

한반도 하구역 부착돌말류의 공간적 분포

김하경¹ · 조인환¹ · 김영호¹ · 이민혁^{1,3} · 김용재² · 원두희³ · 황수옥⁴ · 변정환^{5,7} · 황순진⁶ · 김백호^{7,*}

¹한양대학교 환경과학과, ²대진대학교 생명과학과, ³생태조사단, ⁴K-Water,
⁵국립환경과학원 한강물환경연구소, ⁶건국대학교 환경보건학과, ⁷한양대학교 생명과학과

Spatial Distribution of Epilithic Diatom Communities in the Estuary of Korean Peninsula. Kim, Ha-Kyung¹ (0000-0001-9279-8715), In-Hwan Cho¹ (0000-0002-1945-3478), Young-Hyo Kim¹ (0000-0002-4559-440X), Min-Hyuk Lee^{1,3} (0000-0001-9866-4136), Yong-Jae Kim² (0000-0003-3326-8372), Du-Hee Won³ (0000-0002-1435-7743), Su-Ok Hwang⁴ (0000-0002-9225-028X), Jung-Hwan Byun^{5,7} (0000-0001-5422-2950), Soon-Jin Hwang⁶ (0000-0001-7083-5036) and Baik-Ho Kim^{7,*} (0000-0002-7144-0770) (¹Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea; ²Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 11159, Republic of Korea; ³Doohee Institute of Ecological Research, Seoul 13814, Republic of Korea; ⁴K-waters, Korea Water Resources Corporation, Gyonggi 13841, Republic of Korea; ⁵Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi 12585, Republic of Korea; ⁶Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea; ⁷Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea)

Abstract With land-use (cover) and water quality, the distributional characteristics of epilithic diatom communities were studied with 193 samples from estuaries of Korean peninsula between 2015 and 2016. Of total 394 taxa classified, *Nitzschia perminuta* (19.6%) and *N. inconspicua* (14.0%) were the 1st and 2nd dominant species. Using a cluster analysis, the epilithic diatom communities of Korean estuaries were divided into four groups (G1-G4). Ecological characteristics of each group were followed: G1 was located in estuaries of the East Sea, and characterized by high forest land-use and high DO and low nutrients; G2 was the eastern part of the South Sea, and characterized by low turbidity and nutrients; G3 was the western part of the South Sea, and characterized by high agriculture, low electric conductivity and low salinity; G4 was the Yellow Sea, and characterized by high nutrients. The environmental factors having significant correlation with diatom distributions were as follows: TN to G1, turbidity to G2, agriculture to G3, and TP to G4. Moreover, the important factors affecting the occurrence of indicator species were forest land-use for *Fragilaria construens* var. *venter* in G1, turbidity for *Rhoicosphenia abbreviata* in G2, urban land-use and total phosphorus (TP) for *Bacillaria paradoxa* and *Hantzschia amphioxys* of G3, and TP and turbidity for *N. ovalis* and *Stephanodiscus invistatus* of G4. These results collectively indicate that the distribution of epilithic diatom communities in Korean peninsula was largely effected by water quality and land cover/use.

Key words: epilithic diatoms, water quality, land use/cover type, estuary, random forest model

Manuscript received 5 January 2018, revised 31 January 2018,
revision accepted 28 February 2018
* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0960, Fax: +82-2-2220-0960,
E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr

서 론

하구는 해수와 담수가 만나는 전이수역으로(Costanza *et al.*, 1997; Divya *et al.*, 2009) 물리적, 화학적 변화가 심하게 일어나며 이에 따라 담수와 해수 생물의 구성도 다양하게 나타나는 역동적인 생태계이다(Davies and Eyre, 2005; Divya *et al.*, 2009). 하구는 자정작용의 기능을 가지고 있으나 자연과 인간의 활동으로부터 발생된 오염물질이 자정작용의 허용치이상으로 유입될 때, 부영양화와 환경 질의 저하가 일어날 수 있다(Boyer *et al.*, 2002). 하구는 다양한 생물의 서식처는 물론 홍수와 다른 해양 재해들의 위협을 줄일 수 있고 자연 경관에 기여하며 지하수를 함유한다. 또한 하구에서의 상업적 활동은 경제에 기여를 하기도 한다(Flemer and Champ, 2006; Lee, 2010; Rho and Lee, 2014).

한반도는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있으며 좁은 국토면적에 비해 많은 해안선의 발달로 인해 약 460여 개의 하구역이 형성되어 있다(Rho and Lee, 2014). 동쪽의 하구는 단조로운 해안지대, 높은 해발고도를 가지며 수질이 양호하며, 남쪽과 서쪽의 하구들은 복잡한 해안선, 심한 조석차, 발달된 갯벌이 특징이다. 한반도 하구는 크게 한강-서해 한강-동해, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강, 제주 등 7개 구역으로 구분된다(Rho and Lee, 2014). 하구의 토지피복도에서 산림(산림 39.2%, 농경지 28.8%, 수역 16.4%, 도시 5.8%)의 비율은 한반도 전체의 산림 비율(65%)보다 낮다(Rho and Lee, 2014). 또한 하구에 축조된 댐이나 인공보에 의해 담수와 해수의 혼합이 차단되어 하구 순환이 없는 닫힌 하구와 시설물이 없어 담수와 해수가 혼합되는 하천 구간이 있는 열린 하구로 구분할 수 있다(Harrison *et al.*, 2000). 한반도의 서해와 남해 지역에 다목적 여러 하구 둑이나 방조제 그리고 농업용 수자원 확보를 위한 배수갑문 등의 구조물 설치로 인해 닫힌 하구의 수가 점차 증가하고 있다(Kim *et al.*, 2013).

수생태계 내 1차 생산자인 부착돌말은 다른 생물보다 이동성이 낮아 물리·화학적 요소들의 누적효과를 파악하기가 용이하기 때문에 수생태계 상태를 평가하기 좋은 지표 생물이다(Mulholland *et al.*, 1986; Dixit, 1992; Battarbee, 1994; Dixit and Smol, 1994; Lamberti, 1996; Kelly, 2003). 특히, 부착돌말은 낮은 운동성을 가지고 있어 다른 생물군보다 담수와 해수에서의 물리·화학적 변화에 매우 빠르게 반응을 한다(Lamberti, 1993; Leland and Porter, 2000). 그러므로 이동성이 높은 식물플랑크톤이나 운동성이 있는 대형 무척추동물과 어류보다 수생태계를 평가하기 위해 부착돌말을 이용하는 것이 더욱 용이하다(Santos *et al.*,

1996; Sullivan, 1999).

지금까지 한반도 하구역을 대상으로 하는 연구는 주로 수질을 포함한 식물플랑크톤, 식생구조, 어류, 저서동물 등의 생물군집에 초점을 맞추었다(Hong *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2004; Kim and Kim, 2005; Ok *et al.*, 2005). 또한 하천에 유입되는 영양물질이나 바다 양식사업으로 인한 부영양화 및 적조에 집중되어 있으며(Yoon *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012; Lee and Ahn, 2012; Shin, 2013), 부착돌말류를 이용한 하구역의 생태계 파악을 위한 연구는 매우 빈약하다(Kim *et al.*, 2013). 그러나 하구는 담수와 해수에 의해 정기적으로 물리·화학적 요인들이 심하게 교차되거나 혼합되기 때문에 이동성이 높은 식물플랑크톤, 저서동물, 어류 등을 이용하여 수생태의 상태를 파악하는 것은 시, 공간적으로 제한되기 쉽다(Kim *et al.*, 2015). 하구는 상류 하천에 비해 하천의 복잡성이 낮고 서식환경(하상, 노천울 등)이 단순하기 때문에 부착돌말을 하는 생물군이 지표성이 높다고 판단된다. 뿐만 아니라 부착돌말이 비록 현미경적 크기이지만 독특한 규산질 세포벽을 가지고 있어 종 동정이나 세포수 산정이 용이하다. 따라서 다양한 생물지리적 특성을 가진 한반도 하구역의 수환경-물리·화학적 변화를 이해하는 데 부착돌말류 분포와 발생에 관한 연구가 매우 적절하다고 판단하였다.

본 연구는 한반도 하구역의 수환경을 이해하기 위하여 2015~2016년 동안 하구의 193개 지점에서 부착돌말과 환경요인들을 조사하여 (1) 하구 부착돌말의 공간적 분포, (2) 부착돌말과 환경요인과의 관계, (3) 하구를 대표하는 지표 종들의 출현 예측, 등을 각각 분석하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 부착돌말 군집분석

본 연구는 제주권역을 제외한 7개의 권역을 2015년 5월과 2016년 5월에 조사하였다(5월은 강수로 인한 영향이 감소하는 시기이다). 물리적 특성을 고려하여 조사 지역은 동해하구(40 지점), 남해하구(92 지점) 그리고 서해하구(61 지점) 등 3지역들로 나누어졌다(Fig. 1). 연구지역들은 하구 수생태 건강성 조사지점에 따라 선정되었다(MOE/NIER, 2008).

각각의 지역에서 기질의 표면으로부터 부착돌말의 시료를 채집하였다. 부착돌말을 채집하기 위한 기질은 최소 7일 동안 수중에 잠겨 있었고 물 흐름과 일치되는 상부가 평평하고 10 cm 이상의 크기의 자연석을 선택하였다. 채집용 솔을 이용하여 기질의 25 cm²를 긁어 시료를 정량 채

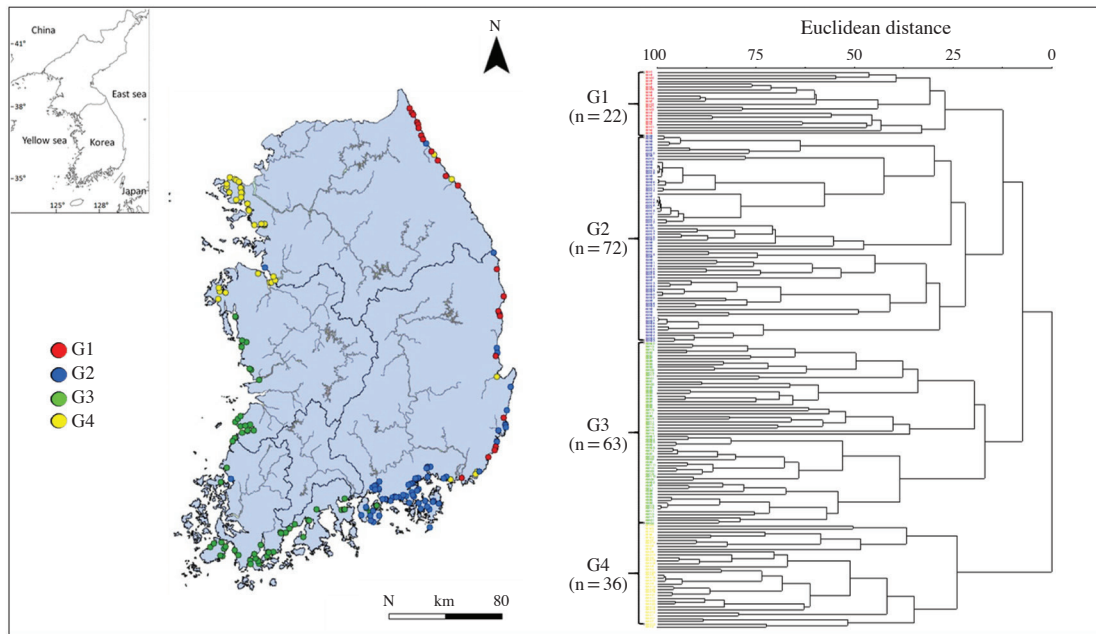


Fig. 1. Left; The map showing the 193 sampling stations for the water quality and epilithic diatom sampling in Korean estuaries between 2015 and 2016. Right; Dendrogram illustrating the sites affinity based on epilithic diatom abundance. Colors in figures presents the same groups; G1 (red), G2 (blue), G3 (green) and G4 (yellow).

집하였다. 부착돌말의 종 동정을 위한 시료는 채집 즉시 Lugol’s 용액 (Thronsdon, 1978)으로 고정한 후 연구실로 운반하였다. 시료는 Permanganate method (Hendey, 1974)의 방법으로 세정한 다음 봉입제를 이용하여 영구표본을 제작하였다. 부착돌말 표본은 광학현미경 (Nikon E600, Japan; Zeiss Axioskop Image 20)의 400~2000배 하에서 관찰하였다. 부착돌말의 종은 Krammer and Lange-Bertalot (1991, 2007) 등을 참조하여 동정하였고, 분류는 Simonson (1979)의 체계에 따랐다.

2. 환경요인 조사

각 조사지점의 토지 이용도 (%)는 USEPA (1999) 가이드라인에 따라 반경 50 m 이내에서 평가하였으며 (Barbour et al., 1999), 농경지, 도시 그리고 산림 등 각각의 유형을 백분율로 산출하였다. 7개의 환경요인들 (수온, 용존산소 (DO), pH, 전기전도도 (EC), 염도 그리고 탁도)은 다항목 수질 측정기인 Horiba U-50 (HORIBA Ltd., Kyoto, Japan)를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다.

수질 분석에 필요한 현장수 (2 L)는 각 조사지점에서 무균병에 채수하여 아이스박스 속에 냉암소 상태로 보관하여 연구실로 운반하였다. 생물학적 산소 요구량 (BOD)은 Winkler-azide법을 따라 300 mL의 BOD병에 현장수를 채집하여 암상태 배양기에서 상온 20°C로 5일 동안 배양한

후의 DO 농도와 현장에서 측정된 DO 농도의 차이로 계산하였다.

총질소 (TN) 농도는 카드뮴 환원법, 총인 (TP) 농도는 과황산염 분해 후 아스코르브산법으로 용존무기 농도를 각각 분광광도계 (Optizen POP, Mecasys Co., Ltd, Daejeon, Korea)를 이용해 측정하였다. 엽록소 (Chl-*a*) 농도와 유기물함량 (AFDM)은 조사지점에서 10 cm 이상의 크기에 표면이 평평한 돌로 3개 이상 선택하였다. 채집한 돌은 현장에서 기질 상부의 25 cm²의 넓이를 부드러운 솔을 이용하여 깨끗이 씻어낸 후 현장수를 이용하여 플라스틱 시료병에 담는다. 채집된 부착돌말 시료는 냉암소 조건을 유지하여 실험실로 운반 후 시료의 일부를 standard methods에 따라 측정하였다 (APHA, 2001).

3. 데이터 분석

부착돌말 군집의 특성을 파악하기 위해 지점별 출현종수와 현존량을 근거로 우점종 및 우점도 지수 (McNaughton, 1968), 다양도 지수 (Shannon and Weaver, 1948), 균등도 지수 (Pielou, 1975) 그리고 풍부도 지수 (Margalef, 1958)를 각각 산출하였다.

부착돌말의 현존량과 출현종수를 근거로 군집분석 (Cluster analysis)을 실시하였다. Ward’s linkage 방법과 Euclidean 거리를 이용하여 부착돌말 군집의 공간 분포를

계산하고, 부착돌말의 군집 유사성에 따라 여러 그룹으로 분류하였다(McCune and Grace, 2002).

Cluster analysis을 통하여 구분된 각 그룹의 지표종 및 지표값을 분석하기 위하여 Indicator species analysis (ISA)를 이용하였다. ISA는 비계층적 통계적 분석방법으로, 각 조사지점에서 각 종들의 상대풍부도와 상대빈도를 이용하여 지표값(indicator value, IndVal)을 계산하고 이를 토대로 지표종을 판별하게 된다. IndVal method (Dufrene and Legendre, 1997)에서 지표값은 0~100의 범위로 나타나며 숫자가 클수록 지표성이 큰 것을 의미한다(Petersen and Keister, 2003). 이렇게 나타난 지표값은 25 이상이며, 다른 그룹의 값보다 5배 이상 높은 지표값을 갖는 종(Good species)을 각 그룹의 지표종으로 선정하였다(Keister and Petersen, 2003). 지표종 분석의 유의성을 판단하기 위하여 Monte Carlo test를 사용하였다. Cluster analysis와 ISA에 이용된 부착돌말 자료는 전체 조사지점의 5% (8지점) 미만 지점에서 나타난 종은 rare taxa로 구분하여 통계분석에서 제외하였다. 또한 각 개체수의 변이를 줄이기 위하여 자연 로그(ln)로 변환을 하였으며, ln값이 불능이 되는 것을 방지하기 위하여 각 변수의 값에 1을 더해 계산하였다.

부착돌말의 군집분포와 환경요인 간의 관계를 평가하기 위하여 Canonical correspondence analysis (CCA)를 사용하였다(ter Braak, 1987). CCA 분석 결과 각 축의 유의성은 Monte Carlo permutations를 사용하여 평가하였으며, 환경요인들과 CCA 좌표축들 사이의 상관관계로부터 환경요인의 중요성을 판단하였다.

부착돌말의 분포에 대한 환경요인의 중요도를 평가하기 위해 Random forest model을 사용하였다. Random forest model은 잠재적 예측 변수와 반응 변수의 관계를 예측하고 평가하기 위한 비모수 통계 방법(non-parametric method) (Breiman, 2001)으로 다양한 환경 변수의 조합을 이용하여 예측하였다. 이 모델에서 사용되는 환경 변수들의 중요성은 각 환경요소의 상대적 중요도를 비교하기 위해 Minimum Description Length (MDL)를 이용하여 평가하고(Robnik-Sikonja, 2004), MDL의 값은 0에서 100까지로 변환하여 상대적 중요도를 비교하였다. 모델의 예측력을 평가하기 위해 정확도(accuracy rate; Ar), AUC (Area Under Curve)를 각각 산출하였다. 정확도는 출현과 비출현의 이분법에 의해 측정되며 범위는 0부터 1까지의 범위로 나타난다. AUC의 경우 모델 결과값의 신뢰성을 예측할 수 있으며 범위는 보통 0.5 (random)부터 1 (perfect discrimination or accuracy)까지로 나타나지만 이보다 낮은 값이 나타나기도 한다(Engler *et al.*, 2004).

그룹 간 군집특성(출현종수, 현존량), 군집지수, 환경

요인의 차이를 비교하기 위해 비모수 다중 비교 시험인 ANOVA를 Tukey's post hoc test 방법으로 실시하였다. 또한 그룹별 지표종 및 환경요인과의 관계분석을 위하여 Pearson's 상관분석 기법을 사용하였다. 위의 분석은 SPSS software (v. 21. SPSS Inc. Korea)를 이용하였다. Cluster analysis와 ISA, CCA 분석은 PC-Ord 프로그램을 이용하였으며(McCune and Mefford, 1999), Random forest model은 R 통계 프로그램의 CORElearn 패키지(Robnik-Sikonja and Savicky, 2012)로 실행하였다(<http://cran.r-project.org>).

결과 및 고찰

1. 부착돌말류의 출현특성

한반도 하구의 193지점에서 출현한 부착돌말은 총 394 분류군으로 조사되었다(not shown). 이는 2012~2014년의 3년 동안 161지점에서 조사된 10과 327 분류군(Kim *et al.*, 2015)보다 많이 출현하였는데 이는 본 조사가 Kim *et al.* (2015)의 연구에서 누락되었던 한강-서해 권역을 포함한 더 넓은 지역에서 진행되었기 때문으로 판단된다.

전체 조사지점 중 5% 미만으로 출현한 종을 제외한 총 144종을 대상으로 종 수 및 현존량(세포밀도)에 따라 cluster 분석을 실시한 결과, 4개의 그룹(G1, G2, G3, G4)으로 나누어졌다(Fig. 1). G1은 주로 동해에 분포하는 하구 지점(22 지점)이었고, G2는 주로 동해와 남해의 동부지역에 분포하는 지점(72 지점)이었으며, G3은 남해의 서부지역과 서해의 남부지역에 분포하는 지점(63 지점)인 반면에 G4는 대부분 서해의 북부지역에 분포하는 지점(36 지점)으로 구성되었다.

부착돌말의 분류군은 Achnanthaceae, Bacillariaceae, Entomoneidaceae, Eunotiaceae, Fragilariaceae, Melosiraceae, Naviculaceae, Surirellaceae 그리고 Thalassiosiraceae 등 9개 과(family)로 구성되었다(Table 1). Naviculaceae과는 모든 그룹에서 40% 이상으로 종 구성비가 가장 높았으며, 두 번째로 많이 출현한 과는 Bacillariaceae였다. 각 그룹별로 현존량이 가장 많은 분류군은 G1에서 Fragilariaceae과였으며 G2와 G3은 Bacillariaceae과였고, 가장 높은 종 구성비를 보였던 G4는 Naviculaceae과였다. 또한 G1에서 Eunotiaceae과는 출현하지 않았고, G3에서 Entomoneidaceae과가 출현하지 않았다.

본 연구에서 *Nitzschia perminuta*가 가장 높은 상대빈도(19.6%)로 조사되었으며 G2에서 우점종이었다. 그 다음으로 높은 상대빈도를 나타낸 종은 *N. inconspicua*, *Navicula gregaria* 등이었으며 G2와 G3에서 우점을 하였다(Fig.

Table 1. Relative number of diatom species (N) and density (D) of epilithic diatom community at family level distributed in Korean estuaries between 2015 and 2016. The estuaries were divided into four groups by cluster analysis based on epilithic diatom abundance. Classification of diatoms was followed to Simonsen's system.

Family (%)	G1		G2		G3		G4	
	N (%)	D (%)	N (%)	D (%)	N (%)	D (%)	N (%)	D (%)
Achnanthaceae	10.62	15.61	12.80	9.08	11.61	8.13	11.86	3.36
Bacillariaceae	16.81	31.82	17.60	67.61	16.96	38.43	17.80	27.35
Entomoneidaceae	0.88	0.48	0.80	0.04	0.00	0.00	0.85	0.07
Eunotiaceae	0.00	0.00	0.80	0.02	0.89	0.02	0.85	0.02
Fragilariaceae	15.04	34.55	13.60	0.78	10.71	7.17	10.17	4.58
Melosiraceae	0.88	2.38	1.60	0.61	1.79	6.42	0.85	0.19
Naviculaceae	48.67	13.58	43.20	21.41	44.64	33.31	46.61	33.56
Surirellaceae	1.77	0.13	2.40	0.22	2.68	0.72	1.69	0.16
Thalassiosiraceae	5.31	1.46	7.20	0.24	10.71	5.79	9.32	30.71

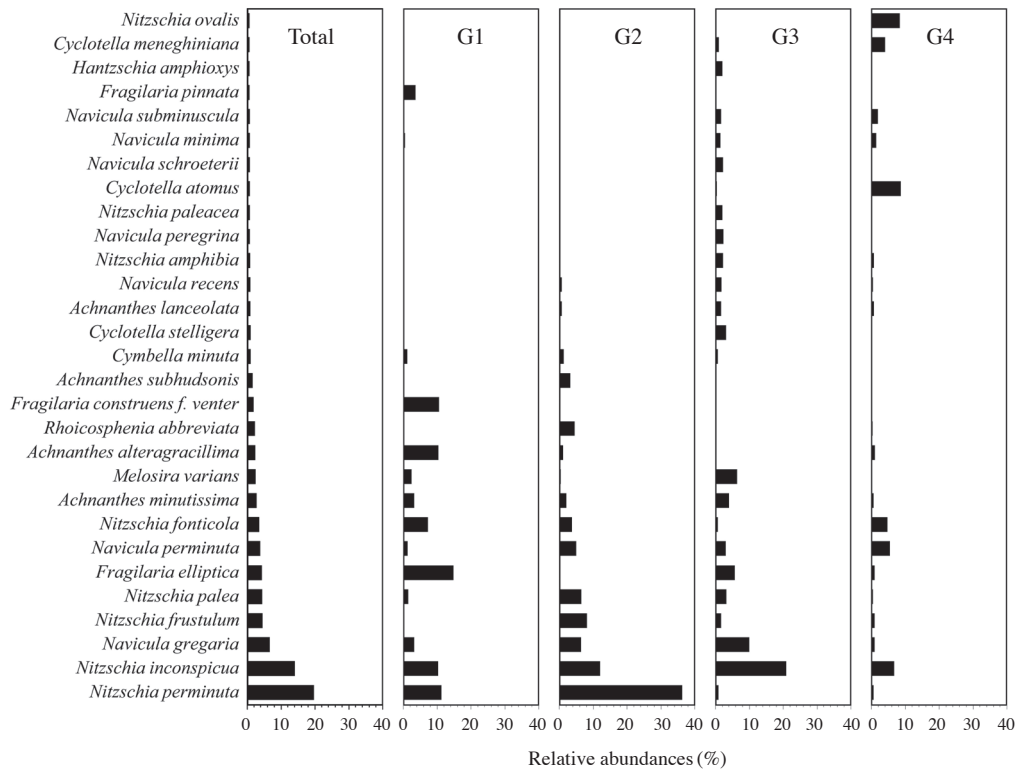


Fig. 2. Relative abundances (%) of major epilithic diatom species observed in four groups in Korean estuaries between 2015 and 2016. The listed species was occurring over 0.5% of total abundance in each group.

2). 한반도 하구에서 출현한 주요 부착돌말류는 헝가리, 스웨덴 (Kovács *et al.*, 2006), 미국 (Potapova and Charles, 2002), 아르헨티나, 우루과이 (Licursi *et al.*, 2006), 영국 (Underwood *et al.*, 1998) 등의 하구를 포함한 전 세계에서 높은 출현율을 나타내었다.

각 그룹의 우점도 지수는 G2 (0.62)에서 가장 높았으며 다양도 지수 (3.56), 풍부도 (3.22)와 균등도 지수 (0.69)는

G4에서 가장 높았다. G4에서 많은 종이 출현함으로써, 높은 다양도, 풍부도와 균등도를 나타내었으나 생물량과 우점도는 가장 낮았다 (Fig. 3).

2. 군집 그룹별 환경요인 특성

부착돌말의 현존량과 출현 종수를 근거로 하여 구분

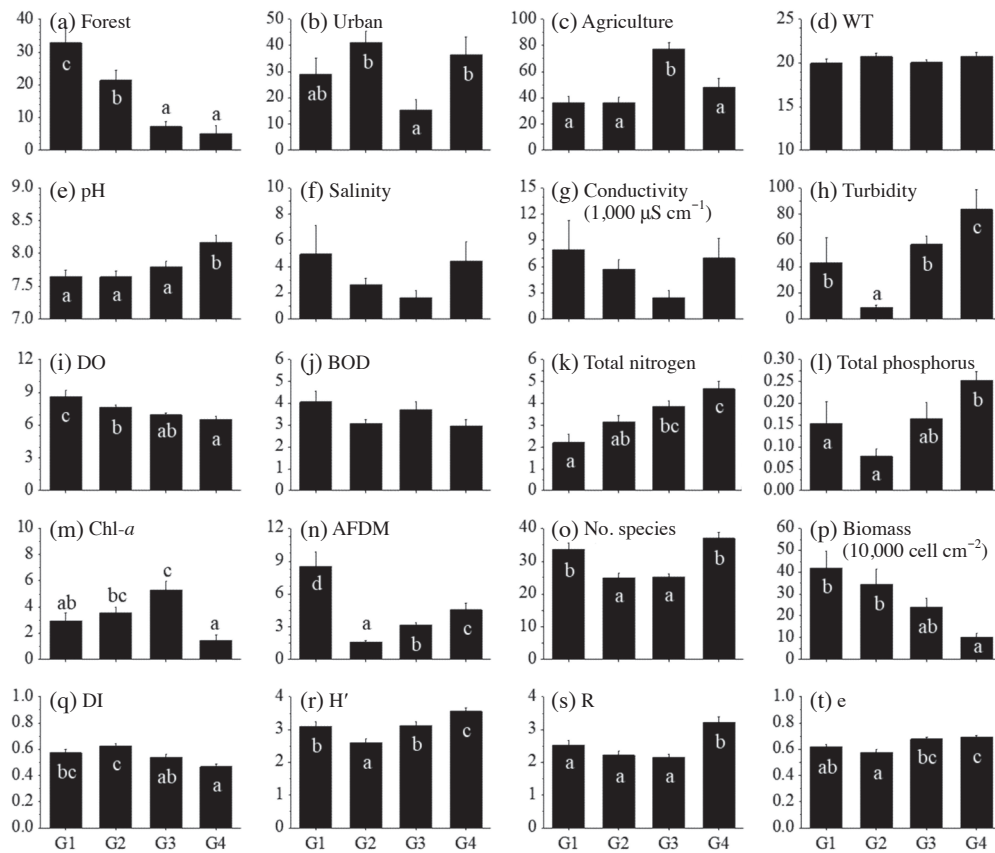


Fig. 3. Environmental variables in four groups of Korean estuaries between 2015 and 2016. Small letters (a, b and c) were Tukey's post hoc test with Bonferroni test. WT: Water temperature ($^{\circ}\text{C}$), DO: Dissolve oxygen (mg L^{-1}), BOD: Biochemical oxygen demand (mg L^{-1}), conductivity: electric conductivity, Chl-*a*: Chlorophyll-*a* ($\mu\text{g cm}^{-2}$), AFDM: Ash-free dry-matter (mg cm^{-2}), DI; dominant index, H': Shannon index, R; richness, e; evenness.

된 4가지 그룹(유형)의 물리-화학적 환경을 비교한 결과(ANOVA), 유의한 차이를 나타낸 요인들은 다음과 같다(Fig. 3). 토지이용도(land-use)에서 숲(forest)의 비율은 G3와 G4보다 G1과 G2에서 상대적으로 높았지만, 농지(agriculture) 비율은 G1과 G2보다 G3에서 유의하게 높았다($p < 0.05$). G1과 G2는 동해와 남-동부 지역으로 한강 동해 권역과 낙동강 권역이 이것에 속하며, 산림의 비율은 60% 이상이다(Rho and Lee, 2014). G3에 속하는 지점들은 낮은 지대에 분포하고 있고(Kim and Kim, 2005), 농지가 많은 영산강 권역과 금강 권역에 위치하고 있다. 본 그룹의 농경지 비율은 한국 전체 평균(28.8%)보다 높았는데 이것은 영산강과 금강 권역의 간척 사업으로 나타난 결과이다(Rho and Lee, 2014). G4의 하구 지점들은 금강 권역과 한강-서해 권역에 위치해 있고, 도시 비율이 높았으며. 이것은 한강-서해 권역의 평지 때문이다.

용존산소는 G1과 G2의 지점들에서 높았으며, pH와 탁도, 총질소, 총인은 G3과 G4에서 유의하게 높았다

($p < 0.05$). 특히 탁도(83.5NTU)와 총질소(4.665 mg L^{-1}), 총인(0.252 mg L^{-1})은 모두 G4에서 가장 높은 반면, 용존산소(6.5 mg L^{-1})는 가장 낮았다. 한편, 엽록소 농도는 탁도가 가장 높았던 G4에서 가장 낮았고, 유기물량은 G2에서 가장 낮았다($p < 0.05$). G4에서 출현 평균 종수(36.9)가 가장 높았고 G2에서 가장 낮았다(25.0). G1에서 현존량이($41.7 \times 10^4\text{ cell cm}^{-2}$) 가장 높았으며, 가장 낮은 G4($10.2 \times 10^4\text{ cell cm}^{-2}$)보다 4배 이상의 높은 값을 보였다.

동해와 동해 남부로 이루어진 G1과 G2는 산림 비율이 가장 높았으며 용존산소가 높고 영양염이 낮게 나타났다. 이것은 토지이용도가 숲일 때 영양염과 음의 상관관계를 보인다는 선행연구와 일치한다(Tong and Chen, 2002; Lee and Hwang, 2007). TN과 TP값은 농경지와 관련되어 있는데, G3의 농경지 이용도는 G2보다 높아 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다. G4에서 pH, 탁도, 총질소, 그리고 총인 농도가 가장 높았으며, 용존산소, 엽록소 농도는 가장 낮았다. G4(금강과 한강-서해 권역의 하구)에서 산림비율

Table 2. Relationship between indicator species and environmental variables in each group of Korean estuaries between 2015 and 2016. The estuaries were divided into four groups by cluster analysis based on diatom abundance.

Code	Forest	Urban	AGR	WT	pH	SAL	EC	TURB	DO	BOD	TN	TP	Chl- <i>a</i>	AFDM	G
FRCF	0.24**	0.09	-0.06	0.02	-0.16*	-0.04	0.09	-0.08	0.07	0.14	-0.17*	0.02	0.06	0.30**	1
NATR	0.15*	0.14	-0.09	-0.06	-0.05	0.24**	0.20**	0.07	0.07	-0.02	-0.24**	-0.06	0.01	0.41**	1
FRPI	0.20**	0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.04	0.10	-0.05	0.15*	0.12	-0.27**	-0.06	-0.01	0.37**	1
SYFA	0.16*	0.24**	-0.23**	-0.04	-0.04	0.31**	0.16*	-0.06	-0.12	-0.11	-0.27**	0.03	0.05	0.42**	1
ACCO	0.11	0.14	-0.16*	-0.06	-0.02	0.16*	0.14*	-0.05	0.07	0.14	-0.25**	0.06	-0.01	0.33**	1
FRCG	0.22**	0.010	0.07	-0.05	-0.11	-0.15*	-0.09	0.04	0.14	0.08	-0.18*	-0.11	-0.16*	0.19**	1
AMCP	0.09	0.04	0.06	-0.05	-0.01	0.01	0.09	0.01	-0.05	-0.07	-0.21**	-0.03	-0.08	0.24**	1
RHAB	0.25**	0.07	-0.02	0.09	-0.16*	0.02	-0.12	-0.38**	0.15*	-0.06	-0.15*	-0.33**	0.09	-0.36**	2
ACBE	0.02	0.24**	-0.25**	0.13	0.04	0.21**	0.02	-0.27**	-0.07	-0.02	-0.13	-0.12	0.18*	-0.08	2
COPL	0.10	0.04	-0.10	0.13	-0.19**	-0.03	-0.04	-0.34**	0.07	-0.02	-0.09	-0.11	-0.05	-0.30**	2
BAPA	-0.04	-0.23**	0.19**	0.13	0.00	-0.05	-0.05	0.19**	0.01	0.01	-0.10	-0.07	0.16*	0.09	3
HAAM	-0.08	-0.31**	0.23**	0.06	-0.08	-0.11	-0.03	0.23**	-0.05	0.09	-0.01	0.02	0.02	0.03	3
NIOV	-0.26**	-0.02	0.01	0.09	0.29**	-0.03	0.08	0.36**	-0.07	-0.09	0.31**	0.28**	-0.38**	0.12	4
STIN	-0.21**	0.03	-0.13	0.05	0.23**	0.07	0.11	0.29**	-0.04	-0.06	0.18*	0.22**	-0.21**	0.20**	4
NIPE	-0.17*	0.08	-0.11	0.07	0.20**	0.13	0.16*	0.33**	-0.22**	-0.03	0.15*	0.22**	-0.38**	0.18*	4
CYAT	-0.31**	-0.10	0.10	0.11	0.28**	-0.03	0.10	0.43**	-0.19**	0.03	0.19**	0.25**	-0.22**	0.21**	4
NAVE	-0.14*	-0.05	0.06	0.03	0.24**	-0.12	0.03	0.29**	0.00	-0.07	0.20**	0.20**	-0.28**	0.13	4
STHA	-0.27**	-0.04	0.03	0.07	0.25**	-0.00	0.09	0.43**	-0.16*	0.15*	0.22**	0.30**	-0.24**	0.18*	4
NAAT	-0.19**	-0.07	0.06	0.06	0.19**	-0.04	0.03	0.28**	-0.15*	-0.13	0.22**	0.26**	-0.23**	0.22**	4
NASP	-0.16*	-0.09	0.08	0.12	0.23**	-0.08	0.02	0.23**	-0.02	-0.07	0.20**	0.17*	-0.25**	0.05	4
AUAM	-0.15*	-0.01	0.02	-0.00	0.04	-0.01	0.04	0.26**	-0.07	0.01	0.17*	0.21**	-0.09	0.26**	4
SYAU	-0.11	-0.05	0.02	0.09	0.13	-0.05	0.02	0.26**	-0.06	0.02	0.12	0.20**	-0.15*	0.13	4
NAMN	-0.12	-0.05	0.12	0.08	0.16*	-0.14	-0.05	0.25**	-0.03	-0.13	0.23**	0.19**	-0.23**	0.10	4
NICN	-0.07	0.14*	-0.26**	0.06	-0.01	0.04	0.12	0.08	-0.05	0.04	0.16*	0.13	-0.12	0.09	4
NIFR	-0.04	0.04	-0.02	-0.15*	0.05	-0.03	0.01	0.02	0.05	0.03	0.05	0.04	0.01	0.07	4
AUGR	-0.13	-0.02	0.00	0.06	0.23**	-0.04	0.04	0.19**	0.02	0.00	0.07	0.11	-0.03	0.09	4

FRCF: *Fragilaria construens* var. *venter*, NATR: *Navicula tridentula*, FRPI: *Fragilaria pinnata*, SYFA: *Synedra fasciculata*, ACCO: *Achnanthes conspicua*, FRCG: *Fragilaria capucina* var. *gracilis*, AMCP: *Amphora copulata*, RHAB: *Rhoicosphenia abbreviata*, ACBE: *Achnanthes brevipes* var. *intermedia*, COPL: *Cocconeis placentula* var. *lineata*, BAPA: *Bacillaria paradoxa*, HAAM: *Hantzschia amphioxys*, NIOV: *Nitzschia ovalis*, STIN: *Stephanodiscus invistatus*, NIPE: *Nitzschia pellucida*, CYAT: *Cyclotella atomus*, NAVE: *Navicula veneta*, STHA: *Stephanodiscus hantzschii*, NAAT: *Navicula atomus*, NASP: *Navicula saprophila*, AUAM: *Aulacoseira ambigua*, SYAU: *Synedra acus* var. *angustissima*, NAMN: *Navicula minuscula*, NICN: *Nitzschia constricta*, NIFR: *Nitzschia frustulum*, AUGR: *Aulacoseira granulata*.
 AGR; agriculture, WT: water temperature, DO: dissolved oxygen, BOD: biochemical oxygen demand, TURB: turbidity, EC: electric conductivity, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus, Chl-*a*: chlorophyll-*a*, AFDM: ash-free dry matter, G: group, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

은 가장 낮았고 도시 비율은 가장 높았다. 이와 같은 도시 비율은 도시화에 따른 자연을 수용하고, 자정작용을 할 수 있는 한계치 이상으로 인간활동이 많고, 다량의 오염물질이 유입됨에 따라 영양염 농도가 높게 나타난 것으로 보인다(Lee *et al.*, 2009). 한반도 서해안은 갯벌이 발달되어 있으며 조수 차이가 8m 이상으로 매우 커서 조류에 의해 바다의 펄이 부상됨으로써 수중내 높은 탁도가 발생되고 있다(Jeong, 2013).

3. 부착돌말 분포와 환경요인과의 관계

각 그룹의 지표종과 환경요인의 관계는 Table 2와 같다. 대부분의 그룹 지표종은 산림 비율, TN 그리고 AFDM과 높은 상관관계를 보였다. 특히 산림 비율은 G1과 G2의 지표종과 양의 상관관계를 보였으며 G3과 G4의 지표

종과 음의 상관관계를 보였다. 총질소 농도는 G4의 지표종과 양의 상관관계를 보였으나 G1과 G2의 지표종과는 음의 상관관계를 보였다. 또한, 탁도는 G2의 지표종과 음의 상관관계를 보였으나 G3와 G4의 지표종과는 양의 상관관계를 보였다. AFDM은 G2의 지표종과 음의 상관관계를 가지나 다른 그룹들의 지표종과는 양의 상관관계를 보였다. G4에서 *Cyclotella atomus*, *Navicula atomus* 그리고 *N. saprophila*는 TN, TP와 양의 상관관계를 보였으나 산림의 비율과는 음의 상관관계를 보임으로서 오염내성종의 특성(Jüttner *et al.*, 1996; Watanabe *et al.*, 2005)을 잘 나타내고 있다. G1의 *Fragilaria capucina* var. *gracilis*와 *Achnanthes conspicua*는 TN과 음의 상관관계를 나타내었고, 이 결과는 오염민감종(Watanabe *et al.*, 2005) 특성을 나타내고 있다. G2의 *Rhoicosphenia abbreviata*와 *Cocconeis placentula* var. *lineata*는 탁도, BOD, TN, TP, AFDM과 음

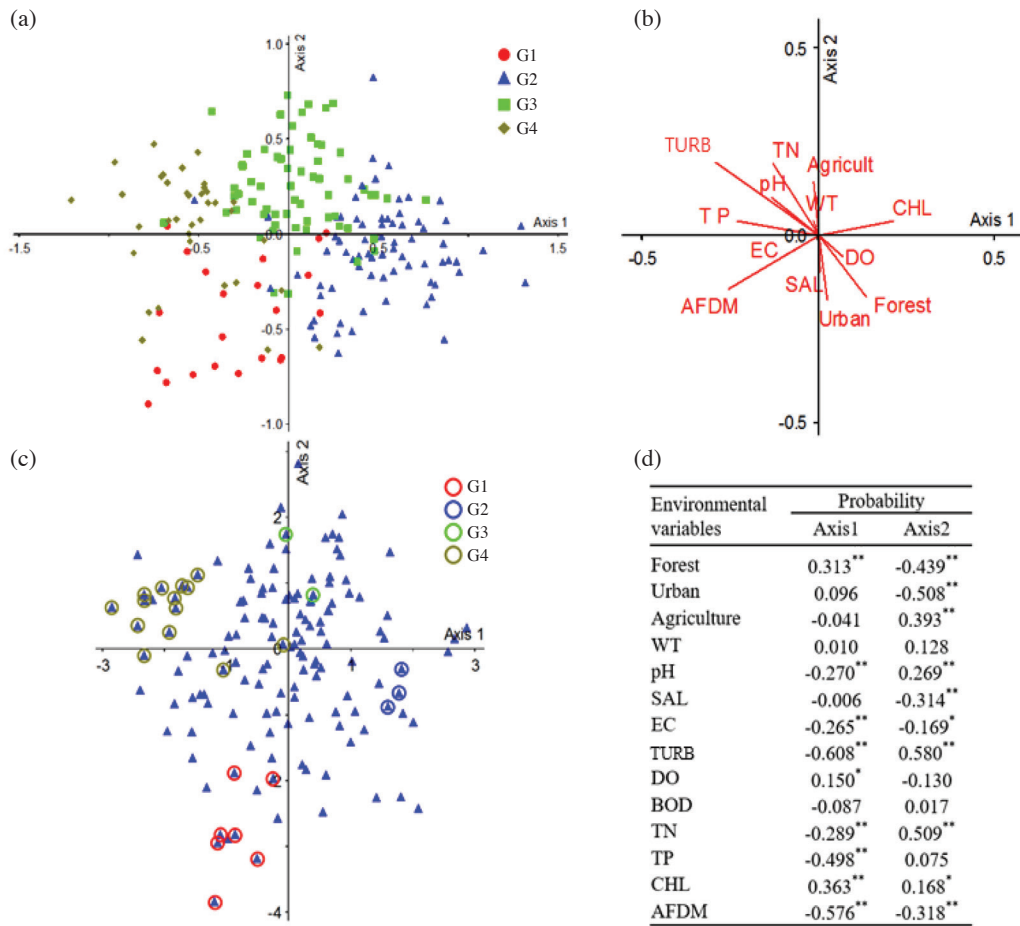


Fig. 4. (a) CCA ordination showing the distributions of four diatom groups in Korean estuaries between 2015 and 2016. (b) Environmental variables affecting epilithic diatom distribution. (c) Distributions of epilithic diatoms included indicator species. (d) Correlation coefficients between environmental variables and the CCA axes 1 and 2. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. WT: Water temperature, SAL: Salinity, DO: Dissolve oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, NTU: Turbidity, EC: Electric conductivity, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, CHL: Chlorophyll-*a*, AFDM: Ash-free dry matter.

의 상관관계를 나타내고 있으며, 이것은 또한 오염민감종으로 (Jüttner *et al.*, 1996; Watanabe *et al.*, 2005) 분류되고 있다.

4. 부착돌말 분포에 대한 환경요인의 영향

CCA 분석은 부착돌말의 분포에 대한 환경요인들의 영향을 제시해주고 있다(Fig. 4). G1은 Axis 2의 음의 방향, G2는 Axis 1의 양의 방향에, G3은 Axis 2의 양의 방향 그리고 G4는 Axis 1 음의 방향에 위치하였다(Fig. 4a). CCA의 화살표들은 각각의 환경요인들의 상관계수를 나타낸 것이다(Fig. 4b). Axis 1에 대해서 탁도($r = -0.608$), AFDM($r = -0.576$), TP($r = -0.498$), Chl-*a*($r = 0.363$) 그

리고 산림($r = 0.313$)과 높은 상관성을 보였으며, Axis 2에 대해서 탁도($r = 0.580$), TN(0.509), 도시($r = -0.508$) 그리고 산림($r = -0.439$) 등이 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지표종들을 포함한 부착돌말들의 분포는 Fig. 4c에 나타나 있다. *Fragilaria fasciculata*, *Achnanthes conspicua*, *F. capucina* var. *gracilis*와 *Amphora copulata* 등 G1의 지표종들은 산림의 영향을 받는 것으로 나타났는데 이들 종은 대체로 빈-중영양 상태의 수역에서 주로 생육하는 호청수성종이거나 광적응성종이다(Patrick and Reimer, 1975; Krammer and Lange-Bertalot, 1991; Watanabe *et al.*, 2005). *Cyclotella atomus*, *N. atomus*, *N. saprophila*와 같은 G4의 지표종은 오염 내성종이며(Watanabe *et al.*, 2005), 탁도, TP와 높은 상관관계성을 보인다(Fig. 4d).

Table 3. List of epilithic diatoms and the 1st and 2nd important variables predicting species occurrence by random forest in Korean estuaries between 2015 and 2016. Ar: Accuracy rate, AUC: Area Under the Curve, GI: group indicator.

Species	Ar	AUC	Important variables		GI
			1st	2nd	
<i>Achnanthes alteragracillima</i> Lange-Bertalot	0.83	0.98	TN	TURB	
<i>Achnanthes brevipes</i> Agardh	0.88	0.99	pH	TP	
<i>Achnanthes brevipes</i> var. <i>intermedia</i> (Kützing) Cleve	0.88	0.98	TURB	SAL	2
<i>Achnanthes clevei</i> Grunow	0.94	1.00	TURB	TN	
<i>Achnanthes conspicua</i> Ant. Mayer	0.93	0.99	TN	Forest	1
<i>Achnanthes convergens</i> Kobayasi, Nagumo & Mayama	0.87	0.96	EC	AGR	
<i>Achnanthes delicatula</i> (Kützing) Grunow	0.82	0.99	TN	pH	
<i>Achnanthes exigua</i> Grunow	0.87	1.00	TURB	DO	
<i>Achnanthes hungarica</i> (Grunow) Grunow	0.91	1.00	AGR	Urban	
<i>Achnanthes inflata</i> (Kützing) Grunow	0.90	0.99	TP	TURB	
<i>Achnanthes lanceolata</i> (Brébisson) Grunow	0.92	0.99	pH	TURB	
<i>Achnanthes minutissima</i> Kützing	0.86	0.95	SAL	TP	
<i>Achnanthes subhudsonis</i> Hustedt	0.90	0.98	BOD	pH	
<i>Amphora australiensis</i> J. John	0.93	0.99	TN	TP	
<i>Amphora coffeaeformis</i> (Agardh) Kützing	0.85	0.99	SAL	TURB	
<i>Amphora copulata</i> (Kützing) Schoeman and Archibald	0.90	0.98	Urban	AGR	1
<i>Amphora montana</i> Krasske	0.94	0.99	DO	pH	
<i>Amphora pediculus</i> (Kützing) Grunow in Van Heurck	0.91	1.00	SAL	BOD	
<i>Amphora strigosa</i> Hustedt	0.94	0.99	EC	SAL	
<i>Amphora veneta</i> Kützing	0.90	0.96	EC	SAL	
<i>Aulacoseira alpigena</i> (Grunow) Krammer	0.94	0.99	EC	BOD	
<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grunow) Simonsen	0.90	0.96	Urban	SAL	4
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	0.91	0.98	TURB	pH	4
<i>Bacillaria paradoxa</i> Gmelin	0.88	0.98	Urban	TURB	3
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	0.89	1.00	DO	Forest	
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Grunow	0.94	1.00	TP	TURB	
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (Ehrenberg) Van Heurck	0.86	0.98	TURB	TP	2
<i>Cyclotephanos dubius</i> (Hustedt) Round	0.95	0.99	TN	TP	
<i>Cyclotella atomus</i> Hustedt	0.91	0.97	TURB	Forest	4
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	0.87	0.97	TP	TURB	
<i>Cyclotella pseudostelligera</i> Hustedt	0.83	0.97	TURB	TP	
<i>Cyclotella radiosa</i> (Grunow) Lemmermann	0.93	1.00	TP	AGR	
<i>Cyclotella stelligera</i> Cleve & Grunow	0.90	1.00	TP	EC	
<i>Cymbella affinis</i> Kützing	0.91	0.98	EC	Urban	
<i>Cymbella cistula</i> (Ehrenberg) O. Kirchner	0.95	0.99	pH	TP	
<i>Cymbella minuta</i> Hilse in Rabenhorst	0.86	0.99	TP	EC	
<i>Cymbella silesiaca</i> Bleisch in Rabenhorst	0.85	0.96	TURB	SAL	
<i>Cymbella sinuata</i> W. Gregory	0.95	0.99	SAL	TURB	
<i>Cymbella tumida</i> (Brébisson) Van Heurck	0.87	0.97	TURB	EC	
<i>Diploneis interrupta</i> (Kützing) Cleve	0.94	0.98	DO	Urban	
<i>Diploneis subovalis</i> Cleve	0.87	0.98	TN	pH	
<i>Entomoneis alata</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	0.91	0.96	SAL	pH	
<i>Eunotia minor</i> (Kützing) Grunow	0.95	1.00	EC	SAL	
<i>Fragilaria capitellata</i> (Grunow) J. B. Petersen	0.90	0.98	Urban	AGR	
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières	0.83	0.95	AGR	pH	
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracilis</i> (Østrup) Hustedt	0.94	1.00	EC	SAL	1
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>vaucheriae</i> (Kützing) Lange-Bertalot	0.95	0.99	SAL	TURB	
<i>Fragilaria construens</i> var. <i>venter</i> (Ehrenberg) Grunow	0.87	0.98	Forest	BOD	1
<i>Fragilaria construens</i> var. <i>binodis</i> (Ehrenberg) Grunow	0.94	0.98	SAL	EC	
<i>Fragilaria elliptica</i> Schumann	0.96	0.99	TURB	TN	
<i>Fragilaria parva</i> (Grunow) A. Tuji & D. M. Williams	0.92	1.00	BOD	Urban	
<i>Fragilaria pinnata</i> Ehrenberg	0.89	0.97	TN	AGR	1

Table 3. Continued.

Species	Ar	AUC	Important variables		GI
			1st	2nd	
<i>Fragilaria rumpens</i> (Kützing) G. W. F. Carlson	0.91	0.99	TURB	pH	
<i>Fragilaria rumpens</i> var. <i>familiaris</i> (Kützing) Cleve-Euler	0.89	0.99	EC	SAL	
<i>Fragilaria rumpens</i> var. <i>fragilarioides</i> (Grunow) Cleve-Euler	0.94	0.99	Forest	AGR	
<i>Gomphonema clevei</i> Fricke in Schmidt	0.91	0.99	Forest	SAL	
<i>Gomphonema lagenula</i> Kützing	0.79	1.00	SAL	BOD	
<i>Gomphonema minutum</i> (Agardh) Agardh	0.94	0.99	TURB	AGR	
<i>Gomphonema parvulum</i> (Kützing) Kützing	0.83	0.97	EC	SAL	
<i>Gomphonema pseudoaugur</i> Lange-Bertalot	0.87	0.97	TP	SAL	
<i>Gomphonema quadripunctatum</i> (Østrup) Wislouch	0.93	1.00	TURB	AGR	
<i>Gomphonema truncatum</i> Ehrenberg	0.95	1.00	EC	DO	
<i>Gyrosigma acuminatum</i> (Kützing) Rabenhorst	0.91	0.99	AGR	TURB	
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow	0.90	0.98	TP	AGR	3
<i>Melosira nummuloides</i> Agardh	0.92	0.99	pH	EC	
<i>Melosira varians</i> Agardh	0.91	0.98	EC	pH	
<i>Meridion circulare</i> var. <i>constrictum</i> (Ralfs) Van Heurck	0.91	0.99	EC	SAL	
<i>Navicula accomoda</i> Hustedt	0.91	1.00	TP	TURB	
<i>Navicula atomus</i> (Kützing) Grunow	0.93	0.98	TN	TP	4
<i>Navicula atomus</i> var. <i>permitis</i> (Hustedt) Lange-Bertalot	0.97	1.00	SAL	pH	
<i>Navicula capitata</i> Ehrenberg	0.88	0.97	Urban	Forest	
<i>Navicula capitata</i> var. <i>hungarica</i> (Grunow) R. Ross	0.94	0.97	Forest	EC	
<i>Navicula capitatoradiata</i> Germain	0.94	0.98	AGR	EC	
<i>Navicula cincta</i> (Ehrenberg) Ralfs in Pritchard	0.92	1.00	SAL	BOD	
<i>Navicula clementis</i> Grunow	0.94	1.00	AGR	Urban	
<i>Navicula contenta</i> Grunow	0.87	0.97	AGR	TP	
<i>Navicula cryptocephala</i> Kützing	0.93	0.98	EC	SAL	
<i>Navicula cryptotenella</i> Lange-Bertalot	0.83	0.98	BOD	TURB	
<i>Navicula goeppertiana</i> (Bleisch in Rabenhorst) H. L. Smith	0.89	0.99	BOD	AGR	
<i>Navicula gregaria</i> Donkin	0.85	0.97	TN	SAL	
<i>Navicula halophila</i> (Grunow) Cleve	0.94	0.99	SAL	EC	
<i>Navicula menisculus</i> Schumann	0.91	0.99	BOD	AGR	
<i>Navicula minima</i> Grunow in Van Heurck	0.92	0.98	EC	TURB	
<i>Navicula minuscula</i> Grunow in Van Heurck	0.95	0.98	TP	SAL	4
<i>Navicula mutica</i> Kützing	0.91	1.00	EC	pH	
<i>Navicula mutica</i> var. <i>ventricosa</i> (Kützing) Cleve & Grunow	0.91	0.99	pH	TN	
<i>Navicula notha</i> J. H. Wallace	0.94	1.00	EC	TP	
<i>Navicula peregrina</i> (Ehrenberg) Kützing	0.93	1.00	TURB	Urban	
<i>Navicula perminuta</i> (Kützing) Cleve & Grunow	0.89	0.98	TP	EC	
<i>Navicula phyllepta</i> Kützing	0.90	0.98	SAL	pH	
<i>Navicula pupula</i> Kützing	0.84	0.98	SAL	EC	
<i>Navicula pygmaea</i> (Kützing) Pantoczek	0.94	0.99	Urban	EC	
<i>Navicula radiosa</i> Kützing	0.91	0.99	TN	SAL	
<i>Navicula recens</i> (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot	0.78	1.00	EC	TP	
<i>Navicula rhynchocephala</i> Kützing	0.92	0.99	AGR	TURB	
<i>Navicula salinarum</i> Grunow in Cleve & Grunow	0.87	0.97	AGR	Urban	
<i>Navicula saprophila</i> Lange-Bertalot & Bonik	0.92	0.98	TP	pH	4
<i>Navicula schroeteri</i> Meister	0.90	0.99	TN	pH	
<i>Navicula seminuloides</i> Hustedt	0.95	0.99	TURB	EC	
<i>Navicula seminulum</i> Grunow	0.94	0.99	TP	EC	
<i>Navicula subatomoides</i> Hustedt	0.94	1.00	AGR	Forest	
<i>Navicula subminuscula</i> Manguin	0.89	0.98	TP	TN	
<i>Navicula tenera</i> Hustedt	0.87	0.99	BOD	Forest	
<i>Navicula tridentula</i> Krasske	0.91	0.99	AGR	TURB	1
<i>Navicula trivialis</i> Lange-Bertalot	0.86	0.99	AGR	DO	

Table 3. Continued.

Species	Ar	AUC	Important variables		GI
			1st	2nd	
<i>Navicula veneta</i> Kützing	0.92	0.97	TP	SAL	4
<i>Navicula viridula</i> var. <i>rostellata</i> (Kützing) Cleve	0.89	1.00	TURB	TP	
<i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith	0.94	0.99	SAL	AGR	
<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow	0.91	0.97	SAL	TP	
<i>Nitzschia calida</i> Grunow in Cleve & Grunow	0.86	0.99	DO	EC	
<i>Nitzschia capitellata</i> Hustedt	0.88	0.99	SAL	TP	
<i>Nitzschia clausii</i> Hantzsch	0.95	1.00	SAL	EC	
<i>Nitzschia communis</i> Rabenhorst	0.88	0.99	SAL	EC	
<i>Nitzschia constricta</i> (Kützing) Ralfs	0.87	0.99	AGR	EC	4
<i>Nitzschia dissipata</i> (Kützing) Grunow	0.83	0.98	TP	TN	
<i>Nitzschia filiformis</i> (W. Smith) Hustedt	0.82	0.98	AGR	TURB	
<i>Nitzschia fonticola</i> Grunow in Cleve & Möller	0.88	0.97	AGR	SAL	
<i>Nitzschia frustulum</i> (Kützing) Grunow in Cleve & Grunow	0.81	0.98	EC	AGR	4
<i>Nitzschia gracilis</i> Hantzsch	0.92	0.98	TP	Urban	
<i>Nitzschia inconspicua</i> Grunow	0.86	0.98	TURB	EC	
<i>Nitzschia levidensis</i> (W. Smith) Grunow	0.94	0.99	EC	TURB	
<i>Nitzschia linearis</i> W. Smith	0.88	0.99	TURB	AGR	
<i>Nitzschia littoralis</i> Grunow in Cleve & Grunow	0.93	0.98	BOD	EC	
<i>Nitzschia ovalis</i> H. J. Arnett	0.95	0.98	TP	TURB	4
<i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W. Smith	0.90	0.97	SAL	AGR	
<i>Nitzschia paleacea</i> (Grunow) Grunow in Van Heurck	0.82	1.00	SAL	TP	
<i>Nitzschia pellucida</i> Grunow	0.92	0.98	TURB	TP	4
<i>Nitzschia perminuta</i> (Grunow) M. Peragallo	0.91	0.98	TURB	BOD	
<i>Nitzschia tryblionella</i> Hantzsch in Rabenhorst	0.91	1.00	EC	TN	
<i>Reimeria sinuata</i> (Gregory) Kociolek & Stoermer	0.93	1.00	EC	TP	
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (Agardh) Lange-Bertalot	0.92	0.97	TURB	TP	2
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow	0.95	0.98	TP	TURB	4
<i>Stephanodiscus invisitatus</i> Hohn & Hellermann	0.93	0.99	TURB	AGR	4
<i>Surirella angusta</i> Kützing	0.85	0.98	EC	SAL	
<i>Surirella minuta</i> Brébisson in Kützing	0.82	0.97	BOD	Urban	
<i>Surirella ovata</i> Kützing	0.94	0.99	TP	TURB	
<i>Synedra acus</i> Kützing	0.91	0.98	DO	TURB	
<i>Synedra acus</i> var. <i>angustissima</i> (Grunow) Van Heurck	0.93	0.98	pH	DO	4
<i>Synedra fasciculata</i> (C. Agardh) Kützing	0.89	0.99	TN	SAL	1
<i>Synedra pulchella</i> (Ralfs in Kützing) Kützing	0.88	0.99	AGR	EC	
<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Ehrenberg	0.84	0.95	AGR	SAL	
<i>Tabularia fasciculata</i> (Agardh) Williams & Round	0.93	1.00	SAL	EC	
<i>Thalassiosira bramaputrae</i> (Ehrenberg) Håkansson & Locker	0.85	0.98	Urban	AGR	
<i>Thalassiosira weissflogii</i> (Grunow) G. Fryxell & Hasle	0.93	0.99	SAL	TP	

TURB: turbidity, SAL: salinity, AGR: agriculture, DO: Dissolve oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, EC: Electric conductivity, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus.

5. 부착돌말의 출현 예측

Random Forest 모델 (Robnik-Sikonja, 2004)을 이용하여 한반도 하구에서 출현한 총 144분류군을 대상으로 이들의 출현에 영향을 주는 요인과 예측률(신뢰도)을 조사하였다. 144분류군 중에 *Navicula atomus* var. *permitis*는 가장 높은 예측률을 보였다 (Ar: 0.97, AUC: 1.00). *Eunotia minor*, *Gomphonema truncatum* 그리고 *Nitzschia clausii*의 예측

률 또한 높았으나 (Ar: 0.95, AUC: 1.00) *N. recens*는 가장 낮은 예측률(0.78)을 가졌다. 부착돌말의 출현에 영향을 미치는 중요한 요소들은 탁도(22 species, 15.3%), 전기전도도(22 species, 15.3%), 염도(22 species, 15.3%) 그리고 총인 이었다(20 species, 13.9%). 이러한 환경요인들은 59.8%의 부착돌말의 출현을 설명하였다(Table 3). 탁도와 전기전도도는 Kim *et al.* (2015)의 연구에서도 중요한 예측 요소들이었다. 단기적으로 높은 탁도는 광합성과 호흡을

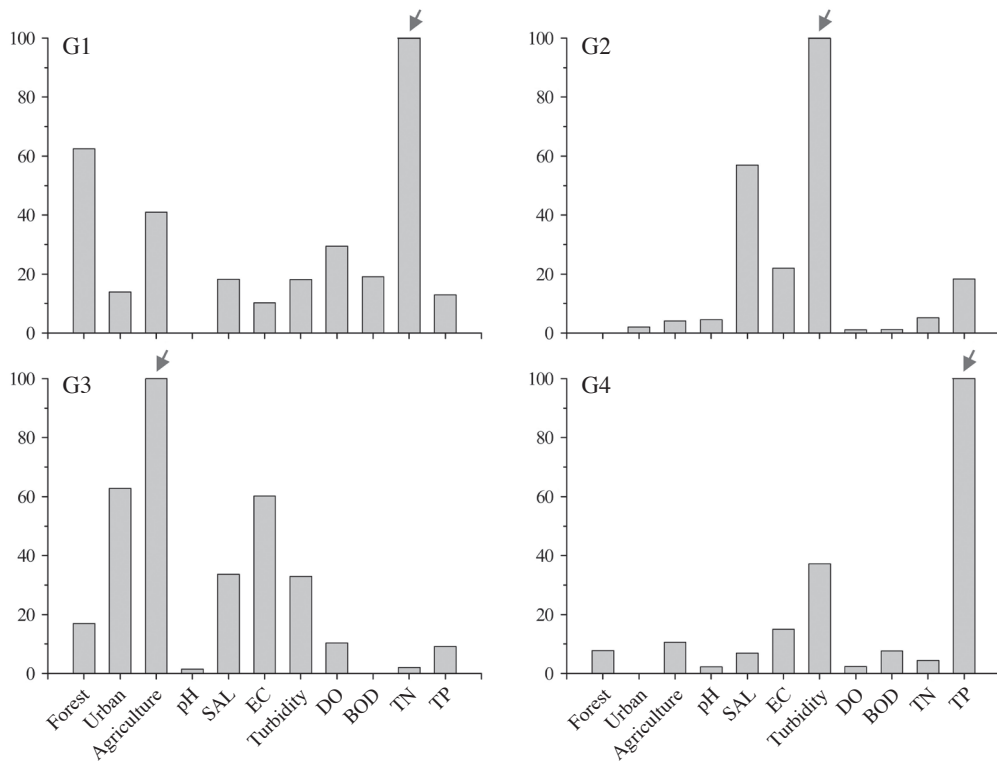


Fig. 5. Relative importance (%) of predictable variables using a random forest model in four epilithic diatom communities defined by cluster analysis in Korean estuaries between 2015 and 2016. Arrow is the most predictable variable on each community.

위한 빛과 용존산소를 차단한다. 장기적으로는 토사와 함께 유입된 입자성 영양물질의 점차적인 용해를 거쳐 수체 내 조류 성장을 유도한다(Kirk, 1994; Wetzel, 2001). 이것이 탁도가 부착돌말의 출현을 예측하는 데 중요한 환경 요소들 중 하나인 이유이다. 부착돌말 군집의 형성에는 전기 전도도도 중요하다(Potapova and Charles, 2003; Soinenen *et al.*, 2004). 다른 부착돌말들은 염도에 대한 다른 저항성 정도를 가지고 있는 반면에, 대부분의 부착돌말들은 최적 내성범위의 염분에 따라 생장이 결정된다(Wilson *et al.*, 1994; Underwood and Provot, 2000). 인은 조류의 성장을 돕고 부착돌말의 출현을 예측하는 중요 환경요인들 중의 하나로서 돌말군집에서 다양성을 결정하는 중요한 인자임을 설명한다(Logan and Taffs, 2013).

한편, 각 그룹별 부착돌말류의 출현과 연관되는 주요 요인은 G1에서 총질소, G2에서 탁도, G3에서 농경지의 비율, 그리고 G4에서 총인 등으로 밝혀졌다(Fig. 5). Random Forest로 분석된 부착돌말의 출현은 화학적 변수들과 지형 조건에 의해 영향을 받는다. 높은 TN과 TP는 부착돌말의 활발한 성장을 유도한다(Reavie and Smol, 2001). 광합성 및 호흡과 관련된 빛과 산소의 양에 영향을 미치는 탁도는 인

자이다.

Random Forest를 이용한 부착돌말의 출현예측은 주로 화학적 요인에 의해 결정되는 것으로 제시되었다. 그러나 미국의 계곡형 하천에서 군집의 우점종은 주로 하도 형태, 수중 서식처, 수변 환경 등에 의해 영향을 받으며 영양염류와 같은 수질과 부착돌말 군집은 연관성이 낮다는 보고가 있다(Pan *et al.*, 2006). 이와 같은 결과에 따르면 부착돌말은 물리적인 서식처에 의해 영향을 받기 때문에 하천의 지형학적 영향(하천의 직강하, 유속, canopy 등)에 대해서도 주목해야 할 것으로 보인다. 또한 부착돌말은 많은 수중 초식동물의 주요 먹이로 이용되기 때문에 포식자에 의한 포식압도 영향을 미치는 것으로 보인다(Johnson and Hering, 2010). 그러므로 연구자들은 부착돌말 분포에 대한 물리적 서식처의 역할에 대해 명확한 증거를 제시하기 위해 미래의 연구에서 하천의 지형학적 영향과 그에 포함된 변수들의 특성을 고려할 필요가 있다.

결 론

국내 3개 연안의 하구지역에서 193지점을 대상으로 부

착돌말의 분포와 토지이용도 및 환경요인과의 관계를 파악하기 위하여 부착돌말과 환경요인을 조사하였다. 분류된 394 분류군 중에서 우점종은 *Nitzschia perminuta* (19.6%)와 *N. inconspicua* (14.0%)로 나타났다. 부착돌말의 현존량과 종수를 기초로 집괴분석을 실시한 결과, 우리나라 하구역 부착돌말은 크게 4개 그룹(G1~G4)으로 나누어졌다. 지리적으로 G1은 동해지역이며 높은 산림 토지이용도와 높은 DO, 낮은 영양염이 특징으로 나타났다. G2는 동-남해로 낮은 탁도와 영양염이 특징이며, G3은 남-서해 지역으로 높은 농경지 비율, 낮은 염도와 전기전도도를 보였다. 그리고 G4는 서해지역으로서 높은 영양염이 특징으로 나타났다. 각각의 지역적 특성을 나타냈다. G1과 G2는 높은 산림비율, 용존산소, 낮은 탁도와 영양염 농도를 보였고, G4는 높은 도시비율, 탁도와 영양염 그리고 낮은 용존산소로 유의한 차이를 보였다. 부착돌말의 출현과 연관되는 주요요인은 G1에서 총질소, G2에서 탁도, G3에서 농경지의 비율, 그리고 G4에서 총인 등으로 밝혀졌다. 또한 지표종의 발생에 영향을 미치는 중요한 요인으로는 G1의 지표종인 *Fragilaria construens* var. *venter*는 숲의 비율이, G2의 지표종인 *Rhoicosphenia abbreviata*는 탁도로 나타났으며, G3의 지표종인 *Bacillaria paradoxa*와 *Hantzschia amphioxys*는 각각 도시의 비율과 TP 그리고 G4의 지표종인 *N. ovalis*와 *Stephanodiscus invistatus*에는 각각 TP와 탁도가 중요 요인으로 나타났다. 이 결과 한반도의 부착돌말 군집 분포가 수질 및 토지 이용도에 크게 영향을 받는다는 것을 종합적으로 보여준다.

사 사

본 연구는 2015~2016년 하구수생태 건강성 조사 및 평가 사업에 의하여 수행하였음.

REFERENCES

- APHA. 2001. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, American Public Health Association, New York, USA.
- Barbour, M.Y., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid Bio-assessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, USA.
- Battarbee, R.W. 1994. Diatoms, lake acidification and the Surface Water Acidification Programme (SWAP): A review. *Hydrobiologia* **274**: 1-7.
- Boyer, E.W., C.L. Goodale, N.A. Jaworski and R.W. Howarth. 2002. Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern USA. In *The Nitrogen Cycle at Regional to Global Scales*. Springer Netherlands. pp. 137-169.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* **45**: 5-32.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Gaskin, P. Sutton and M.V.D. Belt. 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature* **387**: 253-260.
- Davies, P.L. and B.D. Eyre. 2005. Estuarine modification of nutrient and sediment exports to the Great Barrier Reef Marine Park from the Daintree and Annan River catchments. *Marine Pollution Bulletin* **51**(1): 174-185.
- Dixit, S.S., J.P. Smol, J.C. Kingston and D.F. Charles. 1992. Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environmental Science & Technology* **26**: 22-33.
- Dixit, S.S. and J.P. Smol. 1994. Diatoms as indicators in the Environmental Monitoring and Assessment Program-Surface Waters (EMAP-SW). *Environmental Monitoring and Assessment* **31**: 275-306.
- Divya, B., S.O. Fernandes, G. Sheelu, S. Nair, P.L. Bharathi and D. Chandramohan. 2009. Limno-tolerant bacteria govern nitrate concentration in Mandovi Estuary, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **82**(1): 29-34.
- Dufrene, M. and P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**(3): 345-366.
- Ector, L., J.C. Kingston, D.F. Charles, L. Denys, M.S.V. Douglas, K. Manoylov, N. Michelutti, F. Rimet, J.P. Smol, R.J. Stevenson and J.G. Winter. 2004. Freshwater diatoms and their role as ecological indicators. pp. 469-480. In: *Proceedings of the 17th International Diatom Symposium* (Poulin, M., ed.). Biopress Limited, Bristol.
- Engler, R., A. Guisan and L. Rechsteiner. 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology* **41**(2): 263-274.
- Evelyn, G. 2009. Periphyton as an indicator of restoration in the Florida Everglades. *Journal of Ecological Indicators* **9**(6): 37-45.
- 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.
- Harrison, J.D., J.A.G. Cooper and A.E.L. Ramm. 2000. State of South African Estuaries: Geomorphology Ichthyofaunal, Water Quality and Aesthetics, Department of Environmental Affairs and Tourism, Pretoria, South Africa. pp. 185.
- Hendey, N.I. 1974. The permanganate method for cleaning

- freshly gathered diatoms. *Microscopy* **32**: 423-426
- Hong, J.S., I.S. Seo, K.T. Yoon, I.S. Hwang and C.S. Kim. 2004. Notes on the benthic macrofauna during September 1997 Namdaecheon estuary, Gangneung, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **22**: 341-350.
- Jeong, H.S. 2013. Comparison of geotectonical characteristic between the west and south shore areas. Korea University. South Korea.
- Johnson, R.K. and D. Hering. 2010. Spatial congruency of benthic diatom, invertebrate, macrophyte, and fish assemblages in European streams. *Ecological Applications* **20**(4): 978-992.
- Jüttner, I., H. Rothfritz and S.J. Ormerod. 1996. Diatoms as indicators of river quality in the Nepalese Middle Hills with consideration of the effects of habitat-specific sampling. *Freshwater Biology* **36**(2): 475-486.
- Kelly, M.G. 2003. Short term dynamics of diatoms in an upland stream and implications for monitoring eutrophication. *Environmental Pollution* **125**: 117-122.
- 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**(3): 341-361.
- Kim, C.J., C.H. Kim and Y. Sako. 2004. Population Analysis of Korean and Japanese Toxic *Alexandrium catenella* Using PCR Targeting the Area Downstream of the Chloroplast psbA Gene. *Fisheries and Aquatic Sciences* **7**(3): 130-135.
- Kim, C.H., E.J. Kang, H. Yang, K.S. Kim and W.S. Choi. 2012. Characteristics of fish fauna collected from near estuary of Seomjin River and population ecology. *Korean Journal of Environmental Biology* **30**: 319-327.
- Kim, E.G. and D.J. Kim. 2005. Historical Changes and Characteristics of Rehabilitation, Management and Utilization of Forest Resources in South Korea. *Journal of Mountain Science* **2**(2): 164-172.
- 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.
- Kim, H.K., Y.S. Kwon, Y.J. Kim and B.H. Kim. 2015. Distribution of Epilithic Diatoms in Estuaries of the Korean Peninsula in Relation to Environmental Variables. *Water* **7**(12): 6702-6718.
- Kirk, J.T. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge university press. New York, USA. pp. 401.
- Kovács, C., M. Kahlert and J. Padisák. 2006. Benthic diatom communities along pH and TP gradients in Hungarian and Swedish streams. *Journal of Applied Phycology* **18**(2): 105-117.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991. Bacillariophyceae. 4: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Fischer, Stuttgart.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae, Elsevier Book Company, Berlin, Germany.
- Lamberti, G.A. 1993. Grazing experiments in artificial streams. *Journal of the North American Benthological Society* **12**(4): 337-342.
- Lamberti, G.A. 1996. The role of periphyton in benthic food webs. In: Ecology: freshwater benthic ecosystems. Elsevier Academic Press, San Diego, USA.
- Lee, J.H. 2010. Estuary classification and management strategies based on physical characteristics of geomorphological features, Nature Habitat Distribution and Land Uses, Myongji University. South Korea.
- Lee, S.W., S.J. Hwang, S.B. Lee, H.S. Hwang and H.C. Sung. 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning* **92**(2): 80-89.
- Lee, S.W. and S.J. Hwang. 2007. Investigation on the Relationship between Land Use and Water Quality with Spatial Dimension, Reservoir Type and Shape Complexity. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* **34**(6): 1-9.
- Lee, Y.K. and K.H. Ahn. 2012. Actual Vegetation and Vegetation Structure at the Coastal Sand Bars in the Nakdong Estuary, South Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **26**: 911-922.
- Leland, H.V. and S.D. Porter. 2000. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology* **44**(2): 279-301.
- Licursi, M., M.V. Sierra and N. Gómez. 2006. Diatom assemblages from a turbid coastal plain estuary: Río de la Plata (South America). *Journal of Marine Systems* **62**(1): 35-45.
- Logan, B. and K.H. Taffs. 2013. Relationship between diatoms and water quality (TN, TP) in sub-tropical east Australian estuaries. *Journal of Paleolimnology* **50**(1): 123-137.
- Margalef, H. 1958. "Trophic" typology versus biotic typology, as exemplified in the regional limnology of Northern Spain. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **13**: 339-349.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. PCORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, MjM Software: Glenden Beach, OR, USA.
- McCune, B. and J.B. Grace. 2002. Analysis of Ecological Communities, MjM Software Design: Glenden Beach, OR, USA.
- McNaughton, S.T. 1968. Structure and function in California grasslands. *Ecology* **49**(5): 962-972.
- MOE/NIER. 2008. Survey and Evaluation of Aquatic Ecosystem Health in Korea. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research: Incheon,

- Korea. (in Korean)
- Mulholland, P.J., J.W. Elwood, A.V. Palumbo and R.J. Stevenson. 1986. Effect of stream acidification on periphyton composition, chlorophyll, and productivity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **43**: 1846-1858.
- Park, E.O., H.L. Suh and H.Y. Soh. 2005. Seasonal variation in the abundance of the demersal copepod *Pseudodiaptomus* sp. (Calanoida, Pseudodiaptomidae) in the Seomjin River estuary, southern Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **23**(4): 367-373.
- Pan, Y., B.H. Hill, P. Husby, R.K. Hall and P.R. Kaufmann. 2006. Relationships between environmental variables and benthic diatom assemblages in California Central Valley streams (USA). pp. 119-130. *In: Advances in Algal Biology: A Commemoration of the Work of Rex Lowe*. Springer Netherlands.
- Patrick, R. and C.W. Reimer. 1975. The diatoms of the United States, exclusive of Alaska and Hawaii: Entomoneida-ceae, Cymbellaceae, Gomphonemaceae, Epithemiaceae, vol. 2. Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Philadelphia, USA.
- Peterson, W.T. and J.E. Keister. 2003. Interannual variability in copepod community composition at a coastal station in the northern California Current: a multivariate approach. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **50**(14): 2499-2517.
- Pielou, E.C. 1975. Ecology diversity. (Ed. by J. Wiley and Sons). Wiley, New York.
- Potapova, M.G. and D.F. Charles. 2002. Benthic diatoms in USA rivers : distributions along spatial and environmental gradients. *Journal of Biogeography* **29**(2): 167-187.
- Potapova, M. and D.F. Charles. 2003. Distribution of benthic diatoms in US rivers in relation to conductivity and ionic composition. *Freshwater Biology* **48**(8): 1311-1328.
- Reavie, E. and J. Smol. 2001. Diatom-environmental relationships in 64 alkaline southeastern Ontario (Canada) lakes: a diatom-based model for water quality reconstructions. *Journal of Paleolimnology* **25**(1): 25-42.
- Rho, P.H. and C.H. Lee. 2014. Spatial distribution and temporal variation of estuarine wetlands by estuary type. *Journal of the Korean Geographical Society* **49**(3): 321-338.
- Robnik-Sikonja, M. 2004. Improving random forests. *In European Conference on Machine Learning* **3201**: 359-370.
- Robnik-Sikonja, M. and P. Savicky. 2012. CORElearn—Classification, Regression, Feature Evaluation and Ordinal Evaluation. The R Project for Statistical Computing. Available online: <http://www.r-project.org> (accessed on 8 September 2012).
- Santos, P.J.P., J. Castel and L.P. Souza-Santos. 1996. Seasonal variability of meiofaunal abundance in the oligo-mesohaline area of the Gironde Estuary, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **43**(5): 549-563.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1948. A mathematical theory of communication: American telephone and telegraph company. University of Illinois Press, Illinois, USA.
- Shin, Y.K. 2013. An ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 524-540.
- Simonsen, R. 1979. The diatom system: ideas on phylogeny. *Bacillaria* **2**: 9-71.
- Soininen, J., R. Paavola and T. Muotka. 2004. Benthic diatom communities in boreal streams: community structure in relation to environmental and spatial gradients. *Ecography* **27**(3): 330-342.
- Sullivan, M.J. 1999. Applied diatom studies in estuaries and shallow coastal environments. *In The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ter Braak and C.J.F. Ordination. 1987. Data Analysis in Community and Landscape Ecology, Pudoc, Wageningen, Netherlands.
- Thronsdon, J. 1978. Preservation and storage. pp. 69-74. *In: Phytoplankton Manual: Monographs on Oceanographic Methodology* 6 UNESCO, Paris, France.
- Tong, S.T. and W. Chen. 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management* **66**(4): 377-393.
- Underwood, G. and L. Provot. 2000. Determining the environmental preferences of four estuarine epipelagic diatom taxa: growth across a range of salinity, nitrate and ammonium conditions. *European Journal of Phycology* **35**(2): 173-182.
- Watanabe, T., T. Ohtsuka, A. Tuji and A. Houki. 2005. A Picture Book and Ecology of the Freshwater Diatoms, Uchida-Rokakuho, Tokyo, Japan.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: lake and river ecosystems. Gulf Professional Publishing, Massachusetts, USA. pp. 1006
- Wilson, S.E., B.F. Cumming and J.P. Smol. 1994. Diatom-salinity relationships in 111 lakes from the Interior Plateau of British Columbia, Canada: the development of diatom-based models for paleosalinity reconstructions. *Journal of Paleolimnology* **12**(3): 197-221.
- Yoon, K.T., H.S. Park and M. Chang. 2011. Implication to Ecosystem Assessment from Distribution Pattern of Subtidal Macro-benthic Communities in Nakdong River Estuary. *The Sea* **16**(4): 246-253.