

## 댐호화된 하천의 조류 과다 발생원인과 해소 방안 - 낙동강 물금 지역의 수질 분석 데이터를 중심으로 -

양시천<sup>1)</sup> · 夏晔晔<sup>2)</sup> · 강태호<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (주)한국아쿠오시스 대표이사 · <sup>2)</sup> 동국대학교 대학원 조경학과 · <sup>3)</sup> 동국대학교 경주캠퍼스 조경학과

## Causes and Overcoming of the Algae Excess in a Dam Water - Based on the Data of Water Quality Analysis of Mulgum Area -

Yang, Shi-Chun<sup>1)</sup> · Xia, Tian-Tian<sup>2)</sup> and Kang, Tai-Ho<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> President of Aquosys Co., Yongjamro, Namgu, Ulsan,

<sup>2)</sup> Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Dongguk University,

<sup>3)</sup> Professor, Dept. of Landscape Architecture, Dongguk University Gyeongju Campus.

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze a term of decade of water quality data of the Mulgum intake station on the Nakdong river(dam) to find the cause of algal blooms and to set an alternative to prevent artificial lake water pollution. Our study shows that water quality changes have regular periodic regularity and there was a certain correlation between specific analytical items. According to the analysis results of each factor, the decline in precipitation was not the main reason for algal blooms. TP concentration had a slight effect on Chl-a concentration but was not a limiting nutrient of a bloom. TN concentration had a strong correlation with Chl-a and strongly negative correlation with temperature, but was not a bloom's limiting nutrient, and was only a dependent variable. As the temperature was negatively correlated with the Chl-a concentration, it is found that the aspect of the ecological influence of the temperature was the most important factor of the phytoplankton concentration change. The N/P ratio lies under a power function with a high degree of reliability by the TP concentration, and the phenomenon appeared to be the same as the results of two other comparative areas. This result confirms that TN is dependent on TP and the biota in the lake that TN is a dependent variable whose concentration

**First Author** : Yang, Shi-Chun, President, Aquosys Co., 791, Yongjamro, Namgu, Ulsan 44784, Korea

Tel : +82-52-222-6051, E-mail : scyang65@hanmail.net

**Corresponding Author** : Kang, Tai-Ho, Professor, Dept. of Landscape Architecture,

Gyeongju Campus of Dongguk University, Tel : +82-54-770-2231, E-mail : kth@dongguk.ac.kr

**Received** : 14 November, 2016. **Revised** : 8 August, 2017. **Accepted** : 3 August, 2017.

is determined by TP it. In conclusion, the increase in lake bloom is the result of a food chain change, and it is necessary to control the ecosystem by the food chain in the lake in order to reduce the lake's bloom. In particular, it is important to keep the benthic ecosystem as wide as possible in the aerobic state.

**Key Words :** *Fluctuation of Algal Population, Lake water pollution, Ecological influence, Correlation, Nutrient Elements*

## I. 서 론

호수는 육지 생태 시스템의 중요한 구성 인자이고 인간의 생존과 사회, 경제의 발전과 관련한 환경과 기초 자원을 제공하는데, 근세기 들어서는 부족한 수자원의 확보를 위하여 수많은 댐이 건설되었으며 이들은 인공 호수로서의 역할을 담당하고 있다. 조류의 과다 발생은 광범위한 지역의 많은 호수와 인공호에서 대두되는 공통된 문제이며, 수자원 적용상의 제약은 물론 인간의 건강과 경제의 지속 가능한 발전에 직접적인 영향을 주는 심미적인 경관의 훼손, 부영양화, 악취와 독성물질 생성 등의 수질 악화를 촉진시키는 주요 원인이 된다. 그러므로 수생태 환경 보호를 위해 조류의 과다 발생의 원인과 위해 요인을 찾고 해소 방안을 수립하는 것은 중요한 과제이다.

1934년 Redfield에 의하여 해양에서의 광합성 플랑크톤 생체 내의 탄소(C)와 질소(N), 인(P) 간의 존재비가 106:16:1 인 것으로 제시된 이래로 수많은 후속 연구가 이루어졌으며, Sakamoto는 광합성플랑크톤의 생체 질량에 있어서 총질소(TN):총인(TP)의 비가 17이상인 경우와 10이하인 경우 및 10~17 사이인 경우들로 나눈 후 이들 각각의 경우에서 식물성플랑크톤의 증식은 TP 또는 TN 및 양쪽 성분 모두에 각각 제한을 받는다고 하였고(Sakamoto, 1966) 일부 연구자들은 TN 보다는 용해성무기인(DIN)과의 비; DIN:TP를 보다 적절한 지표로 보기도 하는 등(Bergström, 2010, Kolzau et al, 2014), 수계 내

또는 수계 유입수 중의 질소와 인 등 영양물질의 양을 조류 과다 발생의 가장 중요한 원인으로 간주하고 있다(Park et al, 1987, Kim et al, 2012). 그리하여, 연구자들은 유해한 조류의 제어 방법으로써 호수 내의 영양물질의 비율과 제한물질을 파악하여 제한 요소 성분을 통제하는 방안을 제시하기도 하였으나(Ma et al, 2015), 부영양화 된 얇은 호수에 대해 TN:TP 비율로서 N제한 호수와 P제한 호수로 구별하여 지표로 삼는 것은 적절하지 않다는 견해도 있으며(Lv & Chen, 2011), 얇은 호수에 대한 장기간의 데이터와 시뮬레이션 연구 결과에 의하여 질소만이 주요 제한요소인 것으로 보고되기도 하였다(Rolighed et al, 2016).

연구자들은 조류 과다 발생의 원인 파악과 문제 해소를 위하여, 조류 발생을 4계단으로 나누고 각 계단에 따른 효과적인 방안을 찾고(Kong et al, 2005), 조류의 독특한 생리학적 내부 특성과 환경 인자를 서로 결합하여 연구하고(Ma et al, 2013), 여러 지역의 다른 호수를 대상으로 조류 과다 발생의 다양한 영향인자를 분석하였다(Dokulil et al, 2000). 또한, 수리학적 거동에 대한 해석을 수행하여 조류발생 현황 및 원인을 분석하고(Cho et al, 2012), 조류발생 원인 및 형태를 수량, 수질, 기상측면에서 구체적으로 규명하여 적용 가능한 조류제어 방안들을 제시하고(Ma et al, 2015, Mo et al, 2013), 조류 해소를 위하여 약품 응집, 황산동 주입방식, 물속 방전 및 초음파 살조 등 여러 가지 방안들을 소개하고(Lee et al, 2012), 생물학적 제어를 목적으로

살조세균 및 섬모충을 적용하는 방안을 제시하기도 하였으며(Kim et al, 2004), 인공 배양된 포식성 천적생물인 물벼룩을 이용하여 조류를 제거하는 시도(Nam et al, 2011)와, 이매패 말조개를 이용하여 조류를 제거하는 연구를 하기도 하였다(Park et al, 2010). 이와 같이 군집구조, 기상조건, 영양성분, 생물상 변동과 출현 종 고찰 등의 물리·생태적 인자와 관련한 다양한 시도와 많은 연구가 있었지만 시아노박테리아와 같은 식물성 플랑크톤의 대번식의 문제와 같은 경우에 대하여 이렇다 할 명쾌한 설명은 아직까지 없는 실정이다(Ma et al, 2013, Kim, 2013).

본 연구는 이러한 연구 결과들을 바탕으로 하여, 강 하구에 설치된 댐에 의하여 유속이 느려져서 인공호 상태로 된 낙동강의 한 지점(물금)을 대상으로 장기간에 걸쳐 축적된 수질 데이터의 사례를 분석하여 조류 농도 변화에 대한 납득할 만한 영향 원인을 찾고, 문제점의 근본적인 해소를 위한 방향을 제시하는 목적으로 진행하였다.

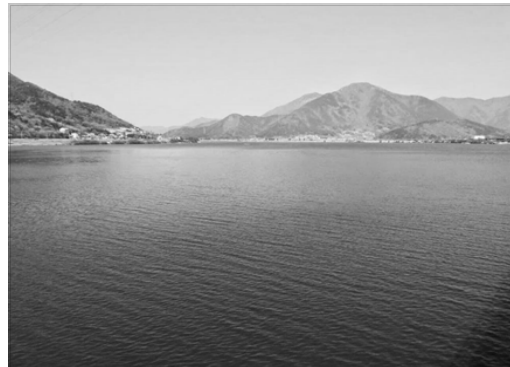
여기에서, 관련 수질 데이터는 매월 1회씩 분석하여 제시되는 대한민국 환경부의 물환경정보시스템(Water Information System, <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do>)에서 해당 자료를 다운로드하였으며, 회귀분석을 포함한 통계학적 해석을 통하여 수질 분석 항목간의 상관성 여부의 파악과 함께 조류발생량 변동의 직접적인 원인인자를 찾고자 하였다. 이와 아울러 서로 다른 지역에 존재하는 2개의 댐호(팔당 2 및 회야호1 지점)에서의 특정 분석 항목을 앞의 물금의 경우와 같은 조건 하에서 추가로 함께 대비하여 조류발생량 변동의 원인인자 파악의 자료로 삼았다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구대상지역의 개황

#### 1) 물환경측정망 소개

대한민국 환경부는 ‘환경정책기본법’ 등 관련



(a) View of 'Mulgum' in the Nakdong River



(b) Surrounding River System of 'Mulgum'  
(From National Institute of Environmental Research)

**Figure 1.** The View of 'Mulgum' in the Nakdong River and Surrounding River System

법령에 따라서 국내의 하천·호소 등 공공수역의 수질 및 수생태계의 실태를 파악하기 위한 ‘물환경측정망’을 설치, 운영하고 있다. 이 물환경측정망은 ‘수질측정망’을 비롯하여 ‘총량측정망’, ‘자동측정망’, ‘퇴적물측정망’, ‘방사성물질측정망’, ‘생물측정망’으로 구성되어 있는데, 환경부와 국립환경과학원, 물환경연구소, 한국수자원공사 등 여러 기관이 참여하여 운영되고 있으며, 일반 수질측정망의 경우 대상을 하천과 호소, 농업용수, 도시관류, 산단하천으로 나누어 1,828개 지점을 선정(2016년 말 현재)하여 주기적인 수질 분석을 실시하여 이 결과를 웹사이트 ‘물환경정보시스템’에 지속적으로 입력, 일반에

공개하고 있다.

## 2) 검토대상지역 ‘물금’

본 연구는 낙동강 하류 지역인 경상남도 양산시 물금읍 물금리 경도 128도58분20초, 위도 35도18분55초 물금취수장취수탑(낙동강물환경연구소 일반 수질측정지점)의 시료에 대한 시험 데이터를 주 대상으로 검토 하였는데, 이 지점은 Figure 1에서와 같이 낙동강하구언으로부터 약 27km 상류 지점으로서 하구언에 의하여 수위가 상승하고 유속이 느려져서 댐호처럼 작용하고 있다. 또한 낙동강 하구언은 1987년11월에 완공되어 2003년 시점에서는 15년 이상이 경과되었으므로 주어진 조건 하에서 하나의 생태계로서 안정화가 이루어졌다고 볼 수 있는데, 검토 대상 기간(2003년~2012년) 동안의 평균 수온은 16.18℃, TP 농도 평균은 0.123mg/L 수준으로서 TP와 관련한 OECD 관리모델에 따르면(Vollenweider & Kerekes, 1982) 부영양화 정도가 심하였다.

## 3) 참고지역; ‘팔당2’ 및 ‘회야호1’ 지점

물금의 수질 측정 데이터와 함께 비교 검토하기 위하여 서로 다른 수계로서 상대적으로 멀리 떨어져 위치하는 한강 팔당댐 상의 팔당2 지점(경도 127도17분7초, 위도 37도31분16초)과 비교적 가까운 곳에 위치하는 회야강의 회야댐 상의 회야호1 지점(경도 129도16분54초, 위도 35도28분21초)을 선정하여 일부 수질 데이터를 대비하였는데, 팔당댐과 회야댐은 1973년도와 1986년도에 각각 완공이 되었으며, 2003년~2012년 기간 동안의 대상 지점의 평균 수온은 각각 13.00℃와 15.58℃이었으며, TP 농도의 평균은 각각 0.046mg/L와 0.053mg/L이었다.

## 2. 연구항목 및 연구방법

본 연구는 환경부 물환경정보시스템 상에 게시된 낙동강물환경연구소의 조사결과 데이터를

엑셀파일로 내려 받아서 하나의 사례로 선정하였으며, 2003년1월~2012년12월의 기간 동안 매월 1회씩 시험 항목별로 분석한 각각 120개의 데이터를 대상으로 하였다(n=120).

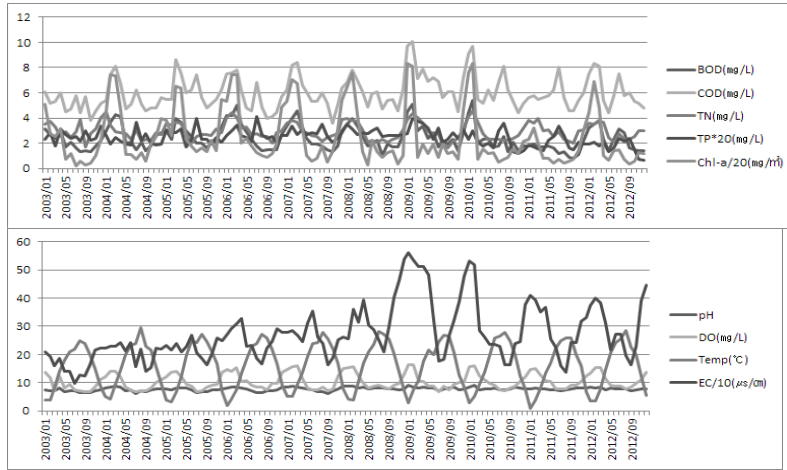
연구항목은 생물학적산소요구량(BOD, mg/L), 화학적산소요구량(COD, mg/L), TN(mg/L), TP(mg/L), 클로로필a(Chl-a, mg/m<sup>3</sup>), 수소이온농도(pH), 용존산소(DO, mg/L), 수온(Temp, °C), 전기전도도(EC, µS/cm) 등을 주대상으로 하였다.

연구 방법은 대상 기간인 10년 동안의 월별 수질 각 항목의 저장 데이터를 내려 받아 수질의 주기성 및 분석 항목 간의 연동성을 관찰하였고, 다음으로 각 항목의 변화 상황은 SPSS18.0을 이용하여 회귀분석을 통한 데이터 쌍 간의 상관관계와 이동평균 시계열변화 등을 조사함으로써 연구 대상 수계의 조류 발생의 구체적인 원인을 파악하였다. 마지막으로는 댐호의 수질 개선을 위한 제언과 이번 연구 결과에 따른 향후 연구의 방향을 제시하고자 한다. 여기에서 데이터 간의 상관관계 계수는 Rea & Parker의 해석에 따랐는데, 이에 의하여 상관계수 r의 절대치(|r|)가 0.0~0.1이면 거의 상관관계가 없으며, 0.1~0.2는 약한 상관관계, 0.2~0.4는 보통의 상관관계, 0.4~0.6은 비교적 강한 상관관계, 0.6~0.8은 강한 상관관계, 0.8~1.0은 매우 강한 상관관계 하에 있는 것으로 간주하였다(Rea & Parker, 2005).

## III. 결과 및 고찰

### 1. 물금의 수질 동태

2003년부터 2012년까지의 물환경정보시스템 상의 자료를 엑셀프로그램에 내려 받아 수질의 월별 변화를 시계열 변동 그래프로 형성시켰다(Figure 2). 이에 따르면, 수질의 변화는 주기성을 가지고 있으며, 매년 초에 수온을 제외한 다른 항목들이 공통적으로 높은 수치를 나타내고 있으며, 각 항목들 간에는 상당한 연동성이 눈



**Figure 2.** Monthly Water Quality Change in Mulgum  
(Data from Water Environment Information System of Ministry of Environment)

**Table 1.** Annual Rainfall in the Nakdong River(Miryang) and EC of Mulgum (2003~2012)

Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Rainfall(mm)	1685.3	1377.4	971.5	1324.5	1061.0	1229.4	1130.8	1251.5	1529.8	1370.4
EC(µS/cm)	165	207	220	255	260	340	395	291	286	305

(r = -0.3699)

(Rainfall Data from National Climate Data Service System, Republic of Korea)

에 떨어진다.

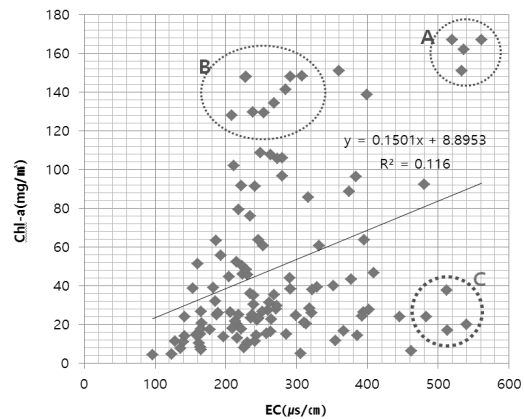
수질 분석 자료에 따르면, BOD와 COD의 최고치는 각각 5.4mg/L와 10.1mg/L 이고 TN과 TP는 각각 4.582mg/L와 0.207mg/L 이며, Chl-a의 변화 폭은 4.6~167.3mg/m<sup>3</sup> 이다. DO와 pH는 각각 6.7~16.4mg/L와 6.3~9.1의 구간에서 주기적으로 변화하였다.

## 2. 조류 대량 발생의 원인 예상 인자 조사

### 1) 강수량의 감소

일반적으로 강수량의 감소가 조류의 대량 발생을 일으킬 수 있다고 생각되어질 수 있는데, Figure 3을 참조하면, 수중의 Chl-a 농도와 EC 간의 상관계수(이하, 절대치 |r|로 비교)는 0.3406으로서 보통의 상관관계로 나타났다. EC는 수중 전해물질 농도의 지표로서 어떤 수계에 유입되는 오염물질의 양에 대한 상대적인 강수의 유

입량 증감에 따라서 낮아지거나 높아지는 것으로 알려져 있는데(USGS, 2003), 기상청 국가기후데이터센터의 통계자료에 따르면 조사된 기간 중 낙동강 지역(밀양시 기준)의 각 연도별 강수량은 Table 1에서와 같이 971.5~1683.3mm



**Figure 3.** Scatter Plots of Chl-a with EC

의 범위에서 나타났으며 (<http://sts.kma.go.kr/jsp/home/contents/applystatic11/view.do?applyStaticId=krpnsIClmStcs>) 같은 연도의 검토대상 지역의 연평균 EC와의 상호 상관계수는 -0.3699로 나타나서 강수량의 증가와 전기전도도 간에는 보통 수준의 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

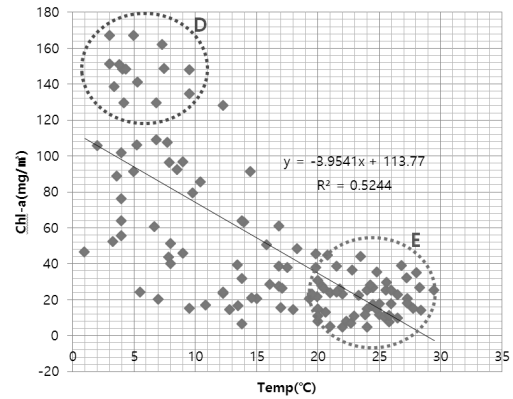
Figure 5 (a)의 EC와 수온의 상관관계를 보면 EC(오염원의 희석 정도)는 수온(계절적 변화)과 비교적 강한 상관성이 있지만( $r=-0.4898$ ), 같은 계절에서도 큰 폭의 편차를 나타내었다.

이와는 독립적으로 Chl-a 농도는 조류 양의 증가에 따라서 높아지는데, Figure 3에 의하면 “A” 군의 경우 EC가 높은 시기에 Chl-a 농도가 높게 나타났으나, “B” 군의 경우 EC가 충분히 낮음에도 Chl-a 농도는 높게 나타나고 있으며, “C” 군의 경우는 EC가 매우 높음에도 Chl-a 농도는 낮게 나타났다.

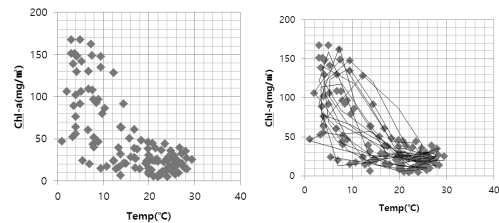
## 2) 수온의 상승

Figure 4 (a)의 Chl-a 농도와 수온 간의 산점도를 보면 Chl-a 농도는 수온과 강한 역 상관관계로 나타나고 있으며( $r=-0.7242$ ), Chl-a의 대량 발생은 5°C 내외의 저 수온 상태에서 주로 나타났다(“D” 군), 수온이 높은 시기의 Chl-a 농도는 최저치로 낮아져 있어서(“E” 군), 이 수계에서는 광합성 플랑크톤류가 수온이 높고 일조량이 풍부한 시기(하절기)가 아닌 반대의 시기(동절기)에 고 농도로 번성하고 있는 것으로 나타났다.

Figure 4 (c)에서는 2003년~2012년의 Chl-a와 수온의 산점도 상에 각개 측정치의 전후 2개월별 이동평균 점을 연결하는 곡선을 내려 받았다. 이 이동평균 곡선에 따르면, Chl-a 농도는 겨울철에 급상승하고, 봄철에 급 하락한 후 여름철과 가을철에 저점에서 안정된 후 다시 겨울철에 급상승하는 순환 패턴을 보이고 있다. 이를 다시 Figure 4 (d)와 같이 2008.01.~2010.12.

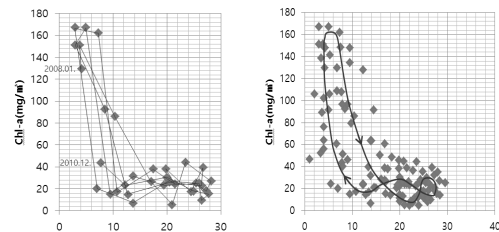


(a) Scatter Plots and Correlation of Chl-a with Water Temp



(b) Scatter Plots

(c) Moving Average Curve, 2 Months



(d) Time-series Fluctuation (2008~2010) (e) Expected Transition Curve

Figure 4. Time-series Fluctuation of Water Temp with Chl-a

의 3개년 간으로만 축소, 한정된 후 Chl-a의 시계열 변화 곡선으로 작성하여 자세히 살펴보면 겨울철의 급등과 그 외 계절의 주기적인 등락을 수반하는 순환 현상을 보다 명확히 확인할 수 있다.

## 3) DO와 BOD, COD

Figure 5 (a)에 의하면 이 수계에서 DO 농도는 수온과 매우 강한 역 상관관계를 가지는데

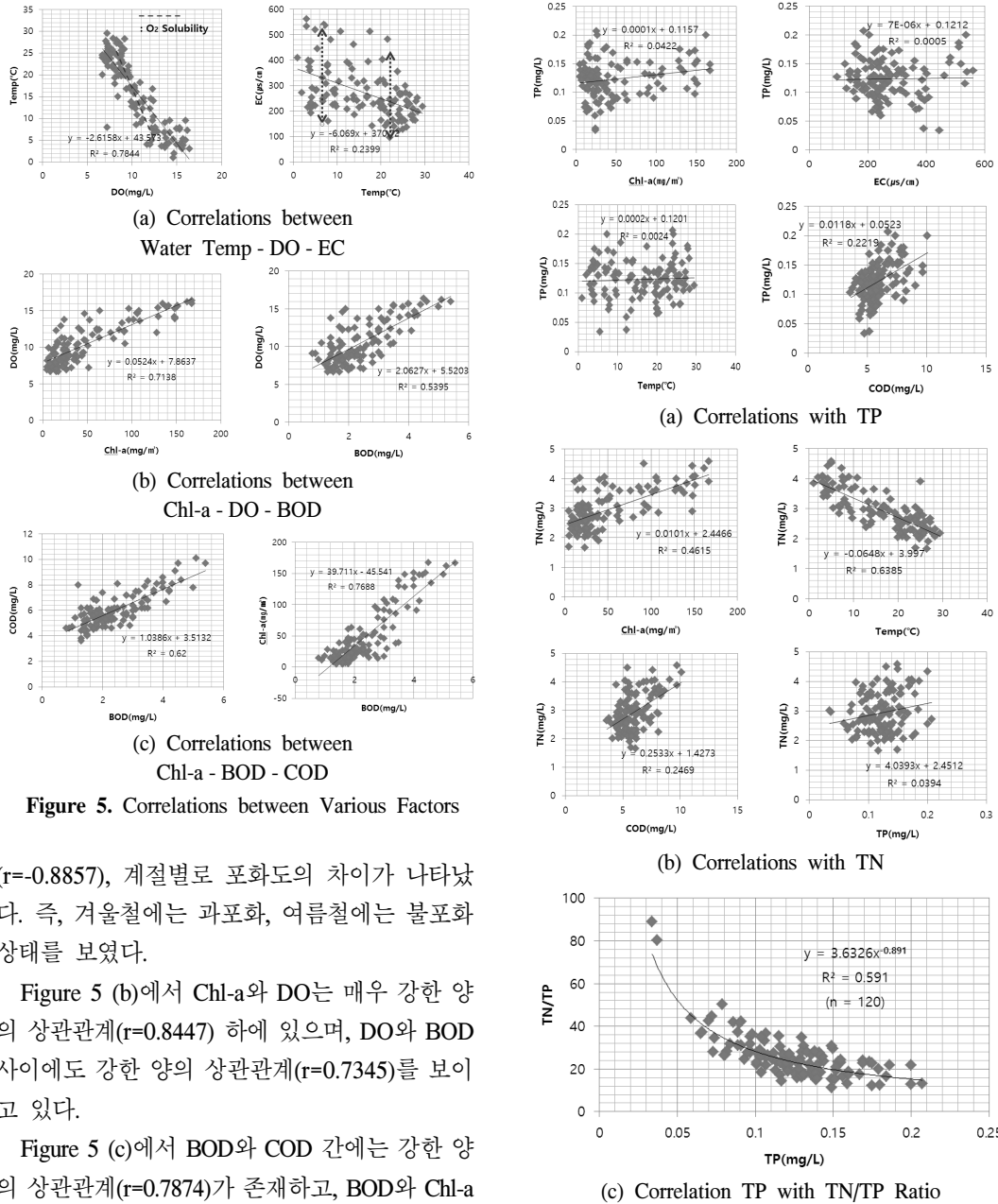


Figure 5. Correlations between Various Factors

( $r=-0.8857$ ), 계절별로 포화도의 차이가 나타났다. 즉, 겨울철에는 과포화, 여름철에는 불포화 상태를 보였다.

Figure 5 (b)에서 Chl-a와 DO는 매우 강한 양의 상관관계( $r=0.8447$ ) 하에 있으며, DO와 BOD 사이에도 강한 양의 상관관계( $r=0.7345$ )를 보이고 있다.

Figure 5 (c)에서 BOD와 COD 간에는 강한 양의 상관관계( $r=0.7874$ )가 존재하고, BOD와 Chl-a 간에도 매우 강한 양의 상관관계( $r=0.8768$ )가 나타나고 있다.

4) TP, TN 농도 및 TN/TP 비

인과 질소는 식물 생장의 중요한 영양인자이다. 그러나 Figure 6에 따르면 TP 농도는 Chl-a 농도와 상관성이 약하거나 보통인 수준으로 나

타내고 있다( $r=0.2054$ ).

그리고, TP 농도는 강수 유입의 지표인 EC ( $r=0.0224$ )나 계절의 변화에 따른 수온( $r=0.0490$ ) 등과는 아무런 상관성이 없는 것으로 나타나고 있으며 TN 농도와도 일차 함수적으로는 거의 상

Figure 6. Scatter Plots of TP, TN and TN/TP Ratio

관관계가 없는 것으로 나타났다( $r=0.0628$ ).

한편으로 TN은 Chl-a 농도와 강한 양의 상관관계( $r=0.6793$ ) 하에 있으며, 동시에 수온과는 강한 음의 상관관계( $r=-0.7991$ )를 보이고 있다.

또한, TP와 TN 농도는 각각 COD와 공히 비교적 강한 양의 상관관계를 나타내었다. (COD-TP;  $r=0.4711$ , COD-TN;  $r=0.4969$ )

TN/TP 비는 앞의 서론에서 살펴본 바와 같이 많은 연구자들에 의하여 조류 증식의 매우 중요한 변수로 간주되고 있으며, 해양 광합성플랑크톤의 경우 그 성분비가 거의 일정한 것으로 파악되고 있다. 그런데, Figure 6 (c)의 산점도와 추세곡선을 보면 TN 농도는 높은 신뢰도( $r=0.7688$ )의 함수관계에 의하여 TP 농도에 의하여 일정한 수준의 TN/TP 비율로 구성되는 제약을 받고 있는 것으로 나타났다(상호 거듭제곱 함수관계,  $y = 3.6326x^{-0.891}$ ).

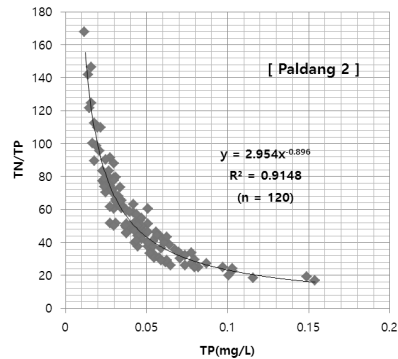
### 5) 타 지역 댐호의 수질 데이터

지리적으로 서로 다른 수계인 한강의 팔당댐 상의 팔당2 지점과 회야강의 회야댐 상의 회야호1 지점의 2003년~2012년의 10개년 동안의 각 지점별 120개 시료의 분석 결과치 중에서 TP 대비 TN/TP의 비율을 산점도 상에 나타내고 각각의 추세식과 상관계수를 적출하였다(Figure 7).

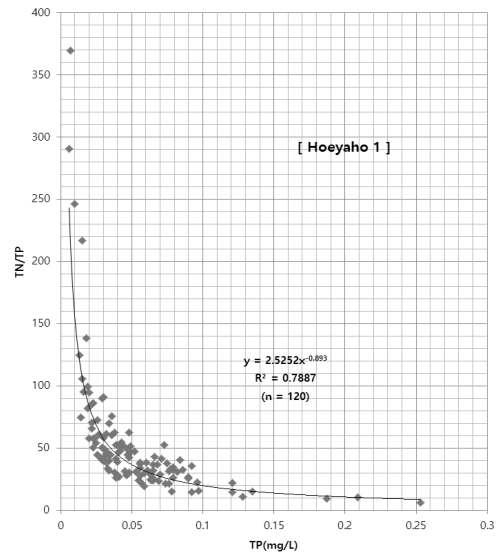
그 결과, 팔당2 지점의 경우 추세식은  $y = 2.954x^{-0.896}$ , 상관계수는 0.9565로서 매우 강한 상관관계를 보이며, 회야호1 지점의 경우 추세식은  $y = 2.5252x^{-0.893}$ 에 상관계수는 0.8881로서 역시 매우 강한 상관관계를 나타내었다.

아울러, 위의 팔당2 지점과 회야호1 지점 및 앞의 물금 등 3개 지점의 TP 및 TN 관련 데이터 각각 120개씩, 총 360개의 데이터들을 TP 대비 TN/TP 비율의 쌍으로 하여 Figure 8과 같이 모두를 하나의 산점도 상에 나타내고 그에 따른 추세식과 상관계수를 적출하였다.

그 결과, 산점도에 따른 추세식은  $y = 4.2861x^{-0.768}$ , 상관계수는 0.9027로서 매우 강한 상관관



(a) Scatter Plots and Correlation for Paldang2



(b) Scatter Plots and Correlation for Hoeyaho 1

Figure 7. Scatter Plots of TP with TN/TP Ratio for Paldang2 and Hoeyaho 1

계를 나타내었다.

## 3. 데이터의 분석 및 고찰

### 1) 강수량의 영향

연평균 강수량과 연평균 EC와의 상호 상관계수는  $-0.3699$ 로 나타나서 강수량과 EC 간에는 보통 수준의 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났는데, 강수량의 영향을 받는 EC와 Chl-a의 상관계수( $0.3406$ )로 볼 때 강수량은 식물성 플랑크톤의 농도에 어느 정도의 영향을 미치지만,



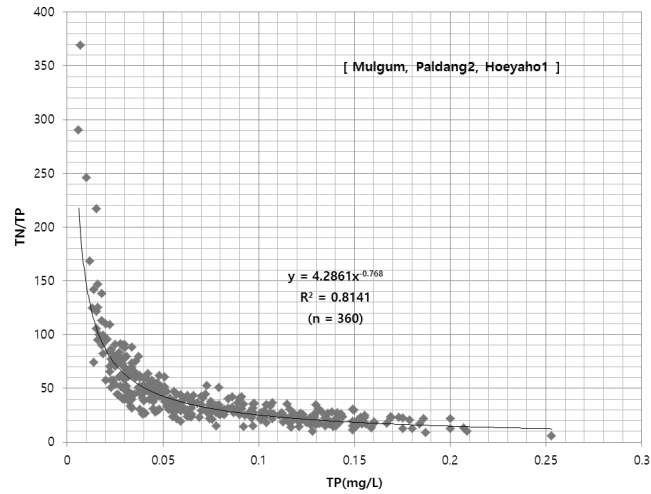


Figure 8. Scatter Plots and Correlation of TP with TN/TP Ratio for the 3 Regions (Mulgum, Paldang2 and Hoeyaho1)

Figure 3에서와 같이 EC가 충분히 낮을 때도 Chl-a가 높게 나타나거나 EC가 매우 높을 때도 Chl-a가 낮게 나오는 경우들이 각각 다수 존재하는 것으로 볼 때, 가뭄 등 강수량 감소에 따른 유입수 중의 오염물질 농도 상승이 식물성 플랑크톤 대량 증식의 주 원인으로 보기는 어려울 것 같다.

2) 수온의 영향

호소수에 있어서 수온의 변화는 산소를 포함하는 각종 유기 및 무기성 물질의 포화 용해도와 전리도의 차이를 유발하는 등의 물리·화학적 측면과, 계절의 변화와 함께하여 수중 생물상의 변화를 가져오게 하는 생태학적인 측면이 각각 존재한다.

물금 지역의 경우, 이 수계에서 조류의 농도 변화는 수온과의 상관성이 큰 것으로 나타났는데( $r=-0.7242$ ), 일조량이 풍부하고 광합성 플랑크톤류의 생리 활동이 활발해지는 하절기에 Chl-a의 농도가 최저점을 형성하고, 수온이 낮고 일조량이 줄어드는 반대의 시기에 오히려 최고점을 형성하는 것은 일반적인 식물의 광합성 작용으로는 설명될 수가 없으며, 수온에 따른

활동성의 변화가 큰 동물성 섭식자들의 개체 수 및 활성화 정도에 따른 결과라는 유추를 가능하게 한다. 즉, Figure 4에서 “D”군처럼 5°C 내외의 저 수온 상태에서 최고점을 이루는 것은 동물성 플랑크톤 등 섭식자들의 활동이 정지되는 기간 중에 일부 식물성 플랑크톤 종이 자유롭게 증식한 결과이고, 수온의 상승과 더불어 Chl-a 농도가 급격히 낮아진 후에 등락을 반복하는 것은 섭식자들의 활동 개시와 먹이의 고갈과 섭식자 생태계의 변화(이를테면 물고기 치어의 대량 출현 등) 및 뒤이은 식물성 플랑크톤 우점종의 변화와 개체 수 회복 등이 번갈아가며 주기적으로 나타나는 먹이사슬의 작동 결과일 개연성을 나타낸다 할 수 있다. (여기에서 나타나는 상관계수는 Chl-a 농도가 수온의 물리·화학적 속성에 의하여 영향을 받는 것이 아니라 생태학적인 속성의 영향을 받아서 나타난 결과로 추정함.)

3) DO와 BOD 및 COD

Figure 5에 나타난 BOD와 COD의 상관관계에 따르면 BOD는 COD의 하나의 다른 표현으로 볼 수 있으며( $r=0.7874$ ), BOD와 DO 간에는

강한 양의 상관관계가 있어서 BOD가 높을 때 DO도 함께 높다( $r=0.7345$ ). 이는 BOD로 측정되는 수중의 물질이 산소 소모자가 아닌 산소 생산자인 것을 의미하며, BOD와 Chl-a가 매우 강한 양의 상관관계( $r=0.8768$ ) 하에 있는 것으로 보아, 이 수계에서 BOD 또는 COD로 측정된 물질은 살아서 활동하는 식물성 플랑크톤이 주 구성물인 것을 알 수 있게 한다.

#### 4) TP, TN 농도 및 TN/TP 비

인과 질소는 조류 생장의 중요한 영양인자이지만, Figure 6에 따르면 TP 농도는 Chl-a 농도와 상관성이 약하거나 보통인 수준으로 나타나고 있어서( $r=0.2054$ ), 이 수계에서 TP 농도는 조류 대량 발생의 결정적인 제약조건이 아닐 가능성을 암시하고 있다. 이는 앞의 “2) 수온의 영향” 부분의 현존하는 식물성플랑크톤의 농도가 먹이사슬에 의하여 제어될 것이라는 유추를 뒷받침한다.

한편으로, TN 농도는 Chl-a 농도와 강한 양의 상관관계 하에 있으나( $r=0.6793$ ), 동시에 수온과는 강한 음의 상관관계를 보이고 있다( $r=-0.7991$ ). 그런데 TN 농도와 수온의 관계에서, 수온은 기온에 영향을 받으며 TN에 의하여 영향을 받을 수 없는 절대적인 독립변수로서의 지위를 가지므로 결과적으로 TN이 종속변수가 될 수밖에 없다. 따라서 TN 농도가 Chl-a 농도와 강한 상관성이 있다는 것은 TN 농도가 하나의 종속 변수로서 Chl-a 농도에 예측된다는 의미로 볼 수 있다(TN 농도는 오염원에 의한 외부 유입량과 함께, 계내 생명체에 의한 공중질소의 고정 및 유기질소 화합물과 암모니아의 산화, 질산염의 탈산소 분해 과정 등을 통한 양적 조절이 가능한 결과에 따르는 것으로 볼 수 있음). Figure 6 (c)의 산점도와 추세곡선에 따르면 TN 농도는 TP에 의하여 높은 신뢰도( $r=0.7688$ )로 일정한 수준의 TN/TP 비율로 구성되어지는 정해진 함수관계에 따라 제약을 받고 있는 것으로 나타났는데, 이는 계

내 TN 농도가 종속적인 변수임을 뒷받침 한다.

#### 5) 타 지역 댐호의 TN, TP 수질 데이터

지리적으로 서로 다른 수계인 한강의 팔당2 지점과 회야강의 회야호1 지점의 TP 대비 TN/TP 비율의 산점도에 따른 추세식과 상관계수에 의하면(Figure 7), TN/TP 비율은 양 지점 모두 매우 높은 신뢰도로서 TP 농도에 의하여 각각 일정한 거둬제곱의 함수관계 하에 놓여 있다(상관계수 0.9565, 0.8881).

그리고, 팔당2 지점과 회야호1 지점과 앞의 물굽에 대한 TP 대비 TN/TP 비율을 하나의 산점도 상에 모아 담아서( $n=360$ ) 상관계수와 함께 추세식을 산출한 결과 Figure 8에서와 같이 상관계수 0.9027의 높은 신뢰도로서  $y = 4.2861x^{-0.768}$  인 하나의 함수에 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 TN 농도가 TP 농도에 연동하는 종속변수임과 이들 관계에 보편성이 있음을 보여주는 결과가 된다.

호소 수중의 임의의 영역 중의 인 농도의 변화는, 그 영역으로 혼입되는 유입수 중의 농도와와의 차이와 대형 동·식물체 내로의 흡수와 방출 및 인을 함유한 침전성 유·무기 물질의 침강 그리고 퇴적물로부터 용출된 인의 확산·유입 등에 의하여 변동이 가능하며, 질소 농도의 경우는 혼입수 중의 농도의 차이와 대형 동·식물체 내로의 흡수와 방출 및 질소를 함유한 침전성 유·무기 물질의 침강과 퇴적물로부터 용출된 질소의 확산·유입량에 더하여 앞에서 언급한 바와 같이 영역 내 생명체에 의한 공중질소의 고정 및 유기질소화합물과 암모니아의 산화에 이은 질산염의 탈산소 분해 등의 산화환원 반응 과정을 통한 양적 조절이 총체적으로 균형을 이루어 나타난 결과로 보아야 한다. 생태학적 화학양론의 관점에서 Elser 등은 생물체 내의 C:N:P 비율은 유기체의 종류와 성장 단계에 의하여 달라진다고 하였는데(Elser et al, 2000), 대량 강우 시와 같이 일시적이고 급격한 수중 용

존·분산 물질들의 농도 변화가 일어나는 경우를 예외로 하는 안정화된 수체에 있어서, 특정 지점에서 분석용 시료의 채취가 이루어졌다고 가정했을 때, 그 영역에서는 그곳에 존재하는 생명체들이 광합성과 질소 고정 및 에너지 대사 등을 포함하여 상호 경쟁과 먹이사슬의 작동에 의하여 매순간 주어진 조건에 따른 극상을 향하여 역동적인 천이이 일어나고 있다고 볼 수 있을 것이며, 이에 따라서 이 영역의 영양성분들은 생물체 내 구성 성분의 형태로서 그때그때 최적화된 균형을 이루고 있을 것으로 추정할 수 있다.

#### IV. 조류 과다 발생 대처 방안의 조사

광합성 플랑크톤들의 증식은 일차적으로 일조량과 영양성분의 공급에 의하여 일어나지만, 이들 상호간의 경쟁과 공생 등을 통한 성장과 번식의 과정을 거치면서 동시에 동물성 플랑크톤류와 패각류 등의 섭식자들에게 피식을 당하는 정도에 의하여 종별 개체수가 등락을 반복하는 현상으로 나타나게 된다.

이러한 상황 하에서 조류 과다 발생 문제의 해소를 위한 방안은 수중 영양성분 공급량의 제어와 직접적인 조류의 개체 수 제어의 두 가지 방식이 가능하며, 현재까지 이에 따른 여러 가지 방안이 제안되거나 시행되고 있다.

현재 영양성분 공급량의 제어를 위하여 적용되는 방법들은, 주로 오·폐수의 방류 시 질소, 인 등을 고도 처리하여 배출 농도를 최대한 낮추는 방법과 호소 유입 지천에서 별도로 인 처리 장치를 설치하여 운용하는 방법 등이 있으나, 이미 강과 호소의 밑바닥에는 침전물의 형태로 인을 포함하는 여러 가지 영양물질들이 다량 존재하므로 많은 비용의 투입에도 불구하고 괄목할만한 결과를 얻지 못하고 있다. 이에 따라 호소 바닥의 침전물을 준설하는 방안이 검토되기도 하였으나 많은 시간과 비용이 소요되고

피 올린 준설토의 처리가 어려운 등 여러 가지 문제점을 가지고 있으며, 수생 식물에 의한 영양염류의 제거가 시도되기도 하나, 처리 속도와 용량에서 한계를 보이고 있다.

직접적인 조류의 제어에 의한 과다 발생 해소 방안은, 첫째로 화학약품(살조제)의 살포를 통하여 조류의 번식을 억제하는 화학적인 방법이 있는데 비교적 강력하고 즉각적인 효과가 있지만 환경오염이나 생태계 파괴를 피할 수 없어서 부정적인 견해가 많다. 둘째로는 물리학적 방법으로서 조류의 응집침전이나 부상분리 제거, 광조절, 수위 조절 또는 초음파 살조 등의 방법이 있지만 어느 방법이나 대규모로 실시하는 것은 쉽지가 않을 뿐만 아니라 생태계에 손상을 줄 수도 있다. 마지막으로 생물학적 방법은 주로 생태적 포식 관계를 이용하여 조류 발생을 제어하는 방안이 있는데, 이는 친환경적인 방법이기도 하나 주로 미생물이나 조류를 먹는 천적 생물 등을 배양하여 활용함으로써, 천적 생물 배양의 어려움과 처리 대상과 범위가 제한적인 등의 문제점이 있다.

#### V. 결론 및 제언

본 연구에서는 담호화된 낙동강의 한 지점을 대상으로 수질 데이터를 분석하고 조류의 증가 및 감소의 과정을 파악하여 조류 과다 발생의 주요 원인을 찾고자 하였다. 수질의 변화에는 분명한 주기성이 있고 특정 분석 항목 간에는 일정한 상관성도 있었다. EC, TP, TN, N/P 비율, 온도, DO, COD, BOD 등을 종합적으로 관찰해 보면 COD 등 수질 영향 성분은 생태계의 변동에 편승하여 번식한 조류 자체로 나타났다. 그런데 만약에 광합성과 함께 증가되는 유기물질들이 먹이 사슬에 의하여 제거되지 못할 경우, 이들은 호의 바닥으로 퇴적하여 혐기성 분해를 시작하게 될 것이고, 호의 하부는 빈산소 및 무산소 성층 구조가 확대되어 저서 생태계

파괴에 이은 호수 전체의 먹이 사슬의 붕괴를 불러와서 결과적으로 생태 순환이 회복 불능의 상태로 고착화되는 악순환을 초래할 것이다.

따라서 댐호의 수질 개선 방향은 스스로 순환이 가능한 생태계의 유지를 최종의 목표로 삼아야 할 것이며, 이를 위해서는 질소, 인 등의 영양성분의 유입을 방지하거나, 수중에 존재하는 영양성분들을 인위적으로 제거하는 노력도 도움이 되겠지만, 호수 중에서 가능한 한 많은 영역을 생태적 먹이 사슬이 작동 가능한 영역으로 유지시킴으로써 조류 등 광합성 생산자들의 총 개체수가 섭식자들의 섭식 활동에 의하여 즉각적으로 제어되고, 유기물질을 포함하는 영양성분들이 포식자들의 생체 내 축적을 거쳐서 최종적으로 계 외로 제거되도록 하는 편이 보다 효율적이라 할 수 있을 것이다.

생태계의 먹이 사슬을 경제적인 방법으로 안정화시키기 위해서는 수계 내에 다양한 생명체들의 생존을 위한 서식처를 확보해 주는 것과 동시에 저서생태계를 호기적 상태로 활성화시키는 것이 중요하다 하겠다. 따라서 호수나 댐 호화된 하천에 대하여 이러한 목표를 달성하기 위해서는 호의 하부에 효과적으로 용존산소를 공급하는 방안과 인공적인 서식 공간의 설치 등 물리·화학적 및 생태학적인 대안을 제공하기 위한 포괄적인 연구를 수행하는 것이 중요하다고 본다.

## References

- Bergström AK. 2010. The use of TN:TP and DIN:TP ratios as indicators for phytoplankton nutrient limitation in oligotrophic lakes affected by N deposition. *Aquat. Sci.* (2010) 72: 277-81
- Cho WH. · Yum KT. · Kim JS. · Ban YJ. and Chung SW. 2012. Study on Algae Occurrence in Daecheong Reservoir. *Journal of Environmental Impact Assessment*. Volume 21, Issue 3, 2012, pp. 367-380. (in Korean with English summary)
- Dokulil MT. and Teubner K. 2000. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 438: 1-12.
- Elser JJ. · Sterner RW. · Gorokhova E. · Fagan WF. · Markow TA. · Cotner JB. · Harrison JF. · Hobbie SE. · Odell GM. and Weider LJ. 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, (2000) 3: 540-550  
<http://sts.kma.go.kr/jsp/home/contents/applystatic11/view.do?applyStaticId=krpnsIcImStcs>  
<http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do>
- Kolzau S. · Wiedner C. · Rucker J. · Köhler J. · Köhler A. and Dolman A.M. 2014. Seasonal Patterns of Nitrogen and Phosphorus Limitation in Four German Lakes and the Predictability of Limitation Status from Ambient Nutrient Concentrations. *PLoS One*. 9(4): e96065.
- Kim BH. · Choi HJ. and Han MS. 2004. Potential in the Application for Biological Control of Harmful Algal Bloom Caused by *Microcystis aeruginosa*. *Korean J. Limnol.* 37(1): 64-69. (in Korean with English summary)
- Kim GH. · Lee JH. and An KG. 2012. Spatiotemporal Fluctuations with Influences of Inflowing Tributary Streams on Water Quality in Daecheong Reservoir. *Korean J. Limnol.* 45(2): 158~173. (in Korean with English summary)
- Kim SC. 2013. Study on the Characteristics and Correlations of Algae Occurrence Based on Water Environmental Factors in Nakdong

- River and Small Reservoirs. (in Korean with English summary)
- Kong F. and Gao G. 2005. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*. Vol. 25, No. 3.
- Lee CY. 2012. Microalgae Removal and Energy Production by Combined Electro-flotation and Anaerobic Hydrogen Fermentation Processes. *J. of KOREA*, Vol. 20, No. 3. (in Korean with English summary)
- Lv J. · Wu H. and Chen M. 2011. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China. *Limnologia Ecology and Management of Inland Waters*. Volume 41, Issue 1, February 2011, Pages 48-56
- Ma J. · Deng J. · Qin B. and Long S. 2013. Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes. *Acta Ecologica Sinica*. Vol. 33, No. 10.
- Ma J. · Qin B. · Wu P. · Zhou J. · Niu C. · Deng J. and Niu H. 2015. Controlling cyanobacterial blooms by managing nutrient ratio and limitation in a large hyper-eutrophic lake: Lake Taihu, China. *J Environ Sci (China)*. 2015 Jan 1;27: 80-6.
- Mo S. 2013. Algal occurrence pattern and control method in Yeongsan river. (in Korean with English summary)
- Nam KS. · Song YH. · Lee UH. · Bae YS. and Hong DB. 2011. Development of algae prevention technology using predatory natural enemy creatures, *Water for future* v.44 no.6, pp. 49-56, 1738-9488 (in Korean without English summary)
- Park CH. · Lee JH. · Hwang SJ. and Kim BH. 2010. Influences of Freshwater Bivalve *Unio douglasiae* on the Water Quality and Periphyton Community in Artificial Eutrophic Streams. *Korean journal of limnology* v.43 no.3, pp. 437-450, 1976-8087 (in Korean with English summary)
- Park TG. · Park KH. and Seon KH. 1987. Water Pollution. Donghwa Technology.
- Rea LM. and Parker RA. 2005. Designing & Conducting Survey Research A Comprehensive Guide (3rd Edition). San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Redfield A. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. p. 177-192. In: James Johnstone Memorial Volume (Daniel, R.J. ed.). University Press of Liverpool. Liverpool.
- Rolighed J. · Jeppesen E. · Søndergaard M. · Bjerring R. · Janse JH. · Mooij WM. and Trolle D. 2016. Climate Change Will Make Recovery from Eutrophication More Difficult in Shallow Danish Lake Søbygaard. *Water* 2016, 8, 459; doi:10.3390/w8100459
- Sakamoto M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiol.* 62: 1-28.
- USGS(U.S. Geological Survey). 2003. A Summary Report of Sediment Processes in Chesapeake Bay and Watershed. Water-Resources Investigations Report 03-4123
- Vollenweider RA. and Kerekes J. 1982. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris (France): OECD Cooperative programme on monitoring of inland waters (eutrophication control); Environment Directorate.