

낙동강 상류 수계인 내성천의 부착돌말 군집과 부착돌말지수를 이용한 생물학적 수질평가

최재신 · 이재학 · 김한순*

경북대학교 생물학과

The Epilithic Diatom Community and Biological Water Quality Assessment of Naeseongcheon Located at the Upper Region of Nakdong River. Choi, Jae sin (0000-0001-6280-7692), Jae hak Lee (0000-0001-5016-6496) and Han-Soon Kim* (0000-0002-8186-3849) (Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea)

Abstract The aims of this study were to analyze the physico-chemical factors and the characteristics of epilithic diatom community from 15 sites of the Naeseongcheon and tributaries located in the upper region of the Nakdong river from May to October 2016. The biological water quality was assessed using DAIPo and TDI. A total of 163 diatom taxa were identified with 2 orders, 3 suborders, 9 families, 35 genera, 145 species, 16 varieties and 2 forms. *Cocconeis placentula* var. *lineata* appeared at every examined sites. *Achnanthes lanceolata*, *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia inconspicua* and *Reimeria sinuata* were common taxa of the Naeseongcheon. *Nitzschia inconspicua* and *Achnanthes minutissima* were major dominant species. As a result of the CCA, Electrical conductivity and total nitrogen concentration were important factors determining the diatom species composition. In the result of the biological assessment using DAIPo, the Naeseongcheon was rated at class B with an average of 62.38. In the result of assessment using TDI, the Naeseongcheon was rated at class C with an average of 66.12.

Key words: epilithic diatom, DAIPo, TDI, Naeseongcheon

서 론

인간 활동에 의해 자연계에 방출되는 유해오염물질의 대부분은 최종적으로 수생태계로 유입되며, 영양염류를 포함한 이들 오염물질은 특정 수서생물의 먹이사슬을 통해 수생태계 전반에 걸쳐 영향을 미치게 된다. 영양염뿐만 아니라 서식처의 물리적 특성 또한 수서생물의 생육에 중요한 요인이 된다. 따라서 어떤 지역의 생물상의 특성은 그

수계 전반의 환경을 대표하기 때문에 선진국뿐 아니라 최근 우리나라에서도 생물학적인 평가기법을 이용하여 수생태계의 환경을 평가하고 있다(Kim *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015).

지표생물을 이용한 수질평가는 일차생산자인 조류로부터 저서 대형무척추동물 및 어류에 이르기까지 다양한 생물을 이용해 왔다. 특히 부착돌말은 다양한 수계에서 생육하며, 환경 변화에 대한 반응이 빠르고, 다양한 환경요인들에 대해 생태적으로 민감한 많은 종들이 존재할 뿐 아니라, 기질에 부착하여 성장하므로 장기간의 수환경 변화를 반영할 수 있는 특성을 가지기 때문에 이들을 수질 오염의 지표생물로 이용하여 왔다(Watanabe *et al.*, 1986, 1990;

Manuscript received 9 September 2017, revised 14 December 2017, revision accepted 14 December 2017
* Corresponding author: Tel: +82-53-950-5344, Fax: +82-53-953-3066, E-mail: kimhsu@knu.ac.kr

Van dam *et al.*, 1994; Peszek *et al.*, 2015). 최근 이런 부착돌말의 특성을 이용해 수질의 변화를 판단할 수 있는 지수들이 아시아(Watanabe *et al.*, 2005), 유럽(Prygiel and Coste, 1993; Kelly and Whitton, 1995)과 북미(Lowe and Pan, 1996; Stevenson and Pan, 1999) 등에서 개발되어 이용되고 있다.

우리나라에서는 유기물에 대한 내성 정도에 따른 생태군별 상대빈도로 수질을 평가하는 DAIPo(Watanabe *et al.*, 2005)를 주로 이용하였다. 이는 DAIPo가 우리나라의 수환경과 분류학적 유사성이 높고, 생태군별 종의 동정이 세분되어 있어서 종 분류에 더 신뢰도가 높고 수질 등급을 구분하는 데 유리하기 때문이다(KME, 2007). 그러나 우리나라의 수생태계는 넓은 영양염 구배를 가질 뿐 아니라 돌말의 성장과 수질 악화에 영양염이 주원인이므로, 영양염을 기준으로 하는 TDI(Kelly and Whitton, 1995)도 최근에는 같이 이용하여 평가하고 있다(Hwang *et al.*, 2006). 이를 이용한 국내의 연구에는 금강, 영산강과 섬진강의 연구(Hwang *et al.*, 2006), 북한천과 달천의 연구(Kim *et al.*, 2009), 남대천, 연곡천과 사천천의 연구(Kim and Lee, 2010), 조양강의 연구(Kim *et al.*, 2012a), 신천의 연구(Park *et al.*, 2014)와 금호강의 연구(Choi *et al.*, 2015) 등이 있다.

우리나라의 최대 하천인 낙동강 수계의 부착돌말 군집을 이용한 수질평가에 대한 연구는 본류에 대한 Lee(1998)의 연구, 중류 지역에 대한 Park *et al.*(2004)의 연구와 지류들에 대한 연구(Park *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015) 등이 있다. 그러나 낙동강의 제1지류로써, 낙동강 상류 수계의 수질에 영향을 미치는 내성천의 부착돌말 군집에 대한 연구나 내성천의 수질을 생물학적으로 평가한 연구는 수행된 바가 없는 실정이다.

본 연구에서는 낙동강의 상류 수역인 내성천과 그 지류들의 이화학적 환경요인을 조사하고, 부착돌말류의 종 분포 및 군집 특성을 분석하였다. 또한 이들을 이용한 생물학적 수질평가 방법인 DAIPo와 TDI로 내성천의 수질을 생물학적으로 평가하여 낙동강 수계의 주요 서식지 내 부착돌말류 다양성 조사를 통한 담수환경 정보 축적 및 담수 서식지 보전과 관리전략 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지역

본 연구는 낙동강 상류에 위치한 내성천과 지류들을 대상으로 총 15개의 지점을 선정하여 2016년 5월, 8월과 10

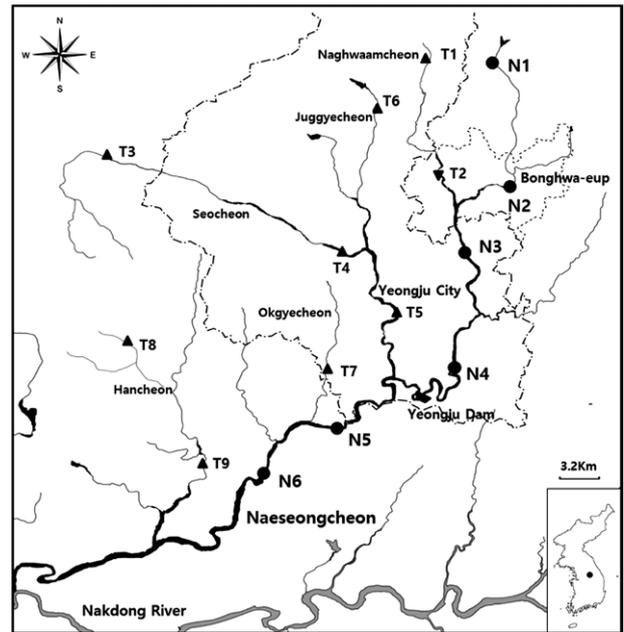


Fig. 1. A map showing the sampling sites at Naeseongcheon from May to October 2016.

월에 조사를 실시하였다. 내성천은 봉화군 물야면에서 발원하여 봉화 시내를 가로질러 106.29 km를 흘러 낙동강과 합류하는 낙동강의 제1지류이다. 본 연구에서는 내성천 본류에 6개 지점(N)과 지류에 9개 지점(T)을 선정하였다(Fig. 1).

2. 채집 및 분석

수온, pH, DO, 전기전도도, 탁도는 휴대용측정기(Horiba U-50series)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 영양염(TN, TP) 분석을 위한 시료는 1 L 플라스틱병에 채수하고 냉암소에서 보관하여 가능한 한 빨리 실험실로 옮긴 후, 수질오염공정시험기준(KME, 2014)에 준하여 분석하였다.

부착돌말 시료는 유속 20~30 cm sec⁻¹ 정도의 수심 10~30 cm에 있는 편평한 돌을 선택하여 솔로 상면을 긁어서 채집하였다. 종의 동정과 계수를 위한 연구표본은 KMnO₄ 법(Hendey, 1974)으로 시료를 세정한 후, Pleurax로 봉입하여 제작하였다. 부착돌말군집의 특성 분석을 위해 광학현미경(Zeiss Axioskop 2) 1,000배 하에서 검경하고, 현미경사진을 촬영하여 Patrick and Reimer(1966), Krammer and Lange-Bertalot(1986, 1988, 1991), Watanabe *et al.*(2005) 및 Cho(2011, 2012) 등을 이용하여 종을 동정하였으며 Simonsen(1979)의 체계에 따라 분류하였다. 또 출현종의 상대빈도는 임의로 선정된 현미경 시야에서 피각의 수를 500개 이상 계수하였고, 각 지점에서 출현한 종들 중

에서 상대빈도가 가장 높은 종을 우점종으로 하였다.

생물학적 수질평가를 위해 유기물지수인 DAIPo (Diatom Assemblage Index to Organic Pollution)는 Watanabe *et al.* (2005)의 방법에 따라 구하였는데, DAIPo는 조사기간 동안 출현한 청수성종과 오염성종의 상대빈도에 근거하여 산출하였다. DAIPo의 범위는 0~100이며 0은 가장 오염된 상태이며 100은 가장 청정한 상태를 의미한다. 영양염지수인 TDI (Trophic Diatom Index)는 Kelly and Whitton (1995)의 방법에 따라 구하였는데, TDI는 조사기간 동안 출현한 모든 부착돌말을 대상으로 각 종의 오염에 대한 민감도를 평가하여 일정한 가중치와 오염지표값을 각각 부여하여 계산하여 산출하였다. 또한 산출된 지수는 4등급(A: 최적, B: 양호, C: 보통, D: 불량)으로 평가하였다(KME, 2007).

이화학적 수질 항목이 부착돌말의 종조성에 미치는 영향을 파악하기 위한 정준상관분석(Canonical Correspondence Analysis)은 CANOCO (Canonical Community Ordination) 프로그램 (ver. 5; Ter Braak and Šmilauer, 2013)을 사용하였다. 부착돌말지수들과의 상호관계는 Pearson's 계수를 이용하였고, 분석은 SPSS (ver. 23)를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 환경요인

내성천과 지류들의 수온 변화는 12.8~30.0°C의 범위였으며 대체로 8월에 높고 10월에 낮은 계절적 차이를 보였

Table 1. Physico-chemical factors at Naeseongcheon from May to October 2016.

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
WT(°C)															
May	16.7	20.3	23.5	22.2	25.8	25.8	16	20.6	16	22.9	24.3	18.7	20.3	20.1	23.1
Aug.	17.8	22.7	26	28	29.5	30	21.7	25.5	22.1	27	27.4	23.8	25.3	24	29.2
Oct.	16.8	15.6	18.2	21	17.2	17.4	14.2	16.4	12.8	15.2	16.2	13.8	16	15.2	17.2
Mean	17.1	19.5	22.6	23.7	24.2	24.4	17.3	20.8	17.0	21.7	22.6	18.8	20.5	19.8	23.2
pH															
May	6.94	7.4	7.01	6.68	6.87	8.36	7.09	7.46	8.2	7.06	7.69	7.5	7.27	7.1	7.83
Aug.	7.27	6.86	6.76	6.74	7.84	8.37	8.01	7.39	7.53	7.76	7.64	6.47	7.19	6	8.26
Oct.	7.41	7.58	7.32	9.07	8.1	8.42	7.49	7.25	6.57	6.58	7.04	7.2	7.09	7.4	6.96
Mean	7.21	7.28	7.03	7.50	7.60	8.38	7.53	7.37	7.43	7.13	7.46	7.06	7.18	6.83	7.68
DO (mg L ⁻¹)															
May	6.51	7.25	6.78	5.95	7.7	8.14	6.22	8.88	5.89	7.41	7.68	6.52	7.32	8.73	9.32
Aug.	6.91	6.84	7.19	7.54	6	6.85	6.95	7.27	7.51	6.91	4.52	7.89	4.55	7.24	7.55
Oct.	8.84	9.28	9.94	13.28	11.72	12.43	9.24	9.87	9.32	10.4	9.65	9.2	9.53	8.74	9.72
Mean	7.42	7.79	7.97	8.92	8.47	9.14	7.47	8.67	7.57	8.24	7.28	7.87	7.13	8.24	8.86
Tur. (NTU)															
May	0.11	3.14	1.56	1.19	0.3	1.75	0	5.55	0.83	2.59	2.75	1.43	0.52	2.81	3.33
Aug.	0.82	5.15	10.98	8.95	10.77	7.47	0.02	3.04	0	2.66	8.19	1.83	0	0	1.55
Oct.	0	0.08	2.69	6.97	1.34	0	0	0	0	5.14	0	0	0	0	0
Mean	0.31	2.79	5.08	5.70	4.14	3.07	0.01	2.86	0.28	3.46	3.65	1.09	0.17	0.94	1.63
EC (μS cm ⁻¹)															
May	70.2	235	259	224	347	255	102.4	193	138.2	194	195.6	187.5	276	93.5	223
Aug.	51	204	241	222	249	149.4	78	282	148.3	172.2	182	233	290	78.9	249
Oct.	75.6	262	286	292	380	380	97.7	268	120	182	230	294	426	94.6	222
Mean	65.6	233.7	262.0	246.0	325.3	261.5	92.7	247.7	135.5	182.7	202.5	238.2	330.7	89.0	231
T-N (mg L ⁻¹)															
May	1.461	3.192	2.267	2.03	2.618	2.576	2.368	3.127	1.805	3.496	2.635	3.458	1.589	2.207	1.907
Aug.	1.352	2.969	3.021	2.457	3.29	3.415	2.325	4.646	1.496	3.434	3.319	5.292	2.732	1.403	1.86
Oct.	1.126	2.841	2.678	1.614	3.047	3.18	2.558	3.498	1.711	3.38	3.103	5.128	3.947	1.879	1.892
Mean	1.313	3.001	2.655	2.034	2.985	3.057	2.417	3.757	1.671	3.437	3.019	4.626	2.756	1.830	1.886
T-P (mg L ⁻¹)															
May	0.016	0.023	0.021	0.011	0.03	0.018	0.02	0.036	0.017	0.017	0.022	0.023	0.018	0.019	0.033
Aug.	0.015	0.039	0.057	0.036	0.054	0.058	0.01	0.108	0.011	0.015	0.05	0.047	0.052	0.017	0.025
Oct.	0.023	0.113	0.107	0.057	0.039	0.05	0.024	0.021	0.011	0.022	0.023	0.028	0.027	0.015	0.036
Mean	0.018	0.058	0.062	0.035	0.041	0.042	0.018	0.055	0.013	0.018	0.032	0.033	0.032	0.017	0.031

Table 2. Dominant species and relative abundance (%) at Naeseongcheon from May to October 2016.

Site	Dominant species (relative abundance %)		
	May	Aug.	Oct.
N1	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (31.50)	<i>Achnanthes minutissima</i> (45.88)	<i>Achnanthes linearis</i> (48.54)
N2	<i>Nitzschia fonticola</i> (12.78)	<i>Nitzschia fonticola</i> (15.16)	<i>Achnanthes minutissima</i> (19.72)
N3	<i>Fragilaria elliptica</i> (18.41)	<i>Navicula atomus</i> (39.14)	<i>Navicula minima</i> (25.73)
N4	<i>Achnanthes minutissima</i> (21.40)	<i>Achnanthes minutissima</i> (56.40)	<i>Cymbella turgidula</i> (15.82)
N5	<i>Nitzschia inconspicua</i> (50.92)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (75.63)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (63.87)
N6	<i>Nitzschia inconspicua</i> (87.57)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (79.09)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (43.73)
T1	<i>Achnanthes convergens</i> (64.43)	<i>Achnanthes linearis</i> (36.44)	<i>Achnanthes linearis</i> (50.00)
T2	<i>Gomphonema minutum</i> (29.50)	<i>Navicula subminuscula</i> (41.67)	<i>Gomphonema clevei</i> (23.15)
T3	<i>Achnanthes linearis</i> (59.14)	<i>Reimeria sinuata</i> (23.92)	<i>Achnanthes minutissima</i> (28.94)
T4	<i>Gomphonema clevei</i> (32.46)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (39.63)	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (12.99)
T5	<i>Nitzschia inconspicua</i> (17.82)	<i>Nitzschia palea</i> (22.08)	<i>Navicula minima</i> (42.05)
T6	<i>Nitzschia inconspicua</i> (27.62)	<i>Navicula atomus</i> (31.94)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (48.65)
T7	<i>Navicula minima</i> (34.27)	<i>Navicula subminuscula</i> (30.97)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (15.24)
T8	<i>Achnanthes linearis</i> (29.74)	<i>Navicula atomus</i> (24.78)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (15.19)
T9	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i> (24.49)	<i>Nitzschia inconspicua</i> (23.68)	<i>Navicula minima</i> (23.97)

Table 3. Species number, DAIpO and TDI at Naeseongcheon from May to October 2016.

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Species number															
May	33	56	49	47	45	38	25	43	36	48	50	44	40	21	60
Aug.	37	50	32	46	27	37	34	27	36	42	47	36	39	40	39
Oct.	17	34	45	57	21	34	41	38	26	51	39	51	43	30	36
Mean	29	47	42	50	31	36	33	36	33	47	45	44	41	30	45
DAIpO															
May	95.72	70.11	58.36	70.22	53.93	51.44	96.75	58.90	92.96	87.27	57.74	46.26	38.70	78.07	87.27
Aug.	91.96	65.08	30.64	74.88	50.17	47.09	86.83	28.13	91.24	64.25	32.58	42.20	38.05	64.56	66.16
Oct.	93.13	83.39	42.49	52.05	48.73	43.49	87.86	52.83	92.87	61.26	35.74	44.41	38.10	72.42	55.18
Mean	93.60	72.86	43.83	65.72	50.94	47.34	90.48	46.62	92.36	70.92	42.02	44.29	38.29	71.68	69.54
TDI															
May	38.07	55.27	65.38	51.81	80.17	94.30	32.57	74.02	32.33	38.24	72.19	85.59	89.39	48.02	52.67
Aug.	31.10	65.60	94.70	37.90	91.80	93.90	45.60	93.30	53.80	72.30	86.00	88.80	89.20	73.20	60.30
Oct.	30.30	39.20	81.30	62.00	91.30	86.10	41.00	77.50	44.00	67.30	82.90	90.40	88.30	70.30	79.10
Mean	33.16	53.36	80.46	50.57	87.76	91.43	39.72	81.61	43.38	59.28	85.59	88.26	88.96	63.84	64.02

다(Table 1). pH는 평균 6.83~8.38의 범위로 중성에서 약 알칼리성을 나타내어 국내 하천 연구들(Kim *et al.*, 2012b; Choi *et al.*, 2015)과 유사한 값을 나타내었다. 용존산소는 4.52~13.28 mg L⁻¹의 범위로 10월에 높고 8월이 낮게 나타나 수온에 의존적인 경향을 보였다. 탁도는 0~10.98 NTU의 범위로 지류보다 본류가 더 높았으며, 특히 8월에 높은 값을 나타내어 여름에 집중된 강우의 영향을 받은 것으로 판단된다. 전기전도도는 51~426 μS cm⁻¹의 범위를 나타내었다. 총질소는 1.126~5.292 mg L⁻¹의 범위로 대체로 8월에 높게 나타났으며, 특히 지류의 T2와 T6에서 평균 3.757 mg L⁻¹ 이상의 높은 농도를 나타내었다. 총인도 0.010~0.113 mg L⁻¹의 범위로 8월에 높게 나타났으나, 10

월의 N2와 N3에서 현저히 높은 농도를 나타내었다.

2. 부착돌말 군집

조사기간 동안 내성천과 지류들에서 출현한 부착돌말류는 총 163종이었으며, 이들은 2목 3아목 9과 35속 145종 16변종 2품종으로 분류되었다. 2016년 10월의 N1에서 17분류군으로 가장 적게 출현하였고, 5월의 T9에서 60분류군으로 가장 많이 출현하였다. 조사시기별 평균 출현 종수는 39종으로, 5월에 42종, 8월과 10월에 각각 38종이 출현하였다. 지점별 평균 출현 종수는 N4에서 50종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, N1에서 29종으로 가장 적은 종이 출현하였다(Table 3).

부착돌말류의 속별 구성은 *Navicula*속이 31종으로 가장 다양하게 출현하였으며, *Nitzschia*속이 19종, *Fragilaria*속이 18종, *Gomphonema*속이 15종, *Achnanthes*속이 13종, *Cymbella*속이 12종, *Amphora*, *Cocconeis*와 *Cyclotella*속이 5종, *Surirella*속이 4종, *Aulacoseira*속이 3종, *Caloneis*, *Cyclostephanos*, *Diatoma*, *Eunotia*, *Gyrosigma*, *Hannaea*, *Pinnularia*, *Synedra*와 *Thalassiosira*속이 2종, *Asterionella*, *Bacillaria*, *Cymatopleura*, *Diploneis*, *Encyonema*, *Ephithemia*, *Frustulia*, *Hantzschia*, *Melosira*, *Meridion*, *Neidium*, *Pleurosira*, *Reimeria*, *Rhoicosphenia*와 *Stauroneis*속은 각각 1종씩 출현하였다.

본 연구에서 출현한 대부분의 분류군들은 주로 중성에서 알칼리성 수역에서 출현하는 분류군들로 *Cocconeis placentula* var. *lineata*는 모든 지점에서 출현하였으며, *Achnanthes lanceolata*, *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia inconspicua*와 *Reimeria sinuata*는 몇 지점을 제외한 대부분의 지점에서 출현하여 내성천의 보편적인 분류군들로 조사되었다. 또한 대부분 낮은 산성수계에서 생육하는 분류군인 *Eunotia* 중에서, 다른 종들보다 전기전도도가 낮고 pH 6.5~7.5 사이의 약알칼리 수역에서도 출현하는 *Eunotia minor*가 출현하였다(Alles *et al.*, 1991). 특히 *Pleurosira laevis*는 금호강의 지류인 신천(Kim *et al.*, 2008)에서 처음 보고된 이래 낙동강 수계에서 간혹 발견되는 희귀종으로, 높은 온도와 영양염에서 출현하는 부영양화 오염 지표종이다(Cho, 2012; Park *et al.*, 2017).

조사지점의 우점종들은 *Achnanthes convergens*, *Achnanthes linearis*, *Achnanthes minutissima*, *Cocconeis placentula* var. *lineata*, *Cymbella turgidula*, *Fragilaria pinnata*, *Gomphonema clevei*, *Gomphonema minutum*, *Navicula atomus*, *Navicula minima*, *Navicula subminuscula*, *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia inconspicua*, *Nitzschia palea*와 *Reimeria sinuate*로 15종이었다. 가장 빈번하게 나타난 우점종은 *Nitzschia inconspicua*로 13개 지점에서 우점종으로 출현하였으며, *Achnanthes linearis*와 *Achnanthes minutissima*가 5개 지점에서 각각 우점종으로 출현하여 내성천의 주요 우점종으로 조사되었다. 그중 *Nitzschia inconspicua*는 알칼리성 수역에 대표적으로 출현하는 보편종(Watanabe *et al.*, 2005)이고, *Achnanthes linearis*와 *Achnanthes minutissima*는 중성수역에서 동시에 발생하거나 우점하는 종들로 이들은 낙동강 수계에서 흔히 보고되는 종들이다(Cho, 2012). 분류와 지류들의 대부분 지점들에서 우점종의 변화가 있었으나, N5와 N6은 전 조사기간 동안 *Nitzschia inconspicua*가 43.73%~87.57%의 상대빈도로 우점하여 안정된 군집을 나타내었다(Table 2). Wata-

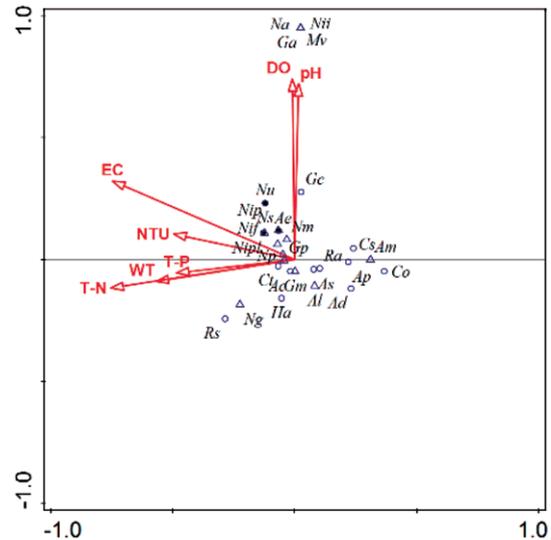


Fig. 2. Canonical correspondence-analysis (CCA) ordination of the two axes showing the scores for the species and the environmental variables (○: saproxenous taxa, △: indifferent taxa, ●: saprophilous taxa, Ac: *Achnanthes convergens*, Ad: *Achnanthes delicatula*, Ae: *Achnanthes exigua*, Al: *Achnanthes linearis*, Am: *Achnanthes minutissima*, As: *Achnanthes subhudsonis*, Ap: *Amphora pediculus*, Co: *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, Cs: *Cymbella silesiaca*, Ct: *Cymbella turgidula*, Ga: *Gomphonema angustum*, Gc: *Gomphonema clevei*, Gm: *Gomphonema minutum*, Gp: *Gomphonema parvulum*, Ha: *Hannaea arcus* var. *subarcus*, Mv: *Melosira varians*, Na: *Navicula atomus*, Ng: *Navicula gregaria*, Nm: *Navicula minima*, Np: *Navicula perminuta*, Nu: *Navicula pupula*, Ns: *Navicula seminulum*, Rs: *Reimeria sinuate*, Ra: *Rhoicosphenia abbreviata*, Nif: *Nitzschia fonticola*, Nii: *Nitzschia inconspicua*, Nip: *Nitzschia palea*, Nipl: *Nitzschia paleacea*).

nabe *et al.* (2005)의 생태군 기준에 따르면 5월의 4개 지점, 8월의 1개 지점과 10월의 3개 지점에서 *Cocconeis placentula* var. *lineata* 등의 청수성종이 우점하고 나머지 지점들은 모두 *Nitzschia inconspicua* 등의 광적응성종이 우점하였으나, 8월에만 6개 지점에서 *Navicula subminuscula* 등의 오염성종이 22.08%~41.67%로 우점하였는데, 이는 8월에 증가한 영양염들과 탁도의 영향으로 수질이 악화되었기 때문인 것으로 사료된다(Kim *et al.*, 2012a).

이화학적 환경요인들과 출현종(상대빈도 5% 이상)들과의 상관관계를 나타내는 정준상관분석(Canonical Correspondence Analysis) 결과, 종조성에 영향을 미치는 가장 큰 환경요인은 전기전도도로 나타났다(Fig. 2). *Achnanthes delicatula*, *Achnanthes subhudsonis*, *Amphora pediculus*, *Cocconeis placentula* var. *euglypta* 등은 전기전도도에 음(-)의 관계를 보였으며, Watanabe *et al.* (2005)의 생

Table 4. Correlation comparison of items of water quality at Naeseongcheon from May to October 2016.

	WT (°C)	pH	DO (mg L ⁻¹)	Tur. (NTU)	Con. (μS m ⁻¹)	T-N (mg L ⁻¹)	T-P (mg L ⁻¹)	DAIpo	TDI ¹
WT (°C)	1.00	0.16	-0.47**	0.59**	0.12	0.11	0.17	-0.31*	-0.32*
pH		1.00	0.25	0.13	0.19	0.07	0.17	0.05	0.08
DO (mg L ⁻¹)			1.00	0.14	0.36*	0.03	0.16	0.10	0.09
Tur. (NTU)				1.00	0.08	0.20	0.32*	-0.30*	0.23
Con. (μS cm ⁻¹)					1.00	0.47**	0.42**	-0.68**	-0.62**
T-N (mg L ⁻¹)						1.00	0.36*	-0.58**	-0.56**
T-P (mg L ⁻¹)							1.00	-0.44**	-0.32*
DAIpo								1.00	0.93**
TDI ¹									1.00

¹TDI(100-X)

*P<0.01, **P<0.05, n=45.

태균 기준에 따르면 청수성종과 광적응성종들이었다. *Achnanthes exigua*, *Navicula pupula*, *Navicula seminulum*, *Nitzschia palea* 등은 전기전도도에 양(+)의 관계를 보였으며 오염성종들과 광적응성종들이었다. 또한 영양염중 총질소 역시 부착돌말 종조성에 영향을 미치는 것으로 나타나, 부착돌말류들의 성장에 영양염류의 영향도 큰 것으로 나타났다(Hwang *et al.*, 2006).

3. 생물학적 수질평가

부착돌말을 이용한 수질평가 결과, 내성천의 DAIpo는 38.05~96.75의 범위를 보였으며, 5월의 N1에서 95.72로 가장 높았고 8월의 N3에서 30.64로 가장 낮았다. 지류들의 DAIpo는 5월의 T1에서 96.75로 가장 높았으며, 8월의 T2에서 28.13으로 가장 낮았다. TDI는 30.30~94.70의 범위를 보였으며, N1에서 평균 TDI가 33.16으로 가장 낮게 나타났다으며 N6에서 91.43으로 가장 높게 나타났다(Table 3).

부착돌말지수들(DAIpo와 TDI)을 환경부·국립환경과학원(2007)에서 제시한 4등급 체계와 비교하면, 내성천의 최상류 지점(N1)에서 DAIpo와 TDI는 조사기간 동안 모두 A등급을 나타내었다. N2, N3와 N4에서 DAIpo는 대부분 B~C등급, TDI는 C~D등급으로 나타났으며, 특히 N3는 8월에 DAIpo와 TDI 모두 D등급이었다. N5와 N6는 조사기간 동안 DAIpo는 C등급을, TDI는 D등급을 나타내었다. 또 내성천으로 유입되는 지류의 상류인 T1과 T3에서 DAIpo는 A등급을, TDI는 A~B등급으로 나타났으며 계절적인 변화는 없었으나 본류로 유입되는 지점인 T2, T5, T6와 T7에서 DAIpo는 C~D등급을, TDI는 D등급으로 낮아졌다. 대부분의 지류 지점들이 8월에 등급이 낮아졌는데, 특히 T2의 유입 후 N3에서 등급이 급격히 낮아졌다.

내성천의 수질등급은 평균 DAIpo가 62.38로 B등급이나, 본류로 유입되는 하류들의 평균 DAIpo는 49.11로 C등

급을 나타내었다. 또 평균 TDI는 66.12로 C등급이나, 본류로 유입되는 하류들의 평균 TDI는 78.73으로 D등급을 나타내어 내성천은 본류가 지류보다 등급이 높았다. 또 내성천의 최상류 지점은 조사시기에 관계없이 A등급을 유지하고 있으나, C~D등급을 나타내는 지류들(T2, T5와 T7)의 유입 후 본류의 등급이 낮아졌다. 특히 T2의 유입 후 N3의 등급이 급격히 낮아졌고, 상류에 산업단지와 농공단지가 위치한 T7의 평균 DAIpo는 38.28로 조사기간 중 모두 D등급으로 조사되어 내성천 본류로 유입되는 지류들에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

4. 부착돌말지수와 화학적 수질의 비교

부착돌말지수(DAIpo와 TDI)들은 전기전도도와 0.68과 0.62의 상관관계를 각각 나타내었다(Table 4). 총질소와도 0.58과 0.56으로 각각 높은 상관성을 나타내어 수질오염에 지표성이 높은 것으로 나타났다(Lee, 1998; Kim, 2001). 영양염은 대체로 8월에 높게 나타났는데 이는 계절적인 영향으로 판단되며 DAIpo는 B등급인 5월과 10월에 비해 8월에는 평균 59.25로 C등급이었다. 또 TDI도 8월에는 평균 71.83으로 D등급을 나타내었다(Figs. 3, 4).

특히 주변에 농경지와 주거지역이 있는 T2는 총질소와 총인이 모두 8월에 높게 나타났다. T2의 유입 후 N3의 부착돌말지수(DAIpo와 TDI)들의 변화는 심하였으며 등급도 급격히 낮아졌다. 또한 총질소는 대체로 본류보다 지류에서 높게 나타났으며 부착돌말지수들을 이용한 생물학적 수질평가의 결과와 같았다. 이는 영양염에 의한 유기물량 증가와 수질 악화로, 지류의 유입 시 본류의 수질에 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 총인은 총질소보다 낮은 상관성을 나타내었는데 이는 금호강과 신천 등에서의 결과와 일치하며(Park *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015), 내성천의 수질도 총질소의 영향을 더 받는 것으로 나타났다.

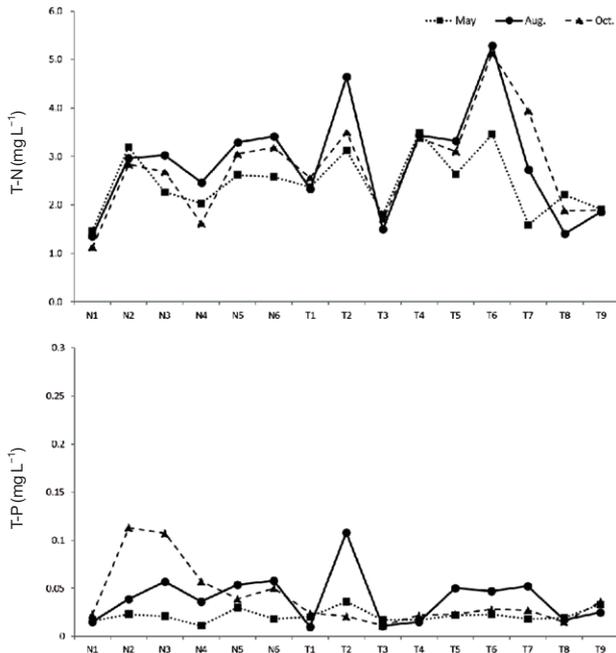


Fig. 3. Variations of T-N and T-P at Naeseongcheon from May to October 2016.

또 부착돌말지수들(DAIpo와 TDI)은 서로 상당히 높은 상관성(0.93)을 보였는데, Kim *et al.* (2009, 2010)의 결과(0.83, 0.51~0.89)보다 더 높은 상관성을 보였다. 이는 수질의 경향성이 뚜렷한 상, 하류에 조사지점이 선정되었기 때문으로 사료된다. 이처럼 부착돌말지수들에 의한 생물학적 수질평가는 수질의 차이가 뚜렷한 수역에서는 상관성이 높으나 경향성이 뚜렷하지 않는 수역에서는 상관성이 낮아질 수 있어서 이화학적인 수질요인들의 분석을 통해 더 세밀하게 평가를 할 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 낙동강 상류에 위치한 내성천과 지류들을 대상으로 총 15개의 지점에서 2016년 5월, 8월 및 10월의 총 3회에 걸쳐 이화학적 환경요인들과 부착돌말 군집의 특성을 분석하고, 생물학적 방법인 DAIpo와 TDI를 이용하여 수질을 평가하였다. 내성천 수계에서 출현한 부착돌말류는 2목 3아목 9과 35속 145종 16변종 2품종으로 구성된 총 163종이 출현하였다. *Cocconeis placentula* var. *lineata*는 모든 지점에서 출현하였으며, *Achnanthes lanceolata*, *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia inconspicua*와 *Reimeria sinuate*는 내성천의 보편적인 분류군들로 조사되었다. *Nitzschia inconspicua*와 *Achnanthes minutissima*가 주요

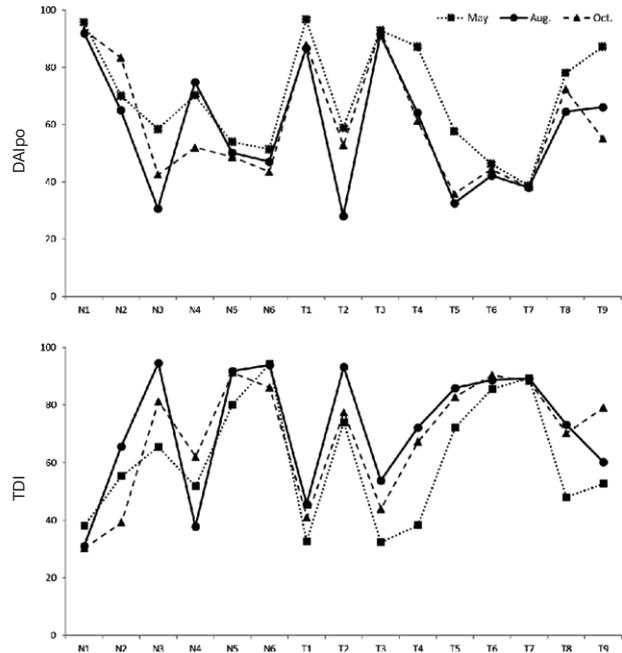


Fig. 4. Variations of DAIpo and TDI at Naeseongcheon from May to October 2016.

우점종으로 출현하였다. CCA 분석 결과, 부착돌말 종조성은 전기전도도와 총질소에 가장 많이 영향을 받는 것으로 나타났다. DAIpo를 이용한 생물학적 수질평가 결과, 내성천의 DAIpo는 평균 62.38로 B등급이나, TDI로 평가한 결과, 내성천의 TDI는 평균 66.12로 C등급으로 나타났다.

사 사

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

REFERENCES

- Alles, E., M. Norpel-Schempp and H. Lange-Bertalot. 1991. Zur Systematik und Ökologie charakteristischer Eunotia-Arten (Bacillariophyceae) in elektrolyt-armen Bachoberläufen. *Nova Hedwigia* **53**: 171-213.
- Cho, K.J. 2012. Freshwater diatoms V: Achnanthes et al. Algal Flora of Korea Vol. 3. No. 7. National Institute of Biological Resources, Ministry of Environment. 132pp.
- Choi, J.S., H.S. Chae and H.S. Kim. 2015. Analysis of the Epilithic Diatom Community and Comparison of Water

- Quality in the Kumho River. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**(2): 115-121.
- Hendey, N.I. 1974. The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms. *Microscopy* **32**: 423-426.
- Hwang, S.J., N.Y. Kim, D.H. Won, K.K. An, J.K. Lee and C.S. Kim. 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.
- Kelly, M.G. and B.A. Whitton. 1995. The trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* **7**: 433-444.
- Kim, H.N., H.K. Park, S.J. Park and O.M. Lee. 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.
- Kim, J.W., Y. Ree and O.M. Lee. 2012b. The epilithic diatom community and water quality assessment in Pyengchang river and inflow streams of Gangwon-do. *Journal of Korean Society on Water Environment* **28**(4): 531-537.
- Kim, Y.J. 2001. An Assessment of Organic Pollution using Attached Diatom Assemblages in the Shinchon Stream. *Korean Journal of Limnology* **34**: 199-205.
- Kim, Y.J. and O.M. Lee. 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.
- Kim, Y.J., K.A. Sin and O.M. Lee. 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.
- Kim, Y.S., J.S. Choi, J.H. Kim, S.C. Kim, J.W. Park and H.S. Kim. 2008. The effects of effluent from a closed mine and treated sewage on epilithic diatom communities in a Korean stream. *Nova Hedwigia* **86**: 507-524.
- Korea Ministry of Environment 2007. Ecowater health research and assessment guidelines. 163pp.
- Korea Ministry of Environment (KME) 2014. The Korean standard method of environmental pollutions for water quality. 1375pp.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot, 1986. Bacillariophyceae. Teil 1. Naviculaceae. Susswasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1. Gustav Fisher Verlag, Jena. 876pp.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot, 1988. Bacillariophyceae. Teil 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Susswasserflora von Mitteleuropa. Band 2/2. Gustav Fisher Verlag, Jena. 596pp.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot, 1991. Bacillariophyceae 4. Teil: Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema* Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4. In: Ettl H. *et al.*, Susswasserflora von Mitteleuropa. VEB Gustav Fisher Verlag, Jena. **2**: 1-437 pp. 88 pls., 2048 figs.
- Lee, J.H. 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.
- Lowe, R.L. and Y. Pan. 1996. Benthic algal communities as biological indicators. In: *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems* (Eds.: R.J. Stevenson, M.L. Bothwell and R.L. Lowe). Academic Press, San Diego. pp. 705-739.
- Park, J.W., J.S. Choi and M.G. Kim. 2004. Variation of epilithic diatom community and an assessment of water quality by DAIPo in the middle reaches of the Nakdong river. *Korean Journal of Ecology and Environment* **37**(1): 70-77.
- Patrick, R. and C.W. Reimer. 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 pp.
- Park, S.Y., J.S. Choi, J.H. Kim and H.S. Kim. 2017. Morphology and physico-ecology of two rare freshwater epilithic diatoms: *Hydrosera whampoensis* and *Pleurosira laevis*. *Nova Hedwigia* **105** Heft(1-2): 152-166.
- Park, Y.J., J.S. Choi and H.S. Kim. 2014. Water quality assessment of the Sinchun stream based on epilithic diatom communities. *Journal of Environmental Biology* **35**(6): 1053-1059.
- Peszek, Ł., T. Noga, J. Stanek-Tarkowska, A. Pajaczek, N. Kochman-Kędziora and M. Pieniążek. 2015. The effect of anthropogenic change in the structure of diatoms and water quality of the Żołyńianka and Jagielnia streams. *Journal of Ecological Engineering* **16**(2): 33-51.
- Prygiel, J. and M. Coste. 1993. The assessment of water quality in the Artois - Picardie water basin (France) by the use of diatom indices. *Hydrobiology* **269/270**: 343-349.
- Simonsen, R. 1979. The Diatom system; Ideas on phylogeny. *Bacillaria* **2**: 9-71.
- Stevenson, R.J. and Y. Pan. 1999. Assessing ecological conditions in rivers and streams with diatoms. p. 11-40. In: *The Diatoms: Applications to the Environmental and Earth Sciences* (Stoermer, E.F. and J.P. Smol eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Van Dam, H., A. Mertens and J. Sinkeldam. 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* **28**: 117-133.
- Watanabe, T., K. Asai and A. Houki. 1990. Numerical simulation of organic pollution in flowing water. *Hazardous waste Containment and Treatment* **4**: 251-281.
- Watanabe, T., K. Asai, A. Houki, S. Tanaka and T. Hizuka. 1986. Saprophylic and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAIPo). *Diatom* **2**: 23-73.
- Watanabe, T., T. Ohtsuka, A. Tuji and A. Houki. 2005. Picture book and ecology of the freshwater diatoms. Uchida rokakuho, Tokyo. 666pp.