

농업용저수지 유역환경특성에 따른 수질경향 분석

김호섭 · 최은미¹ · 김동우² · 공동수 · 김경만³ · 김범철^{1,*}

(국립환경과학원 한강물환경연구소, ¹강원대학교 환경과학과
²국립환경과학원 수질총량과, ³한국농촌공사)

Water Quality Trend Analysis based on Watershed Characteristics in Agriculture Reservoirs. Kim, Ho-Sub, Eun-Mi Choi¹, Dong-Woo Kim², Dong-Soo Kong, Kyungman Kim³ and Bomchul Kim^{1,*} (Han River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi 476-823; ¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701; ²Watershed Management Research Division, Environmental Research Complex, Incheon 404-170; ³Korea Rural Community & Agriculture Corporation, Chuncheon 765-5)

This study was conducted to assay the relationship between the characteristics of watershed and water quality, and to evaluate water quality characteristics of the classified types by TSI deviation analysis with the collected data from 490 reservoir. Relatively shallow depth (<5 m) reservoirs out of selected 490 appeared to be eutrophic. The mean TP concentration in reservoirs with the PFA+UFA/watershed area of above 30% was $\geq 0.1 \text{ mg L}^{-1}$. The mean TN concentration in reservoirs with the PFA/watershed area of above 25% was $\geq 2.6 \text{ mg L}^{-1}$. Based on the TSI deviation analysis, water quality parameters in TYPE III reservoirs were in high concentration compared to other reservoirs types. Characteristics of Type III generally showed eutrophic, small DA/RA ratio, shallow depth, and large paddy field and upland field to watershed ratio compared to other types of reservoirs. Both water quality and morpho-physical parameters, Type I and II reservoirs were similar with the exceptions of BOD and chl. *a* concentration. Phosphorus in Type I reservoirs was not the primary limiting factor on algal growth, but significant decrease chl. *a* concentration with the increasing TN/TP indicated that phosphorus was the possible secondary limiting factor. Overall results indicated that type of land use, such as PFA and UFA area in watershed, was important parameters for the assessment of water quality characteristics, and phosphorus was limiting nutrient on algal growth in 490 reservoirs.

Key words : TSI deviation analysis, morpho-physical parameters, land use, PFA+UFA/watershed area, primary limiting factor

서론

국내 분포하고 있는 중소규모의 저수지는 비교적 큰

하천에 건설된 댐에 의해 형성된 인공호와는 다르게 소하천이 유입되는 배수구역 하류부에 형성되어 댐호와는 다른 유역과 수리·수문학적 특성을 가지고 있다. 농업용 저수지중 부영양화되었거나 이미 조류의 대번성을 경

* Corresponding author: Tel: 033) 250-8572, Fax: 033) 252-4443, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

협하고 있는 수체들 대부분은 수심이 얇거나 (<10 m 이하), 생성연도가 오래된 구조물들로 농업지역의 비점오염원과 깊은 유기물 퇴적층을 가지는 공통적인 특성을 가지고 있다(김, 2004a). 또한 유역 내 임야의 면적이 상대적으로 넓으며(김, 2004a) 인위적인 방류시설이 없어 관개용수를 공급하는 시기와 집중강우에 의해 월류되는 경우를 제외하고는 배출되지 않는 특징을 가지고 있다.

유역으로부터의 오염물질 분포나 유출특성(Cooke and Williams, 1973; Krenkel and Vladmir, 1980; William, 1987; Tabuchi *et al.*, 1991; 박, 2003)과 부영양화의 관계에 대해 많은 연구가 진행되어왔으며, 수질이 지역적인 기후, 유역 내 오염원 현황이나 지형 그리고 호수 규모와 같은 형태학적 특성(EPA, 1974)과 수리수문학적 특성이 복합적으로 작용하여 결정되는 것으로 이해되고 있다(Carmack *et al.*, 1979). 유역으로부터 유입되는 영양염류의 형태와 양은 오염원 및 토지이용형태 그리고 강우량과 강우빈도에 영향을 받으며(Krenkel and Vladmir, 1980; William, 1987; Tabuchi *et al.*, 1991), 유역면적의 크기는 퇴적물과 영양염류의 부하에 대한 잠재력을 예측하는 지표로 활용되고 있다(Fee, 1979). Vollenweider(1968)는 유역 내 점오염원이 인의 유입량과 밀접한 관련이 있음을 제시한 바 있고, EPA(1992)는 농경활동에 의한 비점오염원이 하천 수질악화의 72%, 호수 수질악화의 56% 그리고 강어귀에서의 수질악화의 43% 기여하므로 농업활동이 지류와 호수에서 오염물질의 가장 큰 원인이 되고 있음을 지적하였다.

효율적인 수질관리를 위해서는 수질과 생태계의 기능악화를 초래하는 원인을 진단하고 그에 대한 메카니즘을 파악하는 것을 기본으로 하며, 다양한 수체를 대상으로 유역환경과 수질과의 연계성을 규명하는 것은 수질 관리를 위한 중요한 정보로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내 분포하고 있는 농업용 저수지를 대상으로 유역환경특성과 수질과의 관계를 규명하고자 하였다. 이를 위해 국내 분포하고 있는 490개 저수지를 대상으로 수집된 유역환경과 수질자료를 분석하였고 TSI 편차분석을 통해 구분된 각 유형별 저수지들의 수질과 연계된 유역특성을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 대상저수지

본 연구는 수질측정망 중 농업기반공사에서 운영하고

있는 490개 농업용저수지를 대상으로 하였다. 수질은 1998년부터 2003년까지 년 2회 측정된 농업기반공사에서 측정된 자료를 사용하였고, 유역현황은 2001년 조사된 자료를 활용하였다(농업기반공사, 2001). 저수지 내 측정지점이 여러 개인 경우 방조제 앞 자료를 사용하였으며, 각 저수지에서의 수질 대표값은 1998년부터 2003년까지 자료의 평균값을 사용하였다. 조사대상저수지들의 수리·수문학적인 특징으로서 유효저수량(WS: Water storage)과 만수면적(RA: reservoir surface area)의 비(\bar{z} : Mean depth), 유역면적(DA: Drainage area)과 만수면적의 비(DA/RA)를 비교하였다.

2. 오염원 조사

수질과의 연계성을 규명하기 위한 유역 내 인구밀도, 한우, 젖소, 돼지의 사육두수 및 논(PFA: paddy field area), 밭(UFA: upland field area), 산림(FOA: forest area) 등의 토지이용형태와 수질과의 관계를 조사하였다.

3. 영양상태 평가

본 연구대상 저수지에서의 엽록소 *a* 농도와 총인(TP) 농도를 이용한 부영양화도지수(TSI: Trophic state index)는 Carlson(1977)이 제시한 방법에 따라 계산하였고 Kratzer and Brezonik(1981)가 제시한 방법에 따라 총질소(TN) 농도를 이용한 부영양화도지수를 계산하였다. 부영양화도 지수를 이용한 영양상태 평가는 Kratzer and Brezonik(1981)가 제시한 기준을 따랐다.

4. 유형분류

호수 내 부유물의 조성과 조류 성장을 제한하는 요인들을 직접 평가하는 방법으로는 시료가 담긴 용기 내에 영양물질을 투입하는 생물검정 방법이나 섭식 실험, 부유물질의 크기분석 등과 같은 방법이 이용되고 있다. TP 농도, 엽록소 *a* 농도 그리고 투명도 자료에 의해 계산된 Carlson의 부영양화도 지수들의 상호편차를 이용한 분석 방법은 조류 성장을 제한하는 요인들에 대한 간접적이고 간편한 방법으로 알려져 있다(Havens, 2000). TSI 지수간의 편차분석은 엽록소 *a* 농도로부터 계산된 TSI 지수와 TP와 TN 농도로부터 계산된 지수간의 차이를 통해 조류 성장에 대한 인과 질소의 제한 유무를 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 TSI 지수간의 편차 분석을 통해 평가된 조류 성장에 대한 제한 영양염을 기준으로 연구대상저수지를 4개의 유형으로 구분하였다.

5. 통계분석

본 연구대상 저수지의 수질과 형태학적 특성 그리고 유역 내 오염원과의 상관성 분석은 Pearson's correlation analysis를 이용하였다(SPSS 10.0). 저수지 유형간의 차이는 one-way ANOVA를 이용하여 평가하였으며, 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 를 기준으로 하였다.

결과 및 고찰

1. 유역환경특성과 수질

저수용량, 수표면적, 수심 등의 형태학적 특성과 수질과의 관계규명에서 수심이 깊을수록 부영양화 가능성이 높게 나타났다(Fig. 1). 얕은 수심과 수표면적에 비해 넓은 유역면적은 퇴적물로부터의 영양염 공급이 용이하고 유

기물생산이 가능한 수층이 상대적으로 넓으며, 유역으로부터 저수지로 유입되는 오염물질의 양이 많아 부영양화 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Fee, 1979; 김과 홍, 1992; 박, 2003). 본 연구에서도 평균수심이 증가할수록 엽록소 *a* 농도 ($r^2=0.35, p < 0.01$), 화학적 산소요구량(COD) ($r^2=0.41, p < 0.01$)은 감소하는 경향을 나타냈다. 엽록소 *a* 농도는 평균수심이 5m 미만인 경우에 평균 $31.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 높은 경향을 보였고(ANOVA, $p < 0.05$) COD도 평균수심 5m 미만인 저수지에서 평균 7.8mg L^{-1} 로 높았다(Fig. 1).

토지이용형태 중 논과 밭의 이용면적에 따라 수체 내 TP와 TN 농도의 뚜렷한 차이가 있었다(Fig. 2). 유역 내 인구밀도가 높고 논과 밭의 면적이 넓을수록 수질이 악화되는 경향을 보였다(Fig. 2)(Table 1). 유역에서의 높은 인구밀도는 BOD ($r^2=0.45$), TP ($r^2=0.45$), COD ($r^2=0.42$), 엽록소 *a* 농도($r^2=0.47$)와 비교적 높은 상관성을 보였고,

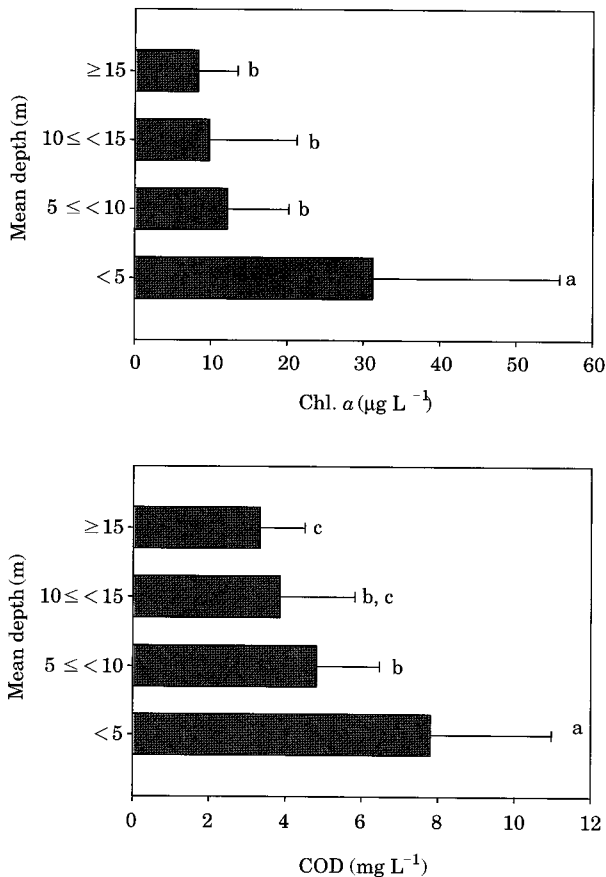


Fig. 1. The distribution of chl. *a* and COD concentration as mean depth in 490 reservoirs. a, b and c indicates significant difference among treatments ($p < 0.05$, ANOVA).

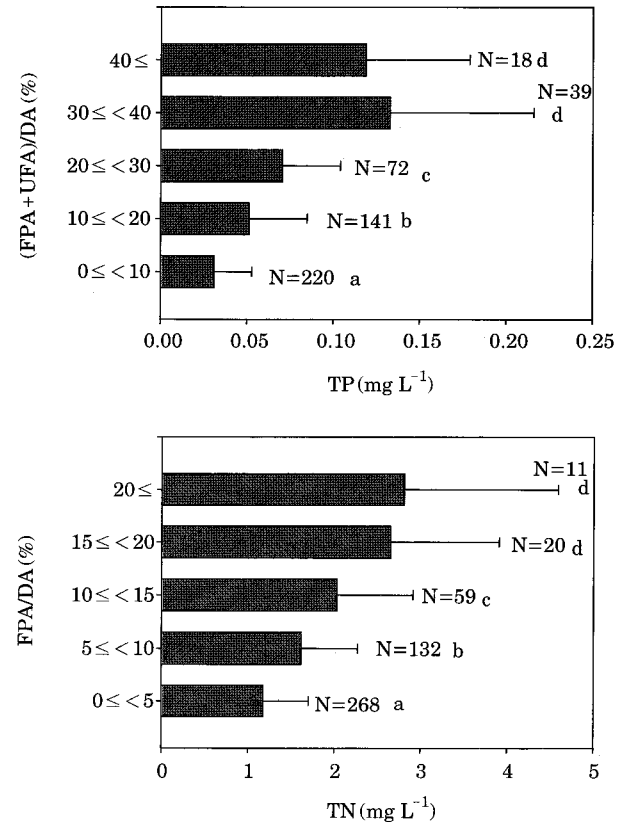


Fig. 2. Relationships between general land use and total phosphorus and total nitrogen in 490 study reservoirs. PFA, UFA and DA denotes paddy field area, upland field area and drainage area, respectively. a, b, c and d indicates significant difference among treatments ($p < 0.05$, ANOVA).

Table 1. Relationships between land use (PFA/DA, UFA/DA, FOA/DA, other/DA, and (PFA+UFA)/DA) and water quality. PFA, UFA, FOA, DA, and other denotes paddy field area, upland field area, forest area, and drainage area, respectively. (Other=DA-PFA-UFA-FOA)

Parameters	BOD (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	SS (mg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (µg L ⁻¹)
PFA/DA	0.584**	0.588**	0.390**	0.575**	0.584**	0.574**
UFA/DA	0.517**	0.571**	0.411**	0.371**	0.497**	0.488**
FOA/DA	-0.641**	-0.686	-0.443**	-0.491**	-0.613**	-0.597**
Other/DA	0.413**	0.461**	0.257**	0.253**	0.383**	0.382**
(PFA+UFA)/DA	0.607**	0.639**	0.449**	0.504**	0.594**	0.583**

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, $n = 490$

TN 농도 ($r^2=0.35$)와 부유물질(SS)농도 ($r^2=0.25$)와는 상대적으로 상관성이 낮았다. 반면에 유역 면적 내 축종별 가축 밀도는 수질항목과 상관성이 없었다 ($r < 0.176$). 토지이용형태 중 논으로 이용되는 면적이 밭의 이용면적보다 수질과의 상관성이 높았고, 임야의 면적은 수질과 뚜렷한 음의 상관성을 보였다 (Table 1). 수체 내 TP 농도는 유역 내 논과 밭의 이용면적 ($r=0.594$, $p < 0.001$)과, TN 농도는 유역내 논의 이용면적 ($r=0.575$, $p < 0.001$)과 상관성이 높게 나타났다. 유역 내 논과 밭의 이용면적이 30% 이상인 경우 수체 내 TP 농도는 평균 0.1 mg L^{-1} 이상이였다. TN 농도는 유역전체면적 중 논 면적이 15% 이상인 경우에 평균 2.6 mg L^{-1} 이상의 분포를 나타냈다. 본 연구와 유사하게 Omernik (1977)는 수체 내 높은 질소, 인 농도가 유역 내 농경지로의 토지이용형태와 밀접한 관련이 있음을 보고하였고, 농경지에서의 시비량 증가가 결과적으로 수질의 악화를 초래하는 원인으로 지적된 바 있다 (Cooper and Lipe, 1992).

SS 농도와 토지이용형태와의 낮은 상관성에도 불구하고 토지이용형태 중 논으로 이용하는 면적비가 수체 내 TP 농도와 상관성이 높았다 ($r=0.584$, $p < 0.001$) (Table 1). 유역으로부터 수체로 유입되는 TP, TN 농도는 강우강도, 토양입자와의 결합력 차이로 유입시기나 유입형태가 다른 것으로 알려져 있다 (Cooke and Williams, 1973; Tabuchi *et al.*, 1991; 김 등, 1996; 김 등, 1997). 유역으로부터 인과 질소의 유출 특성은 토양입자와의 결합력 차이로 (Cooke and Williams, 1973), 질소는 표면유출이 있는 경우에 쉽게 유출되나 (Happer, 1992) 인은 일반적으로 강우강도가 높은 시기에 토양입자와 더불어 입자형태로 많이 유입된다 (Krenkel and Vladmir, 1980; Tabuchi *et al.*, 1991; 김 등, 1996; 김 등, 1997). 이러한 선행연구를 토대로 볼 때, 강우시에는 토지이용형태와 수체 내 TP, SS 농도 사이에 유의적인 상관성이 예측 가능하다. 반면 비강우시에는 수체 내 부유물질이 유입과정에서의 침

강, 수체에서 생성된 조류 그리고 퇴적물로부터의 재부유 등 다양한 경로에 의해서 제거·생성될 수 있으므로 토지이용형태와 SS농도와의 상관성은 적을 수 있다. 그러나 유역내 논 의 이용형태가 많은 곳에서는 논에 무기형태의 질소와 인 등이 비료로 공급되고 관개용수의 유출이나 적은 경우량에도 쉽게 인이 수체로 공급되어 본 연구결과와 같이 수체 내 TP 농도에 기여할 가능성이 있다 (Table 1).

2. TSI지수 편차분석을 통한 유형별 수질특성

본 연구 대상저수지는 TSI 편차분석 방법에 따라 구분된 4개의 유형 중 조류 성장이 인에 의해 제한될 수 있는 곳은 64%이며, 질소만 제한되는 저수지는 거의 없는 것으로 나타났다 (Fig. 3). TYPE III에 포함된 저수지에서는 인과 질소 모두 조류 성장을 제한할 수 있는 인자로 제시되지만, 국내 대부분의 부영양호소에서 인에 비해 질소가 수체 내 용존형태로 많이 분포하고 있으므로 (박, 2003; 김과 황, 2004b) 질소의 제한가능성은 상대적으로 적을 것으로 판단된다. 본 연구에서도 엽록소 *a* 농도와 TP 농도의 상관성이 ($r^2=0.83$) TN 농도 ($r^2=0.51$)에 비해 높았고, 이는 인의 대부분이 입자성 형태로 존재하고 있음을 제시한다 (Table 2).

저수지와 수질, 형태학적 특성, 토지이용형태에서 TYPE III에 포함된 저수지들이 다른 두 유형의 저수지들과 차이를 보였다 (Figs. 4 and 5) (Table 3). TYPE III에 포함된 저수지는 수표면적에 대한 유역면적의비 (DA/RA)가 작고 수심이 상대적으로 낮은 형태학적 특성을 보였으며 (Fig. 4) 토지는 논과 밭으로의 이용형태가 많았다 (ANOVA, $p < 0.05$) (Fig. 5). 수질항목별 평균 농도도 다른 두 형태에 포함된 저수지에서보다 2배 이상 높은 수준이었다 (ANOVA, $p < 0.05$). 반면 TN/TP비는 TYPE III에 해당하는 저수지에서 상대적으로 낮았고 엽록소 *a* 농도와 TP 농도 사이의 양의 상관성에도 불구하고, TN/TP비 증

가에 따른 엽록소 *a* 농도의 감소는 나타나지 않았다(Fig. 6). 수체 내 N/P는 영양상태와 밀접하게 관련되어 있어,

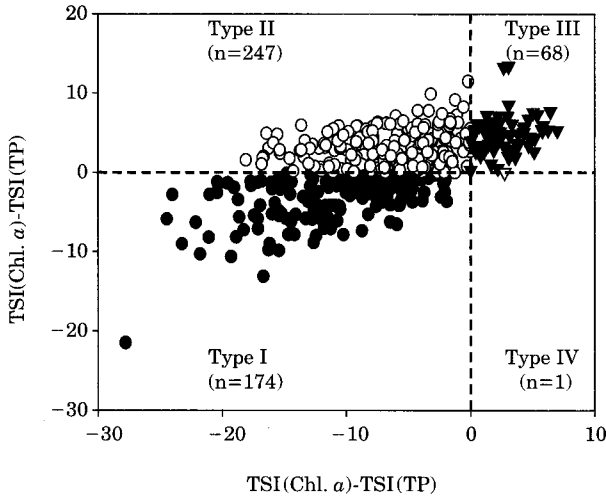


Fig. 3. Classification of 490 reservoirs based on trophic state index (TSI) deviation.

Table 2. Correlation coefficients (*r*) among 6 variables of water quality.

Parameters	COD (mg L ⁻¹)	SS (mg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (μg L ⁻¹)
BOD	0.90**	0.594**	0.726**	0.863**	0.897**
COD		0.656**	0.668**	0.875**	0.885**
SS			0.540**	0.738**	0.638**
TN				0.796**	0.717**
TP					0.910**

* *p* < 0.05, ** *p* < 0.01, n=490

영양상태가 높을수록 비율이 감소하고 영양상태가 낮을수록 증가하는 경향을 보인다(Downing and McCauley, 1992; Welch and Lindell, 1992; 공, 1997; 김 등, 2003). 본 연구에서 TYPE III에 포함된 저수지에서의 TN/TP비 범위는 11~42(평균 19)로 20 이상의 저수지들이 거의 포함되어 있지 않았기 때문에 TN/TP 비와 엽록소 *a* 농도와의 상관성이 적게 나타난 것으로 판단된다. 김과 황(2004a)은 수체 내 TN/TP비에 따른 엽록소 *a* 농도의 현저한 감소가 엽록소 *a* 농도가 20 μg L⁻¹ 이상인 부영양화 저수지들에서는 TN/TP비가 20 이상에서, 엽록소 *a* 농도가 20 μg L⁻¹ 이하인 저수지에서는 TN/TP비가 100 이상에서 나타남을 보고한 바 있다.

TYPE I과 II가 유사한 유역특성과 형태학적 특성을 가지고 있음에도 TSI 편차 분석에서 TYPE I에 포함된 저수지들은 인과 질소가 제한되지 않는 것으로 평가되었으나(Fig. 3) TN/TP비와 엽록소 *a* 농도 관계에서는 인 제한 가능성이 제시되었다(Fig. 6). TYPE I과 II에 포함된 저수지의 수질은 TYPE II에서 BOD와 엽록소 *a* 농도가 높은 것을 제외하고는 유사한 수준이었고, 형태학적 특성(평균수심, DA/RA)이나 토지이용형태 또한 유사하였다(ANOVA, *p* > 0.05). 또한, 유역내 오염원 중 TP 농도와 높은 상관성을 나타낸 인구밀도(*r*²=0.45)도 TYPE I(중양값, 20인/km²)과 II(중양값, 30인/km²)는 유사한 수준이었다(ANOVA, *p* > 0.05)(Figs. 4 and 5). 조류의 성장은 영양염외에도 계절에 따른 광주기와 일사량, 수온, pH 그리고 수체 내의 유입과 유출, 체류시간, 수층혼합, 영양염 분포, 섭식압 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Lathrop and Carpenter, 1990; Vincent, 1992; Carpenter and Kitchell, 1993; Frenette *et al.*, 1996;

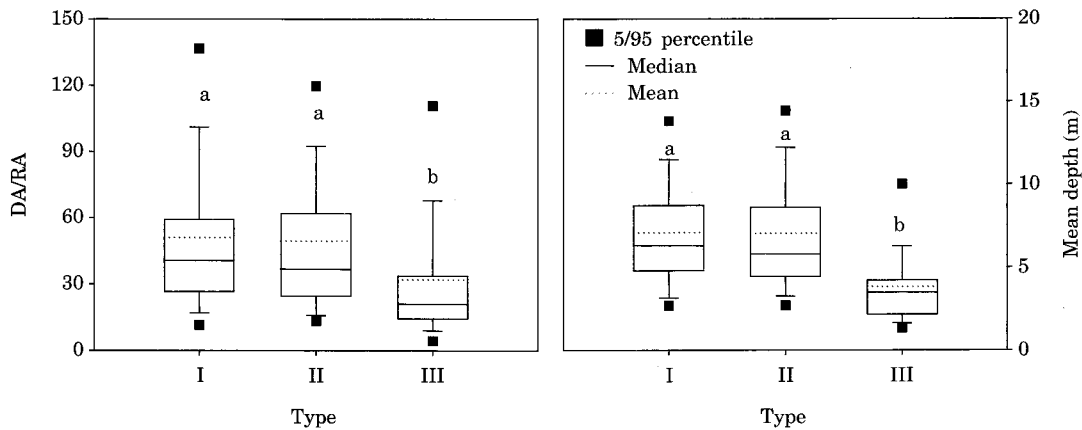


Fig. 4. Comparison of DA/RA and mean depth in classified three types by TSI deviation analysis. DA and RA denotes drainage area and lake surface area, respectively. a and b indicates significant difference among treatments (*p* < 0.05, ANOVA).

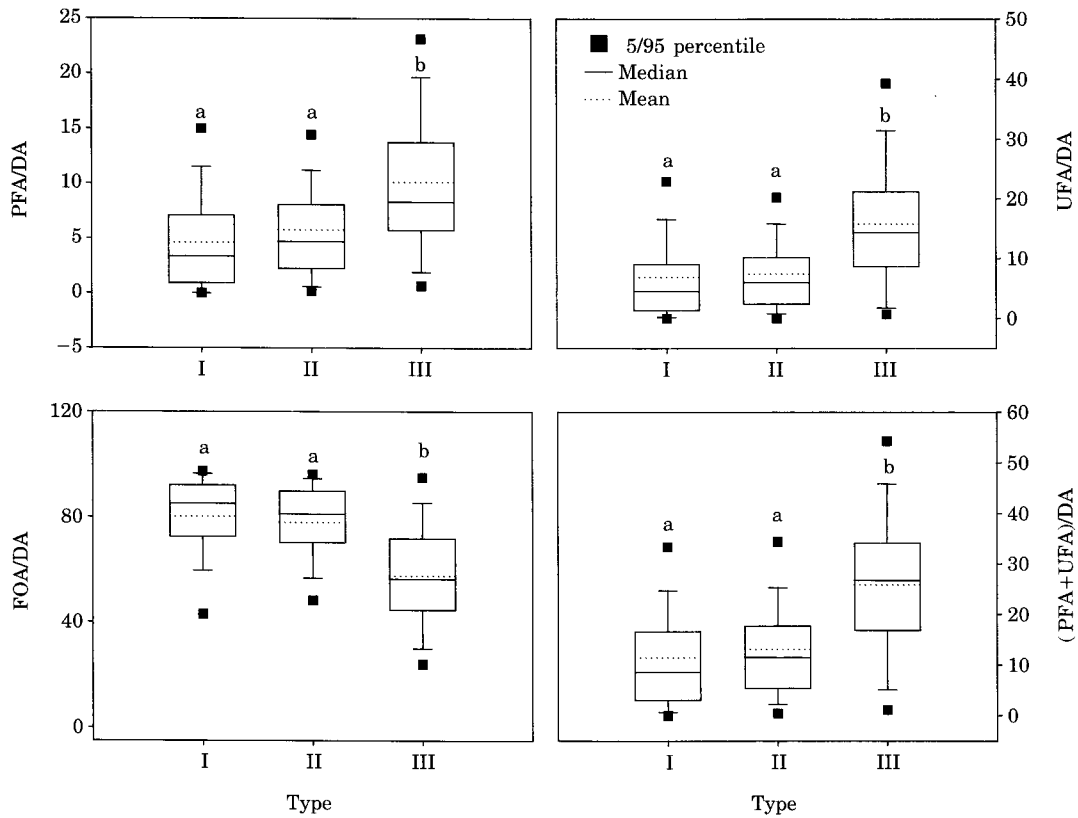


Fig. 5. Comparison of general land use in classified three types by TSI deviation analysis. PFA, UFA, FOA and DA denotes paddy field area, upland field area, forest area and drainage area, respectively. a and b indicates significant difference among treatments ($p < 0.05$, ANOVA).

Table 3. Water temperature, pH, DO, BOD, COD, SS, TN, TP and chl.a concentration in classified three types by TSI deviation analysis. a, b and c indicates significant difference among treatments ($p < 0.05$, ANOVA).

Type	Temp. °C	pH	DO mg L ⁻¹	BOD mg L ⁻¹	COD mg L ⁻¹	SS mg L ⁻¹	TN mg L ⁻¹	TP mg L ⁻¹	Chl. a µg L ⁻¹	TN/TP by weight
I	Min	12.3	6.6	6.4	0.8	2.1	1.4	0.3	0.012	1.7
	Max	21.0	8.8	14.0	10.8	11.6	50.2	4.9	0.228	50.6
	Mean	16.9 ^a	7.6 ^a	8.6 ^a	2.3 ^a	5.0 ^a	9.4 ^a	1.4 ^a	0.048 ^a	10.2 ^a
	Median	17.0	7.6	8.6	2.0	4.7	7.3	1.2	0.035	7.3
II	Min	9.9	6.5	6.1	0.8	2.1	1.5	0.5	0.007	2.7
	Max	22.9	9.5	18.6	12.2	16.4	29.3	6.2	0.258	89.1
	Mean	17.3 ^a	7.8 ^b	8.9 ^b	2.8 ^b	5.3 ^a	7.8 ^a	1.5 ^a	0.044 ^a	17.3 ^b
	Median	17.4	7.8	8.8	2.3	4.8	6.4	1.3	0.034	13.4
III	Min	13.3	7.0	6.4	1.5	3.0	2.6	0.2	0.012	9.0
	Max	21.3	9.7	12.2	12.2	22.0	68.9	6.0	0.372	148.8
	Mean	18.2 ^b	8.3 ^c	9.3 ^c	5.4 ^c	9.5 ^b	14.7 ^b	1.8 ^b	0.107 ^b	48.5 ^c
	Median	18.2	8.2	9.3	4.8	9.0	12.3	1.6	0.082	39.4

Sterner and Grover, 1998). 수온은 TYPE I과 II 저수지에서 유사하였고, pH와 DO는 TYPE II에 포함된 저수지에서 높았다(Table 3). pH와 용존산소농도는 담수생태계

에서 일반적으로 조류 생물량과 관련된 것으로 이해될 수 있으므로 TYPE I과 II에 포함된 저수지에서 수질 차이의 직접적인 원인으로 판단되지는 않는다. 그러나 두

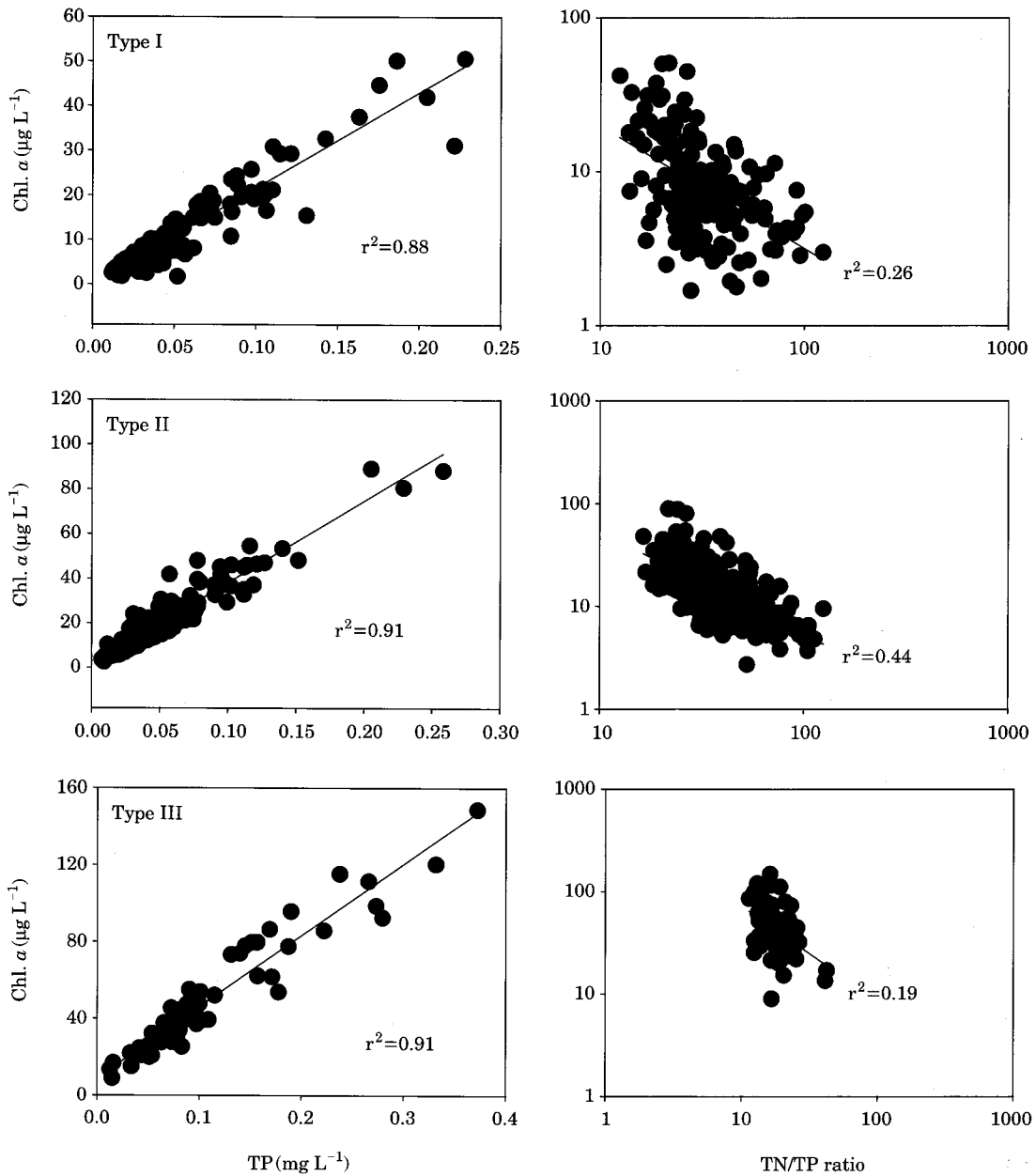


Fig. 6. Relationships between chl. *a* concentration and TP concentration, TN/TP ratio (by weight) in classified three types by TSI deviation analysis.

유형의 수질 항목 간 비교에서 상대적으로 엽록소 *a* 농도가 낮은 TYPE I에 포함된 저수지에서 SS 농도가 다소 높았다 (Table 3). 이는 TYPE I에 포함된 저수지에서 조류가 빛에 의해 성장이 제한될 수 있음을 시사한다.

결론적으로 국내 중소규모 저수지의 형태, 오염원 분포 특성 등 유역환경특성과 수질과의 관계분석에서 부영양화된 저수지들은 수심이 얕고, 유역면적 대 수표면적이 작고, 유역 내 논과 밭으로의 이용면적이 넓은 특성을 가

지고 있었다. 국내 농업용저수지 대부분은 인이 조류 성장을 제한하는 중요한 인자였으며 수체 내 인 농도는 유역내 논과 밭의 토지이용밀도와 밀접한 관련이 있었다. 이러한 결과들은 부영양화된 농업용저수지의 수질개선 시 대상수체 선정 및 방법 등의 결정과정에 기초 자료로 활용이 가능할 것이다. 향후 TYPE I과 II가 유사한 특성을 가짐에도 TSI 편차분석에서 나타난 상반된 결과의 원인 규명과 오염원별 수체로의 유입특성을 고려한 분석이

진행될 필요가 있다.

적 요

본 연구에서는 국내 분포하고 있는 490개 저수지를 대상으로 유역특성과 수질과의 관계를 조사하였고, TSI편차분석을 통해 유형을 구분하여 영양염 측면에서의 각 유형별 특성을 조사하였다. 본 연구 대상저수지에서 수심이 얕을수록 부영양화 가능성이 높게 나타났다. 유역 내 논과 밭의 이용면적이 30% 이상인 경우 수체 내 TP 농도는 평균 0.1 mg L⁻¹ 이상이었다. TN 농도는 유역전체면적 중 논 면적이 25% 이상인 경우에 평균 2.6 mg L⁻¹ 이상의 분포를 나타냈다. TSI편차를 통해 구분된 형태 중 TYPE III에 해당하는 저수지의 수질항목별 평균 농도는 다른 두 형태에 포함된 저수지에서 보다 2배 이상 높은 수준이었다. TYPE III에 포함된 저수지는 다른 두 유형에 포함된 저수지와 비교해 부영양상태이고, 수심이 얕으며, 수표면적에 대한 유역면적비(DA/RA)가 작고, 논과 밭으로의 이용면적이 넓었다. TYPE I과 II에 포함된 저수지의 수질은 TYPE II에서 BOD와 엽록소 a 농도가 높은 것을 제외하고는 유사한 수준이었고, 형태학적 특성(평균수심, DA/RA)이나 토지이용형태 또한 유사하였다. TYPE I에 포함된 저수지들에서는 인이 조류성장에 대한 일차적인 제한요인은 아닌 것으로 나타났다. 본 연구에서 모든 대상저수지에서 인의 제한가능성이 나타났으며, 토지이용형태, 특히 유역 내 논과 밭으로의 이용면적은 저수지의 수질을 결정하는 매우 중요한 인자였다.

인 용 문 헌

공동수. 1997. 국내 주요호소의 영양상태 판정기준에 관한 제고. 하천·호소의 수질보전과 유역관리에 관한 한·일 공동세미나. pp. 251-266.

김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규. 1996. 부영양한 낙동강수계에서 유기물오염에 대한 조류1차생산의 기여도. *Algae* **11**: 231-237.

김범철, 최광순, 심수용. 1997. 비점오염원으로 부터의 인의 총수유출. 하천호소의 수질보전과 유역관리에 관한 한일공동세미나 pp. 166-177.

김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 한명수. 2003. 호소형 및 하천형 담호의 육수학적 특성과 조류 발생과의 상관관계. *육수지* **36**: 124-138.

김좌관, 홍옥희. 1992. 국내 인공담호의 물리적 환경인자에 의

한 호수특성 고찰에 관한 연구. *한국환경과학회지* **1**: 49-57.

김호섭, 황순진. 2004a. 육수학적 특성에 따른 국내저수지의 부영양화 유형분석-엽록소 a와 수심 중심으로. *육수지* **37**: 213-226.

김호섭, 황순진. 2004b. 얕은 부영양저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. *육수지* **37**: 180-192.

농림부 농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.

박주현. 2003. 한국 주요호수의 비교육수학적 연구. 강원대학교 환경학과 이학박사논문.

Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.

Carmack, E.C., C.B.J. Gray, C.H. Pharo and R.J. Daley. 1979. Importance of lake-river interactions on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia. *Limnol. Oceanogr.* **24**: 634-644.

Carpenter, S.R. and J.R. Kitchell. 1993. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* **35**: 634-639.

Cooke, G.W. and R.J.B. Williams. 1973. Significance of man-made sources of phosphorus: fertilisers and farming. *Wat. Res.* **7**: 19-33.

Copper, C. and W. Lipe. 1992. Water quality and agriculture: Mississippi experiences. *J. Soil Wat. Conserv.* **47**: 220-223.

Downing, J.A. and E. McCauley. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **37**: 936-945.

EPA, 1992. National water quality inventory: 1992 Report to Congress. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1992: EPA 841-94-001.

EPA, 1974. Lake restoration. US Environmental Protection Agency, Minneapolis, Minnesota.

Fee, E.J. 1979. A relation between lake mophometry and primary productivity and its use in interpreting whole-lake eutrophication experiment. *Limnol. Oceanogr.* **24**: 401-406.

Frenette, J.-J., S. Demers, L. Legendre and M. Boule. 1996. Size-related photosynthetic characteristics of phytoplankton during periods of seasonal mixing and stratification in an oligotrophic multibasin lake system. *J. Plankton Res.* **18**: 45-61.

Happer, D. 1992. Eutrophication of fresh water: principles, problems and restoration. Chapman and Hall. pp. 199-200.

Havens, K.E. 2000. Using Trophic state index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water qua-

- lity monitoring data. *Korean Journal of Limnology* **33**: 187-196.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Wat. Res. Bull.* **17**: 713-717.
- Krenkel, P.A. and N. Vladmir. 1980. Water quality management. p. 229.
- Lathrop, R.C. and S.R. Carpenter. 1990. Zooplankton and their relationship to phytoplankton, p.127-150. *In*: Food Web management (J.F. Kitchell, ed.). Springer-Verlag, New York.
- Omernik, J.M. 1977. Non-point Source-Stream Nutrient Level Relationships. A Nationwide Study. EPA 600/3-77-105.
- Sterner, R.W. and J.P. Grover. 1998. Algal growth in warm temperate reservoirs: Kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients. *Wat. Res.* **32**: 3539-3548.
- Tabuchi, T., K. Hisao, S. Hiroyuki, T. Keiko and M. Takashi. 1991. Nitrogen outflow during irrigation period from a small agricultural area-Research on outflow load from agricultural area without a point source (II), *Trans. JSIDRE* **154**: 55-64.
- Vincent, W.F. 1992. The daily pattern of nitrogen uptake by phytoplankton in dynamic mixed layer environments. *Hydrobiologia* **238**: 37-52.
- 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.*
- Welch, E.B. and T. Lindell, 1992. Nutrient limitation. *In*: Ecological Effects of Wastewater (E.B. Welch and T. Lindell, eds.), pp. 134-135. Chapman & Hall press, London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne, Madras.
- William, F.J., R.H. Kennedy and R.H. Montgomery. 1987. Seasonal and longitudinal variations in apparent deposition rates within an Arkansas reservoir. *Limnol. Oceanogr.* **32**: 1169-1176.

(Manuscript received 6 March 2007,
Revision accepted 28 May 2007)