

금강권역 주요 하천의 돌부착돌말류 분포 및 출현예측

조인환 · 김하경 · 최만영¹ · 권용수² · 황순진³ · 김상훈⁴ · 김백호^{5,*}

한양대학교 환경과학과, ¹(주)자연과사람들, ²국립생태원, ³건국대학교 환경보건학과,
⁴국립환경과학원, ⁵한양대학교 생명과학과

Distribution and Species Prediction of Epilithic Diatom in the Geum River Basin, South Korea. Cho, In-Hwan, Ha-Kyung Kim, Man-Young Choi¹, Yong-Su Kwon², Soon-Jin Hwang³, Sang-Hoon Kim⁴ and Baik-Ho Kim^{5,*} (Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ¹Nature and People, Gyeongnam 621-909, Korea; ²National Institute of Ecology, Suhcheon 325-813, Korea; ³Department of Environment and Public Health, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ⁴National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea; ⁵Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

Abstract In order to understand the relationship between the distribution of epilithic diatoms and the habitual environments, land-use, water qualities, and epilithic diatoms were studied at 141 sampling sites in the midwestern stream of Korean peninsula (Geum river, Mangyeong river, Dongjin river, and Sapgyo river). The total 183 diatom taxa was appeared in the study, while the dominant species were found to be *Nitzschia palea* (10.9%) and *Achnanthes convergens* (8.4%). Based on the abundance of epilithic diatoms, a cluster analysis results indicate that the sampling sites divided the sampling sites into 4 groups (G) at the 25% level. In term of geographic and aquatic environments, G-I and -II accounted for the upper and mid streams of the Geum river, and had large forest areas and good in water quality. G-III accounted for farmland and urban, and high concentration nutrient levels (TN and TP) and electric conductivity. G-IV accounted for mostly farmland, and high levels in turbidity, BOD, nutrient and electric conductivity. CCA results showed that the saproxenous taxa *Meridion circulare* was the indicator species of G-I, which strongly influenced by altitude and forests. In G-II, the indifferent taxa *Navicula cryptocephala* was influenced by Chl-*a*, AFDM, and DO. In G-III and -IV, the indifferent taxa *Fragilaria elliptica* and saprophilous taxa *Aulacoseira ambigua* were influenced by electric conductivity, turbidity, and nutrient counts. Meanwhile, random forest results showed that the predicting factor of indicator species appearance in G-I, -II, and -III was found to be electric conductivity whereas in G-IV it was found to be turbidity. Collectively, the distribution of diatoms in the midwestern of Korean peninsula was found to depend more on the land-use and its subsequent water qualities than the inherent characteristics of the aquatic environment.

Key words: epilithic diatom, Geum river basin, cluster analysis, indicator species analysis, water quality, CCA, random forest

Manuscript received 5 June 2015, revised 3 July 2015,
revision accepted 13 July 2015
* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0960, 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

금강은 한반도 중서부에서 가장 큰 유로연장을 가지며 산간계류, 도시 및 농촌지역을 차례대로 거쳐 금강하구둑에서 서해로 유입된다. 주변에 대전과 천안 등 대형도시와 논산, 강경, 함열을 경유하는 농업지대에서 유입되는 하폐수로 인한 수질오염이 발생하고 있다. 금강의 주요 지류로는 무주남대천, 봉황천, 초강천, 미호천, 갑천, 논산천 등이 있다. 만경강과 동진강은 유로연장이 100 km 이하인 하천으로 주로 농경지와 전주, 익산, 정읍 등의 소형도시가 발달되어 있으며, 주변에 왕궁축산단지, 원예 및 채소용 비닐하우스, 온천 등이 분포한다(Cho, 2007). 만경강의 지류로는 고산천, 전주천 등이 있고, 동진강의 지류로는 정읍천, 고부천 등이 있다. 삼교천은 북쪽에 위치한 소형하천이지만 주변에 중소도시, 공업단지, 과학단지 등에서 유입되는 하폐수로 인한 수질오염이 심하다. 삼교천의 지류로는 무한천, 곡교천 등이 있다. 최근 충청남도 연기군, 공주시, 청원군 일부 지역을 중심으로 하는 세종특별자치시가 건설되어 주택, 상가, 학교 등 도시화가 활발하게 진행되고 있어 수질오염이 예상되고 있다(Yi, 2013).

돌말류는 지구 탄소고정량의 20%를 차지하며, 담수에서 미세조류 중 가장 다양한 분류군이다(Leland and Porter, 2000). 또한 하천생태계의 1차 생산자로서 수서곤충, 어류 등 상위포식자의 주요한 먹이원이다(Stevenson *et al.*, 1996; Ewe *et al.*, 2006; Evelyn, 2009). 그중 돌부착돌말류는 박테리아와 함께 기질표면에 군체화를 일으켜 생물막을 형성하며(Cushing and Allan, 2001), 이러한 생물막은 수중내 영양물질을 흡수하여 세포밀도를 증가시키고 일정한 성장에 도달하면 탈리된다(Khattoon *et al.*, 2007). 또한 암석 또는 자갈과 같은 기질에 장기간 부착하며 수온, 영양염, 유속, 유량 등 환경변화에 대해 민감하게 반응하여, 서식처의 오염 및 환경상태 변화에 대해 지표생물로 사용되고 있다(Watanabe and Asai, 1990; Kelly and Whitton, 1995).

한반도 금강권역의 하천에 대한 연구들은 주로 수질 및 생물상 조사가 대부분이었으며(Moon *et al.*, 2001; Yun *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2008; Lee and Park, 2009; Park *et al.*, 2011), 수환경 지표성이 높은 부착돌말류에 대한 연구는 상대적으로 빈약하며(Kim *et al.*, 2000; Cho *et al.*, 2014), 금강과 만경강에서만 집중적으로 이루어졌다. 한편, 삼교천과 동진강은 물론 최근 만경강 하류에 형성된 새만금 방조제는 해수유입이 원활하지 않아 수질 오염은 물론 심각한 생물상 변화가 우려되고 있다(Yang *et al.*, 2008). 금강의 경우, 최근에 2개 인공보가 형성되어 유

속이 감소하였고(Yang *et al.*, 2015), 하구에 형성된 하구연택은 부여, 군산 등 인근도시의 상수원수로 이용되기 때문에 수질환경은 물론 부착돌말과 같은 지표성이 높은 생물들의 분포특성을 파악하는 연구는 매우 중요하다 하겠다.

본 연구는 하천의 물리-화학적 환경이 하천의 지표생물 돌말류의 분포 및 발생에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 금강권역의 주요하천(금강, 만경강, 동진강, 삼교천)의 산간계류에서 하구역까지 총 146개 지점을 대상으로 부착돌말류와 환경요인 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사시기 및 지점선정

금강권역의 주요하천은 금강, 만경강, 동진강, 삼교천을 포함해 여러 하천이 있으며, 본 연구에서는 4개 주요하천을 대상으로 조사가 이루어졌다. 2013년 9월에 4개 주요하천의 본류와 지류를 포함하여 총 146개 지점(금강-100 sites, 만경강-18 sites, 동진강-14 sites, 삼교천-14 sites)을 선정한 후, 각 지점에서 돌부착돌말류 및 환경요인을 조사하였다(Fig. 1).

2. 환경요인 분석

조사지점의 해발고도는 Digital Elevation Map (DEM)으로 측정하였으며, 토지이용(Land-use, %)은 조사지점을 중심으로 반경 1 km 범위를 농경지(agriculture), 도시(urban), 숲(forest) 등으로 구분하고 각 항목별 상대적 비율(%)을 계산하였다. 하폭은 교량의 폭에 기준하여 측정하였고, 수심은 대자로 측정하였다. 수온, 용존산소, pH, 전기전도도, 탁도 등은 휴대용 수질측정기 Horiba U-50 (HORIBA Ltd. Japan)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 수질분석에 필요한 현상수는 각 지점에서 2L 무균채수병에 채수후 냉조건에 보관하여 실험실로 운반하였다. BOD는 Winkler-azide 법에 따라 현장에서 직접 채수한 시료를 300 mL-BOD병에 넣고 냉암조건을 유지하면서 실험실로 운반한 후, 20°C incubator에서 5일 동안 암조건 하에 배양하여 채수 당일 고정된 시료의 용존산소를 비교하여 계산하였다(APHA, 2001). 영양염의 경우 Standard method에 의거하여 NO₃-N은 Cadmium reduction법, NH₃-N은 Colorimetric법, TN은 Cadmium reduction법, PO₄-P는 Ascorbic acid법, TP는 persulfate 분해 후 Ascorbic acid법으로 각각 Spectrophotometer (SP2770i Youngwoo, Korea)를 이용하여 측정하였다(APHA, 2001). 현장에서 채집한 고정하지 않은 시료는 냉

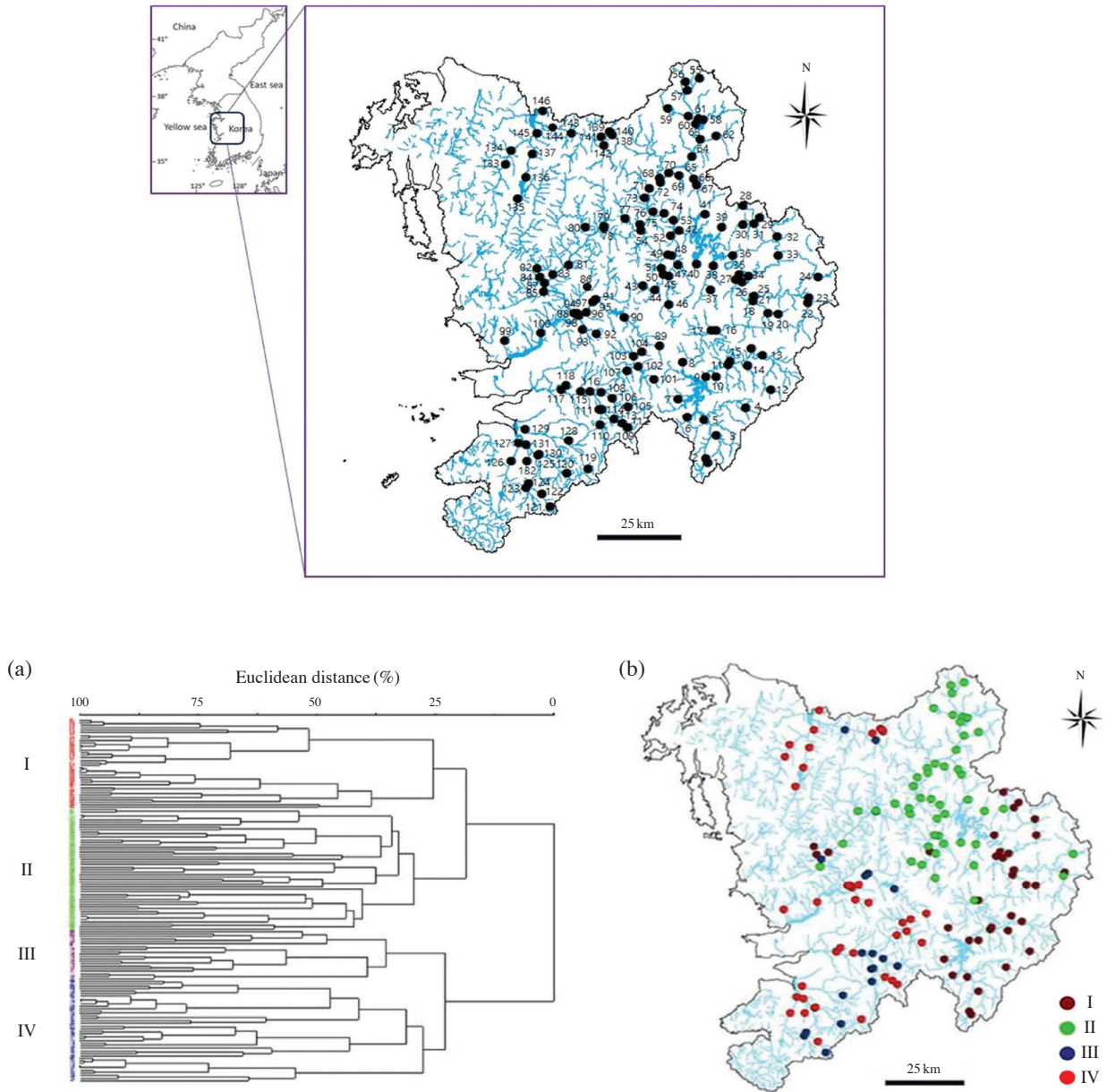


Fig. 1. The map showing the sampling sites (totally 146 sampling sites belonged to 4 river systems) of water and diatoms of the Korean peninsula in 2013. (a) a dendrogram of cluster analysis and (b) the map showing four groups based on diatom abundance. (I; brown-, II; green-, III; blue-, IV; red-colored circle).

암조건을 유지하여 실험실로 운반한 후 엽록소와 유기물 함량 (Ash-free dry-matter, AFDM)을 APHA (2001)에 따라 분석하였다.

3. 돌말류 채집 및 군집분석

조사지점에서 1주일 이상 수중에 잠겨있었고, 상부가 넓은 자연석을 대상으로 기질을 선정하였다. 25 cm² 넓이에

서 채집한 시료의 일부는 Lugol's solution으로 고정하고, 다른 일부는 고정하지 않았다. 고정된 시료는 실험실로 운반하여 Permanganate method (Hendey, 1974)에 따라 세정후 봉입제 Naphrax[®] (Brunel Microscopes Ltd, England)를 이용하여 영구표본을 제작한 후 광학현미경을 이용하여 1000배 하에서 동정 및 분류하였다. 돌부착돌말류 군집 분석을 위한 출현종의 상대빈도를 위한 계수는 임의로 선정된 현미경 하의 시야에서 돌부착돌말류 피각 수가

200개 이상이 되도록 하였다. 동정은 Krammer and Lange-Bertalot (2007)을 이용하였고, Simonsen (1979) 체계에 따라 분류하였다. 또한 돌부착돌말류 군집 특성을 파악하기 위하여 각 지점의 출현특성(출현종수, 세포밀도)을 근거로 우점종 및 우점도 지수 (McNaughton, 1967), 다양성 지수 (Shannon and Weaver, 1959), 풍부도 지수 (Margalef, 1958), 및 균등도 지수 (Pielou, 1975)를 각각 산출하였다. 산출한 돌부착돌말류 자료는 전체 조사지점의 3% 미만 지점에서 나타난 종은 rare taxa로 구분하여 분석에서 제외하였다. 각 개체수의 변이를 줄이기 위하여 로그(\log_{10})변환을 하였으며, 0이 되는 것을 방지하기 위하여 각 변수에 1을 더해 계산하였다. 로그변환한 자료를 근거로 유클리디언 거리 (Euclidean distance)를 이용하여 집괴분석 (Cluster analysis)을 실시하였다. 집괴분석 결과에 따라 나누어진 각 그룹을 대표하는 돌부착돌말류를 선정하기 위해 Indicator species analysis (ISA)를 실시하였다 (Dufrene and Legendre, 1997).

4. 환경과 돌말류

돌말류를 이용한 수질평가를 위하여 돌부착돌말류의 유기오염에 대한 내성도를 기준으로 출현종을 호오탁성종 (Saproxenous taxa), 광적응성종 (Indifferent taxa), 호청수성종 (Saprophilous taxa)으로 분류하여 각 지점의 DAIPo (Diatom Assemblage Index to Organic Water Pollution) 지수를 계산하였다 (Watanabe and Asai, 1990).

돌말류 분포에 미치는 환경영향을 파악하기 위하여 CCA (Cannonical Correspondence Analysis)를 실시하였다 (ter Braak, 1987). CCA 축의 유의성은 Monte Carlo permutation를 이용하여 평가하였다.

돌부착돌말류 출현에 미치는 환경요인을 예측하기 위하여 Random Forest Model (Breiman, 2001)을 사용하였다. 이 모델에서 사용되는 환경변수들의 상대적 중요도를 비교하기 위해 Minimum Description Length (MDL)를 이용하여 평가하고 (Robnik-Sikonja and Sacicky, 2012), MDL의 값을 0에서 100까지 변환하였다. 이 모델의 예측력을 평가하기 위해 정확도 (accuracy rate), AUC (area under the curve)를 이용하였다. accuracy는 이분법 (출현, 비출현)에 의해 측정되며 범위는 0부터 1까지이다. AUC는 결과값의 신뢰성을 측정하기 위해서 사용된다. 범위는 주로 0.5 (random)~1.0 (perfect discrimination or accuracy)에서 나타난다.

5. 통계분석

금강권역 161개 지점에서 출현된 부착돌말류 (출현종수

및 개체수)를 근거로 집괴분석을 실시한 다음, 각 그룹 간의 환경 및 생물군집의 특성을 비교하기 위하여 ANOVA를 실시하였다. 분석은 PC-Ord Package (ver 4.25 MjM Soft, USA), SPSS software (ver. 21. SPSS Inc. Korea), R 프로그램 (<http://cran.r-project.org/>)을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 돌부착돌말류의 출현 특성

금강권역 4개 주요하천의 146개 지점에서 출현한 돌부착돌말류는 총 183분류군으로 1강 2목 3아목 9과 35속 162종 18변종 2품종 1아종 등으로 이루어졌다. 선행연구 (Hwang *et al.*, 2011)에 의하면, 한반도 전체에서 돌부착돌말류 531분류군이 출현하였고, 본 연구는 이에 27.5%에 해당한다. 이는 선행연구에 비해 제한된 지점으로 인한 결과로 사료된다.

각 조사지점의 출현특성(출현 종수, 현존량)을 이용하여 집괴분석 (cluster analysis)을 실시한 결과, 약 25% 수준에서 크게 4개 그룹으로 구분하였다. 그룹 I은 주로 금강의 상류(36개 지점), 그룹 II는 주로 금강 중류(49개), 그룹 III은 주로 만경강, 동진강의 중류와 곡교천(20개), 그룹 IV는 금강, 만경강, 동진강 하류와 삽교천(41개)에 각각 구성되어 있다 (Fig. 1).

조사에서 출현된 총 10개의 family 중 Navicuaceae (> 40%)가 가장 높은 중 구성비를 보였으며, Fragilariaceae, Achnantheaceae, Bacillariaceae (> 10%) 등은 서로 비슷하였고 이러한 패턴은 그룹 간에 차이를 보이지 않았다. 현존량은 그룹 간 큰 차이를 보였는데 그룹 I, II, III에서 Navicuaceae (36.6~43.3%), 그룹 IV에서 Bacillariaceae (41.0%)가 높은 현존량을 보였다. 또한 그룹 I, II에서는 Achnantheaceae (> 25%), Fragilariaceae (> 10%) 등이 높은 밀도를 보인 반면 그룹 III, IV에서는 Bacillariaceae (> 30%)으로 높았다 (Table 1).

전체 지점에서 돌부착돌말류 중 가장 높은 현존량을 보인 종은 *Nitzschia palea* (총 현존량의 10.9%), *Achnanthes convergen* (8.4%)이었다 (Fig. 2). 다음으로 비교적 높은 현존량을 보였던 주요종은 *Navicula contenta* (II), *Melosira varians* (III), *Cymbella minuta* (I) 등으로 그룹 간 현존량의 차이를 나타냈다. 한반도의 주요종들은 주로 *Achnanthes convergens*, *Achnanthes minutissima*, *Nitzschia inconspicua* 등이 출현하였는데 이는 본 연구의 주요종과 비슷한 결과로 나타났다 (Hwang *et al.*, 2011). 또한 *Nitzschia palea*, *Melosira varians*, *Cymbella affinis* 등은 미국, 아프리카, 아

Table 1. Relative species numbers and cell density of epilithic diatom community at family in the western part of the Korean peninsula in 2013. The diatom community was divided into four groups by cluster analysis based on diatom abundance. Classification of diatoms was followed to Simonsen (1979).

	Family	I	II	III	IV
Numbers	Thalassiosiraceae	5 (6.7%)	5 (6.5%)	8 (11.1%)	10 (12.5%)
	Melosiraceae	1 (1.3%)	1 (1.3%)	1 (1.4%)	1 (1.3%)
	Fragilariaceae	11 (14.7%)	12 (15.6%)	8 (11.1%)	9 (11.3%)
	Eunotiaceae	2 (2.7%)	3 (3.9%)	2 (2.8%)	1 (1.3%)
	Achnantheaceae	9 (12%)	10 (13%)	8 (11.1%)	10 (12.5%)
	Naviculaceae	33 (44%)	33 (42.9%)	32 (44.4%)	35 (43.8%)
	Epithemiaceae	1 (1.3%)	1 (1.3%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
	Bacillariaceae	8 (10.7%)	7 (9.1%)	10 (13.9%)	10 (12.5%)
	Surirellaceae	5 (6.7%)	5 (6.5%)	3 (4.2%)	4 (5.0%)
Density (10 ³ cells cm ⁻²)	Thalassiosiraceae	74.1 (2.1%)	508.3 (2.9%)	410.1 (5.1%)	907.4 (9.5%)
	Melosiraceae	58.0 (1.6%)	632.6 (3.6%)	1332.2 (16.5%)	257.4 (2.7%)
	Fragilariaceae	458.4 (12.8%)	1945.6 (11.2%)	530.9 (6.6%)	215.9 (2.3%)
	Eunotiaceae	11.3 (0.3%)	100.0 (0.6%)	10.1 (0.1%)	0.1 (0%)
	Achnantheaceae	1074.2 (29.9%)	4551.1 (26.2%)	363.1 (4.5%)	593.3 (6.2%)
	Naviculaceae	1552.9 (43.3%)	7212.4 (41.5%)	2967.1 (36.6%)	3625.8 (38%)
	Epithemiaceae	6.2 (0.2%)	35.7 (0.2%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
	Bacillariaceae	271.4 (7.6%)	1977.9 (11.4%)	2445.1 (30.2%)	3913.6 (41%)
	Surirellaceae	81.3 (2.3%)	431.8 (2.5%)	38.8 (0.5%)	31.5 (0.3%)

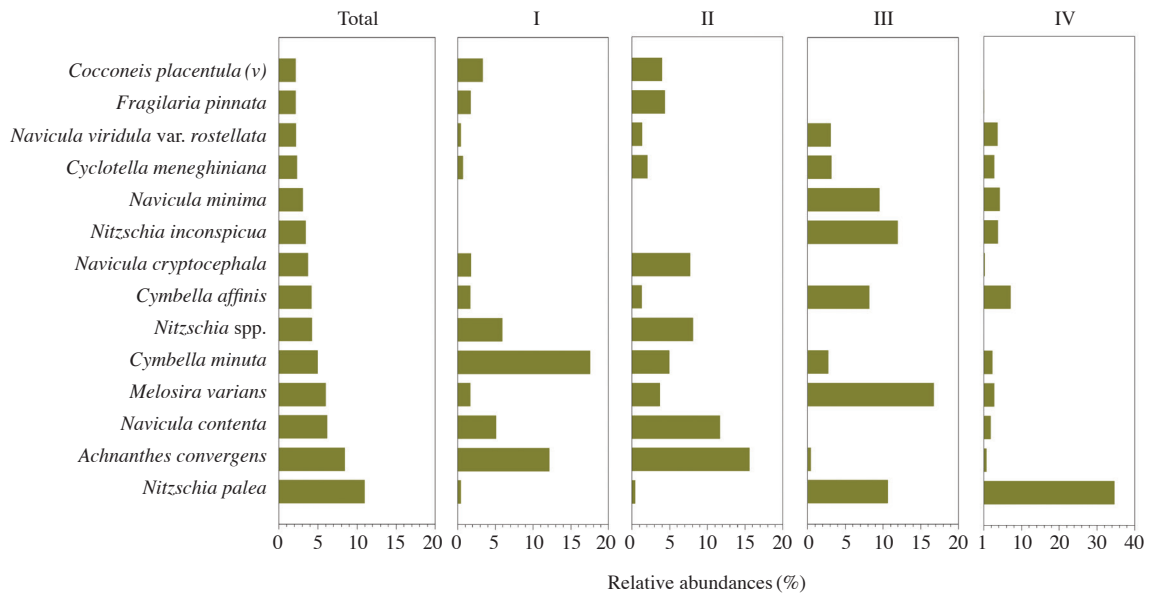


Fig. 2. Relative abundances (%) of major epilithic diatom species observed in four groups in the western part of the Korean peninsula in 2013. The diatom community was divided into four groups (G) by cluster analysis based on diatom abundance. The major species is the comprising species over the 1% of total abundance in each group.

르헨티나, 중국 등과 같은 다른 지역에서도 흔히 출현하고 있다 (Gasse *et al.*, 1995; Potapova and Charles, 2002; Tang *et al.*, 2002; Martínez de Fabricius *et al.*, 2003).

각 군집의 특성을 파악하기 위해 군집지수 (우점도, 다양도, 풍부도, 균등도)를 분석하였다. 우점도와 풍부도는

각 그룹 간 구분되지 않은 반면, 다양도와 균등도 지수는 그룹 I, II가 가장 높았고, 그룹 IV가 상대적으로 낮았다 (Table 2, Fig. 3). 전체 조사 지점의 3% 이상에서 출현한 돌부착돌말류 111분류군을 대상으로 각 그룹의 지표종 분석을 실시한 결과 (Dufrene and Legendre, 1997), 지표값

Table 2. Biological and physicochemical variables in four group divided by diatom community of the western part of the Korean peninsula in 2013. The diatom community was divided into four groups (G) by cluster analysis based on diatom abundance. Small alphabets (a and b) were Tukey's post hoc test with Bonferroni test.

Variables	I	II	III	IV	F	P
Altitude (m)	199.6±22.1 ^b	69±7.0 ^a	37.8±5.0 ^a	46.1±7.0 ^a	33.808	<0.001
Urban (%)	6.9±3.9 ^a	27.6±6.2 ^a	53.5±9 ^b	27.8±5.4 ^a	7.223	<0.001
Forest (%)	60.8±6.7 ^b	31.0±5.5 ^a	15.5±7.3 ^a	22.7±5.5 ^a	9.220	<0.001
Agriculture (%)	31.9±6.4	40.0±5.9	29.0±8.2	44.6±6.3	1.039	0.377
Width (m)	50±10	57±9	58±10	120±73	0.662	0.577
Depth (cm)	41±4	42±5	55±10	79±24	1.714	0.167
Water temperature (°C)	22.3±0.5 ^a	23.5±0.2 ^{ab}	23.4±0.5 ^{ab}	25.3±1.2 ^b	2.803	0.042
Dissolved oxygen (mg L ⁻¹)	10.4±0.3 ^b	10.3±0.2 ^b	8.0±0.3 ^a	7.9±0.2 ^a	28.830	<0.001
pH	7.96±0.14	8.05±0.05	8.02±0.08	8.01±0.1	0.160	0.923
Electric conductivity (µS cm ⁻¹)	153.0±9.6 ^a	271.8±25.1 ^a	607.2±87.3 ^b	610.9±69.9 ^b	21.389	<0.001
Turbidity (NTU)	2.9±0.4 ^a	4.6±0.8 ^a	21.2±5.2 ^b	36.0±5.5 ^c	22.755	<0.001
Biochemical oxygen demand (mg L ⁻¹)	1.0±0.1 ^a	1.7±0.1 ^{ab}	1.9±0.29	2.9±0.3 ^c	14.737	<0.001
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.057±0.026 ^a	0.080±0.015 ^a	0.165±0.056 ^{ab}	0.542±0.198 ^b	4.383	0.006
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	1.1±0.089	0.981±0.062	1.086±0.126	1.218±0.158	0.898	0.444
Total nitrogen (mg L ⁻¹)	1.756±0.124 ^a	1.706±0.117 ^a	1.964±0.259 ^{ab}	2.704±0.326 ^b	5.017	0.002
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.014±0.002 ^a	0.027±0.003 ^a	0.033±0.008 ^{ab}	0.052±0.009 ^b	7.527	<0.001
Total phosphorus (mg L ⁻¹)	0.031±0.006 ^a	0.052±0.006 ^a	0.068±0.016 ^{ab}	0.107±0.016 ^b	8.887	<0.001
Chlorophyll- <i>a</i> (µg cm ⁻²)	2.2±0.5 ^a	7.9±0.7 ^b	2.0±1.0 ^a	2.0±0.4 ^a	25.368	<0.001
Ash-free dry-matter (mg cm ⁻²)	11.3±1.3 ^b	14.3±1.3 ^b	2.5±0.5 ^a	2.0±0.2 ^a	34.198	<0.001
Biomass (10 ³ cells cm ⁻²)	100.0±21.7 ^a	355.6±31.3 ^b	409.2±75.0 ^b	235.9±81.4 ^{ab}	5.459	0.001
Number of species (No. cm ⁻²)	20.4±0.6 ^a	23.1±0.5 ^{ab}	24.4±1.3 ^b	19.8±1.2 ^a	5.126	0.002
DAIpo	69.5±2.2 ^b	67.6±1.5 ^b	41.2±2.7 ^a	40.5±4.1 ^a	30.848	<0.001
Dominance (DI)	0.49±0.02	0.48±0.02	0.52±0.03	0.57±0.03	2.979	0.034
Diversity (H')	1.00±0.03 ^b	1.03±0.02 ^b	0.96±0.04 ^{ab}	0.84±0.04 ^a	8.134	<0.001
Richness (R)	4.03±0.14	4.01±0.1	3.97±0.24	3.48±0.21	2.675	0.05
Evenness (E)	0.77±0.02 ^b	0.76±0.01 ^b	0.71±0.02 ^{ab}	0.68±0.02 ^a	5.547	0.001

DAIpo; Diatom Assemblage Index to Organic water Pollution

Table 3. Good indicator species and their important values (IndVal; %) in four groups of the western part of the Korean peninsula in 2013. The diatom community was divided into four groups (G) by cluster analysis based on diatom abundance. Good indicator is selected by values were five times higher to any other groups. Monte Carlo simulations (999 permutation) were used to assess the significance of species as an indicator of each sampling site.

Good indicator species	I	II	III	IV	P
<i>Meridion circulare</i>	50	8	0	0	0.001
<i>Cymbella leptoceros</i>	48	0	0	0	0.001
<i>Cyclotella stelligera</i>	27	2	0	0	0.001
<i>Navicula cryptocephala</i>	7	62	0	3	0.001
<i>Fragilaria pinnata</i>	5	27	0	1	0.002
<i>Fragilaria elliptica</i>	0	0	80	2	0.001
<i>Fragilaria construens f. venter</i>	0	0	25	0	0.001
<i>Aulacoseira ambigua</i>	0	0	2	37	0.001

25% 이상을 보인 지표종 (good indicator species)은 모두 8 분류군 - I (3종), II (2종), III (2종), IV (1종)이었다 (Table 3). 그룹 I은 *Meridion circulare* (50%), *Cymbella leptoceros* (48%), *Cyclotella stelligera* (27%), 그룹 II는 *Navicula cryptocephala* (62%), *Fragilaria pinnata* (27%), 그룹 III의 *Fragilaria elliptica* (80%), *Fragilaria construens f. venter*

(25%), 그룹 IV는 *Aulacoseira ambigua* (37%)으로 각각 출현하였다 (Table 3). 그룹 I의 지표종인 *Meridion circulare*는 금강 상류의 지표종으로 출현한 적이 있었으며, 그룹 II 지표종 *Fragilaria pinnata*는 금강 중류의 지표종으로 출현한 적이 있었다 (Cho et al., 2014).

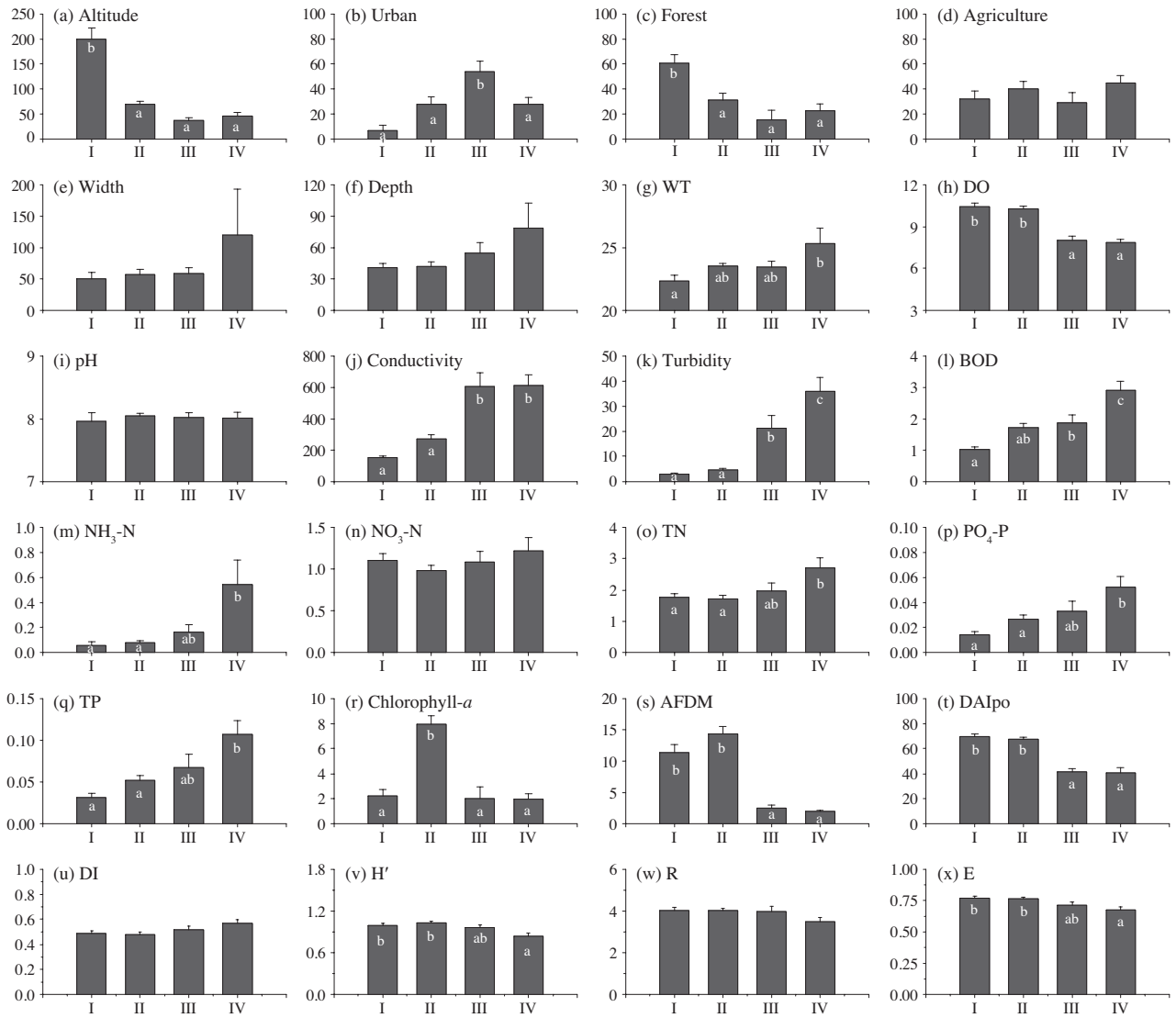


Fig. 3. Biological index and environmental variables in four diatom groups in the western part of the Korean peninsula in 2013. Small alphabets (a, b and c) were Tukey's post hoc test with Bonferroni test. WT: Water temperature (°C), DO: Dissolve oxygen (mg L⁻¹), BOD: Biochemical oxygen demand (mg L⁻¹), TN: Total nitrogen (mg L⁻¹), TP: Total phosphorus (mg L⁻¹), Conductivity: electric conductivity (10³ μS cm⁻¹), AFDM: Ash-free dry-matter (mg cm⁻²), DAIPo: Diatom Assemblage Index to Organic water Pollution, DI: Dominance index, H': Diversity index, R: Richness index, E: Evenness index.

2. 토지이용 및 수질환경

각 그룹의 이화학적 환경을 서로 비교한 결과, 유의한 차이를 보인 요인들은 다음과 같다 (Table 2; ANOVA, P < 0.05). 해발고도는 그룹 I에서 (199.6 m) 유의하게 높았다. 토지이용 (land-use)의 경우 도시 비율은 그룹 III에서 (53.5%) 가장 높았으며, 숲의 비율은 그룹 I에서 (60.8%) 가장 높았다. 한편 농경지 비율의 경우 모든 그룹에서 25% 이상으로 나타나 유의한 차이를 보이지 않았다. 용존산소는 그룹 I, II가 높았으며, 전기전도도는 그룹 III, IV (> 600 μS

cm⁻¹)가 높았다. 또한 탁도와 BOD는 그룹 IV가 가장 높았으며, NH₃-N, TN, PO₄-P, TP는 그룹 IV가 가장 높았다. 엽록소 (Chl-a)는 그룹 II가 다른 그룹에 비해 뚜렷하게 높았으며, 유기물함량 (AFDM)은 그룹 III, IV가 가장 높았다.

Cho *et al.* (2014)에 의하면 금강의 상류는 숲의 비율이 높고 수질이 매우 깨끗하게 나타났으며, Hwang *et al.* (2011)에 의하면 한국의 해발고도가 높은 지역에 위치하는 하천들은 주로 토지이용 중 숲의 비율이 높고, 낮은 전기전도도, 낮은 농도의 영양염류 등의 특성을 보였다. Cho *et al.* (2014)에 의하면 금강의 중류는 주요 지류인 갑천

과 미호천에 오염물질이 유입되어 불량한 수질을 보인다고 하여 본 연구결과와는 차이를 보였다. 이는 오염물질이 계절적 몬순강우에 의해 희석된 결과라 사료된다 (An and Jones, 2000; Kim and Kim, 2004). 도시의 비율이 높은 하천은 전기전도도와 양의 상관성을 보이며 (Walsh, 2001), 전기전도도가 증가함에 따라 유기물 또는 영양염류의 증가가 함께 동반된다 (Leland and Poter, 2000; Potapova and Chales, 2002). 하천의 하류에 조사지점이 집중된 그룹 IV는 영양염류가 높고, 오염된 수질을 보였는데, 지리학적인 특징이라 사료된다.

한반도 대부분 하천의 상류지역은 수질이 비교적 청정하지만 도심지, 농경지, 산업지역을 통과하면서 수질이 악화되고 있는 실정이다 (Moon *et al.*, 2001). 금강은 다른 권역에 비해 농경지의 비율이 높으며 (Rho and Lee, 2014), 금강 하류는 주변의 중소도시와 농경지로부터 유입되는

각종 오염물질의 영향을 받고 있다 (Shin and Cho, 2000). 또한 만경강과 동진강은 상류보다 하류에서 수질이 오염되었다 (Yun *et al.*, 2002).

3. 유기물오염지수

DAIpo지수와 관련되는 환경지표종의 종수와 현존량은 다음과 같다 (Fig. 4). 종수는 그룹 I, II에서 광적응성종 (> 65%)이 가장 많이 출현하였으며, 그룹 III, IV에서 호오탁성종 (>55%)이 가장 많이 출현하였다. 한편, 현존량은 그룹 I에서 호청수성종 (56.9%)이, 그룹 II, III에서 광적응성종 (>45%)이, 그룹 IV에서 호오탁성종 (62.2%)이 각각 많이 출현하였다. 그러나 그룹 II에서는 호오탁성종 (43.7%)이 호청수성종보다 많이 출현하였고, 그룹 III에서는 호청수성종 (31.8%)이 호오탁성종보다 많이 출현하였다.

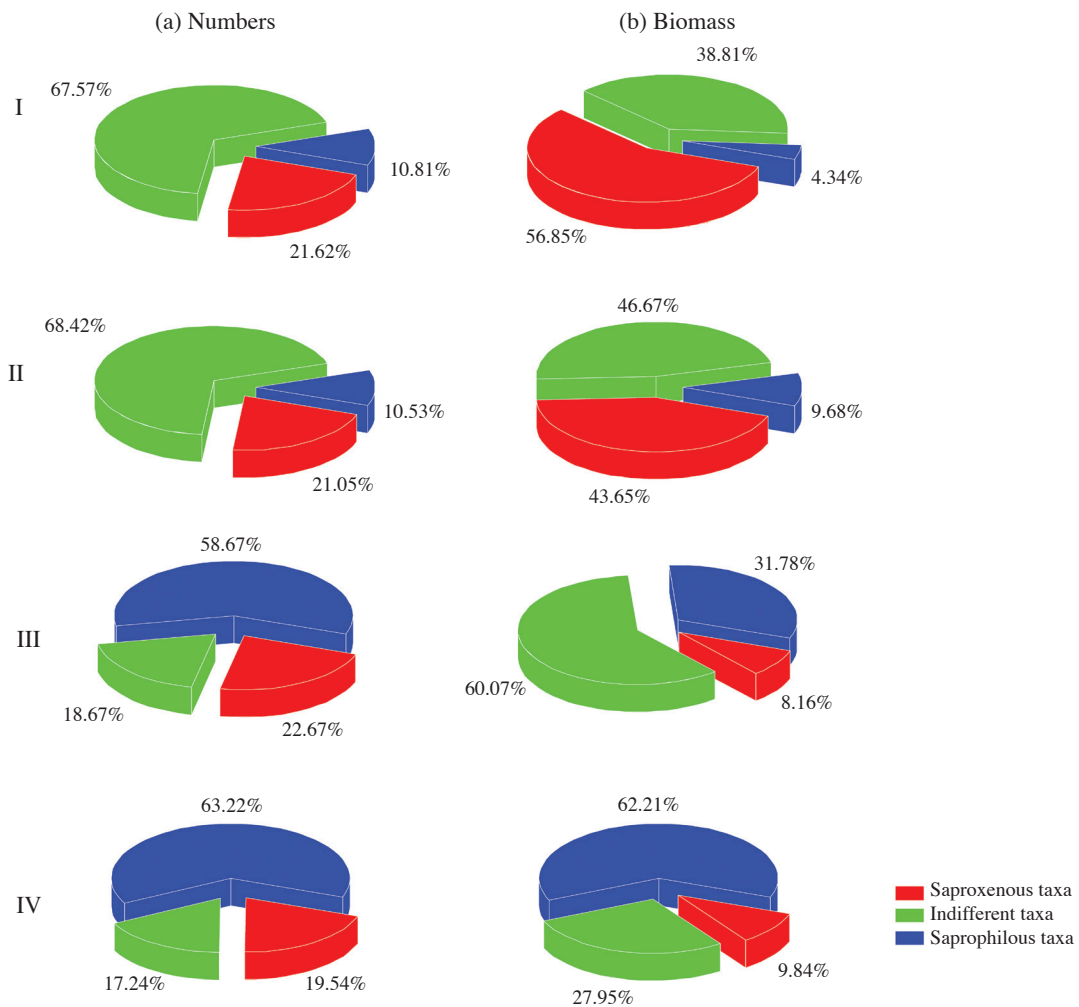


Fig. 4. Relative species composition (a) and abundance (b) of epilithic diatom based on the DAIpo system (Watanabe, 2005) in the western part of the Korean peninsula in 2013.

4. 돌부착돌말류에 대한 환경의 영향

각 그룹의 환경요인이 돌부착돌말류 군집에 미치는 영향을 파악하기 위해 CCA를 실시하였다 (Fig. 5). Axis 1과 Axis 2의 고유값 (Eigenvalue)은 0.413, 0.095로 환경영향의 설명력은 51% 수준으로 나타났다. Axis 1을 기준으로 해발고도, 도시비율, 숲의 비율 등 대부분의 환경요인과 유의한 상관성을 보였으며, 특히 전기전도도 ($r=0.85$), DO ($r=-0.72$) 등과 높은 상관성을 보였다. Axis 2를 기준으로 해발고도, 도시비율, 숲의 비율 등 대부분의 환경요인과 유의한 상관성을 보였으며, 특히 BOD ($r=0.59$), Chl-*a* ($r=0.58$)과 높은 상관성을 보였다. 돌부착돌말류 군집은 axis 2를 경계로 그룹 I, II는 좌측에, 그룹 III, IV는 우측에 위치하였다. 좌측에 위치한 그룹 I, II는 축1을 경계로 구분되는 양상을 보였고, 그룹 III, IV는 혼재되어 나타났다. 그룹 I에는 Chl-*a*, AFDM, DO가 영향을 미쳤으며, 그룹 II에

는 해발고도, 숲비율이 영향을 미쳤다. 한편, 그룹 III, IV에는 EC, 탁도, BOD, 도시의 비율 등 많은 환경요인들이 영향을 미쳤다.

청정한 유수역에서 출현하는 *Meridion circulare* (Patrick and Reimer, 1966), 평균정도의 전해질을 선호하며 중영양 수역에서 생육하는 *Cymbella leptoceros* (Krammer, 2002) 등이 그룹 I의 지표종으로 출현했으며, 해발고도, 숲의 비율의 영향을 받았다. 호청수성종으로 알려진 *Fragilaria pinnata* (Kobayasi *et al.*, 2006) 등이 그룹 II의 지표종으로 출현했으며, Chlorophyll-*a*, AFDM, DO의 영향을 받았다. 또한 기수역이나 높은 전기전도도를 선호하는 *Fragilaria elliptica* (Taylor *et al.*, 2007), 중영양 수역을 선호하는 *Fragilaria construens f. venter* (Van Dam *et al.*, 1994)는 그룹 III의 지표종으로 출현했으며, 유기오염에 넓은 적응성을 가진 *Aulacoseira ambigua* (Krammer and Lange-Bertalot, 1991)는 그룹 IV의 지표종으로 출현했다. 이들은 EC, 탁

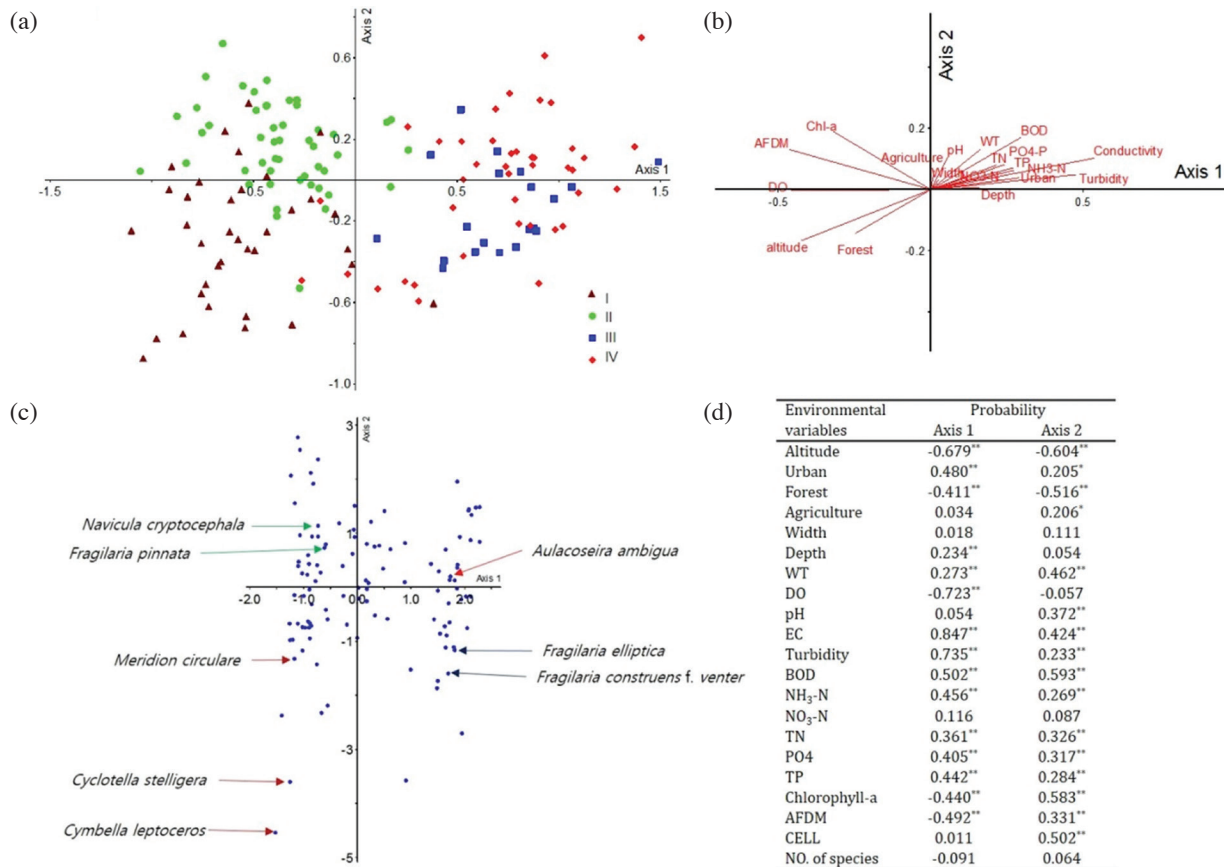


Fig. 5. (a) CCA ordination showing the distributions of four diatom groups in the western part of the Korea peninsula in 2013. (b) Environmental variables affecting epilithic diatom distribution. (c) Distributions of epilithic diatoms included indicator species. (d) Correlation coefficients between environmental variables and the CCA axes 1 and 2. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. WT: Water temperature, DO: Dissolved oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, EC: Electric conductivity, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, Chl-*a*: Chlorophyll-*a*, AFDM: Ash-free dry-matter, CELL: diatom density.

Table 4. Epilithic diatom list observed from the western part of the Korea peninsula in 2013, and the important variables (1st and 2nd variables) predicting species appearance using the random forest model. Ar: Accuracy rate, AUC: Area Under the Curve.

Species	AUC	Ar	Important variables		SI&IS
			1 st	2 nd	
<i>Achnanthes alteragracillima</i> Lange-Bertalot	0.98	0.85	Altitude (100)	TN (80)	IND
<i>Achnanthes convergens</i> H. Kobayasi in Kobayasi	0.96	0.90	Altitude (100)	EC (99.8)	SX
<i>Achnanthes exigua</i> Grunow	0.98	0.93	EC (100)	NTU (17.6)	SP
<i>Achnanthes hungarica</i> (Grunow) Grunow	1.00	0.83	NH ₃ -N (100)	Altitude (68.7)	IND
<i>Achnanthes lanceolata</i> (Brébisson) Grunow	0.98	0.86	NTU (100)	EC (90.1)	IND
<i>Achnanthes lanceolata</i> ssp. <i>rostrata</i> (Østrup) Lange-Bertalot	0.99	0.92	NH ₃ -N (100)	PO ₄ -P (45.2)	IND
<i>Achnanthes minutissima</i> Kützing	1.00	0.92	BOD (100)	EC (47.3)	SX
<i>Achnanthes subhudsonis</i> Hustedt	1.00	0.92	NO ₃ -N (100)	PO ₄ -P (82.4)	SX
<i>Asterionella formosa</i> Hassall	0.96	0.84	EC (100)	DO (35.1)	SX
<i>Aulacoseira alpigena</i> (Grunow) Krammer	0.99	0.97	Agriculture (100)	TN (54.4)	IND
<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grunow) Simonsen	0.98	0.93	NTU (100)	Depth (59.3)	IV, SP
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	0.99	0.82	Altitude (100)	TP (49.8)	IND
<i>Bacillaria paradoxa</i> Gmelin	1.00	0.82	Forest (100)	BOD (90.2)	IND
<i>Caloneis silicula</i> (Ehrenberg) Cleve	1.00	0.95	NH ₃ -N (100)	DO (89.1)	IND
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	0.97	0.86	EC (100)	NO ₃ -N (39.7)	SX
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Grunow	0.98	0.92	EC (100)	DO (33.8)	SX
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (Ehrenberg) Van Heurck	1.00	0.96	NTU (100)	TP (62.3)	SX
<i>Cyclotella atomus</i> Hustedt	0.97	0.84	NTU (100)	DO (30.7)	SP
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	0.98	0.90	Altitude (100)	pH (86.6)	SP
<i>Cyclotella stelligera</i> Cleve & Grunow	0.98	0.92	pH (100)	Altitude (98.6)	I, IND
<i>Cymbella affinis</i> Kützing	0.98	0.86	TN (100)	Altitude (55.5)	IND
<i>Cymbella cistula</i> (Ehrenberg) Kirchner in Patrick & Reimer	0.99	0.90	EC (100)	NTU (29.3)	SX
<i>Cymbella lacustris</i> (Agardh) Cleve	1.00	0.93	Altitude (100)	NTU (83.5)	IND
<i>Cymbella leptoceros</i> (Ehrenberg) Kützing	0.99	0.95	Altitude (100)	EC (22.8)	I, IND
<i>Cymbella minuta</i> Hilse in Rabenhorst	0.99	0.89	EC (100)	NTU (58.1)	SX
<i>Cymbella naviculiformis</i> Auerswald in Heiberg	1.00	0.88	Altitude (100)	PO ₄ -P (70.9)	IND
<i>Cymbella sinuata</i> var. <i>tabellaria</i>	0.97	0.89	Altitude (100)	TN (87.6)	IND
<i>Cymbella tumida</i> (Brébisson in Kützing) Van Heurck	1.00	0.93	NH ₃ -N (100)	BOD (63.6)	SX
<i>Diatoma vulgare</i> Bory	0.97	0.86	TN (100)	NH ₃ -N (95.4)	SX
<i>Diploneis subovalis</i> Cleve	1.00	0.95	NH ₃ -N (100)	Depth (70.3)	IND
<i>Eunotia minor</i> (Kützing) Grunow	0.99	0.90	DO (100)	EC (84.8)	IND
<i>Fragilaria bidens</i> Heiberg	0.98	0.88	DO (100)	EC (92.4)	IND
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracilis</i> (Østrup) Hustedt	0.99	0.96	NH ₃ -N (100)	NTU (80.3)	IND
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>rumpens</i> (Kützing) Lange-Bertalot in Krammer and Lange-Bertalot	0.99	0.80	EC (100)	NTU (86.2)	SX
<i>Fragilaria construens</i> f. <i>binodis</i> (Ehrenberg) Hustedt	1.00	0.97	BOD (100)	EC (40.8)	IND
<i>Fragilaria construens</i> f. <i>venter</i> (Ehrenberg) Hustedt	1.00	0.97	EC (100)	NH ₃ -N (98.8)	III, SP
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitton	1.00	0.96	NTU (100)	PO ₄ -P (74.2)	IND
<i>Fragilaria elliptica</i> Schumann	0.98	0.94	EC (100)	width (48.6)	III, IND
<i>Fragilaria pinnata</i> Ehrenberg	1.00	0.97	EC (100)	NTU (61.3)	II, SP
<i>Fragilaria pinnata</i> var. <i>lancetula</i> (Schumann) Hustedt	0.99	0.82	NTU (100)	Altitude (98.5)	SP
<i>Fragilaria robusta</i> (Fusey) Manguin	0.99	0.94	EC (100)	NTU (36.1)	IND
<i>Fragilaria ulna</i> (Nitzsch) Lange-Bertalot	0.98	0.92	EC (100)	NTU (33.6)	IND
<i>Fragilaria vaucheriae</i> var. <i>parvula</i> (Kützing) Cleve-Euler	0.99	0.92	EC (100)	Altitude (90.6)	IND
<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehrenberg	0.98	0.95	TN (100)	EC (71)	IND
<i>Gomphonema clevei</i> Fricke in Schmidt	0.97	0.88	Altitude (100)	TP (85.1)	SX
<i>Gomphonema gracile</i> Ehrenberg	1.00	0.95	EC (100)	PO ₄ -P (77.9)	IND
<i>Gomphonema lagenula</i> Kützing	0.97	0.92	EC (100)	DO (97.2)	IND
<i>Gomphonema parvulum</i> (Kützing) Kützing	0.98	0.94	Altitude (100)	BOD (54.4)	IND
<i>Gomphonema pseudosphaerophorum</i> H. Kobayasi	1.00	0.86	EC (100)	DO (64.1)	IND
<i>Gomphonema quadripunctatum</i> (Østrup) Wislouch	0.96	0.86	NH ₃ -N (100)	TP (90.2)	IND

Table 4. Continued.

Species	AUC	Ar	Important variables		SI&IS
			1 st	2 nd	
<i>Gomphonema truncatum</i> Ehrenberg	1.00	0.92	NTU (100)	BOD (86.2)	SX
<i>Gyrosigma acuminatum</i> (Kützing) Rabenhorst	0.98	0.96	TN (100)	Width (75.5)	IND
<i>Gyrosigma scalproides</i> (Rabenhorst) Cleve	1.00	0.97	NTU (100)	EC (53.4)	IND
<i>Gyrosigma spencerii</i> (J.W.Bailey ex Quekett) Griffith & Henfrey	1.00	0.95	NO ₃ -N (100)	EC (84.6)	IND
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow in Cleve & Grunow	0.99	0.90	NH ₃ -N (100)	DO (57.5)	IND
<i>Melosira varians</i> Agardh	0.98	0.82	NH ₃ -N (100)	DO (32.6)	IND
<i>Meridion circulare</i> (Greville) C.Agardh	0.98	0.90	EC (100)	Altitude (43.2)	I, SX
<i>Navicula bacillum</i> Ehrenberg	1.00	0.95	NH ₃ -N (100)	NTU (36.7)	IND
<i>Navicula capitata</i> Ehrenberg	0.99	0.85	NH ₃ -N (100)	EC (83)	IND
<i>Navicula capitatoradiata</i> Germain	1.00	0.87	Forest (100)	BOD (76.2)	SX
<i>Navicula clementis</i> Grunow	1.00	0.95	EC (100)	NTU (94.2)	IND
<i>Navicula contenta</i> Grunow in Van Heurck	0.98	0.94	EC (100)	DO (32.3)	SX
<i>Navicula cryptocephala</i> Kützing	0.97	0.92	EC (100)	DO (61.2)	II, IND
<i>Navicula cryptotenella</i> Lange-Bertalot	0.99	0.75	BOD (100)	pH (96.3)	IND
<i>Navicula cuspidate</i> (Kützing) Kützing	0.99	0.94	NO ₃ -N (100)	NH ₃ -N (75.1)	SP
<i>Navicula decussis</i> Østrup	0.99	0.81	Altitude (100)	NH ₃ -N (91.3)	IND
<i>Navicula goeppertiana</i> (Bleisch in Rabenhorst) H. L. Smith	0.99	0.93	NO ₃ -N (100)	pH (88.3)	SP
<i>Navicula gregaria</i> Donkin	0.99	0.95	EC (100)	DO (61.8)	IND
<i>Navicula minima</i> Grunow in Van Heurck	0.98	0.95	EC (100)	DO (25.6)	SP
<i>Navicula mutica</i> Kützing	0.98	0.88	EC (100)	pH (46.8)	SP
<i>Navicula neoventricosa</i> Hustedt	1.00	0.9	EC (100)	DO (81.4)	IND
<i>Navicula notha</i> Wallace	0.98	0.9	EC (100)	Agriculture (80.5)	IND
<i>Navicula pupula</i> Kützing	0.98	0.92	EC (100)	DO (38.1)	SP
<i>Navicula recens</i> (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot	0.99	0.94	Agriculture (100)	BOD (71.1)	IND
<i>Navicula schroeteri</i> Meister	1.00	0.95	NTU (100)	NO ₃ -N (82)	IND
<i>Navicula seminulum</i> Grunow	1.00	0.97	PO ₄ -P (100)	NTU (99.8)	SP
<i>Navicula subminuscule</i> Manguin	0.97	0.89	EC (100)	NTU (40.5)	SP
<i>Navicula trivialis</i> Lange-Bertalot	1.00	0.97	Depth (100)	NO ₃ -N (71.3)	IND
<i>Navicula veneta</i> Kützing	1.00	0.96	EC (100)	Altitude (40.3)	IND
<i>Navicula viridula</i> var. <i>rostellata</i> (Kützing) Cleve	0.95	0.82	EC (100)	Altitude (39.5)	IND
<i>Nitzschia amphibian</i> Grunow	0.98	0.9	Altitude (100)	EC (43.9)	IND
<i>Nitzschia filiformis</i> (W. Smith) Hustedt	1.00	0.96	NTU (100)	PO ₄ -P (83.6)	IND
<i>Nitzschia fonticola</i> Grunow in Cleve & Möller	0.99	0.93	PO ₄ -P (100)	BOD (83)	SX
<i>Nitzschia gracilis</i> Hantzsch	0.95	0.85	Altitude (100)	BOD (40.6)	SP
<i>Nitzschia inconspicua</i> Grunow	0.98	0.94	EC (100)	DO (19.8)	IND
<i>Nitzschia linearis</i> W. Smith	0.99	0.9	TN (100)	DO (79.9)	IND
<i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W. Smith	1.00	0.92	BOD (100)	Urban (88.4)	SP
<i>Nitzschia sinuata</i> var. <i>tabellaria</i> (Grunow) Grunow	0.99	0.88	NH ₃ -N (100)	pH (99.3)	IND
<i>Nitzschia subacicularis</i> Hustedt in A. Schmidt <i>et al.</i>	1.00	0.97	TN (100)	BOD (83.8)	IND
<i>Nitzschia tryblionella</i> Hantzsch in Rabenhorst	1.00	0.95	NH ₃ -N (100)	TN (74.9)	IND
<i>Pinnularia gibba</i> Ehrenberg	1.00	0.9	BOD (100)	NH ₃ -N (58.9)	IND
<i>Pinnularia microstauron</i> (Ehrenberg) Cleve	0.98	0.91	EC (100)	Altitude (80.7)	SP
<i>Reimeria sinuate</i> (Gregory) Kociolek & Stoermer	0.99	0.92	BOD (100)	EC (76.5)	SX
<i>Rhoicosphenia curvata</i> (Kützing) Grunow in Rabenhorst	1.00	0.88	Altitude (100)	Depth (51.1)	SX
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow	1.00	0.97	PO ₄ -P (100)	EC (90.6)	IND
<i>Surirella angusta</i> Kützing	1.00	0.83	NH ₃ -N (100)	DO (76.4)	IND
<i>Surirella linearis</i> W. Smith	0.98	0.92	EC (100)	Altitude (69.7)	IND
<i>Surirella minuta</i> Brébisson in Kützing	0.99	0.92	BOD (100)	pH (70.2)	IND
<i>Surirella splendida</i> (Ehrenberg) Kützing	0.99	0.94	Urban (100)	Agriculture (62.9)	IND
<i>Surirella tenera</i> W.Gregory	1.00	0.95	Altitude (100)	DO (98.7)	IND

Table 4. Continued.

Species	AUC	Ar	Important variables		SI&IS
			1 st	2 nd	
<i>Synedra acus</i> Kützing	0.99	0.93	pH (100)	EC (63.8)	SX
<i>Thalassiosira bramaputrae</i> (Ehrenberg) Håkasson & Locker	1.00	0.92	NTU (100)	Altitude (99.6)	IND

SI; Saprobic indicator species, IS; Indicator species, DO; dissolved oxygen, EC; electric conductivity, BOD; biochemical oxygen demand, TN and TP; total nitrogen and phosphorus, IND; Indifferent taxa, SX; Saproxenous taxa, SP; Saprophilous taxa

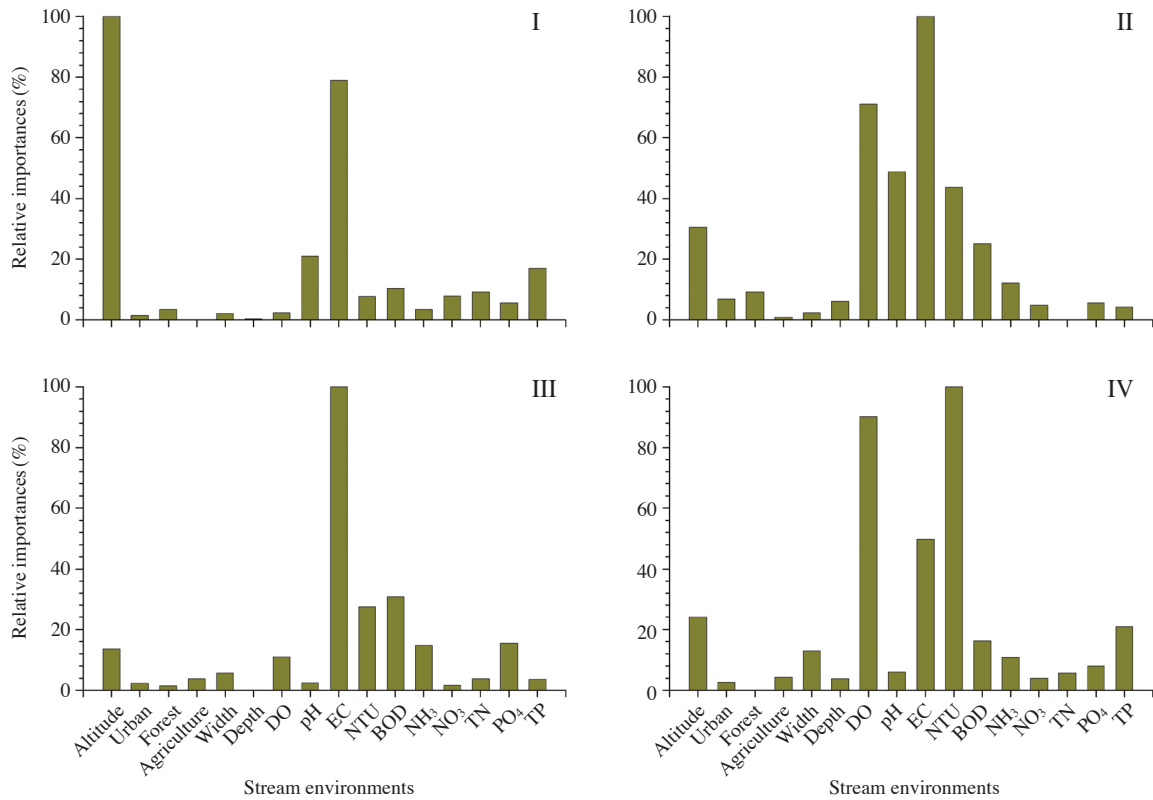


Fig. 6. Relative importance (%) of environmental variables to four epilithic diatom communities of west of the Korean peninsula from September 2013 using a random forest model.

도, TN, TP 등 많은 환경요인들의 영향을 받았다.

5. 돌부착돌말류의 출현예측

일반적으로 하천의 돌부착돌말류의 분포를 결정하는 환경요인으로서 전기전도도 (Potapova and Charles, 2003; Soininen *et al.*, 2004), 탁도 (Kirk, 1994; Wetzel, 2001), 해발고도 (Hwang *et al.*, 2011) 등은 잘 알려져 왔다. 본 연구에서는 Random forest (Robnik-Sikonja and Sacicky, 2012) 를 이용하여 미동정 종을 제외한 102분류군의 발생에 가장 많은 영향을 미친 환경요인을 예측하였다 (Table 4). 금강권역 주요하천에서 출현한 부착 돌말류의 출현 (발생)에

가장 높은 영향을 주는 예측요인은 전기전도도 (32종, 31%), 해발고도 (15종, 15%), NH₃-N (14종, 14%) 순으로 나타났다. 한편, 그룹 I의 지표종 *Meridion circulare*, 그룹 II의 지표종 *Navicula cryptocephala*, 그룹 III의 지표종 *Fragilaria elliptica* 등은 모두 전기전도도가 주된 결정요인으로 나타났다. 반면에 그룹 IV의 지표종인 *Aulacoseira ambigua*는 탁도가 주된 결정요인으로 나타났다. 전체 지점에서 높은 현존량을 보였던 우점종 *Nitzschia palea*는 BOD, *Achnanthes convergens* 등은 해발고도가 결정요인으로 나타났다. 유기물오염지수 환경지표종 (Watanabe and Asai, 1990)의 결정요인은 다음과 같다. 호청수성종은 전기전도도, BOD, 탁도, 광적응성종은 전기전도도, 탁도, DO,

호오탁성종은 전기전도도, 탁도 등으로 나타났다. 한편 각 그룹의 돌부착돌말류의 출현을 결정하는 주된 요인은 그룹 I의 해발고도, 그룹 II, III의 전기전도도, 그룹 IV의 탁도 등으로 나타났다(Fig. 6). 본 연구의 대상수역인 금강권역의 돌부착돌말류의 군집에는 전기전도도, 탁도 및 해발고도가 가장 중요한 환경요인으로 밝혀졌다.

적 요

금강권역(금강, 만경강, 동진강, 삼교천)의 돌부착돌말류 분포와 환경과의 관계를 파악하기 위하여 총 146개 지점의 토지이용, 수질 및 돌말류 조사를 실시하였다. 조사에서 출현한 돌말류는 총 183분류군으로 1강 2목 3아목 9과 35속 162종 18변종 2품종 1아종이었으며, 우점종은 *Nitzschia palea* (10.9%), *Achnanthes convergens* (8.4%)로 밝혀졌다. 돌말류의 현존량을 근거로 집괴분석을 실시한 결과, 25% 수준에서 4개 그룹으로 구분되었다. 지리적 특성 및 수질환경은 그룹 I, II는 각각 금강의 상류와 중류 지점으로 주변에 숲 구성비가 높고 수질이 양호하였다. 그룹 III은 도시를 관통하고 농경지였으며 수질은 영양염(TN, TP), 전기전도도 등이 높았다. 그룹 IV는 대부분 평야지대로서 농경지로 구성되었으며 수질은 탁도, BOD, 영양염, 전기전도도 등이 상대적으로 높았다. CCA 결과는 그룹 I은 호청수성종 *Meridion circulare*가 지표종으로 해발고도와 숲의 영향을, 그룹 II는 광적응성종 *Navicula cryptocephala*가 Chlorophyll-a, AFDM, DO의 영향을 각각 받은 것으로 나타났다. 그룹 III, IV는 각각 광적응성종 *Fragilaria elliptica*와 호오탁성종 *Aulacoseira ambigua* 등이 전기전도도, 탁도, 영양염의 영향을 받았다. 한편 그룹 I, II, III의 지표종들의 발생을 결정하는 예측요인으로는 공히 전기전도도였으며 그룹 IV는 탁도로 나타났다. 이상을 종합하면, 금강권역의 돌말류의 분포는 수계의 고유성 보다는 주변의 토지이용도와 그로 인한 수질에 의해 결정되는 것으로 판단되며, 미소서식체에 대한 제밀한 연구가 이루어진다면 보다 정확한 돌말류 분포특성을 이해할 수 있을 것으로 사려되었다.

사 사

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

REFERENCES

- Allan, J.D. 1995. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Chapman and Hall 83-108.
- An, K.G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and waste water, American Public Health Association, New York.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* **45**(1): 5-32.
- Cho, I.H., S.J. Hwang, B.H. Kim and Y.J. Kim. 2014. Distribution of epilithic diatom communities in relation to land-use and water quality in the Geum River system, South Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **30**(3): 283-291.
- Cho, S.W. 2007. Changes in the role and meaning of Man-kyeong River. *The Korean Association of Regional Geographers* **13**(2): 187-200.
- Cushing, C.E. and J.D. Allan. 2001. Streams: their ecology and life. Gulf Professional Publishing.
- Dufrene, M. and P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**(3): 345-366.
- Evelyn, G. 2009. Periphyton as an indicator of restoration in the Florida Everglades. *Journal of Ecological Indicators* **9**(6): 37-45.
- Ewe, S.M.L., E.E. Gaiser, D.L. Childers, V.H. Rivera-Monroy, D. Iwaniec, J. Fourqurean and R.R. Twiley. 2006. Spatial and temporal patterns of above ground net primary productivity (ANPP) in the Florida Coastal Everglades LTER (2001~2004). *Journal of Hydrobiologia* **569**(1): 459-474.
- Gasse, F., S. Juggins and L. Ben Khelifa. 1995. Diatom-based transfer functions for inferring past hydrochemical characteristics of African lakes. *An International Journal for the Geo-sciences* **117**: 31-54.
- 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.
- 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**: 4232-4244.
- Khatoun, H., F.M. Ysuff, S. Banerjee and M. Shariff. 2007. Formation of periphyton biofilm and subsequent biofouling on different substrates in nutrient enriched brackish-water shrimp ponds. *Aquaculture* **273**(4): 470-477.
- Kim, B.C. and Y.H. Kim. 2004. Phosphorus cycle in a deep

- reservoir in Asian monsoon area (lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model. *Korean Journal of Limnological Society* **37**(2): 205-212.
- Kim, H.J., Y.K. Yoon, Y. An and K.S. Lee. 2004. Study on the Characteristics of the Water Quality in Lake Sapkyo. *Korea national Committee on Irrigation and Drainage Journal* **11**(2): 32-46.
- Kim, J.H., S.J. Lee and H.M. Oh. 2000. Dynamics of Epilithic Algal Community in the Geum River, Korea. *The Korean Society of Phycology* **15**(4): 287-297.
- Kirk, J.T.O. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge university press. USA. p. 401.
- Kobayasi, H., M. Idei, S. Mayama, T. Nagumo and K. Osada. 2006. Kobayasi's Atlas of Japanese Diatoms Based on Electron Microscopy, Uchida Rokakuho, Tokyo.
- Krammer, K. 2002. Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats, Vol. 3. *Cymbella*, Gantner Verlag, A.R.G., Ruggell, K.G., Koeltz Scientific Book, Königstein.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot 1991. Bacillariophyceae 4. Achnantheaceae. Gustav Fischer Verlag. Jena. 437 p. (Cyclotella stelligera).
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Elsevier Book Co., Germany.
- Lange-Bertalot, H. 2001. Diatoms of Europe-Navicula sensu stricto 10 genera separated from Navicula sensu lato Frustulia. Gantner Verlag A. R. G. and Ruggell K. G.
- Lee, H.W. and S.S. Park. 2009. Trend analysis of water quality in Dongjin River watershed. *Korean Journal of Limnology* **42**(1): 39-47.
- Lee, J.W., H.S. Jeong, J.H. Yoon and S.U. Cheon. 2008. Review on water quality and Achievement of water quality goal by various Evaluation Methods in Geum River. *Environmental Impact Assessment* **17**(6): 373-380.
- 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**: 279-301.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology, General Systems: Yearbook of the International Society for the Systems Sciences, 3.
- Martínez de Fabricius, A.L., N. Maidana, N. Gómez and S. Sabater. 2003. Distribution patterns of benthic diatoms in a Pampean river exposed to seasonal floods: the Cuarto River (Argentina). *Biodiversity and Conservation* **12**: 2443-2454.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- Moon, Y.H., J.M. Park, J.G. Son and K.H. Kim. 2001. Change in water quality on upper stream of Mankyong River. *The Korean Society of Environmental Agriculture* **20**(3): 252-257.
- Park, S.H., E.H. Moon, J.H. Choi, B.W. Cho, H.S. Kim, W.H. Jeong, S.J. Yi and Y.I. Kim. 2011. Analysis of distribution characteristics of flowrate and water quality in tributary at Chungcheongnam-do. *Korean Society of Environmental Engineers* **33**(10): 739-747.
- Patrick, R. and C.W. Reimer. 1966. The diatoms of the United States (exclusive of Alaska and Hawaii). Volume 1: Systematic descriptions of diatoms of the taxonomic orders Fragilariales, Eunotiales, Achnantheales, and Naviculales (family Naviculaceae). Monograph 13. The Academy of Natural Sciences, Philadelphia, Pennsylvania. 688 p.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity, New York: Wiley.
- 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.G. 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.
- 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. and Savicky, P. 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).
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1959. A mathematical theory of communication, University of Illinois Press.
- 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 Limnology* **33**(3): 251-259.
- 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.
- Stevenson, R.J., M.L. Bothwell and R.L. Lowe (eds) 1996. Algal ecology: freshwater benthic ecosystems. Academic Press, Inc., San Diego.
- Tang, T., Q. Cai, R. Liu, D. Li and Z. Xie. 2002. Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology* **17**(3): 345-352.
- Taylor, J.C., W.R. Harding and C.G.M. Archibald. 2007. An illustrated guide to some common diatom species from South Africa. Water Research Commission, WRC Report TT 282/07. Pretoria, 178 pls.
- ter Braak C.J.F. 1987. Data Analysis in Community and Landscape Ecology, R.H.G., ter Braak C.J.F. and van Tongeren O.F.R. (eds.), Pudoc, Wageningen. 91-173.

- Van Dam, H., A. Mertens and J. Sinkeldam. 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal Aquatic Ecology* **28**: 117-133.
- Watanabe, T. and K. Asai. 1990. Numerical simulation using diatom assemblage of organic pollution in stream and lakes. *Rev. Inquiry and Research (Kansai Univ. Foreign Studies)*. **52**: 99-139.
- Watanabe, T. 2005. Picture book and ecology of the freshwater diatoms. Uchida Rokakuho Publishing Co. Tokyo, Japan.
- Watanabe, T., K. Asai and A. Houki. 1990. Numerical simulation of organic pollution in flowing waters. *Encyclopedia Environmental Control Technology* **4**: 251-281.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: lake and river ecosystems. Academic Press, San Diego, California. USA. P. 1006.
- Yang, J.S., Y.H. Jeong, K.H. Ji, H.S. Kim, J.H. Choi and W.J. Kim. 2008. The Early-stage changes of water qualities after the Saemangeum sea-dike construction. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **11**(4): 199-213.
- Yang, Y.M., M.J. Shim, D.Y. Oh, J.B. Khan, J.B. Lee, S.H. Hong, S.H. Lee and S.J. Park. 2015. Spatial distribution of heavy metals in geum river after weirs construction. *The Korean Society of Environmental Agriculture* **34**(1): 64-68.
- Yi, S.J. 2013. Establishment of water quality standards and water quality target in the Geum-river basin. *Journal of Korean Society on Water Environment* **29**(3): 438-442.
- Yun, S.G., J.S. Lee, G.B. Jung, M.K. Kim, S.J. Kim, M.H. Koh and K.C. Eom. 2002. Evaluation of water quality characteristics on tributaries of Mankyeong River watershed. *The Korean Society of Environmental Agriculture* **21**(4): 237-242.