

ORIGINAL ARTICLE

대청호 수질오염 평가를 위한 부영양도 지수산정, 공간적 구배 특성 및 경험적 모델

권혁현 · 안광국*

충남대학교 생명시스템과학대학 생명과학과

Trophic State Index (TSI), Spatial Gradient Characteristics and the Empirical Models for Eutrophication Evaluations in Daecheong Reservoir

Hyuk-Hyun Kwon, Kwang-Guk An*

Department of Biological Sciences, College of Biosciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract

The objectives of this study were to analyze reservoir trophic state, based on Trophic State Index (TSI), spatial variation patterns of three zones (riverine, transition, and lacustrine zone), and empirical models through 20-years long-term data analysis. Trophic variables of TP and CHL-*a* were highest during the summer monsoon, and decreased along the main axis from the riverine to lacustrine zone. In the mean time, TN did not show the trend. Ratios of N:P and Secchi disc transparency (SD) increased from the riverine to lacustrine zone. The analysis of trophic state index (TSI) showed that mean TSI (TP) and TSI (CHL-*a*) were 62 and 57, respectively, and these values were highest in the transition zone during the summer. This zone should be managed well due to highest lake water pollution. The analysis of Trophic State Index Deviation (TSID) showed that algal growth was primarily limited by light penetration, and this was most pronounced in the monsoon season. The analysis of empirical models showed that the value of R^2 , based on CHL-SD model, was 0.30 ($p < 0.0001$) in the transition zone and the R^2 , based on TP-SD model, was 0.41 ($p < 0.0001$) in the transition zone.

Key words : Daecheong Reservoir, Water Quality, TSI, Empirical model

1. 서론

최근 국내·외의 인공호 연구에 따르면, 인공호의 부영양화는 수체의 수리수문학적 특성, 수체의 점오염원 및 비점오염의 분포, 수체 자체의 형태적 특성(Morphometry)

및 수체의 토지이용도(Landuse pattern)등에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 우리나라는 연 총강수량 1,267억 m^3 로 충분한 수자원을 보유하나, 평균 이용량은 약 26%로 이용률이 낮다(Ministry of Construction & Transportation, 2001). 이런 용수 이용률을 높이기 위

Received 1 April, 2014; Revised 6 August, 2014;

Accepted 13 August, 2014

*Corresponding author : Kwang-Guk An, Department of Biological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
Phone: +82-42-821-6408
E-mail: kgan@cnu.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.

해 댐, 하구언 및 최근에는 다양한 보(Weir) 등을 건설하여 정체된 수계인 인공호를 많이 조성하고 있다. 그러나 최근 각종 오염원 증가 및 토지 이용도 증가에 따라 수체는 점차 빠르게 부영양화 되어 수질관리가 절실한 것으로 보고하고 있다(Kim, 2003). 이런 인위적인 과정을 거쳐 건설된 인공호는 1990년대 이후 급격히 부영양화가 진행되고 있는 것으로 보고되고 있고(Park, 2005), 북미 및 유럽의 외국 자연호들과는 형성과정이 근본적으로 다르기 때문에(Thornton, 1990; Wetzel, 1990), 우리나라에서는 인공호의 수질문제에 대한 원인규명 및 효율적 관리를 위한 대책 마련이 시급하다.

우리나라 대형 인공호의 가장 큰 문제점은 부영양화에 의한 수질 악화로써, 이런 물이 주로 음용수/식수로 이용된다는 측면에서 특히 효율적인 수질관리가 요구된다. 특히, 우리나라 대형 인공호의 부영양화는 대부분 점오염원 및 비점오염원으로부터 영양염류의 과다 유입에 의한 것으로 알려져 있으며, 부영양화를 조절하는 주요인자는 총인(TP)으로 보고되고 있다(An과 Park, 2002a; An, 2003). 이화학적 수질특성에 대한 영향 및 호수 유역으로부터의 영양염류 유입은 대부분 문순 장마기에 발생한다. 하절기 집중강우는 유역으로부터의 급격한 유량 증가를 가져오고 수체에 유입, 양적 변화를 가져오는 것으로 보고되고 있다(An 과 Kim, 2003). 하절기 강우로 인하여 비점오염원으로부터 각종 인(P)과 질소(N) 같은 영양염류의 유입이 보고되고 있고(An 과 Shin, 2005), 하절기 용존산소를 조절하는 1차 요인은 하절기 강우의 강도가 원인이라는 보고되고 있다(An, 2000a). 이런 이유로 우리나라 인공호의 수질은 문순장마의 강도가 연강수량 및 유입량의 크기를 조절하며, 이런 특성은 수질에 영향을 미치는 가장 큰 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 또한 여러 연구에 따르면, 호수 형태 특성 역시 수질관리 시 고려되어야 하는 중요한 요인이며, 형태가 길고 좁아 수체의 종적혼합이 제한된 인공호에서는 수온, 전기전도도, 염양염 및 엽록소-a 농도의 상-하류 간 변이가 심하기 때문에 이를 계절특성과 공간특성에 반영하여 영양상태 판정 시기와 지점 등이 적절하게 고려되어야 한다고 제시하고 있다(Lee 등, 2002).

우리나라의 인공호는 공간적 측면에서 나뭇가지의 모양(Dendritic shape)을 하며, 호수의 상류와 댐의 근처인 하류부 사이에 공간적 이질성(Spatial heterogeneity)이

높은 것으로 알려져 있다. 인공호의 공간적 이질성에 대한 연구는 국내 외에서 폭넓게 연구되었고(An, 2000b; An 등, 2001; An과 Park, 2002a; Forsberg과 Ryding, 1980; Nurnberg, 1996; Vollenweider, 1968), 이런 특성들은 대형댐 인공호의 수질변이에 가장 크게 기여하는 것으로 보고되고 있다. 우리나라에서의 인공호 부영양화 판정은 Vollenweider(1968)의 분류기준을 기본으로 하고 있으며, 조류성장의 1차 제한요인 중의 하나인 N:P 비율을 수질기준항목으로 채택하고 있다(Bae 등, 2007). 이중에서도 TP는 영양단계판정 시 1차제한 영양염으로 잘 알려져 있으며, TP와 밀접한 상관관계를 보이는 투명도와 엽록소-a 역시 이용되고 있다(OECD, 1982). 또한, Carlson(1977)은 이러한 세 가지 부영양화 변수를 이용하여 2차적 지수를 이용하는 TSI(Trophic State Index) 지수를 제시하였다. Sakamoto(1966)는 일본의 호수에서 질소와 인의 농도 및 조류의 생산이 양적으로 어떠한 관계가 있는지 해석하기 위해 총인-엽록소 모델(TP - CHL), 투명도-총인 모델(SD - TP), 투명도-엽록소 모델(SD - CHL) 간의 경험적 모델(Empirical model)을 개발하여 영양상태 평가 및 예측에 이용하였으며 이러한 기법을 이용한 지역적인 인공호들의 적용 및 평가가 절실히 요구된다.

본 연구 대상지인 대청호는 저수면적 72.8 km², 저수용량 15억 ton 및 유역면적 4134 km²로서 우리나라 인공호중 3번째로 큰 규모의 호수이다. 1980년 대형댐이 완공되면서 대전광역시 및 청주시의 식수, 생활용수 및 공업용수를 공급하고 있어, 수질관리가 특히 요구되는 호수이다. 대청호의 기존연구에 따르면, 대청호의 조류생장은 다른 수계의 인공호들과 마찬가지로 인(P)이 중요한 핵심 제한요인으로(Kong 등, 2009; Lee과 Lee, 1987; Lee 등, 2006; Lee, 2010) 알려져 있고, 하절기 문순강우의 강도, 빛, pH 역시 조류생장에 주요한 요인인 것으로 나타나 있다(An과 Jones, 2000). 대청호에서는 대형 호수 내 수질의 상-하류간의 공간 이질성 평가(Bae 등, 2007; Lee 등, 2002), 수질 변수에 의거한 경험적 모델(Empirical Model) 평가(An과 Park, 2002a; An 등, 2008) 및 호수 크기에 따른 부영양화 상태 평가(Han 등, 2010) 등 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 여전히 호수내의 부영양화 평가 및 경험적 모델을 이용한 평가 시 형태적 특성(유수대, 전이대, 정수대)을 적용한 평

가는 미미한 실정이다.

본 연구의 목적은 형태적으로 길고 복잡한 대청호의 형태적 특성 (유수대, 전이대, 정수대)을 고려하여 20여년간의 장기적인 이화학적 수질특성에 대한 변화 분석을 통해 부영양화의 연별, 공간별 특성과 부영양화도 지수(Trophic State Index, TSI)를 이용한 영양상태 평가와 변이 분석(TSI Deviation), 부영양화 변수를 이용한 경험적 모델(Empirical model)의 분석을 통해 수질 변수들 간의 상호관계의 이해 및 변화를 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사 지점

본 연구에서는 대청호의 상류역에 위치한 유수대(Riverine zone, R_z), 중류부에 위치한 전이대(Transition zone, T_z), 댐 근처의 정수대(Lacustrine zone, L_z)로 구분하여 수질특성 및 부영양화지수 분석을 실시하였으며, 연구대상 지점은 Fig. 1과 같으며 세부지점은 다음과 같다.

< 대상조사 지점 >

R_z : 충청북도 옥천군 안내면 장계리, 장계교

T_z : 충청북도 보은군 회남면 어성리, 회남교

L_z : 충청북도 청원군 문위면 덕유리

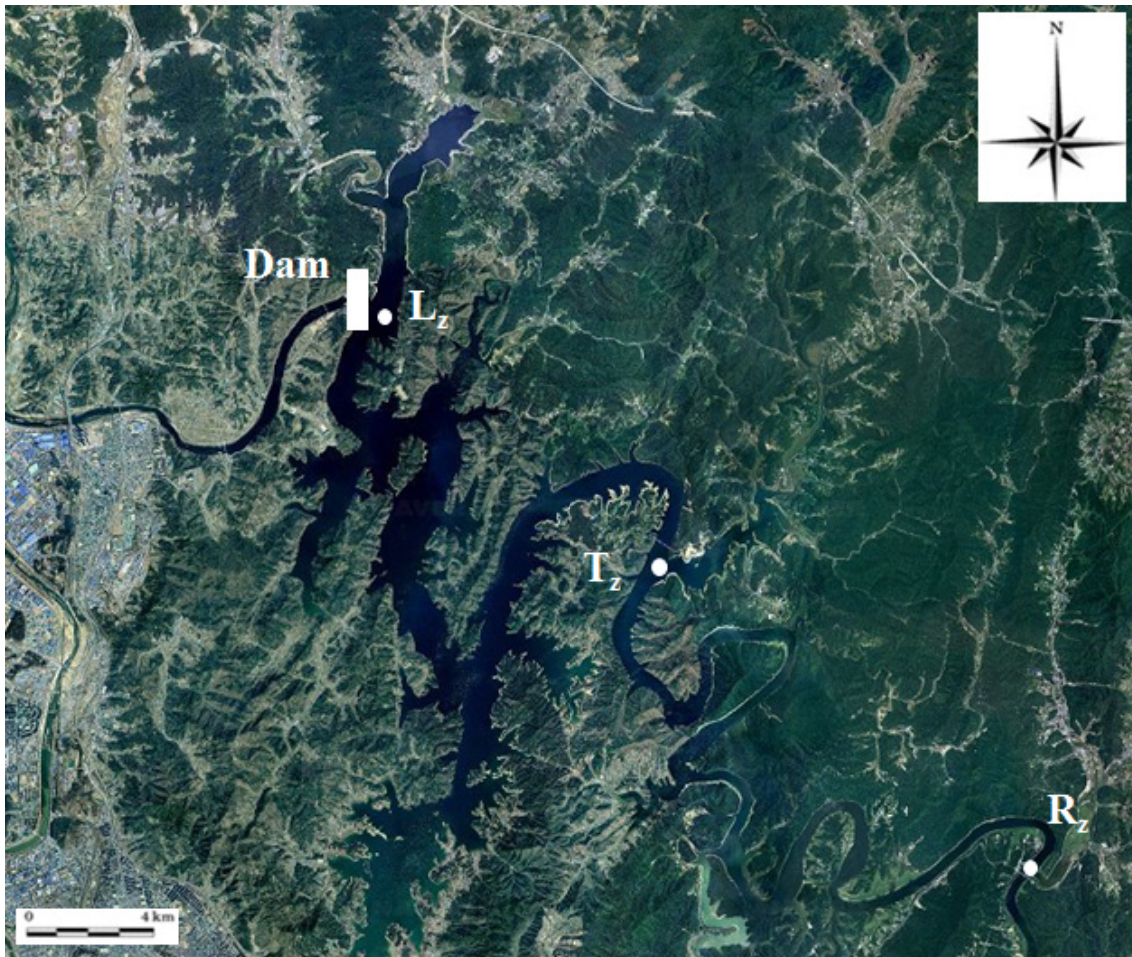


Fig. 1. The map showing sampling sites of three zones Daechong Reservoir.
(R_z : Riverine zone, T_z : Transition zone, L_z : Lacustrine zone).

2.2. 수질 자료 분석

본 연구에 이용된 수질 자료는 지점별로 1993년부터 2012년까지의 20년간 월별로 측정된 환경부 수질측정망자료(<http://water.nier.go.kr>)로서 총질소(TN), 총인(TP), 엽록소-*a*(CHL-*a*) 및 투명도(Secchi depth, SD)를 이용하였다. 강우량 자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 측정된 자료를 이용하였고, 또한 장마에 대한 영향을 파악하기 위하여 1~6월을 장마 전기(Premonsoon, P₁), 7~8월을 장마기(Monsoon, M₀), 9~12월을 장마 후기(Postmonsoon, P₀)으로 구분하여 분석하였다.

2.3. 부영양도 지수 (TSI)에 의거한 영양상태 분석

호소의 부영양도를 평가하기 위하여 Carlson(1977)이 제시한 방법에 기초하여 CHL-*a*, TP 및 투명도(SD) 자료를 유수대, 전이대, 정수대로 구분하여 부영양화 지수(Trophic State Index)로 전환하여 대청호의 영양 상태를 지점별로 평가하였다. TN 자료는 Kratzer과 Brezonik(1981)의 기준에 기초해서 TSI로 전환하였다. 공식은 다음과 같다(An과 Park, 2002b).

$$\begin{aligned} \text{TSI (TP, } \mu\text{g/L)} &= 10 \times \left(6 - \frac{\ln\left(\frac{48}{\text{TP}}\right)}{\ln(2)} \right) \\ \text{TSI (CHL-}a\text{, } \mu\text{g/L)} &= 10 \times \left(6 - (2.04 - 0.68 \times \frac{\ln(\text{CHL}-a)}{\ln(2)}) \right) \\ \text{TSI (SD, m)} &= 10 \times \left(6 - \frac{\ln\left(\frac{\text{SD}}{1}\right)}{\ln(2)} \right) \\ \text{TSI (TN, mg/L)} &= 10 \times \left(6 - \frac{\ln\left(\frac{1.47}{\text{TN}}\right)}{\ln(2)} \right) \end{aligned}$$

2.4. 부영양화 주요변수의 경험적 모델

(Empirical Model)

대청호에서 TN과 TP의 농도, N:P 비율, CHL-*a* 및 SD가 어떠한 관계가 있는지 알아보기 위하여 TN - CHL-*a*, TP - CHL-*a*, N:P 비율 - CHL-*a*, CHL-*a* - SD 및 TP-SD간의 경험적 모델을 분석하였으며, 이를 통해 대청호의 영양상태 평가 및 예측을 실시하였다. 각 변수들을 지점별로 유수대, 전이대, 정수대로 구분한 뒤, Log로 전환하여 Log₁₀(TN), Log₁₀(TP), Log₁₀(N:P 비율),

Log₁₀(CHL-*a*) 및 Log₁₀(SD)을 이용하였으며, Pearson의 회귀분석을 실시하였다. 이를 통하여, 인공호에서 물의 유속 및 특징이 변함에 따라 수질측정 자료 변수에 미치는 영향 및 수질 변수 사이의 관계를 분석하였다. 또한 1차 생산력에 대한 추정을 위하여 변수로서 CHL-*a*을 이용하였으며, CHL-*a*의 성장을 제한하는 제한요인이 빛인지 영양염류인지에 대하여 판단하기 위하여 TSI의 편차 분석(TSI Deviation)을 실시하였다(Havens, 2000). TSI(CHL-*a*)-TSI(SD) 및 TSI(CHL-*a*)-TSI(TP)를 산정하여 제한요인에 대한 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대청호 수계의 강우 및 이화학적 수질 특성

대청호 수계의 강우 분석(1993~2012년)에 따르면, 조사 기간 내 1년간 총 강우량은 1998년에 가장 많은 강우(2070 mm)를 보였고, 2001년에는 가장 적은 강우(828 mm)를 보여 큰 차이를 나타냈다(Fig. 2). 장마기간의 강우량은 전체 강우량에서 차지하는 비율은 기존의 연구(An 등, 2001)에서 나타난 것과 마찬가지로 평균 46%, 최대 70%까지 나타났다. 조사 시기에 강우 특성을 보면, 여름철 장마기에 강우가 집중되는 동아시아 몬순 기후의 특성이 잘 드러났다. 우리나라의 강우 양상은 계절적으로 뚜렷한 특성을 보이며, 또한 영양염류 증가 및 감소, 조류증식으로 인한 녹조 현상, 부영양화 현상 및 1차 생산력의 변화를 야기할 것으로 사료된다(An, 2000a; An, 2003). 20년간의 장기간 이화학적 수질변화 분석에 따르면, 수질은 하절기에 변이가 가장 크게 나타났다. 이는 여름철 강우량의 급격한 증가가 원인으로 사료된다. 수질변수 중 총질소(TN)의 평균 농도는 유수대 1.7 mg/L, 전이대 1.7 mg/L, 정수대 1.5 mg/L로 나타났고 특히 정수대에서 변이가 가장 적게 나타났다. 월 평균 변화가 세 지점에서 모두 크지 않은 것으로 나타나 강우의 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

부영양화 변수 중 가장 중요한 제한 영양염류로 알려진 총인(TP)의 평균 농도는 유수대 33.1 μg/L, 전이대 27.1 μg/L, 정수대에서 20.2 μg/L로 나타나 부영양 및 중영양 상태로 나타났으며(기준: Fosberg과 Ryding, 1980), 하류로 갈수록 농도는 감소하는 경향을 나타냈다. 강우가 집중되는 장마기에 유수대의 TP는 최대 5.5배 증

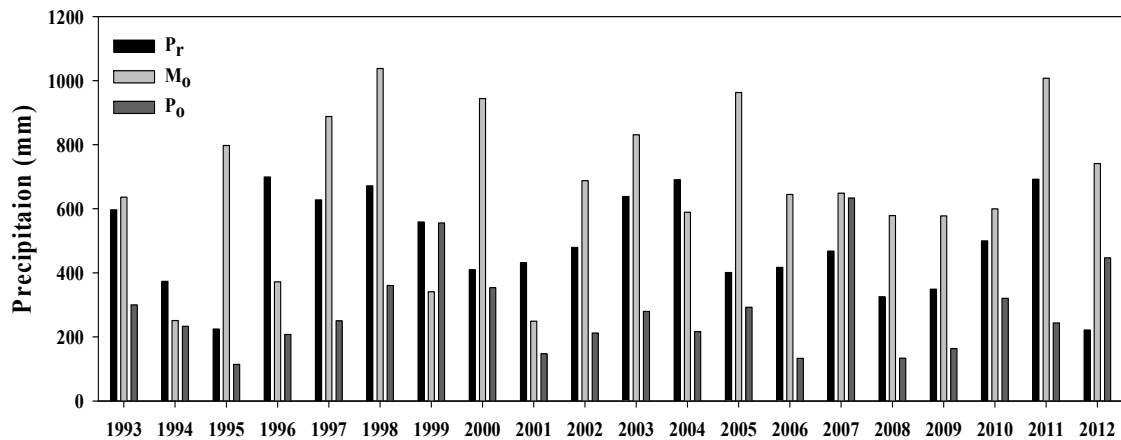


Fig. 2. Inter-annual patterns of precipitation (mm) in the premonsoon (P_r), monsoon (M_o) and postmonsoon (P_o) seasons during 1993 - 2012.

가하여 급격히 증가하는 것으로 나타났는데, TP의 농도는 여름장마의 강도에 의해 결정된다는 이전의 연구(An, 2000b)와 일치하였다. 유수대에서는 강우로 인한 토사 유출 등으로 인하여 외부에서 유기물 등이 공급되지만, 댐 근처인 정수대에서는 물의 유속이 감소하여 수체류시간(WRT)이 증가하고 물의 양이 증가한다. 따라서 이에 따른 희석 효과 및 입자성 인의 침강(Kennedy 등, 1981) 등으로 인하여 감소하는 것으로 사료된다. 1997년과 2011년에 나타난 유수대에서의 TP의 급격한 증가는 장마로 인한 많은 양의 강우가 원인으로 사료되며, 이후 전이대로 흘러들어가면서 희석된 것으로 사료된다.

부영양화 및 1차생산력의 중요지표인 N:P 비율은 장마기인 하절기에 최저로 감소하는 경향을 보였다. N:P 비율은 유수대 80.1, 전이대 94.5, 정수대 115.6로 나타나 정수대에서 최고치를 보였다. N:P 비율은 수질의 영양 상태와 밀접한 관련성이 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 담수에서는 인의 용해도가 낮아 대부분의 경우, 인이 수중생물의 성장에 제한영양소가 되고 인의 농도가 증가하여 충분할 경우 질소가 제한 영양소가 되는 것으로 알려져 있다. 수질을 평가 할 때, 호소의 TP, TN의 경우, TP에 대한 TN의 농도 비율이 7 미만일 경우에는 TP의 기준은 적용하지 아니하며, 그 비율이 16 이상일 경우에는 TN의 기준을 적용하지 않는다(Grim과 Fisher, 1986). Harper(1995)의 P-limitation 기준 16 및

Fosberg와 Ryding(1980)의 기준인 16 역시 상회하였다. 대청호에서 N:P 비율은 16 이상이므로 인 제한(P-limitation) 상태인 것으로 판단된다.

호소 내 1차생산력을 의미하는 변수인 CHL-*a* (Kimmel과 Groeger, 1984)의 평균 농도는 유수대 11.0 $\mu\text{g/L}$, 전이대 8.3 $\mu\text{g/L}$, 정수대 5.3 $\mu\text{g/L}$ 을 보여 TP와 마찬가지로 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, Fosberg과 Ryding(1980)의 기준에 의거하면, 유수대와 전이대는 부영양 상태, 정수대는 중영양 상태로 나타났다. 2001년 전이대에서의 CHL-*a*의 가장 급격한 증가를 보였는데, 이는 조사 기간 중 장마기간 강우가 가장 적었던 해로, 맑고 화창한 날이 많아 CHL-*a*가 성장하기에 빛이 충분하였고, 2001년 초 TP의 증가로 인하여 생장에 필요한 영양염류가 충분히 공급되어 CHL-*a*의 생장이 촉진되었을 것으로 사료된다. 하절기 동안 전이대의 CHL-*a*이 급격히 증가한 것을 볼 수 있다. 하절기 20년 동안 평균 농도는 유수대 13.4 $\mu\text{g/L}$, 전이대 15.6 $\mu\text{g/L}$, 정수대 6.4 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다. 대청호의 수질 자료를 살펴보면, CHL-*a*의 생장에 유수대에서는 빛이 제한요인으로 작용하였고, 정수대에서는 영양염류의 결핍이 제한요인으로 작용한 것으로 사료된다. 전이대에서 가장 높은 CHL-*a*의 생장이 나타난 것은 적당한 빛과 영양분 공급이 이루어졌음을 시사한다. 본 연구 결과, 전이대에서 1차 생산력이 가장 높아진다는 Kimmel과 Groeger

(1984)의 기존의 연구결과와 일치하였다.

수체내의 광 투과도의 중요한 지표인 투명도(Secchi disk depth)는 대청호에서 CHL-*a*가 증가하면서 뚜렷하게 감소하였다. 대청호에서는 정수대가 유수대보다 투명도가 높은 것으로 나타났고, 강우량이 많은 장마기에 투명도가 감소하였다. CHL-*a*가 증가하면 물이 혼탁하게 되며, 일반적으로 투명도 1.5 ~ 2.0 m를 부영양호의 경계로 본다(Park과 An, 2007). 조사 결과, 유수대는 1.9 m, 전이대 2.8 m, 정수대는 3.4 m의 평균 투명도를 보여 부영양 상태는 아닌 것으로 판단된다. 투명도의 감소는 1차 생산자인 조류에 광제한 효과를 가져와(Dodds 등, 1998) 1차 생산력이 감소할 것으로 추론되나, 장마기의 총인 농도의 증가의 영향으로 CHL-*a*의 농도는 증가하여 이전의 연구(Bae 등, 2007; Park 과 An, 2007)와 일치하였다. 이를 통해 TP가 하천 생태계의 1차생산력에 가장 큰 제한 요인으로 작용할 수 있다고 사료된다(Fig. 3; Fig. 4).

3.2. 부영양화 지수 (TSI)에依거한 영양상태 분석

부영양화 지수를 이용한 호소의 부영양화 평가는 TSI < 20 : 극빈영양, 30 ~ 40 : 빈영양, 45 ~ 50 : 중영양, 53 ~ 60 : 부영양, > 70 : 과영양 상태로 호소의 영양 상태를 나타낼 수 있다(Kratzer 과 Brezonik, 1981). 호수의 구간별 부영양화 지수인 TSI 지표 분석에 따르면, TSI(TP)는 하절기 평균 유수대에서 61, 전이대 58, 정수대 49로 나타났다. 유수대가 정수대보다 높게 나타나 장마기의 다량의 강우에 의한 외부 유입이 가장 큰 영향을 준 것으로 사료된다. 하절기에는 정수대를 제외한 유수대, 전이대에서 부영양 상태로 나타나 하절기에 부영양화가 가장 심한 것으로 나타났다. 유수대와 전이대의 부영양화 지수는 9월과 비교해 10월에 감소하는 것으로 나타났지만, 정수대는 9월에 비해 오히려 증가한 것으로 나타났고 가장 높은 부영양화 지수를 나타냈다. 정수대는 일반적으로 영양염이 제한요인으로 작용하며, 수층이 혼합되는 시기는 내부부하에 의한 부영양화가 발생한다고 한다(Kennedy과 Nix, 1987). 따라서 대청호의 정수대의 10월, 11월의 부영양화는 유수대로부터의 TP 유입 및 내부부하(Internal loading)의 영향으로 사료된다.

부영양화 지수 중 조류량을 직접적으로 표현하여 호소의 영양상태를 평가할 때 최적의 변수인 TSI(CHL-*a*)

은 TSI(TP)와 전반적으로 유사한 경향을 보였으나, 8, 9월에는 전이대의 부영양화 지수가 57로 나타나 유수대의 54보다 부영양화 지수가 높게 나타났다. 이러한 양상은 Kimmel과 Groeger(1984)의 가설과 일치하는 결과로서, 상류 보다 유속이 느려 조류의 생장이 원활해지고, 장마기에 외부로부터 다량의 영양염류가 유수대로 유입되어 전이대에 충분한 영양염류를 공급하고, 전이대에 적절한 광투과 현상으로 인하여 장마기 이후 조류 생장이 증가한 것으로 사료된다. 또한 각 지점의 최고치는 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는 특성을 보여 이전의 연구결과(Thornton 등, 1981; An, 2000b)와 일치하였다. 투명도에 의한 부영양화 지수인 TSI(SD)는 유수대 52, 전이대 47, 정수대 44로 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다. 유수대에서 장마기인 7월에 62로 가장 높은 부영양화 상태를 나타냈다. 장마기 강우로 주변의 토사 유입 및 영양염류의 유입이 원인으로 사료된다. 대청호의 TSI(TN)은 거의 모든 시기에 부영양 상태로 나타났는데, 시기별, 지점별 변이가 크지 않아 이는 수질 관리할 때 무시될 수 있음을 시사한다(Fig. 5).

부영양도 지수 변이분석법(TSI Deviation; Carlson, 1991)을 대청호에서 유수대, 전이대, 정수대에서 장마전기, 장마기, 장마후기로 구분하여 분석하였다. 유수대에서 조류생장에 TP와 빛이 가장 큰 제한 요인인 것으로 사료된다. 특히, 장마기에 인보다는 빛이 가장 큰 제한요인으로 나타났다. 많은 양의 강우로 인해 외부에서 유입되는 영양염류 및 토사로 조류 성장에 필요한 인의 공급은 충분하였지만 흐린 날씨로 인해 빛이 부족하여 가장 큰 제한 요인으로 나타난 것으로 사료된다. 전이대에서는 조류생장에 인이 가장 큰 제한 요인으로 나타났다(Fig. 6). 유수대에 비해 느려진 유속으로, 물의 양의 증가로 인한 희석효과 및 입자성 인의 침강(Kennedy 등, 1981)으로 인하여 인의 감소가 조류 성장에 영향을 주는 것으로 사료된다.

3.3. 인공호의 경험적 모델 (Empirical Model) 분석

CHL-*a* 농도는 일반적으로 부영양화의 정도와 관련되어있고 CHL-*a*는 수질을 악화 시키는 수화현상의 좋은 지표이다. 온대, 아열대 호소의 앞선 연구에서 여름철 CHL-*a*에 대한 TP의 영향을 설명해 주었다(Canfield과

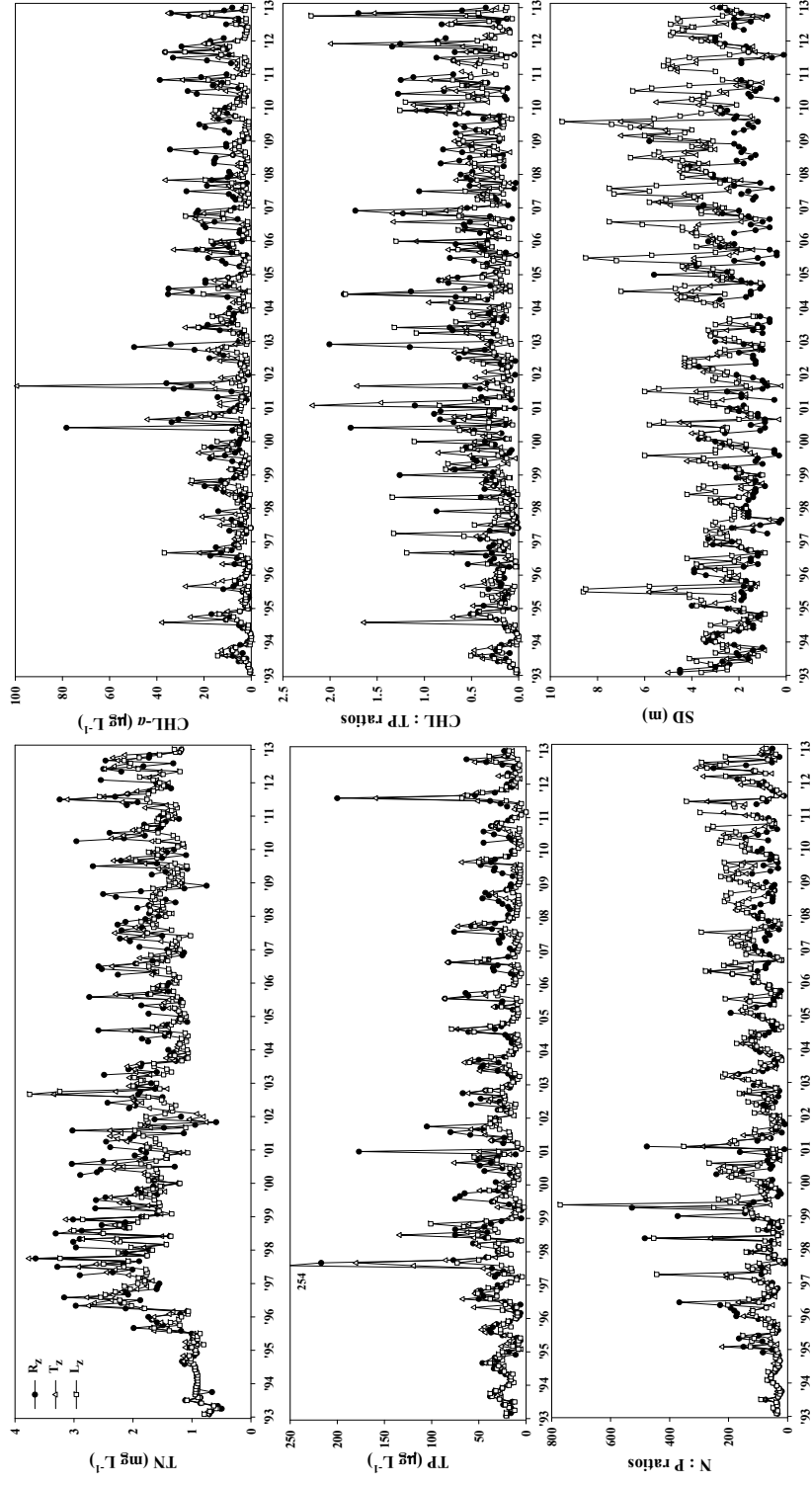


Fig. 3. Long-term annual variations of water quality (TN, TP, N:P ratios, CHL- α , CHL- α :TP ratios and Secchi disk transparency(SD)) in the three zones (Rz: Riverine zone, Tz: Transition zone, Lz: Lacustrine zone) during 1993 - 2012.

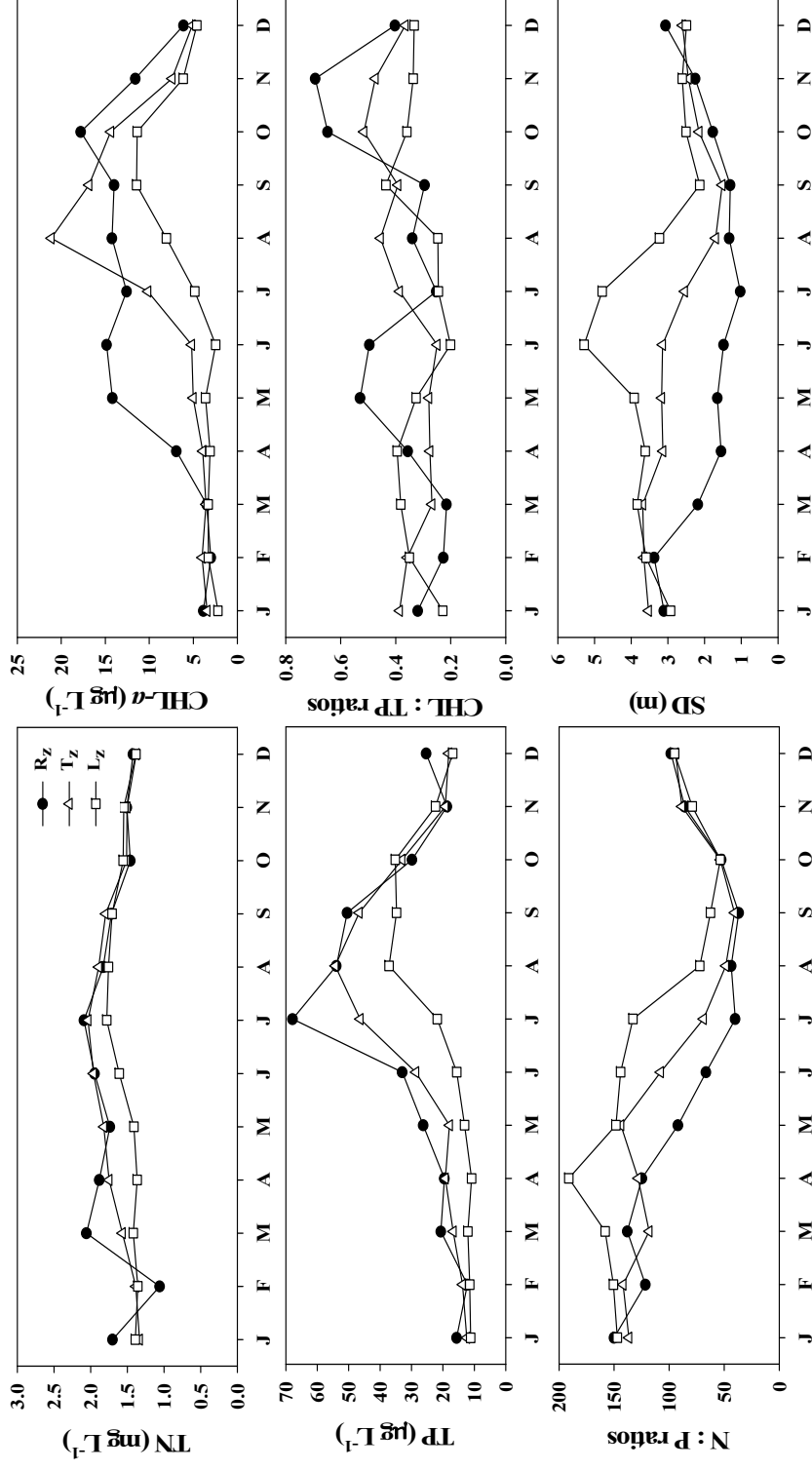


Fig. 4. Seasonal variations of TN, TP, N:P ratios, CHL-a, CHL-a:TP ratios and Secchi disk transparency (SD) in the three zones (Rz: Riverine zone, Tz: Transition zone, Lz: Lacustrine zone).

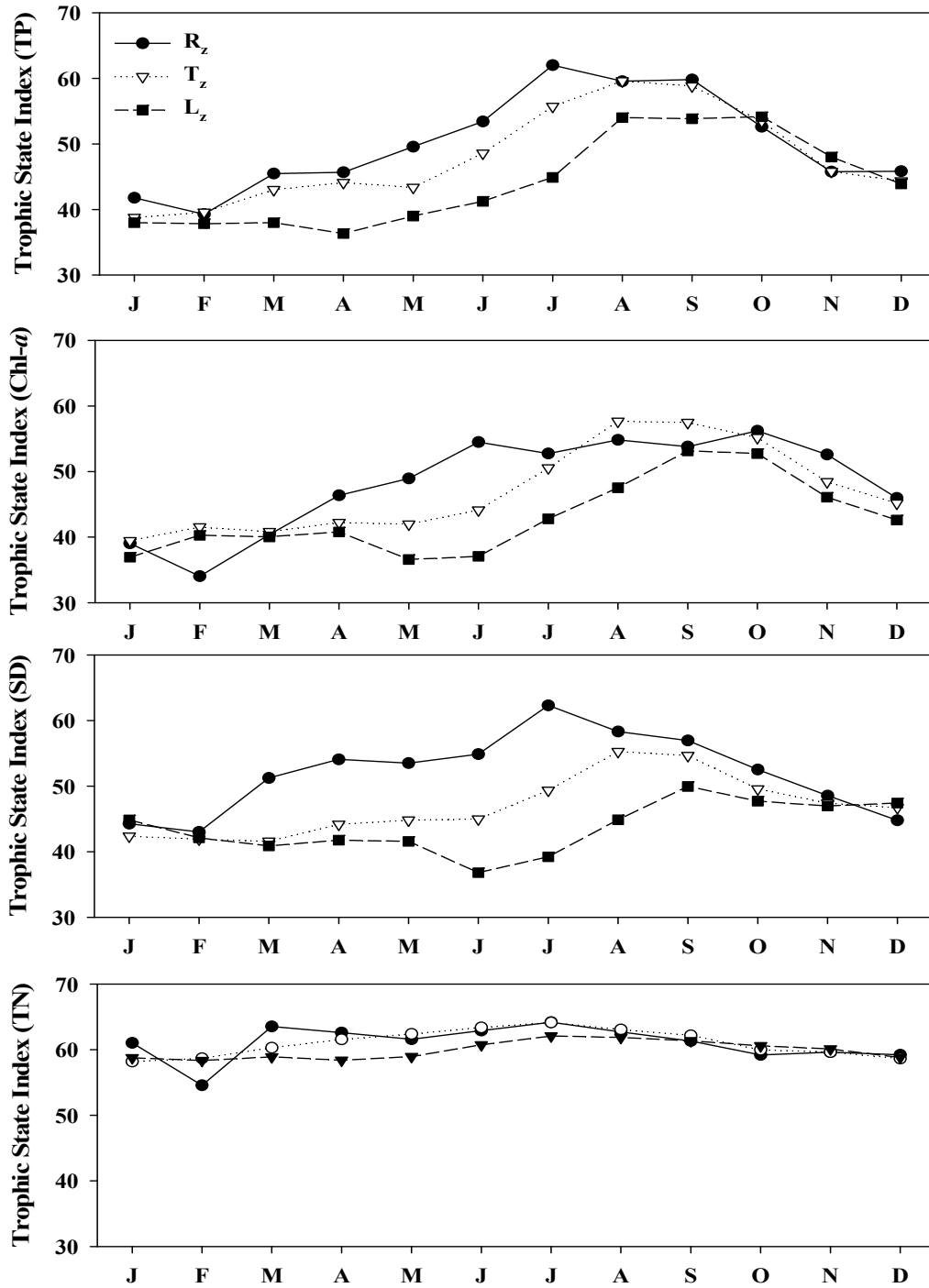


Fig. 5. Seasonal patterns of Trophic State Index (TSI) based on TP, CHL-a, SD and TN on three zones (R_z: Riverine zone, T_z: Transition zone, L_z: Lacustrine zone).

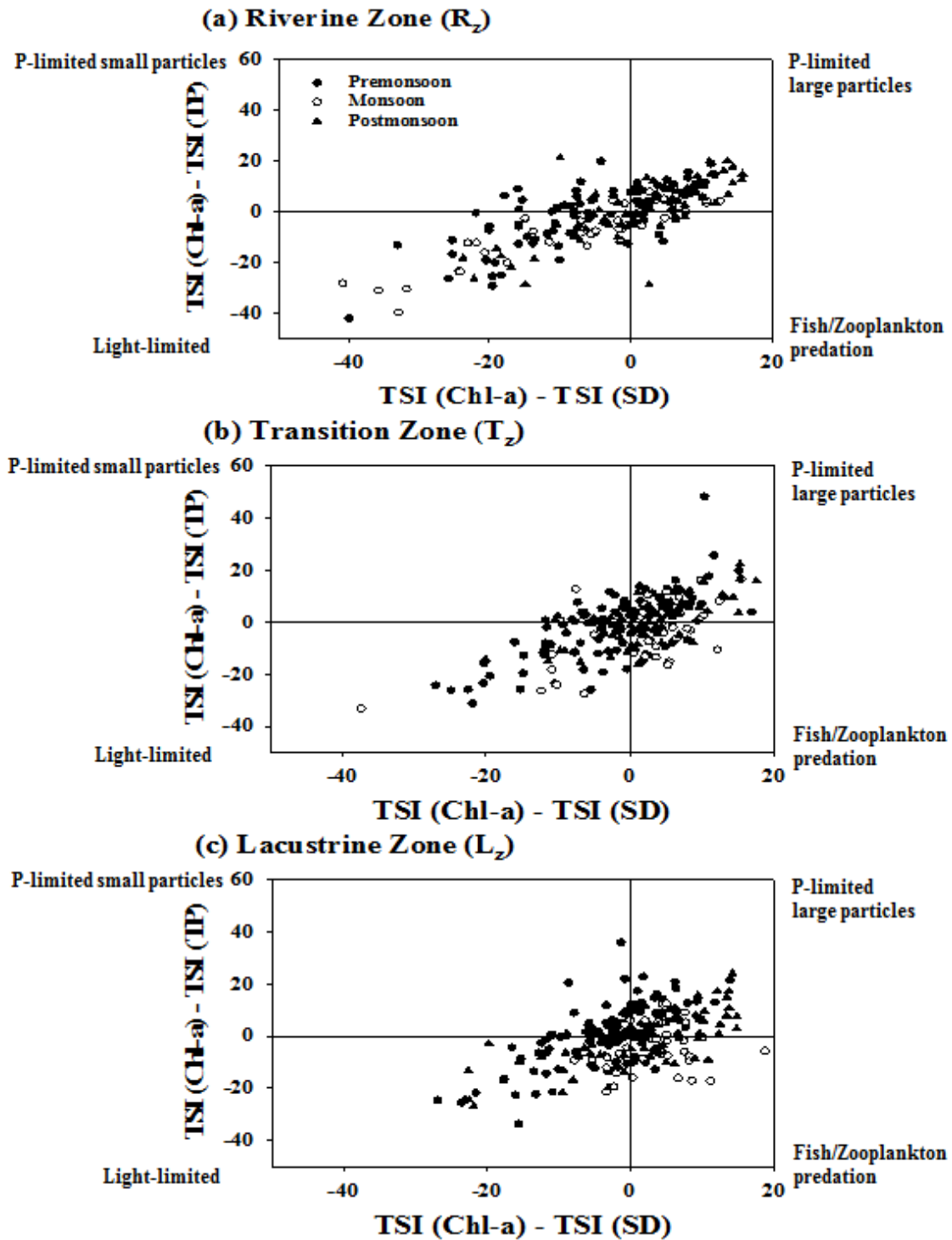


Fig. 6. Trophic State Index Deviations (TSID) in the three zones (R_z : Riverine zone, T_z : Transition zone, L_z : Lacustrine zone).

Bachmann, 1981; Dillon과 Rigler, 1974; Forsberg과 Ryding, 1980; Nurnberg, 1996). 수질 변수 간의 상관관계를 알아보기 위하여 회귀 분석을 유수대, 전이대, 정수대로 구분하여 실시하였다. TN과 CHL-*a*는 상관관계를 거의 나타내지 않았다. 이는 대청호에서 TN의 농도는 충분하여 CHL-*a*에 큰 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. TP - CHL-*a* 모델에 따르면 전이대에서 19%($R^2=0.19$, $p < 0.0001$) 설명하는 것으로 나타나 유수대, 정수대보다 상대적으로 높은 설명력을 가지는 것으로 나타났으며, TN - CHL-*a* 모델과 비교하여 상대적으로 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다. 하지만, 대청호에서 TP - CHL-*a* 모델은 62%의 상관성을 나타낸다는 An 등(2008)의 결과와 비교해보면 상관성이 낮게 분석되었다. CHL-*a* - SD 모델에 따르면 SD의 변이는 CHL-*a*에 의해 전이대에서 30%($R^2=0.30$, $p < 0.0001$)의 설명되는 것으로 나타났으며, TP - SD 모델에 따르면 TP 변이에 따라 SD의 변화가 전이대에서 41%($R^2=0.41$, $p < 0.0001$), 유수대에서 39%($R^2=0.39$, $p < 0.0001$)의 높은 설명력을 보여 TP와 CHL-*a*의 증가가 SD의 감소에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(Table 1). 그 영향은

전이대에서 가장 높게 나타났다. 유수대에서는 빠른 유속으로 인해 많은 영양염류가 공급됨에도 CHL-*a* 및 투명도에 큰 영향을 주지 못하고, 전이대에서는 유수대에 비해 상대적으로 감소된 유속으로 인하여 TP와 CHL-*a*가 증가하고 투명도의 감소에 영향을 주는 것으로 사료된다.

대청호의 경험적 모델 분석에 따르면, Vollenweider과 Kerekes(1980)의 이전의 연구모델과 마찬가지로 호소 속 인(P)은 조류 현존량을 설명하는데 가장 주요한 인자이고, 조류의 농도는 투명도의 크기에 의해 조절된다는 것을 입증하였다. 이런 경험적 모델은 대청호 및 다른 인공호의 향후 수질 관리, 수환경 이용 및 부영양화 현상 조절에 활용될 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 대전광역시, 청주시 등의 식수와 생활용수 등을 공급하는 대청호의 20년간 장기간 수질 분석에 대한 연구로서 부영양화 지수(TSI)를 이용하여 영양상태를 평가하였고, 공간적 특성 분석을 위해 3개의 구역(유

Table 1. Empirical models and equations of in the trophic variables (TN, TP, CHL-*a* N:P ratios and SD) in three zones (R_z = Riverine zone, T_z = Transition zone, L_z = Lacustrine zone), the dataset used here were based on the period of 1993 - 2012

Empirical models		Equations	Regression coefficient (R^2)	p -values
TN vs. CHL- <i>a</i>	R_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = 0.70\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.70$	0.06	0.0002
	T_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = 0.77\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.58$	0.06	<0.0001
	L_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = 0.78\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.42$	0.06	0.0001
TP vs. CHL- <i>a</i>	R_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = 0.53\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.10$	0.11	<0.0001
	T_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = 0.60\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.06$	0.19	<0.0001
	L_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = 0.54\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.09$	0.16	<0.0001
N:P ratios vs. CHL- <i>a</i>	R_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = -0.30\text{Log}_{10}(\text{N:P ratios})+1.39$	0.03	0.0050
	T_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = -0.46\text{Log}_{10}(\text{N:P ratios})+1.60$	0.10	<0.0001
	L_z	$\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a) = -0.40\text{Log}_{10}(\text{N:P ratios})+1.33$	0.09	<0.0001
CHL- <i>a</i> vs. SD	R_z	$\text{Log}_{10}(\text{SD}) = -0.22\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a)+0.35$	0.21	<0.0001
	T_z	$\text{Log}_{10}(\text{SD}) = -0.27\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a)+0.51$	0.30	<0.0001
	L_z	$\text{Log}_{10}(\text{SD}) = -0.21\text{Log}_{10}(\text{CHL-}a)+0.54$	0.22	<0.0001
TP vs. SD	R_z	$\text{Log}_{10}(\text{SD}) = -0.53\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.97$	0.39	<0.0001
	T_z	$\text{Log}_{10}(\text{SD}) = -0.47\text{Log}_{10}(\text{TP})+1.01$	0.41	<0.0001
	L_z	$\text{Log}_{10}(\text{SD}) = -0.31\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.86$	0.22	<0.0001

수대, 전이대, 정수대)에 대해 변이 및 경험적 모델을 분석하였다. 총인(TP)과 엽록소(CHL-*a*) 농도는 하절기 증가하는 경향을 보였으며, 유수대에서 정수대로 갈수록 감소하였다. 반면, 총질소(TN)는 공간적 변이가 크지 않았고 수체의 N:P 비율과 투명도(SD)는 유수대에서 정수대로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 부영양화 지수인 TSI(TP)를 이용한 영양상태 평가에 의하면 하절기 최대 62로 모든 지점에서 부영양 상태로 나타났고, TSI(CHL-*a*)는 하절기 전이대에서 57로 가장 높은 부영양 상태를 보여 호수 수질오염에 대한 중요한 관리대상 지역으로 평가되었다. 부영양화 지수 변이 분석법(TSI Deviation)에 의하면 유수대에서는 광투과 요인이 큰 조류생장에 제한 요인이었고, 특히 장마기에 가장 심화되었다. 부영양화 경험적 회귀모델분석에 따르면, CHL-*a*-SD모델은 전이대에서 $R^2 = 0.30$ ($p < 0.0001$)을 보였고, TP-SD모델은 $R^2 = 0.41$ ($p < 0.0001$)로 나타나 향후 유역으로부터 유입되는 인 부하(P-loading)를 줄여야 호수의 수질 회복에 기여할 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 대전녹색환경지원센터의 2009년도 연구개발 사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- An, K.G., 2000a, Dynamic change of dissolved oxygen during summer monsoon, *Korean J. Limnol.*, 33(3), 213-221.
- An, K.G., Jones, J.R., 2000, Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon, *Hydrobiologia*, 432, 37-48.
- An, K.G., 2000b, Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus, *Korean J. Limnol.*, 33, 222-229.
- An, K.G., Seo, J.W., Park, S.S., 2001, Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung reservoir, *Korean J. Limnol.*, 34, 327-336.
- An, K.G., Park, S.S., 2002a, Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study, *Ecol. Model.*, 152, 191-203.
- An, K.G., Park, S.S., 2002b, Influence of seasonal monsoon on the trophic state deviation in an Asian reservoir, *Water Air Soil Poll.*, 145, 267-287.
- An, K.G., Kim, D.S., 2003, Response of reservoir water quality to nutrient inputs from streams and in-lake fishfarms, *Water Air Soil Poll.*, 149, 27-49.
- An, K.G., 2003, Spatial and temporal variabilities of nutrient limitation based on in situ experiments of nutrient enrichment bioassay, *J. Environ. Sci. Heal. A*, 38, 687-882.
- 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(1), 54-62.
- An, K.G., Kim, J.K., Lee, S.J., 2008, Reservoir trophic state and empirical model analysis, based on nutrients, transparency, and chlorophyll-a along with their relations among the parameters, *Korean J. Environ. Biol.*, 26(3), 252-263.
- Bae, D.Y., Yang, E.C., Jung, S.H., Lee, J.H., An, K.G., 2007, Nutrients and chlorophyll dynamics along the longitudinal gradients of Daechung reservoir, *Korean J. Limnol.*, 40(2), 285-293.
- Canfield, D.J., Bachmann, R.W., 1981, Prediction of total phosphorus concentration, chlorophyll-a and secchi depths in natural and artificial lakes, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38, 414-423.
- Carlson, R.E., 1977, A trophic state index for lake, *Limnol. Oceanogr.*, 22, 361-369.
- Carlson, R.E., 1991, Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs, *Enhancing the States's Lake management Programs*, 59-71.
- Dillon, P.J., Rigler, F.H., 1974, The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 19, 767-781.
- Dodds, W.K., Jones, J.R., Welch, E.B., 1998, Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen and phosphorus, *Water Resources*, 32(5), 1455-1462.
- Forsberg, C., Ryding, S.O., 1980, Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, *Arch. Hydrobiol.*, 89, 189-207.

- Grim, N.B., Fisher, S.G., 1986, Nitrogen limitation in a Sonoran desert stream, *J. N. Benthol. Soc.*, 5, 2-15.
- 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(2), 319-337.
- Havens, K.E., 1994, Seasonal and spatial variation in nutrient limitation in a shallow sub-tropical lake (lake Okeechobee, FL) as evidenced by trophic state index deviations, *Arch. Hydrobiol.*, 131, 39-53.
- Havens, K.E., 2000, Using Trophic State Index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data, *Korean J. Limnol.*, 33(3), 187-196.
- Kennedy, R.H., Thornton, K.W., Carroll, J.H., 1981, Suspended sediment gradients in Lake Red Rock, American Society of Civil Engineers, New York, 1318-1328.
- Kennedy, R.H., Nix, J., 1987, Proceedings of the DeGray Lake Symposium, Technical Report, E-87-4.
- Kim, J.Y., 2003, The evaluation of the eutrophication for the lakes by phosphorus loading, *J. Environ. Sci. Int.*, 12(7), 689-695.
- Kimmel, B.L., Groeger, A.W., 1984, Factors controlling phytoplankton production in lake and reservoirs, U.S. EPA 440/5/84-001 277-281.
- Kong, K.H., Lee, J.H., An, K.G., 2009, The analysis of water quality and suspended solids effects against transparency of major artificial reservoirs in Korea, *Korean J. Limnol.*, 42(2), 221-231.
- Kratzer, C.R., Brezonik, P.L., 1981, A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes, *J. Am. Water Resour. As.*, 17, 713-715.
- Lee, H.J., Lee, H.K., 1987, A study on simple phosphorus budget model for Dae Chung Reservoir, *J. Kor. Wat. Pollut. Res. Contr.*, 3, 17-29.
- 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(1), 36-44.
- Lee, J.W., Kim, J.Y., Hyun, K.S., 2010, Characteristics and correlation of influence factors for eutrophication in Daecheong Lake, *Jour. KWSWST*, 18(4), 39-46.
- Lee, S.H., Sin, Y.S., Jang, N.I., Kim, J.M., Kim, H.K., Cho, Y.G., Jeong, J., 2006, Trophic state and water quality in major lakes of the sumjin and Youngsan River system, *Korean J. Limnol.*, 39(3), 296-309.
- Ministry of Construction & Transportation, 2001, National Water Resources Plan Update, 64-65.
- Nurnberg, G.K., 1996, Trophic state of clear and colored, soft- and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish, *Lake and Reservoir Management*, 12, 432-447.
- OECD, 1982, Eutrophication of waters: monitoring assessment and control OECD, Paris, 154pp.
- Park, H.J., An, K.G., 2007, Trophic State Index (TSI) and empirical models, based on water quality parameters, in Korean reservoir, *Korean J. Limnol.*, 40(1), 14-30.
- Park, J.G., 2005, Water environmental factors and trophic states in lake Daecheong, *Korean J. Limnol.*, 38(3), 382-392.
- Sakamoto, M., 1966, Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth, *Arch. Hydrobiol.*, 62, 1-28.
- Thornton, K.W., 1990, Perspectives on reservoir limnology, *Reservoir Limnology: ecological perspectives*, 1-13.
- Thornton, K.W., Kennedy, R.H., Carroll, J.H., Walker, W.W., Gunkel, R.C., Ashby, S., 1981, Reservoir sedimentation and water quality-an heuristic model, American Society of Civil Engineers, New York, 654-661.
- Vollenweider, R.A., 1968, The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, DAS/CSI/68, 27, 1-182.
- Vollenweider, R.A., Kerekes, J., 1980, Loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication, *Progress in Water Technology*, 12, 5-38.
- Wetzel, R.G., 1990, Reservoir ecosystems: conclusions and speculations, In: *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*, John Wiley & Sons, New work, 227-238.