

ORIGINAL ARTICLE

국내 수력발전댐 저수지 수질의 시공간 변화 분석

박경덕 · 강동환* · 조원기 · 양민준¹⁾

부경대학교 지질환경연구소, ¹⁾부경대학교 지구환경시스템과학부 지구환경과학전공

Analysis Temporal and Spatial Changes of Water Quality in Domestic Hydropower Dam Reservoirs

Kyoung-deok Park, Dong-hwan Kang*, Won Gi Jo, Minjune Yang¹⁾

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

¹⁾*Division of Earth and Environmental System Sciences, Major of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

Abstract

This study analyzed the temporal and spatial characteristics of water quality for five hydropower dam reservoirs in South Korea. Water temperature, pH, dissolved oxygen, and chlorophyll-a (Chl-a) showed high fluctuations in summer and autumn at all reservoirs, indicating the existence of seasonal effects. At all five reservoirs, the concentrations of suspended solids (SS) and total nitrogen (TN) fell under the “slightly bad” category and those of total organic carbon (TOC) fell under the “slightly good” category or higher, according to “the standard for living environment of lake water quality.” Variations in the concentration ranges and degrees of change in SS, TN, and TOC among reservoirs were observed, indicating the influences of rainfall, surrounding environments, and seasonal changes. Daecheong and Namgang Dam showed high Chl-a concentrations in summer, indicating that the metabolism of microbial communities, such as algae, was active.

Key words : Hydropower dam, Water quality, Water depth, Seasonal change

1. 서론

인류는 오래전부터 수자원 공급을 위한 저수 및 홍수 통제 등의 이유로 하천에 댐을 건설하였다(Ion and Ene, 2021). 댐에서의 수력발전은 물레방아에서부터 시작하여 점차 대형 저수지의 건설로 발전해 왔으며, 타 에너지에 비해 저비용으로 오랜 시간 동안 전기 에너지를 생산할 수 있다는 점에서 지난 수십 년간 비존재 재생 에너지

(non-intermittent renewable energy)로서 각광 받았다. 최근에는 에너지 수요 증가 및 화석연료 사용의 문제점으로 인해 댐의 건설이 점차 늘어나는 추세이다(Bates et al., 2008; Gunkel, 2009).

국내에 존재하는 저수용 수력발전댐은 총 24개이며, 한강 및 낙동강 유역 등 비교적 규모가 큰 하천에 건설되어 수력발전뿐 아니라 용수 공급과 홍수 조절 등의 다목적댐으로서의 역할을 수행한다(WAMIS, 2022). 그러나

Received 7 February, 2022; Revised 4 May, 2022;
Accepted 9 May, 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.

주변 지역으로부터의 물질유입(Lee and Lee, 2000; Park, 2005)으로 인해 다량의 조류가 발생하여 여과지 폐색과 산소고갈 등의 다양한 문제를 유발한다(Yeon et al., 2010).

댐 저수지에서 수질 관련 연구는 수자원 관리 및 생태계 보전을 위해 지속적으로 수행되어 왔다. 국내에서의 연구는 저수지의 시·공간적 수질 변화 분석(Kim et al., 2002; Lee et al., 2002; Han et al., 2010; Lee et al., 2011; Kim et al., 2012a; Kim et al., 2012b; Mamun et al., 2021)을 중심으로 하여 퇴적물 용출 특성에 따른 저수지 수질 변화(Lee and Lee., 2000; Kim et al., 2020), 저수지 형태에 따른 수질 특성(Cho and Cho, 2013; Cho et al., 2019), 유입지천의 영향(Park et al., 2012; Kim et al., 2012b; Shim et al., 2015), 주변 토지이용 및 강우로 인한 물질유입(Park et al., 2011; Lee et al., 2012; Cho et al., 2019; Choi et al., 2020) 등 저수지별 수질에 미치는 영향인자를 구명하기 위한 연구를 수행하였다. 국내 연구는 특히 조류 발생과 관련된 연구가 많다(Ahn et al., 2002; Yeon et al., 2010; Noh et al., 2014; Baek et al., 2019; Chung et al., 2019; Lee et al., 2019). 국외 연구의 경우 WQI 등을 이용한 수질 평가(Zhao et al., 2013; Elshemy and Meon, 2016; De La Mora-Orozco et al., 2017), 통계분석을 이용한 저수지 수질 특성(Elhatip et al., 2007; Mirosław and Barbara, 2019), 시·공간적 수질 변화(Alpaslan et al., 2012; Chowdhury and Al-Zahrani, 2014; Mohseni-Bandpei et al., 2018) 등이 주를 이룬다.

최근에는 기후변화에 의한 관심이 높아지면서 댐 저수지에서도 온실가스가 발생된다는 연구결과가 제시되고 있다(St. Louis et al., 2000; Giles, 2006; Rasanen et al., 2018; Song et al., 2018). 댐 저수지에서는 온실가스인 CO₂, CH₄, N₂O가 배출되며, 온실가스 배출은 수질 특성과 상관성이 높다(Rudd and Hamilton, 1978; Alison and Prosser, 1993; Parton et al., 1996; Bilotta and Brazier, 2008; Frame and Casciotti, 2010; West et al., 2012; Da Silva and De Bortoli, 2018). 국내에서는 온실가스 배출 영향인자에 대한 연구가 전무하나, 기후변화 방지 차원에서 탄소중립 실현을 위해서는 LULUCF (Land use, land-use change, and forestry) 분야 차원에서 국내 수력발전 댐을 대상으로 한 온실가

스 모니터링이 필요하다.

본 연구에서는 온실가스 배출과 관련된 기초 연구로서, 온실가스와 연관이 있을 것으로 예상되는 수질 성분을 대상으로 국내 수력발전댐 5개소를 대상으로 댐 저수지 간 수십별 수질 비교 및 계절 변화에 따른 수질 변화 특성을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상지역 운영 현황

국내에 존재하는 수력발전댐 저수지의 위치는 Fig. 1과 같으며, 본 연구는 국내의 동·서·남·북부와 중부를 대표하는 5개 저수지(소양강, 보령, 대청, 안동, 남강)를 대상으로 하였다(Table 1). 선정된 5개 댐은 2000년 이전에 준공된 것으로, 현재까지도 용수공급과 전력 생산 등의 역할을 수행하고 있다(KNCOLD, 2022).

소양강다목적댐은 춘천시에 위치한 길이 530 m, 높이 123 m 규모이며, 유역 면적 2,703 km², 저수지 면적 70.0 km², 총 저수용량 2,900백만 m³으로 한강 유역을 대표하는 댐이다. 1973년에 준공된 이후 서울 및 수도권 지역으로의 연간 1,213백만 m³의 용수공급과 수력발전을 이용한 연간 6,100 GWh의 전력생산, 한강 하류부의 수해방지 등에 기여하고 있다.

보령다목적댐은 충청남도 보령시에 위치한 길이 291 m, 높이 50 m 규모이며, 유역 면적은 163.6 km², 저수지 면적은 5.81 km², 총 저수용량은 117백만 m³인 댐이다. 1998년 준공 이후 남한 중서부 지방에 용수를 공급함과 동시에 5.8 GWh의 전력을 생산하고 있다.

대청다목적댐은 대전광역시와 충청북도 청주시 사이에 위치한 길이 495 m, 높이 72 m 규모이며, 유역 면적은 4,134 km², 저수지 면적은 72.8 km², 총 저수용량은 1,490백만 m³으로서 금강 유역을 대표하는 댐이다. 1981년 준공 이후 현재까지 대전광역시를 포함한 충청권과 전북권으로 연간 1,649백만 m³의 용수공급과 연간 240 GWh의 전력생산, 홍수조절 등의 역할을 수행하고 있다.

안동다목적댐은 낙동강 상류지역에 위치하여 길이 612 m, 높이 83 m 규모이며, 유역면적 209 km², 저수지 면적 51.5 km², 총 저수용량 1,248백만 m³인 댐이다. 1977년 준공 이후 부산과 울산 등을 포함한 경상남북도 도시의 용수 공급 및 국내 최초의 양수겸용 수력발전소

Table 1. List of the hydropower dams (KNCOLD, 2022)

Dam name (ID)	Depth (m)			Area (km ²)	Total storage capacity (million m ³)	Construction year (yr)
	Upper	Middle	Lower			
Soyanggang (SY)	5	35	70	70.0	2,900	1973
Boryeong (BR)	5	30	60	5.8	117	1998
Daecheong (DC)	5	35	70	72.8	1,490	1981
Andong (AD)	5	30	60	51.5	1,248	1977
Namgang (NG)	5	15	30	28.2	309	1969

로서 연간 89 GWh의 전력을 생산하여 경북 지역으로 공급하고 있다.

남강다목적댐은 경상남도 진주시에 위치한 길이 1,126 m, 높이 34 m이며, 유역면적은 2,285 km², 저수지 면적 28.2 km², 총 저수용량 309백만 m³인 남부 지역을 대표하는 댐이다. 1969년 준공 이후 경남 서부지역으로의 연간 157백만 m³의 용수공급, 연간 41.3 GWh의 전력 생산, 남강연안의 홍수피해 경감의 역할을 수행하고 있다.



Fig. 1. Location of the domestic hydropower dams.

2.2. 자료 수집

본 연구에 이용된 수질 자료는 국가수자원관리종합시스템(WAMIS, 2022)에서 제공하는 호소수 수질측정망 자료로서, 해당 자료는 “물환경측정망 설치·운영 계획” (환경부고시 제2019-99호)에 고시된 방식에 따라 상층부(수표면으로부터 아래로 5 m 사이), 중층부(전체 수심의 1/2), 하층부(바닥으로부터 위로 5 m 사이)로 구분하여 1개월 간격으로 측정하고 있다. 본 연구에서는 호소수 수질측정망 자료 중 연구대상 댐으로부터 상류 방향으로 약 500 m 떨어진 지점에서 측정한 일 자료를 수집하였다. 본 연구에서는 수온, pH, DO (Dissolved Oxygen), SS (Suspended Solid), TN (Total Nitrogen), TOC (Total Organic Carbon), Chl-a (chlorophyll-a)를 대상으로 댐 저수지별 수질특성을 비교하였다. 수질 성분 자료는 2011년부터 2020년까지 1개월 간격으로 10년간 측정된 수질측정망의 일 자료를 수심(상·중·하층부)별로 수집·정리하였다. 수질 성분 중 TOC는 2013년 7월부터 조사를 시작하였으며, Chl-a의 경우 기존에는 상층부만을 대상으로 조사하였으나, 2016년 8월을 기준으로 중·하층부로 조사영역을 확장하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수력발전댐 저수지 별 수질 현황

수집된 수질 자료를 기반으로 수력발전댐 저수지별로 수심에 따른 수질 특성을 비교하고, 호소수 생활환경기준(환경정책기본법 시행령 제2조)을 적용하여 수질을 평가하였다.

수온의 경우 상층부에서 하층부로 수심이 깊을수록 감소하는 경향을 보였다. 소양강댐의 평균 수온은 4.6~14.8℃로서 5개 댐 저수지 중에서 수온이 가장 낮으며,

상층부와 하층부 사이의 수온차가 큰 것으로 나타났다. 대청댐과 안동댐은 평균 수온이 각각 5.7~16.3°C, 5.3~16.2°C로, 전체적으로 소양강댐보다 높은 수온을 보였다. 보령댐의 평균 수온은 12.4~15.5°C로 상층부는 소양강댐보다 높고, 대청댐, 안동댐보다 낮으며, 하층부는 소양강댐, 대청댐, 안동댐에 비해 높은 수온을 보였다. 남강댐의 평균 수온은 13.9~16.7°C로 5개 댐 저수지 중 수온이 가장 높다. 소양강댐과 대청댐, 안동댐의 경우 상층부와 하층부 사이의 수온차가 비교적 큰 반면, 보령댐과 남강댐은 수심에 의한 수온차가 크지 않은 것으로 나타났다(Fig. 2A).

pH의 경우 전 지점에서 수심이 깊을수록 감소하는 경향을 보였다. 소양강댐과 안동댐의 평균값은 각각 7.0~7.5, 6.9~7.5로 비교적 낮은 수치를 보였다. 보령댐과 남강댐의 평균값은 각각 7.6~7.8, 7.5~7.8로 타 지점보다 pH가 높고 상층부와 하층부 사이의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 대청댐의 평균값은 7.3~8.0으로, 상층부에서 타 지점과 비교하여 높은 pH를 보였다. 모든 댐 저수지의 pH를 호소수 생활환경기준(“보통” 기준 6.5~8.5)과 비교해 보면, 상층부에서는 pH 8.5 이상의 값이 관측되는 경우가 있으며, 하층부에서는 pH 6.5 이하의 낮은 값이 발견되기도 하였다(Fig. 2B).

DO 농도의 경우 상층부에서는 변화폭이 크지 않고 높은 농도를 유지하는 반면, 하층부로 갈수록 DO 농도는 감소하고 변화폭은 증가하였다. 특히 하층부에서는 호소수 생활환경기준(“나쁨” 기준 2.0 mg/L 이하) 이하의 농도가 발견되었다. 소양강댐과 대청댐, 안동댐의 평균 DO 농도는 각각 5.9~9.7 mg/L, 6.1~10.0 mg/L, 7.1~9.2 mg/L로, DO 농도가 비교적 낮다. 소양강댐과 대청댐의 경우 상층부와 하층부 사이의 농도차는 약 4.0 mg/L 정도로 큰 것으로 나타났다. 보령댐과 남강댐의 평균 DO 농도는 각각 8.5~10.4 mg/L, 8.2~10.7 mg/L로, 하층부에서 소양강댐, 대청댐, 안동댐에 비해 높은 농도를 보이며, 상층부와 하층부의 DO 농도차는 2.0 mg/L 미만으로 나타났다(Fig. 2C).

SS 농도의 경우 수심별 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 소양강댐과 대청댐, 안동댐의 평균 SS 농도는 각각 1.1~1.5 mg/L, 1.4~1.6 mg/L, 0.8~1.3 mg/L으로 나타났다. 보령댐의 평균 SS 농도는 2.2~2.3 mg/L로, 소양강댐, 대청댐, 안동댐에 비해 높은 농도를 보였다. 남강댐의

평균 농도는 3.2~4.1 mg/L로 타 지점에 비해 높은 농도를 보였으며, 모든 수심에서 호소수 생활환경기준(“약간 나쁨” 기준 15 mg/L 이하)을 초과하는 경우도 발견되었다(Fig. 2D).

TN의 경우 전 지점에서 공통적으로 수심별 차이는 거의 나타나지 않았으며, 평균 농도가 호소수 생활환경기준(“약간 나쁨” 기준 1.0 mg/L 이하)을 초과하였다. 소양강댐의 평균 TN은 1.809~1.820 mg/L로, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 상층부와 하층부 모두 약 1.2 mg/L 정도의 차이를 보였다. 보령댐과 대청댐의 평균 농도는 각각 1.927~1.936 mg/L, 1.888~2.028 mg/L로 타 지점에 비해 높으며, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 상층부와 하층부 모두 약 2.0 mg/L 정도를 보였다. 안동댐의 평균 농도는 1.459~1.538 mg/L로 가장 낮은 농도를 보이며, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 1.0~1.7 mg/L 정도를 보였다. 남강댐의 경우 평균은 1.485~1.535 mg/L로 타 지역에 비해 낮은 농도를 보이나, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 상층부와 하층부 모두 3.0 mg/L 이상으로 나타났다(Fig. 2E).

TOC의 경우 전 지점에서 수심별 차이는 거의 나타나지 않았다. 소양강댐의 평균 TOC는 각각 1.6~1.7 mg/L이며, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 상층부에서 1.5 mg/L, 하층부에서 2.6 mg/L 정도로 나타났다. 보령댐의 평균 농도는 1.4~1.6 mg/L로, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 상층부와 하층부 모두 1.5 mg/L 정도로 나타났다. 대청댐의 평균 농도는 1.7~2.1 mg/L이며, 최댓값과 최솟값 간의 차이는 상층부 2.0 mg/L, 하층부 1.5 mg/L 정도로 나타났다. 안동댐의 평균 농도는 2.4~2.5 mg/L로 타 지점에 비해 전체적으로 높은 농도를 유지하였으며, 최솟값과 최댓값 간의 차이는 상층부 4.1 mg/L, 하층부 3.7 mg/L 정도로 타 지점에 비해 높은 변동성을 보였다. 남강댐의 평균 농도는 2.0~2.1 mg/L로 대청댐과 유사한 수치를 보이나, 최댓값과 최솟값의 차이는 상층부 3.6 mg/L, 하층부 2.8 mg/L 정도의 농도변화를 보였다. 모든 댐에서의 TOC 농도는 호소수 생활환경기준 “좋음”(3.0 mg/L 이하)에서 “약간좋음”(4.0 mg/L 이하) 정도의 농도를 보였다(Fig. 2F).

Chl-a의 경우 상층부에서 하층부로 이동할수록 감소하는 경향을 보였다. 소양강댐의 경우 평균 Chl-a 농도는 0.5~2.1 mg/m³이며, 최댓값이 7.4 mg/m³으로, 호소수 생활환경기준(“좋음” 기준 9 mg/m³) 이하를 유지하였으며,

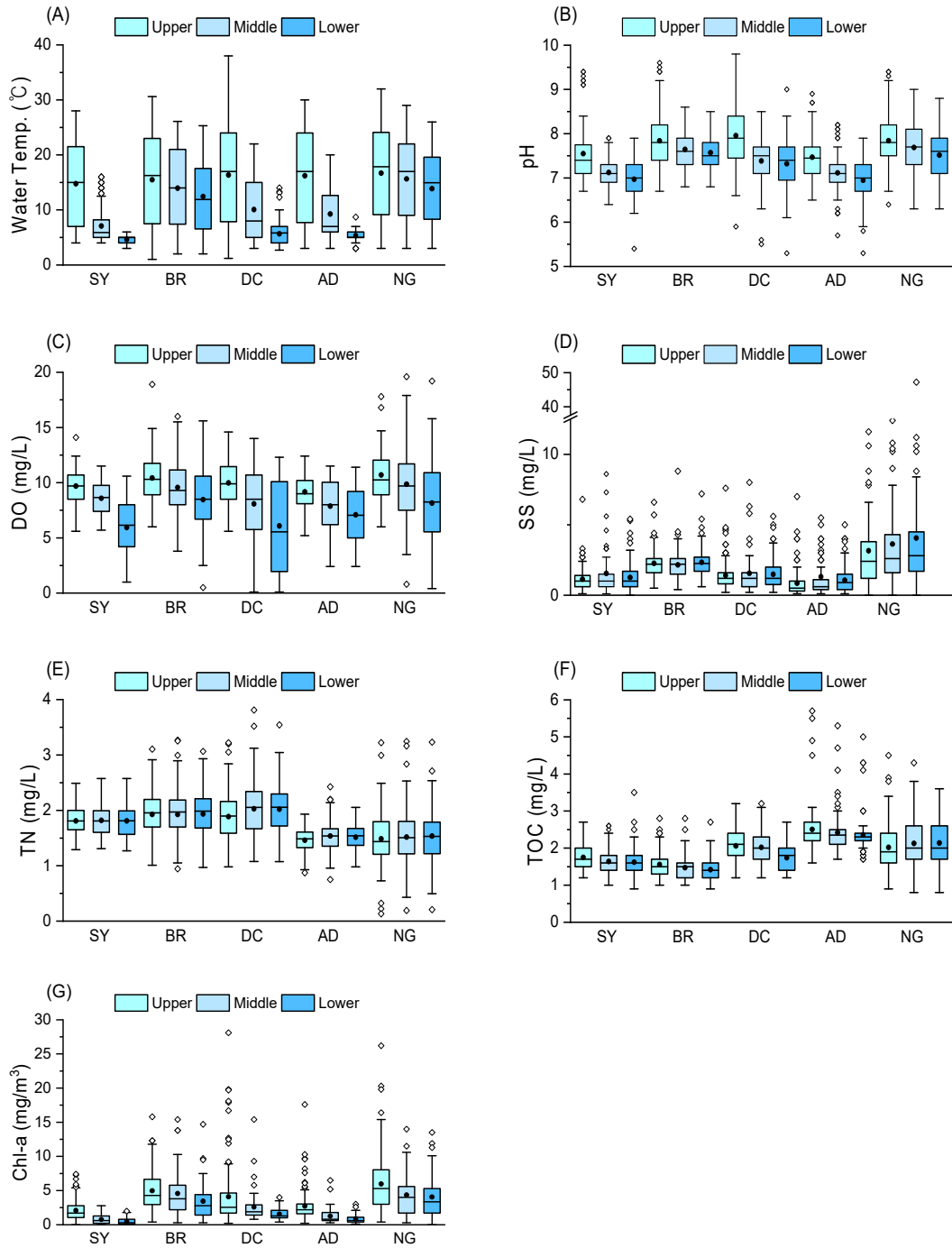


Fig. 2. Comparison of water quality of each dam reservoir during 2011-2020 (A : Water temperature, B : pH, C : DO, D : SS, E : TN, F : TOC, G : Chl-a).

수심에 따라 감소하는 경향을 보였다. 보령댐의 경우 평균 농도는 3.4~5.0 mg/m³이며, 상층부는 최대 15.8 mg/m³의 농도를 보였다. 대청댐의 평균 농도는 1.6~4.1 mg/m³으로, 상층부에서는 최대 28.1 mg/m³, 하층부에서는 최대 4.0 mg/m³으로 수심이 깊을수록 감소하는 경향을 보였다. 안동댐의 평균은 0.9~2.7 mg/m³으로 대청댐보다는 낮은 농도를 보이며, 상층부에서는 최대 17.6 mg/m³, 하층부에서는 최대 3.0 mg/m³으로 대청댐과 마찬가지로 수심이 깊을수록 감소하는 경향을 보였다. 남강댐의 평균은 4.1~6.0 mg/m³으로 타 지점과 비교하여 상층부와 하층부 모두 높은 농도를 보였다. 특히 대청댐과 남강댐은 호소수 수질환경기준 “약간 나쁨”(20~35 mg/m³) 수준까지 증가하는 경우도 발견되었다(Fig. 2G).

3.2. 수력발전댐의 월별 수질 변화

수력발전댐 저수지의 수질 자료를 이용하여 수심별·월별 평균 수질을 산정하여 계절에 따른 수질 변화를 수심별로 분석하였다.

수온은 전 지점에서 8~9월에 높고 1~3월에는 낮은 계절적인 특성을 보였다. 특히 저수지 규모가 상대적으로 큰 소양강댐과 대청댐, 안동댐은 여름철 높은 기온으로 인해 상층부의 수온은 증가하는 반면, 하층부는 계절의 영향을 거의 받지 않아 낮은 수온을 유지함으로써 수온 차에 의한 성층현상을 보였다(Fig. 3). 보령댐과 남강댐 또한 여름에 수온이 증가하나 상층부 뿐만 아니라 중·하층부에도 계절적인 수온 변화를 보이는데, 저수지 규모가 소양강댐과 대청댐, 안동댐에 비해 작아 강우 등의 영향에 쉽게 반응하고, 이로 인해 수체가 빈번하게 혼합됨으로써 생기는 결과로 볼 수 있다(Kim et al., 2002).

pH는 6~9월 사이에 상층부에서 증가하는 추세를 보이며, 여름철 수온 증가나 조류 발생 등으로 인해 수체 내 CO₂가 배출되는 것으로 추정된다. 반면, 중·하층부는 상층부에 비해 비교적 안정한 상태로 존재하므로 pH 증가 폭이 크지 않으며, 반대로 유기물의 분해로 인해 CO₂가 축적됨으로써 pH가 감소하는 경우도 있다(Fig. 4).

DO 농도는 1~3월에 높고 6~8월에 낮은 것으로 나타났다. 상층부에서는 DO의 변동이 비교적 크지 않으나, 중·하층으로 갈수록 여름철에 DO 농도가 급격히 감소하는 패턴을 보였다. 여름철에는 유기물질의 다량 유입으로 인해 산소가 소모되는데, 상층부에서는 조류 등에 의

해 산소가 지속적으로 유입되는 반면, 중·하층에서는 유기물 분해로 사용되는 산소에 비해 공급되는 산소량이 낮기 때문으로 보인다(Fig. 5).

SS 농도의 경우 대부분 계절에 따른 농도변화는 크지 않으나, 7~10월 사이에 급격한 농도 증가가 발견되는데, 이는 강우로 인해 입자성 물질이 단기간에 유입된 것으로 보인다(Kim et al., 2012; Zhou et al., 2015). 다만 남강댐에서는 7~10월에 평균 농도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 강우로 인한 영향보다는 조류 발생 등 계절적인 영향에 의해 증가하는 것으로 보인다(Fig. 6).

TN 농도의 경우 지점에 따라 계절별 패턴이 각기 달랐다. 소양강댐은 8~9월에 소폭 증가하고, 대청댐은 상층부에서는 5~6월, 중·하층부에서는 6~9월에 비교적 높으며, 안동댐은 계절에 따른 변화가 거의 발견되지 않았다. 반면 보령댐의 경우 주로 1~6월에 농도 변화폭이 크며, 남강댐에서는 주로 3~5월에 높고, 6~10월에 낮은 값을 보였다(Fig. 7). TN 농도는 주로 산림이 많은 곳에서 높은 특징이 있고, 댐 주변의 인간 활동과 관련 있으며(An and Shin, 2005), 여름철 강우로 인한 물질유입 또는 희석효과에 영향을 받는다(An, 2001).

TOC 농도는 주로 7~10월 사이에 높은 농도를 보였다. 그러나 소양강댐과 보령댐은 계절에 따른 TOC 변화가 크지 않았다. 안동댐에서는 평균 농도변화는 크지 않으나, 7~11월 사이에 이상치가 많이 발견되어 강우로 인한 유입(Zhou et al., 2015)이 주요 요인으로 보인다. 남강댐에서 7~9월에 높은 농도를 기록하여 계절에 따른 변화가 가장 두드러지게 나타나며, 조류 발생으로 인한 유기물 생산량이 증가한 것이다(Leloup et al., 2013; Fig. 8).

Chl-a 농도는 7~11월 사이에 높은 것으로 나타났다. 소양강댐은 전체적으로 낮은 Chl-a 농도를 기록하였으며, 8~10월 사이에 상층부의 Chl-a 농도가 소폭 증가하였고, 안동댐에서는 8~10월에 일시적으로 높은 Chl-a 농도를 기록하였으나 대부분 5 mg/m³ 이하의 낮은 농도를 유지하였다. 반면 대청댐에서는 7~11월에 상층부에서 높은 Chl-a 농도를 기록하였고, 남강댐에서는 6~9월 사이에 높은 Chl-a 농도를 기록하여 이 시기에 남조류의 번식이 활발한 것으로 나타났다(Fig. 9). 보령댐의 경우 모든 시기에 월평균 5 mg/m³ 정도의 농도를 유지하며, 1월에도 높은 Chl-a 농도가 발견되었는데, 여름에는 남조류가 겨울에는 규조류가 우점하였기 때문이다(Jeong and

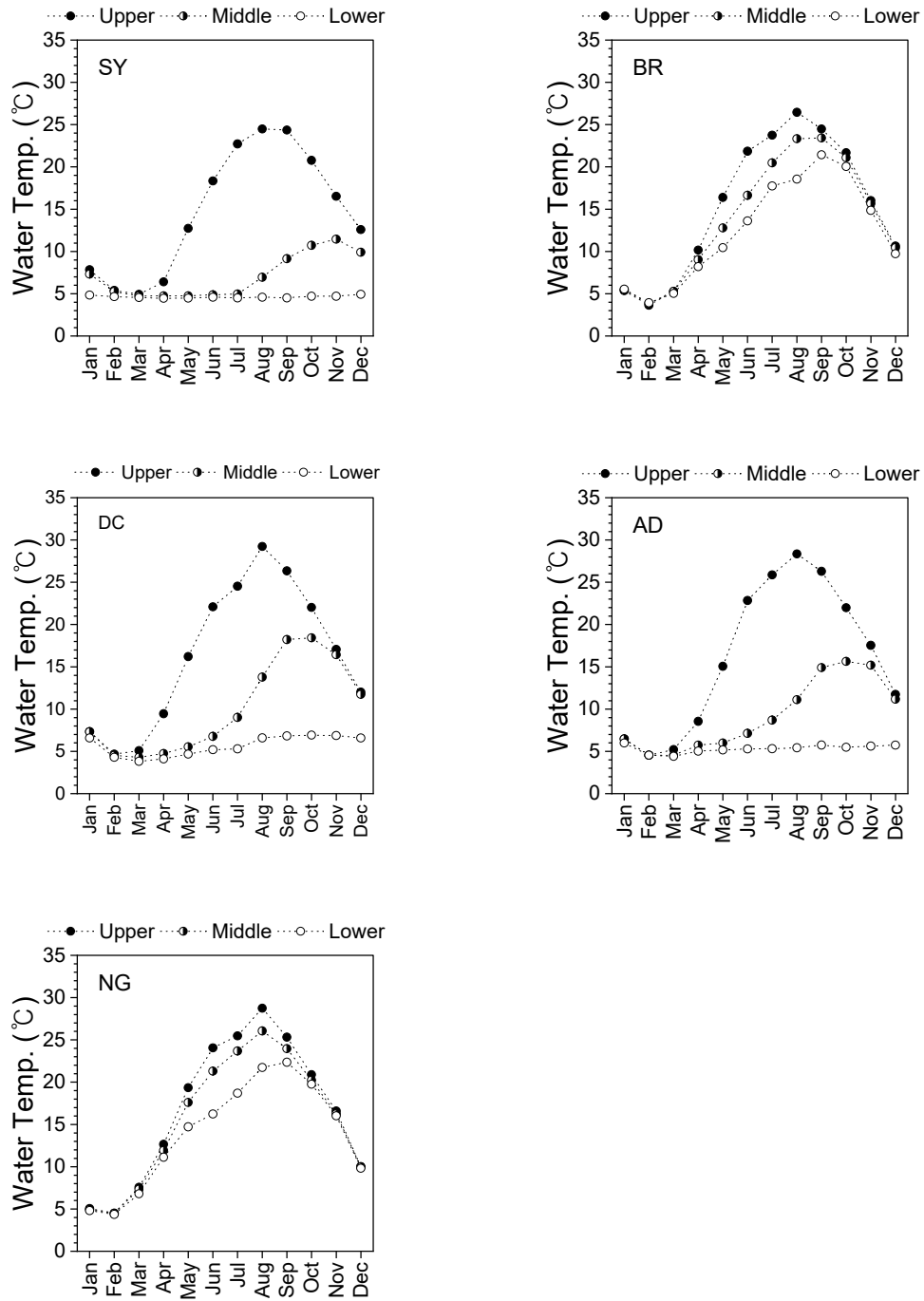


Fig. 3. Monthly changes of mean water temperature for each dam reservoir.

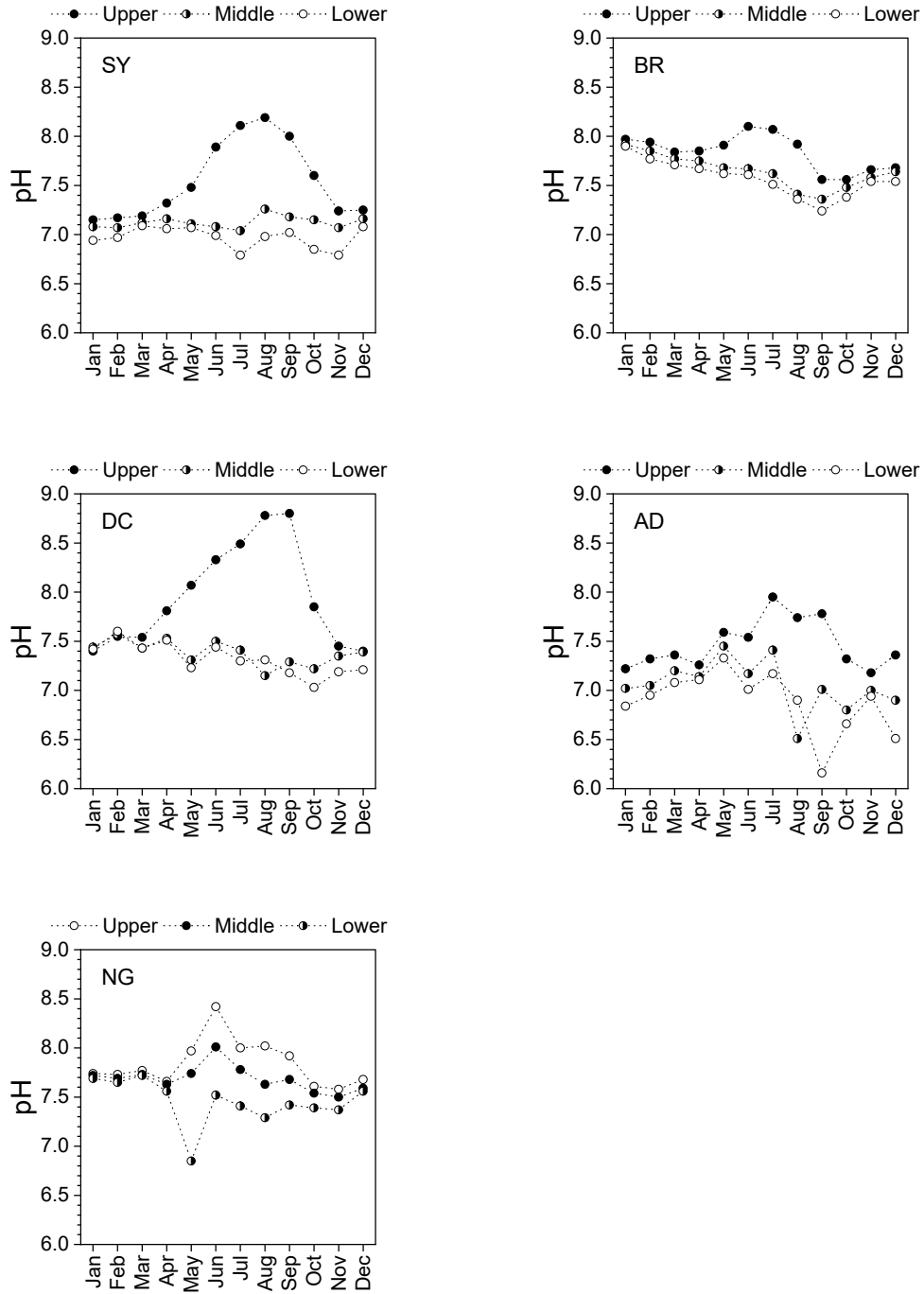


Fig. 4. Monthly changes of mean pH for each dam reservoir.

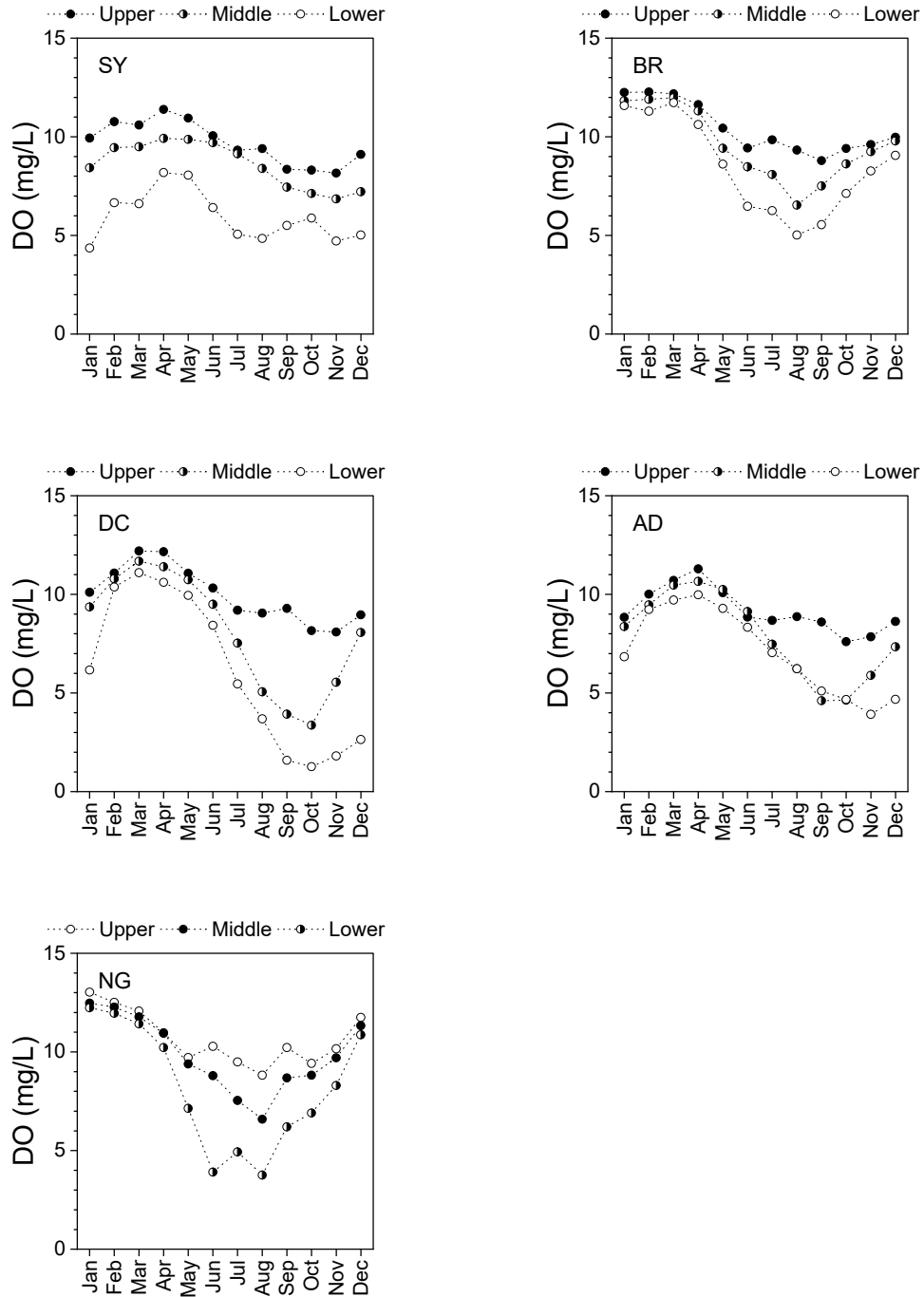


Fig. 5. Monthly changes of mean DO concentration for each dam reservoir.

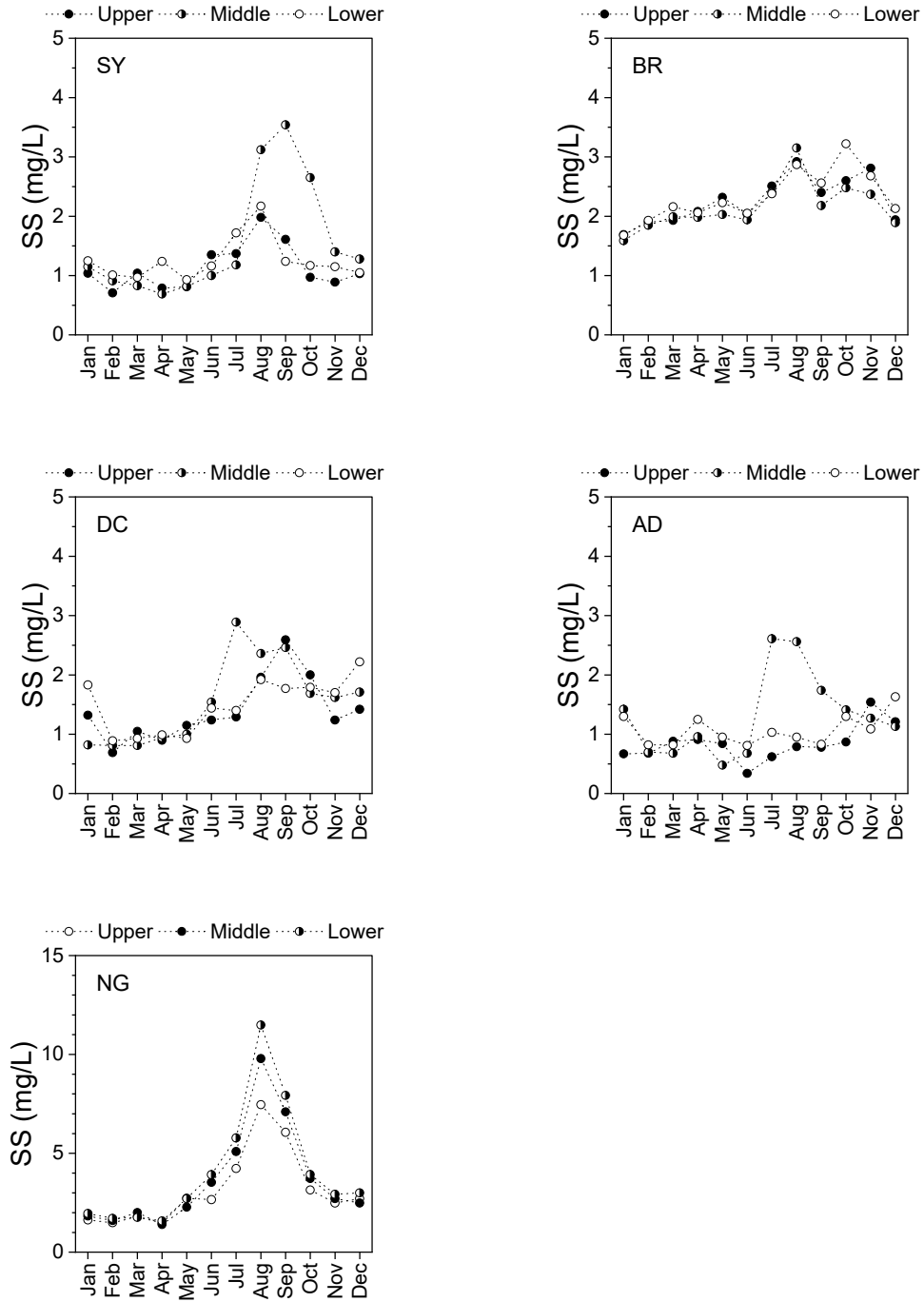


Fig. 6. Monthly changes of mean SS concentration for each dam reservoir.

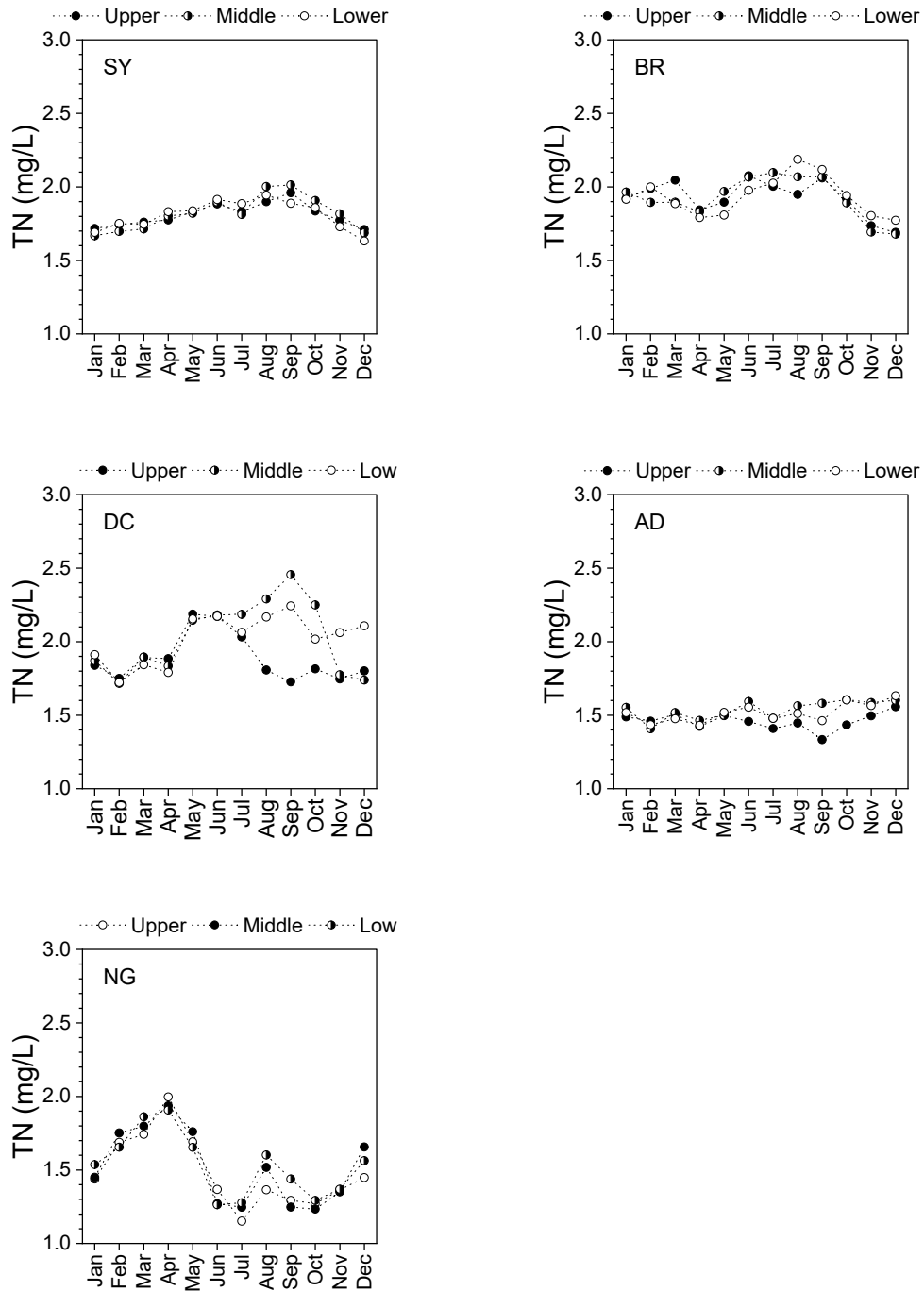


Fig. 7. Monthly changes of mean TN concentration for each dam reservoir.

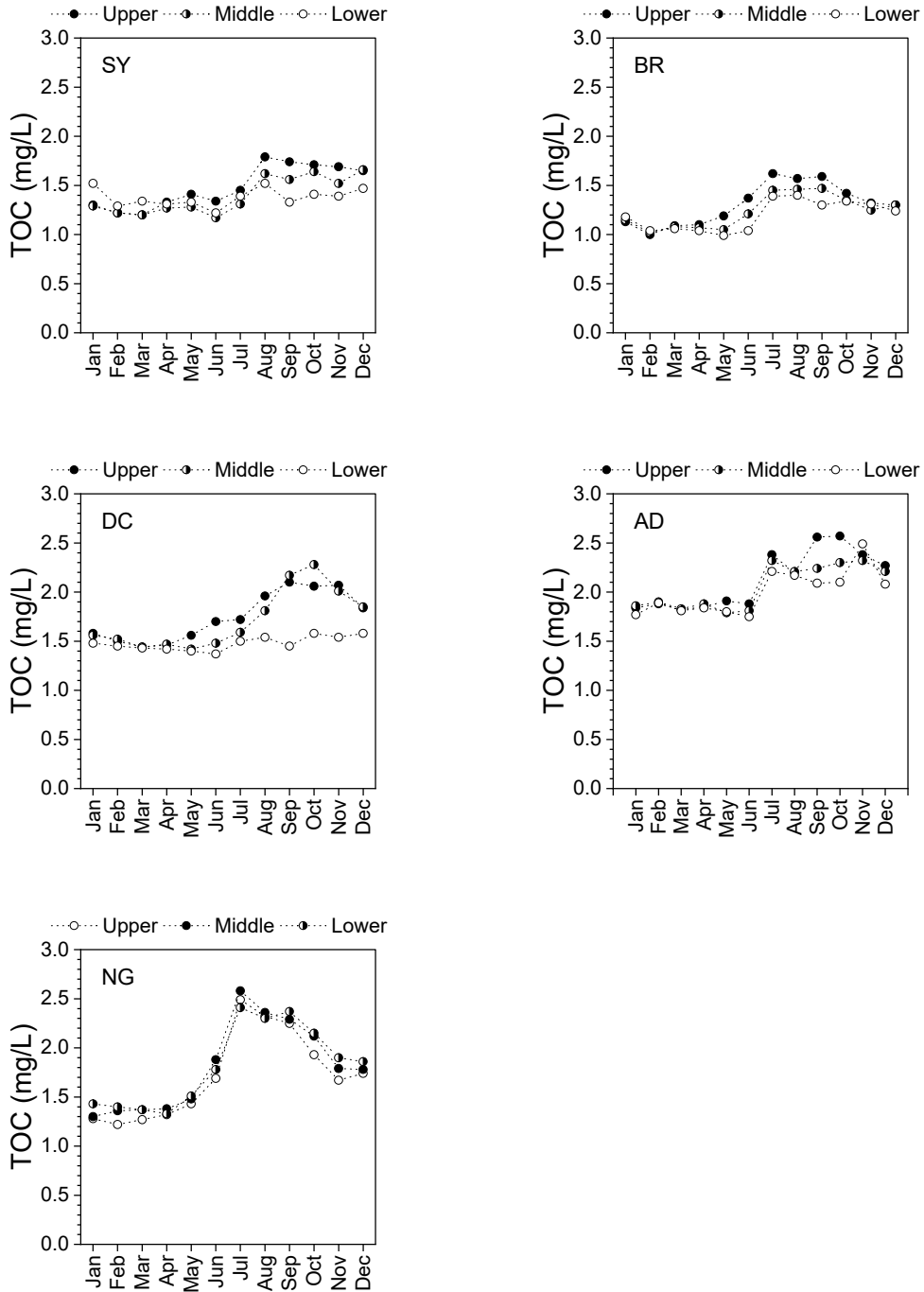


Fig. 8. Monthly changes of mean TOC concentration for each dam reservoir.

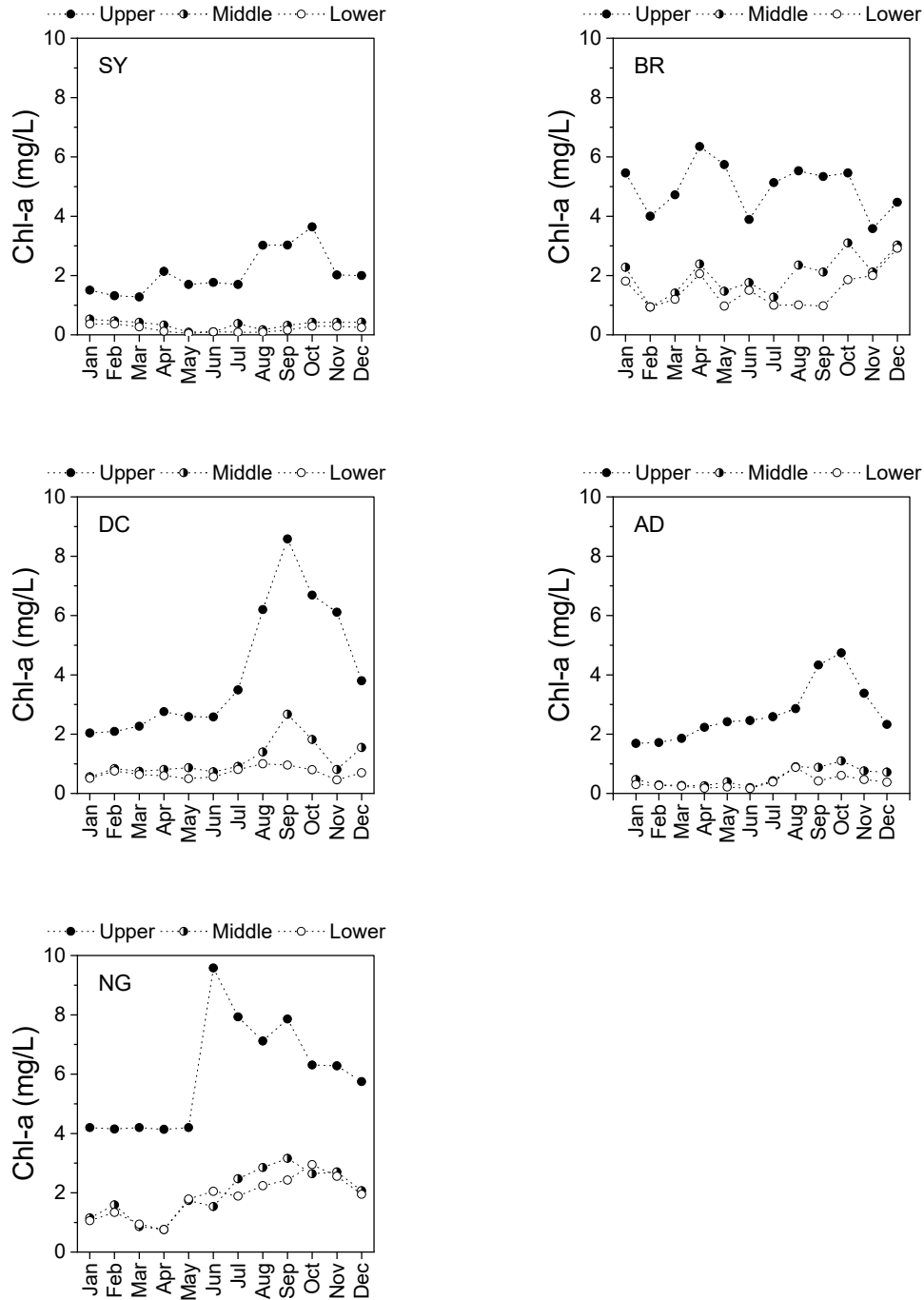


Fig. 9. Monthly changes of mean Chl-a concentration for each dam reservoir.

Jo, 2003).

4. 결론

수력발전댐 저수지별 계절에 따른 수질변화를 분석한 결과, 수온과 pH, DO, Chl-a는 모든 지점에서 계절에 따른 변동성을 보이며, SS와 TN, TOC는 계절적인 변화 이외에도 강우나 주변 환경 등 외부적인 요인에 의해 저수지별로 차이를 보였다. 수온은 북쪽에 위치한 소양강댐에서 낮고, 중부에 위치한 대청댐과 남부에 위치한 남강댐에서 높으며, 특히 대청댐과 남강댐에서는 여름에 높은 Chl-a 농도를 보여 비교적 조류 등 미생물 활동이 활발한 것으로 판단된다.

여름철에는 상층부의 수온 증가로 수체혼합이 적고 성층이 발달하는데, 규모가 작은 저수지는 강우 및 주변 지류 등의 영향으로 수체혼합이 발생하는 경우도 있다. 보령댐과 남강댐은 여름철에도 수심별 수온차가 크지 않아 수체혼합이 비교적 활발한 것으로 보이며, 이들 저수지는 수온이 높은 여름철에 온실가스 배출량이 높을 것으로 예상된다. 반면 소양강댐과 대청댐, 안동댐은 여름철에 수온에 의한 성층이 조성되나, 상층부의 수온이 하강하는 가을에 수체혼합이 발생함으로써 온실가스가 배출될 가능성이 있다.

향후에는 본 연구 결과를 이용하여 수력발전댐 저수지에서 온실가스 배출량에 대한 연구를 수행하고자 한다. SS와 TN, TOC는 저수지별로 차이는 존재하나, SS와 TN은 호소수 생활환경기준으로 “약간나쁨”, TOC는 “약간좋음” 이상의 농도로 나타나 모든 저수지에서 온실가스 발생에 충분한 영양염류 및 유기물질이 존재하는 것으로 판단된다. 또한 여름과 가을 사이에 Chl-a 농도가 증가하는 것으로 보아 이 시기에 높은 수온으로 미세조류를 포함한 미생물의 대사활동이 활발하여 온실가스 발생량이 높을 것으로 판단된다. 온실가스 발생은 주로 인위적인 요소에 집중하여 왔으나, 탄소중립을 실현하기 위해서는 자연계에서 발생하는 온실가스를 대상으로 한 연구가 수행되어야 한다. 본 연구 결과를 토대로 향후 댐 저수지를 대상으로 수질 인자와 온실가스 발생량 간의 관계를 구명할 수 있을 것으로 기대된다.

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

- 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.
- Alison, S. M., Prosser, J. I., 1993, Ammonia oxidation at low pH by attached populations of nitrifying bacteria, *Soil Biol. Biochem.*, 25, 935-941.
- Alpaslan, K., Tocer, M. A. T., 2012, Vertical and seasonal changes of water quality in Keban Dam Reservoir, *J. Fish. Sci.*, 6, 252-262.
- An, K. G., 2001, Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem, *KJEE*, 34, 1-8.
- An, K. G., Shin, I. C., 2005, Influence of the asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream, *Korean J. Limnol.*, 38, 54-62.
- 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.
- Bates, B., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J., 2008, Climate change and water - IPCC Technical Paper VI, IPCC Secretariat, Geneva.
- Bilotta, G. S., Brazier, R. E., 2008, Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, *Water Res.*, 42, 2849-2861.
- Cho, H. S., Cho, H. J., Cho, K. H., 2019, Effects of hydrogeomorphology and watershed land cover on water quality in Korean reservoirs, *Ecol. Resil. Infrastruct.*, 6, 79-88.
- Cho, K. H., Cho, H. S., 2013, Analysis of environmental factors of geomorphology, hydrology, water quality and shoreline soil in reservoirs of Korea, *KJEE*, 46, 343-359.

- Choi, H. S., Jeon, M. S., Kim, L. H., 2020, Effect of Cultivation Activity in Daecheong Lake Flood Control Site on Water Quality, *J. Wet. Res.*, 22, 49-58.
- Chowdhury, S., Al-Zahrani, M., 2014, Water quality change in dam reservoir and shallow aquifer: analysis on trend, seasonal variability and data reduction, *Environ. Monit. Assess.*, 186, 6127-6143.
- 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.
- Da Silva, M. I., De Bortoli, A. L., 2018, Comparison of the modified adomian decomposition method and the simplified Runge-Kutta method for solutions of the anaerobic digestion process, *Proc. Ser. Braz. Soc. Comput. Appl. Math.*, 6, 010260.
- De La Mora-Orozco, C., Flores-Lopez, H., Rubio-Arias, H., Chavez-Duran, Ochoa-Rivero, J., 2017, Developing a water quality index (WQI) for an Irrigation dam, *IJERPH*, 14, 439.
- Elhatip, H., Himis, M. A., Gülbahar, N., 2008, Evaluation of the water quality at Tahtali dam watershed in Izmir-Turkey by means of statistical methodology, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 22, 391-400.
- Elshemy, M., Meon, G., 2016, Water quality assessment of Aswan high dam reservoir. In: Negm, A. M., *The Nile River, The Handbook of Environmental Chemistry*, 56, Springer.
- Frame, C. H., Casciotti, K. L., 2010, Biogeochemical controls and isotopic signatures of nitrous oxide production by a marine ammonia-oxidizing bacterium, *Biogeosciences*, 7, 2695-2709.
- Giles, J., 2006, Methane quashes green credentials of hydropower, *Nature*, 444, 524-525.
- Gunkel, G., 2009, Hydropower - A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions, *Clean - Soil Air Water*, 37, 726-734.
- Han, J. H., Lee, J. Y., An, K. G., 2010, Interannual and seasonal variations of water quality in terms of size dimension on multi-purpose Korean dam reservoirs Along with the Characteristics of Longitudinal Gradients, *Korean J. Limnol.*, 43, 319-337.
- Ion, I. V., Ene, A., 2021, Evaluation of greenhouse gas emissions from reservoirs: A review, *Sustainability*, 13, 11621.
- Jeong, J. W., Jo, J. G., 2003, Study on seasonal population structure and character of phytoplankton at the Seonakdong River, *Rep. Busan Inst. Health Environ.*, 13, 69-89.
- Kim, E. S., Sim, K. B., Yang, S. Y., Yoon, J. H., Kal, B. S., Son, I. O., Choi, H. I., 2012a, Seasonal water quality analysis in Daecheong Lake by eutrophication assessment methods, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 28, 882-889.
- Kim, G. H., Lee, J. H., An, K. G., 2012b, Spatio-temporal fluctuations with influences of Inflowing tributary streams on water quality in Daecheong Reservoir, *Korean J. Limnol.*, 45, 158-173.
- Kim, J. M., Park, J. D., Noh, H. R., Han, M. S., 2002, Changes of seasonal and vertical water quality in Soyang and Paldang River-reservoir system, Korea, *Korean J. Limnol.*, 35, 10-20.
- Kim, Y. H., Park, J. C., Shin, T. C., Kim, J. J., 2020, Assessment of pollution characteristics of surface sediments from Lake Andong(II): Studies on the nutrient and heavy metal release characteristics from sediments in Andong Dam, *Korean J. Mineral. Petrol.*, 33, 391-405.
- KNCOLD, 2022, <http://www.kncold.or.kr/>.
- Lee, G. S., Park, J. H., Choi, Y. W., 2012, The Comparison of water quality of Daecheong-Dam basin according to the data sources of land cover map, *KSIS*, 20, 25-35.
- 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.
- Lee, H. S., Chung, S. W., Choi, J. K., Oh, D. G., Heo, T. Y., 2011, Analysis of spatial water quality variation in Daechung Reservoir, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 27, 699-709.
- Lee, H. W., An, K. G., Park, S. S., 2002, Long term annual trend analysis of epilimnetic water quality and their longitudinal heterogeneities in Lake Soyang, *Korean J. Limnol.*, 35, 69-44.
- Lee, Y. S., Lee, K. S., 2000, A Study on release characteristics of sediment and its impacts on water quality in Daecheong Dam Reservoir, *J. Environ. Impact Assess.*, 9, 99-107.
- Leloup, M., Nicolau, R., Pallier, V., Yéprémian, C.,

- Feuillade-Cathalifaud, G., 2013, Organic matter produced by algae and cyanobacteria: Quantitative and qualitative characterization, *J. Environ. Sci.*, 25, 1089-1097.
- Mamun, M., Kim, J. Y., An, K. G., 2021, Multivariate statistical analysis of water quality and trophic state in an artificial dam reservoir, *Water*, 13, 186.
- Mirowslaw, W., Barbara, W., 2019, Changes in the flow and quality of water in the dam reservoir of the Mała Panew catchment (South Poland) characterized by multidimensional data analysis, *Arch. Environ. Prot.*, 45, 26-41.
- Mohseni-Bandpei, A., Motesaddi, S., Eslamizadeh, M., Rafiee, M., Nasserri, M., Namin, M. M., Hashempour, Y., Mehrabi, Y., Riahi, S. M., 2018, Water quality assessment of the most important dam (Latyan dam) in Tehran, Iran, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25, 29227 - 29239.
- 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.
- Park, H. K., Kwon, O. Y., Jung, D. I., 2011, Characteristics of allochthonous organic matter in large dam reservoir, Lake Soyang, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 27, 88-97.
- Park, J. G., 2005, Water environmental factors and trophic states in Lake Daechung, *Korean J. Limnol.*, 38, 382-392.
- Park, S. J., 2012, Seasonals pollutant outflow analysis in the watershed of Soyang Lake by using multivariate analysis, *JKAIS*, 13, 3726-3734.
- Parton, W. J., Mosier, A. R., Ojima, D. S., Valentine, D. W., Schimel, D. S., Weier, K., Kulmala, A. E., 1996, Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10, 401-412.
- 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.
- 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.
- Shim, M. J., Yoon, J. Y., Lee, S. H., 2015, Water quality properties of tributaries of Daechung Lake, Korea, *KJEE*, 48, 12-25.
- Song, C., Zhang, J., Wang, Y., Wang, Y., Zhao, Z., 2008, Emission of CO₂, CH₄ and N₂O 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.
- WAMIS, 2022, <http://wamis.go.kr/>.
- 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.
- Yeon, I., Hong, J., Hong, E., Lim, B., 2010, The characteristics and correlation analyses of chlorophyll-a data monitored continuously in Daechung Reservoir, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 26, 994-999.
- Zhao, P., Tang, X., Tang, J., Wnag, C., 2013, Assessing water quality of Three Gorges Reservoir, China, Over a five-year period from 2006 to 2011, *Water Resour. Manag.*, 4545-4558.
- Zhou, Z., Huang, T., Ma, W., Li, Y., Zeng, K., 2015, Impacts of water quality variation and rainfall runoff on Jinpen Reservoir, in Northwest China, *Water Sci. Eng.*, 8, 301-308.

-
- Full-time Researcher. Kyeong-Deok Park
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
godsla6593@nate.com
 - Ph.D. Dong-hwan Kang
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
dhkang@pknu.ac.kr
 - Full-time Researcher. Won-Gi Jo
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
brilliantwg@gmail.com
 - Professor Min-June Yang
Division of Earth and Environmental System Sciences,
Major of Environmental Geosciences, Pukyong National University
minjune@pknu.ac.kr