

우리나라 대형 인공호에서 영양상태 평가 및 수질 변수를 이용한 경험적 모델 구축

박희정·안광국*

(충남대학교 생명과학부)

Trophic State Index (TSI) and Empirical Models, Based on Water Quality Parameters, in Korean Reservoirs. Park, Hee-Jung and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The purpose of this study was to evaluate trophic conditions of various Korean reservoirs using Trophic State Index (TSI) and predict the reservoir conditions by empirical models. The water quality dataset (2000, 2001) used here were obtained from the Ministry of Environment, Korea. The water quality, based on multi-parameters of dissolved oxygen (DO), biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), suspended solid (SS), Secchi depth (SD), chlorophyll-*a* (CHL), and conductivity largely varied depending on the sampling watersheds and seasons. In general, trophic conditions declined along the longitudinal axis of headwater-to-the dam and the largest seasonal variations occurred during the summer monsoon of July-August. Major inputs of TP occurred during the monsoon ($r=0.656$, $p=0.002$) and this pattern was similar to solid dynamics of SS ($r=0.678$, $p<0.001$). Trophic parameters including CHL, TP, SD, and TN were employed to evaluate how the water systems varies with season. Trophic State Index (TSI, Carlson, 1977), based on TSI (CHL), TSI (TP), and TSI (SD), ranged from mesotrophic to eutrophic. However, the trophic state, based on TSI (TN), indicated eutrophic-hypereutrophic conditions in the entire reservoirs, regardless of the seasons, indicating a N-rich system. Overall, nutrient data showed that phosphorus was a primary factor regulating the trophic state. The relationships between CHL (eutrophication index) vs. trophic parameters (TN, TP, and SD) were analysed to develop empirical models which can predict the trophic status. Regression analyses of log-transformed seasonal CHL against TP showed that the value of R^2 was 0.31 ($p=0.017$) in the premonsoon but was 0.69 ($p<0.001$) during the postmonsoon, indicating a greater algal response to the phosphorus during the postmonsoon. In contrast, SD had reverse relation with TP, CHL during all season. TN had weak relations with CHL during all seasons. Overall, data suggest that TP seems to be a good predictor for algal biomass, estimated by CHL, as shown in the empirical models.

Key words : eutrophication, reservoir, monsoon, empirical model, trophic state index

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

서 론

우리나라는 연 총강수량 1,267억 m^3 중 평균 이용량은 301억 m^3 으로 총강수량의 26%만을 이용 (건설교통부, 2001)하고 있는 실정으로 용수의 이용을 높이기 위해 댐이나 하구언을 건설하여 정체된 수계인 인공호를 조성하고 있다(김, 2003). 이러한 인공호는 자연호와는 형성과정이 근본적으로 다른 인위적인 과정을 거쳐 형성(Jones and An, 1997)되었기 때문에 생태적 특성이 현저히 다른 저수지로서의 특성을 지니고 있다(Thornton, 1990; Wetzel, 1990). 1990년대 이후 인위적으로 야기된 부영양화를 경험하고 있는 수가 증가하고 있다(농업기반공사, 2000). 김(1997)의 연구에 따르면, 소양호는 초기에 빈영양 상태(Oligotrophic condition)를 보였으나 1980년대 후반에는 부영양(Eutrophy) 상태로 전환된 것으로 보고되었다. 김 등(1998)은 충주호, 대청호, 안동호의 총인(Total phosphorus, TP) 농도 변화를 통해 13~18 $\mu g L^{-1}$, 21~29 $\mu g L^{-1}$, 16~22 $\mu g L^{-1}$ 로 부영양화 단계에 있다고 보고한 바 있으며, 신 등(2000)은 팔당호 연구에서 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL) 함량이 44.8 $\mu g L^{-1}$ 로 부영양 상태를 초과했음을 보고한 바 있다.

우리나라의 중대형 수체(하천 및 호소) 연구에 따르면, 계절적 몬순강우가 이화학적 수질특성에 대한 직접적인 영향을 준다는 연구는 다양하게 보고되고 있다(An and Jones, 2000; 안 등, 2001; An and Kim, 2003; 김과 김, 2004). 우리나라 연평균 강수량은 1,273 mm로 세계 평균 973 mm의 1.3배이지만 강수량의 2/3 이상이 하절기 장마철에 집중된다. 하절기 집중 강우는 유역으로부터의 급격한 유량증가를 가져오고 수체에 음적, 양적 변화를 가져오는 것으로 보고되고 있다(안 등, 2001; An and Kim, 2003). 특히, 비점오염원으로부터 각종 인과 질소 같은 영양염류의 유입이 보고되고 있다(안과 신, 2005). 허 등(1994)은 낙동강 수계의 연구에서 하절기 CHL 농도는 평균치(14.2 $\mu g L^{-1}$)를 크게 상회하는 것으로 보고하고 있다. 또한 이 등(2002)의 소양호 연구에 따르면, 장마기간의 TP 농도는 장마 전에 비해 91%까지 증가하였고, 총질소(Total nitrogen, TN) 농도는 최대치를 보였고, CHL 농도는 장마 후 수층이 안정되는 장마후기(9월)에 최대치를 보이는 것으로 나타났다. An(2000)은 대청호 연구에서 장마기간에 생물학적 산소 요구량(BOD), 화학적 산소 요구량(COD) 농도는 최대치를 보였으며, TN는 3.018 $mg L^{-1}$ 로 최고값을 나타냈고, TP는 장마철에 연평균 농도보다 약 2배 정도 높게 나타나는 것으로 보고하

였다.

호소의 영양 상태를 평가하기 위한 다양한 유형의 방법이 적용되어왔다(Vollenweider, 1968; Havens, 1994; Nurnberg, 1996). 허 등(1994)은 U.S. EPA(1976)와 Forsberg and Ryding(1980) 기준으로 볼 때 낙동강 수계는 매우 부영양화 상태라고 하였다. 유 등(1999)은 금강의 연구에서 U.S. EPA(1976)의 호소 부영양화 판정 기준인 CHL 농도 10 $\mu g L^{-1}$ 에 비교해 볼 때 평균 농도 16.3~83.7 $\mu g L^{-1}$ 로 부영양화 상태임을 나타냈다. 안(2000)의 대청호 연구에서 Nurnberg(1996)의 기준에 의해 TP 농도는 부영양 상태에 있다고 밝혔으며, 안 등(2002)은 소양호를 Nurnberg의 CHL 분류기준에 의해 중영양 상태로 판명하였다. TN 농도는 Forsberg and Ryding(1980) 및 OECD(1982)의 기준에 따라 부영양 혹은 과영양 상태로 판단하였다.

Carlson(1977)은 대상으로 한 호소의 대부분을 지수 0~100 범위 내에 넣기 위해 부영양화도 지수(Trophic State Index, TSI)를 제창했다. 유 등(1999)은 부영양화도 지수(TSI)를 통해 금강은 부영양 상태를 훨씬 초과하는 수준을 나타내고 있다고 보고했다. 허 등(1994)은 낙동강 수계의 하계 자료를 계산한 결과 투명도(Transparency, SD), CHL, TP 모두 60~80으로 부영양화 단계로 나타났다.

Sakamoto(1966)는 일본의 호소에서 질소와 인의 농도 및 조류의 생산이 양적으로 어떠한 관계가 있는지 해석하기 위해 TP-CHL, SD-TP, SD-CHL간의 경험적 모델(Empirical model)을 개발하여 영양상태 평가 및 예측에 이용하였다. 이를 기반으로 북미 및 유럽에서는 많은 자체적 경험적 모델을 개발하였다. 이 등(2002)의 소양호 연구에서 CHL 농도변화는 TP 농도변화에 의해 82.3%까지 설명되었으며, CHL-TN 회귀분석에 따르면 R^2 값은 0.08~0.17 범위로 TN은 CHL의 변이를 거의 설명할 수 없었다. 장마 전기와 장마 후기에 대청호에서 Log로 전환한 TP 농도변화는 CHL 농도변화($R^2 \geq 0.83$)를 강하게 반영하였으며, 이는 유럽과 북미 호소에서는 이미 CHL과 TP의 Log 전환 회귀분석 모델이 보고된 바 있다(An *et al.*, 2002).

본 연구 목적은 1) 수문자료를 통해 몬순강우의 영향과 수리수문학적 특성을 알아보고자 한다. 2) 우리나라의 계절적 수문현상을 고려하여 하절기 집중강우가 호소 수질 자료의 변화에 미치는 영향과 호소의 부영양화도 지수(TSI)를 평가한다. 3) 경험적 모델(Empirical model) 개발에 의한 영양상태 평가를 통해 TP, TN, CHL 그리고 SD 수질 변수들 간의 다각적 상호관계의 이해를 통해 CHL

조절인자를 알고자한다.

조 사 방 법

1. 연구대상 호소 및 자료

다목적댐 수문자료는 소양강, 충주호, 팔당호, 대청호, 주암호, 영산호 및 안동호를 대상으로 2000년 1월부터 2001년 12월까지 2년 동안 측정된 한국수자원공사(<http://www.kowaco.or.kr>)의 다목적댐 수문자료를 통해 유역 면적, 깊이, 길이, 체적, 강수량, 유입량, 방류량의 자료를 분석하였다(Table 1).

호소수질자료 연구대상은 한강수계(HR), 금강수계(KR), 섬진강수계(SR), 영산강수계(YR), 낙동강수계(NR)로 대별하여 자료를 분석하였다. 본문 내 한강수계는 HR로, 금강수계는 KR, 섬진강수계는 SR, 영산강수계는 YR, 낙동강수계는 NR로 표기하였다. 세부적인 조사 수계는 다음과 같다.

- 1) 한강수계 : 소양호(5), 팔당호(5), 충주호(5), 조정지호(4), 화천호(3), 춘천호(3), 의암호(3), 청평호(3), 괴산호(3), 광동호(1)
- 2) 금강수계 : 대청호(6), 금강하구(3), 탑정지(2), 보령호(3)
- 3) 섬진강수계: 섬진강호(3), 동북호(2), 보성강호(2), 주암호(3), 부암호(3)
- 4) 영산강수계: 영산호(3), 담양호(2), 장성호(2), 광주호(2), 나주호(2)
- 5) 낙동강수계: 안동호(3), 남강호(3), 합천호(3), 임하호(3), 하구언(3), 운문호(2), 가창호(2), 영천호(2)

2. 수질자료분석

호소의 영양 상태를 알기 위해 수질 자료는 수계별로 나누어 월별로 평균한 호소수질자료를 이용하였다. 연구에 사용된 자료는 2000년 1월부터 2001년 12월까지 2년 동안 월별로 측정된 환경부(<http://www.me.go.kr>)의 호소수질자료로 pH, 전기전도도(Conductivity, Cond.), 용존 산소 농도(Dissolved oxygen, DO), 생물학적 산소 요구량(Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소 요구량(Chemical oxygen demand, COD), 총인(Total phosphorus, TP), 총질소(Total nitrogen, TN), TN:TP비율(TN/TP), 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL), 부유물질(Suspended solid, SS), 투명도(Secchi depth, SD) 등을 이용하였다.

수집된 자료는 우리나라 수리수문학적 반응의 특성 및 몬순현상에 의한 수질변화를 파악하기 위해 수계별 공간적 변이와 계절적 변이로 분류하였다. 공간적으로 수질 분석을 위해 본류를 댐에서부터의 거리를 기준으로 상류, 중류, 하류로 구분하여 환경부에서 지정한 댐 근처를 S1으로 댐으로부터 S2, S3, S4로 구분하였다. 한강수계(HR)에서는 소양호(SY), 충주호(CJ), 팔당호(PD)를, 금강수계(KR)는 대청호(DC)를, 섬진강수계(SR)는 주암호(JA)를, 영산강수계(YR)는 영산호(YS)를, 낙동강수계(NR)는 안동호(AD)를 지점별로 구분하여 측정하였다. 계절적으로 수질 상태를 판단할 때는 하절기 집중 강우특성을 반영하기 위해 장마를 기점으로 장마 전기(Premonsoon, 1~6월), 장마기(Monsoon, 7~8월) 그리고 장마후기(Postmonsoon, 9~12월)로 구분하여 조사하였다. 본 연구에서 수질요인들 간의 상관관계를 알아보는 통계적 측정 방법은 Pearson의 상관도 분석법을 이용하였다.

Table 1. Hydro-morphological characteristics in five watersheds (HR, KR, SR, YR, NR). The letter of 'SY', 'CJ', 'PD', 'DC', 'JA', 'YS', and 'AD' indicate Soyang, Choongju, Paldang, Daechung, Jooam, Yongsan, and Andong reservoir, respectively. Mo=outflow rate during the monsoon, No=outflow rate during the non-monsoon.

Water system	HR			KR	SR	YR	NR
	SY	CJ	PD	DC	JA	YS	AD
Watershed area (km ²)	2703	6648	-	4134	1010	193	1584
Surface area (km ²)	70	97	-	73	33	-	52
Water volume (10 ⁶ m ³)	1680	1440	90	910	340	180	600
Water depth (m)	100	70	20	60	40	12	50
Precipitation (mm)	1100	1198	-	1230	1530	1507	950
Inflow (10 ⁶ m ³)	56	155	-	102	25	-	27
Water capacity (10 ⁶ m ³)	2900	2750	244	1490	457	191	1248
Outflow rate (%)							
Mo / No		69 / 31		73 / 27	73 / 27	68 / 32	68 / 32

3. 부영양화지수 (TSI)를 통한 영양상태 평가

호소의 부영양도를 평가할 수 있는 기준에 제시된 여러 방법 중 Carlson(1977)의 접근에 기초하여 CHL, TP, SD, 그리고 TN 자료를 부영양화도 지수 (Trophic State Index)로 전환하여 영양 상태를 평가하였다. 또한, TN 자료는 Kratzer and Brezonik (1981)의 접근에 기초하여 TSI로 전환하였다. 공식은 다음과 같다 (An and Park, 2002).

$$TSI(CHL, \mu g L^{-1})=10 \times [6 - (2.04 - 0.68 \ln Chl-a) / \ln 2]$$

$$TSI(TP, \mu g L^{-1})=10 \times [6 - \ln(48/TP) / \ln 2]$$

$$TSI(SD, m)=10 \times [6 - \ln SD / \ln 2]$$

$$TSI(TN, mg L^{-1})=10 \times [6 - \ln(1.47//TN) / \ln 2]$$

한강수계 (HR), 소양호 (SY), 충주호 (CJ), 팔당호 (PD), 금강수계 (KR), 대청호 (DC), 섬진강수계 (SR), 주암호 (JA), 영산강수계 (YR), 영산호 (YS), 낙동강수계 (NR), 안동호 (AD)로 대별하여 부영양화도 지수를 평가하였다.

4. 경험적 모델 (Empirical Model)

호소에서의 질소와 인의 농도 및 조류의 생산이 양적으로 어떠한 관계가 있는지 해석하기 위해 TN-CHL, TP-CHL, SD-CHL, TP-SD간의 경험적 모델 (Empirical model)을 이용하여 영양상태 평가 및 예측에 이용하였다. 우리나라 대형 인공호 18곳(소양, 팔당, 충주, 화천, 춘천, 청평, 괴산, 보성강, 대청, 남강, 합천, 영천, 담양, 나주, 부안, 탐정지, 임하, 주암)을 대표적으로 조사함으로써 우리나라 호소의 전체적인 수질 평가를 대표할 수 있다. 수질 자료를 계절별(장마 전기, 장마기, 장마 후기)로 나누어 Log로 전환한 $Log_{10}(TN)$, $Log_{10}(TP)$, $Log_{10}(CHL)$, $Log_{10}(SD)$ 를 이용하여 Pearson의 상관도 분석법과 회귀 분석을 실시하였으며, 이런 통계적인 분석에는 SPSS를 이용하였다. 이를 통해 하절기 집중호우가 수질측정 자료 인자에 미치는 영향 및 부영양의 주요 인자인 CHL에 영향을 주는 요인을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 수리 수문학적 특성

조사기간 동안 수계의 평균 강수량은 2000년과 2001년 각각 1,360 mm, 991 mm로 나타났다. 10년간의 강수량의 변화를 통해 보듯 2000년이 2001년에 비해 강수량,

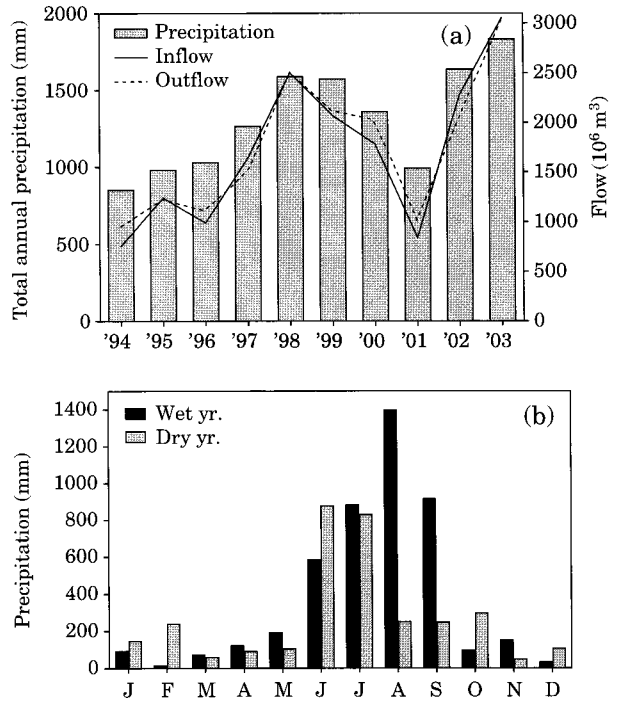


Fig. 1. Total annual precipitation and monthly precipitation during the wet year (2000) and dry year (2001).

유입량, 유출량에 있어서 큰 차이를 보였다 (Fig. 1a). 이러한 차이로 2000년은 집중 강우해, 2001년은 가뭄해로 표기하기로 한다. 계절별 강우에 따르면 1~3월의 갈수기 동안에는 2000년과 2001년에 각각 91 mm, 148 mm의 평균 강수량을 보인 반면 집중호우 기간인 6~8월에는 2000년과 2001년에 각각 953 mm, 641 mm의 평균 강수량을 보여 연 총강수량의 62.9%, 59.4%를 나타냈다 (Fig. 1b). 이를 통해 강수량 뿐만 아니라 유입, 유출량의 대부분이 집중호우 기간에 분포되어 있음을 알 수 있다. 장마기의 유입량이 수질변화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 집중 강우해는 수체류 시간도 짧고 외부 부유물의 유입, 유출이 많을 것으로 예측된다.

우리나라의 하천이나 호소의 수질은 강수량이나 유량과도 밀접한 관계를 보이고 있기 때문에 (전, 1996; 김 등, 2002) 유량에 영향을 미칠 것으로 판단되는 각 수계별 호소 형태 및 수리수문학적 변동을 평가하였다. 한강수계의 소양강호, 충주호, 금강수계의 대청호는 호소 면적, 수심, 저수량 등이 높은 값을 가지는 대형 인공호인 반면 영산강수계의 영산호는 호소 크기뿐 아니라 유입, 방류량 또한 작은 것으로 나타났다 (Table 1). 특히 영산강수계는 다른 호소에 비해 오염도가 심각한 것으로 나타났는데

Table 2. Annual averages of water quality parameters. Each value is an average of each watershed in the wet year and dry year.

Parameters	Wet year					Dry year				
	HR	KR	SR	YR	NR	HR	KR	SR	YR	NR
Temp. (°C)	14.2	14.9	13.5	16.3	13.5	14.2	15.0	12.7	16.9	13.1
pH	7.9	7.8	7.3	7.5	7.6	7.8	7.9	7.2	7.5	7.7
Cond. ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	123	153	72	251	145	136	162	74	278	138
DO (mg L^{-1})	10.2	9.7	8.7	10.1	9.1	10.1	10.1	8.9	10.4	9.2
BOD (mg L^{-1})	1.2	1.7	1.6	1.8	1.8	1.3	1.9	1.7	1.8	1.8
COD (mg L^{-1})	2.4	3.6	3	5.4	3.0	2.5	4.7	3.1	4.7	2.9
TN (mg L^{-1})	2.041	2.065	1.152	2.012	1.702	1.951	2.099	1.450	2.570	1.783
NO ₃ -N (mg L^{-1})	1.374	1.474	0.789	1.250	1.384	1.385	1.321	0.840	1.036	1.384
NH ₃ -N (mg L^{-1})	0.194	0.167	0.063	0.175	0.056	0.185	0.207	0.056	0.351	0.044
TP ($\mu\text{g L}^{-1}$)	28	25	22	56	23	28	24	18	49	28
TN/TP	87	98	55	40	81	75	77	84	67	67
CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	7.4	12.6	10.8	18.9	11.2	8.4	14.7	8.8	10.2	10.7
SS (mg L^{-1})	3.1	8.4	3.6	8.6	5.4	3.5	11.4	3.6	5.7	6.7
SD (m)	2.93	1.69	2.51	0.99	1.81	2.58	1.53	2.51	1.41	1.73

(Table 2) 이는 호소의 크기와 방류량이 작아서 수체류 시간이 길기 때문이라 여겨진다. 이를 통해 호소의 규모와 같은 형태학적 차이(EPA, 1974)뿐만 아니라 수리 수문학적인 특성은 부영양화 현상을 조절하는 가장 중요한 인자인 호소 내 영양염류 농도에 영향을 주는 것으로 사료된다. 김 등(2002)의 연구에서처럼 조류가 증가할 때 방류량을 늘리는 것이 이들의 발생을 감소 또는 증대시킬 수 있는 방안으로 사료된다.

2. 수질분석을 통한 몬순강우의 영향

우리나라 수리수문학적 반응의 특성 및 몬순현상에 의한 수질변화를 파악하기 위해 수계별 공간적 변이와 계절적 변이로 분류하였다.

각 수계를 공간적으로 구분하여 수질 변이를 조사한 결과 공간에 따라 변화를 보였다(이 등, 2002). S1 지점에서 S4 지점으로 갈수록 TP, TN, CHL, SS 농도가 증가하고, SD는 감소하는 것으로 나타나 댐에서 멀어질수록 오염도가 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 2a, b). 이는 이 등(2002)의 소양호 연구에서 상류에서 하류로 갈수록 수질요인이 감소하는 것과 일치한다.

2000~2001년 수계별 수질요인 연평균 값을 통해 수계별 영양 상태와 집중 강우해와 가뭄해 간 수질요인별 농도 차이가 있음을 알 수 있다(Table 2). 안(2000)의 연구와 같이 하절기 몬순 강도의 희석효과에 의해 집중 강우해에 전기전도도가 더 낮게 나타났으며, TP는 집중 강우해에 더 높게 나타났는데 이를 통해 강우가 호소 내

인 분포에 주된 영향을 주는 것을 알 수 있다(Hoyer and Jones, 1983; Soballe and Bachman, 1984; Ford, 1990). TN은 한강 수계를 제외하고는 가뭄해에 증가했는데 이는 유입량보다는 점오염원에 의해 직접적으로 결정되는 것으로 사료된다. 우리나라의 몬순 특성은 이런 계절별 강우 분포에 따라 이화학적 수질이 역동적으로 변화하는 것으로 보고하고 있다(An, 2000a, b; An and Jones, 2000; An and Kim, 2003). Pearson의 상관도 분석에 따르면 강우에 따른 전기전도도 변이는 상관지수 $r = -0.511$, $p = 0.021$ 로 나타났다(Table 3). 이는 An and Jones(2000)의 다른 국내 대형 인공호에서의 연구결과와 일치하며, 이를 통해 호소 내 계절적 이온농도 및 성분에 영향을 주는 1차적인 요인은 하절기 동안 증가된 유입수의 영향으로 몬순 강도에 의존하는 희석효과로 사료된다. 또한 강우는 TP, SS에 대하여 각각 높은 상관성($r = 0.656$, $r = 0.678$)을 보였으며, 그 외 항목들에 대해서는 낮은 상관성을 보였으나 안과 신(2005)에서와 같이 강우가 수질의 이화학적 변이에 중요한 요소임이 재차 확인되었다.

계절적 특성을 반영하여 수계별 수질요인을 분석해 보았다(Figs. 3-6). 연평균 수온은 14~15°C로서 최소 3°C에서 최대 29°C까지 전형적인 온대권의 특성을 보였다. 안과 신(2005)의 연구에서 수질변수에 대한 월 변화 특성은 온도 및 강우특성에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 용존산소의 연평균 농도는 집중 강우해와 가뭄해가 각각 9.6 mg L^{-1} 와 9.7 mg L^{-1} 로 나타났다(Table 2). 수온이 상승할수록 DO는 감소하는 경향(Fig. 3)을 보였는데 이런 특성은 타 하천의 연구결과와도 일

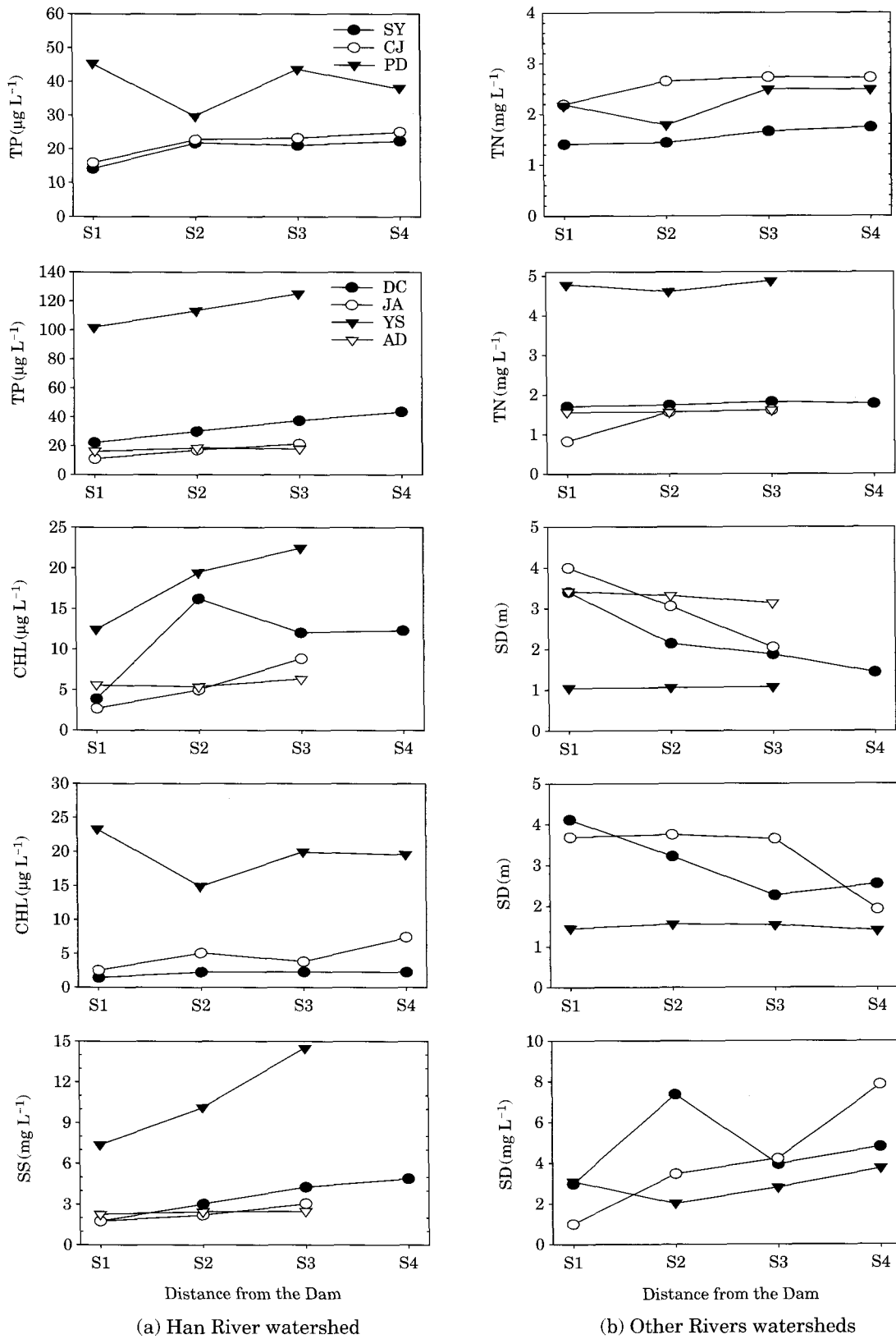


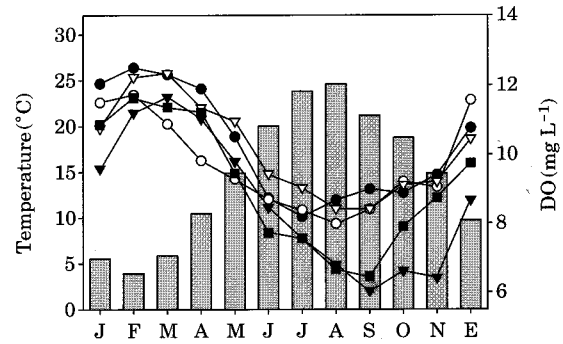
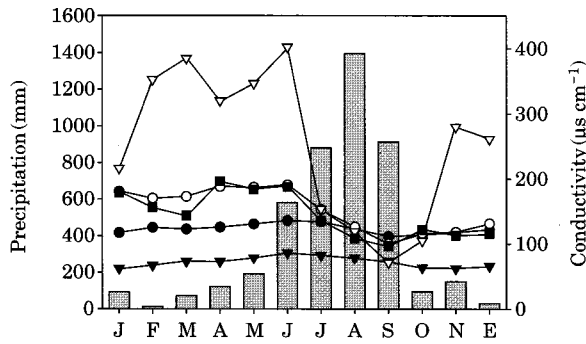
Fig. 2. Spatial variations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chlorophyll-a (CHL), transparency (SD), and suspended solid (SS) along the main axis of the various reservoirs.

Table 3. Pearson's correlation coefficients (*r*) and its probability (*p*, *n*=100) of chemical parameters.

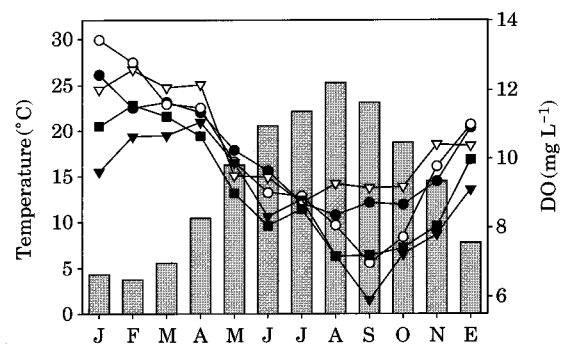
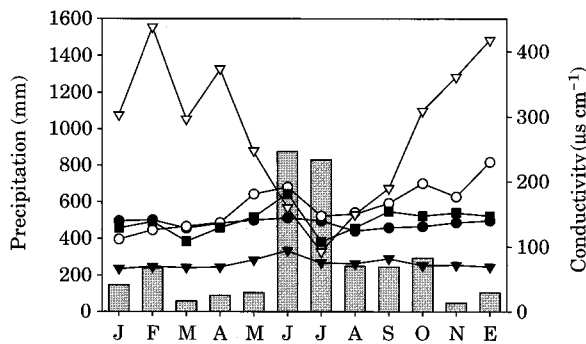
		Prec.	Cond.	DO	BOD	COD	TP	TN	CHL	SS
Cond.	<i>r</i>	-.511*								
	<i>p</i>	.021								
DO	<i>r</i>	-.574**	.540*							
	<i>p</i>	.008	.014							
BOD	<i>r</i>	.388	.200	-.016						
	<i>p</i>	.091	.399	.947						
COD	<i>r</i>	.523*	.079	-.606**	.552*					
	<i>p</i>	.018	.742	.005	.012					
TP	<i>r</i>	.656**	-.505*	-.194	.510*	.209				
	<i>p</i>	.002	.023	.412	.022	.377				
TN	<i>r</i>	.072	.013	.380	.497*	-.126	.464*			
	<i>p</i>	.761	.958	.098	.026	.597	.039			
CHL	<i>r</i>	.324	-.310	-.451*	.440	.494*	.372	-.044		
	<i>p</i>	.163	.183	.046	.052	.027	.106	.855		
SS	<i>r</i>	.678**	-.284	-.673**	.510*	.733**	.499*	.043	.550*	
	<i>p</i>	.001	.225	.001	.022	.000	.025	.857	.012	
SD	<i>r</i>	-.471*	.521*	.708**	-.048	-.473*	-.218	.106	-.404	-.549*
	<i>p</i>	.036	.019	.000	.840	.035	.356	.655	.077	.012*

* : significant at the 0.05 level. ** : significant at the 0.01 level.

(a) Wet year



(b) Dry year



■ Prec. ● HR ○ KR ▼ SR ▽ YR ■ NR

Fig. 3. Seasonal variations of temperature vs. dissolved oxygen (DO), and precipitation vs. conductivity in the five watersheds.

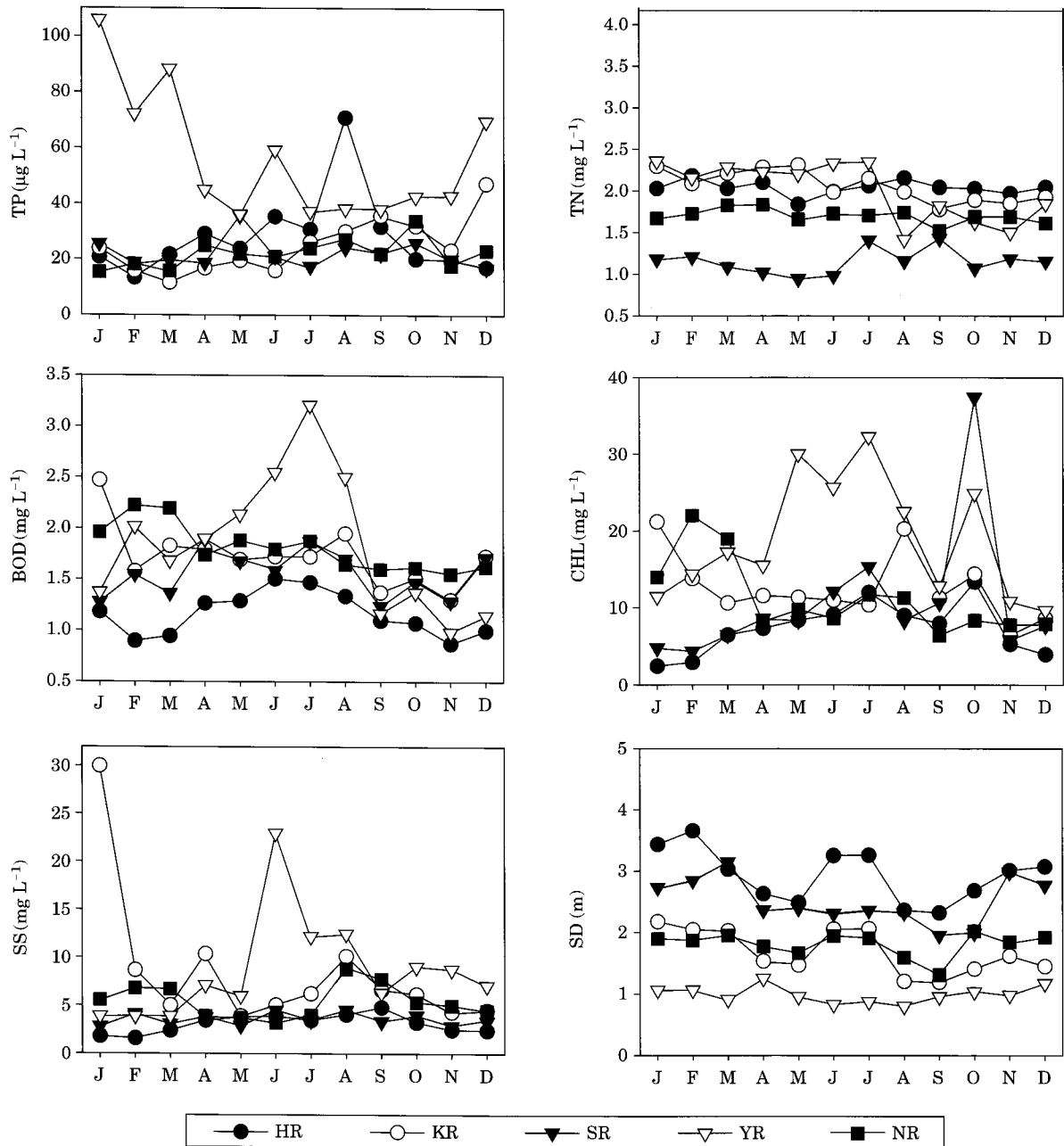


Fig. 4. Seasonal fluctuations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), biological oxygen demand (BOD), chlorophyll-*a* (CHL), suspended solid (SS), and transparency (SD) in wet year.

치하며 하절기 용존산소를 조절하는 요인은 수온이라는 사실을 제시한다(An, 2000; 안과 신, 2005). 수소이온 농도는 수계들이 전체적으로 연평균 7.6으로 중성 상태를 보였으며 집중호우가 시작되는 8월경에는 8.4까지 상승하였으나 9월 이후에는 안정성을 유지하였다(Table 2).

BOD의 연평균 농도는 집중 강우해와 가뭄해가 각각 1.6 mg L^{-1} 와 1.7 mg L^{-1} 로서 우리나라 현행 수질기준에

의거할 때 2등급으로 평가된다(Figs. 4, 5). 집중 강우해에 영산강수계의 BOD 농도는 장마가 시작되는 6월부터 상승하여 최고 3.21 mg L^{-1} 에 도달하였다. BOD 최대치가 집중호우 시기와 일치한다는 것을 고려할 때 강우와 함께 인근 수계로부터 유입된 비점원 및 점원오염원인 외 부기원유기물의 영향으로 사료된다(안과 신, 2005).

질소는 부영양화의 주된 요인으로 여겨지고 있다. TN

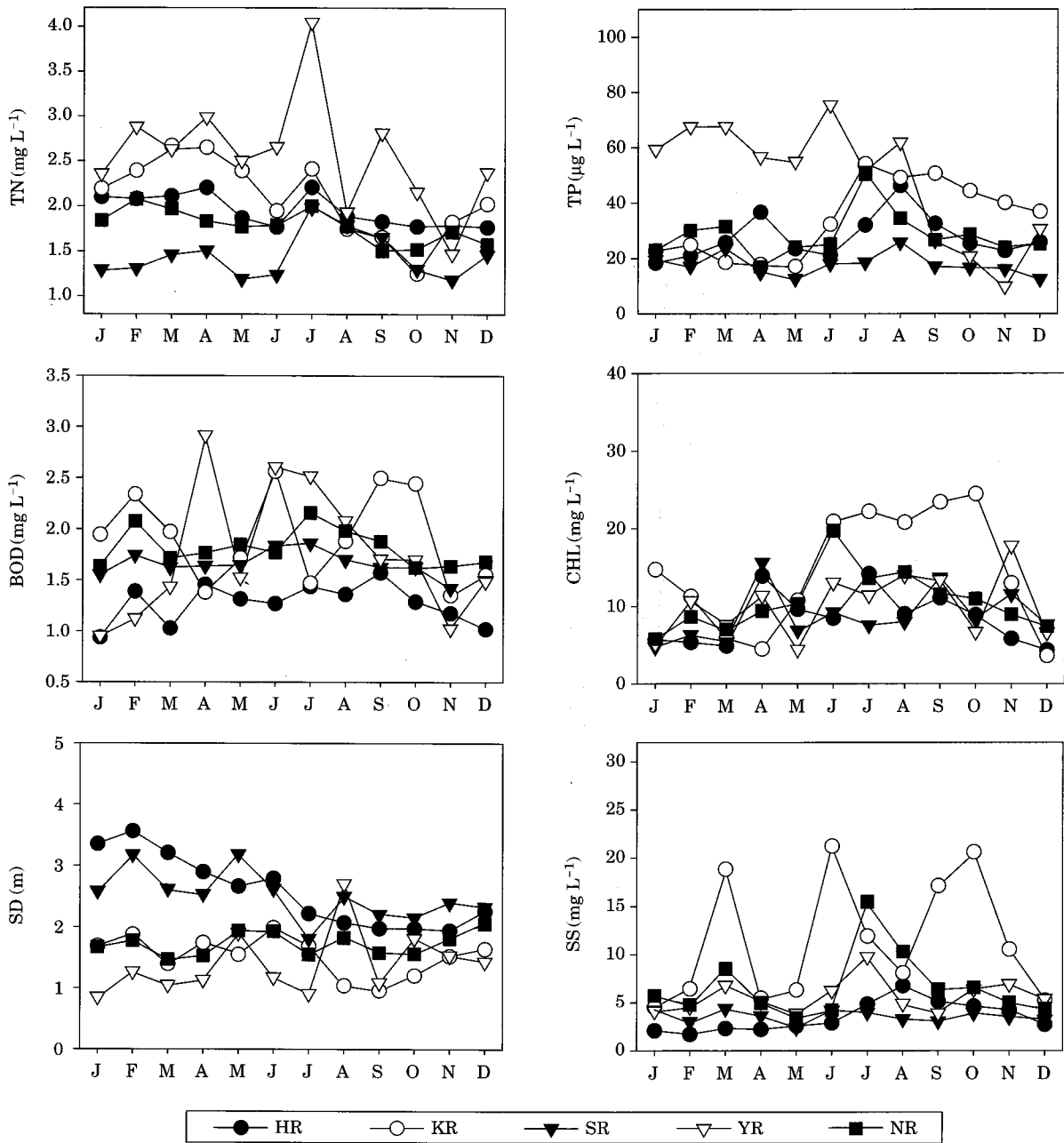


Fig. 5. Seasonal fluctuations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), biological oxygen demand (BOD), chlorophyll-a (CHL), suspended solid (SS), and transparency (SD) in dry year.

의 연평균 농도는 집중 강우해와 가뭄해가 각각 1.794 mg L⁻¹와 1.971 mg L⁻¹이었고 가뭄해 장마철 영산강 수계에서 최고값인 4.051 mg L⁻¹이었으며 그 외의 기간에는 비교적 변동 폭이 적은 것으로 나타났다(Figs. 4, 5). 연평균 TN 농도가 높은 것은 An(2000)의 연구 결과에서 보듯 여름철 장마기의 외부 유입량의 증가보다는 산업폐수 농장과 도시의 오물, 부패조의 유출액 등 점오염원에

서 축적된 오염부하 증가의 결과로 사료된다.

호소가 부영양화가 되는지 빈영양화가 되는지는 대부분 인의 농도에 달려 있다. TP 농도 25 μg L⁻¹을 기준으로 이 이상이면 부영양호, 이하이면 빈영양호로 구분할 수 있다. TP는 연중 변동 폭이 컸으며 연평균 농도가 집중 강우해와 가뭄해가 각각 31 μg L⁻¹와 29 μg L⁻¹로 부영양 상태를 나타냈으며, 특히 집중 강우해에 TP 농도가

더 높게 나타났다(Figs. 4, 5). 영산강 수계를 제외한 모든 수계에서 장마기 TP 농도가 연평균 농도보다 약 1.5배 정도 높게 나타나 수계내의 인 유입은 주로 하절기에 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 An(2000), 이 등(2002)의 TP 농도는 여름장마의 강도에 의해 결정된다는 연구 결과와 일치한다. 특히 한강 수계에서는 TP 변화는 강우의 시작과 함께 6월에 급격히 증가하여 8월에 최대값인 $70.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 보였으며 다시 강우와 함께 감소하는 경향을 보였다. 이는 김(1996)과 허 등(1992)의 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. 6). 안과 신(2005), 김 등(2004)의 연구에서 TP의 변동이 TN보다 강우와 더 밀접한 것으로 나타난 것과 일치한다. 또한 이런 특성은 하절기 몬순의 영향으로 국외 호소보다 국내에서 더 복잡하게 나타날 수 있음이 지적되었다(An, 2000, 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 아니하며, 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. 두 해 평균 TN/TP는 한강수계가 81, 금강 수계가 88, 섬진강 수계가 70, 영산강 수계가 54, 낙동강 수계가 74로 높게 나타나(Table 2) 이미 질소 성분은 과잉 공급 상태인 것으로 판단되며 이를 통해 우리나라 수계가 인의 농도에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 안 등(2000)에서 TP는 TN/TP와 높은 역 상관관계($r = -0.51, p < 0.01$)를 보였으나 TN와는 낮은 상관성($r = -0.21$)을 보여 TN/TP가 TP의 변동 폭에 의해 주로 조절되는 것으로 나타났다.

부영양호에서는 인과 같은 제한영양소의 유입 증가로 인하여 조류의 생물량이 많아진다. CHL 농도는 호소의 부영양화 정도를 잘 포현해주는 인자이다. CHL 농도는 장마기보다 장마 후에 높은 농도를 보였다. 이것으로 보아 조류 생체량은 영양염류의 농도 뿐만 아니라 수층의 안정화에 영향을 받는 것으로 판단되었다(안 등, 2002). 또한 장마기의 CHL 농도가 장마 후보다 더 낮은 이유는 장마기 호소의 유입량과 유출량의 급격한 증가로 인한 수체류 시간의 감소로 인해 조류의 씻겨 내림과 Inorganic SS 등 유입물의 증가로 인한 호소의 탁도 증가와 광투과도의 감소에 의해 CHL 생산량이 감소하는 것으로 사료된다. CHL 농도를 이용하여 부영양화를 나타내기 위

한 여러 가지 방법이 제시되었다. OECD에서는 CHL 농도가 $25 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상, U.S. EPA에서는 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 보다 높으면 부영양단계로 분류하고 있으며 Forsberg and Ryding은 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상을 과영양호로 분류하고 있다. 이들 기준으로 볼 때 우리나라는 한강 수계를 제외한 모든 수계의 CHL 농도가 $10.2 \sim 18.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 나타내 부영양 단계에 있다고 사료된다(Figs. 4, 5). 여름철 몬순강우에 의해 CHL 농도가 증가함을 알 수 있으며 이 등(2002)의 호소의 수화현상(Algal bloom)이 하절기 집중호우 이후에 나타날 가능성을 시사하는 것과 일치한다.

SS의 연평균 농도는 집중 강우해와 가뭄해가 각각 5.8 mg L^{-1} 와 6.2 mg L^{-1} 이고 금강수계가 8.4 mg L^{-1} , 11.4 mg L^{-1} 로 가장 높았다. 금강 수계를 제외한 수계에서 대체적으로 장마기간에 평균농도가 상승하였다(Figs. 4, 5). 안과 신(2005)의 연구 결과로 미루어 볼 때 대부분은 비휘발성 무기물(Non-volatile suspended solids)의 증가로 사료된다. 이런 무기성 물질의 증가는 Perkins and Jones(1994)의 복미 하천 연구에서 제시된 바와 같이 집중호우기인 봄철의 하천방류량과 일치하는 양상을 보여주었다.

부영양호는 조류의 양이 많아 혼탁하며, 일반적으로 투명도 1.5~2.0 m를 부영양호의 경계로 본다. 조사 결과 한강 수계와 금강 수계는 2.5 m를 초과해 비교적 깨끗한 상태를 나타냈으나 영산강 수계는 0.99 m, 1.41 m로 부영양화를 초과한 상태를 나타냈으며, 다른 수계들에서 1.69~1.71 m로 부영양 상태임을 나타냈다(Figs. 4, 5). 일반적으로 강수량이 적을 때는 투명도가 높았으며, 강수량이 많은 장마기에는 투명도가 낮게 나타났다(Fig. 6). 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 하천 생태계의 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(Fig. 6). 또한 집중 강우해에 강수량의 증가로 인한 외부 유입량의 증가로 TP 농도가 더 높게 나타났으며 수체가 안정되는 가뭄해에 CHL 농도가 더 높게 나타났다. 이는 Jones *et al.*(1997), An(2000)의 타하천의 연구결과와 일치한다. 이를 통해 호소 내 계절적 수질요인에 영향을 주는 1차적

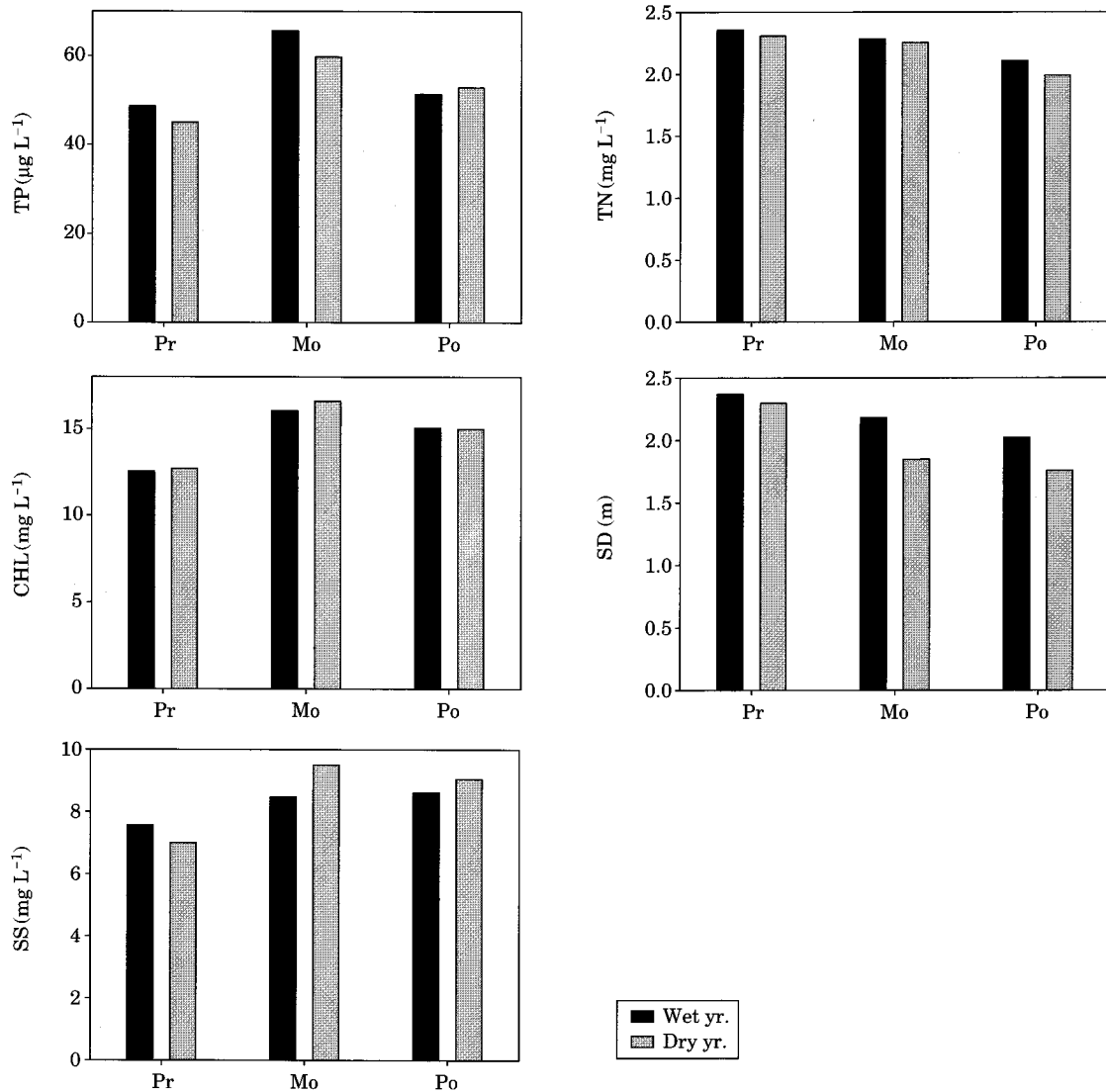


Fig. 6. Seasonal variation (premonsoon, monsoon, and postmonsoon) of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chlorophyll- α (CHL), transparency (SD), and suspended solid (SS) along the main axis of the reservoirs in the wet and dry year. 'Pr', 'Mo', and 'Po' indicate Premonsoon, Monsoon and Postmonsoon.

인 요인은 하절기 몬순 강도에 의존하는 것을 알 수 있다.

3. 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 수계별로 대부분 부영양 상태를 나타냈으며 일부는 부영양 상태를 초과하는 값을 보였다 (Fig. 7). 하지만 수질요인 간 부영

양화도 지수는 차이가 나타났다. 부영양화도 지수 중 조류량을 직접적으로 표현하는 부영양화도 지수는 TSI (CHL)이다. 조사 결과 모든 수계의 TSI (CHL)은 일부 큰 호소 (소양, 충주, 주암, 안동호)를 제외한 대부분 수계에서 50을 초과해서 나타내 부영양 상태에 있음을 나타냈다. 집중 강우해에 수계가 작은 영산강 수계를 제외한 대부분의 큰 수계의 호소에서 TSI (CHL)이 더 낮게 나타났다. 이는 An and Jones (2000)의 연구 결과와 일치하며 썩겨 내려가는 조류량의 증가와 광제한 효과에 의한 것으로 사료된다 (Carlson, 1977; Kimmel *et al.*, 1990). 영산강 수계를 제외한 대부분의 수계의 TSI (TP), TSI (SD)

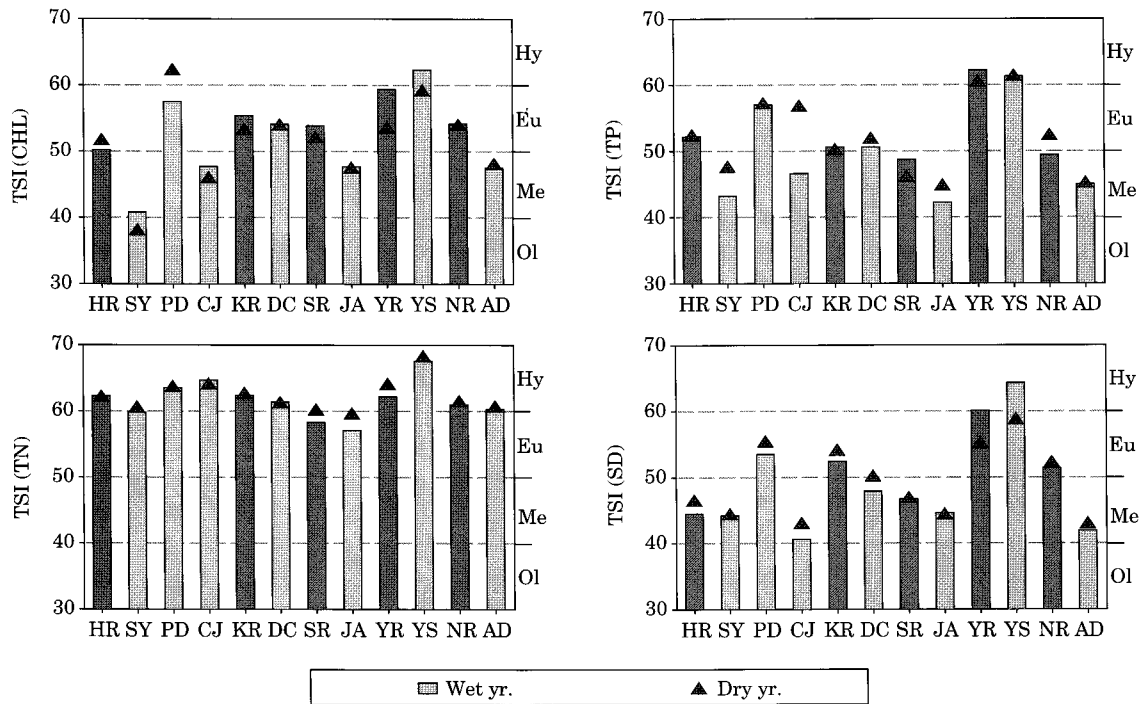


Fig. 7. Trophic State Index (TSI, Carlson 1977) based on total phosphorus (TP), chlorophyll-*a* (CHL), transparency (SD), and total nitrogen (TN) in various reservoirs during wet and dry year. In the Figure, ‘Ol’, ‘Me’, ‘Eu’, and ‘Hy’ indicate oligotrophic, mesotrophic, eutrophic, and hypereutrophic condition, respectively.

Table 4. Empirical model of CHL vs TP, CHL vs TN, SD vs TP, and SD vs CHL during the wet year (n= 18).

Empirical model		Equation	R ²	p
CHL vs TP	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.77\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.21$	0.42	0.004
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.45\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.32$	0.20	0.070
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.80\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.14$	0.47	0.002
CHL vs TN	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=-0.26\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.78$	0.01	0.733
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=1.11\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.75$	0.16	0.098
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.95\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.70$	0.22	0.048
SD vs TP	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.40\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.82$	0.30	0.019
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.05\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.41$	0.01	0.769
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.37\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.78$	0.11	0.187
SD vs CHL	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.49\text{Log}_{10}(\text{CHL})+0.70$	0.65	<0.001
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.43\text{Log}_{10}(\text{CHL})+0.73$	0.38	0.006
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.65\text{Log}_{10}(\text{CHL})+0.88$	0.45	0.002

를 통해 45~50 범위로 중영양 상태를 나타냈으며 집중 호우해가 가뭄해보다 높게 나타났다. TSI(TN)은 모든 수계가 60 이상으로 이미 호소 대부분이 부영양 상태를 초과했음을 보여준다. 따라서 TN은 수질 관리시 무시될 수 있음을 알 수 있다. 이는 이 등(2002)에서 제시된 바 있다. 또한 영산강 수계 모든 부영양화도 지수가 60을 초과해 나타났는데 김 등(2004)연구에서 평균수심이 깊을수

록($r=0.47, p<0.001$) CHL 농도는 감소하는 경향을 나타낸다고 하는 연구에 기초할 때 영산강 수계가 다른 수계들보다 부영양화 지수가 높게 나타난 것은 수체가 작고 수체류 시간이 길어서 오염도가 심각한 것으로 사료된다.

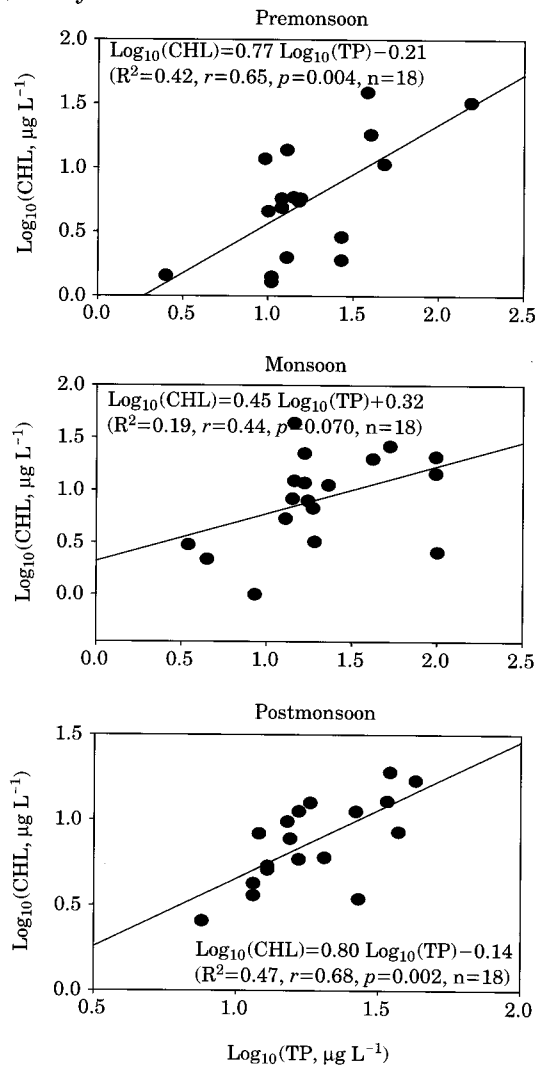
4. 경험적 모델 (Empirical Model) 구축

CHL 농도는 일반적으로 부영양화의 정도와 관련되어

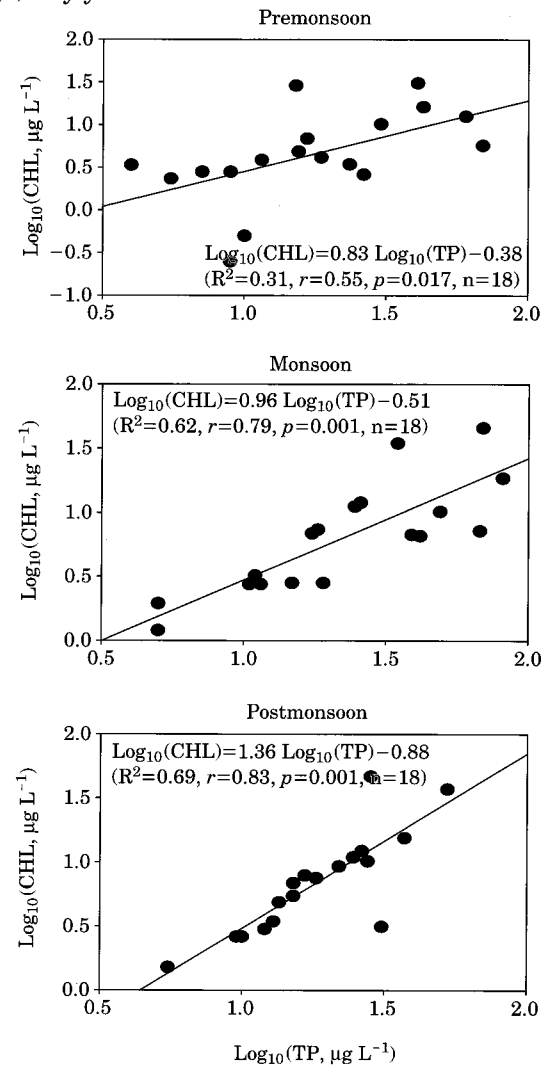
Table 5. Empirical model of CHL vs TP, CHL vs TN, SD vs TP, and SD vs CHL during the dry year (n=18).

Empirical model		Equation	R ²	p
CHL vs TP	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.83\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.38$	0.31	0.017
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.96\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.51$	0.62	< 0.001
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=1.36\text{Log}_{10}(\text{TP})-0.88$	0.69	< 0.001
CHL vs TN	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=-0.09\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.65$	0.01	0.912
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=1.47\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.47$	0.25	0.033
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{CHL})=0.54\text{Log}_{10}(\text{TN})+0.75$	0.04	0.408
SD vs TP	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.18\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.54$	0.04	0.417
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.20\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.54$	0.05	0.363
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.41\text{Log}_{10}(\text{TP})+0.75$	0.12	0.164
SD vs CHL	PRE	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.30\text{Log}_{10}(\text{CHL})+0.51$	0.25	0.034
	MON	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.23\text{Log}_{10}(\text{CHL})+0.45$	0.10	0.199
	POS	$\text{Log}_{10}(\text{SD})=-0.38\text{Log}_{10}(\text{CHL})+0.55$	0.27	0.028

(a) Wet year



(b) Dry year

**Fig. 8.** Empirical models of CHL-TP during the wet and dry year.

있고 CHL은 수질을 악화 시키는 수화현상의 좋은 지표이다. 앞선 은대, 아열대 호소의 연구에서 여름철 CHL은 TP의 영향을 설명해 주었다(Dillon and Rigler, 1974; Forsberg and Ryding, 1980; Canfield and Bachmann, 1981; Nurnberg, 1996).

수질 변이 간의 상관관계를 알아보기 위해 회귀 분석을 이용하였는데 장마 전기, 장마기, 장마 후기로 나누어 조사하였다. TN은 CHL과 거의 관계를 보이지 않았으며 이는 TN 농도가 호소 내에 이미 필요 이상 존재함을 의미한다. 여름 장마기에 많은 강우로 인해 TN, TP, CHL 등이 씻겨 내려가 수체가 안정된 장마 후기에 정확한 자료를 얻을 수 있었다(Table 4, 5). 집중 강우해 장마 후기의 CHL-TP 모델에 따르면 CHL의 변이는 TP의 변이에 의해 47% ($R^2=0.47, p=0.002$) 설명하는 것으로 나타났다. CHL-TN 모델에서는 CHL의 변이가 TN의 변이에 의해 22% ($R^2=0.22, p=0.048$) 설명되는 것으로 나타났다. 가뭄해의 CHL-TP 모델은 $R^2=0.69, p<0.001$, CHL-TN 모델은 $R^2=0.04, p=0.408$ 로 집중 강우해보다 가뭄해에 CHL의 변이가 TP의 변이를 매우 높게 설명하는 것을 알 수 있다. 특히, 집중 강우해 장마기의 CHL-TP 모델 ($R^2=0.20, p=0.070$)은 장마전기 CHL-TP 모델 ($R^2=0.42, p=0.004$)보다 더 낮은 관계를 나타냈다(Fig. 8). 이는 An *et al.* (2002)의 연구 결과와 동일하며 수체가 안정되는 시기에 TP 증가는 CHL 농도 증가를 강하게 반영함을 나타낸다.

SD-CHL 모델에서 보듯 CHL의 증가는 SD의 감소를 가져오며 특히 집중 강우해 장마 후에 45% ($R^2=0.45, p=0.002$) 설명하는 것으로 나타났다. SD-TP 또한 TP가 증가하면 SD는 감소하는 것으로 나타났다. 여름 장마 이후에 외부 부유물의 유입량의 증가와 그에 따른 CHL 생체량의 증가는 수체의 탁도에 영향을 주어 SD가 감소하는 것이라 유추된다. 이와 더불어 TP의 증가는 부유물 증가와 함께 일어나 투명도(SD)의 감소에 영향을 준다고 사료된다(이 등, 2002).

경험적 모델(Empirical model)을 통한 연구결과에 의하여 호소의 부영양화와 관련하여 다음과 같은 사실을 요약할 수 있다(Vollenweider and Kerekes, 1980). 첫째, 호소속의 영양염류는 조류 현존량을 설명하는데 주요한 인자로서 1차 회귀식으로 도출되었다. 둘째, 호소속의 TP, TN 농도는 하절기의 수계로부터 유입되며, 이런 관계는 특히 홍수기의 해(Wet year)에 TP-CHL 및 TP-TN 관계를 약화시켜 수리수문학적 특성이 이런 관계를 변형시키는 것으로 나타났다. 셋째, 조류의 양과 투명도 사이에는 뚜렷한 역 상관관계가 성립되었으며 이런 특성은

계절에 상관없이 유의한 것으로 판명되었다. 이런 경험적 모델은 개별적인 인공호 및 수계의 향후 부영양화 현상 저감 및 수환경 관리에 활용될 것으로 사료된다.

결 론

여름철 장마기의 집중강우는 전기전도도의 감소를 유발하며 영양염류 중 TP의 증가를 가져온다. 인의 유입은 호소 내 부영양화를 가속화시키는 원인이 되며 이는 수체가 안정되는 장마 후기에 조류 생체량(CHL)의 증가를 유발하여 수체 내 투명도를 감소시킨다. 반면 TN은 이미 수체 내 존재하는 양 자체가 평균 1.0 mg L^{-1} 이상으로서 TP 농도에 비해 그 양이 높아 질소는 부영양화 기여에 제한요인(Limiting factor)으로 작용하지 않는 것으로 나타났다. 수체 내 TN/TP비는 영양 상태와 밀접하게 관련되어 있다. 영양상태가 높을수록 비율이 감소하고 영양상태가 낮을수록 증가하는 경향을 보인다. 상류로 갈수록 오염도가 증가했으며 계절적 변이를 통해 여름 몬순기간 동안 하천의 TP 농도 증가에 기여하고 유입된 TP는 호소의 1차 생산력에 대한 제한 요인으로 작용할 잠재성을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 집중 호우시 많은 양의 인 유입부하를 최소화하기 위해서는 원천적으로 인 유입을 감소시키는 대책마련이 요구된다.

부영양화도 지수(TSI)를 통해 우리나라 대부분 수계가 중영양-부영양 상태로 나타났으며 특히 TSI(TN)을 기초로 보았을 때, 이미 부영양 상태를 초과했으며 이는 이미 수계에 TN농도가 충분해 호소 관리시 질소는 무시될 수 있음을 나타낸다. 이는 우리나라 모든 수계의 TN/TP의 비율이 50이 넘게 나타났기 때문에 인이 제한요인으로 작용하여 질소의 상대적인 중요성이 떨어지기 때문이다.

호소에서 TP, TN, CHL, 그리고 SD의 관계를 설명하기 위해 경험적 모델(Empirical model)을 이용하였다. CHL-TP 모델은 $R^2=0.69, p<0.001$, CHL-TN 모델은 $R^2=0.04, p=0.408$ 로 CHL의 변이는 TP의 변이에 의해 설명되는 것으로 나타났으며 수체가 안정되는 가뭄해에 더 높게 설명되는 것으로 나타났다.

호소생태계에서 조류는 매우 중요한 기초생산자로서 호소의 생산력에 큰 영향을 미친다. 우리나라 인공호의 이런 1차 생산력은 경험적 모델 분석 결과 대부분 인(Phosphorus)에 의하여 조절되는 것으로 판명되었다. 이와 같이 수체에 유입되는 인의 양은 호소의 부영양화 정도를 결정하는 일차적인 요소로서, 인공호내 인 농도는 강우 및 유입수의 증감에 의해 영향을 받았다. 따라서 수

체가 안정되는 장마후기에 1차 생산력이 급격히 증가되기 때문에 이런 기간 동안 효율적이고 체계적인 수질관리가 요구된다.

적 요

본 연구의 목적은 부영양화도 지수(TSI)를 이용하여 우리나라 호소의 영양 상태를 평가하고, 경험적 모델(Empirical model)에 의한 호소의 상태를 예측하기 위한 것이다. 연구에 사용된 수질 자료(2000, 2001)는 환경부 DB시스템에서 획득하였으며 이용된 변수는 용존산소(DO), 생물학적 산소 요구량(BOD), 화학적 산소 요구량(COD), 총인(TP), 총질소(TN), 부유물질(SS), 투명도(SD), 엽록소-a(CHL), 전기전도도(Cond.)였다. 이런 수질 변수의 농도는 측정된 수계 및 계절에 따라 변이양상을 보였다. 일반적으로, 영양 상태(Trophic state)는 상류로부터 댐으로 감소하는 경향을 보였으며, 계절적 변이는 여름 장마기(7~8월)동안 크게 발생했다. TP의 주된 유입은 장마기($r=0.656$, $p=0.002$)동안 일어났고, 이런 현상은 SS($r=0.678$, $p<0.001$)와 유사한 경향을 보였다. CHL, TP, SD 및 TN을 포함한 수질변수는 계절에 따른 수계내의 영양상태를 평가하는 방법에 적용되었다. Carlson (1977)의 부영양화도지수(TSI)에 기초한 수계내 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. 따라서, 인은 호소 내 영양 상태를 조절하는 주요 인자가 된다. CHL와 다른 수질 변수(TP, TN, 그리고 SD) 사이의 관계를 분석하기 위한 경험적 모델(Empirical model)이 개발되었다. 로그-전환 회귀분석에서 CHL-TP는 장마 전기 R^2 값이 0.31($p=0.017$)이었으나 장마 후기에는 0.69($p<0.017$)로 장마 후기 인이 조류 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와 대조적으로, SD는 TP, CHL 증가에 대해 감소하는 경향을 보였고 TN은 모든 기간 동안 CHL와 약한 관계를 가졌다. 결과적으로, 경험적 모델(Empirical model)이 제시하듯이 TP는 CHL을 예측하는 핵심인자로 사료되었다.

사 사

본 연구는 부분적으로 농림기술개발 연구 과제(2006)의 지원으로 수행되었고, 수질 자료를 제공한 환경부에

감사를 포함.

인 용 문 헌

- 건설교통부, 2001. 수자원장기종합계획, pp. 64-65.
- 김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭. 2002. 낙동강 부영양화와 수질 환경요인의 통계적 분석. *Algae* 17(2): 105-115.
- 김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형땀(소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용. *육수지*. 37(2): 205-212.
- 김용재. 2004. 낙동강 중·하류의 식물플랑크톤 군집의 월 변화. *Algae* 19(4): 329-337.
- 김재운. 2003. 총인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가. *한국환경과학회지*. 12(7): 689-695.
- 김호섭, 황순진. 2004. 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석-엽록소 a와 수심을 중심으로. *육수지*. 37(2): 213-226.
- 농림부 농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 서동일. 1998. 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. *대한환경공학회지*. 20(9): 1219-1234.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. *인제대학교 박사학위논문*. p. 202.
- 신재기, 조경제. 2000. 생물검정에 의한 남조류 *Microcystis*가 수질에 미치는 영향. *한국환경과학회지*. 9(3): 267-273.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. *육수지*. 33(4): 389-394.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. *육수지*. 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. *육수지*. 53(1): 36-44.
- 임창수, 신재기, 조경제. 2000. 금강 중·하류에서 오염양상과 수질평가. *육수지*. 33(3): 51-60.
- 허무명, 김범철, 박원규. 작동강 수계의 계절별 인, 질소, Chl. a와 영양염류 농도 분포. pp. 103-110.
- 한국수자원공사. 2006. <http://www.kowaco.or.kr>
- 환경부. 2006. <http://water.nier.go.kr>
- An, K-G. 2000. Dynamic change of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korean J. Limnol.* 33(3): 213-221.
- An, K-G. 2000. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean J. Limnol.* 33(3): 222-229.
- An, K-G. 2000. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Korean J. Limnol.* 33(4): 342-349.
- An, K-G. 2000. An influence of point-source and flow events on inorganic nitrogen fractions in a large artificial reservoir. *Korean J. Limnol.* 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. and J.R. Jones. 2000a. Significance of an intensity of the Asian monsoon on reservoir functional changes along longitudinal gradients (in press). *Freshwater Biology*.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2000b. Factors regulating blue-green dominance in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **432**: 37-48.
- An, K-G. 2001. Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem. *Korean J. Limnol.* **34**(1): 1-8.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2002. Reservoir response to the Asian monsoon with an emphasis on longitudinal gradients. *Journal of Freshwater Ecology* **17**(1): 151-160.
- An, K-G. and S.S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-*a* total phosphorus models in reservoirs: a case study. *Ecological Modelling* **152**(2-3): 191-203.
- An, K-G. and S.S. Park. 2002. In situ experimental evidence of phosphorus limitation on algal growth in a lake ecosystem. *Journal of Environmental Science and Health A* **37**(5): 913-924.
- An, K-G. and D.S. Kim. 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., S.S. Park, K.-H. Ahn and C.G. Urchin. 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. and S.S. Park. 2003. Influence of seasonal monsoon on the trophic state deviation in an Asian reservoir. *Water, Air, and Soil Pollution*. **145**: 267-287.
- Canfield, D.J. and R.W. Bachmann. 1981. Prediction of total phosphorus concentration, chlorophyll-*a* and Secchi depths in natural and artificial lakes. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **38**: 414-423.
- Carlson, R.E. 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.
- Ford, D.E. 1990. Reservoir transport process. p. 15-41. In: *Reservoir Limnology: ecological perspectives* (Thornton, K.W. et al. eds.). John Wiley & Sons, New work.
- 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.
- Havens, K.E. 1994. Seasonal and spatial variation in nutrient limitation in a shallow sub-tropical lake (lake Okeechobee, FL) as evidenced by trophic state index deviations. *Arch. Hydrobiologia* **131**: 39-53.
- Hoyer, M.W. and J.R. Jones. 1983. Factors affecting the relation between phosphorus and chlorophyll *a* in mid-western reservoirs. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **40**: 192-541.
- 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 J. Limnol.* Special Issue **82**: 1-9.
- Jones, J.R., M.F. Knowlton and K-G. An. 2003. Trophic state, seasonal patterns and empirical models in South Korean Reservoirs. *Lake and Reservoir Management* **19**(1): 64-78.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin* **17**: 713-717.
- Kimmel, B.L. 1990. Reservoir Primary Production. p.133-199. In: *Reservoir Limnology: ecological perspectives* (Thornton, K.W. et al., eds.). Wiley Interscience.
- Nurnberg, G.K. 1996. Trophic state of clear and colored, soft- and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish. *Lake and Reservoir Management* **12**: 432-447.
- OECD. 1982. *Eutrophication of Waters: Monitoring assessment and Control* OECD. p. 154. Paris.
- Perkins, B. and J.R. Jones. 1994. Temporal variability in a midwestern stream during spring. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **25**: 1471-1476.
- Sakamoto, M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiologia* **62**: 1-28.
- Soballe, D.M., Bachmann, R.W. 1984. Influence of reservoir transit on riverine algal transport and abundance. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* **41**: 1803-1813.
- 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 work.
- U. S. EPA. 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental protection agency. Proceeding of an EPA sponsord symposium, EPA-600(3-76-079): 185.
- 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.
- Vollenweider and Kerekes. 1980. The loading concept as bases for controlling philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication. *Prog. Wat. Tech.* **12**: 5-38.
- 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 work.

(Manuscript received 5 June 2006,
Revision accepted 22 September 2006)