

담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석

유순주[†] · 채민희 · 황종연 · 이재안 · 박종겸 · 최태봉^{*}

금강물환경연구소

^{*}국립환경연구원 생물다양성연구부

Analysis of Trophic State Variation of Lake Yongdam in Dam Construction

Soon-Ju Yu[†] · Min-Hee Chae · Jong-Yeon Hwang · Jea-an Lee · Jong-gyum Park · Tae-bong Choi^{*}

Geum River Water Quality Research Lab., NIER

^{*}Department of Biodiversity Research, NIER

(Received 7 March 2005, Accepted 6 May 2005)

Abstract

We have performed to analyze the trophic state resulting of Lake Yongdam as a result of water quality and nutrient concentration. Lake Yongdam is artificial multi-purpose Dam resulting from the floods of 2001. The water quality of Lake Yongdam may affect the status of the Geum river basin including the Daechong reservoir. It is necessary to understand the trophic state to assess water quality until stability after flooding. Water quality was surveyed using depth and hydraulic condition analysis. Further density flow was estimated for stratification and trophic state of Lake Yongdam by chlorophyll *a* concentration (2001~2004). And Environmental factors on chlorophyll *a* concentration were analyzed statistically. Trophic state was evaluated as the oligotrophic state at the main stream of the reservoir and eutrophic state at the upper stream in 2001, but evaluated as eutrophic state in 2002 and 2003 by TSI of Aizaki. From the results of multiple regression analysis using stepwise method, chlorophyll *a* concentration was shown to be very significant when nutrient concentration is high upon initial filling of the Dam. Chlorophyll *a* concentration varied according to sample site, season and year. Concentration were high in the upper stream of Lake Yongdam 4, algae bloom in these watershed were affected by location and high nutrient levels in the summer season which have in turn increased phytoplankton bloom into the reservoir.

keywords : Trophic state index (TSI), Stratification, Trophic state, Initial flooding

1. 서론

금강 상류유역에 수자원의 효율적 관리를 위하여 대청호로 유입되는 년 간 유입유량 32.2억톤 중 대청호로 방류되는 전체 유입유량의 49%인 연간 무효 방류량 15.7억톤을 감소시키고 전주권 등 서해안 지역의 균형개발을 위한 안정적인 용수공급을 목적으로 전북 진안군 진안면 월계리에 용담댐이 건설되었다. 용담댐은 높이 70 m, 길이 498 m의 콘크리트 표면차수벽형 석괴식 댐에 의하여 조성된 유역변경식 댐호로, 유역면적이 930 km², 저수면적 36.24 km², 저수용량이 8.15억톤이고 유효저수량은 6.72억톤으로서 저수용량면에서는 소양호, 대청호, 충주호 및 안동호에 이어 우리나라 인공댐호 중 5번째 규모의 대형호수에 속한다(한국수자원공사, 2000a). 용담댐의 건설은 금강 상류에서 대청호로 유입되는 유량이 인위적으로 조절됨으로서 현재까지 대청호가 지니고 있었던 수리적인 특성 즉 오염물질 유입

량, 유입시기 및 유출·입량에 따른 호수의 흐름, 체류시간 등에 변화를 줄 가능성이 있고 이에 따라 대청호의 물질순환 및 영양상태 등에 영향을 미칠 가능성이 있다(금강물환경연구소, 2001b). 따라서 용담댐 건설에 의한 용담호의 담수 초기부터 안정화 되는 시점까지 용담호 지점별 수온 및 탁도의 거동에 따른 밀도류의 형성과 수질 항목간의 상관분석과 조류발생 요인을 분석하여 용담호의 수층별 영양상태 변동을 평가하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 용담호 유역 현황

수리·수문 현황은 한국수자원공사 댐 수문자료를 통하여 용담호에 대한 일 강우량, 유입유량, 방류량 및 수위를 조사하였다.

2.2. 용담호 수질조사

용담호의 수질 조사지점은 용담호 내 4개 지점(Y1, Y2, Y3, Y4)과 용담댐 방류수를 대상으로 실시하였으며 Fig. 1

[†] To whom correspondence should be addressed.
ysj4205@hanmail.net

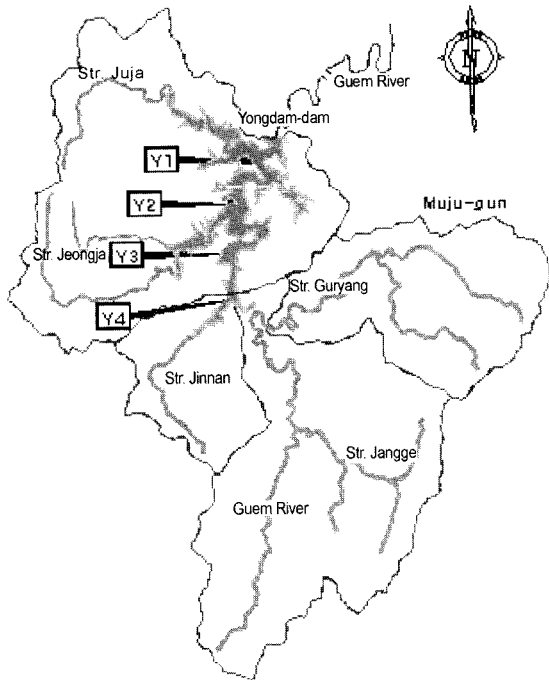


Fig. 1. Sampling site in Lake Yongdam.

과 같다. 조사 기간은 2001년 2월부터 2004년 10월까지 4년이었으며 조사 주기는 월 1회였다. 수심별 수질조사에서 수온과 pH 등 현장측정 항목은 수 표면에서 수직 2 m 간격으로 나누어 측정하였고 (YSI 6600, USA) 영양염류 등의 항목은 표층, 중층, 하층의 3개 층으로 나누어 조사하였다.

수질 조사항목은 수온, pH, DO, 전도도, 탁도, 투명도, BOD, COD, SS, DOC, (D)TN, NH₃-N, NO₃-N, NO₂-N, (D)TP, PO₄-P, Chlorophyll-a 등 19개 항목이고 분석방법은 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다. DOC는 고온산화법(Apollo 9000)을 사용하였다.

2.3. 용담호 밀도류 발생특성

조사기간 동안 용담호 4개 지점에서 수온, 탁도에 대하여 surfer 8(Golden Software Inc.)를 이용하여 각 댐 앞 지점의 밀도류 특성을 조사하여 밀도류 발생시기별 댐의 상·하류 간 밀도류를 분석하였다.

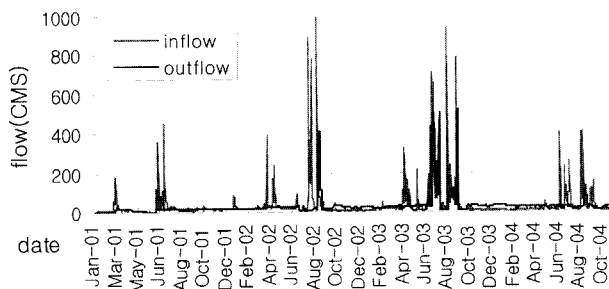


Fig. 2. Influx and efflux in Lake Yongdam.

2.4. 용담호 영양상태 및 조류발생 요인 분석

용담호 영양상태는 표층의 클로로필 a 농도에 따라 Aizaki 부영양지수를 적용하여 비교하였다. 수온, 클로로필 a 농도 등 16개 변수들간 수질항목과 조류 발생량과 단순 상관분석을 실시하였다. 4년간 지점별 클로로필 a 농도와 수온, pH, DO, COD, SS, TN, DTN, NH₃-N, TP, DTP, PO₄-P 외의 Stepwise method을 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용담댐 유역 현황

용담호의 유역면적은 930 km²로 대청호 유역면적의 29% 정도이며, 저수용량은 8.15억톤으로 유효 저수량이 대청호 유효저수량의 85%에 달하고 있어 용수 이용율이 높은 호수이다. 조사기간 동안 용담호의 유입·방류량 및 수위는 Fig. 2와 3과 같이 조사되었다. 용담호는 2001년 6월에 본격적으로 담수를 시작하여 8월 말 태풍 루사의 영향으로 186 mm 집중 강우가 일시적으로 발생하였으며 용담호 유입량이 증가하면서 총 방류 규모도 400 m³/sec로 증가하여 수위가 계획홍수위 75% 수준으로 1년 3개월만인 2002년 8월에 담수가 완료되었다. 용담호의 일 수위변화는 담수초기에는 수위가 서서히 감소하기도 했지만 2003년까지 꾸준히 증가 후 2004년부터 감소하다가 다시 일정 수위를 유지하는 것으로 나타났다.

3.2. 용담호 수질

용담호 상류에 해당되는 Y4지점에서부터 댐 방류수의 COD, TN, TP와 클로로필 a의 농도 변화를 Fig. 4와 같이 2001년부터 2004년까지 비교하였다. COD 농도 변동을 보면 2001년에 Y1과 Y3지점에서 최대인 시기는 8월이었고, 2002년도는 조류발생이 가장 많았던 9월에 전 지점에서 COD 농도가 최대값을 보이고 있었다. 2003년과 2004년 COD 농도는 지점별로 큰 차이를 보이지 않았으며 최대 6.0 mg/L이내의 농도 분포로 2003년에 풍수해로 상류로부터 유입량이 많아 오염물질이 희석되는 영향이 있을 수 있으나, 평년의 강우량을 보이는 2004년에도 유사한 농도분포를 보이고 있어 상류로부터 유기물의 유입이 초기 담수 시보다 낮아지고 안정화되는 것으로 나타났다.

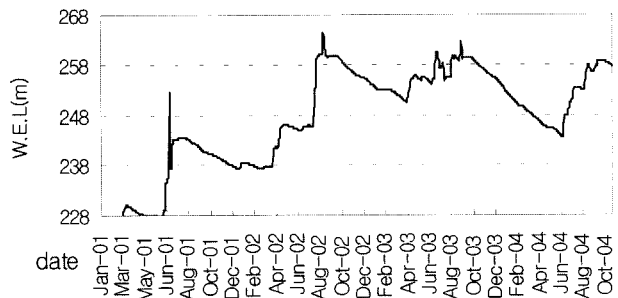


Fig. 3. Water elevation level in Lake Yongdam.

클로로필 a 농도는 전반적으로 COD 농도와 유사한 경향을 보이고 있었다. 2001년 Y1지점에서 3월에 일시적으로 증가하였는데, 이는 온대지역의 호수에서 봄철에 일시적으로 일어나는 Spring Bloom 현상 때문이며 이 시기의 용담호 저수율과 수심이 낮았기 때문에 수체 내에 잔존된 영양원의 영향을 받아 일어난 현상으로 볼 수 있다. 2001년 7월 Y1지점과 Y2지점에서 클로로필 a 농도는 각각 26.2, 71.1 mg/m³에 달했는데 이때 우점 조류는 남조류의 *Microcystis spp.*이었다. 이 시기에 용담호 유역 강우량은 6월 중순부터 7월 중순까지 내린 강우량이 약 643 mm에 달하여 용담호 저수가 이 시기에 내린 강우량에 의하여 확보되어 용담호 유역 내에 산재해 있던 오염물질이 강우와 더불어 유입되어 조류의 발생을 증가시킨 것으로 판단되었다. 용담호와 같이 담수를 시작하는 초기 호수의 경우는 기존 호수와 같이 호수로 유입되는 밀도류가 호수의 중·하층으로 유입되는 것이 아니고 기존에 소량 저수되었던 물의 일부가 호수의 하층에 위치하고 새로이 유입된 물이 상·중층에 위치하게 되며, 유입 유량 증가에 따른 저수량 증가시기에 상·중층의 구분 없이 대부분의 수층이 완전 혼합층이었을 것으로 생각되며 그 이후 유입유량의 감소에 따라 호수의 수체가 안정화되기 시작하였기 때문인 것으로 판단되었다.

2002년에는 Y1 지점은 2001년과 같은 Spring Bloom 현상이 발생하지 않았다. 이는 2001년부터 저수를 시작한 용담호의 저수율이 증가하였고 Y1 지점의 수심이 깊어졌기 때문이었다(Fig. 3). 그러나 2002년 5월 Y4지점에서 클로로필 a 농도가 45.4 mg/m³로 급격히 증가였고, 용담호 전체 수역에서 클로로필 a 농도가 증가하였다. 7월부터 8월까지 두 달 동안 940 mm의 강우가 기록되었고 강우 일수 또한

39일이나 되어 일시적으로 조류가 감소하였다가 9월부터 맑은 날이 지속되어 Y1 지점을 제외한 전체수역의 클로로필 a 농도가 100 mg/m³로 급증하였다. 특히 용담호 상류 수역인 Y4 지점 농도는 310.4 mg/m³까지 증가하였다. 2003년 용담호 전체 수역은 2001년과 같은 Spring Bloom 현상이나 2002년 초여름 용담호 상류인 하천유입부에서 조류 이상증식과 같은 현상이 발생하지 않았다. 이는 2002년 8월 담수가 완료되어 수체가 안정적이었고, 수심이 증가하면서 호수 저층 잔존유기물의 영향이 감소하였기 때문이었다. 2003년 7월 이후 용담호 전 수역에서 클로로필 a 농도가 30 mg/m³ 내외로 유지되면서 2002년 이전과 같이 급격히 증가하지는 않았다.

2003년 4월에서 9월까지 강우가 지속적으로 내려 용담호 유역 내에 산재해 있던 오염물질이 유입되었을 것으로 생각되었으나 TP의 농도가 낮았고, 일조시간이 적어 조류가 대량 발생할 조건이 되지 못하였다. 2004년에도 조류의 발생이 현저히 감소되었다. 이는 상류 유기물 유입 부하가 많지 않았고 유속도 일정하게 유지되면서 국부적인 조류 발생이 감소되었기 때문이다.

Fig. 5의 TN의 변동을 보면 2003년부터 다소 지점간의 농도 차이가 많지 않지만 표층의 농도분포가 최대 3 mg/L 정도로 담수 이후 농도의 감소는 크게 보이지 않고 있다. 수심별로 농도가 감소되지 않고 있어 지속적으로 TN의 유출은 발생하는 것으로 판단된다. TP의 변동을 보면 하천 유입부인 Y4지점에서 2001년 9월 0.348 mg/L로 최대 농도를 나타냈으며 점차 감소하여 2003년과 2004년에는 0.1 mg/L이하의 농도를 보이고 있으며 농도는 Y4 지점이 가장 높고, Y3, Y2, Y1의 순이었다.

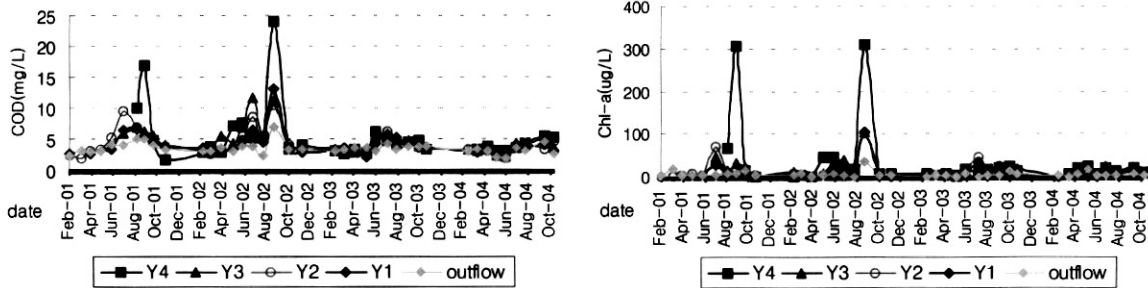


Fig. 4. Monthly variation of COD and Chl-a at each site in Lake Yongdam.

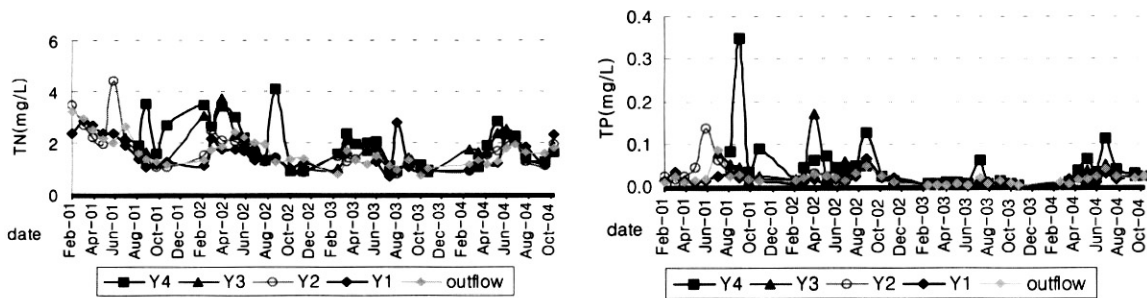


Fig. 5. Monthly variation of TN and TP at each site in Lake Yongdam.

3.3. 용담호 밀도류 분석

저수지내로 유입한 오염물질의 혼합은 크게 유입수의 운동에너지에 의한 혼합, 바람에 의한 혼합, 방류에 따른 국부적 혼합, Langmuir 혼합, convection mixing, 내부파, seiches and upwelling과 Coriolis 효과 등에 의해 발생된다(한국수자원공사, 2000b). 우리나라의 다목적 댐 저수지는 수리적 특성(홍수기 집중 호우와 집중 유입) 및 지형적인 특성상 유입수에 의한 혼합 효과가 지배적으로 발생하고 있다. 저수지내로 들어오는 하천수의 진행 경로는 유입수 밀도와 저수지의 수직적인 성층구조에 따라 결정되는데 상층 밀도류(overflow), 층간밀도류(interflow), 심층밀도류(underflow)의 형태로 구분되며 저수지내의 혼합을 일으키는 주요 에너지를 제공 한다(한국수자원공사, 2000b).

계절적 유입형태는 일반적으로 가을, 겨울과 봄에는 상층류로, 여름은 중층류 또는 심층류의 형태로 유입된다. 특히 여름철 집중 호수시에 유입되는 탁류는 유역의 비점오염원의 주요한 부하경로로 고농도의 유기물과 영양염류를 동반하고 있으며(한국수자원공사, 2000b; 유, 2005) 본 조사에서도 인 화합물과 탁도와 상관성은 비교적 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다. 우리나라 대규모 저수지에서는 홍수기에 정도의 차이는 있으나 탁류가 발생하고 있으며 저수지 내 체류시간은 유역으로부터 유입되는 부유물질의 구성성분과 저수지 흐름 상태 그리고 저수지 운영(수문방류) 등에 의해 지배적이어서 수문상황에 따라 큰 편차를 보이고 있다.

댐 하류에 속하는 용담댐 앞에서 시기별 수온 및 탁도 분포를 살펴보면 Fig. 6과 같다. 2001년에는 담수가 진행되고 있어 수심별 측정이 하반기부터 실시되었기 때문에 2002년부터 분석하였다. 2002년 여름철 집중강우의 영향으로 수온 약층이 하강하고 있으나 강우가 많았던 풍수해인 2003년과 평수해였던 2004년 모두 수층이 안정화 되고 있어 여름철에도 수체의 교란이 보이지 않았다. 탁류의 유입은 2002년에 표층 아래로 유입되어 침전되지 않았으며, 9월에도 저층

으로 가라앉지 않고 소멸되는 것으로 나타났다. 2003년에는 7월경부터 약 5 NTU이상이 전층에 보이고 있으며 이후 9월에 태풍 매미의 영향으로 유입된 탁류가 수심 20 m 부근에서 이동되는 것으로 나타났다. 집중강우가 7월부터 시작되어 수체의 교란시기가 다른 해에 비하여 빨랐으며 유입유량 및 방류량의 증가로 호소전체가 하천형의 형태로 일정 유속 이상을 유지하였다. 유입량은 증가하였으나 2002년에 비하여 강도가 크지 않았기 때문에 탁류는 2002년보다 낮은 40 NTU 정도였으며 보다 바닥 층으로 하강하면서 서서히 소멸되었는데 이는 수온밀도가 높은 층이 보다 아래로 내려갔기 때문으로 생각되었다. 2004년에는 집중강우가 빨라져 7월경에 댐 앞에서 고탁류의 이동이 수심 20~30 m 부근에서 관측되었다. 이와 같이 고탁도의 유입은 대략 4월경에 갈수기시 많은 강우에 의해 유입되어 발생하거나 7월에서 8월경 여름철 집중강우에 의해 발생되고 있었다(Fig. 7).

이와 같이 용담호는 비교적 수온 성층이 안정하게 유지되어 탁류의 진입이 중하층까지 가라앉지 않고 중·상층으로 이동되어 방류되는 것으로 나타났으며, 고탁도의 유기물이 하층으로 침전되지 않기 때문에 수리·수문조건이 크게 다르지 않는 한, 상류로부터 발생한 조류가 하류로 내려오면서 중·저층으로부터의 영양원 공급이 차단되어 댐 앞 지점 하류에서 조류는 크게 발생하지 않을 것으로 판단된다. 따라서 용담호는 금강수계의 대청호 밀도류 현상(유, 2005)과 다르게 나타나므로 해서 유기물의 분포와 분해에 따른 조류발생 양상도 다르게 나타날 것으로 사료된다.

3.4. 호소의 영양상태 평가

호수의 영양수준을 평가하는 지표는 1919년 스웨덴의 Naumann(Horn et al., 1993)에 의해 소개된 후 오늘날에는 호수의 영양상태를 평가하는 방법이 다양해져 영양염류뿐만 아니라 부영양화와 밀접한 관계를 가진 수질항목을 기준으로 영양단계를 평가하는 방법과 영양상태 지수(Trophic State Index, TSI)에 의한 평가 방법이 개발(Calson, 1997)

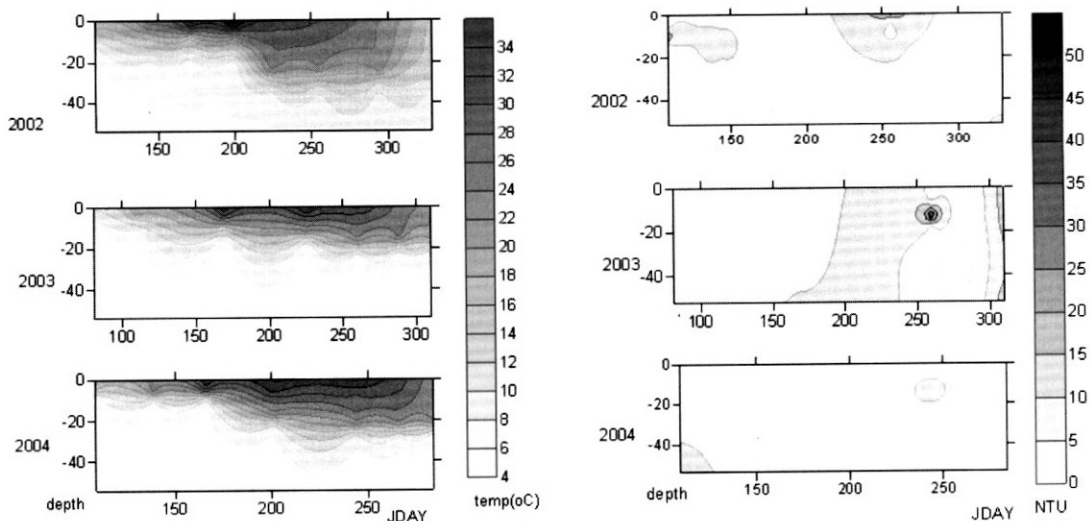


Fig. 6. Yearly variation of water temperature and turbidity in Y1.

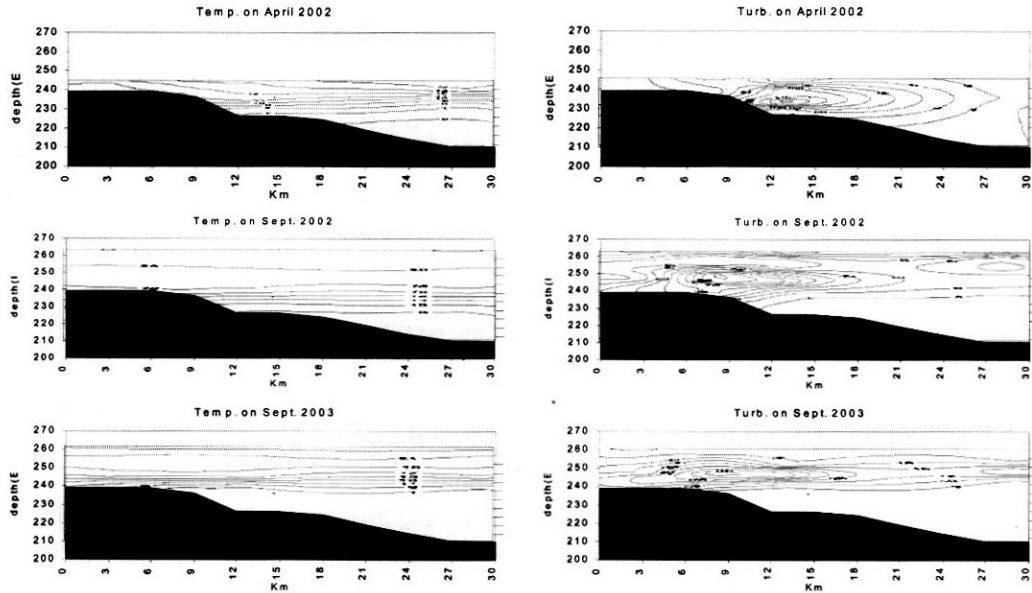


Fig. 7. Water temperature and turbidity distribution in Lake Yongdam.

되었다. 부영양화와 관련된 수질항목에 의한 평가방법은 측정이 간단하고, 수체의 여러 특성을 종합적으로 고려할 수 있다는 장점이 있는 반면, 수질인자 간에 영양상태의 평가 결과가 다르게 나타날 경우 영양상태의 정확한 평가가 어렵다는 단점이 있다. 영양상태지수에 의한 평가방법은 수질항목에 의한 평가방법에 비하여 간단하면서도 수질의 제반 특성을 종합적으로 고려할 수 있으며, 부영양화의 발생 여부 및 진행 정도를 0에서 100 사이의 연속적인 수치로 표시하여 호수의 영양상태를 구체적으로 표현할 수 있는 방법이다. 한편 호수의 영양상태를 평가하는 것은 영양염류 유입량, 호수의 위치와 지형, 조류의 생산성 및 수리학적 체류시간 등 여러 환경인자의 특성이 각각 다르기 때문에 이를 명확하게 구분하기가 곤란하다. 본 연구에서는 영양상

태 분류의 정확도를 높이기 위하여 영양상태 지수 산정에 사용되는 3개의 수질인자 중 부유물질 등 다른 요인에 의하여 저하될 가능성이 많은 투명도를 기준으로 한 Carlson의 영양상태지수보다 분광학적인 특성이 뚜렷하지 않은 총인은 배제하고, 호소의 조류량과 직접적인 관계가 있는 클로로필 a를 대상으로 한 Aizaki의 영양 상태지수(相崎 등, 1981 : 금강수질검사소, 2001a)가 보다 적합하다고 판단되어 클로로필 a 만을 선택하여 영양상태를 평가하였다. Aizaki가 제시한 영양상태지수와 등급과 기준을 보면 클로로필 a 농도가 4.1 mg/m³ 미만인 경우에는 빈영양 상태, 4.11~10.25 mg/m³는 중영양 상태, 그리고 10.25 mg/m³를 초과하면 부영양 상태로 구분된다. 이 기준을 토대로 용담호 영양상태를 평가하면 Table 1과 같다. 용담호에서 클로

Table 1. Monthly trophic state at each sampling site of Lake Yongdam

Site	Month	Feb.	Mar.	April	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Mean
Y1	2001	m	e	o	o	o	e	m	m	e	o	m
	2002	m	m	o	o	e	e	e	e	m	o	e
	2003	o	o	o	o	m	e	e	e	e	e	e
	2004	o	o	m	o	o	m	o	e	o	-	m
Y2	2001	o	o	m	m	m	e	m	e	e	o	e
	2002	m	o	o	o	m	o	m	e	m	o	e
	2003	o	o	o	o	e	e	e	e	e	m	e
	2004	o	o	m	o	o	m	m	e	m	-	m
Y3	2001	-	-	-	-	-	e	e	e	e	m	e
	2002	m	o	o	m	e	e	e	e	m	o	e
	2003	o	m	m	o	e	e	e	e	e	m	e
	2004	o	o	m	o	o	e	e	e	m	-	m
Y4	2001	-	-	-	-	-	-	e	e	e	o	e
	2002	o	m	o	c	c	e	e	e	m	m	e
	2003	m	o	m	o	e	e	e	e	e	o	e
	2004	-	m	e	e	m	e	e	e	e	-	e

로필 a는 2001년 9월의 경우 호수의 유입부에서 300 mg/m³ 이상으로 부영양상태를 보였으며 호소 내 하류로 가면서 농도는 감소하고 있었다. 2001년의 연구결과에서 위성영상으로 표현한 용담호의 영양상태도를 보면 2001년 9월에는 호수 본류 구간 중 댐 앞과 전주권 상수원수 취수탑 방향의 일부 수역은 빈영양~중영양상태로 분포되어 있지만 호수 유입부로 향할수록 대부분 부영양상태를 보이고 있었다. 이들 만입부 수역은 용담호가 조성되기 전에는 주로 농경지로 이용되던 지역으로서 그간 농경지 토양에 축적되었던 영양염류와 잔존유기물이 담수가 시작되면서 용출되었고 또한 물의 정체시간이 길고 순환율이 낮아 호수 본류구간에 비하여 조류의 증식 속도가 빠르기 때문에 조류의 성장을 촉진시킨 것으로 사료된다. 2002년에는 Y2지점에서 중·빈영양 상태였고, Y1, 3과 4지점에서는 2001년보다 중·부영양 상태가 증가하였다. 2003년에는 Y1, 2, 3, 4지점 모두 2002년에 비해 부영양기간이 늘어났다. 년 평균 클로로필 a 농도는 매년 감소한 것으로 조사되었지만 부영양 상태 기간은 용담호 주요지점에서 매년 증가한 것으로 나타났다. 용담호는 2001년 담수화 이후 점차 대청호와 유사한 양상을 보이고 있어 상당히 호소의 안정화가 이루어진 것으로 보이고 있으나 용담호 만입부 유역(Y4)에서는 여름철 조류 농도가 높아 부영양화 상태를 보이고 있어 용담호 수질보호를 위해서는 만입부 유역에 대한 수질관리가 중요하다고 하겠다.

3.5. 조류발생 요인분석

호소 수심 0.5 m 깊이의 호소 환경조건 과 영양상태에 따른 조류 발생량 관계를 규명하고자, 클로로필 a 등 수질 변수들 간의 단순상관분석을 실시한 결과 Table 2와 같다.

용담호 클로로필 a는 BOD와 COD와의 상관성에서 전 지점 모두 높게 나타나고 있다. 이것은 단순히 조류가 COD 측정치를 증가시키는 요인뿐만 아니라 BOD와의 높은 상관관계로 볼 때 잔류하고 있는 인위적 오염물질 중 생물학적 분해 가능한 유기물이 조류의 성장에 유리하게 작용하였거나 조류가 다량 발생하면서 비교적 생분해 가능한 유기물이 배출되었기 때문으로 추정되나 이에 대한 이해는 좀 더 연구되어야 할 과제이다. 하지만 담수화 이후 잔존하고 있는 미분해 유기물이 조류 성장에 유리한 환경을 제공할 것으로 추측되었다.

조사기간 동안 농도가 높았던 TN은 Y4지점을 제외하고 클로로필 a 농도와는 약한 부의 상관관계를 보였으며 유의성은 없는 것으로 조사되었고, Y4 지점에서 높은 유의성을 갖으며 정의 상관성이 있는 것으로 나타나고 있었다. Y4 지점은 총인, 용존성 총인과 인산염인과는 모두 통계적으로 유의한 수준의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 일반적으로 조류의 성장에 따라 총인 중 용존성 인의 비율은 감소하고, 총인이 일정하더라도 용존 인을 흡수하여 용존 인 또는 용존 무기인, 용존 무기질소는 감소하여야 하는 현상을 충분히 설명하지 못하고 있다. 다만 Table 3에서와 같이 Y4 지점의 경우 TN/TP 비가 27.59로 비교적 낮게 나타나고 있어 대부분 부영양화가 진행된 호소와 다르게 초기 담수 특성에 따른 영향으로 추측된다. 반면, Y1을 제외한 지점에서는 대부분 인 화합물과의 상관관계가 낮은 것으로 나타나고 있다.

용담호에서 총 질소 및 인의 용존성 질소와 인의 비율은 Fig. 8과 같이 월별 변화가 크게 나타나고 있으나 질소의 경우(a) Y4 지점에서 그 변화가 매우 심하고 매년 집중강우 후 9월에 그 비율이 낮아지고 있다. 이는 상류하천으로

Table 2. Regression coefficients between Chl-a and analytical parameter

Site	Temp.	pH	DO	EC	ORP	TRB	BOD	COD	DOC	SS	TN	DTN	NH3	TP	DTP	PO ₄
Y1	0.22	0.49**	0.42**	0.04	0.08	0.74**	0.91**	0.90**	0.62**	0.07	-0.09	-0.37*	-0.16	0.85**	0.09	0.18
Y2	0.35	0.49**	0.19	0.15	-0.26	0.30	0.91**	0.76**	0.51**	0.13	-0.09	-0.23	-0.01	0.32	0.08	-0.10
Y3	0.44*	0.69**	0.44*	0.27	-0.40	0.00	0.86**	0.80**	0.56**	0.31	-0.17	-0.32	-0.08	0.15	0.12	-0.23
Y4	0.32	0.47*	0.49*	0.25	-0.44	0.69**	0.91**	0.95**	0.51*	0.56**	0.56**	-0.29	0.41	0.81**	0.65**	0.61**

(* : 5% significant level, ** : 1% significant level)

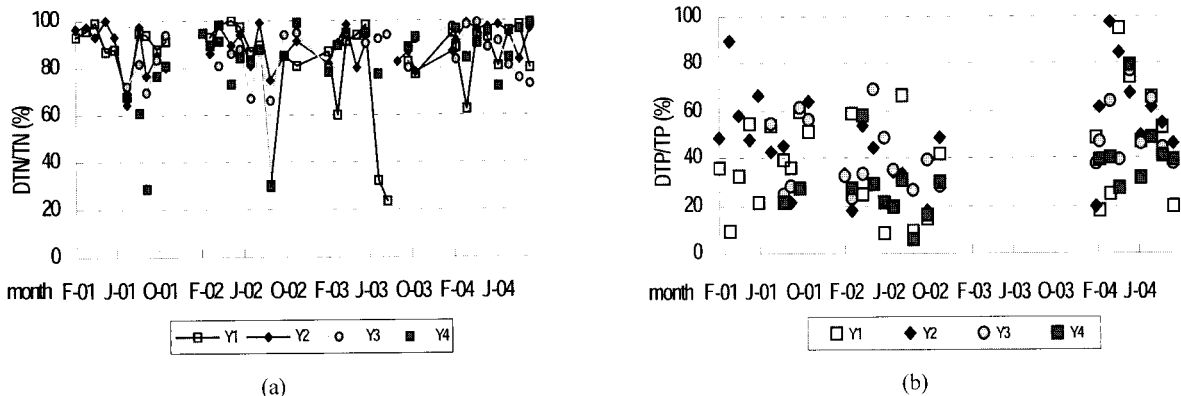


Fig. 8. Monthly variations of DTN/TN (a) and DTP/TP (b) in each site.

Table 3. Variations of each status among nutrients

rate	year	Y1	Y2	Y3	Y4
TN/TP Ratio	2001	117.72	89.17	52.04	27.59
	2002	117.90	84.62	58.49	46.64
	2004	120.21	121.90	115.93	55.22
TOP/TP(%)	2001	95.25	88.97	97.58	97.14
	2002	96.45	95.52	95.62	96.41
	2004	94.46	89.05	87.49	92.39
DOP/OP(%)	2001	39.97	46.71	43.78	24.34
	2002	32.64	32.47	34.62	25.94
	2004	51.08	60.34	46.73	39.03
PO4-P/DTP(%)	2001	18.30	16.86	4.33	2.10
	2002	15.76	9.03	9.92	17.50
	2004	15.23	16.47	26.60	16.98

Table 4. Multiple regression equation for chl-a in Lake Yongdam

Site	Estimated Chl-a(mg/m ³) multiple regression equation	R ²	Sig.
Y1	= -20.819+6.604(COD)-127.337(NH ₃ -N)+499.648(TP)	0.931	.000
Y2	= -20.132+8.889(COD)-130.164(NH ₃ -N)	0.660	.000
Y3	= -14.173+7.895(COD)-176.069(NH ₃ -N)	0.726	.000
Y4	= -46.452+12.989(COD)+429.393(TP)-0.836(Temp.)	0.984	.000

부터 입자성 유기질소 영향이 크게 작용하는 것으로 생각되며 2004년부터는 그 변화가 감소하면서 전 지점에서 약 60% 이상이 용존성 질소가 차지하고 있으며 계절적인 구분은 뚜렷하게 나타나지 않아 강우의 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있다. 인의 경우 2003년에는 용존성 인의 분석이 이루어지지 않아 2003년을 제외한 결과(Fig. 8(b))를 보면 질소와 마찬가지로 2002년까지 매우 변화가 심하였으나 2004년에는 용존성 인의 비율이 증가하는 것으로 나타났으며 갈수기인 4월과 5월경에 최대 용존성 인 농도를 보이고 있다.

호소에서 조류의 생물량은 무기인, 무기 질소와 같은 영양염의 농도에 비례하여 나타나며 제한 영양염의 영향이 절대적인(Heck et al., 1988) 것으로 알려져 있으며, 조류성장에 대한 영양염 제한을 나타내는데 간접적인 지표로 활용되고 있다. 일반적으로 DIN/DIP 비를 적용하지만, 부영양화 호수의 영양염 비율을 토대로 잠재적 영양염 평가에서 TN/TP 10~17의 범위에서 인과 질소가 동시에 제한 염이 될 수 있고 이 이하에서는 질소에 의한 식물플랑크톤의 성장이 제한될 수 있다(Smith, 1982). 그러나 Table 3에서 보는 바와 같이 TN/TP 비율이 연도별로 2004>2002>2001로 증가하였으며 지점별로 Y1>Y2>Y3>Y4로 나타나 담수로 갈수록 증가하여 그 범위는 27.59(2001년, Y4)~121.90(2004년, Y3)이었다. 따라서 용담호의 경우 용존 유기질소농도가 풍부하고, 인 제한적 호소라 할 수 있다.

또한 Table 3과 인의 분포 형태의 경우 자연수계에서 대부분 유기인 형태가 대부분이고 이들 유기인 중 28~60%가 용존유기인이고, 생물체가 직접 이용 가능한 용존 무기인은 10% 미만(Wetzel, 1983)이라는 결과와 비교할 때 총 인중 용존 유기인의 비율이 대부분 90%이상이고 상대적으로 무기인의 비율은 10% 미만으로 낮게 나타나고 유사한 것으

로 나타났다. 그러나 앞서 상관관계 분석결과에서 조류의 발생과 인과의 상관성은 지점에 따라 다르고 현재까지 용존성 무기인의 영향이 현재 큰 영향을 주는 것으로 판단되지 않는다.

그러나 총 유기인 가운데 용존성 유기인은 담 하류로 갈수록 증가하고 담수 이후 점차 증가하고 있으며 총 용존성 인중 무기인도 증가하는 추세를 보이고 있어 담수 이후 호소 내 지표면에 축적되었던 총인의 형태가 점차 용존성과 무기화의 진행에 따라 조류의 발생에 환경적 조건이 부합된다면 호소 본류에서 증가되리라 생각된다.

이 같은 상관분석을 토대로 stepwise 변수선택 방법으로 다중회귀분석을 실시하였다(Table 4). 지점별로 살펴보면, Y1 지점의 경우 COD, NH₃, TP 등 3가지 변수가 포함되었고 이 변수들로 매우 높은 유의성이 갖으면서 93%의 클로로필 a의 농도 변이를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. Y2와 Y3 지점의 경우에는 COD와 NH₃의 두 가지 변수가 포함된 회귀식이 각각 66%와 73%의 클로로필 a의 농도 변이를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. Y4 지점은 COD, TP, 수온 등 3가지 변수가 포함되었고 이 변수들로 98%의 클로로필 a의 농도 변이를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 호수의 규모와 유입 유량규모에 따라 조류의 발생 요인들에 대한 설명력이 다르게 나타나고 있으며 용담호의 경우는 현재까지 호소 내 잔존하고 있는 유기물이 조류 발생에 영향을 주고 있으며 특히 갈수년의 경우에는 하천 유입수(특히 초기 강우시)와 만입부(유입부) 지역의 관리가 중요하다고 하겠다(금강물환경연구소, 2003).

4. 결론

담수 초기인 용담호의 오염물질 유입 특성에 따른 호소

영양상태 변동과 수심별 수질을 조사하여 용담호 조류발생 요인을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용담호는 2001년 6월부터 담수가 시작되어 1년 3개월 후인 2002년 8월에 담수가 완료되었으며 '02년과 '03년과 같이 집중 강우가 있었던 풍수년에는 유입유량이 증가되어 호수 수층간의 혼합을 촉진하였으나 4년간 밀도류 분석 결과 수온성층이 비교적 안정하게 유지되는 기간이 길어 상류로부터 탁류의 진입이 중·하층까지 가라앉지 않고 중상층으로 이동되어 용담담 앞까지 영향을 주지 않고 소멸되는 것으로 나타났다.
- 2) Y4 지점과 같은 하천 유입부 지점들은 호수에서 오염도가 높고 조류발생이 심한 지역으로 조류의 발생점이고, 기상 및 수리·수문조건에 따라 조류가 증식하여 호수 전체로 확산되기 때문에 하절기 초기 강우에 의해 유입되는 오염물질의 저감과 함께 조류의 발생·증식지점인 하천 유입부의 집중적 관리가 필요하다.
- 3) Aizaki 영양상태지수를 이용하여 용담호의 영양상태를 분석한 결과, 담수초기인 2001년 9월에는 호수 분류구간 중 댐앞과 전주권 상수원수 취수탑 방향의 일부 수역은 빈영양~중영양상태로 분포되어 있지만 호수의 만입부와 하천유입부로 올라갈수록 대부분 부영양상태를 보였다. 용담담 담수 이후 주요 지점에서 클로로필 a의 농도는 감소한 반면 부영양 상태를 나타내는 기간은 증가한 것으로 나타났다.
- 4) 용담호 조류발생과 수질항목간에 다중회귀분석을 실시한 결과, Y1 지점의 경우 COD, NH₃, TP 변수와, Y2와 Y3 지점에서는 COD와 NH₃변수가, Y4지점의 경우에는 COD, TP, 수온이 클로로필 a의 농도 변화를 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 금강수질검사소, 원격탐사를 이용한 용담호의 영양상태 평가에 관한 연구, pp. 54-67 (2001a).
- 금강수질검사소, 초기담수호의 영양상태가 하류하천 및 호수수질에 미치는 영향(I), pp. 1-3 (2001b).
- 금강물환경연구소, 초기담수호의 영양상태가 하류하천 및 호수수질에 미치는 영향(III), pp. 245-249 (2003).
- 유순주, 댐 호에서 자연유기물과 염소소독부산물 생성특성 및 CE-QUAL-W2에 의한 거동모의, 충북대학교 공과박사학위 논문, pp. 133-156 (2005).
- 최태봉, 이재안, 이재운, 김동호, 이준배, 초기담수호인 용담호의 영양상태변동, 한국물환경학회 춘계학술발표논문집, pp. 15-18 (2004).
- 한국수자원공사, 용담다목적댐 건설사업 수질대책보고서, p.17 (2000a).
- 한국수자원공사, 댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발, p. 12 (2000b).
- 相崎守弘, 大槻晃, 福島武彦, 河合崇欣, 細見正明, 村岡浩爾, Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state, 國立公害研究所研究報告, **23**, pp. 13-31 (1981).
- Calson, R. E., A trophic state index for lakes, *Limnology and Oceanography*, **22**(2), pp. 361-369 (1977).
- Heck, R. E. and Kilham, P., Nutrient Limitation of Phytoplankton in Fresh Water and Marine Environments : A View of Recent Evidence on the Effects Enrichment, *Limnol. Oceanogr.*, **33**, pp. 796-822 (1988).
- Horne, A. J. and Goldman, C. R., *Limnology*, McGraw-Hill, New York, 2nd edition, pp. 464-465 (1993).
- Smith, V. H. The Nitrogen and Phosphorus Dependence of Algal Biomass in Lakes: An Empirical and Theoretical Analysis, *Limnol Oceanogr.*, **27**, pp. 1101-1112 (1982).
- Wetzel, R. G., *Limnology*, 2nd ed, Saunders Coll. Publ., New York, p. 767 (1983).