

Study Note

낙동강 상류 수계에서 부착돌말류를 이용한 생물학적 수질 평가

최재신* · 채현식** · 김한순*

경북대학교 생물학과*, 한국극지연구소**

Assessment of Biological Water Quality Using Epilithic Diatoms in the Upper Region of Nakdong River

Jaesin Choi* · Hyunsik Chae** · Han-Soon Kim*

Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu, Korea*
Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea**

요약: 낙동강 상류 수계에 위치한 영강, 내성천과 위천을 대상으로 2016년 5월부터 10월까지 부착돌말류를 이용한 생물학적 수질 평가를 하였다. 부착돌말류는 이동성이 없어 장기적인 수질상태를 반영할 수 있다. 채집된 부착돌말류는 총 158 분류군으로 2목 3아목 8과 34속 143종 15변종으로 구성되어 있다. 영강은 *Achnanthes convergens*와 *Achnanthes minutissima*, 내성천은 *Nitzschia inconspicua*, 위천은 *Achnanthes minutissima*, *Cocconeis placentula* var. *lineata*와 *Navicula minima*가 우점하였다. CCA 분석 결과, 낙동강 상류 수계에서는 전기전도도, 총인과 총질소가 부착돌말류의 종조성에 중요한 요인들로 나타났다. 상관분석 결과, 부착돌말지수들(DAI_{po}와 TDI)은 서로 높은 상관성(0.87)을 보였다. 부착돌말지수(DAI_{po}와 TDI)를 이용한 생물학적 수질평가 결과, 영강은 대부분의 지점에서 A등급으로 평가되었다. 내성천은 A등급으로 평가된 N1을 제외한 모든 지점에서 C~D등급으로 평가되었다. 위천은 W1의 DAI_{po}가 B~C등급이나 TDI는 D등급으로 평가되어, 이 지점의 생물학적 수질 평가는 DAI_{po}보다 TDI의 결과가 더 불량한 것으로 나타났다. W2의 DAI_{po}와 TDI는 A~D등급으로 수질의 변화가 심하였다. W3와 W4의 DAI_{po}와 TDI는 대부분 B와 C등급으로 각각 평가되었다.

주요어: 부착돌말, DAI_{po}, TDI, 낙동강, 생물학적 수질 평가

Abstract: This study assessed biological water quality using epilithic diatoms in the Yeong river, Naeseong stream and Wi stream in the upper region of the Nakdong river from May to October 2016. Epilithic diatoms were not mobile, so they could reflect long-term water quality. The sampled epilithic diatoms were identified a total 158 taxa which were composed to 2 orders, 3 suborders, 8

First Author: Jaesin Choi, Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, Tel: +82-53-950-5344, E-mail: jschoi63@dreamwiz.com, ORCID: 0000-0001-6280-7692.

Corresponding Author: Han-Soon Kim, Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, Tel: +82-53-950-5344, E-mail: kimhsu@knu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-8186-3849.

Co-Author: Hyunsik Chae, Division of Polar Life Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea, Tel: +82-32-760-5524, E-mail: chaehs85@kopri.re.kr, ORCID: 0000-0003-0491-4662.

Received: 13 November, 2018. Revised: 7 February, 2019. Accepted: 14 February, 2019.

families, 34 genera, 143 species and 15 varieties. Dominant species were *Achnanthes convergens* and *Achnanthes minutissima* at Yeong river, *Nitzschia inconspicua* at Naeseong stream, and *Achnanthes minutissima*, *Cocconeis placentula* var. *lineata* and *Navicula minima* at Wi stream. As a result of the CCA, Electrical conductivity, total nitrogen and total phosphorus were important factors determining the diatom species composition in the upper region of the Nakdong river. The correlation between diatom indices (DAIpo & TDI) measured to be high in the correlation coefficient (0.87) from the result of correlation analysis. In the result of the assessment of biological water quality using DAIpo and TDI, Yeong river was rated as class A at most sites. Naeseong stream was rated as class C to D at all sites except for N1 which was rated as Class A. Wi stream was rated as class B to C for DAIpo of W1, and TDI was rated as class D. The assessment of biological water quality at this site showed inferior TDI result compared to that of DAIpo. DAIpo and TDI of W2 were rated as class A to D, and the water quality has changed a lot. W3 and W4 were mostly rated as class B and C respectively.

Key words: Epilithic diatom, DAIpo, TDI, Nakdong river, Assessment of biological water quality

I. 서론

다양한 경로로 수계에 유입되는 오염 물질은 먹이 사슬을 통해 수 생태계에 영향을 미치고, 수질의 변화를 야기한다. 수 생태계의 이화학적 수질환경 평가는 그 수계의 모든 오염물질을 찾아내는 것이 불가능할 뿐 아니라, 수계 환경의 단기적인 변화를 반영한다. 그러나 생물 상은 장기적으로 그 수계 전반의 환경을 반영하기 때문에 생물학적인 평가기법을 이용하여 수 생태계의 환경을 평가할 수 있다.

지표 생물을 이용한 생물학적 수질 평가에는 조류, 저서대형무척추동물과 어류 등을 이용해 왔으나, 최근 들어 부착돌말도 생물학적 수질 평가의 도구로 인식되고 있다. 부착돌말은 수중 생태계에서 먹이사슬의 기초가 되는 1차 생산자로서, 생활 환이 짧고, 환경 변화에 대한 반응이 빠르며 다양한 환경 요인들에 대해 생태적으로 민감한 종에서 내성종에 이르는 많은 종들이 있다. 또 기질에 부착하여 성장하므로 이동성이 없어 장기간의 수질 상태를 반영할 수 있기 때문에 이들을 수질 오염의 지표 생물로 이용하고 있다 (Watanabe et al. 1986; Van dam et al. 1994; Peszek et al. 2015). 부착돌말을 이용해 수질의 상태를 수치적으로 판단할 수 있는 지수들이 유럽 (Prygiel & Coste 1993; Kelly & Whitton 1995), 북

미 (Lowe & Pan 1996; Stevenson & Pan 1999)와 아시아 (Watanabe et al. 2005) 등에서 개발되어 이용되고 있다.

우리나라에서는 여러 지수들 중 유기물에 대한 내성 정도에 따른 생태군별 상대 빈도로 수질을 평가하는 DAIpo (Watanabe et al. 2005)를 이용하고 있다. 이는 DAIpo가 다른 지수들보다 우리나라와 분류학적 유사성이 높은 일본에서 제안되었으며, 생태군별 종의 동정이 세분되어 있어서 종 분류에 더 신뢰도가 높고 수질 등급을 구분하는데 유리하기 때문이다. 또한 우리나라의 수 생태계는 넓은 영양염구배를 가질 뿐 아니라 돌말의 성장과 수질 악화에 영양염이 영향을 끼치므로(Hwang et al. 2006), 더 정확한 생물학적 수질 평가를 위해서 영양염을 기준으로 하는 TDI (Kelly & Whitton 1995)도 병행하여 평가하고 있다(Ministry of Environment 2007). 이들 지수들을 이용한 국내의 연구에는 금강, 영산강과 섬진강(Hwang et al. 2006), 복하천과 달천(Kim et al. 2009), 남대천, 연곡천과 사천천(Kim & Lee 2010), 조양강(Kim et al. 2012a), 신천(Park et al. 2014)과 금호강(Choi et al. 2015)에 대한 연구 등이 있다.

우리나라의 최대 하천인 낙동강 수계의 부착돌말 군집을 이용한 수질 평가에 대한 연구는 본류(Lee 1998), 중류(Park et al. 2004)와 지류(Park et al.

2014)들에 관한 연구 등이 있다. 그러나 낙동강 상류 수계의 하천들에 대한 부착돌말균집에 대한 연구나 수질을 생물학적으로 평가한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 낙동강의 상류 수계의 주요 하천들의 부착돌말류의 종을 분석하였다. 또한 이들을 이용한 생물학적 수질 평가방법인 DAIPo와 TDI로 수질을 평가하여 낙동강 상류 수계의 주요 서식지내 부착돌말류의 다양성과 담수 환경 정보 축적 및 담수 서식지 보전과 관리 전략 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 조사 지점 및 조사기간

본 연구는 낙동강 상류 지역에 위치한 영강(4개 지점), 내성천(6개 지점)과 위천(4개 지점)에 총 14개의 지점을 선정하여 2016년 5월, 8월과 10월에 조사를 실시하였다(Figure 1).

영강은 경상북도 문경시 화북면에서 발원하여 문경시를 동서로 가로질러 흐르는 낙동강의 제1지류로

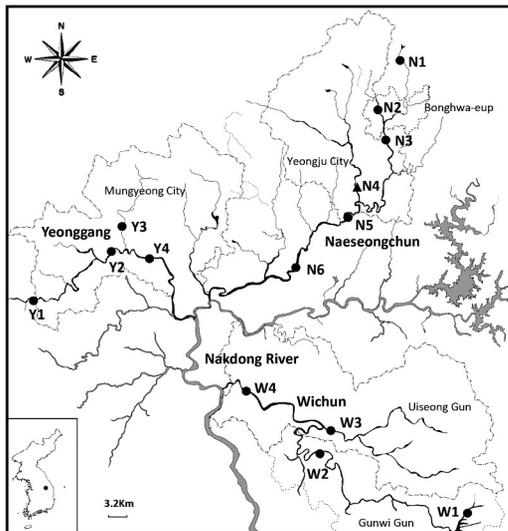


Figure 1. A map showing the sampling sites at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream located in the upper region of the Nakdong river from May to October 2016

길이는 78km이다. 상류는 자연성이 양호하게 유지되고 있으며, 중류는 유속이 느리고 하류는 문경 등 도시화 지역을 지나는 평지형 하천의 모습을 나타낸다. 내성천은 경상북도 봉화군 물야면에서 발원하여 영주시와 예천군을 지나 낙동강에 합류하는 낙동강의 제1지류로 본류 길이는 110.69km, 유역 면적은 1,815.28km²이다. 강바닥이 모래 층으로 되어 있으나 상류지역의 오염원에서 축산 폐수와 생활하수 등이 유입된다. 또한 영주댐 유역에 영양물질을 공급하는 오염원이 밀집되어 있다. 위천은 군위군 고로면에서 발원하여 군위읍과 의성군을 지나는 낙동강의 제1지류로 길이는 113.5km이다. 중류는 농경지와 거주지로 이용되고 있으며 낚시터와 과수 농가가 있다.

2. 채집 및 분석

수온, pH, DO, 전기전도도, 탁도는 휴대용측정기(Horiba U-50series)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 영양염(TN, TP) 분석을 위한 시료는 1L 플라스틱병으로 채수하고 냉암소에서 보관하여 가능한 빨리 실험실로 옮긴 후, 수질오염공정시험기준(Ministry of Environment 2008)에 준하여 분석하였다.

부착돌말 시료는 Watanabe et al.(2005)의 채집 방법에 따라 각 지점의 보편적인 상태를 지니고, 유속 20 ~ 30cm sec⁻¹ 정도의 수심 10 ~ 30 cm에 있는 편평한 돌을 선택하여 100cm²의 상면을 솔로 긁어서 채집하였다. 종의 동정과 계수를 위한 영구 표본은 KMnO₄ 법(Hendey 1974)으로 시료를 세정한 후, Pleurax로 봉입하여 제작하였다. 부착돌말균집의 종 분석을 위해 광학 현미경(Zeiss Axioskop 2) 1,000배 하에서 검경하고, 현미경 사진을 촬영하여 종을 동정하였으며(Patrick & Reimer 1966; Krammer & Lange-Bertalot 1986, 1988, 1991; Watanabe et al, 2005; Cho 2012) Simonsen의 체계(Simonsen 1979)에 따라 분류하였다. 또 출현종의 상대 빈도는 임의로 선정된 현미경 시야에서 500개 이상의 피각을 계수하여 산출하였고, 각 지점에서 출현한 종들 중에서 평균 출현율을 상회하며 상대 빈도가 가장 높은 종을 우점종으로 하였으며 10% 이상의 차순위

종을 아우점종으로 하였다.

3. 생물학적 수질 평가

생물학적 수질 평가를 위해 부착돌말 지수들 중 유기물 지수(DAIpo: Diatom Assemblage Index to Organic Pollution)와 영양염 지수(TDI: Trophic Diatom Index)를 이용하였다.

1) 유기물 지수 (DAIpo : Diatom Index for Organic Pollution)

유기물지수인 DAIpo는 Watanabe et al.(2005)의 방법에 따라 구하였는데, 조사기간 동안 출현한 각 돌말의 유기오탁에 대한 내성도를 기준으로 호오탁성종, 호청수성종, 그리고 광적응성종의 생태군으로 나누고 이들 중 호청수성종과 호오탁성종의 상대 빈도에 근거하여 산출하였다. DAIpo의 범위는 0~100으로 0은 가장 오염된 상태이며 100은 가장 청정한 상태를 의미한다.

$$DAIpo = 50 + 1/2(\sum_{i=1}^P X_i - \sum_{j=1}^q S_j)$$

$\sum_{i=1}^P X_i$ 출현한 1부터 p까지의 호청수성종 (saproxenous)의 상대 빈도(%)의 합
 $\sum_{j=1}^q S_j$ 출현한 1부터 q까지의 호오탁성종 (saprophilous)의 상대 빈도(%)의 합

2) 영양염 지수 (TDI : Trophic Diatom Index)

영양염지수인 TDI는 Kelly & Whitton (1995)의 방법에 따라 구하였는데, TDI는 조사기간 동안 출현한 모든 부착돌말을 대상으로 각 종의 오염에 대한 민감도(S, sensitivities values)와 지표 값(V, indicator values)을 구하고, 가중평균민감도(WMS, weighted mean sensitivity)를 산정한 후에 이를 이용하여 최종 TDI를 산출하였다. TDI의 범위는 0~100으로 100은 가장 오염된 상태이며 0은 가장 청정한 상태를 의미한다.

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

$$WMS = \sum A_j \cdot S_j / \sum A_j \cdot V_j$$

A_j : 표본 내 j종의 상대 풍부도(%)

S_j : j종의 오염 민감도 ($1 \leq S \leq 5$)

V_j : j종의 지표 값 ($1 \leq V \leq 3$)

또한 산출된 지수들은 환경부 (Ministry of Environment 2007)가 제시한 4등급(A: 청정, B: 양호, C: 보통, D: 불량)으로 구분하여 평가하였다.

부착돌말군집의 종 조성과 환경요인들과의 관계를 파악하기 위한 정준상관분석(Canonical Correspondence Analysis)은 CANOCO (Canonical Community Ordination) 프로그램(v. 5; Ter Braak and Šmilauer 2013)을 사용하였다. 부착돌말지수들과 환경요인들의 상호관계는 Pearson's 계수를 이용하였고, 분석은 SPSS (23)를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 환경요인

낙동강 상류 수계의 환경요인들은 다음과 같다 (Table 1). 내성천의 수온은 16.2~30.0℃의 범위이고, 영강은 17.1~29.1℃의 범위였으며 위천은 15.4~31.3℃의 범위였다. 수온은 계절적 특성이 뚜렷하여 8월에 모두 높게 나타났다. 용존 산소의 농도는 4.5~13.4 mgL⁻¹의 범위로 8월의 지점 N4에서 가장 낮았으며, 5월의 지점 W2에서 가장 높았다. 평균 용존 산소 농도는 7.3~10.4 mgL⁻¹의 범위로 W2에서 가장 높았으며 N4와 W1에서 가장 낮았다. 용존 산소는 8월에 낮았으나 10월에 높아지면서 수온과는 반대의 경향을 나타내었다. pH는 6.6~8.7의 범위였으며, 평균 pH는 Y2, Y4, N6에서 8이상이었는데 이는 문경시와 영주시로부터 유입된 생활하수의 영향으로 판단된다. 전기전도도는 51~448 μscm⁻¹의 범위로 평균전기전도도는 N1에서 가장 낮았고 의성군을 지난 지점인 W3에서 가장 높았다. 조사 기간 동안 전기전도도는 하루로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 탁도는 0~27.5 NTU의 범위로 대부분의 지점에서 5월과 10월보다 8월에 높게 나타났는데, 문경읍을 지난 Y3와 내성천의 하류지점들에서 높아졌다. 특히 W1은 8월에 다른 조사 지점들보다 높았는데, 이는

Table 1. Environmental factors at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream from May to October 2016

Date	Site	W.T (°C)	pH	DO (mg L ⁻¹)	Tur. (NTU)	Con. (μS cm ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)
May 2016	Y1	20.50	7.32	10.30	0.09	83.00	1.807	0.008
	Y2	24.00	7.80	9.70	1.60	240.00	2.567	0.015
	Y3	20.00	7.98	10.83	0.65	175.50	3.138	0.027
	Y4	25.00	8.42	10.10	0.64	306.00	1.939	0.014
	N1	16.70	6.94	6.51	0.11	70.20	1.461	0.016
	N2	20.60	7.46	8.88	5.55	193.00	3.127	0.036
	N3	23.50	7.01	6.78	1.56	259.00	2.267	0.021
	N4	24.30	7.69	7.68	2.75	195.60	2.635	0.022
	N5	25.80	6.87	7.70	0.30	347.00	2.618	0.030
	N6	25.80	8.36	8.14	1.75	255.00	2.576	0.018
	W1	16.40	7.56	5.85	1.76	164.50	3.337	0.045
	W2	27.10	8.33	13.43	1.50	364.00	2.027	0.021
	W3	26.90	8.11	10.35	1.10	444.00	1.009	0.018
	W4	27.20	6.67	9.45	2.91	389.00	1.267	0.016
Aug. 2016	Y1	25.60	7.20	5.13	0.00	89.60	2.522	0.012
	Y2	21.60	8.04	6.34	0.00	267.00	3.331	0.008
	Y3	23.60	7.20	7.10	4.81	205.00	3.622	0.036
	Y4	29.10	7.90	6.74	1.48	329.00	1.973	0.016
	N1	17.80	7.27	6.91	0.82	51.00	1.352	0.015
	N2	25.50	7.39	7.27	3.04	282.00	4.646	0.108
	N3	26.00	6.76	7.19	10.98	241.00	3.021	0.057
	N4	27.40	7.64	4.52	8.19	182.00	3.319	0.050
	N5	29.50	7.84	6.00	10.77	249.00	3.290	0.054
	N6	30.00	8.37	6.85	7.47	149.40	3.415	0.058
	W1	24.40	7.37	6.69	27.50	139.00	3.773	0.175
	W2	31.30	7.42	7.41	3.25	359.00	2.156	0.021
	W3	30.50	7.43	9.38	1.48	448.00	1.225	0.018
	W4	31.00	6.55	7.66	4.19	408.00	0.895	0.019
Oct. 2016	Y1	17.10	7.29	7.35	0.00	96.10	2.750	0.010
	Y2	17.70	8.71	11.10	0.00	105.10	2.866	0.017
	Y3	17.80	7.70	8.92	0.00	181.90	2.282	0.011
	Y4	20.40	8.18	10.12	0.00	334.00	2.248	0.009
	N1	16.80	7.41	8.84	0.00	75.60	1.126	0.023
	N2	16.40	7.25	9.87	0.00	268.00	3.498	0.021
	N3	18.20	7.32	9.94	2.69	286.00	2.678	0.107
	N4	16.20	7.04	9.65	0.00	230.00	3.103	0.023
	N5	17.20	8.10	11.72	1.34	380.00	3.047	0.039
	N6	17.40	8.42	12.43	0.00	380.00	3.180	0.050
	W1	15.40	7.43	9.25	3.83	128.00	1.960	0.034
	W2	19.40	7.68	10.33	2.14	344.00	4.203	0.018
	W3	19.40	7.87	10.04	1.72	411.00	3.860	0.023
	W4	19.60	7.72	9.30	4.97	320.00	3.276	0.027

이 지점의 채집 시 갑자기 쏟아진 소나기의 영향으로 판단된다. 영강의 모든 정점들이 10월에 0 NTU를 나타냈다.

총질소 농도는 0.895~4.646 mgL⁻¹의 범위로 대부분의 지점들이 8월에 높아지는 계절적 변화를 나타내었으나 위천의 중하류 지점들은 10월에 높게 나타났다. 평균 총질소 농도는 1.313~3.757mgL⁻¹의 범위로 내성천의 최상류인 N1에서 가장 낮았고 유입 지류인 N2에서 가장 높게 나타났다. 총질소 농도의 수계별 변화는 내성천에서 뚜렷하였는데, 이는 총질소 농도가 높은 지류들의 유입 때문인 것으로 판단된다. 위천은 상류지점에서 비교적 높은 총질소 농도를 나타내었다. 총인 농도는 0.008~0.175mgL⁻¹의 범위로서 각 지점마다 변화가 거의 없었으나 대부분의 지점들이 8월에 높아지는 계절적 변화를 나타내었다. 영강과 위천의 총인 농도는 탁도와 같은 변화를 나타내었고, 특히 8월에 탁도가 가장 높았던 위천의 W1에서 총인 농도도 가장 높았다. 위천은 상류지점에서 총질소와 총인의 농도가 비교적 높게 나타났으며, 영강과 내성천은 본류에 비해 유입 지류의 총질소와 총인의 농도가 높아 본류의 수질에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2. 부착돌말군집

조사기간동안 낙동강 상류 수계에 출현한 부착돌말류는 총 158 분류군으로 2목 3아목 8과 34속 143종 15변종으로 구성되었다. 각 분류군별로 *Navicula* 속(21.5%)이 가장 많이 출현하였고 *Cymbella* 속(10.7%), *Fragilaria*와 *Gomphonema* 속(9.4%), *Nitzschia* 속(8.8%) 순으로 출현하였다. 가장 빈번하게 나타난 우점종과 아우점종은 *Achnanthes minutissima* (17회), *Navicula minima* (11회), *Achnanthes convergens* (8회), *Nitzschia inconspicua* (8회), *Cocconeis placentula* var. *lineata* (6회) 등의 순이었다(Table 2). 이들 중 광범위한 수역에서 출현하는 보편종으로 알려진 *Achnanthes convergens*와 *Achnanthes minutissima*는 낙동강 중류에서도 주요 우점종으로 보고되었다(Lee 1998).

영강은 8과 23속 89종 14변종으로 총 103분류군이

출현하였다. 10월의 Y3에서 54종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 5월의 Y2에서 17종으로 가장 적은 종이 출현하였다. 지점별로는 최상류인 Y1에서 연중 가장 적은 종이 출현하였고, 문경읍을 지나 본류로 유입되는 지류인 Y3에서 가장 많은 종이 출현하였다. 영강의 주요 우점종과 아우점종은 *Achnanthes convergens*와 *Achnanthes minutissima*로 군집내 구성비가 28.90~77.61%의 범위로 우점하였다. 특히 Y2와 Y4는 5월과 8월에 *Achnanthes convergens*가 64.85~77.61%로 초우점하였으며, Y1은 전 조사기간동안 *Achnanthes minutissima*가 우점을 차지하여 안정된 군집을 나타내었다.

내성천은 7과 25속 104종 14변종으로 총 118 분류군이 출현하였다. 5월의 N4에서 49종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 10월의 N1에서 16종으로 가장 적은 종이 출현하였다. 지점별로 최상류인 N1에서 연중 가장 적은 종이 출현하였고 영주시를 지나서 본류로 유입되는 지류인 N4에서 가장 많은 종이 출현하였다. 내성천은 *Nitzschia inconspicua*가 17.82~87.57%의 범위로 많은 지점에서 우점종과 아우점종으로 출현하였다. 최상류인 N1은 조사기간동안 대부분 *Achnanthes convergens*와 *Cocconeis placentula* var. *lineata* 등이 우점하였으나, N2, N3와 N4는 *Navicula minima*, *Navicula subminuscula*, *Nitzschia inconspicua*와 *Nitzschia palea* 등이 우점 또는 아우점하여 내성천의 유입 지류와 중류는 지점과 조사 시기에 따라 변화가 있었다. 하류 정점인 N5와 N6는 조사기간동안 *Nitzschia inconspicua*가 우점하여 안정된 군집을 나타내었다.

위천은 7과 24속 102종 10변종으로 총 112 분류군이 출현하였다. 8월의 W4가 59종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 5월의 W2가 25종으로 가장 적은 종이 출현하였다. 지점별로는 W2에서 연중 가장 적은 종이 출현하였고 하류인 W4에서 가장 많은 종이 출현하였다. 위천은 *Achnanthes minutissima*, *Cocconeis placentula* var. *lineata*와 *Navicula minima*가 10.10~77.50%의 범위로 많은 지점에서 우점 또는 아우점을 하였다. 위천은 지점과 조사 시기에 따라 우점종의 변화가 있었으며, W4는 주로 중

Table 2. Seasonal changes of dominant and subdominant species at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream from May to October 2016

Date	Site	Dominant species (%)	Subdominant species (%)
May 2016	Y1	<i>Achnanthes minutissima</i> (28.90)	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (19.44)
	Y2	<i>Achnanthes convergens</i> (71.57)	<i>Achnanthes minutissima</i> (10.64)
	Y3	<i>Achnanthes alteragracillima</i> (39.09)	<i>Achnanthes minutissima</i> (36.91)
	Y4	<i>Achnanthes convergens</i> (77.61)	
	N1	<i>Achnanthes convergens</i> (35.93)	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (31.50)
	N2	<i>Gomphonema minutum</i> (29.50)	<i>Nitzschia fonticola</i> (18.12)
	N3	<i>Achnanthes convergens</i> (18.58)	<i>Fragilaria elliptica</i> (18.41)
	N4	<i>Nitzschia inconspicua</i> (17.82)	<i>Navicula minima</i> (16.29)
	N5	<i>Nitzschia inconspicua</i> (50.92)	
	N6	<i>Nitzschia inconspicua</i> (87.57)	
	W1	<i>Navicula minima</i> (27.45)	<i>Achnanthes subhudsonis</i> (22.09)
	W2	<i>Achnanthes minutissima</i> (77.50)	
	W3	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (49.49)	<i>Navicula minima</i> (10.10)
	W4	<i>Achnanthes minutissima</i> (38.20)	<i>Fragilaria construens</i> var. <i>venter</i> (30.60)
Aug. 2016	Y1	<i>Achnanthes minutissima</i> (52.84)	
	Y2	<i>Achnanthes convergens</i> (64.85)	<i>Achnanthes minutissima</i> (16.27)
	Y3	<i>Achnanthes minutissima</i> (58.78)	<i>Achnanthes alteragracillima</i> (11.61)
	Y4	<i>Achnanthes convergens</i> (52.17)	<i>Achnanthes minutissima</i> (28.94)
	N1	<i>Achnanthes minutissima</i> (45.88)	<i>Achnanthes convergens</i> (27.88)
	N2	<i>Navicula subminuscula</i> (41.67)	<i>Navicula atomus</i> (20.64)
	N3	<i>Navicula atomus</i> (39.14)	<i>Navicula subminuscula</i> (33.71)
	N4	<i>Nitzschia palea</i> (22.08)	<i>Navicula subminuscula</i> (20.36)
	N5	<i>Nitzschia inconspicua</i> (75.63)	
	N6	<i>Nitzschia inconspicua</i> (79.09)	
	W1	<i>Navicula minima</i> (20.41)	<i>Reimeria sinuata</i> (13.38)
	W2	<i>Achnanthes minutissima</i> (49.15)	<i>Navicula minima</i> (12.09)
	W3	<i>Achnanthes minutissima</i> (28.87)	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (16.7)
	W4	<i>Fragilaria elliptica</i> (31.83)	<i>Fragilaria pinnata</i> (16.82)
Oct. 2016	Y1	<i>Achnanthes minutissima</i> (45.84)	<i>Gomphonema pumilum</i> (10.79)
	Y2	<i>Achnanthes minutissima</i> (49.61)	
	Y3	<i>Gomphonema clevei</i> (28.70)	<i>Achnanthes minutissima</i> (17.37)
	Y4	<i>Fragilaria pinnata</i> (29.17)	<i>Achnanthes minutissima</i> (25.74)
	N1	<i>Achnanthes convergens</i> (70.42)	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (12.92)
	N2	<i>Gomphonema clevei</i> (23.15)	<i>Navicula minima</i> (19.92)
	N3	<i>Navicula minima</i> (25.73)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (22.35)
	N4	<i>Navicula minima</i> (42.05)	
	N5	<i>Nitzschia inconspicua</i> (63.87)	<i>Navicula perminuta</i> (12.89)
	N6	<i>Nitzschia inconspicua</i> (43.73)	<i>Navicula minima</i> (15.97)
	W1	<i>Reimeria sinuata</i> (22.09)	<i>Navicula atomus</i> (19.05)
	W2	<i>Navicula minima</i> (29.16)	<i>Fragilaria elliptica</i> (20.93)
	W3	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (20.00)	<i>Navicula minima</i> (16.00)
	W4	<i>Fragilaria elliptica</i> (37.73)	<i>Achnanthes minutissima</i> (13.43)

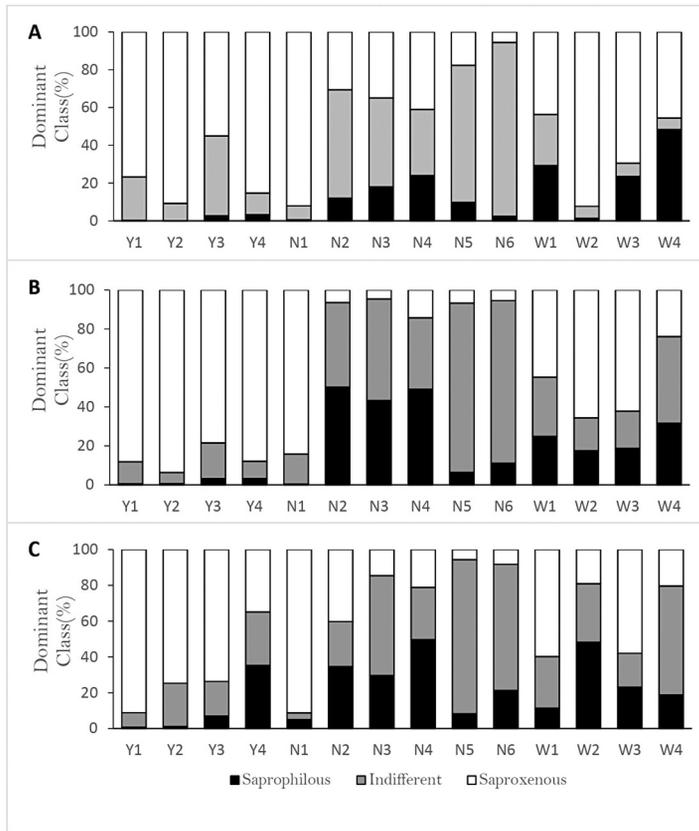


Figure 2. Ecological groups(%) of water quality indicators at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream from May to October 2016(A: May, B: August, C: October)

부수성 수역에서 생육하는 종으로 알려진 *Fragilaria* 속의 종들이 우점종이나 아우점종으로 출현하였다.

Watanabe 등(Watanabe et al., 2005)의 생태군 기준에 따르면, 영강은 *Achnanthes convergens* 등의 호청수성종이 10월의 Y4를 제외하고 모든 정점에서 50%이상으로 높게 나타났다. *Nitzschia amphibia* 등의 호오탁성종은 10월에 Y4에서 35.26%로 높게 나타난 것을 제외하고 모든 지점에서 0~6.94%의 범위로 낮게 나타나 호청수성종과 반대의 양상을 나타내었다(Figure 2).

내성천도 최상류 지점인 N1에서 *Cocconeis placentula* var. *lineata* 등의 호청수성종이 84.20~92.05%로 나타났고, 본류인 N3, N5와 N6은 *Nitzschia inconspicua* 등의 광적응성종이 47.04~91.89%로 증가하였다. 유입 지류인 N2와 N4는

*Navicula subminuscula*와 *Nitzschia palea* 등의 호오탁성종이 12.01~50.19%로 나타나 상류에서는 호청수성종이, 본류에서는 광적응성종이, 지류에서 호오탁성종이 뚜렷이 증가하였다.

위천은 대부분 지점에서 5월에서 10월로 갈수록 광적응성종이 증가하였다. 상류 지점인 W1은 5월과 8월에 중류 지점인 W2보다 호오탁성종과 광적응성종이 더 높았으나, 10월에는 호오탁성종이 감소하였다. 특히 W2는 5월에서 10월로 갈수록 호오탁성종과 광적응성종이 증가하였고 W4는 호오탁성종이 줄어들고 광적응성종이 늘어나 위천은 지점별과 조사 시기별로 차이를 보였다.

환경요인들과 출현종(상대 빈도 2%이상)들과의 상관관계를 나타내는 정준상관분석(Canonical Correspondence Analysis) 결과, 조사된 환경요인

Table 3. Seasonal changes of DAIPo and TDI at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream from May to October 2016

Site	Y1	Y2	Y3	Y4	N1	N2	N3	N4	N5	N6	W1	W2	W3	W4
May														
DAIPo	88.24	95.38	76.17	91.00	95.72	59.27	58.49	58.47	53.93	51.53	57.21	95.45	72.98	48.06
DAIPo class	A	A	B	A	A	C	C	C	C	C	C	A	B	C
TDI	35.36	27.45	29.75	27.91	38.07	74.02	65.38	72.19	80.17	94.30	73.31	33.19	52.53	37.21
TDI class	A	A	A	A	A	D	C	D	D	D	D	A	B	A
Aug.														
DAIPo	93.82	96.56	87.66	92.32	91.90	28.13	30.64	32.58	50.17	47.18	59.93	74.03	71.70	46.15
DAIPo class	A	A	A	A	A	D	D	D	C	C	C	B	B	C
TDI	35.30	27.40	33.30	28.50	31.10	93.30	94.70	86.00	91.80	93.90	79.70	46.80	52.40	61.40
TDI class	A	A	A	A	A	D	D	D	D	D	D	B	B	C
Oct.														
DAIPo	95.28	86.82	83.39	49.84	93.13	52.83	42.49	35.74	48.73	43.49	74.21	35.42	67.45	50.79
DAIPo class	A	A	B	C	A	C	C	D	C	C	B	D	B	C
TDI	33.40	29.20	43.80	48.60	30.30	77.50	81.30	82.90	91.30	86.10	70.10	76.10	58.70	59.30
TDI class	A	A	B	B	A	D	D	D	D	D	D	D	C	C

결과와 일치하였다.

내성천은 최상류 지점인 N1의 DAIPo와 TDI는 조사기간동안 모두 A등급으로 생물학적 수질이 청정한 것으로 나타났다. 하지만 DAIPo와 TDI가 C~D등급인 N2와 N3의 유입 후 본류 지점들의 DAIPo와 TDI는 모두 C~D등급으로 나타났다. 내성천의 생물학적 수질은 최상류는 청정하나, 오염된 지류의 유입 후 수질이 악화되어 보통에서 불량한 것으로 나타나 상류에서 하류로 가면서 수질이 악화되는 전형적인 하천의 경향을 보였다. 유입 지류들에서 *Navicula subminuscula*와 *Nitzschia palea* 등이 우점하였는데, 이 종들은 농촌, 주거지역 및 공단에서 유출되는 높은 오염원에 내성이 강한 것으로 보고(Kim 2001)되어, 내성천으로 유입되는 지류들은 농촌과 주거지역 등의 오염에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다.

위천은 상류 지점인 W1의 DAIPo가 B~C등급이나 TDI는 D등급으로 생물학적 수질이 보통에서 불량한 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 높은 총질소와 총인의 영향으로 유기물지수인 DAIPo에 비해 영양염 지수인 TDI가 상대적으로 수질을 나쁘게 평가한 것으로 판단된다(Hwang et al. 2006). W2는 DAIPo와 TDI가 5월에는 A등급(청정), 8월에는 B등급(양호), 10월에는 D등급(악화)으로 수질이 점점 악화되

었으며, 특히 10월에는 W4보다 수질이 더 악화되었는데 이는 영양염중 총질소의 변화와 일치하며 주변의 낚시터와 축산농가들에서 유입되는 영양염의 증가 때문인 것으로 판단된다. W3는 DAIPo와 TDI가 대부분 B등급으로 생물학적 수질이 양호한 것으로 평가되었으며, W4는 DAIPo와 TDI가 대부분 C등급으로 생물학적 수질이 보통인 것으로 평가되었다.

조사기간 동안 낙동강 상류 수계의 생물학적 수질 변화는 위천의 중류에서 제일 크게 나타났는데, 이는 총질소의 변화에 따른 영향 때문인 것으로 판단된다. 또 영강의 하류, 내성천의 지류와 지류 유입 후 지점들에서도 변화가 크게 나타났는데, 특히 내성천은 유입 지류가 지류 유입 후 지점에도 영향을 미치는 것으로 나타났다(Figure 4).

상관 분석 결과, 낙동강 상류 수계의 부착돌말지수들(DAIPo와 TDI)은 서로 높은 상관성(0.87)을 보였는데 김 등(Kim et al. 2009)의 보고(0.83)보다 조금 높은 결과를 나타냈다(Table 4). 또한 부착돌말지수들이 다른 요인들보다 영양염에 대해 비교적 높은 상관성을 나타내어 황 등(Hwang et al. 2006)의 보고와 같이 낙동강 상류 수계도 영양염이 수질 오염의 주요한 원인으로 나타났다. 특히 TDI가 DAIPo보다 영양염에 대해 더 높은 상관성을 보였으며, 영양염중

Table 4. Correlation coefficients among epilithic diatom indices (DAI_{po}, TDI) and environmental factors at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream from May to October 2016

	WT(°C)	pH	DO (mg L ⁻¹)	Tur. (NTU)	Con. (μS cm ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	TDI ¹	DAI _{po}
WT(°C)	1	0.04	-0.31*	0.32*	0.41**	0.18	0.08	0.07	0.11
pH		1	0.42**	0.14	0.12	0.20	0.09	0.07	0.16
DO(mg L ⁻¹)			1	-0.34*	0.39**	0.10	0.18	0.12	0.02
Tur. (NTU)				1	0.11	0.32*	0.77**	-0.41**	-0.32*
Con.(μS cm ⁻¹)					1	0.05	0.07	0.19	-0.36*
TN(mg L ⁻¹)						1	0.47**	-0.49**	-0.44**
TP(mg L ⁻¹)							1	-0.54**	-0.44**
TDI ¹								1	0.87**
DAI _{po}									1

¹: TDI(100-X)
 *: p<0.01, **: p<0.05, n=42

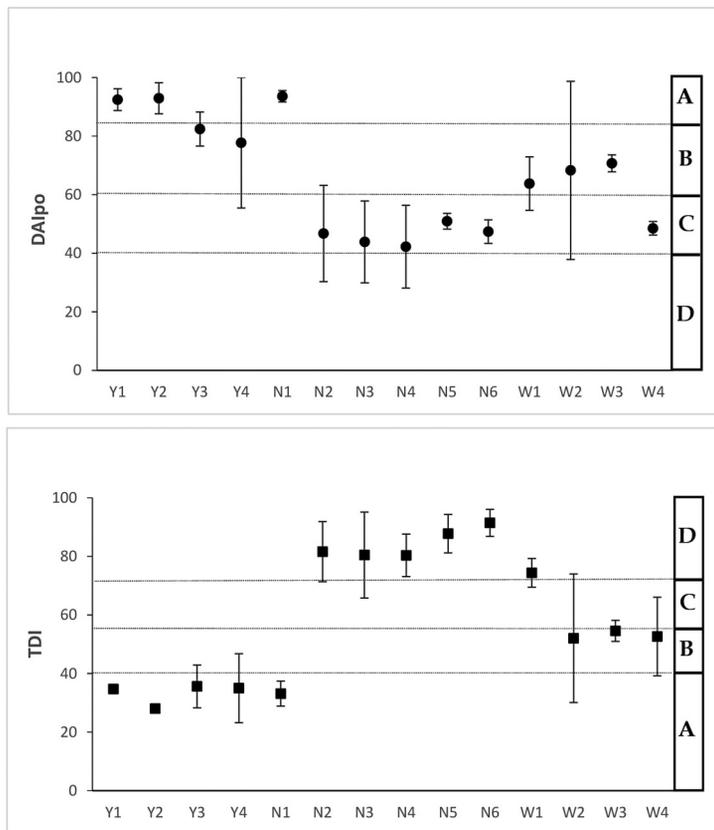


Figure 4. DAI_{po} and TDI at Yeong river, Naeseong stream and Wi stream from May to October 2016

총질소보다 총인과 더 높은 상관성을 나타내었는데 이러한 결과는 김과 원(Kim & Won 2011)의 보고와 일치하였다.

본 연구결과, 영양과 내성천의 상류는 생물학적 수질이 대부분 청정한 것으로 나타나 이를 보전하기 위한 관리가 필요한 것으로 판단된다. 또 내성천과 위

천은 외부의 오염과 영양염류의 유입에 대해 하천의 수질과 생물 군집이 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 특히 오염된 지류의 유입이 있는 내성천과 영양염의 농도가 높은 위천의 상류는 이를 개선하기 위한 수질관리가 필요한 것으로 판단된다.

IV. 결론

낙동강 상류 수계에 위치한 영강, 내성천과 위천의 부착돌말군집을 조사하고, 부착돌말 지수(DAI_{po}와 TDI)를 이용하여 생물학적 수질 평가를 하였다. 부착돌말은 이동성이 없어 장기적인 수질상태를 반영할 수 있다.

- 1) 환경요인 분석결과, 수온은 계절적 특성이 뚜렷하였고 용존산소와는 반대의 경향을 나타내었다. 영양염은 위천의 상류지점에서, 영강과 내성천은 본류에 비해 유입 지류에서 총질소와 총인 농도가 높게 나타났다.
- 2) 부착돌말군집은 총 158 분류군이 출현하였으며, 2목 3아목 8과 34속 143종 15변종으로 구성되었다. 영강은 *Achnanthes convergens*와 *Achnanthes minutissima*, 내성천은 *Nitzschia inconspicua*, 위천은 *Achnanthes minutissima*, *Cocconeis placentula* var. *lineata*와 *Navicula minima*가 우점종으로 출현하였다.
- 3) CCA분석 결과, 조사된 환경요인들중 전기전도도, 총질소와 총인이 낙동강 상류 수계의 부착돌말군집의 종 구성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 상관 분석 결과 부착돌말 지수들(DAI_{po}와 TDI)은 서로 높은 상관성(0.87)을 보였다.
- 4) 생물학적 수질은 영강이 DAI_{po}와 TDI가 대부분 A등급으로 평가되어 수질이 비교적 청정한 것으로 판단되었다. 내성천은 DAI_{po}와 TDI가 상류인 N1에서 모두 A등급이지만 지류와 본류에서는 C~D등급으로 평가되어 최상류는 청정하나, 오염된 지류의 유입 후 수질이 악화되어 보통에서 불량한 것으로 나타났다. 위천은 지점에 따라 DAI_{po}와 TDI가 A~D등급으로 수질의 변화가 심하였다.

- 5) 연구결과, 생물학적 수질이 대부분 청정한 것으로 평가된 영강과 내성천의 상류는 이를 보전하기 위한 관리가 필요하고, 특히 오염된 지류의 유입이 있는 내성천과 영양염의 농도가 높은 위천의 상류는 이를 개선하기 위한 수질관리가 필요한 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 국립 낙동강 생물자원관의 「담수 생물자원(미세조류) 발굴 및 주요 서식지 내 부착돌말류 다양성 연구」에 의해 지원되었습니다.

References

- Cho KJ. 2012. Freshwater diatoms V: *Achnanthes* et al. *Algal Flora of Korea* Vol. 3. No. 7. National Institute of Biological Resources. Ministry of Environment. p. 132. [Korean Literature]
- Choi JS, Chae HS, Kim HS. 2015. Analysis of the Epilithic Diatom Community and Comparison of Water Quality in the Kumho River. *Korean J Ecology and Environment*. 48(2): 115-121. [Korean Literature]
- Hendey, NI. 1974. The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms. *Microscopy*. 32: 423-426.
- Hwang SJ, Kim NY, Won DH, An KK, Lee JK, Kim CS. 2006. Biological assessment of water quality by using epilithic diatoms in major river systems (Geum, Youngsan, Seomjin River). *Korean Journal of Korean Society on Water quality*. 22(5): 784-795. [Korean Literature]
- Kelly MG, Whitton BA. 1995. The trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of*

- Applied Phycology. 7: 433-444.
- Kim HN, Park HK, Park SJ, Lee OM. 2012a. Biological water quality assessment of Joyang-river located at the upper region of North Han-river using DAIPo and TDI. *Journal of Ecology and Environment*. 45(3): 289-301. [Korean Literature]
- Kim JW, Ree Y, Lee OM. 2012b. The epilithic diatom community and water quality assessment in Pyeongchang river and inflow streams of Gangwon-do. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 28(4): 531-537. [Korean Literature]
- Kim YJ. 2001. An Assessment of Organic Pollution using Attached Diatom Assemblages in the Shinchon stream. *Korean Journal of Limnology*. 34: 199-205. [Korean Literature]
- Kim YJ, Lee OM. 2010. Assessment of water quality in Namdae-stream, Yeongok-stream and Sacheon-stream using trophic status and epilithic diatom indices. *Journal of Ecology and Environment*. 43(1): 117-128. [Korean Literature]
- Kim YJ, Won DH. 2011. Characteristics of epilithic diatom communities and physico-chemical habitats in the lake imha basin (Banbyeon stream, Kilan stream and Nakdong river). *Korean Journal of Environmental Biology*. 29(3): 180-194. [Korean Literature]
- Kim YJ, Sin KA, Lee OM. 2009. Water quality assessed by DAIPo and TDI of Bokha stream and Dal stream in South-han river. *Korean Journal of Environmental Biology*. 27(4): 414-424. [Korean Literature]
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1986. Bacillariophyceae. Teil 1. Naviculaceae. *Sussqasserflora von Mitteleuropa*. Band 2/1. Gustav Fisher Verlag. Jena. p. 876.
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1988. Bacillariophyceae. Teil 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. *Sussqasserflora von Mitteleuropa*. Band 2/2. Gustav Fisher Verlag. Jena. p. 596.
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1991. Bacillariophyceae 4. Teil: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. *Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4*. In: H. Ettl et al., *Suesswasserflora von Mitteleuropa*. VEB Gustav Fisher Verlag. Jena. p. 437. 88 pls., 2048 figs.
- Lee JH. 1998. Epilithic diatoms in the Naktong river and its value of the diatom assemblage index of organic water pollution (DAIPo). *Korean Journal of Limnology*. 31(1): 38-44. [Korean Literature]
- Lee JH. 2012. Freshwater diatoms VI: Navicula. *Algal Flora of Korea Vol. 3. No. 8*. National Institute of Biological Resources. Ministry of Environment. p. 60. [Korean Literature]
- Lowe RL, Pan Y. 1996. Benthic algal communities as biological indicators. In: *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems* (Eds.: Stevenson RJ, Bothwell ML, Lowe RL). Academic Press. San Diego. p. 705-739.
- Ministry of Environment. 2007. *Ecowater health research and assessment guidelines*. p. 163. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2008. *The Korean standard method of environmental pollutions for water quality*. [Korean Literature]
- Park JW, Choi JS, Kim MG. 2004. Variation of epilithic diatom community and an assessment of water quality by DAIPo in the middle

- reaches of the Nakdong river. Korean Journal of Ecology and Environment. 37(1): 70-77. [Korean Literature]
- Park YJ, Choi JS, Kim HS. 2014. Water quality assessment of the Sinchun stream based on epilithic diatom communities. Journal of Environmental Biology. 35(6): 1053-1059. [Korean Literature]
- Patrick R, Reimer CW. 1966. The Diatoms of the United States exclusive of Alaska and Hawaii. Vol. 1. Monographs of Academy of Natural Sciences of Philadelphia. 13(1): 1-688.
- Peszek Ł, Noga T, Stanek-Tarkowska J, Pajączek A, Kochman-Kędziora N, Pieniżek M. 2015. The effect of anthropogenic change in the structure of diatoms and water quality of the Żołyńianka and Jagielnia streams. Journal of Ecological Engineering. 16(2): 33-51.
- Prygiel J, Coste M. 1993. The assessment of water quality in the Artois-Picardie water basin (France) by the use of diatom indices. Hydrobiologia. 269/270: 343-349.
- Simonsen R. 1979. The Diatom system; Ideas on phyloheny. Bacillaria. 2: 9-71.
- Stevenson RJ, Pan Y. 1999. Assessing ecological conditions in riversand streams with diatoms. In : The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences (Stoermer EF, Smol JP eds.). Cambridge University Press. Cambridge. UK. p. 11-40.
- Van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. Netherlands Journal of Aquatic Ecology. 28: 117-133.
- Watanabe T, Asai K, Houki A, Tanaka S, Hizuka T. 1986. Saprophilous and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAI_{po}). Diatom. 2: 23-73.
- Watanabe T, Ohtsuka T, Tuji A, Houki A. 2005. Picture book and ecology of the freshwater diatoms. Uchida rokakuho. Tokyo. p. 666.