

우포늪의 수환경요인 변화

이 정 준 · 이 정 호*

대구대학교 과학교육학부

Changes of the Environmental Factors in Upo Wetland

Jung Joon Lee and Jung Ho Lee*

Division of Science Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

Abstract – In the Upo wetland, physico-chemical factors were observed during the period from March 2005 to December 2007 on a monthly basis. In the Upo wetland, water temperatures ranged 3.4~34.5°C. Conductivities were in the range of 133~806 $\mu\text{S cm}^{-1}$, which showed about 140 $\mu\text{S cm}^{-1}$ below in comparison with the precedent studies. The pH levels were between 6.7~9.1 with lower level in summertime. The dissolved oxygens were between 0.06~18.23 mg L^{-1} . COD ranged 4.9~20.8 mg L^{-1} , and showed a tendency to decrease every year. Nitrogen nutrients such as nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and total nitrogen (T-N) showed that they were generally decreased in comparison with those in the precedent studies. However the total nitrogen (T-N) is still considerably higher than the standard concentration level of eutrophication and algal blooming. Phosphate phosphorus ($\text{PO}_4\text{-P}$) and total phosphorus (T-P) were also shown as to be reduced considerably comparing with the values in the precedent studies. However, It was found out that total phosphorus (T-P) was dissolved over the criteria concentration of eutrophication. The average of TN/TP ratio was 18 in the Upo wetland, which proved that phosphorus was the limiting factor to the growth of phytoplankton in the Upo wetland. The chl-*a* was the highest in wintertime and the lowest in summertime, and especially in 2006 summer when the cyanobacterial bloom developed, it showed extremely high concentration.

Key words : Upo Wetland, physico-chemical factors

서 론

우포늪과 주변 지역은 생태계보전지역으로 지정되어 있으며, 람사지구에 등록되어 보호되고 있다. 그러나 우포늪의 보호 대상 지역이 유역 전체가 아닌 습지 주변 지역으로 국한되어 있어 수질 관리에 상당한 어려움을 겪고 있는 실정이다(서 2006).

우포늪은 유역 내에 존재하는 각종 축사와 생활하수, 오염물 투기, 비료 사용 등 다양한 형태의 비점오염원의 유입으로 인해 수질오염이 심각하게 진행되고 있다(서 2006). 우포늪으로 유입되는 비점오염원은 유역의 토지 이용 형태와 강우에 의해 큰 영향을 받고 있는 것으로 보고되었으며, 특히 하계 집중 강우시기에 낙동강 강물의 역류에 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다(환경부 2002; 서 2006). 낙동강은 유역 면적이 넓고, 금호강을 비롯한 회천과 황강, 남강, 밀양강, 양산천 등에서 유입되는 생활하수와 공단폐수, 가축폐수 등에 의해 오염이 가

* Corresponding author: Jung Ho Lee, Tel. 053-850-4421, Fax. 053-850-6999, E-mail. jungho@daegu.ac.kr

속되고 있다(허 등 1995). 이렇듯 오염도가 심각한 낙동강의 강물이 강우시기에 우포늪으로 유입되는 경우, 습지 내로 유입되는 오염원의 양을 측정하고 이들이 습지 수질에 미치는 영향을 평가하기에는 많은 어려움이 있다. 강우시 우포늪으로 유입되는 비점오염원의 부하량을 측정하는 것은 유역의 토지이용형태와 지표퇴적물량, 강우량 등 여러 가지 주변 환경 조건에 따라 분석된 자료의 형태가 매우 떨어지는 문제점을 지니고 있다(Bedient *et al.* 1980; 방 등 2000). 우포늪의 경우, 유역면적에 대한 표면적비(DA/SA)가 크기 때문에 수질의 부영양화가 쉽게 일어날 수 있는 형태적인 요소를 지니고 있다(Fee 1979).

우리나라에서는 우포늪을 대상으로 수환경 요인에 대한 연구가 매우 미비한 실정이다. 현재까지 김(2001)과 Choi *et al.*(1998)에 의한 보고가 있었으나, 장기적인 모니터링은 이루어지고 있지 않은 상황이다. 우포늪으로 유입되는 각종 오염물질을 저감하기 위한 방안들이 빠른 시일 내에 마련되어야 할 것으로 보여지며, 효과적인 수질 관리를 위해서는 장기적인 수질 모니터링과 자료의 축적이 시급한 실정이다(창녕군 국립자연사박물관 우포늪 광역유치위원회 2001).

따라서 본 연구에서는 2005년 3월부터 2007년 12월까지 34개월에 걸쳐 매월 우포늪을 대상으로 다양한 수환경 요인의 변동 양상을 조사하고, 연도별 농도 변화를 측정하였다. 또한 우포늪을 대상으로 보고되었던 선행 연구들의 결과와 본 조사를 통해 분석된 결과와의 비교를 통해 지난 10여 년간 우포늪의 수환경요인 변동을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

우포늪은 경상남도 창녕군에 위치하는 자연습지로서, 우포늪의 수원은 화왕산에서 발원하는 토평천을 통해 유입된 후, 적포 부근에서 낙동강 분류와 합류한다(김 등 2004). 우포늪의 상류에는 토평천 이외에도 초곡천과 평지천, 대합천, 중대천, 도야천 등이 합류되어 우포늪으로 유입된다(서 2006). 평균 수심은 1m 정도이며, 우포늪의 바닥은 오랜 세월이 걸쳐 가라앉은 부식질이 두껍게 쌓여 다양한 수생식물과 습생식물이 모두 서식하는 독특한 생태계를 구성하고 있다(환경부 1987; Baek 1988; 한국자연보존협회 1989; 함과 손 1998).

본 조사는 우포늪의 가운데에 위치한 전망대 아래 지점을 대상으로, 2005년 3월부터 2007년 12월까지 매달

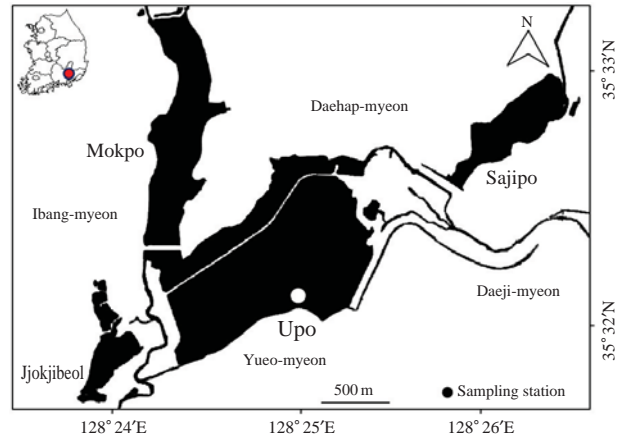


Fig. 1. A map showing the sampling station in Upo wetland.

1회씩 총 34회에 걸쳐 실시하였다(Fig. 1). 이 · 화학적 수질 조사를 위한 시료 채취는 수심 10~30 cm 깊이의 표층수를 플라스틱 채수병을 이용하여 채수하였다. 시료 보관용 용기는 2L 플라스틱 무균 채수병을 사용하였다. 수온과 pH, 용존산소, 전기전도도 등은 수질측정기인 Quanta multiprobe (HYDROLAB)을 사용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 나머지 수질 분석을 위한 시료는 아이스박스를 사용하여 당일 실험실로 운반하여 분석하였다. 화학적산소요구량(COD)와 질산성질소, 암모니아성 질소, 총질소, 인산염인, 총인, 엽록소-*a*의 수질 항목은 수질오염공정시험방법(환경부 1996) 및 Standard Methods for examination of water and wastewater (APHA · AWWA · WACEF 1998)에 따라 분석하였다.

결 과

1. 수 온

우포늪에서는 총 34회의 조사 기간 동안 수온은 3.4~33.5°C의 범위로 조사되었다. 연도별 평균 수온은 2005년에 17.0°C였으며, 2006년과 2007년에는 각각 17.9°C와 17.8°C로 나타났다. 연도별 최고 수온은 2006년에 33.5°C로 가장 높았으며, 2007년에 30.7°C로 가장 낮았다(Fig. 2). 우포에서 전 조사 기간 평균 수온은 18.3±9.1°C로 조사되었다. 2005년부터 2007년까지 하계에 해당하는 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 수온은 26.8±3.2°C였으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 수온은 13.6±7.8°C로 우리나라 남부 수생태계의 전형적인 양상을 나타내었다(Table 1).

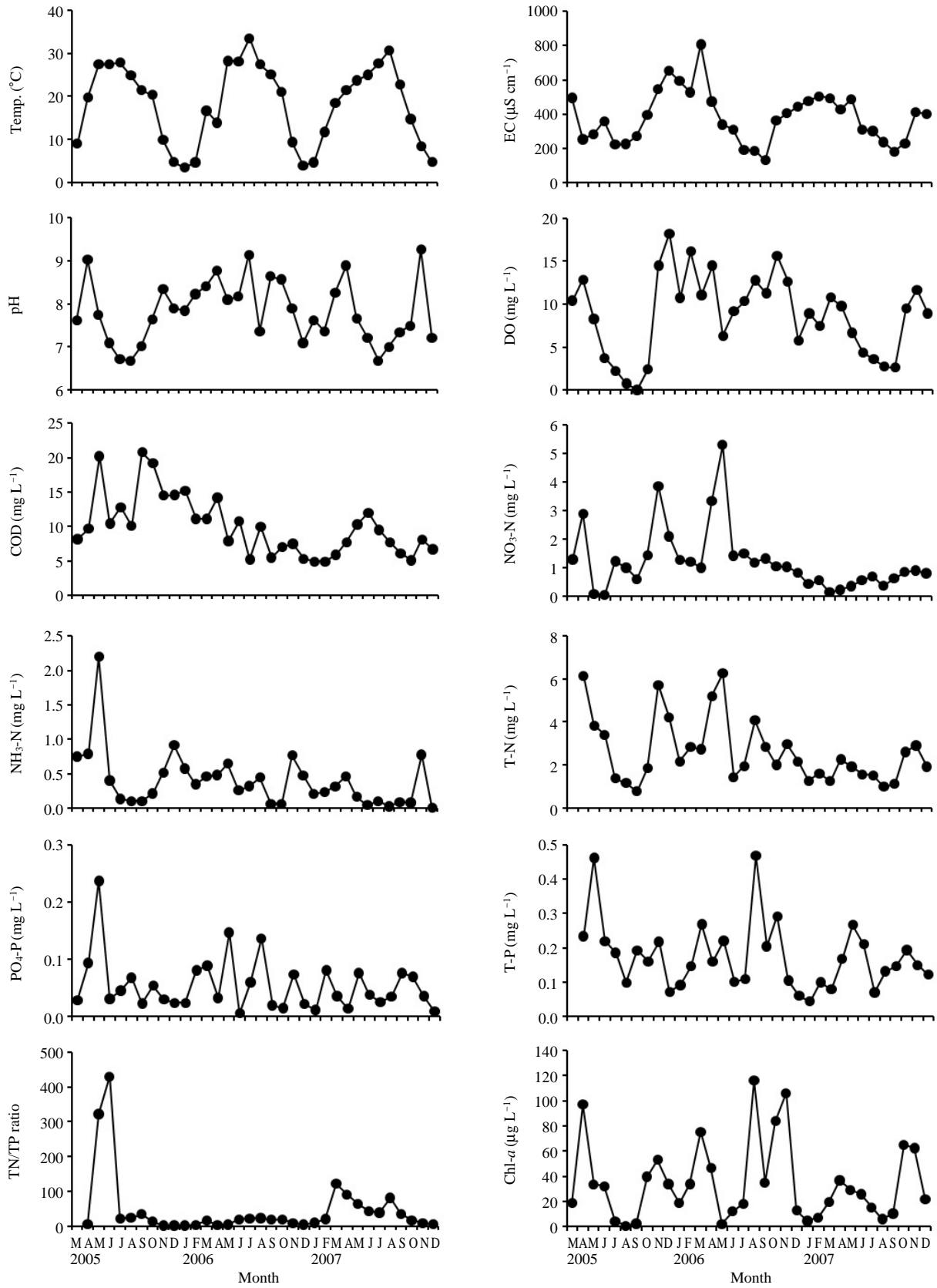


Fig. 2. Seasonal changes of physico-chemical factors in Upo wetland.

Table 1. Summary of the physico-chemical factors in Upo from March 2005 to December 2007

Factors	Jun. ~ Sep. (n=12)	Oct. ~ May (n=21 ~ 22)	Total mean (n=33 ~ 34)
Water temperature (°C)	26.8 ± 3.2	13.6 ± 7.8	18.3 ± 9.1
Conductivity (µS cm ⁻¹)	245 ± 64	456 ± 127	381 ± 148
pH	7.4 ± 0.8	8.0 ± 0.6	7.8 ± 0.7
Dissolved oxygen (mg L ⁻¹)	5.3 ± 4.2	10.6 ± 3.7	8.8 ± 4.6
COD (mg L ⁻¹)	10.1 ± 4.0	10.0 ± 4.5	10.0 ± 4.3
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.89 ± 0.44	1.42 ± 1.29	1.23 ± 1.10
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.17 ± 0.14	0.52 ± 0.44	0.40 ± 0.40
T-N (mg L ⁻¹)	1.85 ± 0.99	3.03 ± 1.54	2.60 ± 1.48
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.05 ± 0.03	0.06 ± 0.05	0.05 ± 0.05
T-P (mg L ⁻¹)	0.18 ± 0.10	0.17 ± 0.10	0.17 ± 0.10
TN/TP ratio	11.4 ± 4.9	21.1 ± 11.7	17.5 ± 10.8
Chlorophyll <i>a</i> (µg L ⁻¹)	23.3 ± 30.0	41.1 ± 29.0	34.8 ± 30.5

(mean ± sd) (n) indicates sampling frequency

2. 전기전도도

전기전도도는 대체로 하계에 낮고 동계에 높게 나타나는 계절적 변동 양상을 나타내었다. 연도별 평균 전기전도도는 2005년부터 2007년까지 점차 감소하여 나타나 2005년에 410 µS cm⁻¹로 가장 높았고 2007년에 373 µS cm⁻¹로 가장 낮았다. 최대 전기전도도는 2006년 3월의 806 µS cm⁻¹였으며, 최저 전기전도도는 2006년 9월의 133 µS cm⁻¹였다 (Fig. 2). 전 조사 기간 평균 전기전도도는 381 ± 148 µS cm⁻¹로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 전기전도도는 245 ± 64 µS cm⁻¹였으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 전기전도도는 456 ± 127 µS cm⁻¹로 하계와 나머지 조사 시기와의 차이가 상당히 큰 것으로 조사되었다 (Table 1).

3. pH

pH는 2005년과 2007년의 경우, 하계에는 낮고 동계와 춘계에 높게 나타났다. 그러나 2006년 하계에는 남조류에 의한 수화 현상의 발생으로 pH 또한 하계에 상당히 높게 나타났다. 연도별 평균 pH도 2005년과 2007년에는 각각 7.6과 7.7로 유사하게 나타났으나, 2006년에는 8.2로 높게 나타났다 (Fig. 2). 전 조사 기간 평균 pH는 7.8 ± 0.7로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 pH는 7.4 ± 0.8였으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 pH는 8.0 ± 0.6으로 하계에 다소 낮은 것으로 확인되었다 (Table 1).

4. 용존산소

용존산소 농도는 수생식물이 급격하게 성장하는 하계에 낮고, 다른 시기에는 높게 나타나는 계절적 변동 양

상을 나타내었다. 그러나 2006년에는 수화 현상이 발생함으로 인해 하계에 용존산소 농도가 상당히 높게 유지되었다. 연도별 평균 용존산소 농도 또한 2006년에 11.4 mg L⁻¹로 가장 높았고, 2005년과 2007년에는 각각 7.4 mg L⁻¹와 7.3 mg L⁻¹로 유사하게 나타났다 (Fig. 2). 전 조사 기간 평균 용존산소 농도는 8.8 ± 4.6 mg L⁻¹였다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 용존산소 농도는 5.3 ± 4.2 mg L⁻¹였으나, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 용존산소 농도는 10.6 ± 3.7 mg L⁻¹로 하계에 상당히 낮은 것으로 조사되었다 (Table 1).

5. 화학적산소요구량 (COD)

COD 농도는 계절적 변동 특성은 나타나지 않았으나, 본 조사 기간 동안 꾸준히 감소하는 경향을 나타내었다. 연도별 평균 COD 농도 또한 2005년에 14.1 mg L⁻¹로 가장 높았으며, 2006년에 9.2 mg L⁻¹, 2007년에는 7.4 mg L⁻¹로 시간의 흐름에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 전 조사 기간 평균 COD 농도는 10.0 ± 4.3 mg L⁻¹로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 COD 농도는 10.1 ± 4.0 mg L⁻¹였으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 농도는 10.0 ± 4.5 mg L⁻¹였다 (Table 1).

6. 질산성질소

질산성질소 농도는 2005년의 경우, 11월에 3.86 mg L⁻¹로 가장 높았으며, 4월에도 2.89 mg L⁻¹로 상당히 높게 나타났다. 그러나 하계에는 다소 낮게 나타나는 경향을 나타내었다. 2006년에는 4월과 5월의 춘계에만 높은 농도를 유지하였으며, 다른 계절에는 대체로 낮은 농도를 유지하였다. 2006년의 평균 질산성질소 농도는 1.46 mg L⁻¹로 조사되었다. 2007년에는 8월에 다소 낮은 농도를 나타내었으나, 연중 낮은 농도로 유지되었다 (Fig. 2). 2007년의 평균 질산성질소 농도는 0.55 mg L⁻¹로 2005년과 2006년에 비해 약 1/3 정도의 수준인 것으로 조사되었다. 전 조사 기간 평균 질산성질소 농도는 1.23 ± 1.10 mg L⁻¹로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 질산성질소 농도는 0.89 ± 0.44 mg L⁻¹로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 농도는 1.42 ± 1.29 mg L⁻¹로 하계에 대체로 낮게 나타났다 (Table 1).

7. 암모니아성질소

암모니아성질소 농도는 춘계와 동계에 높고 하계와

추계에 낮게 나타나는 계절적 변동 양상을 나타내었다. 최고 농도는 2005년 5월의 2.20 mg L^{-1} 였으며, 최저 농도는 2007년 9월의 0.003 mg L^{-1} 로 조사되었다. 연도별 평균 암모니아성질소 농도는 2005년에 0.61 mg L^{-1} , 2006년에 0.41 mg L^{-1} , 2007년에 0.21 mg L^{-1} 로 점차 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 2). 전 조사 기간 평균 암모니아성질소 농도는 $0.40 \pm 0.40 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 암모니아성질소 농도는 $0.17 \pm 0.14 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 농도는 $0.52 \pm 0.44 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되어 하계에 상당히 낮게 나타나는 것으로 조사되었다(Table 1).

8. 총질소

총질소 농도는 하계와 추계에 낮고, 춘계와 동계에 높게 나타나는 암모니아성질소 농도와 유사한 계절적 변화 양상을 나타내었다. 총질소 농도는 2006년 5월에 6.23 mg L^{-1} 로 가장 높았으며, 2005년 9월에 0.77 mg L^{-1} 로 가장 낮았다. 연도별 평균 총질소 농도는 2005년과 2006년에 각각 3.16 mg L^{-1} 와 3.05 mg L^{-1} 로 유사하게 나타났으나, 2007년에는 1.74 mg L^{-1} 로 상당히 낮게 나타났다(Fig. 2). 전 조사 기간 평균 총질소 농도는 $2.60 \pm 1.48 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 총질소 농도는 $1.85 \pm 0.99 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 21회 조사의 평균 농도는 $3.03 \pm 1.54 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되었다(Table 1). 우포에서 질소계열 영양염의 계절적 변동은 대체로 하계에 낮게 나타나는 양상을 보여주었다.

9. 인산염인

인산염인의 농도는 2005년의 경우 5월에 0.237 mg L^{-1} 로 최고치를 나타낸 이후, 12월까지 대체로 낮은 농도로 유지되었으나, 2006년과 2007년에는 계절적 변화보다는 월별로 상당한 차이를 나타내며 변화하는 양상을 나타내었다. 연도별 평균 인산염인 농도는 2005년에 0.064 mg L^{-1} 였으며, 2006년에는 0.059 mg L^{-1} , 2007년에는 0.042 mg L^{-1} 로 2005년부터 2007년까지 점차 감소하는 것으로 확인되었다(Fig. 2). 전 조사 기간 평균 인산염인 농도는 $0.054 \pm 0.047 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 인산염인 농도는 $0.047 \pm 0.033 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 농도는 $0.059 \pm 0.052 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되어 계절간의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다(Table 1).

10. 총인

총인 농도 또한 인산염인과 마찬가지로 월간 변동 폭이 큰 것으로 나타났으나, 춘계와 추계에 높고 하계와 동계에 낮은 계절적 변화 양상을 나타내었다. 연도별 평균 총인 농도 또한 2005년부터 2007년까지 각각 0.21 mg L^{-1} , 0.19 mg L^{-1} , 0.14 mg L^{-1} 로 점차 감소하는 것으로 조사되었다(Fig. 2). 전 조사 기간 평균 총인 농도는 $0.17 \pm 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 총인 농도는 $0.18 \pm 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 21회 조사의 평균 농도는 $0.17 \pm 0.10 \text{ mg L}^{-1}$ 로 조사되었다(Table 1).

11. 총인과 총질소의 농도비(TN/TP ratio)

총인과 총질소의 농도비를 조사한 결과 2005년에는 평균 19로 나타났으며, 2006년에는 20, 2007년에는 14로 나타났다. 총 33회에 걸친 조사에서 총인과 총질소의 농도비는 2005년 9월에 4로 가장 낮았으며, 2005년 12월에 58로 가장 높게 나타났다. 전 조사 기간 동안 총인과 총질소의 농도비가 10 이하로 나타난 것은 총 8회였다. 계절적 변동 양상은 대체로 하계에 낮게 나타나는 것으로 확인되었다(Fig. 2). 전 조사 기간 평균 총인과 총질소의 농도비는 17.5 ± 10.8 로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 총인과 총질소의 농도비는 11.4 ± 4.9 로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 21회 조사의 평균 농도비는 21.1 ± 11.7 로 하계와 비하계 시기간의 차이가 큰 것으로 조사되었다(Table 1).

12. 클로로필-a(Chl-a)

Chl-a 농도는 수생식물이 성장하는 하계에 대체로 낮게 나타났다. 특히 2005년에는 7월부터 9월까지 $5.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 chl-a 농도를 나타내었다. 그러나 2006년에는 남조류 수화 발생으로 인해 하계에 chl-a 농도가 급증하였으며, 8월에는 $116.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 매우 높은 농도를 나타내었다. 연도별 평균 chl-a 농도 또한 2005년과 2007년에는 각각 $31.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $25.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났으나, 2006년에는 $46.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 매우 높게 나타났다(Fig. 2). 전 조사 기간 평균 chl-a 농도는 $34.8 \pm 30.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사되었다. 2005년부터 2007년의 6월부터 9월까지 총 12회 조사 평균 chl-a 농도는 $23.3 \pm 30.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났으며, 10월부터 5월까지의 총 22회 조사의 평균 농도는 $41.1 \pm 29.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사되었다(Table 1).

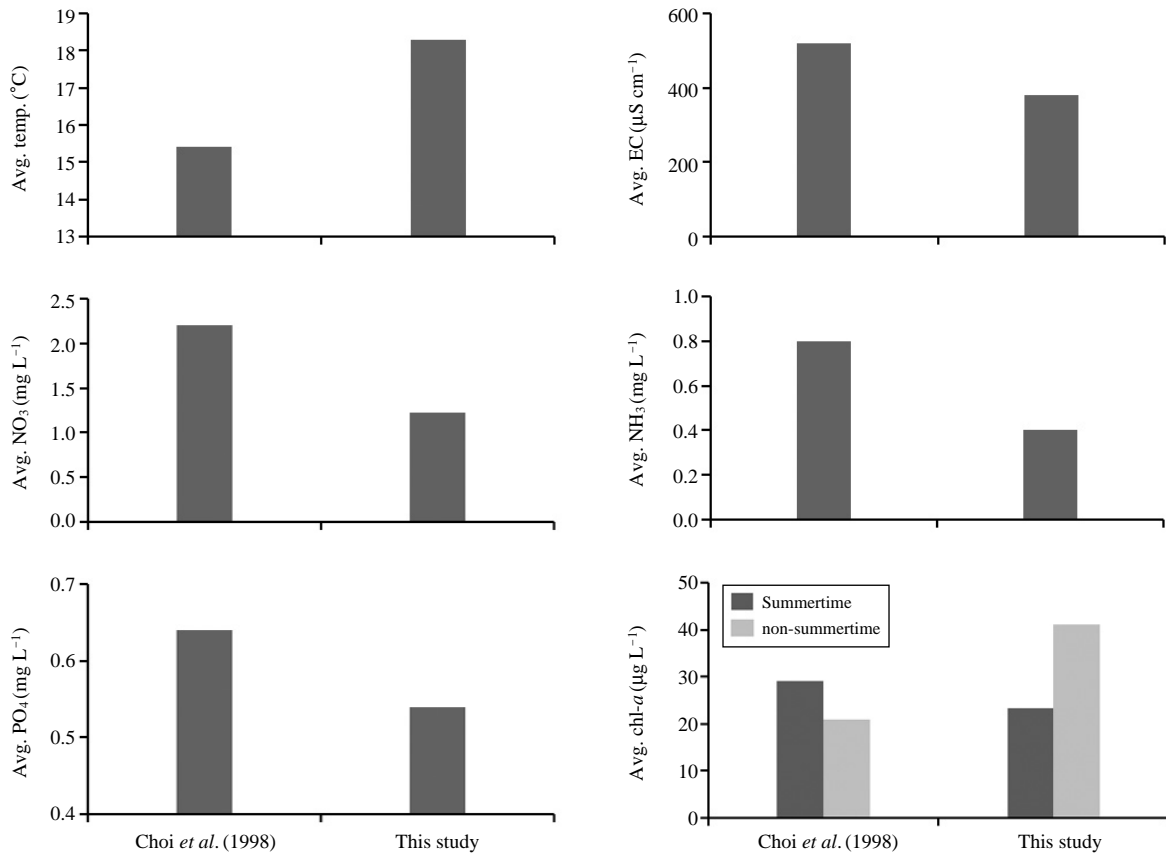


Fig. 3. Comparison of average value of environmental factors with the precedent study.

고찰

본 조사에서 나타난 우포늪의 평균 수온은 18.3°C로 나타났다. 이는 1995년부터 1999년까지 우포에서 보고된 평균 수온인 15.4°C에 비해 약 3.0°C나 높은 수치이다(Choi *et al.* 1998). 수온은 현장 조사의 시간차에 따른 오차가 크게 발생할 수 있는 특성을 지니고 있으므로, 지난 연구와 비교하여 단기간 내에 급격히 증가하였다고 결론을 내릴 수는 없을 것으로 보여진다. 그러나 본 조사 결과 지난 10여 년에 걸쳐 우포늪의 수온이 어느 정도 상승된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 또한 본 조사에서도 수온은 지속적으로 증가하는 양상을 나타내었다. Dale and Swartzman (1984)은 수온이 식물플랑크톤의 성장과 동물플랑크톤의 섭식과 호흡에 지대한 영향을 미치며, 수온의 증가로 인해 일반적인 수환경보다 따뜻한 수역에서 서식하는 종들로의 군집 변화가 일어날 것으로 보고하였다. 결국 우포늪에서의 지속적인 수온 증가는 향후 고수온에서 주로 서식하는 남조류로의 식물플랑크톤 군집 변화를 유발할 수도 있을 것으로 보여진

다. 또한 이러한 식물플랑크톤 군집 변화는 남조류 수화 발생과 같은 극단적인 수생태계 변화를 동반하여 결국 생물 종다양성 유지에도 어려움을 주어 전반적인 우포늪의 수생태계에 지대한 영향을 끼칠 것으로 보여진다. 본 연구에서 34회 동안 조사된 평균 전기전도도는 381 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 1995년부터 1998년까지 연구된 Choi *et al.* (1998)의 520 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 에 비해 약 140 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 저하된 것으로 나타났다(Fig. 3). 또한 본 연구 기간 동안에도 연도별 평균은 점차 저하되는 것으로 조사되었다. 수체 내에서 1차 생산자인 식물플랑크톤의 현존량 증감과 대단히 밀접한 관련을 지니고 있는 pH는 본 조사에서 전체적으로 하계에 낮게 나타나는 계절적 양상을 나타내었다(Wetzel 2001; 이 2002). 이는 하계에 수생식물의 급격한 성장으로 인해 식물플랑크톤의 생장이 저해받는 결과로 보여진다. 용존산소 농도는 전반적으로 하계에 낮게 나타났다. Horne and Goldman (1994)은 고수온기에 용존산소 농도의 극심한 저하는 어류를 비롯한 생태계의 여러 구성인자들의 생육을 제한하게 되어 수중생태계의 균형을 교란하는 피해를 초래할 수도 있다고 보고하였으나, 우포늪에서 하계의 낮은 용존산소 농도는 수

생식물의 생장에 의한 것으로 생태계의 균형이 교란되는 상황은 발생하지 않을 것으로 보여진다. COD는 BOD와 함께 수중의 유기물 오염도를 측정하는 것으로 매우 중요한 오염지표 항목이다(Cooper *et al.* 1984; Eckenfelder 1989). 모로코와 튀니지, 이집트에 있는 9개 자연 습지에서 COD의 연도별 평균 농도는 17.9~43.5 mg L⁻¹의 범위를 나타내는 것으로 보고되었다(Fathi *et al.* 2001). 본 조사에서 COD의 평균 농도는 10.0 mg L⁻¹로 조사되어 현재 우포늪의 유기물 오염도는 국외 자연 습지와 비교하여 상당히 양호한 것으로 확인되었다. 계절별 COD 변화는 하계에 대체로 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 하계에 우포늪에서 성장하는 수생식물의 생물량이 COD 농도에 상당량 기여한 것으로 보여진다. 또한 본 조사를 통해 나타난 연도별 평균 COD 농도는 점차 감소하는 것으로 나타나 현재 우포늪에서 유기물에 의한 오염도가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과 해석은 3년간의 자료만으로는 무리가 있는 것으로 보여지며, 향후 지속적인 자료의 보완으로 확인하여야 할 것으로 보여진다.

질소는 인과 함께 수중생태계의 가장 중요한 제한 요인으로 알려져 있다(Horne and Goldman 1994). 또한 질소 복합물의 농도는 계절적으로 규칙적인 변화를 보이는 경향이 있으며, 생물학적 흡수력은 식물플랑크톤 군집 변화에 크게 지배받는 것으로 보고되었다(이 2002). 본 조사에서 평균 질산성질소와 암모니아성질소의 농도는 각각 1.23 mg L⁻¹와 0.40 mg L⁻¹로 나타났다. 이는 Choi *et al.* (1998)이 보고한 2.20 mg L⁻¹와 0.80 mg L⁻¹에 비해 상당히 낮은 수치이며, 따라서 지난 10여 년간 우포늪에서 질소계열 영양염이 지속적으로 감소한 것을 알 수 있었다(Fig. 3). 그러나 질산성질소의 경우, 국외 자연 습지(스리랑카의 Bundala 습지와 모로코의 Merfa Sidi Bou Rhaba 습지, Zerge 습지, Bokka 습지, 이집트의 Edku 습지, Vurullus 습지, Manzala 습지, 남미의 Parana 강 유역 습지)의 연구 결과에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다(Fathi *et al.* 2001; Izaguirre *et al.* 2004; Piyankarage 2004). 암모니아성질소 농도 또한 Mississippi 강 유역의 Pontchartrain 습지에서 보고된 0.05 mg L⁻¹에 비해 높은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다(Lane 2001). 총질소 농도는 수화발생 기준과 부영양 기준을 크게 초과하는 것으로 조사되었으며(Klapper, 1991), 암모니아성질소와 마찬가지로 Pontchartrain 습지에서 보고된 1.20 mg L⁻¹에 비해 다소 높은 농도를 나타내었다(Lane 2001). 그러나 스리랑카의 Bundala 습지에서는 총질소 농도가 5.18 mg L⁻¹로 보고되었으며, 이스라엘의 Agmon 습지와 미국의 Ventura 습지에서도 각각 5.04 mg L⁻¹와 5.45 mg

L⁻¹로 우포늪에 비해 약 2배 정도 총질소 농도가 높은 것으로 보고되었다(Gophen 2000; Piyankarage 2004; Schrage and Dowing 2004). 인산염인 농도 또한 질산성질소, 암모니아성질소와 마찬가지로 Choi *et al.* (1998)에 의해 보고된 0.64 mg L⁻¹에 비해 본 조사에서는 0.10 mg L⁻¹의 감소가 확인되었다(Fig. 3). 그러나 남미의 Parana 강 유역 습지의 평균 농도인 0.44 mg L⁻¹에 비해서는 다소 높은 것으로 나타났다(Izaguirre *et al.* 2004). 국외의 자연 습지에서 총인 농도는 대체로 0.39~0.55 mg L⁻¹의 범위를 나타내는 것으로 보고되었다(Fathi *et al.* 2001; Izaguirre *et al.* 2004; Schrage and Dowing 2004). 본 조사에서 나타난 총인 농도는 0.17 mg L⁻¹로 국외에서 보고된 자연 습지에 비해서는 다소 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었으며, 총질소와 마찬가지로 부영양 기준을 초과하는 것으로 확인되었다(Klapper 1991). 따라서 향후 우포늪을 대상으로 인과 질소의 저감 방안에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 보여진다. 총인과 총질소의 농도비는 식물플랑크톤 생장에 지대한 영향을 미치는 제한 요인을 결정하는 중요한 인자이다(Horne and Goldman 1994). 국외 자연 습지의 경우, 스리랑카의 Bundala 습지에서 총인과 총질소의 농도비는 74로 보고되었으며, 이스라엘의 Agmon 습지에서는 42로 보고되었다(Gophen 2000; Piyankarage 2004). 본 연구에서 나타난 우포늪의 평균 총인과 총질소의 농도비는 18로 국외 자연 습지에 비해 상당히 낮은 것으로 확인되었다. 본 연구에서 나타난 평균 chl-*a* 농도는 Choi *et al.* (1998)의 연구와 비교하여 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 계절별 chl-*a* 농도를 살펴보면, 6월부터 9월까지의 하계에 본 연구에서는 23.3 µg L⁻¹로 선행 연구에 비해 약 5.7 µg L⁻¹가 감소한 것으로 나타났으며, 비하계 동안에는 약 20.2 µg L⁻¹가 증가한 것으로 나타났다. 따라서 10년 전과 비교하여 현재 계절별 chl-*a* 농도 변화가 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다(Fig. 3).

본 연구를 통해 현재 우포늪의 수온이 점차 증가하고 있는 것으로 나타나 향후 수생생물의 군집 변화가 야기될 우려가 있는 것으로 나타났다. 그러나 인과 질소계열의 영양염이 **선행연구 비교하여** 점차 감소하는 것으로 조사되었고, COD 농도 또한 2005년부터 2007년까지 연도별 평균 농도가 지속적으로 감소하는 것으로 나타나 유기물에 의한 오염이 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 단기간의 연구를 통해 우포늪의 수환경요인 변화를 규명하기에는 많은 문제점들이 있는 것으로 보여진다. 따라서 향후 장기적인 수질 모니터링이 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단되어진다.

사 사

본 연구는 환경부 국가장기생태연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음. 본 논문 작성에 도움을 주신 대구대학교 육수학 연구실원들과 시료 분석을 도와주신 한국수자원공사 경북권 수질검사소 관계자 분들에게 감사드립니다. 논문 교정에 수고를 아끼지 않으신 익명의 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김구연, 이찬우, 주기재. 2004. 우포늪 물억새 (*Miscanthus sacchariflorus*) 군락에서 생장초기에 잘라주기와 태우주기에 따른 성장변화. 한국육수학회지. 37:255-262.
- 김한순. 2001. 우포늪과 목포늪의 식물플랑크톤 군집의 계절적 변동. 한국육수학회지. 34:90-97.
- 방기웅, 이준호, 최종수. 2006. 강우시 산업단지에서의 오염물질 유출 특성. 대한환경공학회지. 22:341-353.
- 서동조. 2006. 위성영상의 규칙기반 분류기법을 적용한 우포늪 유역의 비점오염원 정보추출. 서울대학교 학위논문.
- 이정호. 2002. 대청호 남조류 수화 발달의 생태기작 연구(2차년도). 한국수자원공사 보고서 (WRRI-WR-02-07).
- 창녕군 국립자연사박물관 우포늪 광역유치위원회. 2001. 우포도우미.
- 한국자연보존협회. 1989. 한국의 희귀 및 위기 동식물도감.
- 함규황, 손성원. 1998. 경상남도 창녕군 우포늪과 창원군 주남저수지 일대의 조류분포. 경남대학교 기초과학연구소 연구논문집. 12:261-274.
- 허우명, 김범철, 황길순, 최광순, 박원규. 1995. 낙동강 수계의 인, 질소 및 chl. *a* 농도 분포. 한국육수학회지. 28:175-181.
- 환경부. 1987. 우포, 주남저수지 생태계 조사.
- 환경부. 1996. 공정시험법안. 동화기술.
- 환경부. 2002. 창녕 우포늪 생태계 보전지역 보전·관리대책수립.
- APHA, AWWA and WACEF. 1998. Standard method for the examination of water and wastewater, 20th edition. APHA, New York.
- Baek SY. 1998. Ecological studies on the Upo Wetland. M.S. Thesis. Chung-Ang University.
- Bedient PB, DA Lambert and NK Springer. 1980. Storm-water pollution load-runoff relationship. J. WPCF. 52:2396-2404.
- Choi SH, H Ha, YH Ju, HW Kim and GJ Joo. 1998. Physico-chemical characteristics of the Woopo wetland. S. Korea. Korean J. Limnol. 31:273-281.
- Cooper WJ, JC Young, RA Micear and WH Keith. 1984. Water Analysis. Academic Press, New York.
- Dale VH and GL Swartzman. 1984. Simulating the effects of increased temperature in a plankton ecosystem: A case study. pp.395-427. In Algae as ecological indicators (L Elliot Shubert ed.). Academic Press. New York.
- Eckenfelder WW. 1989. Industrial water pollution control. 2nd edition. McGraw-Hill, New York.
- Faith AA, HMA Abdelzaher, RJ Flower, M Ramdani and MM Kraiem. 2001. Phytoplankton communities of North African wetland lakes: the CASSARINA Project. Aqua. Ecol. 35: 303-318.
- Fee EJ. 1979. A relation between lake morphometry & primary productivity & its use in interpreting whole-lake eutrophication experiment. Limnol. Oceanogr. 24:401-406.
- Gophen M. 2000. Nutrient and plant dynamics in Lake Agmon Wetland (Hula Valley, Israel): a review with emphasis on *Typha domingensis* (1994-1999). Hydrobiol. 441:25-36.
- Horne AJ and CR Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill Inc, New York.
- Izaguirre I, I O'Farrell, F Unrein and R Sinistro. 2004. Algal assemblages across a wetland, from a shallow lake to relic-tual oxbow lakes (Lower Parana River, South America). Hydrobiol. 511:25-36.
- Klapper H. 1991. Control of eutrophication in inland waters. Ellis Horwood, New York.
- Lane RR, JW Day Jr., GP Kemp and DK Demcheck. 2001. The 1994 experimental opening of the Bonnet Carre Spillway to divert Mississippi River water into Lake Pontchartrain, Louisiana. Ecol. Engin. 17:411-422.
- Piyankarage SC, AP Mallawatantri, Y Matsuno and KAS Pathiratne. 2004. Human impacts and the status of water quality in the Bundala RAMSAR wetland lagoon system in Southern Sri Lanka. Wetlands Ecol. Manag. 12:473-482.
- Schrage L and JA Dowing. 2004. Pathways of increased water clarity after fish removal from Ventura Marsh; a shallow, eutrophic wetland. Hydrobiol. 511:215-231.
- Wetzel RG. 2001. Limnology-Lake and River Ecosystems. Academic Press, London.

Manuscript Received: May 27, 2009
Revision Accepted: September 17, 2009
Responsible Editor: Kyung-Hoon Shin