

영양염류, 투명도 및 엽록소를 이용한 인공호 영양상태,
경험적 모델 분석 및 변수들 간의 상호관계

안 광 국* · 김 재 경 · 이 상 재

충남대학교 생명과학부

Reservoir Trophic State and Empirical Model Analysis,
Based on Nutrients, Transparency, and Chlorophyll-*a* Along
with Their Relations Among the Parameters

Kwang-Guk An*, Jae-Kyeng Kim and Sang-Jae Lee

*School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University,
Daejeon 305-764, Korea*

Abstract – The purpose of this study was to determine trophic state, based on nutrients (TN, TP), transparency (SD), and chlorophyll-*a* (Chl) and identify their empirical relations of TN-Chl, TP-Chl and Chl-SD depending on the dataset used along with dynamics of conductivity and suspended solids. Analysis of trophic states showed that more than half of 36 reservoirs were judged as eutrophic-hypertrophic conditions depending on the trophic variables. Seasonal values of TP varied by nearly 500% and showed greater in August than any other months. In contrast, TN varied within less than 90% and all monthly mean values of TN were never fall less than 1.2 mg L⁻¹, indicating low seasonal variations and high ambient concentrations (eutrophic-hypertrophic state). Analysis of empirical relations in the trophic variables showed that transparency had greater functional relations with Chl ($R^2=0.31$, $p<0.001$) than TP ($R^2=0.15$, $p<0.001$) and TN ($R^2=0.20$, $p<0.001$). Ratios of TN : TP in the ambient water indicated that most reservoirs showed a potential phosphorous limitation on the algal growth. Thus, algal biomass, based on Chl values, was more regulated by phosphorous than nitrogen. Analysis of linear regression model, based on log-transformed annual mean values, showed that only 30% in the variation of Chl was explained by TP ($R^2=0.295$, $p=0.001$, $n=36$) and 15% by TN ($R^2=0.151$, $p=0.019$, $n=36$). However, linear regression model, based on individual system, showed that Chl-TP model had strong positive relations ($R^2=0.62$, $p=0.002$, $n=12$), whereas the model had no any relations ($p=0.892$, $n=12$). Overall, our data suggested that averaging effect in the empirical model developments may influence the significance in the statistical analysis.

Key words : empirical relation, average effect, nutrient, chlorophyll, seasonal variation

*Corresponding author: Kwang-Guk An, Tel. 042-821-6408,
Fax. 042-822-9690, E-mail. kgan@cnu.ac.kr

서 론

1990년대 이래 수자원 확보에 대한 필요성이 증가함에 따라 인공호의 부영양화 현상에 대한 다각적 연구는 활발히 진행되고 있다(김 등 1998; 김 2003). 특히, UNESCO에서는 1989년 자연호 및 인공호의 부영양화 조절(Ryding and Rast 1989)에 대한 연구 결과를 기점으로 하여 인공호와 자연호의 구조적, 기능적 차이점(Wetzel 1990)이 밝혀졌고, 수체의 부영양화 기작 규명(이 등 2000), 호수의 평가기법(Carlson 1976; 최 등 2006), 호수 내 관리기법(윤 등 2000; 허 등 2006; 이 등 2008) 및 수계관리기법(Ticehursta *et al.* 2008)에 대한 다양하고 폭넓은 연구가 이루어지고 있다. 우리나라에서도 대형 인공댐 및 농업용수 확보를 위한 저수지는 영양염류(특히, 질소, 인)의 유입으로 인한 엽록소 농도 증가(김 등 2004) 및 조류 대발생 빈도의 증가(김 등 2003; 박 등 2005b)가 빈번히 보고되고 있고, 이에 따른 산소농도 감소(박 등 2008) 및 수체 내 광투과도 감소(김 등 2007)를 가져와 부영양화 현상이 가중되고 있다.

우리나라 호수는 외국과는 달리 하절기의 집중 강우 기간에 급격한 수리수문학적 변동(손 등 1995; 박 등 2005a)에 의한 영양염류 농도의 변이(An 2000c) 및 수계로부터 무기성 부유물(Inorganic solids)의 역동성 때문에 차별적 호수 관리가 필요한 상황이다(최 등 2006). 기존의 우리나라 호수 연구들에 따르면, 수체 내 수질 특성은 하절기 강우 특성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 연 강수량의 2/3 이상이 집중되는 하절기 집중강우는 유역으로부터 급격한 유량증가를 가져오며 수체에 음적, 양적 변화를 야기시키는 것으로 보고되어 있다(An and Kim 2003). 특히 수체의 수온성층화 현상(Thermal stratification)을 감소하여 수체혼합을 유도하고(An 2000c), 수체류 시간 감소(김 등 2004) 및 이온희석 현상을 가져와 수질 향상에 기여한다(An and Kim 2003; 김과 김 2004). 한편, 하절기에 호수의 공간적 이질성 특성(Spatial heterogeneity)은 극부적으로 온도 상승에 의한 조류생체량 증가 및 수계로부터의 높은 인부하(P loading)를 가져와 호수의 부영양화에 기여하는 것으로 보고되고 있다. 또한 호수에서는 하절기에 총질소(TN)는 일부 희석되어 증가하지 않지만, 조류생체의 핵심 요소인 총인(TP)의 농도는 강우 전기인 갈수기에 비해 30~50%까지 증가하는 것으로 보고하고 있다. 특히 유입된 인(P)은 장마가 끝난 9~10월에 향상된 광조건 및 증가된 수체류시간으로 인해 조류발생을 가져오는 것으로 알려져 있다.

우리나라 수체에서 영양염류중의 인은 부영양화 평가에 가장 중요한 핵심 변수로서 서(1998)는 총주호, 대청호, 안동호가 총인 농도에 의거하여 부영양화상태를 진단하였다. 허 등(1995)은 낙동강 수계 연구에서 하절기 평균 엽록소(Chl) 농도가 U.S EPA(1976)와 Forsberg and Ryding(1980)의 부영양상태 기준을 상회하는 것으로 보고하여 하절기의 영양염류 유입 및 계절적 변동성을 제시하였다. 이런 다각적 연구들은 기본적으로 수체 내에서의 총인, 총질소, 엽록소 및 광조건(투명도)에 대한 계절적 역동성을 강조하고 있으나 다양한 호수에서의 경험적 모델에 대한 연구 및 연구대상 호수의 수에 따른 모델결과의 변이성에 대한 비교 평가는 극히 미미한 실정에 있다.

외국에서는 영양상태 특성 및 호수 내 부영양화의 구조적 분석법으로서 총인-엽록소(TP-Chl), 투명도-총인(SD-TP), 투명도-엽록소(SD-Chl)의 다양한 경험적 모델(Empirical model)을 개발하여 영양상태 평가 및 변수들 간에 특성 분석을 통해 부영양화 예측 및 호수관리에 효율성을 거두고 있다. 본 연구에서는 우리나라 인공호의 일반적인 영양염류, 투명도 및 엽록소 변이 양상을 통하여 인공호의 영양상태를 분석하고, 경험적 모델의 개발에 TP, TN, Chl 및 SD의 주요 수질 변수들 간 상호관계를 파악하여 효율적인 인공호 수질관리에 기여하는데 본 목적이 있다.

재료 및 방법

본 연구에서 이용된 분석된 자료는 1999년 1월~12월까지의 1년간 월별 자료로서, 환경부 및 농림부에서 획득된 자료를 이용하였다. 연구대상 인공호는 총 36개로서(Fig. 1) 경기지역, 충청지역, 전라지역, 경상지역, 및 강원지역에 전국에 걸쳐 분포하고 있으며 세부조사지는 다음과 같다. 경기지역에서는 광교지, 이동지, 고삼지, 원천지 충청지역에서는 예당지, 경천지, 대청댐, 탑정지, 보령댐, 전라지역에서는 담양댐, 장성댐, 부안댐, 광주호, 나주호, 동북댐, 섬진강댐, 보성강댐, 주암호, 대야지, 수어호, 주암조정지댐, 강원지역에서는 달방댐, 경상지역에서는 남강댐, 합천댐, 운문댐, 회야호, 사연호, 안계댐, 보문호, 영천댐, 안동댐, 가창댐, 임하호, 구천댐, 연초댐, 주남저수지를 대상으로 하였다. 상기 호수에서는 유역면적 및 평균 수심이 각각 6.7 km², 0.6 m인 소규모 저수지로부터, 3,204 km², 26.9 m인 대규모 다목적댐까지 다양한 수계조사지점을 포함하였다.

호수 내 영양염류 분석에 이용된 핵심 수질변수는 총

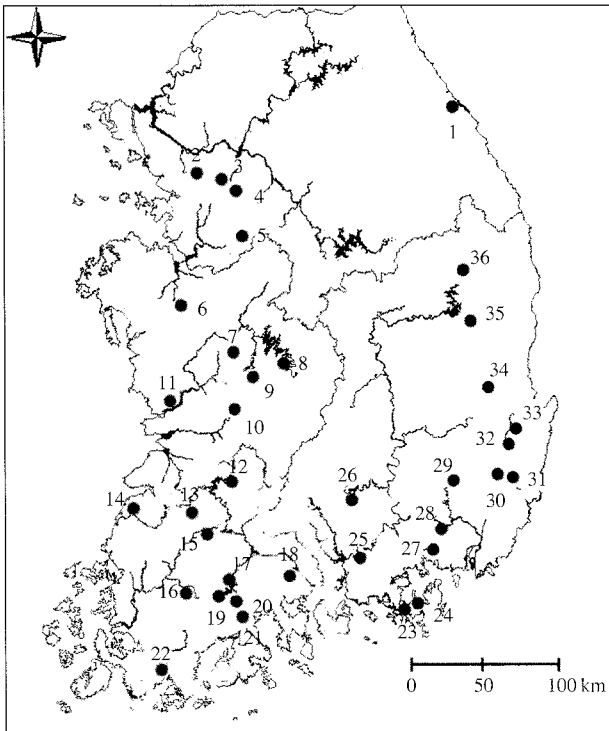


Fig. 1. Map showing 36 sampling reservoirs. The numbers indicate each reservoir (R): 1=Dalbang R., 2=Kwangkyo R., 3=Woncheon R., 4=Idong R., 5=Kosam R., 6=Yedang R., 7=Tapjung R., 8=Daecheong R., 9=Kyungcheon R., 10=Daea R., 11=Boryeong R., 12=Seomjin river R., 13=Damyang R., 14=Buan R., 15=Jangsung R., 16=Naju R., 17=Gwangju R., 18=Sueo R., 19=Dongbok R., 20=Juam R., 21=Juam regulating pondage R., 22=Bosung R., 23=Kucheon R., 24=Yeoncho R., 25=Nam river R., 26=Hapcheon R., 27=Junam R., 28=Unmun R., 29=Gachang R., 30=Bomun R., 31=Sayeon R., 32=Hoeya R., 33=Angye R., 34=Yeongcheon R., 35=Imha R., 36=Andong R.

질소 (Total nitrogen, TN), 총인 (Total phosphorus, TP), 엽록소 (Chlorophyll, Chl), 투명도 (Secchi depth, SD)였고, 상대적인 이온회석도 분석 및 부유물의 특성을 분석하기 위해 부수적으로 전기전도도 (Conductivity, Cond.) 및 부유물질 (Suspended solids, SS) 역동성을 비교 평가하였다. 우리나라의 경우 몬순 하절기의 영향이 극명한 관계로 (손과 한 1995), 수리수문적 반응의 일반적 경향성 및 몬순현상에 의한 수질 변화를 파악하기 위하여 수질자료는 장마전기 (Premonsoon, 5~6월), 장마기 (Monsoon, 7~8월) 및 장마후기 (Postmonsoon, 9~10월)로 구분하여 분석하였다. 호소의 영양상태 판정은 Forsberg and Ryding (1980)의 기준에 의거하였다.

호소에서의 질소 및 인 농도에 대한 조류 성장에 대한 평가는 경험적 모델 (Empirical model)을 이용하였으며, 총질소-엽록소 (TN-Chl), 총인-엽록소 (TP-Chl), 총질

소-투명도 (TN-SD), 총인-투명도 (TP-SD) 및 엽록소-투명도 (Chl-SD)의 경험적 모델이 분석되었다. 분석을 위해 측정치는 정규분포 (Normal distribution) 곡선을 위해 로그-전환 (\log_{10} transformation)한 후 SPSS (Version 12.0 K)를 이용하여 상관도 분석 (Pearson correlation analysis) 및 회귀분석 (Regression analysis)을 실시하였다. 또한, 매달 수질변수의 상대적 변이값 (Relative variation)의 산정은 연평균 수질 측정치에서 월 평균 수질 관측치를 뺀 후 연평균 수질 측정치로 나누어 산정하였다.

결과 및 고찰

1. 영양상태 및 호수변수와의 상호관계

호수의 형태학적 특성 및 수질변수와의 상관관계 분석에 따르면, 평균 수심이 깊은 호수일수록 수질이 향상되는 경향을 보였다. 특히 평균 수심이 10 m 이상인 호수에서 총인의 평균이 $21.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타나 평균 수심 10 m 미만인 호수의 $45.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 보다 2배 이상 낮은 것으로 나타났다 (Fig. 2). 또한 유역면적인 $1,000 \text{ km}^2$ 이상에서 총질소, 총인, 엽록소가 급격히 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다 (Fig. 3). 이는 유역면적이 넓게 형성된 호수일수록 일반적으로 호수의 면적 및 평균 수심이 커지며 궁극적으로는 내부에서 유출되는 영양염의 영향이 적기 때문으로 사료되었다. 따라서 호수 수질특성은 점원 및 비점오염원에 의한 1차적 수질영향도 중요하지만, 아울러 호수의 평균 수심 (mean depth) 및 유역면적과 같은 형태적 특성 (Morphological feature)도 중요한 요인으로 나타났다.

본 연구에서는 영양상태 (Trophic state) 평가시 핵심변수인 총질소 (TN), 총인 (TP), 엽록소 (Chl), 투명도 (SD)의 변수를 이용하여 36개 호소의 부영양화 실태를 파악하였다. 호수 영양상태 평가시 가장 널리 이용되는 Forsberg and Ryding (1980)의 기준에 의거하여 분석한 결과에 따르면, 이용된 변수에 따라 일부 차이를 보이나, TN에 의거한 영양상태는 총 36개의 호수 중 34개에 달하는 96% 호수가 부영양 (Eutrophy) 혹은 과영양화 (Hypertrophy) 상태를 보였다 (Fig. 4). 모든 호수에서 평균 총질소 농도는 1.2 mg L^{-1} 이상을 상회하여, 배경농도가 높은 것으로 나타났다. 호수들에서 총질소의 평균농도가 높아 대부분 부영양화 된 것은 사실이지만, 우리나라 호수 수질기준의 경우 TN:TP 기준에 의거하여 17 이상을 상회할 때, 질소 농도에 의한 영양상태에서 질소를 고려하지 않는다는 점을 감안할 때 총질소에 의한 단일 평가는

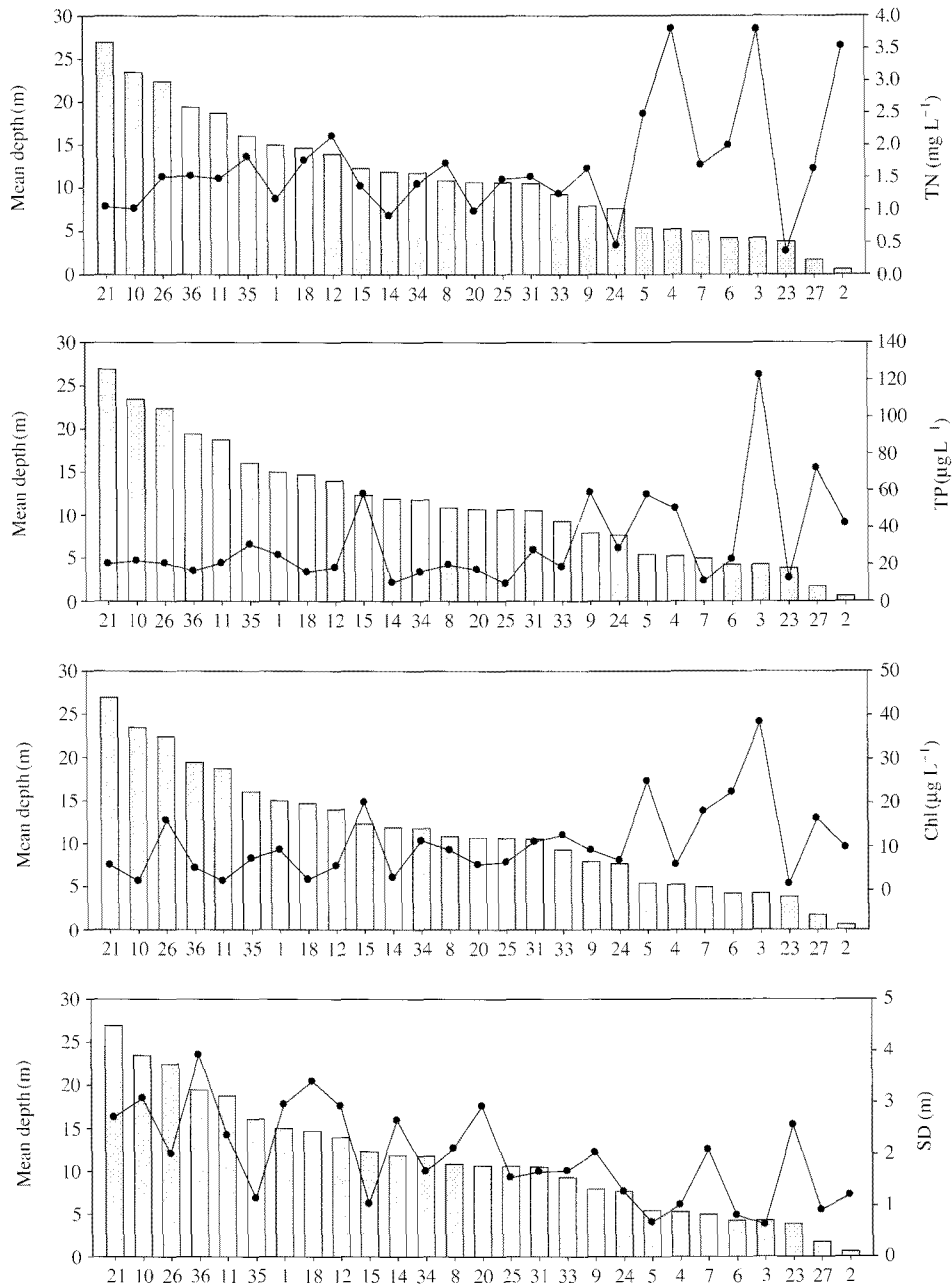


Fig. 2. Relations of mean depth (m) to TN (Total nitrogen), TP (Total phosphorus), Chl (Chlorophyll) and SD (Secchi depth). The numbers in the X-axis indicates the reservoir (See Fig. 1) and the reservoirs were arranged by the depth in order.

피하는 것이 바람직한 것으로 사료되었다. TP에 의한 영양상태 평가에 따르면, 총질소와는 구별되는 양상을 보였는데 36개 호소 중 46% (17개)가 부영양 상태 (Eutrophy)로 가장 많았으며, 28% (10개) 호수가 중영양 상태 (Mesotrophy)로 나타났다. 조류의 생체량의 척도로써 이용된 엽록소 (Chl)에 의거한 영양상태는 부영양 (ET), 중영양 (MT), 과부영양 (HT), 빈영양 (OT)의 순서로 나타났고, 상대적인 빈도분포 순서는 TP와 동일하게 나타났

다. TP는 Chl과 영양도 변이 패턴에 있어서 서로 일치하는 것으로 보아 질소 (N)보다는 인 (P) 농도가 조류의 생체량에 중요한 영향을 미치는 인자라는 기존의 연구결과에 부합하는 것으로 볼 수 있다 (An and Jones 2000a; An and Park 2002). 한편, 투명도 (SD)의 변수에 의거할 때 전체 인공호의 82%가 부영양 상태로 나타났다. 상기 4개의 변수를 이용하여 호소 전반의 영양변이 양상을 분석한 결과, 4개 변수 모두에서 심각한 부영양화를 경

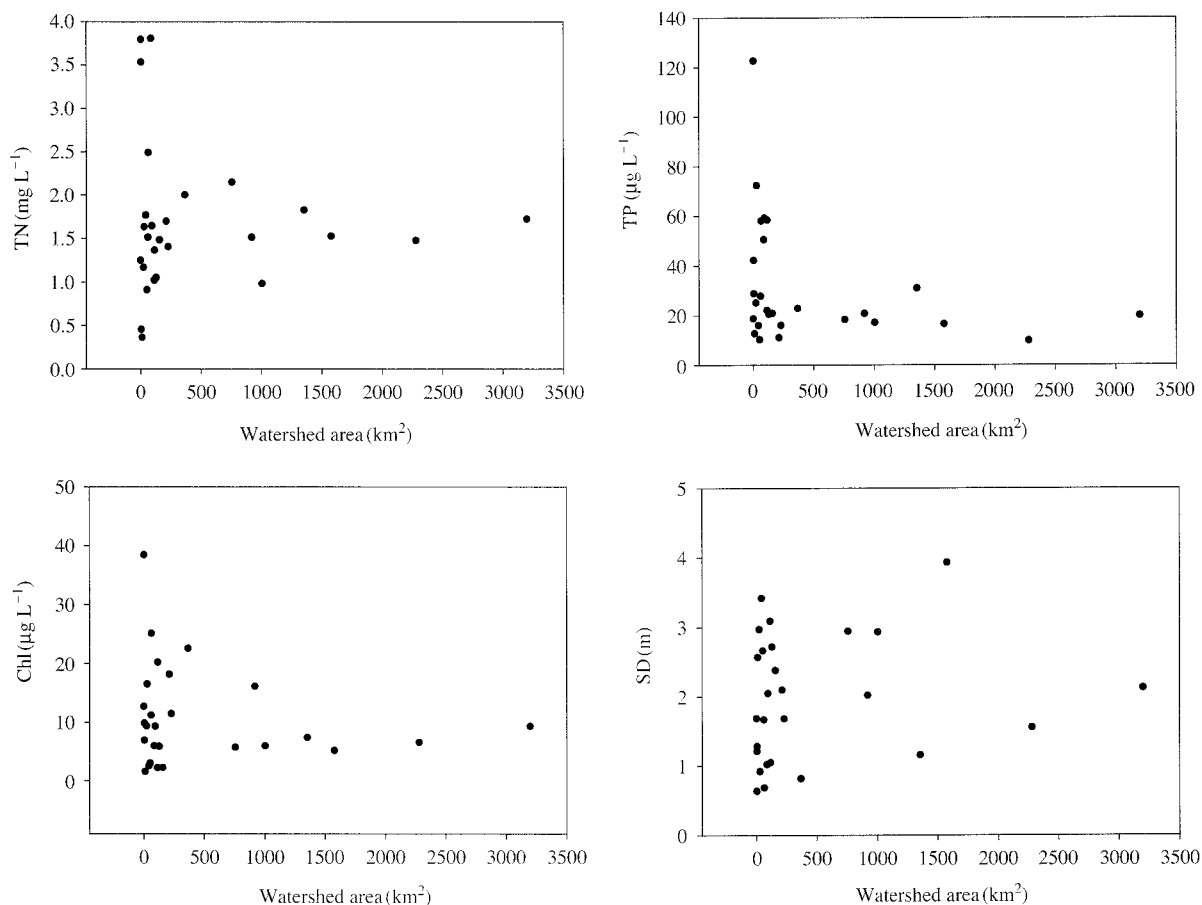


Fig. 3. Relations of watershed area to nutrients (TN, TP), Chlorophyll (Chl) and Secchi depth (SD).

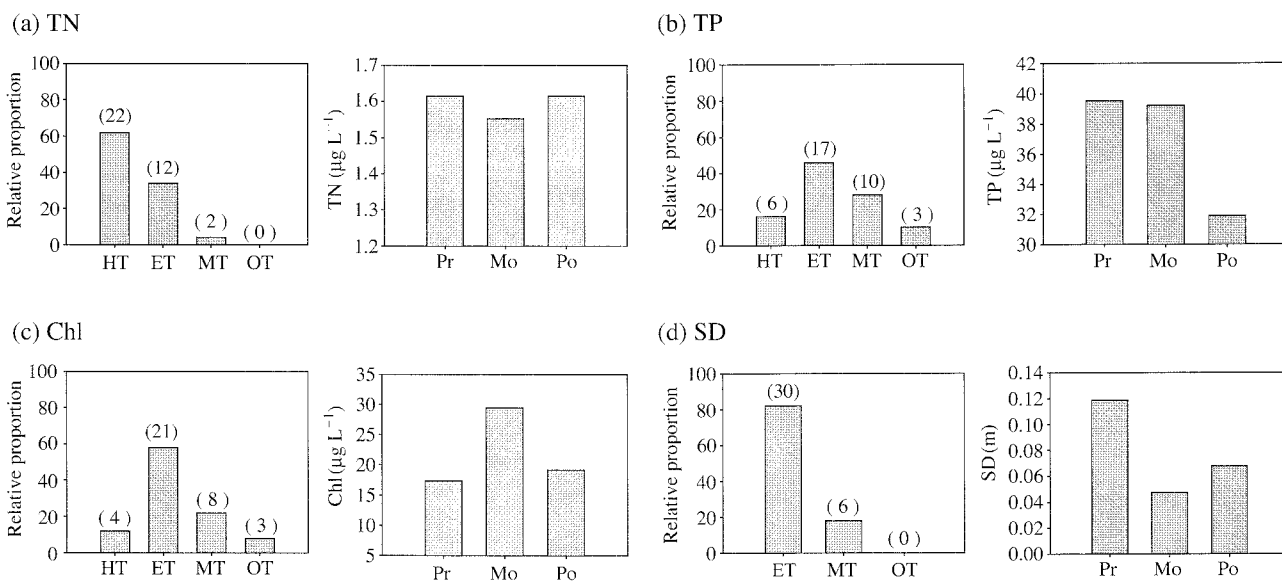


Fig. 4. Trophic classifications, based on Total nitrogen (TN, a), Total phosphorus (TP, b), Chlorophyll (Chl, c), and Secchi depth (SD, d) in the 36 reservoirs and Their seasonal variations of premonsoon (Pr), monsoon (Mo), and postmonsoon (Po). The criteria of hypertrophic (HT), eutrophic (ET), mesotrophic (MT), and oligotrophic (OT) reservoirs were based on the approach of Forsberg & Ryding (1980).

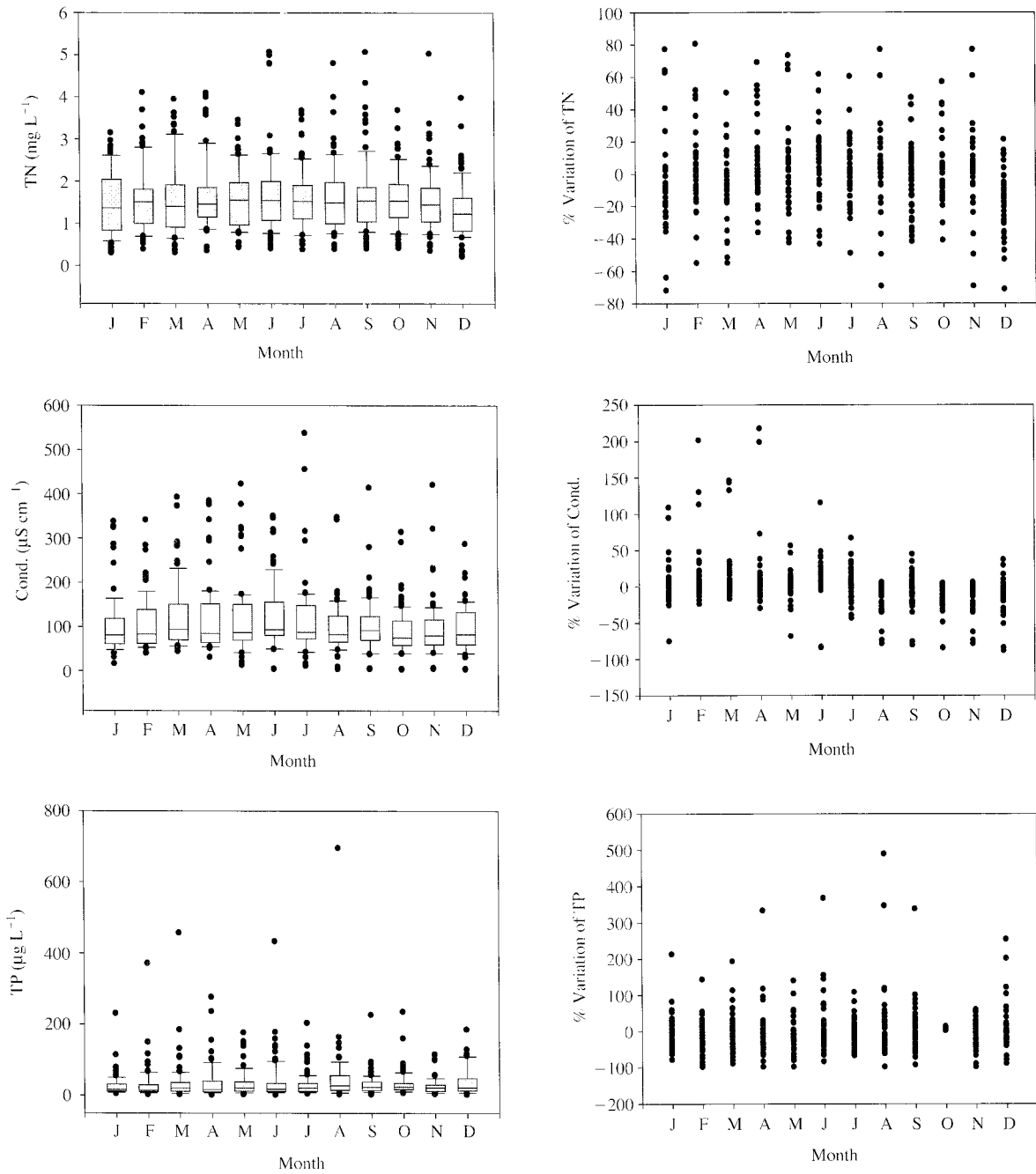


Fig. 5. Monthly variations of conductivity, TN and TP and the percent variations, based on the equation of (annual mean-monthly observed mean)/annual mean of each parameters.

험하고 있는 것으로 나타난 바 이에 대한 대책 마련이 시급하다고 하겠다.

2. 월별 수질 변이 특성

월별 수질의 이온변화 양상특성을 파악하기 위한 전기전도도 (EC, 25°C) 분석에 따르면, 본격적인 장마철인

8월에 340 μS cm⁻¹로 최저치를 보였다 (Fig. 5). 이는 이전의 여러 호수연구 (Dillon and Rigler 1990; An 2000b)에서 제시한 바와 같이 장마철 빗물이 호수 내로 유입되면서 호수물의 이온 농도가 희석되었기 때문으로 볼 수 있다. 전기전도도의 월별 최대치는 1~7월까지 계속 올라가는 양상을 보인 후 8월에 최대치가 급격히 하강하였다 (Fig. 5). 전기전도도 수치의 상대적인 변이값 (전기

전도도의 연 평균값-월 평균값/연평균 전기전도도값)에 따르면, 1~4월까지 대체로 증가하는 양상을 보이다가 5~8월 기간 동안 변이 폭이 확연하게 감소하는 것으로 분석되었다.

총질소(TN)의 경우는 1~12월까지 월별 변화의 뚜렷한 경향을 보이지 않았다(Fig. 5). 본 연구에서처럼 연중 총질소 농도는 1.2 mg L^{-1} 을 상회하여 상대적으로 질소가 풍부한 것으로 나타났고, 이는 이전의 Fig. 4에서처럼 부영양-과영양 상태로 판정되었다. 이전의 다른 연구(An 2000a)에 따르면, 총질소 중 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 80% 이상을 차지하여, 식물성 플랑크톤의 제한 영양염류(Limiting nutrient)로써 작용하기는 어려울 것으로 사료된다. 특히, 하절기의 장마기간인 7~8월도 전혀 증가하지 않는 양상으로 봐서, 외부의 점원 및 비점오염원으로부터 영향이 미미한 것으로 나타났다. 즉, 호수 내 높은 질소 농도는 부분적으로 호수 내 생물체에 의한 질산화 과정이 이루어지며, 우리나라의 상류에 점오염원이 거의 없는 산간 계류형 호수에서도 총질소 농도가 높은 이유는 일부 지질학적 영향 때문으로 사료된다. 반면에, 인(P)은 상대적으로 다른 영양염류에 비하여 호수 내 포함되어 있는 양이 적고 월별 변이의 경향이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 5). 전기전도도와는 반대의 경향성을 보이는데 7월과 8월 사이에 총인(TP) 농도가 $180 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $720 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 현격하게 증가하는 것이 확인되었다. 8월에 TP가 평균에 비하여 약 4배 정도 증가하는 양상을 보여 연중 최고치 인 농도로 분석되었다. 이는 총인의 월 변이(% Variation)가 최고 500%까지 상회하여 전기전도도 및 TN의 90%, 250% 이하 변이에 비해 크게 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 인의 연중 변동의 폭이 심한 것은 장마철 호수 내로의 유입량이 많음을 시사하는 것으로 다른 조사변수간의 7~8월 중 변화 양상을 조사함으로써 총인과 다른 변수 간의 관계를 명확하게 볼 수 있을 것이다. 이러한 결과는 An(2000b), 이 등(2002)의 TP 농도는 여름철 장마강도에 의해 결정된다는 연구결과와 안과 신(2005), 김 등(2004)의 연구에서 TP 변동이 TN보다 강우와 더 밀접하게 나타난 것과 그 맥락을 같이 하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 양상은 호수 내의 부유물(SS) 농도는, 엽록소(Chl) 및 투명도(SD)에 영향을 끼쳐 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다. SS는 장마철에 접어들면서 농도가 꾸준히 증가하다가 10월에는 급격하게 감소하였다. 즉, SS는 하절기 동안 수계로부터의 비휘발성 부유물(Non-volatile suspended solids, 실트) 유입 및 수체 내의 자체 유기성 부유물(Volatile solids, 식물성 플랑크톤 등) 증가에 의해 9월까지 증가하며(An and Jones 2000b), 10월에는 조류성장이 둔화되는 수온하

강 및 무기현탁물 유입감소로 감소되는 것으로 사료되었다.

조류 생체량 지표로 측정된 Chl의 경우, 6~10월 사이에 높은 농도를 보이다가 11월이 되면서 감소하였는데(Fig. 6) 이는 장마철에 영양염류 증가와 온도상승이 조류의 발생과 성장에 기여함으로써 Chl 농도가 증가한 것으로 사료되며, 이와 같은 연중 변동 양상은 SD와는 반대되는 것으로 SD는 일반적으로 강수량이 적을 때는 투명도가 높으며 강수량이 많은 집중호우기인 장마철에는 투명도가 감소하는데(신 등 2000) 이는 호수 내 조류의 양이 증가하여 혼탁해졌기 때문이라 사료된다.

강우의 분포특성에 따른 계절별 수질특성 분석에 따르면, 장마전기(5~6월, Pr), 장마기(7~8월, Mo), 장마후기(9~10월, Po)의 수질특성은 Fig. 4와 같다. 여름 장마기에 조류 생체량(Chl) 및 부유현탁물(SS)의 농도는 현격히 증가하였고 농도의 증가가 예상되었던 TP의 경우는 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 또한 5~6월에 가장 높은 농도를 보였으며, 이후 점차 감소하는 양상을 볼 수 있었는데 이는 인공호의 경우 빗물에 의하여 TP가 유입되는 경향이 있는 반면, 저수지는 봄철 TP 농도가 높게 유지되다가 장마가 시작되면서 빗물에 의하여 희석되어 TP가 희석되기 때문으로 사료되었다. TP의 변동양상이 일반적인 대형인공호와 차이가 생기는 것은 저수지와 같은 특성이 상당부분 반영되었기 때문으로 사료되었다. 장마전기, 중기 및 장마후기 동안의 Chl, SD, SS를 보면 연중 변동양상에서 보았던 경향성이 더욱 두드러져 보이는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4). Chl은 7~8월에 현격히 증가한 반면 SD는 같은 시기 확인한 감소를 확인할 수 있다. SS의 경우는 장마 이후 그 농도가 증가하여 9~10월까지 일정수준 이상을 유지하는 것으로 나타났다.

3. 경험적 모델 구축

조류생체량의 1차적인 척도인 Chl 농도는 일반적으로 부영양화 정도를 파악할 수 있는 최적 지표중의 하나이고, Chl은 수질을 악화시키는 수화현상의 좋은 지표이다(이 등 2002). Chl이 수질 변수들 간에 어떤 상관관계가 있는지를 분석하기 위해 1차 회귀분석을 실시하였고, 연중, 장마전기, 장마중기, 장마후기로 대별하여 분석하였다(Fig. 7, Table 1). TN-Chl 모델분석에 따르면, 연 평균 측면에서나 장마전기, 장마중기, 장마후기를 보더라도 장마후기를 제외하면 $R^2=0.130\sim0.151$ ($p<0.05$) 수준에 머물렀다. 이는 TN이 Chl의 변동 양상을 유의 수준에서 설명하되 설명하는 정도는 약하게 나타나는 것으로 TN

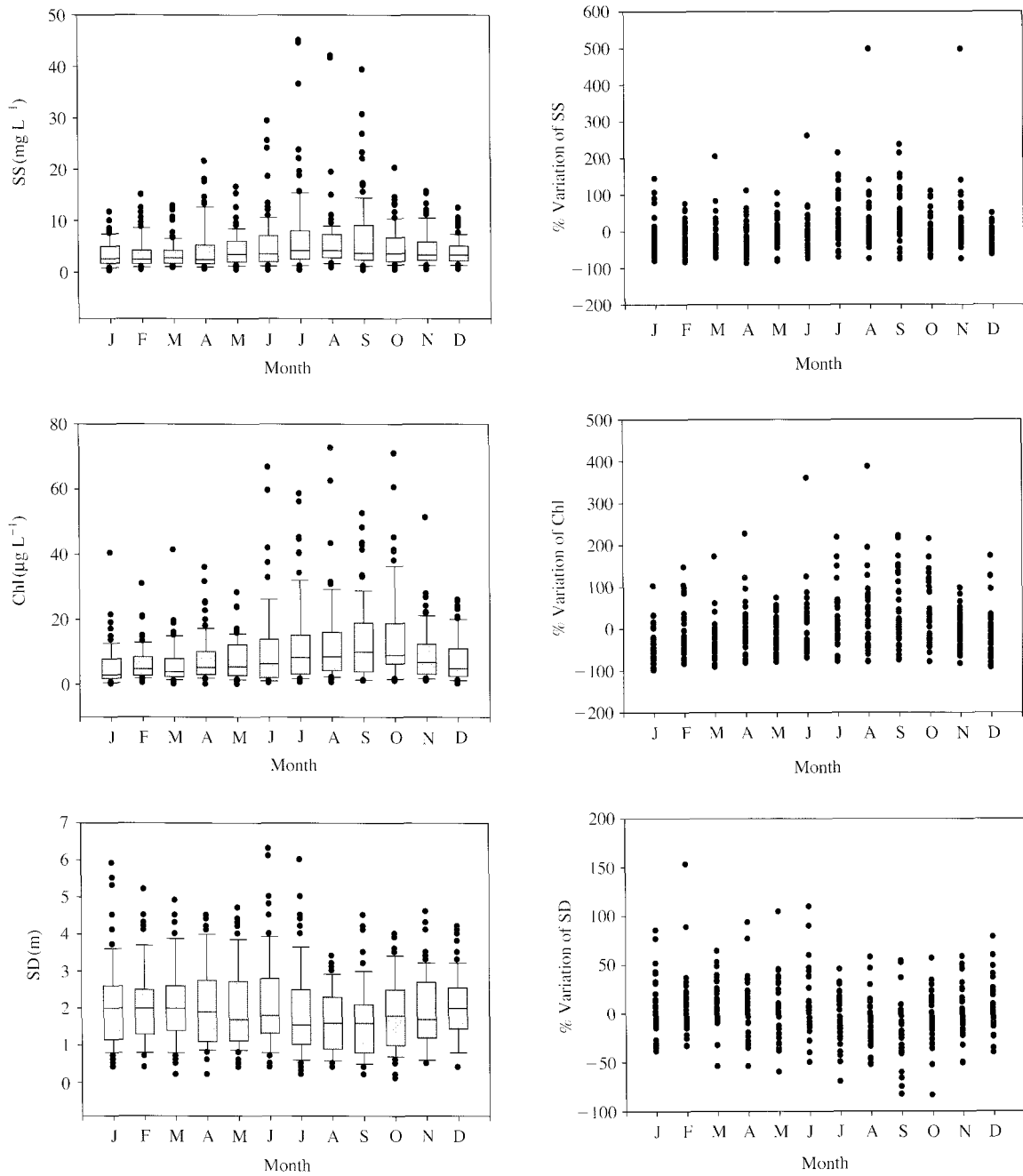


Fig. 6. Monthly variations of Suspended solids (SS), Chlorophyll (Chl), and Secchi depth (SD) and the percent variations are ditto with Fig. 3.

과 Chl 간에는 낮은 상관성을 보였다. 한편, TP-Chl 경험적 모델 (Empirical model) 분석에 따르면, $R^2=0.114\sim 0.295$ ($p<0.05$)로써 TN에 비하여 Chl을 일부 더 설명하는 것으로 나타났다 (Fig. 7). TP-SD 회귀모델에서는 $R^2=0.193\sim 0.342$ ($p<0.05$)로 TN-Chl 및 TP-Chl 모델보다 약간 더 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다. 각 모델수치에 대해 장마전기, 장마중기, 장마후기를 비교하

여 보면 TP-Chl 모델의 장마 중 기간에 $R^2=0.354$ ($p<0.01$)로 제시한 모델 중 가장 높은 R^2 수치를 보였다. 이 결과는 수체가 안정되는 시기에 TP의 증가는 Chl 농도 증가를 가장 강하게 반영한다는 An *et al.* (2003)의 연구 결과와 부합하지는 않았으나, 우리나라 인공호의 경우 수문을 인공적으로 개폐하기 때문에 수체류 시간의 지연 효과 및 무기성 부유물에 의해 Chl 생장이 영향

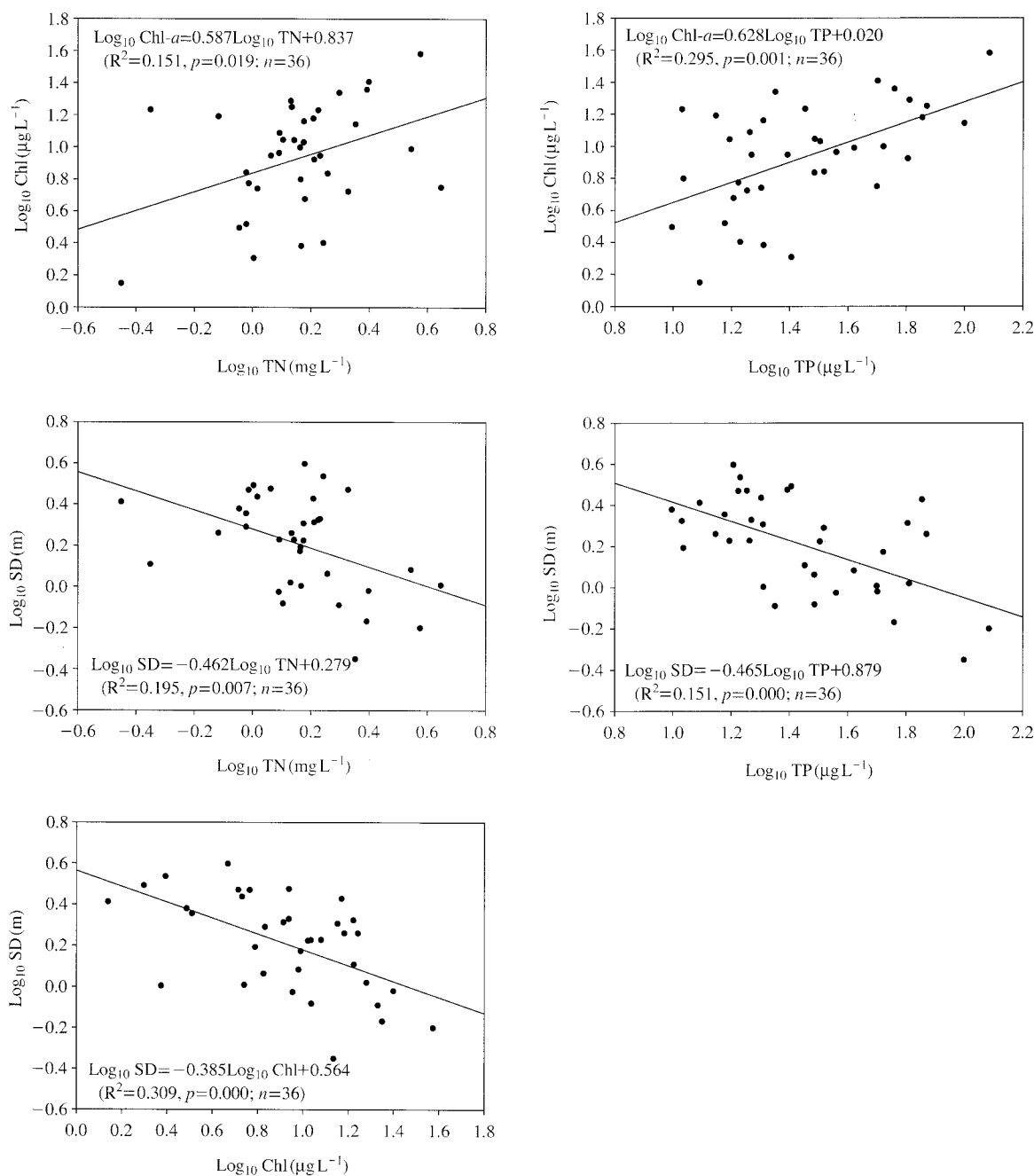
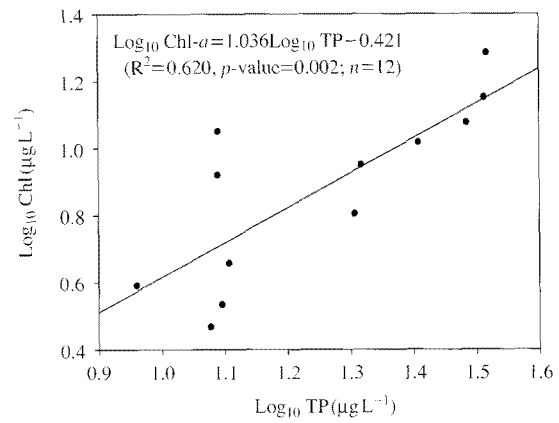
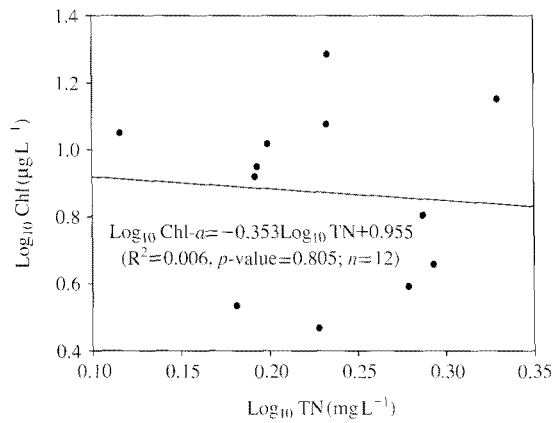


Fig. 7. Empirical models on TN-Chl, TP-Chl, TN-SD, TP-SD, and Chl-SD relations, based on annual mean of overall 36 reservoirs. All data were long-10 transformed for the analysis.

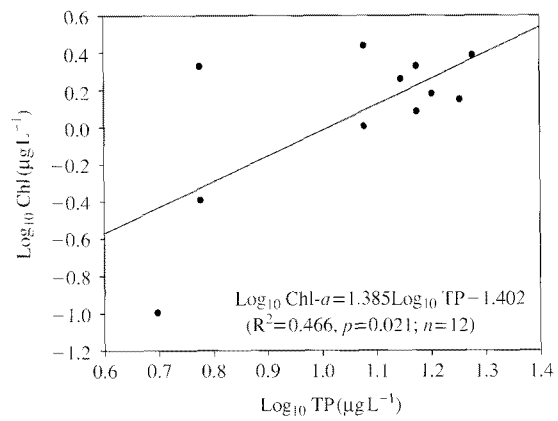
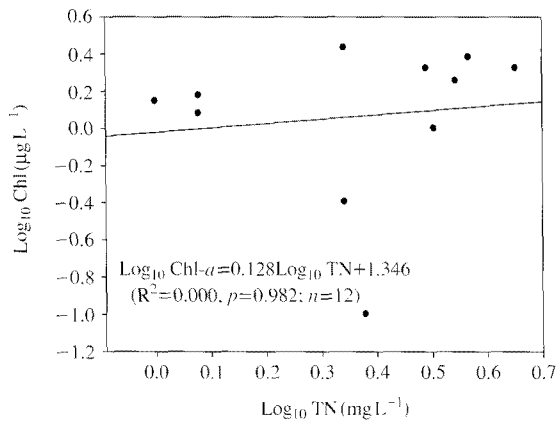
Table 1. Seasonal empirical models during the premonsoon (Pr), monsoon (Mo), and postmonsoon (Po).

Models	Pr			Mo			Po		
	R ²	p-value	n	R ²	p-value	n	R ²	p-value	n
TN-Chl	0.196	0.009	36	0.135	0.027	36	0.043	0.224	36
TP-Chl	0.171	0.014	36	0.354	0.000	36	0.114	0.044	36
TN-SD	0.196	0.009	36	0.144	0.024	36	0.046	0.208	36
TP-SD	0.342	0.000	36	0.087	0.085	36	0.193	0.007	36
Chl-SD	0.463	0.000	36	0.106	0.053	36	0.106	0.053	36

(a) Daechung R.



(b) Guchun R.



(c) Juam R.

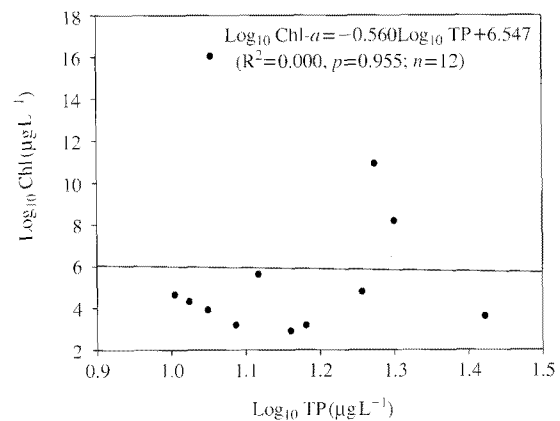
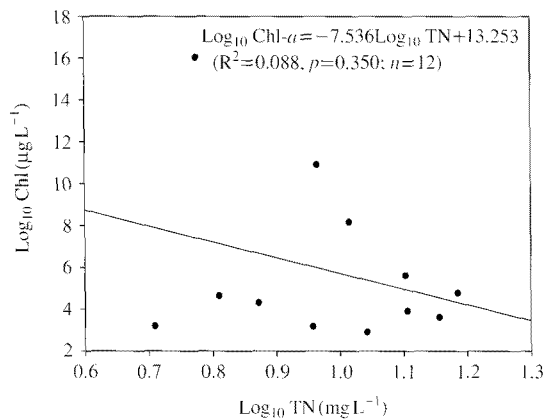


Fig. 8. Empirical models of TP-Chl in the individual reservoirs of Daechung Reservoir (Type I), Guchun Reservoir (Type II), and Juam Reservoir (Type III). All data were long-10 transformed for the analysis.

을 받은 것으로 사료되었다.

조류 생체량에 대한 평가를 위해 Chl-SD 모델 분석에 따르면, 장마후기(Po)를 제외한 타 시기 동안 $R^2=0.301 \sim 0.440$ ($p < 0.01$)의 범위를 보였다. 이는 수체 내 식물

성 플랑크톤의 변동이 타 변수에 의하여 투명도를 좀 더 설명, 예측할 수 있는 지표가 될 수 있음을 시사하였다. 전국의 36개 호소에 대하여 연평균 값(Annual mean)를 가지고 각 변수 간 관계성을 경험적 모델을 분석하

였을 때 위의 결과와 같이 R^2 값이 기존의 연구 결과에 비하여 높지 않음을 확인하였다. 이런 경우 우리나라 대부분의 호수에서 조류생산력에 대한 총인의 예측치가 낮게 나왔으나, 실제 이런 특성은 수체의 크기가 다른 호수, 즉 호수의 기능이 다른 호수들의 자료에 동일한 처리 방식이었다. 이러한 결과에 의거할 때, 개별 호수에 대한 상기 경험적 모델 분석이 필요한 것으로 사료되었다. 개별적인 호수 분석에 따르면, TP-Chl 모델의 경우 두 변수간의 반응 강도면에서 강한 호수(Type I), 중간 호수(Type II), 약한 호수(Type III)로 대별되었다. 대청호의 경우는 반응이 강한 Type I의 호수로서 연평균 자료를 이용하였을 때, TP와 Chl 모델에서 $R^2=0.620$ ($p=0.002$)로 나타났다(Fig. 8). 이것은 36개 호수의 평균치를 이용하였을 때 제시된 R^2 수치를 크게 상회하는 것으로 기존에 연구 보고된 바와 같이 TP와 Chl 간 높은 관계성을 충실하게 반영하고 있다. 구천담은 반응정도가 중간 정도인 Type II의 호수로서 $R^2=0.466$ ($p=0.021$)로 평균을 상회하였다. 36개 호수의 자료 평균치를 이용하여 각 변수 간 관계를 살폈을 때 상대적으로 낮은 결정계수를 보인 원인은 일반적으로 연평균 자료를 이용하면 개별 호수의 특성이 가려지는 현상이 발생하는데 이른바 자료의 'Averaging effect' 때문으로 나타났다. 상기 연구 결과를 종합하여보면 경험적 모델(Empirical model)을 통한 연구에서는 호수의 부영양화특성은 분석 가능하되 자료 분석 효과에 의하여 변수 간 연관성이 어느정도 가려질 수도 있는 것(Masking effect)으로 나타났다(Vollenweider and Kerekes 1980). 이런 경험적 모델을 분석한 결과를 종합해보면, 첫째, 호수속의 영양 염류 중 TN과 TP를 비교하였을 때 TN보다 TP의 양 및 변이 양상이 조류의 현존량을 설명하는 데 주요한 인자로서 작용하였다. 둘째, 조류의 농도(Chl)와 광투과도(SD) 사이에는 뚜렷한 역 상관관계가 성립한 것을 볼 수 있으며, 이러한 경향은 계절에 상관없이 통계학적으로 유의한 것으로 판명되어 경험적 모델 중 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 따라서, Chl-SD의 경험적 모델은 중소형 인공호 및 수계의 일반적인 향후 부영양화 현상에 대한 예측 및 이에 대한 대책을 마련하고 이와 아울러 전반적인 수질 관리에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 연구의 목적은 총질소(TN), 총인(TP), 엽록소(Chl), 투명도(SD)의 변수를 이용하여 호수의 영양상태(Trophic state)를 평가하였고, 전기전도도에 따르면 부

유물질(SS)의 역동성을 비교 평가하여 총질소-엽록소(TN-Chl), 총인-엽록소(TP-Chl), 엽록소-투명도(Chl-SD)의 경험적 모델을 분석하였다. 호수의 영양상태 분석에 따르면, 36개 인공호 중 절반이상이 부영양-과영양화 상태(Eutrophy-Hypertrophy)로 나타났다. 총인의 월 변이(% Variation)가 최고 500%까지 상회하였으며 특히 8월에는 연중 최고치를 보였다. 한편 총질소의 월 변이는 90% 이하로 나타났으며, 모든 호수에서 평균 총질소 농도는 1.2 mg L^{-1} 이상을 상회하여, 배경 농도가 높은 것으로 나타났다(부영양-과영양화상태). 경험적 모델 분석에 따르면 투명도의 변이는 총인($R^2=0.15$, $p<0.001$) 및 총질소($R^2=0.20$, $p<0.001$)보다 주로 엽록소($R^2=0.31$, $p<0.001$)에 의해 설명되는 것으로 나타났다. 총인:총질소의 비(TN:TP ratio)의 분석에 따르면, 대부분의 인공호는 조류 성장에 있어 잠재적인 인(P)의 영향을 시사하였다. 따라서 식물성 플랑크톤 성장은 질소보다 인에 의하여 조절 되는 것으로 나타났다. 수질 변수의 연 평균값에 로그-전환(Log_{10} transformation)한 후 실시한 선형 회귀분석에 따르면 엽록소는 총인 및 총질소에 의해 각각 30%, 15% 설명되어, 연관성이 극히 낮은 것으로 나타났다. 그러나 개별 호수에 대한 선형 회귀분석 일부 총인-엽록소가 강한 정 상관관계($R^2=0.62$, $p=0.002$, $n=12$)를 총질소-엽록소에서는 유의성이 없는 것으로 나타났다($p=0.892$, $n=12$). 상기 연구를 종합해보면 경험적 모델 분석 시 자료의 평균효과(Averaging effect)는 모델의 변이성을 설명하는 데 중요한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 김범철, 안태석, 조규송. 1998. 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교 연구. 한국육수학회지. 21:151-163.
- 김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형담(소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지. 37:205-212.
- 김재윤. 2003. 총인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가. 한국환경과학회지. 12:689-695.
- 김중민, 허성남, 노혜란, 양희정, 한명수. 2003. 호수형 및 하천형 담 호의 육수학적 특성과 조류발생과의 상관관계. 한국육수학회지. 36:124-138.
- 김호섭, 황순진. 2004. 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석-엽록소 *a*와 수심을 중심으로. 한국육수학회지. 37:213-226.
- 김호섭, 황순진, 공동수. 2007. 부영양 저수지에서 남조류의 발달과 천이 및 영향 요인. 한국육수학회지. 40:121-129.
- 박선구, 조인기, 권오병, 문정수, 엄한용, 황순진. 2008. 인공식물체에 의한 조류(Algae) 및 영양염류의 제거. 한국육수

- 학회지. 41:93-98.
- 박재충, 박정원, 신재기, 이희무. 2005a. 인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성. 한국육수학회지. 38:105-117.
- 박혜경, 이현주, 김은경, 정동일. 2005b. 팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석. 한국물환경학회지. 21:584-594.
- 서동일. 1998. 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. 대한환경공학회지. 20:1219-1234.
- 손병주, 한지연. 1995. 동아시아 하계 몬순의 강약과 관련된 기후학적 특성. 한국기상학회지. 31:477-488.
- 신재기, 조경제. 2000. 생물검정에 의한 남조류 Microcystis가 수질에 미치는 영향. 한국환경과학회지. 9:267-273.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지. 38:389-394.
- 윤태광, 윤태일, 김창균, 박세진. 2000. 부영양화 인공호소의 수질관리를 위한 초고속응집침전(URC) 공정의 적용. 대한환경공학회지. 22:2025-2036.
- 이상재, 이재연, 이재훈, 배대열, 이의행, 한정호, 황순진, 안광국. 2008. 실험적 생물조절 기법을 이용한 엽록소 및 남조류 제거 효과. 한국육수학회지. 41:86-92.
- 이진환, 오희목, 맹주선. 2000. 대청호의 수질과 식물플랑크톤 현존량. 환경생물. 18:355-365.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석. 한국육수학회지. 53:36-44.
- 최은미, 김호섭, 김범철, 김동우, 황하선. 2006. 국내저수지 유역특성에 따른 부영양화 분석. 한국물환경학회, 대한상수도협회 공동출판물. 1059-1068.
- 허우명, 김범철, 황길순, 최광순, 박원규. 1995. 낙동강 수계의 계절별 인, 질소, Chl-a와 영양염류 농도분포. 한국육수학회지. 28:175-181.
- 허진, 신재기, 박성원. 2006. 하천 및 호소 수질관리를 위한 용존 자연유기물질 형광특성 분석. 대한환경공학회지. 28:940-948.
- An KG. 2000a. An Influence of point-source and flow events on inorganic nitrogen fractions in a large artificial reservoir. Korean J. Limnol. 33:350-357.
- An KG. 2000b. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorous. Korean J. Limnol. 33:222-229.
- An KG. 2000c. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. Korean J. Limnol. 33:342-349.
- An KG. 2001. Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem. Korean J. Limnol. 34:1-8.
- An KG and DS Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms. Water, Air, and Soil Pollution. 149:27-49
- An KG and JR Jones. 2000a. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. Hydrobiol. 436:179-189.
- An KG and JR Jones. 2000b. Regulating bluegreen dominance in a reservoir influenced by the Asian monsoon. Hydrobiol. 432:37-48.
- An KG and SS Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorous models in reservoirs: a case study. Ecological Modelling 152:191-203.
- An KG, SS Park, KH Ahn and CG Urchin. 2003. Dynamics of nitrogen, phosphorus, algal biomass, and significant implications of regional hydrology on trophic status. Korean J. Environ. Biol. 24:29-38.
- Carlson RE. 1976. A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography 22:361-369.
- Dillon PJ and FH Rigler. 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lake. limnology: ecological perspective. John Wiley & Sons, New York. pp. 15-41.
- Forsburg C and SO Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state in 30 Swedish waste receiving lakes. Arch. Hydrobiol. 89:189-207.
- Ryding SO and Rast W. 1989. The control of eutrophication of lakes and reservoirs. United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation, Paris and The Parthenon Publishing Group Inc., New Jersey. 314pp.
- Sakamoto M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. Arch. Hydrobiol. 62:1-28.
- Tichestursta JL, Letchera RA and Rissik D. 2008. Integration modelling and decision support: A case study of the coastal lake assessment and management (CLAM) Tool. Mathematics and Computers in Simulation. 78:435-449
- U.S. EPA. 1976 Water quality criteria reserch of the U.S. Environmental Protection agency. Proceeding of an EPA sponsored symposium. EPA-600(3-76-079):185.
- Vollenweider and Kerekes. 1980. the loading concept as bases for controlling philosophy and preliminary results of the the OECD programme on eutrophication. Prog. Walt. Tech. 12:5-38.
- Wetzel RG. 1990. Reservoir ecosystem: Conclusions and speculations In Reservoir Limnology Ecological Perspective. John Wiley & Son, Inc., pp. 227-238.