

상류댐 건설에 따른 대청호 부영양화에 대한 기능 변화

이 순 철 · 한 정 호 · 안 광 국*

(충남대학교 생명과학과)

Functional Modifications of Daechung Reservoir Eutrophication by Upper Dam Construction. Lee, Soon-Cheol, Jung-Ho Han and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objectives of the study were to elucidate functional modifications in relation to hydrological, physico-chemical and ecological aspects in Daechung Reservoir by the upper dam constructions of Youngdam Reservoir and analyze temporal and spatial dynamic patterns using trophic parameters of TN, TP, chlorophyll (CHL), and Secchi depth (SD). Hydrological data such as inflow, precipitation, and water levels before (BDC, 1995~2000) and after (ADC, 2001~2006) the dam construction showed that precipitation had greater correlations with inflow volume in the BDC ($r=0.964$, $p=0.002$) than in the ADC ($r=0.857$, $p=0.029$). This outcome indicates that the upper dam construction influenced the inflow and water level of Daechung Reservoir. One of the greatest changes after the dam construction was decreases of nutrient contents (TN, TP) and increases of algal biomass (as CHL) as the water residence time increases. Values of CHL had greater relations with TP in the ADC ($r=0.412$, $p<0.001$) than the BDC ($r=0.249$, $p<0.001$), indicating that CHL had greater response at a given phosphorus in the ADC. Thus, algal yield at a given TP (CHL:TP ratios) increased in the ADC, resulting in a greater CHL-TP relations. Long-term interannual TP, TN, SD, and CHL showed greater variations in the riverine zone (RZ) than any other transition (TZ) and lacustrine zones (LZ). This phenomenon was mainly attributed to rapid hydrological response in the riverine zone (RZ) to flow reductions (short water residence time) from the upper dam, resulting in ambient contents of nutrients and light regime along with functional relations of CHL-TP.

Key words : Daechung Reservoir, monsoon rain, empirical model, nutrients

서 론

최근, 산업화 및 인구의 도시 집중화로 인하여 용수의 수요량이 급격히 증가하고 있으나, 하절기 몬순(Monsoon) 기간의 편중현상, 연별, 지역별 강우 편차현상으로 수자원 분포의 시·공간적 불균형이 나타나 수자원 확보의 필요성이 확대되고 있다. 우리나라의 경우, 자연호가 거

의 없는 실정이어서 안정적인 수자원의 관리와 공급을 위하여 하천에 인공댐을 건설하였다. 인공댐의 건설로 인하여 수자원을 안정적으로 확보하고 있으며, 홍수피해 방지 및 하천의 유지용수 공급, 낚시 및 수상레저의 공간 제공, 수력발전을 통한 전력생산 등 다양한 경제적 이점을 주고 있다(해양수산부, 2007). 이런 경제적 이점에도 불구하고, 댐 건설은 하천 시스템을 물리적으로 차단시키는 효과 때문에 일차적으로는 유량 및 수온과 같은 수

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

리·수문학적 요인 변화(Macan, 1961, 1974; Stuckenberg, 1969) 및 영양염류(인, 질소)와 같은 화학적인 수질 변화와 수체의 투명도 감소효과(Macan, 1974; Krenkel *et al.*, 1979; Rada and Wright, 1979), 수체 내 서식하는 동·식물플랑크톤, 무척추 동물, 어류 등의 생물학적 개체군 구조 및 기능에 영향(Moss, 1980; Vannote and Sweeney, 1980; Edwards and Crisp, 1982; Merritt *et al.*, 1982; Ward, 1982; Sweeney *et al.*, 1986)을 주는 것으로 알려져 있다. 특히, 최근 이런 인공 댐들은 건설한지 10~20년이 경과되면서 영양염류의 증가로 인하여 수체 내 물질순환 및 부영양화에 직접적인 영향을 주어 수생태계의 기능 변화 및 다양한 환경문제(Allan, 1995; 최와 김, 2003; 여, 2004; 박, 2005)를 야기시키고 있기 때문에 이를 해결하기 위한 연구가 시급히 요구되고 있다.

전 세계적으로 인공호의 부영양화에 대한 현장평가 및 평가기법에 대한 연구는 1960년대 이후 다각도로 진행되어 왔다(Vollenwider, 1968; Forsberg and Ryding, 1980; Havens, 1994; Nurnberg, 1996). 우리나라에서도 호수에 대한 연구는 소양호, 팔당호, 대청호, 안동호 및 충주호 등에서 활발히 진행되어 왔으며, 주로 인공호에서의 부영양화에 관련된 연구가 활발히 진행되어왔다. 특히, 본 연구 대상 인공호인 대청호는 완공 이후 김 등(1984)에 의해 부영양화 현상이 최초로 보고된 이래 거의 매년 비슷한 시기에 부영양화 현상이 보고되었으며(이 등, 2003), 저수를 시작한 이래 질소(N) 및 인(P)의 농도가 계속적으로 증가하는 추세에 있다고 보고되었다(김 등, 1995). 대청호와 같은 인공호로 유입되는 각종 유기 오염물질의 증가는 인공호 내 영양단계를 높일 뿐만 아니라, 물의 흐름을 차단함으로써 체류시간을 증가시켜 호수 내 부영양화가 심각하게 진행되는 것으로 나타났다(김과 김, 1996; 이와 김, 1996; 한 등, 1998; 이 등, 2006). 또한 우리나라 인공호의 수질 및 부영양화 특성은 계절적 몬순 영향에 의해 경험적 부영양화 모델(Empirical model)의 변수관계에 큰 변이성을 주는 것으로 나타났다(An, 2000; An *et al.*, 2001). 특히 하절기의 유입량 증가는 수체 내 영양염류 농도 변화 및 조류생물량(엽록소-*a* 농도)의 변화에 큰 영향을 주는 것으로 나타나(An and Park, 2002; An, 2003), 영양단계 판정에 있어 계절적 몬순 요인이 반드시 고려되어야 한다는 결과를 도출하였다(An, 2000; An *et al.*, 2001).

상기의 대청호에 대한 다양한 연구에도 불구하고, 대청호의 상류에 위치한 용담댐의 영향에 대한 연구는 거의 전무한 현실이다. 대청댐의 경우, 1988년에 댐이 완공된 이후 대전광역시 및 충남·북 지역에 용수공급의 역할을

해왔으나, 댐 상류인 전북 지역의 용수 부족으로 인해 대청댐으로부터 192 km 상부의 지역에 2000년에 용담댐을 건설하였다. Ward and Stanford (1983)의 Serial Discontinuity Concept에 대한 연속적 인공댐에 대한 가설에 따르면, 대청호와 용담호와 같이 연속적인 댐으로 이어져 있을 경우 댐의 상·하류 간의 자연적인 흐름이 차단되기 때문에 하류 호수의 경우 체류시간 증가, 인과 질소의 영양염류 축적, 1차 생산량 증가와 같은 현상이 일어나 궁극적으로 수생태계 기능이 변할 수 있음을 제시한 바 있다. 따라서 댐 건설의 생태학적 부정적인 영향을 최소화하기 위해서는 호수의 수리·수문학적인 특성과 상류댐의 건설로 인한 하류 댐의 수질변화 원인과 그 영향관계에 대하여 이해하는 것이 중요하다. 그러나 이와 같은 중요성에도 불구하고 이들의 역할 및 특성을 정량화하려는 연구가 거의 전무한 실정이다.

본 연구의 목적은 용담댐 건설에 따른 대청호의 총체적인 물리학적, 화학적 수질의 변화를 분석하고, 유역 내에서 나타나는 유입량 변화양상과 계절성 강우에 따른 영향을 과학적이고 체계적으로 분석하는 것이다. 본 연구 결과는 향후 용담댐 건설에 따른 하류댐 수역의 생태학적 기능변화에 대한 영향 파악 및 하류댐 생태계의 피해를 최소화하기 위한 효과적인 최적관리방안을 수립하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황 및 수문학적 자료 분석

본 연구에서는 상류댐 건설이 하류 호수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 금강 수계의 중류에 위치한 대청댐을 연구 대상으로 선정하였다. 대청댐은 1980년 12월에 준공되어 높이 72 m, 길이 495 m, 체적 123만 4천 m³의 콘크리트 중력식 댐과 사력댐으로 구성된 복합형 댐으로 금강 하구둑으로부터 137 km 상류지점에 위치해 있다. 대청댐은 총 저수용량이 14억 9천만 톤으로 대전과 청주, 천안을 비롯한 충청지역 및 군산 등 전북 일부 지역에 생·공용수를, 금강하류와 미호천 유역에 농업용수를 공급하고 있다. 또한 홍수조절에 따른 댐 하류 홍수피해 경감과 수력발전을 통하여 시설용량 9만 Kw의 수력발전을 통한 전력을 생산하여 국민의 삶을 윤택하게 함은 물론 국가경제발전에 일익을 담당하고 있다.

한편, 용담댐은 대청댐으로부터 192 km 상류지점에 위치하고 있어 전주권을 포함한 서해안 지역의 안정적인 생활용수, 농업용수 및 공업용수의 수요를 대비하고 홍수

조절 기능 확보 및 갈수기 하천의 오염을 방지하는 등 수자원의 효율적인 사용을 위하여 건설되어 금강 중·상류에 연속적으로 댐을 형성하고 있다(허 등, 2006).

대청호 수계에서 1995년부터 2006년까지의 연별·월별 강수량 분석을 위해 대전지방기상청 (<http://daejeon.kma.go.kr>)의 자료 검색을 통해 대청호의 강수량을 조사하였고, 상류댐인 용담호의 방류량과 대청호의 유입량, 저수위는 한국수자원공사 물관리정보유통시스템 (<http://www.wins.go.kr>)의 댐 운영 수문정보를 통해 수집된 자료를 분석하였다.

2. 조사 지점 및 수질 자료 분석

대청호의 장기간에 걸친 부영양화 진행 상태를 분석하기 위한 수질자료는 1995년부터 2006년까지의 환경부의 수질측정망 (<http://www.me.go.kr>)의 월별 수질측정 자료를 이용하였다. 분석에 사용된 수질항목은 호소의 부영양화와 밀접한 관계를 보이는 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP), 부유물질(Suspended solid, SS), 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL), 투명도(Secchi depth, SD)를 수질변수로 선정하여 분석하였으며, 이를 이용해 TN:TP ratio 및 CHL:TP ratio를 산정하여 부영양화 상태 및 호수의 기능변화를 분석하였다. 수집된 수질자료는 상류 댐 건설에 따른 대청호의 수질변화의 정도를 분석하기 위해 용담댐 건설 이전 기간(Before dam construction, BDC; 1995~2000년)과 이후 기간(After dam construction, ADC; 2001~2006년)으로 나누어 연별 수질변화 특성을 분석하였다. 또한, 댐의 상류부에 위치한 강 유입부로부터 댐까지의 연속성을 따라 발생하는 대청호의 종적구배(Longitudinal gradient) 특성을 분석하기 위하여(Thornton *et al.*, 1981) 댐으로부터 먼 거리 순으로 유수대(Riverine zone, RZ; 46 km), 전이대(Transition zone, TZ; 20 km), 정수대(Lacustrine zone, LZ; 1 km)로 구분하여 공간적인 수질특성을 파악하였다. 또한 강우의 하절기 특성을 반영하고자 수질자료를 장마전기(Premonsoon, 5~6월), 장마기(Monsoon, 7~8월), 장마후기(Postmonsoon, 9~10월)로 구분하여 계절적인 수질특성을 분석하였고, 용담댐의 건설 후 이에 대한 영향을 분석하였다. 각 지점은 행정구역상 충청북도에 위치하며, 세부사항은 Fig. 1과 같다.

3. 자료의 통계적 분석

용담댐 건설에 따른 대청호의 수질변화를 알아보기 위하여 7개의 수질항목(TN, TP, SS, SD, CHL, TN:TP, CHL:

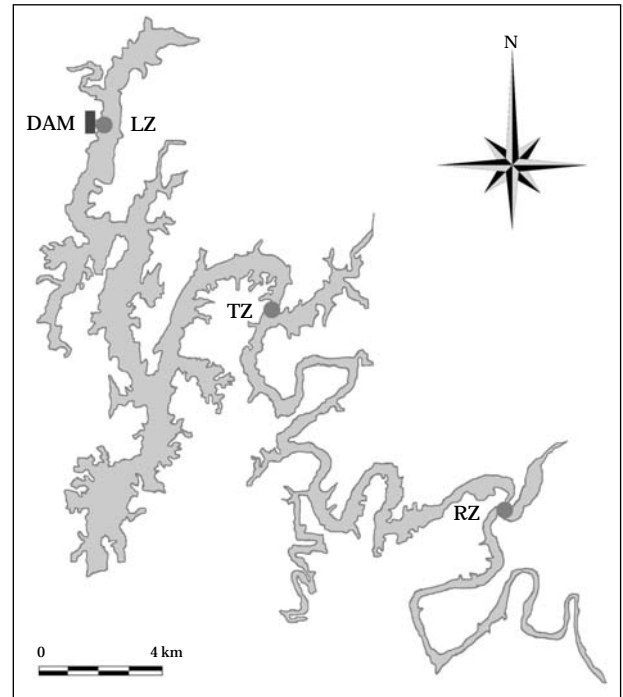


Fig. 1. Study sites (LZ=Janggye bridge, Annae-myeon, Okcheon-gun, TZ=Hoenam bridge, Hoenam-myeon, Boeun-gun, RZ=Daechung dam, Munui-myeon, Cheongwon-gun) in Daechung Reservoir.

TP)에 대한 측정치를 BDC와 ADC로 대별하여 기본 통계량을 분석하였으며, 대청호 수질의 종적구배 특성을 분석하기 위하여 대청호 지점을 상류역의 유수대(RZ), 상류역과 댐의 중간역인 전이대(TZ), 댐에 인접한 정수대(LZ)로 대별하여 자료를 분석하였다. 각 수질 항목들 간의 단순상관행렬을 구하여 상관관계를 산출하였으며, 이를 바탕으로 상류댐 건설 전·후의 시·공간적인 수질변화를 분석하였다. 통계처리는 SPSS (Version 12.0 KO for windows, 2004) 프로그램을 이용하여 분석을 수행하였다.

결 과

1. 용담댐 건설에 따른 대청호의 수문학적 특성 변화

대청호 수계에서 장기간(1995~2006년)의 강우특성 분석에 따르면, 연 평균 강수량은 1,477 mm로써 5~10월 사이에 연중 강수량의 80% 이상의 강우가 집중되는 것으로 나타났다(BDC; 83.5%, ADC; 80.3%). 특히, 하절기의 몬순 장마기에는 연중 강수량의 40% 이상이 집중

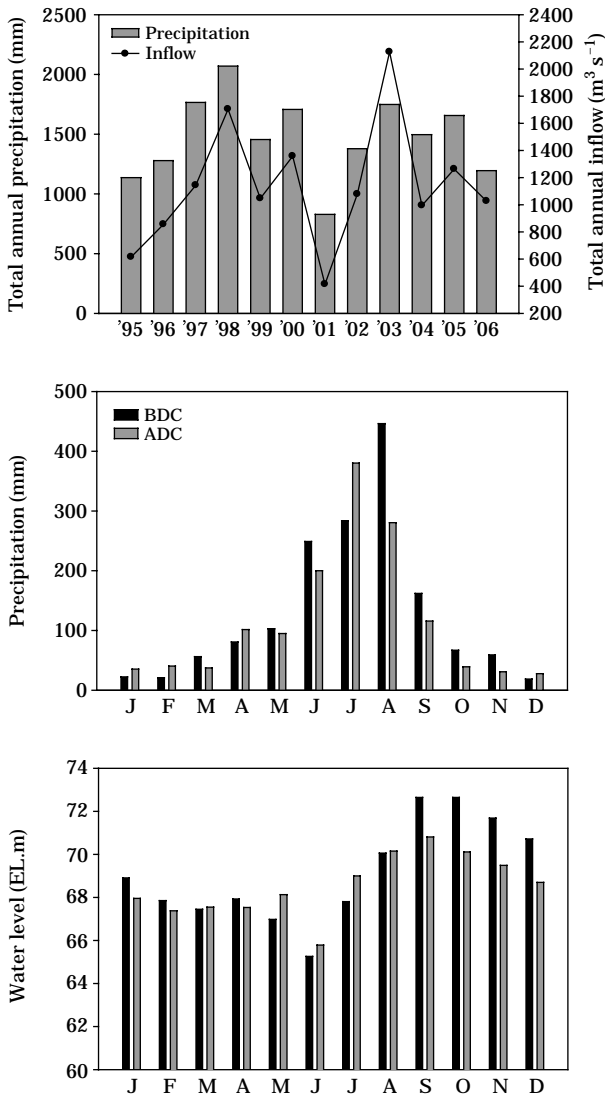


Fig. 2. Annual precipitation, total inflow and monthly precipitation (BDC=before dam construction, ADC=after dam construction) and water level (EL, m) during 1995~2006.

되는 것으로 나타났으며, 상류댐인 용담댐 건설 이전과 이후에 하절기 강수량은 차이가 없는 것으로 나타났다 (BDC; 47%, ADC; 48%). 즉, 수문집중 하절기 동안 수리 수문학적으로 가장 변이가 심한 시기로 나타났다. 연별 강우분포 분석에 따르면, 대부분의 해에 강수량은 1,100 mm 이상으로 나타났으나, 1998년은 총 강수량 2,070 mm로 다른 해에 비해 많은 강우가 내린 반면, 2001년은 총 강수량 829 mm로 가장 적은 강우가 내려 가뭃의 해로 나타났다 (Fig. 2).

대청호의 유입수 대부분은 호수 상류의 본류 끝단으로

Table 1. Comparisons of annual outflow (m³ sec⁻¹) in the Yongdam Reservoir vs. Daechung Reservoir. First discharge from the Yongdam Reservoir occurred in 2002.

	Year				
	2002	2003	2004	2005	2006
Annual outflow of Yongdam Reservoir (m³ sec⁻¹)	324	601.8	271.8	358.2	237.2
Annual inflow of Daechung Reservoir (m³ sec⁻¹)	1078	2125.3	994.2	1262.7	1026.7

Table 2. Pearson's correlation coefficients (*r*) and its probability (*p*, n=6) between total annual precipitation and inflow (BDC=Before dam construction, ADC=After dam construction).

		Precipitation of BDC	Precipitation of ADC
		Inflow of BDC	<i>r</i> 0.964 <i>p</i> 0.002
Inflow of ADC	<i>r</i> <i>p</i>		0.857 0.029

유입되는 것으로 확인되었다. 본 연구기간 중 유입량은 강우의 증가에 따라 동반적인 증가를 보이는 것으로 나타났다지만, 용담댐 건설 이후인 2001년 대청호의 유입량은 414.3 m³ sec⁻¹로 가장 낮았고, 2003년에는 2,125 m³ sec⁻¹로 가장 높게 나타나 용담댐의 수문조절에 의해서도 영향을 받는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 대청호의 강수량 (Precipitation)과 유입량 (Inflow rate)의 통계학적 분석결과에 따르면, 용담댐 건설 이전까지만 해도 높은 상관관계를 보였으나 (*r*=0.964, *p*=0.002), 용담댐 건설 이후에 상관도 지수 (Correlation coefficient)는 이전에 비해 낮아진 것으로 분석되었다 (*r*=0.857, *p*=0.029; Table 2). 이는 적은 강수량과 맞물려 상류에 건설된 용담댐에서의 본격적인 담수로 인한 영향이 반영된 결과로 사료되어진다. 반면, 연 강수량이 가장 높았던 1998년 (대청호 연간 유입량; 1,704 m³ sec⁻¹)보다 2003년 대청호 연간 유입량이 많았던 원인으로는 상류에 위치한 용담댐 건설 이후의 방류량이 2003년에 601.8 m³ sec⁻¹로 다른 해보다 월등히 높았기 때문으로 사료된다 (Table 1, Fig. 2).

한편, 수체 내 저수위 (Water level)에 대한 연별 분석결과에 따르면, 최저 저수위를 보인 시기는 연구기간 중 최소 강수량과 용담댐에서 본격적으로 담수를 시작한 2001년에 가장 낮은 저수위를 보였으며, 높은 강수량을

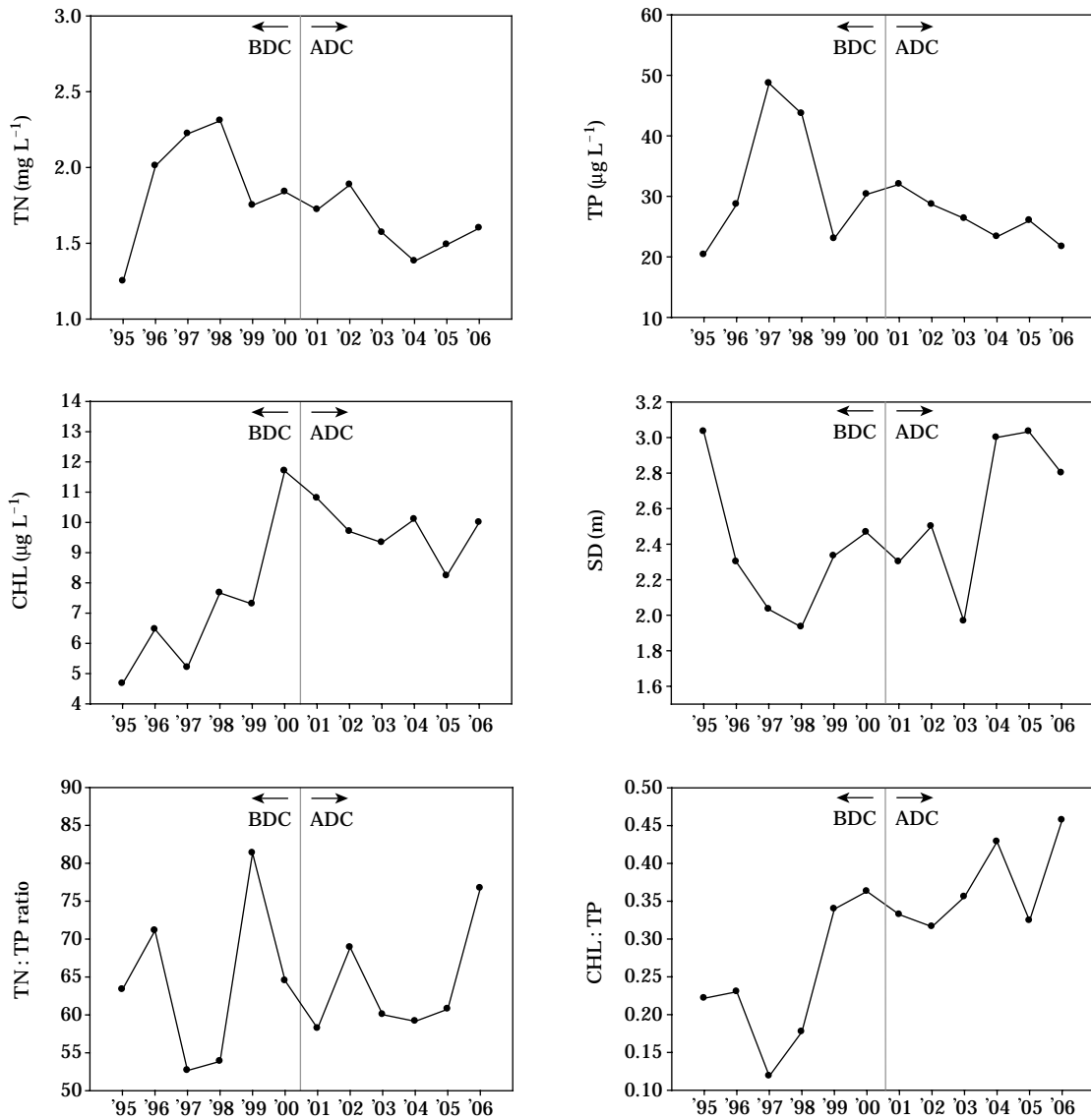


Fig. 3. Interannual variations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll (CHL), Secchi depth (SD), TN : TP ratios, and CHL : TP ratios as an algal yield at a given phosphorus. The dam construction of Yongdam Reservoir was completed in 2000. The BDC and ADC in the figure indicate before and after the dam construction, respectively.

보였던 1998년과 높은 유입량을 보였던 2003년에 높은 저수위를 보였다 (Fig. 2). 계절별 분석결과에 따르면, 장마 전인 6월에 가장 낮은 저수위를 보였으며, 장마후인 9월에 가장 높은 저수위를 보였다 (Fig. 2). BDC와 ADC의 저수위 분석결과, 9~12월에 걸친 기간에는 댐 건설 이전에 평균 E.L. 2 m 정도의 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 집중호우가 내린 기간의 차이 (BDC: 8월, ADC: 7월)와 용담댐에서 저수위를 맞추기 위한 물막이 영향으로 사료되었다.

2. 이화학적 수질 특성 변화

대청호에서 부영양화 지수에 관계된 수질 변수 (TN, TP, CHL, SD, TN : TP ratio, CHL : TP ratio)를 분석한 결과에 따르면, 연별, 지점별로 변이를 보였으며, 상류의 용담댐 건설 이전 (BDC)과 댐건설 이후 (ADC)에 뚜렷한 기능적 변화를 보였다 (Figs. 3, 4). TN의 연별 분석에 따르면, 1995~2000년 기간에 평균 1.25~2.31 mg L⁻¹의 범위를 보였으나, 2000~2006년에는 평균 1.38~1.89 mg L⁻¹로 나타나 용담댐 건설 이후 TN의 양이 점차 감소되

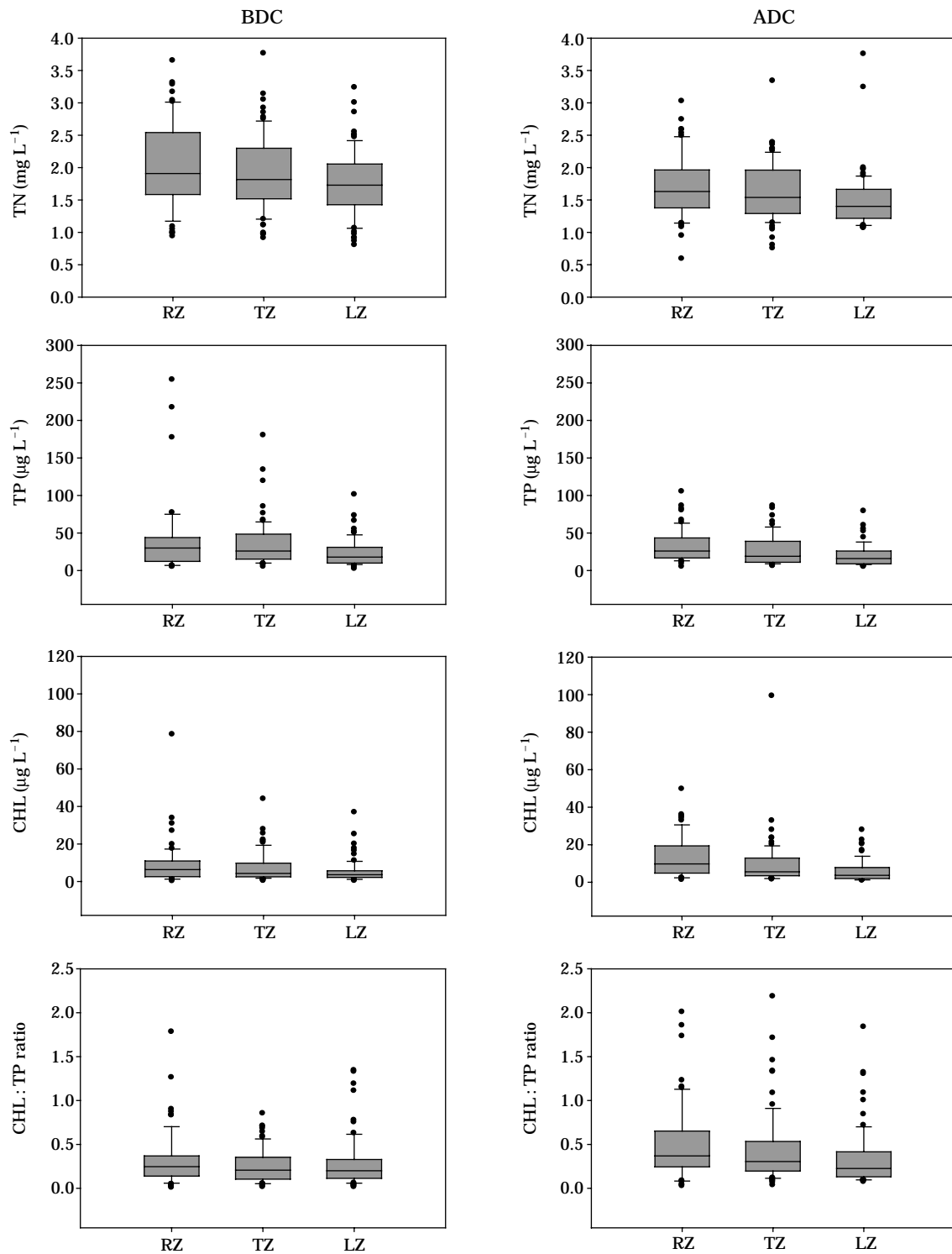


Fig. 4. Nutrients (TN, TP), chlorophyll (CHL), TN : TP and CHL : TP ratios in the three zones before (BDC) and after dam construction (ADC).

고 있는 것으로 나타났다(Figs. 3, 4). 한편, 지점별 분석에 의하면 TN의 평균 농도는 BDC에 RZ는 2.04 (1.33~

2.55) mg L^{-1} , TZ는 1.91 (1.30~2.28) mg L^{-1} , LZ는 1.74 (1.12~2.14) mg L^{-1} 로 나타났으며, ADC에 RZ는 1.70

Table 3. Comparisons of nutrients (TN, TP), chlorophyll-*a* (CHL), secchi depth (SD), the ratios in the three zones between before dam construction (BDC) and after dam construction (ADC).

	Riverine Zone (RZ)		Transition Zone (TZ)		Lacustrine Zone (LZ)	
	BDC	ADC	BDC	ADC	BDC	ADC
TN (mg L ⁻¹)	2.04±0.42 (1.33~2.55)	1.70±0.12 (1.56~1.90)	1.91±0.37 (1.30~2.28)	1.63±0.19 (1.34~1.90)	1.74±0.39 (1.12~2.14)	1.50±0.23 (1.25~1.86)
TP (µg L ⁻¹)	39±17 (21~70)	33±7 (24~44)	35±13 (23~52)	26±4 (20~30)	23±9 (15~39)	20±3 (16~23)
CHL (µg L ⁻¹)	8.8±5.7 (4.3~20.0)	13.3±3.1 (10.1~17.3)	7.4±1.2 (6.1~9.3)	9.8±3.4 (6.4~16.2)	5.3±1.6 (2.7~6.6)	6.0±1.6 (3.9~8.2)
SD (m)	1.7±0.3 (1.4~2.1)	1.7±0.3 (1.4~2.1)	2.3±0.4 (1.9~2.8)	2.8±0.5 (2.1~3.3)	3.0±0.6 (2.5~4.2)	3.3±0.7 (2.3~4.1)
TN : TP Ratio (µg µg ⁻¹)	57±14 (33~73)	54±9 (39~65)	57±13 (43~77)	63±9 (57~80)	79±16 (55~106)	75±14 (54~89)
CHL : TP Ratio (µg µg ⁻¹)	0.243±0.123 (0.074~0.455)	0.429±0.164 (0.280~0.721)	0.237±0.093 (0.128~0.344)	0.376±0.115 (0.283~0.540)	0.246±0.110 (0.154~0.440)	0.302±0.094 (0.177~0.406)

(1.56~1.90) mg L⁻¹, TZ는 1.63 (1.34~1.90) mg L⁻¹, LZ는 1.50 (1.25~1.71) mg L⁻¹로 나타나 댐축으로 갈수록 TN의 농도가 감소하는 것으로 나타났다 (Table 3). 이는 대청댐으로 유입되는 대부분의 TN은 상류 유입구 부근의 RZ에서 크게 일어나고 (Kennedy *et al.*, 1981), 하류로 갈수록 침전작용에 의해서 농도가 낮아지기 때문에 사료되었다.

TP는 TN과 함께 호소 내 부영양화 현상의 주 영양염류로서 인공호에서 큰 유입원이 중간에 없는 경우 상류에서 하류로 갈수록 양적인 감소를 보여주는 것으로 알려져 있는데 (Kimmel and Groeger, 1984), 이런 경향은 대청호에서도 동일하게 나타났다. TP의 연별 분석에 따르면, 1995~2000년 기간 동안 평균 20~49 µg L⁻¹의 범위를 보였으나, 2001~2006년 기간에는 평균 22~32 µg L⁻¹로 나타나, 최대값의 경우 TN과 마찬가지로 용담댐 건설 이후 인(P)의 농도가 점차 감소되고 있는 것으로 나타났다 (Figs. 3, 4). 한편, 지점별 분석에 의하면 TP의 평균 농도는 BDC에 RZ는 39 µg L⁻¹ (범위: 21~71) µg L⁻¹, TZ는 35 µg L⁻¹ (범위: 23~50), LZ는 23 µg L⁻¹ (범위: 15~39)로 나타나 뚜렷한 농도구배 (Concentration gradient) 특성을 보였다. 또한 총인은 댐 건설 이후 (ADC)에 RZ는 33 (24~44) µg L⁻¹, TZ는 26 (20~30) µg L⁻¹, LZ는 20 (16~23) µg L⁻¹로 나타나 TN과 마찬가지로 댐축으로 갈수록 TP의 농도가 감소하는 것으로 나타났다 (Table 3). 이는 대청댐으로 유입되는 대부분의 TN과 TP의 유입물질의 부하가 강 유입구 부근의 상류지역 (RZ)에서 크게 일어나고 (Kennedy *et al.*, 1981), 하류로 갈수록 침전작용에 의해서 농도가 낮아지기 때문에 사료된다. 또한 장

마기의 밀도류 (Density flow) 형성으로 인한 중층유입 (An, 2000)에 의하여 댐축 (LZ)의 표층수에 즉각적인 영향이 나타나지 않은 것으로 사료된다.

식물플랑크톤의 1차 생산력의 지표로서 이용된 엽록소-*a* (CHL)는 BDC인 1995~2000년 동안 모든 지점에서 9 µg L⁻¹ 이하를 보였으나 (Fig. 3), 2001~2006년 기간 동안은 큰 폭으로 증가하였다 (Figs. 3, 4). CHL은 댐의 건설과 함께 늘어난 체류시간에 맞추어 양적 증가를 보였으며, 증가의 폭은 댐의 상류역에 위치한 RZ에서 가장 두드러지는 것으로 나타났다. CHL은 영양염류와 같이 상류에서 하류로 갈수록 농도가 낮아지는 현상을 보인다. 즉, 일반적으로 인공호의 경우, 무기성 부유물 농도가 높은 상류 및 영양염류의 농도가 낮은 하류에서는 CHL 농도는 낮고, 중류에서 최고값을 보이는 것이 일반적이다. 하지만, 대청호에서는 이와 유사한 현상이 나타나지 않았다. 즉, 이전 연구인 An and Park (2002) 및 An (2003)에서 제시한 바와 같이 일반적으로 강우 집중기인 7~8월에는 현저하게 무기성 부유물의 증가로 인하여 CHL 농도의 감소현상이 나타나지만, 연평균 자료를 이용할 경우 무기물 농도에 의한 CHL 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 오히려 영양염류의 농도 변화가 CHL의 농도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 2003년의 경우 대청호는 증가된 용담댐의 방류량으로 인하여 높은 유입량을 보였는데 (Table 1, Fig. 2), 이로 인하여 대청호의 RZ에서는 CHL의 양이 급격히 감소하게 되는 결과를 보였다. 이는 RZ에서 많은 양의 유입수와 빠른 유속으로 인하여 1차 생산자인 조류의 세척현상 (Washout) 을 초래하였으며, 무기성 현탁물의 증가로 인한 광조건

Table 4. Pearson's correlation coefficients (*r*) and its probability (*p*, BDC; *n*=212, ADC; *n*=206) of chemical parameters between before dam construction (BDC) and after dam construction (ADC).

		BDC (ADC)				
		TN	TP	CHL	SD	TN : TP Ratio
TP	<i>r</i>	.298 (.220)				
	<i>p</i>	.000 (.001)				
CHL	<i>r</i>	.221 (.107)	.249 (.412)			
	<i>p</i>	.001 (.125)	.000 (.000)			
SD	<i>r</i>	-.335 (-.197)	-.383 (-.476)	-.410 (-.453)		
	<i>p</i>	.000 (.005)	.000 (.000)	.000 (.000)		
Ratios of TN : TP	<i>r</i>	.038 (.145)	-.469 (-.681)	-.242 (-.321)	.176 (.422)	
	<i>p</i>	.581 (.038)	.000 (.000)	.000 (.000)	.010 (.000)	
Ratios of CHL : TP	<i>r</i>	.001 (-.035)	-.243 (-.204)	.614 (.612)	-.189 (-.165)	.395 (.232)
	<i>p</i>	.989 (.618)	.000 (.003)	.000 (.000)	.006 (.018)	.000 (.001)

악화현상이 1차 생산력의 감소현상을 나타낸 것으로 사료되었다.

대청호 수체의 SD는 TN, TP, CHL의 양상과 달리 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 것으로 나타났다. 이는 빛의 투과를 방해하는 조류의 번식과 LZ에서 투과되는 빛의 제한으로 인한 조류생장에 영향을 준 것으로 사료되었다. 인의 농도에 의한 1차생산력의 중요한 지표인 CHL : TP ratio의 분석에 따르면, 용담댐 건설 이후인 2001~2006년 기간에는 CHL : TP ratio는 뚜렷하게 증가한 것으로 나타났다 (Fig. 4). 대청호의 상류 지역에 용담댐이 생겨남으로써 대청호로 유입되는 TP의 양이 줄어들었지만, 체류시간이 늘어남에 따라 CHL은 상대적 증가를 보였으며, CHL : TP ratio가 증가하는 방향으로 변화가 일어나, 호수 생태계 기능이 변화하였음을 제시하였다. CHL : TP ratio는 RZ에서 가장 두드러진 변화를 보였으며, TZ, LZ 순으로 변화의 폭이 감소하는 것으로 나타나 댐 건설 후 RZ에서 호수의 생태적인 기능이 변화된 것으로 분석되었다.

3. 이화학적 수질 변수 간의 상관도 변화

용담댐 건설 이전 (BDC) 및 이후 (ADC)에 대청호 내의 수질 변수간의 상관도 분석을 실시한 결과는 Table 4와 같다. CHL과 TP의 상관도는 댐 건설 이전보다 댐건설 이후 (ADC)에 상관도가 높아진 것으로 나타났다 (BDC; $r=0.249$, $p<0.0001$, ADC; $r=0.412$, $p<0.001$). 이는 용담댐 건설에 따라 유입되는 TP의 양이 줄었으나 CHL은 수중에서 생존과 번식에 필요한 인을 흡수함에 있어 높은 강도의 반응성 (High response)을 갖는 것으로 사료되었다. 호수내의 1차 생산력에 영향을 미치는 대표적인 영

양염류인 TN과 TP의 상대적인 비율을 보여주는 TN : TP ratio는 댐 건설 이후 (ADC)에 TP와의 역 상관관계가 더욱 높아진 것으로 나타났다 (BDC; $r=-0.469$, $p<0.001$, ADC; $r=-0.681$, $p<0.001$; Table 4). 한편, 댐 건설 이전에 TN은 TN : TP ratio에 통계학적으로 영향을 주지 않는 것으로 나타났다 ($p=0.581$). 수체 내에서 SD는 댐 건설 이전 및 이후에 모두 TP, CHL과 역 상관관계 ($p<0.001$)를 보였으며, 댐 건설 이후 상관도 지수 (절대값)는 증가하는 것으로 나타났다 (Table 4). 이는 투명도가 수체류 시간의 증가로 인한 1차 생산력 (조류)의 변화에 직접적으로 조절되는 것으로 사료된다. 용담댐 건설 이후 (BDC)에는 SD와 TN 및 TP의 상관도가 유사하게 나타났지만, 댐 건설 이후 (ADC) SD와 TN의 상관관계가 이전보다 낮아지고, SD와 TP의 상관관계는 이전에 비해 높아진 것을 확인하였다. 이는 투명도를 저해시키는 요인인 CHL이 용담댐 건설 후 낮아진 TP에 대해 높은 반응성을 보이는 것에 영향을 받았기 때문이라고 사료되었다.

4. 계절적 특성에 따른 수질 변수 분석

수체의 부영양화 평가 시 핵심 변수인 TN과 TP의 BDC 농도는 댐건설 이후보다 높게 나타났다. 특히 TN은 RZ, TZ, LZ의 모든 영역에서 뚜렷한 감소를 보였다 (Fig. 5). 한편, TP의 농도는 문순 장마기에 최상류 지점인 RZ에서 댐건설 이후에 가장 큰 감소 현상을 보여 (Fig. 5), 대청호 내의 상류로부터의 인 (P) 유입은 장마기간 중 현저히 감소한 것으로 나타났다. TP는 장마 전·후의 기간보다 장마기 (Monsoon)에 유역 간의 양적인 차이가 크게 나타났는데, 특히 장마기의 RZ에서는 ADC에 TP가 현저하게 낮아진 것으로 나타났다. 이는 장마기간에 상류로부

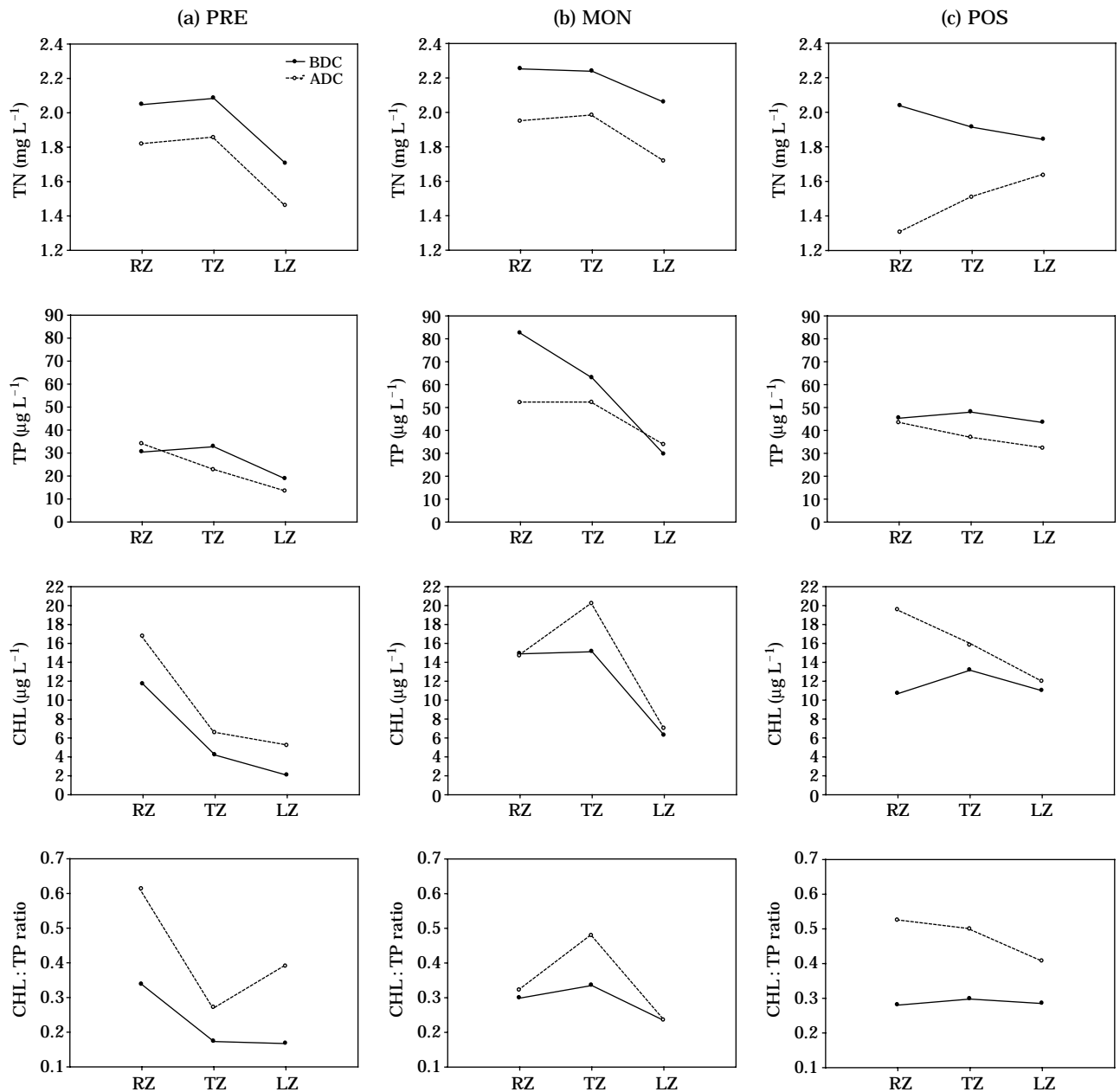


Fig. 5. Seasonal variation of trophic conditions in the three zones during season of the premonsoon (PRE), monsoon (MON), and postmonsoon (POS).

터 많은 양의 인 유입현상이 나타나지만 상류댐인 용담댐의 저해로 인하여 대청호로 유입되는 인의 양이 감소된 것으로 사료된다. 이런 영양염류의 감소현상은 장마 전기 (premonsoon) · 중기 (Monsoon) · 후기 (Postmonsoon)의 계절별로 일부차이는 있으나 모두 감소한 것으로 나타나 용담댐의 건설이 대청호의 영양염류의 감소에 기여하는 것으로 사료된다 (Fig. 5).

CHL의 농도의 변화 특성은 TN, TP와 상이한 양상을 보였다. CHL의 농도는 BDC에 비하여 ADC에 증가하였으며, 장마 전 · 중 · 후로 본 계절적 변화분석에서도 모두 댐 건설 이후에 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 5). 지점별 특성으로 장마 전 · 후에 CHL의 농도가 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는데 비해 장마기 상류에서는 유입량의 증가로 인한 세척현상에 의해서 TZ와 비

숫하거나 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 댐 건설에 따른 CHL:TP ratio는 장마 전·후기에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 장마기에는 TZ에서만 차이를 보였다 (Fig. 5).

고 찰

본 연구 결과에 따르면, 용담댐의 건설은 대청호의 유입량과 체류시간 등의 수문학적 특성 변화에 영향을 주었으며, 이런 변화는 영양염류(TN, TP), 투명도 및 1차 생산력(엽록소-*a*)에 변화를 가져와 호수 생태계의 기능 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. 수리수문학적 분석 결과에 따르면, 강수량은 유입량과 높은 상관관계(BDC; $r=0.964$, $p=0.002$, ADC; $r=0.857$, $p=0.029$)를 보였으며, 하절기의 단기간 동안의 집중강우는 영양염류인 TP의 유입을 증가시켰고, 상류에 위치한 용담댐 방류량은 하류 대청호의 유입량 및 영양염류의 유입에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 연중 강수량이 적은 2001년에 용담댐 건설 이전과 비교하였을 때 대청호의 수위도 크게 낮아진 것으로 나타나, 강우량이 연평균보다 적은 해의 경우에는 평균 강우량을 보이는 해 혹은 연평균 강우 이상의 해보다 더 크게 수질특성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 김 등(2002)이 제시한 연구 결과와도 일치하는 것으로 나타났으며, 이는 우리나라 하천 및 호소의 수질이 강우량 혹은 유량과 밀접한 관계를 보인다. 따라서 강우량이 극히 적은 해의 대청호 수질은 상류 용담댐의 수리수문학적 조절에 의해 크게 변할 수 있는 가능성을 보여준 것으로 사료된다.

기존의 많은 인공호 연구에서 제시한 바와 같이, TP, TN, CHL 및 SD는 가장 핵심적인 부영양화 지표로서 알려져 있다. 본 연구에서 대청호의 TN, TP의 농도는 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는 농도구배 현상을 보였으며, 용담댐의 건설 이후에 대청호 내의 영양염류의 유입량 감소로 인하여 TN, TP의 농도가 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 용담댐 건설 이후에 대청호 수체 내의 TP 농도는 용담댐 건설 이전에 비해 LZ에서 낮게 나타나는 것을 확인하였다. 1차 생산력을 나타내는 CHL의 농도는 영양염류의 유역별 농도 구배와 마찬가지로 상류에서 하류로 갈수록 농도가 낮아지는 것으로 나타났으나, TN, TP의 농도변화 양상과는 다르게 전체적으로 증가하였다. 즉, 이는 용담댐 건설 후 대청호에 유입되는 영양염류의 양은 분명히 감소하였으나 상대적으로 체류시간이 증가하였고, 조류번성에 필요한 단위 인(P)에 대

한 조류생산성, 즉 CHL:TP 반응성이 확연히 높아졌기 때문에 이런 결과가 나타난 것으로 사료된다.

부영양도 평가의 지표중의 하나인 SD는 TN, TP, CHL과는 반대로 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 것으로 나타났다. 호수 내의 이런 SD의 지점별 구배 현상은 주로 무기성 부유물(Non-volatile suspended solids, NVSS)에 의한 영향보다는 유기성 부유물(Volatile suspended solid, VSS)에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 이런 결과는 조류의 1차 제한영양염류인 TP의 농도가 높아질수록 CHL의 농도가 증가하는 정상관계(Positive relations)를 보였으며, 이런 조류농도의 증가에 따라 투명도가 감소한다는 사실은 유기성 부유물에 의해 투명도의 구배현상이 생겨났음을 증명하는 것이다. 대청호에서 가장 뚜렷한 현상은 유량의 감소에 의해 낮아진 TP의 농도와 높아진 CHL의 농도에 의해 CHL:TP ratio는 뚜렷한 증가를 보여 수체의 생태계 기능변화가 현저하게 나타났다. 변화의 폭은 대청댐에서 상류역에 위치한 RZ에서 가장 두드러지게 나타났으며, 이는 호수의 기능적인 측면에서 RZ가 댐 건설 이전의 LZ 및 TZ는 생태적 기능이 변화하였음을 보여준다.

수질 변수 간의 상관분석 결과에 따르면, 대청호 수체 내 인의 농도는 용담댐 건설 이후 감소현상을 보였지만, 반면 CHL의 높은 반응성은 용담댐 건설 이후 CHL과 TP의 경험적 모델의 상관지수에도 영향을 준 것으로 나타났다. TN:TP ratio는 용담댐 건설 이후 TP와의 역상관계가 높아진 것으로 나타났다. 즉, 질소와 인과의 비는 댐 건설 이전에 비해 댐 건설 이후에 인 농도에 의해 좀 더 조절되는 것으로 나타나 인의 농도 효과는 호수 부영양화에 더 크게 작용하는 것으로 나타났다. SD는 TN, TP, CHL과 모두 역 상관관계를 보였으나, 용담댐 건설 이후에 TN에 대한 상관도는 낮아지고, TP와의 상관도는 높아진 것으로 나타났다. 이는 용담댐 건설에 따라 투명도를 저해시키는 요인인 CHL이 TP에 대한 높은 반응성을 보이며 조류생장에 따라 질소보다는 인의 영향을 더 많이 받은 결과로 나타났다.

계절적 변화 분석에 따르면, 호수 내로 유입되는 영양염류의 양은 장마기에 가장 높게 나타나는 것으로 확인되었으며, 지점별로 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는 것으로 나타났다. 용담댐 건설에 따라 전반적으로 대청호로 유입되는 영양염류의 양이 감소되었으며, 장마 후기의 RZ에서 TN의 유입량이 큰 폭으로 줄어든 것으로 나타났다. 이는 상류에서의 유입량 저감 및 수체 내 조류의 감소에 따른 질소 고정율 감소에 의한 현상으로 사료된다. TP는 장마기에 유역별 농도구배의 폭이 가장 큰 것

으로 나타났으나, 용담댐 건설에 따라 농도구배의 폭이 급격하게 감소한 것으로 나타났다. 조류(CHL)의 농도는 용담댐 건설 후 전체적으로 뚜렷한 증가 양상을 보였고, 장마 후기에 RZ에서 가장 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 반면, 장마기에 CHL은 유입량 증가로 인해 1차 생산자인 조류가 하류로 씻겨 내려가는 이동현상에 의해서 농도가 비교적 감소하는 것으로 사료된다.

결론적으로 용담댐의 건설은 대청호의 체류시간 증가와 함께 대청호 수체 내의 영양염류(TN, TP) 유입의 감소를 가져왔으며, 이런 결과는 호수 내의 1차 생산자의 생산력을 감소시키는 것이 아니라 오히려 1차 생산력(CHL)의 증가를 가져와 수체 내의 뚜렷한 기능적 변화를 나타냈다. 이러한 생태계의 기능적 변화는 상류역인 RZ에서 가장 크게 나타났으며, 보다 안정적인 하류부의 LZ에서는 가장 낮은 변이 폭을 보였다. 따라서 용담댐의 건설은 대청호의 CHL 및 TP의 경험적 부영양화모델에서 제시하는 바와 같이 생태계에 기능적 변화에 직접적인 영향을 준 것으로 나타났다.

적 요

본 연구에서는 대청호 상류에 위치한 용담댐의 건설에 따른 대청호의 수문학적 영향 및 이화학적, 생태학적 기능변화에 대한 특성을 규명하고, 영양염류(TN, TP), 엽록소-*a* 및 투명도의 부양양화 변수의 시공간적(계절별, 연별, 상하류 간) 역동성을 분석하였다. 용담댐 건설 이전(BDC; 1995~2000년)과 이후(ADC; 2001~2006년)의 수문학적 자료를 통해 대청호의 유입량과 저수량의 변화를 살펴 본 결과, 대청호의 BDC에는 강수량과 유입량의 높은 상관관계를 볼 수 있었으나, ADC에는 보다 낮은 상관관계를 확인하였다(BDC; $r=0.964$, $p=0.002$, ADC; $r=0.857$, $p=0.029$). 이는 용담댐의 건설이 대청호의 유입량과 저수위 등에 영향을 주고 있다고 사료된다. 용담댐 건설로 인하여 가장 큰 변화는 상류로부터의 유입량 감소에 따른 대청호의 TN 및 TP 농도는 전 지점에서 감소하였으나 호수 내 수체류 시간의 증가로 CHL의 양이 상대적으로 증가하는 경향을 보였다. BDC의 CHL과 TP의 상관관계는 ADC 이후에 증가하는 양상으로 분석되었는데(BDC; $r=0.249$, $p=0.000$, ADC; $r=0.412$, $p=0.000$), 이는 상대적으로 감소한 TP의 양에 대해 높은 반응성을 가지게 된 것으로 사료된다. CHL:TP ratio의 변화는 ADC에 오면서 증가하는 것을 보여 CHL과 TP의 관계가 댐 건설 이후에 변화하였음을 보여주고 있다. 호수 내의 공

간적 변이를 볼 때 우수대(Riverine zone, RZ)에서의 수질 변수 변화폭은 전이대(Transition zone, TZ)나 정수대(Lacustrine zone, LZ)에 비해 높은 것으로 나타났는데, 이는 인공호의 상류부에 위치하며, 빠른 유속, 짧은 체류시간, 많은 영양염류 유입의 특성을 보이는 호수의 우수대(RZ)에서 영양염류, 광조건 및 CHL-TP의 함수관계에 대한 기능적인 변화가 있었음을 시사한다.

사 사

본 논문에 이용된 수질자료는 환경부에서 운영하는 수질측정망(<http://www.me.go.kr>)의 수질측정 자료를 이용하였기에 이에 대한 감사를 표함.

인 용 문 헌

- 김동근, 서운수, 송준상, 이문호, 최재덕, 박건현, 최광수. 1984. 대청호 부영양화에 관한 종합연구. 국립환경연구소. 192p.
- 김명운, 김민호, 조장천, 김상중. 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화. 한국육수학회지 **28**: 1-9.
- 김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭. 2002. 낙동강 부영양화와 수질 환경요인의 통계적 분석. *Algae* **17**(2): 105-115.
- 김환기, 김태근. 1996. 원격탐사에 의한 대청호의 수질 관리방안. 대한환경공학회지 **18**: 1383-1396.
- 박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. 한국육수학회지 **38**: 382-392.
- 여준호. 2004. 댐건설과 관련된 환경·사회적 피해사례. 환경포럼 **8**(19): 1-8.
- 이상현, 신용식, 장남익, 김종민, 김현구, 조영관, 정진. 2006. 섬진강·영산강 수계 주요 호소의 수질 동향과 영양상태 조사. 한국육수학회지 **39**: 296-309.
- 이정준, 이정호, 박종근. 2003. 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관관계. 한국육수학회지 **36**(3): 269-276.
- 이정호, 김용재. 1996. 낙동강 수계 댐 호의 부착규조 및 영양단계 평가. 환경생물 **14**(1): 18-28.
- 최지용, 김흥년. 2003. 환경친화적 댐 관리를 위한 사례연구. 한국환경정책평가연구원.
- 한의정, 김태근, 정동환, 천세여, 김신조, 유순주, 황종연, 김태승, 김명희. 1998. Landsat TM 영상자료를 이용한 대청호의 영양상태 평가. 환경영향평가 **7**: 81-91.
- 해양수산부. 2007. 내수면 잠재력 조사 및 발전방안 연구(3차년도 종합). p. 243-246.
- 허우명, 권상용, 김범철, 김윤희. 2006. 용담호의 육수 생태학적

- 연구. 환경연구논문집 **3**: 47-64.
- Allan, J.D. 1995. Modification of running waters by Human-kind, p. 305-321. *In: Stream ecology: structure and function of running waters*. Chapman and Hall, London.
- An, K.G. 2000. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean Journal of Limnology* **33**: 222-229.
- An, K.G. 2003. Spatial and temporal variabilities of nutrient limitation based on in situ experiments of nutrient enrichment bioassay. *Journal of Environmental Science and Health Part A* **38**: 687-882.
- An, K.G., J.W. Seo and S.S. Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **34**: 327-336.
- Edwards, R.W. and D.T. Crisp. 1982. Ecological implications of river regulation in the United Kingdom. p. 843-865. *In: Gravel-Bed Rivers* (Hey, R.D., J.C. Bathurst and C.R. Thornen, eds.). John Wiley and Sons, Chichester.
- Forsberg, C. and S. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish wastereceiving lakes. *Archiv Für Hydrobiologie* **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.
- Kennedy, R.H., K.W. Thornton and J.H. Carroll. 1981. Suspended sediment gradients in Lake Red Rock. *Amer. Soc. Civil Engr., New York*. p. 1318-1328.
- Kimmel, B.L. and A.W. Groeger. 1984. Factors controlling phytoplankton production in lake and reservoirs. U.S. EPA 440/5/84-001 277-281.
- Krenkel, P.A., G.F. Lee and R.A. Jones. 1979. Effects of the impoundments on downstream water quality and biota, p. 289-306. *In: The Ecology Of Regulated Stream* (Ward, J.V. and J.A. Stanford, eds.). Plenum Press, NY.
- Macan, T.T. 1961. Factors that limit the range of freshwater animals. *Biological Reviews* **36**: 151-198.
- Macan, T.T. 1974. *Freshwater Ecology*. John Wiley, NY.
- Merritt, R.W., D.H. Ross and G.J. Larson. 1982. Influence of stream temperature and seston on the growth and production of over Wintering larval black flies (diptera: Sumuliidae). *Ecology* **63**(5): 1322-1331.
- Moss, B. 1980. *Ecology of fresh waters*, Blackwell Scientific Publications, London.
- 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.
- Rada, R.G. and J.C. Wright. 1979. Factors affecting nitrogen and phosphorus levels in canyon ferry reservoir Montana and its effluent waters. *Northwest Science* **53**: 213-220.
- SPSS. 2004. SPSS 12.0 KO for windows. Apache software foundation.
- Stuckenberg, B.R. 1969. Effective temperature as an ecological factor in Southern Africa. *South African Journal of Zoology* **4**(2): 145-197.
- Sweeney, B.W., R.L. Vannote and P.J. Dodds. 1986. The relative importance of temperature and diet to larval development and adult size of the winter stonefly. *Soyedina Carolinensis* (Plecoptera, Nemouridae). *Freshwater Biology* **16**: 39-48.
- Thornton, K.W., R.H. Kennedy, J.H. Carrol, W.W. Walker, R.C. Gunkel and S. Ashby. 1981. Reservoir seimentation and water quality. *Amer. Soc. Civil Engr., New York*. p. 654-661.
- 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.
- Vannote, R.L. and B.W. Sweeney. 1980. Geographical analysis of thermal equilibria: a conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities. *American Naturalist* **115**(5): 667-693.
- Vollenweider, R.A. 1968. Scientific Fundamental of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as factors in Eutrophication. OECD, Paris, Technical Report DAS /CSI/68.27. 159 p.
- Ward, J.V. 1982. Ecological aspects of stream regulation: responses in downstream lotic reaches. *Water Pollution and Management Reviews*. New Delhi **2**: 1-26.
- Ward, J.V. and J.A. Stanford. 1983. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems, p. 29-42. *In: Dynamics of Lotic Ecosystems* (Fontaine, T.D. and S.M. Bartell, eds.). Ann Arbor, Michigan, USA: xii+284 p, illustr.

(Manuscript received 1 July 2008,
Revision accepted 8 September 2008)