

탑정저수지의 부영양화 특성 및 주요 변수 간의 상호관계

박유미 · 이의행¹ · 이상재 · 안광국*

(충남대학교 생명시스템과학대학, ¹한국농어촌공사 농어촌연구원)

Trophic State Characteristics in Topjeong Reservoir and Their Relations among Major Quality Parameters. Park, Yu-Mi, Eui-Haeng Lee¹, Sang-Jae Lee and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ¹Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Ansan 462-825, Korea)

The objectives of this study were to characterize long-term annual and seasonal trophic state of Topjeong Reservoir using conventional variables of Trophic State Index (TSI) and to determine the empirical relations between the trophic parameters. For the analysis, we used water quality dataset of 1995~2007, which is obtained from the Ministry of Environment, Korea and the number of parameters was 9. Annual ambient mean values of TN and TP were 1.78 mg L^{-1} and 0.03 mg L^{-1} , respectively and TN:TP ratios averaged 76, indicating that this system was nitrogen-rich hypertrophic, and was probably phosphorus-limitation for algal growth. Therefore, nitrogen varied little with seasons and years, and total phosphorus (TP) varied depending on season and year. Monsoon dilutions of TP occurred in August and monthly fluctuations of suspended solid (SS) was similar to those of chlorophyll-*a* (CHL). Annual mean values of BOD and COD_{Mn} were 1.61 mg L^{-1} and 4.23 mg L^{-1} , respectively and the interannual values were directly influenced by the intensity of annual rainfall. There were no significant differences in the trophic variables between the two sampling sites. Mean values of Trophic State Index (TSI, Carlson, 1977), based on TN, TP, CHL, and SD (Secchi depth), turned out as eutrophic state, except for the TN (hypertrophic). Regression analyses of log-transformed seasonal CHL against TP and TN showed that variation of the CHL was explained 37% by the variation of TP ($R^2=0.37$, $p<0.001$, $r=0.616$), but not by TN ($R^2=0.03$, $p>0.05$). Regression coefficient of $\text{Log}_{10}\text{CHL}$ vs Log_{10}SD was 0.336 ($p<0.003$, $r=0.580$), indicating that transparency is regulated by the organic matter in the system. Results, data suggest that one of the ways controlling the eutrophication would be a reduction of phosphorus from the watershed.

Key words : Eutrophication, nutrient, reservoir, empirical model, trophic state

서 론

우리나라는 강수로부터의 용수 이용이 연 총강수량 1,267억 m^3 중 301억 m^3 으로 26%(건설교통부, 2001)에 불과함을 인식하고 용수의 이용을 높이기 위해 댐이나

하구언을 건설하여 정체된 수계인 저수지 등과 같은 인공호를 조성하고 있다(김, 2003). 이러한 저수지는 자연 호와는 형성과정이 근본적으로 다른 인위적인 과정을 거쳐 형성(Jones *et al.*, 1997)되었기 때문에 생태적 특성이 현저히 다른 저수지로서의 특성을 지니고 있다(Thorn-ton, 1990; Wetzel, 1990). 우리나라의 많은 저수지들은

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

대개 90% 이상이 농업용 저수지이며, 1990년대 이후 인위적으로 야기된 부영양화를 경험하고 있으며, 일부는 과영양 상태까지 진행되고 있다(농림부, 2001).

우리나라에서 농업용 저수지와 같은 인공호는 자연호에 비하여 시공간적 수질의 역동이 크고, 수리수문학적으로 더 큰 변이를 보이는 것으로 알려져 있다. 특히 우리나라의 하절기 몬순강우는 호소의 수질변이에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며(안과 신, 2005), 몬순강우로 인한 저수지의 수위 및 유량 뿐 아니라 유기물과 영양염(N, P) 유입 등 전반적인 물리적, 화학적인 상태변화에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(김과 김, 2004). 우리나라에 존재하는 대부분의 농업용 저수지는 10 m 이하의 평균 수심을 가지며, 호수의 체적에 비해 표면적이 비교적 큰 것을 감안한다면 부영양화 현상이 가속화 될 수 있는 가능성이 높다.

대전광역시를 비롯한 충남북의 인구 증가와 산업의 발전으로 인한 오염원의 증가로 금강수계의 수질이 과거에 비하여 악화되는 경향을 나타내고 있다(유 등, 1999). 본 연구의 대상인 탐정저수지는 1944년에 준공된 저수지로 금강 수계의 논산천을 지류로 하고 있으며 저수지 주 유입 하천 하류부에 농경지와 축사가 분포하여 수질자료 분석을 통한 영양상태 평가 및 대책이 시급하다고 판단된다.

현재까지 농업용 저수지 내에서 수질변이의 특성을 파악하기 위해 다양한 수질 모델모듈을 개발·적용하여 왔으며, 이러한 모델모듈을 통하여 영양염류(N, P)와 조류 생산력의 관계를 수치적으로 해석하여 저수지의 향후 수질변화를 예측하고 있다. 그러나 이러한 모듈은 우리나라

의 국지적 하절기 몬순강우의 영향 및 인공저수지의 수리수문학적인 특성에 의해 수치예측의 오차를 나타내기도 한다. 따라서 국내 저수지의 수리수문학적 특성 및 계절적 강우의 영향을 고려한 다양한 경험적 모델(Empirical model)의 개발이 필요하다. 본 연구의 목적은 첫째, 계절적 몬순 및 연별 강우분포에 따른 수질특성의 변이 및 경향성을 분석하고, 둘째, 탐정저수지의 영양상태(Trophic state) 및 부영양화특성을 파악하는 것이며, 셋째, 총인-엽록소(TP-CHL), 총질소-엽록소(TN-CHL), 투명도-엽록소(SD-CHL) 및 총인-투명도(TP-SD)의 경험적 모델의 구축을 통해 부영양화의 주요변수간의 상호관계를 분석하여 탐정저수지를 비롯한 저수지의 수질관리를 위한 기초자료로 제공하는 것이다.

재료 및 방법

1. 연구대상 호소

본 연구의 대상인 탐정저수지는 저수면적 6.36 km², 저수량 30,301 t, 유역면적 218.80 km²으로 주 유입하천은 논산천으로 왕사봉에서 발원한 장성천이 유하하면서 웅촌천, 웅천, 명암천과 합류되어 유입되는 저수지이다. 탐정저수지는 1944년에 한국농촌공사에 의해 준공되었으며 논산시의 농업용수를 공급하는 데 주로 이용된다.

본 연구에서는 탐정저수지 내의 두 지점을 대상으로 수질자료를 분석하였으며, 측정지점은 다음과 같다(Fig. 1).

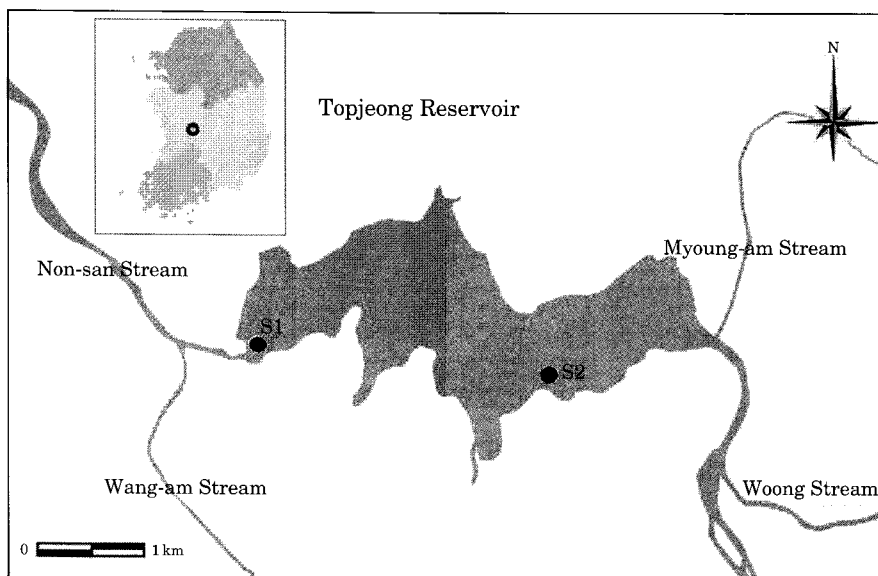


Fig. 1. The study site of Topjeong Reservoir.

S1: 충청남도 논산시 가야곡면 중연리(댐)
 S2: 충청남도 논산시 가야곡면 병암리

2. 수질자료 분석

연구에 사용된 자료는 1995년부터 2007년까지의 13년 간 월별로 측정된 환경부 수질측정망자료를 이용하였으며, 또한 강우량 자료는 기상청의 지역 자료를 참고하였다. 탐정저수지의 영양 상태를 알기 위해 수질 자료는 수계별로 나누어 월별로 평균한 호소수질자료를 이용하였다. 이용된 수질항목은 수온(Temperature), 수소이온 농도(pH), 용존산소량(Desolved oxygen, DO), 생물학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP), 부유물질(Suspended solids, SS), 투명도(Secchi depth, SD), 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL), 전기전도도(Electric conductivity, EC)의 10여 개의 수질 항목을 이용하였다.

획득한 수질자료는 지점별 변이를 파악하기 위하여 각 지점별로 분석하였다. 또한 계절적으로 수질 상태를 판단할 때는 하절기 집중 강우특성을 반영하기 위해 장마를 기점으로 장마 전기(Premonsoon, 5~6월), 장마기(Monsoon, 7~8월) 그리고 장마후기(Postmonsoon, 9~10월)로 구분하여 조사하였다. 본 연구에서 수질요인들 간의 상관관계를 알아보는 통계적 측정 방법은 Pearson의 상관도 분석법을 이용하였다.

3. 부영양화 지수를 통한 영양상태 평가

탐정저수지의 영양상태 분석은 측정된 자료 중 총질소(TN), 총인(TP), 엽록소-a(CHL), 투명도(SD)를 이용하여 부영양화 단계를 Forsberg and Ryding (1980)의 기준에 의거하여 분석하였고, 이들 항목을 영양상태 지수(Trophic State Index, TSI)로 전환하였다. 총질소(TN)는 Kratzer and Brezonik (1981)의 지수산정방식을 따랐으며, 총인(TP), 엽록소-a(CHL), 투명도(SD)는 Carlson (1977)의 지수산정 방식에 따랐다.

$$TSI(TN) = 14.43 * \ln TN(mg L^{-1}) + 54.45$$

$$TSI(TP) = 14.42 * \ln TP(\mu g L^{-1}) + 4.15$$

$$TSI(CHL) = 9.81 * \ln CHL(\mu g L^{-1}) + 30.6$$

$$TSI(SD) = -14.41 * \ln SD(m) + 60$$

4. 경험적 모델(Empirical Model)

탐정저수지에서의 질소와 인의 농도 및 조류의 생산이

양적으로 어떠한 관계가 있는지 해석하기 위해 TN-CHL, TP-CHL, SD-CHL, TP-SD 간의 회귀분석을 통해 경험적 모델(Empirical model)을 구축하여 영양상태 평가 및 예측에 이용하였다. 수질 자료를 계절별로 나누어 Log로 전환한 $Log_{10}(TN)$, $Log_{10}(TP)$, $Log_{10}(CHL)$, $Log_{10}(SD)$ 를 가지고 Pearson의 상관도 분석법과 회귀분석을 실시하였으며, 이런 통계적인 분석에는 SPSS를 이용하였다. 이를 통해 탐정저수지의 부양화의 특성과 부영양화의 주요 인자인 CHL에 영향을 주는 요인이 무엇인지를 연구를 통해 알아보았다.

결과 및 고찰

1. 수질 분석

탐정저수지의 수리수문학적 반응의 특성 및 몬순현상에 의한 수질변화를 파악하기 위해 수질변수의 특성을

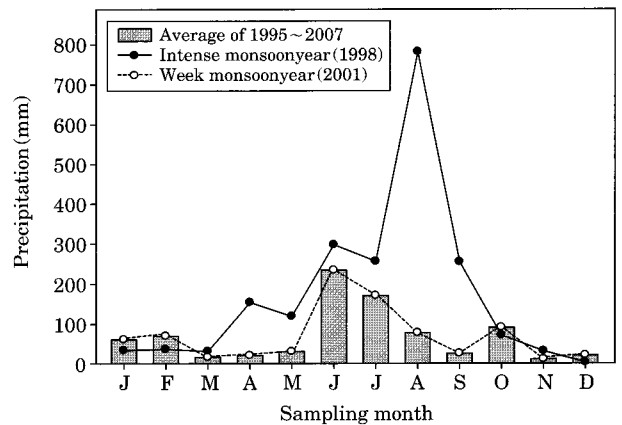
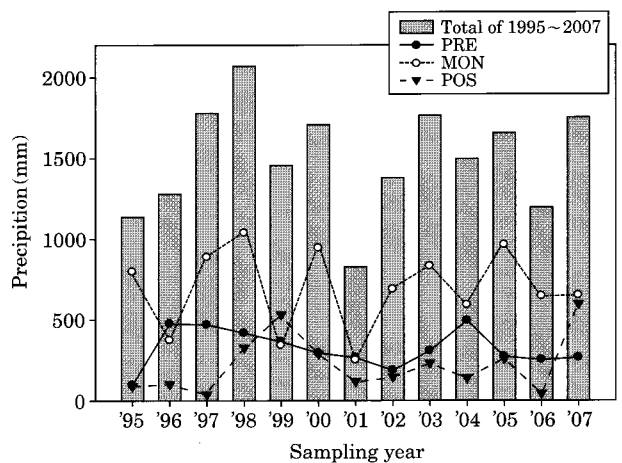


Fig. 2. Annual and seasonal (monthly) fluctuation of precipitation during 1995~2007.

Table 1. Annual averages of water quality parameters. Each value is an average of site I and site II in Topjeong Reservoir (1995~2007).

| Parameters | Sampling year | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
| Temperature (°C) | 16.1 | 15.3 | 15.4 | 16.0 | 16.2 | 16.3 | 16.6 | 14.6 | 15.6 | 15.5 | 15.5 | 15.8 | 14.6 |
| pH | 7.3 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.1 | 7.5 | 8.1 | 7.7 | 7.7 | 8.3 | 8.4 |
| EC ($\mu\text{s cm}^{-1}$) | 130.3 | 123.5 | 120.3 | 93.7 | 112.0 | 120.3 | 122.2 | 130.7 | 106.8 | 105.0 | 105.2 | 107.3 | 114.3 |
| DO (mg L^{-1}) | 10.3 | 8.6 | 9.7 | 10.0 | 10.0 | 10.4 | 9.4 | 9.3 | 9.8 | 9.1 | 9.5 | 10.6 | 11.1 |
| BOD ₅ (mg L^{-1}) | 1.8 | 1.4 | 1.3 | 1.0 | 1.6 | 1.9 | 2.7 | 1.7 | 2.0 | 1.3 | 1.0 | 1.3 | 1.9 |
| COD _{Mn} (mg L^{-1}) | 3.2 | 3.4 | 3.8 | 3.2 | 3.7 | 3.6 | 7.3 | 5.5 | 4.7 | 4.3 | 3.7 | 4.1 | 4.7 |
| TN (mg L^{-1}) | 1.5 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.7 | 1.9 | 1.6 | 1.9 | 1.8 | 2.7 | 1.7 | 1.5 | 1.8 |
| TP ($\mu\text{g L}^{-1}$) | 70.5 | 44.0 | 31.4 | 20.1 | 10.8 | 10.5 | 20.9 | 18.4 | 47.0 | 67.8 | 18.4 | 28.6 | 37.9 |
| TN/TP ratios | 21.0 | 38.8 | 54.1 | 81.9 | 156.6 | 178.0 | 77.6 | 105.6 | 38.8 | 40.1 | 89.9 | 51.8 | 48.5 |
| CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$) | 5.8 | 9.6 | 12.1 | 12.8 | 16.8 | 13.3 | 22.2 | 11.5 | 19.6 | 11.8 | 6.0 | 6.7 | 10.5 |
| SS (mg L^{-1}) | 3.3 | 6.5 | 4.0 | 4.5 | 4.4 | 7.8 | 15.8 | 6.0 | 6.2 | 4.9 | 4.3 | 6.7 | 5.9 |
| SD (m) | 1.0 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 2.1 | 1.3 | 1.1 | 1.2 | 1.6 | 1.4 | 1.1 | 0.8 | 0.8 |

EC: Electric conductivity, DO: Dissolved oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, COD: Chemical oxygen demand, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, CHL: Chlorophyll-a, SS: Suspended solid, SD: Secchi depth

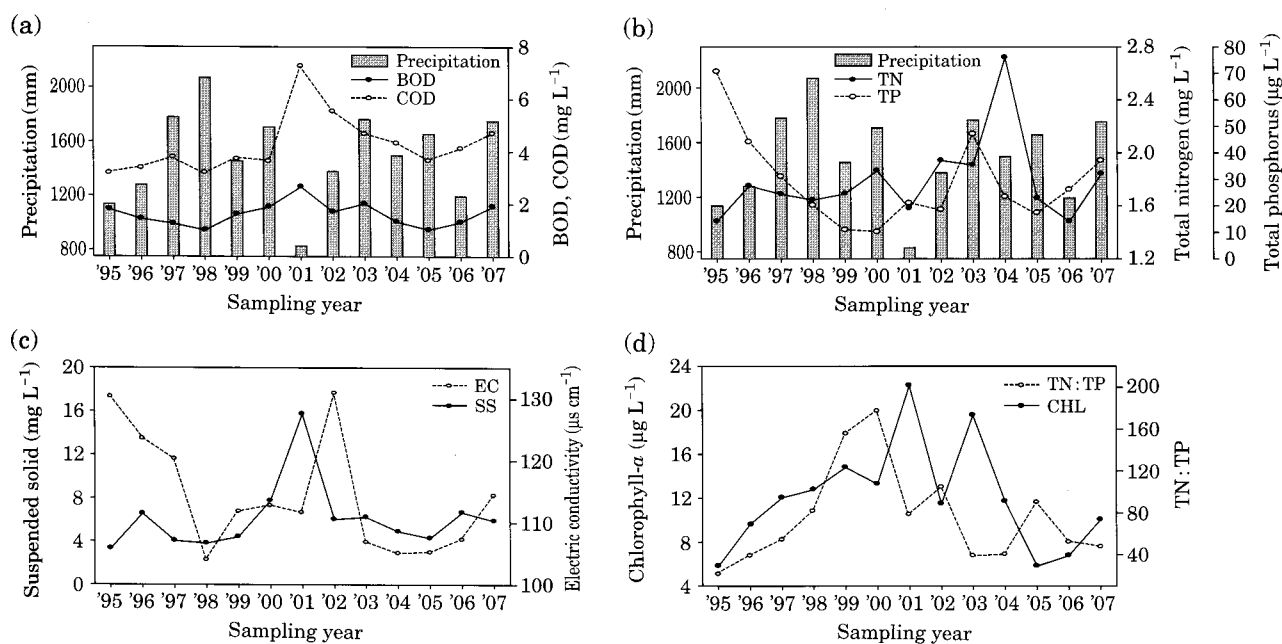


Fig. 3. Annual variations of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), nutrients (TN, TP), chlorophyll-a (CHL), suspended solid (SS), electric conductivity (EC) and the mass ratios of TN : TP.

시간적 변이와 공간적 변이로 분류하였다. 조사 기간인 1995~2007년 동안 탐정저수지 주변의 연평균 강수량은 1,499 mm로 나타났으며 1998년에는 최댓값인 2,070 mm, 2001년에는 최솟값인 828.7 mm의 결과를 나타내 본 연구에서는 1995년을 집중 강우해 (Intense monsoon year)로 적용하였으며, 2001년을 가뭄해 (Weak monsoon year)로 적용하였다 (Fig. 2). 계절별 강우에 따르면 1~3

월의 갈수기 동안에는 37.5 mm의 평균 강수량을 보인 반면 집중호우 기간인 5~8월에는 303 mm의 평균 강수량을 보여 연총강수량의 67.4%를 나타냈다 (Fig. 2). 이를 통해 강수량의 대부분이 집중호우 기간에 분포되어 있어 수질변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

1995~2007년간의 탐정저수지의 수질변수의 연별평균 값을 통해 시간에 따른 탐정저수지의 영양 상태와 수질

Table 2. Pearson's correlation coefficients (r) and its probability (p) of chemical parameters (n=156).

| | | Precipitation | Conductivity | DO | BOD ₅ | COD _{Mn} | TP | TN | CHL | SS |
|-------------------|-----|---------------|--------------|----------|------------------|-------------------|---------|--------|---------|---------|
| EC | r | -0.569* | | | | | | | | |
| DO | r | -0.320** | 0.174* | | | | | | | |
| BOD ₅ | r | -0.205* | 0.198* | -0.121 | | | | | | |
| COD _{Mn} | r | 0.518** | 0.193* | -0.262** | 0.561** | | | | | |
| TP | r | 0.085 | 0.037 | -0.111 | 0.094 | 0.046 | | | | |
| TN | r | 0.157 | -0.088 | -0.125 | -0.005 | 0.004 | 0.225** | | | |
| CHL | r | 0.254** | -0.029 | -0.293** | 0.547** | 0.533** | 0.103 | -0.002 | | |
| SS | r | -0.563* | 0.081 | -0.196** | 0.512** | 0.518** | 0.044 | -0.070 | 0.473** | |
| SD | r | 0.014 | -0.057 | -0.025 | -0.049 | -0.206* | -0.102 | 0.158 | -0.007 | -0.549* |

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, EC: Electric conductivity, DO: Dissolved oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, COD: Chemical oxygen demand, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, CHL: Chlorophyll-a, SS: Suspended solid, SD: Secchi depth

별 농도 변화를 알 수 있다 (Table 1). 가뭄해를 비롯해 평균보다 강수량이 낮은 해에는 BOD 및 COD 값이 높게 나타났는데 이는 저수량 감소에 따른 농축효과에 의한 것으로 판단된다 (Fig. 3). 이외의 연별 수질 변수의 변이 양상은 강수량의 변화와 관계가 뚜렷하지 않은 것으로 보아 강수요인 외에도 주변 점오염원으로부터 영양염을 비롯한 부유물의 유입과도 관련을 갖는 것으로 사료된다.

Pearson의 상관도 분석에 따르면 탐정저수지의 강우에 따른 전기전도도 변이는 상관지수 $r = -0.569$, $p = 0.042$ 로 나타났다 (Table 2). 이는 An and Jones (2000)의 다른 국내 대형 인공호에서의 연구결과와 일치하며, 이를 통해 호소 내 계절적 이온 농도 및 성분에 영향을 주는 1차적인 요인은 하절기 동안 증가된 유입수의 영향으로 단순 강도에 의존하는 희석효과로 사료된다. 또한 강우는 CHL, SS, BOD, COD에 대하여 각각 높은 상관성 ($r = 0.254$, $r = -0.563$, $r = -0.320$, $r = 0.518$)을 보였으며, 그 외 항목들에 대해서는 낮은 상관성을 보였으나 안과 신 (2005)에서와 같이 강우가 수질의 이화학적 변화에 중요한 요소임이 재차 확인되었다.

탐정저수지의 연평균 수온은 15~16°C로서 최소 3°C에서 최대 32°C까지 전형적인 온대권의 특성을 보였다 (Fig. 4a). 안과 신 (2005)의 연구에서 수질변수에 대한 월 변화 특성은 온도 및 강우특성에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. pH는 전체적으로 연평균 7.9로 중성 상태를 보였으며 집중호우기인 8월경에는 10까지 상승하였으나 9월 이후에는 안정성을 유지하였다 (Fig. 4b). DO의 연평균 농도는 9.82 mg L⁻¹로 나타났으며 수온이 상승할수록 DO는 감소하는 경향 (Fig. 4a, 4c)을 보였다. 이런 특성은 타 호소의 연구결과와도 일치하며 하절기 DO를 조절하는 요인은 수온이라는 사실을 제시한다 (An,

2000a).

BOD의 연평균 농도는 1.61 mg L⁻¹로서 우리나라 현행 수질기준에 의거할 때 2등급으로 평가 된다 (Fig. 4d). 탐정저수지의 BOD 농도는 장마가 시작되는 6월부터 상승하여 최고 7.40 mg L⁻¹에 도달하였다. BOD 최대치가 장마기와 일치한다는 것을 고려할 때 강우와 함께 인근 수계로부터 유입된 비점원 및 점원오염원인 외부기원유기물의 영향으로 사료된다. COD의 연평균 농도는 4.23 mg L⁻¹로 나타났으며 장마기부터 증가하여 차츰 감소하는 등 BOD와 유사한 변이를 보였다 (Fig. 4e). SS의 연평균 농도는 6.2 mg L⁻¹이고 대체적으로 장마기간에 평균 농도가 상승하였다 (Fig. 4f). 안과 신 (2005)의 연구 결과로 미루어 볼 때 이들 대부분은 비휘발성 무기물 (Non-volatile suspended solids)의 증가로 사료된다.

TN의 연평균 농도는 1.782 mg L⁻¹이었고 2004년 7월 최댓값인 3.293 mg L⁻¹이었으며 그 외의 기간에는 비교적 변동 폭이 적은 것으로 나타났다 (Fig. 5a). 연평균 TN 농도가 높은 것은 An (2000c)의 연구 결과에서 보듯 여름철 장마기의 외부 유입량의 증가보다는 농가와 축사로부터의 폐수 등 점오염원에서 축적된 오염부하 증가의 결과로 사료된다.

TP 농도 25 µg L⁻¹을 기준으로 이 이상이면 부영양화, 이하이면 빈영양화로 구분할 수 있다. TP는 연중 변동 폭이 컸으며 연평균 농도가 32 µg L⁻¹로 부영양 상태를 나타냈다 (Fig. 5b). 장마기 TP 농도가 연평균 농도보다 약 1.5배 이상 높게 나타나 수계내의 인 유입은 주로 하절기에 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 장마기 TP 농도가 연평균 농도보다 약 1.4배 정도 낮게 나타나 8월 집중 강우에 의한 희석 효과가 나타나는 경향을 보이기도 했다. 그러나 대체적으로 TP 변화는 강우의 시작과 함께 6월에 증가하여 9월에 최댓값인 41.7 µg L⁻¹를 보였으며

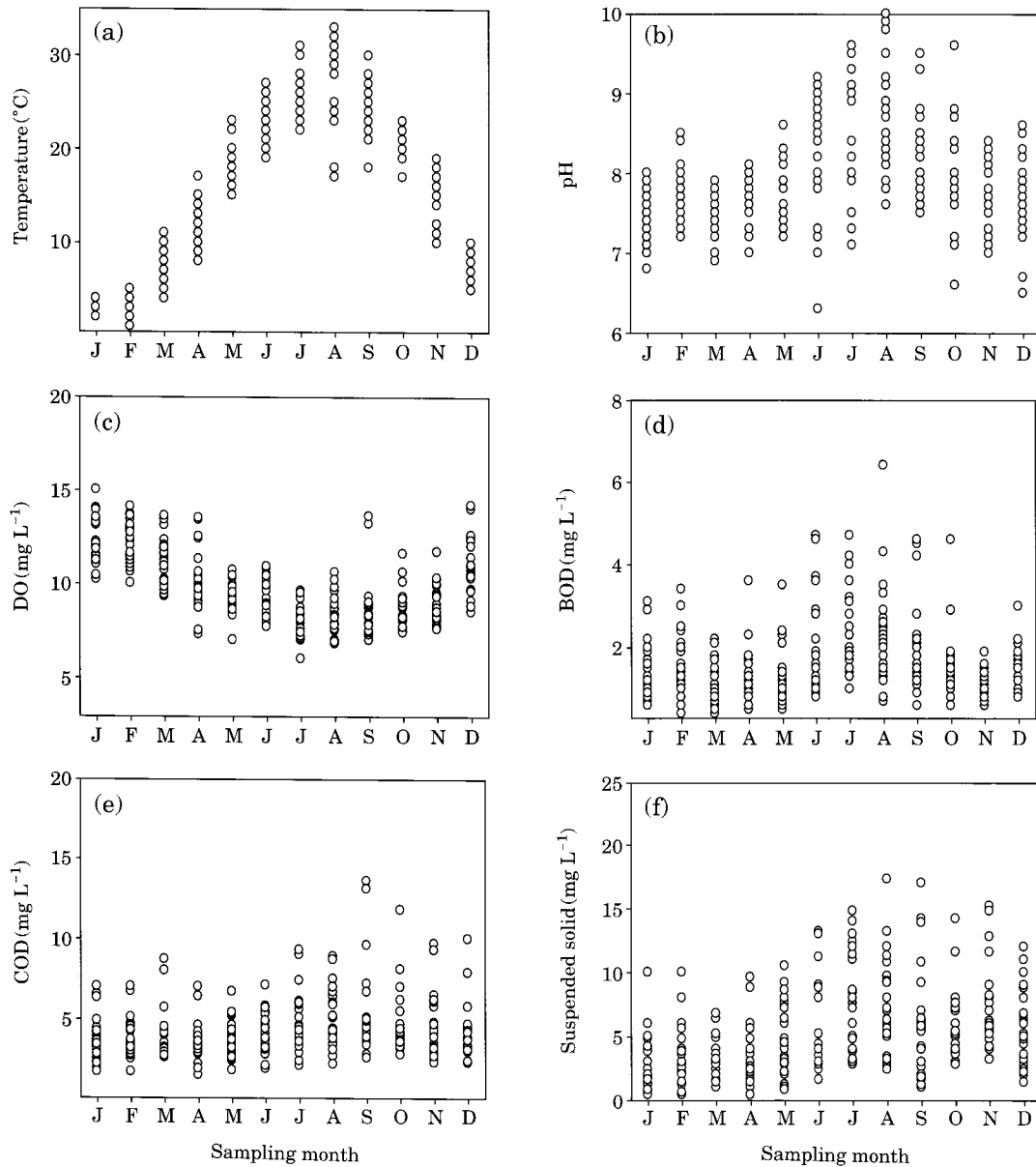


Fig. 4. Seasonal variations of temperature, pH, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD) and suspended solid (SS).

다시 강우와 함께 감소하는 경향을 보였다. 이는 장마철 (7~9월)에 유입되는 인부하량이 연 유입되는 인부하량의 70%로 대부분이 우기에 집중된다는 보고와도 일치한다. 한편 강우분포에 따른 TP의 변화는 TN과 다른 양상이 나타났다(Fig. 5a, 5b). 안과 신 (2005)의 연구에서 TP의 변동이 TN보다는 강우와 더 밀접한 것으로 나타난 것과 일치한다(An, 2000b; An, 2001).

TN/TP는 수질의 영양 상태와 밀접한 관련성이 있다(신 등, 2000). 호소의 TP, TN의 경우 TP에 대한 TN의

농도 비율이 7 미만일 경우에는 TP의 기준은 적용하지 아니며, 그 비율이 16 이상일 경우에는 TN의 기준을 적용하지 아니하므로(Grim and Fisher, 1986) TP에 비해 상대적으로 TN의 함량이 매우 클 때는 TP는 제한 영양염으로 작용될 수 있다. 연평균 TN/TP는 75.5로 높게 나타나 이미 질소 성분은 과잉 공급 상태인 것으로 판단되며 이를 통해 탐정저수지는 타 소호들과 같이 인의 농도에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. TP는 TN/TP와 높은 역 상관관계($r=-0.929, p=0.01$)를 보였으나 TN과

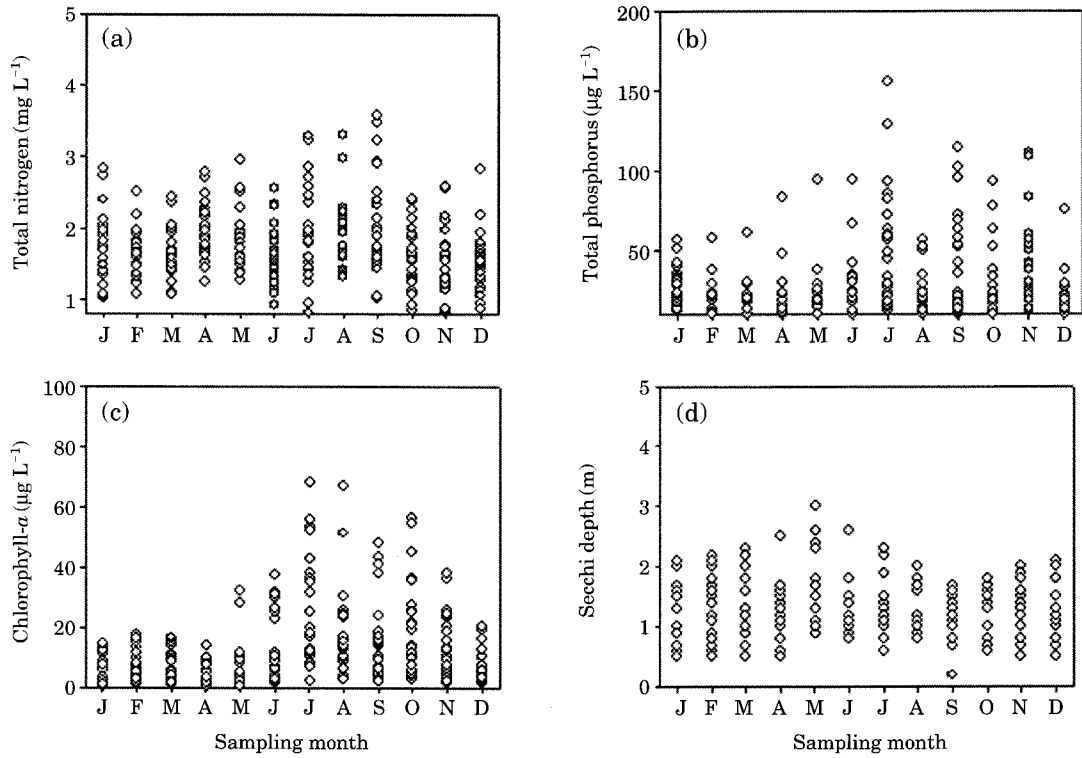


Fig. 5. Seasonal variations of nutrients (TN, TP), chlorophyll-*a* (CHL) and Secchi depth (SD).

는 낮은 상관성 ($r=0.287$)을 보여 TN/TP가 TP의 변동 폭에 의해 주로 조절되는 것으로 나타났다(Fig. 8e, 8f).

부영양호에서는 인과 같은 제한영양소의 유입 증가로 인하여 조류의 생물량이 증가한다. CHL 농도는 호소의 부영양화 정도를 잘 포현해주는 수질 변수이다 (An 2000b). CHL 농도는 장마기 전기보다 장마기· 장마 후기에 높은 농도를 보였다(Fig. 5c). 이것으로 보아 조류 생체량은 영양염류의 농도뿐만 아니라 수층의 안정화에 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 장마기의 CHL 농도가 장마 후보다 더 낮은 이유는 장마기 호소의 유입량 또는 유출량의 급격한 증가로 인한 수 체류 시간의 감소로 인해 조류의 썩겨 내림과 Inorganic SS 등 유입물의 증가로 인한 호소의 탁도 증가와 광투과도의 감소에 의해 CHL 생산량이 감소하는 것으로 사료된다. CHL 농도를 이용하여 부영양화를 나타내기 위한 여러 가지 방법이 제시되었다. OECD에서는 CHL 농도가 25 µg L⁻¹ 이상, U.S. EPA에서는 10 µg L⁻¹보다 높으면 부영양단계로 분류하고 있으며 Forsberg and Ryding (1980)은 40 µg L⁻¹ 이상을 과영양호로 분류하고 있다. 이들 기준으로 볼 때 탐정저수지의 CHL 농도는 평균 7.15 µg L⁻¹를 나타내 부영양 단계에 있다고 사료된다(Fig. 7b). 또한 여름철 몬순

강우에 의해 장마기와 후기에 CHL 농도가 평균 19~24 µg L⁻¹까지 증가함을 알 수 있으며, 이는 이 등(2002)의 호소의 수화현상 (Algal bloom)이 하절기 집중호우 이후에 나타날 가능성을 시사하는 것과 일치한다.

부영양호는 조류의 양이 많아 혼탁하며, SD의 경우 1.5~2.0 m를 기준으로 설정하고 있다. 조사 결과 탐정저수지는 평균 1.3 m로 부영양 상태를 나타냈다. 일반적으로 장마기 이전의 5월까지의 투명도가 높았으며, 강수량이 많은 장마기에는 투명도가 낮게 나타났다(Fig. 5d). 집중호우기인 장마기의 호소내로의 유입량의 증가는 투명도의 감소를 가져오고 이는 수체 내 산소요구량을 증가시킨다. 1차생산자의 주요역할을 담당하는 조류에 광제한 효과를 가져와 (Dodds *et al.*, 1998) 1차생산력은 감소될 것으로 추론되나, 장마기의 총인 농도의 증가의 영향으로 CHL의 농도는 증가함을 나타낸다. 이를 통해 인이 하천생태계의 1차생산력에 제한요인으로 작용할 수 있는 잠재성을 보였다.

계절별로 나누어 본 결과 여름 몬순기간에 TP, TN, CHL, SS의 농도는 증가하고, 여름 집중 강우 후 유입물의 증가로 SD는 장마 후에 감소함을 나타냈다. 이들을 통해 탐정저수지내 계절적 수질요인에 영향을 주는 1차

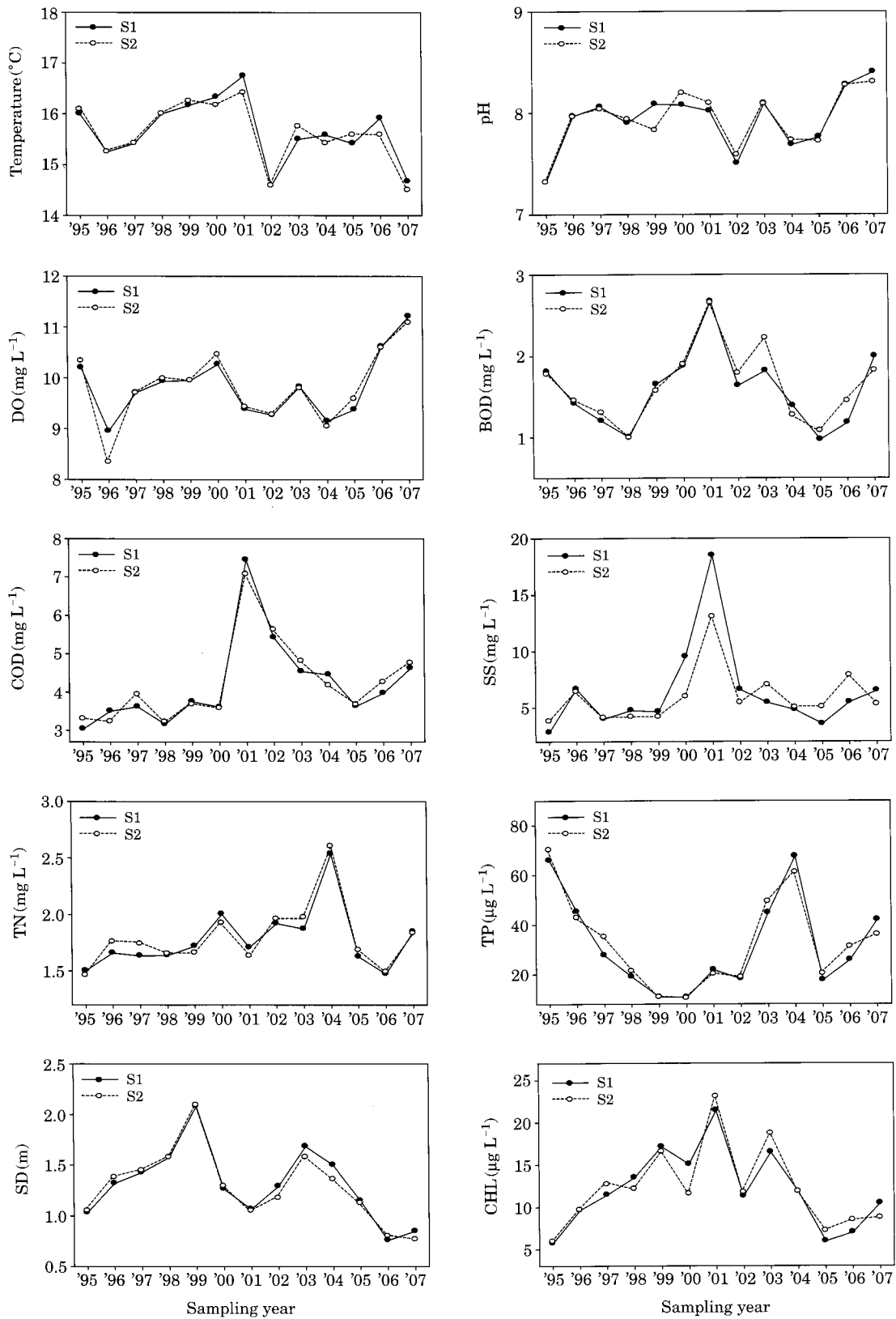


Fig. 6. Site variations of temperature, pH, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), suspended solid (SS), chlorophyll-a (CHL), nutrients (TN, TP) and Secchi depth (SD).

적인 요인은 하절기 몬순 강도에 의존하는 것을 알 수 있었다.

또한 탐정저수지 내의 공간적 변이를 파악하기 위하여 S1 및 S2에서의 수질 변수를 비교한 결과 공간적인 변이는 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 6). 1995~2007년의 15년 간 S1과 S2의 연평균 수질 변수의 변화 분석에 따르면, 일부 구간에서 차이를 보일뿐 매우 유사한 양상을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 수질 모니터링 시 탐정저수지에서는 2개의 지점 중 1개의 지점을 제외할 경우 측정비용 절감 효과가 기대되었다.

2. 부영양화도 지수(TSI)를 통한 영양상태 평가

부영양화도 지수를 이용한 호소의 부영양화도 평가는 TSI<20 : 극빈영양, 30~40 : 빈영양, 45~50 : 중영양, 53~60 : 부영양, >70 : 과영양 상태로 호소의 영양 상태를 나타낼 수 있다(Kratzer and Brezonik, 1981).

부영양화도 지수에 따른 수계의 부영양도를 평가해보면 탐정저수지는 수질요인 간 부영양화도 지수는 차이가 나타났지만 대부분 부영양 상태를 나타냈으며 TSI(TN)는 부영양 상태를 초과하는 값을 보였다(Fig. 7a). 부영양화도 지수 중 조류량을 직접적으로 표현하는 지수인 TSI(CHL)은 95년과 05, 06년을 제외한 나머지 해에 50을 초과하여 부영양 상태에 있음을 나타냈다(Fig. 7b). 강수량이 높은 해에는 TSI(CHL)이 더 낮게 나타났는데 이는 An and Jones (2000)의 연구 결과와 일치하며 씻겨 내려가는 조류량의 증가와 광제한 효과에 의한 것으로 사료된다(Carlson, 1977; Kimmel, 1990). 탐정저수지의 TSI(TP)는 최저 46, 최고 65의 범위로 변화 폭이 큰 편이나 평균적으로 부영양 상태를 보이고 있으며 TSI(SD)는 99년을 제외하고 부영양 상태를 나타냈다(Fig. 7a, 7c). TSI(TN)은 모든 지점이 60 이상으로 이미 탐정저수지가 부영양 상태를 초과했음을 보여준다.

3. 경험적 모델(Empirical Model) 구축

일반적으로 CHL 농도는 부영양화의 정도와 관련되어 있고 CHL은 수질을 악화시키는 수화현상의 좋은 지표로 작용한다. 온대, 아열대 호소의 연구에서 여름철 CHL은 TP의 영향을 설명해 주었다(Dillon and Rigler, 1974; Forsberg and Ryding, 1980; Canfield and Bachmann, 1981; Nurnberg, 1996).

본 연구에서는 수질 변이 간의 상관관계를 알아보기 위해 회귀 분석을 이용하여 조사하였다. 부영양화 변수의 경험적 모델(Empirical model)의 분석에 따르면, TN:TP

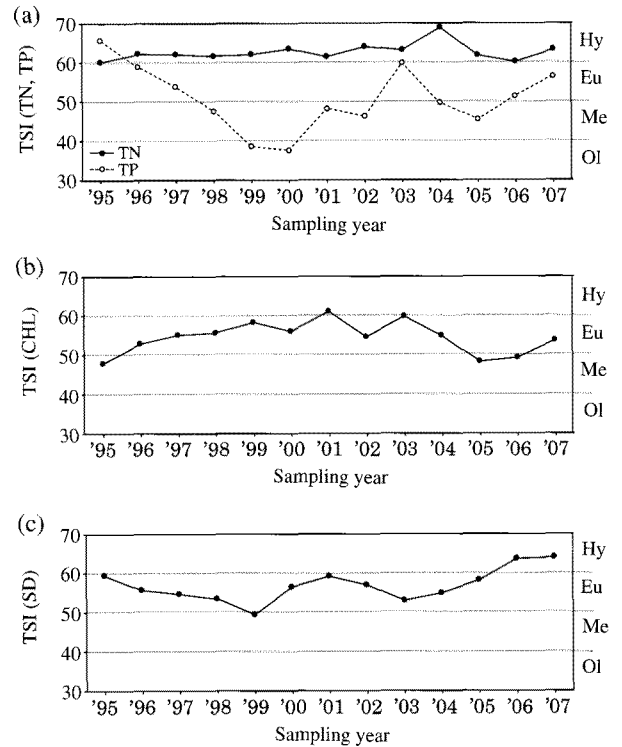


Fig. 7. Classification of trophic state using trophic variables. Ol=Oligotrophic, Me=Mesotrophic, Eu=Eutrophic and He=Hyper-eutrophic.

비는 TN과의 상관관계 ($p > 0.05$, $n=24$)가 미약한 것으로 나타나는데, 이는 TN 농도가 호소 내에 이미 필요 이상 존재함을 의미한다. TP와는 높은 상관성 ($R^2=0.863$, $p < 0.001$, $n=26$)을 보였다(Fig. 8e). TP에 대한 CHL의 회귀 분석에 따르면 CHL의 변이는 TP의 변이에 의해 37% ($p = 0.001$, $n=24$)를 설명하며 CHL은 TP와 1차 함수관계 ($\text{Log}_{10}\text{CHL}=0.354 * \text{Log}_{10}\text{TP}+1.103$)를 나타내 TP의 증가에 따라 조류 생산력이 증가함을 보였다. 계절별 결과에서도 TN:TP 비와 TP의 상관관계가 가장 높게 나타났다.

일반적으로 우리나라의 담수 호수와 저수지의 부영양화는 수체 내 질소의 양이 풍부하여 질소의 농도에 의해 부영양화가 일어나는 것보다 인의 농도에 따라 부영양화가 야기되는 인 제한효과가 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 탐정저수지에서도 인의 증가가 1차생산력으로 직결되며, CHL 농도의 증가에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 수체 내 TN:TP 비는 CHL의 생물량을 예측하거나, CHL에 대한 제한 영양염으로 무엇이 작용하고 있는지를 나타내는 간접 예측 지표로 활용되고 있어, TN:TP 비에 따라 저수지의 제한 영양염과 부영양도의

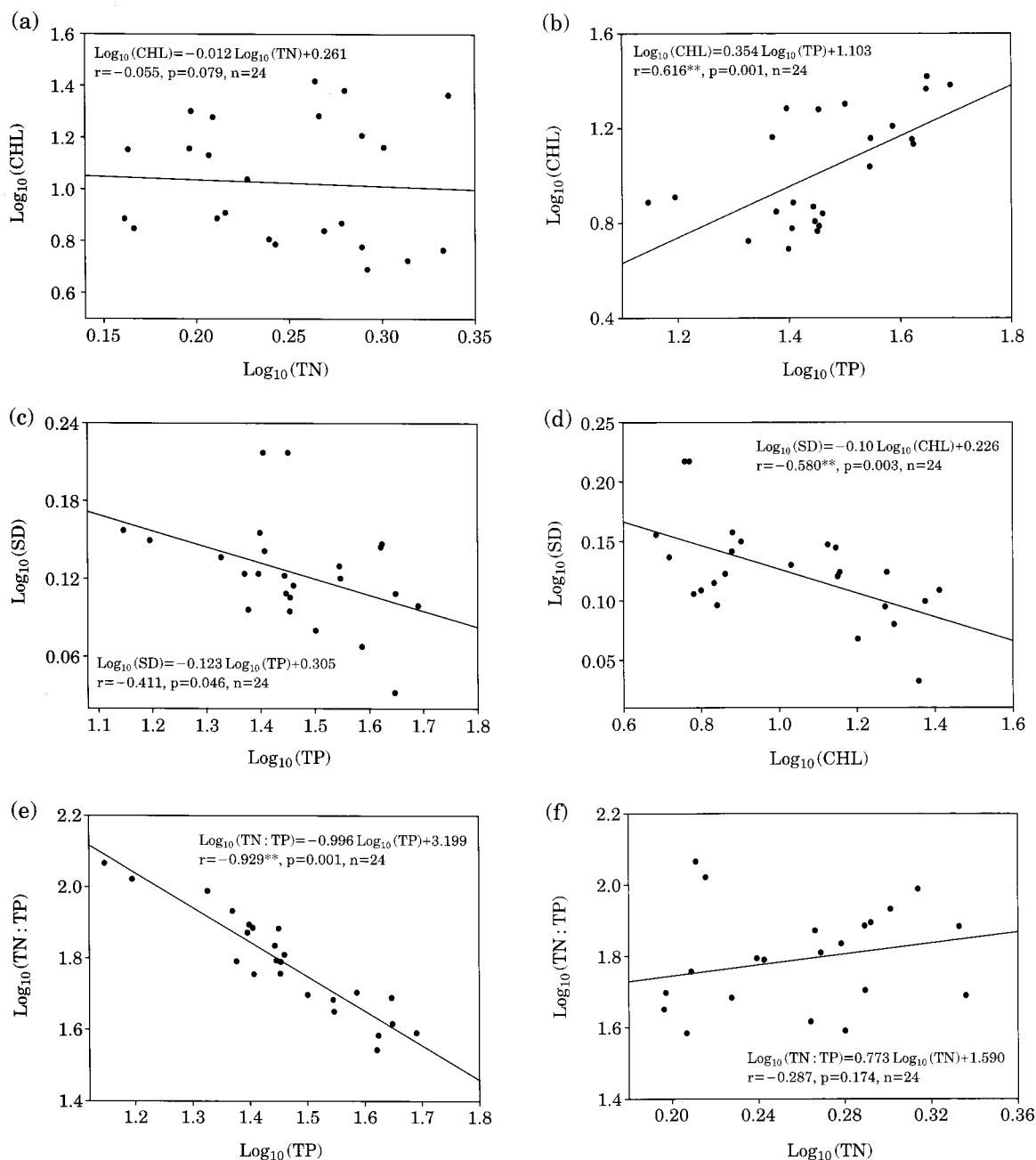


Fig. 8. Regression analyses of log-transformed seasonal TN, TP, CHL, SD and TN : TP.

예측이 가능하다.

또한 SD-CHL의 상관관계에서 보듯 CHL의 증가는 SD의 감소를 가져오며 17% ($R^2=0.169, p=0.046$) 설명하는 것으로 나타났다(Fig. 8d). SD-TP의 상관관계 또한 TP가 증가하면 SD는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 8c). 여름 장마 이후에 외부 부유물의 유입량의 증가와 그에 따른 CHL 생체량의 증가는 수계의 탁도에 영향을 주어

SD가 감소하는 것이라 유추된다. 이와 더불어 TP의 증가는 부유물 증가와 함께 일어나 투명도(SD)의 감소에 영향을 준다고 사료된다.

경험적 모델을 통한 연구결과에 의하여 탐정저수지의 부영양화와 관련하여 다음과 같은 사실을 요약할 수 있다. 첫째, 탐정저수지의 영양염류는 조류 현존량을 설명하는 핵심 변수로서 1차 회귀식으로 도출되었다. 둘째,

조류의 양과 투명도 사이에는 뚜렷한 역 상관관계가 성립되었으며 이런 특성은 계절에 상관없이 유의한 것으로 판명되었다. 셋째, TN:TP 비에 따라 저수지의 제한 영양염과 부영양도의 간접 예측이 가능하다. 따라서 탐정저수지는 인에 의해 1차 생산력이 조절되고 있음이 확인되었고, 인 증가에 따른 CHL의 증가가 뚜렷한 것으로 나타났다. 이러한 경험적 모델은 탐정저수지의 향후 부영양화 현상 저감 및 수 환경 관리에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구의 목적은 탐정저수지의 부영양화 특성을 알고, 주요변수간의 상호관계를 결정하는 것이다. 연구를 위하여 1995년부터 2007년까지의 환경부의 수질 측정 자료를 이용하여 다양한 변수를 분석하였다. 이러한 수질 변수는 연별, 계절별로 변이양상을 보였다. 탐정저수지의 TN과 TP의 연평균 값은 각각 1.78 mg L^{-1} , 0.03 mg L^{-1} 로, TN:TP의 비율은 76으로 나타나 탐정저수지 내의 질소는 연중 부영양화를 초과한 상태이며 인은 호소의 1차 생산력에 대한 제한 요인으로 작용할 잠재성을 갖는 것을 알 수 있다. TP는 8월에 강수에 의한 희석 현상을 보이며, SS의 월별 변화는 CHL과 같은 양상을 보였다. BOD와 COD의 연평균 값은 각각 1.61 mg L^{-1} , 4.23 mg L^{-1} 로 나타났으며 연별 변화 양상은 강수량과 관련되었음을 알 수 있었다. 또한 탐정저수지 내의 두 사이트는 공간적인 변이의 특성을 거의 보이지 않은 것으로 나타났다.

탐정저수지 내의 TSI (CHL), TSI (TP) 및 TSI (SD)는 중영양-부영양 상태를 보였다. 한편, TSI (TN)은 계절에 관계없이 전체 호소 내에서 TN 농도가 풍부한 부영양-과영양 상태를 보였다. CHL와 다른 수질 변수 (TP, TN, 그리고 SD) 사이의 관계를 로그-전환 회귀분석을 통해 분석하였다. TP에 대한 CHL의 계절별 회귀분석에 따르면 CHL의 변이는 TP의 변이에 의해 37% ($R^2=0.37$, $p < 0.001$, $r=0.616$)를 설명하는 것으로 나타났으나 TN은 낮은 상관관계 ($R^2=0.03$, $p > 0.05$)를 보였다. 또한 SD에 대한 CHL의 회기 분석에서는 CHL이 SD의 변이에 의해 33% ($R^2=0.33$, $p < 0.003$, $r=0.580$)를 설명하는 것으로 나타나 탐정저수지의 SD는 CHL에 의하여 조절됨을 알 수 있었다. 결과적으로 TP는 탐정저수지의 부영양화 현상을 예측하는 핵심인자로 사료되므로 부영양상태를 조절하기 위해 수계로부터 인의 유입의 철저한 관리가 매우 중요

하다고 판단되었다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project [과제명: 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발 (08-IV-11)]의 일환으로 수행되었기에 이에 대한 감사를 표함.

인 용 문 헌

- 건설교통부. 2001. 수자원장기종합계획, p. 64-65.
- 김병철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형댐 (소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지 **37**(2): 205-212.
- 김재윤. 2003. 총인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가. 한국환경과학회지 **12**(7): 689-695.
- 농림부 농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 **33**(4): 389-394.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지 **38**(1): 54-62.
- 유선재, 김종구, 권태연, 이석모. 1999. 금강의 부영양화 현상에 관한 연구. 한국환경과학회지 **8**(2): 155-160.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석. 한국육수학회지 **35**(1): 36-44.
- An, K-G. 2000a. Dynamic change of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korean Journal of Limnology* **33**(3): 213-221.
- An, K-G. 2000b. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean Journal of Limnology* **33**(3): 222-229.
- An, K-G. 2000c. An influence of point-source and flow events on inorganic nitrogen fractions in a large artificial reservoir. *Korean Journal of Limnology* **33**(4): 350-357.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- 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.
- Canfield, D.J. and R.W. Bachmann. 1981. Prediction of total phosphorus concentration, chlorophyll-a and Sec-

- chi depths in natural and artificial lakes. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **38**: 414-423.
- Carlson, R.E. 1997. A trophic state index for lake. *Limnology Oceanogr* **22**: 361-369.
- Dillon, P.J. and F.H. Rigler. 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **19**: 767-781.
- Dodds, W.K, J.R. Jones and E.B. Welch. 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. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state in 30 Swedish waste receiving lakes. *Arch. Hydrobiologia* **89**: 189-207.
- Grim, N.B. and S.G. Fisher. 1986. Nitrogen limitation in a Sonoran desert stream. *J. N. Am. Benthol. Soc.* **5**: 2-15.
- Jones, J.R., M.F. Knowlton and K.-G. An. 1997. Developing a paradigm to study and model the eutrophication process in Korean reservoirs. *Korean Journal of Limnology Special Issue* **82**: 1-9.
- Kimmel, B.L. 1990. Reservoir Primary Production. p. 133-199. *In: Reservoir Limnology: ecological perspectives* (Thornton, K.W. *et al.*, eds.). Wiley Interscience.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bullentin* **17**: 713-717.
- 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.
- Thornton, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. p. 1-4. *In: Reservoir Limnology: ecological perspectives* (Thornton, K.W. *et al.*, eds.). John Wiley & Sons, New York.
- Wetzel, R.G. 1990. Reservoir ecosystems: conclusions and speculations. p. 227-238. *In: Reservoir Limnology: Ecological perspectives* (Thornton, K.W. *et al.*, eds.). John Wiley & Sons, New York.

(Manuscript received 7 August 2009,
Revision accepted 18 September 2009)