

동화습지의 갈대 침수줄기에 서식하는 부착구조균집의 생태학적 특성

김 백 호 · 박 영 석¹ · 김 용 재^{2,*}

(건국대학교 환경과학과, ¹경희대학교 생물학과, ²대진대학교 생명과학과)

Periphytic Diatom Communities and Water Environment in the Donghwa Constructed Wetlands. Kim, Baik-Ho, Young-Seok Park¹ and Yong-Jae Kim^{2,*} (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 130-701, Korea; ²Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 478-711, Korea)

Water quality and epiphytic diatom on the submerged stems of reed (*Phragmites communis*), which occupy 90% of the Donghwa wetland macrophytes were monthly monitored at three points such as inflow stream, high- and low-level wetlands, and outflow stream between March and October, 2005. 1) A diverse and high density of diatom species observed in the cold-season, especially *Nitzschia palea* and *Nitzschia amphibia* dominated the diatom community without wetlands. 2) High DAIPo and TDI indices were measured over the sampling periods and stations, regardless of nitrogen increase and phosphorus increase through the wetlands. 3) Higher density of diatom species in high wetland than low wetlands was attributed in the enough nutrients and light penetration by low growth of reed. Therefore, epiphytic diatom of reed stem in Donghwa wetland, where high nutrients released from the sediment and reed debris after the death of macrophytes, flourished with low canopy of low reed vegetation.

Key words : Donghwa wetland, epiphytic diatom community, DAIPo, *Phragmites communis*, TDI, water quality

서 론

자연 또는 인공습지는 오래 전부터 어업이나 농업에 중요한 수자원을 공급하여 왔으며, 최근에는 생태학습공간 및 2차 오염발생이 없는 저비용 고효율 하수처리 기술로서 가치를 인정받고 있다(Ghosh and Sen, 1987). 도시나 주거 밀집지역에 형성된 인공습지는 고등동물이 서식하기에는 다소 불리한 여건을 가지고 있지만 식물플랑크톤, 부착조류, 수생식물(생산자), 원생동물과 수서곤충(소비자), 박테리아(분해자)의 다양한 생물들이 모여있는 독특한 생태계를 이루며 특히 수질개선에도 중요한 역할을 하고 있

다(Kadlec and Knight, 1996). 그러나 각종 개발로 습지가 소멸되거나 훼손되어 이들의 본래 기능을 발휘하지 못하고, 많은 유기물이 하류에 위치하는 저수지나 하천에 유입되어 수질을 악화시키고 있다(Braakhekke and Marchand, 1987). 따라서 최근 부영양화를 방지하기 위한 습지의 건설은 오염이 심한 하천의 수질개선은 물론 생태계의 건강성 회복에도 긍정적인 평가를 받고 있다(Horn and Goldman, 1994; Jun *et al.*, 1998).

수중 생태계에서 부착조류는 수중의 용존유기물 흡수 및 상위인자로의 에너지 전달에 중요한 역할을 하며(Kelly *et al.*, 2001; Hill *et al.*, 2003), 박테리아, 곰팡이 등과 함께 1차 생물막(biofilm)을 형성하고(Callow, 2000;

* Corresponding author: Tel: 031) 539-1851, Fax: 031) 539-1850, E-mail: yjkim@daejin.ac.kr

Yamamoto *et al.*, 2005), 대형무척추동물의 먹이나 서식처를 제공한다(Caron and Sieburth, 1981; Meenakumari and Nair, 1994), 수심이 비교적 낮은 습지나 저수지 연안에 서식하는 수생식물의 줄기 또는 잎에 착생하는 식물 부착규조는 강우에 의한 수위변동, 독성물질 유입, 기질과의 관계(competition, canopy, allelopathy), 미생물의 분해 등 생태학적으로 매우 불안정한 서식환경을 가지고 있다(Denys, 2004; Phiri *et al.*, 2007). 특히 풍부한 유기물과 안정된 수온으로 인하여 빠른 생물막 형성 또는 탈리 등으로 현존량 변화가 심하며, 이들이 분리되어 수중의 탁도를 증가시킨다(Adamus and Stockwell, 1983). 그러나 갈대와 같은 수생식물의 줄기에 형성된 규조군집은 다른 생물군에 비해 수질에 대한 민감성이 뛰어나 습지 조성 이후 수질변화 및 예측 등에 장점을 가지고 있다(김과 권, 2004; Poulicova *et al.*, 2004).

1977년 반월공업도시 개발과 함께 건설된 시화호와 주변 하천은 많은 산업시설 및 축산단지로부터 배출되는 하수에 의해 심각한 수질오염이 발생함에 따라 환경기초시설과 인공습지 조성 등으로 수질개선을 위해 노력해 왔지만 시화호의 수질은 거의 개선되지 않아 2000년 12월부터 담수화를 포기하고 해수를 다시 유통시키고 있다(한국수자원공사, 2002). 특히 시화습지는 시화호 수질개선을 목적으로 2006년에 건설하였으며 유입하천에 따라 크게 반월습지와 동화습지로 나누어져 있고, 위치에 따라 저습지(low-level wetland; L)와 고습지(high-level wetland; H)로 구분된다. 고습지에는 스크루 펌프(Archimedes screw)를 이용하여 시간당 540톤의 하천수를 유입하고 있고 저습지에는 수문을 통해 유입되고 있다. 동화습지를 통과한 배출수는 반월습지에서 나온 배출수와 함께 시화호로 유입된다(한국수자원공사, 2002).

본 연구는 동화천에 조성된 인공습지를 대상으로 수생식물 군락의 95% 이상을 차지하는 갈대(*Phragmites communis* Trinius)의 침수줄기에 형성된 부착규조 군집과 수질특성을 파악하고자, 결빙기를 제외한 2005년 3월부터 10월까지 유입수, 습지, 배출구를 대상으로 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사기간 및 조사지점

조사는 갈수기와 결빙기를 제외한 10개월 동안(2005년 3월부터 10월까지) 매월 1회씩 실시하였다. 조사지점은 유입부(유입하천), 습지(고습지, 저습지), 배출구 등으로 구분하여 생물조사는 고습지(H1, H2, H3), 저습지(L1, L2, H3)

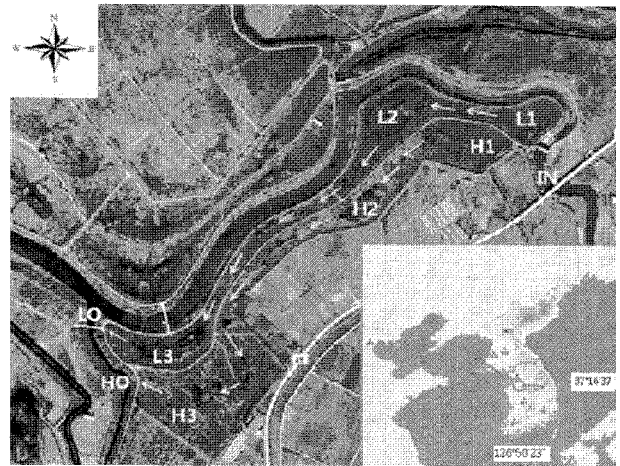


Fig. 1. The sampling stations of water and epiphytic diatom in the Donghwa wetland from March to October 2005. IN; inflow of high- and low wetland from Donghwa stream. L1, L2 and L3; Small ponds formed in the low wetland. H1, H2 and H3; Small ponds formed in the high wetland. LO and HO; Discharging points of the low wetland and the high wetland.

등 6개 지점에서, 수질조사는 유입수(IN), 습지(H1, H2, H3, L1, L2, L3), 배출구(HOUT, LOU) 등 총 9개 지점에서 실시하였다(Fig. 1).

2. 수질분석

수온, pH, 염분도, 전기전도도, 용존산소(DO), 탁도 등은 Portable multi-parameter (YSI 600QS-O-M, YSI inc., USA)를 이용하여 현장에서 측정하였고, Chl-*a*, 부유물질(SS) 및 영양염은 채수 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 광투과율은 Li-250 light meter를 이용하여 표면과 수심 30 cm의 광도를 각각 측정하여 상대적 투과율(relative penetration, %)을 계산하였다. Chl-*a*는 acetone법, 부유물질은 GF/C-filter를 이용하였으며, BOD는 Winkler-Azide법, COD는 acid KMnO₄법, NO₂, NH₃는 phenate, colorimetric법, NO₃과 TN은 cadmium reduction법, PO₄는 ascorbic acid법, TP는 persulfate 분해 후 용존무기인 측정법으로 각각 측정하였다(APHA, 1995). 조사기간 동안 동화습지 주변의 강수량, 일조시간, 기온은 조사기간의 수원기상대(http://www.kma.go.kr/sfc/sfc_03_02.jsp)의 자료를 이용하였다.

3. 부착규조 군집 및 오염도 평가

조류채집은 먼저 수중에 잠겨 있는 갈대의 중심 줄기를

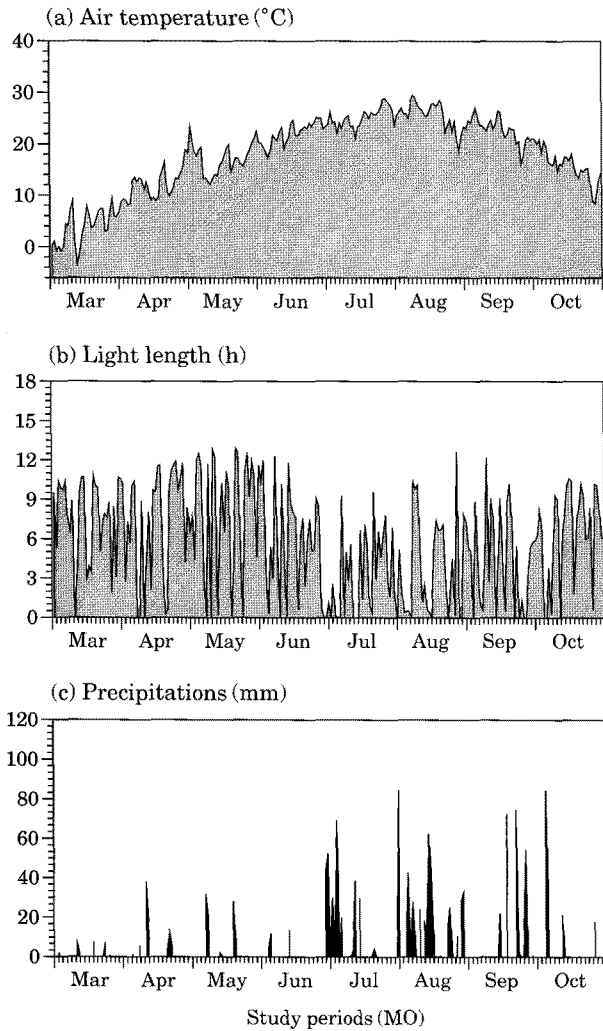


Fig. 2. Air temperature (°C), light length (hours) and precipitations (mm) in the Donghwa constructed wetland during the study periods between March and October 2005.

수표에서 수심 20 cm까지 가위로 잘라 vinyl pack에 넣어 실험실로 운반하였다. 운반된 줄기는 길이와 두께를 고려하여 100 cm² 표면적을 부드러운 brush로 긁어 PE병에 넣고 증류수를 이용하여 100 mL로 정량 채집하였다. 채집한 시료를 KMnO₄법으로 세정하고(Hendey, 1979) 연구표본을 제작하여 광학현미경(Axioscop 20, ×1,000~2,000) 하에서 동정, 분류하였다. 부착구조 현존량은 100 mL씩 정량 채집한 시료를 잘 혼합한 후 1 mL를 취해 Sedgwick-Rafter chamber로 500 cells 이상을 계수하여 이를 근거로 각 분류군의 상대빈도로 환산하였다. 또한 각 분류군의 현존량을 근거로 하여 우점종 및 우점도 지수(Shimpson, 1949), 종다양성 지수(Shannon and Weaver, 1963)를 산출

하였고, 습지의 유기물 및 영양염 오염상태를 파악하기 위하여 DAIPo 지수(diatom assemblage index of organic pollution, Watanabe and Asai, 1999)와 TDI 지수(Trophic diatom index, Kelly and Whitton, 1998)를 계산하였다.

4. 자료분석

습지의 수질 및 생물요인의 특성을 비교하기 위하여 분산분석(ANOVA) 및 Turkey's THD test를 실시하였고, 유의수준은 0.05로 하였다. 분석은 SPSS package(v. 12.0.1, 2004)를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 환경요인

조사기간 동안 동화습지 주변의 기온은 8월 5일에 29.5 °C로 가장 높았으며 3월 12일에 -0.8°C로 가장 낮았다. 일조시간은 강우에 의해 가장 큰 영향을 받았으며 7월과 10월 사이에 50 mm 이상의 강우가 8회 이상이었다(Fig. 2). 수온은 8.2~29.1°C의 범위로서 계절성이 뚜렷하였으며 유입수의 pH는 습지를 통과하면서 감소하였고 특히 두 배출부 HOUT, LOUT에서 동일한 경향으로 감소하였다(Table 1, Fig. 3). 용존산소(DO)는 pH와 비슷한 패턴을 보였으며, 염분도는 전체적으로 0.4‰ 이하 수준이었다. 전기전도도는 습지를 거치면서 대부분 증가하였으며, 조사지점간 차이는 조사시기에 따라 증감을 반복하는 불규칙한 경향을 나타내었다. 탁도는 습지내보다 LOUT에서는 높아지는 경향을 나타냈다(Table 1, Fig. 3).

조사기간 동안 질소계열 영양염은 습지를 통과하면서 감소한 반면 인계열은 반대로 증가하였다(Fig. 4). NO₂와 NO₃는 지점간에 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 NH₄는 LOUT에서 유입수의 약 25%까지 감소하였고, TN은 고습지에서 뚜렷하게 감소하였다. 한편 PO₄는 HOUT에서 유입수의 약 2배 이상까지 증가하였으나, TP는 지점간 차이를 보이지 않았다(Table 1, Fig. 4). 습지의 부유물질(SS)은 유입수와 비슷하거나 오히려 높은 값을 보였는데, 특히 LOUT에서 유입수보다 약 2.5배 이상 높았다. Chl-*a*는 전체적으로 고습지에서 유입수의 50% 정도로 낮았으나 저습지에서는 증가(5월), 감소(6~8월), 다시 증가(9월) 등으로 심한 변이를 나타냈다. BOD는 LOUT에서만 약간의 감소를 보였을 뿐, COD는 지점간 차이를 나타내지 않았다(Fig. 5).

이상의 결과를 종합하면, 동화습지의 총인과 총질소 농도는 모든 조사에서 부영양 상태로서(Vollenweider, 1979;

Table 1. Environmental variables of the Donghwa constructed wetland between March and October 2005.

Items	Sampling sites					F	P
	IN	L	LOUT	H	HOUT		
WT	20.65±2.31	20.46±2.137	19.99±1.93	20.24±2.14	20.14±1.94	0.016	0.999
pH	8.69±0.17 ^b	8.39±0.181 ^{ab}	7.98±0.16 ^a	8.09±0.12 ^{ab}	7.87±0.10 ^a	5.018	0.003
DO	12.78±1.61	10.65±1.211	8.41±0.87	8.75±1.10	9.15±1.22	2.156	0.094
Sal.	0.36±0.05	0.33±0.026	0.32±0.02	0.38±0.05	0.38±0.05	0.571	0.685
Cond.	644.13±124.19	709.29±74.85	807.88±173.61	716.54±110.31	742.88±95.38	0.242	0.912
NTU	16.05±3.28 ^a	29.68±6.107 ^{ab}	41.55±8.01 ^b	11.04±2.59 ^a	10.25±1.74 ^a	7.534	0.001
NO ₂	0.18±0.05 ^b	0.06±0.02 ^a	0.10±0.03 ^{ab}	0.03±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	4.964	0.003
NO ₃	1.34±0.35	0.98±0.34	0.95±0.21	0.89±0.39	0.63±0.35	0.578	0.680
NH ₄	1.74±0.58	0.53±0.19	1.63±0.55	0.17±0.06	1.54±0.61	2.456	0.064
TN	7.38±0.86 ^b	5.11±0.70 ^{ab}	5.87±0.78 ^{ab}	4.29±0.44 ^a	4.38±0.66 ^a	3.305	0.021
PO ₄	148.50±58.31 ^a	140.55±24.70 ^a	289.61±36.20 ^{ab}	180.73±36.95 ^a	394.44±82.30 ^b	4.427	0.005
TP	425.84±86.45	476.96±87.71	466.95±72.63	549.55±92.29	615.86±86.40	0.781	0.545
SS	26.90±7.93 ^a	45.60±7.00 ^{ab}	61.00±13.48 ^b	20.88±3.15 ^a	20.55±3.41 ^a	5.007	0.003
Chl- <i>a</i>	166.84±62.20	131.70±22.06	162.86±60.45	89.53±28.55	81.81±25.47	0.837	0.511
BOD	12.04±1.55	11.45±1.53	9.18±1.21	10.38±1.60	10.24±2.01	0.486	0.746
COD	14.39±1.46	16.19±1.33	15.20±1.24	15.35±1.43	15.83±0.79	0.289	0.883

IN; Inflow of Donghwa wetland, L; Mean water quality of three small ponds (L1, L2, and L3) formed in the low wetland of Donghwa wetland, LOU; Discharging points of the low wetland, H; Mean water quality of three small ponds (H1, H2, and H3) formed in the high wetland of Donghwa wetland, HOUT; Discharging points of the high wetland. WT; water temperature (°C), DO (mg L⁻¹), Cond.; electric conductivity (umhos cm⁻¹), Sal.; salinity (‰), NTU; turbidity, TN; total nitrogen (mg L⁻¹), TP; total phosphorus (µg L⁻¹), SS; suspended solids (mg L⁻¹), Chl-*a*; chlorophyll-*a* (mg L⁻¹), BOD; biochemical oxygen demand (mg L⁻¹), COD; chemical oxygen demand (mg L⁻¹). P; p-value is the probability of obtaining a test statistic at least as extreme as the one that was actually observed, F; ANOVA F-statistic is a ratio of the between group variation divided by the within group variation. Small bold alphabets (a and b) are significant differences by analysis of Turkey's THD test.

Forsberg and Ryding, 1982), 호오탁성 생물들의 출현이 예상되었다. 또한 두 고습지와 저습지로 유입된 하천수는 습지내 질소는 감소하였으나 인은 오히려 증가하였으며 배출부의 부유물질과 탁도는 증가하였다. 이와 같이 인의 농도가 습지를 통과하면서 증가하는 것은 인이 습지내에 유입되어 퇴적물에 의한 흡착 및 침전, 수초에 의한 흡수, 미생물에 의한 흡수 및 분해 등의 다양한 방법으로 처리되지만 (Corbitt and Bowen, 1994; 서 등, 2009) 대부분의 인은 주로 흡착 및 침전된 후에 용존산소농도의 감소로 혐기성 환경으로 되면서 이들로부터 수체로 용출되기 때문이다 (최 등, 2008). 또한 이런 현상은 배출부가 다른 지점에 비해 상대적으로 넓은 습지를 가짐으로써 많은 생물막의 탈리로 생성된 유기물질이 폭이 좁은 배출구로 집중화 되면서 일어난 현상 (Sondergarrrd and Schierup, 1982; 최 등, 2008)으로 현재보다 체류시간이 더 느려질 경우 배출부 차단 및 인근 부위에 빠른 퇴적화가 일어날 것으로 판단되었다.

2. 갈대 부착규조 군집의 특성

조사기간 동안 동화습지에서 출현된 갈대 부착규조는 총 120종이었으며, 고온기(여름)에 비해 저온기(봄, 가을)

에 보다 다양한 종과 높은 생물량을 나타냈다 (Fig. 6). 종 출현과 현존량은 비슷한 패턴을 보였는데, 종 출현은 L3에서 42분류군으로 가장 많았고, H2에서 16분류군으로 가장 적었다. 현존량은 L3에서 6,460,000 cells cm⁻²로 가장 높은 밀도를 보였으며, L1에서 170,000 cells cm⁻²로서 가장 낮았다. 이와 같이 고온기에 낮은 종 출현과 현존량을 보인 것은 주로 강우에 의한 희석과 갈대의 높은 성장에 의한 canopy 또는 먹이경쟁의 결과로 사료되었다.

부착규조 군집은 주로 *Achnanthes*, *Navicula*, *Nitzschia* 등 3개 속이 우점하였으며 두 습지 모두 비슷하였다 (Table 3). 저습지에서는 *Achnanthes minutissima*, *Cyclotella meneghiniana*, *Navicula cryptocephala*, *Navicula goeppertiana*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia palea* 등 7분류군이 우점하였고 조사시기 및 지점에 따라 5.5~57.9%의 범위로 다양한 우점율을 나타냈다. 가장 높은 우점빈도를 보인 분류군들은 *Nitzschia palea* (18회), *Nitzschia amphibia* (15회), *Achnanthes minutissima* (11회) 순이었다. 고습지에서는 *Nitzschia palea*, *Achnanthes minutissima*, *Navicula goeppertiana*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea* 등 5분류군이 우점하여 4.9~72.5%의 다양한 우점율을 나타냈다. 가장 높은

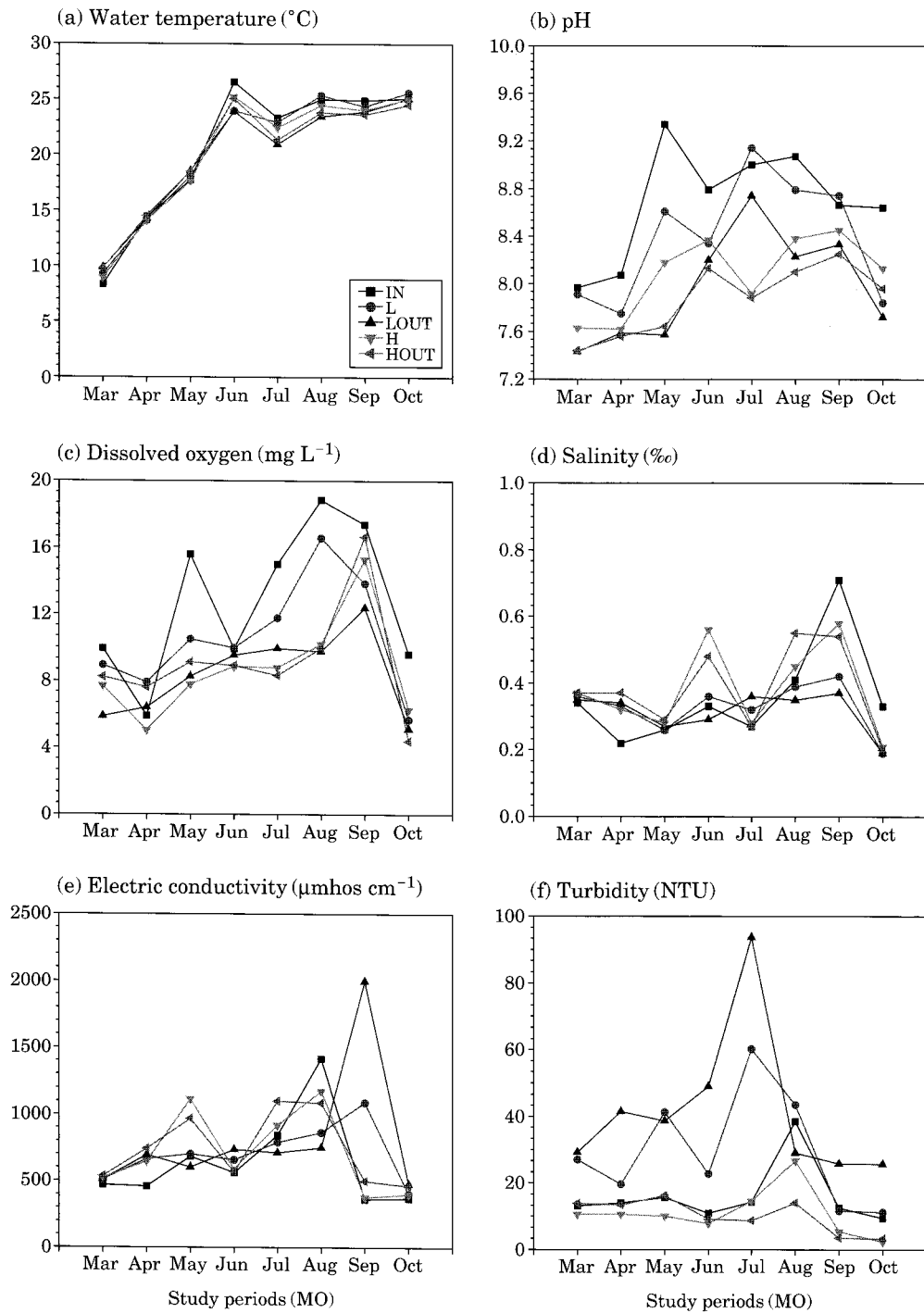


Fig. 3. Environmental variables in each sampling stations at the Donghwa constructed wetland from March to October 2005. IN; inflow of high- and low wetland from Donghwa stream. L; low wetland, LOUT; outflow of low wetland. H; high wetland, HOUT; outflow of high wetland.

우점빈도를 보였던 분류군은 저습지와 비슷하게 *Nitzschia palea* (20회), *Nitzschia amphibia* (18회), *Achnanthes minutissima* (6회) 순이었다. 특히, 두 습지에서 가장 높은

상대밀도를 보였던 종은 *Nitzschia palea*, *Nitzschia amphibia* 등 2종으로 오락된 수역에서 우점으로 출현하는 종(Watanabe, 2005)으로 전자는 L1에서 55.9% (8월),

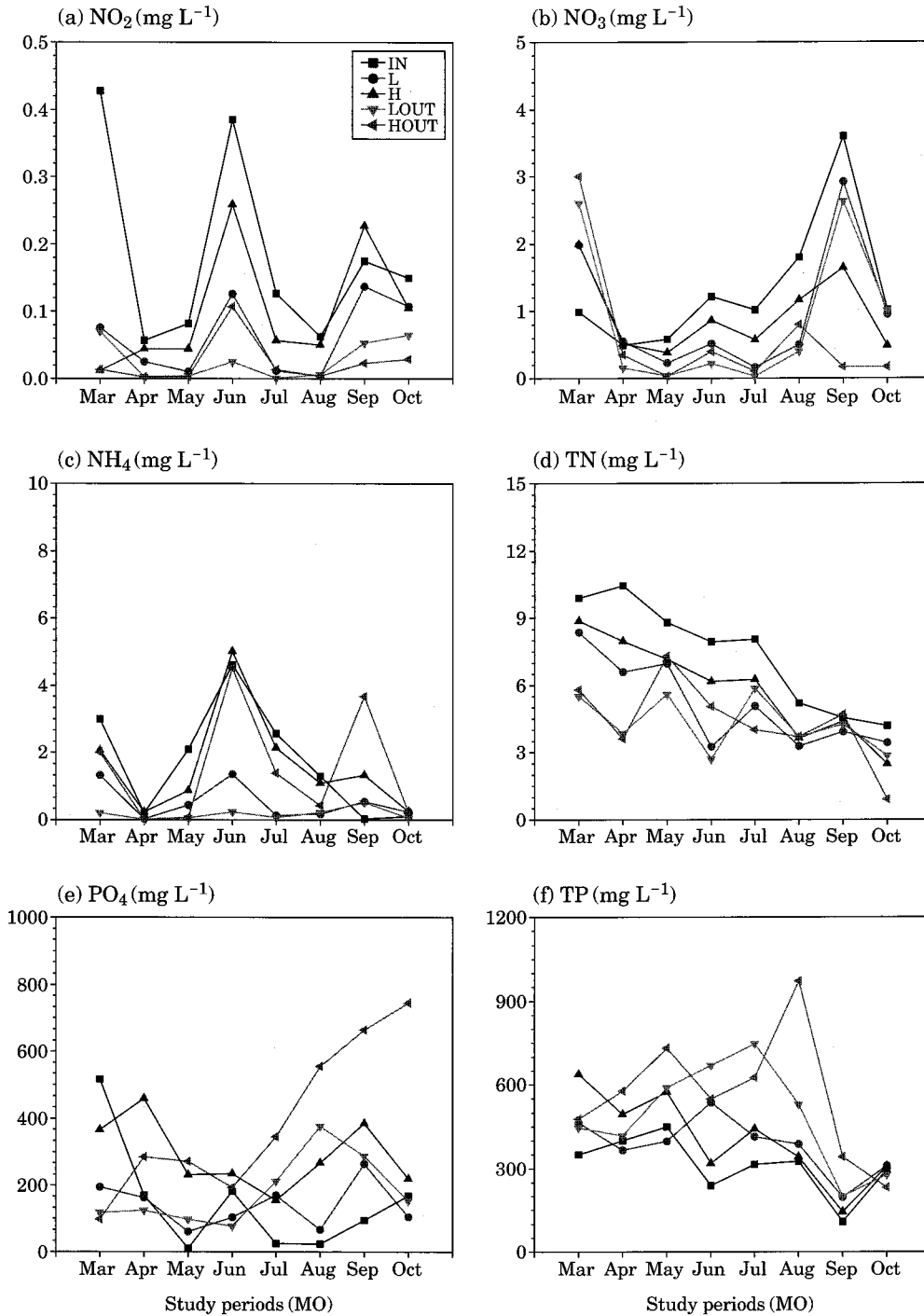


Fig. 4. Environmental variables in each sampling stations at the Dongwha constructed wetland from March to October 2005. IN; inflow of high- and low wetland from Dongwha stream. L; low wetland, LOU; outflow of low wetland. H; high wetland, HO; outflow of high wetland.

H3에서 70.9% (5월), 후자는 L1에서 57.9% (7월), H3에서 72.5% (10월) 등으로 가장 높은 밀도를 나타냈다 (Table 3). 동화습지의 갈대군락에 형성된 부착규조 종 출현은 국

내 일반하천의 돌부착규조보다 낮은 편이지만 현존량은 비슷하거나 더 높았다 (이, 1998; 김, 1999, 2001, 2005, 2009; 김과 김, 2006). 동화습지와 비슷한 반월습지의 경우

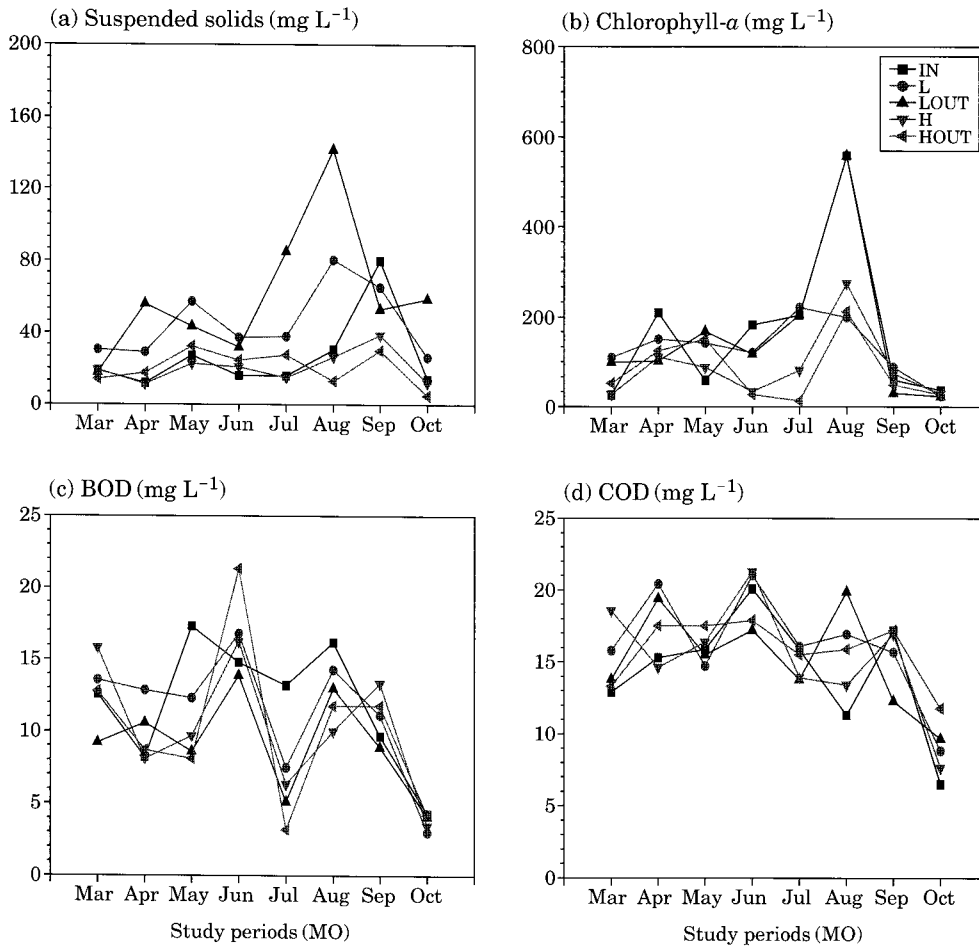


Fig. 5. Environmental variables in each sampling stations at the Donghwa constructed wetland from March to October 2005. IN; inflow of high- and low wetland from Donghwa stream. L; low wetland, LOU; outflow of low wetland. H; high wetland, HOU; outflow of high wetland.

Table 2. Biological indices and water qualities of the Donghwa constructed wetland between March and October 2005.

Items	Sampling sites						F	P
	L1	L2	L3	H1	H2	H3		
No	33.00±2.30 ^{ab}	34.75±1.97 ^{ab}	35.50±2.82 ^{ab}	35.75±1.01 ^b	32.63±3.19 ^{ab}	26.13±1.46 ^a	2.532	0.043
Biomass	120.00±57.33	217.10±73.01	221.25±68.77	153.69±45.68	226.13±64.48	210.44±54.09	0.514	0.764
DI	0.19±0.05 ^a	0.18±0.02 ^a	0.18±0.02 ^a	0.14±0.02 ^a	0.21±0.03 ^a	0.37±0.06 ^b	4.679	0.002
H'	1.18±0.04 ^a	1.16±0.07 ^a	1.08±0.06 ^a	1.20±0.04 ^a	1.07±0.11 ^a	0.77±0.07 ^b	5.202	0.001
DAIpo	30.86±4.57 ^a	31.56±3.47 ^a	34.31±2.65 ^{ab}	26.84±1.62 ^a	29.23±3.66 ^a	45.86±2.52 ^b	4.355	0.003
TDI	81.08±3.58 ^{ab}	83.80±2.86 ^{abc}	77.56±4.89 ^a	91.69±0.85 ^{bc}	94.70±1.33 ^c	91.81±3.28 ^{bc}	4.920	0.001

L1, L2, and L3; three small ponds formed in the low-level wetland of Donghwa wetland. H1, H2, and H3; three small ponds in the high-level wetland of Donghwa wetland. No; number of species, Biomass; number of diatom cells (× 10⁶, cells cm⁻²), DI; dominant index (Simpson, 1949), H'; diversity index (Shannon-Weaver, 1963), DAIpo; diatom assemblage index of organic pollution (Watanabe and Asai, 1999), TDI; trophic diatom index (Kelly and Whitton, 1998). Small bold alphabets (a, b and c) are significant differences by analysis of Turkey's THD test.

*Achnanthes minutissima*가 봄에 총 현존량의 89.9%를 차지하다가 여름에는 *Navicula*와 *Nitzschia*가 새롭게 우점하였고, 가을에 *Achnanthes minutissima*가 다시 우점하는

등 뚜렷한 계절성을 나타냈다(김, 2009). 이에 반해 동화습지의 경우, 전체 우점종은 *Nitzschia palea*로서 봄에 일시적으로 71%의 높은 우점율을 보였으나 여름에는 *Nitzs-*

Table 3. Relative abundance (%) of dominant and subdominant species in the Donghwa wetland between March and October 2005.

Months	Species	Sampling sites					
		L1	L2	L3	H1	H2	H3
March	<i>Achnanthes minutissima</i>			31.7			17.4
	<i>Navicula atomus</i>		16.6				
	<i>Navicula cryptocephala</i>	10.7					
	<i>Nitzschia amphibia</i>				14.6	15.0	
	<i>Nitzschia fonticola</i>		22.5	18.2			
	<i>Nitzsachia palea</i>	12.6			16.2	18.4	26.9
April	<i>Achnanthes minutissima</i>	13.5	15.5	43.1			18.8
	<i>Nitzschia amphibia</i>	16.2			15.6		
	<i>Nitzsachia palea</i>		37.1	25.5	22.8	24.1	41.9
May	<i>Achnanthes minutissima</i>	35.9	21.9				
	<i>Navicula minima</i>		22.4				
	<i>Navicula saprophila</i>					27.8	
	<i>Navicula subminuscule</i>				12.6		
	<i>Nitzschia amphibia</i>	15.3					
	<i>Nitzschia fonticola</i>			31.1			
June	<i>Nitzsachia palea</i>			19.2	23.5	35.1	70.9
	<i>Achnanthes minutissima</i>					36.2	71.1
	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	26.3					
	<i>Nitzschia amphibia</i>	24.0		20.1	18.0	27.8	
	<i>Nitzschia fonticola</i>		23.0	40.0			
	<i>Nitzsachia palea</i>		24.5		15.7		10.8
July	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	30.7	37.2				
	<i>Nitzschia amphibia</i>	57.9	16.1	20.5	23.7	38.4	30.5
	<i>Nitzsachia palea</i>	12.3	17.5	27.3	29.0	18.8	21.6
August	<i>Gomphonema pseudoaugur</i>			17.0			
	<i>Nitzschia amphibia</i>	12.6	33.5		48.2	53.1	54.8
	<i>Nitzschia filiformis</i>				11.0		
	<i>Nitzsachia palea</i>	55.9	11.4	21.6		18.6	17.0
September	<i>Navicula geoppertiana</i>		25.3				
	<i>Nitzschia amphibia</i>		45.1	49.8	16.2	39.9	68.3
	<i>Nitzschia fonticola</i>	25.8					
	<i>Nitzsachia palea</i>	15.1		10.2	26.6	10.3	
October	<i>Achnanthes minutissima</i>					11.3	
	<i>Cyclotella meneghiniana</i>		14.9				
	<i>Navicula geoppertiana</i>		40.8		22.4		
	<i>Nitzschia amphibia</i>			16.6	20.9	49.5	72.5
	<i>Nitzsachia palea</i>	18.8		19.0			
	<i>Nitzsachia sigma</i>	19.5					

L1, L2 and L3; Small ponds formed in the low wetland of the Donghwa constructed wetland. H1, H2 and H3; Small ponds formed in the high wetland of the Donghwa constructed wetland.

chia palea, *Nitzschia amphibia*, *Achnanthes minutissima* 등이 고르게 우점하였고, 가을에는 *Nitzschia palea* 가 다시 우점하는 등 두 인접한 습지들의 생물군집이 비슷한 특성을 갖는 것으로 밝혀졌다.

군집의 우점도 지수는 전체적으로 0.5 이하였으며, 조사 시기와 지점간에 심한 차이를 보였다. 특히 H3에서는 5,

6, 9, 10월 동안 평균 0.4 이상의 높은 우점도를 보여 다른 지점과 뚜렷한 차이를 나타냈다. 종 다양도 지수는 H3에서 조사기간 동안 가장 낮은 수치를 보였으며, 나머지 지점간에는 큰 차이를 보이지 않았다(Table 2, Fig. 6). 고습지의 H3 지점은 다른 지점에 비해 넓은 갈대 군락과 낮은 체류시간이 특징이며, 조사기간 동안 가장 낮은 출현 종수

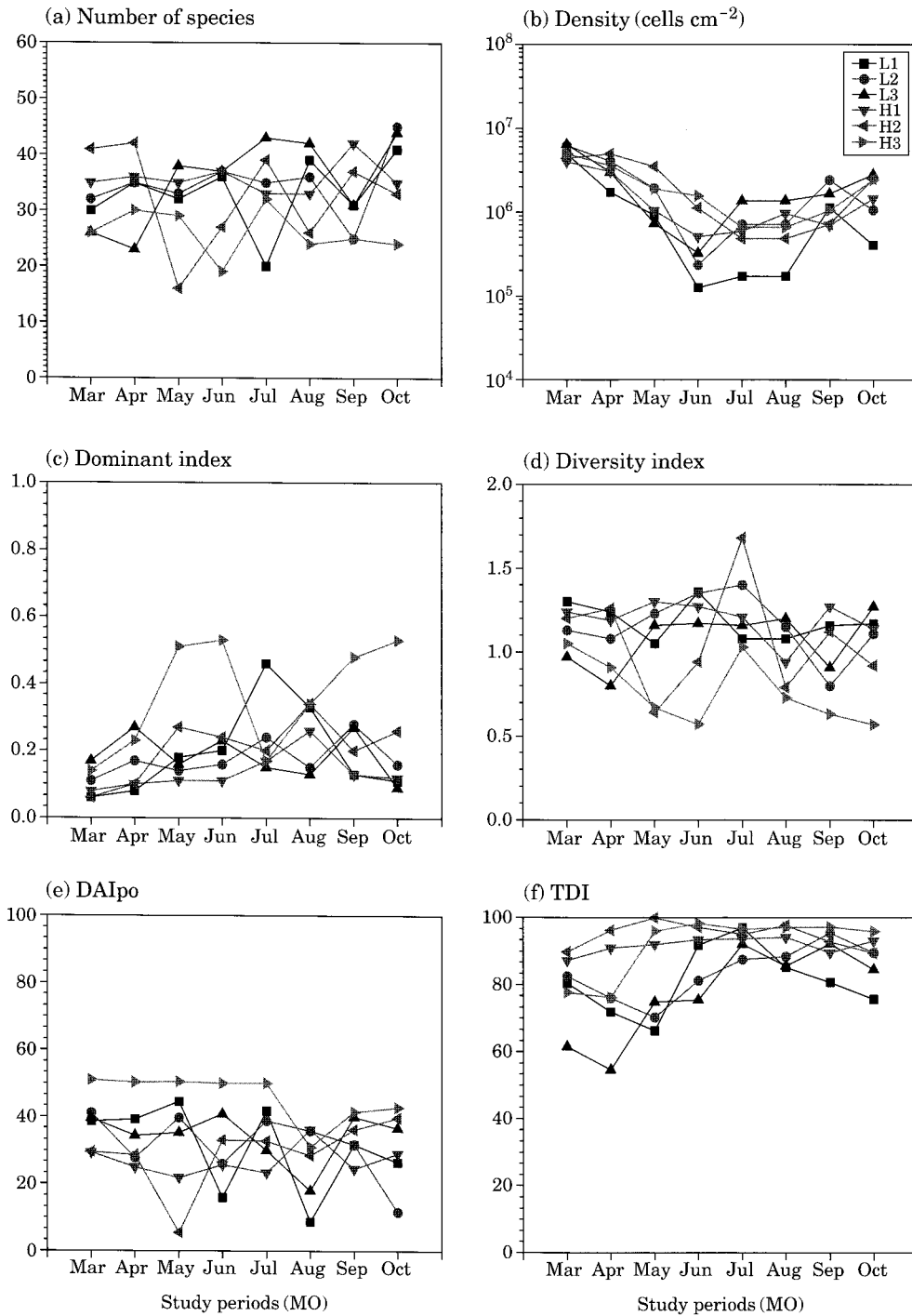


Fig. 6. Periphytic diatom community in the Donghwa constructed wetland from March to October 2005. L1, L2 and L3; Small ponds formed in the low wetland. H1, H2 and H3; Small ponds formed in the high wetland.

와 가장 높은 밀도를 보였는데 특히 전체 우점종인 *Nitzschia palea*, *Nitzschia amphibia*의 밀도가 다른 지점에 비해 상대적으로 매우 높은 것으로 보아 두 오탁종이 서식하기 위한 적합한 환경으로 판단되었다.

3. 유기물 오염지수 (DAIpo) 및 영양염 오염지수 (TDI)

동화습지의 유기물 오염지수(DAIpo)는 저습지의 경우 30.9~34.3로서 지점간에 큰 차이를 보이지 않는 반면, 고

습지는 26.8~45.7로서 지점간에 차이를 나타냈다. 특히 고습지 H3를 제외한 모든 지점에서 40 이하의 낮은 DAIPo 지수를 나타내 동화습지의 유기물 오염이 매우 심한 것으로 평가되었다(Watanabe and Asai, 1999). 한편, 영양염 오염지수(TDI)는 저습지의 경우 77.6~83.8였으며 고습지는 91.7~94.7로서 고습지의 영양지수가 매우 높은 것으로 나타났다. 결국 동화습지의 영양지수는 모든 지점에서 70 이상으로 극히 불량한 것으로 평가되었으며, DAIPo 지수가 상대적으로 낮았던 H3 역시 매우 높은 영양지수를 나타내 동화습지의 영양염 오염이 매우 심한 것으로 나타났다(Kelly and Whitton, 1998).

이상의 결과를 종합하면 동화습지의 수질은 모든 지점에서 심하게 오염되었으며, 유기물 오염지수가 다소 양호하였던 고습지 H3에서 영양염 지수는 91.8로서 매우 높았으며, 저습지에서 유기물 지수가 가장 높았던 L3(34.3)에서 영양염 지수는 77.6으로 가장 낮게 나타내 돌부착규조를 이용한 수질평가에서 두 지수간의 높은 상관성을 보인다는 선행연구들(환경부, 2007, 2008)과는 차이를 나타냈다.

4. 동화습지 부착규조의 서식환경

동화습지의 대부분을 차지하는 갈대는 수질은 물론 수중생물들의 성장에 매우 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히 갈대의 침수줄기에 서식하는 부착규조의 생장은 크게 수중생물(박테리아, 원생생물, 저서생물, 어류 등)과 환경조건(빛, 탁도, 영양물질 등)으로 구분할 수 있다. 전자는 본 연구에서는 조사되지 않아 이들이 부착규조 군집에 미치는 영향에 대해서는 알 수 없으며 추후 연구가 절대적으로 필요하다 하겠다. 후자의 경우, 먼저 유기물이 풍부하고 부유물질이 포함된 하천수가 습지로 유입될 경우, 1) 영양물질(N, P 또는 비율)에 의하여 특정 조류의 과도한 성장 유도, 2) 부유물질이 침수줄기에 부착됨으로써 조류성장 억제, 2) 고온기(여름) 동안 갈대의 왕성한 성장으로 인한 canopy의 증가로 인하여 조류의 광합성 저해(Patrick, 1948; Sudhakar et al., 1994), 갈대 식물의 Allelopathy에 의하여 조류의 선택적 성장 등 다양한 영향을 예상할 수 있다.

동화습지의 광투과율은 전체적으로 저습지보다 고습지에서 뚜렷하게 높게 나타났으며, 특히 H2, H3 지점은 강우에 상관없이 조사기간 동안 평균 40% 이상의 높은 투과율을 보여 조류 성장에 적합한 광조건을 유지하였다(Fig. 7). 한편 저습지의 경우, 특히 L2, L3는 봄부터 초 가을까지 지속적으로 매우 낮은 광투과율을 나타내 부착규조의 서식환경으로 적합하지 않은 것으로 나타났다. 한편, 수중 내

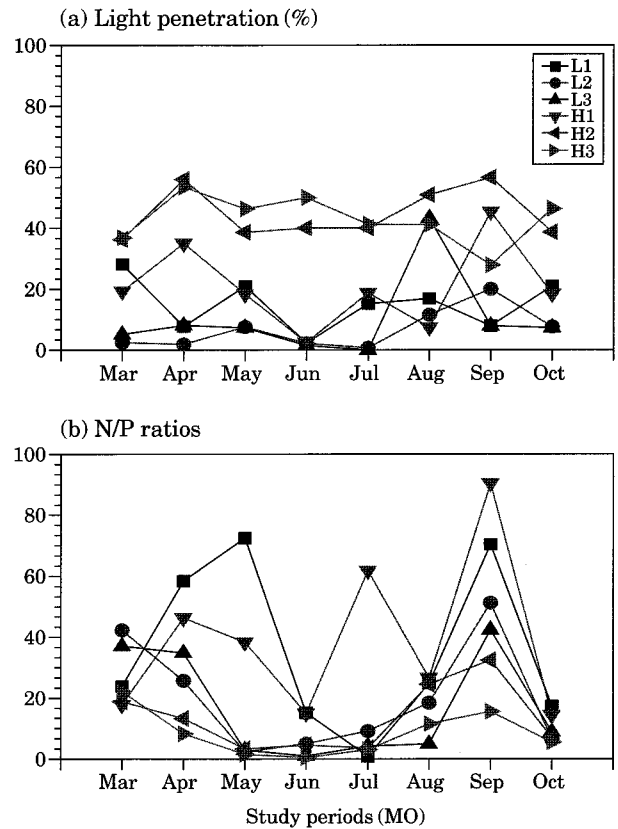


Fig. 7. Light penetrations and N/P ratios of in the Donghwa constructed wetland from March to October 2005. L1, L2 and L3; Small ponds formed in the low wetland. H1, H2 and H3; Small ponds formed in the high wetland.

N/P 비는 습지간에 큰 차이는 없었으나 하천수의 유입지점과 습지로부터 배출로 갈수록 뚜렷한 차이를 나타냈다(Fig. 7). 특히 고습지의 H2, H3는 조사시기와 지점에 상관없이 가장 낮은 수치를 보여 질소보다 상대적으로 높은 인이 함유됨을 알 수 있었다. 결국 용존인의 농도가 높은 H3에서의 높은 생물량은 앞에서 언급한 두 종이 높은 인 농도에서 활발하게 성장하는 종들임을 알 수 있었고, 이 두 지점을 제외한 대부분의 조사지점은 부영양 상태(R-ratios > 16)로 나타났다. 특히 하천수 유입지점(L1, H1)은 가장 높은 N/P 비를 나타내 습지를 통과하면서 질소는 높은 흡수를 보인 반면 인은 오히려 증가하는 현상을 나타냈다. 이러한 현상은 선행연구들과 일치되는 현상으로(Mitsch and Gosselink, 2000), 일반적으로 인공습지의 형성이 유입수의 수질개선을 유도하지만 동화습지의 경우, 크게 효과를 보이지 않는 것으로 나타나 새로운 관리방법(예, 정 등, 1999)의 개발이 요구되었다.

적 요

동화습지의 90% 이상을 차지하는 갈대의 침수줄기에 형성된 부착규조 군집 및 수질특성을 파악하고자, 결빙기를 제외한 2005년 3월부터 10월까지 유입수, 습지(고습지, 저습지), 배출구를 각각 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 1) 습지에 상관없이 높은 유기물 및 영양염 지수를 나타냈으며, 습지를 통과하면서 질소계열은 감소한 반면, 인계열은 오히려 증가하였다. 2) 부착규조는 저온기에 보다 다양하고 높은 생물량을 나타냈으며, 우점종은 습지에 관계없이 *Nitzschia palea*, *Nitzschia amphibia*였으며, 조사 시기(강우)에 따라 다양한 범위를 나타냈다. 3) 저습지보다 고습지에서 높은 현존량은 영양염과 광투과율, 그리고 낮은 canopy와 관계가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 동화습지는 풍부한 퇴적물과 갈대 쉼질로부터 유출된 영양물질(특히 인)이 특정 규조류의 성장을 촉진하였으며, 특히 갈대식물 밀도가 적어 낮은 canopy를 보였던 고습지에서 높은 현존량을 나타냈다.

사 사

본 연구는 2009년도 대전대학교 학술연구지원비에 의해 수행되었으며, 실험을 도와주신 박지연, 권용수님에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

김용재. 1999. 부착규조에 의한 포천천의 수질평가. 한국육수학회지 **32**: 135-140.
 김용재. 2001. 신천의 부착규조 군집과 유기오탁 판정. 한국육수학회지 **34**: 199-205.
 김용재. 2005. 하천수(반월천, 동화천, 삼화천)의 시화인공습지 관류에 따른 개방수에서 식물 플랑크톤 군집 동태. 한국육수학회지 **38**: 403-411.
 김용재. 2009. 시화 반월 고습지와 저습지의 갈대 부착규조 군집 구조. 한국하천호수학회지 **42**: 95-106.
 김용재, 권순국. 2004. 시화호 인공습지의 식물플랑크톤과 갈대 부착조류 군집의 동태. 한국환경농학회지 **23**: 59-67.
 김용재, 김한순. 2006. 시화인공습지 완공 초기에 갈대 부착조류 군집의 변화. 한국육수학회지 **39**: 402-412.
 서동철, 임석천, 조인성, 이병주, 이홍재, 김상돈, 이준배, 조주식, 허종수. 2009. 단일 통풍형과 이중 통풍형 인공습지시스템의 하수처리 효율 비교. 한국환경농학회지 **28**: 258-265.

수원기상대. <http://www.kma.go.kr/shfc/sfc-03-02.jsp>.
 이정호. 1998. 낙동강의 부착규조와 유기오탁지수(DAIpo). 한국육수학회지 **31**: 38-44.
 정연숙, 오현경, 노찬호, 황길순. 1999. 습지식물의 지상부 제거가 생산력과 영양염류 제거량에 미치는 효과. 환경생물 **17**: 459-465.
 최돈혁, 최광순, 김동섭, 김세원, 최동호, 황인서, 이윤경, 강 호. 2008. 시화호 인공습지에서 시공간적 수질분포 및 오염물질 제거효율 평가. 대한환경공학회지 **30**: 1013-1020.
 한국수자원공사. 2002. 시화호 인공습지 운영관리 방안 연구. 환경부. 2007. 수생태건강성 조사 및 평가.
 환경부. 2008. 수생태건강성 조사 및 평가.
 Adamus, P.R. and L.T. Stockwell. 1983. A method for wetland functional assessment: VII. 1. Critical review and evaluation concepts. US Dept. Transportation, Federal Highway Administration. Report FHWA IP: 82-83.
 APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed. American Public Health Association, Washington.
 Braakhekke, W.G. and M. Marchand. 1987. Wetlands: The community's wealth. European Environment Bureau. Brussels. 24.
 Callow, M.E. 2000. Algal biofilm, p. 189-222. In: Biofilm: Recent advances in their study and control (Evans, L.V., ed.). Harwood Academic Publ., Amsterdam.
 Caron, D.A. and J.M. Sieburth. 1981. Disruption of the primary fouling sequence on fiber glass-reinforced plastic submerged in the marine environment. Appl. Environ. Microbiol. **41**: 268-273.
 Corbitt, R.A. and P.T. Bowen. 1994. Constructed wetlands for wastewater treatment, p. 221-241. In: Applied Wetlands Science and Technology (Kent, D.M., ed.). Publishers Lewis, CRC Press, Boca Raton, FL.
 Denys, L. 2004. Relation of abundance-weighted averages of diatom indicator values to measured environmental conditions in standing freshwaters. Ecological Indicators **4**: 255-275.
 Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1982. Eutrophication parameter and trophic state indices in 30 Swedish receiving lakes. Arch. Hydrobiol. **89**: 189-207.
 Ghosh, D. and S. Sen. 1987. Ecological history of Calcutta's wetland conversion. Environmental Conservation **14**: 219-226.
 Hendey, N.I. 1979. The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms. Microscopy **32**: 423-426.
 Hill, B.H., A.T. Herlihy, P.R. Kaufmann, R.J. Srevenson, F.H. McCormick and C.B. Johnson. 2003. Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. J. N. Am. Benthol. Soc. **19**: 50-67.

- Horn, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Jun, M.S., Y. Watanabe and B.C. Kim. 1998. The effects of dilution rate and temperature on phytoplankton growth in stream water. *Korean Journal of Limnology* **31**: 328-336.
- Kadlec, R.H. and R.L. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Kelly, M.G. and B.A. Whitton. 1998. Biological monitoring of eutrophication in rivers. *Hydrobiol.* **384**: 55-67.
- Kelly, M.G., C. Adams, A.C. Graves, J. Jamieson, J. Krokowski, E.B. Lycett, J. Murray-Bligh, S. Pritchard and C. Wilkins. 2001. *The trophic diatom index: a user's manual*. (Revised ed.). R & D Technical Report E2/TR2.
- Meenakumari, B. and N.B. Nair. 1994. The effects of slime film on barnacle settlement, p. 3-9. *In: Recent Developments in Biofouling Control* (Thomson, M.F., R. Nagabhushnam, R. Sarojini and M. Fingerma, eds.). Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.
- Mittsch, W.J. and J.G. Gosselink. 2000. *Wetlands*. 3rd ed. Wiley, New York.
- Patrick, R. 1948. Factors affecting the distribution of diatoms. *Bot. Rev.* **14**: 473-524.
- Phiri, C., J. Day, M. Chimbari and E. Dhlomo. 2007. Epiphytic diatoms associated with a submerged macrophyte, *Vallisneria aethiopica*, in the shallow marginal areas of Sanyati Basin (Lake Kariba): a preliminary assessment of their use as biomonitoring tools. *Aquat. Ecol.* **41**: 169-181.
- Poulicova, A., M. Duchoslaw and M. Dokulil. 2004. Littoral diatom assemblages as bioindicators of lake trophic status: a case study from perialpine lakes in Austria. *Eur. J. Phycol.* **99**: 143-152.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. *The Mathematical theory of communication*. Illinois Univ. Press, Urbana.
- Shimpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 1-688.
- Sondergaard, M. and H.H. Schierup. 1982. Dissolved organic carbon during a spring diatom bloom in Lake Mosso, Denmark. *Water Res.* **16**:815-821.
- Sudhakar, G., B. Jyothi and V. Venkateswarlu. 1994. Role of diatoms as indicators of pollution gradients. *Envir. Monit. Assess.* **33**: 85-99.
- Vollenweider, R.A. 1979. Das Nährstoffbelastungskonzept als Grundlag für den externen Eingriff in den Eutrophierungsprozess stehender Gewässer und Talsperren. *Z. Wasseru. Abwasser-Forschung.* **12**: 46-56.
- Watanabe, T. and K. Asai. 1990. Numerical simulation using diatoms assemblage of organic pollution in stream and lakes. *Rev. Inq. Res.* **52**: 99-139.
- Watanabe, T., T. Ohtsuka, A. Tuji and A. Houki. 2005. *Picture book and ecology of the freshwater diatoms*. Uchidarokakuho, Tokyo.
- Yamamoto, M., H. Murai, A. Takeda, S. Okunishi and H. Morasaki. 2005. Bacterial flora of the biofilm formed on the submerged surface of the reed *Phragmites australis*. *Microb. Environ.* **20**: 14-24.

(Manuscript received 22 January 2010,
Revision accepted 3 March 2010)