

## 우리나라 호소의 영양상태 분류에 관한 제언

공동수<sup>1,\*</sup> · 김범철<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 바이오융합학부

<sup>2</sup>강원대학교 환경융합학부

## Suggestion for Trophic State Classification of Korean Lakes

Dongsoo Kong<sup>1,\*</sup> · Bomchul Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Bioconvergence, Kyonggi University

<sup>2</sup>Department of Environmental Science, Kangwon University

(Received 29 March 2019, Revised 3 May 2019, Accepted 8 May 2019)

---

### Abstract

Most of the lakes in Korea are artificial, and their limnological characteristics are significantly different from those of natural lakes in other countries. In this study, the relationship between trophic state parameters was investigated, based on summer average data of the upper layer, in 81 lakes in Korea, 2013-2017. Compared with trends of foreign natural lakes, chlorophyll *a* (Chl. *a*) concentration was slightly lower at the same total phosphorus (TP) concentration, and transparency (Secchi depth, SD) was noticeably lower at the same Chl. *a* concentration. This is because of excessive allochthonous loading of non-algal material during the monsoon period, and the reduction in phosphorus availability to algal growth, by light limitation and short hydraulic residence time. Considering these characteristics, we suggested site-specific thresholds of trophic state classification for Chl. *a*, TP and SD, based on annual average data at the upper layer of lakes (3-10  $\mu\text{g L}^{-1}$  of Chl. *a* measured by UNESCO method; 13-33  $\mu\text{g L}^{-1}$  of TP; 1.6-3.2 m of SD for mesotrophic state class, respectively). The threshold value of TP for each trophic state class, corresponded to the upper value of previously reported range, and that of SD was out of the range. We suggested applying only TP and Chl. *a* in assessment of trophic state of lakes in Korea, excluding SD.

---

**Key words** : Eutrophication, Phosphorus, Secchi depth, Trophic state classification, Water quality

---

<sup>1,\*</sup> Corresponding author, 교수(professor), [dkong@kgu.ac.kr](mailto:dkong@kgu.ac.kr), <https://orcid.org/0000-0001-8438-3229>

<sup>2,\*</sup> Corresponding author, 교수(professor), [bkim@kangwon.ac.kr](mailto:bkim@kangwon.ac.kr), <https://orcid.org/0000-0003-1687-222X>

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.

## 1. Introduction

호수의 영양상태를 평가하는데 주로 적용되고 있는 항목은 조류증식의 잠재적 요인인 영양물질(인, 질소)과 조류 현존량(Chl. *a*) 및 그 결과와 관련된 것(투명도)으로 구분된다.

내륙 수체에서 질소는 조류성장에 대한 제한인자로서의 중요성이 인에 비해 상대적으로 낮기 때문에 영양상태의 지표 항목으로 적용한 사례가 많지 않다. 또한 용존유기물 또는 비조류성 고형물로 인해 탁도가 높은 호수에서는 투명도에 의한 영양상태의 평가가 왜곡될 수 있다는 점이 주목되었다(Carlson, 1991; Forsberg and Ryding, 1980). 국내 호소는 체류시간이 짧은 인공호가 대부분이어서 조류현존량에 대한 영양물질 농도 및 투명도의 상관성이 외국의 자연호와는 상당히 다르다(Kim et al., 1988; Kim et al., 2001; Kong, 1997a; Kong, 1997b).

몬순기후대에 속한 우리나라의 기후 특성 상 비조류성 고형물이 몬순기에 집중되어 유입되고 고형물과 더불어 다량으로 유입된 인의 조류증식에 대한 이용성이 상대적으로 낮아지는 것에 대해서는 여러 선행연구를 통해 밝혀진 바 있다(An, 2000; Kim and Kim, 2004).

이처럼 국내 호수의 영양상태의 지표항목 간 상관성이 외국의 호수의 그것과는 다르다는 인식이 일반적임에도 불구하고 아직까지 국내외 호수의 영양상태에 대한 비교 분석이 체계적으로 이루어졌다고 할 수 없으며, 영양상태에 대한 지표항목 또는 그 분류의 기준치(threshold)에 대한 학술적인 검토도 충분하지 않다. 그 주요한 이유는 국외의 기준치가 주로 유광층의 여름철 자료에서 도출된 것인 반면 우리나라에서는 이와 비교할 수 있는 데이터베이스가 부족했기 때문이다.

환경부는 물환경측정망을 통해 우리나라의 호수 중 규모가 크거나 이수 또는 환경적으로 중요한 81개 호수의 수질에 대한 모니터링을 주관하고 있다. 수질 측정결과는 국립환경과학원의 물환경정보시스템(<http://www.water.nier.go.kr>)에 취합되고 있으며, 동 시스템은 과거에는 전층 평균의 월간 자료를 제공하였는데 최근에는 월간 또는 주간(주요 지점)의 수층 별 자료를 제공하고 있다. 따라서 최근의 자료를 활용하면 영양상태에 대한 상세한 시공간적 분석과 더불어 국외 호소와의 차이점에 대한 비교분석이 가능하다.

이러한 배경에서 본 연구는 환경부 물환경측정망의 81개 호소의 상층부의 2013~2017년 여름철(6~9월)의 수질자료를 바탕으로 영양상태 지표항목들의 관계를 분석하고 이를 국외의 결과와 비교하였고, 영양상태에 대한 국외의 분류기준치, Chl. *a* 시험방법의 차이, 항목간 관계를 반영하여 단위기반(unit-based)의 항목별 영양상태 분류기준치를 제안하였다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. 분석자료

본 연구의 분석대상 호소는 환경부 물환경측정망의 81개 호소였으며, 분석에 사용된 자료는 국립환경과학원의 물환경

정보시스템에서 추출한 2013~2017년(5개년)의 자료였다(NIER, 2018). 81개 호수 중 조사지점은 191개였다.

국외의 경향과 비교분석에 사용된 수질자료는 상층부의 여름철(6~9월) 평균치였으며, 이는 수심 5m 이내의 주로 수심 50 cm 내외에서 채수된 시료에 대한 분석결과였다. 비교 분석에 사용된 국외 호수의 자료는 Carlson (1977)에 의한 북미 호수의 결과와 Aizaki et al. (1981)에 의한 일본의 결과였다.

영양상태 분류기준을 설정하기 위해 분석된 수질자료는 상층부의 연평균치였다.

### 2.2. 유형구분

Kong (2019)은 임의적인 구분으로서 만수위 기준으로 평균수심이 10 m 이상이고 체류시간이 30일 이상인 호소는 호수형(lake-type), 그 외는 하천형(river-type)으로 분류하였고(국내 81개 호수 중 호수형 34개, 하천형 47개), 유엔 식량농업기구의 염분 기준(FAO, 1992)을 준용하여 전층의 연평균 자료로부터 전기전도도가 700  $\mu$ S/cm을 넘는 경우 기수호로 분류하였으며(담수호 66개, 기수호 15개), 질소와 인의 존재 형태별 비교와 아울러 질소/인 비와 Chl. *a*의 관계 등을 자세히 기술하였고 기존의 여러 문헌(Forsberg and Ryding, 1980; JMOE, 1971; Sakamoto, 1966)을 참고하여 총질소/총인의 농도비가 10보다 작으면 질소 제한(0개), 20보다 크면 인 제한(74개), 그 사이면 인-질소 동시 제한(7개)으로 구분하였다. 본 연구에서는 Kong (2019)의 유형화 결과를 그대로 인용하였다.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. 영양상태 지표항목 간 상관성

Kong (2019)에 의하면 본 연구의 대상인 81개 호소에서 전층의 연평균 총인에 대한 총질소의 비 및 반응성인에 대한 총무기질소의 비는 기하평균치로 각각 53과 120이었다. 이는 국내 호수에서 조류성장에 대하여 질소가 제한요인으로 작용할 가능성이 낮음을 시사한다. 국내의 내륙 수체에서 질소에 비해 인이 제한요인으로 작용하는 것은 조류성장잠재력에 대한 여러 실험을 통해서도 확인된 바 있다(Kim and Hwang, 2004; Kwon, et al., 2006; Park, et al., 1992).

따라서 본 연구에서는 질소를 빼 총인(total phosphorus, TP), 엽록소 *a*(chlorophyll *a*, Chl. *a*), 투명도(Secchi depth, SD)만을 대상으로 항목 간 관계를 분석하였다. Carlson (1977)은 기존에 발표된 북미의 여러 호수(기 발표는 물론 미발표 자료를 포함하여 분석한 것으로 기술하고 있으나 대상 호수의 목록은 제시되지 않음)의 표층수의 여름철 자료로부터 이들 항목 간의 관계를 도출하였고, Aizaki et al. (1981)은 1977~1980년간 일본의 24개 담수호의 유광층의 여름철 자료를 가지고 같은 분석을 수행한 바 있다.

Table 1은 본 연구에서 도출된 관련 항목 간 회귀식과 Carlson (1977), Aizaki et al. (1981)의 회귀식을 비교하여 정리한 것이다. 자료의 비교 시 유의해야 할 항목은 Chl. *a*로서 우리

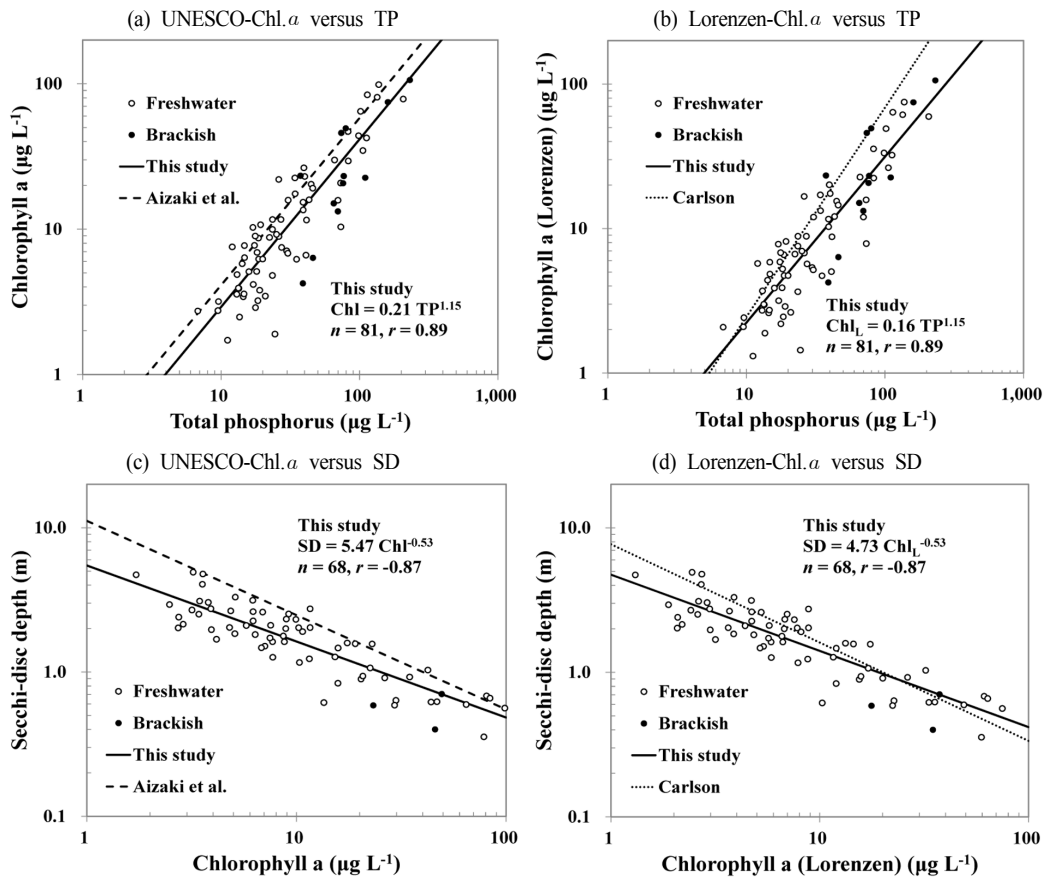
**Table 1.** Comparison of regression equations between parameters related on trophic state

	Equations (sample size, determination or correlation coef.)	Unit			Data
		Chl. <i>a</i> ( <i>C</i> )	TP ( <i>P</i> )	<i>Z</i> <sub>SD</sub> ( <i>SD</i> )	
Carlson (1977)	$\ln C_L = -2.442 + 1.449 \ln P$ ( $n = 43, r = 0.846$ ) $\ln SD = 2.04 - 0.68 \ln C_L$ ( $n = 147, r = 0.93$ )	$\mu\text{g L}^{-1}$	$\mu\text{g L}^{-1}$	m	Near the surface in summer (Jul. ~ Aug.)
Aizaki et al. (1981)	$\ln C = 6.71 + 1.15 \ln P$ ( $n = 24, r^2 = 0.90$ ) $\ln C = 3.69 - 1.53 \ln SD$ ( $n = 24, r^2 = 0.96$ )	$\mu\text{g L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	m	Mean of euphotic layer in summer
This study <sup>1)</sup>	$\ln C = -1.57 + 1.15 \ln P$ ( $n = 81, r = 0.89$ ) $\ln SD = 1.70 - 0.53 \ln C$ ( $n = 68, r = -0.87$ )	$\mu\text{g L}^{-1}$	$\mu\text{g L}^{-1}$	m	Upper layer ( $<$ water depth 5m) in summer (Jun. ~ Sep.)
	$\ln C_L = -1.84 + 1.15 \ln P$ $\ln SD = 1.55 - 0.55 \ln C_L$				

<sup>1)</sup> based on average data of 81 lakes (66 freshwater lakes + 15 brackish lakes) in Korea during summer (Jun. ~ Sep.), 2013-2017.

나라와 일본의 Chl.*a* 자료는 SCOR/UNESCO법(UNESCO, 1966)에 의해 측정된 것인 반면 미국의 자료는 Lorenzen (1967)의 방법에 의한 것이다. 두 방법에 의해 측정된 Chl.*a* 값은 pheophytin의 포함 정도에 따라 차이가 나는데, Lorenzen법에

의한 값이 UNESCO법에 의한 값보다 0.76 배 수준으로 낮다 (NIER, 2006). 따라서 기존에 UNESCO법으로 측정된 원 자료를 통해 도출된 회귀식과 아울러 UNESCO-Chl.*a* (*C*) 값에 0.76 을 곱하여 환산한 Lorenzen-Chl.*a* (*C<sub>L</sub>*)에 해당하는 회귀식을



**Fig. 1.** Relationship between total phosphorus, Secchi depth, and Chlorophyll *a* based on average values during summer, 2013-2017 in 81 Korean lakes. (Solid lines, dotted lines, and thick dotted lines indicate regression, according to this study, Carlson (1977), and Aizaki et al. (1980), respectively; Chl<sub>L</sub> means Chl.*a* transformed from value, by the UNESCO method of this study, to equivalent value by the Lorenzen method).

함께 제시하였다.

회귀선의 경향으로 볼 때 같은 TP 농도에서 나타나는 Chl. a 농도(Fig. 1a) 및 같은 Chl.a 농도에서 나타나는 SD(Fig. 1c)는 일본 호소의 경향에 비해 현저히 낮았다. 또한 같은 TP 농도에서 나타나는 Lorenzen-Chl.a 농도(Fig. 1b)와 같은 Lorenzen-Chl.a 농도에서 나타나는 SD(Fig. 1d)는 북미 호소의 경향에 비해 전반적으로 낮았다. 이러한 이유는 국내의 호소가 대부분 인공호로서 강우 시 유역으로부터 다량의 현탁물이 유입되어 탁도가 높아지고, 현탁물과 함께 인의 농도가 증가하지만 짧은 체류시간과 빛 제한으로 조류성장에 대한 인의 이용성이 낮는데 원인이 있다(Kim and Jung, 2007; Kim et al., 1988; Kong, 1997a; Kong, 1997b).

### 3.2. 영양상태 분류기준의 제언

TP 등 개별항목의 영양상태 분류기준은 1970년대에 여러 기관이나 학자들에 의해 제안되었으며(Table 2), 그 이후 나라별로 또는 지역별로 약간씩 조정되어 적용되고 있으나 거시적으로 볼 때 큰 차이는 없다. 대체로 빈영양/중영양과 중영양/부영양의 TP 기준치(threshold)는 각각 10~15  $\mu\text{g L}^{-1}$ 와 20~35  $\mu\text{g L}^{-1}$ , Chl.a는 2~4  $\mu\text{g L}^{-1}$ 와 6~10  $\mu\text{g L}^{-1}$ 이며, SD는 3.7~6 m와 2~3 m의 범위에 있다.

국외에서 설정된 영양상태 분류기준은 Chl.a에 대한 측정 방법, 비조류성 물질의 영향, 체류시간의 차이로 인해 국내 호소에 그대로 적용할 경우 영양상태를 왜곡하여 진단하게 될 가능성이 크다. 본 연구에서는 조류 현존량의 지표인 Chl.a를 준거로 영양상태의 분류기준치를 정하고, 국내 호소에서 나타나는 항목 간 관계를 통하여 각각 TP와 SD의 기준치를 설정하였다. 분석에 적용된 자료는 호소 상층부의 연평균치였다. 국외의 경우 대체로 여름철 자료로 영양상태를 평가하는 경우가 많으나(Aizaki et al., 1981; Carlson, 1977; Forsberg and Ryding, 1980), 국내의 조류 현존량은 하천형 인공호에서는 겨울철과 늦여름에 높고 호소형 인공호에서는 초가을에 높기 때문에(Kong, 2019) 연평균치를 분석대상으로 정한 것이다.

Chl.a의 기준치는 Vollenweider and Kerekes (1982)의 값을

따랐다. Vollenweider and Kerekes (1982)의 기준치는 호소 전 층의 연평균 값으로 제시된 것이긴 하지만 Table 2에서 볼 수 있듯이 대략적으로 여러 기준치의 중앙값에 가깝다. 또한 이 기준치는 1982년 OECD 프로그램의 일환으로 수행된 보고서에 수록되어 있어 “OECD 기준”으로서 보편적으로 인용 및 이용되고 있는 것이다. 여기서 Vollenweider and Kerekes (1982)의 Chl.a의 기준치는 Lorenzen 법에 의한 것이므로 그 값을 우리나라 공정시험기준인 UNESCO법의 값으로 환산하고(UNESCO-Chl.a = Lorenzen-Chl.a/0.76) (NIER, 2006) 가독성을 위해 빈/중영양의 기준치를 3  $\mu\text{g L}^{-1}$ , 중/부영양의 기준치는 10  $\mu\text{g L}^{-1}$ , 부/과영양의 기준치는 30  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 설정하였다. 우리나라와 같이 UNESCO법으로 Chl.a를 측정하는 일본의 자료를 기반으로 제안된 TSI<sub>m</sub>에서 Chl.a의 빈/중영양의 해당 값은 약 4  $\mu\text{g L}^{-1}$ , 중/부영양의 해당 값은 약 10  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 본 연구에서 설정한 기준치와 유사한 수준이었다.

영양상태의 분류체계에서 준거항목의 기준치에 부합하는 관련항목의 기준치는 두 항목 간 상관관계를 전제로 한 회귀식을 통해 도출된다. 이는 매우 간편한 방법이지만 항목 간 상관관계가 높지 않은 경우 실제 적용에 있어서는 몇 가지 불확실한 부분이 있다. 그 첫째는 수질항목 간 관계가 비선형이어서 적합한 회귀식을 결정하는데 혼란이 있다는 점이다. 수질항목 간 관계는 대체로 멱함수의 형태로 나타나는데 이 경우 각각의 변수 값을 대수치로 변환하여 선형화하고 최소자승법으로 회귀식을 도출한 후 다시 멱함수로 변환하는 방법이 있고, 비선형의 멱함수로 관계식을 구성한 후 실측치와 계산치의 차이의 자승합이 최소가 되는 계수를 시행착오법으로 구할 수도 있다. 이때 전자는 큰 수의 상대적인 차이가 무시되는 반면 후자는 작은 수의 상대적인 차이가 무시된다. 둘째는 경향을 크게 벗어나는 이례적인 수치가 있거나 독립변수의 특정 구간에 측정치가 몰려 있는 경우, 전자는 이례적인 수치로 인해 회귀선이 왜곡되고 후자는 측정치가 적은 구간의 값에 대한 회귀선의 적합도가 낮아진다.

전국 81개 호소를 대상으로 한 본 연구의 자료 역시 수질 값이 등 간격을 이루지 못하고 대체로 작은 값 쪽으로 편포하고 있었으며, 항목 간에 유의적인 상관성이 있었지만 산포

**Table 2.** Conventional trophic classification systems for lakes

	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	References
TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	<10	10-20	>20	US EPA (1974)
	<10	10-20	>20	Rast and Lee (1978)
	<15	15-25	>25	Forsberg and Ryding (1980)
	<10	10-35	>35	Vollenweider and Kerekes (1982)
Chlorophyll a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	<4	4-10	>10	US EPA (1974)
	<2	2-6	>6	Rast and Lee (1978)
	<3	3-7	>7	Forsberg and Ryding (1980)
	<2.5	2.5-8	>8	Vollenweider and Kerekes (1982)
Secchi depth (m)	>3.7	2.0-3.7	<2.0	US EPA (1974)
	>4.6	2.7-4.6	<2.7	Rast and Lee (1978)
	>4.0	2.5-4.0	<2.5	Forsberg and Ryding (1980)
	>6	3-6	<3	Vollenweider and Kerekes (1982)

정도가 작지 않았고 이는 호수형 및 하천형 모두에서 같은 경향이였다(Fig. 2). 이에 따라 항목 간 원 자료의 비선형 회귀를 통하여 도출된 관계식과 대수변환치의 선형 회귀를 통해 도출된 관계식이 차이를 보였는데 두 식 중 어떤 식이 보다 적합한지를 판단할 수 없었다. 또한 Chl.a의 영양상태 분류기준치를 각각의 관계식에 적용하여 TP 또는 SD의 영양상태 분류기준치를 도출하고 이를 기준으로 영양상태를 판정한 결과, 이들 항목에 의한 영양상태 유형별 호소 개수는 Chl.a를 기준으로 분류된 유형별 개수와 다소 간의 차이를 보였다.

이러한 모호성에 따라서 TP와 SD의 영양상태 분류기준치를 설정하기 위해 회귀방법을 사용하지 않는 대신, 81개 호소의 평균치에서 Chl.a의 영양상태 분류기준치(빈/중영양의 기준치를  $3 \mu\text{g L}^{-1}$ , 중/부영양의 기준치는  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ , 부/과영양의 기준치는  $30 \mu\text{g L}^{-1}$ )의 순위와 등위인 TP 값과 역순으

로 등위인 SD 값을 각각의 잠정 기준치로 정하였다.

이와 같은 순위기반의 분류기준치 설정방식은 NIER (2006)가 한국형 부영양화 지수(Korean trophic state index, TSI<sub>KO</sub>)의 설정 시 채택한 방법이기도 하다. 항목 간 관계식은 빈/중영양, 중/부영양, 부/과영양에 대한 Chl.a의 기준치와 순위로 정한 TP 및 SD의 잠정 기준치에 각각 대수를 취하여 선형의 회귀식(각 영양상태의 경계에 대한 기준치이므로  $n=3$ )을 구한 후 멱함수로 변환하는 과정을 거쳐 도출하였다. Fig. 3은 도출된 멱함수의 관계식에서 구한 계산치를 실선으로 하여 원 자료와 비교한 것이다. Chl.a의 실측치와 Chl.a-TP 관계식으로 도출된 계산치 간의 상관관계수는 모든 자료를 기반으로 도출된 회귀식의 상관계수(Fig. 2)와 큰 차이가 없었다.

Chl.a의 분류기준치를 Fig. 3의 관계식에 대입하여 도출된 TP와 SD의 기준치는 Table 3과 같다. TP의 분류기준치는 기

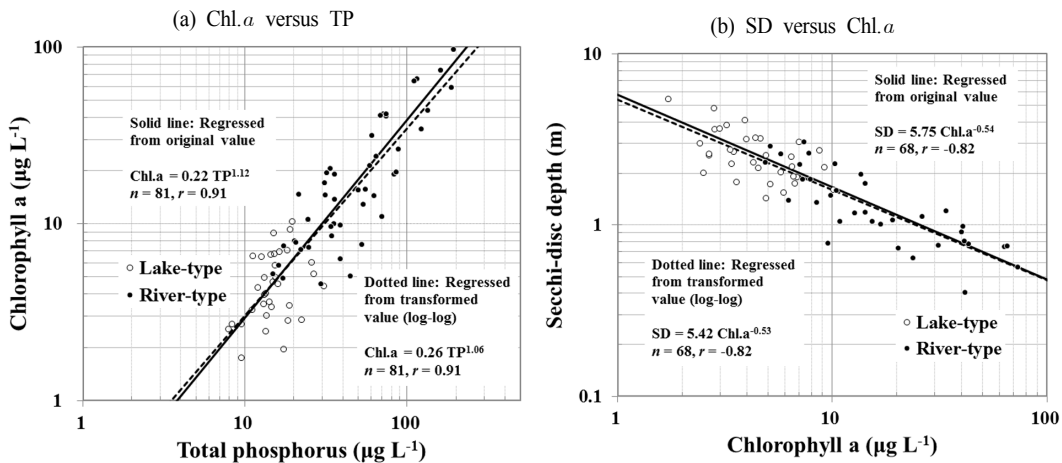


Fig. 2. Regressed power equation line according to data types (original or log-transformed) between (a) total phosphorus and chlorophyll *a*, (b) chlorophyll *a* and Secchi-disc depth, based on annual average values at the upper layer, of 81 lakes in Koera (*r* indicates correlation coefficient, between observed value and calculated value).

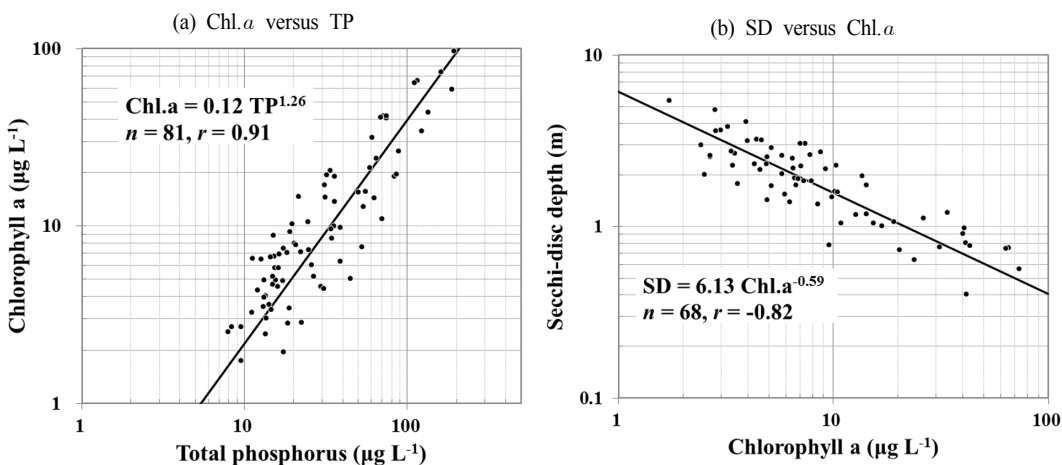


Fig. 3. Regressed power equation line according to ordinary classification, between (a) total phosphorus and chlorophyll *a*, (b) chlorophyll *a* and Secchi-disc depth, based on annual average values at the upper layer, of 81 lakes in Koera (*r* indicates correlation coefficient between observed value and calculated value).

**Table 3.** Trophic state classification of Korean lakes suggested in this study

	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Hypertrophic
TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	<13	<33	<80	$\geq 80$
Chlorophyll <i>a</i> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	<3	<10	<30	$\geq 30$
*Secchi depth (m)	>3.2	>1.6	>0.8	$\leq 0.8$

\*Generally, Secchi depth should be excluded.

**Table 4.** Lake types and water quality of oligotrophic and hypertrophic lakes in Korea

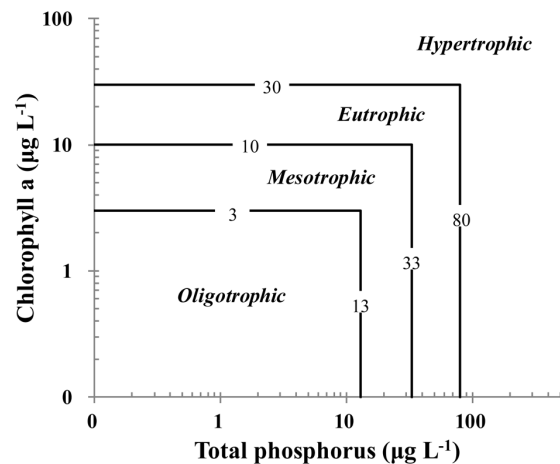
Lakes	Type			TP	Chl. <i>a</i>	SD	Trophic state	
							— $\mu\text{g L}^{-1}$ —	m
Paro	L	F	P	10	1.7	5.4	O	O
Gampo	L	F	P	8	2.5	2.0	O	O
Buan	L	F	P	8	2.7	2.5	O	O
Unmun	L	F	P	10	2.7	2.6	O	O
Gwangpo	R	B	N	195	96.0		H	H
Sapgyo	R	F	P	162	73.6	0.6	H	H
Seoho	R	F	P	116	65.9	0.7	H	H
Asan	R	B	P	111	63.8	0.7	H	H
Ganwol	R	B	N/P	189	58.6		H	H
Namyang	R	B	P	135	43.3	0.8	H	H
Bunam	R	B	P	75	41.7	0.4	E	H
Geumgang	R	F	P	72	41.4	0.8	E	H
Singal	R	F	P	123	34.0	1.2	H	H

L: lake-type, R: river-type, B: brackish, F: freshwater, P: phosphorus-limited, N: nitrogen-limited, N/P: phosphorus-limited and nitrogen-limited, O: oligotrophic, M: mesotrophic, E: eutrophic, H: hypertrophic.

존의 기준치 범위(Table 1)에서 대략 상위 값에 해당하였고 SD는 범위 값을 벗어났다. TP는 조류 증식의 원인물질로서 비록 몬순기에 인의 이용도가 낮더라도 다른 시기의 조류증식에 대한 잠재적 인자로서 영양상태의 평가 항목으로서 의미가 있다 할 수 있다. 그러나 SD는 조류증식의 결과가 반영될 때 영양상태의 지표로 고려될 수 있는데, 몬순기에 집중 유입되는 비조류성 물질이 SD에 미치는 영향이 매우 큰 우리나라 호수의 영양상태 판정에서 SD는 부적합한 항목으로 볼 수 있다. 이는 관련된 많은 선행 연구의 결과에서도 유추될 수 있는 것이다(An, 2000; Kim and Kim, 2004; Kim et al., 1988; Kim et al., 2001; Kong, 1997a; Kong, 1997b).

이에 따라 본고에서는 비록 SD의 자료를 분석에 포함하고 있지만 Table 3의 분류기준표에서 SD의 적용은 배제할 것을 권고한다. 81개 호소의 TP와 Chl.*a*에 의한 영양상태에 대한 평가결과는 Appendix 1과 같다. 두 항목 모두 빈영양으로 분류된 4개 호소는 호수형 담수호로서 인 제한으로 분류된 호소였고, 과영양으로 분류된 9개 호소는 하천형이었으며 서호와 신갈호를 제외하곤 석호, 하구호 및 간척지 호수였다 (Table 4).

영양상태에 대한 종합적인 평가는 두 항목 중 어떤 항목이라도 더욱 불량한 영양상태(즉 보다 부영양화된 상태)로 분류되는 유형으로 결정할 것을 제시하며 이에 대한 개념도는 Fig. 4와 같다.



**Fig. 4.** Suggestion of classification scheme, for trophic state of Korean lakes.

#### 4. Conclusion

본 연구는 환경부의 물환경측정망 대상의 81개 호소의 2013~2017년 월간 및 주간의 수층별 수질 자료를 기반으로 영양상태의 지표항목 간 관계를 외국 호소의 경향과 비교 분석하고 영양상태에 대한 우리나라의 분류기준치를 새로이 설정하여 제시한 것이다.

호소 상층부의 여름철 자료로 비교할 때 우리나라의 호소는 외국의 자연호에 비해 같은 인 농도에서 Chl.a 농도가 상대적으로 낮고, 같은 Chl.a 농도에서 투명도가 상대적으로 낮다. 이는 국내 호소의 대부분은 인공호로서 강우 시 비조류성 물질의 유입으로 투명도가 낮고, 현탁물과 함께 인의 농도가 증가하는 반면 짧은 체류시간과 빛 제한으로 조류성장 에 대한 인의 이용성이 낮기 때문이다.

본 연구에서 제안된 영양상태 분류기준치에서 총인의 기준치는 기준에 제안된 범위의 상위 값에 해당하고 투명도의 기준치는 범위 밖의 값을 보이는데 이는 비조류성 물질에 의한 탁수영향이 큰 우리나라의 지역특이성이 반영된 결과이다. 따라서 본고에서는 국내 호소의 영양상태 판정에서 투명도를 제외하고 총인과 Chl.a의 기준만을 적용할 것을 권고한다.

현재까지 국내 호소의 상층부 즉 주로 플랑크톤성 조류의 증식이 일어나는 구역에 대한 영양상태 분류기준이 제시된 바 없으므로 본 연구에서 제안된 기준은 학술적인 검토의 시작이 될 수 있으며 관련 정책의 수립 또는 평가를 위해 활용될 수 있을 것으로 보인다.

## Acknowledgement

본 연구는 환경부의 “수질 및 수생태계 목표기준 평가 규정 개정안 마련 연구 (2018)” 과제에서 얻어진 자료와 결과를 보완한 것으로 이에 감사드립니다.

## References

- Aizaki, M., Otsuki, A., Fukushima, T., Kawai, T., Hosomi, M., and Muraoka, K. (1981). Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state, *Research Report from the National Institute for Environmental Studies*, 23, 13-31. [in Japanese].
- An, K. G. (2000). Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus, *Korean Journal of Limnology*, 33(3), 222-229.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes, *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- Carlson, R. E. (1991). Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs, *Enhancing the States' Lake Management Programs*, 59-71.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1992). *The use of saline waters for crop production*, FAO Irrigation and Drainage Paper 48, 1-133.
- Forsberg, C. and Ryding, S. O. (1980). Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, *Archiv für Hydrobiologie*, 89(1/2), 189-207.
- Japanese Ministry of the Environment (JMOE). (1971). *Enforcement regulations, water pollution control law*, [http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws\\_search/lsg0500/detail?lawId=346M5000402002](http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=346M5000402002) (accessed on Feb. 2019). [Japanese Literature]
- Kim, B. and Jung, S. (2007). Turbid storm runoffs in lake Soyang and their environmental effect, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 29(11), 1185-1190. [Korean Literature]
- Kim, B. and Kim, Y. (2004). Phosphorus cycle in a deep reservoir in Asian monsoon area (lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model [CE-QUAL-W2], *Korean Journal of Limnology*, 37(2), 205-212. [Korean Literature]
- Kim, B., Ahn, T. S., and Cho, K. S. (1988). A comparative study of the eutrophication in reservoirs of the Han river, *Korean Journal of Limnology*, 21(3), 151-163. [Korean Literature]
- Kim, B., Park, J. H., Choe, K., and Hwang, G. (2001). Eutrophication of reservoirs in South Korea, *Limnology*, 2(3), 223-229.
- Kim, H. S. and Hwang, S. J. (2004). Seasonal variation of water quality in a shallow eutrophic reservoir, *Korean Journal of Limnology*, 37(2), 180-192. [Korean Literature]
- Kong, D. (1997a). Limnological and ecological characteristics of a river-reservoir (Paldang), Korea, *Korean Journal of Limnology*, 30(Supplement), 524-535.
- Kong, D. (1997b). Review on trophic state standards of Korean lakes, *Joint Seminar of Korea and Japan on Water Quality Preservation and Watershed Management of Streams and Lakes*, 251-266. [Korean Literature]
- Kong, D. (2019). Statistical analysis on water quality characteristics of large lakes in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(2), 165-180. [Korean Literature]
- Kwon, Y. H., Seo, J. K., Park, S. W., and Yang, S. Y. (2006). Evaluation of diatom growth potential in midstream and downstream Nakdong river, *Algae*, 21(2), 229-234. [Korean Literature]
- Lorenzen, C. J. (1967). Determination of chlorophyll and phaeophytin; spectrophotometric equations, *Limnology and Oceanography*, 12(2), 343-346.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2006). *A study on the comprehensive assessment methods of water environment - Eutrophication -*, NIER, 1-282. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018). *Water environment information system*, <http://water.nier.go.kr> (accessed May. 2018). [Korean Literature]
- Park, H. K., Lee, M. H., and Ryu, J. K. (1992). Identification of algal growth limiting nutrient in some artificial lakes of Korea by algal growth potential spike test, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 8(3), 159-166. [Korean Literature]
- Rast, W. and Lee, G. F. (1978). *Summary analysis of the North American (US Portion) OECD eutrophication project: Nutrient loading - lake response relationship and trophic state indices*, EPA-600/3-78-008, US EPA, Corvallis Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR. 1-455.
- Sakamoto, M. (1966). Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth, *Archiv für Hydrobiologie*, 62, 1-28.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (1966). *Determination of photosynthetic pigments in sea-water*, UNESCO, Paris, 1-69.
- US EPA. (1974). *The relationships of phosphorus and nitrogen to the trophic state of Northeast and North-Central lakes and reservoirs*, National Eutrophication Survey Working Paper no 23, US EPA, 1-28, Appendix A and B.
- Vollenweider, R. A. and Kerekes, J. (1982). *Eutrophication of waters. monitoring, assessment and control, OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters*, OECD, 1-154.

**Appendix 1.** Types of 81 lakes in Korea, annual average water quality at the upper layer, 2013-2017, and the classification of trophic state

Lake and reservoir	Type	TP	Chl. <i>a</i>	SD	Trophic state				
					— $\mu\text{g L}^{-1}$ —	m	TP	Chl. <i>a</i>	
Gachang	가창호	L	F	P	16	4.5	2.1	M	M
Gampo	감포호	L	F	P	8	2.5	2.0	O	O
Gwangdong	광동호	L	F	P	16	5.0	1.4	M	M
Gucheon	구천호	L	F	P	13	3.5	2.6	M	M
Gunwi	군위호	L	F	P	15	6.7	1.7	M	M
Naju	나주호	L	F	P	20	10.2	1.6	M	E
Dalbag	달방호	L	F	P	14	3.6	1.8	M	M
Damyang	담양호	L	F	P	13	4.9	2.5	M	M
Daegok	대곡호	L	F	P	27	5.2	1.7	M	M
Daea	대아지	L	F	P	15	8.8	2.7	M	M
Daecheong	대청호	L	F	P	18	7.0	3.0	M	M
Dongbok	동북호	L	F	P	11	6.5	2.2	O	M
Donghwa	동화호	L	F	P	12	4.3	2.3	O	M
Milyang	밀양호	L	F	P	13	2.4	3.0	M	O
Boryong	보령호	L	F	P	15	5.8	2.0	M	M
Buan	부안호	L	F	P	8	2.7	2.5	O	O
Sayon	사연호	L	F	P	26	6.0	1.5	M	M
Isa	상사호	L	F	P	13	3.9	4.1	M	M
Soyang	소양호	L	F	P	14	3.0	3.6	M	M
Sueo	수어호	L	F	P	14	4.0	3.1	M	M
Angye	안계호	L	F	P	14	6.6	1.9	M	M
Andong	안동호	L	F	P	19	2.8	4.8	M	O
Yeongcheon	영천호	L	F	P	16	6.9	1.9	M	M
Okjeong	옥정호	L	F	P	13	6.5	2.5	O	M
Yongdam	용담호	L	F	P	11	3.2	3.8	O	M
Unmun	운문호	L	F	P	10	2.7	2.6	O	O
Imha	임하호	L	F	P	31	4.4	3.2	M	M
Jangseong	장성호	L	F	P	19	9.2	2.2	M	M
Jangheung	장흥호	L	F	P	19	3.4	2.3	M	M
Juam	주암호	L	F	P	15	4.6	3.2	M	M
Chungju	충주호	L	F	P	23	2.9	3.6	M	O
Paro	파로호	L	F	P	10	1.7	5.4	O	O
Pyonghwa	평화의회	L	F	P	17	1.9		M	O
Hapcheon	합천호	L	F	P	15	3.4	2.7	M	M
Ganwol	간월호	R	B	N/P	189	58.6		H	H
Gyongcheon	경천지	R	F	P	17	7.4	3.0	M	M
Gyongpo	경포호	R	B	N/P	83	19.0		H	E
Gosam	고삼지	R	F	P	63	14.3	1.2	E	E
Gwanggyo	광교지	R	F	P	54	12.8	1.2	E	E
Gwangju	광주호	R	F	P	20	8.0	1.8	M	M
Gwangpo	광포호	R	B	N	195	96.0		H	H
Goesan	괴산호	R	F	P	30	4.5		M	M

L: lake-type, R: river-type, B: brackish, F: freshwater, P: phosphorus-limited, N: nitrogen-limited, N/P: phosphorus-limited and nitrogen-limited, O: oligotrophic, M: mesotrophic, E: eutrophic, H: hypertrophic.



**Appendix 1.** Types of 81 lakes in Korea, annual average water quality at the upper layer, 2013-2017, and the classification of trophic state (continued)

Lake and reservoir		Type			TP	Chl. <i>a</i>	SD	Trophic state	
								— $\mu\text{g L}^{-1}$ —	m
Geumgang	금강하구	R	F	P	72	41.4	0.8	E	H
Geumho	금호호	R	B	P	34	20.5	0.7	E	E
Nakdong	낙동강하구	R	F	P	89	26.4	1.1	H	E
Namyang	남양호	R	B	P	135	43.3	0.8	H	H
Daeam	대암호	R	F	P	35	8.5	1.3	E	M
Daeho	대호	R	B	N/P	75	40.3	0.9	E	H
Maeho	매호	R	B	N/P	59	21.2		E	E
Bomun	보문호	R	F	P	31	16.8	1.0	M	E
Boseong	보성호	R	F	P	32	19.2	1.1	M	E
Bongpo	봉포호	R	F	P	36	19.0		E	E
Bunam	부남호	R	B	P	75	41.7	0.4	E	H
Sapgyo	삼교호	R	F	P	162	73.6	0.6	H	H
Seoho	서호	R	F	P	116	65.9	0.7	H	H
Seonam	선암호	R	F	P	35	9.9	1.5	E	M
Songji	송지호	R	B	P	39	9.7		E	M
Singal	신갈지	R	F	P	123	34.0	1.2	H	H
Asan	아산호	R	B	P	111	63.8	0.7	H	H
Yoncho	연초호	R	F	P	25	7.3	1.8	M	M
Yongrang	영랑호	R	B	P	45	5.0		E	M
Yongsan	영산호	R	F	P	65	24.0	0.6	E	E
Yongam	영암호	R	B	P	34	9.6	0.8	E	M
Yedang	예당지	R	F	N/P	69	40.9	1.0	E	H
Woncheon	원천지	R	F	N/P	50	15.4	1.0	E	E
Uiam	의암호	R	F	P	21	7.8	2.6	M	M
Idong	이동지	R	F	P	70	10.9	1.0	E	E
Junam	주남저수지	R	F	P	61	31.4	0.8	E	H
Jinyang	진양호	R	F	P	22	7.1	2.2	M	M
Cheonjin	천진호	R	F	P	22	14.5		M	E
Cheongcho	청초호	R	B	P	53	7.6		E	M
Cheongpyong	청평호	R	F	P	16	5.8	2.6	M	M
Chuncheon	춘천호	R	F	P	15	5.2	2.9	M	M
Chungjujo	충주조정지	R	F	P	39	6.3	1.4	E	M
Tapjeong	탑정지	R	F	P	25	10.4	2.3	M	E
Paldang	팔당호	R	F	P	31	14.4	1.7	M	E
Pyongrim	평림호	R	F	P	25	10.5	1.6	M	E
Hyangho	향호	R	B	N/P	86	19.6		H	E
Hwajinpo	화진포호	R	B	P	56	15.5		E	E
Hoeya	회야호	R	F	P	36	13.7	2.0	E	E
Hoengseong	횡성호	R	F	P	17	4.9	2.3	M	M

L: lake-type, R: river-type, B: brackish, F: freshwater, P: phosphorus-limited, N: nitrogen-limited, N/P: phosphorus-limited and nitrogen-limited, O: oligotrophic, M: mesotrophic, E: eutrophic, H: hypertrophic.