

인공호의 부영양화에 따른 피라미 (*Zacco platypus*) 개체군의 전장-체중 관계 및 비만도 지수

고 대 근 · 한 정 호 · 안 광 국*

(충남대학교 생명시스템과학대학 생물학과)

Length-Weight Relations and Condition Factor (K) of *Zacco platypus* Along Trophic Gradients in Reservoir Ecosystems. Ko, Dae-Geun, Jeong-Ho Han and Kwang-Guk An* (Department of Biological Science, College of Biological Sciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objective of this study was to determine the weight-length relations and condition factor (K) of *Zacco platypus*, along the trophic gradients from oligotrophic to eutrophic state in six reservoir ecosystems (B_aR , Y_yR , J_yR , G_pR , Y_dR , and M_sR), during 2008~2010. The species was selected as a sentinel species for the study, due to its wide distribution and wide trophic gradient. The analysis of trophic state index (TSI), based on total phosphorus (TP) and chlorophyll-*a* (Chl-*a*), indicated that reservoirs of Y_yR and B_aR were classified as to be in an oligotrophic state (30~40), the J_yR and G_pR as mesotrophic (40~50), and the Y_dR and M_sR as eutrophic state (50~70). Total 47 species and 26,226 individuals were sampled from 6 reservoirs and sensitive species dominated in the oligotrophic reservoirs (Y_yR and B_aR). In the mean time, the tolerant species dominated the community in the mesotrophic (J_yR and G_pR) and eutrophic (Y_dR and M_sR) reservoirs. Regression analysis of body weight, against the total length, indicated that the regression coefficient (b value) was lower in the oligotrophic reservoir (2.77~2.79) than the mesotrophic (3.07~3.17) and eutrophic reservoirs (3.15~3.21). This result suggests that the population growth rate *Zacco platypus* reflected the trophic gradients of the reservoirs. The analysis of condition factor (K) against the total length showed positive slopes ($b > 3.0$) in mesotrophic and eutrophic reservoirs, and a negative slope ($b < 3.0$) in oligotrophic reservoir. The variation of the regression slope of "b" in *Z. platypus* was accounted for 79.7% [$b = 0.012 \times TSI(TP) + 2.395$, $p = 0.017$] by the variation of TSI (TP) and 82.2% [$b = 0.013 \times TSI(Chl-a) + 2.36$, $p = 0.013$] by the variation of TSI (Chl-*a*). The proportion of DELT abnormality increased as the trophic state increases in the reservoirs. The overall data suggest that the growth of the fish populations, based on the length-weight relations and condition factor, reflected the trophic state of nutrient and phytoplankton biomass of the reservoir waters. Thus, in spite of the tolerant characteristics of *Z. platypus*, hypertrophic states might negatively affect the health of the population.

Key words : *Zacco platypus*, length-weight relations, condition factor, trophic state, nutrient, reservoir

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 821-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

서 론

우리나라에 산재하는 대부분의 호수는 인공호로서 자연호와 달리 수리·수문학적, 형태학적, 생태학적인 측면에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다(Kent *et al.*, 2002; Kong *et al.*, 2009). 이러한 인공호는 각 수계의 계절적 몬순 강우 특성(An, 2000) 및 유입량과 댐에서의 방류량 변화(Macan, 1974)에 따라 호내의 수온 및 용존산소 분포 특성, 영양염류(N, P)와 같은 이·화학적인 수질 요인에 많은 영향을 준다(Macan, 1974; Krenkel *et al.*, 1979; Rada and Wright, 1979). 이런 수질 변화는 수체 내 서식하는 동·식물플랑크톤, 수서무척추동물 등의 생물학적 개체군의 구조 및 기능에 영향을 미치며, 최종적으로는 수체 내 최상위 소비자인 어류 개체군 분포 및 군집 특성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Edwards and Crisp, 1982).

북미 및 유럽의 인공호 수질은 어류의 생산력(Productivity) 혹은 생체량(Biomass)과 1차적 함수관계를 갖는 것으로 알려져 있어(Ryder, 1965; Ryder *et al.*, 1974; Matuszek, 1978; Kerr and Ryder, 1988), 인(P)과 질소(N)의 부영양도가 어류군집에 주는 영향과 관련된 연구들이 광범위하게 진행되어 왔다. 이를 기반으로 다양한 수질변수와 어류 생산력과의 관계를 알아보기 위한 기작 모델(Mechanical model) 및 경험적 모델(Empirical model)들이 제시되어 왔다. 호수생태계에서는 이러한 연구들을 기초로 하여 어류 생산력 관리를 위한 호수지형 적합지수(Morphoedaphic Index, MEI) 모델이 개발되었고(Ryder, 1982), 이러한 모델들은 어류 생산력과 영양염류 부하(Nutrient loading) 혹은 식물플랑크톤 생산력과 연계시켜 설명하였다(Melack, 1976; McConnell *et al.*, 1977). 최근 연구들에서도 이런 경험적 모델들이 광범위하게 적용되고 있으며, 조류의 생체량(엽록소-*a*), 평균 수심, 1차 생산자의 생산력, 총질소(TN), 총인(TP) 등 다양한 변수와 어류 생산력과의 관계를 규명하고 있다.

인공호 내에서 어류 개체군 및 군집특성 파악을 통한 어류관리는 인공호 생태계의 수질개선에 많은 기여를 할 수 있음에도 불구하고, 우리나라는 생태계 및 수환경을 고려한 과학적인 어류관리가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다(Choi *et al.*, 2006). 과거 국내 호수생태계의 관리 동향은 이·화학적 수질평가에 의한 관리가 주를 이루어 왔고, 생물학적 평가 또한 종 분포도, 어류상, 군집지수 분석과 같은 단편적이고, 획일적인 평가만으로 관리가 되어온 실정이다. 또한 호소의 환경상태를 측정하는

데 필요한 조사기법과 분석방법이 과학적이고, 체계적으로 정립되지 않아서 객관적이고 일관성 있는 자료 획득이 어렵기 때문에 인공호 및 저수지를 유지·관리하는데 한계성을 드러내고 있다(MEK, 2001). 이러한 생물관리 기법의 부재는 국내 고유종들의 다양성 감소를 야기시키는 특정 어류 개체군의 급증(배스, 블루길 등)과 더불어 호수의 빠른 부영양화를 진단할 수 없기 때문에 큰 문제로 대두되고 있다.

따라서 본 연구는 이·화학적 수질과 어류 개체군 간의 연관성을 규명하고, 경험적 모델을 제시하고자 피라미(*Zacco platypus*)를 대상으로 선정하였다. 잉어과(Cyprinidae) 피라미속(*Zacco*)에 속하는 피라미는 일차담수어로서 국내 인공호를 포함한 담수 생태계 전역에 분포하고 있으며, 부영양호부터 빈영양호까지 우점하여 분포하는 종으로 알려져 있다(Jeon, 1980, 1982; Choi *et al.*, 1989; Kim, 1997). 피라미는 특히 서식지 교란 및 수질오염에도 잘 견디는 내성종으로 널리 알려져 있으며(Kim and Kim, 1975; Jeon, 1980; Choi *et al.*, 1989; Kim, 1997; Choi and Kim, 2004; Choi *et al.*, 2005), 정체성 수역으로부터 여울성 수역에 이르기까지 광범위한 서식지를 점유하는 것으로 보고 있다(Kim and Kim, 1975; Jeon, 1980; Choi and Kim, 2004). 피라미의 주요 먹이는 자갈이나 모래에 부착하여 서식하는 수서곤충(Macroinvertebrate) 및 부착조류(Periphyton)를 섭식하며, 환경이 악화된 곳에서는 하상의 유기물을 섭식하는 잡식종으로 보고되었다(Kim and Kim, 1975; Kim, 1997; Kim *et al.*, 2010). 또한, 피라미는 수질오염뿐만 아니라 보 설치, 골재채취, 댐 건설 등의 인위적인 환경 변화에 따른 개체수의 증가(Kim and Kim, 1975; Jeon, 1980; Choi and Kim, 2004; Choi *et al.*, 2005)하는 것으로 알려져 있다. 그러나 영양염류 농도 및 식물성 플랑크톤의 생산력 혹은 수체의 영양상태(Trophic state)가 피라미 개체군에 어떤 영향을 주는지는 전혀 알려져 있지 않다. 인공호에서 이런 우점종에 대한 화학적 수질 평가, 부영양도 평가 및 어류 개체군 성장도 평가가 어족자원을 보호하고 관리하는데 있어서 핵심 연구임에도 불구하고, 장기적인 인공호의 영양상태에 따른 개체군 및 성장도 특성에 대한 연구는 극히 부족한 실정에 있어(Yang *et al.*, 1991; Choi, 2005), 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 영양상태(Trophic state)가 각기 다른 6개 인공호들의 이·화학적 수질 특성을 분석하고, 각 인공호별 어류군집 구조 및 어류 종 조성을 파악하였으며, 수체 내의 부영양화 현상이 어류에 미치는 영향을 파악하기 위하여 피라미(*Zacco platypus*) 개

체군을 대상으로 개체군의 전장-체중 관계 및 개체군 비만도 지수를 분석하였다. 최종적으로 이·화학적 수질이 어류 개체군 및 생체량에 미치는 영향을 진단하여 호수 내 어류 관리에 있어서 핵심적인 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사 기간 및 조사 지점

본 연구에서는 영양 상태 (Trophic state)와 호수 크기를 고려하여 6개 인공호를 선정하였으며, 2008년부터 2010년까지 3년에 걸쳐 어류 조사를 실시하였다. 조사 시기는 수체 안정기인 장마전기 (5~6월)와 장마후기 (9~10월)로 구분하여 호수별로 각각 2회씩 현장 조사를 실시하였다. 각 호수별 조사 구간은 종적 구배 (Longitudinal gradient) 특성을 고려하여 대형호는 정수대 (Lacustrine zone, N1), 전이대 (Transitional zone, N2), 유수대 (Riverine zone, N3)의 3개 구간, 중형호는 2개의 구간, 소형호는 1개의 구간을 선정하였다. 선정된 각 구간에서

접근이 용이한 연안대 3지점 선정하여 어류 조사를 실시하였다 (US EPA, 1998). 각 지점의 자세한 위치와 행정구역 명칭은 다음과 같다 (Fig. 1).

- 대형호 진양호 (J_yR): 경상남도 진주시 판문동
1차조사: 2008년 10월, 2차조사: 2009년 6월
- 부안호 (B_aR): 전라북도 부안군 변산면
1차조사: 2010년 6월, 2차조사: 2010년 10월
- 중형호 양양호 (Y_yR): 강원도 양양군 서면
1차조사: 2010년 6월, 2차조사: 2010년 10월
- 예당지 (Y_dR): 충청남도 예산군 대흥면
1차조사: 2010년 6월, 2차조사: 2010년 9월
- 소형호 금풍지 (G_pR): 전라북도 남원시 주생면
1차조사: 2009년 6월, 2차조사: 2009년 10월
- 마산지 (M_sR): 충청남도 아산시 온양동
1차조사: 2008년 10월, 2차조사: 2009년 6월

2. 채집 도구 및 조사 방법

어류 현장조사는 호내 지역에서 실시하였다. 어류를 채집하기 위하여 사용된 어류채집도구는 삼각망 (Fyke net, FN), 자망 (Gill net, GN), 삼중자망 (Trammel net, TN), 투망 (Casting net, CN), 족대 (Kick net, KN), 통발 (Minnow trap, MT) 등 6가지 유형의 어획도구를 이용하였다. 호안 부에서는 FN (5×5 mm), GN (45×45 mm), TN (12×12 mm), MT (4×4 mm)를 1일 (24시간) 동안 설치 후 수거하였고, FN, GN, TN, MT가 설치된 지점 부근의 연안부에서는 호수 규모별 정량채집을 위해 CN (7×7 mm: 소형호 10회, 중형호 15회, 대형호 20회), KN (4×4 mm: 소형호 40분, 중형호 50분, 대형호 60분)을 사용하여 어류 조사를 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 국내에서 발간된 검색표 (Kim and Park, 2002; Kim *et al.*, 2005)에 의거해 동정하였으며, Nelson (1994)의 분류체계를 따라 정리하였다. 피라미를 제외한 다른 어종들은 현장에서 동정 후 바로 놓아주는 것을 원칙으로 하였다. 채집된 피라미는 10% 포르말린 용액에 고정하여 실험실로 옮긴 후 전장과 체중을 측정하였다.

3. 이화학적 수질 분석

조사 대상 6개 인공호의 이·화학적 수질 특성을 분석하기 위하여 현장 조사 시 다항목 수질측정기기인 YSI-6600을 이용하여 수질을 측정하였으며, 이 수질 자료 이외에도 장기적인 수질 변화양상을 분석하기 위해 2006년부터 2010년까지 총 5년간 측정된 한국농어촌공사 농

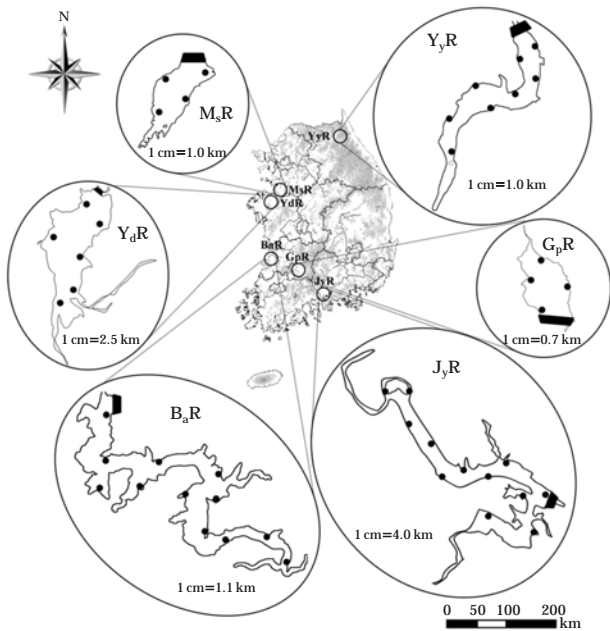


Fig. 1. Reservoir morphologies in three types of reservoirs (large, mid, and small-size). The abbreviations are as follows; M_sR=Masan reservoir, Y_dR=Yedang reservoir, B_aR=Buan reservoir, J_yR=Jinyang reservoir, G_pR=Geumpung reservoir, Y_yR=Yangyang reservoir.

총용수종합정보시스템 (<http://rawris.ekr.or.kr>)과 환경부 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>)의 자료를 수질 분석에 이용하였다. 자료분석에 이용된 수질 항목은 수소이온농도 (pH), 전기전도도 (Conductivity, EC), 생물학적 산소요구량 (Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량 (Chemical oxygen demand, COD), 총부유물질 (Total suspended solids, TSS), 엽록소-a (Chlorophyll-a, Chl-a), 총인 (Total phosphorus, TP), 총질소 (Total nitrogen, TN) 등의 8개 항목을 이용하여 각 호수별 영양상태를 분석하였다. 각 호수의 영양상태를 정량화하기 위하여 Carlson (1977)의 Trophic State Index (TSI)를 이용하였으며, 이 중 TP와 Chl-a를 이용하여 호수의 부영양화 정도를 평가하였다. Trophic State Index (TSI)를 이용한 부영양도 평가 방법은 다른 방법에 비하여 간단하면서도 수질의 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 장점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

4. 피라미 개체군 분석

1) 전장-체중 관계

어류의 전장과 체중을 이용한 피라미 (*Zacco platypus*) 개체군의 비만도 평가를 위해 이용된 식은 아래와 같다.

$$T_w = aT_L^b$$

$$\text{Log}(T_w) = \text{Log} a + b \text{Log}(T_L)$$

T_w : total weight, T_L : total length (a, b: parameters)

상기 전장-체중 관계식을 이용하여 피라미 개체군의 전장 별 성장도 및 비만도를 평가하였다. 어류의 성장도와 비만도 분석은 주어진 환경에서 개체군의 건강 상태나 생식능력의 정도를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 서식 환경의 서식처 등급, 수질 및 피식자 이용능력 등의 다양한 정보를 제공하는 지표로서 이용된다 (Anderson and

Gutreuter, 1983; Busacker *et al.*, 1990; Ney, 1993). 위식에 의해 얻어진 개체군의 회귀계수 b 값은 성장도를 의미하는 것으로서, 일반적으로 회귀계수 b 값이 3.0보다 작으면 길이의 증가만큼 개체가 비대하지 않다는 것을 의미하며, 3.0보다 클 경우 전장의 증가에 비해 비대함을 의미한다. 따라서 회귀계수 b 값이 높을수록 개체군의 성장도가 양호하다는 것을 의미하며, 낮을수록 성장도가 불량하다는 것을 의미한다.

2) 비만도 지수 (K)

전장-체중 관계식과 함께 어류의 건강성을 평가하는 방법 중의 하나인 비만도 지수 (Condition factor, K)는 어류의 먹이원의 섭식 상태를 반영하는 지수로서 비만도 지수 (K)값의 증감에 따라서 어류개체군의 에너지 축적 상태를 설명할 수 있다 (Seo, 2005). Fulton-type의 비만도 지수 (K)와 상대적 비만도 지수 (Relative condition factor, K_n)는 전장-체중관계에서의 매개변수 a 와 b 보다 쉽게 설명되는데 그 식은 아래와 같다.

$$K = T_w / T_L^3 \times 10^n \text{ (Anderson and Neumann, 1996)}$$

$$K_n = T_w / aT_L^b \text{ (LeCren, 1951)}$$

결과 및 고찰

1. 부영양도 지수 및 이·화학적 수질 특성

호수의 부영양도 평가를 위하여 이용된 TSI (TP)와 TSI (Chl-a) 값에 따르면, TSI (TP)는 14.2~83.7, TSI (Chl-a)는 18.8~77.2의 범위를 나타냈으며, Carlson (1977)에 분류기준에 의거하였을 때, 양양호 (Y_yR), 부안호 (B_aR)는 빈영양호 (TSI 지수: 30~40), 진양호 (J_yR), 금풍지 (G_pR)는 중영양호 (TSI 지수: 40~50), 예당지 (Y_dR)와 마산지 (M_sR)는

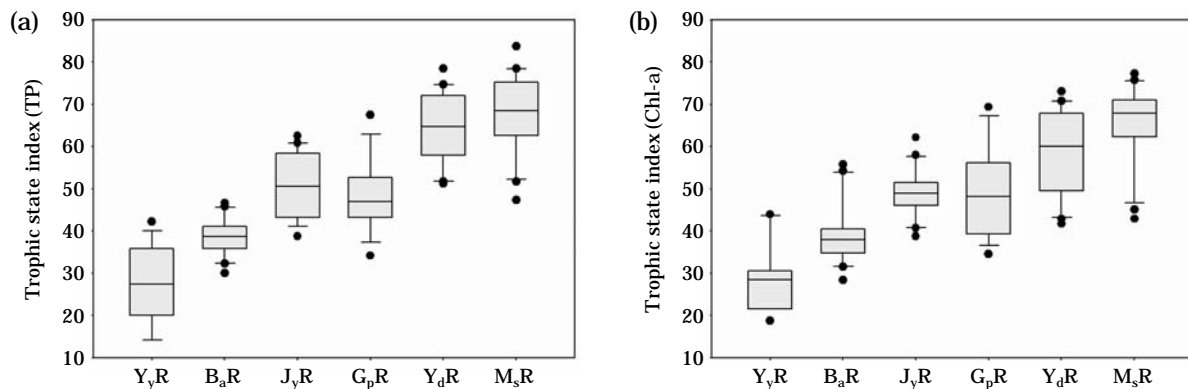


Fig. 2. Carlson's trophic state index (TSI) based on; (a) total phosphorus (TP) and (b) chlorophyll-a (Chl-a) in six reservoirs.

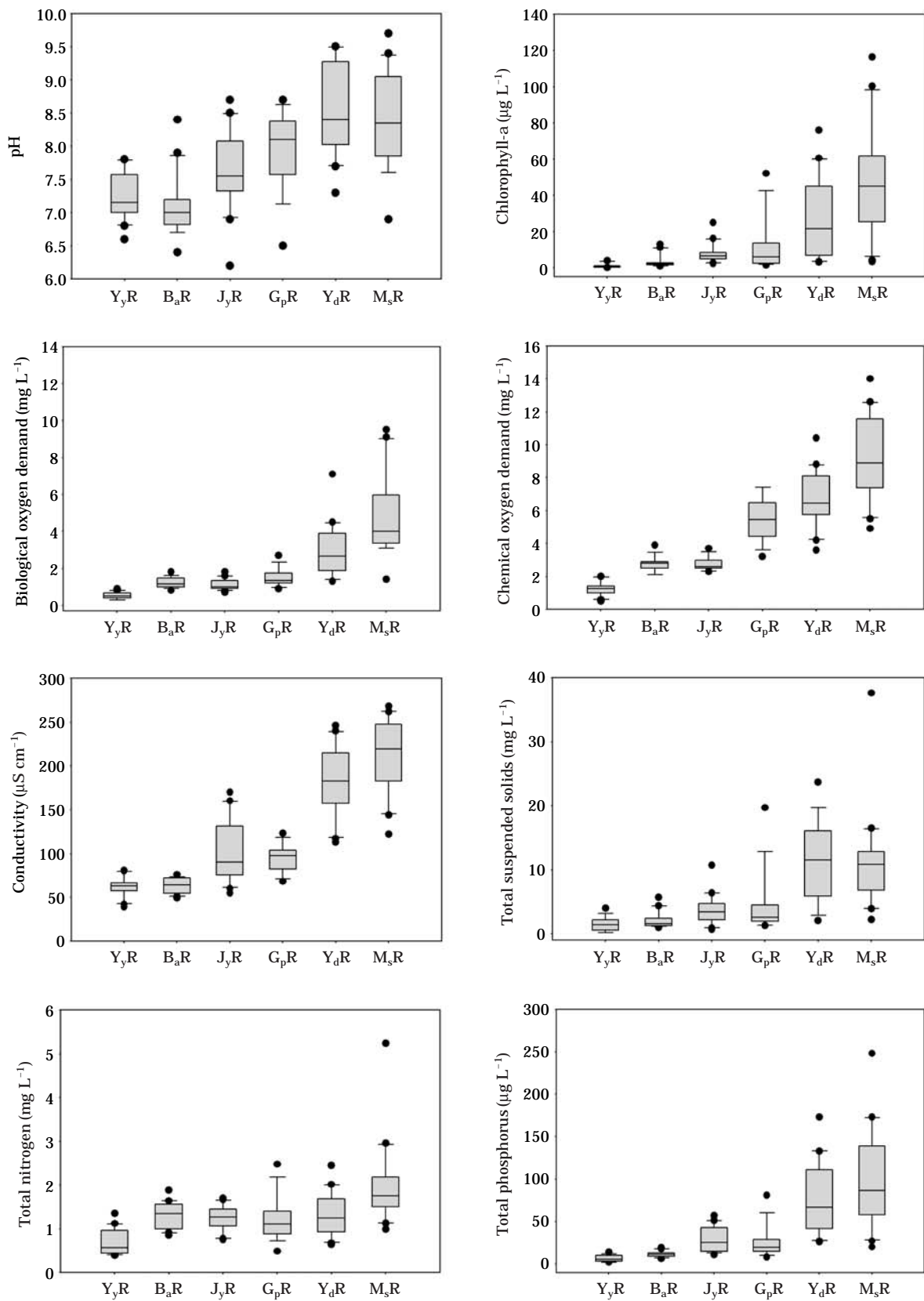


Fig. 3. Physico-chemical conditions in six reservoirs.

부영양호(TSI 지수: 50~70)로 나타나 호수별 영양 상태에 있어서 차이가 있는 것으로 분석되었다(Fig. 2). 호수별 부영양도 분석결과, TSI (TP) 값은 양양호(Y_yR), 부안호(B_aR), 진양호(J_yR), 금풍지(G_pR), 예당지(Y_dR), 마산지(M_sR)의 순으로 갈수록 증가하는 것으로 분석되었으며, TSI (Chl-*a*) 값도 이와 유사한 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 한편, 8개의 이·화학적 수질변수를 대상으로 각 인공호별 수질 특성을 분석한 결과, 유기물 오염 정도를 판단하는 수질 변수인 BOD, COD와 수체 내 영양염류 상태를 반영하는 TP, TN에서 모두 영양상태가 빈영양-중영양-부영양 상태로 진행될수록 그 수치가 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 COD에서 뚜렷한 증가 양상을 확인할 수 있었다. 수소이온농도(pH)는 6.2~9.7 사이의 범위를 보였으며, 빈영양호인 부안호와 양양호에서는 약 7.0~7.2, 중영양호인 금풍지와 진양호에서는 약 7.6~7.9의 중성상태를 보인 반면, 부영양호인 마산지와 예당지에서는 약 8.4~8.5의 약 알칼리성의 특성을 보여 영양단계 증가함에 따라서 pH 값도 증가하는 것으로 나타났다. 전기전도도(EC)는 39~268 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 부안호와 양양호에서 평균 63 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 낮은 값을 보였으며, 금풍지가 94 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 진양호가 103 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 예당지가 183 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 마산지는 225 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 순으로 전기전도도 역시 부영양화 단계가 높아질수록 수치가 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3).

영양염류인 TN과 TP 역시 부영양화에 따른 증가양상을 확인할 수 있었으며, TN보다는 TP에서 비교적 뚜렷하게 수치 증가 경향을 보였다. 이는 우리나라에서 인공호를 비롯한 대부분의 수계 내 질소(Nitrogen)의 농도가 매우 높게 존재하고 있다는 이전 연구(Lee and An, 2009)

의 부합되는 결과로 각 호수 별 TN의 농도에 있어서 큰 차이를 보이지 않는 이유로 사료되었다. 반면 1차 생산력의 제한인자로 작용하는 인(P)은 부영양화 상태로 진행될수록 농도가 빠르게 상승하는 것으로 나타났다. 총부유물질(TSS)의 평균농도는 마산지와 예당지를 제외한 나머지 호수에서 큰 차이를 보이지 않았으나, 최대값은 호수의 빈-중-부영양도에 따라 극명하게 증가하는 양상을 보였다. 호수 내 1차 생산력을 대별하는 엽록소-*a*(Chl-*a*)는 양양호에서 1.0 $\mu\text{g L}^{-1}$, 부안호 4.1 $\mu\text{g L}^{-1}$, 진양호 7.6 $\mu\text{g L}^{-1}$, 금풍지 11.6 $\mu\text{g L}^{-1}$, 예당지 27.1 $\mu\text{g L}^{-1}$, 마산지 38.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 순으로 나타나 호수 별로 인(P)의 농도가 증가함에 따라 Chl-*a*의 농도도 동일하게 증가하는 것으로 분석되었다(Kimmel and Groeger, 1984).

2. 어류분포 특성 및 우점도 특성

조사 대상인 6개 인공호에 대한 어류상 분석 결과, 총 47종 26,226개체가 채집되었으며, 양양호, 부안호는 각각 9종, 12종이 출현하였고, 금풍지, 마산지는 각각 7종, 15종, 진양호 및 예당지는 29종, 32종이 출현하여 예당지에서 가장 많은 종이 출현한 반면, 금풍지에서 가장 적은 종이 출현한 것으로 나타났다(Table 1). 이와 같은 결과는 호수면적 크기가 증가할수록 더 많은 종이 출현하였으며, 이와 더불어 부영양화된 호수일수록 서식하는 어류의 종과 개체수가 상대적으로 높은 것으로 분석되어 어류군집이 물리적인 서식지와 이·화학적인 수질에 영향을 받는 것으로 사료되었다(Fig. 4a). 6개 전체 인공호에서 채집된 어류 중 우점종은 피라미로서, 전체 채집된 개체수의 24.1%의 높은 상대풍부도를 나타냈다. 호수별 우점종을 확인한 결과, 빈영양호인 양양호에서는 참갈겨니

Table 1. Fish fauna and compositions along with the tolerance guilds (To.G.) and trophic guilds (Tr.G.) in six reservoirs.

Species name	To.G.	Tr.G.	Ex.S.	Sampling reservoirs						TNI
				Y _y R	B _a R	J _y R	G _p R	Y _d R	M _s R	
Cyprinidae										
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O				3	1	8	17	29
<i>Carassius auratus</i>	TS	O		38	6	6		1,083	453	1,586
<i>Carassius cuvieri</i>	TS	O	Y			14	1	67	667	749
Acheilognathinae										
<i>Rhodeus ocellatus</i>	IS	O						1,667	302	1,969
<i>Rhodeus uyekii</i>	IS	O						548	17	565
<i>Rhodeus notatus</i>	IS	O				1		172		173
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	IS	O				341		10		351
<i>Acheilognathus koreensis</i> *	IS	O				6				6
<i>Acheilognathus yamatsutae</i> *	IS	O				29		1		30
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	IS	O				163				163
<i>Acanthorhodeus macropterus</i>	IS	O				93		33		126
<i>Acanthorhodeus gracilis</i> *	IS	O						36		36

Table 1. Continued.

Species name	To.G.	Tr.G.	Ex.S.	Sampling reservoirs						TNI	
				Y _y R	B _a R	J _y R	G _p R	Y _d R	M _s R		
Gobioninae											
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O			13	65		1,846	2,239	4,163	
<i>Pungtungia herzi</i>	IS	I		8	12	21				41	
<i>Squalidus gracilis majimae</i> *	SS	I			126	322	3			451	
<i>Squalidus japonicus coreanus</i> *	TS	O			10	156				166	
<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> *	IS	O				28				28	
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I				231				231	
<i>Hemibarbus longirostris</i>	IS	I						1		1	
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I				20		35		55	
<i>Abbottina rivularis</i>	TS	O						13		13	
<i>Abbottina springeri</i> *	TS	O						86		86	
Leuciscinae											
<i>Rhynchocypris steindachneri</i>	SS	I		15						15	
Danioninae											
<i>Aphyocypris chinensis</i>	TS	O						4		4	
<i>Zacco koreanus</i> *	SS	I		2,219	39					2,258	
<i>Zacco platypus</i>	TS	O		424	402	3,350	135	672	1,337	6,320	
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	TS	C						2		2	
Cultrinae											
<i>Erythroculter erythropterus</i>	TS	C				541				541	
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	TS	O				535		64	2,117	2,716	
Cobitidae											
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	O					3	1		4	
<i>Cobitis lutheri</i>	IS	I				42		30		72	
Bagridae											
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	TS	I			3	2		12	47	64	
Siluridae											
<i>Silurus asotus</i>	TS	C		8		1		1		10	
Osmeridae											
<i>Hypomesus nipponensis</i>	IS	I		14	11	69		72	120	286	
<i>Plecoglossus altivelis altivelis</i>	IS	H				149				149	
Adrianichthyidae											
<i>Oryzias sinensis</i>	TS	O						101	32	133	
Centropomidae											
<i>Siniperca scherzeri</i>	SS	C		1	47					48	
<i>Coreoperca herzi</i> *	SS	C		28		1				29	
Centrarchidae											
<i>Lepomis macrochirus</i>	TS	I	Y			739				739	
<i>Micropterus salmoides</i>	TS	C	Y			456	895	36		1,387	
Odontobutidae											
<i>Odontobutis platycephala</i> *	SS	C			1			1		2	
<i>Odontobutis interrupta</i> *	IS	C						5	5	10	
Gobiidae											
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	IS	I						19		19	
<i>Rhinogobius giurinus</i>	TS	O						70	22	92	
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I			77	128	51	21	23	300	
<i>Tridentiger brevispinis</i>	IS	I				1				1	
Channidae											
<i>Channa argus</i>	TS	C						2	5	7	
Total number of species					9	12	29	7	32	15	47
Total number of individuals					2,755	747	7,513	1,089	6,719	7,403	26,226

To.G.: tolerance guild (TS: tolerant species, IS: intermediate species, SS: sensitive species), Tr.G.: trophic guild (C: carnivore, H: herbivore, I: insectivore, O: omnivore), Ex.S.: exotic species, Y_yR: Yangyang reservoir, B_aR: Buan reservoir, J_yR: Jinyang reservoir, G_pR: Geumpung reservoir, Y_dR: Yedang reservoir, M_sR: Masan reservoir, *: Korean endemic species, TNI: total number of individuals

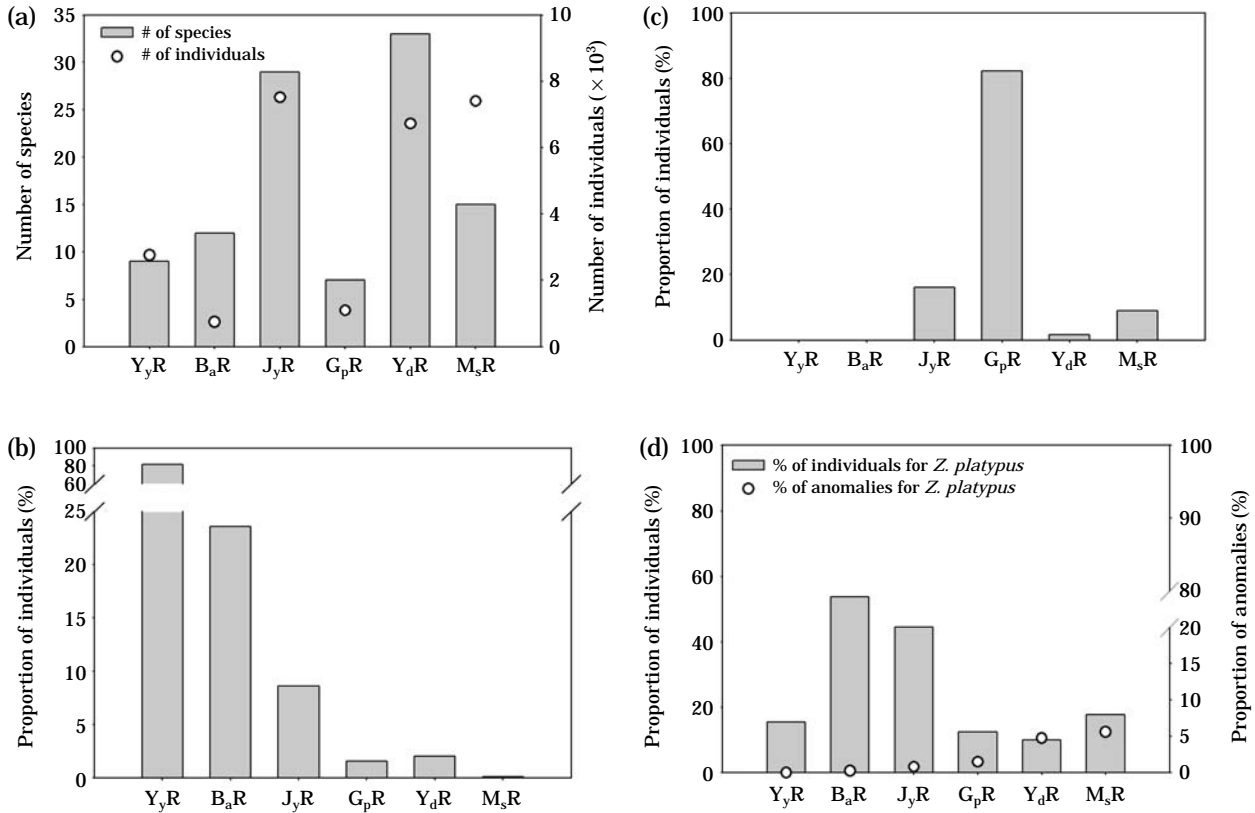


Fig. 4. Fish fauna analysis in six reservoirs. (a) the number of species and individuals, (b) proportion of individuals for Korean endemic species, (c) proportion of individuals for exotic species, and (d) proportion of individuals and anomalies for *Zacco platypus*.

(*Zacco koreanus*)가 80.5%의 출현을 보여 우점종으로 확인되었으며, 피라미가 15.4%로 아우점종으로 확인되었다. 부안호에서는 피라미가 53.8%로 우점종으로 확인되었으며, 긴물개 (*Squalidus gracilis majimae*)가 16.9%로 아우점종으로 확인되었다. 중영양호인 진양호에서는 우점종으로 피라미가 44.6%, 아우점종으로 블루길 (*Lepomis macrochirus*)이 9.8%로 확인되었다. 금풍지에서는 배스가 82.2%의 높은 출현율을 보이는 것으로 확인되었으며, 피라미가 12.4%로 아우점하는 것으로 나타났다. 부영양호인 예당지에서는 참붕어가 27.5%, 흰줄납줄개 (*Rhodeus ocellatus*)가 24.8%로 우점하고 있는 것으로 확인되었다. 마산지에서도 우점종은 참붕어로서 30.2%의 출현율을 보였으며, 치리가 28.6%로 아우점하고 있는 것으로 확인되었다. 한편, 부영양도가 높을수록 높은 상대풍부도를 보일 것으로 예상된 피라미가 부영양호인 예당지와 마산지에서 상대적으로 낮은 출현율을 보였는데 이는 다른 호수들에 비하여 다른 내성종의 상대풍부도가 높게 나타났으며, 특히 예당지에서는 흰줄납줄개와 각시붕어 등의 중간

종의 상대풍부도 또한 높았기 때문에 이와 같은 결과를 보인 것으로 사료되었다.

전체 채집된 어종 중 한국고유종 (Korean endemic species)은 전 호수에서 출현하였으며, 진양호와 예당지에서 6종으로 가장 많은 종이 출현하였고, 금풍지와 마산지에서 1종이 출현하여 호수별로 차이를 보였다. 그러나 고유종의 개체수 비율 (Proportion of individuals)을 비교한 결과 양양호에서 약 81.6%로 가장 높은 수치를 나타냈으며, 부안호 23.6%, 진양호 7.2%, 금풍지 0.3%, 예당지 2.0%, 마산지 0.1% 순으로 나타나 부영양화가 진행될수록 고유종의 개체수는 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 4b). 한편, 외래종 (Exotic species)은 떡붕어 (*Carassius cuvieri*), 블루길, 배스 등 3종이 출현하였으며, 빈영양상태를 보이는 부안호와 양양호에서는 전혀 채집되지 않았다 (Fig. 4c). 출현한 외래종 중 “생태계교란야생동물”로 지정된 배스는 부안호, 양양호, 마산지를 제외한 나머지 호수에서 모두 출현하였으며, 그 중 금풍지에서 82.2%의 높은 상대풍부도를 보여, 배스에 의한 교란이 심각한 것으로 사료된

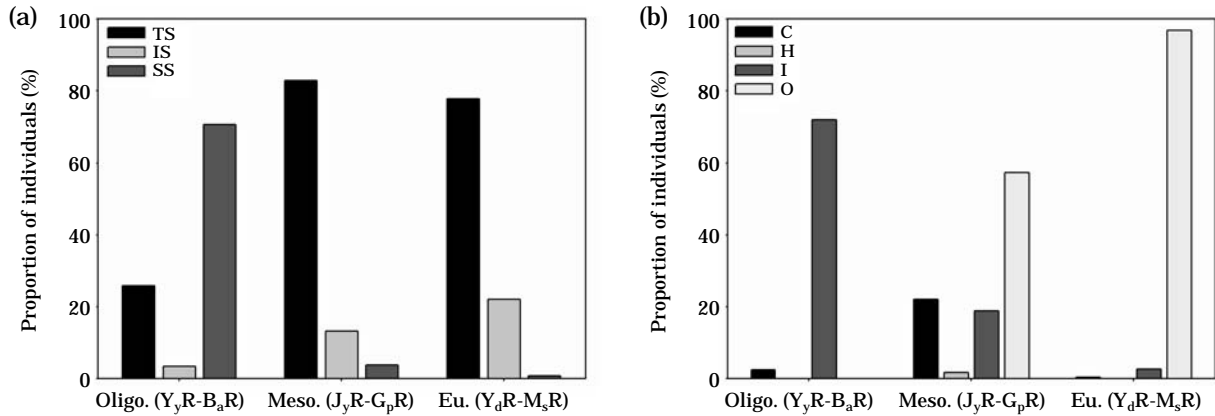


Fig. 5. Tolerance and trophic guild analysis depending on different trophic states; (a) tolerance guild analysis, and (b) trophic guild analysis. The abbreviations are as follows; TS=tolerant species, IS=intermediate species, SS=sensitive species, C=carnivores, H=herbivores, I=insectivores, and O=omnivores.

다. 한편, 베스 이외의 생태계교란야생동물인 블루길은 진양호에서만 채집되었으며, 9.8%의 상대풍부도를 보였다.

3. 개체군의 내성도 길드 및 섭식길드 분석

내성도 길드(Tolerance guilds)에 따른 어류 분석에 의하면, 수환경의 물리적 교란이나 이·화학적 수질의 질적 저하에 따른 오염에 민감하게 반응하여 감소하는 특성을 보이는 민감종(Sensitive species, SS)의 개체수 비율은 빈영양 상태인 양양호에서 약 82.1%로 조사 대상 호수 가운데 가장 높게 나타났으며, 불안호 28.5%를 제외한 중영양 이상의 영양 상태인 나머지 4개 호수에서 5% 미만으로 나타나 부영양화가 진행될수록 민감종은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 달리, 수환경의 오염이 진행됨에 따라 증가하는 특성을 나타내는 내성종(Tolerant species, TS)의 개체수 비율은 전반적으로 약 70% 이상으로 높게 나타난 반면, 빈영양 상태인 양양호에서 약 17.1%로 가장 낮게 나타나 민감종과는 서로 반대 경향을 보였다(Fig. 5a). 한편, 섭식 길드(Trophic guilds)에 따른 어류 분석에 의하면, 잡식종(Omnivore, O)의 개체수 비율이 약 81.3%, 육식종(Carnivore, C) 15.2%, 충식종(Insectivore, I) 3.5%로 나타나 전반적으로 잡식종이 매우 우세한 현상을 보였다. 각 호수별로 나누어 분석하였을 때, 금풍지에서 육식종의 개체수 비율이 약 95%로 나타나 금풍지에서는 육식종이 우점하고 있음을 보였는데, 이는 생태계 교란에 커다란 영향을 미치는 위해성 외래 육식종인 베스 때문으로 사료된다. 초식종(Herbivore, H)은 총 6개 조사 지점 가운데 진양호에서 은어(*Plecoglossus altivelis altivelis*) 한 종만이 채집되었다. 충식종의 개

체수 비율은 빈영양 상태인 불안호와 양양호에서 약 35% 이상으로 나타났으며, 특히 양양호에서는 약 81.9%로 가장 높은 값을 나타내 섭식 길드도 내성도 길드의 특성을 잘 반영하고 있음을 보였다(Fig. 5b). 이런 결과는 호수의 부영양화가 진행될수록 내성종과 잡식종의 출현빈도가 높아지는 양상을 대별하며, 유기물 오염, 서식지 파괴 등의 서식지의 물리·화학적 질적 저하에 따라 내성종과 잡식종의 어종이 증가한다는 Karr (1981)의 연구 및 US EPA (1991)의 보고와 일치하는 것으로 나타났다.

4. 피라미 개체군의 전장-체중 관계 분석

조사 대상 6개 인공호에서 채집된 피라미 개체군의 전장-체중 관계 분석에 따르면, 빈영양호(Y_yR, B_aR) 회귀계수 b값은 2.77~2.79의 범위를 보였고, 중영양호(J_yR, G_pR)와 부영양호(Y_aR, M_sR)의 회귀계수 값은 각각 3.07~3.17, 3.15~3.21로 나타나 영양단계(Trophic gradient)가 상승함에 따라 성장도를 나타내는 회귀계수 b값이 증가하였다. 이와 같은 결과는 부영양화가 진행될수록 피라미 개체군이 성장하는 데 있어 유리한 조건을 제공하는 것으로 사료되었다. 시기별로 전장-체중 관계식을 비교해 본 결과, 양양호(Y_yR)의 회귀계수 b값은 장마전기에 2.79에서 장마후기에 2.85로 확인되어 장마후기에 증가하였다. 불안호(B_aR) 역시 장마전기에 2.81에서 장마후기에 2.97로 나타나 양양호와 유사한 양상을 보였다. 진양호(J_yR)의 b값은 3.21에서 2.79로 장마후기에 크게 감소한 것으로 나타났는데, 이는 장마전기에 출현하지 않은 20~50 mm의 전장에 해당하는 당년생 어린 개체들이 다수 출현한 것으로 나타나 산란에 의한 영향으로 판단된

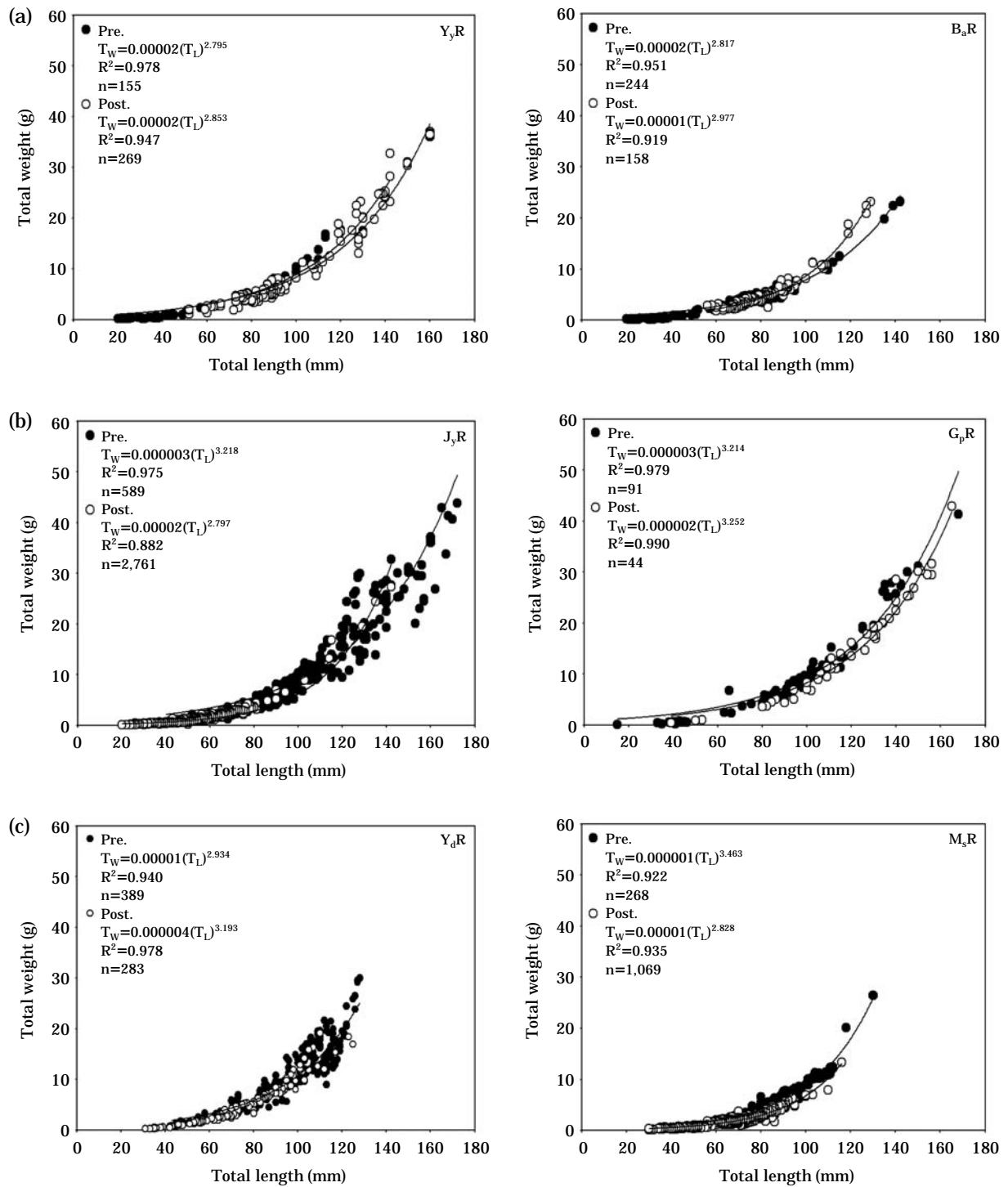


Fig. 6. Length-weight relations for *Zacco platypus* along the trophic states; (a) oligotrophic reservoirs (Y_yR, B_aR), (b) mesotrophic reservoirs (J_yR, G_pR), and (c) eutrophic reservoirs (Y_dR, M_sR). The abbreviations are as follows; Pre=premonsoon, Post=postmonsoon, T_W=total weight, and T_L=total length.

다. 금풍지 (G_pR)는 3.21에서 3.25로 확인되어 시기별 큰 차이를 보이지 않았으며, 예당지 (Y_dR)에서는 2.93에

서 3.19로 장마후기에 b값이 증가하였다. 마산지 (M_sR)는 진양호와 유사한 양상을 나타냈는데, 장마전기에 3.46에

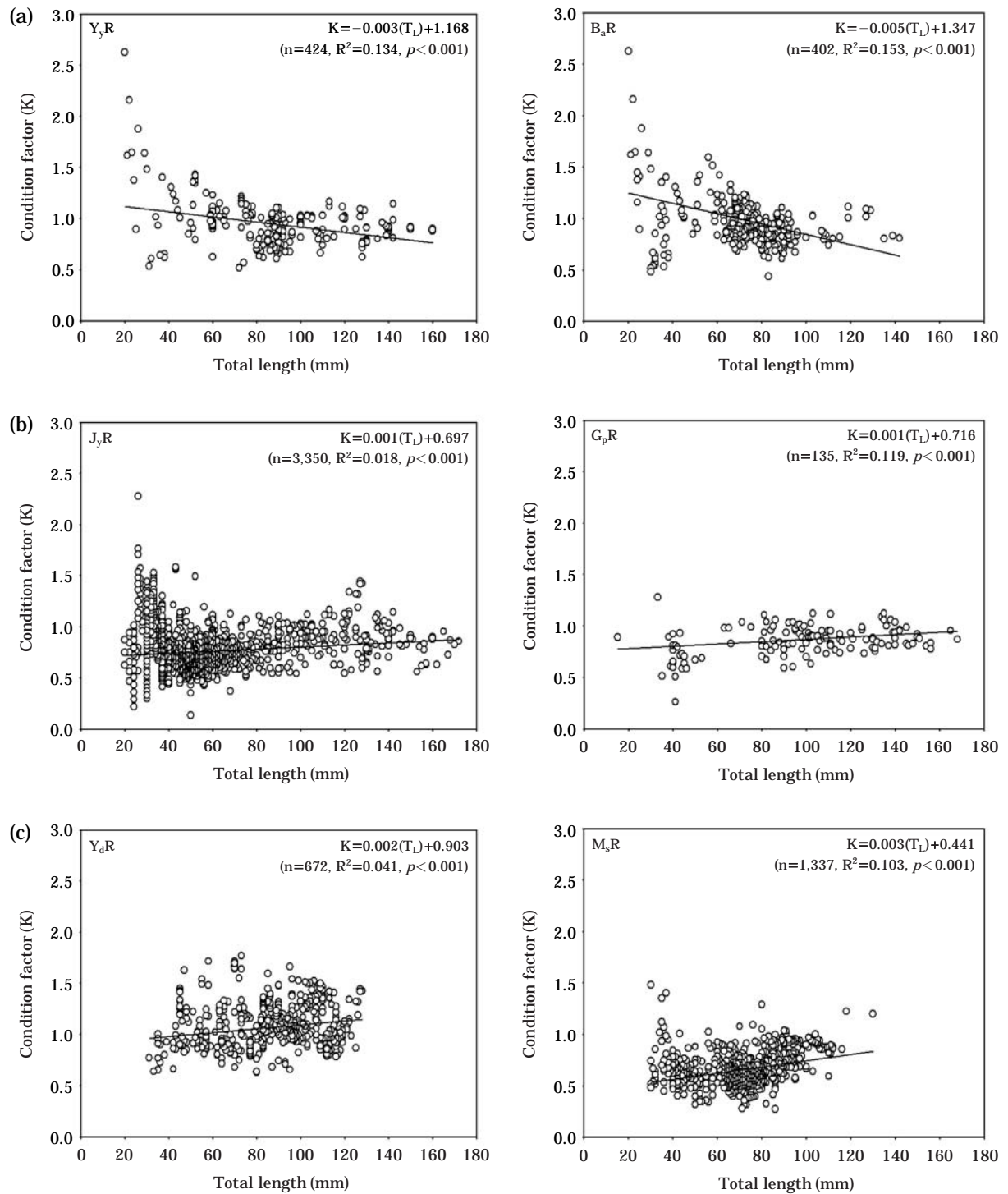


Fig. 7. Regression analysis of condition factor (K) against total length (T_L) in *Zacco platypus* along the trophic gradients; (a) oligotrophic reservoirs (Y_yR, B_aR), (b) mesotrophic reservoirs (J_yR, G_pR), and (c) eutrophic reservoirs (Y_dR, M_sR). The abbreviation is as follow; T_L =total length.

서 장마후기에 2.82로 크게 감소하였다. 이 역시 장마전기에 출현하지 않은 30~50 mm의 전장에 해당하는 당년

생 어린 개체들이 다수 출현하였기 때문으로 사료된다 (Fig. 6). 이를 통하여 본 연구의 조사 대상 6개 인공호에

서 서식하는 피라미 개체군에 대한 전장-체중 수식은 다음과 같다.

$$Y_yR : \log T_w = -4.699 + 2.790 \times \log T_L$$

$$B_aR : \log T_w = -4.523 + 2.773 \times \log T_L$$

$$J_yR : \log T_w = -5.301 + 3.075 \times \log T_L$$

$$G_pR : \log T_w = -5.398 + 3.172 \times \log T_L$$

$$Y_dR : \log T_w = -5.301 + 3.149 \times \log T_L$$

$$M_sR : \log T_w = -5.523 + 3.206 \times \log T_L$$

한편, Jang *et al.* (2007)의 연구에 따르면, 황성호의 피라미 개체군의 회귀계수 *b*값은 3.09~3.35로 알려졌으며, 한강수계의 피라미 개체군의 *b*값은 3.3~3.6, 북한강수계의 피라미 개체군의 *b*값은 3.1~3.6의 범위를 보였다(최, 미발표자료). 황성호의 영양상태(Trophic state)를 알아보기 위해 물환경정보시스템에서 2007년부터 2010년까지 측정된 이·화학적 수질자료를 분석한 결과, 영양염류인 총인(TP)은 평균 35.25 μg L⁻¹ (18.3~51.7), 엽록소-*a*(Chl-*a*)는 평균 5.525 μg L⁻¹ (3.6~6.6)였으며, 부영양도 지수(TSI) 산정 결과, TSI(TP): 55.6, TSI(Chl-*a*): 47.3으로 나타나 중-부영양 상태로 확인되었다. 이는 본 연구의 조사 대상 6개 인공호 가운데 진양호와 가장 유사한 이·화학적 수질 특성을 보였으며, 회귀계수 *b*값의 범위를

비교한 결과, 중-부영양 상태의 4개 호수(J_yR, G_pR, Y_dR, M_sR)들과 비슷한 범위(3.075~3.206)로 나타났으나 한강수계와 북한강수계에서 서식하는 피라미 개체군에 비해서는 낮은 *b*값을 보여, 하천에서 서식하는 피라미 개체군과 성장 정도에 있어서 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

5. 피라미 개체군의 비만도 지수(K) 분석

비만도 지수(Condition factor, K)산정 결과 분석에 의하면, 6개 인공호 전체에서 최소 0.275에서 최대 2.625의 분포범위를 나타냈으며, 호수별 평균값은 0.653~1.06의 범위를 보여 서로 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 전장과 비만도 지수와의 관계로부터 얻어진 기울기(Slope) 값을 분석한 결과, -0.005~0.003의 범위로 나타났으며, 빈영양호(Y_yR: -0.003, B_aR: -0.005)에서는 음의 기울기 값을 보여, 피라미 개체군이 서식하기에 다소 불리한 환경으로 판단되었다. 반면, 중영양호(J_yR: 0.001, G_pR: 0.001)와 부영양호(Y_dR: 0.002, M_sR: 0.003)에서는 양의 값을 나타내 서식환경이 양호한 것으로 판단되었으며, 이는 위의 전장-체중 관계식의 분석 결과와 유사한 양상을 보여 부영양화가 진행될수록 피라미 개체군이 서식함에 있어 성장에 유리한 서식환경을 제공하는 것으로 사료된다(Fig. 7). 이러한 결과는 TSI(TP), TSI(Chl-*a*) 및 8개의

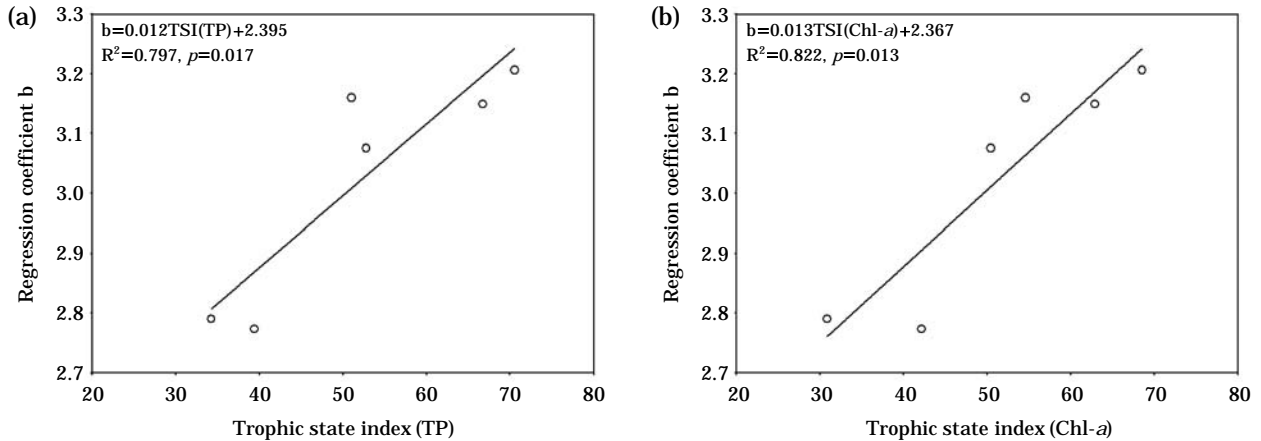


Fig. 8. Regression analysis on regression coefficient *b* of length-weight relations against the trophic state index (TSI) based on: (a) total phosphorus (TP) and (b) chlorophyll-*a* (Chl-*a*).

Table 2. Pearson's correlation coefficients (*r*) and its probability (*p*, *n*=6) of regression coefficient *b*-value of length-weight relationship to chemical parameters and trophic state index (TSI).

	pH	BOD	COD	EC	SS	TN	TP	Chl- <i>a</i>	TSI (TP)	TSI (TN)	TSI (Chl- <i>a</i>)	
b-value	<i>r</i>	0.906	0.682	0.803	0.785	0.699	0.625	0.759	0.738	0.893*	0.647	0.907*
	<i>p</i>	0.013	0.135	0.054	0.065	0.122	0.185	0.080	0.094	0.017	0.165	0.013

*: Correlation is significant at the 0.05 level.

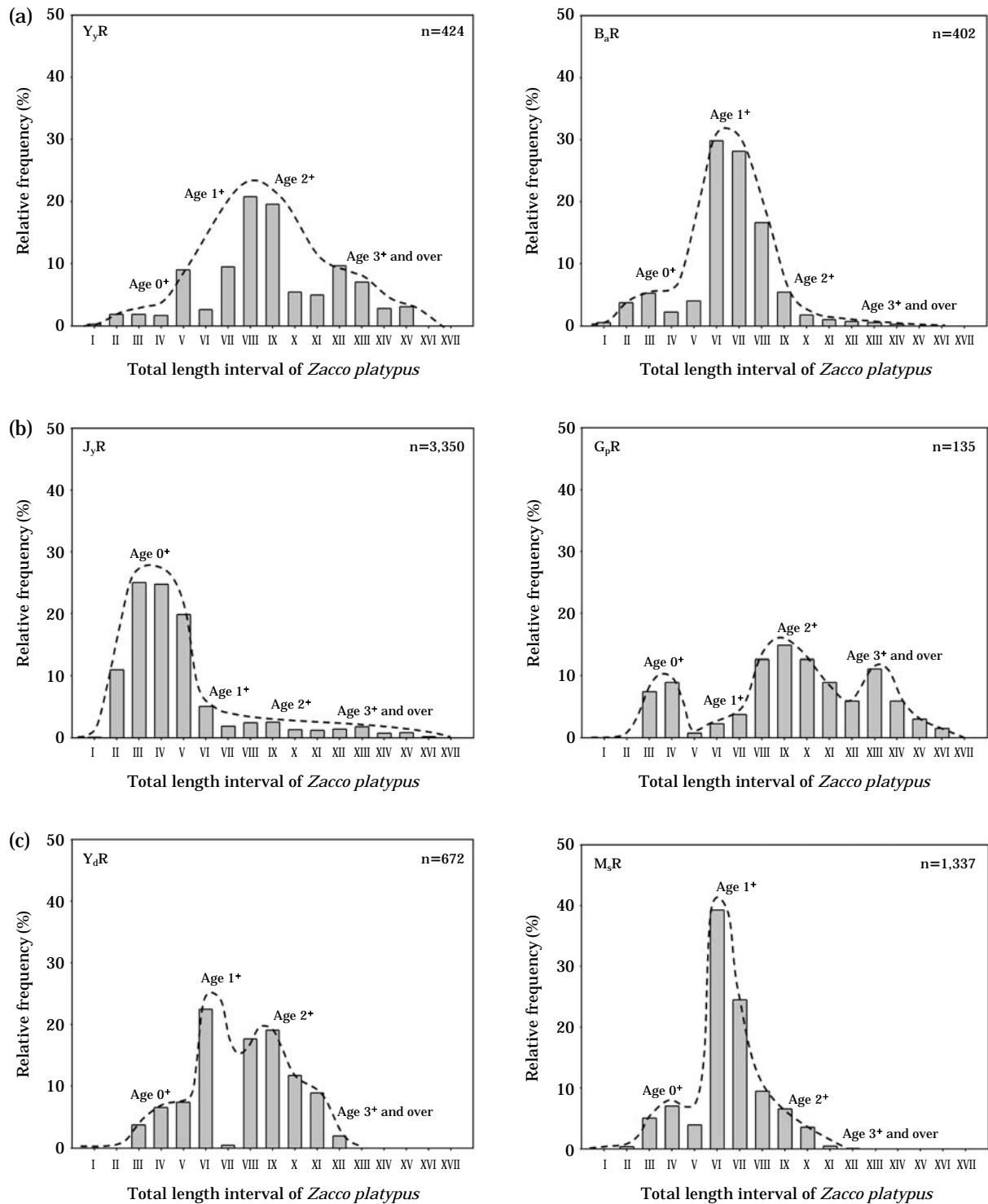


Fig. 9. The total length distribution (I=11 ~ 20 mm, XVII=171 ~ 180 mm) of *Zacco platypus* along the trophic state gradients; (a) oligotrophic reservoirs (Y_yR, B_aR), (b) mesotrophic reservoirs (J_yR, G_pR), and (c) eutrophic reservoirs (Y_aR, M_sR).

이 · 화학적 수질 요인들과 전장-체중 관계식에서 얻어진 회귀계수 *b*값간의 연관성을 확인하기 위해 상관분석한

결과에서도 동일한 양상을 보였다. 회귀계수 *b*값은 TSI (TP)와의 상관분석에서 $R^2=0.797$ ($p=0.017$)으로 나타났

으며, TSI (Chl-*a*)와의 상관분석에서도 $R^2=0.822$ ($p=0.013$)로 두 항목 모두 95% 신뢰구간에서 높은 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 결론적으로 부영양화가 피라미 개체군의 성장도를 증가시키는 것으로 판단되었다 (Table 2, Fig. 8).

호수별로 채집된 피라미 개체들 중 비정상 개체의 비율을 확인한 결과 (Fig. 4d), 빈영양호(Y_yR : 0%, B_aR : 0.25%), 중영양호(J_yR : 0.81%, G_pR : 1.48%), 부영양호(Y_dR : 4.76%, M_sR : 5.61%)로 나타나 호수의 영양단계 (Trophic gradient)가 상승함에 따라 비정상개체가 증가하는 경향을 보였다. 호수별 최대 전장-체중 값을 비교한 결과 중영양호(J_yR , G_pR)에서 170 mm, 45 g로써 가장 높은 값을 나타냈으며, 빈영양호(Y_yR , B_aR): 160 mm, 40 g, 140 mm, 25 g, 부영양호(Y_dR , M_sR)에서 130 mm, 30 g으로 가장 낮은 값을 보여, 영양 상태 별로 각기 다른 양상을 나타냈다 (Fig. 9).

상기 연구결과를 종합해 볼 때, 호수의 부영양화는 피라미 개체군이 서식하기에 적절한 환경을 제공하며, 호수의 영양 상태 (Trophic state)에 따른 피라미 개체군의 성장도 및 비만도 지수는 내성 및 섭식길드특성을 그대로 반영하였으나, 부영양화가 피라미 개체군의 건강성에 미치는 부정적인 영향을 확인하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 효율적인 인공호의 수질 관리를 위해서는 추후에 어종 별 화학적 수질내성도 (Chemical gradient) 평가 및 각 연구대상 어종의 타 어종들과의 길드 공존성 관계 분석과 같은 추가 연구들을 통하여 부영양화 특성에 따른 어류 개체군의 변화 규명이 더 수행되어야 할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 인공호의 영양 단계에 따른 피라미 개체군의 전장-체중 관계 및 비만도 지수 (K)의 차이를 알아보기 위해 2008년~2010년까지 부안호, 양양호, 진양호, 금풍지, 예당지 및 마산지 등의 6개 인공호를 대상으로 실시하였으며, 광범위한 분포 특성과 섭식 특성을 보이는 피라미 (*Zacco platypus*)를 본 연구의 대상 어종으로 선정하였다. 총인 (TP)과 엽록소-*a* (Chl-*a*)를 이용한 영양상태 지수 (TSI) 분석 결과 양양호와 부안호는 빈영양 (30~40), 진양호와 금풍지는 중영양 (40~50), 예당지와 마산지는 부영양 (50~70)상태로 나타났다. 6개 호수에서 총 47종 26,226개체의 어류가 채집되었으며, 빈영양호 (양양호, 부안호)에서는 민감종이 우세한 현상을 보였다. 한편, 중영

양호 (진양호, 금풍지)와 부영양호 (예당지, 마산지)에서는 내성종이 우세한 것으로 분석되어 호수의 영양 상태에 따라 우세종의 내성특성에 차이를 보이는 것으로 나타났다. 전장-체중 관계 분석 결과에 따르면, 회귀계수 *b*값은 중영양호 (3.07~3.17)와 부영양호 (3.15~3.21)에 비해 빈영양호 (2.77~2.79)에서 낮은 값을 보였다. 이러한 결과는 호수의 영양상태가 피라미 개체군의 성장도에 영향을 주는 것으로 사료된다. 전장에 따른 비만도 지수 (K) 관계 분석 결과 중영양호와 부영양호에서는 양의 기울기를 보인 반면, 빈영양호에서는 음의 기울기를 나타내 호수의 영양상태에 따라 차이를 보였다. TSI (TP), TSI (Chl-*a*)와 회귀계수 *b*값의 상관관계를 분석한 결과 $b=0.012*TSI$ (TP)+2.395 ($R^2=0.797$, $p=0.017$), $b=0.013*TSI$ (Chl-*a*)+2.367 ($R^2=0.822$, $p=0.013$)으로 나타나 높은 상관관계를 보였다. 한편, 부영양화가 진행될수록, 비정상개체의 비율이 증가하는 것으로 나타났다.

결론적으로, 전장-체중 관계와 비만도 지수 분석에 의한 피라미 개체군의 성장도는 영양염류나 식물플랑크톤의 생체량과 같은 영양상태를 반영하는 것으로 사료되며, 과도한 부영양화는 수환경의 오염을 초래하여 피라미 개체군의 성장과 건강도에 부정적인 영향을 미치는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project [과제명: 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발 (EW42-08-10)]의 지원으로 수행되었기에 이에 감사합니다.

인 용 문 헌

An, K.G. 2000. Articles: Monsoon inflow as a major source of In - Lake Phosphorus. *Korean Journal of Limnology* 33(3): 222-229.

Anderson, R.O. and R.M. Neumann. 1996. Length, weight and associated structural indices, p. 447-482. *In: Fisheries Techniques*, 2nd edition (Murphy, B.R. and D.W. Willis eds.). American Fisheries Society, Maryland, USA.

Anderson, R.O. and S.J. Gutreuter. 1983. Length weight and associated structural indices, p. 283-300. *In: Fisheries Techniques* (Johnson, L.A. ed.). American Fisheries Society, Maryland, USA.

Busacker, G.P., I.A. Adelman and E.M. Goolish. 1990. Grow-

- th, p. 363-377. *In: Methods for Fish Biology* (Schreck, C.B. and P.B. Moyle eds.). American Fisheries Society, Maryland, USA.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lake. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Choi, J.K., J.S. Choi, H.S. Shin and S.C. Park. 2005. Articles: Study on the dynamics of the fish community in the lake Hoengseong region. *Korean Journal of Limnology* **38**(2): 188-195.
- Choi, J.S. 2005. Fish fauna and community in Cheongpyeong reservoir. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 63-72.
- Choi, J.S. and J.K. Kim. 2004. Original Articles: Ichthyofauna and fish community in Hongcheon river, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **22**(3): 446-455.
- Choi, J.S., J.K. Kim, Y.S. Jang, K.Y. Lee, H. Ryu, J. Jeong and B. Kim. 2006. Articles: Characteristics of fish community on six lakes located in Gyeonggi. *Korean Journal of Limnology* **39**(2): 178-186.
- Choi, K.C., S.R. Jeon, I.S. Kim and Y.M. Son. 1989. Distribution map of Korean freshwater fishes. Korean Limnobiology Research Center. p. 2-202.
- Edwards, R.W. and D.T. Crisp. 1982. Ecological implications of river regulation in the United Kingdom, p. 843-865. *In: Gravel Bed Rivers* (Bathurst, J.C., R.D. Hey and C.R. Thorne, eds.). Fluvial Processes, Engineering and Management. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Jang, Y.S., J.S. Choi, K.Y. Lee, J. Seo and B. Kim. 2007. Articles: Length-weight relationship and condition factor of *Zacco platypus* in the lake Hoengseong. *Korean Journal of Limnology* **40**(3): 412-418.
- Jeon, S.R. 1980. Studies on the distributions of the Korean freshwater fishes. PhD thesis. Chungang University, Rep. Korea. p. 18-45.
- Jeon, S.R. 1982. Studies on fresh-water fish fauna in the rivers flowing into the East Sea. Academic Report of Nature Conservation **4**: 230-248.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Kent, W.T., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 2002. Reservoir limnology. Shingwang, p. 66-169.
- Kerr, S.R. and R.A. Ryder. 1988. The applicability of fish yield indices in freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography* **33**(4): 973-981.
- Kim, I.S. 1997. Illustrated Encyclopedia of Fauna & Flora of Korea. Vol. 37. Freshwater Fishes. Ministry of Education, Korea. Seoul, Rep. Korea. p. 133-520.
- Kim, I.S. and H.G. Kim. 1975. Articles: A study on the water pollution and its influence on the fish community in Jeonju-cheon Creek, Jeonrabug-do Province, Korea. *Korean Journal of Limnology* **8**: 7-14.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater Fishes of Korea. Kyohak Publishing Co., Ltd, Seoul, Rep. Korea. p. 1-465.
- Kim, I.S., M.K. Oh and K. Hosoya. 2005. A new species of cyprinid Fish, *Zacco koreanus* with redescription of *Z. temminckii* (Cyprinidae) from Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **17**(1): 1-7.
- Kim, J.K., J.H. Han and K.G. An. 2010. Articles: Tolerance range analysis of fish on chemical water quality in aquatic ecosystems. *Korean Journal of Limnology* **43**(4): 459-470.
- Kimmel, B.L. and A.W. Groeger. 1984. Factors controlling phytoplankton production in lake and reservoirs. U.S. EPA-440/5/84-001 277-281.
- Kong, K.H., J.H. Lee and K.G. An. 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.
- Krenkel, P.A., G.F. Lee and R.A. Jones. 1979. Effects of TVA impoundments on downstream water quality and biota, p. 289-309. *In: The Ecology of Regulated Streams* (Ward, J.V. and J.A. Stanford, eds.). Plenum Press, New York, USA.
- LeCren, E.D. 1951. The length-weight and condition in the seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch *Perca fluviatilis*. *Journal of Animal Ecology* **20**(2): 201-219.
- Lee, H.J. and K.G. An. 2009. The development and application of multi-metric water quality assessment model for reservoir managements in Korea. *Korean Journal of Limnology* **42**(2): 242-252.
- Macan, T.T. 1974. Freshwater ecology, 2nd ed. London: Longmans, viii. p. 343.
- Matuszek, J.E. 1978. Empirical predictions of fish yields of large north American lakes. *Transactions of the American Fisheries Society* **107**: 385-394.
- McConnell, W.J., S. Lewis and J.E. Olson. 1977. Gross photosynthesis as an estimator of potential fish production. *Transactions of the American Fisheries Society* **106**(5): 417-423.
- MEK (Ministry of Environment, Korea). 2001. The general report of investigation technique development for limnological environment in Korea, p. 28.
- Melack, J.M. 1976. Primary productivity and fish yields in tropical lakes. *Transactions of the American Fisheries Society* **105**(5): 575-580.
- Nelson, J.S. 1994. Fishes of the world (3rd ed.). John Wiley & Sons, New York, USA.
- Ney, J.J. 1993. Practical use of biological statistics, p. 137-

158. *In: Inland Fisheries Management of North America* (Kohler, C.C. and W.A. Hubert eds.). American Fisheries Society, Maryland, USA.
- Rada, R.G. and J.C. Wright. 1979. Factors affecting nitrogen and phosphorus levels in canyon Ferry reservoir, Monata, and its effluent waters. *Northwest Science* **53**(3): 213-220.
- Ryder, R.A. 1965. A method for estimating the potential fish production of north-temperature lakes. *Transactions of the American Fisheries Society* **94**: 214-218.
- Ryder, R.A. 1982. The morphoedaphic index-use, abuse, and fundamental concepts. *Transactions of the American Fisheries Society* **111**: 154-164.
- Ryder, R.A., S.R. Kerr, K.H. Loftus and H.A. Regier. 1974. The morphoedaphic index, a fish yield estimator-review and evaluation. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **31**: 663-688.
- Seo, J. 2005. Fish fauna and ecological characteristics of dark chub (*Zacco temminckii*) population in the mid-upper region of Gam Stream. *Korean Journal of Limnology* **38**(2): 196-206.
- US EPA. 1991. Technical support document for water quality-based toxic control. EPA 505-2-90-001. US. EPA, Office of Water, Washington D.C., USA.
- US EPA. 1998. Lake and Reservoir Bioassessment and Bio-criteria. EPA 841-B-98-007. US. EPA, Office of Water, Washington, D.C., USA.
- Yang, H.J., B.S. Chae and M.M. Nam. 1991. Articles: The ichthyofauna in autumn at upper reach of Hongchon River. *Korean Journal of Limnology* **24**(1): 37-44.

(Manuscript received 30 January 2012,
Revised 15 March 2012
Revision accepted 10 April 2012)