

중등학생의 환경교육 활성화를 위한 부착돌말영양지수 TDI(Trophic Diatom Index)의 간이화와 적용*

김성민** · 이정호***

Simplification of TDI (Trophic Diatom Index) to Promote Environmental Education for Secondary Students and its Application*

Seoung Min Kim** · Jung Ho Lee***

요약: 부착돌말영양지수 TDI(Trophic Diatom Index)는 우리나라에서 물환경보전법에 따라 전국 하천 3,016개 지점에 대한 조사가 법제화 되어있으나, 시료 세정 과정의 위험성과 분석 시간의 과도함, 중동정의 어려움 등으로 학생을 비롯한 비전문가인 일반인이 TDI를 교육받고 조사하기에는 어려움이 있다. 본 연구는 안전한 시료 세정법 제안과 합리적인 피카 계수량 선정, 중동정의 간이화를 통해 TDI 평가 방법을 간소화하고, 이를 환경교육의 도구로써 활용할 수 있는지 검증하였다. 시료 세정에 사용되는 강산성 화학제 대신 상대적으로 안전한 가정용 배수관 세정제를 이용한 세정법을 제안하였다. 피카 계수량에 따른 TDI 결과를 대응 표본 t-검정과 RMSE(Root Mean square Error)로 비교하여 적정 피카 계수량을 300개로 선정하였다. 기선발된 115종의 지표-규조군을 이용하여 TDI 평가에서 중동정을 간소화하였다. 간이화된 TDI를 이용하여 비전문가인 고등학생들과 실제 수질 평가를 진행하고 전문 조사자의 TDI 결과와 비교하였다. 대응 표본 t-검정과 RMSE 결과를 토대로 두 집단의 TDI 결과는 동일한 것으로 분석되어 간이화된 TDI가 일반인의 환경교육을 위한 학습 도구로써 활용 가능할 것으로 기대된다.

주요어: 부착돌말, 간이화, 환경교육, TDI

Abstract: The TDI (Trophic Diatom Index), a water quality assessment method using epilithic diatoms, is mandated according to the Water Environment Conservation Act on total 3,016 nationwide river and stream sites in South Korea. However, there are various difficulties of the sample cleaning and mounting process, and the analysis should be required a significant amount of time. The propose of this study is to simplify the survey method of TDI by proposing a safe sample cleaning method, selecting a reasonable number of valves to count and simplifying the identification process. In addition, it is verified whether the simplified method can be used as a tool for the environmental education in schools. A cleaning method using a relatively safe drain cleaner is proposed instead of the strong acid chemicals used in sample cleaning. To select a reasonable number of counting, paired t-tests and RMSE (Root Mean Square Error) were conducted on the TDI according to number of valves to count and showed that 300 counts were selected as a reasonable number of valves to count. The identification process could be able to simplify by using total 115 species of the indicator-diatom taxa. The simplified TDI method was taught to non-expert high school students and they conducted actual water quality assessments. The results were compared with those of

* 본 연구는 2022학년도 대구대학교 연구년 과제(2022-0038)로 수행되었음.

** 대구대학교 생명과학과 박사과정(Graduate Student, Dept. of Life Science, Daegu University), seoungmin3162@gmail.com

*** 대구대학교 생물교육과 교수(Professor, Dept. of Biology Education, Daegu University), jungho@daegu.ac.kr

professional investigators. The paired t-test and RMSE indicated that the samples belonged to the same group. Therefore, it is expected that the simplified TDI will be valuable as a tool in environmental education for non-professionals.

Key words: Epilithic diatom, Simplification, Environmental education, TDI

I. 서론

환경교육에서 체험활동의 의미와 효과는 매우 중요하다. 아직까지 학교 수업에서 이루어지는 환경교육을 위한 체험활동 프로그램은 충분히 다양하게 갖추어지지 않은 실정이다(추정인·이석희, 2022). 특히 환경문제를 탐구하고 해결하기 위한 실행 계획 수립 등의 효과적이고 실제적인 환경교육을 위해서는 체험활동과 관련된 수업 설계가 반드시 필요하다(이지호·김동렬, 2019). 더욱이 지역에 따라 다양한 종류의 환경문제가 발생하는 것이 일반적이어서 지역 단위 수준에서의 개별적 환경교육이 요구되고 있으며, 지역 현황을 반영한 다양한 환경교육 프로그램의 발굴과 보급이 시급한 실정이다(최유진·이재영, 2023).

그러므로, 환경교육의 장소로 접근이 쉬운 지역 하천을 활용하는 것은 큰 이점이 된다(신재열, 2015). 교실 안팎에서도 학생들의 지역 하천 생태교육 체험을 위해 다양한 노력이 이루어지고 있다(윤병진, 1996; 이정호 외, 2011; 조운석 외, 2020). 국립환경과학원에서도 2018년에 경기도 가평군의 조종천 일대에서 학생들을 대상으로 부착돌말과 저서성 대형무척추동물, 어류, 수변식생 등 수생생물을 채집·분류·관찰하고 이를 통해 수생태계 건강성을 평가하는 현장 교육을 진행한 바가 있다(시사메거진, 2018).

수생생물 중에서도 특히 부착돌말은 다른 생물군에 비해 채집이 용이하고, 빠른 번식과 짧은 생활사로 물리적, 화학적 요인의 영향에 민감하게 반응하며 이동성이 낮아 누적된 오염정도의 파악과 모니터링에 용이한 장점이 있다(Barbour *et al.*, 1999; McCormick and Stevenson, 1998; Solak, 2011). 또한 부착돌말은 실제 우리나라 하천의 수환경 평가에도 TDI(Trophic Diatom Index; Kelly and Whitton, 1995)라는 방법을 통해 이용되고 있고, 특히 물환경보전법 시행규칙 제8조의2를 통해 ‘수생태계 현황 조사’에 필수 항목으로 법제화되어 3년을 주기로 전국 하천의 3,016개 지점을 조사하도록 되어있다. 그러므로 부착돌말을 이용한 수환경 평가법과 관련된 교육 프로

그램을 개발하고 체험하는 것은 실제 현장에서 쓰이는 수질 평가법을 반영하고 있으므로 중요하다.

그럼에도 비전문가인 일반인이 부착돌말의 시료 분석을 하기 위해서는 몇 가지 어려움이 있다. 부착돌말의 종동정을 위해서는 돌말 세포의 세포질을 제거하여 피각만을 남기는 세정 과정이 요구되는데 이때 사용되는 강산성의 화학제와 이를 가열하는 실험이 학생들을 대상으로 하기에는 위험하다(Mayama *et al.*, 1996). 또한 부착돌말을 이용한 시료 분석은 많은 종수와 피각의 미세 구조로 인해 요구되는 전문도가 높고, 피각을 계수하는데 소요되는 시간이 과도한 단점이 있다.

본 연구는 부착돌말을 이용한 수생태계 건강성 평가법인 TDI를 간이화하여, 학생들을 비롯한 비전문가인 일반인 대상의 환경교육 실험 도구로써 TDI의 활용 가능성을 검증하는 데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 시료 세정법의 간이화

간이 시료 세정법은 박진원 외(2016)와 Mayama(1996), Nagumo(1995), NIER(2019) 등의 다양한 세정법을 비교 검토하였다. 특히 Mayama(1996)와 Nagumo(1995)의 방법을 주로 참고하였으며, 세정이 완료된 시료의 보관 방법과 영구표본의 제작 과정은 NIER(2019)과 박진원 외(2016)를 원용하였다.

2. 조사 시기 및 지점

적정 피각 계수량을 선정하기 위한 조사 지점은 환경부의 연구 사업인 ‘하천 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가(2021~2022)’의 낙동강 수계 지점 중 하천의 분류와 지류, 상류, 중류, 하류를 고려하여 총 60개를 선정하였다. 조사 시기는 2021년 9월과 2022년 5월로, 각 시기에 1회 조사를 실시하였다. 2021년 9월에는 낙동강 분류 10

개 지점과 황강, 밀양강 등 지류 20개 지점을 조사하였고, 2022년 5월에는 낙동강 본류 13개 지점과 남강, 영강 등 지류 17개 지점을 조사하였다.

본 논문에 제안된 간이화된 TDI를 비전문가인 고등학생을 대상으로 교육한 후, 지역 하천 2곳을 교육받은 학생들이 조사하였다. 한 곳은 경상북도 김천 소재의 감천으로 감천 상류와 하류, 인근 지류인 직지사천, 아천, 울곡천, 연봉천을 각각 1지점씩 총 6지점을 조사하였다. 나머지 한 곳은 경상북도 영천 소재의 금호강으로 금호강 상류와 중류, 하류, 인근 지류인 자호천, 고촌천, 신녕천을 각각 1지점씩 총 6지점을 조사하였다.

3. 부착돌말 조사

적정 피각 계수량 선정을 위한 부착돌말 시료는 수심 20~30 cm 정도에 위치한 돌을 선정하여 수면과 평행한 기질 표면의 50~100 cm²의 면적을 솔 등으로 긁어내 채집하였다. 부착돌말의 연구표본은 시료를 KMnO₄ 세정법(Hendey, 1974)으로 세정한 후, Pleurax로 봉입해 제작하였으며, 이를 직접 검경하여 부착돌말 군집을 조사하였다. 부착 돌말 군집의 상대밀도 산정을 위한 계수는 광학현미경(ZEISS, Axio scope 2.0)을 사용하여, 임의로 선정된 현미경 하의 시야에서 1,000의 배율로 하였다. 부착돌말영양지수 TDI는 출현종의 상대밀도(%)에 종별 오염민감도 및 지표가중치를 적용하여 산정하였다. TDI 값을 구하는 계산식과 환경 상태를 나타내는 등급 기준은 환경부의 기준을 따랐으며 표 1과 같다(NIER, 2019).

표 1. TDI에 따른 등급 및 범위와 환경상태(NIER, 2019)

등급	환경상태	부착돌말평가지수 (TDI)
A	매우 좋음	90 ≤ ~ ≤ 100
B	좋음	70 ≤ ~ < 90
C	보통	50 ≤ ~ < 70
D	나쁨	30 ≤ ~ < 50
E	매우 나쁨	0 ≤ ~ < 30

$$TDI = 100 - \{(WMS \times 25) - 25\}$$

WMS: 가중평균민감도

$$WMS = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot S_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot V_i}$$

n: 총 종수

A_i: 표본 내 종의 상대밀도

S_i: 종의 오염민감도(1~5)

V_i: 종의 지표가중치(1~3)

4. 간이화된 TDI의 교육 대상

간이화된 TDI의 교육 대상은 경상북도 교육청에서 시행한 ‘미래 과학자 양성프로그램’에 참여한 경상북도 영천시 소재의 고등학교 학생 4명과 김천시 소재의 고등학교 학생 6명으로, 총 10명의 학생을 대상으로 교육을 진행하였다.

5. 피각 계수량에 따른 TDI 비교 및 전문가와 비전문가의 TDI 결과 비교를 위한 통계분석

유사도 분석을 위한 피어슨 상관분석(Pearson's correlation analysis)과 대응 표본 t-검정, 산점도 작성에는 IBM SPSS statistics 20 프로그램을 사용하였으며, RMSE(Root mean square error)는 R 프로그램(Ver. 4.2.2)을 사용하여 계산하였다.

III. 결과

1. 돌말 시료의 간이 세정법

간이 시료 세정법은 기존에 많은 조사에서 사용되는 염산이나 황산 또는 질산 등의 강산성 화학제 대신 시중에서 쉽게 구입할 수 있으며 비교적 안전한 배수관 세정제를 이용한 세정법으로, 이의 주성분인 차아염소산나트륨(NaClO)을 이용하여 돌말의 세포질을 산화 제거하는 방법이다(그림 1, 2).

부착돌말 조사를 위해 채집 해온 시료 중 10~15 ml를 50 ml의 튜브에 넣고 남은 용량에 배수관 세정제를 넣어 섞어준 후, 냉장고에 24시간 동안 보관한다. 24시간이 지난 시료와 배수관 세정제의 혼합액을 원심분리기에 넣고 2,500 RPM에서 5분간 작동시킨다. 원심분리가 끝난 시료는 흔들리지 않게 조심히 운반하며, 아스피레이터(Aspirator) 또는 사이펀(Siphon)을 이용하여 상등액을 제거한다. 볼텍스를 이용하여 덩어리를 풀어준 뒤 증류수를 부어 다시 원심분리를 한다. 이런 증류수 세척 과정을 총 3회 반복한다(그림 3).

세정이 완료된 시료의 보관 방법은 수분에 노출되지 않아 장기 보관에 유리하고 연구표본 제작에 용이한 에탄올 용액에 보관하는 방법을 사용하였다(박진원 외, 2016). 연구표본의 제작에 사용되는 봉입제는 Pleurax를



그림 1. 시중에 판매되는 대표적인 배수관 세정제와 성분표

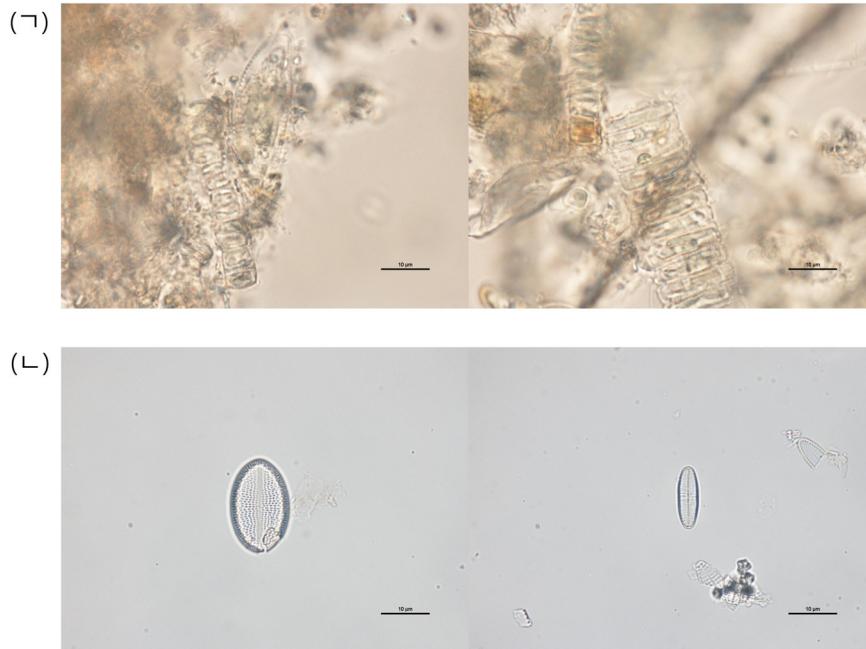


그림 2. 시료를 간이 세정법으로 세정하기 전과 후의 비교 사진(Γ: 세정 전, L: 세정 후), 스케일바는 10 μm 크기이다.

이용하였으며, 영구표본 제작에서 과도한 봉입제의 사용으로 시료에 유동성이 생기는 것을 방지하기 위해 봉입제에 에탄올을 희석하여 사용하였다. 희석에 사용한 에탄올은 슬라이드글라스와 커버글라스를 부착하기 위한 봉입제의 가열 과정에서 휘발되므로 표본의 완성에는 영향을 주지 않는다.

2. 시료 분석의 적정 피각 계수량

우리나라 환경부에서 공인되어 시행되고 있는 부착돌말을 이용한 수생태 평가법인 TDI 조사의 적정 피각 계수량을 선정하기 위해 계수량을 200개와 300개, 500개, 700개, 1,000개로 구분하여 각각 계수하였으며, 이 결과를 바탕으로 TDI 값을 재산정하였다. 결과 비교를 위한 통계처리 방법으로 피어슨 상관분석, 대응 표본 t-검정

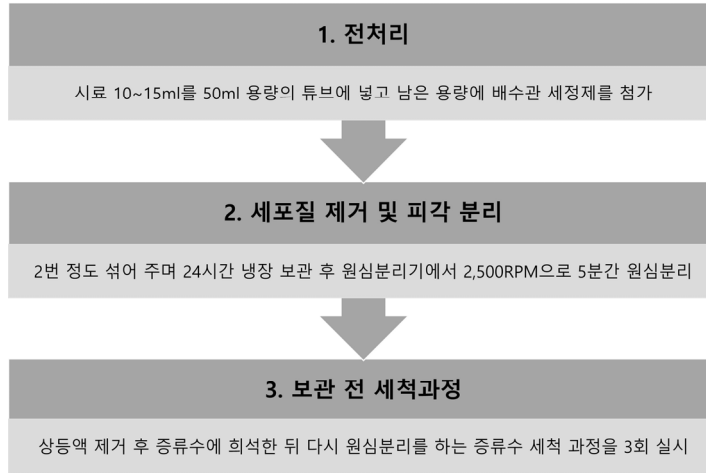


그림 3. 간이 시료 세정법의 모식도

및 RMSE, 산점도 분석을 수행하였다.

피각 계수량에 따라 산정되는 TDI 값 간의 유사도를 알아보기 위해 피어슨 상관분석을 하였다. 분석 결과, 모든 상관계수가 유의수준이 $p < 0.01$ 로 나타났고, 1,000개의 피각을 계수한 결과와 상관계수가 가장 높았던 피각 계수량은 700개였으며, 0.996이었다. 상관계수를 양 집단 간의 유사도의 척도로 사용하였으며, 피각 700개를 계수하여 산정한 TDI 값이 1,000개를 계수하여 산정한 TDI 결과와 가장 높은 유사도를 보인 것으로 나타났다(표 2).

피각 계수량에 따른 TDI 값의 비교를 위한 대응 표본 t-검정 결과, TDI 값의 평균은 200개를 계수하였을 때 67.20으로 가장 높았고, 나머지 계수량에서는 66.05~66.23으로 나타나 유사한 결과값을 보였다. TDI의 표준편차는 피각 200개를 계수하였을 때 20.31로 가장 컸으며, 300개를 계수하였을 때 20.251, 700개를 계수하였을 때 20.078,

500개를 계수하였을 때 19.940, 1,000개를 계수하였을 때 19.880 순으로 계수량이 증가함에 따라 점차 감소하는 양상을 보였다. 반면, 모든 피각 계수량에서 t값의 유의수준이 $p \geq 0.05$ 로 분석되어 모든 집단에서 산정한 TDI 값의 통계적 차이가 없는 것으로 나타났다(표 3).

비교 집단 간에 통계적 차이가 없는 것을 확인하였으나, 집단 간에 나타나는 오차값을 비교해 보고자 계수량 별 RMSE 값을 구하였다. RMSE 값의 임계값은 Lavoie *et al.*(2009)을 참고하여 최댓값의 5%인 5로 선정하였다. RMSE 산정 결과, 200개의 피각을 계수하였을 때 5.23으로 가장 컸으며 임계값을 초과하였다. 300개를 계수했을 때 RMSE 값은 3.14로 나타났으며 500개를 계수했을 때 2.46, 700개를 계수했을 때 1.82 순으로 점차 감소하였다(표 3). 산점도를 통해 전반적인 경향성에서 이탈된 관측값

표 2. 피각 계수량에 따른 TDI간의 유사도

TDI		피각 계수량				
		1000	200	300	500	700
피각 계수량	1000	1				
	200	0.967**	1			
	300	0.988**	0.973**	1		
	500	0.992**	0.973**	0.997**	1	
	700	0.996**	0.973**	0.994**	0.997**	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

표 3. 1,000개의 피각 계수량을 기준으로 200개와 300개, 500개, 700개에서 계산된 통계적 차이와 RMSE

TDI		기술 통계			t (p)	RMSE
		표본수	평균	표준편차		
피각 계수량	1000	60	65.97	19.88	-1.84	5.23
	200	60	67.20	20.31		
	1000	60	65.97	19.88	-0.21	3.14
	300	60	66.05	20.25		
	1000	60	65.97	19.88	-0.68	2.46
	500	60	66.18	19.94		
1000	60	65.97	19.88	-1.09	1.82	
700	60	66.23	20.08			

*p<0.05, **p<0.01

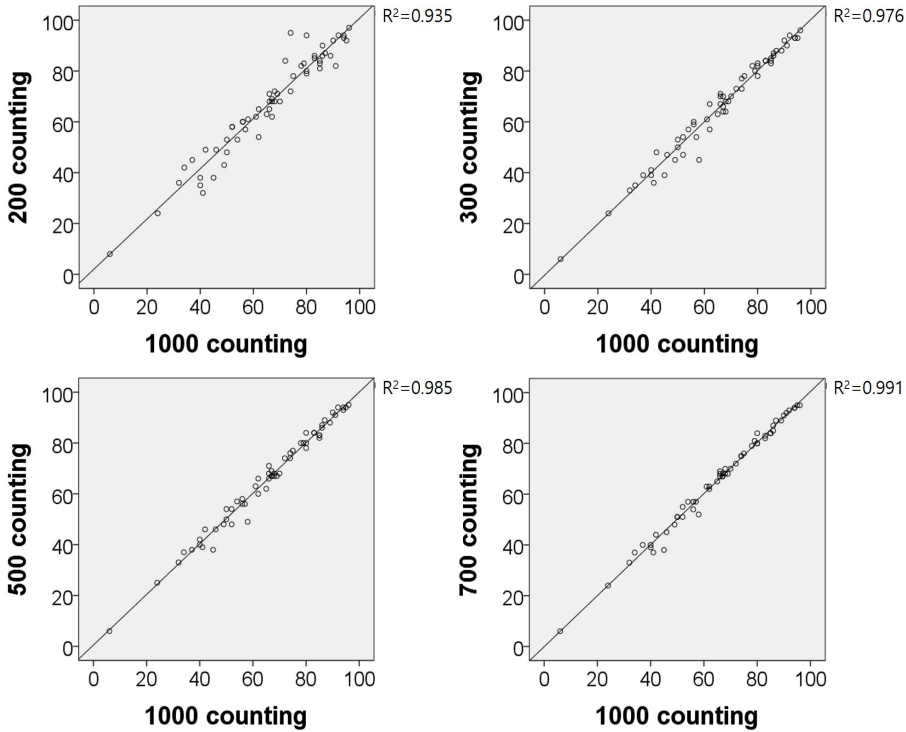


그림 4. 피각 계수량에 따른 산점도(계수량 1,000개 기준)
 R^2 은 상관계수를 의미하며 대각선은 비교되는 두 변수의 관계를 가장 잘 나타내는 적합선을 의미한다.

을 찾기 위해 피각 1,000개를 계수하여 산정한 TDI 값을 기준으로 200개와 300개, 500개, 700개의 피각을 계수하여 재산정한 TDI 값과의 산점도를 작성하였다(그림 4). 모든 산점도에서 TDI 값의 분포가 양의 상관관계를 보였다. 200개를 계수하여 산정한 TDI 값의 분포가 가장 넓게 분산되어 있었으며 계수량이 증가할수록 분산도가

감소하였다. 결정계수(R^2) 또한 200개를 계수하였을 때 0.94로 가장 낮은 값을 보였으며, 300개를 계수하였을 때는 0.98, 500개를 계수하였을 때는 0.99, 700개를 계수하였을 때는 0.99로 점차 증가하였다.

2021년 9월 조사의 총 출현종수는 피각 계수량 200개에서 108종, 300개에서 123종, 500개에서 131종, 700개에

서 133종, 1,000개에서 135종이었다. 2022년 5월 조사의 총 출현종수는 피각 계수량 200개에서 102종, 300개에서 110종, 500개에서 112종, 700개에서 117종, 1,000개에서 123종이었다. 2021년 9월과 2022년 8월 조사 모두 피각 계수량 200개와 300개 사이에서 가장 큰 출현종의 증가를 보였으며, 계수량 300개 이후부터 안정적인 변화를 보였다(그림 5).

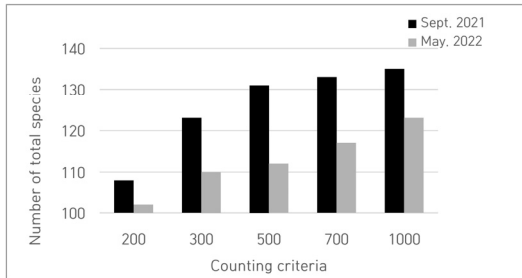


그림 5. 2021년 9월과 2022년 5월에 조사된 총 종수

계수량 200개는 RMSE 값이 임곗값을 초과하여 결과의 안정성이 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 반면, 계수량 300개와 500개, 700개, 1,000개에서는 RMSE 값이 임곗값 미만으로 나타나 선정된 TDI값이 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 통계 결과를 토대로, 시료 분석 시간을 단축하기 위한 적정 피각 계수량을 300개로 선정하였다.

3. 부착돌말류의 종동정 간이하

부착돌말류의 종동정 간이하는 김성민(2023)에서 제안된 지표-규조군을 이용하였다. 지표-규조군은 우리나라 하천에서 출현하는 부착돌말 중 일련의 통계학적 과정을 거쳐 수생태계의 다양한 환경조건을 지표 할 수 있는 소수의 종들을 선발한 결과이다(그림 6). 또한 기존의 TDI가 평가 대상 하천의 전체 출현종을 모두 동정해야 하는 것과는 달리, 총 115종의 지표-규조군 종들만을 동정하여 TDI 지수를 구할 수 있는 방식이다.

4. 간이하된 TDI를 이용한 하천 수환경 평가의 실제 적용

TDI의 간이하는 세 가지 부분에서 이루어졌다. 첫째,

기존의 위험한 강산성 화학제와 가열 과정이 필요한 세정법 대신 배수관 세정제를 이용한 시료 세정법으로 세정 과정을 간이하하고 위험성을 낮추었다. 둘째, 통계적인 비교 검증을 통해 기존에 주로 사용된 피각 계수량인 500개보다 낮은 피각 계수량 300개를 적정 피각 계수량으로 선정하여 시료 분석에 소요되는 시간을 감소시켰다. 셋째로 종동정의 대상을 전체 출현종이 아닌 선발된 지표-규조군 115종만으로 하여 부착돌말 종동정의 난이도를 결정적으로 낮추었다.

앞서 언급된 과정들을 통해 간이하된 TDI가 환경교육을 위한 체험 도구로써 사용될 수 있는지 확인하기 위해 비전문가인 학생을 대상으로 실제 지역 하천에서 간이하된 TDI를 이용하여 수환경 평가를 진행하였다(그림 7).

부착돌말의 현장조사 방법에 대한 교육은 환경부의 NIER(2019)에서 제시된 방법을 전문 조사자가 시연한 후 학생들이 실습하는 방식으로 진행하였다. 채집된 부착돌말 시료는 공동 조사 기관인 지역 소재 대학교의 실험실로 운반하여 학생들이 간이 시료 세정법으로 시료를 세정하였다. 실험 전에 숙련된 전문 조사자가 실험실 이용 시 주의 사항 및 간이 시료 세정법 실험의 주의 사항 등을 학생들에게 교육하였다.

지표-규조군을 이용한 종동정 방법을 이용하기 위해 학생들에게 국내 하천에 주로 출현하는 돌말 속들의 특징과 지표-규조군에 속한 종에 대한 기본적인 동정 교육을 진행하였다. 지표-규조군을 이용한 검경법 교육은 지표-규조군의 종 사진과 해당 종의 간단한 특징이 적힌 도감을 이용하여 교육하였다. 교육 후, 학생들이 현미경과 도감을 활용하여 직접 검경을 하였으며, 검경 중에 동정이 어려운 종은 전문 조사자에게 질문하여 다소의 도움을 받아 진행하였다. 교육 시간 이후에는 학생들이 본인의 소속 고등학교로 돌아가 직접 검경을 하였으며, 동정이 어려운 종은 사진을 찍어 메신저 앱을 통해 전문 조사자에게 질문하기도 하였다.

학생들이 간이하된 방법으로 검경한 결과를 정리하여 TDI를 산출해 지역 하천의 수환경을 평가하였고, 그 결과를 전문 조사자의 결과와 비교하였다(표 4). 전문 조사자의 결과는 기존에 환경부에서 사용하는 TDI 방법을 이용하여 산정한 결과이며, 2008년 이래 환경부 연구 과제로 우리나라 하천의 TDI 평가를 수행하는 대학의 전

중등학생의 환경교육 활성화를 위한 부착물말영양지수 TD(Trophic Diatom Index)의 간이화와 적용

Taxa		S	V
Centrales	Melosira	<i>Melosira varians</i>	4 3
		<i>Melosira</i> (other)	5 2
Thalassiosiraceae	Aulacoecira	<i>Aulacoecira algigena</i>	2 1
		<i>Aulacoecira ambigua</i>	2 1
		<i>Aulacoecira granulata</i>	5 3
		<i>Aulacoecira</i> (other)	2 1
		<i>Cyclotephyrus</i>	4 1
	Cyclotephyrus	<i>Cyclotephyrus dubius</i>	4 1
		<i>Cyclotephyrus</i> (other)	4 1
	Cyclotella	<i>Cyclotella atomus</i>	3 1
		<i>Cyclotella menziesiana</i>	4 3
		<i>Cyclotella pseudostelligera</i>	4 1
<i>Cyclotella stelligera</i>		1 1	
<i>Cyclotella</i> (other)		3 3	
Stephanodiscus	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	5 3	
	<i>Stephanodiscus parvus</i>	5 3	
	<i>Stephanodiscus</i> (other)	5 3	
	<i>Asterionella formosa</i>	1 1	
Pennales	Fragilariaceae	<i>Asterionella</i>	1 1
		<i>Asterionella</i> (other)	1 1
	Diatoms	<i>Diatoma vulgare</i>	4 2
		<i>Diatoma</i> (other)	5 1
	Fragilaria	<i>Fragilaria berolinensis</i>	5 3
		<i>Fragilaria bidens</i>	5 3
		<i>Fragilaria aspillata</i>	2 2
		<i>Fragilaria aspinosa</i>	4 1
		<i>Fragilaria aspinosa</i> var. <i>mesolepta</i>	5 1
		<i>Fragilaria aspinosa</i> var. <i>rumpens</i>	1 1
<i>Fragilaria aspinosa</i> var. <i>vaucheriae</i>		5 1	
<i>Fragilaria construens</i>		5 3	
<i>Fragilaria construens</i> f. <i>binodis</i>		2 3	
<i>Fragilaria construens</i> f. <i>venter</i>		2 1	
<i>Fragilaria erstonensis</i>	4 1		
<i>Fragilaria elliptica</i>	1 1		
<i>Fragilaria fasciculata</i>	5 3		
<i>Fragilaria parva</i>	5 3		
<i>Fragilaria pinnata</i>	4 1		
<i>Fragilaria ulna</i>	5 3		
<i>Fragilaria</i> (other)	5 3		

Taxa		S	V
Eunotiaceae	Eunotia	<i>Eunotia bilunaris</i>	2 1
		<i>Eunotia minor</i>	2 1
		<i>Eunotia</i> (other)	2 1
	Amphora	<i>Amphora copulata</i>	4 3
		<i>Amphora inariensis</i>	4 3
		<i>Amphora pediculus</i>	1 2
		<i>Amphora</i> (other)	4 3
		<i>Cymbella affinis</i>	2 2
		<i>Cymbella aspera</i>	3 3
		<i>Cymbella cistula</i>	3 3
Cymbella	<i>Cymbella delatula</i>	1 3	
	<i>Cymbella lacustris</i>	1 3	
	<i>Cymbella leptoceros</i>	1 1	
	<i>Cymbella minuta</i>	2 3	
	<i>Cymbella silesiaca</i>	1 3	
	<i>Cymbella turgidula</i>	1 3	
	<i>Cymbella turgidula</i> var. <i>nipponica</i>	3 3	
	<i>Cymbella</i> (other)	3 3	
	<i>Gomphonema acuminatum</i>	5 2	
	<i>Gomphonema angustatum</i>	5 2	
Naviculaceae	<i>Gomphonema angustum</i>	5 1	
	<i>Gomphonema augur</i>	5 2	
	<i>Gomphonema clevei</i>	1 3	
	<i>Gomphonema lagenula</i>	5 2	
	<i>Gomphonema minusulum</i>	4 1	
	<i>Gomphonema olivaceum</i>	5 3	
	<i>Gomphonema parvulum</i>	5 2	
	<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	5 3	
	<i>Gomphonema pumilum</i>	2 3	
	<i>Gomphonema truncatum</i>	2 1	
<i>Gomphonema</i> (other)	5 2		
Navicula	<i>Navicula amphiceropsis</i>	5 3	
	<i>Navicula atomus</i>	5 3	
	<i>Navicula bacillum</i>	5 3	
	<i>Navicula aspitatoradiata</i>	5 2	
	<i>Navicula cincta</i>	2 3	
	<i>Navicula confusaeas</i>	5 3	
	<i>Navicula contenta</i>	5 3	

Taxa		S	V
Hannaea	<i>Hannaea arcus</i> var. <i>recta</i>	2 2	
	<i>Hannaea</i> (other)	2 2	
Synedra	<i>Synedra acuta</i>	5 1	
	<i>Synedra</i> (other)	5 1	
Achnanthes	<i>Achnanthes altragnacillima</i>	1 3	
	<i>Achnanthes bisseletiana</i>	5 2	
	<i>Achnanthes clevei</i>	5 2	
	<i>Achnanthes consergens</i>	1 3	
	<i>Achnanthes delatula</i>	5 2	
	<i>Achnanthes exigua</i>	5 3	
	<i>Achnanthes hungarica</i>	5 2	
	<i>Achnanthes japonica</i>	5 2	
	<i>Achnanthes lanceolata</i>	1 1	
	<i>Achnanthes minutissima</i>	1 3	
<i>Achnanthes subrudonis</i>	1 1		
Achnanthes (other)	<i>Achnanthes</i> (other)	5 2	
	<i>Cocconeis pediculus</i>	2 3	
Cocconeis	<i>Cocconeis pleuromela</i>	2 3	
	<i>Cocconeis pleuromela</i> var. <i>egyptia</i>	2 1	
	<i>Cocconeis pleuromela</i> var. <i>lineata</i>	1 3	
Cocconeis (other)	<i>Cocconeis</i> (other)	2 1	
	<i>Bacillaria paradoxa</i>	4 1	
Bacillaria	<i>Bacillaria</i> (other)	4 1	
	<i>Hantzschia amphioxys</i>	5 3	
Hantzschia	<i>Hantzschia</i> (other)	5 3	
	<i>Nitzschia amphibia</i>	5 3	
	<i>Nitzschia aspillata</i>	5 3	
	<i>Nitzschia dissipata</i>	4 3	
	<i>Nitzschia filiformis</i>	5 3	
	<i>Nitzschia fonticola</i>	1 2	
	<i>Nitzschia frustulum</i>	4 3	
	<i>Nitzschia gracilis</i>	4 1	
	<i>Nitzschia inconspicua</i>	1 2	
	<i>Nitzschia intermedia</i>	5 3	
<i>Nitzschia linearis</i>	5 3		
Bacillariaceae	<i>Nitzschia palca</i>	5 1	
	<i>Nitzschia paleacea</i>	3 1	
	<i>Nitzschia armata</i> var. <i>sabellaria</i>	1 3	
	<i>Nitzschia</i> (other)	5 3	
	Pinnularia	<i>Navicula cryptocephala</i>	5 3
		<i>Navicula cryptotenella</i>	4 2
		<i>Navicula goeppertiana</i>	4 1
<i>Navicula gregaria</i>		4 1	
<i>Navicula minima</i>		1 3	
<i>Navicula perminuta</i>		4 1	
<i>Navicula pupula</i>		5 3	
<i>Navicula recens</i>		5 3	
<i>Navicula seminulum</i>		4 1	
<i>Navicula subminuscula</i>		4 3	
Pinnularia	<i>Navicula tripunctata</i>	5 3	
	<i>Navicula veneta</i>	5 3	
	<i>Navicula viridula</i>	2 2	
	<i>Navicula viridula</i> var. <i>rostellata</i>	3 1	
	<i>Navicula</i> (other)	5 3	
	<i>Pinnularia gibba</i>	5 3	
	<i>Pinnularia microstauron</i>	5 3	
	<i>Pinnularia</i> (other)	5 3	
	<i>Reimeria sinuata</i>	1 3	
	<i>Reimeria</i> (other)	1 3	
Rhoicosphenia	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	3 1	
	<i>Rhoicosphenia</i> (other)	4 2	
Surirella	<i>Surirella angusta</i>	4 1	
	<i>Surirella minuta</i>	5 3	
Surirellaceae	<i>Surirella</i> (other)	4 3	
	unidentified group	<i>Diatom</i> (other)	4 2

그림 6. 지표-규조군의 종 목록(김성민, 2023)

문 기관에서 분석한 결과이다.

조사된 TDI 등급을 비교한 결과, 감천에서는 st. 1 지점에서 결과에 차이를 보였다. 학생들이 조사한 결과는 B등급으로 하천의 수질이 ‘좋음’을 나타내었으나 전문

조사자의 결과에서 C등급으로 ‘보통’의 수질인 것으로 나타났다. 금호강에서는 st. 1과 st. 3, st. 4에서 차이를 보였다. 학생들이 조사한 st. 1의 등급은 D로 ‘나쁨’을 나타내었으나 전문 조사자는 C등급으로 조사하였다. 또한

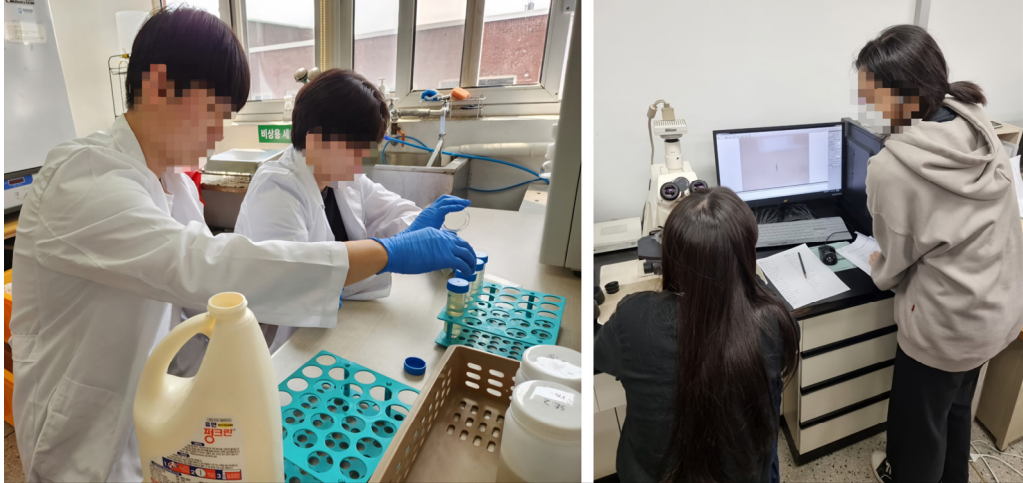


그림 7. 학생들이 간이 시료 세정법으로 시료를 세정하는 모습과 시료를 검경하는 모습

학생들이 조사한 st. 3지점은 B등급, st. 4지점은 D등급으로 나타났으나, 전문 조사자는 모두 C등급으로 조사하였다.

학생들의 TDI 등급과 전문 조사자의 TDI 등급이 일부 지점에서 차이를 보여, 보다 정밀한 비교를 위해 동일 지점의 TDI 점수를 비교해 보았다. 가장 적은 오차를 보인 지점은 김천의 st. 4 지점이었으며 학생들의 조사 결과는 41.8로, 전문 조사자의 결과인 41.3과 0.5의 오차를 보였다. 가장 큰 오차를 보인 지점은 김천 st. 1 지점으로 학생들의 조사 결과는 70.1이었고 전문 조사자의 결과는 62.7로 7.4의 오차를 보였다.

전문 조사자와 학생들이 평가한 TDI 결과의 차이를 통계적으로 분석해 보았다. 두 집단의 TDI 값의 유사도 분석 결과는 0.864이었으며, 유의수준은 $p < 0.01$ 이었다.

대응 표본 t-검정 결과, $t(p)$ 의 유의수준이 0.05 이상으로 두 집단에서 산정한 TDI 값은 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났으며, 오차 비교를 위한 RMSE 결과 역시 4.82로, 임계값 미만으로 나타나 두 집단에서 산정한 TDI 값은 동일한 값을 나타내는 것으로 분석되었다(표 5).

산점도 분석 결과에서도 전문 조사자와 학생들의 TDI 결과는 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다(그림 8). 위 결과들을 통해 전문 조사자와 고등학생의 TDI 결과에서 직접적인 점수 차이는 발생하였으나 통계적인 분석 과정에서는 두 집단의 차이가 없는 거의 동일한 결과를 보여주는 것으로 분석되었다. 그러므로 전문가가 아닌 일반인도 간이화된 TDI를 이용한다면 충분히 수환경 평가가 가능한 것으로 나타났다.

표 4. 학생들과 전문조사자가 평가한 하천의 TDI 등급과 점수
학생들은 간이화된 TDI를 이용하였으며, 전문 조사자는 기존의 TDI를 이용하여 하천을 평가하였다.

		st. 1	st. 2	st. 3	st. 4	st. 5	st. 6
김천	고등학생 TDI 결과	B (70.1)	C (65.7)	C (58.0)	D (41.8)	C (60.6)	C (69.2)
	전문 조사자 TDI 결과	C (62.7)	C (67.3)	C (63.0)	D (41.3)	C (53.9)	C (67.0)
금호강	고등학생 TDI 결과	D (49.0)	C (61.0)	B (70.2)	D (48.3)	C (60.1)	D (45.4)
	전문 조사자 TDI 결과	C (53.0)	C (67.2)	C (64.2)	C (51.4)	C (55.8)	D (49.7)

표 5. 학생들과 전문 조사자가 분석한 TDI 값의 대응 표본 t-검정과 RMSE 결과

TDI	기술 통계			t (p)	RMSE
	표본수	평균	표준편차		
고등학생	12	58.12	8.45	-0.12	4.82
전문 조사자	12	58.23	9.98		

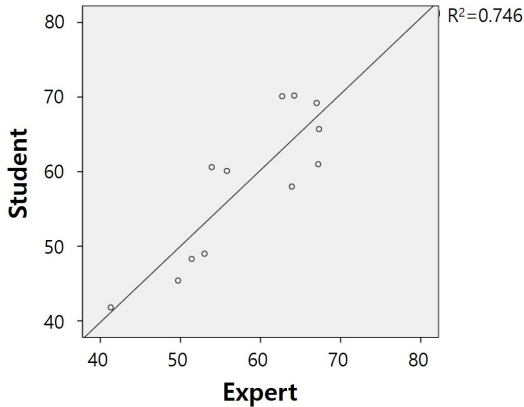


그림 8. 학생들과 전문 조사자가 분석한 TDI 값의 산점도

IV. 고찰

1. 다양한 세정법과 간이 시료 세정법 비교

돌말의 검정을 위해서는 채집된 시료의 세정을 통한 세포질 제거가 반드시 필요하다. 돌말의 동정은 세포질 보다는 규산질 피각의 형태 특성으로 이루어지므로 돌말의 유기물을 산화시키고 규산질의 피각만을 모으는 과정이 필요하다(조경제, 2010).

돌말 관련 연구자들이 일반적으로 사용하는 시료 세정법은 염산과 질산, 황산 등 강산성의 화학제를 이용하는데, 약품이 첨가된 시료를 가열하는 과정에서 시료가 끓어 넘치거나 피부와 접촉할 경우 열화상 및 화학 화상의 가능성이 있어 대단히 위험하며, 또한 실험에 사용되는 화학제들은 학생들을 비롯한 일반인들의 경우에는 구입도 쉽지 않은 게 사실이다(박진원 외, 2016).

KMnO₄ 세정법(Hendey, 1974)의 경우에도 염산과 황산 등 강산성의 화학제를 사용하며 이를 가열하는 과정이 포함된다. 이때 가열 온도가 과도하게 높을 경우 시료가 끓어 넘칠 수 있으며 피부와 접촉할 경우 열화상 및 화학 화상의 위험이 있다. 또한 가열 과정에서 산성의

기체가 발생하므로 안전에 주의가 필요하며 산성 기체를 제거하기 위한 환기 시설이 요구되고, 세정 과정이 복잡하다. 질산법의 경우 시료에 질산을 첨가하여 방치하는 방법으로 비교적 간단한 절차를 보이며 가열 과정이 불필요하나, 시료와 질산이 반응하면서 생기는 산성 기체를 제거하기 위해 환기 시설이 필수로 요구된다(박진원 외, 2016). 또한 위 방법들은 실험 과정 중에 발생한 폐시약의 처리를 위한 시설 또는 장비들이 요구되는 어려움이 있다(김윤경·정해문 1998).

추가로 고려한 시료 세정 방법으로 과산화수소를 이용하는 세정법이 있다. 과산화수소 세정법은 시료 세정 반응을 촉매하기 위해 중크롬산칼륨이 필요하며 가열 과정이 필요하다(박진원 외, 2016). 또한 과산화수소 세정법에 사용되는 중크롬산칼륨과 고농도의 과산화수소(50%)는 일반인이 구하기 어렵고, 시료 세정 과정 중에 가열 과정이 포함되어 있어 화상의 위험이 있는 등 기존의 산성 화학제를 이용한 시료 세정법과 동일한 단점이 발견되어 간이 시료 세정법의 선정에서 제외되었다.

배수관 세정제를 이용한 세정법은 강산성 화학제를 사용하는 기존의 세정법과 달리 별도의 가열 과정이 없으므로 상대적으로 안전하다(Mayama et al., 1996). 또한 산성 기체를 제거하기 위한 클린 벤치(Clean bench) 같은 환기 시설이나 폐시약 처리 시설 등의 설치가 추가로 요구되지 않으며 다른 세정법에 비해 간단하게 시료의 세정이 가능하다(표 6).

배수관 세정제를 이용한 시료 세정법의 세정 능력은 Nagumo and Kobayasi(1990)의 연구에서 확인할 수 있다. Nagumo and Kobayasi(1990)는 차아염소산나트륨 용액과 시판 중인 배수관 세정제를 이용하여 시료를 세정하고 그 결과를 비교하였다. 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 세정된 시료를 관찰한 결과, 종동정을 위한 돌말 피각의 형태학적 특징을 충분히 관찰할 수 있었으며, 두 방법의 시료 세정 결과 간에 큰 차이가 없는 것을 확인하

였다. 그러므로 시료의 세정 능력에 영향을 주는 것은 배수관 세정제의 주성분인 차아염소산나트륨이며, 기타 성분이 세정 결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

배수관 세정제를 이용한 세정법은 시중에서 구하기 쉬운 배수관 세정제를 이용하고 별도의 설비가 필요 없는 접근성과 실험 과정의 간편함, 강산성 화학제의 비사용과 가열 과정의 부재로 인한 안전성 등의 장점이 있다. 또한, 시료의 세정 능력도 중등정에 사용할 수 있을 정도로 우수한 것으로 나타났다. 더욱이, 배수관 세정제 내의 표백 성분에 의한 의복 탈색과 피부 접촉에 의한 화학 화상은 실험복과 보호용 장갑을 착용하여 매우 간단히 예방할 수 있다. 또한 피부 접촉이 일어난 경우 다량의 물을 이용하여 씻어내는 조치를 통해 충분히 화학 화상을 예방할 수도 있다. 이러한 장점을 고려하여 부착돌말 시료 세정 과정의 간이화를 위한 간이 시료 세정법으로 배수관 세정제를 이용한 세정법을 선정하였다.

본 연구에서 적극 인용된 Nagumo(1995)와 Mayama(1996)의 간이 시료 세정법은 시료의 적정 용량이 기재되어 있지 않고 원심분리기의 작동 조건이 누락되는 등 실험 과정의 일관적 안정성을 감소시키는 부분이 있었다. 본 논문에서는 이러한 내용을 수정하여 실험 과정의 일부분을 개선하였다. 기존의 세정법에서 시료와 배수관 세정제 혼합물의 침전 시간을 20~30분으로 하였으나, 확실한 이물질 및 세포질 제거를 위해 침전 시간을 24시간으로 하였다. 또한 시료의 적정 용량은 10~15 ml로 하였으며, 아스피레이터를 이용한 상등액 제거 과정에서 유실되는 피각을 최소화하기 위해 2,500 RPM에서 5분간 원심분리기를 작동하도록 하였다.

2. 적정 피각 계수량 선정의 필요성

일반적인 생물학적 수질 평가 방법에서 사용되는 부착돌말의 피각 계수량은 500개 이상으로 이는 숙련된 전

표 6. 간이 시료 세정법과 주로 사용되는 시료 세정법 과정 비교

	간이 시료 세정법 ¹⁾	질산 세정법 (NIER, 2019)	KMnO ₄ 세정법 (Hendey, 1974)
전처리	시료 10~15 ml를 50 ml 용량의 튜브에 넣고, 남은 용량에 배수관 세정제를 첨가	시료 5-10ml를 비커에 넣고 동량의 질산을 첨가	시료를 튜브에 넣고 증류수에 희석하여 원심분리 후, 상등액을 제거
세포질 제거 및 피각 분리	2번 정도 섞어주며 24시간 냉장보관 후 원심분리기를 이용하여 2,500 RPM에서 5분간 시료를 가라앉힘	질산을 첨가한 시료를 5시간 이상 산화	유기물 제거를 위해 염산 첨가 후 반응 증류수 세척 과정 3회 실시 시료를 비커에 옮긴 후 과망간산칼륨 10 ml와 황산 2 ml를 넣고 끓인 후 식히고, 원심분리를 하여 상등액을 제거 시료에 과산화수소를 15 ml 넣고 반응 증류수 세척 과정을 3회 실시 암모니아 용액 2 ml을 넣고 색이 변하면 투명한 색이 될 때 까지 염산을 첨가
보관 전 세척 과정	상등액 제거 후 증류수에 희석한 뒤 다시 원심분리를 하는 증류수 세척 과정을 3회 실시	비커에 증류수를 가득 채운 뒤 높이 1 cm당 1시간 방치 후 상등액을 제거 모든 색이 없어질 때까지 위 과정을 반복	증류수 세척 과정을 3회 실시
보관	시료의 수분을 제거하기 위해 95% 에탄올을 세척 과정을 2회, 99% 에탄올을 세척 과정 1회 실시 후, 상등액을 제거한 뒤 바이알 병에 담아 보관		
표본 제작	스포이드를 이용하여 보관된 시료 한 방울을 커버글라스에 떨어뜨린 후 핫플레이트를 이용하여 건조, 에탄올이 섞인 Pleurax를 슬라이드글라스 증양에 한 방울 떨어뜨린 후, 건조된 커버글라스로 덮어 핫플레이트로 가열한 후 냉각, 슬라이드글라스와 커버글라스를 접착하여 영구표본 완성		

1) Nagumo(1995)를 수정 보완하여 재구성.

문 분석자도 상당한 시간이 소요되기도 한다(Tryce *et al.*, 2020). 이러한 계수량을 비전문가에게 그대로 적용할 경우 시료 분석에 시간이 과도하게 오래 걸려 교육 과정에 흥미를 잃는 중요한 요소가 될 수 있으므로 수환경 평가 결과에 영향을 주지 않는 범위에서 더 적은 계수량을 찾을 필요가 있다.

적정 피각 계수량 선정을 위한 통계적 검증에 사용한 RMSE의 임계값에 대한 의미와 설정 기준은 Lavoie *et al.*(2009)에서 확인할 수 있었다. Lavoie *et al.*(2009)은 부착돌말을 이용한 수환경 평가법인 IDEC(Indice Diatomées de l'Est du Canada)에 사용되는 종 목록을 간소화하기 위해 RMSE를 이용하였다. 기존의 방식으로 산정한 IDEC의 값과 다양한 방법으로 간소화된 종 목록을 이용하여 산정한 IDEC 값 간의 차이를 RMSE로 비교하였는데, 이때 임계값은 간소화된 종 목록이 IDEC에 주는 영향에 대한 허용 범위이며, 임계값을 초과하는 것은 간소화된 종 목록이 IDEC에 과도한 영향을 끼쳐 평가 결과를 크게 변하게 하는 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 이러한 임계값에 대한 개념을 피각 계수량 선정에서 이용하고자 하였다. 임계값을 초과한 RMSE를 보인 피각 계수량은 TDI 결과에 과도한 영향을 미쳐 평가 결과가 크게 달라지는 것으로 판단하였다. 임계값은 TDI에서 산정되는 RMSE 최댓값 100의 5%인 5로 설정하였다. 피각 계수량 200개를 이용하여 산출한 TDI의 RMSE가 5.23으로 나타나 임계값인 5를 초과하였으므로, 피각 계수량 200개는 TDI 조사 결과에 과도한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

더욱이 피각 계수량 200개 이후 출현종수의 증가량이 가장 크게 나타났다. Rozi *et al.*(2022)은 부착돌말을 이용한 생물 모니터링에 요구되는 효율성의 수준 즉, 계수 과정에서 출현종을 찾아낼 확률은 80% 이상이 요구되며, 피각 계수량 100개와 300개 사이에서는 효율성이 80% 이하의 범위에서 유의미하게 증가하였으나, 계수량 300개부터 효율성이 80% 이상의 범위에 도달하여 변화가 적고 안정적으로 증가하였다고 보고하였다. 출현종수 또한 효율성과 동일한 변화를 보여 피각 계수량 300개 이전에 급격한 증가를 보였으며, 300개 이후부터 안정적인 증가를 나타내었다. 이러한 출현종수의 변화는 본 논문의 그림 5에 나타난 총 출현종수의 변화 결과와 유사하

였다. 이를 통해 피각 계수량 200개는 효율성이 매우 떨어지는 것으로 판단하였다.

또한 Soeprbowati *et al.*(2016)은 피각 계수량 300개 이상에서 우점종의 구성과 300개 이하에서 우점종 구성이 변화할 수 있음을 언급하였으며, Tryce *et al.*(2020)은 너무 낮은 수의 고정 피각 계수량 기준은 상대밀도를 특징하는 능력이 떨어진다고 밝혔다. 이를 통해 피각 계수량 200개를 이용할 경우 우점종의 구성과 상대밀도가 변화할 우려가 있으므로 TDI 평가에 적합하지 않다고 판단하였다.

선행 연구들과 통계적인 분석 결과를 통해 피각 계수량 200개는 적정 피각 계수량 선정 대상에서 제외하였다. 본 연구에서 적정 피각 계수량 선정의 목적은 TDI 평가에 적합한 계수량의 선정을 통한 분석 시간의 감소에 있으므로, RMSE가 임계값 미만으로 나타났으며 계수 과정에서 새로운 종이 출현하게 될 확률인 효율성과 우점종의 구성, 상대밀도의 특정 능력이 안정적인 피각 계수량 등을 고려하여 가장 적은 계수량을 선정하는 것이 합리적인 것으로 판단되어 피각 계수량 300개를 적정 피각 계수량으로 선정하였다.

3. 중동정 방법 간이화의 효과

부착돌말을 이용한 수환경 평가법은 많은 부착돌말의 종수와 부착돌말의 동정에 사용되는 구조의 미세함으로 인해 동정의 난이도가 높아 사용이 어렵다. 그러므로 중동정의 간이화는 TDI 간이화를 위해서 필수적인 과정이다. 이를 위해 김성민(2023)이 고안한 지표-규조균을 이용하고자 하였다. 지표-규조균을 이용한 TDI의 수환경 평가 능력은 김성민(2023)이 통계적 검증 과정을 통해 실제 하천에서도 적용 가능한 것을 확인하였다. 그러므로 비전문가도 지표-규조균을 이용한다면 충분히 하천의 평가가 가능할 것으로 판단하였다. 그럼에도 부착돌말의 중동정이 처음인 학생들은 지표-규조균의 도감을 보며 시료를 분석하는 것에도 많은 어려움을 느꼈다.

최초 1회의 교육만으로는 학생들이 도감에서 종을 찾아내는 데 상당한 시간이 소요되었으나, 추가적인 동정법 교육 및 도감 검색법 교육과 메신저 앱을 통한 지속적인 피드백을 통해 검정에 걸리는 시간을 줄일 수 있었다. 1회 교육 후 한 지점의 동정을 완료하는데 5시간 이상 소요되

었으나 2회 교육 후 약 3시간이 소요되었다. 교육 완료 후 피드백을 통한 검경에서는 한 지점의 검경을 완료하는데 평균 2시간이 소요되는 것을 확인하였다. 추가적인 반복 교육이 이루어진다면 학생을 비롯한 비전문가도 시료 분석에 걸리는 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 간이화된 TDI의 교육적 함의

간이화된 TDI는 기존의 부착돌말을 이용한 수환경 평가법의 어려움을 낮추어 비전문가의 환경교육에 이용하기 위해 고안되었으며, 비전문가인 학생들이 실제 하천의 수환경 평가가 가능한 것도 확인하였다. 그러므로 학생들이 지역 하천을 평가하여 환경문제를 제기하고, 하천 모니터링을 통해 환경에 지속적인 관심을 갖는데 간이화된 TDI를 활용할 수 있으며, 간이화된 TDI는 실질적인 경험과 체험이 일어나는 환경교육의 도구로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 부착돌말을 이용한 부착돌말영양지수 TDI의 시료 세정법과 피각 계수량, 종동정 방법의 간소화를 통해 간이화된 TDI가 전문가가 아닌 학생을 비롯한 일반인들 대상의 환경교육을 위한 학습 도구로서 활용이 가능한지 확인해 보고자 하였다. 이를 위해 TDI는 다음과 같은 세 가지 과정을 거쳐 간이화되었다.

첫 번째, 시중에서 판매하는 배수관 세정제를 이용하여 상대적으로 안전하고 쉽게 세정이 가능한 간이 시료 세정법을 제안하였다. 기존의 조사에서 사용되는 시료 세정법은 염산이나 질산, 황산 등의 강산성 화학제를 이용하고 또한 가열 과정이 포함되므로 숙련되지 않은 비전문가에게는 매우 위험한 것이 사실이다. 또한 환기와 폐액을 처리하기 위한 추가적인 시설이나 장비가 요구되나, 간이 시료 세정법을 통해 이러한 점을 극복할 수 있었다.

두 번째, 적정 피각 계수량 선정을 통해 평가에 소요되는 시간을 감소시켰다. 기존의 일반적인 부착돌말 연구들은 보통 500개 이상의 피각을 계수하는데, 이는 숙련된 전문 분석자도 많은 시간이 소요될 수 있는 수준이다. 그러므로 적정 계수량 선정을 통해 수환경 평가가 가능한 적절한 최소 계수량을 찾고 이를 통해 부착돌말

의 계수에 소요되는 시간을 줄이고자 하였다. 그 결과, 통계적인 검증 과정을 통해 적정 피각 계수량을 300개로 선정하였다.

세 번째, TDI를 이용한 수환경 평가에서 시료 분석을 위한 종동정을 간소화 하기 위해 지표-규조군을 이용하였다. TDI를 포함한 부착돌말 조사에서는 과도하게 많은 종수와 종동정을 위한 분류학적 어려움이 가장 큰 난점이다. 기존의 TDI가 평가 대상 하천의 전체 출현종을 대상으로 동정과 계수가 이루어지는 반면, 지표-규조군을 이용할 경우 불과 115종만을 대상으로 동정과 계수가 이루어지므로 종동정을 결정적으로 용이하게 할 수 있다.

본 연구에서 새롭게 간이화된 TDI를 이용한 비전문가의 수환경 평가 결과가 전체 출현종을 대상으로 한 숙련된 전문가의 결과와 통계학적으로 거의 유사한 것으로 분석되어, 학생들과 같은 비숙련된 일반인들도 환경교육의 도구로써 부착돌말을 이용한 수환경 평가법인 TDI를 활용할 수 있는 가능성이 확인되었다.

참고문헌

- 국립환경과학원/NIER, 2019, 수생태 현황조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침-하천편 (별책: 국립환경과학원고시 제2019-52호).
- 김성민, 2023, 부착구조를 이용한 수질평가법 TDI (Trophic Diatom Index)의 간소화를 위한 지표-규조군 선발 및 적용, 대구대학교 대학원 석사학위논문.
- 김윤경·정해문, 1998, “과학 실험 교육의 현황과 실험 시약 사용의 주의사항”, 환경교육, 11(2), 144-155.
- 박진원·이재관·류덕희·이재안·김상훈·문정숙·권대률·황순진·김백호·김한순·이정호·김용재·이학영, 2016, 한국산 돌말류, 국립환경과학원.
- 신재열, 2015, “지형 및 생태교육을 위한 현장학습활동 프로그램 개발: 낙동강 강정고령보 지역을 중심으로”, 중등교육연구, 63(3), 391-415.
- 윤병진, 1996, “수서 곤충을 이용한 하천의 수질 오염 현장 교육”, 한국환경교육학회 학술대회 자료집, 31-33.
- 이정호·정철·권난주·김영주·박혜경, 2011, “학교 환경교육을 위한 하천 수질 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램 SimRiver 의 활용”, 환경교육, 24(1), 40-48.
- 이지호·김동렬, 2019, “지역 하천 탐구 프로그램이 초등학교들의 환경소양 변화에 미치는 영향에 관한 질적연구

- 구”, 경인교육대학교 교육연구원 교육논총, 39(4), 83-104.
- 조경제, 2010, 한국의 조류(Algae) 제3권 1호 담수산 돌말류, 국립생물자원관.
- 조운석·노대일·조성호·윤진아·오승유·천천·남윤경, 2020, “환경교육을 위한 아두이노 기반 스마트 환경 측정 시스템 개발”, 한국컴퓨터교육학회 학술발표대회 논문집, 24(1), 97-100.
- 추정인·이석희, 2022, “생태환경교육이 초등학생의 환경소양과 과학적 태도에 미치는 영향”, 수산해양교육연구, 34(5), 782-793.
- 최유진·이재영, 2023, “마을 환경교육 프로그램의 현황과 특징: 충청남도 환경교육 시범마을 사업 사례를 중심으로”, 환경교육, 36(3), 273-290.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, D. B., and Stribling, B. J., 1999, *Rapid bioassessment protocols for use in streams and nadeable rivers*, Washington: USEPA.
- Hendey, I., 1974, The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms, *Microscopy*, 32, 423-426.
- Kelly, M. G. and Whitton, B. A., 1995, The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of applied phyology*, 7, 433-444.
- Lavoie, I., Dillon, P. J., and Campeau, S., 2009, The effect of excluding diatom taxa and reducing taxonomic resolution on multivariate analyses and stream bioassessment. *Ecological Indicators*, 9(2), 213-225.
- Mayama, S., Ueyama, S., Mayama, N., and Kobayasi H., 1996, A video program showing the procedure for collection and observation of diatoms used for evaluation of river water quality. *In Biology Education to Nonbiology Majors. Proceedings of the 15th Biennial Conference of the Asian Association for Biology Educatz*, pp. 184-189, AABE.
- McCormick, P. V. and Stevenson, R. J., 1998, Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the Florida Everglades, *Journal of Phyology*, 34(5), 726-733.
- Nagumo, T., 1995, Simple and safe cleaning methods for diatom samples. *Diatom* 10(8888), 22.
- Nagumo, T. and Kobayasi, H., 1990, The bleaching method for gently loosening and cleaning a single diatom frustule, *Diatom* 5, 45-50.
- Rozi, O. R., Soeprubowati, T. R., and Hariyati, R., 2022, Determination of Minimum Number of Frustule for Identification of Diatoms in Telaga Cebong, Dieng, Central Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Linnology*, 3(2), 58-65.
- Soeprubowati, T. R., Tandjung, S. D., Sutikno, S., Hadisusanto, S., and Gell, P., 2016, The minimum number of valves for diatoms identification in Rawapening Lake, Central Java. *BIOTROPIA-The Southeast Asian Journal of Tropical Biology*, 23(2), 97-100.
- Solak, C. N., 2011, Water quality monitoring in European and Turkish rivers using diatoms. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 11(2).
- Tyree, M. A., Carlisle, D. M., and Spaulding, S. A., 2020, Diatom enumeration method influences biological assessments of southeastern USA streams. *Freshwater Science*, 39(1), 183-195.
- 하천 환경 시뮬레이션 프로그램 SimRiver 사이트 ‘Diatom project (<https://www.2u-gakugei.ac.jp/~diatom>, 2023년 8월 10일 접속)
- 시사메거진, 2018년7월26일자, “수생태계 현장체험으로 환경 전문가 꿈 키워요”, (<https://www.sisamagazine.co.kr/news/articleView.html?idxno=136326>, 2023년 12월 16일 접속)

접 수 일 : 2024. 03. 20

수 정 일 : 2024. 05. 26

게재확정일 : 2024. 05. 31

교신: 이정호, 38606, 경상북도 경산시 솔숲길15길 10 (평산동), 대구대학교 사범대학 생물교육과 교수 (jungho@daegu.ac.kr, 053-850-6994)

Correspondence: Jung Ho Lee, jungho@daegu.ac.kr