

철새도래지인 주남저수지의 계절적 수질변동

이 의 행 · 안 광 국*

(충남대학교 생명과학부)

Temporal Dynamics of Water Quality in Junam Reservoir, as a Nest of Migratory Birds. Lee, Eui-Haeng and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objectives of this study were to evaluate seasonal and interannual variations of water quality and nutrient input (N, P) in Junam Reservoir, a nesting waterbody of migratory birds, over 10 years during 1998~2007 along with dynamic relations of trophic parameters using empirical models. Concentrations of COD averaged 7.8 mg L⁻¹ during the study, while TN and TP were 1.4 mg L⁻¹ and 83 µg L⁻¹, respectively, indicating an eutrophic-hypereutrophic state. Values of monthly COD had strong positive relations ($r=0.669$, $p<0.001$) with conductivity, indicating that summer rainfall resulted in an ionic dilution of the reservoir water by rainwater and contributed better water quality. One-way ANOVA tests showed significant differences ($F=5.2 \sim 12.9$, $p<0.05$) in TN and TP between the before and after the bird migration. In other words, nutrient levels were greater in the absence of migratory birds than in the presence of the migratory birds, suggesting a no-effect on nutrient inputs by the birds. Also, one-way ANOVA indicated no significant differences ($F=0.37 \sim 0.48$, $p>0.05$) in NO₃-N and NH₃-N between the before and after the birds migration. Linear empirical models using trophic parameters showed that algal biomass as CHL, had significant low correlations with TN ($R^2=0.143$, $p<0.001$, $n=119$) and TP ($R^2=0.192$, $p<0.001$, $n=119$). These results suggest that influences of nutrients on the CHL were evident, but the effect was weak. This fact was supported by analysis of Trophic State Index Deviation (TSID). Over 70% in the observed values of “TSI (CHL)-TSI (SD)” and “TSI (CHL)-TSI (TP)” were less than zero, suggesting a light limitation on the CHL by inorganic suspended solids.

Key words : water quality, migratory bird, empirical model, Trophic State Index

서 론

본 연구대상인 주남저수지는 1920년에 농업용수 공급을 위해 독을 만들면서 형성된 인공호로서, 제방높이 9.2 m, 만수위는 4.3 m로서 주남·산남·동판의 3개 저수지가 수로로 연결되어 낙동강 수위에 따라 변동한다. 여

름철 집중강우시 만수위가 되면 주남저수지는 낙동강 대신 마산, 진해 및 창원 등지에 송수관로를 통해 농업용수를 공급하고, 동북면 일대의 농경지에 농업용수를 공급하여 (박과 원, 1993; 강과 최, 2006), 수자원 공급면에서 중요한 역할을 하는 인공저수지이다.

현재 주남저수지는 우리나라의 주요한 철새 서식지 중의 하나로서 알려져 있으며, 최근에는 생태적 가치가 높

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

은 습지로서의 기능과 역할을 갖게 되었다(강과 최, 2006; 권, 2006). 습지는 육상생태계와 수생태계의 전이대로서 여러 가지 생태적 기능을 제공하며, 수생생물과 미생물들이 각종 오염물질 및 중금속과 같은 유해 화학물질을 정화시키고, 홍수억제 및 수량조절의 기능을 한다(Mulamottil *et al.*, 1996; 손과 전, 2003). 또한 이러한 수체의 습지에서 생태적 생산성은 산림의 최고 20배, 바다에 비해 10배 정도 탁월하고 서식하는 동식물종도 다양하여 생태적 보존가치가 높다(강과 최, 2007). 특히, 본 저수지는 율속도와 우포늪 중간지점에 위치하고 있어 철새 이동의 매우 중요한 통로이고 저수지 중앙에 갈대섬이 있으며 1년 내내 저수량이 일정하고 겨울에도 수면이 결빙되지 않는 동양 최대 내륙철새 도래지로서 알려져 있어 수생태계의 서식처 및 수질관리가 절실히 요구된다(향토문화연구회, 2002).

주남저수지는 인근 농경지로부터 유입된 인(P)과 질소(N) 등의 영양염류의 증가 및 철새의 배설물에 의한 저수지의 부영양화 및 수질오염이 발생할 수 있다. 이러한 영양염류 유입은 수체내 1차생산력 혹은 조류(Algae) 증감에 핵심적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다(농업기반공사, 2001). 최근 다양한 국내 저수지 연구에 따르면, 수체내 식물플랑크톤의 증감은 수리수문학적 역동성(Kim and Hong, 1992; 최 등, 2001) 및 지형적 특성(Hwang *et al.*, 2003)과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났으며, 최근에는 하절기의 상시적 남조류 발생으로 저수지 생태계의 교란(국립환경연구원, 1999)이 예상되고 있다. 특히, 우리나라 계절적 특징인 몬순강우는 1차생산력의 지표로 이용되는 엽록소-*a*와 같은 수질변이에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며(김 등, 1996; 김 등, 1999; An, 2000; An and Jones, 2000; 안 등, 2001; 안과 신, 2005), 몬순강우로 인한 저수지의 수위 및 유량뿐만 아니라 유기물과 영양염 유입 등 전반적인 물리·화학적 상태변화에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(김과 김, 2004). 특히, 주남저수지는 수심이 얕고(10m 이하) 수표면적이 큰 것을 감안한다면 부영양화로 인한 수질악화가 예상되어 이에 대한 대책마련이 시급하다(Hwang *et al.*, 2003; 농업기반공사 농어촌연구원, 2005). 그러나 지금까지 주남저수지의 연구동향에 대한 분석에 따르면, 철새도래(박과 원, 1993; 유와 함, 1994; 함과 손, 1998; 함 등, 1999; 함, 2000; 김 등, 2001; 함과 김, 2001; 김 등, 2002)에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 식물플랑크톤, 수서무척추동물 및 수생식물과 같은 생물군(최와 이, 1987; 윤 등, 1989; 함과 손, 1995; 이 등, 1997)에 관한 생물상 연구는 일부 이루어진 반면, 이화학적 수질특성 및 영양상

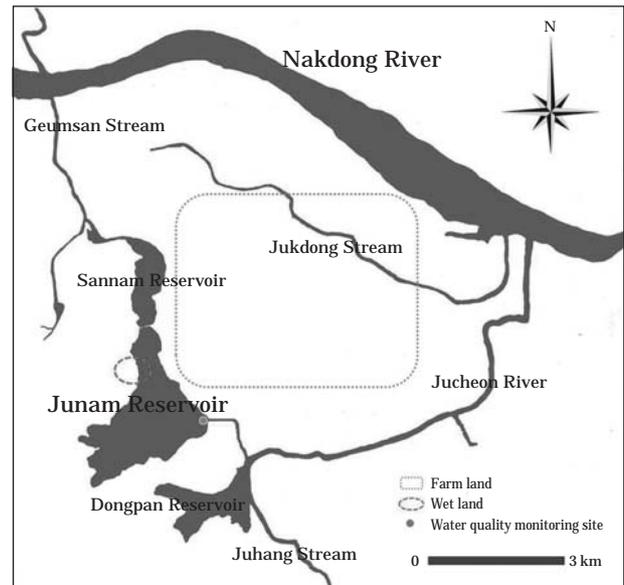


Fig. 1. The study site of Juman Reservoir. This reservoir is connected with Dongpan Reservoir and Sannam Reservoir.

태에 관한 연구는 극히 미미한 실정이다.

본 연구에서는 주남저수지의 철새 이동에 따른 계절적 수질특성 분석 및 연별변이 특성, 강우분포에 따른 영양염류(N, P)의 역동성을 파악하고, 경험적 모델(Empirical model)을 이용하여 부영양화 변수 간의 역동적 관계를 규명하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 현황

본 연구대상지인 주남저수지는 경상남도 창원시 동면에 위치하고 있으며, 조사지점은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 저수지의 우측 최하단부에 위치해 있다. 본 조사지점은 주향천이 유입되는 동판저수지와 수로로 연결되어 있고 흘러들어온 물은 주천강, 산남저수지, 금산천을 통해 낙동강 본류로 배출된다. 연평균 기온이 15°C 이상이고 한겨울에도 비교적 온화하여 결빙기가 짧아 11월부터 그 다음해 3월까지 겨울철새가 서식하는 철새도래지로 알려져 있다.

2. 조사자료 및 수질변수

본 연구에 이용된 수질자료는 1998년~2007년까지 10년간 측정된 환경부 수질측정망 지점(경남남도 창원시

동읍 용산리 수문앞, N 35°18'37", E 128°40'35")의 월별 자료 (<http://water.nier.go.kr>)로서 이를 이용해 계절별, 연별 수질변이 특성 및 영양상태를 분석하였다. 자료분석에 이용된 수질변수는 수온, 용존산소량 (Disolved oxygen, DO), 화학적산소요구량 (Chemical oxygen demand, COD), 부유물질 (Suspended solid, SS), 전기전도도 (Electric conductivity, EC), 총질소 (Total nitrogen, TN), 질산성질소 (Nitrate nitrogen, NO₃-N), 암모니아성질소 (Ammonia nitrogen, NH₃-N), 총인 (Total phosphorus, TP), 인산염인 (Ortho phosphate, PO₄-P), 투명도 (Secchi depth, SD), 엽록소-a (Chlorophyll-a, CHL) 등 12개이었고, 이들 12개 항목 중, 일부 결측값은 제외하였고, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P는 7년간 자료를, SD는 3년간 자료를 이용하였다. 강수량 자료는 마산기상청에서 측정한 1998년~2007년까지 10년간 강수량 자료를 이용하여 강우에 의한 연도별·계절별 변이를 분석하였다.

3. 부영양도 지수산정 및 자료분석

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.

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

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

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

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

한편 각 수질데이터는 SPSS 14.0 Kr 통계패키지를 활용하여, 수질항목별 상관분석 (Correlation analysis) 및 회귀분석 (Regression analysis)을 실시하였다. 또한 수질변수에 대한 철새의 계절별 영향을 분석하기 위해 One-way ANOVA 분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

주남저수지에서 측정된 10년 동안의 강우패턴에 따르면, 연평균 강수량은 1,761 mm로서, 우리나라 평균 강수

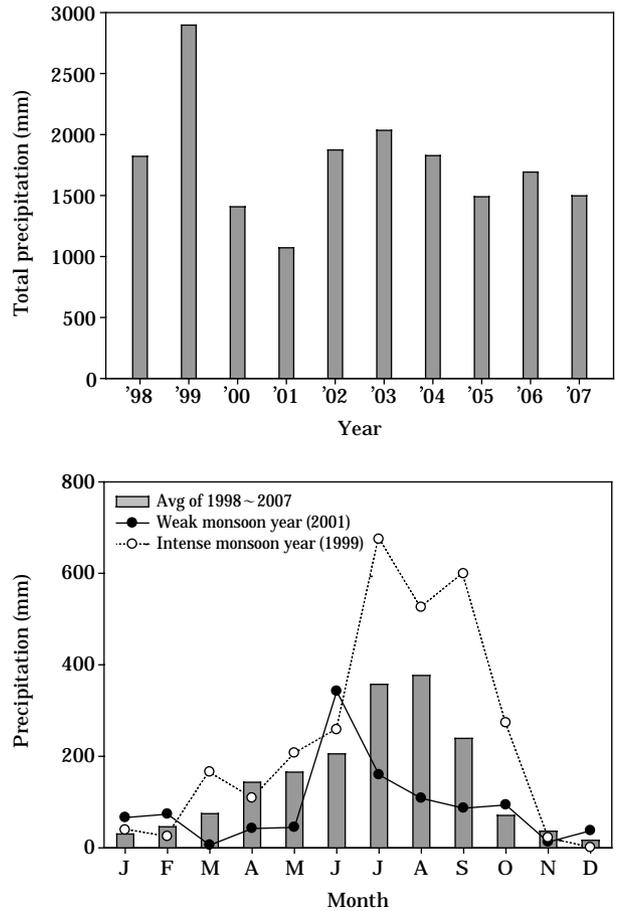


Fig. 2. Annual and seasonal (monthly) fluctuations of precipitation during 1998~2007.

량 (1,400 mm)을 상회하였고, 이 중 대략 50% 이상은 7~9월에 집중하는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 1999년은 최대 강수량 (2,897 mm)을 보인 집중강우해로서, 특히 연강우의 62%가 7~9월에 발생하였으며, 강수량이 가장 적은 가뭄해인 2001년의 총강수량 (1,072 mm)보다 높은 강수량을 보였다. 집중강우해인 1999년과 가뭄해인 2001년의 7~9월 강수량은 1,444 mm의 차이를 보여 하절기 강우에 있어서 큰 변이성을 보여주었다. 이처럼 하절기 집중강우와 같은 우리나라 몬순기후의 영향은 수체내 수질특성 및 영양상태에 영향을 미칠 수 있다는 기존의 육수학적 연구 (김 등, 1996; 김 등, 1999; An, 2000; An and Jones, 2000; 안 등, 2001; 안과 신, 2005)를 감안할 때 주남저수지의 수리수문학적 역동성은 수체내의 특성에 영향을 미치는 주요한 요인으로 사료되었다.

COD는 10년간 자료에 의거할 때, 평균 7.8 mg L⁻¹이었고 3.3~19.3 mg L⁻¹까지 변동하였으며, 집중강우해인

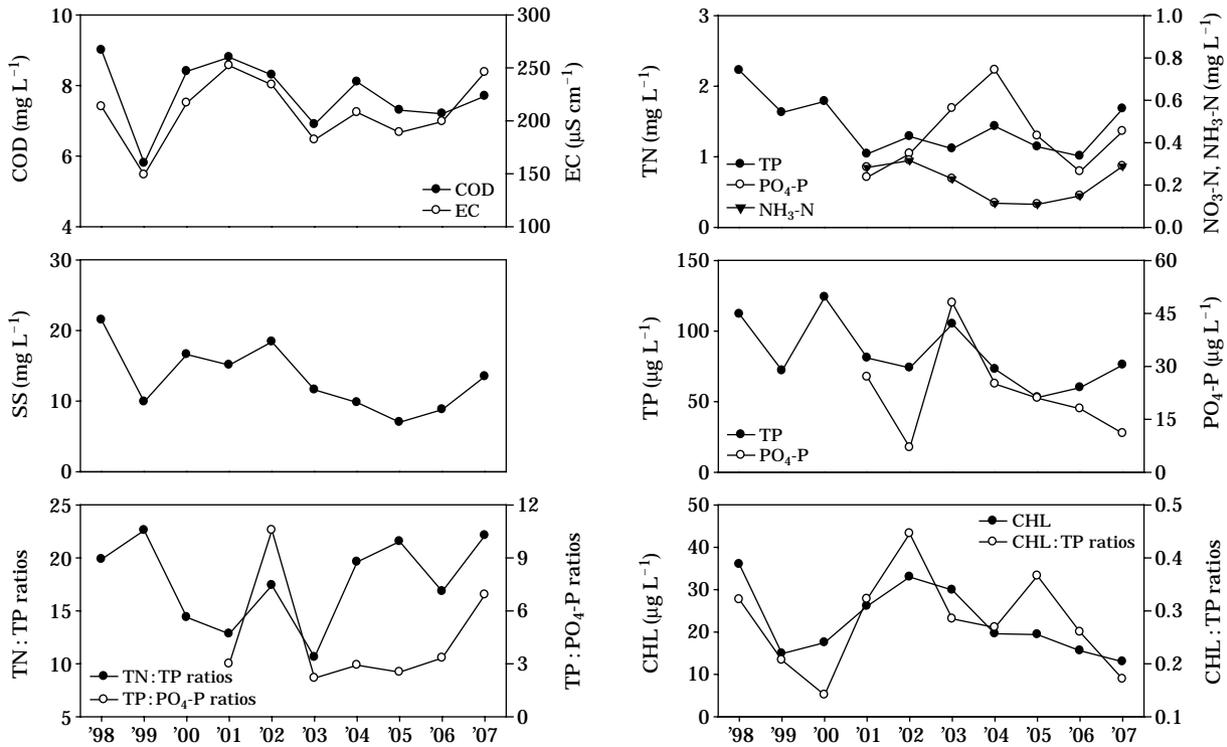


Fig. 3. Annual variations of chemical oxygen demand (COD), suspended solid (SS), electric conductivity (EC), nutrients (TN, TP), and the mass ratios of TN : TP.

1999년에는 5.8 mg L^{-1} , 가뭏해인 2001년에는 8.8 mg L^{-1} 로서 강우의 증가는 저수지내의 유기물 농도에 희석효과를 가져왔다 (Fig. 3). 강우가 집중되기 전 유량이 적고 수체가 안정한 6월에 초기 강우에 의한 각종 오염원의 유입으로 COD는 월평균 12.8 mg L^{-1} 로 5월 (7.8 mg L^{-1})에 비해 증가한 후, 집중강우기에 하절기 강우 시작과 함께 점차 낮아지는 것으로 나타났다 (Fig. 4). Pearson 상관성 분석 결과에 따르면, 이러한 COD의 변동 패턴은 EC ($r=0.669$, $p<0.001$)와 높은 상관관계를 보였으며, SS ($r=0.231$, $p=0.011$) 및 강우량 ($r=0.389$, $p<0.001$)과도 유의한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 강우 증가는 수체내의 이온 희석 현상을 증가시키며, 이는 유기물 농도에 감소효과를 가져오는 것으로 나타났다. 한편, 수체내의 용존산소 (DO) 농도는 오염원 유입 (COD vs. DO, $r=-0.159$, $p=0.083$)에 의한 영향보다는 수온 ($r=-0.493$, $p<0.001$)에 의해 더 영향을 받는 것으로 나타났다 (Fig. 4).

수체내의 영양상태 (Trophic state) 평가를 위한 지표중의 하나로서 널리 이용되는 영양염류 (N, P) 중의 하나인 총질소 (TN)의 농도는 본 연구기간 내에 1.435 mg L^{-1} 로 Forsberg and Ryding (1980)의 기준에 의거하여 부영양

상태 (Eutrophy)로 나타났다. TN의 농도는 6월에 월평균 4.287 mg L^{-1} 로 5월 (1.124 mg L^{-1})에 비해 약 3.8배 증가한 후, 감소하는 양상을 보였는데, 이런 양상은 EC 및 COD의 변이와 유사한 패턴을 보였다 (Fig. 4). TN 중 식물플랑크톤 (CHL)이 이용 가능한 용존 상태의 질소 (N)인 질산성질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 및 암모니아성질소 ($\text{NH}_3\text{-N}$)는 TN의 패턴 ($p<0.001$, $n=84$)을 따랐으며, 각각 평균 0.449 mg L^{-1} 및 0.248 mg L^{-1} 로 TN의 31% 및 17%를 차지하는 것으로 나타났다 (Figs. 3, 4). 이러한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도는 우리나라의 타 호수에 비해 크게 낮은 값으로 나타나 총질소 중 50% 이상은 입자성 질소 (Particulate nitrogen)로 구성되어 있을 것으로 사료되었다. 한편 총인 (TP)의 평균농도는 $83 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 부영양상태 (Forsberg and Ryding, 1980)로 나타났으며, 수체내에서 인 (P)의 농도는 특히 초기 강우 시 인근 상류의 수계로부터 유입에 의해 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 인산염인 ($\text{PO}_4\text{-P}$)은 수체내에서 조류 (Algae)에 의해 이용이 가장 용이한 인의 형태로서 초기강우 시 주변오염원으로부터 유입된 영양염에 의해 급격히 수체내 농도가 증가한 후, 집중강우에 의한 희석효과 및 식물플랑크톤의 인 (P) 흡수에 의해 점차 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 4).

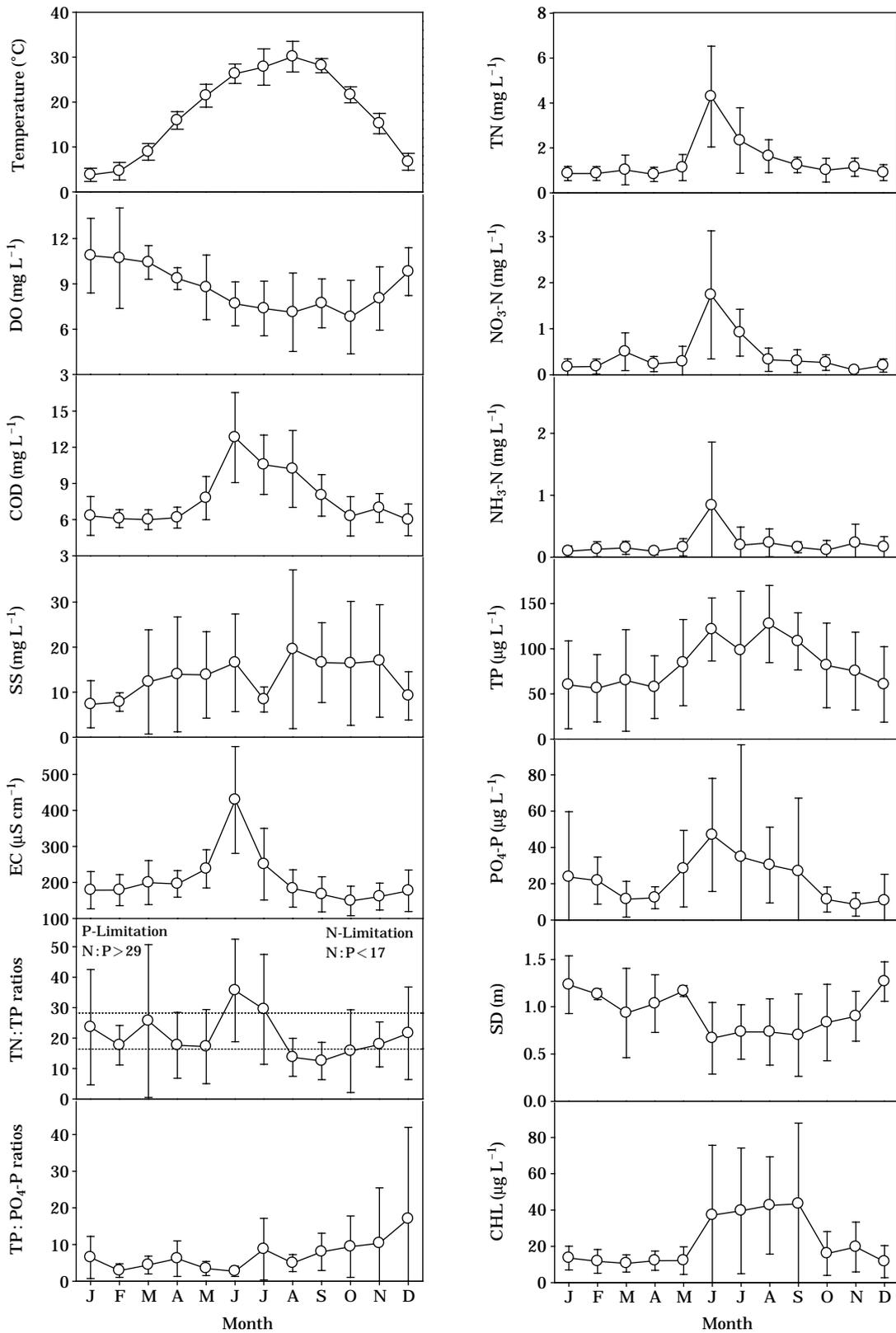


Fig. 4. Seasonal variations of temperature, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), suspended solid (SS), electric conductivity (EC), nutrients, and its ratios.

Table 1. One-way ANOVA tests on nutrient contents in water column before (Sep. ~ Oct.) and after (Jan. ~ Feb.) the arrivals of migratory birds.

Descriptive statistics		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	One-way ANOVA		<i>S</i>	\emptyset	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
TN	Sep. ~ Oct.	18	1.136	0.462	TN	Treatment	0.808	1	0.808	5.186	0.029
	Jan. ~ Feb.	18	0.836	0.313		Residual	5.296	34	0.156		
TP	Sep. ~ Oct.	18	96.722	39.832	TP	Treatment	17644	1	17644	12.915	0.001
	Jan. ~ Feb.	18	52.444	33.850		Residual	46450	34	1366		
NO ₃ -N	Sep. ~ Oct.	12	0.242	0.192	NO ₃ -N	Treatment	0.012	1	0.012	0.372	0.548
	Jan. ~ Feb.	12	0.198	0.164		Residual	0.700	22	0.032		
NH ₃ -N	Sep. ~ Oct.	12	0.145	0.132	NH ₃ -N	Treatment	0.007	1	0.007	0.472	0.499
	Jan. ~ Feb.	12	0.111	0.109		Residual	0.323	22	0.015		

N=sample number, *M*=mean, *SD*=standard deviation, *S*=sum of squares, \emptyset =degree of freedom, *V*=variance, *F*=variance ratio, *p*=significance probability

우리나라의 주요한 철새도래지 중 하나인 주남저수지는 겨울철새가 남하하는 10월부터 체류하는 철새의 수가 증가하기 시작해서 1월에 최대를 보이고 3월 이후 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(구, 1994; 함, 2000). 본 연구에서는 이런 계절적 철새의 수체에 대한 영양염류의 상대적 기여를 평가하기 위해 철새가 남하하기 전인 9~10월(1998~2006년)과 수체에 대규모로 체류하는 1~2월(1999~2007년)의 농도변이를 분석하였다. 철새가 남하하기 전인 9~10월과 체류기간인 1~2월의 TN의 농도는 각각 1.136 mg L^{-1} , 0.836 mg L^{-1} , NO₃-N의 농도는 0.242 mg L^{-1} , 0.198 mg L^{-1} , NH₃-N의 농도는 전·후에 각각 0.145 mg L^{-1} , 0.111 mg L^{-1} 로 나타났다. 이에 대한 TN의 One-way ANOVA 분석 결과에 따르면 철새 도래의 전·후에는 유의한 차이($F=5.186$, $p < 0.05$)가 있는 것으로 나타났으나 철새도래 전에 오히려 더 높은 것으로 나타나 철새도래에 의한 TN의 증가효과는 없는 것으로 나타났다. 한편, NO₃-N 및 NH₃-N의 One-way ANOVA 분석 결과에서는 전·후에 유의한 차이($F=0.37 \sim 0.48$, $p > 0.05$)가 없는 것으로 나타났다. 또한, 철새도래 전·후에 TP의 농도는 각각 $97 \mu\text{g L}^{-1}$, $52 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 전·후에 유의차이($F=12.9$, $p=0.001$)를 보였으나 역시 철새도래 전에 높아 궁극적으로 철새에 의한 인의 증가효과는 없는 것으로 나타났다. 즉, 겨울철새가 최대치를 보이는 1~2월보다 남하하기 전인 9~10월의 영양염류(TN, TP)의 농도가 높게 나타나 겨울철새의 배설물이 용존 영양염의 농도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타나, 철새의 배설물에 의해 겨울철 주남저수지의 부영양화가 심화될 것이라는 예상과 상반되는 결과가 도출되었다(Table 1, Fig. 4). 향후 이런 철새에 대한 수체내의 영양염류의 변동성에 대한 분석을 위해 좀 더 체계적인 모

니터링에 의한 DB 축적이 필요할 것으로 사료되었다.

호소 내 1차생산력 또는 식물플랑크톤의 현존량에 영향을 주는 TN : TP 질량비의 값은 평균 21로서 인(P)과 질소(N)의 두 가지 영양염류 모두 중요한 인자로 사료되었다(Forsberg and Ryding, 1980, Fig. 4). 조사기간 내 연평균 CHL의 농도는 $21.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 부영양 상태로 나타났으며, 대규모 변성하는 시기인 6~9월에 평균 $40.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 다른 시기(평균 $14.4 \mu\text{g L}^{-1}$)에 비해 2.8배 이상 증가하는 것으로 나타났고, CHL의 증가는 수체내 투명도(Secchi depth, SD)의 감소(특히 계절별 자료, $r=-0.860$, $p < 0.001$, $n=12$)에 가장 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 또한, CHL은 SS와 유의한 상관성($r=0.241$, $p=0.008$)을 보였으며, 이때 연평균 CHL : TP 비가 평균 0.27인 것으로 나타나(Fig. 3), 부유물 농도중 비휘발성 부유물(Non-volatile suspended solid, NVSS)에 의한 광제한 효과(Light limitation)가 조류생산력(CHL)에 영향을 끼칠 것으로 사료되었다.

10년간의 자료를 종합한 TN, TP, CHL, SD의 영양상태 평가는 Fig. 5와 같다. Forsberg and Ryding (1980)의 기준에 의거할 때 주남저수지는 주로 부영양(Eutrophy, Eu)-과영양(Hyper-eutrophy, He)로 나타났다. 투명도는 모든 데이터($n=34$)가 부영양 상태 이상으로 나타났고, 120개의 관측치중 TN은 89%, TP는 95%, CHL은 82%가 부영양-과영양 상태로 나타나, 전반적으로 부영양화가 심각하게 진행된 상태인 것으로 나타났다.

부영양화에 관계된 주요 변수를 이용한 경험적 모델(Empirical model)의 1차 회귀분석 결과는 Table 2와 같다. 호수에서 부영양화 정도를 가장 잘 반영하는 지표인 CHL의 제한 영양염에 대한 간접 지표(Fugimoto and Sudo, 1997; Smith, 1983)로 활용되는 TN : TP 질량비는

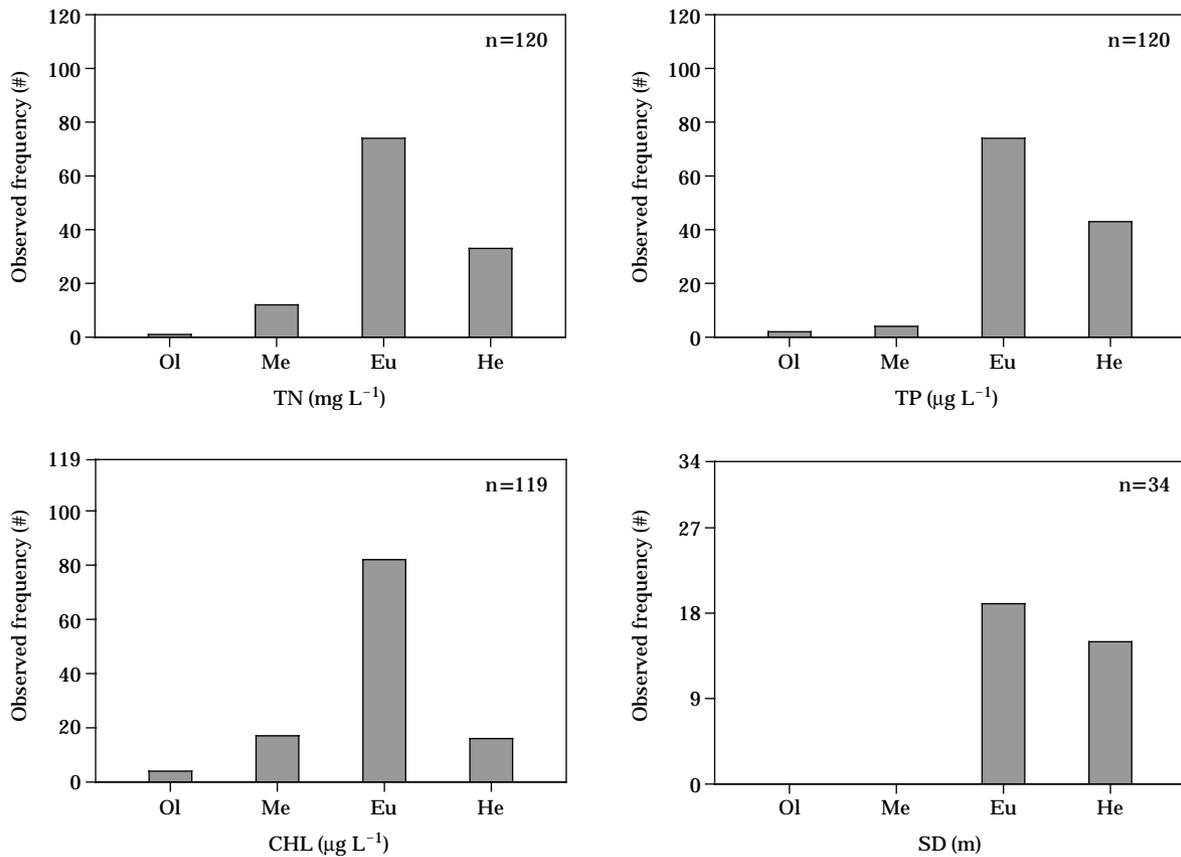


Fig. 5. Classification of trophic state using trophic variables. Ol=Oligotrophic, Me=Mesotrophic, Eu=Eutrophic, and He=Hyper-eutrophic.

Table 2. Empirical models among the various trophic parameters during 1998~2007. IO=Individual observation, SM=Seasonal mean.

Empirical model		Equations	R ²	p	r	n
TN : TP vs. TN	IO	Log ₁₀ (SD)=0.504*Log ₁₀ (TP)+1.192	0.232**	<0.001	0.482	120
	SM	Log ₁₀ (SD)=0.525*Log ₁₀ (TP)+1.144	0.673**	0.001	0.820	12
TN : TP vs. TP	IO	Log ₁₀ (SD)=-0.543*Log ₁₀ (CHL)+2.218	0.293**	<0.001	-0.541	120
	SM	Log ₁₀ (SD)=0.321*Log ₁₀ (CHL)+0.585	0.091	0.341	0.301	12
CHL vs. TN	IO	Log ₁₀ (CHL)=0.513*Log ₁₀ (TN)+1.140	0.143**	<0.001	0.379	119
	SM	Log ₁₀ (CHL)=0.889*Log ₁₀ (TN)+1.197	0.567**	0.005	0.753	12
CHL vs. TP	IO	Log ₁₀ (CHL)=0.570*Log ₁₀ (TP)+0.122	0.192**	<0.001	0.438	119
	SM	Log ₁₀ (CHL)=1.764*Log ₁₀ (TP)-2.072	0.807**	<0.001	0.898	12
CHL vs. TN : TP	IO	Log ₁₀ (CHL)=0.929*Log ₁₀ (TN : TP)+1.150	0.005	0.424	-0.074	119
	SM	Log ₁₀ (CHL)=0.618*Log ₁₀ (TN : TP)+0.543	0.113	0.286	0.336	12
SD vs. TN	IO	Log ₁₀ (SD)=-0.290*Log ₁₀ (TN)-0.063	0.158*	0.020	-0.397	34
	SM	Log ₁₀ (SD)=-0.334*Log ₁₀ (TN)-0.009	0.479*	0.013	-0.692	12
SD vs. TP	IO	Log ₁₀ (SD)=-0.478*Log ₁₀ (TP)+0.759	0.385**	<0.001	-0.621	34
	SM	Log ₁₀ (SD)=-0.649*Log ₁₀ (TP)+1.192	0.652**	0.001	-0.807	12
SD vs. CHL	IO	Log ₁₀ (SD)=-0.233*Log ₁₀ (CHL)+0.186	0.147*	0.025	-0.384	34
	SM	Log ₁₀ (SD)=-0.352*Log ₁₀ (CHL)+0.410	0.740**	<0.001	-0.860	12

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

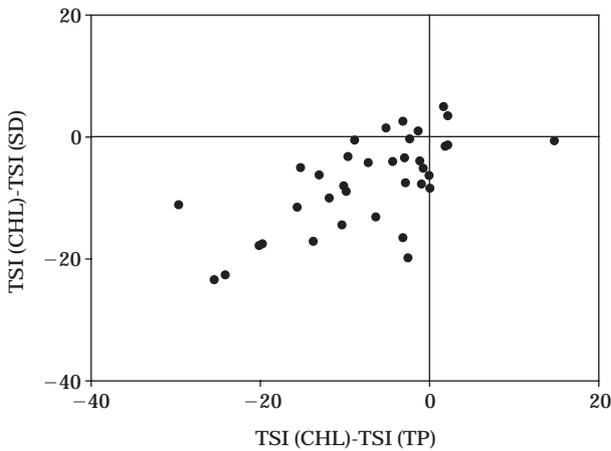


Fig. 6. Deviation analysis of Trophic State Index (TSI).

TN ($R^2=0.232$, $p<0.001$, $n=120$) 및 TP ($R^2=0.293$, $p<0.001$, $n=120$)와 유의한 상관성을 보였으나, CHL ($R^2=0.005$, $p=0.424$, $n=119$)과는 상관관계를 보이지 않았다. 조류생체량(CHL)은 TN ($R^2=0.143$, $p<0.001$, $n=119$) 및 TP ($R^2=0.192$, $p<0.001$, $n=119$)와 통계적으로 유의한 상관성을 보여 CHL의 증감에 영양염류가 영향을 미치나 그 효과는 미미한 것으로 나타났다. CHL은 SD의 변이를 15% ($p=0.025$, $n=34$) 설명하는 것으로 나타났고, 특히 월별 데이터는 매우 높은 상관관계 ($R^2=0.740$, $p<0.001$, $n=34$)를 보여 CHL의 증가에 의한 SD의 감소 양상을 적절히 반영하였다.

상기 경험적 1차 회귀식에서 제시하는 바와 같이, 영양염류 변동에 의한 CHL의 변동성 설명은 미미하여, 이에 대한 분석을 위해 영양상태 지수 변이성(Trophic State Index Deviation, TSID)을 테스트한 결과, TSI(TN)은 TSI(CHL)보다 낮게 나타났으나 큰 차이를 보이지 않았으며, TSI(TP)는 TSI(CHL)에 비해 비교적 높게 나타나 인(P)보다는 다른 요인이 CHL을 제한할 가능성이 높은 것으로 나타났고, TSI(SD)는 TSI(CHL)보다 높게 나타나 호소 내 부유물질 중 작은 크기의 입자들의 구성비가 높고 빛이 제한 요인이 될 가능성이 높은 것으로 나타났다(Carlson, 1991). 영양상태 지수 변이분석법을 적용한 결과(Fig. 6), “TSI(CHL)-TSI(SD)” 및 “TSI(CHL)-TSI(TP)”값은 전체 관측치 중 70% 이상이 음수값으로 나타나 영양염류에 의한 제한보다는 무기성 부유물(Inorganic solids) 혹은 비휘발성 부유물(NVSS)에 의한 광제한 효과(Light limitation)에 의해 1차생산력(CHL)이 감소되는 것으로 나타났다. 이런 결과는 상기의 TN-CHL 및 TP-CHL의 1차 회귀 경험적 모델식에서 보여주는 변수 간

의 미미한 상관성은 TSID의 영양상태 지수 변이성 테스트가 제시하는 바와 같이 무기성 부유물에 의한 영향으로 나타났다.

본 연구를 종합해 보면, 주남저수지는 연평균 강수량의 50% 이상이 강우 집중기에 집중하는 몬순강우의 특성을 반영하는 것으로 나타났으며, 강우와 유의한 상관관계($p<0.001$)를 보이는 COD는 EC ($p<0.001$) 및 SS ($p=0.011$)와 유의한 상관관계를 보이는 것으로 나타나, 강우는 주남저수지의 수질변수를 조절하는 핵심요인으로 사료되었다. 호소 내 1차생산력 또는 식물플랑크톤의 현존량을 조절하는 것으로 알려진 TN:TP 질량비에 따르면, 인(P)과 질소(N) 모두 중요한 인자로 사료되었으며, 투명도는 식물플랑크톤에 의한 유기성 부유물의 영향뿐만 아니라 TSID의 영양상태 지수 변이성 테스트에서 제시하는 바와 같이 무기성 부유물에 의한 영향도 중요한 것으로 사료되었다. 또한 매년 주기적으로 철새가 도래하는 주남저수지의 수질에 대한 철새 배설물에 의한 영양염 농도변이는 겨울철새가 최대치를 보이는 1~2월에 오히려 농도가 감소하는 것으로 나타나 겨울철새의 배설물로 인해 겨울철 저수지의 부영양화가 심화될 것이라 예상과 상반된 결과를 보였으나, 이에 대한 연구는 향후 많은 자료 확보를 통해 규명되어야 한다.

적 요

본 연구에서는 우리나라의 주요한 철새도래지인 주남저수지를 대상으로 1998년부터 2007년까지 10년간의 계절적 수질특성 분석 및 연별변이 특성, 강우분포에 따른 영양염류(N, P)의 부하특성 및 경험적 모델(Empirical model)을 이용한 부영양화 변수 간의 역동적 관계를 분석하였다. 수체내의 COD의 평균농도는 7.8 mg L^{-1} 이었고, TN 및 TP의 영양염류 농도는 각각 1.4 mg L^{-1} , $83 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 부영양-과영양 상태로 나타났다. 주남저수지의 월별 COD는 전기전도도($r=0.669$, $p<0.001$)와 높은 상관관계를 보여 하절기 강우는 이온희석현상을 야기시키고 이는 수질향상에 기여하는 것으로 나타났다. TN 및 TP의 One-way ANOVA 분석 결과에 따르면, 철새 도래의 전·후에는 유의한 차이($F=5.2\sim 12.9$, $p<0.05$)를 보였다. 즉, 이는 철새 도래 전에 오히려 더 영양염류가 높은 것으로 나타나 철새도래에 의한 영양염류의 증가효과는 없는 것으로 나타났다. 또한, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 One-way ANOVA 분석 결과는 철새 도래 전·후에 유의한 차이($F=0.37\sim 0.48$, $p>0.05$)가 없는 것으로 나타났다.

부영양화에 관계된 변수를 이용한 경험적 모델 (Empirical model)의 1차 회귀분석 결과에 따르면, 조류생체량은 (CHL)은 TN ($R^2=0.143$, $p<0.001$, $n=119$) 및 TP ($R^2=0.192$, $p<0.001$, $n=119$)와 통계적으로 유의한 상관성을 보여 CHL의 증감에 영양염류가 영향을 미치나 그 효과는 미미한 것으로 나타났다. 이를 위해 영양상태 지수 변이성 (Trophic State Index Deviation, TSID) 테스트에 따르면, "TSI (CHL)-TSI (SD)" 및 "TSI (CHL)-TSI (TP)"값은 전체 관측치 중 70% 이상이 음수값으로 나타나 CHL은 영양염류에 의한 제한보다는 무기성 부유물 (Inorganic solids)에 의한 광제한 효과로 나타났다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 "생물조절 (먹이 연쇄)을 통한 농업용 저수지 수질관리 기법개발" (306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

강병국, 최종수. 2006. 한국의 늪. 지성사.
 강병국, 최종수. 2007. 주남저수지 (동양 최대 철새 도래지 그 생태 보고서). 지성사.
 구태회. 1994. 서낙동강의 조류. 한국조류학회지 **1**: 79-81.
 국립환경연구원. 1999. 호소내 조류 대 발생에 대한 수면제어 기술에 관한연구(II). 팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발.
 권동희. 2006. 한국의 습지지역 연구 성과와 과제. 한국지형학회지 **13**: 25-34.
 김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규. 1996. 부영양한 낙동강수계에서 유기물오염에 대한 조류 1차생산의 기여도. 한국조류학회지 **11**: 231-237.
 김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형담 (소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지 **37**: 205-212.
 김범철, 전만식, 황순진, 김재욱. 1999. 소양호 동, 식물플랑크톤의 계절 변동. 환경연구 **16**: 292-299.
 김진한, 박진영, 이정연, 유병호. 2001. 철새이동경로 및 도래서식조사. 국립환경연구원보 **23**: 569-581.
 김진한, 박진영, 이정연, 유병호, 이덕길. 2002. 철새이동경로 및 도래서식조사. 국립환경연구원보 **24**: 153-164.
 김호섭, 최은미, 박주현, 황하선, 김범철, 공동수, 황순진. 2008. 농업용 저수지 수질과 경험적 인자들과의 관계. 수질보전 **24**: 333-339.
 농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.

농업기반공사 농어촌연구원. 2005. 효율적인 농업용 저수지 용수 확보 및 이용방안 연구.
 박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. 한국육수학회지 **38**: 382-392.
 박진영, 원병오. 1993. 주남저수지에 도래하는 큰기러기와 쇠기러기의 월동생태. 경희대학교 한국조류연구소 연구보고 **4**: 1-24.
 박희정, 안광국. 2007. 우리나라 대형 인공호에서 영양상태 평가 및 수질 변수를 이용한 경험적 모델 구축. 한국육수학회지 **40**: 14-30.
 손명원, 전영권. 2003. 낙동강 하류 연안 자연습지의 자연지리적 특성. 한국지역지리학회지 **9**: 66-76.
 안광국, 서진원, 박석순. 2001. 대청호의 취수탑 주변의 이화학적, 생물학적 상태에 대한 계절경향의 영향. 한국육수학회지 **34**: 327-336.
 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지 **38**: 54-62.
 유재평, 함규황. 1994. 최근 5년간 주남저수지의 조류분포 연구. 한국조류학회지 **1**: 95-103.
 윤일병, 어성준, 김종인. 1989. 경상남도 소재 5개 늪지의 수서 곤충군집 구조에 관한 연구. 환경생물학회지 **7**: 19-32.
 이호원, 이상명, 강현무, 박시섭. 1997. 주남저수지산 인편성 황갈조류에 관한 연구. 경남대학교 기초과학연구소 연구논문집 **20**: 37-47.
 최광순, 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최종수. 2001. 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4): 주암호. 한국육수학회지 **34**: 30-44.
 최홍근, 이상명. 1987. 주남저수지의 수생관속식물상과 현존량. 환경생물학회지 **5**: 39-50.
 함규황. 2000. 최근 10년 (1989~1998)간 주남저수지에 도래하는 조류의 변동에 관한 연구. 경남대학교 기초과학연구소 연구논문집 **14**: 73-84.
 함규황, 김창숙, 김인규. 1999. 최근 10년 ('89~'98)간 주남저수지 조류의 종수 및 개체수 변동에 관한 연구. 한국조류학회지 **6**: 127-132.
 함규황, 김태좌. 2001. 경상남도 주남저수지에 도래하는 큰 고니 *Cygnus cygnus*와 고니 *Cygnus columbianus*의 도래 현황. 한국조류학회지 **8**: 47-53.
 함규황, 손성원. 1995. 주남저수지의 저토질과 논우렁이의 (*Cipangopaludina chinensis malleata*) 생체조직내 중금속 함량의 분석. 경남대학교 환경문제연구소 환경연구 **17**: 5-17.
 함규황, 손성원. 1998. 경상남도 창원군 우포늪과 창원군 주남저수지 일대의 조류분포. 경남대학교 기초과학연구소 연구논문집 **12**: 261-273.
 향토문화연구회. 2002. 주남을 지키는 작은 생물. 향토문화연구회.
 허우명, 권상용, 이재일, 김동진, 김범철. 2004. 동해안 석호의 육수학적 조사(3): 화진포호. 한국육수학회지 **37**: 12-25.

- 허위행, 이종남, 이인섭, 우용태. 1999. 낙동강 하구의 조류상과 중요 습지로서의 평가. 한국조류학회지 **6**: 47-56.
- An, K.G. 2000. Monsoon inflow as a major source of in-take phosphorus. *Korean Journal of Limnology* **33**: 222-229.
- An, K.G. and J.R. Jones. 2000. Factors regulating blue-green dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **432**: 37-48.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Carlson, R.E. 1991. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. Enhancing the States's Lake Management Programs. pp. 59-71.
- Forsberg, O. and S.O. Ryding. 1980. Entrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish wastereceiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Fuhimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N : P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceanogr.* **42**: 250-256.
- Hwang, S.J., C.G. Yoon and S.K. Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy and Environment* **1**: 43-52.
- Kim, J.K. and W.H. Hong. 1992. studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in Man-made lake of Korea. *Journal of the Korean Environmental Science Society* **1**: 49-57.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlson-Type Trophic State Index for Nitrogen in Florida Lakes. *Water Resources Bulletin* **17**: 713-715.
- Mulamoottil, G., B.G. Warner and E.A. McBean. 1996. Wetlands: Environmental Gradients Boundaries, and Buffers. Lewis Publishers.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.

(Manuscript received 1 November 2008,
Revision accepted 2 February 2009)