creative commons
COMMONS DEED

저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

수산학석사 학위논문

운문호의 환경특성에 의한 식물플랑크톤 군집구조 변동

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수산생물학과

탁보미

수산학석사학위논문

운문호의 환경특성에 의한 식물플랑크톤 군집구조 변동

지도교수 김 창 훈

이 논문을 수산학석사 학위논문으로 제출함.

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수산생물학과

탁보미

탁보미의 수산학석사 학위논문을 인준함.

2012년 2월

주 심 이학박사 조 재 윤 (인)

위 원 이학박사 허 성 범 (인)

위 원 이학박사 김 창 훈 (인)

목 차

List of figures

List of tables

Abstract

Ⅰ. 서 론 ····· 1

Ⅱ. 재료 및 방법 ····· 3

2.1 조사지점 및 시기 ····· 3

2.2 조사방법 ····· 5

2.2.1 기상특성 조사 ····· 5

2.2.2 이화학적 환경요인 조사 ····· 5

2.2.3 식물플랑크톤 조사 ····· 5

Ⅲ. 결과 및 고찰 ····· 7

3.1 기상특성 ····· 7

3.2 이화학적 환경요인 ····· 10

3.2.1 수온 ····· 10

3.2.2 용존산소(DO) ····· 13

3.2.3 수소이온 농도(pH) ····· 15

3.2.4 총질소(TN), 총인(TP) 및 총질소와 총인의 농도비 (TN/TP ratio) ····· 17

3.3 식물플랑크톤 ····· 21

3.3.1 식물플랑크톤 종조성 및 현존량 변화 ····· 21

3.3.2 식물플랑크톤 분류군별 구성비 ····· 26

3.3.3 식물플랑크톤 군집의 우점종 변화 ····· 31

3.4 군집분석 ····· 34
3.4.1 우점도 지수 ····· 34
3.4.2 종 다양성 지수 ····· 34
4.1 식물플랑크톤과 환경 요인과의 관계 ····· 38

Ⅳ. 결론 ····· 40

참고문헌 ····· 42
감사의글 ····· 54

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

List of figures

Fig. 1. The map showing the sampling site in Lake Unmoon. ·· 4

Fig. 2. Annual monthly variations of air temperature in Taegu city. ···· 8

Fig. 3. Annual monthly variations of precipitation in Taegu city. ··· 9

Fig. 4. The seasonal variation of the surface water temperature in Lake Unmoon. ····· 12

Fig. 5. The seasonal variation of dissolved oxygen concentration in the surface water of Lake Unmoon. ····· 14

Fig. 6. The seasonal variation of pH in Lake Unmoon. ····· 16

Fig. 7. Monthly changes of total nitrogen (TN) concentration in Lake Unmoon. ····· 18

Fig. 8. Monthly changes of total phosphate (TP) in Lake Unmoon. ····· 19

Fig. 9. Monthly changes of TN/TP ratio in Lake Unmoon. ····· 20

Fig. 10. Monthly variation in the number of species in Lake Unmoon. ····· 23

Fig. 11. Monthly variation of phytoplankton standing crops(cellss/mL) in Lake Unmoon. ····· 24

Fig. 12. Monthly variation of chlorophyll-a concentration in Lake Unmoon. ····· 25

Fig. 13. Monthly variations of the relative abundance in algal classes in Lake Unmoon from April to November, 2009 (Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta) ····· 28

Fig. 14. Monthly variations of the relative abundance in algal classes in Lake Unmoon from April to November, 2010 (Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta) 29

Fig. 15. Monthly variations of the relative abundance in algal classes in Lake Unmoon from April to November, 2011 (Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta) ····· 30

Fig. 16. Monthly variations of dominant phytoplankton standing crops(cellss/mL) in Lake Unmoon. ····· 33

Fig. 17. Monthly variations of phytoplankton diversity index (H′) and dominance index (DI) in Lake Unmoon from April to November, 2009. ····· 35

Fig. 18. Monthly variations of phytoplankton diversity index (H′) and dominance index (DI) in Lake Unmoon from April to November, 2010. ····· 36

Fig. 19. Monthly variations of phytoplankton diversity index (H′) and dominance index (DI) in Lake Unmoon from April to November, 2011. ····· 37

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

List of tables

Table 1. Location of sampling station in Lake Unmoon ····· 3

Table 2. Monthly variation of standing crops of phytoplankton in Lake Unmoon(Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta) ····· 27

Table 3. Seasonal succession of dominant species phytoplankton in Lake Unmoon ····· 32

Table 4. Pearson correlation between phytoplankton cell density and environmental factors in Lake Unmoon(**, $p<0.005$) ····· 39

Abstract

Variation of Phytoplankton Community Structure by the Environmental Characteristics in Lake Unmoon

by

Bo-Mi Tak

Department of Fisheries Biology
Graduate School, Pukyong National University
Busan, Korea

This study is to clarify the structure and seasonal dynamics of phytoplankton community and environmental factor, and its survey was conducted from April to November 2009, April to November 2010 and April to November 2011 in Lake Unmoon, Korea.

During the surveyed period, the water temperature was of the lake was observed low during winter and high during summer. Its dissolved oxygen was high during summer and low during winter. The pH ranged from 7.3 to 10.6. The Chlorophyll-a concentration was high during the fall(September) and low during winter(October). During the survey period, temperature ranged from 11.2℃ to 30.2℃, pH from 7.3 to 10.6, DO from 5.9 mg/L to 12.4 mg/L and chlorophyll-a from 3.1 mg/m^3 to 193.9 mg/m^3, respectively.

A total of 99 species were identified from the samples. Among them, the largest number of species were Bacillariophyceae with 45 species(45.5%), followed by Chlorophyceae with 35 species(35.4%), Cryptophyceae with 11 species(11.1%) and Cyanophyceae with 8

species(8.1%), respectively.

Common phytoplankton were identified over seasons, such as *Microcystis wesenbergii, Microcystis aeruginosa, Microcystis ichthyoblabe, Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Aulacoseira ambigua, Fragilaria crotonensis*, *Pediastrum duplex* var. *gracitimum, Coelastrum* sp., *Peridinium* sp., and *Dinobryon* sp..

The standing crops ranged from 101 cellss/mL to 8,122 cellss/mL, with a mean value of 1,516 cellss/mL during this study. The biomass of phytoplankton increased in spring and summer. At Lake Unmoon, maximun peaks were observed in June and July, 2011. The highest cell density was observed in July, 2011 with 8,122 cellss/mL. in which dominant species was *Fragilaria crotonensis.*

The phytoplankton community was dominated by Bacillariophyceae. Cyanophyceae was the second abundant group and Cryptophyceae was the third abundant group. Other different species were found occasionally. Bacillariophyceae was dominated in spring and Cyanophyceae was dominated in summer along with the increase of water temperature.

In order to maintain the environment of the lake and secure its resources, a consistent effort should be made to improve the water qualities. Also, the date from Lake Unmoon should be saved and observed to find out the cause of Cyanobacteria water bloom in Lake Unmoon.

Ⅰ. 서 론

우리나라는 매년 강수량의 계절변화가 크고 연간 강수량의 2/3가 우기에 집중되어 있으므로 하천으로 유입되는 수자원의 대부분이 일시에 바다로 유출되는 특징을 가지고 있다. 더욱이 하천으로 유출되는 총 수량 중 수자원으로 이용하기 어려운 홍수기 유출을 제외한 평상시 하천 유출량은 총 하천 유출량의 약 18%에 불과한 실정이다. 따라서 수자원 확보를 위한 용수수급 대책으로 인공호소 축조가 활발하게 이루어져 왔다.

그러나 이와 같은 인위적인 수자원 확보 후 적절한 수질 관리가 이루어지지 않게 되면 호소의 부영양화가 뒤따르게 되고 더욱이 호소 주변부의 인간 활동과 맞물릴 경우 부영양화 정도가 더욱 가속화되는 문제점이 있다. 부영양화된 호소는 식물플랑크톤의 빈번한 수화(water-bloom)현상으로 인해 원수의 수질 관리에 심각한 문제를 초래하여 여과장애, 독소 불쾌한 냄새로 인한 정수 공정의 장해를 유발하기도 한다.

부영양화와 수화를 일으키는 유기물은 그 발생원에 따라 내부생성유기물(Autochthonous organic matter)과 외부기원유기물(Allochthonous organic matter)로 나눌 수 있다(Horne and Goldman, 1994). 내부생성유기물에는 식물플랑크톤, 부착조류, 수초 등이 있고, 외부기원유기물은 육상생태계의 광합성산물, 산업폐수, 하수, 낙엽 등을 꼽을 수 있다. 유속이 빠른 하천에서는 식물플랑크톤의 서식이 어려워 수체에서 생성되는 유기물이 적기 때문에 외부기원유기물이 주요 유기물 공급원이 된다(Wetzel, 1999). 이와 같은 유기물 유입은 수괴의 일차생산 증가로 이어지며, 수중조류의 광합성 활동 및 수중식물의 생체량 증가를 의미하게 되며, 이것이 부영양화 현상의 일련의 과정이다(정 등, 2001; Kalff, 2002).

식물플랑크톤의 증식에 영향을 미치는 요인들은 매우 다양하고 복합적으로 작용하는 것으로 나타나고 있다. 특히 광합성에 필요한 광량, 그리고 영양염의 농도와 조도, 수온 등이 호조건으로 작용할 때 식물플랑크톤이 양적인 증식을 일으켜 수면을 변색시키는 수화현상(blooming)을 일으키기도 하며, 수중 생태계에서 일차 생산성을 촉진시키기도 한다.(박, 1991; Barnes and Mann, 1991; Wetzel, 1999). 또한 수화가 일어나면 식물플랑크톤 스스로 광(light)흡수인자로 작용하여 빛의 투과를 막아 자신들의 성장을 방해하고(self-shading, Kirk, 1994), 포식되지 않고 바닥에 가라앉은 식물플랑크톤은 미생물 대사 작용에 의해서 저층의 용존산소를 고갈시켜서 빈산소층을 형성하여 수질을 악화시킬 뿐 아니라(Sundback *et al.*, 1990),독성을 가지는 조류 등은 적조를 일으켜 수서생태계에 치명적인 피해를 입히기도 한다(Harper, 1992).

이렇듯 식물플랑크톤은 환경변화에 민감하게 반응하는 수서생태계의 중요한 구성원이며, 수질 변화에 따라 현존량과 종조성이 크게 변화하는 수서생태계의 일차생산자이기 때문에 그들의 분포를 보면 수중 환경의 특성을 알 수 있다(이, 1994). 따라서 식물플랑크톤의 생물학적 요인인 식물플랑크톤의 현존량 및 종조성 등과 이들의 발생과 관련된 이화학적 요인을 조사하여 이들의 계절적 변화와 상호관계를 파악하는 것은 강과 호수에서 매우 중요하다. 그러므로 호소의 식물플랑크톤 동태와 부영양화 정도에 대한 조사는 호소 수질 관리를 위해 필수적으로 수행되어야 할 필요가 있다.

운문호는 대구광역시, 영천시와 경산시 등 금호강 주변도시의 급수난을 해결하고 장래 증가될 용수 수요량을 대비하여 1994년도에 건설되어 총 $160.25\times10^{6}m^{3}$의 저수능력을 가지고 있는 국내 최대 규모의 상수원 전용 댐이다. 운문호에 관한 주요 연구는 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택 취수 수심 결정에 관한 연구(이 등, 2000)와, 저질의 인의 존재 형태별 특성 및 용존유기물 용출 특성에 관한 보고(김과 이, 2011)가 있다.

본 조사에서는 운문호에서 발생하는 식물플랑크톤의 계절별 천이 양상과 분포 특성과 여러 환경인자들과의 관계를 파악해서 향후 효율적인 수질관리를 위한 기초자료로 제공하기 위하여 수행되었다.

Ⅱ. 재료 및 방법

2.1 조사지점 및 시기

운문호는 행정구역상 경상북도 청도군 운문면에 소재한다. 제체높이는 55 m, 제체길이는 407 m, 저수면적은 7.8 km^2, 총저수량은 160.25백만 m^3이다. 운문댐은 대구광역시, 경산시, 영천시 및 청도군의 생활 및 공업용수를 공급할 목적으로 1985년 12월에 착공하여 1994년 9월에 완공하였다. 또한, 하류지역의 관개용수 공급 및 동창천의 하천유지용수를 위한 수원으로 이용되고 있다. 호소 용수 이용현황은 생활용수로 연간 97,172 천톤, 농업·공업·발전·유지용수로 연간 21,176 천톤을 이용하고 있으며, 상수원으로 연간 97,271 천톤을 공급하고 있다.

이처럼 용수공급, 전력생산, 홍수조절, 하천유지용수 확보 등의 목적으로 낙동강수계의 중류에 위치한 운문호의 댐 앞 한 개 정점(St: 1)에서 2009년 4월부터 2011년 11월까지 월 1회씩 실시하였다(Fig. 1).

Table 1. Location of sampling station in Lake Unmoon

Station	Latitude	Longitude
1	128˚51′59"	35˚43′30"

Fig. 1. The map showing the sampling site in Lake Unm

2.2 조사방법

2.2.1 기상특성 조사

식물플랑크톤 군집 천이에 중요한 변수로 작용할 수 있는 월별 기온 및 강수량 자료는 본 조사지역에서 행정구역상 가장 가까운 대구시의 2009~2011년 기상연보 자료를 참고하였다.

2.2.2 이화학적 환경요인 조사

이화학적 환경요인 조사로 수온, pH, DO, 전기전도도는 휴대용 수질자동측정기(YSI 556MPS)를 이용하여 현장의 표층수(20 ㎝)에서 직접 측정하였다. 실험실 분석항목은 현장 시료를 냉암소에서 보관하여 가능한 한 빨리 실험실로 옮겼으며, 클로로필-a 및 영양염류(TN, TP)는 수질오염공정시험기준에 준하되 필요한 경우 국제적으로 통용되고 있는 표준시험방법(Standard methods)을 따라 분석하였다.

2.2.3 식물플랑크톤 조사

식물플랑크톤의 동정과 계수를 위해 표층수를 500 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고, 현장에서루골용액으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서 72시간 이상 침강시킨 후 시료의 조류 농도에 따라 10배 이상 농축을 실시하였다. 농축한 시료는 잘 혼합한 후, Sedgwick-Rafter counting chamber에 시료 1 mL를 10분 이상 침전시킨 다음 광학현미경(Zeiss, Axioscop, Germany) 200배 하에서 군체 또는 세포수를 계수하였다. 식물플랑크톤의 동정은 동일종의 현미경 1,000배 하에서 이루어졌으며, 한국담수조류도감(정 준, 1993)과 일본 담수조류도감(Masaru, 1977)을 비롯한 다양한 문헌을 참고하였다. 식물플랑크톤 군집의 특성을 파악하기 위하여 출현 종수와 개체수를 근거로 우점종을 선정하였으

며, 종 다양도 지수(Shannon and Weave, 1949; Margalef, 1958), 우점도 지수를 이용하였다. 군집의 다양성 분석은 군집 분석 프로그램 Primer 5.0 를 통해 산출되었다.

- 우점도 지수(DI)

$$\lambda = \mathrm{SUM}\frac{\mathrm{Ni}^{x}(Ni-1)}{\mathrm{N}^{x}(N-1)}$$

- 종 다양도 지수(H′)

$$H' = -SUM[\mathrm{Pi}^{2x}\mathrm{Log}_{e}(\mathrm{Pi})]$$

N: 개체군 총 개체수(Total individuals)

Pi: 총 출현개체수에 대한 i종의 개체수 비율

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1 기상특성

운문호의 수질변화와 식물플랑크톤 천이양상에 직접적인 영향을 주는 기온, 강우량 등 기상요인이다. 조사 기간 동안 유역 내 년 평균기온은 2009년과 2010년 년평균 19.9℃로 동일하였으며, 2011년 20.6℃로 다소 높은 기온을 나타냈다. 월별 평균기온은 8.6~28.7℃로 나타났으며, 2009년, 2010년 조사에서 11월 각각 9.1℃, 8.6℃로 최저 기온, 8월 25.5℃, 28.7℃로 최고 기온을 나타냈다. 2011년 조사에서 11월에 26.8℃로 최저 기온, 7월 26.8℃로 최고 기온을 나타냈다(Fig. 2).

총 강우량은 조사 기간 동안 2009년 749.2 mm, 2010년 1,044.7 mm, 2011년 1,338.7 mm로 매년 209 mm이상 증가하는 것으로 보였다. 조사기간 중 6~8월의 강우량이 523.8~854.3 mm로 연간 총 강우량의 60% 이상 집중되었고, 봄과 가을에는 강우량이 매우 적었다. 월별로는 2009년 4월 총강우량 21.3 mm로 가장 적었으며 7월 338.0 mm로 가장 많은 강우량을 보였다. 2010년 11월 1.7 mm로 가장 적은 강우량, 8월 396.0 mm로 가장 많은 강우량을 보였으며 2011년 9월 38.5 mm로 가장 적은 강우량, 7월에 427.7 mm로 가장 많은 강우량을 보이며 매년 다소 차이를 보였다(Fig. 3).

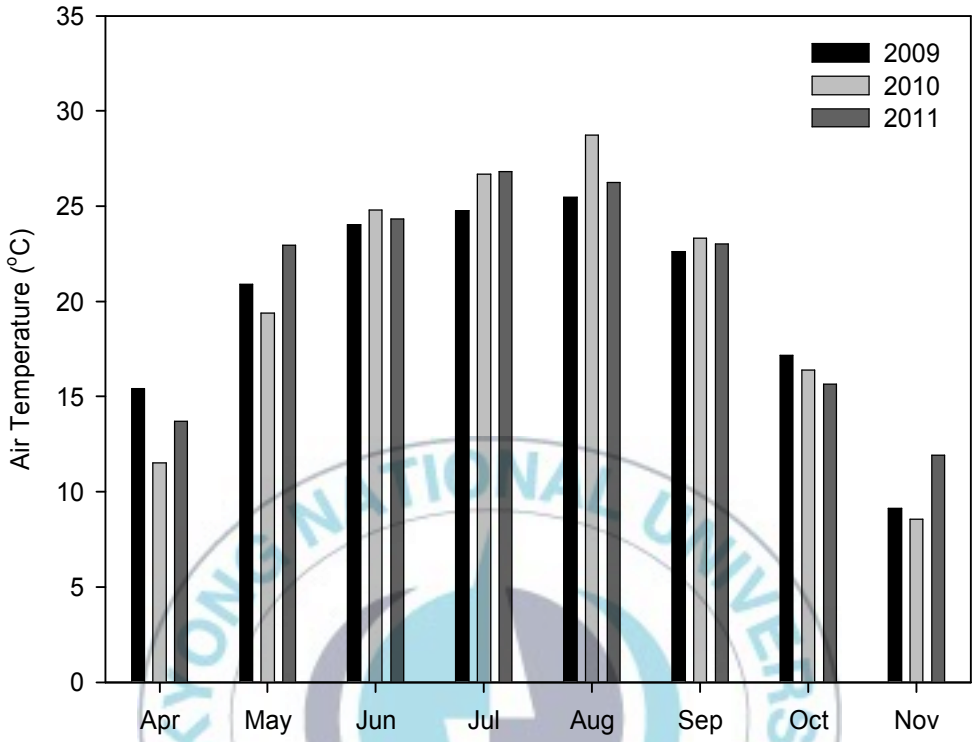

Fig. 2. Annual monthly variations of air temperature in Taegu city.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

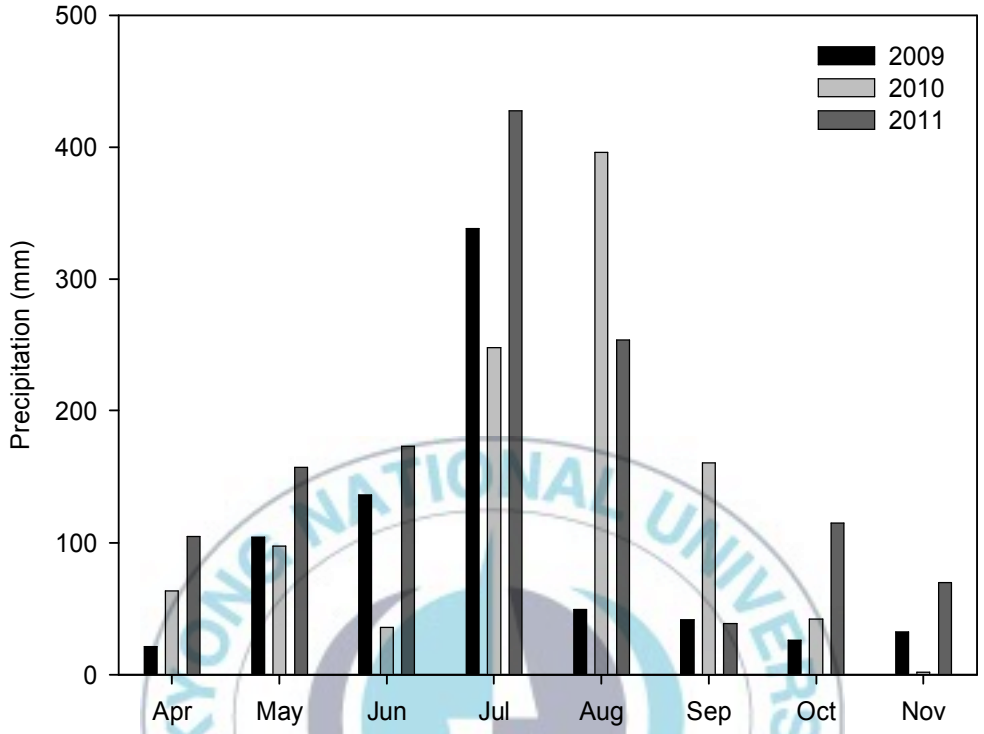

Fig. 3. Annual monthly variations of precipitation in Taegu city.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.2 이화학적 환경요인

3.2.1 수온

수온은 수질의 상태 및 변화 양상을 결정하는 인자로, 수온에 따라 모든 화합물의 반응속도가 변화되며, 용존산소의 포화도 및 알칼리도에 영향을 준다. 또한 조류의 성장 속도 등에 영향을 주어 부영양화 및 자정작용에 직·간접적인 자료로 작용한다(Horne and Goldman, 1994). 운문호의 수온은 조사기간 중 11.2~30.2 ℃였다. 4월 2011년 조사에서 가장 낮았고, 8월 2010년 조사에서 가장 높게 나타났다. 모든 조사 시기에 대한 평균 수온 중 가장 낮은 시기는 4월로 13.1℃였고, 8월 27.3℃로 가장 높게 나타났으며 그 차이는 14.2℃였다. 6월~9월까지의 조사 기간 평균 수온인 25.1~27.3℃로 일반적인 남조류 생육적정 수온이 20~30℃범위임을 감안할 때(Chorus and Bartham, 1999) 남조류가 생육할 것으로 보이며 평균 수온은 조사시기별 평균수온은 20.7~22.0℃로 2011년 조사에서 다소 낮았으나 큰 차이는 나타나지 않아 유입 하천의 수온이 크게 다르지 않음을 알 수 있다(Fig. 4).

계절에 따른 수온 편차는 커서 하계인 8월에 가장 높게 나타났으며, 4월에 가장 낮게 나타났다. 6월까지 9월까지 25℃ 이상의 높은 수온을 유지하였으며 10월 조사부터 수온이 떨어지기 시작하여 11월 조사에서는 20℃ 내외로 감소하였다. 가을 수온이 20℃ 이하로 감소하면서 운문호의 식물플랑크톤 종 조성이 남조류에서 규조류로 완전 천이되는 현상이 관찰되었는데 이러한 사실로 미루어 볼때 운문호의 가을철 식물플랑크톤 종 조성 결정 요인들 중 수온이 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

댐 저수지의 수심별 수온 변화는 식물플랑크톤의 군집 변화를 수반하게 된다. 특히 여름철과 같은 고수온기에는 높은 수온을 보이는 표층수와 상대적으로 낮은 수온을 보이는 심수층의 혼합 없이 안정화되는 수온성층의 형성과 수질 영양단계의 악화가 상호 작용할 경우에 남조류 수화가 발생된다(이 등, 2002). 수체의 정체가 심화되게 되면 물보다 비중이 큰 식물플랑크톤의 대부분의 종은 침강

할 수 밖에 없어 정상적인 생육이 크게 제한 받게 되어 급격한 현존량 감소가 일어나게 된다(Horne and Goldman, 1994). 그러나 *Microcystis* 등의 남조류는 세포내 위공포를 내재하고 있어 자체적인 부력을 이용하여 표층수 부근의 표층수에 집중적으로 모여 타 조류와의 경쟁이 없는 독점적 환경에서 폭발적인 증식을 하게 된다(Henderson-Sellers and Markland, 1987). 남조류 대발생은 국내 대부분의 저수지 수질관리에 있어 가장 중요한 문제가 되고 있으며 따라서 저수지에서 고수온기에 수심별 수온 조사는 매우 중요한 수질 항목이 아닐 수 없다(이 등, 2002).

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

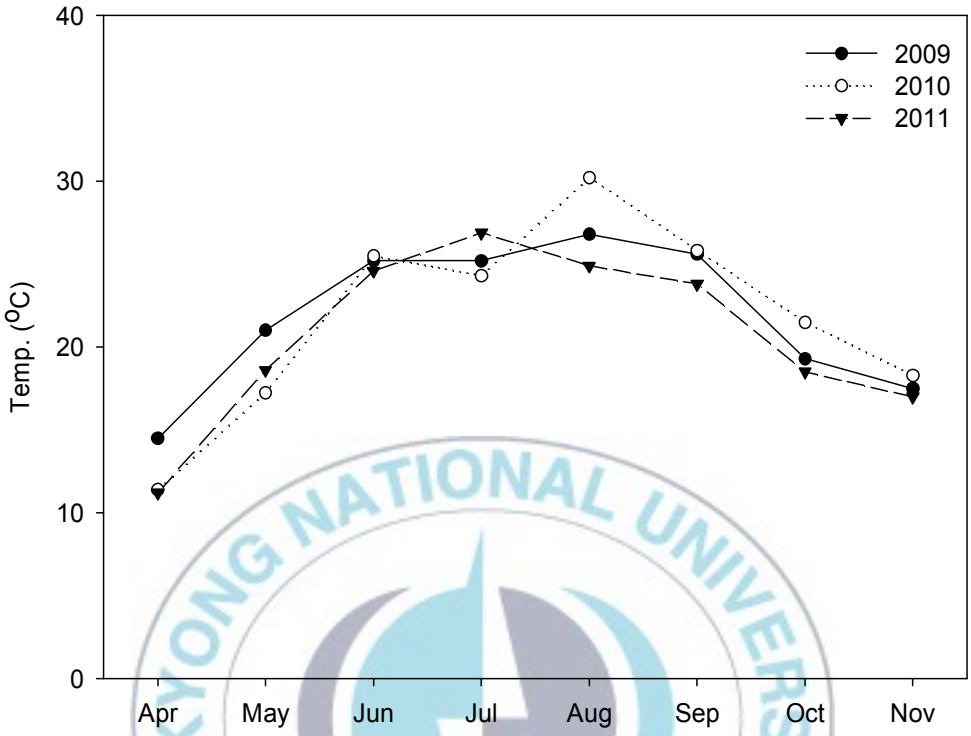

Fig. 4. The seasonal variation of the surface water temperature in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.2.2 용존산소(DO)

호소와 같은 폐쇄적인 수역에서는 하절기 성층현상이 생기면 상층은 조류의 광합성과 대기접촉으로 인해 과포화상태가 되며 하층부는 산소전달이 되지 않아 무산소층을 이루기도 한다. 용존산소는 고수온기에 수온성층의 형성으로 인하여 수층별로 불균등하게 분포하게 되며 심수층이나 저니에서 용존산소의 결핍은 수층내로 인의 재용출을 야기하게 되며 이에 따라 수질영양단계가 급격히 악화될 수 있다. 이러한 영양단계의 상승은 결국 남조류 대발생에 중요한 요인이 된다(Horne and Goldman, 1994).

조사기간 중 4월, 5월 조사에서는 각각 평균 10.8 mg/L, 10.4 mg/L로 큰 차이를 보이지 않았으며 6월 조사에서는 8.1 mg/L로 감소하였다. 9월 조사에서는 8월 조사에 비해 다소 증가한 것으로 조사(9.9 mg/L)되었으며 10월 가장 낮은 7.5 mg/L로 조사되었다. 11월 조사에서는 8.4 mg/L로 조사되었다.

년간 조사를 살펴보면, 2009년 7.3～12.4 mg/L의 범위를 나타냈으며 10월에 가장 낮은 값, 9월에 가장 높은 값을 보였다. 2010년 6.9～11.7 mg/L의 범위를 보였으며 10월에 가장 낮은 값, 5월에 가장 높은 값을 보였다. 2011년 5.9～9.2 mg/L의 범위를 보였으며, 6월에 가장 낮은 값, 4월에 가장 높은 값을 보였다 (Fig. 5).

본 조사에서 용존산소 농도는 4월, 5월 다소 높은 값을 보였으며, 6월 감소하여 7월부터 9월까지 다시 증가하다가 10월 조사부터 다시 감소하는 경향을 보였다.

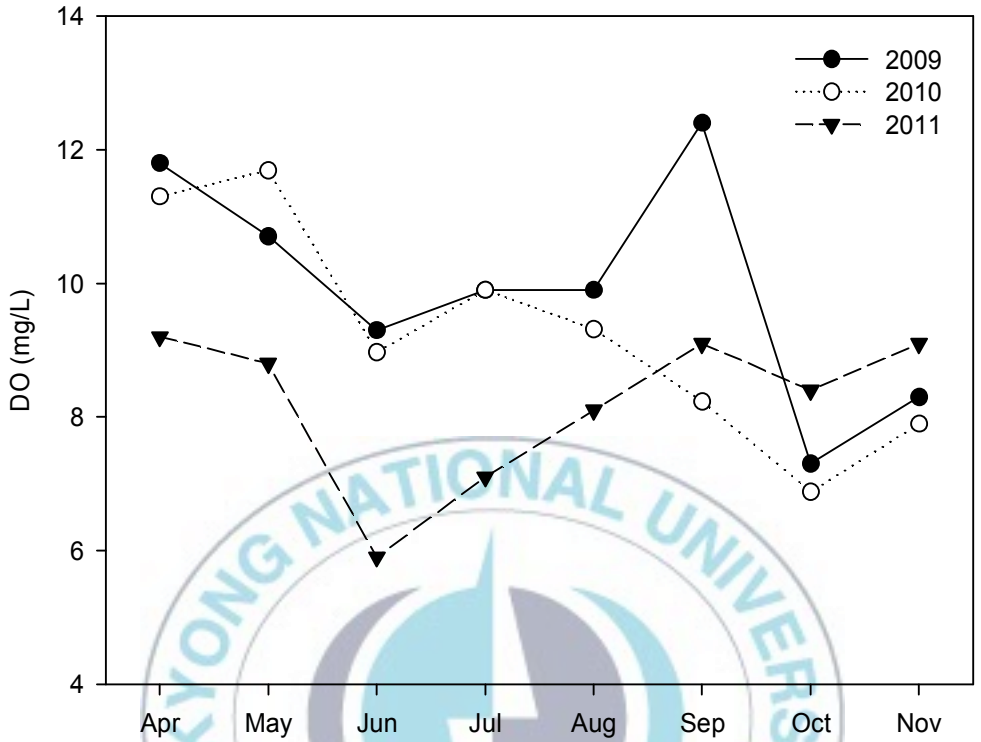

Fig. 5. The seasonal variation of dissolved oxygen concentration in the surface water of Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.2.3 수소이온 농도(pH)

수중 수소이온 농도(pH) 변화는 CO_2나 탄산염의 농도에 따라 큰 영향을 받으므로 독립영양자인 식물플랑크톤의 현존량 증감과 밀접하게 관련되어 있으며 평상시 조사항목에 해당하는 중요지표이다. 수소이온 농도(pH)는 조사시기별 평균 농도가 7.8~9.3(평균: 8.4)의 범위를 나타냈으며, 10월과 11월 조사에서 7.8으로 최저치를, 6월에 9.3로 최고치를 나타내 약알칼리성으로 나타났다. 이는 온도증가와 식물플랑크톤 현존량 증가에 따른 활발한 광합성 활동으로 인한 것으로 보인다(김, 1998). 월별 농도 변화를 살펴보면, 4월에서 7월까지 꾸준히 증가하는 양상을 보이다가 7월을 기점으로 해서 11월까지 감소하는 추세를 보였다. 조사기간 중 평균 pH가 9.0을 초과하여 나타나 6월과 7월 2차례로 계절별로는 광합성이 활발한 하계에 높게 나타났다.

년간 조사를 살펴보면 2009년 조사에서는 8.0~9.1의 범위를 나타냈으며, 10월과 11월에 가장 낮은 수치, 9월에 가장 높은 수치를 기록하였는데 이는 같은 기간 클로로필 a 농도(193.9 mg/m^3)가 조사 기간 중 가장 높은 값으로 활발한 식물플랑크톤 생육특성을 잘 반영하였다. 2010년 조사에서는 7.3~9.4의 범위 보였으며 5월에 가장 낮은 값, 8월에 가장 높은 값을 보였다. 2011년 조사에서는 7.4~10.6의 범위를 보였으며 8월에 가장 낮은 값, 6월에 가장 높을 값으로 2009년 조사때와 원인이 같은 것으로 사료된다(Fig. 6).

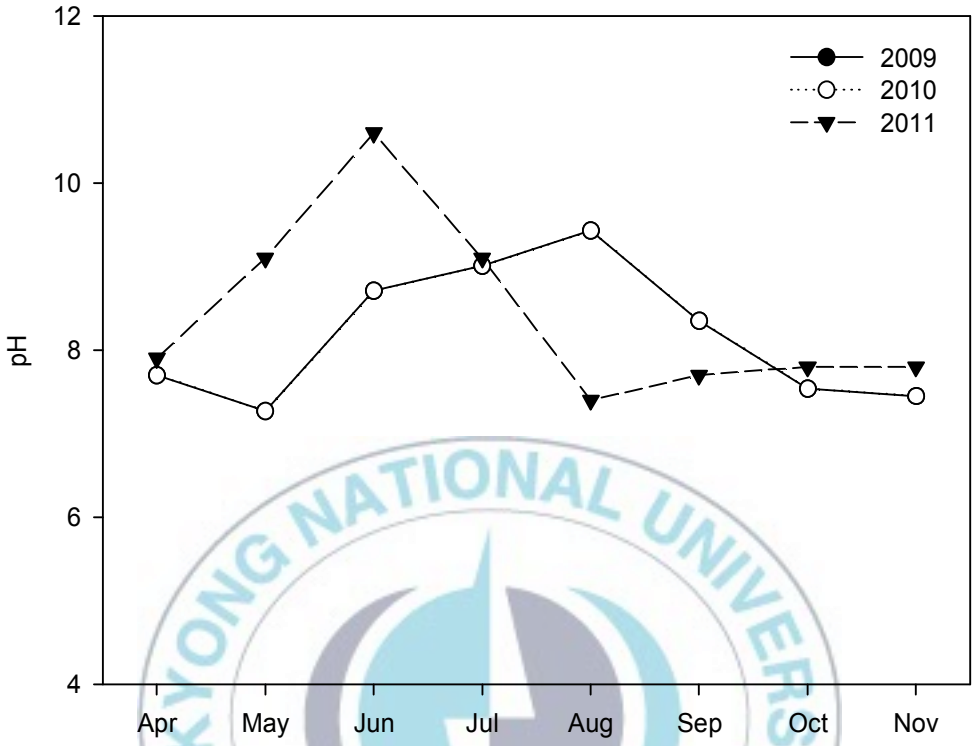

Fig. 6. The seasonal variation of pH in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.2.4 총질소(TN), 총인(TP) 및 총질소와 총인의 농도비(TN/TP ratio)

총질소(TN)의 경우 전 조사기간 동안의 0.559~2.712 mg/L의 범위를 보였으며 평균 농도 1.081 mg/L을 나타내었다. 조사시기별 변화는 2009년 조사에서 0.577~2.712 mg/L이 범위를 보였으며 5월에 가장 낮은 값, 6월에 가장 높은 값을 보였다. 2010년 조사에서 0.559~1.862 mg/L의 범위를 보였으며, 9월에 가장 낮은 값, 4월에 가장 높은 값을 보였다. 2011년 조사에서는 0.901~1.753 mg/L이 범위를 보였으며, 8월에 가장 낮은 값, 4월에 가장 높은 값을 보였다. 계절별 변화를 살펴보면 봄철, 가을철보다 여름철의 농도가 더 높았다. 식물플랑크톤의 수화 발생이 가능한 낮은 농도인 0.300 mg/L를 크게 상회하는 농도이며 또한 일반적인 부영양화 단계의 기준 농도인 0.500 mg/L 역시 초과하는 높은 농도이다. 특히 6월과 7월에는 1.000 mg/L이상의 높은 수치를 나타내었다(Fig. 7).

총인(TP)의 경우 0.003~0.310 mg/L의 농도범위와 평균농도 0.030 mg/L을 나타내었다. 이와 같은 결과는 연간 평균농도(환경부, 2001) 0.018 mg/L 에 비해 비교적 높은 값이며 여름철, 가을철에 총인 농도가 높아 지는 것으로 나타났다. 조사시기별 변화는 2009년 조사에서 0.004~0.052 mg/L이 범위를 보였으며 6월에 가장 낮은 값, 11월에 가장 높은 값을 보였다. 2010년 조사에서 0.012~0.310 mg/L의 범위를 보였으며, 4월에 가장 낮은 값, 5월에 가장 높은 값을 보였다. 2011년 조사에서는 0.009~0.052 mg/L이 범위를 보였으며, 10월과 11월에 가장 낮은 값, 7월에 가장 높은 값을 보였다(Fig. 8).

총질소와 총인의 비율인 TN/TP 비율은 평균 107을 나타내었는데 이는 한국 호수의 TN/TP 비가 대개 100정도로 인이 부족한 사실과 잘 일치하며 운문호 역시 여름, 가을철 식물플랑크톤의 증식을 결정하는 제한 영양소로서 인(P) 제한성이 강하게 나타났다(Fig. 9).

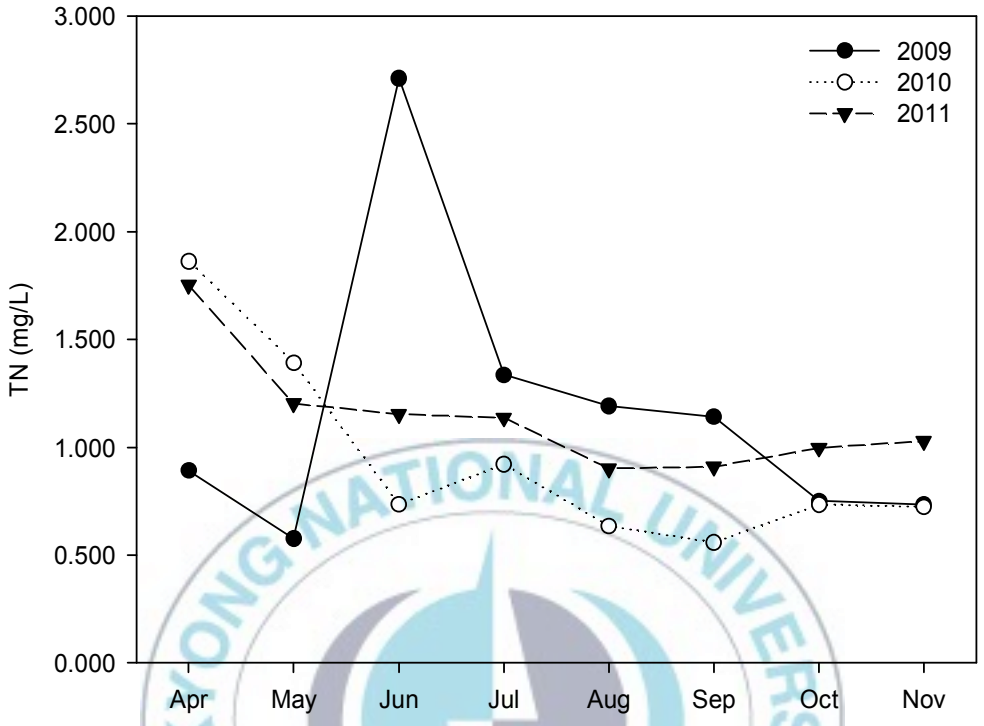

Fig. 7. Monthly changes of total nitrogen (TN) concentration in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

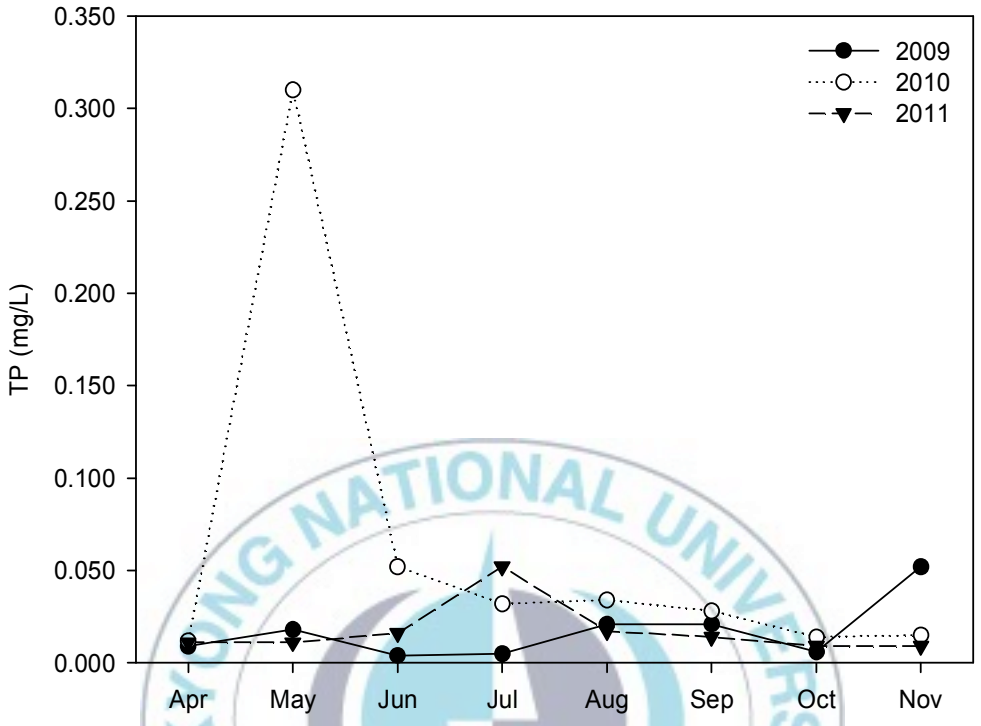

Fig. 8. Monthly changes of total phosphate (TP) in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

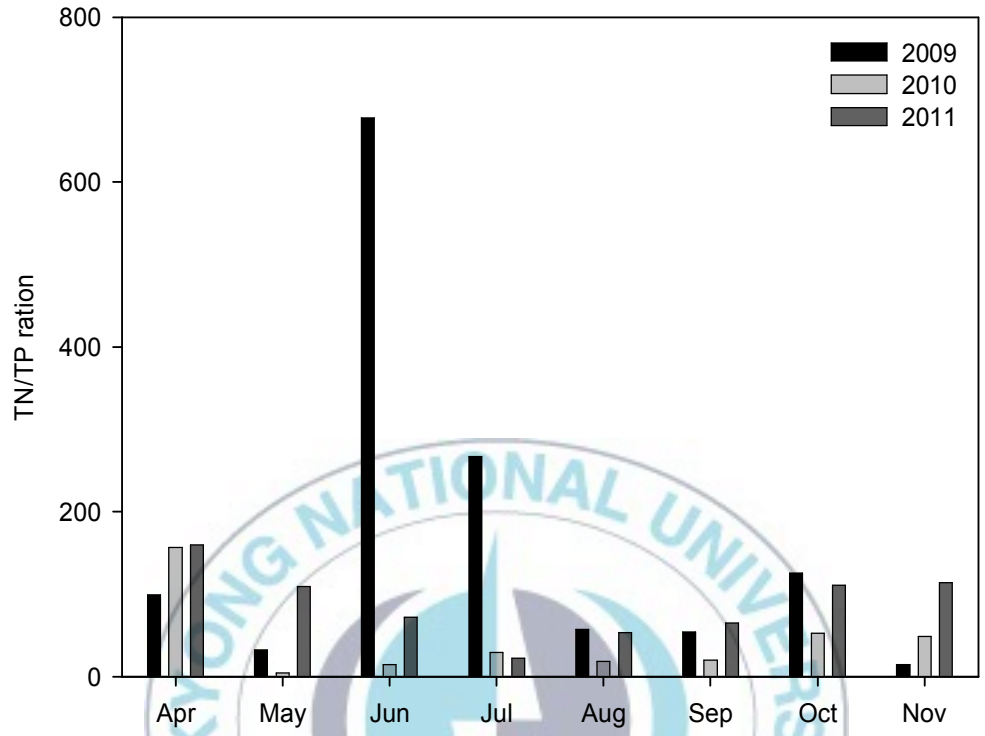

Fig. 9. Monthly changes of TN/TP ratio in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.3 식물플랑크톤

3.3.1 식물플랑크톤 종조성 및 현존량 변화

운문호에서 조사된 식물플랑크톤은 총 99종이 동정되었으며, 분류군별로는 녹조류 35종(35.4%), 규조류 45종(45.5%), 남조류 8종(8.1%), 편모조류 11종(11.1%)으로 조사되었다. 이들은 중 20종은 매년 계속 출현하였고, 그 구성은 규조류 11종, 녹조류 6종, 남조류 1종, 편모조류 2종에 해당한다. 월별 출현 종을 살펴보면, 특정 달만 출현한 종은 총 출현종수의 17.2%에 해당하는 17종으로 규조류 7종, 녹조류 5종, 편모조류 4종, 남조류 1종으로 구성된다.

조사 시기 별로는 2011년 69종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 2009년 39종으로 가장 적은 종이 출현하였다. 월별로 살펴보면, 2009년 조사에서는 7월 조사에서 최대 출현종(16종)을 보이며 종조성이 가장 다양하였고, 그 이후인 8월에는 점차 줄어드는 경향을 나타내었다(Fig. 10). 8월 출현 종수의 급감은 8월의 조사 시 모든 조사 정점에서 우점종이 *Peridinium*속 인 것으로 보아 와편모조류에 의한종다양성 감소가 원인인 것으로 사료된다.

2010년 조사에서는 4월에 22종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 9월 10종 미만으로 급감하였다. 이는 2009년과 달리 와편모조류에 의한 것이 아니며, 남조류에 의한 종 다양성 감소가 원인인 것으로 사료된다. 2011년 4월 조사에서 규조류의 증가로 최대 출현종(26종)을 보이며, 6월에 13종으로 가장 적은 종이 출현하였다. 이는 규조류의 증가로 종 다양성 감소가 원인인 것으로 사료된다.

호소 내 조사시기의 월별 식물플랑크톤 평균 현존량은 4월과 5월 각각 680 cells/mL, 608 cells/mL로 나타났으나 6월 2,680 cells/mL로 급격히 증가하기 시작하였다. 7월 3,382 cells/mL로 최대 현존량을 보였으며, 특히 2011년 조사에서 8,122 cells/mL로 상당히 높은 식물플랑크톤 현존량을 나타내었다. 그러나 8월 조사에서 598 cells/mL로 급격히 감소하여 1,000 cells/mL 이하의 낮은 식물플랑크톤 현존량을 나타내었다. 9월 조사에는 8월에 비해 급격히 증가하여 평균 2,577.8 cells/mL로 나타났으며, 10월 조사에서는 조사기간동안 전반적으로 현존

량이 감소하여 평균 410 cells/mL을 보였다. 11월 조사에서는 2009년과 2010년에는 500 cells/mL이하의 현존량을 보였지만 2011년에는 규조류와 남조류가 혼재하여 출현하여 1,000 cellss/mL이상의 현존량을 보여 평균 649 cellss/mL로 나타났다(Fig. 11).

클로로필 a는 광합성에 관여하는 색소이므로 클로로필 a 측정을 통해 현존량 생산성을 밝힐 수 있다. 식물플랑크톤 생물량을 간접적으로 나타낼 수 있는 클로로필 a의 농도는 식물플랑크톤 생물량 변화와 유사한 변동 양상을 나타내었다. 조사 시기별 평균 식물플랑크톤을 보면 9월 조사에서 클로로필 a 농도가 평균 67.5 mg/m^3로 상당히 높은 수치를 기록하였고, 식물플랑크톤 평균 현존량이 또한 2,577.8 cellss/mL로 높게 조사되었다(Fig. 12). 이는 2009년 조사에서 *Peridinium* 속과 같이 세포 체적이 큰 종들이 대량 출현함으로 인해 클로로필 a농도가 최고치를 기록한 것으로 기록한 것으로 보인다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

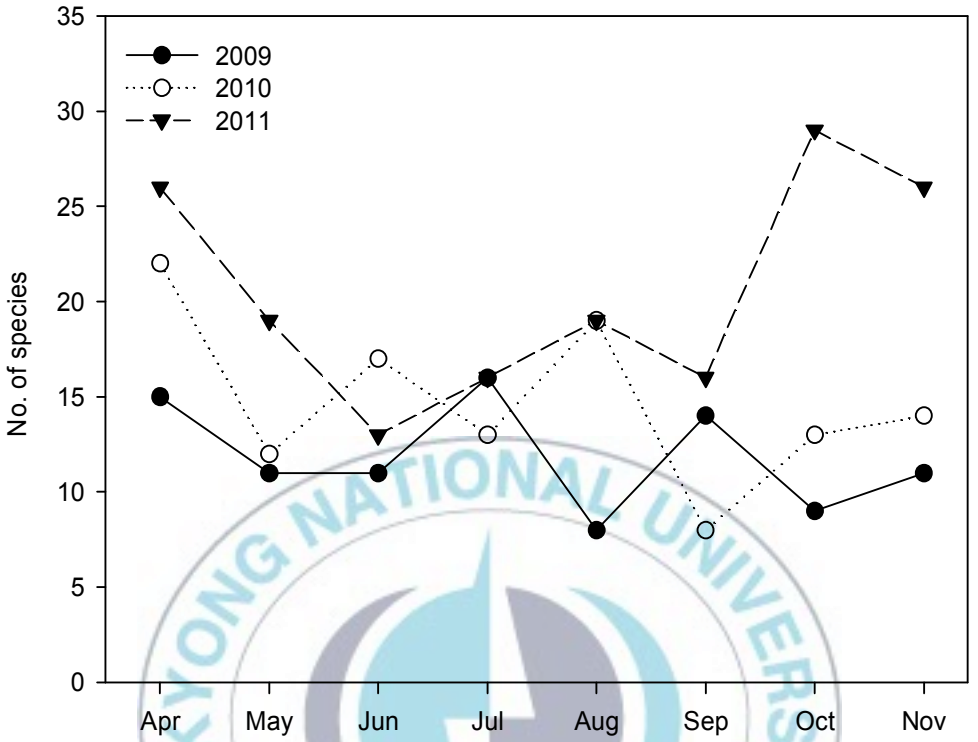

Fig. 10. Monthly variation in the number of species in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

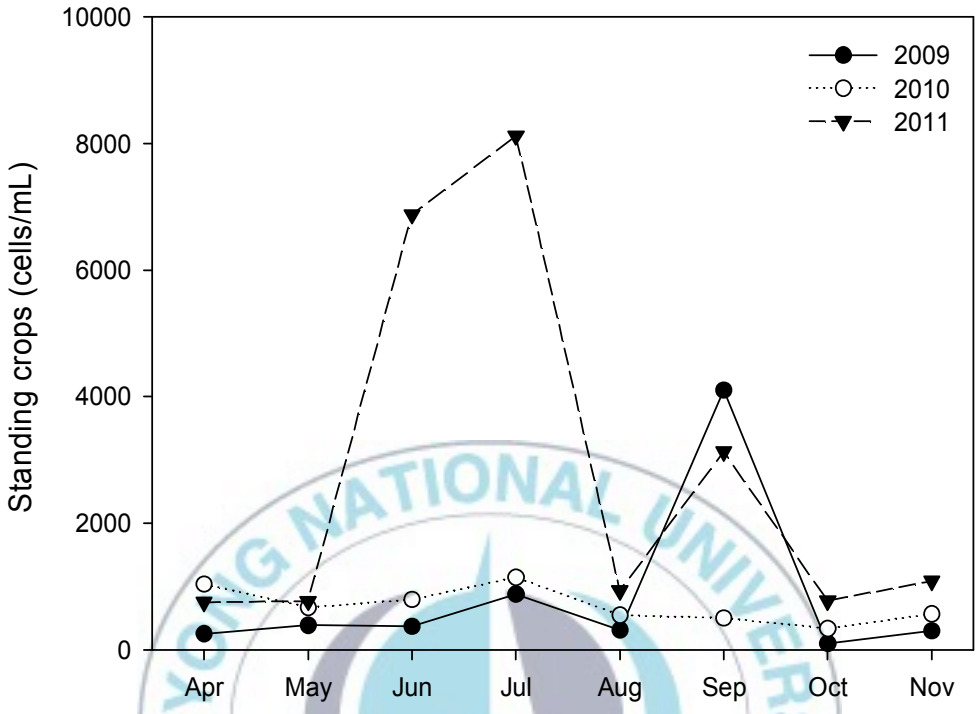

Fig. 11. Monthly variation of phytoplankton standing crops(cellss/mL) in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

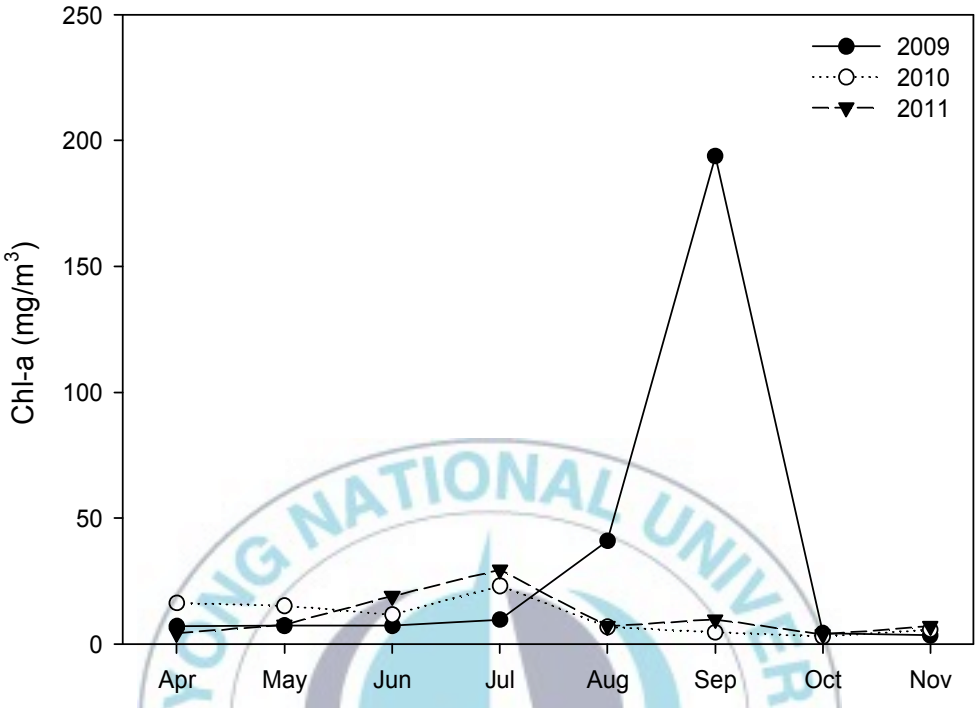

Fig. 12. Monthly variation of chlorophyll-a concentration in Lake Unmoon.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

3.3.2 식물플랑크톤 분류군별 구성비

식물플랑크톤 현존량에 대한 강별 구성비는 조사 시기에 따라 차이를 나타내었다. 2009년 4월 규조류의 구성비(53.7%)가 높게 조사되었고, 5월부터 하계 갈수록 남조류의 구성비가 점차 증가하는 전형적인 댐 저수지의 식물플랑크톤 구성비 변화를 나타내었다. 6월 조사 시에서는 남조류의 가장 높은 구성비(71.7%)를 나타내었으며, 이 시기에 *Microcystis wesenbergii, Anabaena* spp.의 남조류가 우점하였다. 8월과 9월 조사에서 편모조류 구성비가 50.0%를 초과하여 상당히 높게 조사되었으며 10월과 11월 조사에서는 규조류가 각각 68.8%, 50.0%로 상당히 높게 나타났다(Fig. 13). 2010년 조사에서는 2009년과 마찬가지로 규조류의 구성비(41.9%)가 높게 조사되었고, 5월에는 남조류와 편모조류가 혼재(36.2%)하여 나타났으며, 6월과 7월 남조류의 구성비가 점차 증가하여 각각 61.0%, 70.5%로 나타났다. 8월과 10월에는 일시적으로 녹조류가 증가하여 각각 50.0%, 38.2%를 나타내었으며 9월과 11월에는 남조류의 구성비(64.4%, 35.2%)가 가장 높게 나타났다(Fig. 14). 2011년 4월부터 규조류의 구성비(51.4%)가 점차 증가하여 5월과 6월에 90.0%이상으로 높게 나타났으며 7월부터 점차 감소(67.3%)하였다. 수온이 증가한 8월과 9월에는 남조류의 구성비가 각각 49.4%, 79.1%로 높게 나타났으며, 10월과 11월에는 규조류의 구성비가 40.0%이상으로 높게 나타났다(Fig. 15).

월별 분류군별 구성비를 살펴보면, 4월과 5월에 규조류의 구성비가 51.4%, 45.1%가 높게 나타났으며, 6월에 규조류와 남조류가 혼재하여 45.1%로 나타났다. 7월에서 9월까지는 남조류의 구성비가 높게 나타났으며 10월과 11월에 규조류의 구성비가 높게 나타났다.

Table 2. Monthly variation of standing crops of phytoplankton in Lake Unmoon(Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta)

	Class	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
2009	Chl.	49.2	117.1	18.4	131	106	77.9	19.0	123.9
		(19.5)	(30.2)	(5.0)	(14.9)	(34.0)	(1.9)	(18.8)	(41.7)
	Bac.	135.4	95.1	73.4	286	46.9	102	69.7	148.7
		(53.7)	(24.5)	(20.0)	(32.5)	(15.1)	(2.5)	(68.8)	(50.0)
	Cya.	61.5	161.0	263.1	445.7	0.0	952.5	0.0	0.0
		(24.4)	(41.5)	(71.7)	(50.6)	(0.0)	(23.2)	(0.0)	(0.0)
	Etc.	6.1	14.6	12.2	17.1	158.4	2,971.2	12.7	24.8
		(2.4)	(3.8)	(3.3)	(1.9)	(50.9)	(72.4)	(12.5)	(8.3)
2010	Chl.	180	75.0	75	137.8	273.2	155.6	127.5	149.5
		(17.4)	(11.2)	(9.4)	(12.0)	(50.0)	(31.1)	(38.2)	(26.4)
	Bac.	435	109.5	165	110	75	16.7	60.7	118.4
		(41.9)	(16.4)	(20.8)	(9.64)	(13.7)	(3.3)	(18.2)	(20.9)
	Cya.	199	242.2	485.0	806.0	182.1	322.2	78.9	199.4
		(19.2)	(36.2)	(61.0)	(70.5)	(33.3)	(64.4)	(23.6)	(35.2)
	Etc.	224	242.2	70.0	89.6	16.1	5.56	66.8	99.7
		(21.6)	(36.2)	(8.8)	(7.83)	(2.9)	(1.1)	(20.0)	(17.6)
2011	Chl.	20.4	15.8	177.4	25.9	198.1	211.4	270	159
		(2.72)	(2.1)	(2.6)	(0.3)	(21.2)	(6.8)	(34.8)	(14.7)
	Bac.	440	724.6	6,511.3	5,462.1	220.1	389.2	361	692
		(58.7)	(94.5)	(94.7)	(67.3)	(23.5)	(12.4)	(46.6)	(64.0)
	Cya.	0	0.0	187.8	2,575.8	462.3	2,475.9	140	215
		(0.0)	(0.0)	(2.7)	(31.7)	(49.4)	(79.1)	(18.0)	(19.9)
	Etc.	289	26.3	0.0	58.2	55.0	53.7	5	15
		(38.6)	(3.4)	(0.0)	(0.7)	(5.9)	(1.7)	(0.6)	(1.4)

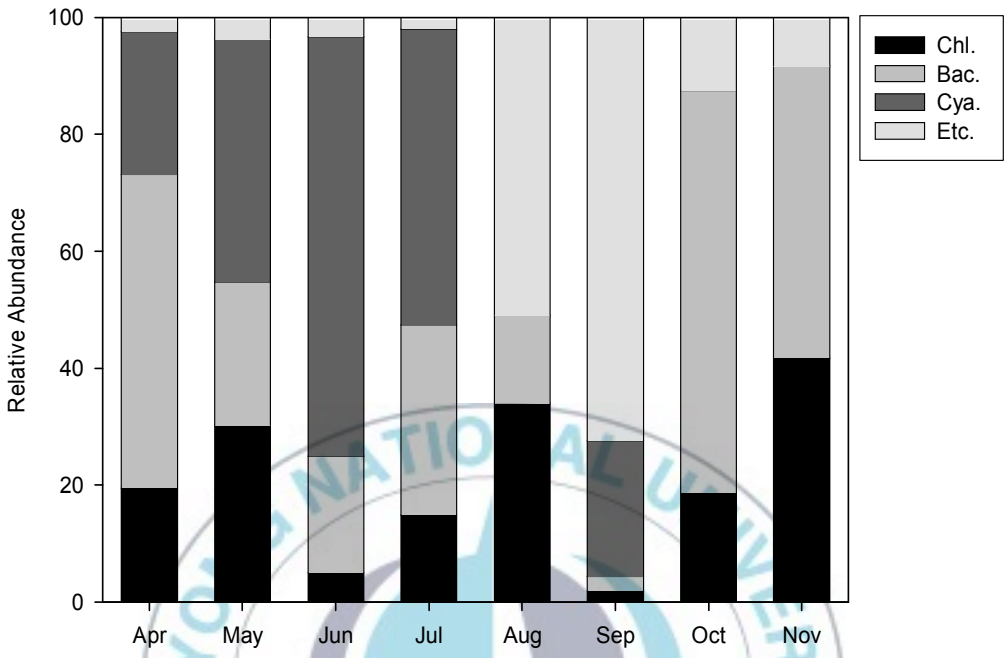

Fig. 13. Monthly variations of the relative abundance in algal classes in Lake Unmoon from April to November, 2009 (Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta)

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

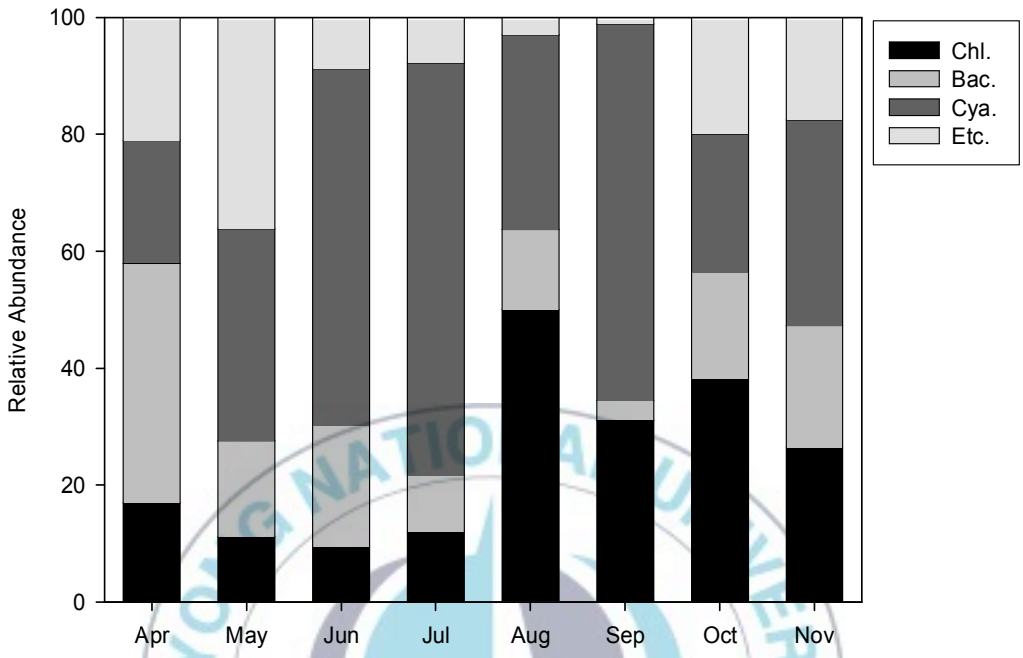

Fig. 14. Monthly variations of the relative abundance in algal classes in Lake Unmoon from April to November, 2010 (Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta)

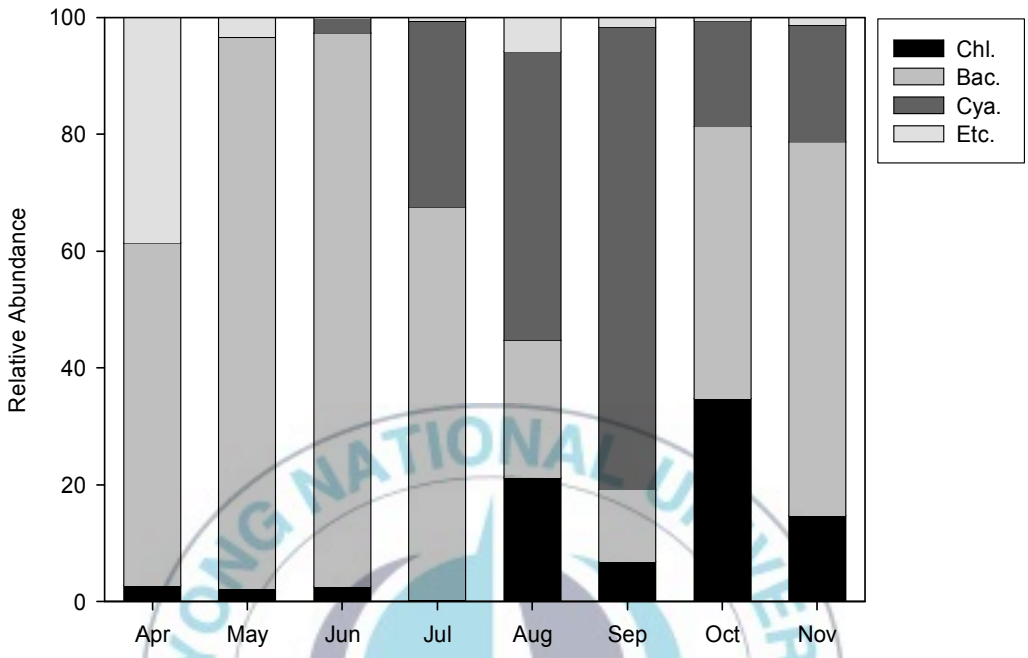

Fig. 15. Monthly variations of the relative abundance in algal classes in Lake Unmoon from April to November, 2011 (Chl: Chlorophyceae, Bac: Bacillariophyceae, Cya: Cyanophyceae, Etc: Crysophyta, Euglenophyta, Dinophyta and Cryptophyta)

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.3.3 식물플랑크톤 군집의 우점종 변화

식물플랑크톤 군집의 우점종은 조사 시기에 따라 차이를 나타내었다. 2009년 조사에서는 4월부터 7월까지 남조류가 우점으로 출현하였고 주요 우점종은 *Microcystis wesenbergii*로 조사되었다. 8월과 9월에는 와편모조류인 *Peridinium* spp.이 우점종으로, 10월 조사에서는 규조류인 *Aulacoseira ambigua*, 11월 조사에서는 녹조류인 *Pediastrum duplex* var. *gracitimum*가 우점종으로 출현하였다. 2010년 조사에서는 9월 조사까지 하계 남조류 수화 발생의 대표적인 원인 종인 *Microcystis aeruginosa, Anabaena* spp.이 우점종으로 나타나 향후 남조류에 의한 수화가 발생할 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 9월 조사를 통해 운문호 남조류 수화가 발생할 것으로 예상되었으나 10월 조사에서는 녹조류인 *Coelastrum* sp.이 우점종으로 출현하고 남조류가 급감하였다. 그러나 11월에 *Anabaena* spp.이 급격히 성장하여 전체 현존량의 35.2%를 자치하며 조사 지점에서 우점종으로 조사되었다. 2011년 조사에서는 4월 편모조류인 *Dinobryon* spp.이 우점종으로 출현하였으며 5월에서 7월까지 규조류인 *Fragilaria crotonenesis*가 우점하였다. 수온이 증가한 8월부터 9월에 *Microcystis* 속이 출현하는 것으로 나타났으며 10월에 *Anabaena planctonica*가 우점종으로 나타났다. 11월에는 규조류인 *Aulacoseira granulata*가 우점종으로 나타났다.

이처럼 운문호의 경우 향후 남조류에 의한 수화 발생의 가능성이 상당히 높은 것으로 추측되었으며, *Microcystis, Anabaena* 속을 비롯하여 남조류 수화를 유발하는 대표적인 분류군들에 대한 면밀한 생태학적 조사와 이들의 생육 저감 방안에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 보여진다.

Table 3. Seasonal succession of dominant species phytoplankton in Lake Unmoon

	Month	Dominant species	Dominance (%)
2009	Apr.	*Microcystis wesenbergii*	24.4
	May	*Microcystis wesenbergii*	41.5
	Jun	*Microcystis wesenbergii*	71.7
	Jul	*Microcystis wesenbergii*	26.0
	Aug	*Peridinium* sp.	50.9
	Sep	*Peridinium* sp.	72.4
	Oct	*Aulacoseira ambigua*	31.3
	Nov	*Pediastrum duplex* var. *gracitimum*	35.4
2010	Apr.	*Microcystis aeruginosa*	21.6
	May	*Microcystis* sp.	36.2
	Jun	*Anabaena* sp.	27.0
	Jul	*Microcystis aeruginosa*	31.3
	Aug	*Microcystis aeruginosa*	21.6
	Sep	*Anabaena* sp.	64.4
	Oct	*Coelastrum* sp.	27.3
	Nov	*Anabaena* sp.	35.2
2011	Apr.	*Dinobryon* sp.	22.8
	May	*Fragilaria crotonensis*	44.5
	Jun	*Fragilaria crotonensis*	94.3
	Jul	*Fragilaria crotonensis*	64.8
	Aug	*Microcystis aeruginosa*	49.4
	Sep	*Microcystis ichthyoblabe*	33.3
	Oct	*Anabaena planctonica*	18.0
	Nov	*Aulacoseira granulata*	26.2

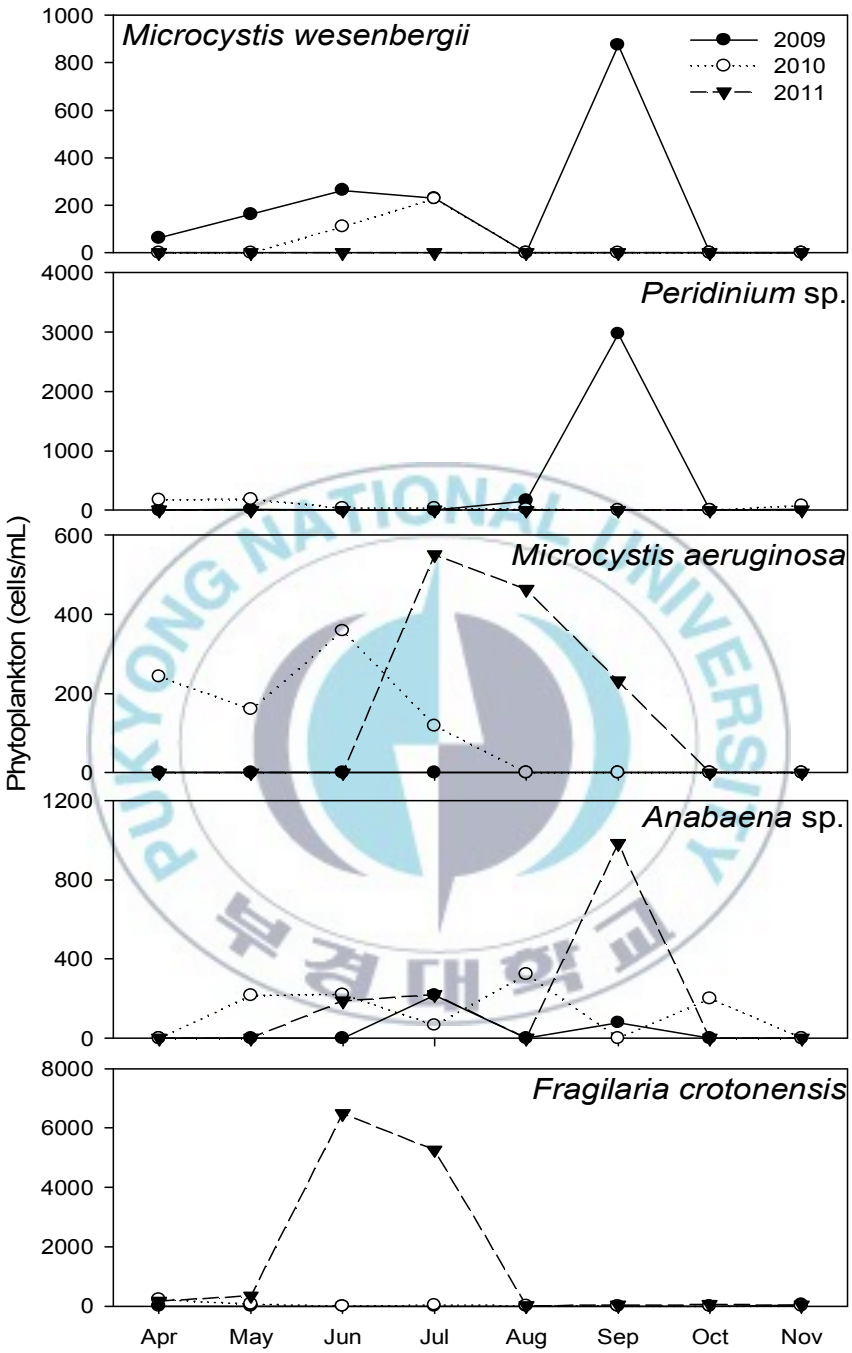

Fig. 16. Monthly variations of dominant phytoplankton standing crops(cellss/mL) in Lake Unmoon.

3.4 군집분석

3.4.1 우점도 지수

식물플랑크톤 우점도 지수는 조사기간 동안 0.09~0.89의 범위를 보였다. 조사시기별로 2009년 조사에서는 0.13~0.57의 범위를 보였으며 4월에 최저치를 9월에 최고치를 보였다. 2010년 조사에서는 0.12~0.45의 범위를 보였으며, 8월에 조사기간 중 가장 최저치를 9월에 최고치를 보였다. 2011년 조사에서는 0.09~0.89의 범위를 보였으며, 10월에 조사기간 중 가장 최저치를 나타내었다. 이는 10월에 출현종이 적었을 뿐만 아니라, 적은 양이 출현하여 비롯된 결과라 생각된다.

월별 평균 변화 범위는 0.14~0.52이 엇으며, 가장 낮은 우점도 지수가 나타난 달은 4월이었으며, 가장 높은 우점도지수가 나타난 달은 6월이었다.

3.4.2 종 다양성 지수

식물플랑크톤 종 다양성 지수는 0.32~2.74의 범위를 보였다. 2009년 조사에서는 0.87~2.27의 범위를 보였으며, 9월에 최저치를 4월에 최고치를 보였다. 2010년 조사에서는 1.16~2.43의 범위를 보였으며 9월에 최저치를 4월에 최고치를 보였다. 2011년 조사에서는 0.32~2.74의 범위를 보였으며 6월에 최저치를 우점도 지수가 가장 낮았던 10월에 최고치를 보였다.

월별 평균 변화 범위는 1.26~2.30이었으며, 가장 낮은 종다양성 지수가 나타난 달은 6월이었으며, 가장 높은 종다양성 지수가 나타난 달은 4월이었다.

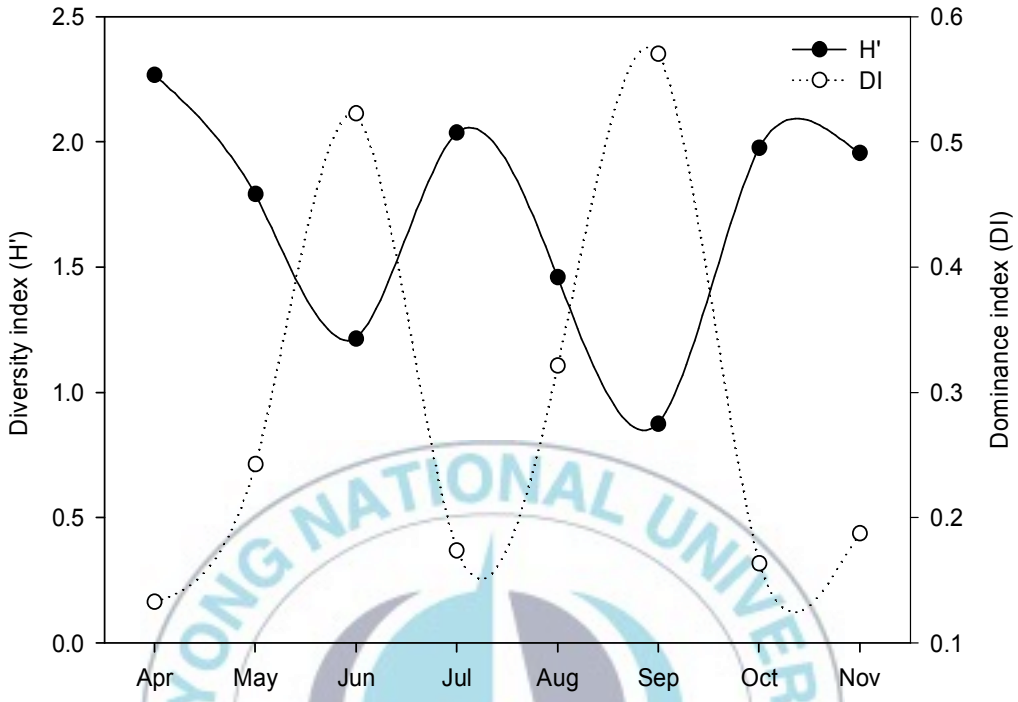

Fig. 17. Monthly variations of phytoplankton diversity index (H′) and dominance index (DI) in Lake Unmoon from April to November, 2009.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

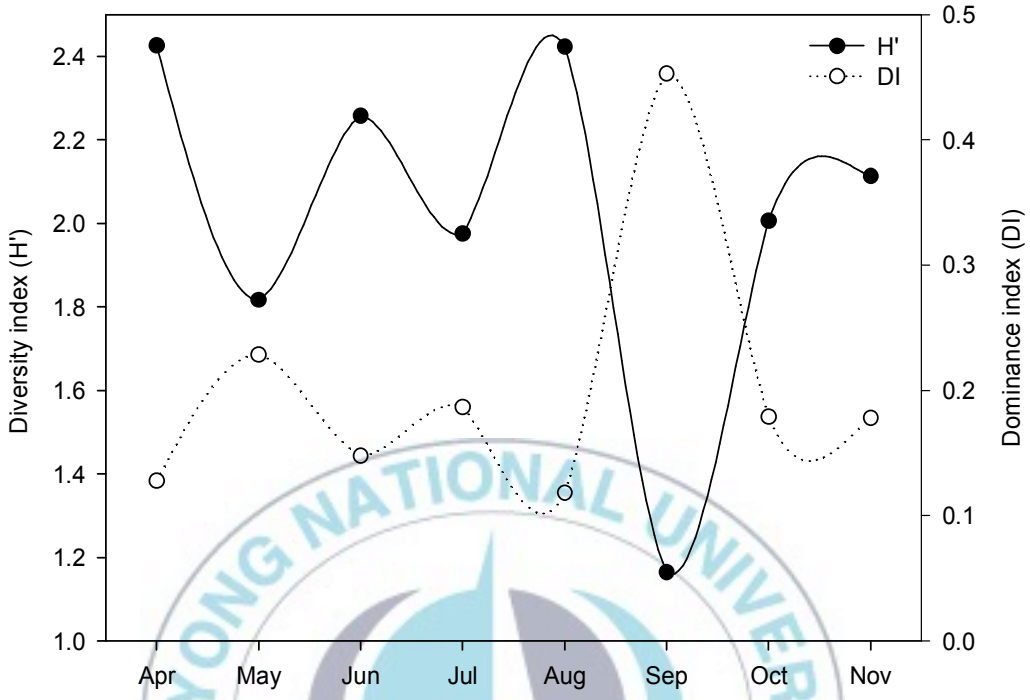

Fig. 18. Monthly variations of phytoplankton diversity index (H′) and dominance index (DI) in Lake Unmoon from April to November, 2010.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

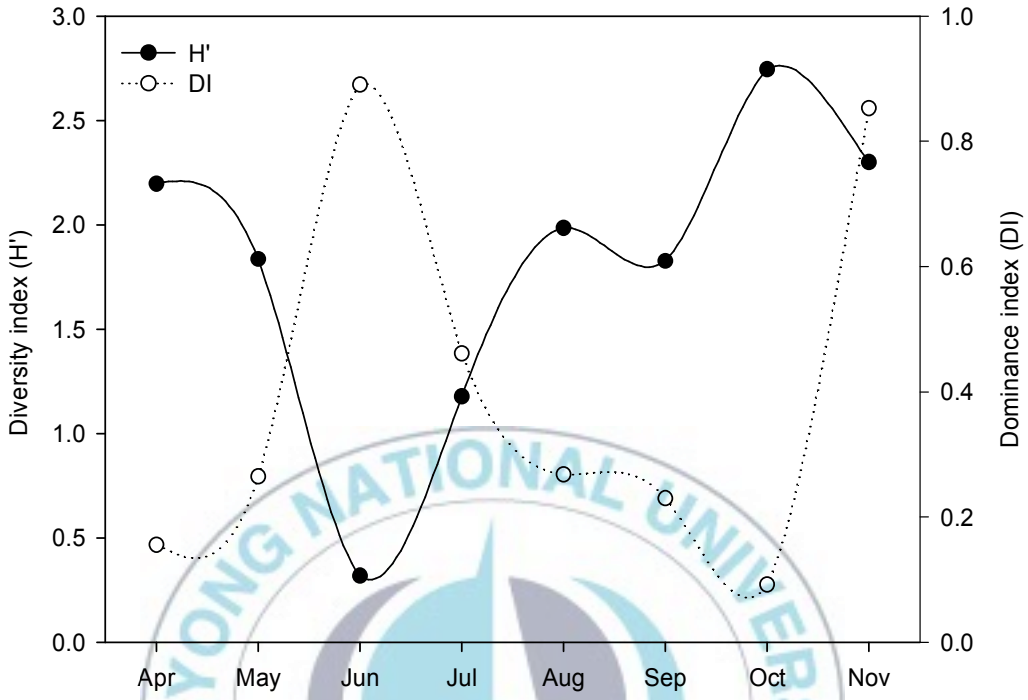

Fig. 19. Monthly variations of phytoplankton diversity index (H′) and dominance index (DI) in Lake Unmoon from April to November, 2011.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

4.1 식물플랑크톤과 환경 요인과의 관계

본 조사기간 중 운문호의 식물플랑크톤 현존량은 평균 1,353.5 cellss/mL로 중영양역(mesotrophication) 이상으로 수온이 낮은 봄 가을철에 낮았으며, 수온이 높은 여름철에 높았다.특히 수소이온 농도(pH)는 식물플랑크톤 현존량과 상관성을 보였다(Table 4).

규조류의 현존량 변화는 수소이온 농도(pH)와 양의 상관성($r=0.585$, $p<0.05$)을 보였으며, 용존산소(DO)는 음의 상관성($r=-0.506$, $p<0.01$)을 보였다. 클로로필 a의 농도는 영양 상태를 평가하는데 식물플랑크톤 현존량과 함께 Biomass를 나타내는데 매우 유용한 척도로 사용된다(USEPA, 1976; Forsberg and Ryding, 1980; Yang and Dickman, 1993). 본 조사에서 클로로필 a의 농도는 평균 18.7mg/m^3로 편모조류 현존량의 변동과 매우 유사하게 변화하였다($r=0.972$, $p<0.05$).

조사기간 동안 각 우점속의 개체수와 수질조사 자료간의 상관도는 높지 않았다. 우점속이었던 *Fragilaria*속 등은 수소이온 농도에 의해 그 분포가 뚜렷하게 차이를 나타냈다($r=0.863$, $p<0.05$). 이러한 우점종들과 환경 요인들간의 상호관계에 대한 상관분석에 따르면, 가을철에 우점하였던 와편모조류 *Peridinium*속은 수온, DO 및 TN등의 영향을 받은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 조사 시기에 따라 차를 보였으나, *Pediastrum*속은 어떠한 환경요인과도 관련성을 보이지 않았다.

Table 4. Pearson correlation between phytoplankton cell density and environmental factors in Lake Unmoon(**; p<0.005)

		Total	Chl.	Bac.	Cya.	Etc.
Temperature	R	0.329	0.227	0.202	0.383	0.116
	P	0.117	0.287	0.344	0.065	0.59
	N	24	24	24	24	24
pH	R	**0.534****	-0.062	**0.585****	0.092	0.148
	P	0.007	0.772	0.003	0.67	0.489
	N	24	24	24	24	24
DO	R	-0.294	-0.125	-0.506	-0.068	**0.468****
	P	0.163	0.561	0.012	0.751	0.021
	N	24	24	24	24	24
Chl.a	R	0.369	-0.143	0.021	0.233	**0.972****
	P	0.076	0.504	0.921	0.274	0.000
	N	24	24	24	24	24.000
TN	R	0.05	-0.355	0.066	-0.034	0.077
	P	0.815	0.089	0.758	0.873	0.721
	N	24	24	24	24	24
TP	R	-0.009	-0.123	-0.015	0.007	0.016
	P	0.966	0.568	0.945	0.974	0.939
	N	24	24	24	24	24
TN/TP	R	-0.159	-0.289	-0.101	-0.134	-0.082
	P	0.459	0.171	0.639	0.534	0.702
	N	24	24	24	24	24

Ⅳ. 결론

수온은 계절적인 변화에 따라 하계에는 높게 동계에는 낮게 조사되었으며, 조사 기간 동안 수온의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았다. 월별 평균 수온을 살펴보면 4월부터 점차 증가하였으며, 6월부터 9월까지 25℃이상의 높은 수온을 유지하였으며10월부터 점차 감소하여 나타났다. 용존산소 농도는 4월과 5월에 높은 농도를 보였으나 5월 이후 점차 감소하여 나타났다. 조사시기별 평균 pH는 11월 조사에서 최저를 나타내었으며 6월에 최고치를 나타내었고 조사 기간 동안 큰 차이를 나타내지 않았다. 조사 기간 동안 운문호에서 출현한 식물플랑크톤은 총 99 종이였고 조사 시기별 4월과 8월에 32종으로 가장 많이 나타났으며, 10월에 17종으로 가장 적게 나타났다.

식물플랑크톤 조사 월별 결과 4월과 5월에는 대부분 1,000 cellsss/mL 이하의 낮은 현존량을 나타내었다. 2009년, 2010년 조사에서는 6월과 7월에는 남조류 *Microcystis* 속, 2011년 조사에서는 규조류인 *Fragilaria* 속(2011)의 현존량이 급격히 증가하였다. 8월과 9월 조사에서는 2010년과 2011년은 남조류인 *Anabaena, Microcystisi* 속이 우점하며 비슷한 양상을 보였으나, 2009년 조사에서는 와편모조류인 *Peridinium* 속이 우점 하면 9월에는 2,900 cellsss/mL 이상이 출현한 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 현존량에 대한 강별 구성비는 조사시기에 따라 차이를 타나태어 4월과 5월에는 남조류와 편모조류의 구성비가 높게 조사되었고, 하계로 갈수록 남조류의 구성비가 점차 증가하는 전형적인 댐 저수지의 식물플랑크톤 구성비 변화를 나타내었다.

운문호의 식물플랑크톤 천이양상을 살펴보기 위하여 2003년 운문호 자료와 비교한 결과 늦봄까지 규조류가 우점하다가 초여름부터는 편모조류로 천이가 일어나며 곧 남조류, 규조류, 편모조류가 혼재하여 양상을 보였다 이후 고 수온이 지속되면서 8월초 녹조류가 일시 우점 하였으나 8월 중순 이후부토 10월 중순까지 남조류가 지속적으로 우점하였다. 가을부터는 남조류가 소멸하고 규조류가 다시 우점하는 양상을 보여주었다. 본조사와 비교했을 때 2009년과 2010년 남조류의 발생시기가 다소 차이를 보였으나 출현 우점 조류종은 일치하게 나타

났다. 이러한 차이는 조사간격의 차이에서 기인한 것으로 보여지며, 조류 천이 관련된 조사는 월 1회 조사보다는 최소 월 2회 이상의 조사가 바람직 할 것으로 여겨진다. 향후 호소수질관리 및 수자원확보를 위해 수질개선을 위한 노력이 필수적으로 요구되며, 운문호의 남조류 수화 발생원인 규명을 위해서는 지속적인 연구를 통해 운문호의 자료를 축적하여 분석하고, 국내외 댐저수지의 남조류 수화 발생 원인에 대한 자료를 수집하고 분석하는 연구가 병행되어야 할 것으로 보여진다.

참고문헌

경남지역환경기술센터, 2004. 호소의 생물상 조사(연초호, 구천호, 장척호). 182 pp.

경남지역환경기술센터, 2005. 호소의 생물상 조사(2). 179 pp.

기상청, 2009-2011. 기상연보, 기상청

김대균, 최애란, 이혜경, 권오섭, 김종설, 2004. 회야댐 저수지에서 물리·화학적 환 경요인에 따른 식물플랑크톤과 세균 군집의 변화. 한 국 육수학회지. 37: 26-35.

김범철, 박주현, 황길순, 최광순, 1997. 한국의 대형 담수생태계의 부영양화. 한국육 수학회지. 30: 512-517.

김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙, 1998. 국내 주요호수의 육수학적 조사(2): 합천호. 한국육수학회지. 30: 312-327.

김용재, 1998. 보문호의 LTSI에 의한 영양상태 판정. 환경생물학회지. 16: 107-116.

김용환, 이순화, 2001. 운문호 저질 중 존재형태별 특성 및 용존유기물의 용출. 경산대학교 환경연구지. 6: 13-21.

김종민, 박준대, 노혜란, 한명수, 2002. 소양호와 팔당호 수질의 수직 및 계절적 변화. 한국육수학회지. 35: 10-20.

김종원, 이학영, 김맹기, 조인숙, 1993. 진양호와 합천호의 식물플랑크톤에 관한 연구. 345 pp.

낙동강수계관리위원회, 2008. 낙동강수계 호소 환경 및 생태 조사. 630 pp.

낙동강수계관리위원회, 2009. 낙동강수계 호소 환경 및 생태 조사. 583 pp.

낙동강수계관리위원회, 2010. 낙동강수계 호소 환경 및 생태 조사. 445 pp.

낙동강유역환경청, 2003. 호소생물상조사보고서. 146 pp.

낙동강유역환경청, 2006. 호소의 생물상(우포). 152 pp.

노태호, 2002. 생물 군집의 회복력 및 저항력: 하천생태계 건전성 평가를 위한 응용성. 환경정책연구. 1: 91-110.

대구지방환경청, 2004. 호소생물상조사 보고서(가창댐, 보문호, 풍락지, 영천댐). 182 pp.

대구지방환경청, 2005. 호소생물상조사 보고서(안동호, 임하호, 안계호, 운문호). 179 pp.

대구지방환경청, 2008. 호소생물상조사 보고서(경천호, 오태지, 덕동호, 용연지). 164 pp.
문성기, 홍채규, 정종문, 1995. 회동수원지의 식물플랑크톤군집에 관하여. 한국육수학회지. 4: 167-175.
백인호, 1999. 운문댐 최적 취수수심 결정을 위한 수질 및 식물플랑크톤 군집 변화 연구. 경북대 석사학위 논문, 75 pp.
이정호, 박종근, 김연숙, 장천영, 최재신, 2002. 대청호 남조류 수화 발달의 생태 기작 연구 2차년도. 한국대댐학회. 145 pp.
이정호, 백인호, 김철호, 2000. 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택취수수심 결정. 한국육수학회지. 33: 331-318.
서정관, 정익교, 1994. 낙동강하구의 식물플랑크톤군집구조. 한국육수학회지. 27:227-250.
서정관, 유재정, 이재정, 양상용, 정익교, 2003. 운문호의 식물플랑크톤 군집동태와 영양단계평가. 한국조류학회. 18: 135-143.
정준, 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적, 496pp.
한국수자원공사, 1997a. 운문댐 상수원 보호구역 지정 종합보고서. 한국수자원공사. 대전, 356 pp.
한국수자원공사, 1997b. 운문댐 하류 냉해방지 대책 용역보고서. 한국수자원공사. 대전, 389 pp.
환경부, 2001. 수질오염공정시험법. 377pp.
Aizaki M., A. Otsuki, T. Fukushima, T. Kawai, M Hosomi. and K. Muraoka, 1981. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese and its relationships to other parameters related to trophic stage. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. 23: 13-31.
Barnes, R.S.K. and K.H. Mann, 1991. Fundamentals of Aquatic Ecology. Blckwell Science Inc.(2nd Ed.).
Bailey-Watts, A.E, 1988. Studies on the control of the early spring diatom maximum in Leven, 1981. In: Round E.F. (ed.) Algae and the Aquatic Environment. Biopress, 57-87
Calson R.E, 1977. A trophic stae index for lakes. Limnol. Oceanogr. 22:

361-369.

Goldman, J.C. and J.H. Ryther, 1976. Temperature-influenced species competition in mass cultures of marine phytoplankton. Biotechnol. Bioeng. 18: 1125-1144.

Harper, D, 1992. Eutrophication of Freshwater. Principles, problems and restoration. Chapman and Hall, London. 329 pp.

Henderson-Sellers, B. and H. R. Markland, 1987. Decaying Lakes - The Origins and Control of Cultural Eutrophication, p 1-254. John Wiley and Sons, Chichester.

Horne, A.J. and C.R. Goldman, 1994. Limnology. Mc Graw-Hill, Inc. New York. 576 pp.

Jimenes, F.J., B.B. Rodriguez and V. Rodriguez, 1987. Relations between chlorophyll, phytoplankton cellss abundance and biovolume during a winter bloom in Mediterranean costal water. J. Exp. Mar. Bio. Ecol. 105: 161-173

Kalff, J, 2002. Limnology. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 592 pp.

Kirk, J.T.O, 1994. Light and photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 75-77. Cambridge University Press, Cambridge, England.

Kratzer C.R. and Brezonik P.L, 1981. A Carson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. Water Res. Bull. 17: 713-715.

Hiroyuki H. and Takaaki Y, 1977. Illustrations of the Japanese fresh water algae. 933 pp.

Malone, T.C. and M.B. Chervin, 1979. The production and fate of phytoplankton size fractions in the plume of Hudson River, New York Bight. Limnol. Oceanogr. 24: 683-696.

Palmer, C.M, 1980. Algae and water pollution. Castle Publication Ltd., UK. 123 pp.

Ryther, J.H, 1969. Photosynthesis and fish production in the sea.

Science 116: 72-76.

Sorokin Y.I, 1999. AquaticMicrobialEcology.Backhuyspublishers, leiden, The Netherlands. pp. 23-27.

Sundback, K., B. Joensseon, P. Nilsson and I. Lindstroem, 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow water sediment system: an experimental study. Mar. Ecol. Prog. Ser. 58: 261-274.

Wetzel, R.G, 1999. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Ed. Academic Press, San Diego. U.S.A. 1006 pp.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

부 록

Appendix 1. Physico-chemical factors measured the Lake Unmoon from April 2009 to November 2011

	Month	Factors					
		W.T (℃)	DO (mg/L)	pH	Chl.a (mg/m^3)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
2009	Apr.	14.5	11.8	8.1	7.0	0.893	0.009
	May.	21.0	10.7	8.5	7.3	0.577	0.018
	Jun.	25.2	9.3	8.6	7.3	2.712	0.004
	Jul.	25.2	9.9	8.8	9.7	1.336	0.005
	Aug.	26.8	9.9	8.9	41.0	1.192	0.021
	Sep.	25.6	12.4	9.1	193.9	1.142	0.021
	Oct.	19.3	7.3	8.0	4.3	0.751	0.003
	Nov.	17.5	8.3	8.0	3.5	0.692	0.009
2010	Apr.	13.5	11.3	7.7	16.3	1.862	0.012
	May.	17.2	11.7	7.3	15.2	1.392	0.310
	Jun.	25.5	9.0	8.7	11.7	0.735	0.052
	Jul.	24.3	9.9	9.0	23.1	0.921	0.032
	Aug.	30.2	9.3	9.4	6.8	0.634	0.034
	Sep.	25.8	8.2	8.4	4.7	0.559	0.028
	Oct.	21.5	6.9	7.5	3.1	0.734	0.014
	Nov.	18.3	7.9	7.5	5.7	0.723	0.015
2011	Apr.	11.2	9.2	7.9	4.2	1.753	0.011
	May.	18.6	8.8	9.1	7.7	1.203	0.011
	Jun.	24.6	5.9	10.6	19.0	1.153	0.016
	Jul.	26.9	7.1	9.1	29.5	1.137	0.052
	Aug.	24.9	8.1	7.4	7.0	0.901	0.017
	Sep.	23.8	9.1	7.7	9.8	0.909	0.014
	Oct.	18.5	8.4	7.8	3.8	0.997	0.009
	Nov.	17.0	9.1	7.8	7.1	1.028	0.009

Appendix 2. Species distribution and abundance(cellss/L) of phytoplankton the Lake Unmoon from April to November 2009

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Pediastrum duplex var. *gracitimum*				86				15
Pediastrum simplex		88						
Coelastrum microporum					65			
Crucigenia crucifera	25			34				
Ankistrodesmus bibraianus					23			
Closteriopsis longissima						12		
Chlamydomonas sp.					12			
Tetraedron minimum						6		
Monoraphidium arcuatum	12		6	6				6
Monoraphidium contortum	6	15			6		6	
Oocystis sp.						24		
Scenedesmus brasiliensis						24		
Closterium aciculare	6		12					
Closterium cornu								6
Elakatothrix gelatinosa		15		6				
Staurastrum sp.						12	13	6
Aulacoseira ambigua	4	44	24	23		24	32	37
Aulacoseira distans	12	15	12	23		12		4
Aulacoseira granulata	49	15	12	149	35	36	20	4
Aulacoseira sp.				11				
Asterionella formosa				63	6			
Synedra acus					6		6	
Cocconeis sp.		7						
Cymbella sp.	6							
Gomphonema sp.						12		
Navicula cryptocephala		7						
Navicula cryptotenella	6							
Navicula sp.	6	7	12					
Pinnularia sp.							6	
Nitzschia palea	6		6					

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Appendix 2. Continued

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Microcystis wesenbergii	62	17	264	229		875		
Anabaena sp.				217		78		
Peridinium cunnigtonii				6				
Peridinium sp.		15	6		158	2,971	6	19
Cryptomonas ovata				6				
Trachelomonas sp.	6		6	6			6	6
Total	207	244	361	863	311	4,086	96	104

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Appendix 3. Species distribution and abundance(cellss/L) of phytoplankton the Lake Unmoon from April to November 2010

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Golenkinia radiata					5	6		
Pediastrum simplex				83				
Pediastrum tetras			2					
Coelastrum cambricum								82
Coelastrum microporum					8	78		
Coelastrum sp.							92	
Crucigenia crucifera					86	56		
Crucigenia sp.		24			43			
Ankistrodesmus bibraianus							7	
Closteriopsis longissima							7	
Chlamydomonas sp.	25	17		28				19
Schroederia robusta								
Schroederia setigera			1		2			
Schroederia sp.	19							
Tetraedron minimum							7	
Monoraphidium arcuatum	12		15		2			12
Monoraphidium contortum	19	12		14		11	7	12
Scenedesmus ecornis	50	24			21			25
Scenedesmus quadricauda	25							
Scenedesmus sp.			2					
Closterium aciculare	6							
Closterium acutum								
Closterium sp.					5			
Cosmarium sp.	12							
Elakatothrix gelatinosa			1		2			
Staurastrum sp.	12			14		6	12	
Aulacoseira ambigua	50		4					19
Aulacoseira distans	32	12	3					25
Aulacoseira granulata	75		6	55	17		24	37
Cyclotella sp.			15		21	17	12	31

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Appendix 3. Continued

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Acanthoceras zachariasii								6
Asterionella formosa							12	
Fragilaria capucina							7	
Fragilaria crotonensis	218	69		34	17			
Synedra acus		12	5					
Synedra ulna							7	
Achnanthes sp.					5			
Cymbella turgidula					5			
Cymbella sp.		6						
Gomphonema sp.					5			
Navicula cryptocephala	6							
Navicula cryptotenella	6							
Navicula pupula	6							
Navicula sp.	6	12	5	7				
Nitzschia palea					5			
Nitzschia sp.	32		1	14				
Surirella sp.	6							
Microcystis aeruginosa	224		16	358	118			
Microcystis wesenbergii			11	227				
Microcystis sp.		242						
Anabaena planctonica							79	
Anabaena sp.			215	22	64	322		199
Peridinium sp.	175	185	35	34	17			82
Cryptomonas sp.						6		6
Trachelomonas sp.								12
Dinobryon cylindrica		58						
Dinobryon sp.	50			55			67	
Total	1,066	670	337	946	449	500	338	568

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Appendix 4. Species distribution and abundance(cellss/L) of phytoplankton the Lake Unmoon from April to November 2011

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Paulschulzia tenera			31					
Golenkinia radiata			5		6			
Pediastrum tetras			42					
Chodatella citriformis								3
Coelastrum astroideum								18
Coelastrum sp.						34		15
Crucigenia crucifera					44		19	
Eutrtramorus globosus							77	
Ankistrodesmes gracilis							19	
Chlamydomonas umbonata							5	
Chlamydomonas sp.	4			13	28	107	39	23
Dictyosphaerium ehrenbergianum						54		
Schroederia setigera	4	11			17		5	
Tetraedron minimum							5	
Westella botryoides							19	
Monoraphidium arcuatum	4	5			17		5	3
Monoraphidium contortum	4					3	5	
Nephrocytium lunatum								43
Oocystis sp.			21			13		10
Scenedesmus ecornis					22		19	20
Scenedesmus quadricauda			21					
Scenedesmus sp.			52					
Closterium aciculare							5	
Closterium acutum							10	3
Closterium sp.	4		5		6			
Cosmarium sp.								5
Euastrum sp.							10	
Elakatothrix gelatinosa							14	
Staurastrum sp.				13	61		14	8
Aulacoseira ambigua	45	84		84	22	44	10	124
Aulacoseira distans	8	11				27	125	134

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Appendix 4. Continued

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Aulacoseira granulata		26			88	10	29	283
Aulacoseira granulata var. *angustissima*		32						
Cyclotella stelligera	4						5	
Cyclotella sp.	49	5	5	32	61	275	82	83
Acanthoceras zachariasii		11			22		5	3
Asterionella formosa	8	173	10	6			39	3
Fragilaria capucina	4	5					5	
Fragilaria crotonensis	171	341	6,485	5,262	17	30	48	40
Fragilaria tenera	110	5		65				
Synedra acus	4	11						
Synedra ulna	4							
Achnanthes minutissima	4							
Cymbella minuta var. *silesiaca*	4	11						
Cymbella turgidula	4							
Cymbella silesiaca			5					
Cymbella sp.		5						
Gomphonema sp.	4			6				
Navicula cryptocephala							10	
Navicula cryptotenella	4							
Navicula decussis	4							
Navicula pupula	4		5					
Navicula sp.						3	5	3
Rhizosolenia eriensis				6	6			20
Nitzschia sp.	4	5						
Microcystis aeruginosa				550	462	231		
Microcystis ichthyoblabe				278		1,043		111
Anabaena planctonica							140	
Anabaena sp.			188	220		983		
Aphsnizomenon sp.				1,527		218		
Peridinium cunnigtonii				39				

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

Appendix 4. Continued

	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Peridinium sp.	4			6				3
Cryptomonas sp.		11		13	11	54		10
Synura sp.								3
Trachelomonas sp.					6		5	
Mallomonas sp.		11			39			
Total	464	761	6,877	8,122	936	3,130	776	968

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

감사의글

그동안 논문을 준비하면서 느낀 점과 곁에서 도움을 준분들께 감사의 마음을 전달하고 싶어 이렇게 몇 자 적어봅니다

한 분야의 전문가가 되는 것이 결코 쉬운 일이 아니란 걸 생각하면서 진정한 전문가가 되기 위해서는 앞으로 더욱 갈고 닦고 배워야 될 일들이 너무나 많은 것을 느낍니다. 아직 학문을 하는 자세와 자질이 부족하다는 것을 나 자신이 너무나 잘 알기에 앞으로 제대로 된 연구를 할 수 있을지 의문이 듭니다. 그러나 학문의 세계는 도전하는 자에서 언제나 열려 있으며, 석사학위 취득이 새로운 시작을 의미 한다는 것을 잘 알고 있기에 감히 발을 내디디려 합니다.

부족한 저를 지도 해주신 김창훈 교수님께 지면을 통해 먼저 감사드리고 싶습니다. 언제나 성실한 삶과 배움에 대한 열정 그리고 제자들에게 먼저 모범을 보이시는 모습은 결코 잊지 못할 아름다운 스승의 덕목으로 기억될 것입니다. 그리고 부족한 논문을 심사하면서 문제점을 세심히 지적해 주시며 필요한 충고를 해주신 조재윤 교수님, 허성범 교수님께 감사드립니다.

학교 실험실에서 만날 때 마다 밝은 얼굴로 맞아주고, 필요할 때마다 도움의 손길을 주저하지 않았던 지효 선배, 모든 실험을 항상 열심히 하는 정수씨에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 학위 과정을 마치는데 있어서 곁에서 격려해주시고 도와주신 김상철 선생님, 이재관 소장님, 이혜진 연구사께도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

그리고 옆에서 버팀목이 되어주며 나를 지켜봐준 사랑하는 가족들. 딸 학위과정이 자랑스러워 항상 응원해주시던 아빠, 뒤에서 힘이 되어주던 엄마! 항상 감사하고 사랑합니다.

마지막으로 나의 평생의 벗 우리 3.A.M 친구들 가장 추억이 많은 선애, 항상 착하다는 땍땍이 진영이, 예뻐지고 있는 민아, 연애한다고 바쁜 지숙이, 세상에서 가장 예쁜 유현이 엄마 보람이 그리고 젊은 사장 정희에게 너무나 고맙다는 말을 전합니다. 또 나의 영원한 힘, 가장 힘들 옆에 있어준 콩 희현,

우리 주봄, 연화에게도 고맙다고 사랑한다는 말을 전합니다. 힘들 때 마다 항상 내 곁에 있어주면서 내 투정 다 받아준 민석 오빠에게 고맙다는 말을 전하며 이 말로도 부족하다는 생각이 됩니다.

많은 이들이 주위에서 도와주시어 제가 이 자리에 있을 수 있음을 감사드리며 이 논문을 바칩니다. 배움의 길에는 끝이 없듯 항상 공부하는 자세로 꿈을 이루기 위하여 최선을 다하겠습니다. 다시 한 번 저를 믿고 응원해주는 모든 사람들에게 감사의 말을 전하며 모두가 행복해 지길 진심으로 바랍니다.