

## 우리나라 농업용 저수지의 영양상태 및 수질특성

이재연 · 이재훈 · 신경훈<sup>1</sup> · 황순진<sup>2</sup> · 안광국\*

(충남대학교 생명과학부, <sup>1</sup>한양대학교 해양환경과학과, <sup>2</sup>건국대학교 환경과학과)

**Trophic State and Water Quality Characteristics of Korean Agricultural Reservoirs. Lee, Jae-Yon, Jae-Hoon Lee, Kyung-Hoon Shin<sup>1</sup>, Soon-Jin Hwang<sup>2</sup> and Kwang-Guk An\* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764; <sup>1</sup>Department of Environmental Marine Science, Hanyang University, Ansan 426-791; <sup>2</sup>Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701)**

For this study, we analyzed spatial and temporal patterns of trophic state and water quality over the period of 2002~2005, using the water chemistry dataset obtained from the Korea Rural community & Agriculture corporation. Most reservoirs, based on TN, showed eutrophic (about 88% of the total). About 26% of agricultural reservoirs, based on TP, showed eutrophic after the criteria of OECD (1982), while 71% and 3% were mesotrophic and oligotrophic, respectively. Seasonal variations were evident due to the intense monsoon rain during July~August; conductivity, COD, SS, nutrients, and chlorophyll-*a* (CHL) increased in the postmonsoon compared to the premonsoon. TP values had positive functional relations with conductivity, COD, and CHL values. COD and SS peaked during the intense monsoon. Mean values of TP and CHL values were two times greater in the intense monsoon than the weak monsoon. The increased TP was probably due to inorganic suspended solids from point and non-point sources during the monsoon. Ratios of TN : TP had strong inverse relations ( $R^2=0.843$ ,  $p<0.001$ ,  $n=34$ ) with TP, but not with TN ( $p>0.05$ ,  $n=34$ ). Log<sub>10</sub>-transformed CHL increased with TP in most P-limited reservoirs ( $\text{Log}_{10}\text{TP}=0.5*\text{Log}_{10}\text{CHL}+0.086$ ). Similarity analysis, based TN, TP, and CHL showed that three groups were separated at 90% similarity level; One group was reservoirs with high salinity nearby the seawater, and the other two groups were reservoirs with a low salinity of the inland, and intermediate salinity, respectively.

**Key words :** Trophic state, agricultural reservoir, empirical model, chlorophyll-*a*, nutrient

### 서 론

최근 농림부에서는 농업용 저수지의 저수량 감소 및 부영양화 현상의 가속화로 인해 농업용수의 안정적인 양적공급 및 질적관리에 대한 관심이 고조되고 있다 (남동, 2003; 농업기반공사 농어촌연구원, 2005). 1990년대

이후 대다수의 농업용 저수지는 인근 농지로부터 유입된 인(P)과 질소(N)는 수체 내 식물성플랑크톤에 의한 1차 생산력의 증가 뿐 아니라 하절기 상시적 남조류의 수화 현상(algal bloom)을 야기시켜(농업기반공사, 2001, 최와김, 2002) 저수지 생태계 교란, 시각적인 불쾌감 증대를 통해 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다(국립환경연구원, 1999). 현재 18,000여 개의 농업용 저수지의 대부분

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

은 준설이 이루어지지 않고 있기 때문에 다량의 퇴적물이 하부에 지속적으로 축적되고 있고, 이러한 퇴적물은 인근에 위치한 농경지 및 축사 등의 점오염원으로부터 유입된 유기물 및 영양염류로부터 기인하는 것으로 보고되고 있으며, 퇴적물의 COD 농도는 4배, TP 농도는 5배 이상 증가하여 화학적 오염이 심각한 것으로 나타났다(이 등, 2003).

환경선진국들에서는 이미 농업용 저수지 수질관리 방안 및 대책에 대한 연구가 상당히 진행되어져 온 반면(Fillery *et al.*, 1986; Datta, 1987, 1995), 우리나라에서는 최근에서야 농업용 저수지의 수질관리 대책 및 친수환경으로의 조성에 대한 방안이 논의되고 있다. 우리나라의 전체 18,000여 개의 저수지 중 지속적으로 수질상태가 모니터링되고 있는 농업용 저수지는 1/6 수준인 3,300여 개만이 존재하고, 그나마 이들 저수지들의 수질 모니터링은 연간 2회에서 4회 정도 밖에 이루어지고 있지 않으며, 모니터링 수질항목도 일반 다목적댐의 인공호에 비하면 극히 적은 수만 이루어지고 있는 실정으로 최근의 농업용 저수지의 수질관리에 대한 높은 관심과는 대조적인 특성을 보이고 있다.

한편 농업용 저수지와 같은 인공호는 자연호에 비하여 시공간적 수질의 역동성이 크고, 수리수문학적으로 더 큰 변이를 보이는 것으로 알려져 있다(최 등, 2001). 특히 우리나라의 하절기 몬순강우는 호소의 수질변이에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며(Faithful and Griffiths, 2000; 안 등, 2001; 안과 신, 2005), 몬순강우로 인한 저수지의 수위 및 유량 뿐 아니라 유기물과 영양염 유입 등 전반적인 물리적, 화학적인 상태변화에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(안 등, 2001). 우리나라에 존재하는 대부분의 농업용 저수지는 10 m 이하의 평균 수심을 가지며, 표면적이 비교적 큰 것을(Hwang *et al.*, 2003) 감안한다면 부영양화 현상이 가속화 될 수 있는 가능성이 높다.

현재까지 농업용 저수지 내에서 수질변이의 특성을 파악하기 위해 다양한 수질 모델을 개발·적용하고 있으며, 이러한 모델을 이용하여 영양염류와 조류 생산력의 관계를 수치적으로 해석하여 저수지의 향후 수질변화를 예측하고 있다. 그러나 이러한 모델은 우리나라의 국지적 하절기 몬순강우의 영향 및 인공저수지의 수리수문학적 특성에 의해 수치예측에 오차를 야기시킬 수 있다. 따라서 국내 저수지의 수리수문학적 특성 및 계절적 강우의 영향을 고려한 경험적 모델(Empirical model)의 개발이 시급하다. 본 연구의 목적은 첫째, 우리나라 저수지의 영양상태(Trophic state) 및 수질특성을 파악하고, 둘째,

계절적 몬순 및 연별 강우분포에 따른 수질특성의 변이 및 경향성을 분석하는 것이며, 셋째, TP-CHL 및 TN-CHL의 경험적 모델의 분석을 통해 부영양화 변수간의 특성을 분석하여 저수지의 수질관리를 위한 기초자료를 제공하는 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 대상 지점선정

본 연구에서는 한국농촌공사로부터 제공받은 우리나라의 농업용 저수지 자료를 토대로 면적이 10,000 m<sup>2</sup> 이상인 수체를 가지는 34개를 농업용 저수지를 대상으로 하였다. 행정구역별로는 경기 3개 저수지(S1: 오남저수지, S2: 길정저수지, S3: 이동저수지), 강원 1개 저수지(S4: 오봉저수지), 충북 1개 저수지(S5: 보청저수지), 충남 3개 저수지(S6: 탑정저수지, S7: 반산저수지, S8: 신송저수지), 전북 8개 저수지(S9: 동화저수지, S10: 옥계저수지, S11: 대산저수지, S12: 구이저수지, S13: 대아저수지, S14: 오성저수지, S15: 입암저수지, S16: 장남저수지), 전남 7개 저수지(S17: 임천저수지, S18: 대지저수지, S19: 내봉저수지, S20: 감동저수지, S21: 수동저수지, S22: 구산저수지, S23: 성양저수지), 경북 4개 저수지(S24: 화매저수지, S25: 순흥저수지, S26: 달창저수지, S27: 성주저수지), 경남 7개 저수지(S28: 칠곡저수지, S29: 옥계저수지, S30: 웅양저수지, S31: 북곡저수지, S32: 삼화저수지, S33: 적량저수지, S34: 하동저수지)이며, 각 대상저수지의 분포상황은 Fig. 1과 같다.

### 2. 대상 수질 항목 및 자료분석

본 연구에서는 2002~2005년까지 한국농촌공사에서 측정된 전기전도도(Conductivity), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorous, TP), 부유물질(Suspended solids, SS), 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL)의 총 6개 수질항목을 이용하였다. 각 수질항목 분석은 수질오염공정시험법에 의하여 분석된 자료로서, COD는 과망간산칼륨법, TN은 흡광광도법, TP는 아스코르빈산 환원법, SS분석은 막여과 시험법, CHL은 흡광광도법을 이용하여 분석되어졌다.

강우자료는 기상청의 2002~2005년까지 각 지역별 해당 강우자료를 활용하였으며, 계절적 자료분석을 위해 정마전기(5~6월), 몬순장마기(7~8월) 및 장마후기(9~10

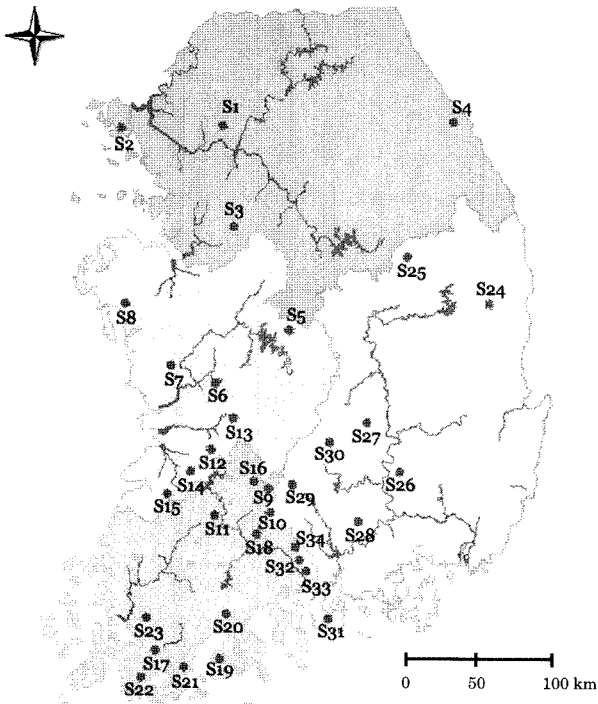


Fig. 1. Locations of agricultural reservoirs used in this study.

월) 대별하여 자료를 처리하였다. 수질데이터는 SPSS (ver. 12.0) 통계패키지를 활용하여 수질항목별 상관관계도의 분석(Correlation analysis)을 실시하였고, PRIMER 5을 활용하여 유사도분석(Similarity analysis)을 실시하였다. 유사도분석은 TN, TP, CHL의 자료를 이용하여 작성하였으며 TN:TP 비를 구하여 각 지점별 제한영양염을 결정한 후 자료를 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 농업용 저수지의 전체 수질경향

2002년부터 2005년까지 측정된 수질자료의 전체적인 분포현황의 분석결과, 영양염(TN, TP) 측면에서 저수지의 영양상태는 부영양에서 빈영양순으로 빈도를 보이고 있었다(Fig. 2). TN은 평균 1.32 mg L<sup>-1</sup>로 Forsberg & Ryding(1980)의 기준에 의거할 때, TN에 따른 영양상태는 부영양 상태로 나타나고 있었으며, 평균 TP는 40 µg L<sup>-1</sup>로서 OECD(1982) 기준에 의거하면 부영양 상태로 나타나고 있었다. TN의 주요 분포 범위는 0.6 mg L<sup>-1</sup> 이상으로 대다수의 저수지에서 부영양 상태를 보이고 있었

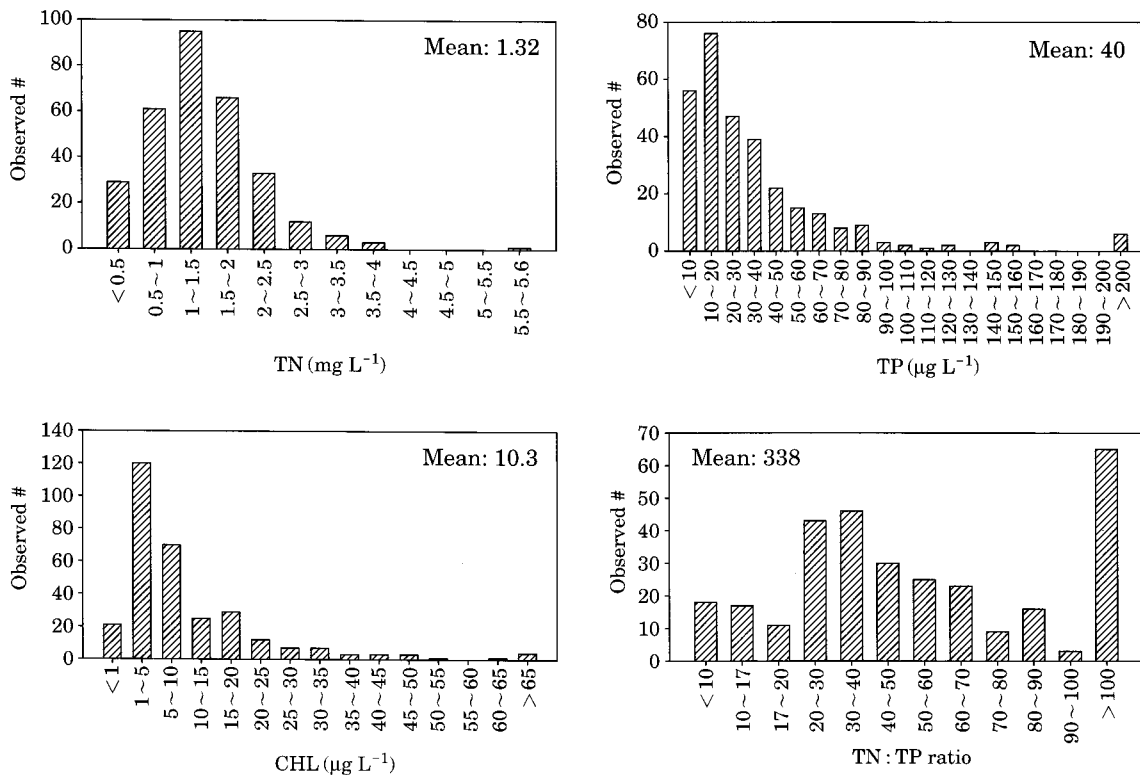
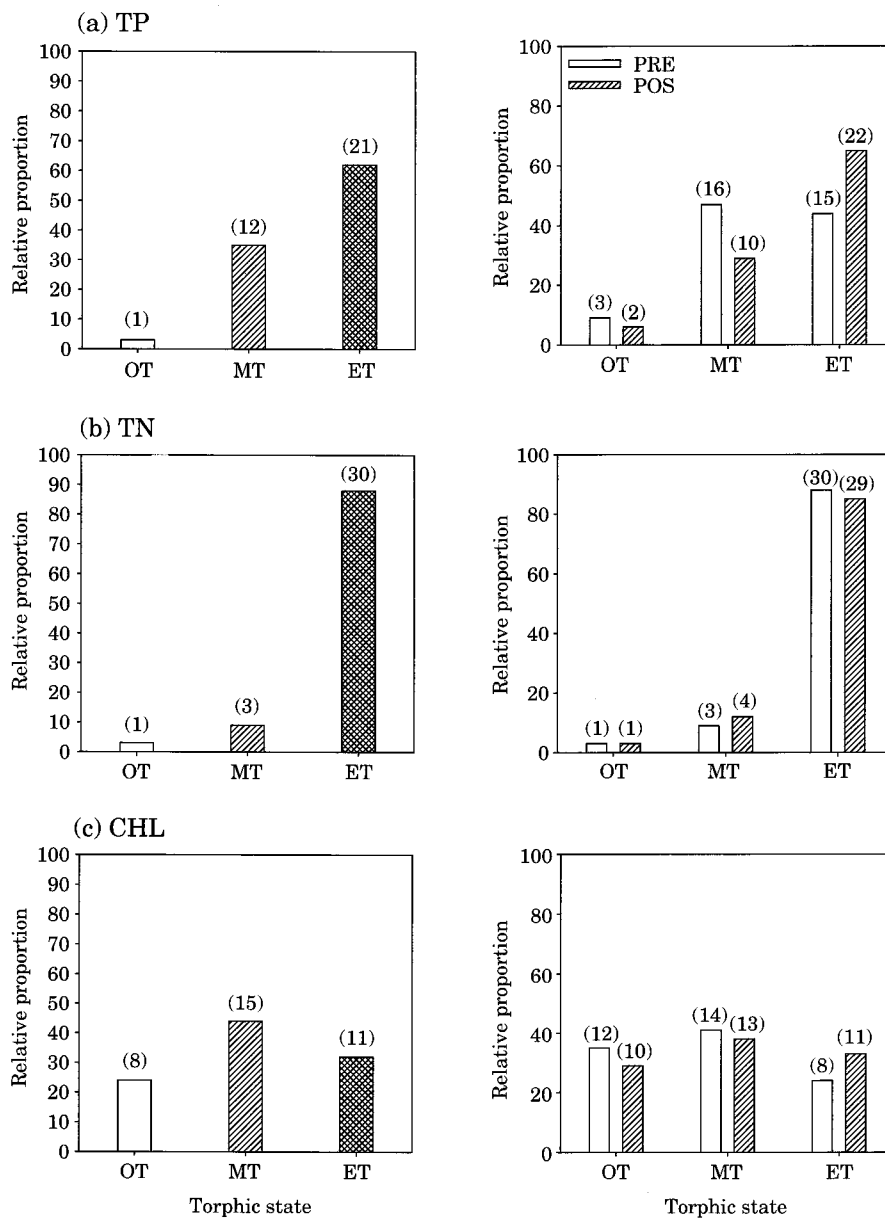


Fig. 2. Distributions of TN, TP, CHL, and TN:TP ratios in the all reservoirs.

으나, TP는 주요 분포범위가 0~60  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 중영양에서 부영양 상태를 보이고 있었다. 식물성플랑크톤의 1차생산력(CHL) 측면에서는 평균 10.33  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로서 OECD (1982) 기준에 따르면 부영양 상태로 나타나고 있었다. 그러나 평균과는 달리 주요 분포 범위는 0~10  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 중영양에서 부영양 상태로 나타나고 있었으며, 1차 생산력에 따른 영양상태는 영양염에 따른 영양상태보다 부영양화 정도가 낮은 것으로 나타났다. 한편 TN:TP 비는 대부분의 데이터에서 10 이상으로 나타나 인에 의

한 제한효과가 기대될 것으로 사료되었다. 또한 TN:TP 비가 100 이상을 나타내는 데이터도 60개 이상으로 나타났으며, 이는 연중 저수지 내 전반적으로 높은 수치의 질소의 양이 유지되는 것에 비하여 인의 양은 계절의 변화에 따라 그 양의 변동이 크게 나타나기 때문으로 판단되었다.

TN, TP, CHL을 기준으로 한 영양상태 분석에 따르면, 전반적으로 부영양화가 심각한 것으로 나타났다. TN의 평균값으로 분석한 각 지점들의 부영양화 단계는 빈영양



**Fig. 3.** Trophic state classifications (OT=oligotrophic, MT=mesotrophic, and ET=eutrophic), based on annual average (left panel) and seasonal average (right panel) of TP (a), TN (b), and CHL (c), respectively.

저수지는 1개, 중영양 저수지는 3개인 반면, 부영양 저수지는 30개로 부영양화가 매우 심각하게 진행되어 있다는 것을 알 수 있었다. TP 평균값에 따른 분류에서는 TN과는 달리 빈영양 저수지 1개, 중영양 저수지 12개, 부영양 저수지가 21개로 나타났다. CHL 평균 농도에 따른 분류에서는 빈영양 저수지 8개, 중영양 저수지 15개, 부영양 저수지 11개로 TN과 TP에 따른 분류보다는 다소 낮은 빈도의 부영양상태를 나타내었다. 이는 식물성플랑크톤 내 축적된 인의 양이 이미 포화상태를 이루어 공급된 인의 양보다 1차생산력으로의 환원율이 낮아진 것으로 사료되었다(Goldman *et al.*, 1987) (Fig. 3).

계절별로 산정한 저수지의 부영양 상태는 연별 평균값으로 산정한 결과와 유사한 양상을 보였으며, 특히 장마 후에 저수지는 부영양화가 가속화 되는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 이는 강우 집중기 동안 유입된 인이 1차 생산력 증가에 기인하는 것으로 판단되었으며, 식물성플랑크톤이 강우 후에 생체량이 증가하는 계절적 특성을 보인다 (Hutchinson, 1957; 김 등, 1999)는 과거 연구결과와 일치하였다. 본 결과에서는 CHL에 의한 부영양상태 분류에서는 부영양 저수지보다 중영양 저수지의 수가 높게 나타나고 있으나, 이들 중영양 저수지의 평균 CHL 농도 값이 부영양 저수지 기준치에 근접하고 있고, 인에 의한 부영양 상태 분류에서 많은 수의 저수지가 부영양 상태로 나타나고 있어, 부영양 상태로 전환될 잠재적인 능력이 매우 큰 것으로 나타났다.

34개 저수지의 장마전기 및 장마후기의 일반 수질항목 값은 전체 6개 항목(전기전도도, COD, TN, TP, SS, CHL) 모두 장마 전에 비하여 장마 후에 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). 전기전도도는 장마 후에 약  $20 \mu\text{s cm}^{-1}$ 의 증가를 보여 장마 전에 비해 큰 변이는 보이지 않았다. COD의 경우 장마 전 수질환경 등급의 3등급 수준에서 장마 후에는 약 4등급 수준에 가까운  $4.6 \text{ mg L}^{-1}$ 로 증가하여 강우에 의한 유기물 유입으로 인한 수질 값의 증가로 판단되었다. 농업용 저수지의 경우 인근에 위치한 농지의 유출수의 영향을 많이 받기 때문에 영농기와 겹치는 장마 후 기간 동안 농지 유출수에 존재하는 다량의 유기물 유입으로 수치가 증가한다고 보고된 바 있다(최 등, 2001). SS의 경우 장마 후에 장마 전 농도 값의 약 2배를 나타내어 COD와 마찬가지로 강우에 의한 유기물 및 부유물 유입효과가 큰 것으로 나타났다. 영양염류(TN, TP)는 장마 후에 장마 전 농도 값의 약 1.5배의 증가를 보였으며, 특히 TP의 경우 장마 전  $30 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 강우 후  $48 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 TN은 강우 후 약  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  증가를 보여 수치상으

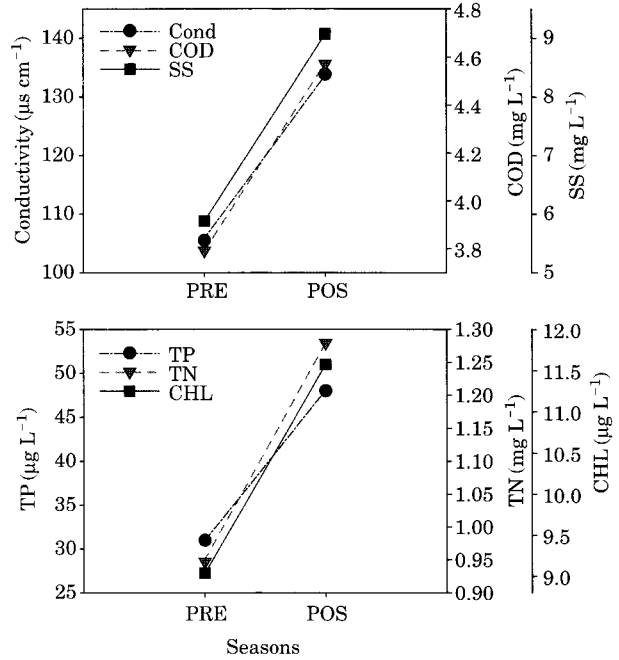


Fig. 4. Seasonal comparisons of water quality parameters during 2002~2005 (PRE=Premonsoon, POS=Postmonsoon).

로는 큰 증가를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 장마 기와는 상관없이 저수지내로 유입되는 질소의 농도가 높기 때문인 것으로 판단되었다. 한편 장마 후에는 인의 증가에 의한 1차 생산력의 증가로 인해 CHL의 농도 값에서도 증가를 보이고 있었다.

## 2. 대상 저수지별 수질경향

전체 저수지에서 측정된 전기전도도의 평균값은  $200 \mu\text{s cm}^{-1}$ 로서 일반적으로 타 저수지와 큰 차이를 보이지 않았으나 일부저수지(S11, S19, S28, S29)에서는 4배 정도까지 월등하게 높은 값을 보였다(Fig. 5a). 전기전도도의 평균치인  $200 \mu\text{s cm}^{-1}$  이상을 보인 저수지에서는 SS의 농도 또한 평균 이상을 나타내고 있었으며, 이들 저수지의 전기전도와 SS 농도의 증가는 비점오염원 뿐 아니라, 인근 점오염원으로 부터의 유기물 및 부유물 유입의 영향이 클 것으로 사료되었다. 그러나 S19의 높은 전기전도도 값은 인근에 위치한 점·비점오염원의 영향 뿐 아니라 저수지가 위치한 지리적인 영향(해수와 담수 경계에 위치)으로 사료되었다.

농업용 저수지별 COD 농도는 9개 저수지를 제외한 나머지 저수지에서 환경부 호소수질환경기준에 의거할 때, 3등급 이상으로 나타났으며, S11, S19는 5등급 이상으로

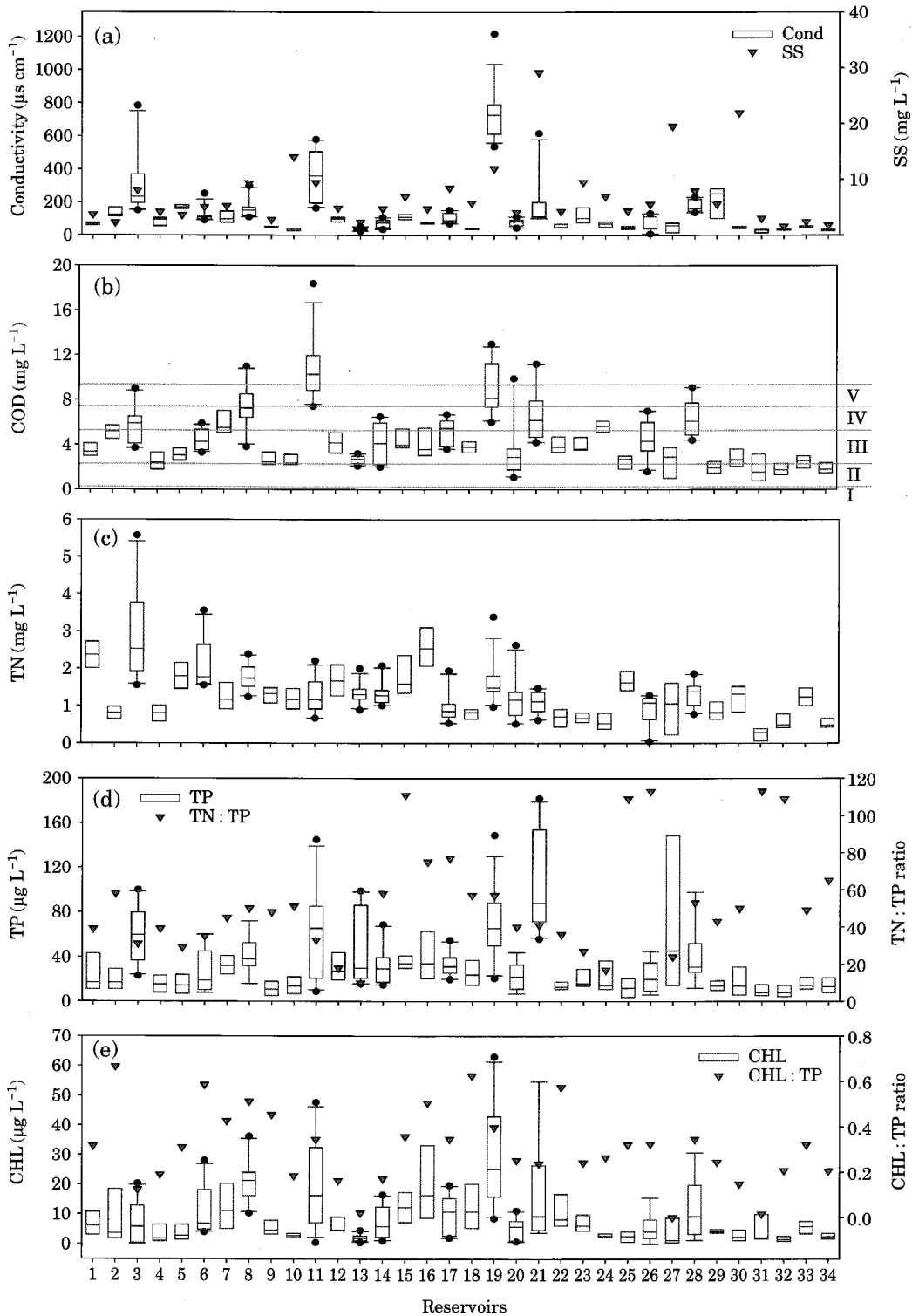


Fig. 5. Spatial variations of water quality in all reservoirs. The numbers in the x-axis indicate the reservoir site (1=S1).

나타났다(Fig. 5b). 전기전도도와 SS 농도가 높았던 저수지에서 높은 COD 농도를 나타냈으며, 이들 저수지는 모

두 4등급 이상으로 나타나 저수지의 오염원 관리가 시급한 것으로 판단되었다. 또한 전체 저수지의 수질등급이 3

등급이상을 나타내고 있어, 전체 저수지에서 전반적인 유기물 유입차단 및 오염원 관리가 필요할 것으로 사료되었다.

TN의 경우 S31을 제외한 전 저수지에서의 평균 농도가 환경부 호소수질환경기준 5등급에 해당하는  $1.5 \text{ mg L}^{-1}$  이상을 보이고 있었으며, 부영양도 기준에 따르면 대다수의 저수지는 부영양호로 나타나고 있었다(Fig. 5c). 이러한 질소의 높은 농도 값은 농업용 저수지의 위치 특성상 인접한 농지로부터의 지속적인 질소의 유입과 침적으로 인한 결과로 판단되었다(전 등, 2002). 특히 질소 농도 증가의 원인으로 작용하는 것은 농지 내에 잔존하던 질소 비료성분이 저수지 유입하천을 통해 지속적으로 유입되거나 장마 시에 집중적으로 유입되어 나타나는 현상으로 판단되었으며, 인근 측사로부터의 축산폐수 역시 저수지 내 질소 농도 증가의 원인으로 작용하는 것으로 판단되었다(최 등, 2001).

저수지별 총인(TP) 농도는 전기전도도, COD와 비슷한 경향을 보이고 있었으며, 전기전도도와 COD가 높은 저수지에서 TP의 농도도 높게 나타났다(Fig. 5d). 특히, 몇몇 저수지(S3, S11, S19, S21, S28)의 TP 농도는 약 5배에서 많게는 10배까지 높은 수치를 나타내고 있어 과영양상태로 사료되었다. TN:TP 비는 S13을 제외하고 모두 17 이상으로 나타나 인에 의한 제한효과가 매우 큰 것으로 나타났다.

조류생체량의 척도로서 분석된 엽록소-a(CHL) 농도 역시 TP의 농도 추이와 높은 t상관성을 보였으며, 특히

S2, S6, S19, S22에서 CHL:TP 비가 높은 수치( $\geq 0.6$ )를 기록해 수화현상이 지속적으로 일어날 것으로 판단되었다(Fig 5e). 따라서 이들 저수지내 수화현상의 제거를 위하여 인의 유입 차단과 함께 수체 내 침적되어 있는 인의 양의 저감 방안이 강구되어야 할 것으로 생각되어진다.

### 3. 강우 강도에 따른 저수지의 수질 변이

본 연구에 이용된 저수지에서 연평균 강우량은  $1,284 \text{ mm}$ 로 나타났으며, 해당 기간 중 최대 평균 강우량을 나타낸 연도는 2003년으로  $1,975 \text{ mm}$ 를 기록하였고, 최소 평균 강우량을 나타낸 2005년으로  $1,336 \text{ mm}$ 를 기록하여, 최대치와 최소치의 차이는  $639 \text{ mm}$ 로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 2003년을 집중 강우해(Intense monsoon)로 적용하였으며, 2005년을 가뭄해(Weak monsoon)로 적용하였다. 계절별 강우량에서는 장마 전(Premonsoon)에는  $241 \text{ mm}$ , 장마 후(Postmonsoon)에는  $169 \text{ mm}$ 로 나타나 장마 전기에 약 1.5배의 강우량을 보여 장마 전에 강우에 의한 이화학적 수질 값의 희석효과가 장마 후 보다 클 것으로 예상되었다.

계절에 따른 수질 변이에서는 전기전도도를 제외한 나머지 항목에서 집중 강우해에 모두 높게 나타났다(Fig. 6). 전기전도도는 집중 강우해의 장마 전, 후, 가뭄해의 장마 전, 후 수치가 거의 일정하게 나타나고 있었다. 이것은 하천과는 달리 정체수역인 저수지에서는 수 체류 시간이

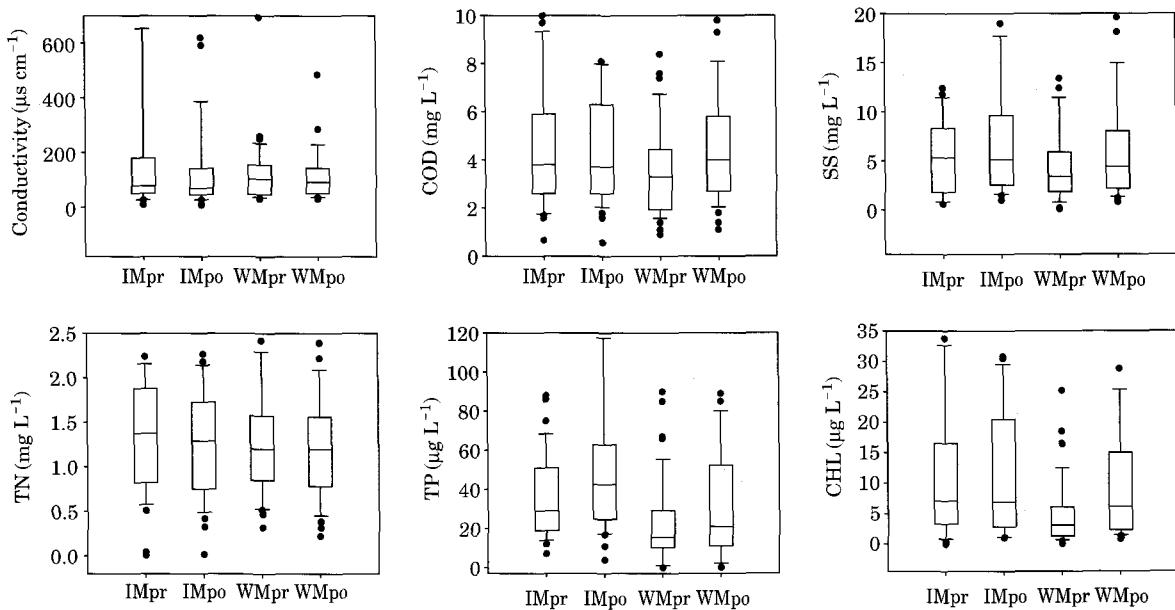


Fig. 6. Comparisons of water quality between intense monsoon (IM) and weak monsoon (WM). pr=Premonsoon, po=Postmonsoon.

길고, 인공호처럼 인위적인 방류가 거의 없기 때문에 연도, 강우 집중에 따른 일시적인 변이는 일어나도, 연도, 계절에 따른 평균적인 전기전도도의 차이는 없는 것으로 판단되었다. 과거 인공호 연구에서도 농업용 저수지와 물리적인 구조가 유사한 댐지점에서 집중 강우해와 가뭄해의 전기전도도의 차이가  $10 \mu\text{s cm}^{-1}$  이내로 나타나 본 결과와 유사한 경향을 보여준 바 있다(이 등, 2002).

화학적 산소요구량(COD) 및 부유물(SS)은 집중 강우해에 높게 나타나고 있었으며, 계절별로는 장마 후에 모두 증가하여, 장마 기간에 유입된 유기물 및 부유물이 저수지내 체류함으로써 증가한 것으로 판단되었다. TN은 전기전도도와 마찬가지로 일정한 농도를 나타내고 있었으며, 큰 변이를 보이지 않았다. TP과 CHL 농도는 집중 강우해에 약 2배 정도 높은 값을 나타냈으며, 이는 강우에 의해 인근 점·비점오염원(인근 농지, 축사, 생활하수)으로부터 다량의 인이 유입되었기 때문인 것으로 판단되었으며, 유입된 인은 저수지내 장시간 체류하면서 1차생산력을 높여 CHL 농도 증가에도 기여한 것으로 사료되었다. 계절에 따른 결과를 살펴보면, 장마 후에 TP과 CHL 농도가 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 이전의 저수지의 계절별 수질 변화 연구(김과 황, 2004)에서도

강우가 집중되는 7월 이후부터 11월, 즉 장마 후에 인과 CHL 농도가 증가하는 것으로 보고한 바 있다.

#### 4. 경험적 모델의 회귀분석

부영양화 변수의 경험적 모델(Empirical model)의 분석에 따르면, N:P 비는 TN과의 상관관계( $p > 0.05$ ,  $n=32$ )가 미약한 것으로 나타났고, TP와는 높은 상관성( $R^2=0.84$ ,  $p < 0.001$ ,  $n=34$ )을 보였다(Fig. 7). TP에 대한 CHL의 회귀분석에 따르면 CHL의 변이는 TP의 변이에 의해 61%( $p < 0.001$ ,  $n=31$ )를 설명하는 것으로 나타났다. 한편 CHL는 TP와 1차 함수관계( $\text{Log}_{10}\text{TP}=0.5 \times \text{Log}_{10}\text{CHL}+0.086$ )를 보이고 있었으며, TP의 증가에 따라 조류 생산력이 증가함을 보였다. 계절별 결과에서도 TN:TP 비와 TP의 상관관계가 가장 높게 나타나고 있었으며(장마전기:  $R^2=0.84$ ,  $p < 0.0001$ , 장마후기:  $R^2=0.84$ ,  $p < 0.0001$ ), CHL과 TP의 상관관계는 장마 전보다 장마 후에 높게 나타나고 있었다(Table 1).

일반적으로 우리나라의 댐인공호와 저수지의 부영양화는 수체 내 질소(N) 제한효과는 미미하며 인의 농도에 따라 부영양화 정도가 결정되는 인 제한효과가 큰 것으

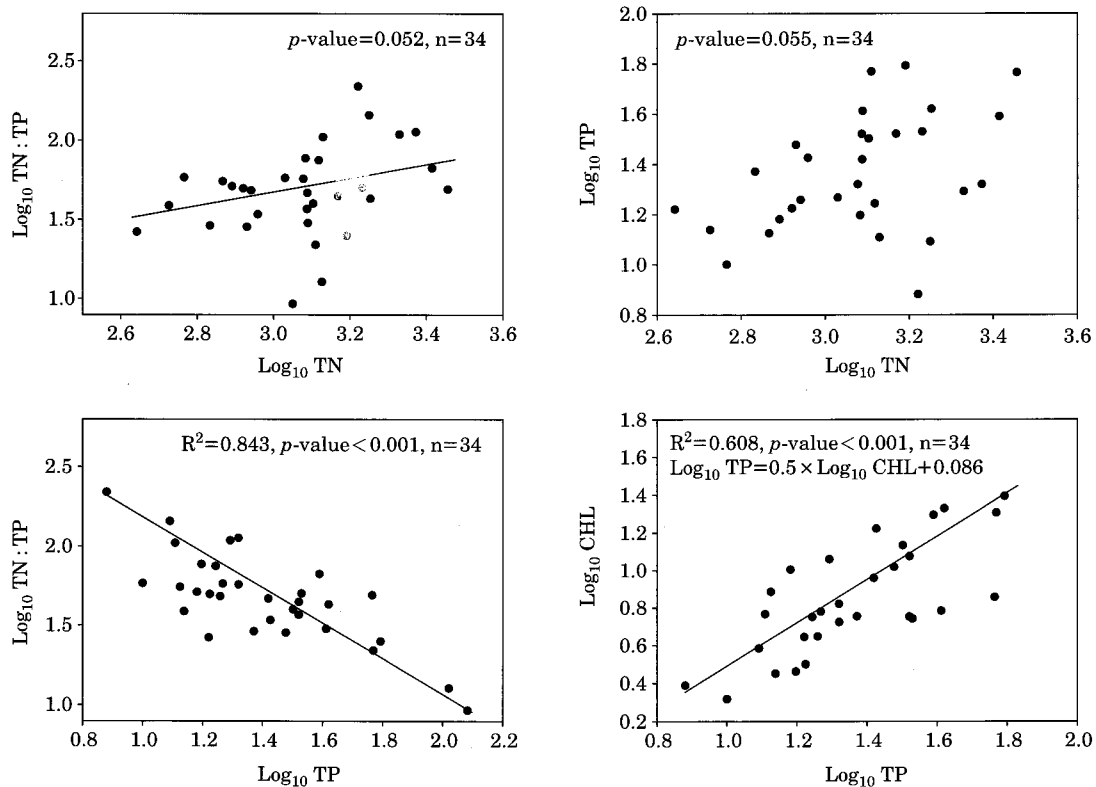


Fig. 7. Regression analysis between each variables. The data points indicate annual averages in the reservoirs.



로 알려져있다(한 등, 1993; 안 등, 2001). 본 연구에서 농업용 저수지는 인의 증가가 1차생산력으로 직결되며, CHL 농도의 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 수체 내 N:P 비는 CHL의 생물량을 예측하거나, CHL에 대한 제한 영양염으로 무엇이 작용하고 있는지를 나타내는 간접 예측 지표로 활용되고 있어(Smith, 1983; Fugimoto & Sudo, 1997), N:P 비에 의거한 제한 영양염류의 특성을 파악할 수 있었다.

5. 저수지의 지역별 분포에 따른 부영양화 경향

부영양화의 핵심변수인 TN, TP, CHL 농도에 의거한 유사도분석에 따르면, 약 90% 유사도 수준(similarity

level)에서 총 3개의 그룹으로 대별되었다. 이런 그룹은 일반적으로 해양에 인접한 지역적 특성, 즉 염도 및 전기 전도도의 특성과 연관되는 것으로 나타났다. 첫째 그룹은 염도가 높으면서 해양 인접 지역에 위치한 저수지(S2, S4, S17, S18, S22-S24, S29, S32, S34), 둘째 그룹은 염도가 낮으면서 내륙에 위치한 그룹(S1, S3, S5, S6, S8, S12, S15, S16, S19, S25), 셋째 그룹은 뚜렷한 위치 특성을 보이지 않는 중간적인 그룹(S7, S9, S10, S11, S13, S14, S20, S21, S26-S28, S30, S33)으로 대별되어졌다. S31(북쪽저수지)은 해안 인접부에 위치하여 염도가 높고 해양에 인접한 그룹으로 분류될 것으로 예상하였으나, 이들 그룹과는 유사성을 나타내지 않았으며 다른 그룹으로 분류되었다(Fig. 8).

한편 각 그룹은 OECD(1982) 기준에 의거하여 빈영양(Oligotrophy)에서 과영양(Hypertrophy)의 4개 영양단계로 분류되었다. 염도가 높으면서 해양에 인접한 지역에 위치한 그룹은 모두 중영양 상태를 보이고 있었으며, 염도가 낮으면서 내륙에 위치한 그룹은 대부분 부영양 상태를 보이고 있었고, 중간적인 그룹은 중영양 상태와 부영양 상태가 약 1:1 비율로 나타나고 있었다. 염도가 낮으면서 내륙에 위치한 그룹에 비하여 염도가 높으면서 해양에 인접한 지역에 위치한 그룹에서 비교적 부영양 상태가 덜한 것으로 나타났으며, 이러한 특성을 나타내는 이유에 대한 명확한 근거 제시를 위해서는 향후 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

Table 1. Regression analysis for the each variables by hydrologic seasons (annual, premonsoon, and postmonsoon).

	n	Premonsoon		Postmonsoon	
		R <sup>2</sup>	p-value	R <sup>2</sup>	p-value
Log <sub>10</sub> TN: TP vs Log <sub>10</sub> TN	34	0.301	0.001	0.242	0.003
Log <sub>10</sub> TN: TP vs Log <sub>10</sub> TP	34	0.839	0.0001	0.843	0.0001
Log <sub>10</sub> TN vs Log <sub>10</sub> TP	34	0.028	0.344	0.011	0.549
Log <sub>10</sub> CHL vs Log <sub>10</sub> TP	34	0.384	0.001	0.508	0.001

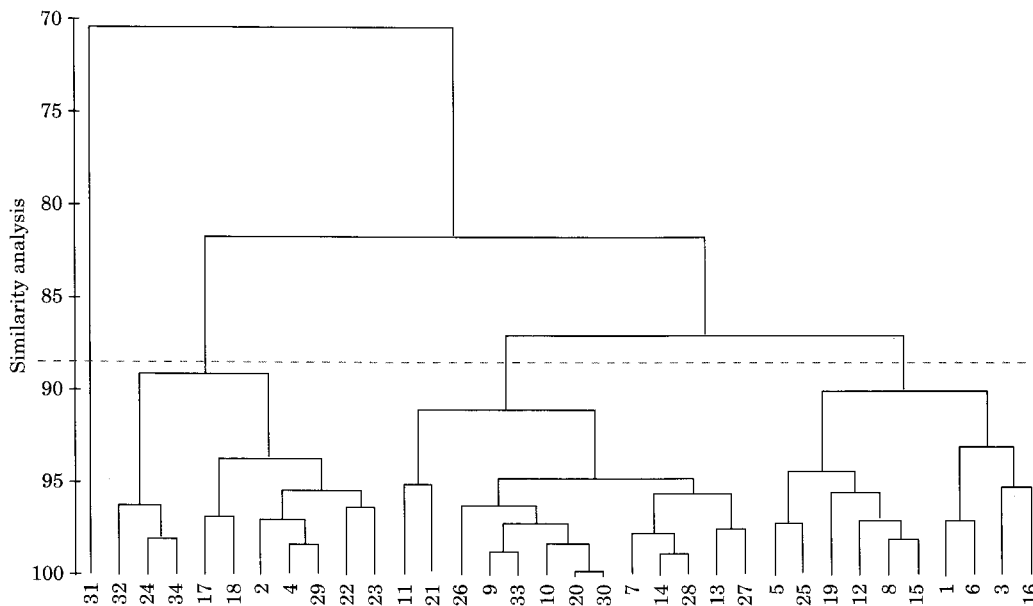


Fig. 8. Dendrogram of agricultural reservoirs, based on similarity level. The numbers indicate the reservoir sites (1=S1). The dotted line indicate 90% similarity level.

## 적 요

본 연구에서는 2002~2005년까지 측정된 한국농촌공사의 수질측정자료를 이용하여 계절별, 공간별 저수지의 부영양화 및 수질 특성을 분석하였다. TN에 의거하였을 때, 대다수(전체의 88%)의 저수지는 부영양 상태로 나타났다. OECD 기준에 의거하여 산정한 TP에 의한 영양상태에서는 전체 저수지의 26%가 부영양 상태로 나타났고, 71%는 중영양, 3%는 빈영양 상태로 나타났다. 계절적 변이는 강우 집중기인 7월에서 8월 사이에 강하게 나타나고 있었으며, 전기전도도, COD, SS, TN, TP 및 CHL 값은 강우 후에 증가하는 것으로 나타났다. TP는 전기전도도와 COD 농도가 높은 저수지에서 높은 수준으로 나타나고 있었으며, TP의 증가에 따라 CHL의 농도도 함께 증가하는 것으로 나타났다. COD와 SS는 집중 강우해에 높은 수치를 기록하였으며, TP와 CHL은 가뭄해에 비하여 약 2배 정도 높은 수치를 기록하였다. 이는 인근 점·비점오염원으로부터 장마 기간에 유기물 및 부유물, 영양염의 다량 유입이 원인으로 작용하는 것으로 나타났다. 한편 회귀분석에서는 TN:TP 비와 TP가 매우 높은 상관관계( $R^2=0.84$ ,  $p<0.001$ ,  $n=34$ )를 보였으며, CHL과 TP는 1차 함수관계( $\text{Log}_{10}\text{TP}=0.5*\text{Log}_{10}\text{CHL}+0.086$ )를 보였다. TN, TP, CHL에 의거한 유사도 분석에서는 약 90% 수준에서 염도가 높으면서 해양 인접 지역에 위치한 그룹, 염도가 낮으면서 내륙에 위치한 그룹, 그리고 뚜렷한 위치 특성을 보이지 않는 중간적인 그룹으로 분류되었다.

## 사 사

본 연구는 한국농촌공사 제공한 수질자료를 이용하여 수행되었으며, 농림부 과제 “어류의 트로픽 구조분석 및 Top-down 조절기법을 이용한 농업용저수지 수질관리 기법개발”의 일환으로 수행되었음.

## 인 용 문 헌

- 국립환경연구원. 1999. 호소내 조류 대 발생에 대한 수면제어 기술에 관한연구 (II). 팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발.
- 김범철, 전만식, 황순진, 김재욱. 1999. 소양호 동, 식물플랑크톤의 계절 변동. 환경연구 16: 292-299.
- 김호섭, 황순진. 2004. 얕은 부영양 저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. 육수지 37(2): 180-192.
- 남귀숙, 장정렬, 이광식, 윤경섭, 이상준. 2003. 중산간 농업용 만온저수지의 수질환경특성. 한국환경농학회지 22(1): 16-25.
- 농림부, 농업기반공사. 2001-2005. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 농업기반공사. 2005. 효율적인 농업용 저수지 용수확보 및 이용방안 연구. 농어촌연구원.
- 안광국, 서진원, 박석순. 2001. 대청호의 취수탑 주변의 이화학적, 생물학적 상태에 대한 계절경향의 영향. 육수지 34(4): 327-336.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 육수지 38(1): 54-62.
- 이재수, 김영철, 황길순. 2003. 장마 전, 후의 농업용 저수지 퇴적물의 변화분석. 대한토목학회지 23(4): 359-368.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석. 육수지 35(1): 36-44.
- 전지홍, 윤춘경, 함종화, 김호일, 황순진. 2002. 농업용 저수지의 물리적 인자가 수질에 미치는 영향. 육수지 35(1): 28-35.
- 최광순, 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최중수. 2001. 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4): 주암호. 육수지 34(1): 30-44.
- 최선화, 김호일. 2002. 우리나라 수자원과 농업용수 수질오염 실태. 농어촌과 환경 12(1): 93-103.
- 최진규, 손재권, 구자웅, 김영주. 2001. 보령담수호 유역내 농업용저수지의 수질 변화. 농촌계획 7(1): 89-98.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 - 1. 수질의연변화: 과거와 현재. 육수지 26(2): 141-149.
- Datta. S.K. 1987. Nitrogen transformation processes in relation to improved cultural practices for lowland rice. *Plant and Soil* 100: 47-69.
- Datta. S.K. 1995. Nitrogen transformation in wetland rice ecosystems. *Fertilizer Research* 42: 193-203.
- Faithful, J.W and D.J, Griffiths. 2000. Turbid folw through a tropical reservoir (Lake Dalympe, Queensland, Australia): Reponses to summer storm event. *Lake & Reservoir Management* 5: 231-247.
- Fillery, I.R., J.R Simpson and S.K. Datta. 1986. Contribution od ammonia volatilization to total nitrogen loss after applications of urea to wetland rice fields. *Fertilizer Research* 8: 193-202.
- Forsberg, O., S.-O. Ryding. 1980. Entrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waster-eceiving 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.
- Goldman, J., D.A. Caron and M.R. Dennet. 1987. Nutrient

- cycling in a microflagellate food chain, 4. phytoplankton-microflagellate interactions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **38**: 75-87.
- Hutchison, C.E. 1957. A Treatise on limnology. I, Geography Physics and Chemistry. New York, John Wiley and Sons Inc. 1015pp.
- Hwang, S.J., C.G. Yoon and S.K. Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy & Environment* **1**: 43-52.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, assessment and control, organisation for economic co-operation and development. Paris, France, 154pp.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*. **221**: 669-671.

(Manuscript received 7 March 2007,  
Revision accepted 13 June 2007)