

팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석

박혜경[†] · 이현주 · 김은경^{*} · 정동일

국립환경과학원 한강물환경연구소

^{*}국립환경과학원 수질총량관리센터

Characteristics of Algal Abundance and Statistical Analysis of Environmental Factors in Lake Paldang

Hae-Kyung Park[†] · Hyun-Ju Lee · Eun-Kyung Kim^{*} · Dong-Il Jung

Han river Environmental Research Laboratory, National Institute of Environment Research

^{*}Watershed Management Research Center, National Institute of Environment Research

(Received 31 May 2005, Accepted 8 July 2005)

Abstract

The spatio-temporal abundance pattern of algae in Lake Paldang from 2002 to 2004 was investigated. The concentration of chlorophyll a representing algal biomass had fluctuated intensively throughout the year. Among three years, the highest algal biomass was shown in 2002, and typical growth peak of concentration of chlorophyll a was occurred in spring and autumn. There had been frequent rainfall in spring drought period in 2003 and it resulted in the decrease of the algal biomass. The distribution pattern of four algal groups on the surface water of Lake Paldang showed different abundance by season and by water area. In particular, different algal growth characteristics by water areas were observed. Influences of various environmental parameters on algal abundance in four water areas of Lake Paldang were analyzed statistically. From the results of Pearson correlation analysis, it was understood that the kinds and affects of environmental parameters were different according to water areas and seasons. Based on the factors analysis of environmental parameters on the concentration of chlorophyll a, stepwise regression models whose independent variables were the factors produced by factor analysis and dependent variable was the concentration of chlorophyll a were derived by water areas and seasons. As a whole, factors related with organics and photosynthesis were revealed to have high affects to algal abundance, whereas limiting nutrients such as phosphorus and nitrogen showed little affect in Lake Paldang.

keywords : Lake Paldang, Algal abundance, Stepwise regression model

1. 서론

팔당호는 1973년 용수조절 및 발전의 목적으로 남한강, 북한강, 경안천이 합류되는 남양주군의 한강 중하류수계에 팔당댐이 축조되면서 형성된 인공 댐호로, 평균 수심이 6.5 m, 평균 체류시간이 약 5.4일로 댐의 수문조작에 의해 체류시간이 영향을 많이 받는, 호수이면서도 하천의 특성을 많이 지니고 있는 하천형 호수이다. 또한 팔당호는 유역의 특성이 상이하고 유량이 다른 세 개의 하천이 합류되어 댐에 의해 체류되기 때문에 세 개의 하천 수역과 합류수역의 수리수문학적, 이화학적, 생물학적 특성이 서로 다른 복잡한 구조를 가지고 있어 수질 및 생태계의 해석이 매우 어렵고 따라서 수질관리를 위한 제반 기술의 적용 또한 어려움이 많다(공 등, 1996).

한편 팔당호는 수도권역의 가장 주요한 상수원으로 이용되

고 있으나 지리적으로 서울과 가깝고 유역 내에 대도시들이 위치하고 있어 댐 축조 이후 넓은 유역으로부터 생활하수, 농업배수, 축산폐수 등의 유입이 지속되면서 급격하게 부영양화가 진행되고 있고(김 등, 1995), 1990년대 이후 봄철과 여름철에 국지적인 조류의 대량발생현상이 나타나고 있다(박 등, 2003).

호소 생태계에서 1차생산자로서 중요한 위치를 점하고 있는 조류의 생산활동은 빛, 온도, 영양염 등의 환경과 함께 공존생물의 움직임에 크게 지배받고 있다. 그러나 그 지배의 방식은 호소에 따라 계절에 따라 현저히 다르기 때문에 조류의 생산과 동태의 공간적, 시간적 변동을 초래하게 된다. 중위도역의 온대지방의 호소에서는 계절의 변화에 따른 일사량과 수온이 변화하는데 따라 조류의 현존량과 군집의 구성 및 생산량의 계절변화가 유발된다. 그러나 팔당호와 같이 수심이 얇고 상류 댐의 수문조작에 따라 수시로 체류시간이 달라지며 특히 집중강우기에는 하루에도 수회 이상 전체 수체가 완전히 교체되는 수리학적 특성을 지닌 하천형 인공호에서는 자연호와 같은 조류의 증식패턴은

[†]To whom correspondence should be addressed.

parkhk@me.go.kr

기대할 수 없으며 화학적, 생물학적 인자 및 수리수문학적 환경인자에 의해 복합적인 영향을 받게 된다.

생태계 현상을 해석하기 위해서는 다양한 환경인자간의 복잡한 선형관계를 몇 개의 유형으로 분류한 후, 그 유형으로부터 원인을 파악할 수 있는 통계분석법을 이용하는 경우가 많다. 그중 요인분석(Factor Analysis)법은 한 가지 이상의 변수들이 서로 복잡한 상관관계를 맺고 있어, 직접적으로 해석하기 어려운 변수들 간의 구조적 관계로부터 주요 인자를 도출하여 분석하는 방법이다. 최근 복잡한 수질환경의 영향인자를 분석하고 변동구조의 해명 등을 통한 수질의 종합평가에 광범위하게 적용되고 있다(권 등, 1974; 오 등, 1984; 박 등, 1986; Sakamoto et al., 1988; 장, 1999).

본 연구에서는 팔당호의 최근 3년간 수역별 조류 발생현황을 조사하여 각 수역별 조류 발생패턴, 조류 군집의 천이특성을 밝히고 또한 다양한 환경인자와의 상관분석, 요인 분석 등의 통계학적 분석기법을 이용하여 각 수역별 및 계절별 조류 발생과 관련 있는 인자를 선정하고 이의 변동에 따른 조류 발생의 정도를 예측할 수 있는 선형회귀모형을 유도하고자 하였다.

2. 재료와 방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

팔당호를 대상으로 세 하천 수역 및 합류수역의 대표 지점에서 2002년부터 2004년까지 매주 1회 조류 발생현황을 조사하였다. 각 수역별 대표지점은 합류수역에서는 팔당댐 앞지점(L1), 남한강 수역에서는 월계사앞 지점(L2), 북한강

수역에서는 삼봉지점(L3), 경안천 수역에서는 광동교지점(L4)으로 Fig. 1과 같다.

2.2. 분석방법

매 조사시 수온, pH, 전기전도도, 용존산소농도는 현장측정기(Hydrolab, minisonde 4e)를 이용하여 현장에서 바로 측정하였으며, 표층수를 채수하여 실험실로 즉시 옮긴 후 일부 시료는 조류 조사를 위해 Lugol solution으로 고정하였고, 나머지 시료는 클로로필 a 농도, 총인, 용존성총인, 인산염인, 총질소, 용존성총질소, 암모니아성질소, 질산성질소, 철, 규소 등의 영양염류와 BOD, COD를 분석하였다. 조류 분석을 위해 고정된 시료를 조류 양에 따라 농축하거나 그대로 사용하였으며 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하여 위상차 현미경하에서 100~400배까지 관찰하여 동정, 계수하였다. 클로로필 a 농도, 영양염류, 및 유기물 분석은 수질오염공정시험방법(환경부, 1996) 및 Standard method(APHA, 1994)에 준하여 분석하였고 조류종의 동정은 한국동식물도감(담수조류편; 정, 1968), 일본담수조도감(廣瀬弘幸 등, 1981) 및 Komárek(1991)의 분류체계에 따라 동정하였다. 수리수문자료 중 일사량 자료는 서울기상청에서 측정된 매일 자료를 사용하였으며 팔당댐, 청평댐의 저수량, 강우량, 방류량 자료는 한국수력원자력(주) 인터넷 홈페이지에 게재된 댐 운영정보의 매일자료를, 충주호의 저수량, 강우량, 방류량, 유입량 자료는 수자원공사 인터넷 홈페이지의 댐 운영정보의 매일자료를 이용하여 강수량은 주간합을, 유입량, 방류량자료는 주간평균값을 사용하였다

2.3. 통계분석

클로로필 a농도와 수질, 수리수문 인자간의 상관관계를 구하기 위하여 팔당댐앞 지점의 경우 1997년 1월부터 2004년 9월까지 매주 조사된 자료에 대해 봄(3~5월), 여름(6~9월), 가을(10~11월), 겨울(12~2월)로 나누어 계절별로 클로로필 a 농도에 대한 상관분석을 하였다. 합류수역을 제외한 나머지 수역에 대해서는 2002년 1월부터 2004년 9월까지 매주 조사된 자료에 대해 마찬가지로 봄, 여름, 가을, 겨울의 계절별로 상관분석을 행하였다.

상관분석에 사용한 각 인자들의 특성을 파악하기 위해 상관분석과 같은 계절별, 수역별로 조사된 자료를 주성분추출방법을 사용하여 요인을 추출하고 요인별 점수를 얻는 요인분석을 하였다. 또한 이 결과를 이용하여 클로로필 a 농도를 종속변수로 하는 선형 회귀모형을 유도하였다. 회귀모형의 유도에는 요인분석 결과 얻은 요인점수를 독립변수로 하고 클로로필 a 농도를 종속변수로 하여 Stepwise법으로 다중회귀분석하였다. 각 통계분석은 SPSS 11.0 통계프로그램을 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 팔당호의 조류발생 현황

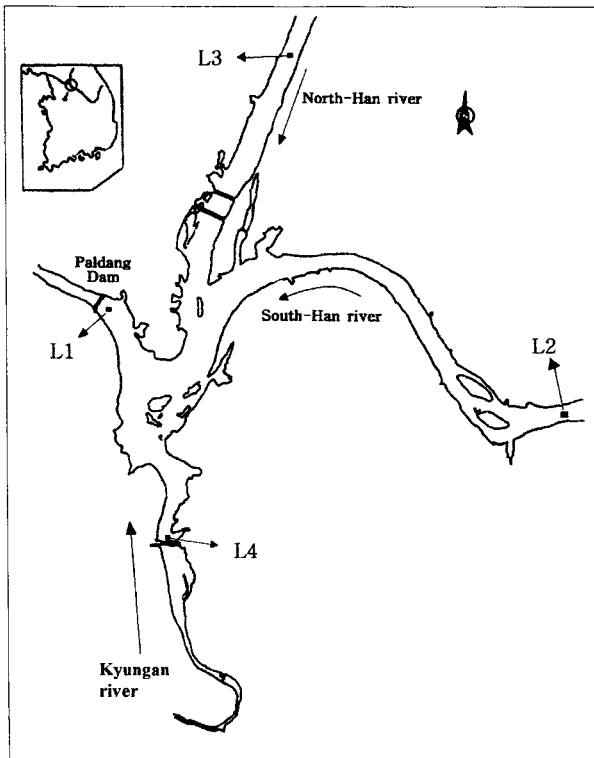


Fig. 1. Site map of Lake Paldang.

3.1.1. 수역별, 시기별 조류발생 패턴

2002년부터 2004년까지 팔당호의 각 수역별로 전체 조류를 규조류, 녹조류, 남조류, 기타조류로 구분하여 분류군별 상대우점도와 전체 조류현존량을 대변하는 지표인 클로로필 a 농도, 그리고 팔당호 유역강우량 및 유입량을 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 2002년부터 2004년까지 팔당호의 유역강우량 및 팔당댐 유입량의 연중패턴을 보면 하절기인 6월과 9월까지 연강우량의 74% 이상이 집중되며 봄과 가을, 겨울에는 강우량이 매우 적은 갈수현상을 보였고 이에 따라 유입량도 여름철에 급증하였으며 그 이외의 시기에는 매우 적은 것으로 나타났다. 그러나 강우기의 강우량 및 강우빈도는 해에 따라 차이를 보여 2003년의 경우 연강우량이 1744 mm로 2002년과 2004년에 비해 약 500 mm 정도로 강우량이 더 많았으며 강우빈도도 높았고 특히 3월부터 5월까지의 봄철 갈수기동안 강우빈도가 높았던 것으로 나타났다. 이에 따라 팔당호 주변의 연평균 일사량도 2002년과 2004년에는 12.6 MJ/m²이었으나 2003년에는 11.8 MJ/m²로 낮았고 봄철 갈수기인 4월의 월평균 일사량은 2002년에 18.0 MJ/m², 2003년에 14.7 MJ/m², 2004년에 17.2 MJ/m²로 2003년에 상대적으로 낮은 일사량을 보였다. 2002년부터 2004년까지 팔당호 수역별 조류 발생패턴을

보면 클로로필 a 농도로 볼 때 북한강 수역을 제외한 나머지 수역에서 2002년에 가장 높은 값을 보였고 2003년에는 모든 수역에서 다른 해에 비해 낮은 농도를 보였다. 팔당호의 대표지점인 합류수역의 팔당댐앞 지점(L1)의 경우 2002년과 2004년의 연평균 클로로필 a 농도는 24.5 mg/m³와 24.7 mg/m³이었으나 2003년에는 18.0 mg/m³로 두 해에 비해 낮았으며 특히 조류발생량이 가장 높은 시기인 4월의 평균 클로로필 a 농도를 보면 2002년에는 49.2 mg/m³, 2004년은 30.6 mg/m³이나 2003년은 22.9 mg/m³으로 낮은 발생량을 보였다. 조류 분류군별 우점도도 2002년과 2004년에는 초봄과 늦가을부터 겨울까지 규조류가 우점하고 봄부터 초여름에 녹조류, 편모조류, 여름과 초가을에 남조류가 우점하는 전형적인 온대수계의 천이패턴을 보였으나 2003년에는 여름철에 일시적으로 남조류, 기타편모조류의 우점도가 높았을 뿐 연중 규조류의 우점도가 높은 것으로 나타났다.

팔당호는 하천의 중하류에 조성된 전형적인 하천형 호수로 강우량의 증가로 인한 상류유입하천에서의 유입량의 증가가 체류시간에 직접적인 영향을 미치는 호수이다(공 등, 1996). 즉 팔당호 유역강우량의 증가는 바로 유입량의 증가로 이어지고 이는 곧 체류시간의 감소로 이어져 팔당호 내

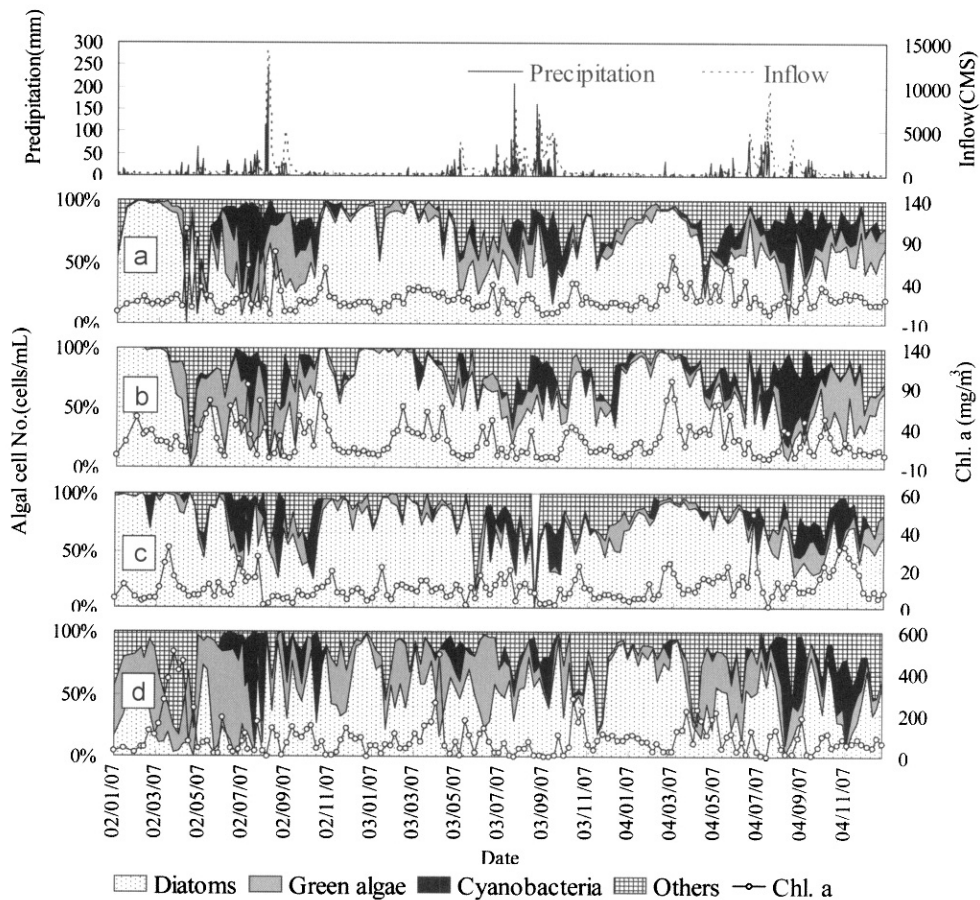


Fig. 2. Temporal variation of major environmental parameters such as daily precipitation and inflow of Paldang dam, chl. a concentration and relative abundance of algal groups in Lake Paldang (2002~2004) (a:confluence area, b:South-Han river area, c:North-Han river area, d:Kyungang river area).

조류 증식에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(박 등, 2003). 2002년과 2004년에 비해 2003년에는 강우량이 많았고 특히 매년 팔당호에서 조류가 가장 많이 발생하는 시기인 봄철 갈수기에 지속적으로 비가 내림으로써 그 결과 팔당호 체류시간이 짧아지고 또한 광합성에 필요한 일사량이 줄어들어 호내 조류발생을 억제하였으며 이런 결과로 볼 때 팔당호의 조류발생은 강우량 및 강우 빈도에 직접적으로 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다.

팔당호의 유입하천 중 유입량이 가장 많은 남한강 수역의 L2지점에서는 2002년과 2004년은 합류수역과 유사한 패턴을 보였으나 2003년의 경우 조류분류군별 우점 패턴은 유사하였으나 봄철 클로로필 a 농도는 북한강 유입수가 합류되는 합류수역에 비해 더 높은 농도를 보였다.

팔당호의 네 수역 중에서 수질상태가 가장 양호한 것으로 알려진(박 등, 2004) 북한강 수역의 L3지점에서는 다른 수역에 비해 전체 조류 현존량(클로로필 a 농도)이 적었으며 2002년에도 조류대량발생이 없었다. 2003년에는 2002년에 비해 클로로필 a 농도가 전체적으로 약간씩 줄었으나 큰 차이는 없었고 조류분류군별로 보아도 크게 감소하지 않았으며 여름철 일시적인 남조류의 출현이외에는 규조류가 우점하는 것으로 나타났다. 2004년에는 다른 해에 비해 더 많은 조류발생량을 보였는데 특히 6월말에 일시적으로

50 mg/m³을 초과하는 높은 발생량을 보였고 늦가을에 일시적으로 남조류인 *Anabaena* spp.가 출현하는 등 조류분류군의 천이도 다른 수역과 다르게 나타나, 북한강 수계 상류의 소양호에서도 조류발생량 특히 부영양수역의 지표조류인 남조류의 발생량이 증가하는 점(Personal discussion)과 함께 볼 때 그동안 양호한 수질을 유지하던 북한강 수역의 오염이 진행되고 있을 가능성을 시사하였다.

팔당호에서 가장 오염도가 높고 조류발생량이 많은 경안천 수역의 L4지점에서는 2002년에 가장 많은 조류발생량을 보여 봄철에는 500 mg/m³을 넘는 대발생 현상을 나타내었으며 다른 수역에서는 전반적으로 조류발생량이 적었던 2003년에도 봄에 클로로필 a 농도가 500 mg/m³이상의 대량발생을 보여 수심이 적고 상류에 대형 댐이 없는 경안천 수역이 다른 수역에 비해 강우의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 경안천 수역의 조류분류군별 우점도를 보면 다른 수역과는 달리 규조류보다 기타편모조류, 녹조류의 우점도가 높으며 여름과 가을철에 남조류가 우점하는 것으로 조사되었다.

팔당호 대표지점인 합류수역의 댐앞지점에서 조류 분류군별 우점 조류속의 2002년부터 2004년까지의 발생량을 보면(Fig. 3) 규조류 중에서는 *Cyclotella* spp.가 가장 우점하였으며, 그 외에 *Asterionella* spp., *Aulacoseira* spp. 등이

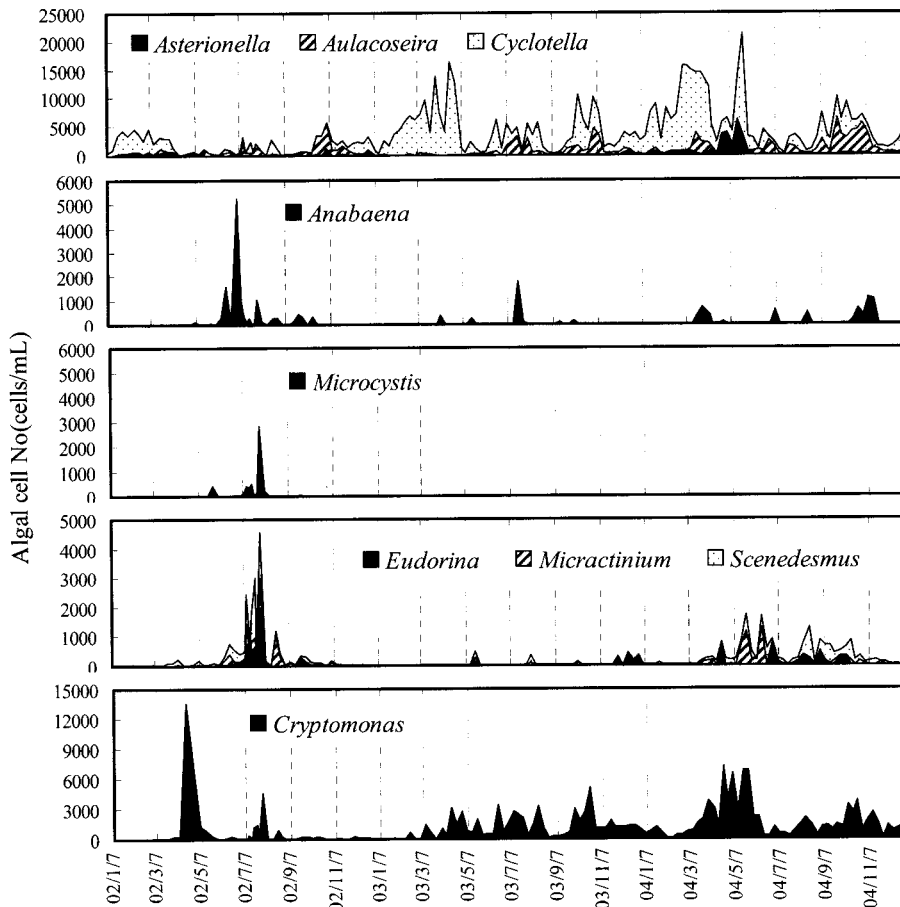


Fig. 3. Seasonal succession pattern of dominant genus of each algal groups at the confluence area of Lake Paldang (2002 ~ 2004).

많이 출현하였고 2004년의 경우 가을철에 *Synedra* spp.가 일시적으로 우점하여 정수처리장 여과지 폐쇄 등의 문제를 유발했다. 규조류의 속간에도 계절별 천이현상을 보여 봄철에는 *Cyclotella* spp.와 *Asterionella* spp.가 주로 우점하고 가을철에는 *Aulacoseira* spp.가 우점하는 패턴을 보였다.

녹조류의 경우에는 다양한 속이 출현하였으나 봄에는 *Chlamydomonas* spp., *Ankistrodesmus* spp., *Golenkinia* spp. 등이 우점하였고 여름부터 가을까지 *Scenedesmus* spp.와 *Micractinium* spp.가 우점하였으며 일시적으로 편모녹조류인 *Eudorina* spp., *Pandorina* spp. 등이 대량 출현하였다. 늦가을부터는 선상녹조류인 *Hormidium* spp.가 우점하였다. 남조류는 연도에 따라 출현하는 속이 달라 2002년과 2004년에는 *Anabaena* spp.와 *Microcystis* spp., *Aphanizomenon* spp. 등의 유독 남조류가 일시적으로 우점하였으나 2003년에는 남조류 발생량도 적었으며 우점속도 *Merismopedia* spp., *Phormidium* spp. 등의 무독성 남조류가 주로 출현하였다.

기타조류로는 갈색편모조류인 *Cryptomonas* spp.가 절대적으로 우점하였으며 주로 봄과 늦가을에 많이 출현하였고 매년 출현량이 증가추세에 있다. 그런데 *Cryptomonas* spp.의 경우 수역별로 출현시기와 출현량이 차이를 보였으며 특히 봄철에 일시적으로 대량발생하여 우점했던 2002년의 경우 경안천에서 4월 1일 20,000 cells/mL 이상의 대량발생을 보였으며 약 2주후인 4월 16일 합류수역에서 대량발생하였고 다시 1주후인 4월 23일 남한강수역에서 발생 피크를 보여 수역별로 약간의 시간차를 두고 대량 발생하였다.

전체적으로 발생량이 적었던 2003년과 전 시기를 걸쳐 발생량이 많았던 2004년에도 경안천 수역에서 4월초에 먼저 최대 발생하였으며 약 1, 2주후에 합류수역과 남한강수역에서 발생하는 현상을 보였다. 이런 현상은 수역별로 *Cryptomonas* spp.의 증식에 미치는 환경인자의 차이에 기인하는 것으로 추정되며 특히 수심이 얕은 경안천 수역이 합류수역과 남한강 수역에 비해 봄철의 수온이 약 2°C정도 높은 점과 조류에 의해 가장 먼저 흡수되는 형태인 NH₄-N의 농도가 다른 수역에 비해 경안천 수역에서 월등히 높고 특히 *Cryptomonas* spp.의 대량발생 직전에 NH₄-N의 농도가 최고값을 나타낸 점으로 보아 이런 환경요인들이 다른 수역보다 경안천 수역에서 *Cryptomonas* spp.의 증식이 빨리 시작되게 한 것으로 판단된다(Fig. 4).

3.1.2. 조류분류군별 분포 패턴

팔당호 전체의 조류분류군별 분포 패턴을 파악하기 위해 조류발생량이 많은 시기인 2002년 6월과 10월에 약 0.2~0.5 km 간격으로 호내 74 정점에서 클로로필 a 농도 및 조류분류군별 개체수를 조사하였다(Fig. 5, 6).

평균수온이 24°C이었던 6월에는 청수기의 영향으로 5월에 크게 감소했던 클로로필 a 농도가 남한강수역과 경안천수역을 중심으로 다시 증가하였으며 이 시기부터 전 수계에서 남조류가 발생되었다. 특히 팔당호 합류수역과 경안천수역에서는 남조류의 상대우점도가 52.0%, 29.5%로 높았으며 북한강 수역에서도 남조류가 14.7%를 점하였으나 남한강 수역에서는 남조류가 0.8%로 매우 낮은 우점도를 보였

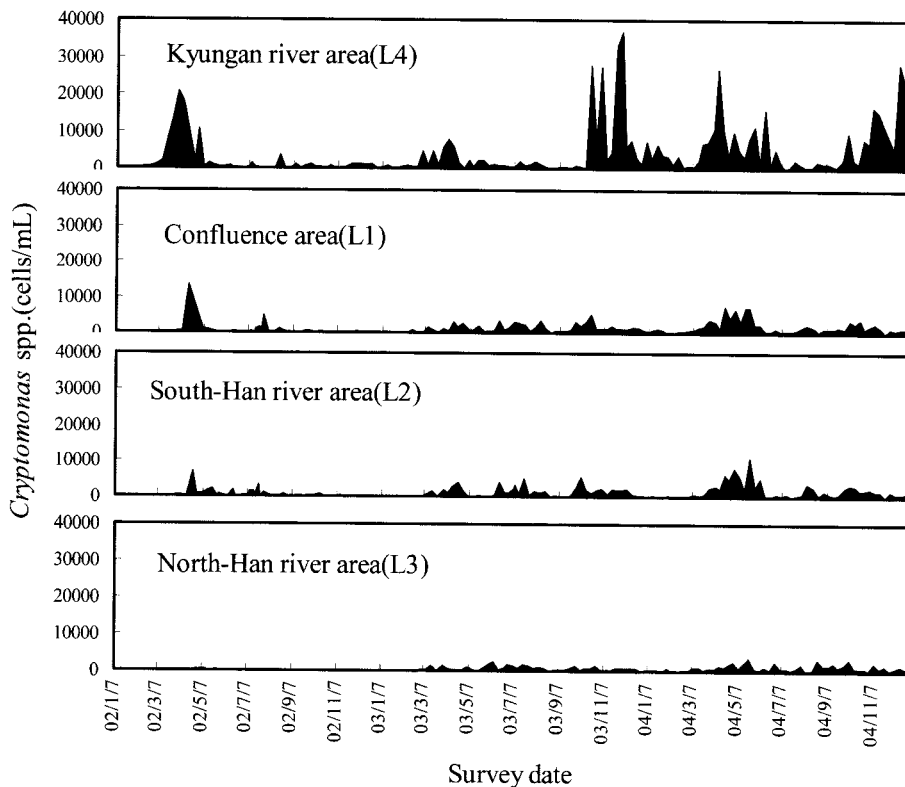


Fig. 4. Temporal variation of *Cryptomonas* spp. biomass at four water areas of Lake Paldang (2002~2004).

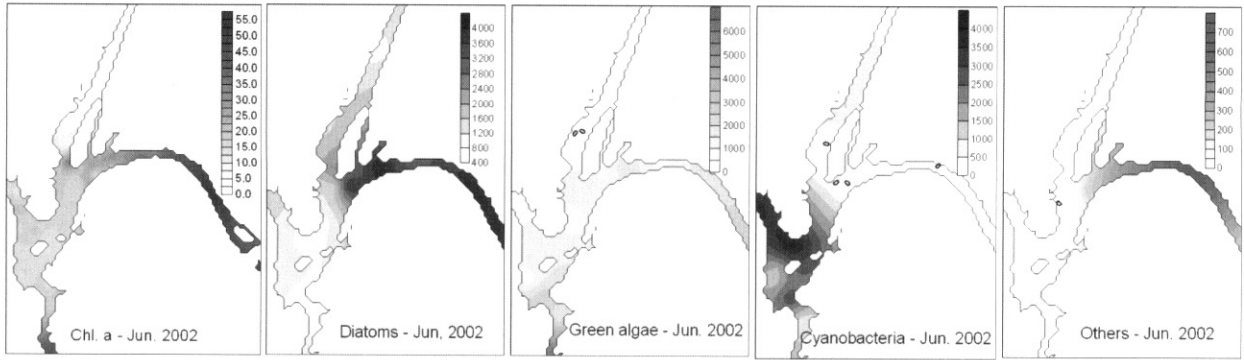


Fig. 5. Iso-concentration of chlorophyll a and cell numbers for dominant algal groups in Lake Paldang (Jun. 2002).

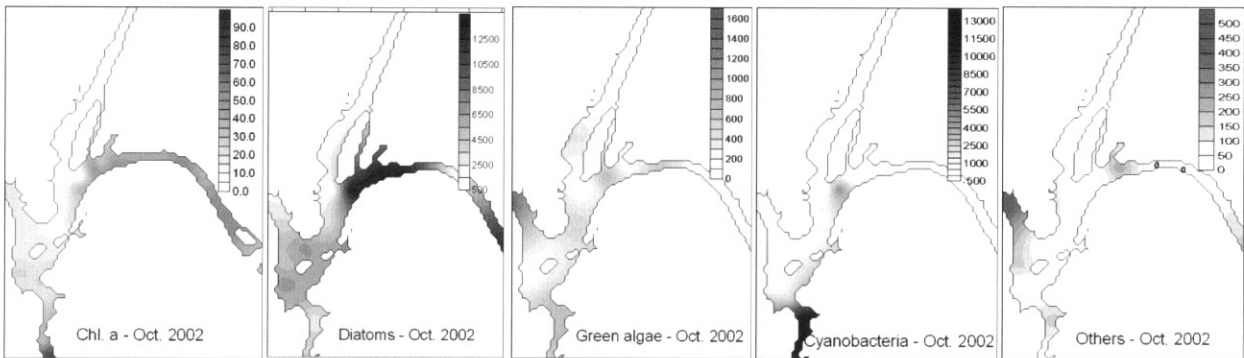


Fig. 6. Iso-concentration of chlorophyll a and cell numbers for dominant algal groups in Lake Paldang (Oct. 2002).

다. 이 시기의 규조류의 분포는 남한강에서 가장 높은 출현량을 보였으며 북한강 수역에서는 73%, 남한강 수역에서는 64%, 경안천 수역에서는 16%, 합류수역에서는 23%의 상대우점도를 보여 이 시기에 경안천과 합류수역은 녹조류 및 남조류의 천이가 이루어졌으나 남한강과 북한강 수역에서는 천이가 이루어지지 않고 규조류가 지속적으로 우점하는 것으로 나타나 같은 시기에도 수역별로 분류군별 발생량 뿐만 아니라 우점 조류의 천이 패턴의 시차가 존재하고 있음을 보여주었다.

여름철 집중강우시 대량의 유입량으로 인한 호수의 washing out 현상으로 매우 낮아졌던 조류발생량이 그 이후로 지속된 가을철 갈수기에 수체가 안정되면서 10월에 남한강과 경안천 수역을 중심으로 6월과 마찬가지로 다시 높은 조류발생량을 보였다(Fig. 6). 그러나 이 시기의 조류 분류군별 분포를 보면 초여름과는 다른 패턴을 보여 남조류의 경우 경안천 수역에서만 54%의 상대우점도를 보였으며 나머지 수역에서는 규조류가 80% 이상의 상대우점도를 보이며 규조류로의 천이가 일어난 것으로 나타났다. 수역별 평균 클로로필 a 농도로 보면 남한강 수역이 40.3 mg/m³, 경안천 수역이 32.2 mg/m³으로 유사한 값을 보였으나 우점 조류분류군의 분포는 전혀 다른 패턴을 보여 수역별로 조류증식환경에 차이가 있는 것으로 나타났고 따라서 팔당호의 조류증식억제대책의 적용에도 이런 조류 발생패턴을 고려한 시기별, 수역별 적용이 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 수질 환경요인의 통계적 분석

3.2.1. 상관분석

팔당호 내의 4 수역별로 매주 조사한 22개의 수질환경인자에 대한 자료를 선별, 정리하여 전체 조류현존량을 대변하는 지표인 클로로필 a 농도와 수질환경인자들간의 상관관계를 분석하였다. 각 수역별, 계절별로 클로로필 a 농도와 p<0.05 이상의 유의도를 가진 인자들을 상관관계수가 높은 순서로 나열한 결과를 Table 1에 나타내었다. 클로로필 a 농도 즉 전체 조류현존량과 상관관계가 있는 인자들은 수역별로 또 시기별로 달라 수역이나 시기에 따라 조류발생에 영향을 미치는 인자들이 서로 차이가 있는 것으로 나타났으나 북한강 수역의 가을과 겨울철을 제외한 모든 시기에서 pH가 클로로필 a 농도와 정(+)의 상관관계를 보여 팔당호의 조류발생과 pH가 가장 상관관계가 있는 것으로 나타났다. pH 농도는 탄소원(H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻)의 변화와 관련이 있고 조류가 광합성을 하게 되면 수중 용존탄소(HCO₃⁻)를 소모함으로써 pH가 높아지며 또한 pH가 높아짐으로써 금속류와 착물로 존재하던 인의 용출이 가속되어 조류의 성장이 촉진된다고 하였다(전 등, 1989; 금강수질검사소, 1995). 낙동강 하류의 조사에서도 클로로필 a 농도가 높을수록 pH와의 높은 양의 상관관계를 보여(김 등, 2002) 평균 클로로필 a 농도로 볼 때 부영양화에 속하는(US EPA, 1979) 팔당호에서도 조류의 증식에 따라 수체의 pH가 직접적으로 영향을 받고 있으며 또한 이런 pH 변동이 다시 조류의 증식에 영향을 미치고 있음을 시사하였다.

Table 1. Parameters of which correlation with chlorophyll a concentration are significant at the 0.05 level at the survey areas during 2002~2004 (PD:Paldang dam, CJ:Chungju dam, CP:Chungpyung dam, SH:South-Han, NH:North-Han, HRT:hydraulic retention time, +:positive correlation, -:negative correlation)

Period Water area	Whole year	Spring	Summer	Autumn	Winter
Confluence area	COD(+)	COD(+)	pH(+)	SS(+)	COD(+)
	pH(+)	TP(+)	WT(+)	COD(+)	pH(+)
	BOD(+)	SS(+)	EC(+)	BOD(+)	SS(+)
	EC(+)	pH(+)	COD(+)	pH(+)	NO ₃ (+)
	Irradiance(+)	TN(+)	BOD(+)	Irradiance(+)	BOD(+)
	Inflow of SH(-)	NO ₃ (+)	Inflow of SH(-)	WT(+)	TP(+)
	Inflow of PD(-)		Inflow of PD(-)		Efflux from PD(-)
	Efflux from PD(-)		Efflux from PD(-)		Inflow of PD(-)
	TN(+)		TP(-)		
	WT(+)		Inflow of NH(-)		
	Inflow of NH(-)		Rainfall of PD(-)		
	NO ₃ (+)				
	Rainfall of PD(-)				
South-Han river area	pH(+)	pH(+)	pH(+)	DO(+)	Si(-)
	Si(-)	DO(+)	HRT(+)	pH(+)	pH(+)
	DO(+)	Efflux from CJ(-)	DO(+)	TN(-)	Efflux from CJ(-)
	Efflux from PD(-)	DTP(-)	WT(+)	DTP(-)	Rainfall of PD(+)
	Inflow of PD(-)	Si(-)	Efflux from PD(-)	WT(+)	
	Efflux from CJ(-)	Efflux from PD(-)	Inflow of PD(-)	DTN(-)	
	PO ₄ (-)	Inflow of PD(-)	Inflow of CJ(-)		
	DTP(-)		PO ₄ (+)		
	Inflow of CJ(-)		Si(-)		
	Irradiance(-)		Rainfall of CJ(-)		
	Rainfall of CJ(-)		Irradiance(+)		
	HRT(+)		EC(+)		
	Rainfall of PD(-)		DTP(-)		
	TP(-)				
	TN(-)				
DTN(-)					
North-Han river area	Si(-)	COD(+)	Si(-)	COD(+)	TP(+)
	pH(+)	DO(+)	WT(+)		Rainfall of PD(+)
	BOD(+)	pH(+)	BOD(+)		Rainfall of CP(+)
	Efflux from CP(-)	NO ₃ (-)	EC(+)		DTN(+)
	Inflow of CP(-)	DTN(-)	pH(+)		TN(+)
	TP(+)		Efflux from CP(-)		Fe(+)
	EC(+)		Inflow of CP(-)		
	TN(+)		Efflux from PD(-)		
			Inflow of PD(-)		
			Rainfall of PD(-)		
Kyungan river area	pH(+)	TP(+)	pH(+)	COD(+)	pH(+)
	BOD(+)	EC(+)	EC(+)	NH ₄ (-)	NO ₃ (+)
	EC(+)	TN(+)	DO(+)	DO(+)	WT(+)
	DO(+)	HRT(+)	Si(-)	pH(+)	
	TN(+)	pH(+)	BOD(+)	PO ₄ (-)	
	TP(+)	DO(+)	Rainfall of PD(-)	NO ₃ (-)	
	Si(-)	Efflux from PD(-)	Efflux from PD(-)	DTP(-)	
	NH ₄ (+)	Inflow of PD(-)	WT(+)	DTN(-)	
	HRT(+)	NH ₄ (+)	Inflow of PD(-)		
	Efflux from PD(-)	Si(-)	PO ₄ (-)		
	Inflow of PD(-)	BOD(+)	Irradiance(+)		
	Rainfall of PD(-)				
	Irradiance(+)				
	DTN(+)				
NO ₃ (+)					

* in this analysis, field data observed weekly were used.

각 수역별 상관인자를 보면 합류수역에서는 COD와 BOD가 전 시기에 걸쳐 클로로필 a 와 정(+)의 상관관계가 나타났는데 이런 점으로 볼 때 팔당호에서의 조류의 증식이 호내의 유기물의 공급원이 되어 수계의 유기탄소농도의 상당부분을 차지함을 알 수 있다(김 등, 1996). 또한 팔당댐유입량, 방류량, 남한강 유입량 등 수리수문학적 인자와 부(-)의 상관관계를 보여 하천형 호수인 팔당호에서는 상류수역에서의 유입량이 증가하면 체류시간이 짧아져 조류증식이 억제되는 것으로 나타났다.

남한강 수역에서는 pH와 더불어 DO, DTP, 그리고 체류시간에 영향을 미치는 수리수문인자들이 조류증식에 주로 영향을 미치는 인자들로 나타났다. 특히 남한강 상류에 위치한 충주댐 방류량, 유입량 그리고 충주댐 유역강우량과 부(-)의 상관도가 높아 남한강 수역의 조류증식은 상류댐에서의 방류량이 증가할 때 영양물질 및 조류량의 희석 효과로 인한 증식저해(OECD, 1982)를 받고 있는 것으로 나타났다.

북한강 수역에서는 다른 수역에 비해 클로로필 a 농도와 상관관계가 있는 인자가 적었다. 이는 북한강수역이 팔당호의 4개 수역 중에서 영양염류농도나 유기물농도가 가장 낮은 등 양호한 수질을 보이고 있고 또한 조류증식도 적어(박 등, 2004) 환경인자와의 상관도가 낮은 것으로 추정된다. 그러나 남한강 수역과 마찬가지로 직상류에 위치한 청평댐의 유입량, 방류량과 부의 상관관계를 보여 북한강 수역 역시 상류 댐에서의 유입, 방류량에 조류증식이 직접적으로 영향을 받고 있음을 나타내었다.

팔당호 4개 수역 중에서 가장 오염도가 심하고 상시적으로

로 조류대량발생이 일어나고 있는 경안천 수역의 경우 pH와 더불어 DO가 전반적으로 상관관계가 높은 인자로 밝혀졌으며, 강우 및 방류량 등의 수리수문학적 인자에 의해 조류 증식이 크게 영향을 받는 시기인 여름철을 제외하고는 총인, 총질소 등의 영양염류와 상관도가 높은 것으로 나타났다. 특히 다른 수역에서는 전혀 보이지 않았던 암모니아성 질소가 경안천에서는 조류가 대량번식하는 봄과 가을철에 상관관계가 있는 것으로 나타나, 다른 수역에 비해 경안천 수역에서 암모니아성 질소의 농도도 높고 수중의 질소원 중에서 조류가 가장 먼저 흡수하는 형태가 암모니아성 질소인 점(Kappers et al., 1980) 등과 일치된 결과를 보여, 경안천 수역에서는 암모니아성 질소가 조류증식에 상당한 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있었다.

3.2.2. 단계적 선형회귀모형의 유도

팔당호 자료의 상관분석을 통해 각 인자간의 상관관계를 도출하였으나 인자들내에는 직, 간접적인 작용에 의한 상관관계 보다는 동일한 특성상 상관관계가 높게 나타나는 것들도 많다. 따라서 각 인자들의 특성을 파악하기 위해 조사된 자료를 요인분석하여 요인을 추출하고 요인별 점수를 얻었다. 또한 이 결과를 이용하여 클로로필 a 농도를 종속변수로 하고 요인분석결과 얻은 요인점수를 독립변수로 하는 단계적 회귀분석을 통해 선형회귀모형을 유도하였다.

요인분석을 통해 유도된 회귀모형 중에서 설명력이 가장 좋게 나타난 남한강 수역의 가을철 자료의 요인분석 결과를 Table 2와 3에 나타내었다. 총 6개의 요인이 추출되었

Table 2. Pattern matrix among environmental parameters affecting to the concentration of chlorophyll a during autumn period in the South-Han river area for each component extracted by factor analysis (PD:Paldang dam, CJ:Chungju dam, HRT:hydraulic retention time)

Variables	Component					
	1	2	3	4	5	6
WT	0.662	-0.470	0.130	-0.252	0.307	0.257
pH	0.303	-0.249	-0.051	0.470	0.664	0.127
DO	-0.221	-0.053	0.142	-0.042	0.850	-0.180
EC	-0.462	0.220	-0.323	0.657	-0.160	-0.177
TP	0.463	0.141	-0.416	-0.048	-0.067	-0.711
DTP	-0.097	0.937	-0.092	0.122	-0.148	-0.014
PO ₄ -P	0.187	0.924	0.042	-0.145	-0.005	0.028
TN	-0.164	0.053	-0.130	-0.042	-0.774	-0.278
DTN	-0.312	0.646	-0.435	0.204	0.005	-0.424
NO ₃ -N	-0.370	0.698	-0.322	0.372	-0.202	-0.109
NH ₄ -N	-0.328	0.161	-0.238	0.798	0.188	0.043
Fe	0.688	-0.537	0.297	0.138	-0.036	0.119
Si	0.854	0.308	0.047	-0.247	-0.219	0.057
Rainfall of CJ	-0.043	-0.087	0.921	-0.189	0.164	-0.039
Inflow of CJ	0.676	0.135	0.105	-0.222	0.090	0.604
Efflux from CJ	0.645	-0.297	-0.217	0.588	0.200	0.026
Rainfall of PD	0.217	-0.003	0.918	-0.173	-0.027	0.089
Inflow of PD	0.974	-0.092	0.046	-0.011	0.037	-0.029
Efflux from PD	0.981	-0.067	0.024	-0.044	0.058	-0.038
HRT	-0.912	0.175	-0.153	0.262	-0.069	-0.004
Irradiance	0.489	-0.408	-0.325	0.200	0.261	0.535

Table 3. Score matrix among environmental parameters affecting to the concentration of chlorophyll a during autumn period at the South-Han river area for each component extracted by factor analysis (PD:Paldang dam, CJ:Chungju dam, HRT:hydraulic retention time)

Variables	Component					
	1	2	3	4	5	6
WT	0.052	-0.068	-0.072	-0.134	0.113	0.070
pH	0.051	0.007	0.020	0.204	0.258	-0.017
DO	-0.060	0.046	-0.007	-0.148	0.501	-0.225
EC	-0.008	0.005	0.061	0.339	-0.120	-0.049
TP	0.141	-0.021	-0.084	-0.063	0.069	-0.529
DTP	0.047	0.301	0.056	0.077	0.001	0.102
PO ₄ -P	0.072	0.336	0.036	-0.063	0.101	0.091
TN	0.013	-0.101	0.027	0.063	-0.388	-0.111
DTN	0.016	0.147	-0.056	0.012	0.120	-0.209
NO ₃ -N	0.007	0.177	0.016	0.170	-0.059	0.051
NH ₄ -N	-0.001	0.051	0.079	0.399	0.017	0.062
Fe	0.113	-0.126	0.133	0.222	-0.156	-0.042
Si	0.163	0.138	0.007	-0.039	-0.091	0.027
Rainfall of CJ	-0.011	0.032	0.323	0.073	0.048	-0.146
Inflow of CJ	0.069	0.152	-0.061	-0.090	0.013	0.419
Efflux from CJ	0.144	-0.056	0.033	0.348	-0.020	-0.067
Rainfall of PD	0.041	0.067	0.337	0.134	-0.076	-0.041
Inflow of PD	0.183	0.024	0.034	0.082	-0.020	-0.115
Efflux from PD	0.182	0.033	0.017	0.053	0.002	-0.120
HRT	-0.143	-0.003	-0.004	0.066	-0.022	0.101
Irradiance	0.031	-0.059	-0.177	0.033	0.033	0.350

으며 제1요인은 수온, 철, 규소, 충주댐 유입, 방류량, 팔당댐 유입, 방류량, 팔당댐 체류시간과 높은 인자부하량을 보여 수온을 제외하고는 체류시간과 관련된 수리수문요인이었고, 제2요인은 용존총인, 인산염인, 용존총질소, 질산성질소와 높은 인자부하량으로 영양염류 요인이었으며, 제3요인은 충주댐 유역강우량, 팔당댐유역강우량, 양평측후소 강우량과 높은 인자 부하량을 보여 강우요인이었고, 제4요인은 전기전도도, 암모니아성 질소와 높은 인자부하량을 보였다. 제5요인은 pH, 용존산소, 총질소와 높은 인자부하량을 보였고, 제6요인은 총인, 일사량과 높은 인자부하량을 보였다.

요인분석에서 얻은 6개의 요인점수(Table 3)를 독립변수로 하고 전체 조류량을 대변하는 클로로필 a 농도를 종속변수로 하여 단계적 회귀분석을 실시한 결과 6개의 요인 중에서 요인 5, 2, 6만이 유의확율이 0.05보다 작아 회귀식에 사용되었으며 이들 요인들은 주로 조류의 광합성에 영향을 미치는 생리적인 인자와 필수 영양염류 인자로 구성된 요인이었다. 가을철에는 여름철 집중강우이후 강우빈도가 낮아지면서 체류시간이 길어져 수체가 정체되어 조류가 증식하기 쉬운 환경이 조성되며 또한 집중강우시기에 외부에서 유입된 오염물질이 수중에서 조류 증식에 이용되면서 조류의 광합성이 활발해지는 시기이므로 다른 시기에 비해 pH 등의 생리적 인자와 필수 영양염류와 관련된 요인에 의해 클로로필 a 농도가 결정되는 회귀모델이 유도된 것으로 판단된다.

각 수역별 시기별 요인분석결과로부터 유도된 선형회귀

모형식과 관련 계수를 Table 4에 나타내었다.

추정된 회귀모형의 타당성에 대해 분산분석을 통해 검정한 결과 북한강수역인 L3 지점을 대상으로 도출된 선형회귀모형을 제외한 모든 수역별 시기별 모형의 유의확률은 0.001이하로 매우 유의하였으나 R²는 0.222~0.803으로 수역과 시기에 따라 차이를 보였다. 수역별로는 남한강 수역과 경안천 수역을 대상으로 유도된 회귀모형의 R²가 다른 수역에 비해 높았으며 특히 남한강 수역에서 가을철을 대상으로 유도된 회귀모형의 R²는 0.803으로 가장 설명력이 좋은 것으로 나타났다. 시기별로는 전체시기를 대상으로 유도된 회귀모형에 비해 계절별로 유도된 회귀모형의 R²이 높아 조류발생에 대한 설명력이 좋은 것으로 나타났으며 특히 북한강 수역을 제외한 나머지 수역에서는 여름철 집중강우 이후에 강우량이 적어 수체가 안정되는 시기인 가을철 회귀모형의 R²이 높았다.

각 수역별, 시기별로 유도된 회귀모형에서 독립변수로 사용된 요인 중에서 베타계수로 보아 상대적 영향력이 가장 큰 요인들은 수역이나 계절별로 서로 다르게 나타나 계절별, 수역별로 조류 증식환경이 다른 것을 시사하였다. 합류수역의 경우 연중을 대상으로 하는 모형과 여름철 모형에서는 광합성과 관련된 물리, 화학적 인자들인 pH, 일사량, 수온, 전기전도도, BOD 등으로 구성된 요인이 상대적 영향력이 가장 큰 것으로 나타났으며 조류발생이 활발한 시기인 봄과 가을에는 유기물 인자들로 구성된 유기물 요인이 제1영향요인이었다. 남한강 수역에서 유도된 모형에서

Table 4. Stepwise regression models and their coefficients for prediction of chlorophyll a concentration by water areas and seasons in Lake Paldang

water area	Period	regression models*	R ²	F	Sig.	Parameters of most affective factor
L1	Whole year	Chl. a = 17.910+(5.546×F3)+(5.404×F5)+ (1.716×F4)+(-1.547×F1)	0.286	39.775	0.000	pH, EC, BOD, Irradiance
	Spring	Chl. a = 23.854+(5.867×F5)+(4.877×F4)+ (4.657×F6)+(-4.528×F3)+(4.285×F2)	0.415	14.210	0.000	BOD, COD
	Summer	Chl. a = 17.522+(7.555×F2)+(3.445×F5)+ (-2.861×F1)	0.257	15.642	0.000	WT, pH, EC, BOD, Irradiance
	Autumn	Chl. a = 16.064+(5.948×F4)+(3.100×F3)+ (-2.759×F7)+(2.184×F5)+(-2.053×F1)	0.581	14.703	0.000	BOD, COD
	Winter	Chl. a = 13.148+(4.218×F4)	0.222	27.435	0.000	pH, COD, SS
L2	Whole year	Chl. a = 25.980+(-8.328×F2)+(-4.580× F4)+(4.376×F5)+(-4.302×F1)+(-3.549×F3)	0.293	11.022	0.000	pH, TP, DTP, PO ₄ -P,
	Spring	Chl. a = 34.698+(-11.130×F2)+(9.587×F5)+ (-9.108×F4)	0.578	16.461	0.000	DO, Inflow of PD, Efflux from PD
	Summer	Chl. a = 20.655+(9.573×F6)+(9.412×F4)+ (-7.539×F2)+(-6.338×F1)	0.574	14.932	0.000	DO
	Autumn	Chl. a = 29.756+(13.684×F5)+(-9.413×F2)+ (5.788×F6)	0.803	16.322	0.000	pH, DO, TN
	Winter	Chl. a = 21.750+(10.169×F2)+(-6.232×F7)+ (-5.387×F4)+(-5.361×F5)	0.587	8.897	0.000	rainfall of CJ, rainfall of PD
L3	Whole year	Chl. a = 10.226+(2.317×F3)+(1.829×F5)+ (-1.188×F1)+(-1.150×F6)	0.260	11.764	0.000	pH, EC, Si, Irradiance
	Spring	Chl. a = 11.755+(-2.337×F1)+(2.143×F6)+ (1.773×F5)	0.371	7.079	0.001	TN, DTN, NO ₃ -N, Si, HRT
	Summer	Chl. a = 10.664+(-4.895×F3)+(2.648×F5)+ (-2.638×F6)+(-1.925×F1)	0.638	21.117	0.000	WT, pH, EC, Si
	Autumn	Chl. a = 10.063+(-3.116×F5)	0.391	8.979	0.010	COD
	Winter	Chl. a = 7.500+(2.822×F4)	0.388	17.718	0.000	TP, Fe, rainfall of PD, rainfall of CP
L4	Whole year	Chl. a = 91.211+(59.232×F3)+(20.474×F1)+ (18.923×F4)+(-12.794×F2)	0.502	33.728	0.000	pH, DO, BOD, Si
	Spring	Chl. a = 155.270+(84.468×F4)+(47.301×F1)	0.530	20.845	0.000	pH, TP, Si
	Summer	Chl. a = 57.083+(32.687×F1)+(-15.533× F2)+(-13.403×F5)+(11.608×F4)+(-10.961×F3)	0.556	11.791	0.000	WT, pH, EC, BOD, Si, Irradiance
	Autumn	Chl. a = 86.044+(43.101×F3)+(41.604×F4)+ (-34.920×F1)	0.739	11.338	0.001	pH, Si, Irradiance
	Winter	Chl. a = 68.847+(-19.130×F3)+14.719× F4)+(10.374×F2)	0.599	12.940	0.000	pH, Fe, Si, rainfall of PD

* F1 ~ F6 in regression models are the major factors used for regression analysis among principal factors extracted from factor analysis.

는 다른 수역에 비해 팔당댐의 유입량, 방류량, 팔당호 및 충주호의 유역 강우량 등의 수리수문인자들로 구성된 수리수문 요인이 제1영향요인으로 나타나 팔당호로 유입되는 하천 중에서 유입량이 가장 많은 남한강 수역에서는 상류 수계에서의 유입 등으로 인한 수리학적 체류시간에 의해 조류발생이 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다. 북한강수역을 대상으로 유도된 회귀모형의 R²는 다른 수역에 비해서는 대체적으로 낮아 상관분석에서와 유사한 결과를 보였고 경안천 수역의 회귀모형은 주로 수온, pH, 일사량, 영양염류 등 광합성과 관련된 물리, 화학적 인자들로 구성된 요인이 상대적 영향력이 가장 높은 것으로 나타났다.

4. 결론

팔당호에서 2002년부터 2004년까지 최근 3년간 수역별

조류발생 패턴을 조사한 결과, 클로로필 a 농도로 볼 때 일주일간격으로 급격하게 증감을 반복하고 있으며 매해의 집중강우 시기에 따라 조류발생패턴과 발생량이 현저하게 달라지는 등 일정한 패턴을 갖지 않고 주변 환경인자에 따라 매우 가변적임을 알 수 있었다. 한편 2002년도의 계절별로 팔당호 수역의 조류분류군별 분포현황을 조사한 결과 수역에 따라 우점조류군이 서로 다르게 나타나 팔당호 조류발생은 수역에 따라 그리고 시기에 따라 서로 다른 시, 공간적 분포 특성을 가진 것으로 조사되어 팔당호의 조류 증식제어대책의 적용에도 이런 조류발생패턴을 고려한 시기별, 수역별 적용이 필요한 것으로 나타났다.

통계적 기법을 이용하여 환경요인과 조류현존량간의 상관관계를 시기별 및 수역별로 분석한 결과 시기별로 그리고 수역별로 클로로필 a 농도와 상관도가 높은 인자들이 서로 다른 것으로 나타났으며, 팔당호 수역별 환경인자를

요인분석하여 그 요인을 독립변수로 하고 전체조류량을 나타내는 클로로필 a 농도를 종속변수로 하는 다중회귀모델을 Stepwise법으로 유도한 결과, 전체적으로 조류발생에 대한 모형의 설명력은 높지 않았으며, 지점별, 시기별로 영향력이 큰 요인들이 서로 다르게 나타났으나 종합적으로 보면 pH, BOD, COD 등의 광합성관련 생리적 인자 및 유기물관련 인자의 영향력이 큰 것으로 나타났고, 조류증식의 필수 영양염류인 인과 질소 등의 영양염류 관련 인자의 영향력은 낮았다.

참고문헌

- 공동수, 윤일병, 류재근, 팔당호의 물수지 및 수문특성, *한국육수학회지*, **29**, pp. 51-64 (1996).
- 권숙표, 정용, 유진수, 신민용, 김정태, 한강하류 수질에 대한 인자분석 및 중회귀 분석, *한강상수도협회지*, **2**, pp. 6-17 (1974).
- 금강수질검사소, 대청호 수질보전 종합대책에 관한 연구(I), *국립환경연구원보*, **19**, pp. 419-429 (1995).
- 김동섭, 김범철, 황길순, 박주현, 팔당호의 부영양화 경향 (1988-1994), *한국수질보전학회지*, **11**, pp. 295-302 (1995).
- 김미숙, 정영률, 서의훈, 송원섭, 낙동강 부영양화와 수질환경요인의 통계적 분석, *Algae*, **17**(2), pp. 105-115 (2002).
- 김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규, 부영양한 낙동강수계에서 유기물오염에 대한 조류 1차 생산의 기여도, *한국조류학회지*, **11**, pp. 213-237 (1996).
- 박영규, 이철희, 정희수, 다변량분석에 의한 금호강의 수질 평가, *영남대학교 환경 문제연구소보*, **6**(1), pp. 101-117 (1986).
- 박혜경, 변명섭, 김은경, 이현주, 전명진, 정동일, 팔당호 상류 유입하천의 수질 및 식물플랑크톤 분포 패턴, *한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 615-624 (2004).
- 박혜경, 정원화, 팔당호의 장기간 식물플랑크톤 발생 추이, *한국물환경학회지*, **19**, pp. 673-684 (2003).
- 오영민, 백성욱, 주성분분석을 이용한 하천수질 자료의 분석, *대한환경공학학회지*, **6**(1), pp. 56-62 (1984).
- 장주영, 다변량 해석에 의한 낙동강 하구 해역 수질특성의 평가, 부경대학교 석사 학위논문 (1999).
- 전상호, 박용안, 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출가능성에 대하여, *한국육수학회지*, **22**, pp. 262-271 (1989).
- 정영호, *韓國 動植物 圖鑑* 제 9 권 淡水藻類편 아카데미출판사 (1968).
- 환경부, *수질오염공정시험방법* (1996).
- 廣瀬弘幸, 山岸高旺 編, *日本淡水藻類圖鑑*, 内田老鶴園 (1982).
- APHA, AWWA, WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th ed., New York (1994).
- Kappers, F. I., The Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* and the Nitrogen Cycle of the Hypertrophic Lake Brille (The Netherlands). In: Barica, J., Mur, L. F. and Junk W. (eds), *Developments in Hydrobiology*, **2**, pp. 37-48 (1980).
- Komárek, J., 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 (1991).
- OECD, *Eutrophication of Waters-Monitoring, Assessment and Control*, OECD, p. 154 (1982).
- Sakamoto, H., Hamaguchi R. and Iwase, M., Evaluation of River Water Pollution in the Chanai Dixtrict of Eastern Hokkaido by the Multivariate Analysis Method, *Water and Waste*, **30**(3), pp. 239-245 (1988).
- US EPA, *Quantitative Techniques for the Assessment of Lake Quality*, US EPA 440/5-79-015 (1979).