

한강 수계 주요 인공댐호의 식물플랑크톤 군집 동태

윤석제 · 박혜경[†] · 신경애

국립환경과학원 한강물환경연구소

Dynamics of Phytoplankton Communities of Major Dam Reservoirs in Han River System

Seok Jea Youn · Hae-Kyung Park[†] · Kyoungae Shin

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research
(Received 20 November 2009, Revised 3 February 2010, Accepted 8 February 2010)

Abstract

This study was to investigate phytoplankton communities and to evaluate the effects of hydrological and physical-chemical environmental factors in major five dam reservoirs in the Han River water system. Annual average of chlorophyll a concentration in Lake Paldang, Lake Cheongpyeong and Lake Doam was higher than that of Lake Chungju and Lake Hoengseong. The opposite seasonal variation patterns of phytoplankton growth were observed in dam reservoirs; the highest biomass in spring of dry season in Lake Paldang, Lake Cheongpyeong which are the river-type reservoirs and Lake Doam where turbidity was high throughout the year, and in summer and autumn of rainy season in Lake Chungju and Lake Hoengseong which are the lake-type reservoirs, indicating that the seasonal pattern for growth of phytoplankton in on-river reservoirs is mainly determined by hydrologic characteristics. The dominant species of phytoplankton in Lake Paldang, Lake Cheongpyeong and Lake Doam, where the concentration of nutrients was relatively high, were Bacillariophyceae such as *Stephanodiscus hantzschii*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* in Lake Paldang and Lake Cheongpyeong and *Nitzschia* spp. in Lake Doam throughout all season. The dominant species of phytoplankton in Lake Chungju and Lake Hoengseong which showed the oligo-mesotrophic state, were Bacillariophyceae such as *Stephanodiscus hantzschii*, *Cyclotella pseudostelligera* in spring and winter, but Cyanophyceae such as *Microcystis* spp. in summer.

keywords : Han River system, Hydrological type, Lake Chungju, Lake Paldang, Phytoplankton community

1. 서론

우리나라의 대형 인공댐호는 하천이나 산골짜기의 어귀에 댐이 축조되면서 유역 면적이 넓어져 주변의 오염원 유입이 더 많아졌고 댐에 의해 체류시간이 길어져 쉽게 부영양화 될 가능성을 지니고 있다. 우리나라 대형 인공댐호의 수질 문제는 1980년대 후반 이후 본격적으로 논의되어 왔으며, 호수의 수질 악화 및 부영양화는 인구의 증가와 산업의 발달에 따라 도시하수 및 산업하수, 유역내의 비점오염원 등에 의한 영양염의 과다 유입에 의해 증가하고 있는 실정이다(신재기 등, 2003; 이정호 등, 2002; Kim et al., 1997).

호수의 수생태계 구조는 외부 오염물질 유입에 영향을 받을 뿐만 아니라 형태적 특성에 따른 체류시간, 성층의 유무 등의 수리수문학적 특성에 의해 수생태계 전반이 영향을 받게 되고 이중 호내 1차생산자인 식물플랑크톤 발생 패턴 및 우점종 천이 등도 상이한 결과를 나타낸다(김미경 등, 2007; 박혜경 등, 2005; Park et al., 2009).

수중 생태계에서 식물플랑크톤은 다른 수중 생물군보다 수질변화에 빠르게 반응하기 때문에 수환경을 평가하는데 중요한 자료로 이용되고 있으며, 이들 종의 발생정도 및 우점종의 천이에 따라 호소의 수질을 예측하는데 사용되고 있다(Guo et al., 2010; Stenger-Kovács et al., 2007; Watanabe et al., 1986). 따라서 대형 인공호의 수질환경과 생물군집의 동태, 특히 1차생산자인 식물플랑크톤의 분포와 시·공간적 변화 양상은 환경생태적인 관심의 대상이 되고 있으며, 장래의 수생태계 변화를 예측하고 수질 보전을 위해서 호소의 육수학적 특성에 따른 현재의 식물플랑크톤 군집의 발생과 천이 과정 등을 자세히 조사하는 것이 필요하다.

국내의 인공댐호는 축조된 이후로 환경요인과 생물상의 다양한 변화를 보이고 있으며(유순주 등, 2005; 최준길 등, 2005), 부영양화에 따른 식물플랑크톤 군집에 변화가 이루어졌다(박혜경 등, 1992; 허우명 등, 2006). 그러나 국내 주요 인공댐호의 환경요인 및 식물플랑크톤 발생과 종조성의 변화에 대해서 특정 호수에 대한 개괄적인 연구들은 많이 발표되고 있으나(박혜경과 정원화, 2003; 이진환 등, 2000; 허우명 등, 2006) 여러 호수를 대상으로 식물플랑크톤의 변화에 대한 종합적인 비교 조사는 상대적으로 미비한 실정

[†] To whom correspondence should be addressed.
parkhk@me.go.kr

이다(김용재와 이정호, 1996; 이정호 등, 2002; Kim et al., 2001).

한강은 총 유로연장이 481.7 km에 달하고 유역면적이 26,018 km²에 이르며 각각 따로 발원한 북한강과 남한강이 팔당호에서 합류하여 한강 하류로 흘러가는 국가하천이다. 한강은 우리나라에서 가장 많은 급수인구를 가지고 있으며 수도권은 물론 강원도, 충청도 일부에도 상수원수 및 다양한 용도의 원수를 제공하고 있다.

본 연구는 남한강 수계의 충주호, 횡성호, 도암호와 북한강 수계의 청평호 그리고 남한강과 북한강이 합류되는 한강 수계 최하류의 댐인 팔당호를 대상으로 각 호수의 식물플랑크톤의 발생양상과 천이특성을 조사하고, 각 호수의 수리수문학적, 이화학적인 환경 요인이 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 이해하는데 목적을 두었다.

2. 연구방법

2.1. 조사대상 호수 및 조사기간

본 연구의 조사대상 호수는 한강 상류부에 속하는 남한강과 북한강 수계 그리고 두 강이 합류되는 하류에 위치한 5개 호수이다(Fig. 1). 한강은 북한강과 남한강 상류부터 치수와 이수의 목적으로 다수의 댐들이 건설되어 이로 인한 인공댐호가 나열되어 있으며 상류의 댐 수문 조작에 의해 하류 댐의 유입유량, 체류시간이 조절되는 특성을 보인다. 각 호수의 일반 제원은 Table 1과 같다. 충주호는 남한강 본류의 중류부에 위치하며, 횡성호는 충주호 하류의 남한강으로 합류하는 섬강 상류에 위치하고 있고, 도암호는 남한강 상류인 송천에 위치하고 있다. 충주호는 1985년에 축조되어 유역면적이 6,648 km²에 달하는 다목적 인공댐호로 수력 발전, 홍수조절, 하천 유지용수 공급 등의 역할을 담당하고 있다. 충주호는 주변에 오염원이 많지 않으나 수심이 깊은 관계로 집중 호우 시 다량의 영양염류 및 토사가 방류되어 하류의 청평호 및 팔당호 수질에 심각한 영향을 주고 있다. 횡성호는 섬강 지류에 위치하여 2000년에 완성된 인공호로 유역면적이 209 km²이며, 비교적 소형의 다목적 인공댐호이다. 횡성호의 유역은 하류지역으로 갈수록 인구밀도 및 농경지 비율이 증가하는 경향을 보이며, 특히 주변에 축산 시설이 존재하여 유역의 생활 및 축산계의 오염물질에 따른 수질악화가 대두되고 있다. 도암호는 1990년 유로변경식 수력발전을 위하여 축조된 인공호로 유역면적은 145 km²이며, 유역에 고랭지 채소밭 및 레저시설이

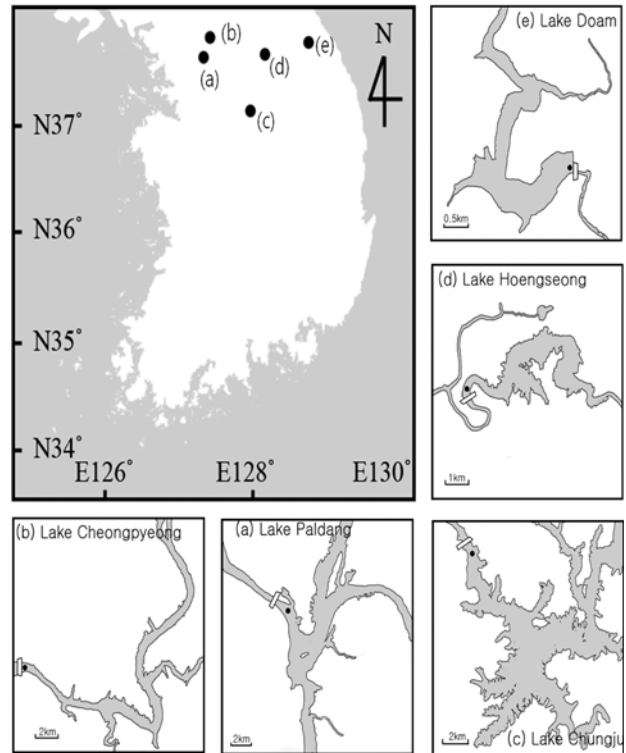


Fig. 1. Map Showing the locations of survey reservoirs (● : sampling site).

존재하여 도암호 호내는 다량의 오염부하량을 받는다. 북한강 수계에서 최 하류에 위치한 청평호는 1943년에 축조된 인공호로 유역면적이 9,921 km²이며, 수도권에 상수원인 팔당호의 직상류 호수로 팔당호 수질에 직접적인 영향을 미친다. 청평호 주변에는 수상 레저활동에 의해 수표층의 교란이 일어나며, 펜션 및 음식점 증가 등에 의한 오염이 심화되고 있다. 팔당호는 총 유역 면적은 약 23,800 km²로 북한강 수계와 남한강 수계의 합류부에 건설되어진 인공호이다. 팔당호의 수표면적은 유역면적에 비해 매우 작아서 상대적으로 오염에 취약하며, 상류 하천의 유입유량에 의해 영향을 받는 호수이다.

조사대상 호수를 수리학적 특성에 따라 유형을 분류하면 팔당호와 청평호는 하천의 중, 하류에 위치하여 수표면적에 비해 유역면적이 넓고 체류시간이 짧으며 수심이 깊지 않아 하천형 호수로 분류할 수 있고, 충주호, 횡성호, 도암호는 하천 상류에 위치하여 유역면적 대 수표면적 비율이 적고 수심이 깊으며 체류시간이 길어 호수형 호수로 분류할

Table 1. General hydrological characteristics of survey reservoirs

Characteristics \ Reservoirs	Paldang	Cheongpyeong	Chungju	Hoengseong	Doam
River system	Han River	North Han River	South Han River	Seum River	Song Stream
Drainage basin area (km ²)	23,800	9,921	6,648	209	145
Surface area (km ²)	37	18	97	6	2
Max water volume (10 ⁶ m ³)	244	186	2,750	87	51
Drainage basin area / Surface area	652	564	69	36	66
Average depth (m)	7	11	32	15	26
Hydraulic residence time (days)	5	10	200	153	142

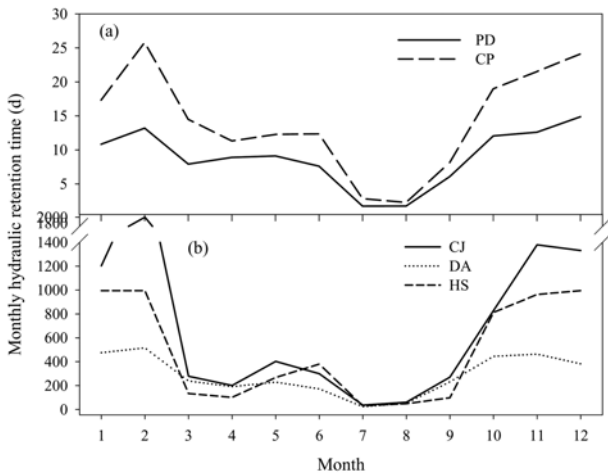


Fig. 2. Temporal variation of monthly hydraulic retention time of river-type (a) and lake-type (b) reservoirs in 2008. PD, CP, CJ, HS and DA mean Lake Paldang, Lake Cheongpyeong, Lake Chungju, Lake Hoengseong and Lake Doam respectively.

수 있다(Fig. 2; 공동수와 정동일, 1999; Park et al., 2009).

본 연구는 5개 호수에 대해 2008년 3월부터 2008년 12월까지 매월 1회씩 조사하였다. 각 호수의 조사지점은 수환경을 대표할 수 있는 댐앞 지점을 대표지점으로 선정하여 조사하였다(Fig. 1).

2.2. 물리·화학적 환경요인

각 조사 대상 호수의 수질 및 식물플랑크톤의 수직분포를 조사하기 위해 결빙기를 제외하고 팔당호와 청평호, 충주호는 0 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m에서 채수하였으며 황성호와 도암호는 0 m, 2 m, 5 m, 10 m에서 채수하였다.

매 조사 시 수온과 탁도는 수질 현장측정기(YSI 6600, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 채수한 시료는 얼음을 채운 아이스박스 보관 후 실험실로 옮겨 일부 시료는 식물플랑크톤 조사를 위해 Lugol's solution을 첨가하여 시료를 고정하였다. 나머지 시료는 질산성 질소(NO₃-N)와 암모니아성 질소(NH₄-N), 인산염 인(PO₄-P), 클로로필 a 등의 수질항목을 수질오염공정시험방법(환경부, 2004) 및 Standard method(APHA, 2005)에 준하여 분석하였고, 질산성 질소와 암모니아성 질소, 인산염 인은 시료를 GF/F 여과지로 일정량 여과한 후 각각 자외선 흡광도법과 페놀법, 아스코르빈산 환원법을 이용하여 분석하였다. 클로로필 a는 시료를 GF/C 여과지로 여과한 후 90% 아세톤을 첨가하여 암냉소에서 12~24시간동안 색소를 추출하였고, 663, 645, 630 및 750 nm의 파장에서 흡광광도계(PerkinElmer, USA)를 사용하여 측정 후 계산하였다.

조사대상 호수의 제원 및 유입유량은 국가수자원관리 종합정보 홈페이지(www.wamis.go.kr)와 한국수력원자력 홈페이지(www.khnp.co.kr)에서 일자료를 이용하였다.

식물플랑크톤 군집과 환경요인과의 상호관계를 알아보기 위해 수심별 식물플랑크톤 개체수와 환경요인을 이용하여 Pearson 상관계수(Pearson's correlation analysis)를 계산하였

고 통계프로그램은 SPSS 12.0을 사용하였다.

2.3. 식물플랑크톤 조사

식물플랑크톤 현존량 및 식물플랑크톤 출현종을 조사하기 위하여 고정된 시료를 농축 또는 그대로 사용하였고 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하여 위상차 현미경(Nikon, Japan)하에서 100~1,000배에서 계수한 후 단위체적당 세포수로 환산하여 식물플랑크톤 개체수를 산출하였다. 식물플랑크톤 종의 동정은 한국동식물도감(담수조류편; 정영호, 1968), 한국담수조류도감(정준, 1993), 일본담수조류도감(廣瀬弘幸 등, 1981) 및 Komárek(1991)를 참조하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물리·화학 환경요인

본 조사기간 동안 5개 호수에서 조사된 환경인자들 중 식물플랑크톤의 증식에 주요한 영향을 주는 수질인자에 대해 각 호수의 투명도를 기준으로 산정한 유광층 수심(팔당호 5 m, 청평호 5 m, 충주호 20 m, 황성호 10 m, 도암호 5 m)까지의 수심평균값을 이용하여 수질 분포를 비교한 결과, 수온은 최저 3°C(3월, 도암호)에서 26°C(7월, 팔당호)의 범위였으며, 월별 변화는 대기의 온도와 유사한 변화양상을 보여 전형적인 온대기후의 수온변화를 나타내었다. 조사기간 평균 수온은 고지대에 위치한 도암호가 12°C로 가장 낮았고, 팔당호가 18°C로 가장 높았다. 호수별 탁도는 충주호와 황성호가 각각 조사기간 평균 1.1 NTU와 2.3 NTU로 낮았고 팔당호와 청평호, 도암호가 각각 3.2 NTU, 3.1 NTU, 8.7 NTU로 높은 값을 보였다. 특히 도암호의 경우 집중 호우와 태풍의 영향을 받은 8월에 수심 5 m에서 60 NTU 이상의 고탁수가 발생하였으며, 중층에 형성된 탁수층의 영향으로 10월까지 탁도가 높게 유지되었다(Fig. 3).

식물플랑크톤 증식에 필요한 필수 영양염 중에서 호수별 질산성 질소는 조사기간 평균 1.143 mg L⁻¹(청평호)에서 2.614 mg L⁻¹(도암호)사이의 범위였으며(Fig. 3), 질산성 질소의 변화양상은 5월 또는 6월을 제외한 조사기간 동안 고른 분포를 나타내었다. 암모니아성 질소는 평균 0.023 mg L⁻¹(청평호)에서 0.063 mg L⁻¹(도암호)사이를 보였으며, 도암호 6월에 0.214 mg L⁻¹로 가장 높은 값이 조사되었다.

인산염 인의 농도는 호수 주변유역의 목장 및 고랭지 채소밭으로부터 다량의 영양염이 유입되는 도암호가 조사기간 평균 0.010 mg L⁻¹로 가장 높았고 다음으로 팔당호가 0.005 mg L⁻¹로 높았으며, 충주호(0.003 mg L⁻¹), 황성호(0.003 mg L⁻¹), 청평호(0.002 mg L⁻¹)순으로 조사되었다(Fig. 3). 또한 인산염 인은 집중강우 시 유역의 오염물질이 호내로 유입된 8월에 높은 값을 나타내었다.

3.2. 클로로필 a의 농도 변화

전체 식물플랑크톤 현존량 지표로 사용되고 있는 클로로필 a 농도의 호수별 평균값은 팔당호가 19.3 mg m⁻³, 청평

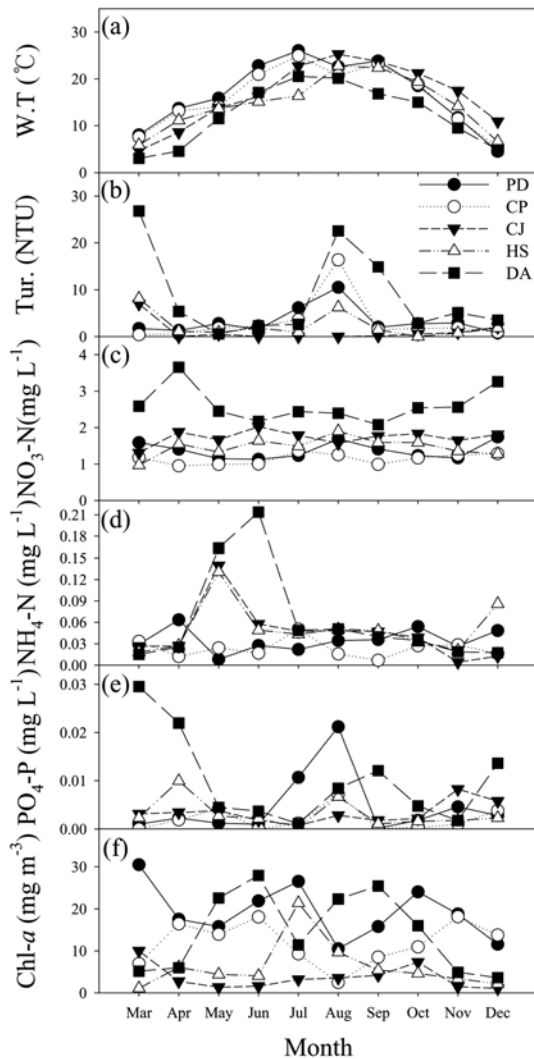


Fig. 3. Temporal variation of water temperature (a), turbidity (b), nitrate (c), ammonia nitrogen (d), phosphate (e), and chlorophyll *a* concentration (f), in survey reservoirs from March to December, 2008. PD, CP, CJ, HS and DA mean Lake Paldang, Lake Cheongpyeong, Lake Chungju, Lake Hoengseong and Lake Doam respectively.

호가 11.9 mg m^{-3} , 도암호가 14.5 mg m^{-3} 로 충주호와 횡성호가 각각 3.6 mg m^{-3} 과 6.2 mg m^{-3} 로 조사되어 팔당호, 청평호, 도암호는 식물플랑크톤의 생산성이 높고, 충주호와 횡성호는 낮은 것으로 나타났다. 클로로필 *a*의 경시적 변동은 팔당호와 청평호의 경우 봄에 높은 농도를 보이다가 집중강우가 있었던 8월에 급격히 낮아졌다. 이후 가을에 다소 증가된 양상을 보였다. 충주호는 연중 낮은 농도를 보였으며, 가을철인 9월과 10월에 증가된 양상을 나타내었다. 횡성호는 *Cyclotella* spp.의 개체수가 급증한 7월에 21.3 mg m^{-3} 로 높았으며, 도암호는 6월과 9월에 가장 높은 값을 나타내었다(Fig. 3).

높은 영양염의 농도는 식물플랑크톤의 생산성을 증가시키며(김백호 등, 2004; Reynolds et al., 1983), 수체에서의 짧은 체류시간은 식물플랑크톤 성장을 저해한다고 알려져

있으나(김좌관과 홍옥희, 1992) 팔당호의 경우 짧은 체류시간에도 불구하고 다른 조사 호수보다 높은 클로로필 *a* 농도를 보이는 이유는 체류시간보다 영양염류의 농도가 식물플랑크톤 증식에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이다. 그러나 도암호가 높은 영양염류의 농도와 보다 긴 체류시간에도 불구하고 팔당호보다 낮은 클로로필 *a* 농도를 보인 이유는 팔당도에 비해 낮은 수온과 높은 탁도로 인한 낮은 광이용성이 도암호의 식물플랑크톤의 성장을 억제하였기 때문으로 판단된다(Fig. 3).

3.3. 식물플랑크톤 우점종의 변동

각 조사 대상 호수에서 계절별 식물플랑크톤의 우점종과 아우점종의 경우, 팔당호의 우점종은 모든 계절에서 규조류였으며, 아우점종은 계절별로 다양한 분류군이 출현하였다(Table 2). 봄철에 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii*와 *Asterionella formosa*가 우점종과 아우점종으로 출현하였다. *Stephanodiscus hantzschii*는 냉수성 규조류로 수온이 낮은 겨울과 봄에 주로 우점을 하고, 부영양화된 수계에서 높은 출현을 보이는 종으로 알려져 있다(Jung et al., 2009; Reynolds, 2006). 여름철과 가을철의 우점종은 부영양화 수계에 높은 출현 빈도를 보이는 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*였다. 아우점종은 남조류인 *Anabaena macrospora*와 *Merismopedia grauca*가 차지하였다. 겨울철의 우점종은 규조류인 *Cyclotella pseudostelligera*였다.

청평호는 모든 계절동안 규조류가 우점종 및 아우점종이었다. 본 호수에서 여름철에 집중 강우 및 태풍의 영향으로 증가한 유입수량에 의해(Fig. 4) 남조류가 하류로 쓸려 내려가 남조류의 대발생은 일어나지 않았고 *Stephanodiscus*, *Asterionella*, *Cyclotella* 속 등이 속간 천이 양상을 나타내었다.

충주호의 경우, 봄철에 *Stephanodiscus hantzschii*가, 여름철에 남조류인 *Microcystis ichthyoblabe*, 가을철과 겨울철은 *Cyclotella* 속이 우점적으로 출현하였다. 여름철 남조류의 발생은 수온의 상승과 강우 시 유입된 영양염류가 남조류의 증식에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Fig. 5; 정승현 등, 2005; Kim et al., 2001).

횡성호는 봄철에 규조류인 *Cyclotella pseudostelligera*와 갈색편모조류인 *Dinobryon divergens*가 우점종과 아우점종으로 출현하였다. 여름철에는 *Cyclotella stelligera*로 속내 천이를 이루었고, 가을에 남조류인 *Microcystis* sp.가 우점종으로 조사되었다. 횡성호에서 봄철에 출현한 *Dinobryon*은 3월과 4월에 높은 우점도로 출현하였으며, 주로 빈영양화 호수에서 수온이 낮은 시기에 우점하는 종으로 국내 몇몇 호소에서 봄에 우점을 보이는 것으로 조사되어 있어서(김용재 등, 1997; 이경락 등, 2003; Reynolds, 2006) 다른 호수에 비해 낮은 영양염 농도를 지닌 횡성호에서 봄에 높은 출현량을 보인 결과와 잘 일치하였다.

도암호의 계절별 우점종과 아우점종은 대부분 규조류였으며, 봄철에는 *Asterionella formosa*가 우점하였다. 높은 탁도에 내성을 가진 *Nitzschia* 속이(Reynolds, 2006) 다른 호수에 비해 높은 탁도를 보인 도암호에서 여름철과 가을철에

Table 2. Dominant and subdominant species in survey reservoirs by season in 2008. The figure within parenthesis indicate the relative abundance of dominant and subdominant species

Reservoirs	Season	Dominant species	Subdominant species
Paldang	Spring	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (59.8%)	<i>Asterionella formosa</i> (20.6%)
	Summer	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (24.4%)	<i>Anabaena macrospora</i> (11.9%)
	Autumn	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (57.4%)	<i>Merismopedia grauca</i> (6.5%)
	Winter	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (62.7%)	<i>Rhodomonas</i> sp. (12.0)
Cheongpyeong	Spring	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (44.7%)	<i>Asterionella formosa</i> (31.8%)
	Summer	<i>Asterionella formosa</i> (48.2%)	<i>Fragilaria crotonensis</i> (20.5%)
	Autumn	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (30.3%)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (23.3%)
	Winter	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (45.4%)	<i>Asterionella formosa</i> (16.6%)
Chungju	Spring	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (84.6%)	<i>Asterionella formosa</i> (5.2%)
	Summer	<i>Microcystis ichthyoblabe</i> (30.3%)	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (14.5%)
	Autumn	<i>Cyclotella stelligera</i> (51.3%)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (11.7%)
	Winter	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (40.8%)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (18.3%)
Hoengseong	Spring	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (24.2%)	<i>Dinobryon divergens</i> (22.7%)
	Summer	<i>Cyclotella stelligera</i> (38.5%)	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (30.8%)
	Autumn	<i>Microcystis</i> sp. (50.9%)	<i>Chodatella citrififormis</i> (23.5%)
	Winter	<i>Cyclotella pseudostelligera</i> (45.8%)	<i>Cryptomonas</i> sp. (11.6%)
Doam	Spring	<i>Asterionella formosa</i> (37.7%)	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (36.1%)
	Summer	<i>Nitzschia acicularis</i> (71.9%)	<i>Ankistrodesmus falcatus</i> var. <i>mirabilis</i> (6.8%)
	Autumn	<i>Nitzschia actinastroides</i> (29.4%)	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (16.0%)
	Winter	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (89.7%)	<i>Coelastrum sphaericum</i> (2.9%)

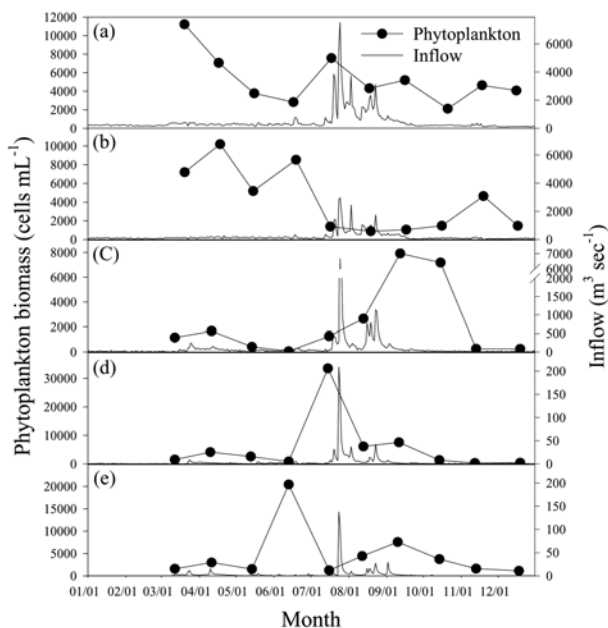


Fig. 4. Temporal variation of phytoplankton biomass and inflow in survey reservoirs in 2008. Lake Paldang (a), Lake Cheongpyeong (b), Lake Chungju (c), Lake Hoengseong (d) and Lake Doam (e).

우점적 출현하였다. 겨울철은 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* 가 주요 우점종으로 조사되었다. 도암호의 경우 긴 체류시간과 성층의 형성 등에 의해 호수형 호수로 분류가 되나 남조류의 발생이 다른 호수형 호수보다 적었다. 이와 같은 결과는 높은 농도의 탁수가 수중에 빛의 투과율을 감소시켜 다른 분류군에 비해 낮은 광량에 민감성을 지닌 *Microcystis* 등의 남조류의 생육 저해로 인해 하계

에 남조류에 의한 대발생이 제한되었을 것으로 사료된다 (Reynolds, 2006).

3.4. 식물플랑크톤 개체수와 분류군별 상대우점도의 계절별 변동

유광층 수심평균값으로 본 식물플랑크톤 개체수의 계절별 변동은 팔당호의 경우 봄에 7,354 cells mL⁻¹로 가장 많은 개체수가 조사되었으며, 이후 점차 적어지는 경향을 보였다. 규조류는 수온과 음의 상관관계($r = -0.517, p < 0.05$)를 나타내었으며, 수온이 낮은 봄과 가을에 높은 발생을 보였다(Table 3). 청평호도 팔당호와 같이 봄에 많고, 겨울에 적었다. 팔당호와 청평호의 경우 봄에 Horne and Goldman (1994)이 제시한 대발생 기준인 5,000 cells mL⁻¹를 상회하는 개체수를 보여 수온이 낮은 시기에도 규조류의 대발생이 일어나고 있었다(Fig. 6(a)). 청평호의 식물플랑크톤 개체수는 질산성 질소와 음의 상관관계($r = -0.554, p < 0.01$)를 보였는데 이는 질산성 질소가 식물플랑크톤이 성장하면서 소비되었기 때문으로 판단된다.

충주호는 다른 호수에 비해 적은 개체수를 보이고 있으며, 봄과 겨울에 적은 개체수를 보이고 남조류의 개체수가 급증한 여름과 초가을에 각각 많은 개체수가 조사되어 시기별 변동이 수온과 관련 있는 것으로 판단되었다($r = 0.405, p < 0.01$). 횡성호는 여름에 12,000 cells mL⁻¹ 이상의 개체수를 보이며, 조사 호수 중에서 가장 많은 계절평균 개체수가 조사되었다. 6월에 수심 5 m에서 *Cyclotella* spp.가 70,000 cells mL⁻¹ 이상의 개체수로 대발생을 보여 여름 평균 개체수를 증가시켰다. 도암호는 계절별 개체수의 대부분이 규조류였으며, 여름과 가을에 많은 개체수가 조사되었다. 식물

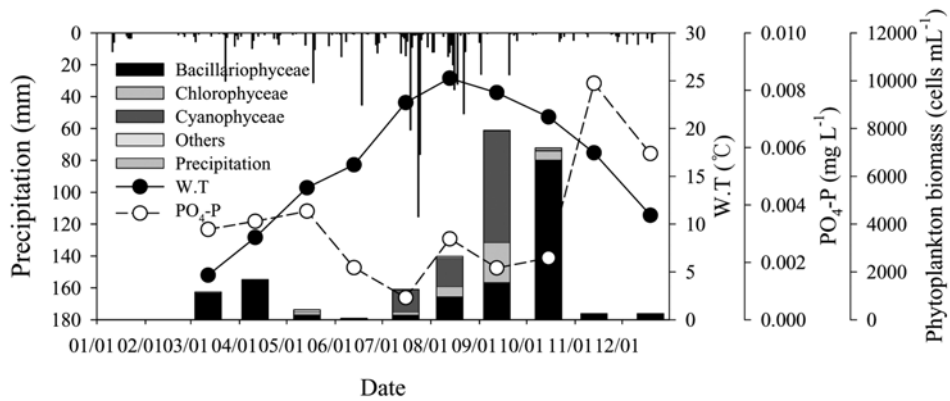


Fig. 5. Temporal variation of phytoplankton biomass, precipitation, water temperature and total-phosphate in Lake Chungju in 2008.

Table 3. Pearson correlation matrix between physico-chemical factors and phytoplankton groups in survey reservoirs in 2008

Reservoirs	Group	W.T	Tur.	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	Chl- <i>a</i>	P.B
Paldang	Bac.	-0.52**	-	-	-	-	0.48**	0.87**
	Chlo.	0.63**	0.39*	-	-	-	-	-
	Cyano.	0.63**	0.57**	-	-	0.50**	-	-
	Others	-	-	-	-	-	-	-
	P.B	-	-	-	-	-	0.53**	1.00
Cheongpyeong	Bac.	-	-0.37*	-0.60**	-	-	0.55**	0.99*
	Chlo.	-	-	-	-	-	0.53**	-
	Cyano.	0.47**	-	0.46*	0.64**	-	-	-
	Others	-	-	-	-	-	-	0.43*
	P.B	-	-0.40*	-0.55**	-	-	0.59**	1.00
Chungju	Bac.	-	-	-	-	-	-	0.51**
	Chlo.	0.45**	-	-0.39**	-	-0.31*	0.55**	0.90**
	Cyano.	0.38**	-	-0.40**	-	-	0.29*	0.90**
	Others	-	-	-	-	-	-	-
	P.B	-	-	-0.35*	-	-0.31*	0.42**	1.00
Hoengseong	Bac.	-	-	-	-	-	0.95**	0.97**
	Chlo.	0.56**	-	-	-	-	-	-
	Cyano.	0.46**	-	-	-	-	-	-
	Others	-	-	-	-	-	0.80**	0.81**
	P.B	-	-	-	-	-	0.95**	1.00
Doam	Bac.	-	-	-	0.70**	-	0.55**	0.99**
	Chlo.	0.64**	-	-0.53**	-	-	0.67**	0.69**
	Cyano.	-	-	-	-	-	-	-
	Others	-	-	-	-	-	-	-
	P.B	-	-	-0.41*	0.68**	-	0.60**	1.00

*p<0.05, **p<0.01, - : Not significant
 W.T : Water temperature, Tur. : Turbidity, NO₃-N : Nitrate, NH₄-N : Ammonium, PO₄-P : Ortho phosphorus, Chl-*a* : Chlorophyll *a*, P.B : Phytoplankton biomass, Bac. : Bacillariophyceae, Chlo : Chlorophyceae, Cyano : Cyanophyceae

플랑크톤에 의해 수중의 질소원 중 가장 먼저 흡수되는 암모니아성 질소는 도암호의 총 개체수와 높은 상관관계($r = 0.683, p < 0.01$)를 보여 도암호의 식물플랑크톤 증식에 영향을 미치는 것으로 생각되어진다.

국내 주요 호수에서는 식물플랑크톤 발생 패턴 및 분류군별 발생이 육수학적 특성뿐만 아니라 호수의 유형에 따라 상이한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. Park 등 (2009)에 의하면 하천형 호수는 봄과 가을에 식물플랑크톤 증식이 활발하고 유입유량이 증가하는 여름철 집중강우기에 식물플랑크톤이 감소를 보이며, 호수형 호수는 여름철

집중강우기에 유입된 영양염을 이용하여 가을에 대발생한다고 보고하였다.

본 연구의 조사대상 호수들에서도 호수 유형에 따른 식물플랑크톤 발생의 전형적인 패턴이 나타났다. 먼저 하천형 호수로 분류되는 팔당호와 청평호에서 봄철 식물플랑크톤의 대발생이 일어나고 있었으며 이런 봄철 대발생의 원인은 겨울철 결빙된 수면이 봄에 해빙되면서 수온과 광투과도가 증가하여 식물플랑크톤 성장을 촉진시켰기 때문으로 생각된다. 한편 여름철에는 체류시간이 강우에 의해 매우 짧아지면서 여름철에 주로 출현하는 남조류 등의 식물플랑

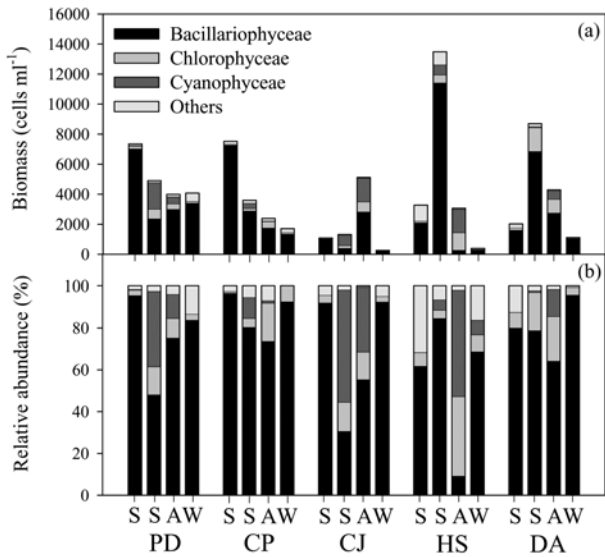


Fig. 6. Seasonal variation of biomass (a) and relative abundance (b) of phytoplankton groups in survey reservoirs in 2008. S, S, A and W mean spring, summer, autumn and winter. PD, CP, CJ, HS and DA mean Lake Paldang, Lake Cheongpyeong, Lake Chungju, Lake Hoengseong and Lake Doam respectively.

크톤이 하류로 쓸려 내려가 적은 개체수가 조사되었다(Fig. 2, 4; 박혜경 등, 2000).

한편 호수형 호수로 분류되는 횡성호와 도암호에서는 수온이 20°C 이상으로 상승된 여름철에 각각 13,485 cells mL⁻¹과 8,696 cells mL⁻¹로 대발생을 나타내었고, 충주호에서도 여름철 강우 이후 높은 수온 조건과 집중강우 시 유입된 영양염류를 이용하여(Fig. 4, 5) 남조류가 우점한 식물플랑크톤의 발생이 5,000 cells mL⁻¹ 이상으로 높게 나타났다.

온대지역 호수에서 식물플랑크톤 분류군별 상대우점도의 계절별 변화는 봄과 가을에 구조류가, 여름에 남조류가 우점을 한다고 일반적으로 알려져 있다(Sze, 1998). 본 연구에서 조사된 호수 중 충주호와 횡성호에서 남조류와 녹조류는 수온과 양의 상관관계($r=0.38\sim0.56, p<0.01$)를 나타내었고 수온이 높은 여름과 가을철에 상대우점도가 높아져 온대수계의 전형적인 천이 패턴을 보였다.

팔당호와 청평호, 도암호에서 여름과 가을철 남조류의 상대우점도는 0.7~36%의 범위를 보였다(Fig. 6(b)). 일반적으로 남조류는 수온이 상승된 시기와 일조량의 증가 등에 의해 높은 성장을 보이고 빠른 수체의 이동 및 탁도에 의한 광저해 등에 의해 발생이 저해된다(Reynolds, 2006). 여름과 가을철 수온과 일조량의 증가, 영양염 농도의 상승에도 불구하고 팔당호와 청평호는 짧은 체류시간에 의해 남조류의 생장이 저해를 받았고(Fig. 2) 도암호는 앞서 언급한 바와 같이 연중 높은 농도의 탁수에 의해 *Microcystis* 등의 남조류의 생육 저해되어 하계에 남조류에 의한 대발생이 제한되었을 것으로 사료된다(Fig. 3).

이런 결과로 볼 때 인공 댐호에서 계절별 식물플랑크톤 발생 및 천이패턴은 이화학적 환경요인뿐만 아니라 호수의

수리학적 유형 즉 여름철 수리학적 체류시간 등에도 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

3.5. 계절별 수온과 클로로필 a, 식물플랑크톤 개체수의 수직분포

팔당호와 청평호에서 수온의 수직분포는 수표면적이 넓고 평균 수심이 얕으며 체류시간이 짧아 수체가 불안정하여 수직혼합이 잘 일어나기 때문에 계절에 상관없이 수직적으로 거의 균일한 분포를 보였다. 반면에 충주호와 횡성호, 도암호는 표층과 저층의 온도차를 보이며 주로 수심 2~10 m 사이에서 혼합층과 수온약층의 경계면을 형성하였으며 특히 여름에 매우 강한 성층을 나타내었다(Fig. 7).

조사기간 동안에 클로로필 a의 수직분포는 호수와 조사 시기에 따라 다르게 나타났다. 팔당호는 여름과 가을철의 경우 수심 0~2 m 사이에서 클로로필 a가 19.8~21.5 mg m⁻³로 가장 높게 나타났으며, 이후 수심부터는 감소하였다(Fig. 7). 이와 같은 수직분포는 팔당호의 유광층 깊이가 약 3 m로 빛이 도달하는 유광층에서 광합성률이 높기 때문에 수심 0~2 m 사이에서 높은 농도를 보이는 것으로 판단된다.

한편 여름에 횡성호와 도암호는 각각 수심 5 m와 2 m에서 다른 수심에 비하여 클로로필 a(23.4 mg m⁻³, 25.1 mg m⁻³)가 급격히 높아지는 현상이 관찰되었다. 여름에 성층을 형성하는 횡성호와 도암호의 경우 수온이 2~5 m부터 급격한 하강을 보였다(Fig. 7). 성층이 형성되면 혼합층 밑에 수온약층(thermocline) 또는 밀도약층(pycnocline) 등과 같은 경계층이 형성되고 표층과 저층사이의 밀도 차에 의해 물질교환을 저해하게 된다(Wetzel, 2001). 따라서 식물플랑크톤은 수온약층 위부분에 머물게 되어 횡성호와 도암호의 경우 성층에 의한 경계층이 시작된 2~5 m에서 클로로필 a가 높게 나타나는 것으로 판단된다(Fig. 7; Lunven et al., 2005; Reynolds, 2006).

또한 두 호수에서 클로로필 a는 표층보다 아래 수심에서 높게 조사되었으며, 구조류가 각각의 수심에서 다른 분류군에 비해 현저히 많은 개체수를 보였다. Reynolds(2006)의 실험결과에 따르면, 운동성이 없는 식물플랑크톤은 침강되지 않고 중층에 밀집하는 것으로 조사되었다. 그러므로 기남이나 편모 등과 같은 부유기작이 없는 구조류는 아래로 침강하며 표층 아래의 혼합층에서 주로 분포하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 한강수계 중에서 남한강 수계의 충주호, 횡성호, 도암호와 북한강 수계의 청평호 그리고 남한강과 북한강이 합류되는 한강 수계 최하류의 댐호인 팔당호를 대상으로 각 호수의 식물플랑크톤의 발생양상과 천이특성을 조사하고, 각 호수의 수리수문학적, 이화학적인 환경요인이 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 평가하였다.

1) 연평균 클로로필 a 농도는 팔당호, 청평호와 도암호에서 높았고 충주호와 횡성호에서는 낮은 농도가 조사되었다.

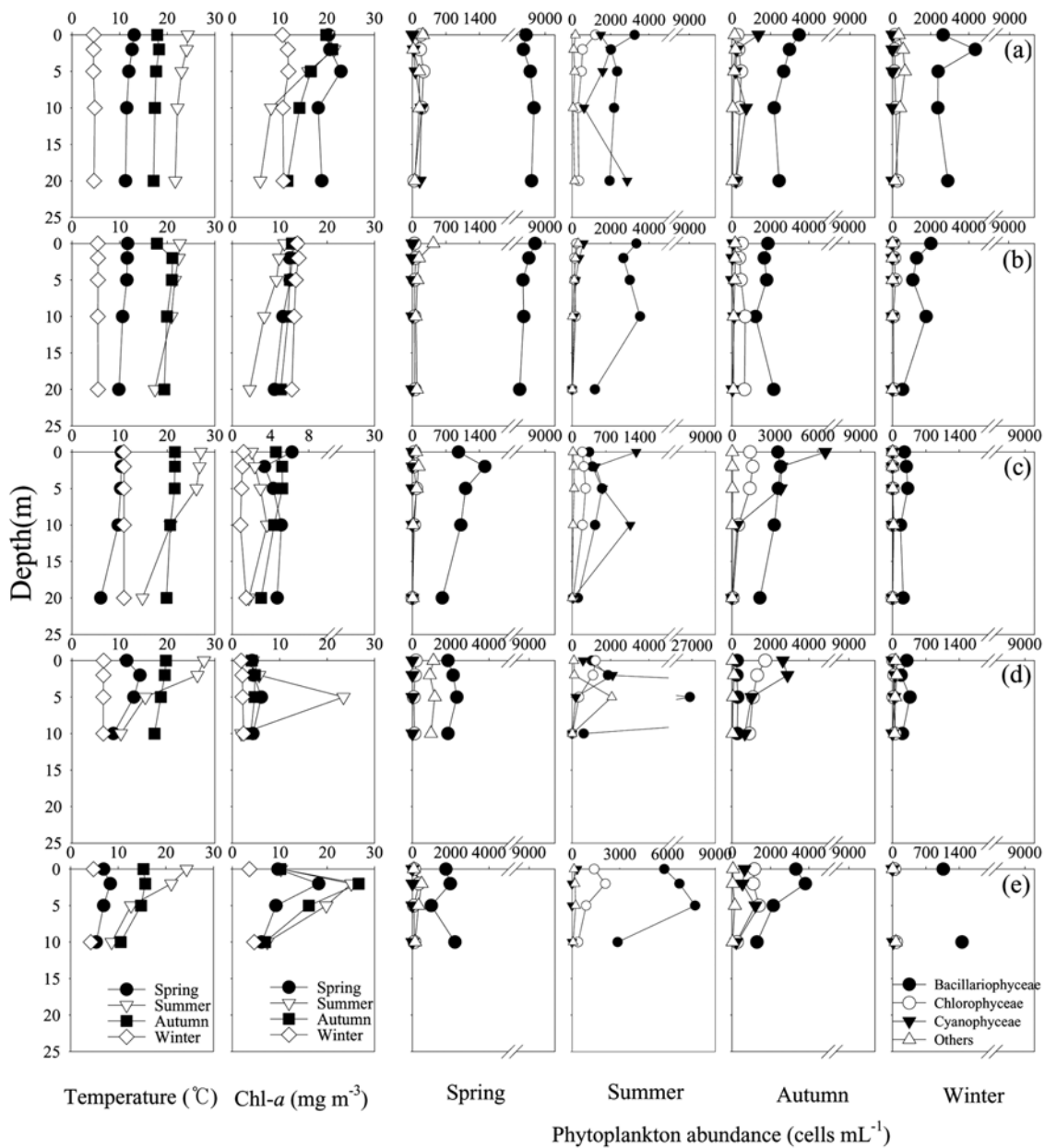


Fig. 7. Vertical distribution of temperature, chlorophyll a concentration, biomass of phytoplankton groups in survey reservoirs in 2008. Lake Paldang (a), Lake Cheongpyeong (b), Lake Chungju (c), Lake Hoengseong (d) and Lake Doam (e).

- 2) 하천형 인공호인 팔당호와 청평호의 식물플랑크톤은 수리학적체류시간이 짧은 여름철에 비해 체류시간이 길어지는 봄에 많은 개체수를 보였다. 반면에 호수형 인공호인 충주호와 횡성호, 도암호의 경우 봄과 겨울에 적었으나 여름과 가을에 많은 개체수를 나타내었다. 따라서 각 호수의 식물플랑크톤의 계절별 증식패턴은 호수의 수리학적 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 3) 영양염류 농도가 상대적으로 높고 연중 수체의 혼합이 일어나는 팔당호와 청평호 그리고 수중탁도가 높은 도암호의 우점종은 사계절 모두 규조류가 차지하였다. 팔당호와 청평호 우점종의 천이는 봄에 *Stephanodiscus hantzschii* 가, 가을에는 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* 가 우점하였고, 도암호는 여름에 *Nitzschia* spp.가

우점하였다. 여름철 성층이 형성되며 수중 영양염류 농도가 상대적으로 낮은 충주호와 횡성호에서 우점종의 천이는 봄에는 *Stephanodiscus hantzschii*, *Cyclotella pseudostelligera* 등과 같은 규조류가 우점하였으나, 여름과 가을은 *Microcystis* spp. 등과 같은 남조류가 우점적 출현하여 계절별 우점종의 천이는 이화학적 환경요인과 호수의 수리학적 유형 즉 여름철 체류시간 등에 영향을 받는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 2008년도 한강수계 환경기초조사사업 「수계별 호소환경 및 생태조사」의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 공동수, 정동일(1999). 하천형 인공호(팔당호)의 수환경특성 및 수질관리. *The 6th International Symposium on Environmental Issues and Alternatives for 21C*, pp. 41-83.
- 김미경, 이순화, 이철희(2007). 경상북도 청도군, 운문호의 식물플랑크톤 우점종 변동과 수화현상의 수문학적 발생 원인. *한국조류학회지*, **22**(4), pp. 261-271.
- 김백호, 최지영, 황순진, 한명수(2004). 몇가지 영양염 결핍이 팔당댐의 식물플랑크톤군집에 미치는 영향. *한국유수학회지*, **37**(1), pp. 47-56.
- 김용재, 이정호(1996). 낙동강 수계의 6개 댐호의 식물 플랑크톤 군집구조 비교. *한국유수학회지*, **29**(4), pp. 347-362.
- 김용재, 최재신, 김한순(1997). 임하호의 식물 플랑크톤 군집구조. *한국유수학회지*, **30**(4), pp. 307-324.
- 김좌관, 홍유희(1992). 국내 인공댐호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **1**(2), pp. 49-57.
- 박혜경, 이현주, 김은경, 정동일(2005). 팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(6), pp. 584-594.
- 박혜경, 정원화(2003). 팔당호의 장기간 식물플랑크톤 발생 추이. *수질보전 한국물환경학회지*, **19**(6), pp. 673-684.
- 박혜경, 정원화, 권오상, 류재근(2000). 팔당호에서 남조류 및 남조류생산 독성물질의 계절 변동. *한국조류학회지*, **15**(1), pp. 29-35.
- 박혜경, 천세억, 박승익, 이문호, 유재근(1992). 국내 주요 댐호에 있어서의 계절별 조류종 천이. *수질보전학회지*, **8**(3), pp.150-158.
- 신재기, 황순진, 강창근, 김호섭(2003). 하천형 저수지 팔당호의 유수학적 특성: 수문과 수환경 요인. *한국유수학회지*, **36**(3), pp. 242-256.
- 유순주, 채민희, 황종연, 이재안, 박종겸, 최태봉(2005). 담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(4), pp. 360-367.
- 이경락, 최재신, 김한순(2003). 박실지와 정양지의 식물플랑크톤 군집의 계절 변동. *한국조류학회지*, **18**(4), pp. 273-280.
- 이정호, 박종근, 김은경(2002). 국내 주요 호수의 식물플랑크톤 종조성 및 영양단계 평가. *한국조류학회지*, **17**(4), pp. 275-281.
- 이진환, 오희목, 맹주선(2000). 대청호의 수질과 식물플랑크톤 현존량. *한국환경생물학회지*, **18**(3), pp. 355-365.
- 정승현, 안치용, 최에란, 장감용, 오희목(2005). 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군집의 관계. *한국환경생물학회지*, **23**(1), pp. 57-63.
- 정영호(1968). *한국동식물도감 식물편(담수조류편)*, 문교부.
- 정준(1993). *한국담수조류도감*, 아카데미서적.
- 최준길, 최재석, 신현선, 박승철(2005). 횡성호 일대의 어류 군집 동태. *한국유수학회지*, **38**(2), pp. 188-195.
- 허우명, 권상용, 김영길, 이원호, 임병진, 김범철(2006). 용담호에서 환경요인과 식물플랑크톤의 시공간적 변동. *한국유수학회지*, **39**(3), pp. 366-377.
- 환경부(2004). *수질오염공정시험방법*.
- 廣瀬弘幸, 山岸高旺, 編 (1981). *日本淡水藻圖*, 鑑内田老鶴圃.
- APHA, AWWA, WPCF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed., New York.
- Guo, Q., Ma, K., Yang, L., Cai, Q., and He, K. (2010). A comparative study of the impact of species composition on a freshwater phytoplankton community using two contrasting biotic indices. *Ecol. Indic.*, **10**(2), pp. 296-302.
- Horne, A. J. and Goldman, C. R. (1994). *Limnology*, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc. New York.
- Jung, S. W., Kwon, O. Y., Lee, J. H., and Han, M. S. (2009). Effects of water temperature and silicate on the winter blooming diatom *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae) growing in eutrophic conditions in the lower Han River, South Korea. *J. Freshwater Ecol.*, **24**(2), pp. 219-226.
- Kim, B. C., Park, J. H., Hwang, G. S., and Choi, K. S. (1997). Eutrophication of large freshwater ecosystems in Korea. *Korean J. Limnol.*, **30**(Suppl.), pp. 512-517.
- Kim, B., Park, J. H., Hwang, G., Jun, M. S., and Choi, K. (2001). Eutrophication of reservoirs in South Korea. *Limnology*, **2**(3), pp. 223-229.
- Komárek, J. (1991). A review of water-bloom forming *Microcystis* species with regard to populations from Japan. *Archiv Hydrobiologie*, Suppl. Bd. 92, Algological Studies, **64**, pp. 115-127.
- Lunven, M., Guillaud, J. F., Youéno, A., Crassous, M. P., Berric, R., Gall, E. L., Kérouel, R., Labry, C., and Aminota, A. (2005). Nutrient and phytoplankton distribution in the Loire River plume (Bay of Biscay, France) resolved by a new Fine Scale Sampler. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.*, **65**(1-2), pp. 94-108.
- Park, H. K., Byeon, M. S., Shin, Y. N., and Jung, D. I. (2009). Sources and spatial/temporal characteristics of organic carbon in two large reservoirs with contrasting hydrologic characteristics. *Wat. Resour. Res.*, **45**, W11418, doi:10.1029/2009WR008043.
- Reynolds, C. S. (2006). *The ecology phytoplankton*. Cambridge Univ. Press, London.
- Reynolds, C. S., Wiseman, S. W., Godfrey, B. M., and Butterwick, C. (1983). Some effects of artificial mixing on the dynamics of phytoplankton populations in large limnetic enclosures. *J. Plankton Res.*, **5**(2), pp. 203-234.
- Stenger-Kovács, C., Buczkó, K., Hajnal, É., and Padišák, J. (2007). Epiphytic, littoral diatoms as bioindicators of shallow lake trophic status: Trophic Diatom Index for Lakes (TDIL) developed in Hungary. *Hydrobiologia*, **589**(1), pp. 141-154.
- Sze, P. (1998). *A Biology of the Algae*, 3rd ed. McGraw-hill Companies. New York.
- Watanabe, T., Asai, K., Houki, A., Tanaka, S., and HiZuka, T. (1986). Saprophytic and eursaprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index(DA_Ipo). *Diatom*, **2**(1), pp. 23-73.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology*, 3rd ed. Academic Press. London.