

부착돌말영양지수(TDI)를 활용한 습지환경 평가^{1a}

김성기² · 최종윤^{3*}

Wetland Habitat Assessment Utilizing TDI(Trophic Diatom Index)^{1a}

Seong-Ki Kim², Jong-Yun Choi^{3*}

요약

낙동강에 위치한 신규조성 습지의 현황 파악 및 관리 방안 마련을 위한 기초연구의 일환으로 부착규조류의 서식현황과 종다양성을 분석하고 부착돌말영양지수(TDI, Trophic Diatom Index)의 적용가능성을 평가하였다. 조사 기간 동안, 부착규조류는 총 38과 173종이 출현하였으며, 봄과 가을에 각각 156종, 154종으로 비슷한 종수를 나타냈다. 자기조직화지도(SOM)를 활용한 분석 결과, 부착규조류의 분포는 각 습지의 영양염류의 농도와 강우 등의 환경요인에 따라 영향 받는 것으로 나타났다. 클러스터 1의 경우, 대부분 가을시기이며, 총인과 총질소 등의 영양염류의 농도와 부착규조류의 종수 및 풍부도가 낮음에도 불구하고, 부착돌말영양지수가 높은 지점들로 구성되었다. 이와 반대로, 클러스터 4는 봄시기의 지점들이며, 총질소가 높음에도 불구하고 부착돌말영양지수가 낮은 특징을 보였다. 신규조성 습지 대부분이 유입·유출구 기능이 원활하지 않은 점을 감안하면, 여름철에 증가된 유량은 가을철에 영양염류 값을 감소시키며, 탁도 증가로 인해 빛의 유입이 원활하지 않아 부착규조류의 종수와 풍부도가 낮아진다. 이와 반대로, 봄철에는 낮은 수위로 인해 부착규조류가 부착할 수 있는 기질표면이 부족하며, 호오탁성 종이 정착 및 발달하기에 이른 시기이기 때문에 부착돌말영양지수 값이 낮게 측정된다. 다양한 기존 연구에서, 부착돌말영양지수를 서식환경 및 수질 평가지표로 활용하고 있으나, 본 습지는 흐름이 적고 정체수역에 가깝기 때문에 대부분 영양염류 농도가 높아 부착돌말영양지수의 평가지표 가치성은 낮은 것으로 판단된다. 여름강우나 유입·유출 조절부의 기능이 부착규조류의 종다양성과 분포에 영향을 미치는 점을 종합적으로 감안한 지속적인 추가 조사가 필요하다.

주요어 : Self-Organizing Map, 영양염류, 강우량, 대체습지, 습지관리방안

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze the habitat status and species diversity of benthic diatoms and estimate the applicability of TDI (Trophic Diatom Index) to obtain the basic data for the identification and management of created wetlands in the Nakdong River. We observed a total of 38 families and 173 species of benthic diatom during the survey period, and spring and autumn showed a similar number of species of 156 and 154, respectively. The result of the SOM (Self-Organizing Map) analysis showed that the distribution of benthic diatom was sensitive to environmental factors such as nutrient concentration and rainfall in each wetland. The cluster 1 was

1 접수 2019년 4월 18일, 수정(1차: 2019년 9월 2일), 게재확정 2019년 9월 4일

Received 18 April 2019; Revised(1st: 2 September 2019); Accepted 4 September 2019

2 국립생태원 생태평가연구실 연구원, Researcher of Division of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 33657, Korea

3 국립생태원 생태평가연구실 전임연구원, Associate researcher of Division of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 33657, Korea

a 이 논문은 국립생태원 ‘낙동강 중·하류지역 생태공간 조사·평가’ 사업에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: jyc311@naver.com

characterized by the survey sites of autumn mostly and consisted of points of high TDI, although the nutrients such as total phosphorus and total nitrogen were low, and the species number and abundance of diatoms were low. Conversely, cluster 4 was characterized by the survey sites of spring mostly and consisted of points of low TDI, even though total nitrogen was high. Considering that most of the created wetlands had the reduced inflow and outflow, the increased flow rate in the summer lowers nutrient values in autumn, and the species number and abundance of benthic diatom decreases due to the increase of turbidity, which reduces the light penetrations to the substrates. On the contrary, the TDI value is low in spring because the low water level causes insufficient substrate surface to the benthic diatoms, and it is too early for the establishment and development of saprophilous species. Although various studies have used TDI as an indicator for evaluating the habitat environment and water quality, it is not a good evaluation indicator in this study since the nutrient concentration in the wetlands mostly high as they have a low flow rate and are close to the stagnant area. Nevertheless, additional periodic surveys that comprehensively reflect the fact that the summer rainfall and inflow/outflow regulating function might affect the species diversity and distribution of benthic diatoms are necessary.

KEY WORDS: SELF-ORGANIZING MAP, NUTRIENT, RAINFALL, REPLACEMENT WETLAND, WETLAND MANAGEMENT

서론

습지는 면적당 생물다양성이 높은 생태계 중 하나이며 (Sutton-Grier and Megonigal, 2011; Zhu *et al.*, 2011), 수생 식물이나 관목 등이 복잡하게 구성되어 서식처 복잡성이 높기 때문에 생물 서식에 유리하다. 수생식물은 미소갑각류나 어류 등의 수서생물에게 적절한 서식처로서 활용될 뿐만 아니라, 포식자를 회피하기 위한 피난처를 제공한다(Muzzaffar and Ahmed, 2007). 수생식물의 종다양성이 높고, 생물량이 풍부한 지역에서는 수중 내 공간이 복잡하게 구성되므로, 포식자를 회피하기 적당하다(Jones *et al.*, 1999). 어류와 같은 포식자는 수생식물이 복잡하게 구성된 지역 내에서는 포식활동이 제한되기 때문에, 미소갑각류 등의 피식자의 생존과 개체군 증식에 기여할 수 있다. 또한 습지의 이탄층은 토양 사이의 간격이 넓어 많은 물을 머금을 수 있어 홍수 등의 방지에 도움을 주며, 습지식물은 마을오폐수나 오염물질 정화에 큰 효과를 가진다. 이러한 습지의 중요성으로 인해, 현재 160개국 이 국제습지협약(Ramsar Convention on Wetlands)에 가입하여, 전 세계적으로 산포된 2018개의 습지를 보호·관리하고 있다. 그러나 기후변화로 인한 서식환경의 변화로 외래종의 침입이나 경제상황의 변동 등 여전히 습지의 서식처와 생물다양성은 지속적으로 위협받고 있는 상황이다.

2008년부터 시작된 ‘4대강 살리기’ 사업의 일환으로, 낙동강을 포함한 금강, 영산강, 한강 등에서 대대적인 하천정비가 진행되었으며, 이와 함께 둔치에 위치한 많은 습지가 훼손 또는 소멸되었다. 그러나 생물서식처로서 습지의 중요성이 인식되

면서, 기존의 습지를 정비하거나, 농경지였던 부분을 새로 조성하여 둔치정비로 훼손 또는 소멸된 습지 면적만큼 대체습지를 조성하기에 이른다. 그러나 조성 이후 지금까지 이들 신규조성 습지에 대한 조사나 연구 등이 부족하여 자세한 정보 파악이 어려우며, 유지 또는 관리 주체가 모호하여 훼손 또는 교란에 지속적으로 위협받고 있다. 신규조성 습지에 관한 연구는 하중도, 모래톱 등의 지형 변화에 대한 내용이나(Im *et al.*, 2015), HGM을 이용한 대체습지의 기능 평가 등(Kim *et al.*, 2017)의 연구가 수행되었지만, 생물 서식 현황이나 환경 변화에 대한 조사 및 평가가 전체적으로 미흡하여, 습지의 관리나 보전 방안 수립이 어려운 상황이다. 따라서, 이들 습지에 대한 생물상 및 수변환경에 대한 평가가 시급하며, 이를 기반으로 한 습지의 지속적인 유지 및 관리 체계 마련이 필요하다.

일반적으로, 한 지역 내 생물상의 분포나 서식 특성은 그 수계 전반의 서식 환경을 대표할 수 있기 때문에 생물종 서식에 대한 특이성을 활용하여 수생태계 환경의 대표성을 평가하고 있다(Kim *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015). 생물상 서식을 이용한 환경 평가는 서식환경 변화에 적응하여 서식하는 지표생물군의 분석에 근거하여 수환경에 대해 종합적인 영향을 파악할 수 있다(NIER, 2011). 수환경 평가에 이용되는 생물은 부착규조류부터 어류까지 범위가 매우 다양하며, 이중 부착규조류의 경우 크기가 작고 풍부하기 때문에 수질 등 환경 변화에 민감한 반응 때문에 수환경의 변화를 평가하기에 적합한 것으로 알려져 있다(Watanabe *et al.*, 1990; Peszek *et al.*, 2015). 또한 부착규조류는 생활사가 상대적으로 짧고 많은 개체를 쉽게 얻을 수 있기 때문에 영국이나 일본 등에서도

생물학적 수질평가에 자주 이용되고 있는 분류군이다(NIER, 2006). 부착규조류는 종에 따라 총인(T-N)이나 총질소(T-P) 등의 영양염류가 풍부한 부영양화된 환경을 선호하는 종(*Cyclotella meneghiniana*, *Fragilaria construens* f. *venter*, *Navicula minima*)도 있으며, 반대로 오염이 적은 빈영양 상태를 선호하는 종(*Achnanthes minutissima*, *Asterionella formosa*, *Cocconeis placentula*)도 있다(Watanabe 1986). 이들은 어류나 무척추동물처럼 서식처를 선택할 수 있는 분류군이 아니기 때문에 물의 특성 변화에 따라 개체뿐만 아니라 종다양성의 변화가 뚜렷하므로 상대적으로 쉽게 수질 등 환경변화를 모니터링 할 수 있다(Watanabe *et al.*, 1990; McCormick and Stevenson, 1998). 기존 연구들은 부착규조류의 이러한 서식특성을 기반으로 수질 오염이나 부영양화를 감지할 수 있는 지표종(indicator species)으로서 적용가능성을 연구하기도 하였다(Munn *et al.* 2002).

부착규조류를 이용한 평가 방법 중, 부착돌말영양지수(TDI, Trophic Diatom Index)는 오염도에 따라 종 분류가 세분화되어 있어서 신뢰도가 높고 수질 등급을 구분하는데 유리하다(Kelly and Whitton, 1995). 이는 DAIPo 보다 넓은 영양염구배를 가진 환경에서의 적용이 용이하기 때문에, 최근에는 부착돌말영양지수(TDI, Trophic Diatom Index, Kelly and Whitton, 1995)를 적극 활용하고 있다(Wu, 1999; Delgado *et al.*, 2010). 또한, 국내에서도 환경부의 '수생태계 건강성 조사 및 평가'에서 부착규조류를 활용한 TDI로 하천건강성을 평가하고 있으며(NIER, 2010; NIER, 2011), 그 외에 강 분류(Lee, 1998; Park *et al.*, 2004) 및 지천(Park *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2017) 등에서도 적용하고 있다. 그러나 대부분 하천이나 강과 같은 유수환경에서 적용하고 있으며(Kelly and Whitton, 1995; Kelly, 1988, Atazadeh *et al.*, 2007), 습지와 같은 정수환경에서의 적용은 매우 제한적이다. 특히, 신규조성 습지는 조성 이후 습지 현황이나 제원에 대한 정보가 거의 없으며, 어떠한 가치를 가지는지 전무한 상황에서 TDI를 활용한 수질이나 서식환경에 대한 평가는 향후 습지의 보전이나 가치 등을 평가하기 위한 기초자료로서 그 의미가 크다.

본 연구에서는 습지의 현황 파악 및 관리 방안 마련을 위한 기초자료 확보로서, 낙동강의 신규조성 습지에서 부착규조류의 군집 현황을 파악하고, TDI의 적용을 통해 습지의 환경 특성을 평가하였다. 낙동강 둔치에 위치한 신규조성 습지는 조성 이후 지속적인 토사 퇴적이나 습지 내 또는 주변에 미약한 식생 정착으로 나대지 발생 및 이로 인한 침식 발생 등으로 점차 변화하고 있는 실정이다. 따라서 환경변화에 민감하고 습지의 건강성을 평가하는 지표생물인 부착규조류의 분포나 종다양성 파악은 향후 신규조성 습지의 보전 및 관리방안 마련에 기여할 것으로 보인다.

연구방법

1. 조사지점 현황

낙동강은 한반도의 남동부에 위치하고 있으며, 태백에서 부산까지 유로 구간으로 약 526km의 길이를 가진다. 국내에서 가장 큰 유역면적을 가진 강이지만(유역면적, 23,817km²), 본류와 지류에 설치한 다목적댐(안동, 임하, 합천, 남강, 영천, 밀양, 운문댐 등)과 하구둑으로 물의 흐름이 인위적으로 조절되는 특성을 가진다(Ha *et al.*, 1998). 또한 2012년에 완공된 8개의 보(상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 달성보, 합천창녕보, 창녕합안보)로 인해 수심 및 하폭이 증가하면서 조절강의 성격이 더욱 강해져, 거의 정체된 수역을 가진다. 상류지역부터 집약적인 토지이용과 수자원의 적극적인 이용에 의해 낙동강 중-하류부는 상당히 부영양화된 상태를 가지며, 여름철 남조류와 겨울철 규조류의 대번성이 매년 관찰되고 있다(Ha *et al.*, 1999; Byun *et al.*, 2015).

2008년부터 2012년까지 진행된 하천정비 사업으로 낙동강 둔치는 재정비되었으며, 이 과정에서 다양한 형태의 습지가 사라지거나 훼손되었지만, 소실된 면적 대비 대체습지가 조성되었다. 낙동강 유역에 신규 조성된 습지는 총 49개로, 이는 한강(22개), 금강(32개), 영산강(44개)보다 많은 수이다. 본 연구에서는 총 49개 습지 중 건천화되거나 수량이 부족한 지점을 제외한 33개 습지를 대상으로 환경요인의 측정 및 부착규조류 채집을 수행하였다(Figure 1.).

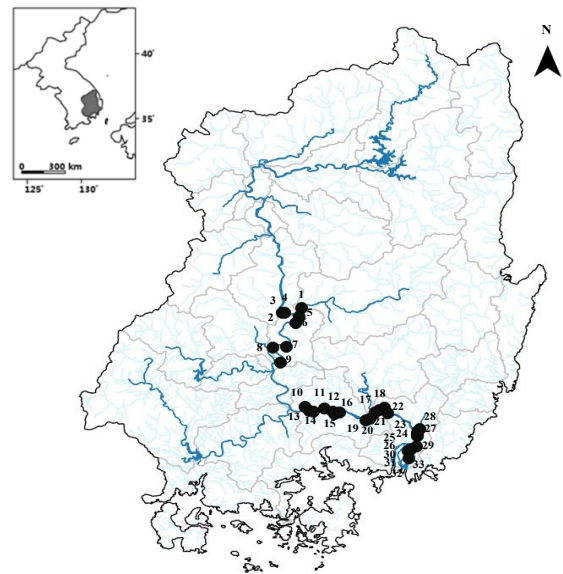


Figure 1. Map of study sites located at Nakdong River basin. The sites indicated by circle(●). The small map in the upper left corner indicates the Korean Peninsula.

2. 조사방법 및 분석

1) 환경요인 분석

낙동강 유역에 위치한 33개의 습지에서 봄과 가을철에 환경요인의 측정과 부착규조류 채집을 수행하였다. 우리나라를 포함한 동아시아 지역은 몬순기후의 영향으로 여름철에 강우가 집중되는 경향을 보이기 때문에(Jeong *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2002), 여름은 생물상 조사를 위한 시기로 적절하지 않다. 습지는 수심과 저질 유형이 다양하고, 봄부터 성장하기 시작한 수생식물의 천이에 따라 서식처 구조나 이질성이 지역에 따라 상이한 특징을 가진다(Van Donk and van de Bund, 2002; Choi *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2016). 따라서 본 연구에서는 습지의 서식처 이질성을 고려하여 1~3지점을 선정하여 조사를 수행하였다. 각 습지에서 조사 지점의 선정은 습지 면적에 따라 결정하였다.

환경요인 중 이화학적 요인의 측정 항목은 수온, 용존산소, 전기전도도, pH, 탁도, 총질소, 총인, BOD(Biochemical oxygen demand) 및 엽록소a(Chlorophyll a) 등 9개로, 수온과 용존산소, 전기전도도, pH는 현장에서 즉시 측정하였으며, 다른 항목은 원수를 실험실로 운반하여 측정하였다. 수온과 용존산소는 DO meter(YSI DO; Model 58)를 이용하여 측정하였으며, pH와 전기전도도는 각각 pH 측정기(Orion pH Meter; Model 58)와 전기전도도 측정기(Fisher Conductivity meter; Model 152)를 이용하였다. 탁도는 탁도측정기(Model 1000IR, EUTECH)를 이용하여 측정하였으며, 총질소, 총인, BOD(Biochemical oxygen demand) 및 엽록소a(Chlorophyll a) 항목은 수질오염공정시험기준(NIER, 2010)에 따라 진행하였다. 이 외에 낙동강 유역의 강우량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 자료를 이용하였다.

2) 서식생물상 조사 방법

부착규조류 채집을 위해 각 조사지점의 수심 50 cm 이하에서 부착규조류가 안정적으로 착생할만한 기질 유형(자갈, 식물, 인공기질 등)을 선정하였다. 기질 선정 시 빛이 상대적으로 적은 그늘이나, 오염된 구간은 제외하였다. 최대한 다양한 유형의 기질을 대상으로 하였으며, 조사지점 당 100 cm²의 기질 면적을 증류수와 함께 nylon 재질의 솔로 굵어 조심스럽게 채집하였다. 채집된 부착규조류는 메스실린더에 모은 후, 증류수로 희석하여 100mL로 맞춘 후 채집병에 담고 루골용액 5%로 고정하였다. 고정한 시료는 실험실로 가져와 산처리 후 SR(Sedgwick-rafter) counting chamber를 이용하여 현미경으로 200 ~ 400배로 확대하여 동정 및 계수하였다. 구해진 값을 이용하여 부착돌말영양지수인 TDI(Trophic Diatom Index)는 Kelly and Whitton (1995)에 나오는 계수한 결과로 나타나는 각 종에 대한 현존량과 각각의 종에 대해 주어진 민감

도와 지표가중치를 주어진 계산식을 이용하여 산출하였다. 단, Kelly and Whitton (1995)이 제시한 민감도(Sensitivity)와 지표가중치(Indicator value)는 국내 실정에 맞게 수정한 값을 이용하였다(NIER, 2010). TDI의 범위는 0 ~ 100까지 나타나며 0이 가장 청정한 상태이고 100이 가장 오염된 상태를 의미한다. 산출된 값은 4등급(A: 최적, B: 양호, C: 보통, D: 악화)으로 나누었으며, 등급을 나누는 기준은 환경부의 기준을 따랐다(Table 1). 값을 구하는 식은 다음과 같다.

Table 1. The grades and health criteria of TDI(Trophic Diatom Index).

Grade	Health criteria	TDI
A	Very good	0 ~ 40
B	Good	40 ~ 55
C	Fair	55 ~ 70
D	Poor	70 ~ 100

$$TDI = (WMS \times 25) - 25$$

WMS : weighted mean sensitivity

$$WMS = \frac{\sum A_j \cdot S_j \cdot V_j}{\sum A_j \cdot V_j}$$

A_j : j종의 개체수

S_j : j종의 오염민감도(Pollution sensitivity, 1 ≤ S ≤ 5)

V_j : j종의 지표가중치(Indicator value, 1 ≤ V ≤ 3)

3) 자기조직화지도(Self-Organizing Map) 분석

부착규조류의 개체수 및 종수와 조사 대상 습지의 환경적 특성 간의 관계는 비선형 생태모형 기법 중 하나인 자기조직화지도(Self-Organizing Map, SOM) 알고리즘을 이용하여 패턴 분석을 실시하였다. 본 연구에서 SOM 모형의 입력 변수로 현장조사를 통해 확보된 조사지점의 환경 요인(용존산소, BOD, 전기전도도, 탁도, 엽록소a, 총질소, 총인, 하상(자갈, 모래, 식물)과 부착규조류의 개체수와 종수, TDI 값을 분석에 활용하였다. 최적의 SOM 구조는 다양한 구조의 SOM 모형을 구축한 뒤 두 에러(quantization error, topographic error)항이 가장 낮은 구조를 선택하였다. 조사지점을 클러스터링하기 위해서 U-matrix를 이용하였으며, SOM 모형을 구성하는 각각의 node들 간의 유사도를 확인하여 가장 적합한 클러스터를 추출하였다. SOM모형 구축과 데이터 분석은 Matlab 6.1을 기반으로 이루어졌으며, SOM 모형 구축에 관련된 여러 가지 함수와 기능들은 Matlab 환경에서 구동되는 SOM_PAK(Kohonen *et al.*, 1996) 툴박스를 활용하였다. 구분된 클러스터내의 항목을 평균하여 클러스터간의 차이를 확인하기 위해 SPSS(ver. 18)의 One-way ANOVA를 이용하였다.

결과

1. 낙동강 신규조성 습지의 환경요인

조사기간 동안, 각 습지에서 측정된 환경요인의 값은 지점과 시기에 따라 상이하였다(Table 2). 용존산소(DO)의 경우, 봄철에는 3.9~12.1 mg/L, 가을철에는 2.1~11 mg/L의 범위를 보였으며, 봄에는 하중도복원 습지(5번), 양산지구 습지(28번), 가을에는 서재지구 습지(1번), 탄섬 대체습지(21번) 등의 습지에서 가장 높았다. 생물학적 산소요구량(BOD)은 봄철 1.0~9.6 mg/L, 가을철 1.2~9.5 mg/L의 범위로 두 계절간 비슷했다. 본 연구에서 생물학적 산소요구량이 높은 습지는 달성구하도복원 습지(5번), 서재지구 습지(1번), 현풍수달 습지(8번)이며, 이들 습지에서는 영양염류인 총인이나 총질소 등의 값이 다소 높았다. 전기전도도 값은 봄철에 69~1,332 μ S/cm의 범위였으나, 가을철에 44~898 μ S/cm로, 가을철이 봄철보다 감소되었다. 일반적으로, 전기전도도 값은 강 중·하류부에서 300~1,000 μ S/cm의 범위를 가지는 점을 감안하면, 본 연구에서의 봄철 전기전도도 값은 일반적인

수준인 것으로 파악된다. 탁도는 봄에 1.1~19.0 NTU, 가을에 1.0~21.2 NTU의 범위를 보여 봄철과 가을철의 차이는 적은 것으로 나타났다. 봄철에는 김해지구II-2 습지(26번), 밀양1-1 습지(18번) 등이 높은 값을 보였으며, 가을철에는 김해지구II-1 습지(25번), 달성구하도복원 습지(5번) 등이 높은 값을 보였다. 엽록소a는 봄철에 0.0 ~ 2.9 μ g/L의 범위를 보였으며, 가을철에 0.0 ~ 23.5 μ g/L의 범위를 보였다. 봄철에는 달성구하도복원 습지(5번)와 삼락대체 습지(33번) 등이 높은 값을 보였으며, 가을철에는 달성구하도복원 습지(5번)와 탄섬대체 습지(21번) 등이 높은 값을 보였다. 총질소는 봄철에 1.132~8.069 mg/L의 범위를 가지며 가을철에는 0.640~5.934 mg/L로 봄철과 가을철 모두 높은 편으로 나타났다. 봄철에는 서재지구 습지(1번), 운정천 습지(11번) 등이 높은 값을 보였으며, 가을철에는 달성구하도복원 습지(5번), 차천 습지(7번) 등이 높은 값을 보였다. 총인은 봄철에는 0.016~0.680 mg/L, 가을철에는 0.027~1.019 mg/L으로 봄철에 낮은 경향을 보인다. 봄철에는 서재지구습지(1번), 하빈습지(2번) 등이 높게 측정되었으며, 가을철에는 수달의 숲(3번)과 달성구하도복원 습지(5번) 등이 높은 값을 보였다.

Table 2. Environmental parameters measured at study sites. DO, Dissolved oxygen; EC, Conductivity; Tur, Turbidity; Chl.a, Chlorophyll a ; T-N, Total nitrogen; T-P, Total phosphorus. 2, 8, 9 sites on autumn was dry state

No.	Sites	Season	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	EC (μ S/cm)	Tur. (NTU)	Chl.a (μ g/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
1	Seojaejigu	Spring	7.0	6.8	704	3.1	0.2	8.069	0.680
		Fall	9.9	3.7	527	1.4	0.4	2.685	0.132
2	Habin	Spring	3.9	3.6	312	8.7	0.7	1.722	0.218
		Fall	-	-	-	-	-	-	-
3	Sudal sup	Spring	4	3.9	656	2.5	0.1	4.098	0.130
		Fall	4.7	2.5	636	1.6	0.4	2.968	0.293
4	Habinseubjiwon	Spring	7.3	1.6	433	2.0	0.1	1.555	0.025
		Fall	4.8	2.9	446	2.1	1.5	2.191	0.138
5	Dalseongguhado	Spring	9.9	9.6	707	6.5	2.9	4.048	0.111
		Fall	9.2	9.5	732	13.4	23.5	5.934	1.019
6	Galdaejeonghwa	Spring	6.5	5.9	445	3.5	0.7	3.126	0.082
		Fall	4.4	5.8	369	6.1	5.6	4.513	0.08
7	Chacheon	Spring	7.6	3.0	1332	6.7	0.2	4.754	0.036
		Fall	6.1	2.6	898	3.2	0.3	4.837	0.038
8	Hyunpungsudal	Spring	10.1	8.8	475	6.9	1.4	2.577	0.103
		Fall	-	-	-	-	-	-	-
9	Gujiseubjiwon	Spring	5.9	3.5	560	4.2	0.4	1.132	0.089
		Fall	-	-	-	-	-	-	-
10	Byeoksowon	Spring	6.9	2.7	439	4.0	0.3	3.707	0.065
		Fall	8.3	3.3	319	6.2	3.0	1.830	0.060

Table 2. continued

No.	Sites	Season	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	EC (μ S/cm)	Tur. (NTU)	Chl.a (μ g/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
11	Unjeongcheon	Spring	6.1	1.5	359	4.0	0.0	5.153	0.104
		Fall	6.1	2.5	283	3.6	2.0	2.286	0.133
12	Hajungdo	Spring	12.1	4.7	370	13.1	0.9	2.029	0.096
		Fall	4.2	3.0	279	8.9	1.9	1.447	0.105
13	Cheonghwawon	Spring	8.9	5.8	470	4.9	0.7	1.971	0.038
		Fall	5.7	3.3	247	4.0	1.5	0.640	0.077
14	Cheongyudo	Spring	8.2	2.3	376	2.8	0.2	2.777	0.024
		Fall	4.5	1.7	243	4.6	3.0	0.921	0.034
15	Dorae	Spring	7.8	3.0	439	1.1	0.1	1.589	0.031
		Fall	3.3	3.5	297	5.1	3.6	3.998	0.269
16	Saenarae	Spring	9.3	2.3	256	1.5	0.2	2.062	0.025
		Fall	4.9	2.6	209	2.9	2.9	1.339	0.035
17	Miryang1	Spring	7.8	4.4	362	5.1	0.5	2.403	0.071
		Fall	2.8	3.5	219	4.1	1.0	1.655	0.075
18	Miryang1-1	Spring	7.1	2.1	350	14.3	0.7	1.373	0.042
		Fall	3.6	1.4	185	7.8	0.0	0.982	0.072
19	Hanlim1	Spring	10.0	2.3	478	4.3	0.3	1.738	0.036
		Fall	4.8	3.2	219	2.2	1.4	1.638	0.054
20	Hanlim2	Spring	7.0	1.7	455	4.8	0.6	1.921	0.032
		Fall	6.9	1.2	194	4.1	1.6	2.303	0.028
21	Ttanseom	Spring	7.4	1.0	492	1.2	0.2	2.876	0.016
		Fall	11	2.8	199	9.5	9.3	1.929	0.138
22	Doyo	Spring	10.1	3.2	409	11.4	0.8	2.370	0.112
		Fall	2.1	2.8	187	1.2	0.4	1.206	0.057
23	GimhaejiguI-1	Spring	7.8	2.7	366	3.0	0.2	1.481	0.069
		Fall	2.4	2.6	278	1.0	2.3	0.721	0.168
27	GimhaejiguI-2	Spring	10.1	3.1	425	1.9	1.4	2.203	0.118
		Fall	2.4	2.6	278	1.0	2.3	0.721	0.168
25	GimhaejiguII-1	Spring	7.7	2.3	69	9.9	1.0	1.481	0.040
		Fall	7.0	5.5	143	21.2	4.0	1.323	0.097
26	GimhaejiguII-2	Spring	8.4	2.7	307	19	0.9	1.663	0.061
		Fall	4.7	1.8	44	1.9	0.7	0.866	0.044
27	HoesanIII	Spring	9.3	4.1	458	10.3	0.5	2.278	0.081
		Fall	3.8	2.7	261	3.3	1.7	1.638	0.117
28	Yangsanjigu	Spring	10.6	1.7	330	8.5	0.2	1.838	0.026
		Fall	4.3	1.8	332	3.6	1.1	1.198	0.049
29	Hwamyong2jigu	Spring	6.3	5.7	471	11.3	0.9	2.245	0.082
		Fall	3.0	3.5	215	3.7	1.0	1.597	0.097

Table 2. continued

No.	Sites	Season	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tur. (NTU)	Chl.a ($\mu\text{g}/\text{L}$)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
30	Sinduk1-1	Spring	6.2	2.3	414	3.3	1.1	2.802	0.046
		Fall	4.3	2.0	199	1.8	0.7	1.572	0.027
31	Sinduk1-2	Spring	5.5	2.2	491	5.1	0.4	2.029	0.076
		Fall	8.9	3.0	221	1.8	0.6	1.073	0.148
32	Sinduk1-3	Spring	6.4	2.3	406	4.5	0.8	2.619	0.031
		Fall	2.8	1.8	214	1.4	0.1	1.314	0.122
33	Samlak	Spring	6.1	4.4	627	3.8	2.2	2.104	0.095
		Fall	5.0	2.6	214	4.4	1.7	1.265	0.121

2. 부착규조류 군집 분포 및 부착돌말영양지수(TDI)

조사기간 동안, 낙동강 신규조성 습지에서 조사된 부착규조류는 총 38과 173종, 평균 $319,479 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 이 출현하였다. *Navicula*속은 조사대상 습지에서 가장 높은 비율(약 20%)로 출현하였으며, 그 다음으로 *Aulacoseira*속(약 19%), *Fragilaria*속(약 16%) 등이 높은 빈도로 관찰되었다. *Navicula*속에 속하는 종은 *Navicula confervacea*, *Navicula confervacea* 등이었으며, 이들은 낙동강 신규조성습지에서 풍부한 것으로 나타났다. 부착규조류는 *Aulacoseira ambigua*로 총 $2,538,781 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 이 가장 우점하였으며, 그 다음으로는 *Navicula confervacea*가 $2,101,782 \text{ cells}/\text{cm}^2$, *Fragilaria elliptica*가 $1,682,609 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 의 순으로 높았다.

부착규조류의 우점종 및 개체수 현황은 계절별로 상이하였다. 봄에는 총 35과 156종, 평균 $281,845 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 이 출현하였으며, 가을에는 35과 154종, 평균 $357,113 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 로 종수는 비슷하지만, 개체수는 봄보다 가을이 더 높았다(Figure 2.). 가을철에 가장 종다양성이 높은 습지는 양산지구 습지(28번, 61종), 차천 습지(7번, 58종), 밀양1 습지(17번, 55종) 등이었으며, 대조적으로 신덕1-3습지(32번, 13종)는 가장 낮은 종수가 관찰되었다. 봄철에는 *Melosira varians*가 $800,345 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 로 가장 우점하였으며, 그 다음으로는 *Eunotia bilunaris* ($568,650 \text{ cells}/\text{cm}^2$), *Achnanthes minutissima* ($538,886 \text{ cells}/\text{cm}^2$) 등이었다. 이 중 *Eunotia bilunaris*는 호오탁성 종(Saprophilous taxa)이며, 한림1 습지(19번), 한림2 습지(20번), 삼락대체 습지(33번) 등의 습지에서 풍부하였으며, *Achnanthes minutissima*는 호청수성 종(Saproxenous taxa)으로 청화원 습지(13번), 도요 습지(22번), 양산지구 습지(28번))에서 $100,000 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 이상으로 높았다. 가을에는 *Aulacoseira ambigua*가 $2,376,450 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 로 가장 우점하였으며, *Navicula confervacea* $1,703,550 \text{ cells}/\text{cm}^2$, *Fragilaria elliptica*가 $1,311,075 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 의 출현을 보여 봄의 부착규조류 분포와 차이를 가졌다. *Aulacoseira*

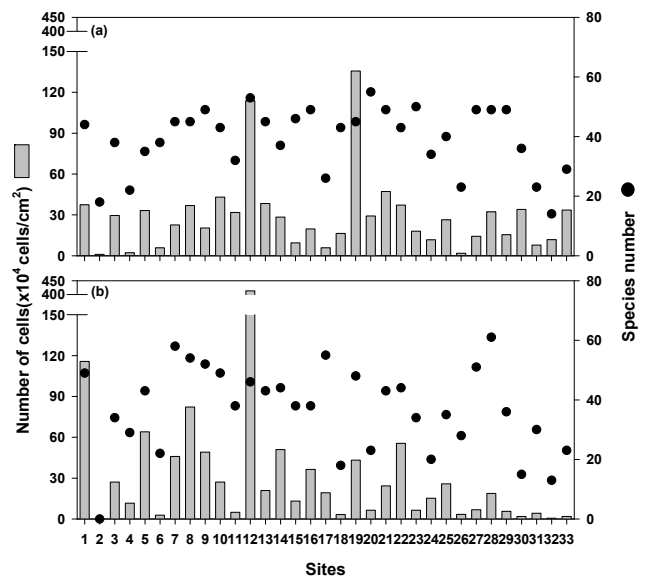


Figure 2. Cell number and species number of benthic diatom. (a) Spring(before summer rainfall), (b) Autumn(after summer rainfall).

*ambigua*와 *Navicula confervacea*는 호오탁성 종으로 하중도 복원 습지(12번), 청유도 습지(14번), 현풍수달 습지(8번) 등에서 높게 출현하였다. 부착규조류 개체수는 $5,717\sim4,131,540 \text{ cells}/\text{cm}^2$ 의 범위를 보였으며, 한림1 습지(19번), 신덕1-1 습지(30번) 등은 봄철에 가을철보다 높은 개체수를 보였으며, 서재지구 습지(1번), 하중도복원 습지(12번) 등은 가을철 개체수가 봄철 개체수 보다 높았다.

부착규조류 출현종 중, 호청수성 종과 호오탁성 종의 개체수 및 종수를 봄/가을로 계산하여 출현 비율 정도를 확인한 결과, 습지별로 계절간 차이가 확인되었다(Figure 3.). 호청수성 종은 개체수의 봄/가을 비율이 0.4~95.2이며 1이 넘는 지점은 25지점으로 나타나 대부분의 습지는 가을철보다 봄철에 종수

가 높은 것으로 나타났다(Figure 3a.). 삼락대체 습지(33번)가 호청수성 중 개체수의 봄/가을 비율이 95.2로 봄과 가을의 개체 수 차이가 가장 크며, 밀양1-1 습지(18번)가 66.4로 그 다음으로 큰 차이를 보였다. 이들 중의 봄/가을 비율이 1보다 작은 습지는 서재지구 습지(1번), 하빈 습지(4번), 달성구하도복원 습지(5번), 구지 습지(9번)가 0.4로 나타났으며, 총 6지점으로 확인되었다. 호청수성 중의 수 또한, 봄/가을 비율이 0.3~5.3이며 1이 넘는 지점이 21지점으로 나타나 대부분의 지

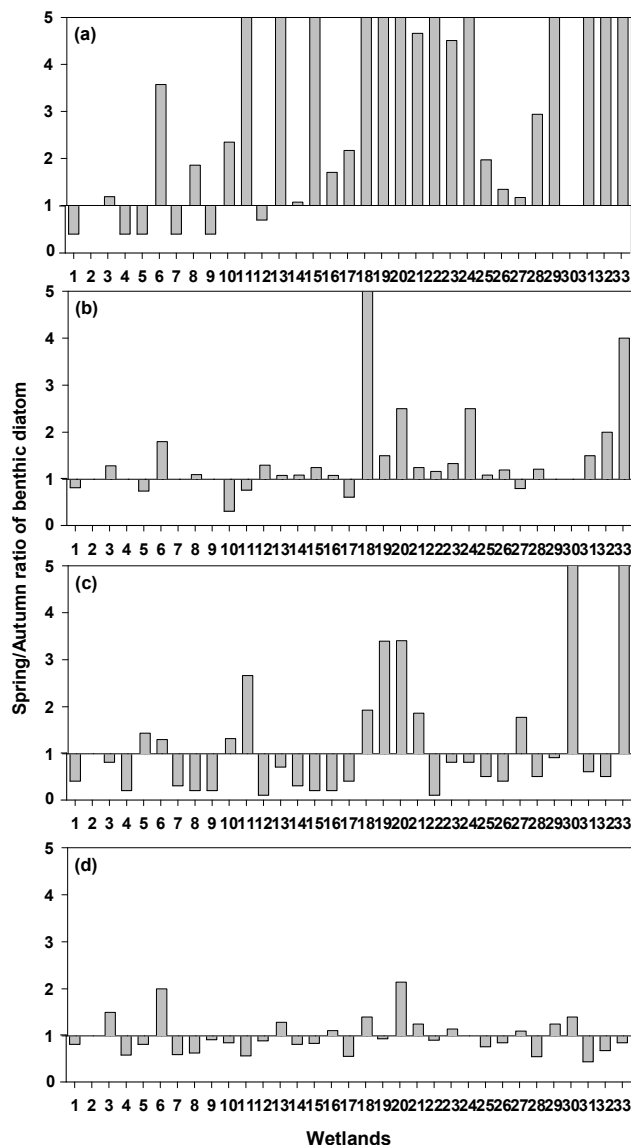


Figure 3. Ratio of spring/autumn of benthic diatom. (a) cell number of saproxenous taxa, (b) species number of saproxenous taxa, (c) cell number of saprophilous taxa, (d) species number of saprophilous taxa.

점에서 가을철보다 봄철에 종수가 높았다. 밀양1-1 습지(18번)가 호청수성 중 종수의 봄/가을 비율이 5.3으로 가장 큰 차이를 보였으며, 한림2 습지(20번)가 2.5로 그 다음으로 큰 차이를 보였다. 이들 중의 봄/가을 비율이 1보다 작은 지점은 벽소원 습지(10번)가 0.3, 밀양1 습지(17번)가 0.6으로 나타났으며, 총 6지점으로 확인되었다.

이와 다르게, 호오탁성 종은 봄보다 가을철에 높은 개체수가 관찰되었다(Figure 3c.). 호오탁성 종의 개체수는 봄/가을 비율이 0.1~19.8로, 1이 넘는 지점은 33개 중 11지점에 불과하였다. 신덕1-1 습지(30번)가 19.8로 봄과 가을간의 호오탁성 개체수의 가장 차이가 크며, 삼락대체 습지(33번)가 13.7로 그 다음으로 나타났다. 이들 중의 봄/가을 비율이 1보다 낮은 지점은 하중도복원 습지(12번)가 0.1, 도요 습지(22번)가 0.1로 나타났으며, 총 21지점으로 나타났다. 호오탁성 종의 종수는 봄/가을 비율이 0.4~2.1이며 1이 넘는 지점이 11지점으로 나타나 종수 또한 봄철보다 가을철에 종수가 높은 지점이 많은 것으로 확인되었다. 이들 중의 봄/가을의 비율은 한림2 습지(20번)가 2.1, 갈대정화 습지(6번)가 2.0으로 큰 차이를 보였다. 호오탁성 종 종수의 봄/가을의 비율이 1보다 작은 지점은 신덕1-2 습지(31번)가 0.4, 밀양1 습지(17번)와 양산지구 습지(28번)가 0.5로 나타났으며, 총 20지점으로 확인되었다.

각 습지에서 조사된 부착규조류의 출현종을 기반으로 TDI를 산출한 결과, 대부분의 습지는 C와 D 등급으로 나타났다(Table 3). 가장 높은 TDI 등급은 청화원 습지(13번)와 양산지구 습지(28번)의 봄이었으며(A등급), 서재지구 습지(1번)의 가을, 달성구하도복원 습지(5번)의 가을, 도래 습지(15번)의 봄, 도요 습지(22번)의 봄, 화명2지구 습지(29번)의 봄은 B등급으로 분석되었다.

3. 클러스터 분석 결과

각 습지들의 환경요인(수질 항목 및 기질풍부도)과 부착규조류 분포 양상을 유형화하기 위해 SOM 분석을 시행한 결과, 5x8구조에서 최적화되었으며, 총 4개의 Cluster로 구분되었다(Quantization error, 0.506; Topographic error, 0.00; $n=63$, Figure 4.). 4개의 클러스터는 계층적 군집 분석의 계통수의 차이성에 기반하여 구분되었으며, 이들 클러스터간에서는 통계적으로 유의한 차이가 있었다(MANOVA, $p<0.05$; Table 4).

클러스터 1의 경우, 대부분 가을철의 조사지점들로 구성되었으며, 총인과 총질소 등의 영양염류와 부착규조류의 종수 및 풍부도가 낮음에도 불구하고, 부착돌말영양지수(TDI) 값이 높은 지점들로 나타났다. 이와 반대로, 클러스터 4는 봄철의 지점들이 대부분이며, 총질소가 높음에도 불구하고 TDI 값이 낮은 특징을 보였다. 클러스터 4에 속한 습지들의 총인 값은 0.059 mg/L로 다른 클러스터 내 습지보다 낮지만, 용존산소는 8.6

Table 3. Water quality assessment using TDI(Trophic Diatom Index) at study sites

No.	Sites	Season	TDI		No.	Sites	Season	TDI	
1	Seojaejigu	Spring	66.0	C	18	Miryang1-1	Spring	58.8	C
		Fall	44.0	B			Fall	82.8	D
2	Habin	Spring	63.5	C	19	Hanlim1	Spring	79.9	D
		Fall	-	-			Fall	86.2	D
3	Sudal sup	Spring	90.8	D	20	Hanlim2	Spring	83.6	D
		Fall	95.0	D			Fall	84.1	D
4	Habinseubjiwon	Spring	58.1	C	21	Ttanseom	Spring	73.5	D
		Fall	89.3	D			Fall	68.3	C
5	Dalseongguhado	Spring	72.2	D	22	Doyo	Spring	52.0	B
		Fall	48.9	B			Fall	89.5	D
6	Galdaejeonghwa	Spring	75.1	D	23	GimhaejiguI-1	Spring	78.3	D
		Fall	88.4	D			Fall	71.8	D
7	Chacheon	Spring	60.5	C	24	GimhaejiguI-2	Spring	69.1	C
		Fall	64.7	C			Fall	97.0	D
8	Hyunpungsudal	Spring	85.8	D	25	GimhaejiguII-1	Spring	77.2	D
		Fall	-	-			Fall	63.1	C
9	Gujiseubjiwon	Spring	73.6	D	26	GimhaejiguII-2	Spring	84.3	D
		Fall	-	-			Fall	91.9	D
10	Byeoksowon	Spring	79.3	D	27	HoesanIII	Spring	77.5	D
		Fall	75.0	D			Fall	82.7	D
11	Unjeongcheon	Spring	59.1	C	28	Yangsanjigu	Spring	20.8	A
		Fall	67.1	C			Fall	64.6	C
12	Hajungdo	Spring	67.0	C	29	Hwamyong2jigu	Spring	48.6	B
		Fall	68.7	C			Fall	76.5	D
13	Cheonghwawon	Spring	33.5	A	30	Sinduk1-1	Spring	58.5	C
		Fall	65.6	C			Fall	91.9	D
14	Cheongyudo	Spring	82.2	D	31	Sinduk1-2	Spring	78.3	D
		Fall	62.5	C			Fall	79.0	D
15	Dorae	Spring	46.2	B	32	Sinduk1-3	Spring	57.8	C
		Fall	74.6	D			Fall	71.6	D
16	Saenarae	Spring	69.0	C	33	Samlak	Spring	75.3	D
		Fall	86.9	D			Fall	70.7	D
17	Miryang1	Spring	68.7	C					
		Fall	82.2	D					

mg/L로 다른 클러스터보다 높았다. 클러스터 3의 경우, 시기에 상관없이 총인과 총질소의 평균값이 각각 2.579 mg/L, 0.201 mg/L로 가장 높았으며, 부착규조류의 종수와 풍부도 또한 높은 습지들로 구성되었다. 클러스터 2의 경우 대부분의 항목이

평균값에 가까운 값이 나타난 습지들로 구성되었다. 이것으로 보아 클러스터 2는 클러스터 1, 3, 4로 구분되지 못한 지점들이 모인 것으로 보인다. 특징적으로, 클러스터 2에서는 하상 내 모래비율이 평균 61.3으로 높은 값으로 나타나 다른 클러스터

와 차이를 보였다. 그 외 서식환경의 경우, 클러스터 4와 매우 유사하였으며, 대부분 가을 시기에 조사된 값으로 구성되어 부착규조류의 종수와 풍부도가 낮은 경향을 보였으나, TDI 값은 높았다.

고찰

낙동강 신규조성 습지에서 조사된 부착규조류의 계절성은 동아시아 지역에서 나타나는 일반적인 천이 과정과 비슷하다 (Kim, 2001). 우리나라는 몬순 기후의 영향으로 강우량이 여름철에 집중되며, 이는 생물군집의 천이에 강하게 영향을 미친다. 여름 강우는 봄철에 높은 밀도로 성장한 개체군을 급감시키며, 가을철에 새로운 천이 과정을 유도한다(Choi *et al.*, 2011).

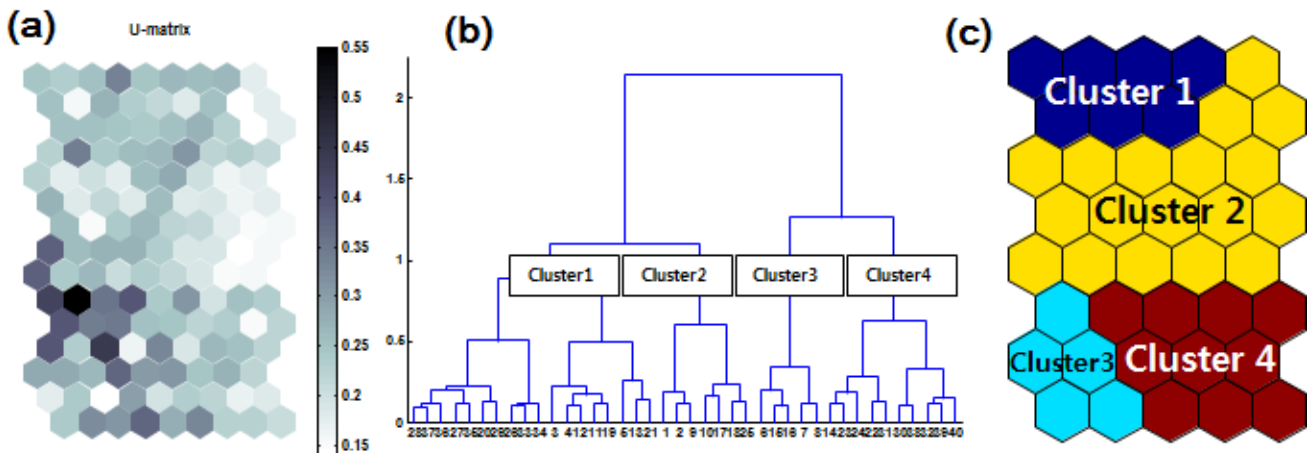


Figure 4. Clustering through data learning by the self-organizing map. (a) U-matrix, (b) hierarchical dendrogram, (c) clustering result.

Table 4. The environmental variable, bed state, TDI, diatom cell density and species number at different clusters defined by SOM. DO(mg/L), dissolved oxygen; EC(μ S/cm), conductivity; Tur.(NTU), turbidity; Chl.a(μ g/L), Chlorophyll a; T-N(mg/L), total nitrogen; T-P(mg/L), Total phosphorus

Variable	Mean	SD	Cluster				F	P
			1	2	3	4		
DO	6.5	2.4	4.4	6.0	7.8	8.6	12.27	0.00
BOD	3.3	1.8	2.7	3.0	5.4	3.4	4.40	0.01
EC	386.2	204.1	291.0	374.3	365.9	492.4	2.59	0.06
Tur.	5.3	4.2	3.2	4.5	8.4	7.1	4.06	0.01
Chl.a	1.6	3.2	1.1	1.3	5.0	1.1	3.40	0.02
T-N	2.3	1.4	1.7	2.4	2.8	2.4	1.07	0.37
T-P	0.11	0.1	0.11	0.12	0.20	0.06	1.54	0.22
bed-sand	51.4	37.1	8.8	61.3	15.7	85.0	31.20	0.00
bed-gravel	11.9	26.6	0.0	1.5	84.3	7.5	282.01	0.00
bed-plant	36.7	37.9	91.2	37.2	0.0	7.5	42.27	0.00
TDI	71.6	14.7	79.6	74.0	70.3	61.5	4.70	0.01
cell density ($\times 10^3$)	321.9	550.8	120.5	379.0	301.7	397.8	0.76	0.52
Species number	38.2	11.6	27.6	37.3	39.7	47.5	9.99	0.00

이러한 ‘여름 강우 효과’는 수생태계의 수리수문 형태나 구조 등에 따라 차이를 가진다. 강의 경우, 흐름이 지속적으로 발생하는 생태계이며, 강우에 의한 유량 증가라는 연속적인 교란으로 하류에 서식하는 생물군집을 크게 감소시킨다(Saunders and Lewis, 1988). 이와 반대로 물 흐름이 거의 없는 둔벌이나 연못 등에서는 풍부한 수생식물이 강우에 의한 교란을 감소시키며, 생물군집의 생존률을 높이고 개체군 성장을 증가시킨다. 본 연구에서 부착규조류의 계절간 차이 또한 습지의 수리수문 형태나 구조적인 특성 등의 영향으로 판단된다. 일부 습지에서 부착규조류의 종수는 감소하고 개체수는 봄에서 가을로 갈수록 크게 증가하였다. 여름 강우와 같은 교란에 취약한 종은 감소한 것으로 판단되며, 여름에 교란으로부터 살아남은 종은 가을철에 높은 개체수로 성장하기에 충분한 개체수를 가졌을 것이다. 특히, 새나래 습지(16번), 한림2 습지(20번), 화명2지구 습지(29번) 등은 수심이 깊고 수량이 많아 물리적인 교란(강우 및 수체 파동 등)으로부터 취약한 조건을 가지며, 이로 인해 종수가 뚜렷하게 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한 이들 습지들은 수생식물이 성장하기 어려운 환경이기 때문에, 강우에 의한 교란 효과가 확대된 것으로 판단된다. Choi *et al.* (2015)는 동아시아 지역에서 여름에 집중된 강우에 의한 물리적인 교란은 수생식물에 의해 감소될 수 있으며, 플랑크톤 군집의 종수와 풍부도를 증가시킨다고 보고하였다. 이와 관련하여, 수생식물이 풍부한 일부 습지(달성구하도 복원습지(5번) 등)는 가을에 종수와 개체수가 증가된 것을 확인할 수 있다. 더욱이, 수생식물의 잎과 줄기는 부착규조류의 서식을 위한 부착기질체를 제공하기 때문에 종다양성과 개체수 증가에 크게 기여할 수 있다. 이러한 수생식물의 서식처 효과와 관련하여, 한림2 습지(20번)나 화명2지구 습지(29번) 등은 수생식물이나 자갈 등이 풍부하여 높은 종다양성을 나타내기도 했다.

습지의 유입·유출부의 기능과 관련된 지속적인 수원유입이나 통수 확보 등은 수질 특성과 관련된 부착규조류의 서식을 유도했다. 호청수종의 종수와 개체수는 봄에 높은 편이었으며, 호오탁성 종은 가을에 상대적으로 높았다. 이는 봄과 가을 간에 수질 환경의 차이를 의미한다. 여름에 집중된 강우는 유입 지류와 주변 토지로부터 많은 양의 영양염류와 오염물질을 유입을 촉진시키며, 높은 탁도 발생과 부영양화를 유도한다(Reynolds, 1993; Sommer, 1995). 대부분의 습지에서 호오탁성 종이 가을철에 높다는 것은 여름 강우에 의해 증가된 영양염류와 오염물질의 축적을 의미한다. 이 습지들은 유입·유출부의 기능이 불량하여 통수가 원활하지 못하며, 높은 탁도 발생과 부영양화를 유도하였으며 이와 함께 호청수성 종의 감소를 이끈 것으로 판단된다. 그러나, 상대적으로 탁도나 오염물질의 증가에 민감하지 않은 호오탁성 종은 봄보다 증가하거나 비슷한 수준이었다. Stevenson *et al.*(1991)은 영양염이 충분할 때 천이 초기에 적용한 호오탁성 종이 강우와 같은 물리적 교란 발생에도 지속적으로 유지될 가능성이 높다고 하였다. 유입·유출부의 기능이 우수하고, 통수가 원활한 일부 습지(서재지구 습지, 1번; 달성구하도복원 습지, 5번; 청유도 습지, 14번; 탄섬대체 습지, 21번; 김해지구II-1 습지, 25번)는 봄과 가을간에 호청수성 종의 종수와 개체수가 높거나 비슷한 수준이었다. 이 습지들은 낙동강 본류를 분기한 셋강형의 습지 형태이며, 유입·유출부의 폭이 넓어 본류수의 유입·유출부의 기능이 원활하여 오염물질 부하량이 비교적 적었다. 또한 수변부에 갈대나 물억새 등 상대적으로 다양한 수생식물이 정착하여 있으며, 그 외에도 자갈 등의 기질 표면이 풍부하였다. 이러한 환경기반은 상대적으로 호오탁성 종보다는 호청수성 종의 출현 빈도 증가에 기여했을 것으로 사료된다.

청화원 습지(13번)와 양산지구 습지(28번)의 경우, 봄에

Table 5. Characteristics of each cluster assumed based on the distribution patterns of input variables and number of study sites in each of clusters. DO(mg/L), dissolved oxygen; EC(μ S/cm), conductivity; Tur.(NTU), turbidity; Chl.a(μ g/L), Chlorophyll a; T-N(mg/L), total nitrogen; T-P(mg/L), Total phosphorus

Cluster	Variable		Characteristics	Wetland number
	High	Low		
1	bed-plant, TDI	DO, BOD, EC, Tur., T-N, T-P, cell density, species number, Chl.a	High TDI, poor inflow and outflow, autumn data mainly	13
2	bed-sand, cell density		No specific information	27
3	DO, BOD, Tur., Chl.a, T-N, bed-gravel, species number,		High phytoplankton	7
4	DO, EC, Tur. bed-sand, cell density, species number,	Chl.a, TDI	Low state of saprophilous taxa, well inflow and outflow, spring data mainly	16

Achnanthes minutissima, *Achnanthes lanceolata* 등의 호청수성 종이 높은 밀도로 출현하여 TDI 등급에서 A로 평가되었으나, 이 종들은 가을에는 현저히 감소되었으며 C등급으로 하락하였다. 이 습지들은 유입·유출부의 기능이 우수하였으나, 낙동강 하구둑에 의한 본류 정체로 통수가 원활하지 못한 것으로 판단되었다. 이로 인해 호오탁성 종의 비율이 높으며, 결과적으로 낮은 TDI 등급을 야기했을 것으로 판단된다. 기존 연구를 살펴보면, TDI로 산출된 C와 D 등급의 서식환경은 일반적으로 하천의 중상류에 해당되는 서식환경과 비슷한 수준이었다(Choi *et al.*, 2017).

SOM 분석에 의해 구분된 4개의 Cluster는 부착규조류의 서식처 특성을 반영했다. 클러스터 1은 대부분 높은 TDI 값을 가지는 가을 시기의 습지들로 구성되었으나, 영양염류(총인, 총질소)의 값은 상대적으로 낮았다. 이를 볼 때, 상대적으로 탁도나 오염물질의 증가에 민감하지 않은 호오탁성 종은 여름 강우로 인한 교란에도 불구하고 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 오히려 여름철에 집중된 강우 시에 내려오는 지표수에 포함된 과도한 영양염류 유입으로 강우의 교란에 적응된 호오탁성 종의 정착 및 발달을 촉진시켰다. 그래서 가을 시기에는 호오탁성 종의 우점현상이 발생하며, 영양염류 농도가 적음에도 불구하고 TDI 값이 높을 수 있다. 이와 반대로, 클러스터 4는 봄 시기의 습지들이 대부분이며, 총질소가 높음에도 불구하고 TDI 값이 낮았다. 봄 시기는 가을과는 다르게, 강우량이 낮아 유지수량이 낮게 유지되기 때문에 물에 녹아든 영양염류 값이 높게 측정될 수 있다(Al-Kenzawi, 2009). 또한 수생식물의 성장과 발달이 아직 미약하여 잎과 줄기와 같은 기질 면적이 적어, 호오탁성 종이 적어 TDI 값이 낮을 수 있다. 또한 부착규조류의 성장에 크게 기여하는 총인의 비중이 적고, 초기 천이과정에서 광적응성 종의 증가도 상대적으로 호오탁성 종의 비율이 낮아졌을 가능성도 있다. 호오탁성 종의 경우 총인 농도와 밀접한 상관관계를 가지며(Bare and Tundisi, 2010), 이는 주로 생활하수 등을 통해 유입되기 때문에, 상대적으로 강우량이 적은 봄철은 총인의 유입가능성이 낮고, 결과적으로 호오탁성 종의 성장에도 영향을 미친다(Greenaway and Gordon-Smith, 2006). 클러스터 3으로 구성된 습지들은 영양염류 농도와 엽록소가 높은 것으로 보아 상대적으로 식물플랑크톤의 풍부도가 높은 환경으로 판단된다. 수표면에 식물플랑크톤의 우점은 수중 내 빛의 유입을 차단할 수 있으며, 상대적으로 수중 내 아래 공간에 서식하는 부착규조류의 성장에 영향을 미칠 수 있다(Brown and Austin, 1973). 그래서 클러스터 3에 속한 습지들은 상대적으로 낮은 TDI 값을 가졌다.

결과적으로, 부착규조류의 종조성과 분포, 이를 기반으로 한 부착돌말영양지수(TDI)는 습지의 수리수문 특성이나 구조, 이로 인해 야기되는 서식환경 변화에 강하게 영향 받는 것으로 사료된다. 낙동강에 위치한 신규조성 습지는 기존하천이나 수

로합류부가 존치된 형태부터 낙동강 본류를 분기한 셋강형, 지하수나 강우에 유지수원을 의지하는 것까지 다양한 유형을 가진다. 대부분의 습지는 내부통수의 원활한 기능 확보를 위해 유입·유출부를 조성하였으나, 조성 이후 오랜 시간이 흐르면서 지속적인 흐름으로 인한 토사 퇴적이나 수생식물의 잠식 등으로 기능이 원활하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 유입·유출부의 기능 저하는 호안사면의 빈번한 침식으로 인한 수중 내 토사 유출이나 과도한 마을오폐수의 유입 등으로 인한 수생식물의 발달 등을 원인으로 볼 수 있다. 습지 내 통수의 기능 저하는 내부재생산에 의한 오염을 증가시키며, 이는 수중 내 빛 유입을 방해하고, 수생식물 등의 생물기질 다양성을 낮춘다. 여름에 집중된 강우량은 습지 주변 지표면을 흐르면서 토사 내 영양염류들을 습지로 이끌며, 이는 유입하천이 존재하는 경우 더욱 많은 양의 영양염류 유입을 촉진시킨다. 이는 상대적으로 호오탁성 부착규조류 종의 정착과 발달을 유도하며, 높은 TDI 값을 나타나게 한다. TDI와 관련성이 높은 총인의 경우, 각 습지 내 TDI 값 변동과 비슷한 성향을 보이거나 총질소의 경우 경향이 보이지 않는다. 기존 연구에서는 대체로 총인과 총질소 모두 TDI와 양의 상관성을 가는 것으로 연구되고 있지만(Atazadeh *et al.*, 2007; Bellinger *et al.*, 2006), 본 연구결과에서 총질소의 경우 대부분 1.0 mg/L을 넘어 이미 과도한 상태이기 때문에 총질소의 농도 변화가 TDI에 적은 영향을 미친다.

여러 기존 연구에서, 부착규조류를 활용한 TDI를 서식환경 및 수질 평가지표로 활용하고 있으며(Atazadeh *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2017), 다양한 범위의 수질 측정값(특히 영양염류)에 따라 차이 있는 TDI가 산출되어 서식환경 파악에 용이한 것으로 나타났다. 그러나 습지에서의 적용가능성은 매우 낮은 것으로 나타났다. 하천이나 강 등의 흐름을 가진 수환경은 상류부터 하류까지의 구간에 따라 비교적 뚜렷한 서식환경을 가지므로 측사나 생활오폐수와 같은 비점오염원 유입 구간이 특징적으로 발굴될 수 있지만(Munafò *et al.*, 2005; Shen *et al.*, 2008), 습지는 흐름이 적고 정체수역에 가깝기 때문에 대부분 영양염류 농도가 높다. 그래서 흐름이 지속적으로 유지되어 호청수성 종(*Saproxenus taxa*)이 출현하는 서식환경이 아니라면, 대부분 높은 TDI 값과 낮은 등급이 산출될 수밖에 없다(Della Bella *et al.*, 2007). 이와 같은 양상은 본 연구 결과에서도 비슷하게 나타나 대부분의 습지가 C와 D등급으로 평가되었다. TDI 등급이 다소 양호한 청화원 습지와 양산지구 습지는 습지이기보다는 셋강형 하천에 가까운 형태를 가지기 때문에 특이적인 결과라 할 수 있다. 따라서 습지의 오염원 제거와 통수확보는 부착규조류의 호청수성 종에게 중요한 요소임을 알 수 있다.

그러나 대부분의 습지는 닫힌 환경이며, 강우나 지표수의 유입에 따라 수위나 수질 항목 등이 변동 폭이 극심하여 부착규조류와 같은 생물상을 조사·평가 하기에 어려움이 있다. 이와

같은 환경의 경우, 지속적이고 주기적인 조사가 필요하다. 부착 규조류 군집은 다른 생물상보다 짧은 기간에 성장·사멸하여 상대적으로 긴 조사주기와 횡수는 단편적인 정보만을 취하게 된다. 본 조사 또한 강우 전·후 1회씩 조사하여 나온 결과로 이를 기반으로 하여 TDI 값 산출 및 환경요인과의 분석이 이루어졌기 때문에 기존 결과와 상충되거나 조사시기만의 정보가 분석될 수도 있다. 그러나 전체적으로 여름강우나 유입·유출부의 기능이 부착규조류의 종다양성과 분포에 영향을 미쳤기 때문에, 이를 기반으로 한 지속적이고 주기적인 조사가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

REFERENCES

- Al-Kenzawi, M.A.(2009) Seasonal Changes of nutrient concentrations in water of some locations in Southern Iraqi marshes, after restoration. *Baghdad Science Journal* 6(4): 711-718.
- Atazadeh, I., M. Sharifi and M.G. Kelly(2007) Evaluation of the trophic diatom Index for assessing water quality in River Gharasou, western Iran. *Hydrobiologia* 589(1): 165-173.
- Bellinger, B.J., C. Cocquyt and C.M. O'Reilly(2006) Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams. *Hydrobiologia* 573: 75-87.
- Bere, T. and J.G. Tundisi(2010) Epipsammic diatoms in streams influenced by urban pollution, São Carlos, SP, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 70(4): 920-930.
- Brown, S.D. and A.P. Austin(1973) Diatom succession and interaction in littoral periphyton and plankton. *Hydrobiologia* 43(3-4): 333-356.
- Byun, J.H., J.H. Joo, B.H. Kim and M.S. Han(2015) Application possibility of naphthoquinone derivative nq 4-6 for mitigation of winter diatom bloom. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(3): 224-236. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.S., H.S. Chae and H.S. Kim(2015) Analysis of the epilithic diatom community and comparison of water quality in the Kumho River. *Korean Journal of Ecology and Environment* 48(2): 115-121. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.S., J.H. Lee and H.S. Kim(2017) The epilithic diatom community and biological water quality assessment of Naeseongcheon located at the upper region of Nakdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment* 50(4): 470-477. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, E.K. Lee, K.R. Choi and G.J. Joo(2014) Utilization of fish gut analysis to elucidation of microcrustacean species composition (cladoceran and copepoda) in a shallow and vegetated lake (Jangcheok Lake, South Korea). *Journal of Ecology and Environment* 37(3): 147-153.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, H.W. Kim, K.H. Chang and G.J. Joo(2011) Inter-annual variability of a zooplankton community: the importance of summer concentrated rainfall in a regulated river ecosystem. *Journal of Ecology and Environment* 34(1): 49-58.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, D.H. Kim and G.J. Joo(2016) Role of aquatic macrophytes as refuge of zooplankton on physical distribution (Summer Rainfall) in shallow wetlands. *Korean Journal of Ecology and Environment* 49(4): 308-319. (in Korean with English abstract)
- Delgado, C., I. Pardo, and I. Garcia(2010) A multimetric diatom index to assess the ecological status of coastal Galician rivers (NW Spain). *Hydrobiologia* 644(1): 371-384.
- Della Bella, V., C. Puccinelli, S. Marcheggiani and L. Mancini(2007) Benthic diatom communities and their relationship to water chemistry in wetlands of central Italy. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* 43(2): 89-99.
- Greenaway, A.M. and D.A. Gordon-Smith(2006) The effects of rainfall on the distribution of inorganic nitrogen and phosphorus in Discovery Bay, Jamaica. *Limnology and Oceanography* 51(5): 2206-2220.
- Ha, K., E.A. Cho, H.W. Kim and G.J. Joo(1999) Microcystis bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: importance of hydrodynamics and nutrient loading. *Marine and Freshwater Research* 50: 89-94.
- Ha, K., H.W. Kim and G.J. Joo(1998) The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River (Mulgum), South Korea. In *Phytoplankton and Trophic Gradients* (pp. 217-227). Springer, Dordrecht.
- Im, R.Y., J.Y. Kim, J.Y. Choi, Y. Do and G.J. Joo(2015) Changes of river morphology in the mid-lower part of Nakdong River basin after the 4 large river project, South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* 48(3): 188-194. (in Korean with English abstract)
- Jeong, K.S., D.K. Kim and G.J. Joo(2007) Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research* 41(6): 1269-1279.
- Jones, J.I., J.O. Young, G.M. Haynes, B. Moss, J.W. Eaton and K.J. Hardwick(1999) Do submerged aquatic plants influence their periphyton to enhance the growth and reproduction of invertebrate mutualists? *Oecologia* 120: 463-474.
- Kelly, M.G. and B.A. Whitton(1995) The trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* 7: 433-444.
- Kelly, M.G.(1998) Use of the trophic diatom index to monitor eutrophication in rivers. *Water research* 32(1): 236-242.
- Kim, J.W., B.E. Lee, J.G. Kim, S.H. Oh, J.W. Jung, M.J. Lee and

- H.S. Kim(2017) Functional assessment of Gangcheon replacement wetland using modified HGM. *Journal of Wetlands Research* 19(3): 318-326. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.J.(2001) An assessment of organic pollution using attached diatom assemblages in the Shinchon stream. *Korean Journal of limnology* 34(3): 199-205. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.S., J.S. Choi, J.H. Kim, S.C. Kim, J.W. Park and H.S. Kim(2008) The effects of effluent from a closed mine and treated sewage on epilithic diatom communities in a Korean stream. *Nova Hedwigia* 86: 507-524.
- Kohonen, T., J. Hynninen, J. Kangas and J. Laaksonen(1996) Sompak: The self-organizing map program package. Report A31, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science.
- Lee, J.H.(1998) Epilithic diatoms in the Nakdong River and its value of the diatom assemblage index of organic water pollution (DAIpo). *Korean Journal of Limnology* 31(1): 38-44. (in Korean with English abstract)
- McCormick, P.V. and R.J. Stevenson(1998) Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the Florida everglades. *Journal of Phycology* 34: 726-733.
- Munafò, M., G. Cecchi, F. Baiocco and L. Mancini(2005) River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment. *Journal of Environmental Management* 77(2): 93-98.
- Munn, M.D., R.W. Black and S.J. Gruber(2002) Response of benthic algae to environmental gradients in an agriculturally dominated landscape. *Journal of the North American Benthological Society* 21(2): 221-237.
- Muzzaffar, S.B. and F.A. Ahmed(2007) The effects of the flood cycle on the diversity and composition of the phytoplankton community of seasonally flooded Ramsar wetland in Bangladesh. *Wetlands Ecology and Management* 15: 81-93.
- NIER(2006) Development research of water environment evaluation method(III).
- NIER(2010) Final report of survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea. The ministry of Environment/ National Institute on Environmental Research, Korea.
- NIER(2011) Final report of survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea. The ministry of Environment/ National Institute on Environmental Research, Korea.
- Park, J.W., J.S. Choi and M.G. Kim(2004) Variation of epilithic diatom community and an assessment of water quality by DAIpo in the middle reaches of the Nakdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment* 37(1): 70-77. (in Korean with English abstract)
- Park, S.B., S.K. Lee, K.H. Chang, K.S. Jeong and G.J. Joo(2002) The impact of monsoon rainfall (Changma) on the changes of water quality in the lower Nakdong River (Mulgeum). *Korean Journal of Ecology and Environment* 35(3): 160-171. (in Korean with English abstract)
- Park, Y.J., J.S. Choi and H.S. Kim(2014) Water quality assessment of the Sinchon stream based on epilithic diatom communities. *Journal of Environmental Biology* 35(6): 1053-1059.
- Peszek, Ł., T. Noga, J. Stanek-Tarkowska, A. Pajaczek, N. Kochman-Kędziora and M. Pieniążek(2015) The effect of anthropogenic change in the structure of diatoms and water quality of the Żołyńianka and Jagielnia streams. *Journal of Ecological Engineering* 16(2): 33-51.
- Reynolds, C.S.(1993) Scales of disturbance and their role in plankton ecology. *Hydrobiologia* 249: 157-171.
- Saunders, J.F. and W.M. Lewis(1988) Zooplankton abundance and transport in a tropical white-water river. *Hydrobiologia* 162(2): 147-155.
- Shen, Z., Q. Hong, H. Yu and R. Liu(2008) Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China. *Science of the total Environment* 405(1-3): 195-205.
- Sommer, U.(1995) An experimental test of the intermediate disturbance hypothesis using cultures of marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 40: 1271-1277.
- Stevenson, R.J., C.G. Peterson, D.B. Kirschtel, C.C. King and N.C. Tuchman(1991) Density-dependent growth, ecological strategies, and effects of nutrients and shading on benthic diatom succession in streams 1. *Journal of Phycology* 27(1): 59-69.
- Sutton-Grier, A.E. and J.P. Megonigal(2011) Plant species traits regulate methane production in freshwater wetland soils. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 413-420.
- Van Donk, E. and W.J. van de Bund(2002) Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto- and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms. *Aquatic Botany* 72: 261-274.
- Watanabe, T.(1986) Saprophilous and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAIpo). *Diatom* 2: 23-73.
- Watanabe, T., K. Asai and A. Houki(1990) Numerical simulation of organic pollution in flowing waters. *Encyclopedia Environmental Control Technology* 4: 251-281.
- Wu, J.T.(1999) A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan. *Hydrobiologia*, 397: 79-87.
- Zhu, G.B., S.Y. Wang, X.J. Feng, G.N. Fan, M.S.M. Jetten and C.Q. Yin(2011) Anammox bacterial abundance, biodiversity and activity in a constructed wetland. *Environmental Science & Technology* 45: 9951-9958.