

한국형 부영양화지수(TSI_{KO})의 인자로서 TOC의 적용성 검토

김범철^{1,*} · 공동수^{2,*}

¹강원대학교 환경융합학부

²경기대학교 바이오융합학부

Examination of the Applicability of TOC to Korean Trophic State Index (TSI_{KO})

Bomchul Kim^{1,*} · Dongsoo Kong^{2,*}

¹Department of Environmental Science, Kangwon University

²Department of Bioconvergence, Kyonggi University

(Received 4 May 2019, Revised 30 May 2019, Accepted 30 May 2019)

Abstract

Korean Trophic State Index (TSI_{KO}) was developed in 2006, and was composed of COD (COD_{Mn} based on permanganate method), Chlorophyll *a* (Chl. *a*) and total phosphorus (TP). However, COD_{Mn} usually represents only 50-60% of total organic matter in stream or lake water due to low oxidizing power of permanganate. This study investigated the relationship between TOC and COD_{Mn} based on the average data for the whole layer in 81 lakes in Korea, during the period 2013-2017. As a result, COD_{Mn} was found to be 1.54 times more than TOC in 66 of the freshwater lakes and 3 brackish lakes (TOC measured using thermo-oxidation method). TOC was about a quarter of COD_{Mn} in 8 coastal lakes (TOC measured using UV-persulfate oxidation method), and it appeared to be underestimated due to chloride interference. Using the data of 69 lakes with exception of 12 brackish lakes, TSI_{KO}(TOC) was developed based on the correlation between TOC and COD_{Mn}, while TSI_{KO}(COD) was replaced with TSI_{KO}(TOC). However, for trophic state assessment of brackish lakes, the TSI_{KO}(TOC) can only be utilized in case that TOC is measured through thermo-oxidation method. The determination coefficient of TSI_{KO}(Chl) to TSI_{KO}(COD) in 66 freshwater lakes and 3 brackish lakes was 0.83, while that to TSI_{KO}(TOC) was 0.68. This difference could be attributed to the recalcitrant organic part of TOC.

Key words : Eutrophication, Trophic state classification, Trophic state index, TSI_{KO}, Water quality

^{1,*} Corresponding author, 교수(professor), bkim@kangwon.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0003-1687-222X>

^{2,*} Corresponding author, 교수(professor), dkkong@kgu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-8438-3229>

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(Chlorophyll *a*, Chl.*a*) 및 그 결과와 관련된 것(투명도)으로 구분되며, 영양상태의 분류는 항목별 단위기반의 등급기준치 또는 이를 변환한 무단위의 영양상태지수(trophic state index, TSI)에 의한(Kong and Kim, 2019).

Carlson (1977)은 투명도(Secchi depth, SD)를 기반으로 TSI를 고안한 후 투명도에 대한 관계로부터 Chl.*a*와 총인(total phosphorus, TP)의 TSI를 도출하였다. Carlson의 TSI가 SD 기반에서 다른 항목(Chl.*a*, TP)으로 확장되었다는 것은 SD가 영양상태를 대변하는 주요 항목이라는 것과 아울러 SD와 다른 항목 간에 높은 상관성이 존재한다는 것을 전제할 것이라 할 수 있다.

반면에 국내 호소는 체류시간이 짧은 인공호가 대부분이어서 조류현존량에 대한 영양물질 농도 및 SD의 상관성이 외국의 자연호와는 다르다(Kim et al., 1988; Kim et al., 2001; Kong, 1997). 특히 SD는 다른 영양상태 지표항목과의 상관성이 낮는데, Kim et al. (1988)은 한강수계 인공호에서 SD의 TSI 값이 다른 지표항목의 TSI 값에 비해 상대적으로 컸으며 이는 무기현탁물이 유입하는 경우 총인과 식물플랑크톤의 증가 없이 SD가 감소하기 때문이라고 추정하였다.

한국형 부영양화 지수(Korean trophic state index, TSI_{KO})는 체류시간이 짧고 외부기원 유기물의 영향을 많이 받는 우리나라 호소의 특성을 고려하여 SD를 제외하고 대신에 COD를 지표항목으로 반영한 지수이다(NIER, 2006). 아직까지 이 지수에 대한 개발 과정과 구체적인 사항이 학술적으로 보고되어 검증된 바는 없으나, 동 지수는 2013년부터 환경부 고시로 지정된 주요 호소의 영양상태에 대한 평가에 적용되고 있고 최근에는 이를 적용한 연구사례도 증가하고 있다(Ahn et al., 2013; Kim et al., 2012; Park et al., 2018).

종합TSI_{KO}는 각 지표항목(COD, Chl.*a*, TP)에 비율 가중치를 곱하여 합산하는 방식으로 산정되는데, 이때 COD 항목의 가중치를 다른 각 항목의 그것에 비해 2배 더 큰 값을 부여하고 있다. 즉 TSI_{KO}는 다른 지표항목(Chl.*a*, TP)에 비해 외부기원(allochthonous) 또는 내부기원(autochthonous)의 유기물 양을 상대적으로 크게 반영하고 있는 지수라고 할 수 있다.

이처럼 TSI_{KO}는 유기물 양에 중점을 둔 지표이므로 관련 항목인 COD가 수중의 유기물 양을 적절하게 대변할 수 있어야 한다. 그러나 우리나라 수질오염공정시험기준에서 정하고 있는 망간법 COD 측정에서 KMnO₄의 낮은 산화력이 지적되어 왔는데, Kim, Jung et al. (2007)은 2003년 6월부터 2007년 2월까지 전국 내륙의 8개 호소와 4대강 53개 하천지점에서 측정된 총유기탄소 대비 COD_{Mn}의 탄소량은 61%였다고 보고한 바 있다. 이러한 이유로 우리나라의 호소 생활환경기준 항목에서 COD_{Mn}은 2016년부터 적용이 배제되었다. 최근 Kong (2019)이 분석한 환경부 물환경측정망 대상 66개 담수호의 2013~2017년 간 평균자료에서 이론적 탄소

성 BOD(carbonaceous biological oxygen demand, CBOD)에 대한 COD_{Mn}의 비율은 52%에 불과하였다.

COD_{Mn}이 수중에 존재하는 유기물의 총량을 반영하는데 한계가 있음에도 불구하고 TSI_{KO}의 지표항목으로 반영된 것은 TSI_{KO}가 개발되던 2004~2006년 당시의 제도적인 여건에서 비롯되었다. 즉 TSI_{KO}는 환경부에서 지정한 주요호소의 영양상태를 판정하기 위한 제도적인 활용을 목적으로 개발된 지수인데, 환경부 물환경측정망의 대상 호소에서 TOC가 측정된 것은 2008년부터이고 호소생활환경기준으로 TOC가 도입된 것은 2012년이다. 따라서 2006년 당시 호소의 영양상태 평가에 법적으로 적용할 수 있는 그리고 가용할 자료가 축적된 유기물 항목인 COD가 적용된 것이다.

그러나 그간에 여건이 바뀌어 환경부 물환경측정망 운영을 통해 2008년부터 TOC 자료가 측정된 상태이고 우리나라의 호소 생활환경기준 항목에서 TOC가 COD를 대체하였으므로, 유기물에 대한 적절한 반영 그 자체를 위해서 뿐만 아니라 제도적인 활용을 위해서도 TOC를 반영한 TSI_{KO}를 개발하여 적용할 필요가 있다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 COD_{Mn}과 TOC의 상관성을 바탕으로 TOC를 인자로 한 TSI_{KO}(TOC)를 도출하고 다른 지수의 값과 비교·분석하여 특이사항을 분석하여 그 적용성을 검토하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 분석자료

본 연구의 분석대상 호소는 환경부 물환경측정망의 81개 호소였으며, 분석에 사용된 자료는 국립환경과학원의 물환경정보시스템(<http://www.water.nier.go.kr>)에서 추출한 2013~2017년(5개년)의 자료였다(NIER, 2018).

2.2. 통계처리

항목 간 TSI의 절대적 차이는 식 (1)의 변수 간 평균제곱근편차(root mean square deviation, RMSD)를 비교대상 변수(y_i)의 범위로 나누어 표준화한 식 (2)의 NRMSD (normalized RMSD)로 평가하였다. 이와 더불어 차이의 방향성과 그 정도는 식 (3)의 평균편차(mean deviation, MD)를 표준화한 식 (4)의 NMD (normalized MD)로 평가하였다.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum(y_i - x_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$\text{NRMSD} = \text{RMSD} / (y_{\max} - y_{\min}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{MD} = \frac{\sum(y_i - x_i)}{N} \quad (3)$$

$$\text{NMD} = \text{MD} / (y_{\max} - y_{\min}) \times 100 \quad (4)$$

항목 별 TSI 간 Pearson 상관계수를 구하고 쌍체 양측 t 검정(two tailed paired t -test)으로 그 차이에 대한 유의성을 검토하였다.

3. Results and Discussion

3.1. TSI_{KO}의 이력 및 특성

TSI_{KO}는 국립환경과학원의 “물환경종합평가방법 개발 조사연구-부영영화조사 및 평가체계 연구-”에서 개발된 지수이다(NIER, 2006). 2013년에 TSI_{KO}는 환경부고시 제2013-134호(2013.11.5.)의 「물환경 목표기준 평가규정」 별표로 포함되어 물환경 목표기준이 설정된 49개 호소에 대한 부영영화 정도를 평가하기 위한 공식적인 지수로 지정되었다. TSI_{KO}에 적용되는 수질은 호수 전층의 연평균 COD, Chl.*a* 및 TP 농도이다.

지수식은 환경부 호수수질측정망 대상 호소와 한국농어촌공사의 수질측정망 대상 농업용저수지를 포함한 500여개 호소의 2000~2002년간 3~10월의 자료에서 각 항목별로 측정치의 25 백분위수는 40으로, 75 백분위수는 60이 되도록 계수를 조정한 것이다(식 (5)~(7)). 식 (7)의 종합TSI_{KO}는 COD에 50%, Chl.*a*와 TP는 각각 25%의 가중치를 부여하여 합산한 것이며(식 (8)), 영양상태의 분류는 종합TSI_{KO}가 30미만은 빈영양, 30~50미만은 중영양, 50~70미만은 부영양, 70이상은 과영양으로 정하고 있다.

$$TSI_{KO}(COD) = 5.8 + 64.4 \log(COD) \quad (COD_{Mn}: mg L^{-1}) \quad (5)$$

$$TSI_{KO}(Chl) = 12.2 + 38.6 \log(Chl.a) \quad (Chl.a: \mu g L^{-1}) \quad (6)$$

$$TSI_{KO}(TP) = 114.6 + 43.3 \log(TP) \quad (TP: mg L^{-1}) \quad (7)$$

종합

$$TSI_{KO} = 0.5 TSI_{KO}(COD) + 0.25 TSI_{KO}(Chl) + 0.25 TSI_{KO}(TP) \quad (8)$$

Carlson (1977)의 TSI와 Aizaki et al. (1981)의 TSI_m은 각각 투명도와 Chl.*a*에 대한 TSI의 기본식을 고안하고 항목 간 회귀식을 기본식에 대입하여 다른 항목의 TSI를 도출하였으나 TSI_{KO}는 각 항목별 분포로부터 독립적으로 산출된 것이다. 이는 회귀식의 적용 시 문제점으로 지적된 “상관성이 낮은 비선형 관계에서 대수치 변환여부에 따른 적합도의 차이, 이례적인 수치 또는 특정 구간에 측정치가 몰리는 경우 회귀선의 왜곡(Kong and Kim, 2019)”을 피한 것으로서 합리적인 선택이었다고 본다.

3.2 TSI_{KO}(TOC)의 도출 및 적용성

TSI_{KO}의 개발 당시와 현재는 10여 년의 시차가 있기 때문에 여러 여건의 변화로 인해 각 시기의 수질분포가 서로 다를 것으로 추정된다. 이를 무시하고 NIER (2006)의 방식대로 현 시점의 TOC 분포로 영양상태를 분류한다면 이는 기존의 COD, Chl.*a* 및 TP에 의한 TSI_{KO}의 분류체계와는 다른 경향을 보일 수 있다. 따라서 기존 지수의 등급체계를 일관성 있게 유지하려면 TOC와 COD의 상관관계를 검토하여 계수 값을 대치하는 것이 바람직하다.

Fig. 1은 본 연구를 통하여 분석된 2013~2017년간 전국

81개 호소 별 평균 TOC와 COD의 관계 및 관련 회귀식을 나타낸 것이다. TOC 측정법 중 고온산화방식은 염분 간섭을 받지 않으나 UV산화방식에서는 염분도가 증가할 때 TOC 산화율이 뚜렷하게 감소하며(Jung et al., 2016; Kim, Kim et al., 2007), 그 결과 UV산화방식으로 측정되고 있는 환경부 측정망의 기수호에서는 TOC 농도가 상대적으로 매우 낮은 값을 보이는 것이 확인된 바 있다(Kong, 2019).

Kong (2019)은 유엔 식량농업기구의 기준(FAO, 1992)을 근거로 전기전도도(electrical conductivity, EC)가 700 $\mu S cm^{-1}$ 을 넘는 호수를 기수호로 분류한 바 있다. 본 연구에서는 Kong (2019)의 기준에 따라 기수호를 분류하였고 그 중 COD/TOC 비가 2이상인 호수는 Fig. 1의 회귀식에서 제외하였다. 금호호, 남양호, 영암호는 평균 EC가 1,000~3,000 $\mu S cm^{-1}$ 범위로서 FAO (1992)의 기준으로 약염(slightly saline: 0.7~2 dS cm^{-1} = 700~2,000 $\mu S cm^{-1}$) 또는 약염에 가까운 중염(moderately saline: 2,000~10,000 $\mu S cm^{-1}$) 수준의 기수호였는데, 이들 호수에 대한 TOC는 모두 고온산화방식으로 측정되고 있었고 COD/TOC 비가 2미만이었으므로 해당 호수의 자료는 회귀식에 포함하였다.

평균 COD/TOC 비가 2이상인 호수는 그 값이 경계선상에 있는 청평호(COD/TOC 2.01)와 보문호(COD/TOC 2.06)를 제외하면 모두 기수호였다. 이중 아산호, 대호, 간월호는 평균 EC가 800~2,600 $\mu S cm^{-1}$ 범위로 약염 또는 약염에 가까운 중염 수준이었는데, 이들 호수에 대한 TOC는 현재 고온산화방식으로 측정되고 있지만 COD/TOC 비가 2보다 약간 큰 수준(평균 2.1~2.6)이었다. 그 외 호소의 평균 EC는 4,600~42,000 $\mu S cm^{-1}$ 로 중염에서 극고염(very high saline: 25,000~45,000 $\mu S cm^{-1}$)에 이르는 수준이었는데 평균 COD/TOC 비가 2.7~5.5의 범위를 보였고 부남호를 제외하면 모두 UV 산화법으로 측정되고 있었다. UV 산화법으로 TOC가 측정되고 있는 동해안의 8개 석호에서 COD/TOC 비는 약 4에 달했다.

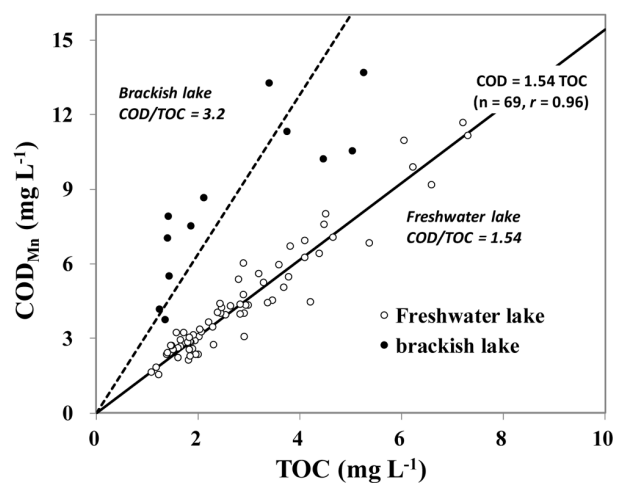


Fig. 1. Relationship between TOC and COD_{Mn} based on the average data for the whole layer of 81 lakes in Korea during the period 2013-2017 (Closed circles represents data with electrical conductivity above 700 $\mu S cm^{-1}$ and COD/TOC ratio above 2).

EC가 700 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이상이고 COD/TOC 농도비가 2 이상인 경우를 제외한 69개 호소의 자료로부터 도출된 TOC와 COD의 관계는 식 (9)와 같다.

$$\text{COD} = 1.54 \text{ TOC} \quad (n = 69, r = 0.96) \quad (9)$$

식 (9)를 식 (5)의 우항에 대입하면 TOC에 대한 TSI_{KO} 는 식 (10)이 된다.

$$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TOC}) = 17.9 + 64.4 \log(\text{TOC}) \quad (10)$$

환경부 호소수질측정망 81개 호소에서 변수 간 차이의 정도를 나타내는 NRMSD와 차이의 방향성을 나타내는 NMD로 볼 때 $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl})$ 에 비해 $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TOC})$ 는 전반적으로 낮았고 특히 기수호에서 그 경향이 뚜렷하였으며(Fig. 2a), 4분면 편차분석에서도 편포하는 정도가 컸다(Fig. 2b).

기수호 중 COD/TOC 비가 2 이상에 해당하는 12개 호수를 제외한 69개 호수만의 자료를 가지고 검정할 때 $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TOC})$ 는 $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{COD})$ 에 비해 $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl})$ 또는 $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TP})$ 와의 상관성이 다소 낮았는데(Table 1), 이는 난분해성 유기물의 영향

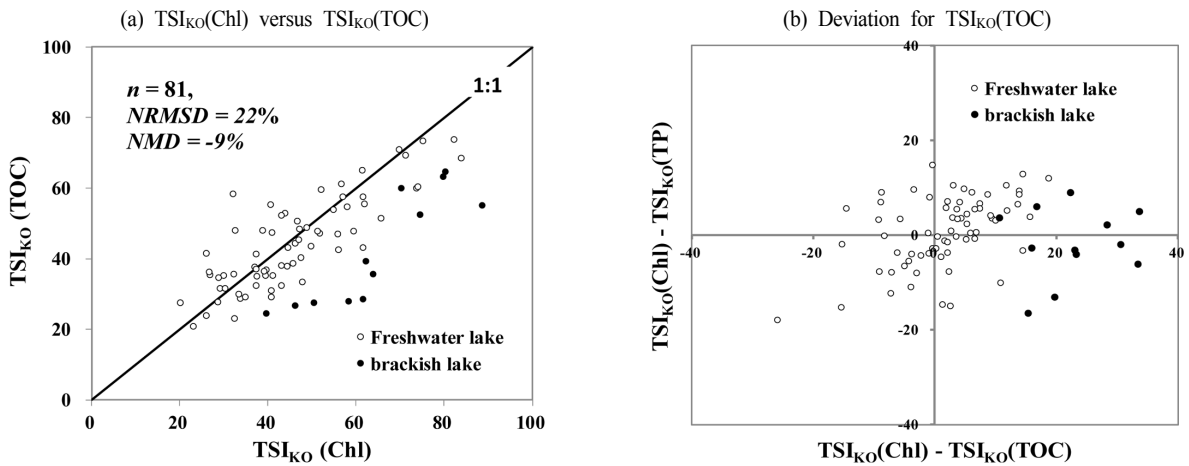


Fig. 2. Fitness of $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TOC})$ to $\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl})$ and quadrant analysis for deviation of TSI_{KO} .

Table 1. The Pearson correlation coefficients (upper right part of the table) and two tailed p -values of paired t -test (lower left part) between the TSIs of 69 lakes (66 freshwater lakes and 3 brackish lakes with COD/TOC ratio below 2) in Korea

	$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TP})$	$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl})$	$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{COD})$	$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TOC})$	TSI_{KO}
$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TP})$		0.86	0.85	0.81	0.93
$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl})$	0.41		0.91	0.83	0.96
$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{COD})$	0.10	0.00		0.95	0.98
$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TOC})$	0.27	0.07	0.44		0.92
TSI_{KO}	0.38	0.01	0.01	0.39	

Table 2. Trophic state classification of Brackish lakes by Korean trophic state index (TSI_{KO})

Lakes and reservoirs	EC	TP	Chl. a	COD	TOC	Trophic state index*			
	$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\mu\text{g L}^{-1}$		mg L^{-1}		TP	Chl	COD	TOC
Yongrang	41,350	45	5.2	4.1	1.3	E	M	M	O
Cheongcho	42,020	53	7.6	3.7	1.4	E	E	E	O
Songji	15,342	39	9.9	7.0	1.4	E	E	E	O
Hwajinpo	18,952	56	15.7	7.9	1.4	E	E	E	O
Gyongpo	34,061	84	19.2	5.5	1.4	E	E	E	M
Maeho	9,973	60	21.9	7.5	1.9	E	E	E	M
Hyangho	9,575	77	19.9	8.6	2.1	E	H	H	E
Daeho	2,605	79	32.4	10.2	4.5	E	H	H	E
Bunam	4,666	75	41.7	13.2	3.4	H	H	H	E
Asan	861	116	56.8	10.5	5.0	H	H	H	E
Ganwol	2,388	189	58.6	13.7	5.3	H	H	H	E
Gwangpo	4,682	195	96.0	11.3	3.8	H	H	H	E

* O: oligotrophic, M: mesotrophic, E: eutrophic, H: hypertrophic

이 TSI_{KO}(TOC)에 반영된 결과로 추정된다. 즉 TSI_{KO}의 적용 목적이 유기물의 양을 평가하는데 중점을 두고 있다면 TSI_{KO}(Chl)로 반영되지 않는 부분을 더욱 크게 포함하고 있는 TSI_{KO}(TOC)를 적용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 즉 결정계수(determination coefficient)로 비교할 때 담수호의 TSI_{KO}(Chl)은 TSI_{KO}(COD)에 83%의 설명력을 갖는 반면, TSI_{KO}(TOC)에 대한 설명력은 68%에 불과하였다. 이러한 설명력의 차이는 낮은 산화율을 보이는 망간법 COD에서 반영하지 못하는 부분으로부터 기인하는 것으로 추정된다.

각 지수의 차이에 대한 양측 쌍체 *t*-검정에서 TSI_{KO}(COD)는 TSI_{KO}(Chl)과 매우 유의한 수준($p < 0.01$)의 차이를 보였다. TSI_{KO}(TOC)는 TSI_{KO}(Chl) 등 다른 항목과 유의적인 차이를 보이지 않았는데 이는 상관성이 상대적으로 낮은 점측 대응 값의 차에 변이가 크기 때문에 나타난 결과로 볼 수 있다.

기수호 중 COD/TOC 비가 2이상에 해당하는 12개 호수에서 항목 간 영양상태의 판정결과는 대부분 큰 차이가 없었으나 TSI_{KO}(TOC)의 결과만이 영양상태가 두드러지게 과소평가되는 결과를 보였다(Table 2). 이러한 호수에서는 TOC에 대한 시험방식을 개선하거나 그 이전에는 TSI_{KO}(TOC) 대신 기존의 TSI_{KO}(COD)로 평가하는 것이 합리적인 것이다.

4. Conclusion

우리나라 호소환경기준의 유기물 항목이 산화력이 낮은 COD_{Mn}에서 TOC로 전환된 점과 아울러 그간 TOC 자료가 충분히 축적된 점을 반영하여 TSI_{KO}(TOC)를 개발하여 이를 추가하거나 기존의 TSI_{KO}(COD)를 대체할 필요가 있다.

본 연구는 환경부의 물환경측정망 대상의 81개 호소 중 전 기전도도가 700 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 미만이고 COD/TOC 비가 2미만인 69개 호수의 2013~2017년 전층의 평균수질을 기반으로 COD_{Mn}과 TOC의 상관성을 바탕으로 TOC를 인자로 하는 한국형 부영양화지수인 TSI_{KO}(TOC)를 도출하고 그 적용성을 검토한 것이다.

담수호의 TSI_{KO}(Chl)의 TSI_{KO}(TOC)에 대한 설명력은 TSI_{KO}(COD)에 대한 설명력에 비하여 현저히 낮았는데 이러한 차이는 망간법 COD에서 측정되지 못하는 난분해성 유기물량을 TOC가 반영하는데 따른 것으로 추정되며, 이는 TSI_{KO}(COD)를 TSI_{KO}(TOC)로 전환해야 하는 이유가 될 수 있다.

그러나 TSI_{KO}(TOC)는 염분도가 높은 조건에서 UV산화법에 의해 TOC가 측정된 경우에는 다른 항목에 의한 지수 값보다 상대적으로 낮은 값을 보이기 때문에 이 경우에는 TSI_{KO}(TOC)의 적용이 불가하다. 따라서 본 연구에서 도출된 TSI_{KO}(TOC)는 우리나라 호수에 범용으로 적용할 수 있는 지수의 개발에 앞서 검토된 잠정적인 것으로 인식되어야 한다.

TSI_{KO}의 개발과정과 적용성에 대한 구체적인 기술과 아울러 최근 여건을 반영한 유기물 지표의 개선에 대한 연구가 수행되어야 하며, 본 연구는 후속 연구에서 유의해야 할 사항(유기물 항목의 시험법 문제, 지표 항목 간 상관성)을 제시한 것에 의의가 있다고 본다.

Acknowledgement

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

References

- Ahn, D. H., Han, S. K., and Lim, M. (2013). Water quality assessment for Geumgang river area using the Korean trophic state index, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 21(3), 13-20. [Korean Literature]
- 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]
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes, *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1992). *The use of saline waters for crop production*, 1-133.
- Jung, H. J., Lee, B. M., Lee, K. H., Shin, H. S., and Hur, J. (2016). Influences of environmental conditions and refractory organic matters on organic carbon oxidation rates measured by a high temperature combustion and a UV-sulfate methods, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 98-107. [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., Jung, S., Jang, C., and Kim, J. K. (2007). Comparison of BOD, COD and TOC as the indicator of organic matter pollution in streams and reservoirs of Korea, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 29(6), 640-643. [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, E., Sim, K., Kim, S., and Choi, H. I. (2012). Water quality assessment for reservoirs using the Korean trophic state index, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(1), 78-83. [Korean Literature]
- Kim, S. J., Kim, S., Chon, K. M., Lee, E., Sarper, S., Lee, S., Kim, D., and Cho, J. (2007). Comparison of three methods for measuring dissolved organic carbon in seawater, *Proceedings of the 2007 Korean Society on Water Environment*, Korean Society on Water Environment, 368-372. [Korean Literature]
- Kong, D. (1997). Limnological and ecological characteristics of a river-reservoir (Paldang), Korea, *Korean Journal of Limnology*, 30(Supplement), 524-535.

- 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]
- Kong, D. and Kim, B. (2019). Suggestion for trophic state classification of Korean lakes, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(3), [in press]. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2006). *A study on the comprehensive assessment methods of water environment - Eutrophication -*, 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, J., Kal, B., Lee, C., Hong, S., Choi, M., and Seo, H. (2018). Analysis of the trophic characteristics of the SoOak river watershed using the Korean trophic state index, *Journal of Wetlands Research*, 20(4), 330-337. [Korean Literature]

Appendix 1. Annual average water quality and Korean trophic state index (TSI_{KO}) at the whole layer of 81 lakes in Korea during the period 2013-2017

Lakes and reservoirs		EC	TP	Chl. <i>a</i>	COD	TOC	Korean trophic state index (TSI _{KO})			
		$\mu\text{S cm}^{-1}$	$-\mu\text{g L}^{-1}-$	$-\mu\text{g L}^{-1}-$	$-\text{mg L}^{-1}-$		TP	Chl	COD	TOC
Paro	파로호	111	10	1.6	2.3	1.4	28	20	29	27
Milyang	밀양호	50	14	2.3	1.5	1.2	34	26	18	24
Pyonghwa	평화의호	173	17	1.9	1.6	1.1	38	23	19	21
Gampo	감포호	98	8	2.4	2.6	1.9	24	27	32	36
Unmun	운문호	80	10	2.4	2.3	1.9	27	27	29	35
Gucheon	구천호	63	11	3.4	1.8	1.2	29	33	22	23
Buan	부안호	79	9	2.7	2.8	1.8	26	29	35	35
Soyang	소양호	79	14	2.8	2.2	1.6	34	29	28	31
Yongdam	용담호	128	11	3.0	2.6	1.6	30	30	32	31
Donghwa	동화호	62	11	3.6	2.5	1.5	30	34	32	30
Sueo	수어호	93	14	3.6	2.4	1.5	35	34	30	29
Hapcheon	합천호	111	16	2.9	2.5	1.8	37	30	32	35
Gachang	가창호	77	16	4.5	2.1	1.8	37	38	27	35
Andong	안동호	160	21	2.3	2.7	2.3	42	26	34	41
Chungju	충주호	240	23	2.7	2.4	1.4	44	29	30	27
Isa	상사호	79	14	3.9	2.7	1.5	35	35	33	29
Damyang	담양호	68	13	4.5	2.6	1.7	33	38	33	32
Dongbok	동북호	79	11	5.2	2.9	2.0	29	40	35	37
Gwangdong	광동호	159	17	4.5	2.3	2.0	38	37	30	37
Dalbag	달방호	87	14	3.4	3.0	2.9	35	33	37	48
Hoengseong	횡성호	140	19	4.4	2.3	2.0	40	37	30	38
Jangheung	장흥호	81	20	3.3	2.8	1.9	41	32	35	35
Boryong	보령호	127	15	5.5	2.7	1.5	36	41	33	29
Okjeong	옥정호	134	13	5.7	3.0	1.8	32	41	37	35
Juam	주암호	81	15	5.1	2.9	1.9	36	40	35	35
Chuncheon	춘천호	99	15	5.0	3.1	1.9	36	39	37	36
Cheongpyong	청평호	119	17	5.6	3.2	1.6	38	41	38	31
Daea	대아지	60	15	8.4	3.2	1.7	35	48	38	33
Daecheong	대청호	162	20	6.4	3.3	2.0	41	43	39	38
Uiam	의암호	103	18	7.5	3.3	2.1	39	46	39	38
Angye	안계호	142	14	6.4	4.4	3.4	34	43	47	52
Goesan	괴산호	152	30	4.5	3.4	2.3	48	37	40	41
Jinyang	진양호	112	24	6.9	3.0	2.0	44	45	37	38
Gyongcheon	경천지	118	18	7.7	3.9	2.6	39	46	44	44
Gunwi	군위호	114	15	5.5	5.5	3.8	35	41	53	55
Yeongcheon	영천호	139	16	6.7	4.5	3.5	37	44	48	53
Sayon	사연호	143	25	5.6	3.9	2.8	45	41	44	47

Appendix 1. Annual average water quality and Korean trophic state index (TSI_{KO}) at the whole layer of 81 lakes in Korea during the period 2013-2017 (Continued)

Lakes and reservoirs		EC	TP	Chl. <i>a</i>	COD	TOC	Korean trophic state index (TSI _{KO})			
		μS cm ⁻¹	—μg L ⁻¹ —	—mg L ⁻¹ —	TP	Chl	COD	TOC		
Daegok	대곡호	140	27	4.9	4.0	2.9	47	39	44	48
Imha	임하호	162	33	3.3	4.5	4.2	50	32	48	58
Chungjujuo	충주조정지	241	39	6.3	2.9	1.7	53	43	36	32
Jangseong	장성호	93	21	8.3	3.6	2.2	42	48	42	40
Yoncho	연초호	108	26	7.0	4.0	2.5	46	45	45	43
Gwangju	광주호	88	21	8.0	4.3	2.7	42	47	47	45
Pyongrim	평림호	120	24	9.5	4.2	2.5	45	50	46	43
Naju	나주호	92	21	10.7	4.4	2.8	42	52	47	47
Yongrang*	영랑호	41,350	45	5.2	4.1	1.3	56	40	46	24
Daeam	대암호	260	34	8.1	4.3	2.9	51	47	47	48
Tapjeong	탑정지	149	26	10.3	4.7	2.9	46	51	49	48
Cheongcho*	청초호	42,020	53	7.6	3.7	1.4	59	46	42	27
Seonam	선암호	279	36	8.9	4.3	3.0	52	49	47	49
Paldang	팔당호	221	32	13.7	4.0	2.4	50	56	45	42
Yongam	영암호	1,448	34	7.9	5.6	3.2	51	47	54	51
Cheonjin	천진호	177	22	14.5	6.2	4.1	42	57	57	57
Boseong	보성호	134	32	19.2	4.4	2.4	50	62	47	43
Hoeya	회야호	325	36	13.7	5.4	2.8	52	56	53	47
Bomun	보문호	164	31	17.0	6.0	2.9	49	60	56	48
Songji*	송지호	15,342	39	9.9	7.0	1.4	54	51	60	27
Woncheon	원천지	417	50	15.4	5.0	3.7	58	58	51	55
Gwanggyo	광교지	155	54	12.8	5.9	3.6	60	55	56	54
Bongpo	봉포호	224	36	19.0	6.8	5.4	52	62	60	65
Idong	이동지	284	70	10.9	6.4	4.4	65	52	58	59
Geumho	금호호	3,128	42	19.1	6.9	4.1	55	62	60	57
Gosam	고삼지	196	63	14.3	7.0	4.7	63	57	60	61
Hwajinpo*	화진포호	18,952	56	15.7	7.9	1.4	60	58	64	28
Gyongpo*	경포호	34,061	84	19.2	5.5	1.4	68	62	53	28
Yongsan	영산호	685	64	19.6	6.7	3.8	63	62	59	55
Nakdong	낙동강하구	407	89	24.5	5.2	3.3	69	66	52	51
Maeho*	매호	9,973	60	21.9	7.5	1.9	62	64	62	36
Hyangho*	향호	9,575	77	19.9	8.6	2.1	66	62	66	39
Junam	주남저수지	239	61	31.4	9.1	6.6	62	70	68	71
Yedang	예당지	252	70	39.6	7.5	4.5	65	74	62	60
Geumgang	금강하구	346	74	40.3	8.0	4.5	66	74	64	60
Daeho*	대호	2,605	79	32.4	10.2	4.5	67	70	71	60
Singal	신갈지	578	123	34.0	9.9	6.2	75	71	70	69
Bunam*	부남호	4,666	75	41.7	13.2	3.4	66	75	78	52
Asan*	아산호*	861	116	56.8	10.5	5.0	74	80	72	63
Namyang	남양호	1,082	135	43.3	11.7	7.2	77	75	74	73
Seoho	서호	524	116	65.9	11.1	7.3	74	82	73	74
Sapgyo	삼교호	639	162	72.8	10.9	6.1	80	84	73	68
Ganwol*	간월호	2,388	189	58.6	13.7	5.3	83	80	79	64
Gwangpo*	광포호	4,682	195	96.0	11.3	3.8	84	89	74	55

* Ratio of COD/TOC > 2 and EC > 700 μS cm⁻¹