

ORIGINAL ARTICLE

## 계절적 몬순에 의한 댐 인공호 및 농업용 저수지에서의 영양상태지수(TSI), 경험적 수질 모델 및 어류 트로픽 구조

윤영진 · 한정호 · 안광국\*

충남대학교 생명시스템과학대학 생명과학과

### Influence of Seasonal Monsoon on Trophic State Index (TSI), Empirical Water Quality Model, and Fish Trophic Structures in Dam and Agricultural Reservoirs

Young-Jin Yun, Jeong-Ho Han, Kwang-Guk An\*

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

#### Abstract

The key objective of this study was to evaluate trophic state and empirical water quality models along with analysis of fish trophic guilds in relation to water chemistry (N, P). Trophic state index (TSI), based on total phosphorus (TP) and chlorophyll-a (CHL), ranged between oligotrophic and hypereutrophic state, by the criteria of Nürnberg(1996), and was lower than the trophic state of total nitrogen (TN). Trophic relations of Secchi depth (SD), TN, TP, and CHL were compared using an empirical models of premonsoon (Pr), monsoon (Mo), and postmonsoon (Po). The model analysis indicated that the variation in water transparency of Secchi depth (SD) was largely accounted ( $p < 0.001$ , range of  $R^2$ : 0.76 - 0.80) by TP during the seasons of Mo and Po and that the variation of CHL was accounted ( $p < 0.001$ ,  $R^2$  = 0.70) up to 70% by TP during the Po season. The eutrophication tendency, based on the  $TSI_{TP}$  vs.  $TSI_{N:P}$  were predictable ( $R^2$  ranged 0.85 - 0.90,  $p < 0.001$ ), slope and y intercept indicated low seasonal variability. In the mean time,  $TSI_{N:P}$  vs.  $TSI_{CHL}$  had a monsoon seasonality in relation to values of  $TSI_{N:P}$  during the monsoon season due to a dilution of reservoir waters by strong monsoon rainfall. Trophic compositions of reservoir fish reflected ambient contents of TN, TP, and CHL in the reservoir waters. Thus, the proportions of omnivore fish increased with greater trophic conditions of TP, TN and CHL and the proportions of insectivore fish decreased with greater trophic conditions.

**Key words** : Artificial reservoir, Empirical water quality model, Trophic guild

#### 1. 서론

우리나라 호수는 98% 이상이 인위적으로 건설된 인

공호로서, 자연호와는 지질학적 형성과정이 근본적으로 다르기 때문에 수체의 생태적 구조 및 특성이 지역마다 아주 다른 것으로 알려져 있다(Thornton, 1990; Wetzel,

Received 19 March, 2014; Revised 24 June, 2014;

Accepted 1 July, 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.

1990). 특히 대형 인공호는 비교적 넓은 규모의 집수역을 포함하고 하천 혹은 강에 의한 영향이 크기 때문에 (Thornton, 1990), 시·공간적으로 수리수문학적 역동성이 크다. 특히, 우리나라의 경우 하절기에 집중되는 몬순강우와 태풍은 유역내 유입량 및 방류량에 영향을 주어 인공호 내의 이화학적 수질특성에 큰 영향을 미친다. 계절적 몬순강우가 인공호의 이화학적 수질에 영향을 준다는 다양한 연구가 보고(An, 2001; An과 Kim, 2003; Kim과 Kim, 2004) 되었고, 이러한 강우는 호수내의 유수대, 전이대, 정수대 구간의 이화학적 특성에 음적 혹은 양적 변화를 불러일으킨 것으로 알려져 있다(An, 2001; An과 Kim, 2003). 특히, 몬순강우 이후의 총인 (total phosphorus, TP) 및 총질소 (total nitrogen, TN)의 수체내 농도는 엽록소-a (chlorophyll-a, CHL) 증가에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타나(Lee 등, 2002; Park 과 An, 2007) 인공호에 대한 계절적 몬순강우의 영향은 큰 것으로 보고되었다.

계절적인 강수 패턴에 의한 인공호 내 수체의 반응이 시간과 공간에 따라 다르게 일어남에도 불구하고(An과 Park, 2002), 우리나라에 분포하는 저수지 및 인공호의 부영양화(Kim 등, 2001)는 비점오염원 혹은 점오염원의 분포특성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 선행된 연구에서는 인공호의 영양상태에 대한 평가가 이루어졌으나(An 등, 2008; Park과 An, 2007), 선행 연구에 적용된 호수의 수질 기준(Forsberg와 Ryding, 1980; Nürnberg, 1996; US EPA, 1976; Vollenweider, 1968)에 따라 각기 다를 뿐만 아니라, 계절적 몬순강우의 영향에 따른 연평균 인 (P) 농도의 산정 및 적용에도 일부 어려움이 있다(Lee 등, 2002). 이런 계절적, 지역적 역동성에도 불구하고, 온대권의 호수들에서 CHL 농도의 증감은 일차적으로 인 (P)에 의해 조절되는 것으로 설명되고 있으며(Dillon과 Rigler, 1974; Sakamoto, 1966), 지역적 특성을 기초하여 경험적 수질 모델이 제시되고 있다.

경험적 수질 모델은 TP-CHL, TN-CHL, CHL-SD 등 수질 변수들 간의 관계를 예측하여 호수로 유입되는 유기물 농도의 변화 및 인위적 영향에 따라 호수 수질의 변이성을 파악하고 이를 개선하고 통합적으로 관리할 수 있는 기초 자료로 활용된다(Carlson, 1977; Dillon과 Rigler, 1974). 또한, 이러한 경험적 모델들은 각 지역의

기후 및 지리적 특성을 반영(An과 Park, 2002; Brown 등, 2000)하여 각 모델의 정확도를 높이고자 하였다. 우리나라의 경험적 수질 모델에 관한 연구는 농업용 저수지(Lee 등, 2007; Park 등, 2009), 대형 인공호(An과 Park, 2002; Lee 등, 2002; Park과 An, 2007)를 대상으로 동일한 특성을 갖는 수체들 간의 특성을 분석한 연구가 진행된 바 있으나 농업용 저수지부터 대형 인공호를 대상으로 통합적인 경험적 수질 모델을 연구한 것은 전무한 실정이다.

한편, 호수의 영양상태를 평가하는 부영양도지수 (trophic state index, TSI)는 호수 표층의 유평대 (euphotic zone)에서 일어나는 생물학적, 비생물학적 요소를 잘 반영하여 Carlson(1977)에 의하여 개발되었다. 이러한 부영양도지수 (TSI)는 Carlson(1977)의 TSI secchi depth (TSI<sub>SD</sub>), TSI chlorophyll-a (TSI<sub>CHL</sub>), TSI total phosphorus (TSI<sub>TP</sub>) 및 Kratzer와 Brezonik (1981)의 TSI total nitrogen (TSI<sub>TN</sub>)으로 구성되어 여러 호수에서 나타나는 평가에 널리 이용되고 있다. 최근 일부 연구에 따르면, 수체의 영양상태 (N, P)는 어류 조성 및 생태적 길드에 영향을 주는 것으로 보고하고 있다(An 등, 2013). 또한, 외국의 연구에서도 어류의 조성 및 생체량은 이화학적 수질과 트로픽 단계 (trophic level)의 하위생물군에 의한 영향을 직·간접적으로 받는 것으로 보고하고 있다(Drenner 등, 1996; Ranta와 Lindström, 1993; Ryder 등, 1974).

본 연구에서는 23개의 댐 인공호 및 농업용저수지의 정수생태계에서 첫째, 여름철 몬순강우의 영향에 의한 인공호의 수질 변수의 범위 및 패턴을 분석하고, 둘째, 계절별 인공호 표층에서의 경험적 모델식 및 TSI 지수를 이용하여 수체의 부영양화특성을 예측하고, 셋째 인공호의 트로픽 상태를 반영하는 수질 변수에 따른 어류의 트로픽 구조 (omnivore fish와 insectivore fish)의 영향의 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상 인공호 및 수질자료 분석

본 연구에 이용된 연구대상 인공호는 댐 인공호 10개, 농업용 저수지 13개로서 총 23개 호수를 분석하였으며, 세부적인 조사대상호수는 Fig. 1에 명시하였다 (괄호속

의 숫자는 각 호수내의 조사지점 수).

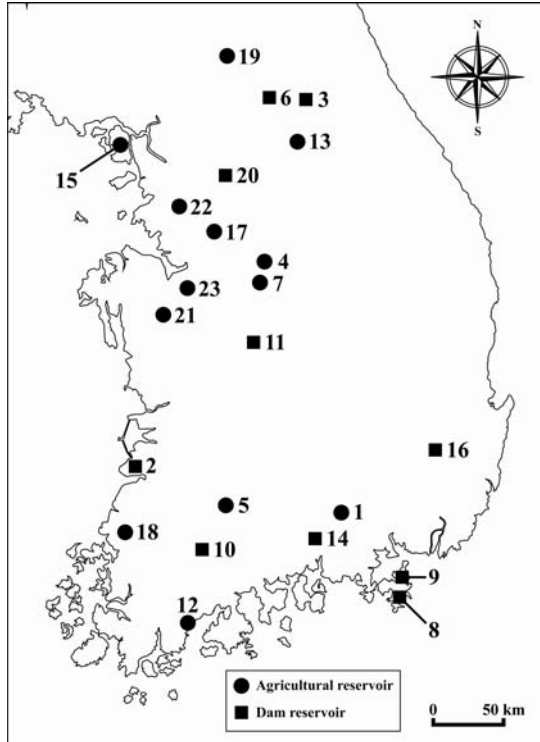


Fig. 1. Map showing the location of 10 dam reservoirs (solid square, ■) and 13 agricultural reservoirs (solid circle, ●).

- 1) 댐 인공호 : 구천호 (1), 남강호 (3), 대청호 (6), 동북호 (2), 부안호 (3), 소양호 (5), 연초호 (2), 운문호 (2), 춘천호 (3), 팔당호 (5)
- 2) 농업용 저수지 : 금풍지 (1), 길정지 (1), 대룡지 (1), 용계지 (1), 마산지 (1), 벽계지 (1), 불갑지 (1), 신촌지 (1), 왕송지 (1), 원남지 (1), 예당지 (3), 이동지 (2), 토교지 (1)

상기 인공호 및 저수지의 트로픽 상태를 분석하기 위해 2005년 1월부터 2011년 12월까지 7년간 월별 수질 자료 (환경부 수질측정망)를 분석하였고, 각 수질변수의 평균값을 매월 산정하였다. 연구에 이용된 수질변수는 총질소 (total nitrogen, TN), 총인 (total phosphorus, TP), 엽록소-a (chlorophyll-a, CHL), 투명도 (secchi

depth, SD)를 대상으로 하였다. 투명도는 부유물질 (suspended solids, SS)의 자료를 이용하여  $\text{Log}_{10}(\text{SD}) = 0.76 - 0.69 \text{Log}_{10}(\text{SS})$ 의 경험적 회귀방정식을 산정한 후 분석에 이용하였다. 수질특성은 장마의 영향에 의한 수질변화를 파악하기 위해 계절적 변이로 대별한 후 분석하였다. 계절적 변이는 장마기의 집중 강우 특성을 기반으로 5-6월을 장마전기 (premonsoon, Pr), 7-8월을 장마기 (monsoon, Mo), 9-10월을 장마후기 (postmonsoon, Po)로 대별하여 분석하였다.

### 2.2. 수질의 경험적 모델 (empirical model) 및 통계 분석

댐 인공호 및 농업용 저수지에서 영양염류 (N, P), 투명도 및 엽록소-a의 관계를 규명하기 위하여 TN-CHL, TP-CHL, TP-SD, CHL-SD의 경험적 모델을 산출하여 우리나라에 분포하는 댐 인공호 및 농업용 저수지의 수질 예측에 이용하였다. 경험적 모델 분석을 위해 TN, TP, SD 및 CHL의 수질자료는 계절별 (장마전기, 장마기, 장마후기) 평균치를 Log 변환하여 선형회귀분석을 실시하였다. 선형회귀분석에서 산출된 결과인 기울기 값은 a, y 절편 값은 b로 표현하였다. 선형회귀분석 및 일원 배치분산분석 (one-way ANOVA) 등의 통계 분석은 SPSS (Version 20.0)를 이용하였다.

### 2.3. 수체의 부영양화지수 (TSI) 분석

본 연구에서 우리나라 저수지 및 인공댐의 부영양화지수 (trophiic state index, TSI) 산정을 위해 수질의 트로픽 상태를 반영하는 수질인자 즉, SD, TP, CHL를 이용하였고, 산정방식은 Carlson(1977)에 의거하였다. TN의 부영양화지수 산정은 Kratzer와 Brezonik(1981)에 의거하였다. 또한, 본 분석에서 이용된  $\text{TSI}_{\text{N:P}}$ 는  $\text{TSI}_{\text{TN}}:\text{TSI}_{\text{TP}}$ 으로 산출하였다. 이러한 TSI를 이용한 호수의 영양상태는 TSI가 20 미만은 극빈영양, 30 - 40은 빈영양, 45 - 50은 중영양, 53 - 60은 부영양, 70을 초과할 시에는 과영양 상태로 평가할 수 있다(Kratzer와 Brezonik, 1981). 적용된 부영양화지수 (TSI)의 공식은 다음과 같다.

$$\text{TSI}_{\text{SD(m)}} = 10 \left[ 6 - \left( \frac{\ln \text{SD}}{\ln 2} \right) \right] \quad (\text{Carlson, 1977})$$

$$\text{TSI}_{\text{TN(mg/L)}} = 10 \left[ 6 - \left( \frac{1.47}{\text{TN}} \right) \times \ln 2 \right] \quad (\text{Kratzer와 brezonik, 1981})$$

$$TSI_{TP(\mu\text{g/L})} = 10 \left[ 6 - \left( \frac{\ln \frac{48}{TP}}{\ln 2} \right) \right] \quad (\text{Carlson, 1977})$$

$$TSI_{CHL(\mu\text{g/L})} = 10 \left[ 6 - \left( \frac{2.04 - 0.68 \ln CHL}{\ln 2} \right) \right] \quad (\text{Carlson, 1977})$$

#### 2.4. 어류의 현장조사 및 조사방법

본 연구에서는 수질분석 이외에도 23개 인공호에 대한 어류조사를 실시하였다. 조사기간은 2008년 10월부터 2012년 10월까지로서 현장조사를 직접 실시하였고, 현장조사 기법은 “호수생태계 건강성 평가법”의 개발의 일환으로 확립된 어류조사 프로토콜에 의거하였다. 현장 조사는 집중 강우의 영향으로 수체가 불안정한 장마기(7-8월)를 제외한 장마전기(6월)와 장마후기(10월)에 실시하였다.

어류 조사에 이용된 어획도구는 catch per unit of effort (CPUE)에 따라 족대(망목크기: 4 × 4 mm)와 투망(망목크기: 5 × 5 mm)이 이용되었다 (An 등, 2006). 족대와 투망을 이용한 어류 조사는 인공호의 연안부를 따라 200 m 내의 범위를 60분 동안 실시하였다. 한편, 상기 2개의 채집도구 외에도 자망, 정치망, 권망 등의 다양한 어류 채집도구를 이용하여 어류채집을 실시하였으나 본 연구에서는 이화학적 수질특성에 따른 트로픽 특성을 규명하기 위해 투망과 족대를 통하여 채집된 어류 자료만을 활용하였다.

#### 2.5. 어류의 트로픽 길드 (trophic guild) 분석

어류에 대한 트로픽 길드 분석은 An 등(2006)에 의해 개발된 담수어류의 트로픽 길드 (trophic guild) 분석에 의거하였다. 트로픽 길드 분석에 이용된 어류의 잡식종 비율 (proportion of omnivore species, Omnivores (%))과 충식종 비율 (proportion of insectivore species, Insectivores (%))을 선택적으로 산정하였고, 이화학적 수질 특성 (TN, TP, SD, CHL)과의 관계를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 시기별 영양상태

우리나라 23개의 댐 인공호 및 농업용 저수지에 대한 영양상태는 Wetzel(1975)과 Nürnberg(1996)가 제시한

수질 기준에 의거하여 분석하였으며, 이에 대한 호수에서 총질소 (TN), 총인 (TP) 및 엽록소-a (CHL)의 영양상태는 Fig. 2와 같다.

총질소 (TN)의 평균값은 1390  $\mu\text{g/L}$ , 범위는 676 - 3,732  $\mu\text{g/L}$ 로 나타났고 Nürnberg(1996)의 기준에 의거하여 부영양 (52%)과 과영양 (47%) 상태로 평가되었다. TN의 농도는 장마전기부터 장마후기에 이르기까지 계절적 차이가 매우 적었으며, 이는 one-way ANOVA 테스트의 결과에서 시기별로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다 ( $p = 0.66$ ,  $n = 69$ ,  $F = 0.42$ ). Park과 An(2007)은 대형 인공호의 연평균 TN 농도는 1,784  $\mu\text{g/L}$ , Lee 등(2007)의 연구에서는 농업용 저수지의 평균 TN 농도가 1,320  $\mu\text{g/L}$ , TN의 주요 분포 범위는 600  $\mu\text{g/L}$  이상이라는 결과를 보고하였고 본 연구에서도 높은 평균값을 보여 부영양 또는 과영양상태인 것으로 분석되었다(Table 2).

인공호에서 총인 (TP)의 농도는 총질소 (TN)의 농도와 뚜렷하게 대비되는 것으로 나타났다(Fig. 1). TP의 영양상태 평가에 따르면, 중영양 상태 (61%)의 호수들이 가장 많았으며, 부영양 (30%), 과영양 (9%) 순으로 분석되었다(Table 2). 그러나 시기별 영양상태 분석에 따르면, 장마전기에는 중영양 상태 (52%)로 가장 높게 나타났고, 장마기에는 부영양 (52%), 장마후기에는 중영양 (52%) 상태로 나타났다. 이러한 TP의 영양상태 분포 특성은 장마기 동안 집중적 강수의 영향으로 인한 TP 농도 증가에 의한 것으로 사료된다(Kong 등, 2009; Lee 등, 2002; Lee 등, 2010).

조류 생체량에 대한 하나의 척도로 활용되는 엽록소-a (CHL)의 농도 변이는 TP의 농도 변이와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 2). CHL의 영양상태 평가에 따르면, 중영양 (44%), 부영양 (39%), 과영양 (9%), 빈영양 (9%)의 순서로 나타나 앞서 확인된 TP와 유사한 경향을 보였고, 시기별 CHL의 영양상태는 장마전기 중영양 (56%), 장마기 부영양 (48%), 장마후기 중영양 (44%)상태를 보여이 가장 높은 빈도를 보인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 호수 내 질소 (N)보다는 인 (P)의 농도가 1차 생산력에 직접적인 영향을 미친다는 An과 Park(2002)의 결과와 부합되는 내용이라고 할 수 있다. 결론적으로, 상기 3개의 변수를 이용하여 호수의 영양상태 평가는 단일 항목만을 기준으로 삼기에는 바람직하지

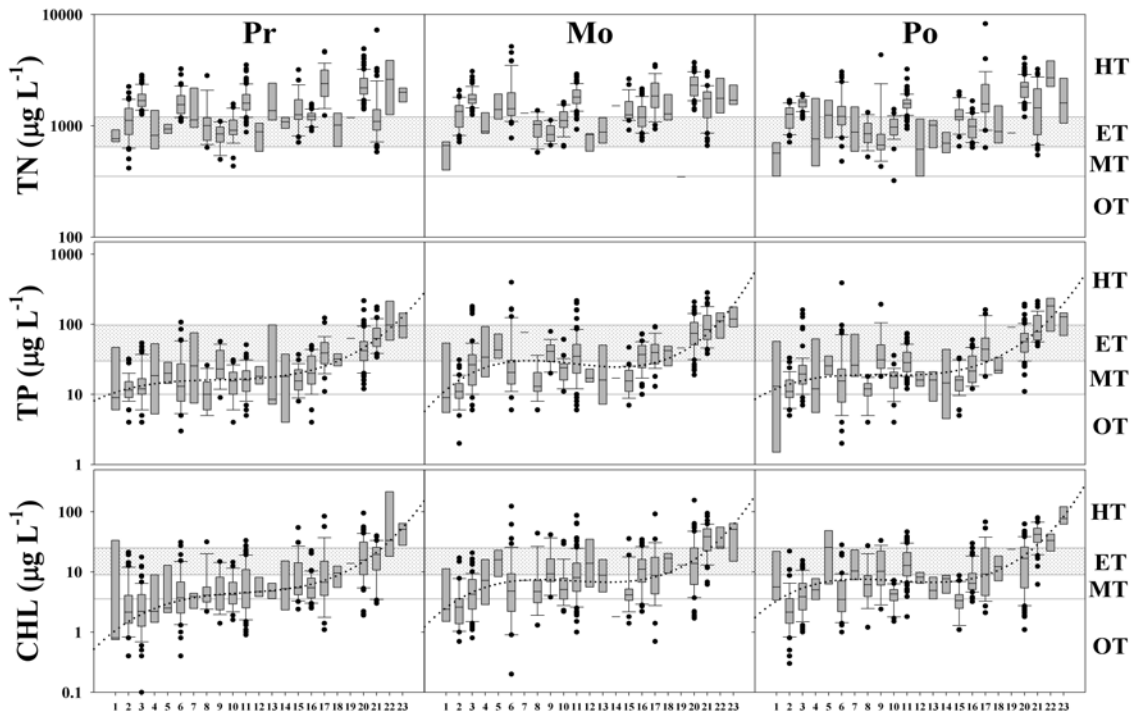


Fig. 2. Box and whisker plot of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chlorophyll-a (CHL) concentrations in 23 artificial Dam reservoirs and agricultural reservoirs. Oligotrophic, mesotrophic, eutrophic, and hypereutrophic state indicate OT, MT, ET, and HT.

Table 2. Seasonal distribution of trophic status of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chlorophyll-a (CHL) in the 23 reservoirs

Trophic class	Total nitrogen (TN)				Total phosphorus (TP)				Chlorophyll-a (CHL)			
	Pr	Mo	Po	Total	Pr	Mo	Po	Total	Pr	Mo	Po	Total
Hypereutrophy (%)	52	65	48	52	9	13	9	9	9	13	17	9
Eutrophy (%)	48	26	48	48	39	52	39	30	30	48	35	39
Mesotrophy (%)		4	4		52	35	52	61	56	39	44	44
Oligotrophy (%)		4							4		4	9

않으며(An 등, 2008), 변수들 간의 관계를 파악하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

### 3.2. 시기별 Nutrient-CHL 경험적 모델

시기별 TN-CHL의 경험적 회귀모델 분석에 따르면 (Fig. 3a), 장마전기와 장마후기에 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나 ( $p < 0.05$ ), 장마기에는 유의하지 않은 것으로 분석되었다 ( $p > 0.05$ ;  $R^2$  범위 = 0.04 - 0.24). 반면에, TP-CHL 모델에 대한 경험적 회귀 분석 결과

(Fig. 3b)는 모든 시기에서 통계적으로 유의한 것으로 분석되었고 ( $p < 0.001$ ),  $R^2$ 값은 0.57 - 0.70의 범위로 나타나 TN보다는 TP의 농도가 CHL 농도에 대하여 제한 영양염류로 작용하는 것으로 분석되었다. TP-CHL 모델의 시기별 분석에 따르면, 장마후기에는  $R^2 = 0.70$  ( $p < 0.001$ )으로 가장 높은 설명력을 보인 것으로 나타났다.

An과 Park(2002)의 연구 결과에 의하면 TP-CHL 모델에서 도출된 기울기 값 (a)과 y 절편값 (b)를 이용하여

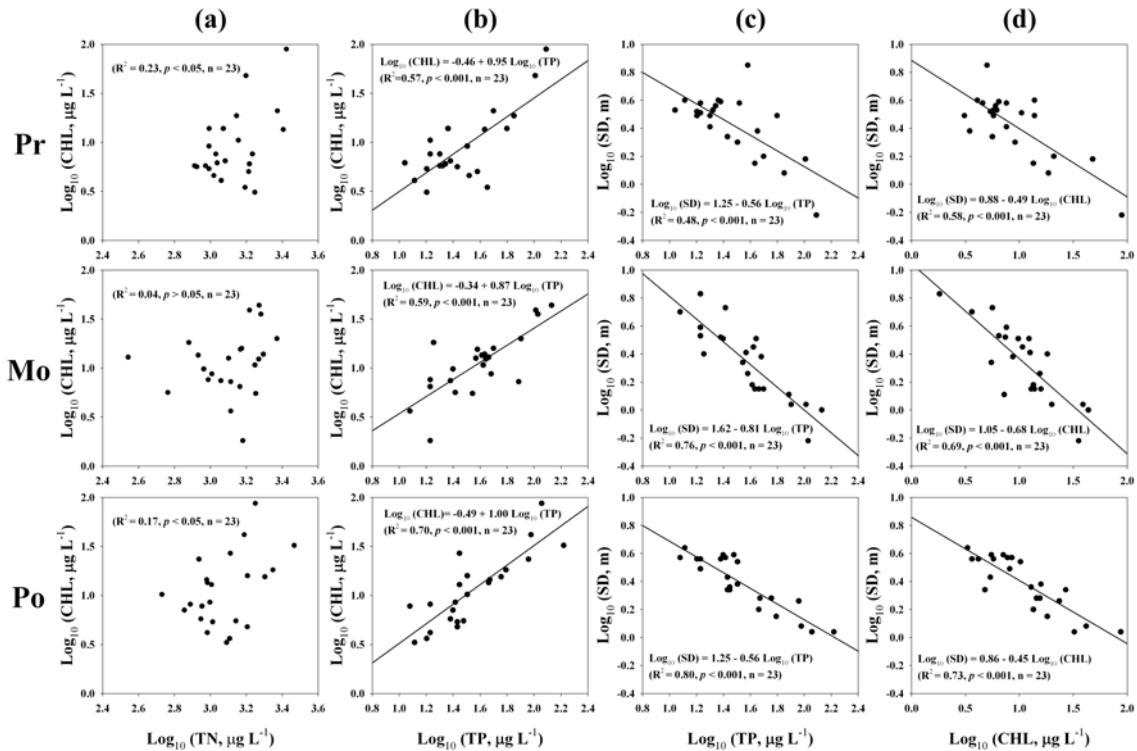


Fig. 3. Simple linear regression models of log - transformed TN - CHL (a), TP-CHL (b), TP-SD (c), CHL-SD (d).

여러 나라에 분포하는 호수들을 비교·분석하였다. 이를 본 연구에 적용하여 시기별로 산출된 a와 b를 비교해보면, 장마전기 ( $a = 0.95$ ,  $b = -0.46$ )와 장마후기 ( $a = 1.00$ ,  $b = -0.49$ )는 유사한 결과값을 보였으나 장마기 ( $a = 0.87$ ,  $b = -0.34$ )는 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 특히, 수체가 안정되는 장마후기의 TP의 증가는 CHL 농도 변화에 큰 영향을 준다는 An 등(2003)의 연구 결과와 일치한다. 한편 장마전기와 장마후기의 TP 농도를 통해 CHL의 농도를 예측할 수 있지만, 장마기에는 다른 두 시기와 다르게 예측되어 장마기간 동안 수체류시간 감소, 탁수의 영향 등과 같은 수리수문학적 특성변화가 요인으로 작용한 것으로 사료된다.

총인 (TP)과 수체내의 투명도 (SD)에 대한 경험적 회귀모델 분석에 따르면(Fig. 3c), 장마전기, 장마기 및 장마후기 모두 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다 ( $p < 0.001$ ). 시기별 분석에 따르면, 장마전기와 비교하여 장마기에 높은 설명력 (장마전기,  $R^2=0.49$ ; 장마기  $R^2=0.76$ )을 보였고, 모델식의 a와 b 값에서도 장마전기

( $a = -0.56$ ,  $b = 1.25$ )와 장마기 ( $a = -0.81$ ,  $b = 1.62$ ) 사이에 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 장마기에 집중되는 강우에 의하여 인공호 내로 유입되는 비휘발성 무기물 (NVSS)의 증가에 따라 입자성 인 (PP)이 증가하고 이로 인한 투명도 (SD)가 감소된다는 연구 결과와 일치한다(An과 Park, 2002). 한편, 장마후기에 TP-SD 모델의 설명력이 가장 높게 ( $R^2 = 0.80$ ) 나타났고 이는 장마기 이후 호수 내 수체류시간 증가 등 수체의 안정성 뿐만 아니라 내부 부하(Edmondson과 Lehman, 1981) 및 가을철 (9-10월) 수층 전도 현상과 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다.

Oglesby와 chaffner(1975)의 연구에 따르면, 입자성 유기물로 간주될 수 있는 조류의 생체량 (CHL)은 그 농도가 증가될수록 투명도 (SD)가 감소하는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서 엽록소-a (CHL)의 농도와 투명도 (SD)에 대한 경험적 모델 분석에 따르면(Fig. 3d) 장마전기, 장마기, 그리고 장마후기 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났고 ( $p < 0.001$ ),  $R^2$  값의 범위는 0.58

- 0.73으로 나타나 CHL-SD의 경험적 모델은 높은 설명력을 갖는 것으로 분석되었다. 시기별 특성을 살펴보면, 장마 후기 ( $R^2 = 0.73$ )에 가장 높은 설명력을 보였고 이는 주어진 CHL의 농도 변이에 대하여 SD가 장마전기와 장마기에 비해 상대적으로 잘 예측될 수 있음을 의미한다. 장마후기의 이러한 특성을 종합하면 표층에서 CHL의 농도는 TP의 농도에 의해 직접적인 영향을 받게 되며, 본 연구에서 분석되었던 호수의 투명도 감소 요인의 대부분은 조류 생체량에 의한 것으로 해석된다. 결과적으로 수체가 안정화되는 장마후기에는 높은 TP 농도에 의한 녹조 현상 등 심각한 부영양화 현상으로 인한 수질 저

하를 겪을 수 있을 가능성이 높기 때문에 인 (P)의 저감에 대한 유입수 또는 호수 내 관리 방안이 필요성이 요구된다.

### 3.3. 시기별 부영양화 패턴

본 연구에 이용된 댐 인공호 및 농업용 저수지에서 장마전기부터 장마후기까지 계절 평균의 영양상태는 수질 변수에 따라 TSI 값의 분포에서 차이를 보였다(Table 1).  $TSI_{TN}$ 에 대한 분석 결과 최소값은 55, 최대값은 66으로 나타나 본 연구대상 호수들의 상태는 부영양상태를 상회하였으나 큰 변이를 보이지 않았다. 한편,  $TSI_{TP}$  값은

**Table 1.** Seasonal mean values of trophic guilds (Omnivore & insectivore fish), ambient chemistry (TN, TP), chlorophyll-a (CHL) concentration, transparency (SD), and Trophic State Indices (TSIs) in the 23 reservoirs

Reservoir	Reservoir type	Abbreviation	No. of fish species	Trophic guilds		TN ( $\mu\text{g/L}$ )	TP ( $\mu\text{g/L}$ )	CHL ( $\mu\text{g/L}$ )	SD (m)	$TSI_{TN}$	$TSI_{TP}$	$TSI_{CHL}$	$TSI_{SD}$
				Omnivores (%)	Insectivores (%)								
Byeokgye	Agricultural	1	3	0	33	676	22	7.2	4.1	55	49	50	40
Buan	Dam	2	9	64	31	1130	12	3.1	4.6	58	40	42	38
Soyang	Dam	3	14	62	37	1650	20	3.3	3.6	61	47	42	42
Yonggye	Agricultural	4	8	43	32	992	28	5.6	3.2	57	52	47	43
Geumpung	Agricultural	5	10	14	6	1195	28	12.4	2.7	59	52	55	46
Chuncheon	Dam	6	8	8	30	1515	25	6.5	3.8	60	51	49	41
Wonnam	Agricultural	7	19	37	53	1232	47	7.3	2.5	59	60	50	47
Gucheon	Dam	8	14	9	90	1007	12	7.5	3.3	57	40	50	43
Yeoncho	Dam	9	12	31	69	859	31	9.8	1.9	56	54	53	51
Dongbok	Dam	10	17	40	24	893	16	6.1	3.5	57	44	48	42
Daechung	Dam	11	29	30	59	1607	22	9.1	3.8	61	49	52	41
Sinchon	Agricultural	12	15	89	8	723	17	8.5	2.9	55	45	52	45
Daeryong	Agricultural	13	9	55	45	1046	20	5.5	4.6	58	47	47	38
Giljeong	Agricultural	14	10	29	43	837	23	5.5	3.2	56	49	47	43
Unmun	Dam	15	18	7	91	1300	16	5.2	3.4	59	44	47	42
Namgang	Dam	16	28	62	27	1243	26	6.7	4.6	59	51	49	38
Idong	Agricultural	17	17	40	16	2364	54	14.4	1.8	63	62	57	52
Bulgap	Agricultural	18	15	8	84	1479	36	10.7	2.7	60	56	54	46
Togyo	Agricultural	19	11	31	34	809	68	14.6	2	56	65	57	50
Paldang	Dam	20	15	66	28	2343	53	18.6	1.7	63	61	59	52
Yedang	Agricultural	21	27	96	3	1444	69	23.6	1.6	60	65	62	53
Wangsong	Agricultural	22	7	89	3	3732	130	50	0.8	66	74	69	63
Masan	Agricultural	23	15	95	4	1892	101	48.6	1.3	62	71	69	56
Mean			14	44	37	1390	38	12.6	2.9	60	57	55	45
Median			14	40	32	1232	26	7.5	3.2	59	51	50	43
Maximum			29	96	91	3732	130	50	4.6	66	74	69	63
Minimum			3	0	3	676	12	3.1	0.8	55	40	42	38

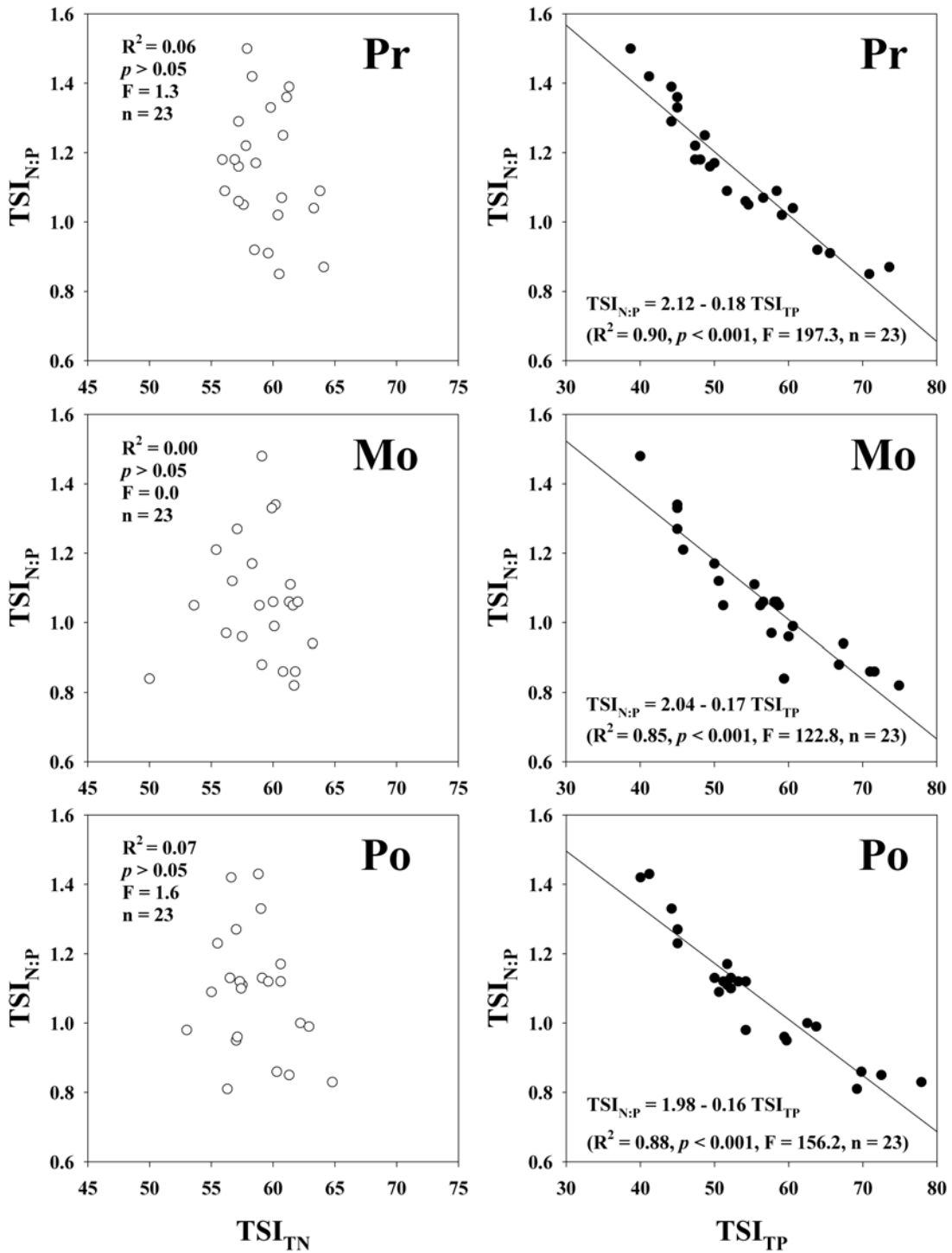


Fig. 4. Relationships between  $TSI_{N:P}$  and  $TSI_{TN}$  (Left panels),  $TSI_{N:P}$  and  $TSI_{TP}$  (Right panels)



최소값 40, 최대값 74로 나타나 빈영양부터 과영양 상태에 이르기까지 큰 변이를 보인 것으로 분석되어, Nürnberg(1996)에 의해 제시된 영양상태의 기준과 부합되는 내용이라 할 수 있다.

호수에서 인 (P)과 질소 (N)의 질량비는 호수생태계를 구성하는 생물의 N:P 질량비와 밀접한 관련이 있으며 (Downing과 McCauley, 1992), 질량비의 차이에 따라 인, 질소 또는 인과 질소 모두가 제한 영양염류가 작용할 수 있다(Forsberg와 Ryding, 1980). 시기별  $TSI_{TN}$  과  $TSI_{N:P}$ 에 대한 선형 회귀 분석에 따르면(Fig. 4), 모든 시기에서 통계적으로 유의한 결과가 도출되지 않았으나 ( $p > 0.05$ ),  $TSI_{TP}$ 와  $TSI_{N:P}$ 의 관계에서는 모든 시기에서 유의하였으며 ( $p < 0.001$ ), 높은 설명력 ( $R^2$  범위: 0.85 - 0.90)을 보인 것으로 분석되었다.

#### 3.4. 부영양화에 따른 시기별 $TSI_{CHL}$ 의 변이 패턴

조류의 생체량 (CHL)은 호수 내에서 부영양화를 쉽게 알아볼 수 있는 일차적인 척도로 활용될 수 있으며 이러한 영향은 N:P 질량비에 의해 조절된다. 앞선 분석에서  $TSI_{TP}$ - $TSI_{N:P}$  모델이 높은 설명력을 보인다는 것에 기초하여 시기별  $TSI_{N:P}$ 와  $TSI_{CHL}$ 에 대한 관계를 분석해 보았다(Fig. 5). 시기별  $TSI_{N:P}$ 의 분포 범위는 장마전기 0.70 - 2.95, 장마기 0.72 - 2.02, 장마후기 0.62 - 3.36으로 분석되었다. 특히 장마기의  $TSI_{N:P}$ 는 가장 작은 분포 범위를 나타내었다. 이러한 영향은 장마기 동안 호수로 유입되는 SS에 의하여 TP 농도가 증가(An과 Park, 2002)한 것으로 판단된다.  $TSI_{N:P}$ 에 따라  $TSI_{CHL}$ 는 다른 범위와 영양상태를 나타내었다.  $TSI_{N:P}$ 가 1 이하일 때

$TSI_{CHL}$ 의 주요 범위 (25% - 75%)는 46 - 66으로 나타나 중영양, 부영양에 분포하는 것으로 분석되었다. 한편  $TSI_{N:P}$  범위가 1.5 - 2일 때 장마전기 34 - 46으로 나타나 빈영양, 중영양에 분포하는 것으로 분석되어  $TSI_{N:P}$ 가 증가할수록  $TSI_{CHL}$ 의 범위 및 영양상태는 감소하는 경향을 나타내었다.

#### 3.5. 어류의 트로픽 구성비

어류의 트로픽 상태를 분석하기 위해 인공호의 TN, TP, CHL, SD의 변이에 대한 섭식 길드 (feeding guild) 분석에 따르면, 충식성 어종 및 잡식성 어종의 개체수 비율은 상대적인 차이를 보여주었다(Fig. 6). TN, TP 및 CHL 값 (평균치±표준편차)의 분석에 따르면, TN은 2000  $\mu\text{g/L}$  이하(Fig. 6a, e), TP는 50  $\mu\text{g/L}$  이하(Fig. 6b, f), CHL은 20  $\mu\text{g/L}$  이하(Fig. 6c, g)에서 충식성 및 잡식성 어류 모두가 우점적으로 출현하는 것으로 나타났다. 또한, 충식성 어류 및 잡식성 어류의 개체수 비율은 수질의 영양단계의 수준에 대해 5 - 90%로 다양하게 분포하고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 총질소 (TN)의 농도가 2000  $\mu\text{g/L}$  이상, TP가 50  $\mu\text{g/L}$  이상, CHL이 20  $\mu\text{g/L}$  이상일 때에는 충식종이 약 30% 이하의 개체수 비율을 나타내어 급격히 감소되었으며, 잡식종은 반대로 급격한 증가(Han과 An, 2008; Hwang 등, 2009)를 보여 수질의 과도한 질적 저하는 충식성 어류 및 잡식성 어류의 개체수 비율이 한쪽으로 편중되는 것으로 나타났다.

댐 인공호 및 농업용 저수지에서 어류의 트로픽 길드 특성에 대한 수체 투명도 (SD)의 변이 분석에 따르면, 인공호의 크기 및 호수의 특성에 대해 다양한 편차가 나타

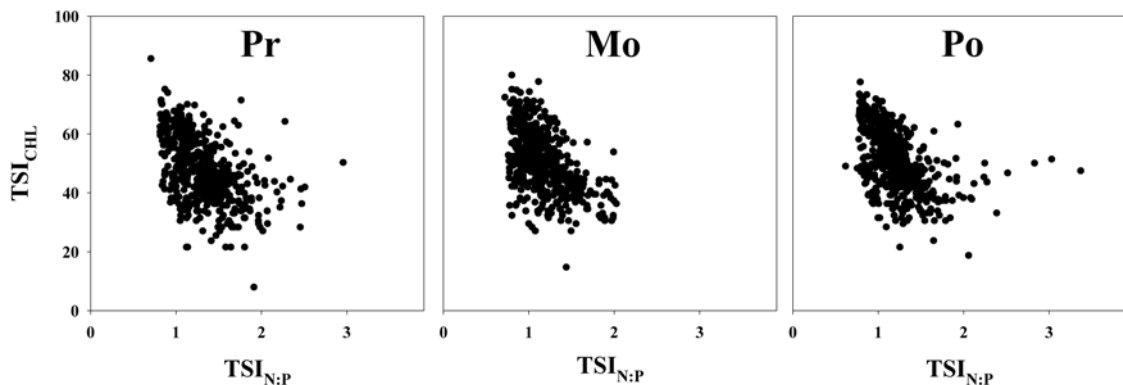


Fig. 5. Seasonal variations of  $TSI_{CHL}$  against  $TSI_{N:P}$ .

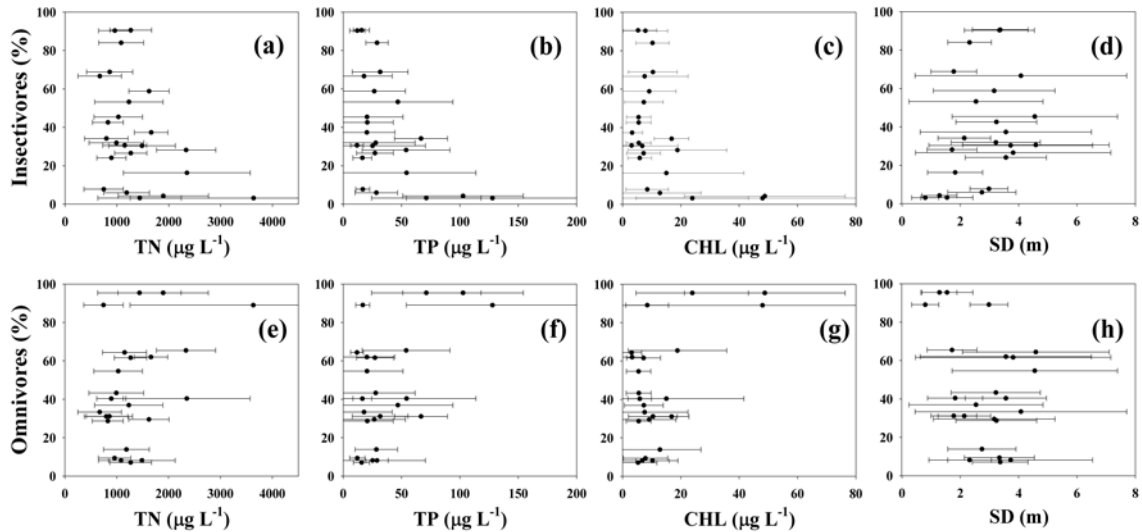


Fig. 6. Relations of insectivores (%) (a - d) and omnivores (%) (e - h) to total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll-*a* (CHL), and secchi depth (SD). Abbreviations: Insectivores (%) = the proportion of insectivore species, Omnivores (%) = the proportion of omnivore species.

났다(Fig. 6d, h). 확인된 투명도의 편차는 인공호의 35%는 2 m 이상, 65%는 2 m 이하를 보였으며, 충식성 어류 및 잡식성 어류의 개체수 비율은 대부분이 약 30 - 70%의 범위에서 분포하는 것으로 분석되었다. 그러나 수체의 투명도의 값 (평균±표준편차)의 범위가 2 m 이하로 지속되는 경우 충식어종은 5% 이하로 극히 낮은 개체수 비율을 보였으며, 반대로 잡식어종은 90% 이상으로 극히 높은 개체수 비율을 보였다.

이런 연구는 호수 생태계 내의 인 (P)농도, 질소 (N)농도 및 수체의 투명도는 식물성 플랑크톤 (조류)의 1차 생산력 및 생체량에 직접적인 영향을 주고, 이들은 최상위 소비자인 어류의 트로픽 구조에 직·간접적으로 영향을 주는 것으로 나타나, 수체의 TSI (trophic state index)는 어류의 상위 먹이연쇄 구조에 중요한 역할을 하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 우리나라의 23개 댐 인공호 및 농업용 저수지에 대한 이화학적 수질과 어류의 트로픽에 대한 연구로서 다음과 같이 결과를 도출하였다.

첫째, 본 연구대상 수체들은 Nürnberg(1996) 기준에

의거할 때 TN은 부/과영양상태, TP와 CHL은 각각 빈영양-과영양상태 범위로 나타났다. Carlson(1977)의  $TSI_{TP}$  및  $TSI_{CHL}$ 은 이들의 원 자료와 비교해볼 때 유사한 영양상태를 보였다. 둘째, 트로픽 변수의 경험적 모델 (empirical model)분석에 따르면, CHL의 변이는 TP에 의해 주로 설명되었으며, TN은 설명력이 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, 본 연구대상 수체들에서는 인 (P)이 1차 생산력을 조절하는 제1 인자로 평가되었다. 계절적 경험적 모델 분석에서는 장마후기에 트로픽 변수들 간에 가장 높은 유의성을 보였다. 셋째, TSI 지수에 의거한 엽록소-a (CHL)의 변이에 대한 N:P의 영향분석에 따르면, N:P 비율은 질소 (N)에 조절되지 않고, 인 (P)에 의해 조절되어 통계적으로 높은 유의성 ( $R^2 = 0.85 - 0.90$ ,  $p < 0.001$ )을 보였다.  $TSI_{TP}$ - $TSI_{N:P}$  모델에 기초한  $TSI_{N:P}$ - $TSI_{CHL}$  모델은  $TSI_{N:P}$ 가 증가됨에 따라  $TSI_{CHL}$ 이 감소하는 것으로 나타났다. 넷째, 어류와 수질과의 분석에 따르면, 이화학적 수질 악화는 잡식종 (Omnivore)의 상대풍부도를 증가시켰고, 충식종 (Insectivore)의 상대풍부도는 감소시키는 것으로 나타나, 수질악화는 어류의 트로픽 길드에 직접적으로 영향을 주는 것으로 분석되었다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR 프로젝트 [과제명 : 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발 (08-IV-11)]의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- An, K. G., 2000, Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus, *Korean Journal of Limnology*, 33, 222-229.
- An, K. G., 2001, Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem, *Korean Journal of Limnology*, 34(1), 1-8.
- An, K. G., Park, S. S., 2002, Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study, *Ecological Modelling*, 152(2-3), 191-203.
- An, K. G., Kim, D. S., 2003, Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms, *Water, Air, and Soil Pollution*, 149(1-4), 27-49.
- An, K. G., Park, S. S., Ahn, K. H., Urchin, C. G., 2003, Dynamics of nitrogen, phosphorus, algal biomass, and suspended solids in an artificial lentic ecosystem and significant implications of regional hydrology on trophic status, *Journal of Environmental Biology*, 24(1), 29-38.
- An, K. G., Lee, J. Y., Bae, D. Y., Kim, J. H., Hwang, S. J., Won, D. H., Lee, J. K., Kim, C. S., 2006, Ecological assessments of aquatic environment using multi-metric model in major nationwide stream watersheds, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 22(5), 796-804.
- 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 Journal of Environmental Biology*, 26(3), 252-263.
- An, K. G., Choi, J. W., Lee, Y. J., 2013, Modifications of ecological trophic structures on chemical gradients in lotic ecosystems and their relations to stream ecosystem health, *Animal Cells and Systems*, 17(1), 1-10.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Synder, B. D., Stribling, J. B., 1999, Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, 2nd Ed, EPA 841 - B - 99 - 002. U. S. EPA office of water, Washington, D. C., USA.
- Brown, C. D., Hoyer, M. V., Bachmann, R. W., Canfield, D. E. Jr., 2000, Nutrient-chlorophyll relationships: an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north-temperate lake data, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57, 1574-1583.
- Carlson, R. E., 1977, A trophic state index for lakes, *Limnology and Oceanography*, 22, 361-369.
- Dillon, P. J., Rigler, F. H., 1974, The phosphorus - chlorophyll relationship in lakes, *Limnology and Oceanography*, 19, 767-773.
- Downing, J. A., McCauley, E., 1992, The nitrogen: phosphorus relationship in lakes, *Limnology and Oceanography*, 37(5), 936-945.
- Drenner, R. W., Smith, J. D., Threlkeld, S. T., 1996, Lake trophic state and the limnological effects of omnivorous fish, *Hydrobiologia*, 319, 213-223.
- Edmondson, W. T., Lehman, J. T., 1981, The effect of changes in the nutrient income on the condition of lake Washington, *Limnology and Oceanography*, 26, 1-29.
- Forsberg, C., Ryding, S. O., 1980, Eutrophication parameters and trophic state in 30 Swedish waste receiving lakes, *Archiv für Hydrobiologie*, 89, 189-207.
- Hwang, Y., Han, J. H., An, K. G., 2009, Water quality in artificial reservoirs and its relations to dominant reservoir fishes, *Korean Journal of Limnology*, 42(4), 441-451.
- Kratzer, C. R., Brezonik, P. L., 1981, A carlson - type trophic state index for nitrogen in Florida lakes, *Water Resources Bulletin*, 17, 713-715.
- Kim, B., Park, J. H., Hwang, G., Jun, M. S., Choi, K., 2001, Eutrophication of reservoirs in south Korea, *Limnology*, 2(3), 223-229.
- Kim, B., 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.
- 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 Journal of Limnology, 42(2), 221-231.
- Lee, H. W., An, K. G., Park, S. S., 2002, Long-term annual trend analysis of epilimnetic water quality and their longitudinal heterogenities in Lake Soyang, Korean Journal of Limnology, 35(1), 36-44.
- Lee, J. H., Kim, J. M., Kim, D. S., Hwang, S. J., An, K. G., 2010, Nutrient and chlorophyll-a dynamics in a temperate reservoir influenced by Asian monsoon along with in situ nutrient enrichment bioassays, Limnology, 11, 49-62.
- Lee, J. Y., Lee, J. H., Shin, K. H., Hwang, S. J., An, K. G., 2007, Trophic state and water quality characteristics of Korean agricultural reservoirs, Korean Journal of Limnology, 40(2), 223-233.
- Nürnberg, K. G., 1996, Trophic state of clear and colored, soft - and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish, Journal of lake and reservoir management society, 12(4), 432-447.
- Oglesby, R. T., Schaffner, W. R., 1975, The response of lakes to phosphorus, in: Porter, K. S. (ed.), Nitrogen and phosphorus - food production, waste and the environment, Chapter 2, Ann Arbor Science publishers Inc., Michigan, 23-57.
- Park, H. J., An, K. G., 2007, Trophic state index (TSI) and empirical models, Based on water quality parameters, in Korean reservoirs, Korean Journal of Limnology, 40(1), 14-30.
- Park, Y. M., Lee, E. H., Lee, S. J., An, K. G., 2009, Trophic state characteristics in Topjeong reservoir and their relations among major quality parameters, Korean Journal of Limnology, 42(3), 382-393.
- Ranta, E., Lindström, K., 1993, Theory on fish yield versus water quality in lakes, Annales Zoologici Fennici, 30, 71-75.
- Ryder, R. A., Kerr, S. R., Loftus, K. H., Regier, H. A., 1974, The morphoedaphic index, a fish yield estimator - review and evaluation, Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 31, 663-688.
- Sakamoto, M., 1966, Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth, Archiv für Hydrobiologie, 62, 1-28.
- Thornton, K. W., 1990, Perspectives on reservoir limnology. in: Thornton, K. W., Kimmel, B. L., Payne, F. E. (eds.) Reservoir Limnology: ecological perspectives, John Wiley & Sons, New York, 1-4.
- Thornton, K. W., 1990, Sedimentary processes. in: Thornton, K. W., Kimmel, B. L., Payne, F. E. (eds.) Reservoir Limnology: ecological perspectives, John Wiley & Sons, New York, 43-70.
- U.S. EPA., 1976, Water quality criteria research of the U.S. Environmental protection agency. Proceeding of an EPA sponsored symposium, EPA - 600 (3 - 76 - 079), 185.
- U.S. EPA., 1993, Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface water. EPA 600 - R - 92 - 111. Environmental monitoring systems laboratory - Cincinnati office of modeling, monitoring system, and quality assurance office of research development, U. S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268. USA.
- Vollenweider, R. A., 1968, The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors, Tech. Rep. OECD. Paris. DAS/CSI/68., 27, 1 - 182.
- Wetzel, E. B., 1975, Limnology. W. B. Saunders Comp., Toronto, 743.
- Wetzel, R. G., 1990, Reservoir ecosystems: conclusions and speculations, in: Thornton, K. W., Kimmel, B. L., Payne, F. E. (eds.) Reservoir Limnology: Ecological perspectives, John Wiley & Sons, New York, 227-238.