

Original article

## 수질 특성에 따른 우리나라 주요 호소 분류 및 호소 영양 상태 변동 특성 분석

이대성 · 이다영 · 박영석\*

경희대학교 생물학과

**Classification of Major Reservoirs Based on Water Quality and Changes in Their Trophic Status in South Korea.** Dae-Seong Lee (0000-0001-7288-0156), Da-Yeong Lee (0000-0002-2457-2041) and Young-Seuk Park\* (0000-0001-7025-8945) (Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea)

**Abstract** Understanding the characteristics of reservoir water quality is fundamental in reservoir ecosystem management. The water quality of reservoirs is affected by various factors including hydro-morphology of reservoirs, land use/cover, and human activities in their catchments. In this study, we classified 83 major reservoirs in South Korea based on nine physicochemical factors (pH, dissolved oxygen, chemical oxygen demand, total suspended solid, total nitrogen, total phosphorus, total organic carbon, electric conductivity, and chlorophyll-a) measured for five years (2015~2019). Study reservoirs were classified into five main clusters through hierarchical cluster analysis. Each cluster reflected differences in the water quality of reservoirs as well as hydromorphological variables such as elevation, catchment area, full water level, and full storage. In particular, water quality condition was low at a low elevation with large reservoirs representing cluster I. In the comparison of eutrophication status in major reservoirs in South Korea using the Korean trophic state index, in some reservoirs including cluster IV composed of lagoons, the eutrophication was improved compared to 2004~2008. However, eutrophication status has been more impaired in most agricultural reservoirs in clusters I, III, and V than past. Therefore, more attention is needed to improve the water quality of these reservoirs.

**Key words:** lotic ecosystem, lakes, cluster analysis, physicochemical factors, hydromorphological factors, trophic state index

## 서 론

호소는 담수생태계에서 인간을 포함한 생명체가 물을 이용 가능케 하는 중요 요소로서 생태계 내 필수 불가결한 요소이다. 우리나라의 호소는 대부분 인공적으로 건설되었으며 다목적댐, 발전용 댐, 생활·공업용 댐, 농업용 저수지 등과 일부 자연호를 포함하여 18,000개 이상의 크고 작은 호

소가 존재한다(Hwang *et al.*, 2003; Kwon *et al.*, 2014).

호소는 위치와 기원, 수질, 크기, 사용 목적 등에 따라 다양한 특성을 가진다. 호소와 같은 정수생태계는 자연계에서는 오랜 시간에 걸쳐 천천히 변화하지만, 최근 인간 활동으로 인해 급격한 변화를 맞이하고 있다(Gikas *et al.*, 2009; MOE, 2009). 호소생태계는 유역 내 자연적 특성뿐만 아니라 인간 활동, 토지 이용 등에 의해 복합적으로 영향을 받으며, 이로 인해 수리·수질 및 생물 다양성과 수생태계 건강성 등이 크게 변화한다(Park *et al.*, 2014; Withers *et al.*, 2014). 호소를 포함한 정수생태계는 유속, 체류 시간, 하상 구성, 생

Manuscript received 11 May 2022, revised 22 June 2022,  
revision accepted 24 June 2022

\* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244  
E-mail: parkys@khu.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

물 다양성이 하천 생태계와는 다른 특성을 가지기에, 호소의 효율적인 관리를 위해서는 정수생태계의 유역·수리·수질 특성에 대한 호소별 차별화된 방안이 필요하다(Lee *et al.*, 2020; Kwak *et al.*, 2021). 따라서 효율적이고 지속 가능한 호소생태계 관리를 위해서는, 호소를 특성에 따라 분류하고 그 특성에 맞는 관리전략이 수립 및 실행되어야 한다(Kwon *et al.*, 2014; Jeong *et al.*, 2022).

호소의 생태적, 이화학적 특성은 대표적으로 호소 부영양화 정도로 나타낼 수 있으며, 이에 다양한 호소 부영양화 지수 기준이 제시되었다. Carlson (1977)은 엽록소-a와 총 인 농도를 이용해 부영양화 지수(Trophic state index; TSI)를 제시하였으며, OECD (1982)에서는 Carlson의 TSI를 기반으로 호소의 부영양 기준을 마련하였다(Kwon *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2014).

국내에서도 영양 상태에 따른 호소 분류를 위하여, Carlson (1977)의 TSI와 OECD (1982) 기준을 사용한 다양한 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2014). 수질 이외에 수심, 유효저수량과 수면적의 비 등 수리수문학적 요소를 이용한 부영양화 연구도 이루어졌다(Kim and Hwang, 2004; MAF, 2005). 한편, 국립환경과학원에서 기존 TSI를 국내 환경에 맞게 개선하여 한국형 부영양화 지수(TSI<sub>KO</sub>)를 개발하였으며(NIER, 2006), 2013년부터 국내 주요 호소에 대해 적용하여, 호소의 영양 상태를 평가해 오고 있다(Kong and Kim, 2019).

Kwon *et al.* (2014)은 자기조직화지도(Self-Organizing

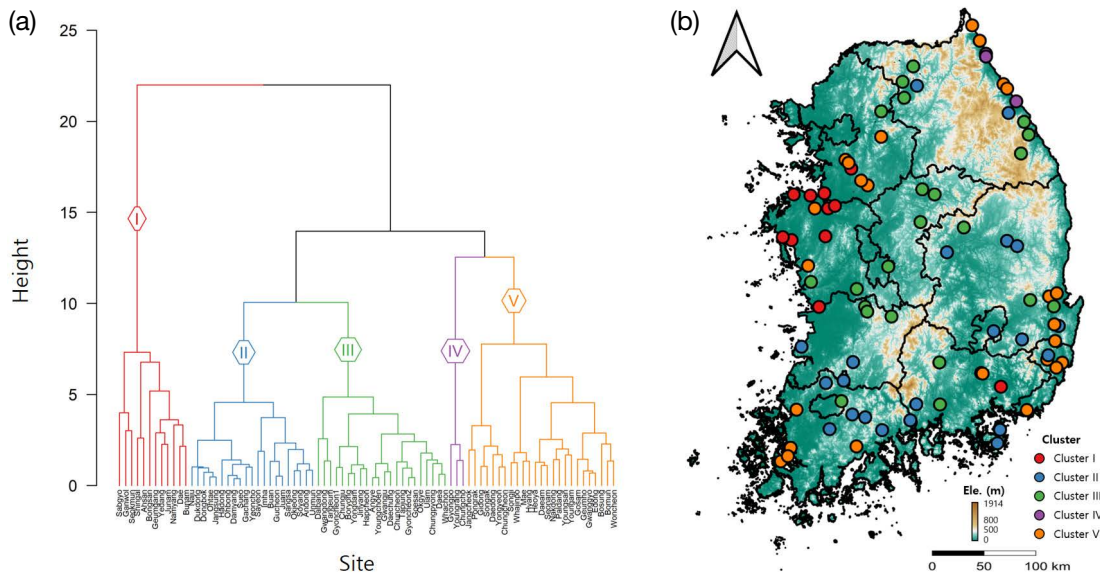
Map)를 이용하여 우리나라 주요 호소를 수리, 지형, 형태적 특성에 따라 유형화하고, 수질, 토지 이용/피복, 수리, 지형, 형태적 요인에서의 각 유형별 차이를 밝혔다. 또한 2004년부터 2008년 수질 자료를 이용해 유형별로 분석하여, 국내 주요 호소 대부분이 부영양화 이상의 영양 상태를 보임을 보고하였다. 그러나 Kwon *et al.* (2014)의 연구에 사용된 자료는 10년 전의 자료로서 근래의 호소 상태를 나타내기에는 무리가 있다.

따라서 본 연구는 우리나라 주요 호소의 최근 5년간 수질 자료를 이용하여 호소를 분류하고, 호소의 수문 및 형태적 특성과의 관계성을 분석하였다. 또한 부영양화 지수를 이용하여, 과거와 최근 호소별 부영양화 상태를 비교하고 국내 호소의 부영양화 상태의 변화 경향을 호소 유형별로 확인하였다. 본 연구의 결과는 호소를 비롯한 국내 정수생태계의 수리수질모델 및 군집변화 예측 모델 개발, 호소생태계 관리 전략 수립 등에 있어 기초 정보로 활용될 것으로 예상된다.

## 재료 및 방법

### 1. 호소 환경 자료

환경부에서 지정한 유역/지방 환경관리청 조사 대상 호소 90개소 중 이용 가능한 수질 자료가 있는 83개 호소를 대상으로 연구를 수행하였다(Fig. 1). 이들 호소는 1일 30만 톤 이상의 원수를 취수하거나, 만수위 50만 톤 이상인 호소를



**Fig. 1.** Classification and distribution of 83 major reservoirs based on physicochemical water quality in South Korea. (a) Dendrogram of reservoir classification based on a hierarchical cluster analysis with Euclidean distance and Ward linkage method, (b) Location of reservoirs in each group defined in the cluster analysis.

포함하고 있다(MOE, 2017).

수질에 따라 호소 분류를 수행하기 위해 해당 호소의 최근 5년간의 월별 수질 자료(2015~2019년)를 수집하였으며, 총 9개 수질 요인(pH, 용존산소량(DO), 화학적 산소요구량(COD), 총 부유물질(TSS), 총 질소(T-N), 총 인(T-P), 총 유기탄소(TOC), 전기전도도(EC), 엽록소-a(Chl-a))를 이용하였다. 또한 과거와 현재 수질 비교를 위해, 2004년부터 2008년까지의 과거 수질 자료를 수집하였다. 해당 자료는 국립환경과학원에서 운영하는 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>) 내 수질측정망 호소 및 농업용수 자료를 사용하였다. 수집한 호소 수질 자료는 우선 호소 및 연도별로 평균낸 후, 다시 호소별로 평균내어 사용하였다.

호소의 수문 및 형태적 요인 자료로 고도(elevation), 유역 면적(catchment area), 만수위(full water level), 총 저수량(full storage)을 사용하였으며, 한국수자원공사(<http://www.wamis.go.kr>) 및 한국농어촌공사(<http://www.ekr.or.kr>)에서 제공하는 자료와 기존에 출판된 보고서 및 문헌자료를 취합하여 이용하였다(MOE, 1994; Kwon *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2014).

## 2. 분석 방법

수질 특성에 따라 83개 호소를 분류하기 위하여, 계층적 군집화 분석(Hierarchical cluster analysis, HCA)을 수행하였다. 표준화된 호소 수질 자료에 대해 호소 간 유사도는 Euclidean 거리를 이용하여 계산하였다. 분류된 그룹 간 연결방법으로는 Ward 연결법을 사용하였다. 이후, 비모수 다차원 척도법(Non-metric Multi-dimensional Scaling, NMDS)을 이용하여, HCA를 통해 분류된 그룹과 환경 자료 간 관계를 확인하였다. NMDS에서는 HCA와 동일한 자료 및 거리 계산 방법을 사용하였다.

그룹 간 수질 및 호소 환경 자료의 차이를 비교하기 위해 통계 검정을 수행하였다. 통계 검정 방법으로는 비모수 통계 검정방법인 Kruskal-Wallis 검정을 수행하였고, 그룹 간 통계적으로 유의한 차이를 보이는 경우( $p < 0.05$ )에는 사후 검정으로 Benjamini-Hochberg 조정을 사용한 Dunn 검정을 실시하였다.

또한 연구 대상 호소의 과거(2004~2008)와 최근(2015~2019) 수질에 대해 한국형 부영양화 지수(TSI<sub>KO</sub>)를 계산하여, 과거와 최근 국내 주요 호소의 영양 상태를 비교하였다. TSI<sub>KO</sub>는 과거 Carlson이 사용한 방법과 달리 COD와 Chl-a, T-P를 이용하여 종합적으로 계산된다(NIER, 2006) (Appendix Table A1).

$$TSI_{KO}(\text{COD}) = 5.8 + 64.4 \times \log(\text{COD mg L}^{-1})$$

$$TSI_{KO}(\text{Chl-a}) = 12.2 + 38.6 \times \log(\text{Chl-a mg m}^{-3})$$

$$TSI_{KO}(\text{T-P}) = 114.6 + 43.3 \times \log(\text{T-P mg L}^{-1})$$

$$TSI_{KO} = 0.5 \times TSI_{KO}(\text{COD}) + 0.25 \times TSI_{KO}(\text{Chl-a}) + 0.25 \times TSI_{KO}(\text{T-P})$$

또한 TSI<sub>KO</sub>를 이용한 부영양화 수준은 TSI<sub>KO</sub> 값에 따라 빈영양(Oligotrophic:  $0 \leq TSI_{KO} < 30$ ), 중영양(Mesotrophic:  $30 \leq TSI_{KO} < 50$ ), 부영양(Eutrophic:  $50 \leq TSI_{KO} < 70$ ), 과영양(Hypertrophic:  $70 \leq TSI_{KO}$ )의 4단계로 구분된다(Appendix Table A2).

호소 유형별 과거와 현재 TSI<sub>KO</sub>의 차이는 통계 분석(Kruskal-Wallis 검정 및 Benjamini-Hochberg 조정을 사용한 Dunn 검정)을 통해 검정하였다. 추가적으로 과거 Kwon *et al.* (2014)에서 구분한 호소 유형과 본 연구에서의 호소 유형을 비교하여 10년간 부영양화 변화 양상을 분석하였다.

본 연구에서 사용한 HCA 및 NMDS, 통계 검정은 R 프로그램(R Core Team, 2021)에서 수행되었으며, ‘stats(R Core Team, 2021)’와 ‘vegan(Oksanen *et al.*, 2020)’, ‘dunn.test(Dinno, 2017)’를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

연구 대상인 83개 호소를 수질 특성에 따라 HCA로 분류한 결과, 전체 5개 그룹(I~V)으로 구분되었다(Fig. 1, Table 1). 그룹 I은 12개 호소, 그룹 II는 21개 호소, 그룹 III은 22개 호소, 그룹 IV는 3개 호소, 그룹 V는 25개 호소가 속하였다. 그룹 IV에 속한 3개 호소는 모두 강원도 동해안에 위치한 석호였다.

NMDS 분석 결과는 HCA를 통해 분류된 5개 그룹과 호소 수질 및 환경 요인 간 관계를 나타낸다(Fig. 2). NMDS 상에서 각 호소는 그룹별 및 관련 환경 요소별로 뚜렷이 구분되었다. 그룹 I은 T-P, Chl-a, COD, TOC에 크게 영향을 받았으며, 그룹 II는 고도, 그룹 III은 만수위가 영향 요소로 나타났다.

각 그룹 간 호소 수질 및 환경 요인의 통계 검정 결과는 이러한 각 호소의 이화학적, 물리적 특성의 차이를 잘 보여준다(Figs. 3, 4). 그룹 I은 pH, COD, T-N, T-P, TOC, Chl-a가 다른 그룹과 유의미한 차이를 보이며( $p < 0.05$ ), 다른 그룹에 비해 매우 높은 값을 가졌다. 반면, 그룹 II는 모든 수질 요소에 대해, 다른 그룹에 비해 통계적으로 유의미하게 낮은 값을 가졌다. 비록 DO 값이 전체 그룹 중 가장 낮았으

**Table 1.** Clusters and Korean trophic state index (TSI<sub>KO</sub>) of study reservoirs compared with past data (Kwon *et al.*, 2014). TSI<sub>KO</sub> levels: 1 (oligotrophy: TSI<sub>KO</sub> < 30), 2 (mesotrophy: 30 ≤ TSI<sub>KO</sub> < 50), 3 (eutrophy: 50 ≤ TSI<sub>KO</sub> < 70), 4 (hypereutrophy: 70 ≤ TSI<sub>KO</sub>).

Reservoir name	Korean name	Past data (2004~2008)			Recent data (2015~2019)			TSI <sub>KO</sub> change**
		Cluster*	TSI <sub>KO</sub>	TSI <sub>KO</sub> levels	Cluster	TSI <sub>KO</sub>	TSI <sub>KO</sub> levels	
Gachang	가창호	5	34.0	2	II	39.1	2	5.1
Ganwol	간월호	2	73.6	4	I	81.9	4	8.3
Gyoncheon (Gyeongbuk)	경천호 (경북)	2	—	—	III	40.2	2	—
Gyoncheon (Jeonbuk)	경천지 (전북)	4	50.5	3	III	45.5	2	-5.0
Gyongpo	경포호	3	64.1	3	IV	55.0	3	-9.1
Gosam	고삼지	5	49.1	2	V	57.0	3	7.9
Gwanggyo	광교지	1	56.8	3	V	60.9	3	4.1
Gwangdong	광동호	4	38.3	2	III	37.2	2	-1.1
Gwangju	광주호	1	39.5	2	III	46.5	2	7.0
Goesan	괴산호	5	38.6	2	III	41.1	2	2.5
Gucheon	구천호	1	29.1	1	II	23.0	1	-6.1
Geumgang	금강하구연	4	69.7	3	I	68.6	3	-1.1
Geumho	금호호	3	53.2	3	V	57.1	3	3.9
Gidong	기동지	3	51.0	3	V	64.2	3	13.2
Naju	나주호	5	43.7	2	II	47.2	2	3.5
Nakdong	낙동강하구연	4	62.4	3	V	58.5	3	-3.9
Namyang	남양호	3	63.4	3	I	67.6	3	4.2
Dalbang	달방호	2	39.1	2	III	35.8	2	-3.3
Damyang	담양호	5	35.8	2	II	34.0	2	-1.8
Daedong	대동지	2	59.7	3	V	59.4	3	-0.3
Daea	대아지	2	34.6	2	III	35.6	2	1.0
Daeam	대암호	4	53.3	3	V	48.4	2	-4.9
Daechung	대청호	5	40.2	2	III	45.0	2	4.8
Dae	대호	2	58.7	3	I	71.8	4	13.1
Dukdong	덕동지	5	43.8	2	II	42.7	2	-1.1
Dongbok	동북호	5	39.3	2	II	36.1	2	-3.2
Mae	매호	4	57.4	3	V	59.0	3	1.6
Boryong	보령호	5	26.4	1	III	35.5	2	9.1
Bomun	보문호	1	51.2	3	V	55.3	3	4.1
Bosung	보성호	4	48.0	2	V	55.0	3	7.0
Bongsan	봉산지	5	54.7	3	I	74.2	4	19.5
Bunam	부남호	5	72.9	4	I	74.7	4	1.8
Buan	부안호	2	32.5	2	II	29.9	1	-2.6
Sayeon	사연호	4	42.6	2	II	43.7	2	1.1
Sabgyo	삼교호	5	73.6	4	I	75.2	4	1.6
Seokmun	석문호	3	—	—	I	77.3	4	—
Seonam	선암호	1	54.9	3	V	49.9	2	-5.0
Soyang	소양호	1	31.3	2	II	23.3	1	-8.0
Songak	송악지	2	63.8	3	V	61.4	3	-2.4
Songji	송지호	4	57.8	3	V	57.5	3	-0.3
Sueo	수어호	1	34.1	2	II	31.1	2	-3.0
Shingal	신갈지	5	66.9	3	I	57.6	3	-9.3
Ahsan	아산호/평택호	4	70.1	4	I	68.4	3	-1.7
Angye	안계호	4	44.4	2	III	42.8	2	-1.6
Andong	안동호	3	31.4	2	II	30.7	2	-0.7

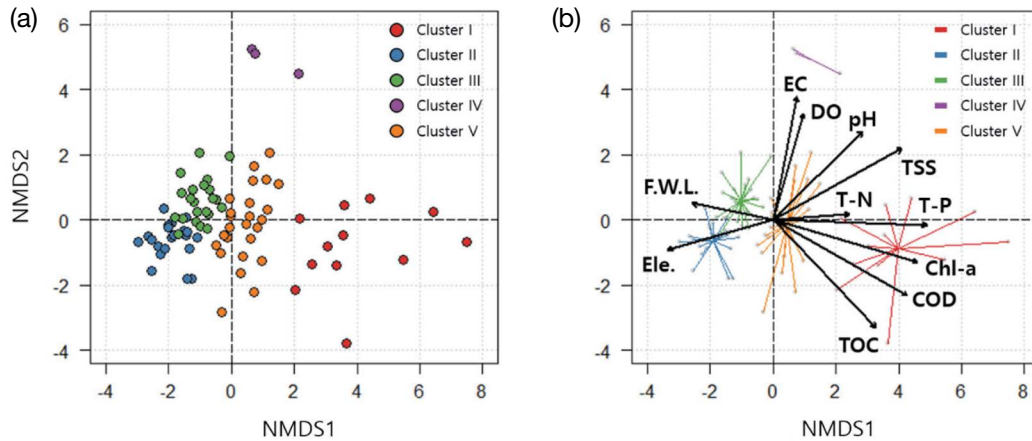
Table 1. Continued.

Reservoir name	Korean name	Past data (2004~2008)			Recent data (2015~2019)			TSI <sub>KO</sub> change**
		Cluster*	TSI <sub>KO</sub>	TSI <sub>KO</sub> levels	Cluster	TSI <sub>KO</sub>	TSI <sub>KO</sub> levels	
Yeoncho	연초호	4	39.8	2	II	37.9	2	-1.9
Youngrang	영랑호	4	68.4	3	IV	42.2	2	-26.2
Youngsan	영산호	2	56.7	3	V	56.4	3	-0.3
Youngam	영암호	4	50.6	3	V	49.9	2	-0.7
Youngchoen	영천호	4	46.2	2	III	44.6	2	-1.6
Yedang	예당지	3	59.6	3	I	66.5	3	6.9
Ohbong	오봉지	2	27.0	1	II	35.5	2	8.5
Ohtae	오탈지	1	35.8	2	II	39.7	2	3.9
Okgye	옥계지	2	32.8	2	III	44.4	2	11.6
Okjeong	옥정호	1	38.8	2	II	33.4	2	-5.4
Yongdam	용담호	-	31.5	2	III	28.9	1	-2.6
Yongyeon	용연지	2	47.9	2	V	55.5	3	7.6
Unmun	운문호	2	33.6	2	II	30.6	2	-3.0
Woncheon	원천지	4	60.5	3	V	54.4	3	-6.1
Uiam	의암호	5	42.0	2	III	40.1	2	-1.9
Edong	이동지	5	53.9	3	V	57.5	3	3.6
Imha	임하호	5	39.8	2	II	40.4	2	0.6
Jangsung	장성호	5	41.4	2	II	42.6	2	1.2
Jangcheok	장척지	3	51.3	3	V	61.7	3	10.4
Junam	주남지	3	61.4	3	I	68.3	3	6.9
Sangsa	상사호/주암조정지	4	32.5	2	II	31.0	2	-1.5
Juam	주암호	2	30.9	2	II	36.1	2	5.2
Jinyang	진양호	2	39.0	2	III	40.4	2	1.4
Chungcheon	청천지	2	56.4	3	V	51.9	3	-4.5
Chungcho	청초호	3	55.5	3	IV	44.2	2	-11.3
Chungpyong	청평호	1	43.4	2	III	39.2	2	-4.2
Chuncheon	춘천호	2	33.9	2	III	38.5	2	4.6
Tangeum	탄금호/충주조정지	4	34.7	2	III	44.4	2	9.7
Chungju	충주호	2	31.6	2	III	32.5	2	0.9
Tapjung	탑정지	5	46.6	2	III	49.5	2	2.9
Paldang	팔당호	4	52.1	3	V	50.4	3	-1.7
Pongrak	풍락지	1	56.6	3	V	57.0	3	0.4
Hadong	하동지	2	-	-	II	36.6	2	-
Hapcheon	합천호	5	33.2	2	III	29.3	1	-3.9
Hyang	향호	3	66.4	3	V	62.2	3	-4.2
Whajinpo	화진포호	4	63.5	3	V	59.1	3	-4.4
Whachon	화천호/파로호	5	30.3	2	III	26.8	1	-3.5
Heoya	회야호	4	56.3	3	V	54.9	3	-1.4

\*: Clusters in Kwon *et al.* (2014); 1 (oligotrophy)~5 (hypereutrophy) \*\*: Difference of TSI<sub>KO</sub> between recent data and pest data

나, 그룹 II에 속한 대부분 호소의 DO가 호소 생활환경기준 'Ia 등급(매우 좋음)'의 DO 기준 값인 7.5 mg L<sup>-1</sup> 이상이기 에(환경정책기본법시행령, [별표] 환경기준), 그룹 II는 다른 그룹에 비해 호소의 이화학적 수질이 양호한 상태로 나타났

다. 그룹 III은 그룹 II와 COD, TSS, T-P, TOC, EC, Chl-a 등이 유사하였으나, pH, DO, T-N이 그룹 II보다 유의하게 높은 경향을 보였다( $p < 0.05$ ). 그룹 IV는 TSS와 EC에서 다른 그룹에 비해 매우 높은 값을 가졌다. 그룹 V는 그룹 I과 II의



**Fig. 2.** Ordination of 83 major reservoirs based on physicochemical factors and water quality in South Korea through a non-metric multidimensional scaling. (a) Ordination reservoirs with clusters defined in a hierarchical cluster analysis, (b) Biplots with environmental factors of reservoirs. Only significant environmental factors were shown in the plot ( $p < 0.05$ ). pH: potential of hydrogen, DO: dissolved oxygen, COD: chemical oxygen demand, TSS: total suspended solid, T-N: total nitrogen, T-P: total phosphorus, TOC: total organic carbon, EC: electric conductivity, Chl-a: chlorophyll-a, Ele.: elevation, F.W.L.: full water level.

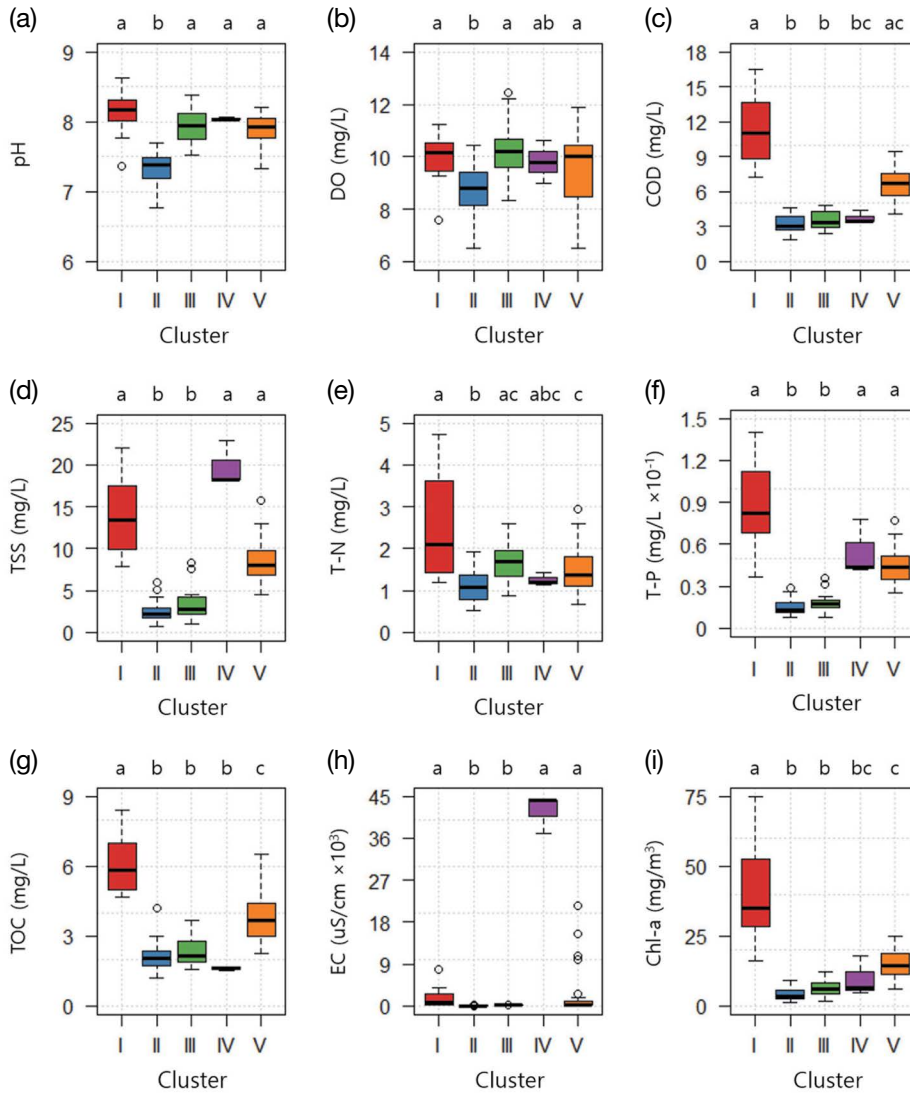
중간 정도 수질 특성을 보이며, 그룹 II와 III에 비해 COD, TSS, T-P, TOC, EC, Chl-a가 높게 나타났다. 그룹별 부영양화 지수(TSI<sub>KO</sub>)를 계산한 결과(평균±표준오차), 그룹 I은  $71.0 \pm 1.8$ , 그룹 II는  $35.5 \pm 3.4$ , 그룹 III는  $39.3 \pm 1.3$ , 그룹 IV는  $47.1 \pm 4.0$ , 그룹 V는  $56.6 \pm 0.8$ 로 나타났다. TSI<sub>KO</sub> 기준에 따르면 그룹 I은 과영양, 그룹 V는 부영양, 나머지 그룹은 중영양 상태로 구분된다. HCA를 통해 분류된 호소 그룹 중 그룹 I은 높은 COD, T-N, T-P, TOC, Chl-a 및 TSI<sub>KO</sub> 값을 보여, 호소의 수질이 안 좋고 부영양화가 진행된 호소로 판단된다. 그룹 IV와 V는 상대적으로 T-P 및 Chl-a의 농도가 높게 나타나고, TSI<sub>KO</sub> 값이 높아 부영양화의 잠재적 발생 가능성을 내포하였다(Cho *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2008; Withers *et al.*, 2014). 그룹 II와 III은 다른 그룹에 비해 양호한 수질 상태를 보였다.

호소의 수질 특성은 호소의 물리적 환경 특성을 반영하는데, 일반적으로 고도와 총저수량 등의 지리적 요인은 부영양화 지수와 반비례 관계를 보인다(Liu *et al.*, 2010; Kwon *et al.*, 2014). 각 호소 그룹별 호소 환경 특성 비교에서도 이러한 관계가 나타났다(Fig. 4). 부영양화가 심한 그룹 I은 다른 그룹에 비해 고도가 낮고, 만수위가 매우 낮았으며, 수질이 양호한 것으로 나타난 그룹 II와 III은 이와 달리 고도와 만수위가 다른 그룹에 비해 유의하게 높았고( $p < 0.05$ ), 총저수량이 많았다. 석호로 구성된 그룹 IV는 해안가에 위치하여 고도가 낮으며, 유역면적 및 총저수량이 적었다. 그룹 V는 제원 특성이 그룹 I과 II의 중간 정도에 해당되었다.

이전 연구에서 Kwon *et al.* (2014)은 전국 90개 주요 호

소를 수리지형형태학적(hydrogeomorphometry) 변수를 이용하여 호소를 유형화하였고, 2004~2008년의 수질 자료 및 Carlson의 TSI 지수를 이용하여 유형별 수질을 비교하였다. 그 결과 본 연구에서와 같이 5개의 유형(그룹)으로 호소를 구분하였고, 유형 1은 부영양화가 가장 적게 된 곳을, 유형 5는 부영양화가 가장 많이 진행된 곳을 나타내었다. 과거 연구와 본 연구에서는 호소 유형화 및 분류하는 방법에서 비교, 방법론적 차이가 있으나, 본 연구 대상 83개 호소는 모두 Kwon *et al.* (2014) 연구 호소에 해당하기에 부영양화 상태가 가장 낮은 유형과 가장 높은 유형을 비교한다면, 호소에 대한 부영양화의 시간적 변화를 비교할 수 있다. 즉 본 연구에서 부영양화가 가장 적게 나타난 그룹 II와 부영양화가 심한 그룹 I은 Kwon *et al.* (2014)에서 분류한 유형 1과 유형 5와 비교할 수 있다(Table 1). 신갈지, 봉산지, 부남호, 삼교호 등은 과거에는 유형 5이며, 최근에도 그룹 I에 속해, 수질 유형에서 변화가 없었다. 그러나 간월호 및 대호, 남양호, 석문호, 예당지, 아산호, 주남지 등은 과거에는 유형 2~4에 속하였으나, 지금은 그룹 I에 포함되어 수질 유형이 다소 악화되었음을 보였다. 구천호, 섬진강호, 소양호, 수어호 등은 과거에 부영양화가 가장 적은 유형 1에 속하였으며, 최근에서도 수질이 양호한 그룹 II에 포함되어, 호소 수질이 매우 양호한 상태를 보여주었다. 한편, 가창호, 나주호, 담양호, 덕동지, 동북호, 임하호, 장성호 등은 과거에 유형 5에 포함되었으나 지금은 그룹 II에 포함되어 호소의 이화학적 수질이 개선됨을 보였다.

부영양화 지수는 호소의 수질 및 영양 상태를 나타낼 뿐



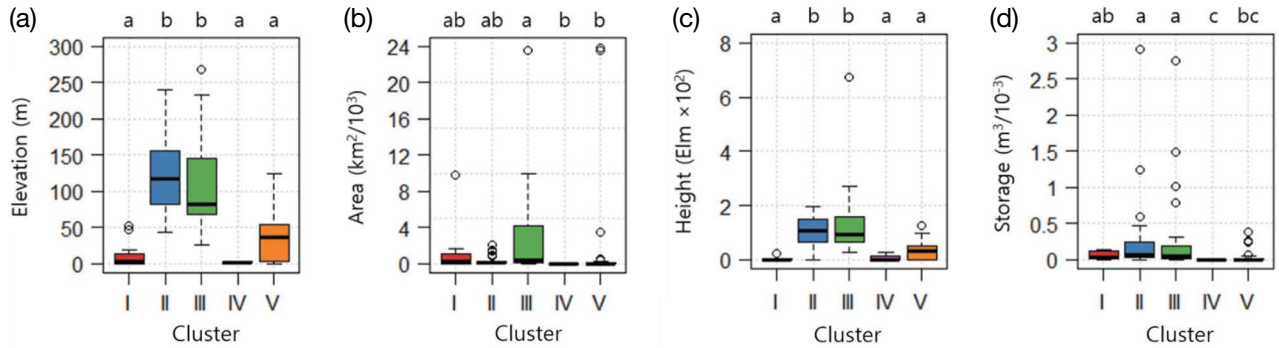
**Fig. 3.** Differences in physicochemical water quality factors at five different clusters defined in cluster analysis. (a) pH, (b) Dissolved oxygen, (c) Chemical oxygen demand, (d) Total suspended solid, (e) Total nitrogen, (f) Total phosphorus, (g) Total organic carbon, (h) Electric conductivity, (i) Chlorophyll-a. Box plot presents minimum, 25th percentile, median, 75th percentile, and maximum values. Circles indicate outliers. Different alphabets show statistically significant differences ( $p < 0.05$ ) among clusters based on Dunn's test with Benjamini-Hochberg adjustment.

만 아니라 호소의 형태적 특성 또한 반영한다(Carlson, 1977; Brezonik, 1984; Kwon *et al.*, 2014). 그러나 기 수행된 연구에서(Cunha *et al.*, 2013; Kong and Kim, 2019) 보고한 바와 같이, 국외에서 개발된 TSI는 국내 호소의 생태계 특성을 반영하는 데 한계가 있어 호소 영양 상태 평가 시 잘못된 정보를 제공할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전국 호소 수질 자료와 한국형 부영양화 지수(TSI<sub>KO</sub>)를 이용하여, 우리나라 주요 호소의 영양 상태를 분석하고, 과거와 현재 호소의 영양 상태를 비교하였다.

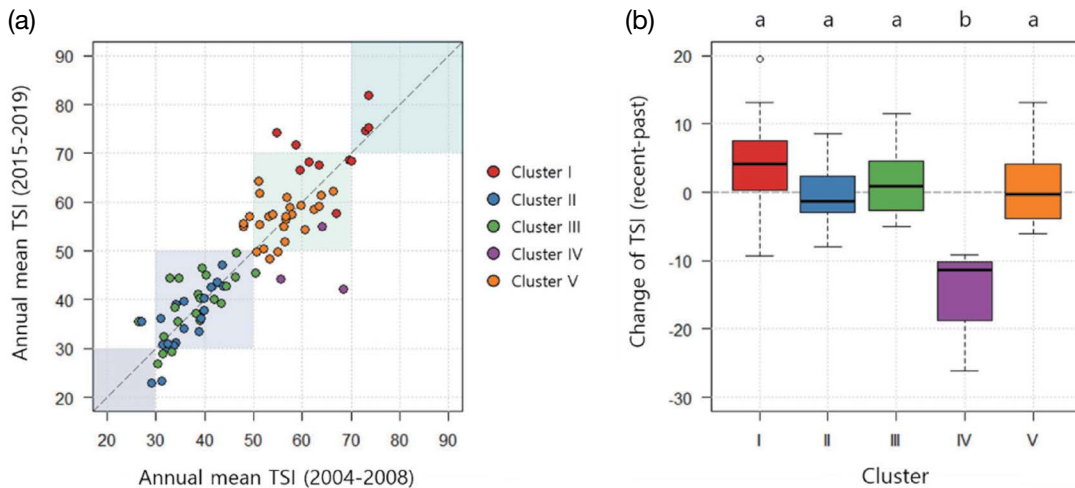
국내 주요 호소에서 호소 유형별 과거(2004~2008)와 최

근(2015~2019) 호소의 부영양화 지수(TSI<sub>KO</sub>)의 차이는 크게 나타나지 않았으나, 유형별 일부 호소에서 과거에 비해 부영양화 지수가 크게 변화하였다(Fig. 5). 그룹 I에 속한 호소는 대부분 부영양화 지수가 과거에 비해 증가하였고, 그룹 II에서는 전반적으로 부영양화 지수가 과거에 비해 감소하는 경향을 보였으나, 감소폭이 크지 않았다. 그룹 III과 V에서는 부영양화 지수가 크게 변하지 않았다. 그룹 IV는 과거에 비해 최근 부영양화 지수가 통계적으로 유의미하게 감소하였다.

전체 83개 호소 중 부영양화 지수의 값이 과거에 비해 증



**Fig. 4.** Differences in hydromorphological factors at five different clusters defined in a cluster analysis. (a) Elevation, (b) Catchment area, (c) Full water level, (d) Full storage. Box plot presents minimum, 25th percentile, median, 75th percentile, and maximum values. Circles indicate outliers. Different alphabets show statistically significant differences ( $p < 0.05$ ) among clusters based on Dunn's test with Benjamini-Hochberg adjustment.



**Fig. 5.** Comparison between past (2004~2008) and recent (2015~2019) trophic state of major reservoirs in South Korea. (a) Relation between past and recent Korean trophic state index ( $TSI_{KO}$ ) of each reservoir. Trophic levels were classified by  $TSI_{KO}$  interval (oligotrophy:  $TSI_{KO} < 30$ , mesotrophy:  $30 \leq TSI_{KO} < 50$ , eutrophy:  $50 \leq TSI_{KO} < 70$ , hypereutrophy:  $70 \leq TSI_{KO}$ ). (b) Changes of  $TSI_{KO}$  at each cluster.  $TSI_{KO}$  change was calculated by subtracting past mean  $TSI_{KO}$  from recent mean  $TSI_{KO}$ . Different alphabets show statistically significant differences ( $p < 0.05$ ) among clusters based on Dunn's test with Benjamini-Hochberg adjustment.

가한 호소는 38개 호소로(그룹 I 중 8개, 그룹 II 중 8개, 그룹 III 중 11개, 그룹 V 중 11개 호소), 전반적으로 그룹 I, III, V에 속한 대부분의 농업용 저수지에서 과거에 비해 현재 부영양화가 심화되었다. 특히 그룹 I에 속한 봉산지와 대호, 그룹 V에 속한 기동지는 과거에 비해  $TSI_{KO}$  값이 10 이상 증가하였다( $TSI_{KO}$  증가 상위 5개 호소(그룹): 봉산지(I) +19.5, 기동지(V) +13.1, 대호(I) +13.2, 옥계지(III) +11.6, 장척지(V), +10.4).  $TSI_{KO}$  값이 증가한 호소 중 그룹 I은 COD, T-P와 Chl-a이, 그룹 III는 Chl-a, 그룹 V는 T-P가 과거에 비해 많이 증가하였다. 우리나라의 농업용 저수지는 외국의 호소에 비해 유역면적이 상대적으로 크며, 수

체의 체류시간은 적은 것으로 알려져있다(Jeon *et al.*, 2002). 또한 그룹 I과 V는 위치한 고도가 낮고 총 저수량이 적은데 이러한 호소의 지리적, 물리적 요소로 인해 해당 저수지의 부영양화가 과거에 비해 심화된 것으로 생각된다.

그룹 IV에 속한 석호 외에도, 그룹 I의 신갈지, 그룹 II의 소양호 등에서도 부영양화 지수가 과거에 비해 감소하였다( $TSI_{KO}$  감소 상위 5개 호소(그룹): 영양호(IV) -26.2, 청초호(IV) -11.3, 신갈지(I) -9.3, 경포호(IV) -9.1, 소양호(II) -8.0). 그룹 IV에 속한 호소는 COD와 Chl-a이, 신갈지에서는 T-P가, 소양호에서는 COD 및 T-P가 과거에 비해 많이 감소하였다. 우리나라에서는 지속적으로 농업용 저수지



를 포함한 호소의 수질 개선 사업을 진행해 오고 있다(Jang, 2010). 동해안에 위치한 석호는(그룹 IV) 과거 1990년대에 수질이 극도로 나쁘고 부영양화가 매우 심하였으나(Heo *et al.*, 1999), 최근 조사 자료에서는 수질 및 영양 상태가 개선된 것으로 확인되었다. 다만, 여전히 TSI<sub>KO</sub> 값이 비교적 높아 수질 개선을 위한 노력이 지속적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한 신갈지와 소양호는 2010년부터 농어촌공사 및 환경부에서 지속적으로 수질 개선 사업을 진행해 오고 있으며, 이로 인해 과거에 비해 수질이 양호해진 것으로 생각된다.

본 연구에서는 다변량분석법을 이용하여 호소의 이화학적 수질인자의 특성에 따라 우리나라 83개 주요 호소를 분류하였다. 이러한 호소의 유형화는 환경 인자의 개별적인 비교를 통해 평가하는 것이 아니라 여러 인자를 동시에 고려하는 다변량 분석법의 일종으로, 수질 등의 환경 요소를 종합적인 판단을 하는 데 매우 유용한 방법이다. 유형화 결과, 총 83개 호소는 5개의 그룹으로 분류되었으며, 각 그룹별로 호소의 이화학적 수질 및 환경(지리적 위치 및 호소 제원 등) 특성을 잘 반영해 주는 것으로 나타났다. 다만 자료의 한계성으로 인해 본 연구에서는 시계열분석을 수행하지 않았으나, 추후에 보다 장기적이고 연속적인 호소 수질 자료를 취합하여 분석한다면, 국내 주요 호소에 대하여 수질 요인별 수질 변동 경향성을 분석할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구의 결과는 앞으로 수질 기반의 호소생태계 관리 방안 마련에 있어 기초 자료를 제공하며, 호소 내 수리수질모델 및 생물군집변화 예측모델 개발 등에 있어서도 활용 가능하다.

## 적 요

호소의 수질 특성을 이해하는 것은 호소 및 정수생태계 관리의 가장 기본 요소이다. 호소의 수질은 호소의 수리수문학적 요소, 주변 토지 이용/피복, 유역 내 인간 활동을 포함한 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 호소에서 5년 동안(2015~2019) 측정된 9가지 이화학적 요인(pH, DO, COD, TSS, T-N, T-P, TOC, EC, Chl-a)을 이용하여, 국내 83개 주요 호소를 수질에 따라 분류하였다. 계층적 그룹 분석을 통해 전체 호소는 총 5개의 유형으로 분류되었고, 각 유형별로 저수지의 수질 및 고도, 유역면적, 만수위, 총 저수량과 같은 수리수문학적 요인을 반영하였다. 특히 저고도에 위치한 대형 호소에서(그룹 I) 수질이 매우 낮게 나타났다. 한국형 부영양화 지수를 이용하여 국내 주요 호소의 부영양화 정도를 비교한 결과, 석호가 포함된 그룹 IV 및 신갈지 등에서는 과거 2004~2008년에 비해 부영양화 지수가 개선되었으나, 그룹 I, III, V에 속한 대부분의 농업용 저수지

에서는 부영양화가 심화되었다.

**저자정보** 이대성(경희대학교 일반대학원 박사과정), 이다영(경희대학교 일반대학원 박사과정), 박영석(경희대학교 교수)

**저자기여도** 연구설계: 박영석, 자료 수집 및 분석: 이대성, 자료 검토: 박영석, 이다영, 원고 작성: 박영석, 이대성, 원고 수정 및 검토: 이다영, 이대성, 박영석

**이해관계** 본 연구는 이해관계의 충돌 여지가 없습니다.

**연구비** 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 ‘수생태계 건강성 확보 기술개발사업 (과제번호: 2020003050003)’의 지원을 받아 수행하였습니다.

## REFERENCES

- Brezonik, P.L. 1984. Trophic state indices: rationale for multivariate approaches. *Lake and Reservoir Management* **1**: 441-445.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Cho, J.-L., S.-J. Hwang, K.-J. Cho and J.-K. Shin. 2000. Eutrophication and water pollution characteristics of the Kyongan Stream to Paltang Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **33**: 387-394.
- Cunha, D.G.F., M. do Carmo Calijuri and M.C. Lamparelli. 2013. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI<sub>tr</sub>). *Ecological Engineering* **60**: 126-134.
- Dinno, A. 2017. dunn.test: Dunn's test of multiple comparisons using rank sums. Page 1 R package version.
- Gikas, G.D., V.A. Tsihrintzis, C.S. Akrotas and G. Haralambidis. 2009. Water quality trends in Polyphytos reservoir, Aliakmon river, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment* **149**: 163-181.
- Heo, W.-M., B.-C. Kim and M.-S. Jun. 1999. Evaluation of eutrophication of lagoons in the eastern coast of Korea. *Korean Journal of Limnology* **32**: 141-151.
- Hwang, S.-J., S.-K. Kwun and C.-G. Yoon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy and Water Environment* **1**: 43-52.
- Jang, J.-R. 2010. Agricultural water quality improvement measures and current status. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* **52**: 23-31.
- Jeon, J.-H., J.-H. Ham, H.-I. Kim, S.-J. Hwang and C.-G. Yoon. 2002. Effects of physical parameters on water quality in agricultural reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **35**: 28-35.
- Jeong, Y.S., D.-S. Lee, D.-Y. Lee, I.-S. Kwak and Y.-S. Park. 2022. Characterization of heavy metal pollution in sedi-

- ments of major reservoirs in South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **55**(2): 175-183.
- Kim, B., J.-H. Park, G. Hwang, M.-S. Jun and K. Choi. 2001. Eutrophication of reservoirs in South Korea. *Limnology* **2**: 223-229.
- Kim, H.-S. and S.-J. Hwang. 2004. Analysis of eutrophication based on chlorophyll-a, depth and limnological characteristics in Korean reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **37**: 213-226.
- Kim, H.-S., E.-M. Choi, D.-W. Kim, D.-S. Kong, K.-M. Kim and B.-C. Kim. 2007. Water quality trend analysis based on watershed characteristics in agriculture reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **40**: 214-222.
- Kim, H.-S., E.-M. Choi, J.-h. Park, H.-S. Hwang, B. Kim, D.-S. Kong and S.-J. Hwang. 2008. The relationships between empirical factors and water quality in agricultural reservoirs. *Journal of Korean Society on Water Environment* **24**: 333-339.
- Kong, D. and B. Kim. 2019. Suggestion for trophic state index of Korean lakes (upper layer). *Journal of Korean Society on Water Environment* **35**: 340-351.
- Kwak, Y.-H., S.-Y. Kim, H.-Y. Song, H.-J. Jeon and M.-Y. Song. 2021. Characteristics of fish communities in Namyang lake and its tributaries in the estuary of Han river watershed, South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **54**: 1-11.
- Kwon, Y.-S., M.-J. Bae, J.-S. Kim, Y.-J. Kim, B.-H. Kim and Y.-S. Park. 2014. Characterizing changes of water quality and relationships with environmental factors in the selected Korean reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 146-159.
- Lee, J.-W., S.-W. Lee, S.-J. Hwang, M.-H. Jang, D.-H. Won, K.-J. An, H.-J. Park and J. Lee. 2020. Establishing diagnosis systems for impaired stream ecosystem using stream/river ecosystem survey and health Assessment. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**: 1-10.
- Liu, W., Q. Zhang and G. Liu. 2010. Lake eutrophication associated with geographic location, lake morphology and climate in China. *Hydrobiologia* **644**: 289-299.
- MAF (Ministry of Agriculture and Forestry). 2005. Development of management strategies and techniques to control nuisance algal blooms in Korean agricultural reservoirs. Ministry of Agriculture and Forestry.
- MOE. 1994. The lakes handbook. Ministry of Environment, Kwacheon.
- MOE. 2009. Study on water quality management for reservoir. Ministry of Environment, Kwacheon.
- MOE. 2017. Guidance of environmental survey for lake/reservoir. Ministry of Environment, Kwacheon.
- NIER. 2006. A study on the comprehensive assessment methods of water environment (III): Study of eutrophication survey and assessment system. National Institute of Environmental Research, Incheon.
- OECD. 1982. Eutrophication of waters : monitoring, assessment and control. Paris.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlenn, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, E. Szoecs and H. Wagner. 2020. Vegan: Community Ecology Package (R package version 2.5-7).
- Park, Y.-S., Y.-S. Kwon, S.-J. Hwang and S. Park. 2014. Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map. *Environmental Modelling & Software* **55**: 214-221.
- R Core Team. 2021. R: A Language and environment for statistical computing. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Withers, P.J., C. Neal, H.P. Jarvie and D.G. Doody. 2014. Agriculture and eutrophication: where do we go from here? *Sustainability* **6**: 5853-5875.

**Appendix Table A1.** Comparison of trophic state index (TSI) between Carlson's TSI (Carlson, 1977) and Korean TSI (NIER, 2006) (Chl-a: Chlorophyll a, T-P: Total phosphorus, SD: Secchi depth, COD: Chemical oxygen demand).

Variable	Carlson's TSI	TSI <sub>KO</sub> *
Chl-a	$9.81 \times \ln(\text{Chl-a } \mu\text{g L}^{-1}) + 30.6$	$12.2 + 38.6 \times \log(\text{Chl-a mg m}^{-3})$
T-P	$14.42 \times \ln(\text{T-P } \mu\text{g L}^{-1}) + 4.15$	$114.6 + 43.3 \times \log(\text{T-P mg L}^{-1})$
SD	$60 - 40.41 \times \ln(\text{SD m})$	—
COD	—	$5.8 + 64.4 \times \log(\text{COD mg L}^{-1})$
Total	—	$0.5 \times \text{TSI}_{\text{KO}}(\text{COD}) + 0.25 \times \text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl-a}) + 0.25 \times \text{TSI}_{\text{KO}}(\text{T-P})$

\*TSI<sub>KO</sub>: Korean Trophic State Index

**Appendix Table A2.** Classification of water trophic levels between OECD (1982) and Korea (NIER, 2006) (T-P: Total phosphorus, Chl-a: Chlorophyll a, SD: Secchi depth).

Trophic status	OECD					Korea
	T-P ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) (mean)	Chl-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) (mean)	Chl-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) (max)	SD (m) (mean)	SD (m) (min)	TSI <sub>KO</sub> *
Ultra-oligotrophic	< 4	< 1	$\leq 2.5$	> 12	$\geq 6.0$	
Oligotrophic	< 10	< 2.5	$\leq 8.0$	> 6	$\geq 3.0$	< 30
Mesotrophic	10~35	2.5~8	8~25	6~3	3~1.5	30~50
Eutrophic	35~100	8~25	25~75	3~1.5	1.5~0.7	50~70
Hypertrophic	> 100	> 25	$\geq 75$	< 1.5	$\leq 0.7$	$\leq 70$

\*TSI<sub>KO</sub>: Korean Trophic State Index