

경상남도 함안군, 범수늪에서 엽록소 형광광도계 (Phyto-PAM)에 의한 일차생산의 계절변동

김 미 경

영남대학교 환경문제연구소 해양과학연구센터

Seasonal Variations of Primary Productivity Analyzed by Phyto-PAM Chlorophyll Fluorometry in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do

Mi Kyung Kim

Marine Science Research Center, Environmental Research Institute, Yeungnam University,
Gyongsan 712-749, Korea

Abstract - The seasonal variations of primary production were investigated by phyto-PAM chlorophyll fluorometry as well as classical methods (standing crops of phytoplanktons and chlorophyll *a*) in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do. The amounts of turbidity, SS, T-N, T-P, BOD, COD, Ca²⁺ and Cl⁻ were the highest at the station 3, where located in flowout site of wastewater treated by the filtration plants. The water quality was the third level by the standard of BOD and COD. The amount of chlorophyll *a* (268.8 mg L⁻¹) was the highest at the station 2 in April because the cell density (2,677 cells mL⁻¹) of *Micractinium pusillum* increased suddenly from February (180 cells mL⁻¹). The patterns of primary production of phytoplankton by phyto-PAM chlorophyll fluorometry were fallen in with those of standing crops and chlorophyll *a* of phyto-planktons. The primary production was varied according to stations and seasons. The water environments of the Beopsu Marsh as a natural mounument should be under the control of a regular examination in order to preserve the ecosystem.

Key words : water environments, phytoplankton, primary productivity, phyto-PAM, Beopsu Marsh

서 론

습지는 불과 육지 생태계의 접이지대로서 생물의 다양한 서식환경을 제공하고, 영양원이 풍부하고 생물학적인 생산성이 높아 종 다양성이 풍부한 곳이다(환경부 2002). 습지는 수심이 얕고 저수량에 비해 여름철을 제

외하고는 상대적으로 체류시간이 길며, 강우나 습지 주변의 다양한 오염원으로부터 직접적인 영향을 받고 있는 실정이다. 육상생태계와 해양생태계의 중간 연결고리 역할을 하고 생태계의 생물다양성을 높이고, 유지 발전하는 1차적 기능과 인간에게 제공하는 많은 혜택 중에 수산물 서식·생산 기능, 오염물질 정화 기능, 산소공급 기능, 기후조절기능, 자연경관 감상 및 학습지 역할, 태풍·홍수 피해 최소화 등 자연재해 조절기능 등을 하는 2차적 기능이 있다(김 등 2000; 김과 신 2006).

* Corresponding author: Mi Kyung Kim, Tel. 053-810-3863,
Fax. 053-813-3083, E-mail. mkkim@yu.ac.kr

우리나라는 1997년 3월에 세계에서 101번째로 습지 보호에 관한 국제협약인 람사(Ramsar) 협약에 가입하고, 생태계 보전지역으로 지정되어 있는 대암산 용늪 및 창녕 우포늪을 람사협약 등록습지로 지정하고, 2008년에 개최되는 “람사 협약당사국 총회”를 한국에 유치하기 위해 습지 보전을 위한 국제적인 노력에 동참하고 있다. 람사협약에서 정의한 습지는 자연적, 인공적, 영구적, 임시적 또는 정체된 물, 흐르는 물, 담수, 기수 염수를 불문하고 소택지, 늪, 토탄지 및 수역을 말한다. 습지가 갖고 있는 주요 기능으로는 1차적 기능에 있지만 그동안 체계적인 보전 대책이 미비하여 매립 등 무분별한 개발에 의해 훼손되고, 이를 위해 정부와 환경단체 간의 습지개발과 보전의 갈등해소를 위한 제도 개선방안이 요망되고 있는 현실이다(송과 구 2006). 이러한 범지구적 환경 위기의 핵심문제 중의 하나인 생물 다양성 보존을 위해 가장 중요한 생물들의 서식지로서 습지관리 및 보존을 위한 인식의 전환이 요구되고 있다.

함안군 법수면 대송리(북위 35° 19' ~ 35° 20', 동경 128° 20' ~ 128° 21')에 위치한 법수늪의 면적(33,911 m²)은 농경지 개간, 도로 부지로의 전용 등으로 과거에 비해 습지의 범위가 현저히 줄어들고 있다. 특히 늪지에 인접한 농경지의 토사유출과 2002년 벽산제방 붕괴시 토사의 유입으로 늪의 가장자리는 육지화가 진행 중이다(환경부 2002). 최고 수심은 2m이며 평균수심은 1.1m인 법수늪은 전형적인 하천습지에 속하는 늪으로 문화재 보호법에 의거하여 1984년 11월 19일에 천연기념물 346호로 지정된 국내 유일한 습지이다(함안군 2006).

법수면은 지대가 낮아 150 mm 이상의 큰비가 올 경우 홍수피해를 막기 위해서 제방의 수문을 강제배수를 해야하고 법수늪의 주변에는 수질정화 관리를 위하여 오수정화시설을 설치하였으나 처리용량의 한계로 큰비가 올 경우 포화상태가 되어 생활하수가 그대로 늪으로 유입되고, 인접해 있는 농경지에서 흘러 들어오는 물에는 잔류 화학비료와 농약이 잔존해 있는 실정이다(함안군 2006). 함안 법수늪과 같은 유역은 생활하수와 농경지 유출수 등의 비점오염원의 영향권에 들어 있는 수계 생태계로서 유역환경의 특징에 따라 민감하게 변화한다. 농촌 배수처리용 습지의 생물상 및 유기물 제거율(김 등 1999a, b), 습지-연못 연계 시스템에 의한 수질개선과 농업적으로 재사용하는 연구(윤 등 2004), 내륙습지의 유형별 평가기법 및 관리방안(김 2001), 습지 생태계 내에서 질소 변동 추이(Woo *et al.* 1996), 한국의 습지 지형(권 2006) 등에 대한 습지의 생태계 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나(환경부 2001, 2002, 2003a, b, 2005a,

b), 법수 늪지의 수환경과 수계 생태계의 체계적인 연구는 거의 전무한 실정이다.

PAM (pulse-amplitude modulation) 엽록소 형광광도법은 기존의 고전 연구방법 보다 정확하고 간편한 방법으로 수생태계의 장기간 구조변화와 1차 생산자인 식물 플랑크톤의 광합성과 오염원으로부터의 건강성을 파악할 수 있는 단기간의 기능적 변화를 연구하는데 응용되고 있다(Juneau and Popovic 1999; Dorigo and Le Boulanger 2001; Beutler *et al.* 2002; Juneau *et al.* 2002; Jakob *et al.* 2005; Schmitt-Jansen and Altenburger 2007, 2008).

본 연구의 목적은 법수늪 유역 내에 유입되는 비점오염원과 늪지의 유입부의 점오염원 지점을 선정하여 수환경의 계절적 변화와 phyto-PAM 엽록소 형광광도법에 의하여 식물플랑크톤의 1차 생산력 변화 추이에 따른 늪지 수생태계의 문제점을 파악하여 늪지의 관리방안과 수환경 보전을 위한 대안을 마련하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사 정점과 조사 시기

법수늪의 지정구역을 중심으로 늪지 수괴의 유출부에 속하는 수문 제방 안쪽을 정점 1로 하였고, 생활하수와 오수정화시설에서 방류되는 하수도가 늪 안으로 유입되는 정점을 각각 2와 3으로 정하고, 인근의 청소년 수련원과 민가의 생활오폐수, 쓰레기 등으로 유입되는 하수로 지점을 정점 4로 정하였다. 반면에 늪지 북쪽에 위치한 야산과 인접한 부분을 정점 5로 하였고, 늪지 수괴의 가장 중간 영역을 정점 6으로 정하였다(Fig. 1). 조사 시기는 2006년 2월, 4월, 8월과 11월에 각각 1회 채수하였

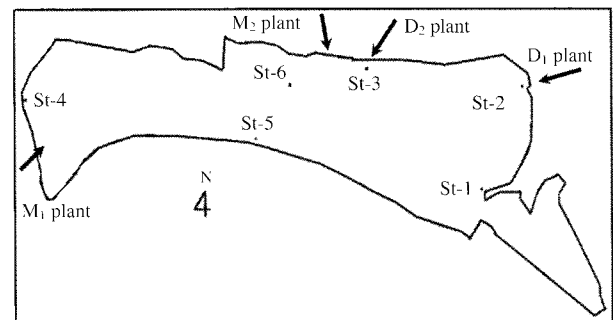


Fig. 1. Sampling sites and inflow stations of wastewater treated by the filtration plants (D1 & 2: Daepung 1 & 2 plants; M1 & 2: Munhyun 1 & 2 plants) in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do (latitude: 35° 20'08" ~ 16"; longitude: 128° 20'06" ~ 35").

고, 정점 1~5는 수 표면에서 채수하였고, 정점 6은 수심 1 m 깊이의 수역에서 채수하였다. 특히 정점 2에서 4는 대평 1과 2, 문현 1과 2의 오수정화시설이 인접하여 이 시설에서 처리된 방류수가 늘지로 유입되었다.

2. 이화학적 요인에 의한 수질 분석

생태계 서식환경을 파악하고자 이화학적 요소들로 수질 상태를 분석하기 위해 수온, pH, SS, 탁도, DO, BOD, COD, T-N, T-P, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-P, 전기전도도, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻를 분석하였다. 채수는 van Dorn 채수기를 이용하여, 12~2시 사이에 채수하였고, 수온, 수소이온농도와 용존 산소량은 Multi meter (Horiba D-55), 탁도는 탁도계 (TN-100)로 현장에서 측정하였다. SS와 영양염류는 일정량의 시료를 막여과지 (pore size : 0.45 μm, Millipore)에 여과시킨 후 분석하였다. BOD와 COD를 비롯한 각종 영양염 분석은 수질 오염 공정 시험법과 Standards Methods (APPA AWWA WEF, 1995) 법에 의해 실시하였다. Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻ 분석은 Ion Chromatography (DX-120, DIONEX, USA)에 의해 측정되었다.

3. 상관분석

수환경인자와 1차 생산력의 상호 유의성을 파악하기 위해 Spearman rank correlation coefficient를 사용하였다. 이 방법은 환경인자의 시·공간적 변화량을 등위화하여 각 인자간의 상관계수(r_s)를 구하고 그 유의성을 결정하는 방법으로 통계프로그램 SPSS v. 14.0에 의해 계산되었다.

$$r_s = 1 - \frac{6\sum Di^2}{n(n^2 - 1)}$$

여기서 Di는 두 인자 등위화된 수치의 차이이며, n은 등위화된 수치의 갯수이다. 유의성 검정은 p=0.05 수준에서 판정하였다(김 등 2003).

4. 식물플랑크톤의 1차 생산력과 phyto-PAM에 의한 광합성효율 측정

미세조류는 해양, 호소, 하천, 늪 등 수중 생태계의 1차 생산자로 유기물을 합성하고, 광합성 산물인 산소를 방출함으로써 수중 생태계의 에너지 흐름에 매우 중요한 역할을 담당하고 있으므로 이들의 종조성, 현존량 그리고 이들의 분포를 파악하는 것은 수중 생태계를 이해하는데 필수적인 요건이다. 특히 식물플랑크톤은 각 유기체에 따라 광, 수온, 그리고 영양염과 생태적인 요인에

따라 1차 생산력이 변화한다. 엽록소 a 농도와 식물플랑크톤의 현존량과 광합성 효율을 측정하여 수생태계의 1차 생산력을 가늠할 수 있는 기능적인 군집변화를 분석하였다.

엽록소 a 농도 측정은 Standards Methods (APPA AWWA WEF, 1995)로 분석하였다.

1차 생산자의 광합성 효율 Chlorophyll Fluorometer 인 phyto-PAM phytoplankton Analyzer (Walz, Effeltrich, Germany)로 형광광도를 분석하여 다음 공식에 준해 광합성 효율을 측정하였다.

$$Fv/Fm = (Fm' - Ft) / Fm' = dF / (Ft + dF)$$

Fv/Fm: 광합성효율, dF: 형광효율 증가치,

Ft: 순간 형광률, Fm': 최대 형광률

식물플랑크톤의 현존량은 1 L용기에 채집한 시료를 Lugol's 용액으로 고정한 후, 실험실에서 48~72시간 침전시켜 50 mL로 농축하였고, 잘 혼합한 후, Sedgwick-Rafter chamber에 골고루 분산시켜 단위 부피당 세포 수 (cells mL⁻¹)를 현존량으로 계산했다. 계수는 최소한 chamber의 100 fields 이상 계수하여 현존량으로 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 수환경 특성

수온은 2월과 4월에 비해 8월이 수온이 상승하는 일반적인 양상을 나타내다가 11월에 다시 감소하는 경향을 나타냈다. 범수뉴 조사에서 생활오수가 흘러드는 정점 2, 정화시설을 거친 처리수가 유입되는 지점인 정점 3, 인근 하천으로부터 생활오수가 흘러드는 정점 4는 수환경 변화 인자가 많은 정점이었으나 2월에는 생활오수가 흘러드는 정점 2에서 7.4°C로 온도가 가장 높았고, 산과 접하고 있는 정점 5가 채광 부족으로 수온이 3.4°C로 가장 낮았다. 4월에는 오히려 정점 2가 다른 지점보다 온도가 낮은 14°C로 나타났다. 8월에는 정점 4에서 33.7°C로 수온이 가장 높았고, 정점 3에서 수온은 23.9°C로 정점 4와 비교하여 큰 온도 차이를 보였다. 11월에는 정점 2가 17.8°C로 가장 높았고, 채광이 부족한 정점 5가 10.4°C로 가장 낮았다(Fig. 2). 정점별 수온의 약간의 차이는 있었지만 4회의 채수시기는 4계절을 잘 대변하는 수온 변화를 보였다.

수소이온농도(pH)는 범수뉴 2월, 4월, 8월과 11월에 정점별로 6.92~10.7의 범위로 나타났다(Fig. 2). 특히

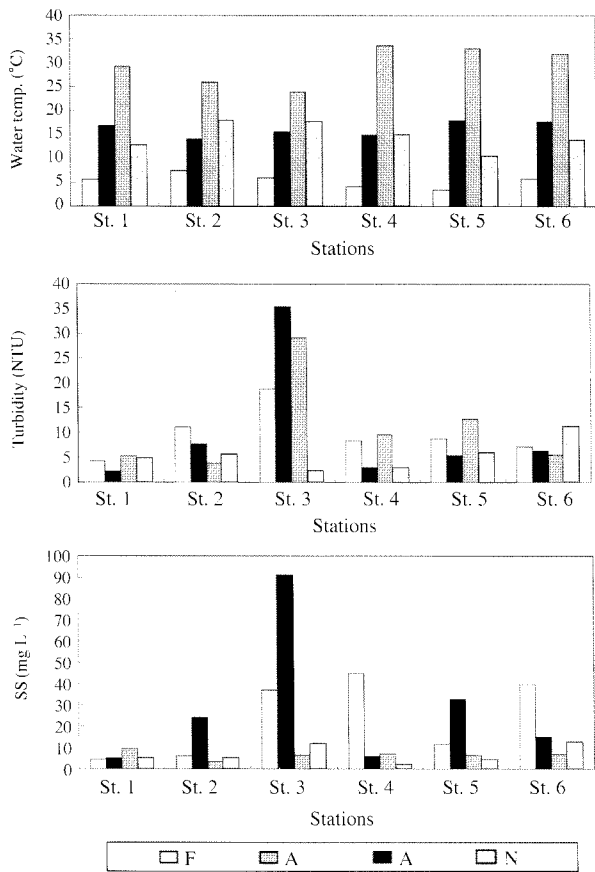


Fig. 2. Seasonal variations of water temperature, turbidity and SS in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do.

인근 마을에서 유입되는 생활오폐수의 영향권에 있는 정점 2, 3과 4에서 pH가 비교적 높게 나타났다. 2월, 4월, 8월보다 11월에 pH가 전반적으로 높게 나타났는데 이는 외부에서 유입된 영양염의 증가와 갈수기의 수분 증발과 식물플랑크톤의 현존량의 증가로 수환경이 알칼리성으로 변화하였다고 판단된다. 이는 인공호에서 10월과 11월에 녹조현상이 발생하는 현상과 비슷한 양상을 나타냈다.

탁도는 전반적으로 2.1~35.4 NTU로 나타났는데, 정점 1, 4, 5는 4월에 낮아졌다가 8월에 다시 높아졌으며, 정점 2, 6은 점점 낮아지는 경향을 보이다가 11월에 다시 높아졌다. 특히 정점 3은 11월에는 탁도가 가장 낮은 2.3 NTU를 보였으나, 4월에 35.4 NTU로 가장 높게 나타났다. 8월의 정점 3은 탁도가 육안으로 식별될 만큼 높았는데 이는 하수로를 따라 유입되는 유입수의 부유물질 잔존량의 증가와 함께 탁도가 높아진 것으로 사료된다 (Fig. 2).

SS는 유기물 또는 무기성의 입자들과 미생물을 포함한 건조 중량을 의미한다. 이는 탁도를 유발시키며 오염

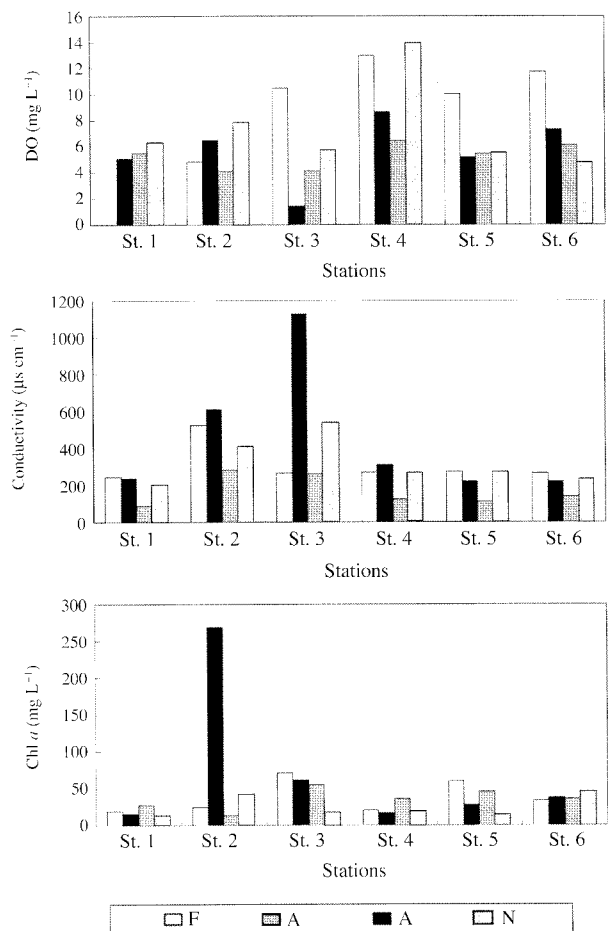


Fig. 3. Seasonal variations of DO, conductivity and Chl a in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do.

도를 검토하는데 중요한 지표이다. 높은 SS는 심미적으로 수계 생태계에 좋지 않은 영향을 미치며 주요 발생원은 자연 상태에서 암석과 토양과의 접촉으로 발생되며, 나머지 미량은 하·폐수 등의 오염원으로부터 원인이 된다. 4월에 정점 3에서 SS가 90.1 mg L⁻¹로 가장 높았는데 이는 탁도가 가장 높게 나타난 현상과 상관관계가 높은 것을 알 수 있다. 정점 2, 3과 5도 2월보다 4월이 두드러지게 높아진 경향을 나타냈다. 8월에 비해 11월은 정점 3을 제외하고는 탁도가 높은 상관관계를 나타냈다. 4월에 비해 8월엔 정점 2, 3, 5와 6의 SS가 낮아졌고, 특히 정점 3(90.85 mg L⁻¹ → 6.4 mg L⁻¹)이 큰 폭으로 감소하였다. SS는 2월과 4월에 높게 나타났는데 이는 갈수기에 수분 증발로 인한 부유물질 입자들이 증가한 것으로 사료된다 (Fig. 2).

전기전도도는 정점 1, 5와 6은 2월보다 4월에 감소한 반면, 정점 2, 3과 4는 4월에 증가한 것을 볼 수 있다. 특히 정점 3(264.8 μs cm⁻¹ ~ 1125 μs cm⁻¹)에서 급격히 증

가하였는데, 이는 4월에 정점 3은 외부로부터 오폐수의 유입이 높아 전기적 반응 ($611.4 \mu\text{s cm}^{-1}$)이 높게 나타난 것으로 사료된다. 8월에는 정점 3에서 큰 폭으로 감소한 것을 제외하고 전반적으로 4월보다 감소하는 경향을 보였는데 이는 6월에서 7월말까지 폭우에 의해 습지 수계가 많이 희석이 되었기 때문으로 사료된다 (Fig. 3).

총질소(T-N)는 호소수 수질 기준인 상수 원수 1급수 수질기준인 0.2 mg L^{-1} , 2급수 수질 기준인 0.4 mg L^{-1} , 3급수 수질 기준인 0.6 mg L^{-1} 로써 기준을 감안하면, 범수 늪의 계절별 총질소의 농도 범위가 $0.1 \sim 65 \text{ mg L}^{-1}$ 로 편차가 크고 농도가 높음을 알 수 있다. 전반적으로 4월에 정점 3을 제외하고 T-N의 농도가 많이 감소했다. 특히, 정점 1의 T-N이 많이 감소되었는데 이는 정점 1의 채수는 유출부 수문의 보 안쪽에서 이루어졌는데 2월보다 4월이 T-N이 아주 낮은 이유는 2월은 갈수기로 수괴가 보 안쪽에 정체되어 있는 상태였으나 4월은 강우량의 증가로 수괴가 정체되어 있지 않고 보를 넘어 흐르면서 희석되어 T-N의 농도가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 오히려 정점 3은 큰 폭으로 T-N의 농도가 증가하였는데 (2월: $6.5 \text{ mg L}^{-1} \rightarrow$ 4월: 65 mg L^{-1}), 이는 정점 3으로 유입되는 오수가 완전히 정화 처리되지 않은 상태에서 방류되어 전반적으로 높은 T-N 농도를 함유한 상태에서 하수로를 따라 정점 3으로 유입되었기 때문인 것으로 사료된다. 8월에는 4월보다 정점 1, 4, 5와 6에서 총 질소가 증가하였는데 이는 6월부터 7월말까지 집중 호우로 인해 늘지 인근의 질소가 유입하여 총질소의 함량이 증가한 것으로 판단되나, 정점 2와 3은 상대적으로 집중 유입된 생활오폐수가 강우로 희석되었기 때문으로 사료된다 (Fig. 4). 범수늪의 T-N의 최저 및 최고치의 범위는 $0.09 \text{ mg L}^{-1} \sim 65.28 \text{ mg L}^{-1}$ 였는데 이는 여주군 청미천 습지의 변화치($0.5 \text{ mg L}^{-1} \sim 5.2 \text{ mg L}^{-1}$)와 여주군의 바위늪구비의 변화치($0.3 \text{ mg L}^{-1} \sim 3.2 \text{ mg L}^{-1}$) (환경부 2003)보다 훨씬 더 T-N의 변동이 심함을 알 수 있다.

질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 깨끗한 물에서는 검출되지 않거나 함유하여도 미량으로 존재한다. 질산염 이온은 물에 대한 용해도가 매우 크다. 질산염이 하천에 유입 시 생물의 질소원으로 이용되어 DO를 감소시키는 효과가 있다. 따라서 오염원의 유입 잠재력을 시사하는 인자로서 정점 2와 4가 가장 높게 나타났는데 최고치가 2월에 정점 2에서 $16 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높고, 정점 4에서는 $12 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 높게 나타났다. 이 곳은 인근 민가의 생활하수 유입이 잦은 곳이고, 정점 2와 4에서의 질산성 질소는 갈수기인 겨울에 가장 높았고, 봄, 여름, 가을에 지속적으로 감소되는 경향을 보였다 (Fig. 4).

총인(T-P) 농도는 총질소(T-N)와 호소수 부영양화를

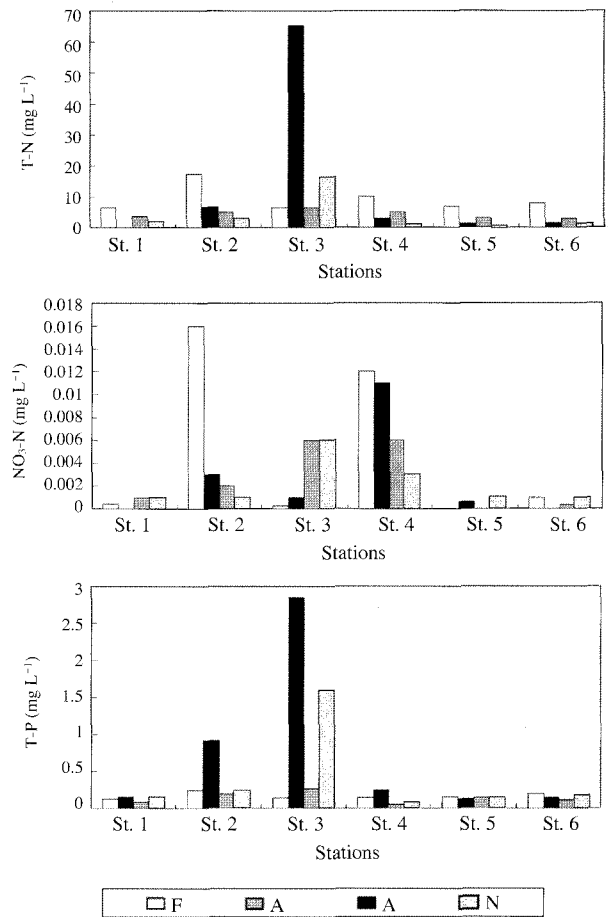


Fig. 4. Seasonal variations of T-N, $\text{NO}_3\text{-N}$ and T-P in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do.

나타내주는 기본 지표 항목이다. 정점 5와 6이 2월에 비해 4월에 약간 감소한 것을 제외하고, 전반적으로 2월보다 4월이 높게 나타났다. 특히 정점 2와 3은 2월보다 4월에 급격하게 증가하였음을 알 수 있다. 4월에 정점 5에서 최저치로 농도 0.12 mg L^{-1} 를 나타냈고 정점 3에서 최고치로 2.85 mg L^{-1} 를 나타냈다. 8월에는 정점 5에서 T-P의 양이 약간 증가한 것을 제외하고는 전반적으로 감소했다. 이는 8월에 강우량이 증가하여 늘지의 T-P의 양이 희석된 것으로 사료된다. 특히 정점 2와 3은 급격한 감소를 보였다. 11월에는 정점 3에서 급격히 증가한 것을 제외하고는 전반적으로 소폭으로 증가한 것을 볼 수 있다 (Fig. 4). T-N의 농도도 높았던 정점 3은 단순한 생활오수라기 보다 축산폐수나 인분 등의 생체의 분비물에 의한 유기물질의 오염원에서 기인한다고 사료된다. 범수늪의 T-P의 최저치와 최고치의 범위가 $0.08 \text{ mg L}^{-1} \sim 2.85 \text{ mg L}^{-1}$ 를 나타냈는데, 이는 여주군 청미천 습지의 변화범위인 $0.2 \sim 0.49 \text{ mg L}^{-1}$ 와 여주군 바위늪구비의 변화범위인 $0.14 \text{ mg L}^{-1} \sim 0.34 \text{ mg L}^{-1}$ (환경부 2003)보다

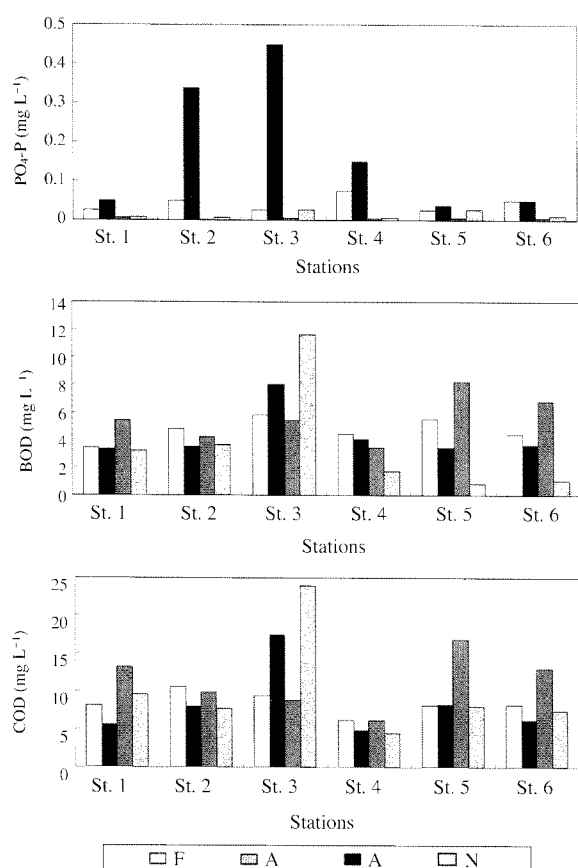


Fig. 5. Seasonal variations of PO₄-P, BOD and COD in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do.

T-P의 변동이 심함을 알 수 있다.

인산성 인(PO₄-P) 농도는 호소 내에서 인은 생물학적 물질대사와 생체 에너지(APT)생성에 있어서 중요한 구성성분 역할을 한다. C, H, O, N, S와는 다르게 수계의 미세조류의 성장을 제한하는 제한요소(limit factor)로 작용한다. 전반적으로 2월보다는 4월이 높게 나타났으며, 특히 4월에는 정점 2와 3에서 높게 나타났고(0.34~0.45 mg L⁻¹), 8월에는 전반적으로 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타내다가 11월에는 다시 전반적으로 소폭 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 5). 특히, 정점 2, 3과 4에서 4월에 인산성 인이 높게 나타난 것은 이 시기에 증가한 무기물과 유기물에 포함된 총인이 산화되고 있음을 시사하고 있다.

용존 산소는 수온에 따라 용존 농도가 달라진다. 4월에 정점 3을 제외하고 용존 산소가 높게 나타났으나(10.5 mg L⁻¹~11.7 mg L⁻¹), 정점 2는 4.84 mg L⁻¹로 낮게 나타났다. 4월에는 전반적으로 용존 농도가 10 이하를 나타냈으며, 특히 정점 3이 11월에 1.39 mg L⁻¹로 낮게 나타났는데 이는 앞의 수환경의 총질소, 총인, 탁도,

SS의 값이 모두 최고로 높게 나온 결과와 상관관계를 나타낸 결과라 사료된다. 4월과 8월에는 정점 1, 2, 3과 4에서 용존산소가 낮게 나타났고, 11월에는 8월에 비해 전반적으로 용존산소가 높아졌는데, 이는 수온이 낮아짐에 따라 8월에 비해 식물플랑크톤의 감소로 인한 부영양화 현상이 감소되었기 때문으로 사료된다. 특히 정점 4는 8월(6.4 mg L⁻¹)보다 11월(13.9 mg L⁻¹)에 급격히 증가한 반면에 정점 6에서는 8월(6.1 mg L⁻¹)보다 11월(4.8 mg L⁻¹)에 감소했다(Fig. 3).

생물학적 산소 요구량(BOD)에 의한 환경부 수질환경 기준은 1급수가 1 mg L⁻¹ 이하, 2급수는 3 mg L⁻¹ 이하, 3급수는 6 mg L⁻¹ 이하, 4급수는 8 mg L⁻¹ 이하, 5급수는 10 mg L⁻¹ 이하로 지정 고시되어 있다. 법수높이의 BOD 변화는 2월보다 4월이 낮게 나타났으며, 정점 3이 11월에 11.8 mg L⁻¹로 가장 높았고, 같은 정점에서 4월에 BOD가 8 mg L⁻¹로 높았다. 8월에 정점 3과 4의 BOD가 4월보다 낮게 나타난 것을 제외하고는 그외 정점들은 BOD가 모두 높게 나타났고, 특히 정점 5에서 BOD가 8.2 mg L⁻¹로 가장 높았다. 11월에는 정점 3을 제외하고는 전반적으로 8월보다 낮게 나타났으며 정점 5와 6은 급격히 낮아졌다. 반면에 정점 3은 8월보다 크게 높아진 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 이는 특히 정점 3이 8월에는 수계가 폭우로 희석된 반면에 11월에 유입된 생활오수가 수분이 증발하여 농축되어 미생물의 증식이 악화되었기 때문으로 판단된다. 따라서 전반적으로 3등급의 수질을 나타내나 법수높은 계절별과 정점별 수질의 변화가 심한 현상을 나타내고 있다.

화학적 산소 요구량(COD)에 의한 호소수 수질기준을 보면 상수원수 1급수의 경우 1 mg L⁻¹ 이하, 2급수의 경우 3 mg L⁻¹ 이하, 3급수의 경우 6 mg L⁻¹가 기준이 된다. 2월의 경우 전반적으로 6.2 mg L⁻¹에서 10.6 mg L⁻¹로 높게 나타났고, 4월의 경우 정점 1과 정점 4는 각각 5.6 mg L⁻¹과 4.8 mg L⁻¹로 조금 낮아졌으며, 정점 3의 경우 17.4 mg L⁻¹로 급격히 증가됨을 보여준다. 8월에는 정점 3이 8.8 mg L⁻¹로 큰 폭으로 낮아진 것을 제외하고, 그외 정점들은 전반적으로 4월에 비해 높게 나타났다. 특히 정점 5에서의 COD가 16.8 mg L⁻¹로 높게 나타났다. 11월에는 BOD의 경우처럼 정점 3을 제외하고 8월보다 낮아졌으며, 반면에 정점 3(8.8 mg L⁻¹~23.8 mg L⁻¹)은 큰 폭으로 높게 나타났다(Fig. 5). COD를 기준으로 했을 때 법수높의 수질은 전반적으로 3급수로 수질이 심각하게 악화되었음을 알 수 있다.

Mg, Ca, Cl 이온의 함량 분석을 비교해 보면 Mg²⁺는 정점 2에서 2월(15.7 ppm)과 4월(11.1 ppm)에 높게 나타났고, 8월에는 모든 정점에서 양이온 Mg²⁺가 전반적

으로 감소하는 경향을 보이는데, 특히 정점 1 (1.1 ppm), 2 (5.0 ppm), 3 (2.5 ppm), 4 (3.0 ppm)에서 크게 감소했으나 월별로는 큰 차이가 없었다. Ca^{2+} 는 정점 3에서 2월 (27.2 ppm)보다 4월 (74.6 ppm)에 월등히 높게 나타났고, 8월에서는 모든 정점들이 크게 감소하였다. Cl^- 는 4월에 정점 2 (81.8 ppm)와 3 (121.8 ppm)에서 가장 높게 나타났다. 역시 8월에 전 정점이 큰 폭으로 감소했고, 정점 3 (121.8 ppm → 6.4 ppm)에서 크게 감소한 것으로 나타났다. 이는 정점 2와 3에서 수질의 이온변화 잠재력이 가장 높아 화학반응이 안정화되지 않고, 가장 활발하게 진행 중에 있음을 의미하므로 외부로부터 오염원이 가장 심한 곳임을 예측할 수 있다 (Table 1). 이 결과를 기존의 문헌 (김과 이 2002)에 의하면 호소수 내에서 Ca^{2+} 의 농도가 3.4~26.8 ppm일 때, Mg^{2+} 의 농도는 2.5~11.3 ppm 일 때 부영양호수임을 판정할 수 있는 기준이 되어 본 논의의 영양단계는 부영양화 상태라 결론 내릴 수 있다.

엽록소 *a*의 농도를 이용한 Carlson (1977)의 부영양화 지수 (TSI: Trophic State Index)에 의하면, 계절별 및 정점별 전 정점이 50을 초과하여 높지는 연중 부영양화 상태이거나 정점 2는 봄에 TSI 지수가 85.4로 높게 나타나 범수층 수질의 심각성을 대변해 주고 있다.

SPSS v. 14에 의한 이변량 Spearman rank correlation coefficient에 의한 수환경 요인의 유의도는 양의 상관관계에 있는 요인들은 TN & Chl *a*, SS & PO_4 -P, TP & 전기 전도도였고, 음의 상관관계에 있는 요인들은 NO_3 -N & pH, SS & COD, COD & PO_4 -P였다.

2. 식물플랑크톤의 1차 생산

엽록소 *a*는 미세조류를 비롯한 광합성세균과 picoplankton이 광합성 작용을 통해 빛에너지에서 생체 에너지로 변환하는 매개체이고, 수계 소비자인 동물플랑크톤과 어류의 먹이가 되는 1차 생산자의 생산력을 판가름

할 수 있는 지표물질이 된다 (김과 김 1999). Fig. 5에서 나타난 범수층의 엽록소 *a*는 2월에는 정점 3과 5에서 비교적 높았다 ($71.10 \mu g L^{-1}$, $60.44 \mu g L^{-1}$) (Fig. 3). 4월에는 정점 2와 3에서 높게 나타났는데, 특히 정점 2에서는 급격히 증가하는 경향이 있었다 ($268.75 \mu g L^{-1}$, $61.32 \mu g L^{-1}$). 이는 4월에 정점 2에서 녹조류 (*Micractinium pusillum*)가 급격히 증가했기 때문인 것으로 보인다.

1차 생산력을 측정하기 위해 가장 고전적인 방법으로 엽록소 *a* 농도나 식물플랑크톤의 현존량을 계산하였으나 이는 광학현미경 상에서 400~1,000배의 비율에서 미세조류의 생산량 계산은 가능하나 검경이 불가능한 직경이 극히 작은 미세조류나 picoplankton의 관찰은 고전적 방법으로 한계가 있다 (이 등 2004). 이런 실험상의 한계를 극복할 수 있는 기기가 최근에 개발된 Phytoplankton Analyzer인 phyto-PAM (식물플랑크톤 형광유도 측정기기)이다. 식물플랑크톤의 광계 II (PSII)에서 최고 광합성 효율을 측정하는 장치인 phyto-PAM은 엽록소 *a*에서 암적응 시에 유도된 엽록소 *a*의 형광에너지를 극초단위로 측정하는 특수 장비이다. 본 연구에서 이 기기를 사용하여 실제 엽록소 *a*의 농도와 유의성 관계를 파악하고자 시도하였다.

식물플랑크톤의 생리현상은 카우츠키 효과 (Kautsky and Hirsch 1931)에 의해 암적응된 엽록소가 빛에너지에 의해 여기된 광자의 일부는 형광과 열 등에 의해 소모되고 남은 광자들이 CO_2 고정에 필요한 NADPH와 ATP를 합성하여 광합성을 유도하는 특성을 가지고 있다 (Juneau and Popovic 1999). Phyto-PAM은 수계 생태계 내에서 다양한 환경인자에 노출된 식물플랑크톤의 생리상태를 측정할 수 있는 도구로써 과거 전통방법에 의한 생리활성 측정방법인 O_2 발생율, CO_2 고정율과 ATP합성에 따른 bioassay보다 현장에서 식물플랑크톤의 생리활성도를 측정할 수 있는 편리함이 있어 수생태계 연구에 많이 응용이 되고 있는 장치이다. 특히 수계에 특정 물

Table 1. Seasonal variations of ion elements in the Beopso Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do

(Unit: ppm)

| Ion elements | Months | St. 1 | St. 2 | St. 3 | St. 4 | St. 5 | St. 6 | |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Cation | Mg^{2+} | F | 4.49 | 15.73 | 6.44 | 8.97 | 7.27 | 6.59 |
| | | A | 6.38 | 11.04 | 9.63 | 8.77 | 5.94 | 5.57 |
| | | A | 1.11 | 4.99 | 2.53 | 3.01 | 2.2 | 3.30 |
| | | N | 3.03 | 7.9 | 6.03 | 6.24 | 6.27 | 3.78 |
| | Ca^{2+} | F | 20.35 | 63.63 | 27.23 | 34.4 | 27.9 | 29.57 |
| | | A | 27.13 | 51.59 | 74.6 | 40.68 | 26.03 | 24.85 |
| | | A | 4.94 | 23.19 | 10.34 | 10.34 | 8.42 | 14.71 |
| | | N | 15.18 | 43.86 | 61.36 | 17.32 | 26.94 | 19.75 |
| Anion | Cl^- | F | 14.62 | 49.54 | 23.31 | 21.33 | 25.21 | 23.06 |
| | | A | 17.93 | 81.84 | 121.75 | 17.14 | 12.83 | 12.59 |
| | | A | 1.94 | 10.3 | 6.38 | 6.38 | 2.95 | 4.27 |
| | | N | 6.52 | 15.54 | 45.08 | 6.94 | 14.88 | 8.86 |

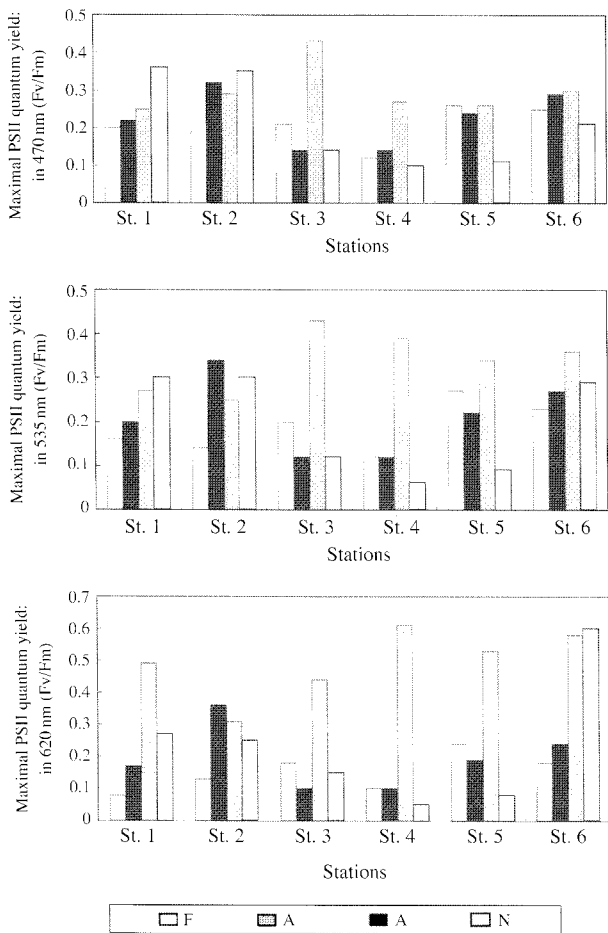


Fig. 6. Seasonal variations of maximal PSII quantum yields in each wavelength of phytoplanktons in the Beopso Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do.

질 (isoproturon, Cu, 제초제), 환경스트레스가 식물플랑크톤에 미치는 영향과 식물플랑크톤의 생리활성에 대한 내성을 검증하기 위해 Phyto-PAM을 이용하여 수계 생태계의 건강성을 파악하기도 한다 (Juneau and Popovic 2000; Dorigo and Leboulanger 2001; 김 2004, 2005; Schmitt-Jansen and Altenburger 2007, 2008).

Fig. 6은 수계에 존재하는 식물플랑크톤을 크게 3가지로 분류하여 최고광합성 효율을 측정된 결과이다. 470 nm의 blue filter에서 빛이 발산된 경우, 엽록소 *b*를 가지고 있는 녹조류가 측정이 되고, 535 nm의 green filter에서는 엽록소 *c*와 카로테노이드로 구성된 규조류나 와편모조류 등의 갈조류의 광합성 효율 측정이 가능하다. 620 nm의 orange filter를 통한 경우는 phycocyanin을 함유한 남조류의 생산력 측정이 가능하다 (Heinz Walz GmbH 1999). phyto-PAM에 의한 연중 식물플랑크톤의 분포도는 엽록소 *a*의 농도, 식물플랑크톤의 현존량과 높은 유의성을 나타내면서 광효율을 동시에 분석할 수 있

Table 2. Standing crops (cells mL⁻¹) of phytoplanktons in the Beopso Marsh

| | | F | A | A | N |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Charophyceae | St. 1 | * | * | * | |
| | St. 2 | * | * | * | |
| | St. 3 | * | * | * | |
| | St. 4 | * | * | * | |
| | St. 5 | * | * | * | |
| | St. 6 | * | * | 130 | |
| Chlorophyceae | St. 1 | 590 | 410 | 6,260 | 740 |
| | St. 2 | 100 | 22,430 | 110 | 1,350 |
| | St. 3 | 7,370 | 350 | 300 | 200 |
| | St. 4 | 20 | 2,390 | 10,420 | 710 |
| | St. 5 | 60 | 2,290 | 1,030 | 710 |
| | St. 6 | 50 | 240 | 1600 | 80 |
| Dinophyceae | St. 1 | 80 | * | * | |
| | St. 2 | 50 | * | * | |
| | St. 3 | * | * | * | |
| | St. 4 | * | * | * | |
| | St. 5 | * | * | * | |
| | St. 6 | * | * | | |
| Cyanophyceae | St. 1 | 440 | 100 | 6,890 | 920 |
| | St. 2 | 147 | 740 | 350 | 200 |
| | St. 3 | 2,460 | 320 | * | 40 |
| | St. 4 | 11,890 | * | 1,340 | |
| | St. 5 | 50 | * | 8,520 | 970 |
| | St. 6 | 360 | 240 | 210 | 520 |
| Bacillariophyceae | St. 1 | 510 | 1,360 | 1,390 | 1,190 |
| | St. 2 | 60 | 2,950 | 550 | 1,410 |
| | St. 3 | 4,580 | 3,790 | 13,690 | 2,820 |
| | St. 4 | 4,590 | 1,020 | 5,390 | 2,160 |
| | St. 5 | 590 | 3,900 | 9,550 | 530 |
| | St. 6 | 1,800 | 880 | 7,950 | 250 |
| Euglenophyceae | St. 1 | * | 680 | 760 | 210 |
| | St. 2 | 120 | 440 | 450 | 1,570 |
| | St. 3 | 50 | 1,390 | 9,600 | 18,720 |
| | St. 4 | * | 20 | * | 10 |
| | St. 5 | * | 500 | 600 | 200 |
| | St. 6 | * | 1,200 | 480 | 6,400 |
| Rhodophyceae | St. 1 | * | * | * | |
| | St. 2 | * | 110 | * | |
| | St. 3 | * | * | * | |
| | St. 4 | * | * | * | |
| | St. 5 | * | * | * | |
| | St. 6 | * | * | * | |
| Xanthophyceae | St. 1 | * | * | * | |
| | St. 2 | * | 100 | * | |
| | St. 3 | * | * | * | |
| | St. 4 | * | * | * | |
| | St. 5 | * | * | * | |
| | St. 6 | * | 10 | * | |

는 이점이 있어 수체 내에 분포하는 식물플랑크톤의 생리적 활성을 월별, 정점별 비교분석이 가능하여 수계 생태계의 1차 생산력을 판단하는 지표가 된다. 정점 1, 4, 5와 6은 월별로 변화가 없으나, 정점 2와 3은 광합성 효율의 월별변화 양상이 두드러졌다. 특히 정점 2는 모든 파장에서 4월이 높게 나타났고, 반면에 정점 3은 광효율

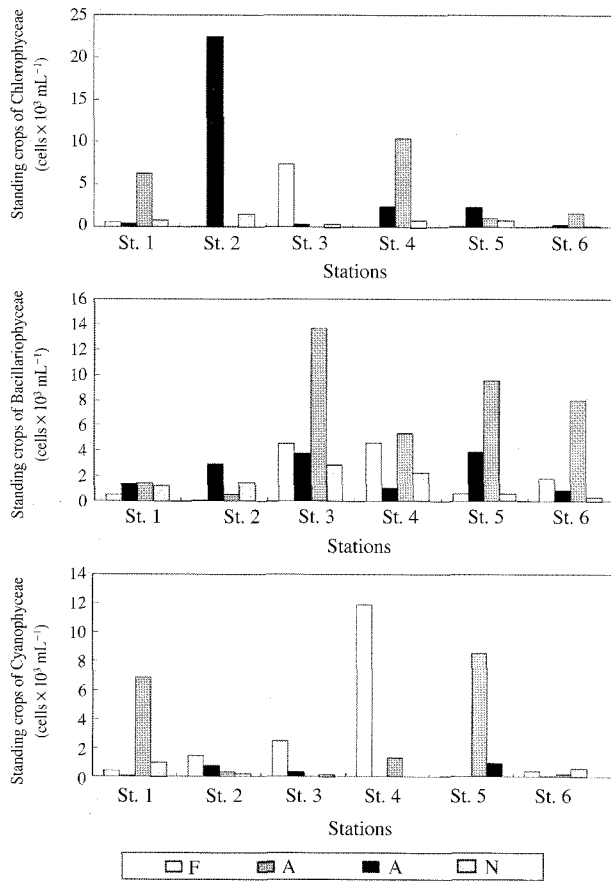


Fig. 7. Standing crops of phytoplankton divisions in the Beopsu Marsh, Haman-gun, Gyeongsangnam-do.

이 4월에 낮게 나타난 것으로 보아 식물플랑크톤 증식이 약화된 반면에 8월에는 정점 3, 4와 5에서 모든 과정에서 높게 나타났는데 이 결과는 여름에 엽록소 *a*의 농도와 식물플랑크톤의 개체수 증가와 동일한 양상을 나타냈다(Fig. 3과 Table 2).

식물플랑크톤의 현존량은 수화현상을 판단하는 기준이 되는데 우리나라 대부분의 댐 저수지들이 조류의 수화기준($5,000 \text{ cells mL}^{-1}$)(Horne and Goldman 1994) 이상의 현존량이 나타나고 있으나, 본 연구에서 법수늪의 식물플랑크톤의 현존량은 정점 1($1,620 \sim 15,300 \text{ cells mL}^{-1}$), 3($14,460 \sim 14,680 \text{ cells mL}^{-1}$)과 4($16,500 \sim 17,150 \text{ cells mL}^{-1}$), 5($700 \sim 19,700 \text{ cells mL}^{-1}$)와 6($230 \sim 10,370 \text{ cells mL}^{-1}$)에서 세 포밀도가 크게 증가한 반면에, 정점 2($1,800 \sim 1,460 \text{ cells mL}^{-1}$)에서는 조금 감소했다(Table 2). 분류군별 현존량의 변화에서 녹조강의 현존량은 4월에 정점 2($22,430 \text{ cells mL}^{-1}$)으로 높게 나타났으며, 8월에 정점 4($10,420 \text{ cells mL}^{-1}$), 2월에 정점 3($7,370 \text{ cells mL}^{-1}$)로 나타났다. 남조강은 2월에서 4월로 갈수록 감소하는 경향이 있었으나, 정점 4에서는 큰 폭으로 감소

했고, 8월로 갈수록 증가하였다. 규조강은 정점 1($500 \rightarrow 1,390 \text{ cells mL}^{-1}$), 2($60 \rightarrow 550 \text{ cells mL}^{-1}$), 3($4,580 \rightarrow 13,690 \text{ cells mL}^{-1}$), 4($4,590 \rightarrow 5,390 \text{ cells mL}^{-1}$), 5($590 \rightarrow 9,590 \text{ cells mL}^{-1}$) 그리고 정점 6($1,800 \rightarrow 7,950 \text{ cells mL}^{-1}$) 모두 증가했으며, 2월에 정점 3과 4에서 현존량이 가장 높게 나타났고, 4월에는 정점 2, 3, 5에서 높게 나타났으며, 8월에는 정점 3, 4, 5, 6에서 비교적 높은 현존량을 나타냈다. 그 중 8월에 정점 3($13,690 \text{ cells mL}^{-1}$)에서 가장 높은 현존량을 나타냈다(Fig. 7).

전반적으로 법수늪지 주변 유역의 농경지, 축산폐수 등의 비점오염원과 늪지 내로 유입되는 하수로의 방류수인 점오염원에 의해 COD 기준으로 3급수로 수질이 낮았고, 이러한 수환경은 수질에 민감한 수계 생물들의 서식환경이 파괴되는 위험 인자로 작용한다고 판단된다. 더구나 늪지식물의 자생지를 보호하기 위해 법수늪이 천연기념물로 지정되어 있지만 불법낙시, 쓰레기 투기, 오폐수 방류 등으로 인한 관리 소홀로 늪지식물 뿐만 아니라 다른 수계 생물의 종 다양성이 점점 줄어들 것으로 사료된다. 관계 당국은 습지의 수질 악화와 수계 생태계의 교란을 방지하기 위해 오염원의 영향권에 있는 정점 2, 3과 4에 각별한 주의와 관리가 요망되며 늪지 주변의 유역 관리를 위해 비점오염원을 줄이기 위한 방안으로 인접한 논밭 경작을 규제할 필요가 하고 인근의 청소년 수련원의 생활 오폐수와 인분뇨 정화능력을 강화할 필요가 있고 늪지 주변에 4곳의 오수정화시설의 정화 능력을 높이기 위한 시설 정기 점검이 필요하고 비점오염원(축산폐수, 비료 등)을 줄이기 위한 방안으로 늪지주변의 농경지를 개간하여 자연늪지 유역으로 변경할 필요가 있고, 낙시, 쓰레기, 오물 등의 정기적인 관리 및 점검이 요구되고, 장기적으로 마을 주민이 자발적으로 <늪지 지킴이>로 자원봉사에 참여하도록 유도하거나, 이에 따른 혜택을 부여하는 천연기념인 법수늪을 유지보전하는 제도 개선이 필요하다고 사료된다.

적 요

본 연구의 목적은 법수늪 유역 내에 유입되는 비점오염원과 늪지의 유입부의 점오염원 예측지역을 선정하여 수환경의 계절적 변화와 형광광도계(phyto-PAM)에 의한 1차 생산력을 분석하여 늪지 생태계의 관리방안을 위한 기초자료로 사용하고자 했다. 조사 시기는 2006년 2월, 4월, 8월과 11월에 각각 1회 정점 1~5의 수 표면에서 수심 1 m 사이의 수역에서 채수하고, 법수늪 유역 5개 지점, 늪 중앙을 1개 지점으로 하여 정점을 설정하

었다. 특히, 생활하수와 오수정화시설에서 방류되는 하수가 늘 안으로 유입되는 정점을 각각 2와 3으로 정하고, 인근의 청소년 수련원과 민가의 생활오수 등으로 유입되는 하수로 지점을 정점 4로 정하였는데 정점 3은 용존산소(1.39 mg L^{-1})가 낮았고, 탁도, SS, T-N, T-P, BOD, COD, Ca^{2+} , Cl^{-} 가 가장 높게 나타나 정점 6곳 중에 가장 오염원이 높은 곳으로 나타났다. BOD와 COD를 기준으로 했을 때 범수질의 수질은 전반적으로 3급수 수준에 머물러 있다고 본다. 엽록소 *a*의 농도는 4월에는 정점 2와 3에서 높게 나타났는데, 특히 정점 2에서는 급격히 증가하는 경향이 있었다(268.75 mg L^{-1} , 61.32 mg L^{-1}). 이는 4월에 정점 2에서 녹조류(*Micractinium pusillum*)가 급격히 증가했기 때문인 것으로 보인다. 식물플랑크톤의 2월에서 4월로 정점 2($180 \rightarrow 2,677 \text{ cells mL}^{-1}$)와 5($700 \rightarrow 6,690 \text{ cells mL}^{-1}$)에서 세포밀도가 크게 증가하였다. phyto-PAM에 의한 연중 식물플랑크톤의 분포도는 엽록소 *a*의 농도, 식물플랑크톤의 현존량과 높은 유의성이 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 2006년 함안군청의 재정적인 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 권동희. 2006. 한국의 습지 지형 연구성과와 과제. 한국지형학회지. 13:25-34.
- 김귀근. 2001. 내륙습지의 유형별 평가기법 및 관리방안에 관한 연구. 농업생명과학연구. 5.
- 김미경, 박정원, 이영옥. 2003. 남매지의 수환경요인과 식물플랑크톤의 계절적인 변동. 한국육수학회지. 36:48-56.
- 김미경. 2004. 운문댐의 조류발생 원인 및 예방대책. 경북지역환경기술개발센터. 60pp.
- 김미경. 2005. 영천댐의 조류발생원인 및 예방대책. 경북지역환경기술개발센터. 57pp.
- 김미경, 김영환. 1991. 일반조류학. 아카데미 서적. 229pp.
- 김범철, 김재욱, 전만식, 황순진. 1999a. 소양호 동·식물플랑크톤의 계절 변동. 한국육수학회지. 32:127-134.
- 김범철, 전만식, 정근, 정연숙, 황길순. 1999b. 농촌배수처리용 습지의 생물상 및 유기물 제거율. 환경생물. 17:407-414.
- 김범철, 전만식, 황길순, 김호섭. 2000. 습지에 의한 수질개선 효과. 한국육수학회지. 33:295-303.
- 김성봉, 신효중. 2006. 복원비용을 통한 습지의 가치도출에 관한 연구. 한국습지학회지. 8:83-92.
- 김종홍, 이도진. 2002. 호소생물학의 생태학. (주)복스힐. 231 pp.
- 윤춘경, 장재호, 정광욱, 함중화. 2004. 습지-연못 연계시스템에 의한 수질개선과 농업적 재이용 타당성 분석. 육수지. 37:344-354.
- 송인주, 구정은. 2006. 습지보전과 개발의 갈등 해소를 위한 제도. 한국습지학회지. 8:5-13.
- 이진환, 정승원, 김종만. 2004. 통영해역에서 일차 생산량의 비교 -식물플랑크톤 현존량, 엽록소-*a* 및 탄소량을 중심으로. 2004년 한국조류학회 Proceedings.
- 함안군. 2006. 함안군 범수면 늪지식물 보호관리학술조사. 181 pp.
- 환경부. 2001, 2002. 전국내륙습지 자연환경조사(질날늪, 범수늪, 석교천습지). 215 pp.
- 환경부. 2003a. 전국 내륙습지 자연환경조사: 청미천습지, 바위늪구비, 방축골습지. 1-543.
- 환경부. 2003b. 전국 내륙습지 자연환경조사: 해평습지, 검암습지. 1-429.
- 환경부. 2005a. 전국 내륙습지 자연환경조사: 섬진강(송전습지). UNDP/GEF 국가습지 보전사업관리단. 1-214.
- 환경부. 2005b. 전국 내륙습지 자연환경조사: 제주도, 동백동산, 용수저수지. UNDP/GEF 국가습지보전사업관리단. 1-261.
- APHA AWWA WEF, 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. (Eaton AD, LS Clesceri and AE Greenberg eds.). Baltimore, 10:157 pp.
- Beutler M, KH Wiltshire, B Meyer, C Moldaenke, C Luring, M Meyerhofer, UP Hansen and H Dau. 2002. A fluorometric method for the differentiation of algal populations in vivo and in situ. Photosynth. Res. 72:39-53.
- Carlson RE. 1977. A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanogr. 22:361-379.
- Dorigo U and C Le Boulanger. 2001. A pulse-amplitude modulated fluorescence-based method for assessing the effects of photosystem II herbicides on freshwater periphyton. J. Appl. Phycol. 13:509-515.
- Heinz Walz GmbH. 1999. Phytoplankton analyzer PHYTO-PAM: system components and principle of operation. Walz 78 pp.
- Horne SE and Goldman CR 1994. Limnology. McGraw-Hill Inc., New York, 576 pp.
- Jakob T, U schreiber, V Kirchesch, U Langner and C Wilhelm. 2005. Estimation of chlorophyll content and primary production of the major algal groups by means of multiwavelength-excitation PAM chlorophyll fluorometry: performance and methodological limits. Photosynth. Res. 83: 343-361.
- Juneau P, A El Berdey and R Popovic. 2002. PAM fluorometry in the determination of the sensitivity of *Chlorella vulgaris*, *Selenastrum capricornutum* and *Chlamydomonas*

- reinhardtii* to copper. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 42: 155-164.
- Juneau P and R Popovic. 1999. Evidence for the rapid phyto-toxicity and environmental stress evaluation using the PAM fluorometric method: importance and future application. Ecotoxicology 8:449-455.
- Kautsky H and A Hirsch 1931. Neue versuche zur kohlen-säureassimilation. Naturwissenschaften 19:964.
- Schmitt-Jansen M and R Altenburger. 2007. The use of pulse-amplitude modulated (PAM) fluorescence-based methods to evaluate effects of herbicides in microalgal systems of different complexity. Toxicol. Env. Chem. 89:651-667.
- Schmitt-Jansen M and R Altenburger. 2008. Community-level microalgal toxicity assessment by multiwavelength-excitation PAM fluorometry. Aquatic Toxicology 86:49-58.
- Woo YK, Park EJ, Lee KS and Lee DW 1996. Effects of *Persicaria thunbergii* on Nitrogen Retention and Loss in Wetland Microcosms. Korean J. Ecol. 19:179-189.

Manuscript Received: March 3, 2008

Revision Accepted: May 20, 2008

Responsible Editor: Hwan-Goo Yeo