reservoir.

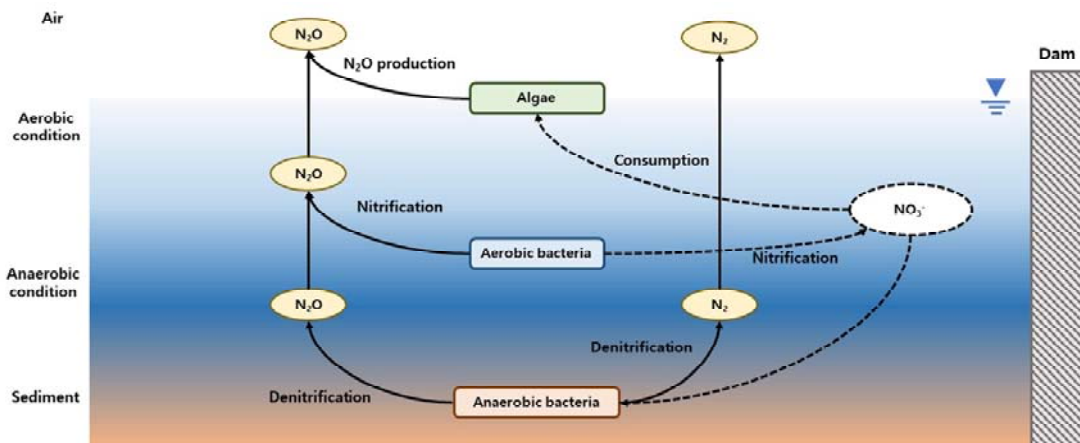


Fig. 3. Diagram of generating N<sub>2</sub>O in the dam reservoir.

미생물의 대사가 활발하며, 부영양화로 조류가 급격히 번식하면 더욱 많은 양의 온실가스가 배출되기 때문이다. 한편, 계절에 따른 기온 변화는 저수지 표층의 밀도를 변화시키므로써 저수지 내 수직 혼합에 영향을 미친다(Fig. 4, Mann and Williams, 2014). 여름철은 높은 수온으로 기체의 용해도가 감소하므로, 겨울철에 비해 여름철에 더 많은 온실가스가 발생하며(Keller and Stallard, 1994), 겨울철에는 낮은 기온으로 수표면에 얼음이 형성됨으로써 대기과 격리되어 온실가스의 배출을 억제한다(Huttunen et al., 2003; Demarty et al., 2009). 한편 여

름은 표층의 수온이 높아 성층현상을 유지함으로써 저층에 온실가스가 축적되며, 겨울은 표층이 빙결됨으로써 수체에 온실가스가 축적되는데, 봄과 가을은 바람에 의해 표층의 기온이 저층에 비해 낮아 밀도가 증가하므로 수체 내 수직적인 혼합이 자주 발생하고, 이로 인해 여름과 겨울에 축적되었던 온실가스가 급격히 방출된다(Deemer et al., 2016).

2.2.2. 강우에 의한 영향

일부 연구에서는 온실가스 배출에 강우가 미치는 영향에 대해 제시된 바 있다. 강우가 저수지 표면에 직접적

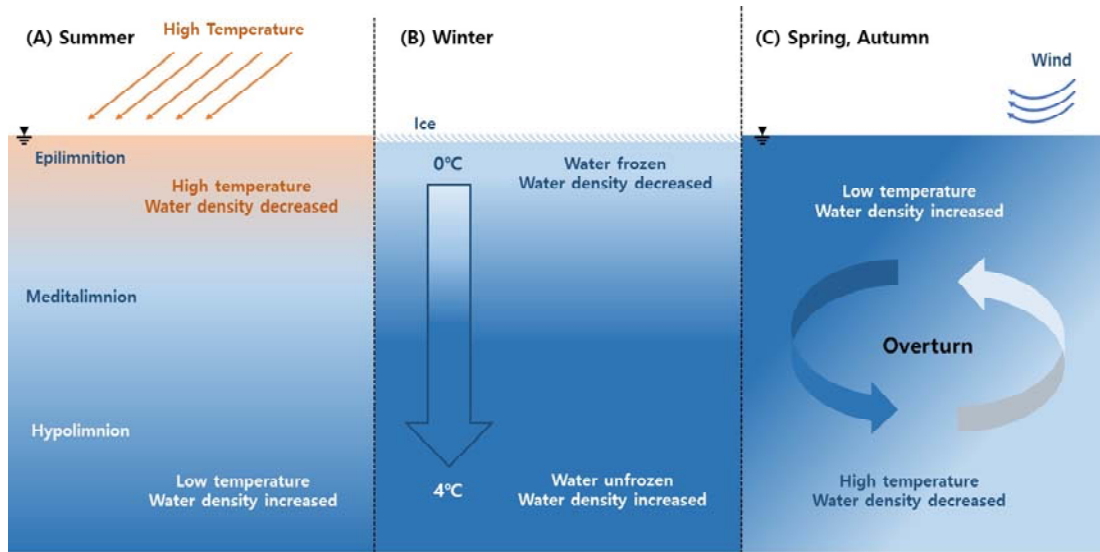


Fig. 4. Annual circulation in the temperate lake.

으로 떨어지면 수중에 있던 기체가 대기 중으로 활발히 이동하며, 이러한 현상은 강우강도 및 입자크기에 비례하여 증가한다는 연구 결과가 있다(Ho et al., 1997). 반면 저수지 주변이 농경지이거나 식생이 풍부할 경우 지표유출로 인해 다량의 유기물과 영양염류가 유입됨으로써 더 많은 양의 온실가스가 생산되는 계기가 되며(Abe et al., 2009; Xiao et al., 2019), 추가적으로 부영양 호수의 경우 강우 이후 일사량의 증가로 인해 조류가 다량 발생하는 경우가 있다(Ahn et al., 2002). 하지만 위의 경우는 강우보다는 저수지 수질과 연관성이 깊으며, 강우는 부영양 호수에서의 온실가스 발생을 촉진하는 하나의 요소로 작용하는 것으로 판단된다.

### 2.2.3. 바람에 의한 영향

수표면에서의 온실가스 배출은 바람에 의해서도 영향을 받으며, 풍속이 강할수록 용존 기체들이 대기 중으로 배출되는 속도가 증가한다(Wanninkhof and Bliven, 1991; Wanninkhof and McGillis, 1999). Duchemin et al.(1999)은 캐나다의 La Grande-2와 Laforge-1 저수지를 대상으로 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 배출량과 풍속 간의 상관성을 분석하였다. 그 결과 수심이 깊은 곳에서의 풍속과 CO<sub>2</sub> 배출량 사이에는 0.36의 상관성을, CH<sub>4</sub> 배출량 사이에는 0.70의 상관성을 보였으나, 수심이 얇은 곳은 기체의 배

출량과 풍속 사이에 아무런 관련성을 찾지 못하였다. 풍속이 3 m/s 이하일 경우 온실가스 배출에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다(Duchemin et al., 1999).

### 2.3. 수력발전댐 특성이 온실가스 발생에 미치는 영향

#### 2.3.1. 댐 저수지 운영 기간(reservoir age)에 따른 온실가스 발생 변화

댐 저수지의 운영 기간이 길수록 온실가스 발생량은 현저히 감소하며, 이는 건설 후 시간이 지남에 따라 저수지 내의 유기물 및 영양염류의 양이 감소하기 때문이다. 일반적으로 댐에서의 온실가스 발생량이 가장 높은 시기는 댐 건설 직후 적정 용량까지 저수할 때이며, 이때 주변 지역이 침수되면서 다량의 유기물 및 영양염류가 저수지 내로 유입된다(Tremblay et al., 2004). 그러나 시간이 지나면서 수체 내의 유기물 감소 및 수생 식물의 영향으로 인해 온실가스 배출량이 점점 감소하게 된다(Fearnside, 1997; Tremblay et al., 2004). 그러나 이러한 결과는 주변으로부터의 유기물 및 영양염 유입이 적을 경우에 가능한 현상이며, 주변으로부터의 물질 유입이 많은 환경이라면 더 오랜 시간동안 온실가스 배출원으로 작용할 수 있다(Fig. 5, Maavara et al., 2020). 그러므로 댐 저수지에서의 온실가스 발생량을 평가할 때

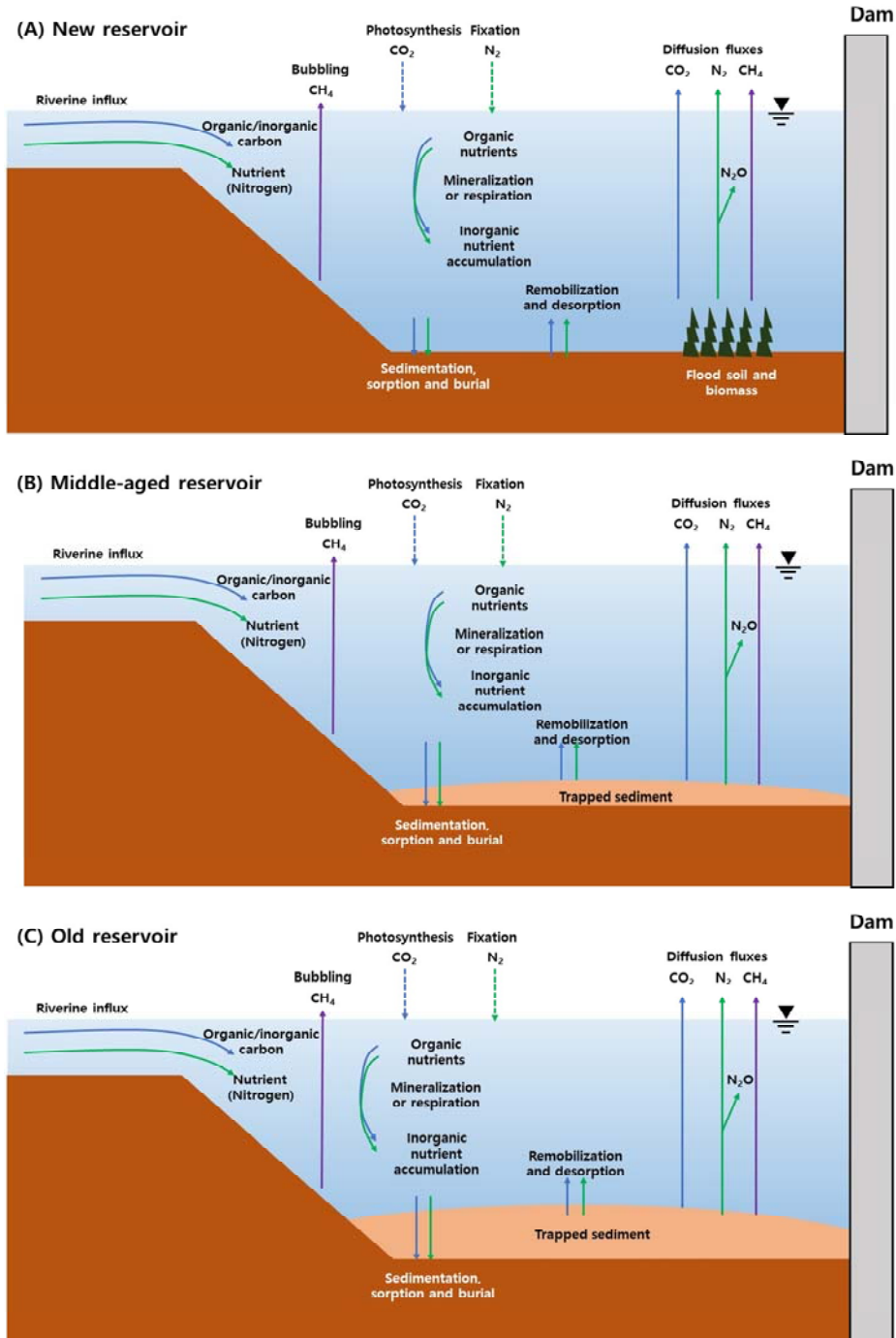


Fig. 5. Diagram of the nutrient circulation in the reservoir according to the dam operation period (a) new, (b) middle-aged, and (c) old reservoirs.

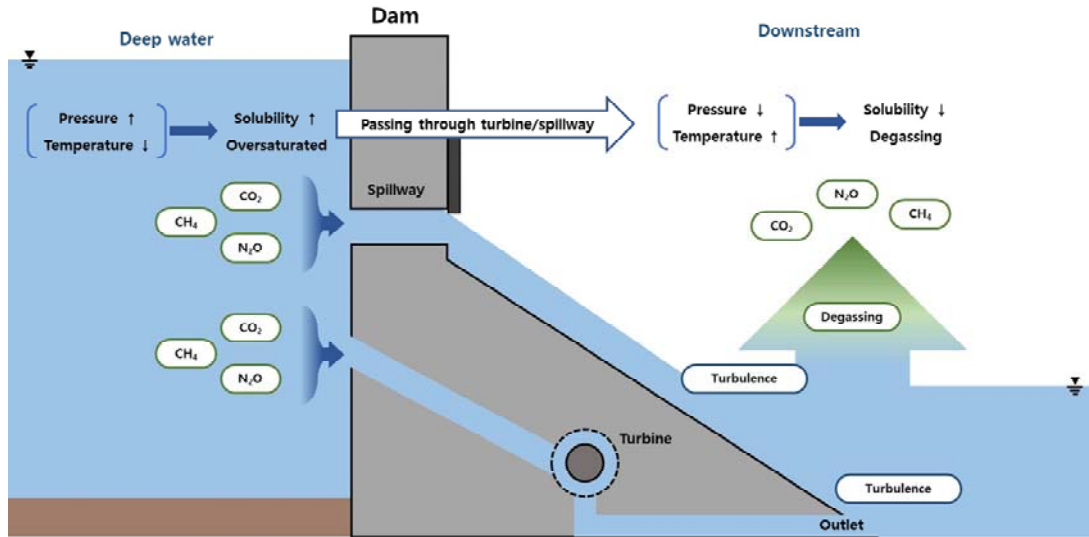


Fig. 6. Diagram of greenhouse gas emission at the spillway and outlet of the hydropower dam.

주변의 환경도 함께 고려해야 할 것으로 보인다.

### 2.3.2. 배출구(outlet) 및 여수로(spillway)를 통과한 방류수에서의 온실가스 발생

발전댐 근처에서는 저수지 표면 뿐 아니라 수력발전용 관로의 배출구와 댐의 여수로를 통과한 물에서도 다량의 온실가스가 배출된다(Fig. 6). 수력발전은 위치에너지를 동력으로 전기를 생성하므로, 낙차를 최대화하기 위해 수력발전 설비를 주로 댐의 최하단부에 설치한다. 물은 관로를 통과하는 동안 물에 가해지는 압력이 증가하여 온실가스는 과포화 상태로 존재하다가 배출구를 통과하는 순간 물의 압력은 급격히 감소하며, 이때 용존상태로 존재하였던 다량의 온실가스가 배출된다(Fearnside, 2004; Kumar and Sharma, 2012; Hertwich, 2013). 또한 저수지 내 물이 일정량 이상 차면 여수로를 통해 하류로 방류하는데, 이때 유속 증가 및 급격한 난류 형성으로 대기와의 접촉면적이 넓어지면서 다량의 온실가스가 배출된다(Fearnside, 2004; Rosa et al., 2006).

### 2.3.3. 저수지 깊이에 따른 온실가스 발생 특성

일반적으로 저수지의 최하층은 혐기 환경에 조성되어 있으며, CH<sub>4</sub>가 생성된다. 그러나 생성된 CH<sub>4</sub>는 확산 또는 버블링(bubbling)으로 저수지 표면에 도달하여 대기 중으로 배출되는 과정에서 표층의 호기 환경을 지나는데,

이때 CH<sub>4</sub>의 일부가 CO<sub>2</sub>로 산화된다. 열대 지역에 위치한 The Petit Saut Reservoir에서는 수심 3 m 지점부터 CH<sub>4</sub>의 산화가 발생하였으며(Galy-Lacaux et al., 1997), 한대 지방에 위치한 Laforge-1, La Grande-2 저수지에서는 7 m 이상의 깊은 지점들에 비해 3.5 m 미만의 얕은 지점들에서 더 많은 양의 CH<sub>4</sub>가 방출되었다(Duchemin et al., 1995). 그러나 깊이에 따른 온실가스 분포는 해당 저수지의 수질과 주변의 기후 등에 영향을 받으므로, 이를 고려할 필요가 있다.

## 3. 국내외 수력발전댐에서의 온실가스 발생 연구 동향

### 3.1. 국내외 수력발전댐 운영 현황

전 세계에는 38,000여개 이상의 대댐(높이 15 m 이상)이 존재한다. GDW(2019)가 제시한 통계에 따르면, 발전댐은 북위 70.4도에서 남위 45.9도까지 전세계에 분포하고 있으며, 대부분의 국외 저수지의 표면적(surface area)은 50 km<sup>2</sup> 미만, 총 저수용량(maximum storage capacity)은 50억 m<sup>3</sup> 미만인 경우가 많으며, 주로 1950년부터 1990년까지 댐 건설이 활발히 이루어졌다(Fig. 7). 2019년 발전댐을 가장 많이 보유한 국가는 미국(357개), 중국(218개)에 이어 캐나다(150개), 노르웨이(82개) 순으로 집계되며, 주로 북아메리카나 유럽 등의 선진국이나

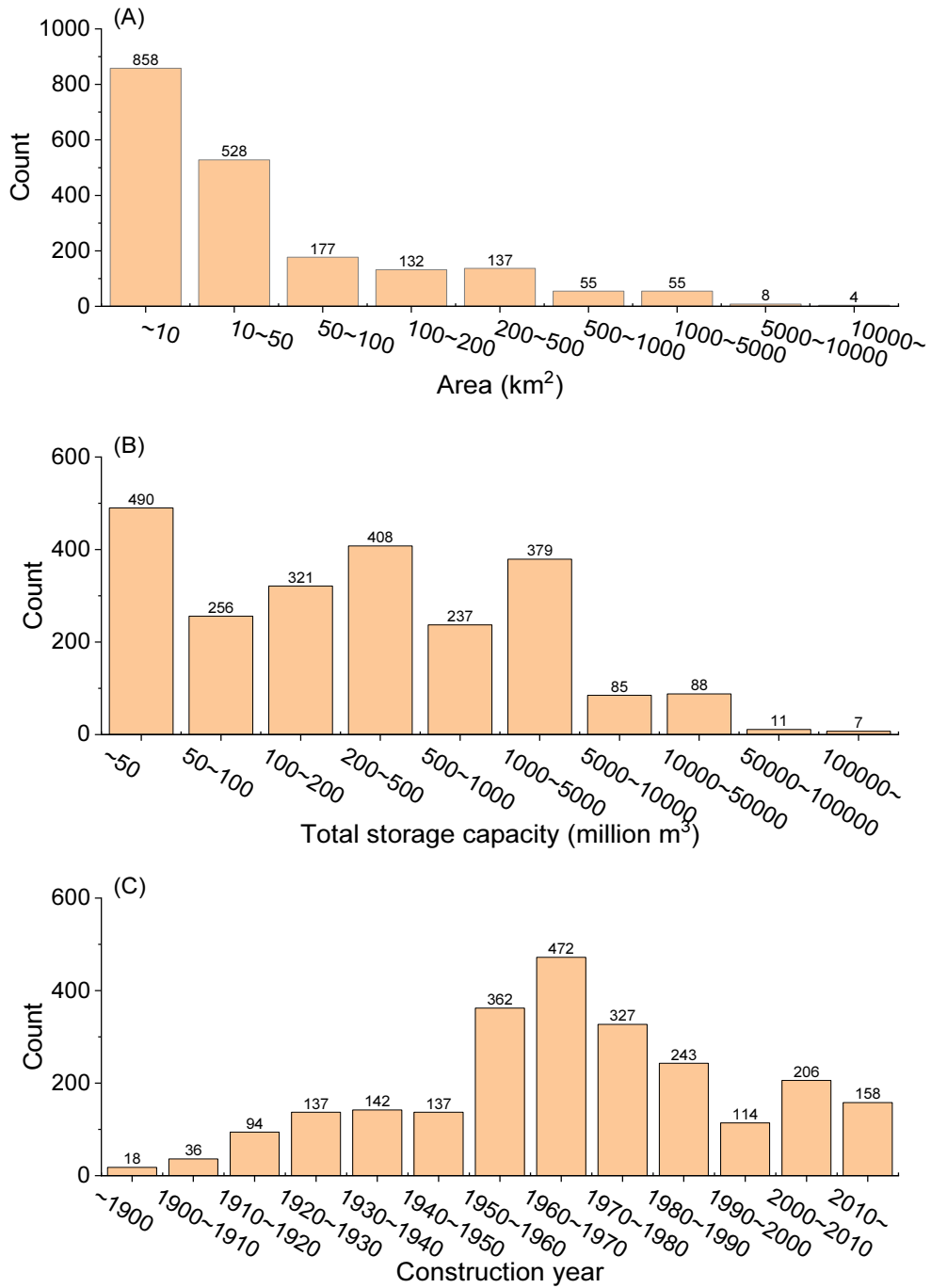


Fig. 7. Comparison of reservoir area (A), total storage capacity (B), and construction year (C) of foreign hydropower dam (GDW, 2019).



**Table 1.** Country rankings with the number of hydropower dams(GDW, 2019)

Rank	Country	Number of hydropower dams
1	United States	357
2	China	218
3	Canada	150
4	Norway	82
5	Spain	74
6	Brazil	69
7	France	54
8	Italy	46
9	Romania	43
10	Sweden	42

**Table 2.** List of hydropower dams in South Korea (KNCOLD, 2021; WAMIS, 2021)

Dam	Area (km <sup>2</sup> )	Total storage capacity (million m <sup>3</sup> )	Construction (year)
Chungju	97	2,750	1986
Goesan	1.75	15	1957
Hoengseong	5.8	87	2005
Hwacheon	38.15	1,018	1944
Chuncheon	14.3	150	1965
Soyanggang	70	2,900	1973
Uiam	15	80	1967
Cheongpyeong	17.6	186	1984
Paldang	36.5	244	1974
Andong	51.5	1248	1977
Imha	26.4	595	1993
Yeongju	10.4	181	2016
Buhang	2.5	54.3	2013
Hapcheon	25	790	1959
Namgang	28.2	309.2	1989
Miryang	2.2	73.6	1970
Yongdam	36.2	815	2006
Daecheong	72.8	1,490	1981
Boryeong	5.8	117	1998
Buan	3	50	1996
Seomjingang	26.5	466	1965
Boseonggang	1.8	5.7	1937
Juam (Regulation)	7.8	250	1991
Jangheung	10.3	191	2006

**Table 3.** Results of the studies on the flux of CO<sub>2</sub> in foreign hydropower dam reservoirs

Country	Dam	Latitude*	Area (km <sup>2</sup> )	Areal flux (mg·m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Reference
Canada	Grand Rapids	53.2	3277	-347~7260	Demarty et al. (2009)
	Jenpeg	53.7	-	-926~2126	
	Kettle	56.4	319	-723~5646	
	McArthur	50.4	100	-1057~3556	
	Eastmain-1	52.2	603	-4~19,676	
	Riviere des Prairies	45.6	8	-234~9380	
	La Grande-2	53.8	2815	45~6509	
Finland	Porttipahta	68.1	214	54~144	Huttunen et al. (2002)
United states	Allatoona	34.2	49	2414	Bevelhimer et al. (2016)
	Douglas	35.9	115	1444	
	Fontana	35.5	43	994	
	Guntersville	34.4	279	1796	
	Hartwell	34.4	226	1168	
	Watts Bar	35.6	176	2760	
	Douglas	35.9	115	236~18,806	
China	Hongfeng	26.5	57.2	-396~3080	Wang et al. (2011)
Brazil	Miranda	-18.9	50.6	3796~4980	Dos Santos et al. (2006)
	Tres Marias	-18.2	1040	-142~2369	
	Barra Bonita	-22.5	312	1537~6434	
	Segredo	-25.8	82	601~4789	
	Xingo	-9.6	60	2440~9837	
	Samuel	-8.7	559	6807~8087	
French Guiana	Tucuruí	-3.8	2430	6516~10,433	Galy-Lacaux et al. (1997)
	Petit Saut	5.1	310**	580~10,500	

\* : referred by GDW(2019).

\*\* : referred by Guerin et al. (2008).

중국, 브라질과 같이 하천의 규모가 큰 국가들에서 수력 발전이 활발함을 알 수 있다(Table 1).

국내에 존재하는 저수용 발전댐은 총 24개로 한강 및 낙동강 유역 등 비교적 규모가 큰 하천에 집중되어 있으며, 이 중 대부분이 용수 공급 및 홍수 조절 등의 다목적 댐의 역할을 수행한다(WAMIS, 2021). 국내의 수력발전댐 저수지의 표면적은 1.75~72.8 km<sup>2</sup>, 총 저수용량은 0.057~29억 m<sup>3</sup>의 범위로 국외에 비해 작은 규모로 운영되고 있으며, 1937년 보성강댐이 건설된

이후 지금까지 꾸준히 건설되고 있다(Table 2).

### 3.2. 국외 수력발전댐에서 온실가스 발생 연구 동향

국외 댐에서 온실가스 발생 연구는 주로 유기물 분해 산물인 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 발생에 주목하고 있다. 대부분의 연구에서는 온대와 한대지역보다 열대지역에서 더 많은 양의 온실가스가 배출되는 것으로 조사되었다(Barros, 2011; Ion and Ene, 2021).

국가별 수력발전댐의 저수지에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 Table 3에 정리하였다. 저수지 면적을 고려한 CO<sub>2</sub>

**Table 4.** Results of the studies on the flux of CH<sub>4</sub> in foreign hydropower dam reservoirs

Country	Dam	Latitude*	Area (km <sup>2</sup> )	Areal flux (mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	Reference
Canada	Grand Rapids	53.2	3277	-0.07~27.7	Demarty et al. (2009)
	Jenpeg	53.7	-	-0.07~10.8	
	Kettle	56.4	319	-0.19~0.97	
	McArthur	50.4	100	-0.03~7.15	
	Eastmain-1	52.2	603	-0.04~8.18	
	Riviere des Prairies	45.6	8	-0.05~6.38	
	La Grande-2	53.8	2815	-0.09~2.56	
Finland	Porttipahta	68.1	214	-0.5~7.6	Huttunen et al. (2002)
United states	Allatoona	34.2	49	187	Bevelhimer et al. (2016)
	Douglas (summer)	35.9	115	40	
	Fontana	35.5	43	6	
	Guntersville	34.4	279	21	
	Hartwell	34.4	226	23	
	Watts Bar	35.6	176	8	
	Douglas (four seasons)	35.9	115	0~0.95	
Brazil	Miranda	-18.9	50.6	45.9~262.4	Dos Santos et al.(2006)
	Tres Marias	-18.2	1040	64.3~328.2	
	Barra Bonita	-22.5	312	19.2~22.6	
	Segredo	-25.8	82	7.6~9.9	
	Xingo	-9.6	60	30.0~50.2	
	Samuel	-8.7	559	24.4~183.6	
French Guiana	Tucuruí	-3.8	2430	13.4~205.4	Galy-Lacaux et al. (1997)
	Petit Saut	5.1	30**	5~3800	

\* : referred by GDW(2019).

\*\* : referred by Guerin et al. (2008).

배출량으로 산정하면, 캐나다는  $-1057 \sim 19,676 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 미국은  $236 \sim 18,806 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 중국은  $-396 \sim 3080 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 브라질은  $-142 \sim 10,433 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  정도로 나타났다. 열대지역인 브라질의 댐 저수지에서는 높은 배출량을 보이고 온대지역인 미국과 캐나다 등의 댐 저수지에서는 계절적인 차이를 보였다. 미국에서는 주로 여름에 높은 CO<sub>2</sub> 배출량을 보이며(Mosher et al., 2015), 캐나다에서는 저수지 표면에 형성되어 있던 얼음이 녹는 늦봄에 높은 CO<sub>2</sub> 배출량을 기록하였다(Demarty et al., 2009).

국가별 수력발전댐의 저수지에서 발생하는 CH<sub>4</sub> 배출량을 Table 4에 정리하였다. 저수지 면적을 고려한 CH<sub>4</sub> 배출량을 산정하면, 브라질은  $7.6 \sim 328.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 프랑스령 기아나(French Guiana)는  $5 \sim 3800 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 미국은  $0 \sim 187 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 캐나다는  $-0.19 \sim 27.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  정도로서 CH<sub>4</sub> 배출량은 열대지역이 한대지역보다 높았다. 이는 열대지역으로 갈수록 기온이 높아 미생물 활동이 활발하며, 또한 저수지 주변의 식생이 풍부하여 저수지의 유기물 유입량이 많았기 때문이다(Tremblay et al., 2004).

**Table 5.** Results of the studies on the flux of N<sub>2</sub>O in foreign hydropower dam reservoirs

Country	Dam	Latitude*	Area (km <sup>2</sup> )	Areal flux (mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	Reference
Finland	Porttipahta	68.1	214	-0.26~0.17	Huttunen et al. (2002)
China	Gongguoqiao	25.6	-	0.010~0.012	Shi et al. (2020)
	Xiaowan	24.7	190	0.012~0.017	
	Manwan	24.6	-	0.017~0.019	
	Dachaoshan	24.0	-	0.017~0.019	
	Nuozhadu	22.6	320	0.017~0.026	
	Jinghong	22.0	510	0.026	
Brazil	Tucurui	-3.8	2430	1.5~9.7	Lima et al. (2002)
	Samuel	-8.7	559	3.1~16.1	
French Guiana	Petit Saut	5.1	300	-5.94~9.64	Guerin et al. (2008)

\* : referred by GDW(2019).

\*\* : referred by Guerin et al. (2008).

**Table 6.** Study on greenhouse gas in domestic dams and reservoirs in South Korea

Year	Author	Article / Report
2016	Jin et al.	Enhanced <b>greenhouse gas</b> emission from exposed sediments along a <b>hydroelectric reservoir</b> during an extreme drought event
2018	Jin et al.	Longitudinal discontinuities in riverine <b>greenhouse gas</b> dynamics generated by <b>dams</b> and urban wastewater
2018	Kangwon National University	The influence of monsoon climate on the emissions of <b>greenhouse gases</b> (CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> ) and phosphorus mobility in a <b>reservoir system</b>
2019	Chungbuk National University	Development and Applications of AI/ML Models for Estimating Carbon Net Atmospheric Flux from <b>Reservoir</b> .

국가별 수력발전댐의 저수지에서 발생하는 N<sub>2</sub>O 배출량을 Table 5에 정리하였다. 저수지 면적을 고려한 N<sub>2</sub>O 배출량을 산정하면, 중국의 댐 저수지에서는 0.010~0.026 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 브라질에서는 1.5~16.1 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> 정도로서 N<sub>2</sub>O 배출량은 열대지역이 온대지역보다 100배 이상 높게 나타났다. N<sub>2</sub>O도 CH<sub>4</sub>와 마찬가지로 열대지역에서 높은 배출량을 보이며, 높은 온도와 다량의 영양염류 유입에 의한 것으로 판단된다.

### 3.3. 국내 수력발전댐에서 온실가스 발생 연구 동향

지구온난화 및 기후변화는 지난 몇 년간 국내에서 큰 관심사였으나, 온실가스 발생이 아닌 기후변화로 인한 댐 및 하천에서의 수질변화 및 물관리 방안이 주를 이루

었다. 그러나 최근 국내에서도 온실가스의 새로운 발생 원인으로의 관점에서 수력발전 댐을 주목하기 시작하였다 (Table 6). Jin et al.(2016)은 소양강댐을 대상으로 기뭇 시 수위하강으로 드러나는 퇴적물에서의 온실가스 발생에 대한 현장조사를 수행하였으며, Jin et al.(2018)은 한강 수계의 본류와 지류 및 댐 표층수에서의 CO<sub>2</sub> 분압 (pCO<sub>2</sub>)과 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 농도를 측정하였다. Chungbuk National University(2019)는 대청호와 낙동강 보를 대상으로 pCO<sub>2</sub>을 측정하고 순배출량을 산정하였으며, Kangwon National University(2018)는 소양강에서 기포로 배출되는 CO<sub>2</sub> 및 CH<sub>4</sub>를 측정하였다. 그러나 현재까지는 4대강 일부 지역을 대상으로 연구를 수행하였으며,

$$Flux_{Diffusion} [mg \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}] = \frac{Slope [ppm \cdot sec^{-1}] \times F_1 \times F_2 \times Chamber Vol. [m^3]}{Chamber Surface [m^2]} \quad (1)$$

$$Flux_{Bubbling} [mg \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}] = \frac{Gas Conc. [mg \cdot m^{-3}] \times Gas Vol. Col. [m^3]}{Funnel Area [m^2] \times Sampling Interval [day]} \quad (2)$$

여기서 *Slope*는 시간당 측정되는 온실가스의 농도,  $F_1$ 은 공기 중 온실가스의 표준 온도 및 압력(STP)에 대한 변환 계수,  $F_2$ 는 시간 변환 계수( $24hr \times 60min \times 60sec = 86,400 sec \cdot day^{-1}$ )를 뜻한다.

국내 댐에서의 온실가스 발생을 분석하기 위해서는 보다 다양한 지역에서의 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 국내 수력발전댐에서의 온실가스 발생 연구 방향

##### 4.1. 국내 온실가스 발생 연구범위

###### 4.1.1. 시공간적 변화에 따른 온실가스 변동 특성

우리나라의 댐은 북위 35~38도 사이의 온대성 기후에 위치하며, 계절변화가 뚜렷하고 특히 여름철에 집중적인 강우가 발생하는 특징이 있다(An and Jones, 2000). 그러므로 우리나라는 계절별 및 강우에 따른 시간적인 환경변화에 대한 온실가스 발생 연구가 필요하다.

규모가 큰 저수지를 대상으로는 공간적인 특성에 따른 온실가스 분포 연구가 필요하다. 댐과 가까운 지점은 수심이 깊고 외부로부터의 물질 유입이 적으며, 저수지 외곽 지역은 수심이 낮으나 지표유출 등으로 인한 물질 유입이 많으므로 댐 및 육지와와의 이격거리는 수질 및 온실가스 조성과 밀접한 관계를 가진다.

수력발전댐에서는 배출구에서의 온실가스 발생도 무시할 수 없다. 수력발전 시 저층수가 하류로 배출되기 때문에  $CH_4$ 의 비율이 저수지 표면에 비해 높고,  $CH_4$ 는  $CO_2$ 에 비해 온실가스 기여도가 21배나 높으므로, 국내 수력발전댐에서도 이와 같은 연구가 필요하다. 또한 온실가스 발생량 대비 수력발전에서 생산되는 전력량을 산정함으로써 온실가스 발생 측면으로서의 수력발전을 보다 객관적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라 향후 수력발전 댐 건설에서도 중요한 요소가 될 것으로 판단된다.

###### 4.1.2. 수질 및 조류 발생에 따른 온실가스 배출

댐 저수지에서의 온실가스 발생은 해당 저수지의 수질 현상이 가장 중요한 요소로 작용한다. 그러므로 댐 저수지 표면에서 배출되는 온실가스를 측정할 때 해당 지

점에서의 수질분석도 함께 수행하여야 한다.

우리나라의 경우 여름철에 대청호(Ahn et al., 2002; Yeon et al., 2010; Noh et al., 2014), 주암호(Chung et al., 2019), 춘천호(Baek et al., 2019), 영천호(Lee et al., 2019) 등의 대표적인 저수지에서 조류가 발생한 사례가 있다. 조류 발생은 호수의 혐기화를 조성하여  $CH_4$ 의 발생에 기여하므로, 국내 저수지에서 조류 발생과  $CH_4$ 의 발생에 대해 연구할 필요가 있다.

##### 4.2. 수력발전댐에서 온실가스 배출량 선정 방법

###### 4.2.1. 수력발전댐에서 온실가스 측정 방법

댐 저수지에서 배출되는 온실가스는 확산과 기포발생으로 나뉘며, 확산을 통해 저수지 수면에서 대기 중으로 배출되는 온실가스는 부유식 챔버(floating chamber)를 통해 포집하며, 저수지 수면하에서 기포를 통해 배출되는 온실가스는 깔때기(funnel)를 통해 포집한다(Fig. 8, UNESCO and IHA, 2010). 포집한 기체는 실험실로 운반하여 가스크로마토그래피를 이용하여 측정하거나, 현장에서 FT-IR(Fourier Transform Infrared) 등을 이용하여 측정하며, 식 1과 2를 이용하여 대기확산 및 기포로 방출되는 온실가스 양을 계산한다(Tremblay et al., 2004; UNESCO and IHA, 2010).

수력발전댐을 통과하는 물은 급격한 난류이므로 직접적인 온실가스의 측정이 어렵다(Rosa et al., 2006). 그러므로 보통 상류의 수력발전 취수구로 유입되는 물과 배출구에서 방류되는 물에서의 온실가스 농도를 측정하고(Fig. 9), 식 3과 같이 두 지점에서의 농도차에 방류량을 곱한 값으로 추정한다(UNESCO and IHA, 2010). 여기서  $[Gas]_{Up,T}$ 와  $[Gas]_{Up,S}$ 는 각각 배출구(터빈이 존재하는 방수로)와 여수로를 통과하기 전의 온실가스 농도를,  $[Gas]_{Down,T}$ 와  $[Gas]_{Down,S}$ 는 통과 후의 온실가스

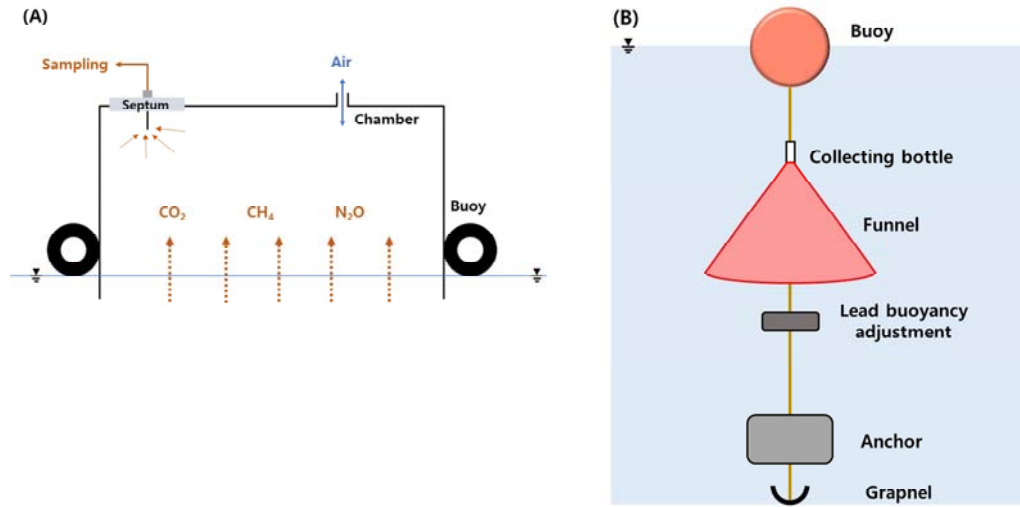


Fig. 8. Diagrams of floating chamber (A) and inverted funnel (B).

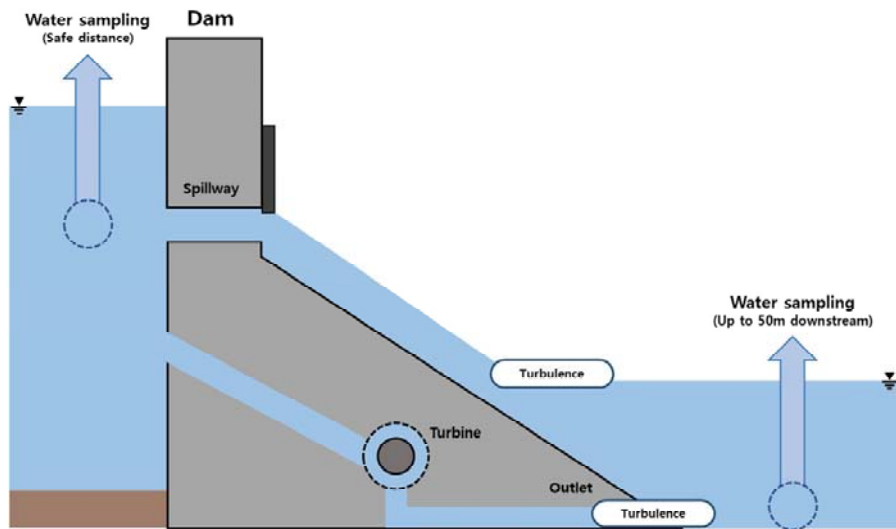


Fig. 9. Schematics of downstream greenhouse gas emission patterns and suggested measurement points.

농도이며,  $Q_T$ 와  $Q_S$ 는 통과유량을 뜻한다.

$$Flux_{Degassing} = (([Gas]_{UpT} - [Gas]_{DownsT}) \times Q_T) + (([Gas]_{UpS} - [Gas]_{DownsS}) \times Q_S) \quad (3)$$

#### 4.2.2. 온실가스 배출량 산정 방법

댐에서의 온실가스 총 배출량은 댐 운영시 저수지 표

면에서 배출되는 양과 댐 배수시설에서 배출되는 양을 합한 것으로 표현한다(식 4).

$$Gas\ Flux\ (mg \cdot m^{-2} d^{-1}) = Flux_{Diffusion} + Flux_{Degassing} \quad (4)$$

여기서  $Flux_{Diffusion}$ 은 저수지 표면에서 확산을 통해

배출되는 양이며,  $Flux_{Degassing}$  은 수력발전댐을 지나면서 배출되는 양을 뜻한다.

배출특성에 따른 배출량을 산정한 후 합산하면 수력발전댐에서 배출되는 온실가스 종류별 배출량(flux)을 구할 수 있다. 한편  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ 는 지구온난화 기여도가 각각 다르며,  $CH_4$ 는  $CO_2$ 의 약 21배,  $N_2O$ 는  $CO_2$ 의 약 310배이다. 그러므로 수력발전댐의 저수지에서 발생하는 모든 온실가스의 배출량은 온실가스 종류별 발생량(flux)에 지구온난화 기여도를 곱함으로써  $CO_2$  환산량( $CO_2$  equivalent,  $CO_2e$ )으로 표현할 수 있으며, 여기에 저수지 면적을 곱하면 해당 수력발전댐에서 배출되는 온실가스의 총 배출량을 구할 수 있다. 이를 통해 향후 지구온난화에 대한 수력발전이 미치는 영향을 보다 정량적으로 파악할 수 있다(식 5).

$$\begin{aligned} \text{Greenhouse Gas Emission}(\text{mg } CO_2e \cdot \text{day}^{-1}) \\ = ((CO_2 \text{ Flux} \times 1) + (CH_4 \text{ Flux} \times 21) \\ + (N_2O \text{ Flux} \times 310)) \times \text{Surface Area}(m^2) \end{aligned} \quad (5)$$

#### 4.3. 온실가스 관측자료 해석

##### 4.3.1. 온실가스와 수질 성분 사이의 관계 분석

온실가스 성분과 수질 성분들 사이의 상관성 분석은 온실가스와 수질 사이의 관계를 파악하기 위한 가장 기초적인 방법으로서, 기존의 연구에서도 상관분석을 통하여 온실가스 발생에 영향을 미치는 특정 수질성분을 파악하고, 영향 정도를 분석한 사례가 있다(Abe et al., 2009; Kumar and Sharma, 2012; Wang et al., 2015; Jin et al., 2018; Yang et al., 2020). 한편 온실가스 발생과 수질 항목들 간의 관계는 해당 지역의 기상 및 주변 지역의 환경에 따라 차이가 있으며, 다양한 수질 인자들이 온실가스 발생에 복합적으로 작용하는 경우도 존재한다. 그러므로 상관성 분석을 통해 온실가스 발생과 높은 상관성을 가지는 수질 항목들을 선정하고 회귀함수를 추정하여 온실가스와 수질 성분들 간의 정량적인 관계 분석 및 온실가스 발생 메커니즘을 해석하는 방향으로의 분석이 필요하다.

##### 4.3.2. 온실가스의 시공간적인 변화 분석

온실가스 배출은 댐을 중심으로 상하류 및 이격거리에 따른 공간적인 분포와 계절 변화에 따라 변동을 보인

다(Wang et al., 2015). 이러한 차이는 조사 지점의 깊이, 강수 및 기온 변화 등의 기상 현상, 육지와와의 거리 및 이에 따른 수질 분포와 밀접한 관계를 가진다. 그러므로 저수지의 상류부와 하류부, 중심부와 가장자리, 심도별 관측자료를 이용하여 수질과 온실가스에 대한 계절별/연별 분포도를 작성하고, 분포 특성을 분석하여 시공간적인 변화에 따른 온실가스 유출입 특성을 분석할 필요가 있다.

#### 5. 결론

수력발전댐에서 발생하는 온실가스는  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  등이며,  $CO_2$ 와  $CH_4$ 는 미생물의 유기물 분해 과정에서 발생하는 최종 부산물이며,  $N_2O$ 는 미생물의 질산화 및 탈질 과정에서 발생한다. 계절변화로 인한 수온 변동은 미생물 활동 및 수체 혼합과 관련하여 온실가스 발생에 영향을 미치는 것으로 보고되었으며, 댐의 운영기간과 저수지 깊이에 따른 온실가스의 종류와 발생량이 다르게 나타났다.

수력발전댐에서의 온실가스 발생 연구는 주로 미국, 브라질, 중국, 캐나다 등에서 활발히 이루어져 왔다. 전세계 수력발전댐에서 발생하는 온실가스 종류별 유출입량은  $CO_2$  -926~18,806  $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,  $CH_4$  -0.19~3800  $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,  $N_2O$  0.010~16.1  $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  정도이었으며, 주로 열대지역에 위치한 수력발전댐에서 많은 양의 온실가스가 배출되었다. 국내에서는 2016년 이후 4대강 하천 지역에서 온실가스 관측 연구가 수행되었으며, 수력발전댐에서의 온실가스 관측 및 발생량 산정 연구는 수행되지 않았다.

국외 연구사례와 국내 댐 현황 분석을 바탕으로 국내 수력발전댐에서의 온실가스 발생 연구 방향으로서 온실가스 배출량 산정, 온실가스와 수질 성분의 상관관계 분석 및 댐의 저수지에서 온실가스의 시공간적인 배출 분포도 작성으로 다양한 댐 환경에서 온실가스의 영향인자 및 발생 기작을 구명하는 연구 방법을 제안하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 “2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2020R111A1A01073860)” 및 “2021년도 교육부의 재원으로

한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터 사업(2021R1A6C101A415)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Abe, D. S., Sidagis-Galli, C., Tundisi, T. M., Tundisi, J. E. M., Grimberg, D. E., Medeiros, G. R., Teixeira-Silva, V., Tundisi, J. G., 2009, The effect of eutrophication on greenhouse gas emissions in three reservoirs of the Middle Tietê River, southeastern Brazil, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 30, 822-825.
- Ahn, C. Y., Chung, A. S., Oh, H. M., 2002, Rainfall, phycocyanin, and N:P ratios related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir, *Hydrobiologia*, 474, 117-124.
- Ai, H., Qiu, Y., He, Q., He, Y., Yang, C., Kang, L., Luo, H., Li, W., Mao, Y., Hu, M., Li, H., 2019, Turn the potential greenhouse gases into biomass in harmful algal blooms waters: a microcosm study, *Sci. Total Environ.*, 655, 520-528.
- An, K. G., Jones, J. R., 2000, Factors regulation bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia*, 432, 37-48.
- Baek, J. S., Youn, S. J., Kim, H. N., Sim, Y. B., Yoo, S. J., Im, J. K., 2019, Effects of environmental factors on phytoplankton succession and community structure in Lake Chuncheon, *Korean J. Environ. Ecol.*, 52, 71-80.
- Bastviken, D., Tranvik, L. J., Downing, J. A., Crill, P. M., Enrich-Prast, A., 2011, Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science* 331, 50.
- Bates, B., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J., 2008, *Climate change and water - IPCC Technical Paper VI*, IPCC Secretariat, Geneva.
- Beaulieu, J. J., Tank, J. L., Hamilton, S. K., Wollheim, W. M., Hall, R. O., Mulholland, P. J., Peterson, B. J., Ashkenas, L. R., Cooper, L. W., Dahm, C. N., Dodds, W. K., Grimm, N. B., Johnson, S. L., McDowell, W. H., Poole, G. C., Valett, H. M., Arango, C. P., Bernot, M. J., Burgin, A. J., Crenshaw, C. L., Helton, A. M., Johnson, L. T., O'Brien, J. M., Potter, J. D., Sheibley, R. W., Sobota, D. J., Thomas, S. M., 2011, Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 108, 214-219.
- Bevelhimer, M. S., Stewart, A. J., Fortner, A. M., Phillips, J. R., Mosher, J. J., 2016, CO<sub>2</sub> is dominant greenhouse gas emitted from six hydropower reservoirs in southeastern United States during peak summer emissions, *Water*, 8, 15.
- Bizic, M., Klintzsch, T., Ionescu, D., Hindiye, M. Y., Gunthel, M., Muro-Pastor, A. M., Eckert W., Urich, T., Keppler, F., 2020, Aquatic and terrestrial cyanobacteria produce methane, *Sci. Adv.*, 6, eaax5343.
- Bothe, H., Schmitz, O., Yates, M. G., Newton, W. E., 2010, Nitrogen Fixation and Hydrogen Metabolism in Cyanobacteria, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 74, 529-551.
- Burlacot, A., Richaud, P., Gosset, A., Li-Beisson, Y., Peltier, G., Algal photosynthesis converts nitric oxide into nitrous oxide, *PNAS*, 117, 2704-2709.
- Calhoun, A., King, G. M., 1997, Regulation of root-associated methanotrophy by oxygen availability in the rhizosphere of two aquatic macrophytes, *Appl. Environ. Microbiol.*, 63, 3051 - 3058.
- Chen, M., Chang, L., Zhang, J., Guo, F., Vymazal, J., He, Q., Chen, Y., 2020, Global nitrogen input on wetland ecosystem: The driving mechanism of soil labile carbon and nitrogen on greenhouse gas emissions, *Environ Sci Ecotechnol.*, 4, 100063.
- Chung, H., Son, M., Ryu, H. S., Park, C. H., Lee, R., Cho, M., Lim, C., Park, J., Kim, K., 2019, Variation of cyanobacteria occurrence pattern and environmental factors in Lake Juam, *Korean J. Environ. Biol.*, 37, 640-651.
- Chungbuk National University, 2019, Development and Applications of AI/ML Models for Estimating Carbon Net Atmospheric Flux from Reservoir.
- Dakos, V., Matthews, B., Hendry, A. P., Levine, J., Loeuille, N., Norberg, J., Loeuille, N., Norberg, J., Nosil, P., Scheffer, M., De Meester, L., 2019, Ecosystem tipping points in an evolving world, *Nat. Ecol. Evol.*, 3, 355-362.
- Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J. F., Powers, S. M., Dos Santos, M. A., Arie Vonk, J., 2016, Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces; A new global synthesis, *BioScience*, 66, 949-964.
- Demarty, M., Bastien, J., Tremblay, A., Hesslein, R. H., Gill, R., 2009, Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Que'bec, Canada, measured with automated systems, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 8908-8915.



- Dos Santos, M. A., Rosa, L. P., Sikar, B., Sikar, E., Dos Santos, E. O., 2006, Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants, *Energy Policy*, 34, 481-488.
- Duchemin, E., Lucotte, M., Canuel, R., 1999, Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 350-357.
- Duchemin, E., Lucotte, M., Canuel, R., Chamberland, A., 1995, Production of the greenhouse gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochem. Cycles*, 9, 529-540.
- Fearnside, P. M., 1997, Greenhouse-gas emissions from Amazonian hydroelectric reservoirs the example of Brazil's Tucuruí Dam as compared to fossil fuel alternatives, *Environ. Conserv.*, 24, 64-75.
- Fearnside, P. M., 2004, Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source an editorial comment, *Clim. Change*, 66, 1-8.
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Lambert, C., Dumestre, J. F., Labroue, L., Richard, S., Gosse, P., 1997, Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana, *Global Biogeochem. Cycles*, 11, 471-483.
- GDW, 2019, Global Reservoir and Dam Database (GRanD), <http://globaldamwatch.org/grand>.
- Giles, J., Methane quashes green credentials of hydropower, *Nature*, 444, 524-525.
- Goreau, T. J., Kaplan, W. A., Wofsy, S. C., McElroy, M. B., Valois, F. W., Watson, S. W., 1980, Production of NO<sub>2</sub><sup>-</sup> and N<sub>2</sub>O by nitrifying bacteria at reduced concentrations of oxygen, *Appl. Environ. Microbiol.*, 40, 526-532.
- Guerin, F., Abril, G., Tremblay, A., Delmas, R., 2008, Nitrous oxide emissions from tropical hydroelectric reservoirs, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L06404.
- Gunkel, G., 2009, Hydropower - A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions, *Clean - Soil Air Water*, 37, 726-734.
- Hertwich, E. G., 2013, Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA, *Environ. Sci. Technol.*, 47, 9604-9611.
- Huttunen, J. T., Alm, J., Liikanen, A., Juutinen, S., Larmola, T., Hammar, T., Silvola, J., Martikainen, P. J., 2003, Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions, *Chemosphere*, 52, 609-621.
- Huttunen, J. T., Vaisanen, T. S., Hellsten, S. K., Heikkinen, M., Nykanen, H., Jungner, H., Niskanen, A., Virtanen, M. O., Lindqvist, O. V., Nenonen, O. S., Martikainen, P. J., 2002, Fluxes of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland, *Global Biogeochem. Cycles*, 16, 3-13-17.
- Ho, D. T., Bliven, L. F., Wanninkhof, R., Schlosser, P., 1997, The effect of rain on air-water gas exchange, *Tellus B*, 49, 149-158.
- IEA, 2021, Hydropower Special Market Report - Analysis and forecast to 2030, IEA Publications, Paris, <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>.
- Ion, I. V., Ene, A., 2021, Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs: A Review, *Sustainability*, 13, 11621.
- Jin, H., Yoon, T. K., Lee, S. H., Kang, H., Im, J., Park, J. H., 2016, Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event, *Environ. Res. Lett.*, 11, 124003.
- Jin, H., Yoon, T. K., Begum, M. S., Lee, E. J., Oh, N. H., Kang, N., Park, J. H., 2018, Longitudinal discontinuities in riverine greenhouse gas dynamics generated by dams and urban wastewater, *Biogeosciences*, 15, 6349-6369.
- Kahrl, F., Li, Y., Su, Y., Tennigkeit, T., Wilkes, A., Xu, J., 2010, Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizer use in China, *Environ. Sci. Policy*, 13, 688-694.
- Kamp, A., Stief, P., Knappe, J., De Beer, D., 2013, Response of the ubiquitous pelagic diatom *Thalassiosira weissflogii* to darkness and anoxia. *PLoS One*, 8, e0082605.
- Kangwon National University, 2018, The influence of monsoon climate on the emissions of greenhouse gases (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) and phosphorus mobility in a reservoir system.
- Keller, M., Stallard, R. F., 1994, Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 99, 8307-8319.
- KNCOLD, 2021, <http://www.kncold.or.kr/>.
- Kumar, A., Sharma, M. P., 2012, Greenhouse gas emissions from hydropower reservoirs, *J. Water Energy Environ.*, 11, 37-42.

- Laanbroek, H. J., 2010, Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. A mini-review, *Ann. Bot.*, 105, 141-153.
- Lee, H. M., Shin, R. Y., Lee, J. H., Park, J. G., 2019, A study on the relationship between cyanobacteria and environmental factors in Yeongcheon Lake, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 35, 352-361.
- Li, S., Bush, R. T., Santos, I. R., Zhang, Q., Song, K., Mao, R., Wen, Z., Lu, X. X., 2018. Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs, *Water Res.*, 147, 13-24.
- Lima, I. B. T., Victoria, R. L., Novo, E. M. L. M., Feigl, B. J., Ballester, M. V. R., Ometto, J. P., 2002, Methane, carbon dioxide and nitrous oxide emissions from two Amazonian Reservoirs during high water table, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 28, 438-442.
- Liu, X., Zhang, F., 2011, Nitrogen fertilizer induced greenhouse gas emissions in China, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 3, 407-413.
- Maavara, T., Chen, Q., Van Meter, K., Brown, L. E., Zhang, J., Ni, J., Zarfl, C., 2020, River dam impacts on biogeochemical cycling, *Nat. Rev. Earth Environ.*, 1, 103-116.
- Mäkinen, K., Khan, S., 2010, Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs, *Water Altern.*, 3, 91-105.
- Mann, K. H., Williams, W. D., 2014, Inland water ecosystem *Encyclopedia Britannica*, <https://www.britannica.com/science/inland-water-ecosystem>.
- Mosher, J. J., Fortner, A. M., Phillips, J. R., Bevelhimer, M. S., Stewart, A. J., Troia, M. J., 2015, Spatial and temporal correlates of greenhouse gas diffusion from a hydropower reservoir in the southern United States, *Water* 7, 5910-5927.
- Musenze, R. S., Fan, L., Grinham, A., Werner, U., Gale, D., Udyam, J., Yuan, Z., 2016, Methane dynamics in subtropical freshwater reservoirs and the mediating microbial communities, *Biogeochemistry*, 128, 233-255.
- Noh, S. Y., Park, H. K., Choi, H. L., Lee, J. A., 2014, Effect of Climate Change for Cyanobacteria Growth Pattern in Chudong Station of Lake Daechung, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 30, 377-385.
- OECD, 2020, *Environment at a Glance 2020*, OECD Publishing, Paris.
- Plouviez, M., Shilton, A., Packer, M. A., Guieysse, B., 2019, Nitrous oxide emissions from microalgae: potential pathways and significance, *J. Appl. Phycol.*, 31, 1-8.
- Prairie, Y. T., Alm, J., Beaulieu, J., Barros, N., Battin, T., Cole, J., Del Giorgio, P., DelSontro, T., Guerin, F., Harby, A., Harrison, J., Mercier-Blais, S., Serca, D., Sobek, S., Vachon, D., 2017, Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: What does the atmosphere see?, *Ecosyst.*, 21, 1058-1071.
- Rasanen, T. A., Varis, O., Scherer, L., Kumm, M., 2018, Greenhouse gas emissions of hydropower in the Mekong River Basin, *Environ. Res. Lett.*, 13, 034030.
- Richardson, D., Felgate, H., Watmough, N., Thomson, A., Baggs, E., 2009, Mitigating release of the potent greenhouse gas N<sub>2</sub>O from the nitrogen cycle - could enzymic regulation hold the key?, *Trends Biotechnol.*, 27, 388-397.
- Rosa, L. P., Dos Santos, M. A., Matvienko, B., Sikar, E., Dos Santos, E. O., 2006, Scientific errors in the fearnside comments on greenhouse gas emissions (GHG) from hydroelectric dams and response to his political claiming, *Clim. Change*, 75, 91-102.
- Rudd, J. W. M., Hamilton, R. D., 1978, Methane cycling in a cutrophic shield lake and its effects on whole lake metabolism. *Limnol. Oceanogr.*, 23, 337-348.
- Shi, W., Chen, Q., Zhang, J., Liu, D., Yi, Q., Chen, Y., Ma, H., Hu, L., 2020, Nitrous oxide emissions from cascade hydropower reservoirs in the upper Mekong River, *Water Res.*, 173, 115582.
- Shi, W., Du, M., Ye, C., Zhang, Q., 2021, Divergent effects of hydrological alteration and nutrient addition on greenhouse gas emissions in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China, *Water Res.*, 201, 117308.
- Song, C., Zhang, J., Wang, Y., Wang, Y., Zhao, Z., 2008, Emission of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from freshwater marsh in northeast of China, *J. Environ. Manage.*, 88, 428-436.
- St. Louis, V. L., Kelly, C. A., Duchemin, E., Rudd, J. W. M., Rosenberg, D. M., 2000, Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate, *BioScience*, 50, 766-775.
- Tremblay, A., Varfalvy, L., Garneau, M., 2004, The issue of greenhouse gases from hydroelectric reservoir; From boreal to tropical regions, *The United Nations Symposium on Hydropower and Sustainable*

- Development, Beijing, China.
- Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C., Garneau, M., 2004, Greenhouse gas emission - Fluxes and processes, Springer, Germany.
- Tsai, D. D. W., Chen, P. H., Ramaraj, R., 2017, The potential of carbon dioxide capture and sequestration with algae, *Ecol. Eng.*, 98, 17-23.
- UNESCO, IHA, 2010, GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs, IHA, UK.
- WAMIS, 2021, <http://wamis.go.kr/>.
- Wang, F., Cao, M., Wang, B., Fu, J., Luo, W., Ma, J., 2015, Seasonal variation of CO<sub>2</sub> diffusion flux from a large subtropical reservoir in East China, *Atmos. Environ.*, 103, 129-137.
- Wang, F., Wang, B., Liu, C. Q., Wang, Y., Guan, J., Liu, X., Yu, Y., 2011, Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the Maotiao River, southwest of China, *Atmos. Environ.*, 45, 3827-3834.
- Wanninkhof, R., Bliven, L. F., 1991, Relationship between gas exchange, wind speed, and radar backscatter in a large wind-wave tank, *J. Geophys. Res. Oceans*, 96, 2785-2796.
- Wanninkhof, R., McGillis, W. R., 1999, A cubic relationship between air-sea CO<sub>2</sub> exchange and wind speed, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1889-1892.
- Weathers, P. J., Niedzielski, J. J., 1986, Nitrous oxide production by cyanobacteria, *Arch. Microbiol.*, 146, 204-206.
- West, W. E., Coloso, J. J., Jones, S. E., 2012, Effects of algal and terrestrial carbon on methane production rates and methanogen community structure in a temperate lake sediment, *Freshw. Biol.*, 57, 949-955.
- Whiting, G. J., Chanton, J. P., 1993, Primary production control of methane emission from wetlands, *Nature*, 364, 794-795.
- Xiao, Q., Hu, Z., Fu, C., Bian, H., Lee, X., Chen, S., Shang, D., 2019, Surface nitrous oxide concentrations and fluxes from water bodies of the agricultural watershed in Eastern China, *Environ. Pollut.*, 251, 185-192.
- Xing, P., Guo, L., Tian, W., Wu, Q. L., 2011, Novel Clostridium populations involved in the anaerobic degradation of Microcystis blooms, *ISME J.*, 5, 792-800.
- Yan, X., Xu, X., Ji, M., Zhang, Z., Wang, M., Wu, S., Wang, G., Zhang, C., Liu, H., 2019, Cyanobacteria blooms: A neglected facilitator of CH<sub>4</sub> production in eutrophic lakes, *Sci. Total Environ.*, 651, 466-474.
- Yang, H., Andersen, T., Dorsch, P., Tominaga, K., Thrane, J. E., Hessen, D. O., 2015, Greenhouse gas metabolism in Nordic boreal lakes. *Biogeochemistry* 126, 211-225.
- Yang, D., Mao, X., Wei, X., Tao, Y., Zhang, Z., Ma, J., 2019, Water - air interface greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O) emissions were amplified by continuous dams in an urban river in Qinghai - Tibet Plateau, China, *Water*, 12, 759.
- Yang, D., Mao, X., Wei, X., Tao, Y., Zhang, Z., Ma, J., 2019, Water-air interface greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O) emissions were amplified by continuous dams in Qinghai-Tibet Plateau, China, *Water*, 12, 759.
- Yeon, I., Hong, J., Hong, E., Lim, B., 2010, The characteristics and correlation analyses of chlorophyll-a data monitored continuously in Daechong Reservoir, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 26, 994-999.

- 
- Full-time Researcher. Kyeong-Deok Park  
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University  
godsla6593@nate.com
  - Full-time Researcher. Won-Gi Jo  
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University  
brilliantwg@gmail.com
  - Full-time Researcher. Yoon-Hwan So  
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University  
lunaace@naver.com
  - Ph.D. Dong-hwan Kang  
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University  
dhkang@pknu.ac.kr