

농업용수원인 왕궁저수지의 수질특성

Characteristics of the Water Quality of Wanggung Agricultural Reservoir

김형중*, 윤경섭*, 이광식**
Kim, Hyung-Joong, Yoon, Kyung-Sup, Lee, Kwang-Sik

Abstract

Physical, chemical and biological water quality indexes of Wanggung agricultural reservoir in Iksan city Korea, were investigated and analyzed to diagnose and assess the water environment from 2000 to 2002. The mean concentrations of SS, COD and T-P satisfied water quality criteria for agricultural use (water quality class IV), but T-N did not meet the water quality class IV. Chlorophyll-*a* concentration was widely fluctuated and ranged between 0.6 and 89.6 mg/L. The water quality limiting factor of Wanggung Reservoir was identified as phosphorus, and the reservoir was in meso-eutrophic stage. Correlation analysis revealed that COD and T-P had strong correlation with Chlorophyll-*a*, but T-N did not show a good relationship with Chlorophyll-*a*. The seasonal succession of phytoplankton in the reservoir was in the order of Cryptophyta, Bacillariophyta → Cyanophyta → Bacillariophyta. The mean concentrations of T-N and T-P were very high near the inlet of the reservoir due to inflow. It was suggested that non-point source pollutant needed to be treated before entering reservoir. BMPs for livestock waste and other NPS pollutant were suggested and also wetlands were recommended to attenuate the pollutant loads at the inlet of the reservoir.

I. 서론

경제의 고도성장으로 배출되는 오염부하량이 자연의 정화능력을 크게 상회하게 되었고, 이와 같은 현상은 주로 도시지역만의 현상이었다. 그러나 이제는 농촌에서도 생활양식의 변화, 축산농가의 증가, 영농방식의 변화 등으로 유역의 말단부에 위치한 간척담수호는 물론이고 유역상류에 위치한 농업용 저수지까지도 수질오염이 가속화 되어가고 있어 이에 대한 대책이 시급한 실정이다.

자연환경의 보전을 위한 입장에서 보면 인간이 배출하는 오염물질은 일정한 처리과정을 거친 후에 자연으로 배출되도록 하여야 하는 것이 당연하겠지만, 오염배출의 완전차단은 거의 불가능하다. 또한 호소의 특성상 일반적으로 하천이나 오염물질 배출원에 대한 수처리 방식을 직접 호소에 적용하여 효과를 보기는 어렵고, 효과가 인정된 공법도 도입에 막대한 재원이 요구되는 경우가 많다. 그러나 오염물질 배출원에 대한 처리를 달성하였다고 하더라도 호소의 환경용량이

* 농업기반공사 농어촌연구원 (iamwater@karico.co.kr)

키워드 : 농업용수수질개선, 물리적특성, 상관관계, 제한영양염류, 부영양화도

내로 충분한 삭감이 이루어지지 않을 경우 호내의 수질개선에는 실질적인 효과를 보지 못하는 경우가 많다. 따라서 배출원의 차단이 1차적인 수질관리이기는 하지만 이것만으로는 호내의 수질개선효과를 기대하기 힘든 것이 현실이다. 호내의 수질은 다양한 환경인자에 반응하여 나타나는 결과물이기 때문에 유입수의 수질특성, 호내수질특성, 저수지 및 유역의 물리적 특성, 수질항목사이의 상관관계, 기후 등을 종합적으로 검토하여 수질개선 방안을 수립해야 할 것이다.

전지홍 등(2002)은 우리나라의 저수지는 외국의 자연호소에 비해 체류시간이 적다고 지적하였다. 김좌관 등(1992)은 국내 인공호소는 외국의 자연호소에 비해 낮은 수심과 적은 저수용량으로 높은 생산성을 유발할 수리·수문학적 특성을 가지고 있다고 기술하였다. 안광국 등(2002)은 대형호소인 대청호는 몬순기간에 비해 몬순 전후에 T-P와 Chl-a의 상관관계가 높다고 보고하였다. 그리고 김호일(2002), 전지홍 등(2002b)은 농업용 저수지의 수질항목 사이의 상관성을 분석하여 Chl-a와 COD가 상관성이 높다고 보고하였다. 그러나 이들 연구는 호소의 일반적인 수질특성을 기술하였지만 호소의 수질개선 및 관리방안에 대해서는 미흡한 부분이 많다. 따라서 저수지 및 하구담수호의 효과적인 수질개선 또는 수질관리를 위해서는 종합적이고 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구는 2000년부터 2002년까지 수행한 현장조사 결과를 이용하여 전형적인 농업용수원인 왕궁저수지에 대한 수질변화 특성과 수질변동 요인 등을 분석하고, 이 결과를 토대로 효과적인 저수지 수질개선 및 관리 방안을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 왕궁저수지 유역의 개황

왕궁저수지 유역의 면적은 8.86 km²이며, 폭은 약 3.4 km, 길이는 약 3.8 km인 원형모양의 유역이다. 유역의 지형은 남서쪽 및 북동쪽이 높고

중앙부는 평탄하며 농지가 위치하고 있다. 유역 내에는 동용지, 동벌지, 염곡지 등 4개의 소규모 저수지가 위치하고 있다.

왕궁저수지는 홍수면적이 41.30 ha, 만수면적이 49.9 ha이며, 사수위는 해발 1.5 m, 만수위는 해발 11.8 m이다. 물넘이 형식은 원래 여수로 월류식이었으나 92년도에 radial gate와 겸용하도록 보강되었다. 1995년에는 가뭄극복을 위한 농업용수 확보를 위해 저수지 퇴적물 및 바닥 282,000 m³을 준설하였다.

왕궁 저수지 유역에는 학현천, 양곡천, 부용천 등 세 하천이 있다. 학현천은 유역면적이 2.59 km²이고, 길이는 1.56 km로 유역의 동쪽에 위치하고 있다. 학현천의 종류에는 동용지가 있어 강우가 적을 경우 학현천 유량의 대부분은 동용지에 저류되어 왕궁저수지로 유입되는 양이 적다. 그러나 많은 비가 내릴 경우에는 동용지의 여수를 월류하여 왕궁저수지로 유입한다. 부용천은 북동쪽에서 시작하며 유역면적이 2.73 km²이고, 길이가 2.10 km이다. 부용천 유역에는 주로 농가 및 농지가 위치하고 있다. 양곡천은 유역면적이 2.24 km²이고, 길이가 2.39 km로 북쪽에서 시작하여 서쪽으로 흐른다. 하류에서 부용천과 합류하여 왕궁저수지로 유입되고 있으며 하천주위가 대부분 논으로 이루어져 있다.

왕궁저수지 유역내 토지이용 현황은 총 유역면적 중에서 밭이 1.9%인 0.171 km², 논이 22.3%인 1.978 km², 임야가 69.7%인 6.171 km², 택지가 1.1%인 0.098 km², 수역이 4.0%인 0.35 km², 그리고 기타가 1.0%인 0.091 km²로 구성되어 있다. 이와 같이 왕궁저수지 유역은 약 70%가 임야로 되어있으며, 그 다음으로 논이 많이 분포하고 있다.

2. 왕궁저수지의 물리적 특성

호소는 호소로 직간접적으로 유입되는 영양염류의 양과 비례관계에 있는 유역면적(D)과 이를 희석시키는 호소면적(L), 유입지천과 호소수표면으로 직접 유입되는 오염부하량을 나타내는

총면적(A, 유역면적 + 호소면적), 총면적으로부터 유입되는 영양염류를 희석시키는 역할을 하며 호소생산성과 반비례 관계가 있는 호소용량(저수량, B)과 깊은 관계가 있다. 즉 D/L비와 A/B비의 값이 크면 클수록 대상 호소의 상대적 오염부하량은 크다(김 등, 1992). 왕궁저수지는 유역면적/호소면적(D/L)비가 17.35로서 외국의 호소(Biwa 4.71, Inawasiro 6.78, Laguna 4.24)에 비해서 높은 것으로 나타났다. 총면적/호소용량(A/B)비도 4.72로서 위의 외국 호소에 비해 높은 특징을 갖고 있다(Table 1). 이와 같이 왕궁저수지는 호소면적에 비해 비교적 넓은 유역면적을 갖고 있어 유역으로부터 많은 영양염류부하량이 유입되고 더불어 높은 호소생산성이 유발될 유역환경 특성을 갖고 있다(김 등, 1992). 유효수심(수면적/저수량)은 3.9 m로서 얕은 반면, 수면적은 상대적으로 넓은 형태로서 부영양화가 일어나기 쉬운 조건을 갖고 있는 것으로 판단된다. 따라서 부영양화에 의한 수질악화를 방지하기 위해서는 바닥준설이나 제체송상을 통하여 유효수심을 깊게하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

Table 1. Physical characteristics of Wanggung reservoir

Drainage area (D : km ²)	Water surface (L : km ²)	Storage (B : 10 ³ m ³)	D/L	A*/B (km ² /10 ⁶ m ³)	L/B (m)
8.66	0.50	1,941	17.35	4.72	3.9

A : Total Area = D + L

3. 조사 및 분석

수질조사는 Fig. 1과 같이 유입하천 3개 지점과 저수지내 4개 지점을 선정하여 조사하였고, 식물 플랑크톤 시료도 채취하였다. 2000년부터 2001년까지는 4월부터 11월까지 월 1~2회 조사하였고, 2002년에는 4월부터 9월까지 월 1회 조사하였다. 현장에서 수온, pH, 전기전도도, DO를 수심 0.5~1 m 간격으로 측정하였다. COD, SS, T-N, T-P, Chl-a 시료는 각 지점의 수표

면에서 모두 채취하고, St.2, St.4의 두 개 지점에 대해서는 수심별로 시료를 채취하였다. 채취한 샘플은 전처리 한 후 신속히 실험실로 운반하여 수질환경공정시험법에 의거하여 분석하였다.



Fig. 1. Watershed and sampling points of Wanggung reservoir

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 기후특성

본 연구를 시행한 2000년부터 2002년까지의 기상상황을 살펴보기 위하여 왕궁저수지로 부터 약 30 km 떨어진 전주기상대의 기상자료를 이용하였다.

왕궁저수지 유역의 30년 연평균 강우량은 1,287 mm (1971~2000 평균)이다. 2000년의 연강우량은 1,637 mm로 350 mm 많았던 반면 2001년에는 총 1,019 mm가 내려 평균보다 268 mm가 적었다. 2002년에는 수질조사를 실시한 9월말까지 1,005 mm가 내려 평년의 9월까지의 강우량 1,139 mm에 비해 134 mm가 적었다. 2000년에는 6, 7, 8월에 100 mm/일 이상의 집

증강우가 내렸으며, 9월에도 70 mm/일 이상의 강우가 내리는 등 6, 7, 8, 9월에는 꾸준히 비가 내렸다(Fig. 2). 2000년 6월 이전에는 큰 선행강우가 없었기 때문에 6월의 집중강우로 유역의 오염물질이 축적되었다가 큰 강우에 일시에 씻겨내려 왕궁저수지로 유입되는 오염부하가 증가될 수 있는 조건이었다. 그 이후에는 오염물질의 씻김현상을 일으킬 만한 강우는 없었다. 2001년에는 6월 중순까지는 오염물질의 씻김현상을 일으킬 만한 강우가 없었고, 6월에 97 mm/일 이상의 강우가 2차례 내린 것을 제외하고는 큰 비는 없었다. 2001년 7월 이후에는 불규칙적으로 무강우와 30 mm/일 내외의 강우가 반복되었기 때문에 오염물질의 축적 및 씻김현상이 발생되어 왕궁저수지의 유입부하가 증가될 수 있는 조건이 되었다. 2002년에는 4월, 7월, 8월에 각각 98, 40, 35 mm/일의 호우가 내렸고, 씻김현상을 일으킬 만한 선행강우가 없었기 때문에 이

가장 높고, 그 이후에 떨어지는 전형적인 우리나라 기후변화 경향과 같았으며, 연구기간에는 평년값과 비슷한 분포를 보였다.

일조시간은 1월부터 길어지기 시작하여 5월 까지 길어지다가 장마기가 시작되는 6월 이후에 짧아지는 경향을 보이고 있다. 수온이 높고, 강우에 의해 오염물질이 많이 유입하는 7, 8월에 일조시간이 긴 기간이 있으면 광합성이 활발해져 부영양화가 발생하기 쉽다. 2000년에는 장마기에 지속적으로 강우가 내리고, 이에 따라 6, 7, 8월에 평년에 비해 일조시간이 짧은 날이 많았기 때문에 광합성은 활발하지 않았을 것으로 판단된다. 2001년에는 7, 8, 9월에는 평년에 비해 일조시간이 긴 날이 많았고, 일조시간이 긴 맑은 날과 강우가 반복되었기 때문에 광합성이 활발히 일어날 수 있는 조건이었다. 2002년에도 7, 8, 9월에는 평년에 비해 일조시간이 짧았으나 강우와 맑은 날이 반복되어 광합성이 활발히 이루어 질 수 있는 조건이었던 것으로 판단된다.

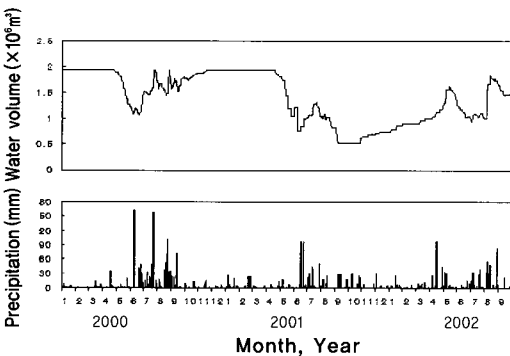


Fig. 2. Precipitation and water storage of Wanggung reservoir

시기에는 높은 부하가 발생할 수 있는 조건이 되었다. 그 이후에는 오염부하의 축적 및 씻김현상이 발생할 수 있는 강우조건이 거의 없었다.

기온과 일조시간은 식물체의 광합성에 대단히 중요한 인자이며, 왕성한 광합성은 부영양화를 일으키는 원인이 되므로 기온과 일조시간은 부영양화 현상에서 주요한 기상요소이다. 왕궁저수지 유역의 기온은 2월부터 상승하여 7, 8월에

2. 유입수의 수질특성

조사대상 하천유역에서 강우시 COD와 T-P의 증가는 SS의 증가와 매우 밀접한 관련이 있었다. 특히, T-P는 용존성인 보다는 입상상 고형물 또는 토사에 흡착된 형태로 유입됨을 알 수 있었다. 이것은 유출되는 물의 운동에너지에 의한 논과 밭의 부유물질과 침식 토사의 이송에 따른 것으로 보인다. 이러한 연구결과에 따르면, 유기물질과 T-P 유출은 토양침식 방지나 보호 프로그램에 의해 통제할 수 있음을 보여주고 있다.

한편, T-N은 SS와의 상관관계가 비교적 적은 것으로 나타나고 있는데, 이것은 T-N의 유출이 NH_4^+ , NO_3^- 와 관련이 있기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 T-N 유출형태는 조사대상 유역에 논과 밭이 혼재하기 때문인 것으로 판단되며, 그 이유로는 NO_3^- 과 같은 이동성 질소성분인 경우 수경 논으로 부터 유출되는 반면에, 흡착된 형태의 질소(고정 NH_4^+) 또는 토양 유기물질에 함유

된 질소는 밭으로부터 토양의 유실에 의해 발생되기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 강우시와 아닌 평상시 T-N이 높은 이유는 수경논으로부터의 농경배수 회귀수와 밭의 토양 간극수에 함유된 이동성 질소가 기저유량과 함께 하천으로 유입되기 때문이다. 이와 같은 연구결과는 강우시 저수지 유입수로부터 부유성(입자상) 물질을 단순히 침전 분리할 경우에 상당량의 COD 및 T-P 부하량을 저감할 수 있음을 암시하고 있으나, T-N 처리를 위해서는 침전이외에도 유역의 최적관리방법을 통한 질소비료의 사용방법 및 양을 관리할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 왕궁저수지의 수질변화 특성

왕궁저수지 수표면의 수온은 봄부터 증가하여 7, 8월경에 가장 높고, 이후에 낮아지는 경향을 보였고, 시료채취 지점에 관계없이 전 수면에서 비슷한 수온분포를 나타냈다. 저수지의 수심별 수온은 여름철에는 수심 약 2 m에서 수온약층이 발달하고, 가을로 접어들면서 수체의 수직혼합에 의하여 전수층이 일정한 수온분포를 보였다.

pH는 7.3~10.8로서 농업용수 수질기준에 비해 조금 높은 편이었고, 평균은 약 8.6이었다. 지점별, 수심별로는 차이가 없이 비슷한 값을 보였다.

용존산소(DO) 농도는 대부분 7~9월 사이에 수표면에서 높은 값을 나타냈는데, 이는 성층현상에 의하여 수체가 표층, 중층, 하층으로 분리

되고 표층부는 공기중의 산소가 재복기되어 DO 농도가 높아졌기 때문으로 판단된다(Fig. 3). 또한 일차생산자인 식물성 플랑크톤의 활발한 광합성 작용도 표층의 용존산소 농도에 영향을 준 것으로 판단된다. 수온약층보다 깊은 수심에서는 용존산소의 급격한 감소로 여름에는 용존산소의 결핍이 나타났다. 봄과 가을에는 수체의 수직혼합으로 전수층이 혼합되면서 심층까지 용존산소가 공급되는 경향을 보였다.

투명도(SD)는 0.3~6.4 m까지로 변화폭이 크게 나타났으며, 평균 1.4 m이고, 최대 투명도는 2001년 5월 4일 저수지의 가장 하류 지점인 St.1에서 나타났다(Fig. 4). 이 시기에는 햇빛이 호소 바닥까지 도달하는 것을 예상할 수 있다. 대부분 봄철 본격적으로 영농이 시작되기 전인 4, 5월에 투명도가 높게 나타났는데, 이는 동물성 플랑크톤의 포식압의 증가에 의한 청정기이기 때문으로 판단된다. 그 이후에는 급격히 투명도가 낮아지는 경향을 보였는데, 이는 영농기의 시작으로 농경지로부터 혼탁된 물이 유입되었기 때문으로 판단된다. 또한 7, 8, 9월에는 남조류에 의한 수화현상이 발생하기 때문에 투명도가 낮아지는 것으로 판단된다.

부유고형물(SS) 농도는 2000년과 2002년에 비해 2001년에 높고 불규칙한 경향을 보였다. 이는 2000년에는 강우가 시기적으로 비교적 크게 내린 반면 2001년에는 30 mm 이상의 강우가 시기적으로 편중되어 내려 오염물의 축적

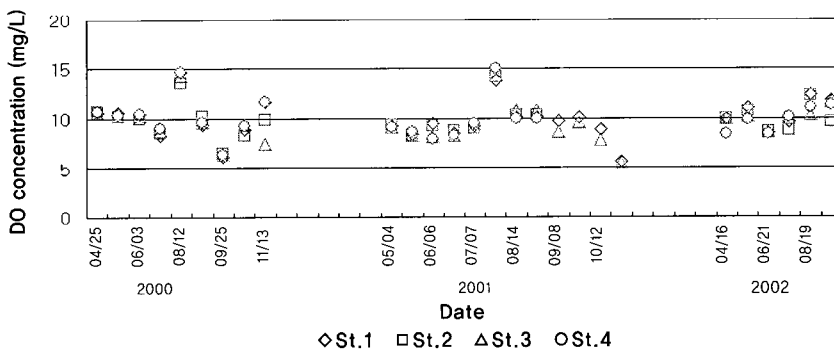


Fig. 3. Change of DO concentration in Wanggung reservoir

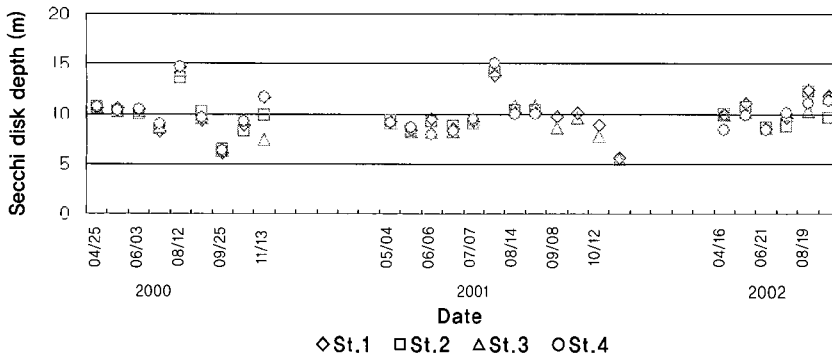


Fig. 4. Change of Secchi disk depth in Wanggung reservoir

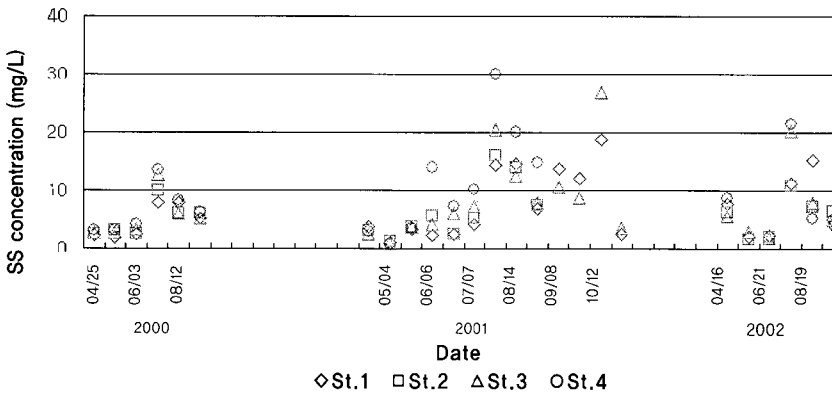


Fig. 5. Change of SS concentration in Wanggung reservoir

과 씻김현상이 반복되었기 때문으로 판단된다 (Fig. 5). 2001년 7월 23일에는 St.4에서 30 mg/L를 나타내는 등 7, 8월에는 수질기준을 초과하는 경우가 많았다. 2001년 7월 23일, 10월 12일, 2002년 7월 23일에 SS 농도가 특히 높았다. 그 이유는 2000년 8월 중순 이후 큰 강우가 없어 유역에 오염물질이 축적되었다가 6월 중순의 큰 강우로 일시에 씻겨 내렸기 때문으로, 이는 다른 수질항목도 높아지게 한 원인이 된 것으로 판단된다. 특히 유역이 주로 농경지인 부용천과 용곡천이 유입하는 St. 4와 그 하류인 St. 3에서 높은 값을 나타냈는데, 이는 강우에 의해 일시에 유역으로부터 SS 성분이 유출된 결과인 것으로 판단된다. 또한 대부분의 시기에서 2개의 하천이 유입하는 St.4에서 SS 농도가 높게 나타났고, 저수지의 물이 줄어들어 St.4에 물이 없어 시료를 채취하지 못한 경우에는 그 하류인 St.3

에서 높은 값을 보였다. 따라서 왕궁저수지의 경우 SS 농도는 유입수의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. SS 농도를 낮추기 위해서는 저수지 유입전에 저류지를 조성하여 강우시 유입되는 SS성분을 가라 앉혀 제거하는 것이 좋을 것이다. 또한 유입부인 St.4부분에 수생식물대를 갖는 자연정화시설을 도입하는 것이 좋을 것으로 생각하며, 이는 저수지 바닥에 퇴적물이 쌓여 영양염류가 재용출되어 저수지가 부영양화되는 2차오염을 방지하는 효과도 있을 것으로 판단된다.

화학적산소요구량(COD)은 3년간의 평균값이 8.0 mg/L로서 농업용수 수질기준인 호소수질기준 IV등급을 만족하고 있다. 그러나 6월 이후에는 대부분 농업용수 수질기준을 초과하고, 특히 7, 8월에 높게 나타났는데, 이는 강우와 영농배수의 영향인 것으로 판단된다(Fig. 6). COD도

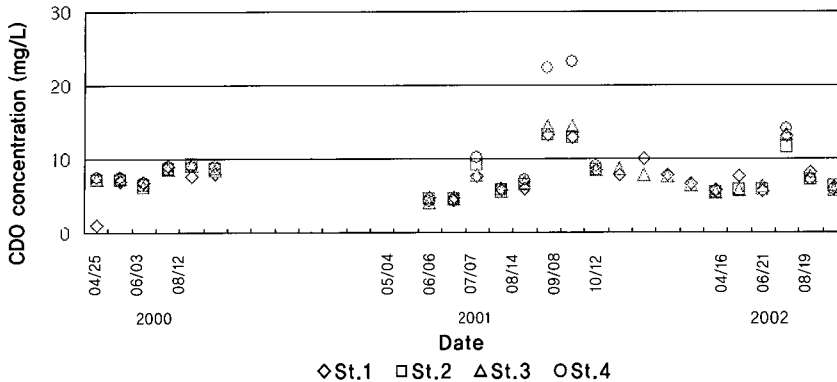


Fig. 6. Change of COD concentration in Wanggung reservoir

SS와 마찬가지로 2000년과 2002년에 비해 2001년에 높은 값을 나타냈다. 강우기에는 부용천과 용곡천이 합류하여 유입하는 St.4에서 높은 값을 나타냈고, 이 시기에는 SS의 농도도 높게 나타난 것으로 보아 COD는 SS의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. COD와 SS의 상관관계를 살펴본 결과 $r^2=0.6$ 으로서 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. 따라서 유기물은 비용존성이 용존성에 비해 많으므로 위에서 기술한 바와 같은 방법으로 SS성분을 저감시키면 COD 농도도 상당히 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

총질소(T-N)의 평균 농도는 1.1 mg/L로서 호소수질기준 IV등급을 약간 초과하고 있으며, 특히 6, 7월에는 수질기준을 초과하는 경우가 많았다(Fig. 7). 6, 7월에 T-N 농도가 증가하는 것은 본격적인 영농의 시작으로 농경지로부터 썩레질 용수 등 비료성분을 많이 함유한 농경배수가 유출되었기 때문으로 판단된다. T-N의 경우도 두 개의 하천이 합류하여 유입하는 St.4에서는 최고 2.2 mg/L를 나타내는 등 대부분 유입부부분인 St.4에서 T-N 농도가 높게 나타났다. 이는 왕궁저수지의 수질이 유입하천의 영향을 많이 받는다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다. 한편 T-N은 SS와의 상관성이 매우 낮은 ($r^2=0.01$) 것으로 보아 질소는 대부분 용존성의 형태로 존재하는 것으로 판단된다. 이 때문에 왕궁저수지의 T-N은 SS성분의 제거만으로는 충분히 경감시킬 수 없을 것으로 판단된다. T-N을

저감시키기 위해서는 축사 및 마을에서 배출되는 오수가 하천으로 유입되지 않도록 미리 차단하는 것이 일차적인 방법이 될 것이다. 농경지로부터 배출되는 비점오염원에 기인하는 T-N을 저감시키기 위한 최적관리 방법의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

형태별로 볼 때 $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 거의 검출되지 않았고, 총질소 중에서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 에 비해 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 비율이 높았다. 이는 유역에서 발생된 유기질소가 유하하면서 산화되고, 또한 샘플이 DO 농도가 비교적 높은 표층수이기 때문에 호기성상태가 유지되어 산화작용이 하층수에 비해 활발하게 일어난 것도 암모니아성에 비해 질산성질소가 높은 원인인 것으로 판단된다. 계절별 형태별 변화경향도 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 총질소의 변화경향과 비슷한 분포를 보였다.

총인(T-P)의 경우 평균 0.05 mg/L로서 호소수질기준 IV등급을 만족하는 등 대부분 농업용수 수질기준을 만족하였다(Fig. 8). T-P의 경시수질변화 경향은 SS의 변화경향과 매우 비슷하였으며, 이는 상관관계 분석에서 두 수질 항목간의 r^2 가 0.6으로 나타난 것으로부터도 알 수 있었다. 따라서 인은 비용존성 형태로 존재하는 것이 많은 것으로 판단된다. 다른 수질항목과 마찬가지로 유역에 농경지와 마을이 많이 분포하는 두 개의 하천이 합류하여 유입하는 St. 4부근에서 상대적으로 T-P 농도가 높게 나타나 유입하천의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다.

인의 경우도 COD와 마찬가지로 SS성분과의 상관성이 높으므로 위에서 기술한 방법으로 SS성분을 저감시킨다면 인도 상당히 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 비점오염원에 기인하는 T-P의 경우는 유입전에 식물대를 조성하여 SS성분을 접촉침전·분해시키는 것이 좋을 것으로 판단된다. 이렇게 함으로써 저수지로 유입되는 SS성분이 감소되고, 이는 저수지바닥에 쌓이는 퇴적물의 감소를 의미하므로 퇴적물의 재용출에 의한 2차 오염도 방지하는 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 축사나 마을에서 배출되는 점원오염원은 하천으로 유입하기 전에 처리해야 할 것으로 판단된다.

엽록소 a(Chl-a) 농도는 0.6~111.8 mg/m³로 변동폭이 컸으며, 2000년보다 2001년과 2002년에는 농도가 크게 높아졌다. 대부분 SS

농도가 높은 시기에 Chl-a 농도도 높아지는 경향을 보이고, 경시 변화경향도 비슷하며, 상관성도 r²가 0.6으로 비교적 높았다. 이는 수면적이 넓고, 수심이 얕아 부영양화가 일어나기 쉬운 구조를 가지고 있어 왕성한 광합성 작용에 의하여 조류가 번성하기 때문에 SS 농도도 같이 높아졌다. Chl-a의 경우도 유입부 부분인 St. 4부근에서 높게 나타났는데, 이는 이 부분에서 T-N, T-P 농도가 높아 활발한 광합성을 할 수 있는 조건이 형성되었기 때문이다. 따라서 왕궁저수지의 부영양화현상을 제어하기 위해서는 저수지 유입부에 저류지나 자연정화시설을 설치하여 SS를 제거함으로써 비용존성 영양염류가 저수지바닥에 퇴적되었다가 재용출되어 2차오염을 일으키는 것을 방지하는 것이 바람직하다. Chl-a의 농도에 영향을 미치는 용존성 무기영양염류는

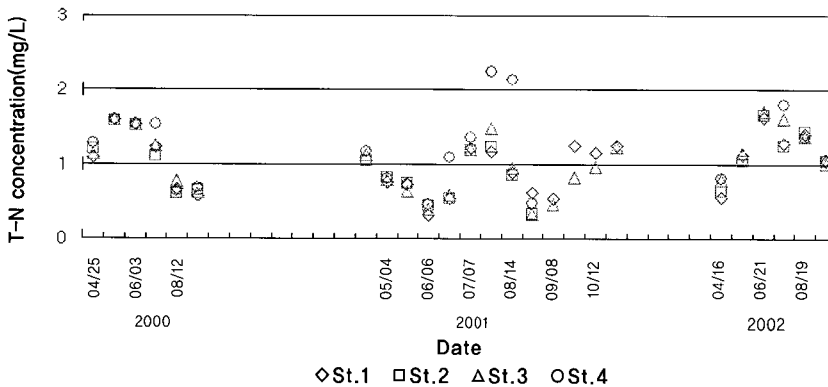


Fig. 7. Change of T-N concentration in Wanggung reservoir

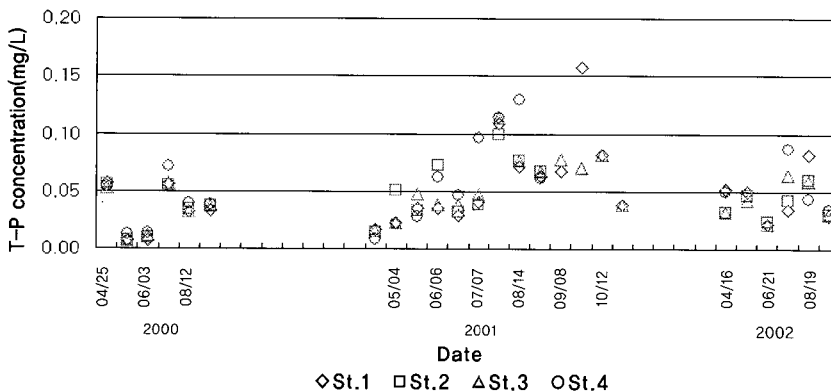


Fig. 8. Change of T-P concentration in Wanggung reservoir

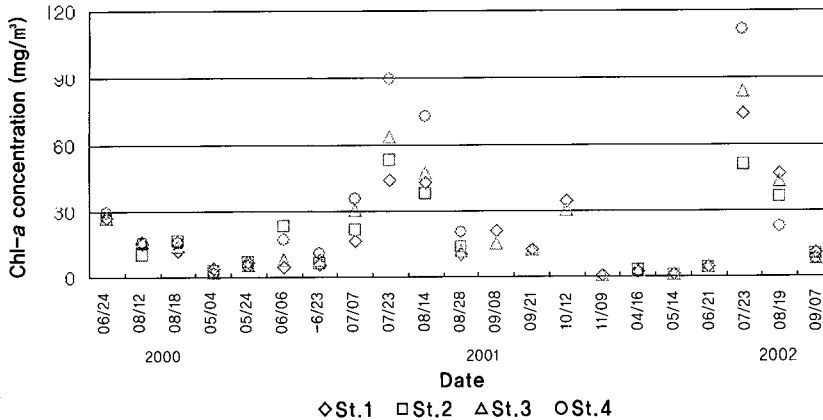


Fig. 9. Change of Chl-a concentration in Wanggung reservoir

저수지 유입부에 인공습지와 같은 자연정화시설을 도입하여 식물 및 미생물의 작용에 의하여 제거하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

왕궁저수지는 여름철에 성층현상에 의해 심층이 혐기성 상태가 되는 경우가 많다. 그러므로 부영양화가 심한 여름철에 한시적으로 폭기장치를 설치하여 심수층에 산소를 공급하여 퇴적물의 재용출에 의한 2차오염을 방지하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 이 경우에는 폭기장치의 설치에 비용이 들고, 운전에 필요한 에너지가 요구되므로 경제성을 충분히 검토해야 할 것이다.

4. 호내 수질항목간의 관계

가. Chl-a와 수질항목 사이의 상관관계

왕궁저수지의 Chl-a 농도와 SS, COD, T-N, T-P사이의 관계를 살펴보기 위하여 2000년~2002년의 4월~9월 사이의 수질자료를 회귀분석 하였다(Table 2). 그 결과, Chl-a와 SS는 결정계수(r^2) 0.7083을 나타내 다른 항목에 비해서 가장 높은 상관성을 보였다(Table 2). Chl-a와 COD, T-P, T-N의 결정계수는 각각 0.5100, 0.2700, 0.0241으로 나타났다. 이와 같이 Chl-a 농도와 SS의 결정계수가 큰 것은 광합성에 의해 조류가 생성되면 SS가 높아지기 때문이다. Chl-a와 COD가 다음으로 큰 결정계수를 나타내었으며, 다음이 Chl-a와

T-P, Chl-a와 T-N의 순이었다. 이는 Chl-a의 구성성분 중 가장 많은 부분을 차지하는 것이 탄소(C)이기 때문에 Chl-a의 성장이 COD의 상승에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 이와 같이 An & Park(2002)가 국내 인공호소에 대해 제시한 Chl-a와 T-P의 결정계수(0.7800)나 Brown C. D(2000), Jones and Bachmann(1976)이 외국의 자연호소에 대해 제시한 Chl-a와 T-P의 결정계수(0.7600, 0.9800)보다 작고, 오히려 Chl-a와 COD의 결정계수가 높은 것은 저수지에서 식물플랑크톤의 광합성에 의해서 유기물이 증가되었기 때문이다. 즉, 식물플랑크톤이 활발히 광합성 작용을 일으키면 Chl-a 농도가 증가되고, 이 광합성 작용에 의하여 이산화탄소와 물로부터 유기물이 생산되므로 COD 농도가 증가되기 때문이다. 이는 윤 등(2003)과 이 등(2003)이 우리나라 농업용 저수지는 대부분 구조적으로 취약하여 활발한 내부생산에 의한 부영양화에 취약한 특성을 갖고 있다고 지적한 것과 일치되는 결과라 할 수 있다. 또한 Chl-a와 T-P의 결정계수가 Chl-a와 T-N의 결정계수보다 큰 것은 뒤에서 논하게될 한계영양물질이 T-P라고 분석된 것과 일치한다.

나. 투명도와 수질항목과의 관계

투명도(SD : Secchi disk depth)는 투명도판

Table 2. Relationships between Chl-a and other water quality indexes in Wanggung reservoir

Index	Regression equation*	Determination coefficient (r ²)
SS	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 1.3094 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] - 0.9138$ (Apr.-Sep.)	0.7083
COD	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 2.6703 \times \text{Log}[\text{COD}(\text{mg}/\text{m}^3)] - 6.3245$ (Apr.-Sep.)	0.5100
T-P	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 1.0411 \times \text{Log}[\text{TP}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 2.2418$ (Apr.-Sep.)	0.2700
T-N	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 0.4764 \times \text{Log}[\text{TN}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 2.6425$ (Apr.-Sep.)	0.0241

* : 95% of confidence level

만 있으면 쉽게 측정할 수 있는 수질항목이므로 저수지의 수질을 관리하는 일선 담당자가 쉽게 이용할 수 있는 수질항목이다. SD는 농업용수 수질기준이나 농업용수 수질측정망 조사항목에는 포함되어 있지 않지만 일선관리자가 간단히 수질상태를 파악할 수 있는 장점이 있다. 여기서는 왕궁저수지에서 SD와 다른 수질항목사이의 상관성을 살펴보고, SD를 이용하여 다른 수질을 추정할 수 있는 가능성에 대하여 분석하였다 (Table 3). 2000년~2002년의 4월~9월 사이의 수질자료의 SD와 SS는 결정계수가 0.8228로서 상관성이 가장 높게 나타났다. 이는 부유고형물이 많을수록 투명도가 낮아지는 것은 당연한 결과라 하겠다. 다음으로 SD와 COD의 결정계수는 0.7308이었다. SD와 Chl-a, T-P, T-N의 결정계수는 각각 0.4999, 0.4331, 0.0218이었다. 이와 같이 SD는 SS 및 COD와 높은 상관성을 보이고 있으므로 현장에서 간단히 SD를 측정함으로써 SS 및 COD를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 부영양화도 평가

왕궁저수지의 부영양화도를 평가하기 위하여,

Vollenweider, OECD, U.S.EPA의 분류기준에 적용하였다(Vollenweider, R. A., 1968 ; Vollenweider, R. A., 1980 ; Bartsch, A. F., 1978). 왕궁저수지의 평균 T-P($\mu\text{g}/\text{L}$), T-N(mg/L), Chl-a($\mu\text{g}/\text{L}$), Secchi-disk depth(m)는 각각 48.4, 1.06, 22.3, 1.4로서 Vollenweider, OECD 분류기준으로는 중-부영양(Meso-eutrophic)단계, U.S.EPA의 분류기준으로는 부영양단계인 것으로 나타났다. 따라서 왕궁저수지는 시급하지는 않지만 부영양화 방지를 위한 대책을 세우는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

6. 제한영양염류 평가

총인에 대한 총질소의 농도 비율(N/P비)이 7 미만일 경우는 총질소를, 16이상일 경우는 총인을 한계영양물질로 볼 수 있는데, 왕궁저수지의 경우는 N/P비가 21로서 총인이 한계인자인 것으로 나타났다. 따라서 왕궁저수지의 부영양화에 의한 수질악화를 방지하기 위해서는 총인을 삭감할 수 있는 대책을 세워야 할 것으로 판단된다.

Table 3. Relationships between SD and other water quality indexes in Wanggung reservoir

Index	Regression equation*	Determination coefficient (r ²)
SS	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.7627 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 5.9308$ (Apr.-Sep.)	0.8228
COD	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -1.7008 \times \text{Log}[\text{COD}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 9.6395$ (Apr.-Sep.)	0.7308
Chl-a	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.3821 \times \text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 4.5795$ (Apr.-Sep.)	0.4999
T-P	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.6949 \times \text{Log}[\text{TP}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 4.2312$ (Apr.-Sep.)	0.4331
T-N	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.2382 \times \text{Log}[\text{TN}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 3.7245$ (Apr.-Sep.)	0.0218

* : 95% of confidence level

7. 플랑크톤의 변화 특성

왕궁저수지에서 식물플랑크톤의 계절적 천이는 녹조류 → 규조류 → 남조류 → 규조류 → 남조류순이었고, 그 시기의 주요 출현종은 각각 *Melosira Scenedesmus* → *Microcystis*, *Anabaena* sp. → *Melosira granulata* → *Microcystis aeruginosa*이었다(Fig. 10). 2000, 2001년에는 주로 *Microcystis aeruginosa*가 남조류 중 우점종이었다. 그러나 2002년에는 6월에 *Anabaena* sp.가 출현하기 시작하여 7월에 한차례 최고로 번성하여 우점한 후 감소하고, 9월에는 *Microcystis aeruginosa*로 종이 천이되어 나타났다.

연도별 식물플랑크톤 생물량은 2000, 2001년에는 8월에 각각 최고 35.2×10^4 Cells/mL, 33.6×10^4 Cells/mL로 나타났으나, 2002년도에는 7월에 최고 5.5×10^4 Cells/mL로 예년에 비해 현저한 감소를 보였다. 이는 2002년에는 식물성 플랑크톤 농도가 가장 높아지는 8월에 예년에 비해 많은 강우가 지속적으로 내렸고, 일조시간도 다른 달에 비해 월등히 적었기 때문으로 판단된다. 특히 일조시간의 경우 2001년 8월이 196.6 h로 가장 길었고, 다음으로 2000년 8월이 161.9 h이었다. 2002년 8월에는 65.9 h로 2002년에 가장 짧았으며 이의 영향으로 2002년 8월에는 플랑크톤의 증식이 저조했던 것으로 판단된다. 2000년과 2001년 남조류의 수화현상은 7월말에 100 mm/day 이상의 큰 비가 오고 난 후 약

15일 정도 지나서 발생하였고 약 한달 정도 지속되었다. 남조류가 우점하는 8월에는 녹조류, 규조류의 생물량도 다른 시기에 비해 높게 나타났으며 남조류 우점이 끝난 후에도 지속적인 출현양상을 보였다.

2002년도의 지점별 식물플랑크톤은 식물플랑크톤의 생물량이 가장 많았던 7월에는 St.4에서 높게 나타났으나, 그 외의 시기에는 St.4에서 높기도 하고 낮기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았다. 이는 Chl-*a* 농도 변화와 유사한 경향인 것을 알 수 있다.

왕궁저수지의 종다양성은 봄철은 4, 5월에는 최대 14종 20속(2002년)으로 나타났으며, 남조류의 번성이 있었던 여름에는 최대 11종 11속(2002년) 정도의 단순한 양상을 보였다. 이러한 낮은 다양성은 남조류의 생물량이 감소하는 시기에도 회복되는 경향은 보이지 않았다.

IV. 결 론

농업용 저수지인 왕궁저수지의 수질변화 특성을 분석하고, 수질개선 방안을 제시하기 위하여 2000년부터 2002년까지 수질조사를 실시하였다.

저수지 수질의 경우 평균 SS, COD, T-P는 농업용수 수질기준을 만족하였으나, T-N는 농업용수 수질기준을 초과하고 있었다. 엽록소 *a* (Chl-*a*) 농도는 0.6 - 111.8mg/m³로 변동폭이 컸다. 왕궁저수지의 제한 영양인자는 T-P인 것으로 나타났으며, 영양상태는 중-

부영양상태 이상인 것으로 나타나 부영양화 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다. 수질항목사이의 관계는 Chl-*a*와 COD가 상관관계가 가장 크고, 다음으로 Chl-*a*와 T-P, Chl-*a*와 T-N의 순으로 나타났다. 식물성 플랑크톤의 계절별 변화는 은편모조류, 규조류 → 남조류 → 규조류로 천이되는

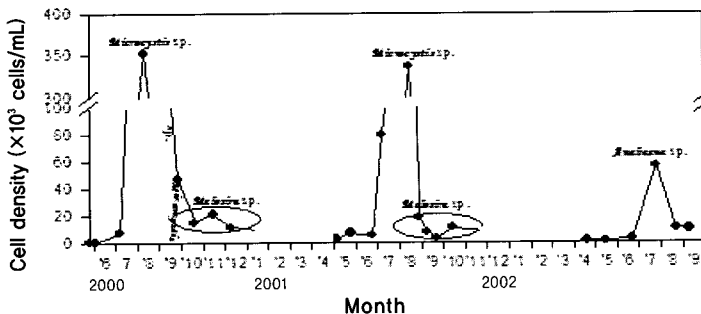


Fig. 10. Change of Phytoplankton in Wanggung reservoir

것으로 나타났다.

왕궁저수지 내 및 유입하천의 COD, T-P의 증가는 SS와 상관성이 높고, 저수지 유입부에서 수질농도가 높은 것으로 보아 왕궁저수지의 수질은 유입수의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 두 개의 하천이 합류하여 유입하는 저수지 유입부에 저류지를 조성하여 단순히 SS를 침전분리 하는 것만으로 상당히 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다. 이에 앞서 생활하수와 축산폐수는 하천에 유입하기 전에 처리하는 것이 바람직하다. T-N의 경우는 용존성인 경우가 많아 인공습지 등과 같이 질소와 인의 흡수율이 높은 수생식물을 이용한 자연정화시설을 도입하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 궁극적으로는 유역의 최적관리를 통하여 비점오염원의 배출량을 줄이는 근본적인 대책을 시행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김좌관, 홍옥희, 1992, 국내 인공담호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구, 한국환경과학회지 1: pp. 49-57.
2. 김호일, 2002, 농업용 저수지의 수질 및 물리적 특성 고찰, 건국대학교 석사학위 논문.
3. 농업기반공사 농어촌연구원, 2002, 저수지와 담수호의 수질개선 방안(Ⅲ).
4. 농업기반공사 농어촌연구원, 2001, 저수지와 담수호의 수질개선 방안(Ⅱ).
5. 농업기반공사 농어촌연구원, 2000, 저수지와 담수호의 수질개선 방안(Ⅰ).
6. 윤경섭, 이광식, 김형중, 김호일, 2003, 농업용 저수지의 유형분류 및 수질관리, 한국농공학회지, 45(4), pp. 66-77.
7. 이광식, 윤경섭, 김형중, 김호일, 2003, 농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안, 한국환경농학회지, 22(2), pp. 166-171.
8. 전지홍, 윤춘경, 함종화, 황순진, 2002a, 농업용 저수지의 물리적인자가 수질에 미치는 영향, 한국육수학회지, 35(1), pp. 28-35.
9. 전지홍, 윤춘경, 김호일, 황순진, 2002b, 농업용 저수지의 수질항목간의 상관관계 조사, 한국농공학회지, 44(3), pp. 136-145.

10. An, K. G. and S. S. Park, 2002, Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study, Ecological modelling. 152(2-3), pp. 191-203.
11. Bartsch, A. F. and Gakstatter, J. H., 1978, Management decisions for lake systems on a survey of trophic status, limiting nutrients, and nutrient loadings in American-Soviet Symposium on use of mathematical models to optimize water quality management, 195. U.S, EPA of Research and Development, Environmental Research Laboratory, Gulf Breeze, FL, pp. 372-394, EPA-600/9-78-024.
12. Brown C. D., M. V. Hoyer, R. W. Bachmann, and D. E. Canfield, 2000, Nutrient-chlorophyll relationships: an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north-temperate lake data, Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 57, pp. 1574-1583
13. Vollenweider, R. A., 1968, Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication, Technical Report DAS/CSI/68.27, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
14. Vollenweider, R. A., and J. Kerekes, 1980, OECD cooperative programme on monitoring of inland water, Synthesis Report.
15. Soballe, D. M. and B. L. Kimmel, 1987, A Large-Scale Comparison of Factors Influencing Phytoplankton Abundance in Rivers, Lakes, and Impoundments, Ecology, 68(6), pp. 1943-1954.