

## 한반도 서남부 하천 하구역의 수질 및 부착돌말 군집 특성

김하경 · 이민혁<sup>1</sup> · 김용재<sup>1</sup> · 원두희<sup>2</sup> · 황순진<sup>3</sup> · 황수옥<sup>4</sup> · 김상훈<sup>5</sup> · 김백호<sup>6,\*</sup>

한양대학교 환경과학과, <sup>1</sup>대전대학교 생명과학과, <sup>2</sup>(주)생태조사단, <sup>3</sup>건국대학교 환경보건학과,  
<sup>4</sup>한국수자원공사, <sup>5</sup>국립환경과학원, <sup>6</sup>한양대학교 생명과학과

**Water Quality and Epilithic Diatom Community in the Lower Stream near the South Harbor System of Korean Peninsula. Kim, Ha-Kyung, Min-Hyuk Lee<sup>1</sup>, Yong-Jae Kim<sup>1</sup>, Du-Hee Won<sup>2</sup>, Soon-Jin Hwang<sup>3</sup>, Su-Ok Hwang<sup>4</sup>, Sang-Hoon Kim<sup>5</sup> and Baik-Ho Kim<sup>6,\*</sup> (Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; <sup>1</sup>Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 478-711, Korea; <sup>2</sup>Doohee Institute of Ecological Research, Seoul 153-768, Korea; <sup>3</sup>Department of Environmental Health, Konkuk University, Seoul 133-701, Korea; <sup>4</sup>K-waters, Korea Water Resources Corporation, Gyeonggi 427-100, Korea; <sup>5</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea; <sup>6</sup>Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)**

**Abstract** Environmental factors and epilithic diatom communities in the lower streams near the harbor region of South Korean peninsula were examined during no monsoon period in May 2013. The sampling of water and epilithic diatoms was conducted at both streams, 19 regulated streams (RS) that there are one or several dams constructed in the river system, and 19 un-regulated streams (US) that there are no dams within the river. A cluster analysis based on the number of species and abundance of epilithic diatoms through the stations, divided into three groups such as groups I (mainly US), II (mixed with US and RS) and III (mainly RS), respectively. Group I showed that water quality is good and high diversity of diatom, while Group II and III was water quality is relatively poor, but not differed in biomass of diatom from Group I. In addition, Group II that had high conductivity, nitrogen and phosphorus, was the lowest in diatom diversity among them. Dominant species were *Nitzschia palea* (17%) and *Navicula seminuloides* (11%) in Group I, *Nitzschia inconspicua* (19%) and *Navicula perminuta* (9%) in Group II, and *Nitzschia inconspicua* (15%) and *Nitzschia palea* (14%) in Group III, respectively. These taxa were widely distributed in brackish water, and not closely related with specific water quality, like eutrophic water. However, the groups II and III belonged to RS, had not only little biomass, but bad water quality such as high concentrations of nutrient and chlorophyll-*a*. Therefore, to determine the effect of dam construction on the lower water ecosystem, the planktonic algae, which can occur algal bloom in the estuary, also was considered to be a parallel investigation.

**Key words:** harbor system, regulated stream, Korean peninsula, small dam, epilithic diatom, water quality

Manuscript received 9 December 2013, revised 9 December 2013,  
revision accepted 23 December 2013

\* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-960, Fax: +82-2-2220-0960,  
E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

## 서 론

댐이나 보 건설과 같은 유수계의 구조변화는 수질(Huang and Foo, 2002)뿐만 아니라 배후습지를 포함한 유역생태계의 구조와 기능을 크게 변화시킨다(Petts, 1979; Everitt, 1993; Topping *et al.*, 2000; Kileshye Onema *et al.*, 2006). 특히 하천의 연속성을 파괴하고, 체류시간과 화학물질의 농도 증가로 인한 수질오염은 종종 퇴행적 생태계 천이를 유도하기도 한다(Hirsch *et al.*, 1991; Morris and Fan, 1998; Wei *et al.*, 2009). 우리나라는 몬순기(여름)에 강우가 주로 집중하기 때문에 수자원의 확보를 위하여 유수역내 댐이나 인공보 건설이 불가피하다(Park *et al.*, 1999). 그러나 하류역의 부영양화는 식물플랑크톤의 갑작스런 현존량 증가, 이로 인한 생물다양성 감소를 유발한다(Yoon *et al.*, 1999; MOE/NIER, 2011).

하구는 담수와 해수가 혼합하는 전이역으로 조류(tide)와 계절에 따라 환경변화가 심하지만(Levinton, 1982), 1차 생산력과 생태적 다양성이 높아 연구자는 물론 경제 및 산업적 측면에서도 관심도가 날로 증가하는 추세이다(Shin and Cho, 2000; Flemer and Champ, 2006; Silva *et al.*, 2013). 특히 하구역에서 적조발생은 주로 상류하천이나 인근 환경기초시설로부터 방류되는 영양물질과 밀접한 관계를 보이며(Silva *et al.*, 2013), 유수역내 댐이나 보 건설로 인한 체류시간 증가나 이로 인한 부영양화(Boyd, 2001; Boyer *et al.*, 2002)의 영향이 크기 때문에 식물플랑크톤과 더불어 1차 생산자이자 먹이경쟁을 하는 부착조류(돌말)의 동태를 파악하는 연구는 의미있다고 판단된다(Kim *et al.*, 2013).

부착돌말은 수생식물, 식물플랑크톤과 더불어 유수생태계의 먹이연쇄와 에너지 전달의 근간을 이루며, 폭넓은 서식처, 높은 유입능과 군집형성을 보이는 특징을 가지고 있다(Stevenson *et al.*, 1996). 이들은 주로 빛, 수온, 수심, 유속(Biggs *et al.*, 1998), 영양물질(Cho, 1994), 탁도(Figueroa-Nieves *et al.*, 2006), 토지이용(Brant and Herdendorf, 1972) 등에 의해 생물량 또는 개체군의 크기가 결정된다. 특히 주변으로부터 영양물질의 유입이나 서식환경의 변화(예, 댐건설)에 대해 빠른 생물변화를 보이기 때문에 오래전부터 유수역의 수질이나 환경상태를 파악하는 데 이용되어 왔다(Kociolek and Spaulding, 2000; Hwang *et al.*, 2011).

국내 유수역에서 댐이나 보 건설이 하천생태계(수질, 퇴적물, 식물플랑크톤 및 저서동물, 어류 등)에 미치는

영향에 대한 연구는 오랫동안 진행되어 왔으나(Hong *et al.*, 1997; Shin and Cho, 2000; Jeong *et al.*, 2011; Shin and Yoon, 2011; Lee *et al.*, 2013), 하류역의 부착돌말류에 대한 연구는 극히 빈약하다(Kim *et al.*, 2013). 그러나 하류 또는 하구에 근접할수록 부착돌말 조사를 위한 접근성이나 지점 또는 기질선정이 어렵고, 특히 조사시간에 따른 조수의 영향 등 여러가지 어려움을 가지고 있다.

본 연구는 한반도 서남부의 하천을 대상으로 상류에 댐이나 인공보와 같은 유속을 조절할 수 있는 인공하천(조절하천, regulated stream, RS)과 시설물이 전혀 없는 자연하천(비조절하천, natural stream, NS)의 수환경과 부착돌말 군집을 비교하기 위하여 조사를 실시하였다.

## 재료 및 방법

조사는 한반도 서남부에 위치하는 24개 주요하천의 하구역을 대상으로 1개 이상의 보가 형성된 14개 인공하천(RS: regulated stream, 19지점)과 보 시설이 없는 10개 자연형 하천(NS: natural stream, 19지점) 등 총 38개 지점을 선정하여, 2013년 5월 3일부터 5월 6일까지 4일 동안 하천수 수질 및 하상의 부착돌말 조사를 실시하였다(Table 1). 채집장소는 바다와 경계를 이루는 하구에서 하천의 상류방향으로 지점을 선정하였다. 선정된 장소는 수변 식생이나 녹음으로 그늘진 지역은 피하였다.

현장의 수온, 용존산소(Dissolved Oxygen: DO), pH, 전기전도도, 염도, 탁도 등은 휴대용 측정기 Horiba U-50(HORIBA Ltd., Japan)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 수질 분석을 위해 현장의 원수 2L를 채수하여 실험실에서 각각 분석하였다. 생물학적 산소 요구량(Biochemical Oxygen Demand: BOD)은 Winkler-azide법에 따라 300 mL BOD병에 현장에서 채집한 현장을 20°C 암상태의 배양기에서 5일간 배양한 후의 DO와 현장에서 측정한 DO농도의 차이로 계산하였다(APHA, 1995). 현장수의 영양염 분석은 총질소(TN)는 카드뮴 환원법, 총인(TP)은 과황산염 분해 후 아스코르브산법, NO<sub>3</sub>-N은 카드뮴 환원법, NH<sub>3</sub>-N의 경우 비색법, PO<sub>4</sub>-P는 아스코르브산법, 용존무기 농도를 각각 분광광도계(SP2770i Youngwoo Co. Korea)를 이용하여 측정하였다(APHA, 1995).

선정된 기질은 1주일 이상 수심 20 cm 이상에서 잠겨 있었으며 상부가 편평한 돌을 3개 이상 선택하여 기질 상부에 25 cm<sup>2</sup> 넓이의 고무판을 밀착시킨 다음 나머지

**Table 1.** Sampling sites of water and epilithic diatoms from Korean harbors in May 2013.

NS			RS		
Sites	Lat.	Long.	Sites	Lat.	Long.
NS 1	35° 53'52''	129° 39'56''	RS 1	35° 01'02''	128° 23'20''
NS 2	35° 14'38''	129° 14'39''	RS 2	35° 53'48''	127° 52'13''
NS 3	34° 57'16''	128° 06'38''	RS 3	34° 54'04''	127° 51'44''
NS 4	34° 53'13''	128° 37'36''	RS 4	34° 46'29''	127° 52'29''
NS 5	34° 53'29''	128° 37'29''	RS 5	34° 46'35''	127° 51'29''
NS 6	35° 03'02''	128° 21'25''	RS 6	34° 40'29''	127° 45'50''
NS 7	35° 03'03''	128° 03'16''	RS 7	34° 41'00''	127° 45'39''
NS 8	34° 59'59''	128° 03'25''	RS 8	34° 39'23''	127° 19'05''
NS 9	34° 44'35''	127° 51'30''	RS 9	34° 40'10''	127° 19'11''
NS 10	34° 50'40''	127° 44'56''	RS 10	36° 06'18''	126° 28'16''
NS 11	34° 41'22''	127° 35'06''	RS 11	35° 05'43''	126° 27'47''
NS 12	34° 39'25''	127° 16'56''	RS 12	35° 22'14''	126° 25'54''
NS 13	34° 39'59''	127° 17'13''	RS 13	35° 22'06''	126° 25'41''
NS 14	34° 30'12''	127° 17'14''	RS 14	35° 25'34''	126° 27'26''
NS 15	34° 30'04''	127° 16'55''	RS 15	35° 25'54''	126° 27'00''
NS 16	34° 28'00''	127° 13'25''	RS 16	35° 30'144''	126° 30'24''
NS 17	34° 28'03''	127° 13'42''	RS 17	35° 30'34''	126° 29'47''
NS 18	34° 26'04''	127° 12'08''	RS 18	35° 36'11''	126° 39'51''
NS 19	34° 25'52''	127° 12'07''	RS 19	35° 35'40''	126° 39'08''

NS: Natural streams have no dams to harvest the flowing water or to keep out the sea.

RS: Regulated streams have one or several dams to harvest the flowing water or to keep out the sea.

부분을 부드러운 솔로 깨끗이 씻어낸 후 고무판에 가려 있던 부분은 현장수를 이용하여 시료병에 담는다. 채집된 시료는 Lugol's solution으로 고정하여 부착돌말 군집을 분석하고, 고정하지 않은 시료는 냉암소 조건하에서 보관하여 엽록소 (Chl-*a*) 농도와 유기물함량 (AFDM)을 측정하였다. 엽록소 농도는 아세톤추출법에 따라 채집한 시료를 Whatman GF/C filter에 여과하여 90% 아세톤을 용매로 사용하여 24시간 동안 4°C 암상태에서 추출한 다음 원심분리기 (MF80 Hanil Science Inc., Korea)를 이용하여 20분간 원심분리하고 분광광도계 (SP-2700i Youngwoo Inc., Korea)를 이용하여 상등액의 흡광도를 750 nm, 663 nm, 645 nm, 630 nm에서 측정하였다 (APHA, 1995). 유기물함량 (AFDM)은 채집한 시료를 Whatman GF/C filter에 여과한 후 105°C에서 24시간 건조시킨 후 측정된 무게와 이를 다시 550°C 도가니에서 1시간 태운 후 무게의 차이를 이용하여 계산하였다 (APHA, 1995).

고정된 시료를 실험실로 운반하고 Permanganate method (Hendey, 1974)에 의하여 세정한 다음 봉입제를 이용하여 영구 표본을 제작하고 광학현미경 (Nikon E600, Japan) 400~1000배 하에서 관찰하였다. 종의 동정은 Krammer and Lange-Bertalot (2007a, b)를 이용하였고 Simonsen (1979) 체계에 따라 분류하였다. 세포모드를 파

악하기 위해 부착돌말 군집의 상대빈도를 임의로 선정된 표본을 현미경 하에서 500개체 이상의 피각을 계수하여 산출한 후, 산처리 이전의 시료에 살아있는 세포를 계수한 총 개체수에 상대빈도를 곱하여 계산하였다. 각 조사지점에서 부착돌말 개체수 및 출현종수를 근거로 군집분석, 각 그룹의 지표종 및 중요도 분석, 군집유형과 환경요인과 관계분석 (CCA: canonical correspondence analysis) 등을 실시하였다. 각 그룹의 지표종 분석은 Indicator species analysis를 실시하여 출현종의 지표값이 25% 이상이고 다른 그룹보다 상대적으로 5배 이상 높은 지표값을 갖는 종 (Good species)를 각 그룹의 지표종으로 선정하였다 (Keister and Peterson, 2003). 프로그램은 McCune and Mefford (1999)가 개발한 생태분석 프로그램인 PC-ORD (ver 4.25 MjM Soft, USA)를 이용하였다. 이들의 유의성은 Monte Carlo test를 실시하여 평가하였다. 한편, 군집특성을 파악하기 위하여 우점도 지수 (McNaughton, 1967), 다양성 지수 (Shannon and Weaver, 1963), 풍부도 지수 (Margalef, 1958) 및 균등도 지수 (Pielou, 1975)를 산출하였다. 각 그룹간 생물 및 환경요인간의 차이를 비교하기 위하여 ANOVA를 실시하였고 프로그램은 SPSS software (ver. 18. SPSS Inc. Korea)를 이용하였다.

## 결과 및 고찰

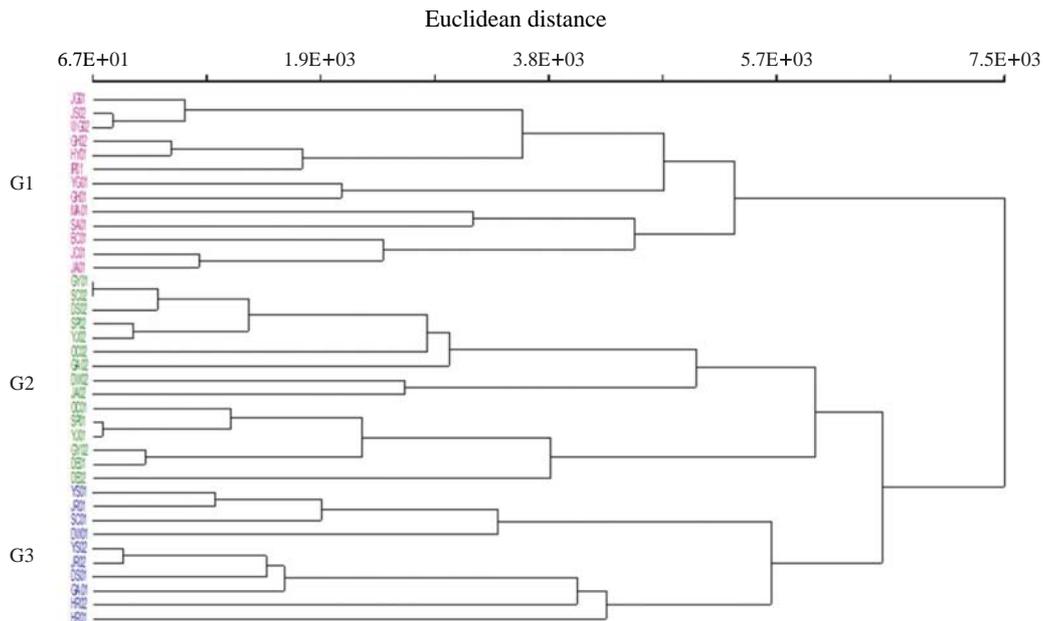
### 1. 부착돌말균집 유형

한반도 서남부 하구역 하천(24개 하천, 38개 조사지점)에서 출현한 부착돌말류의 출현 종수와 현존량을 근거로 집괴분석(cluster analysis)을 실시한 결과, 20% (information remaining) 수준에서 크게 3개 그룹으로 구분되었다(Fig. 1). 각 그룹의 물리적인 특성(예, 인공보 형성여부)을 살펴보면, G1(13개 지점)은 인공보가 없는 비조절 하천(11개 지점, 84%)과 1개 이상의 인공보가 있는 조절 하천(2개 지점, 15.4%)으로 구성되었다. G2(15개 지점)는 자연하천(6개 지점, 40%)과 조절하천(9개 지점, 60%)으로 구성되었다. 반면 G3(10개 지점)는 자연하천(2개 지점, 20%)보다 조절하천(8개 지점, 80%)이 뚜렷한 높은 비율을 각각 차지하였다. 본 연구는 비조절하천(natural stream, 19개 지점)과 조절하천(regulated stream, 19개 지점)을 동일한 비율로 조사하였으나 부착돌말 균집특성으로는 약 40% 정도가 두 하천의 혼합된 유형을 나타냈다. 이는 부착돌말류의 세포크기가 작고 폭 넓은 환경구배에서도 잘 서식하는 생태학적 특성으로 판단되었다(Stevenson *et al.*, 1996).

본 조사에서 출현한 부착돌말은 총 171분류군이었으

며 이들은 다시 1강 2목 3아목 8과 32속 154종 14변종 2품종 1아종으로 구성되었다. 전 조사지점에 걸쳐 *Nitzschia palea* (총현존량의 13%)와 *Nitzschia inconspicua* (12%)는 각각 제1, 2 우점종으로 나타났으며 이와 더불어 *Navicula minima*, *Achnanthes minutissima*, *Navicula perminuta* 등 5종은 높은 현존량을 보였던 주요종으로 나타났다(Fig. 2). 이는 한반도 하구역의 부착돌말 균집의 우점종이 *Nitzschia inconspicua* (17%)로 보고하였던 Kim *et al.* (2013)의 결과와 유사하였다.

각 그룹별로 총 현존량의 5% 이상을 차지하는 분류군은 Fig. 2와 같다. G1에서는 *Nitzschia palea* (17%), *Navicula seminuloides* (11%), *Nitzschia fonticola* (11%), *Navicula saprophila* (8%), *Achnanthes minutissima* (8%), *Nitzschia amphibia* (6%), *Gomphonema angustum* (5%), G2에서는 *Nitzschia inconspicua* (19%), *Navicula perminuta* (9%), *Nitzschia palea* (8%), *Amphora veneta* (6%), *Achnanthes brevipes* (5%), G3에서는 *Nitzschia inconspicua* (15%), *Nitzschia palea* (14%), *Navicula minima* (13%), *Achnanthes minutissima* (8%), *Navicula cryptocephala* (5%), *Nitzschia gracilis* (5%) 등이 우점하였다(Fig. 2). 이들 대부분은 비교적 서식범위가 넓은 기수역의 보편종(common species)들이었다. 특히 *Nitzschia inconspicua*는 G2와 G3에서 가장 높은 현존량을 나타냈는데 한반도 하구역을 대상으로 조사한 Kim *et al.*



**Fig. 1.** Dendrogram of diatom-based harbor sites classification using Euclidean's clustering method. G1: 13 sampling sites (11 NS: 2 RS), G2: 15 sampling sites (6 NS: 9 RS), G3: 10 sampling sites (2 NS: 8 RS). \*NS: a natural stream has no dams to harvest the flowing water or to keep out the sea. \*\*RS: a regulated stream has one or several dams to harvest the flowing water or to keep out the sea.

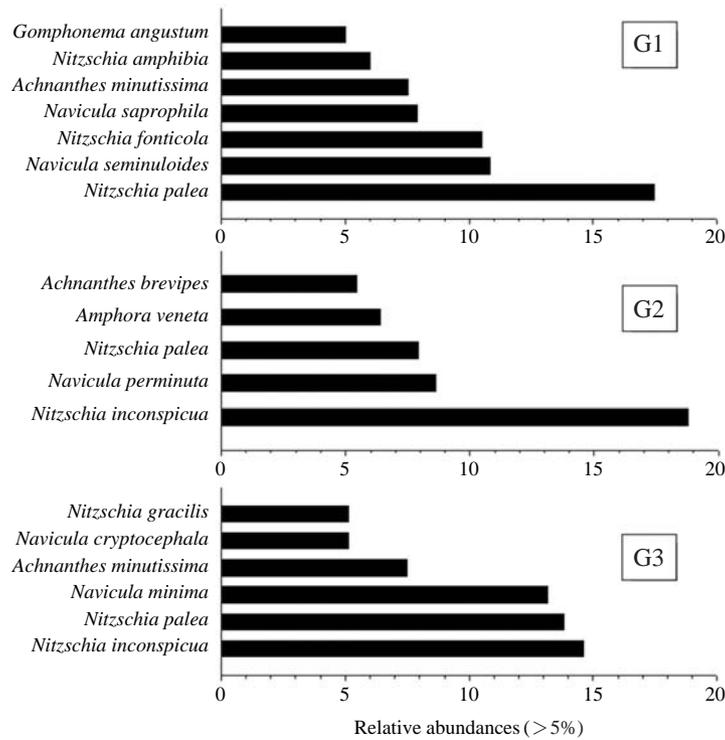


Fig. 2. Major epilithic diatoms and their abundance in major harbors from Korean peninsula in May 2013.

Table 2. Differences among diatom community indices ( $\pm$ SE) in three groups divided by cluster analysis based on the epilithic diatom community from Korean harbors in May 2013.

Indices	G1	G2	G3	F	P
NSP	29.77 $\pm$ 3.38 <sup>b</sup>	17.2 $\pm$ 1.57 <sup>a</sup>	22.9 $\pm$ 0.95 <sup>ab</sup>	8.072	0.001
Abundances	293.7 $\pm$ 54.7	254.7 $\pm$ 50.2	400.1 $\pm$ 83.6	1.400	0.260
Dominance	0.58 $\pm$ 0.03	0.53 $\pm$ 0.05	0.49 $\pm$ 0.03	1.020	0.371
Diversity	2.11 $\pm$ 0.13	1.97 $\pm$ 0.18	2.26 $\pm$ 0.09	0.876	0.425
Richness	2.35 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	1.35 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	1.75 $\pm$ 0.1 <sup>ab</sup>	6.385	0.004
Evenness	0.22 $\pm$ 0.01	0.2 $\pm$ 0.02	0.23 $\pm$ 0.01	0.894	0.418

NSP: number of species, Abundance (unit:  $10^3$  cells  $cm^{-2}$ )  
 Small alphabets (a, b and c) were Tukey's post hoc test with Bonferroni test.

(2013)의 연구에서 *Nitzschia inconspicua*는 서남부 하구역의 아우점종으로 나타났으며 또한 낙동강 중류와 울릉도 수계에서도 *Nitzschia inconspicua*가 우점종으로 보고되었다(Choi et al., 2004; Park et al., 2004).

각 그룹별 군집특성(출현종수, 현존량, 다양도, 풍부도, 균등도)를 비교하기 위하여 ANOVA (Tukey's test, Bonferroni test)를 실시하였다(Table 2). 분석결과, 부착돌말 출현종수(G1=29.77  $\pm$  3.38, G2=17.2  $\pm$  1.57)와 풍부도(G1=2.35  $\pm$  0.3, G2=1.35  $\pm$  0.14)에서만 유의한 차이를 보였을 뿐, 다른 생물지수(현존량, 다양도, 균등도 등)에서는 나타나지 않았다. 특히 각 그룹별로 부착돌말류 현

존량의 차이는 보이지 않은 반면, 인공보가 없는 지점(84.6%)이 많은 G1에서는 가장 많은 돌말류가 출현하였고, 같은 성질의 종풍부도 역시 가장 높았다. 결국 인공보 형성이 부착돌말류 현존량보다 출현종수의 감소에 영향을 보이는 것으로 판단된다. 이는 Shin and Yoon (2011)이 보고한 영산강 하구언택의 건설 이후에 식물 플랑크톤의 종수가 감소한 것과 비슷한 결과이다.

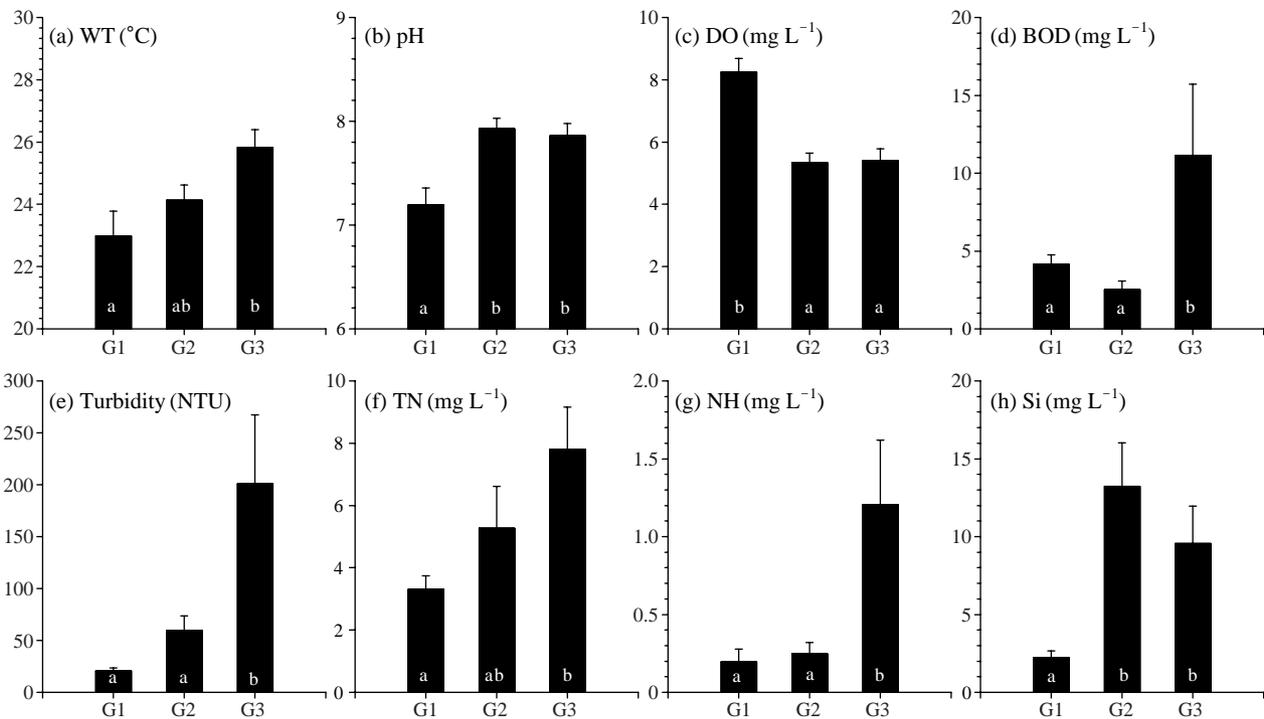
## 2. 그룹별 수질특성

부착돌말류 생물특성에 의해 구분된 각 그룹의 환경

**Table 3.** Differences among environmental variables ( $\pm$ SE) in three groups divided by cluster analysis based on the epilithic diatom community from Korean harbors in May 2013.

Variables	G1	G2	G3	F	P
WT ( $^{\circ}$ C)	22.98 $\pm$ 0.8 <sup>a</sup>	24.13 $\pm$ 0.5 <sup>ab</sup>	25.83 $\pm$ 0.57 <sup>b</sup>	4.448	0.019
pH	7.19 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	7.93 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	7.86 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	9.895	0.000
SAL (‰)	0.68 $\pm$ 0.41	6.3 $\pm$ 2.7	1.44 $\pm$ 0.99	2.734	0.079
DO (mg L <sup>-1</sup> )	8.25 $\pm$ 0.44 <sup>b</sup>	5.34 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	5.41 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>	19.727	0.000
BOD (mg L <sup>-1</sup> )	4.14 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>	2.53 $\pm$ 0.56 <sup>a</sup>	11.15 $\pm$ 4.56 <sup>b</sup>	4.151	0.024
Turbidity (NTU)	20.65 $\pm$ 2.68 <sup>a</sup>	59.78 $\pm$ 13.58 <sup>a</sup>	200.98 $\pm$ 66.38 <sup>b</sup>	7.933	0.001
EC ( $\mu$ S cm <sup>-1</sup> )	1,019 $\pm$ 591	10,156 $\pm$ 4,229	2,613 $\pm$ 1,672	2.851	0.071
TN (mg L <sup>-1</sup> )	3.302 $\pm$ 0.443 <sup>a</sup>	5.269 $\pm$ 1.338 <sup>ab</sup>	7.805 $\pm$ 1.348 <sup>b</sup>	3.518	0.041
NH <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.196 $\pm$ 0.081 <sup>a</sup>	0.246 $\pm$ 0.073 <sup>a</sup>	1.206 $\pm$ 0.412 <sup>b</sup>	7.167	0.002
NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.823 $\pm$ 0.114	2.681 $\pm$ 1.033	1.545 $\pm$ 0.316	1.831	0.175
NO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.595 $\pm$ 0.326	0.06 $\pm$ 0.025	0.355 $\pm$ 0.192	1.75	0.189
TP (mg L <sup>-1</sup> )	0.245 $\pm$ 0.059	0.35 $\pm$ 0.138	0.592 $\pm$ 0.176	1.673	0.202
PO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.045 $\pm$ 0.019	0.066 $\pm$ 0.012	0.073 $\pm$ 0.029	0.539	0.588
Si (mg L <sup>-1</sup> )	2.219 $\pm$ 0.439 <sup>a</sup>	13.222 $\pm$ 2.791 <sup>b</sup>	9.557 $\pm$ 2.394 <sup>b</sup>	6.886	0.003
Chl- <i>a</i> ( $\mu$ g cm <sup>-2</sup> )	3.42 $\pm$ 0.81	4.46 $\pm$ 0.94	4.18 $\pm$ 0.67	0.418	0.662
AFDM (mg cm <sup>-2</sup> )	2.7 $\pm$ 0.39	2.57 $\pm$ 0.28	3.0 $\pm$ 0.27	0.402	0.672

WT: water temperature, SAL: salinity, DO: dissolved oxygen, EC: electric conductivity, BOD: biochemical oxygen demand, TN and TP: total nitrogen and phosphorus, Chl-*a*: chlorophyll-*a*, AFDM: ash-free dry-matter. Small alphabets (a, b and c) were Tukey's post hoc test.

**Fig. 3.** Selected environmental variables showing significant differences among three groups divided by cluster analysis based on the epilithic diatom community of major Korean harbors in May 2013. Small alphabets (a, b and c) were Tukey's post hoc test.

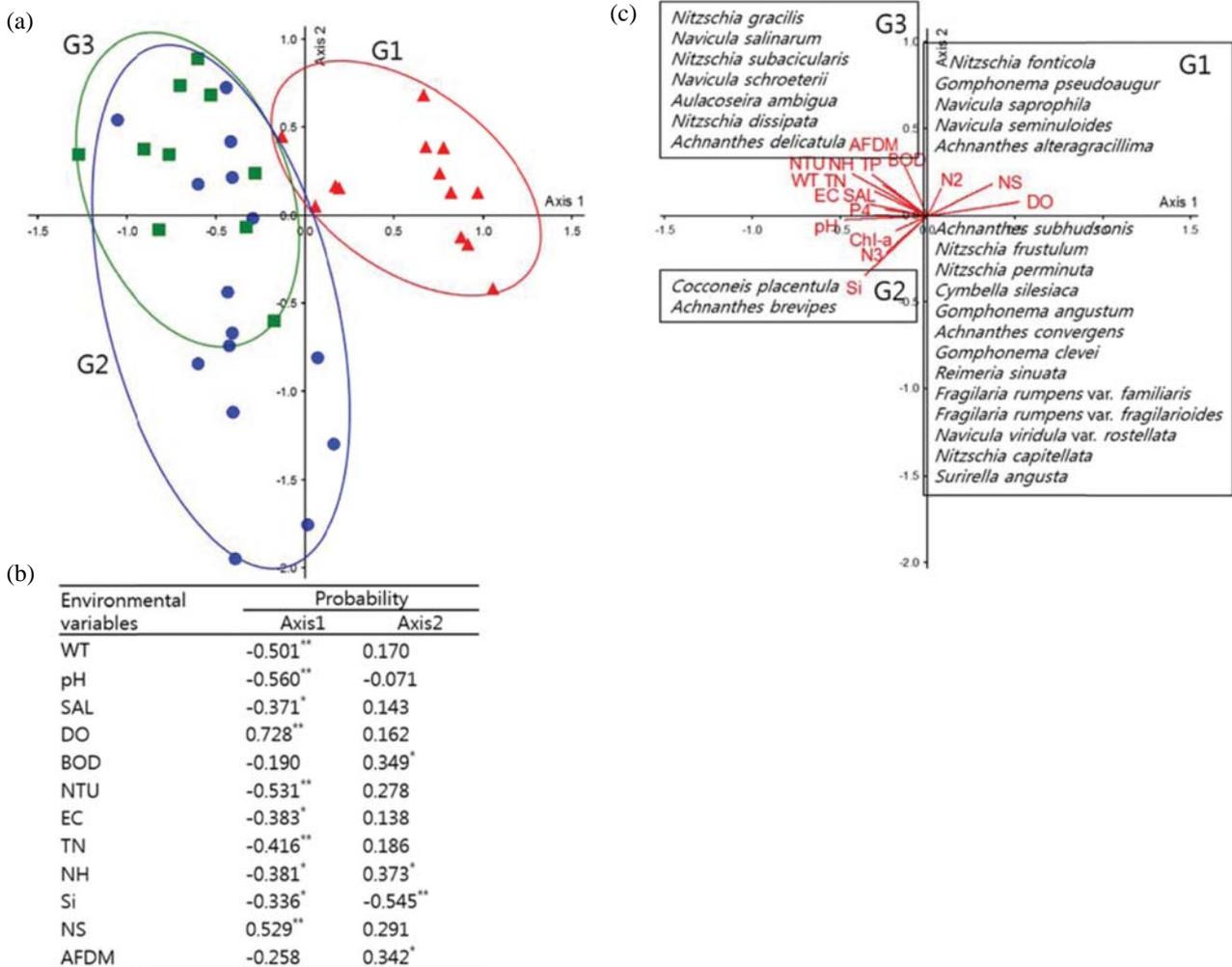
요인(평균)을 비교하기 위하여 ANOVA (Tukey's test, Bonferroni test)를 실시하였다(Table 3, Fig. 3). 분석결과, 그룹간에 유의한 차이를 보인 환경요인은 다음과 같다.

수온은 G1 (23.0  $\pm$  0.8 $^{\circ}$ C)과 G2 (24.1  $\pm$  0.5)보다 G3 (25.8  $\pm$  0.6)에서 높았으며, 반면 pH는 G1 (7.2  $\pm$  0.2)보다 G2 (7.9  $\pm$  0.1)와 G3 (7.9  $\pm$  0.1)에서 높았다. DO의 경

우, G1 ( $8.3 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ )과 G2 ( $5.3 \pm 0.3$ )-G3 ( $5.4 \pm 0.4$ ) 간에 유의한 차이를 보였다. BOD는 G1 ( $4.14 \pm 0.62 \text{ mg L}^{-1}$ )-G2 ( $2.53 \pm 0.56$ )와 G3 ( $11.15 \pm 4.56$ )간에 유의한 차이를 보였다. 탁도(Turbidity)의 경우, G1 ( $20.7 \pm 2.7 \text{ NTU}$ )-G2 ( $59.8 \pm 13.6$ )와 G3 ( $201.0 \pm 66.4$ )간에 유의한 차이를 보였다. 총질소(TN)는 G1 ( $3.30 \pm 0.44 \text{ mg L}^{-1}$ )과 G3 ( $7.81 \pm 1.35$ )간에 유의한 차이를 보였으며, G2 ( $5.27 \pm 1.34$ )는 이들의 중간수준이었다. 암모니아( $\text{NH}_4$ )의 경우, G1 ( $0.20 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$ )-G2 ( $0.25 \pm 0.07$ )와 G3 ( $1.21 \pm 0.41$ )간에 유의한 차이를 보였다. 마지막으로 규소( $\text{SiO}_2$ )는 G1 ( $2.22 \pm 0.44 \text{ mg L}^{-1}$ )과 G2 ( $13.22 \pm 2.79$ )-

G3 ( $9.56 \pm 2.40$ )간에 유의한 차이를 보였다.

이들을 종합하면, G1에서는 용존산소가 가장 높은 반면, G3에서는 수온, pH, BOD, 탁도, 총질소, 암모니아, 규소 등이 높게 나타났다. 한편 자연형 하천과 인공조절 하천이 혼합된 특성을 보였던 G2에서는 DO, BOD, 탁도, 암모니아 등은 G1과 유사한 형태를 나타냈으며, pH, 규소 등은 G3에서와 같이 높게 나타났다. 따라서 G1은 수질이 비교적 양호한 반면, G3은 오염도가 높았으며, G2는 이들의 중간적 특성을 나타냈다. 이처럼 pH와 암모니아가 자연형 하천보다 인공조절 하천에서 유의하게 높게 나타난 것은 Shin and Yoon (2011)의 연구결과와



**Fig. 4.** (a) Ordination diagram showing the distribution of epilithic diatom communities in the harbor system in the South Korea peninsula in May 2013. (b) Correlation coefficients and probabilities of environmental variables and the first two CCA axes (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ ). (c) Ordination of species selected by the IndVal analysis with significant environmental variables. Lists of epilithic diatom in each box are indicator species of each group. WT: water temperature, SAL: salinity, DO: dissolved oxygen, EC: electric conductivity, BOD: biochemical oxygen demand, NTU: Turbidity, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus, NH:  $\text{NH}_4\text{-N}$ , N3:  $\text{NO}_3\text{-N}$ , N2:  $\text{NO}_2\text{-N}$ , P4:  $\text{PO}_4\text{-P}$ , Chl-a: chlorophyll-a, AFDM: ash-free dry-matter, NS: number of species.

비슷한 영향으로 확인되었는데, 이는 강이나 하천의 하류역에 보나 소형 댐이 설치될 경우 상류수역에서 유입되는 유기물과 영양염류의 증가 및 축적에 의해 수질악화를 초래하기 때문이다(Gleick, 2001).

### 3. 부착돌말의 지표성

부착돌말류와 환경요인과의 상관성을 파악하기 위하여 CCA (Canonical correspondence analysis)를 실시하였다. 분석결과, 전체적으로 부착돌말 분포특성(종수 및 현존량)을 근거로 하는 군집분석(cluster analysis) 결과와 유사하게 크게 세 구역으로 구분되었는데 G1은 Axis1의 우측에, G3은 Axis1의 좌측에, G2는 Axis의 상, 하로 각각 길게 분포하였다(Fig. 4a). 대부분 환경요인들은 axis1과의 높은 상관관계를 보였는데 Axis1에 대해서는 DO, pH, 탁도 순으로 나타났으며, Axis2에 대해서는 규소, 암모니아, BOD순으로 나타났다. 비교적 수질이 양호하였던 G1에 대하여 높은 상관성을 보인 요인은 출현종수와 DO 등이었으며, 수질이 오염되었던 G2와 G3은 탁도와 수온, 총인 등이 비교적 높은 상관성을 보였다(Fig. 4b).

각 그룹의 부착돌말 지표종은 G1에서는 *Nitzschia fonticola* (100%), *Gomphonema pseudoaugur* (92%), *Navicula saprophila* (85%), *Navicula seminuloides* (69%), *Achnanthes alteragracillima* (62%) 등을 포함한 18종, G2에서는 *Cocconeis placentula* (31%), *Achnanthes brevipes* (27%) 등을 포함한 2종, G3에서는 *Nitzschia gracilis* (78%), *Navicula salinarum* (60%), *Navicula cryptocephala* (57%), *Nitzschia subacicularis* (50%), *Navicula schroeterii* (46%) 등을 포함한 7종으로, 총 27종이 각 그룹의 지표종으로 나타났다(Fig. 4c). 선행연구에 따르면 G1의 지표종 *Nitzschia fonticola*, *Achnanthes alteragracillima*, *Cymbella silesiaca* 등은 비교적 넓은 생태 범위를 가지며 청정한 하천에서 주로 출현하는 호청수성종으로 알려져 있다(Krammer and Lange-Bertalot, 1988; Watanabe et al., 2005). G2의 지표종 *Cocconeis placentula*, *Achnanthes brevipes* 등은 중영양~부영양까지 생태 범위를 가지며 *Achnanthes brevipes*의 경우 기수역에서 출현하기도 한다. 한편 G3의 지표종 *Navicula salinarum*, *Navicula schroeterii* 등은 비교적 흔히 출현하는 종으로 기수역에서도 서식하고, 높은 전기전도도와 부영양된 수역에서 빈번하게 출현한다고 알려져 있다(Lange-Bertalot, 2001).

본 연구에서 한반도 서남부 하구역의 부착돌말 군집

은 크게 3개 유형으로 구분되었으며, G1은 하류에 인공보가 없는 자연형 하천의 비율이 가장 높은 조사지점으로 수질이 양호하고 다양한 부착돌말류가 출현하였다. G3은 조절하천 지점이 가장 많은 것으로 부착돌말 현존량은 다른 그룹과 큰 차이를 보이지 않았으나, 수질이 가장 심하게 오염되었다. 한편 G2는 조절하천과 비조절하천이 비슷한 비율로 이루어진 혼합형으로서 인공보가 형성되어 있는 지점 중 5지점은 해수와의 교류가 비교적 원활하였고, G3에 비해 수질은 양호하였으나 출현종수는 가장 낮은 특성을 보였다. 결국 3개 그룹에서 부착돌말 우점종은 거의 유사하였고, 하구역을 제외한 국내 대권역의 하천 부착돌말류 조사(Hwang et al., 2011), 한반도 하구역 부착돌말조사(Kim et al., 2013)의 결과들-현존량 및 출현종수 과는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

결론적으로 인공보가 설치된 조절하천(G2, G3)에서는 비조절하천(G1)에 비해 상대적으로 높은 전기전도도, BOD, 탁도, 질소, 인, 높은 염류소량 등을 보였으며 부착돌말류 출현종수는 뚜렷하게 감소하여 군집의 단순화가 일어났다. 그러나 각 그룹간 현존량의 차이는 보이지 않았는데 추후 부착돌말과 더불어 식물플랑크톤 조사가 병행된다면 인공보가 하구역 수질은 물론 1차 생산자에 미치는 영향을 보다 정확하게 파악할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 적 요

한반도 서남부 하천을 대상으로 2013년 5월(문순의 영향이 없었던 시기)에 환경요인 및 부착돌말 군집을 각각 조사하였다. 조사는 상류에 1개 이상의 댐이나 인공보가 형성된 조절하천(19개 지점)과 설치되어 있지 않은 비조절하천(19개 지점)으로 나누어 수질 및 부착돌말 군집조사를 실시하였다. 조사결과, 부착돌말 출현특성에 따라 한반도 서남부 하천은 비조절하천(G1), 혼합형하천(G2), 조절하천(G3) 등 3개 유형으로 구분되었다.

G1은 수질이 양호하고 다양한 부착돌말류가 출현한 반면, G3은 비록 수질은 불량하였으나 부착돌말 현존량이 크게 증가하거나 감소하지 않았다. 또한 G2의 경우 조절하천에 비해 수질은 양호하였지만 부착돌말의 종수는 가장 낮게 나타났다. 본 조사에서 출현한 부착돌말 우점종은 생태범위가 비교적 넓은 담수와 기수 보편종들로서 G1에서 *Nitzschia palea* (17%), *Navicula seminuloides* (11%), G2에서 *Nitzschia inconspicua* (19%), *Navicula perminuta* (9%), G3에서 *Nitzschia inconspicua* (15%),

*Nitzschia palea* (14%)으로 수질환경에 큰 영향을 보이지 않았으나 중수의 감소를 가져왔다. 그러나 G2와 G3과 같은 조절하천에서 비록 부착돌말 현존량은 높지 않았으나 부영양 상태(높은 영양염 및 엽록소량 등)를 나타내 하구역의 정확한 수환경 상태파악을 위하여 국내 연안에서 종종 조류발생을 일으킬 수 있는 부유성 돌말류에 대한 조사도 반드시 병행되어야 할 것으로 판단되었다.

## 사 사

본 연구는 2013년 하구수생태 건강성 조사 및 평가 사업에 의하여 수행하였으며, 조사 및 채집에 도움을 주신 조인환, 변정환 군에게 깊은 감사를 드립니다. .

## REFERENCES

- American Public Health Association (APHA). 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association., Washington, D.C.
- Biggs, B.J., D.G. Goring and V.I. Nikora. 1998. Subsidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form. *Journal of Phycology* **34**(4): 598-607.
- Boyd, S.R. 2001. Nitrogen in future biosphere studies. *Chemical Geology* **176**: 1-30.
- Boyer, E.W., C.L. Goodale, N.A. Jaworski and R.N. Howart. 2002. Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern USA. *Biogeochemistry* **57/58**: 137-169.
- Brant, R.A. and C.E. Herdendorf. 1972. Delineation of Great Lakes estuaries. Ohio State University, Center for Lake Erie Area Research.
- Cho, K.J. 1994. The studies on periphytic microalgae using artificial substrates for microalgae harvest. *Korean Journal of Limnological Society* **27**(1): 47-57.
- Choi, J.S., W.P. Jung, K.L. Lee, M.S. Yang and H.S. Kim. 2004. Seasonal Variation of Epilithic Diatom Community and an Assessment of Water Quality by DAIPo in the Water System of Ulleung Island. *Korean Journal of Limnological Society* **34**(4): 378-384.
- Everitt, B. 1993. Channel responses to declining flow on the Rio Grande between Ft. Quitman and Presidio, Texas. *Geomorphology* **6**(3): 225-242.
- Figueroa-Nieves, D., T.V. Royer and M.B. David. 2006. Controls on chlorophyll-*a* in nutrient-rich agricultural streams in Illinois, USA. *Hydrobiologia* **568**(1): 287-298.
- Flemer, D.A and M.A. Champ. 2006. What is the future fate of estuaries given nutrient over-enrichment, freshwater diversion and low flows?. *Marine Pollution Bulletin* **52**(3): 247-258.
- Gleick, P.H. 2001. Safeguarding our water-making every drop count. *Scientific American* **284**(2): 40-45.
- Hendey, N.I. 1974. The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms. *Microscopy* **32**: 423-426.
- Hirsch, R.M., R.B. Alexander and R.A. Smith. 1991. Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. *Water Resources Research* **27**: 803-813.
- Hong, J.S., R.H. Jung, I.S. Seo and K.T. Yoon. 1997. How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of shihwa dike in the west coast of Korea?. *The Korea Society of Fisheries and Aquatic Science* **30**(5): 882-895.
- Huang, W. and S. Foo. 2002. Neural network modeling of salinity variation in Apalachicola River. *Water Research* **36**(1): 356-362.
- Hwang, S.J., N.Y. Kim, S.A. Yoon, B.H. Kim, M.H. Park, K.A. You, H.Y. Lee, H.S. Kim, Y.J. Kim, J. Lee, O.M. Lee, J.K. Shin, E.J. Lee, S.L. Jeon and H.S. Joo. 2011. Distribution of benthic diatoms in Korean rivers and streams in relation to environmental variables. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* **47**(S1): S15-S33.
- Jeong, B.K., Y.S. Sin, S.R. Yang and C. Park. 2011. Monthly variation of Phytoplankton community in Asan bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **16**(4): 238-245.
- Keister J.E. and W.T. Peterson. 2003. Zonal and seasonal variations in zooplankton community structure off the central Oregon coast, 1998-2000. *Progress in Oceanography* **57**: 341-361.
- Kilshye Onema, J.M., D. Mazvimavi, D. Love and M.L. Mul. 2006. Effects of selected dams on river flows of Insiza River, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **31**(15): 870-875.
- Kim, H.K., Y.J. Kim, D.H. Won, S.J. Hwang, S.O. Hwang and B.H. Kim. 2013. Spatial and Temporal Distribution of Epilithic Diatom Communities in Major Harbors of Korean Peninsula. *Journal of Korean Society on Water Environment* **29**(5): 598-609.
- Kociolek, J.P. and S.A. Spaulding. 2000. Freshwater diatom biogeography. *Nova Hedwigia* **71**(1-2): 223-242.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007a. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Elsevier Book Co., Germany.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007b. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Basillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Elsevier Book Co., Germany.

- Lange-Bertalot, H. 2001. Diatom of Europe-Navicula sensu strict, 10 genera Separated from Navicula sensu lato Frustulia. Ganter Verlag A.R.G. and Ruggell K.G.
- Lee, J.J., J.H. Han, B.H. Lim, J.H. Park, J.K. Shin and K.G. An. 2013. Comparative Analysis of Fish Fauna and Community Structures Before and After the Artificial Weir Construction in the Mainstreams and Tributaries of Yeongsan River Watershed. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**(1): 103-115.
- Levinton, J.S. 1982. Marine Ecology. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. General Systems: Yearbook of the International Society for the Systems Sciences, 3.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. PCORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 4.41, MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- MOE/NIER (Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research). 2011. Passage route survey of migratory fishes before and after the construction of weirs and the fishway's effects. Yeongsan river environment research center, National institute of environmental research, 175pp.
- Morris G.L. and J. Fan. 1998. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watershed for sustainable use. McGraw-Hill, New York.
- Park, J.W., J.S. Choi and M.K. Kim. 2004. Variations of Epilithic Diatom Community and an Assessment of Water Quality by DAIPo in the Middle Reaches of the Nakdong River. *Korean Journal of Limnological Society* **37**(1): 70-77.
- Park, S.B., J.Y. Lee, M.H. Jang, H.W. Kim, J.M. Jeong, J.W. Kim and G.J. Joo. 1999. Water Quality and Phytoplankton Community Dynamics in a Weir Reach of the Yangsan Stream (1993-1996). *Korean Journal of Limnological Society* **32**(4): 331-340.
- Petts, G.E. 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography* **3**(3): 329-362.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity, New York: Wiley.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. The Mathematical Theory of Communication. Illinois Univ. Press, Univ.
- Shin, J.K. and K.J. Cho. 2000. Seasonal Dynamic and Pollution Status of the Water Quality in the Kum River Reservoir. *Korean Journal of Limnological Society* **33**(3): 251-259.
- Shin, Y.S. and B.B. Yoon. 2011. Change Taxonomic Composition of Phytoplankton and Environmental Factors after Construction of Dike in Yeongsan River Estuary. *Korean Journal of Environmental Biology* **29**(3): 212-224.
- Silva, M.A.M., G.F. Eça, D.F. Felix, D.F. Santos, A.G. Guimarães, M.C. Lima and M.F.L. de Souza. 2013. Dissolved inorganic nutrients and chlorophyll *a* in an estuary receiving sewage treatment plant effluents: Cachoeira River estuary (NE Brazil). *Environmental Monitoring and Assessment* **185**: 5387-5399.
- Simonsen, R. 1979. The diatom system: ideas on phylogeny. *Bacillaria* **2**: 9-71.
- Stevenson, R.J., M.L. Bothwell, R.L. Lowe and J.H. Thorp. 1996. Algal ecology: Freshwater benthic ecosystem, Access Online via Elsevier.
- Topping, D.J., D.M. Rubin and L.E. Vierra. 2000. Colorado River sediment transport: 1. Natural sediment supply limitation and the influence of Glen Canyon Dam. *Water Resources Research* **36**(2): 515-542.
- Watanabe, T. 2005. Picture Book and Ecology of the Freshwater Diatoms, Uchida Rokakuho Publishing Co., Tokyo, Japan.
- Wei, G., Z. Yang, B. Cui, B. Li, H. Chen, J. Bai and S. Dong. 2009. Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River, China. *Water Resources Management* **23**(9): 1763-1780.
- Yoon, Y.Y., D.H. Kim and S.M. Lee. 1999. Accumulation of pollutants in the lower course of the Namdae stream and effect of the water discharged from Kangnung hydroelectric power station. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **21**(11): 2221-2230.