

## 다중형 돌말지수를 이용한 국내 하천의 생물학적 온전성 평가

조인환<sup>1</sup>, 이영원<sup>2</sup>, 김하경<sup>1</sup>, 김용재<sup>3,\*</sup>, 황순진<sup>4</sup>, 원두희<sup>5</sup>, 노성유<sup>6</sup>, 이재관<sup>6</sup>, 김백호<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 환경과학과, <sup>2</sup>한양대학교 생명과학과 및 자연과학연구소, <sup>3</sup>대진대학교 생명과학과,  
<sup>4</sup>건국대학교 환경과학과, <sup>5</sup>두희생태조사단, <sup>6</sup>국립환경과학원

## A multimetric diatom index for biological integrity assessment of Korean streams

In-Hwan Cho<sup>1</sup>, Young-Won Lee<sup>2</sup>, Ha-Kyung Kim<sup>1</sup>, Yong-Jae Kim<sup>3,\*</sup>, Soon-Jin Hwang<sup>4</sup>, Du-Hee Won<sup>5</sup>,  
Seong-Yu Noh<sup>6</sup>, Jae-Kwan Lee<sup>6</sup> and Baik-Ho Kim<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Life Science and Research Institute for Natural Sciences, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 11159, Republic of Korea

<sup>4</sup>Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea

<sup>5</sup>Doohee Institute of Ecological Research, Seoul 13814, Republic of Korea

<sup>6</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Baik-Ho Kim  
Tel. 02-2220-0960  
E-mail. tigerk@hanyang.ac.kr

Yong-Jae Kim  
Tel. 031-539-1851  
E-mail. yjkim@daejin.ac.kr

Received: 13 June 2019

Revised: 15 June 2019

Revision accepted: 17 June 2019

**Abstract:** To evaluate the biological integrity of aquatic ecosystems, we developed Korean multimetric diatom index (KMDI) using metrics that many researchers have been previously described, and compared to single-metric diatom index such as trophic diatom index (TDI) and diatom assemblage index to organic pollution (DAIpo). For the biological and environmental data, we investigated the epilithic diatoms, water quality and the land-use for 923 sites in Korean streams between 2013–2017, and estuaries between 2010–2017, respectively. Five appropriate metrics were selected according to the following steps; 1) extraction of 300 potential metrics (biological, chemical, physical, and geographical) based on previous references, of these, 2) 46 samples having high separation power were selected, 3) the selected metrics were each tested for variability, redundancy, and sensitivity to the environments, finally 4) construction of multi-metric diatom index comprising single type metrics such as TDI, DAIpo, % motile diatoms, % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*), and % number of *Gomphonema* species. The biological integrity of the 233 sites from the Geum River basin were independently investigated using KMDI. Collectively, the new KMDI showed high sensitivity and explanatory power for environmental factors such as land-use, biochemical oxygen demand, total nitrogen, and electric conductivity. However, it had slightly higher biological integrity for the same sites as compared to single type diatom metrics. Finally, more data accumulation from all over Korea and the development of acceptable diatom metrics were required.

**Keywords:** Korean multimetric diatom index, epilithic diatom, biological integrity, water quality, stream and estuary

## 서 론

부착돌말은 세포 형태의 다양성은 물론 서식처나 수질 오염에 대한 내성의 범위가 넓고(Leira and Sabater 2005; Watanabe 2005; Janech *et al.* 2006), 이동성이 낮아 특정 환경에 대한 지표성이 매우 높다(Allen 1995; McCormick and Stevenson 1998). 특히 이들은 하천의 물리, 화학적 요인 - 기후, 토지, 영양염, 이온이나 포식자와 같은 생물적 요인들의 변화에 대하여 뚜렷한 종 출현 및 생물량 변화를 나타낸다(Leland and Porter 2000; Weckstrom and Korhola 2001; Kim *et al.* 2019). 이러한 특성을 이용하여 오래전부터 특정 수역의 수질을 판정하는데 사용하여 왔다(Reid *et al.* 1995; Kelly 1998; Wu 1999; Chang *et al.* 2004). 최근에는 많은 국가에서 하천생태계를 보전하고 훼손된 생태계를 복원하기 위하여, 돌말지수 개발 및 이를 이용한 생태계 평가를 실시하고 있다(Karr 1981; OEPA 1987; Ganasan *et al.* 1998; Schmitt and Dethloff 2000; Tan *et al.* 2015; Xue *et al.* 2019).

국내에서는 아직까지 돌말지수를 개발한 적이 없으며, 1900년대 후반부터 TDI(Trophic Diatom Index; Kelly and Whitton 1995)와 DAIPo(Diatom Assemblage Index to Organic Pollution; Watanabe *et al.* 1986)를 혼용하여 왔으나 2000년대 후반부터는 하천 및 하구에 서식하는 부착돌말의 성장에 직접적으로 영향을 주는 인산염을 기본으로 하는 TDI 지수만을 사용하고 있다(MOE/NIER 2009~2018). 이러한 단일형 돌말지수는 영양염, 유기물 등과 같은 단일 환경요인과 돌말의 출현 특성 간의 상호 관련성을 근거로 개발되었는데(Kim *et al.* 2019), 환경에 대한 저서동물의 출현과 민감도를 이용하여 수질 및 수환경의 상태를 평가하는 Zelinka-Marvan(1961)의 방법을 응용한 것으로(Hwang *et al.* 2006; Coste *et al.* 2009) 지금까지 개발된 대부분의 돌말지수 역시 기본적으로 같은 원리를 이용하고 있다.

단일형 지수는 특정 환경요소에 대응되는 돌말류의 출현 특성을 반영하기 때문에 보다 다양한 환경요소에 대한 종합적인 영향을 포괄적으로 설명하기 위해서는 다중형 돌말지수(MDI; Multimetric Diatom Index)의 개발이 필요하다(Hill *et al.* 2003; Kim *et al.* 2019). 다른 생물군 - 어류(Karr 1981), 저서성 대형무척추동물(Kerans and Karr 1994) 등에서는 다중형 지수 개발이 일찍부터 이루어져

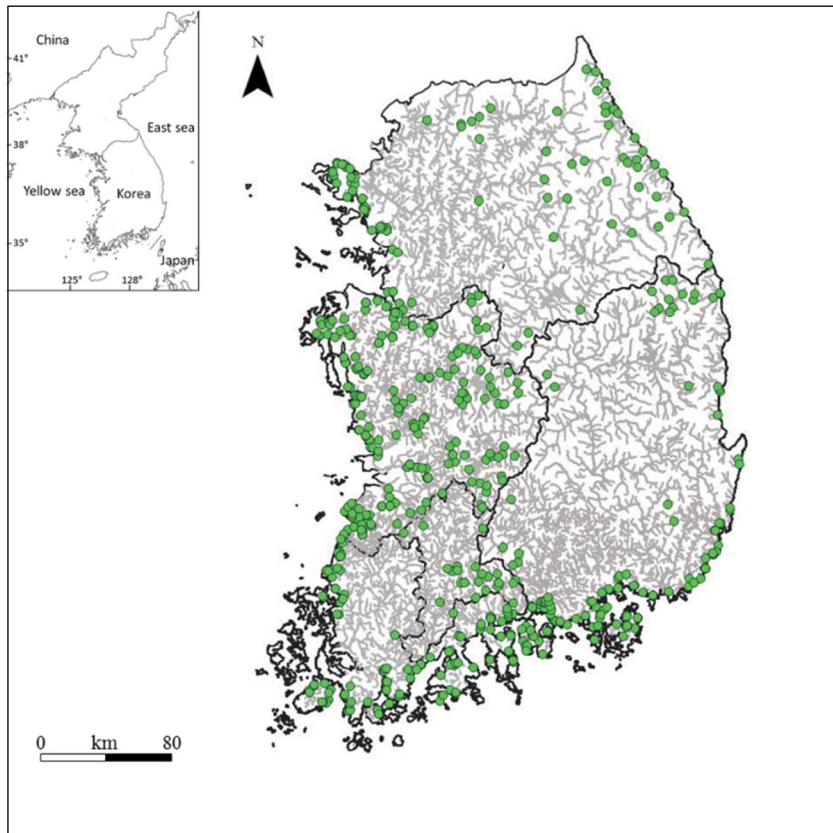
왔다. 반면 다중형 돌말지수의 개발은 최근에 와서 비로소 시작되었다(Wang *et al.* 2005; Zalack *et al.* 2010; Wu *et al.* 2012; Schowe and Harding 2014; Tan *et al.* 2015). Kim (2016)은 이미 개발된 다양한 메트릭(Wang *et al.* 2005; Tan *et al.* 2015)을 바탕으로 임의로 선정한 국내 참조/교란하천들의 환경요소 및 돌말자료를 이용하여 다중형 돌말지수를 개선한 바 있다. 하지만 아쉽게도 1) 자료 숫자가 적어서 국내 하천에 대한 대표성이 낮고, 2) 하구와 같은 기수역에 대한 조사가 포함되지 않았으며, 3) 개발된 지수를 아직까지 적용한 사례가 없다. 뿐만 아니라 지금까지 국내에서 사용하고 있는 단일형 또는 다중형 돌말지수들의 자료들이 국내 환경요인(예, PO<sub>4</sub>-P, BOD)과 출현된 돌말류(우점종, 지표종)가 큰 차이를 보이는 이른바 지역성 때문에 그대로 사용하는 것은 바람직하지 않다(Kim *et al.* 2019).

따라서 본 연구는 국내 하천-하구 생태계의 생물학적 온전성(biological integrity)을 평가하기 위해 기존에 개발된 다양한 돌말지수들의 장, 단점을 검토하고, 국내 388 하천 923개 지점에 대한 부착돌말, 수질과 토지이용도 등의 자료를 근거로 타당성 검증 과정을 거쳐(Wang *et al.* 2005; Tan *et al.* 2015) 선정한 다양한 메트릭을 이용하여 한국형 다중형 돌말지수(KMDI; Korean Multimetric diatom index)를 개발하였다. 또한 개발된 KMDI 지수는 독립적으로 조사가 이루어진 금강수계(금강, 만경강, 동진강, 삽교천) 233개 지점을 대상으로 생물학적 온전성을 평가하고, 단일형 돌말지수들과 비교 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 지점

다중형 돌말지수를 개발하기 위하여 국내의 하천 및 하구를 포함한 388개 하천 923개 지점을 대상으로 부착돌말 채집과 이화학적 수질환경요인 조사를 동시에 실시하였다(Fig. 1). 조사는 하천 5년(2013~2017), 하구 8년(2010~2017) 동안, 문순을 제외한 시기에 각각 독립적으로 실시하였다. 한편 본 연구에서 개발된 지수의 현장 적용 및 기존 돌말지수들과 비교하기 위하여, 선행 조사와 독립적으로 2017년 5월에 금강수계 233개 지점에서 동일한 방법으로 부착돌말과 환경요인 조사를 실시하였다.



**Fig. 1.** A map showing the study sites of epilithic diatoms, water quality and land-use along streams between 2013–2017 and estuaries between 2010–2017 in the Korean peninsula.

## 2. 부착돌말 분석

부착돌말을 채집하기 위해 수중에 잠긴 상부가 편평한 자연석을 대상으로 기질을 선정하였다. 자연석 상부의 100 cm<sup>2</sup>를 정량 채집한 시료의 일부는 Lugol's 용액으로 고정하였고, 다른 일부는 고정하지 않았다. 고정된 시료는 실험실에서 Permanganate method (Hendey 1974)에 따라 세척 및 건조과정을 거친 다음 봉입제 Naphrax<sup>®</sup> (Brunel Microscopes Ltd, England)를 이용하여 영구표본을 제작하고, 광학현미경 (Nikon E600, Japan)의 1,000배 이상에서 동정 및 분류하였다. 동정은 Krammer and Lange-Bertalot (2007) 등의 문헌을 참고하였고, Simonsen (1979) 체계에 따라 분류하였다. 또한 돌말류 군집 특성을 파악하기 위하여 각 지점의 출현 특성(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.

## 3. 환경요인 분석

현장에서 직접 측정하거나 채집한 현장수를 분석한 환경요인들은 메트릭을 선정하는 과정에 사용되었다. 휴대용 수질 측정기 Horiba U-50 (HORIBA Ltd., Japan)을 이용하여 수온, 수심, 용존산소, pH, 전기전도도, 탁도 등은 현장에서 직접 측정하였다. 토지이용은 조사 지점을 중심으로 반경 1 km 범위의 농경지, 도시, 숲의 상대적 비율을 구하여 %로 나타냈다. 조사 지점에서 2 L 무균채수병에 채수 후 현장수를 냉암조건을 유지한 채 실험실로 운반하였다. BOD는 Winkler-azide법으로 측정하였고, NO<sub>3</sub>-N은 Cadmium reduction법, NH<sub>3</sub>-N은 Colorimetric법, TN은 Cadmium reduction법, PO<sub>4</sub>-P는 Ascorbic acid법, TP는 persulfate 분해 후 Ascorbic acid법으로 각각 Spectrophotometer (SP2770i Youngwoo, Korea)를 이용하여 측정하였다 (APHA 2001).

**Table 1.** Criteria and levels for determination of the reference conditions or streams based on the watershed, chemical and biological parameters to identify the disturbance of 923 sites in streams between 2013–2017, and estuaries between 2010–2017, respectively

	Parameters	Units	Ranges
Watershed	Forest land-use	%	≥ 60
Chemical	BOD	mg L <sup>-1</sup>	≤ 1
	TP	mg L <sup>-1</sup>	< 0.1
	TN	mg L <sup>-1</sup>	≤ 1.71
Biological	TDI		≥ 57.6

BOD; Biochemical oxygen demand, TP; Total phosphorus, TDI; Trophic diatom index

#### 4. 비교란(참조)하천의 선정

다중형 돌말지수를 개발하기 위하여 온전성평가의 기준이 되는 대조군을 선정하고자 현장조사를 수행하였던 지점들 중 교란정도가 가장 낮은 지점들을 비교란 또는 참조하천으로 선정하였다. 본 연구에서는 선행연구(Wang *et al.* 2005; Tan *et al.* 2015; MOE/NIER 2016)를 토대로 전체 923개 지점의 토지이용(숲 비율), 화학적(BOD, TN, TP), 생물학적인(TDI)들의 분포를 분석하여 생태학적 교란이나 수질이 우수한 평균 2.5% 미만(23개 지점)을 참조하천으로 선정하였는데(Table 1), 단일형 돌말지수 TDI를 이용한 평가에서 모두 B 등급 이상에 해당되었다.

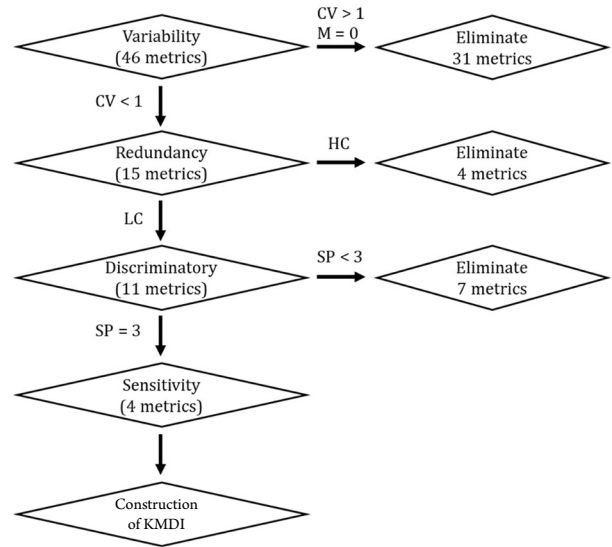
#### 5. 메트릭의 특성

##### 1) 메트릭의 선정

본 연구에서 메트릭(metric)이란 수생태계의 물리적, 화학적, 생물학적 상태를 설명할 수 있는 주요 돌말지표를 의미한다. 먼저, 한국형 다중형 돌말지수(KMDI)를 개발하기 위해 후보 메트릭을 임의로 수집하고(약 300개 metrics), 선행연구 또는 문헌을 참고하여 1차 후보 46개 메트릭을 선정하였다(Barbour *et al.* 1999; Hill *et al.* 2000; Wang *et al.* 2005). 이어서 Wang *et al.* (2005)과 Kim (2016)의 방법에 따라, 이들 후보 메트릭 중 다항목지수에 포함될 최종 메트릭을 선정하기 위해 변이성, 중복성, 변별력 및 수질환경에 대한 부착돌말의 민감성 등 총 4단계 검증 과정을 거쳐 최종적으로 KMDI에 적용할 메트릭을 선정하였다(Fig. 2, Table 2).

##### (1) 변이성(Variability)

각 후보 메트릭의 변이성을 검증하기 위해 다음 3가지



**Fig. 2.** Schematic selection process of metrics for the development of Korean multi-metric diatom index (KMDI), according to Wang *et al.* (2005). CV; Coefficient of variation, M; Median, LC; Low correlation, HC; High correlation, SP; Separation power.

항목에 해당되는 메트릭은 하천에 대한 교란을 파악하는데 적합하지 않다고 판단하여 제외하였다(Barbour *et al.* 1999; Wang *et al.* 2005; Jun *et al.* 2012; Tan *et al.* 2015; Kim 2016).

- ① 중간값이 0인 메트릭
- ② Coefficient of variation (CV, 표준편차/평균)이 1 이상으로 나타나는 메트릭
- ③ 평균, 25<sup>th</sup>, 중간값, 75<sup>th</sup> 값이 낮거나 변이가 심한 메트릭

##### (2) 중복성(Redundancy)

각 메트릭 간 높은 상관성을 보이는 각각의 메트릭은 수질환경 평가에 새로운 정보를 제공하지 못한다. 이러한 이유로 각 메트릭 간 중복성 검증은 다항목지수 개발에 있어서 반드시 필요하다(Jun 2011). 각 메트릭 간 산점도(scatter plot)를 이용하여 선형적 상관성을 평가하고  $r^2 > 0.8$ 으로 나타나는 메트릭은 중복된다고 판단하여 이들 중 한 개의 메트릭을 선정하였다(Fig. 3; Wang *et al.* 2005; Kim 2016).

##### (3) 변별력(Discriminatory)

참조하천과 교란하천의 차이를 구분하기 위해 Mann-Whitney U test, Box-and-Whisker plot을 이용하여 각 메트릭의 변별력을 평가하였다(Wang *et al.* 2005; Kim 2016). Mann-Whitney U test를 사용하여 두 그룹 간 유의한 차이

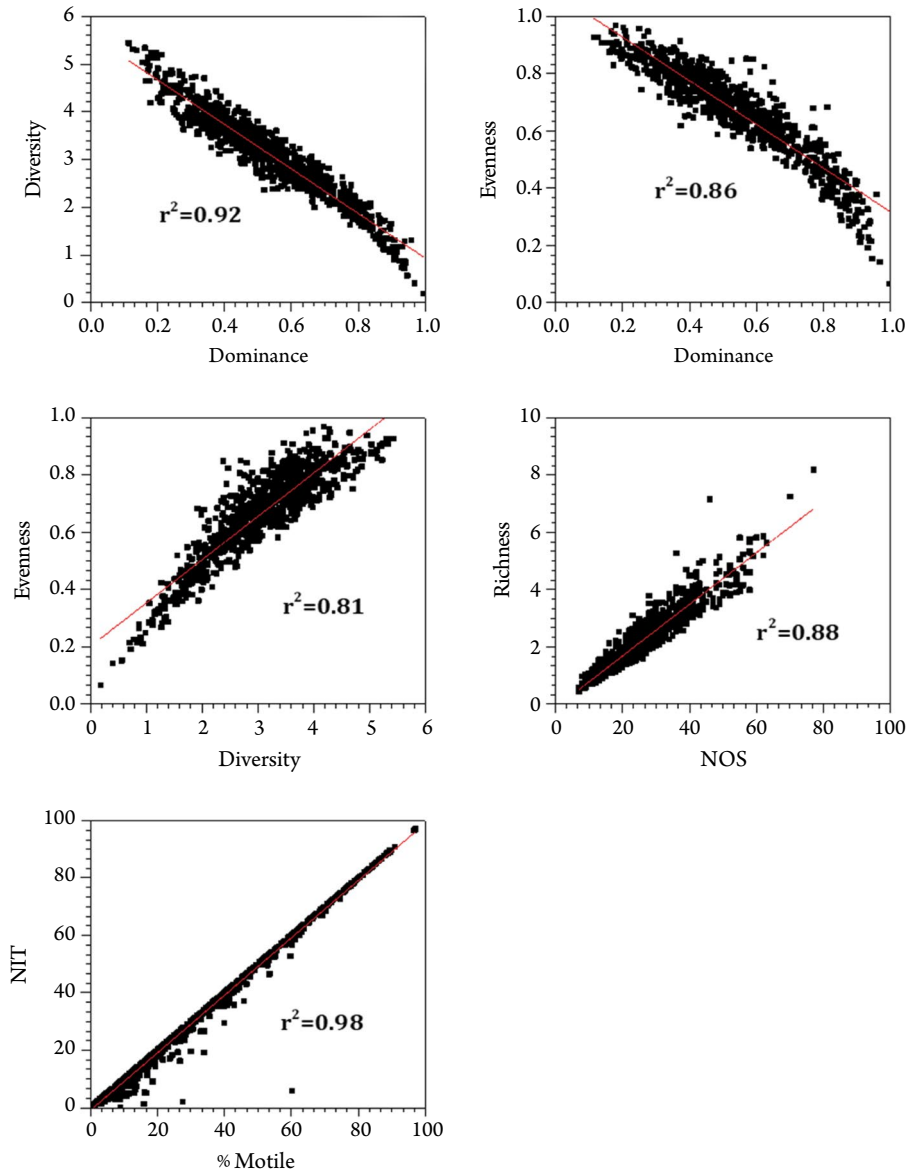
**Table 2.** The selection and testing process for potential diatom metrics to evaluate the biological integrity of 923 studying sites in the streams and estuaries Korea, according to Wang *et al.* (2005)

Candidate metrics	Metric codes	Reason for rejection			
		Variability	Redundancy	Discriminatory	Sensitivity
Trophic Diatom Index (TDI)	TDI				
Diatom Assemblage Index of Pollution (DAI <sub>po</sub> )	DAI <sub>po</sub>				
No. of species	NOS			Low PD	
Dominance index (DI)	DI		Overlapped with J		
Shannon - Weaver Diversity Index (H')	H		Overlapped with J		
Evenness Index (J')	J			Low PD	
Richness Index (R)	R		Overlapped with SR		
% Prostrate individuals	PRO			Low PD	
% Erect individuals	ERE	CV > 1, low median			
% Stalked individuals	STA	CV > 1			
% Unattached individuals	UNA	CV > 1			
% Motile individuals	MOT				
Eutrphentic diatoms ratio	EUT	Low median			
% <i>Achnanthes minutissima</i> individuals	ACM	CV > 1, low median			
% <i>Achnanthes</i> / ( <i>Achnanthes</i> + <i>Navicula</i> )	AAN				
% <i>Cymbella</i> / ( <i>Cymbella</i> + <i>Navicula</i> )	CCN	CV > 1			
% <i>Achnanthes</i> individual	ACH	CV > 1			
% <i>Amphora</i> individuals	AMP	CV > 1, low median			
% <i>Cocconeis</i> individuals	COC	CV > 1, low median			
% <i>Cymbella</i> individuals	CYM	CV > 1			
% <i>Cyclotella</i> individuals	CYC	CV > 1			
% <i>Fragilaria</i> individuals	FRA	CV > 1			
% <i>Frustulia</i> individuals	FRU	CV > 1, low median			
% <i>Gomphonema</i> individuals	GOM	CV > 1			
% <i>Navicula</i> individuals	NAV	Variable			
% <i>Nitzschia</i> individuals	NIT		Overlapped with MOT		
% <i>Rhoicosphenia</i> individuals	RHO	CV > 1, low median			
% <i>Surirella</i> individuals	SUR	CV > 1, low median			
% <i>Synedra</i> individuals	SYN	CV > 1, low median			
% No. of <i>Achnanthes</i> species	NAC			Low PD	
% No. of <i>Amphora</i> species	NAM	CV > 1, low median			
% No. of <i>Cocconeis</i> species	NCO	CV > 1			
% No. of <i>Cyclotella</i> species	NCYC	CV > 1			
% No. of <i>Cymbella</i> species	NCYM	CV > 1			
% No. of <i>Fragilaria</i> species	NFRA			Low PD	
% No. of <i>Frustulia</i> species	NFRU	CV > 1, low median			
% No. of <i>Gomphonema</i> species	NGO				
% No. of <i>Navicula</i> species	NNA	Variable			
% No. of <i>Nitzschia</i> species	NNI	Variable			
% No. of <i>Rhoicosphenia</i> species	NRH	CV > 1, low median			
% No. of <i>Surirella</i> species	NSU	CV > 1, low median			
% No. of <i>Synedra</i> species	NSY	CV > 1, low median			
Saproxenous diatom ratio	SAP	CV > 1, low median			
Saprophilous diatom ratio	SPR	CV > 1, low median			
Chlorophyll-a	CHL	CV > 1			
AFDM (Ash-free dry-matter)	AFDM			Low PD	

CV; Coefficient of variation, SP; Separation power

를 보이는 경우, Box-and-Whisker plot을 이용하여 분할력 (SP; Separation Power)을 분석하였다. 분할력은 각 메트릭에 대한 4분위 범위 (25<sup>th</sup> percentile과 75<sup>th</sup> percentile)와 중간값을 이용하였다 (Barbour *et al.* 1999; Wang *et al.* 2005;

Jun *et al.* 2012; Tan *et al.* 2015). 두 그룹 간 box 사이가 중복되는 경우 1점, 중간값이 중복되지 않는 경우 2점, box 간 중복되지 않는 경우 3점으로 하여, 3점으로 갈수록 변별력이 높은 것으로 판단하였다 (Fig. 4).



**Fig. 3.** Relationship among metrics used in this study. Selection or rejection was made for the highly correlated metric and overlapping metrics in the development of Korean multi-metric diatom index. NOS; Number of species, NIT; % *Nitzschia* individuals in total abundance, % Motile; % motile diatom in total abundance.

#### (4) 환경에 대한 민감도(Sensitivity)

수질환경을 설명하는 생물학적인 지수는 생태계의 물리적, 화학적, 생물학적인 상태를 대변해야 하기 때문에 다양한 유형에 대한 메트릭과 관계를 포함하여야 한다 (Barbour *et al.* 1999). 따라서 생태적 특성을 반영하고 환경요인과의 관계를 파악하기 위해 상관분석을 실시하였다.

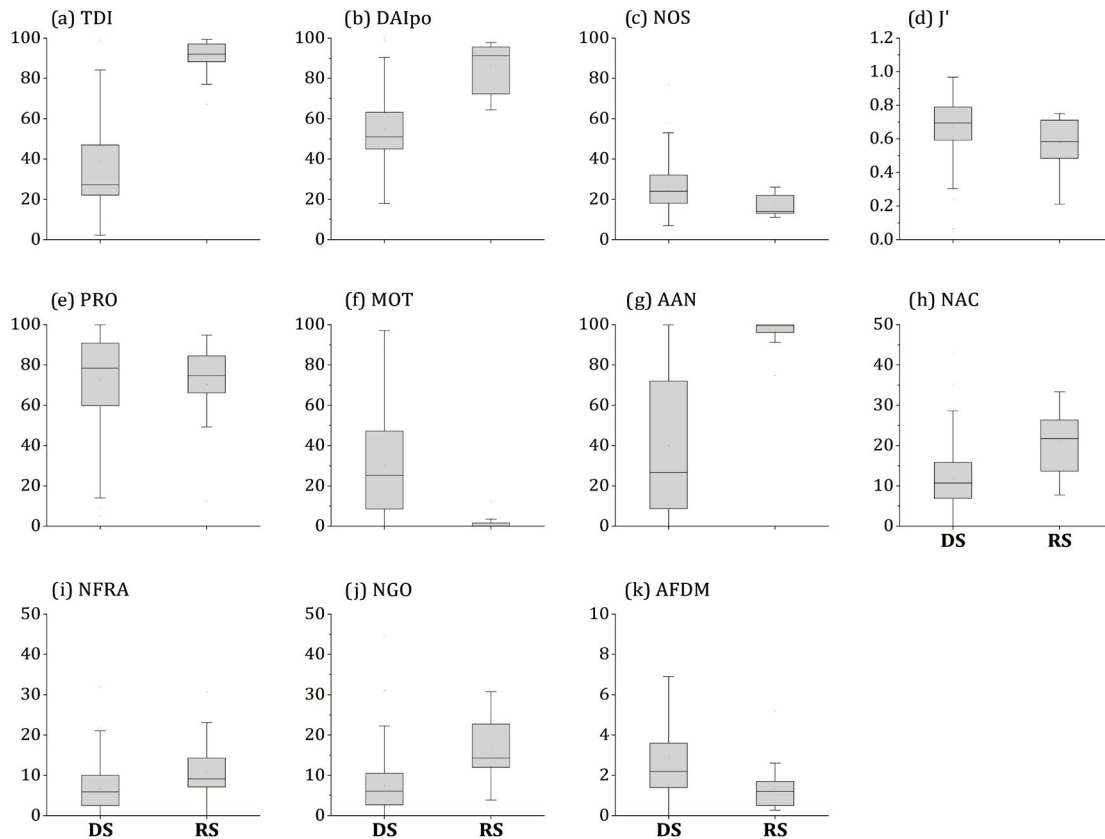
#### 2) 선정된 메트릭의 특성

후보 메트릭을 대상으로 변이성, 중복성, 변별력 및 환경

에 대한 민감성 등의 검증과정을 거쳐 최종적으로 다중형 돌말지수의 주요 메트릭으로 선정된 5가지 지표들의 특성은 다음과 같다.

##### (1) Trophic Diatom Index (TDI)

이 메트릭은 영양염 지수로서 각 종의 상대적인 풍부도, 영양염 ( $PO_4\text{-P}$ )에 대한 오염민감도, 지표종분석(Indicator Species analysis)으로 나타난 지표값(IndVal)을 고려하여 하천의 영양상태를 평가하는 지수이다 (Kelly and Whitton



**Fig. 4.** Discriminatory test based on the separation power (as box plot) to distinguish with the disturbed stream and reference stream in the development of Korean multi-metric diatom index. DS; Disturbed stream, RS; Reference stream, TDI; Trophic Diatom Index, DAIPo; Diatom Assemblage Index of Pollution, NOS; Number of species, PRO; % Prostrate individuals, MOT; % Motile individuals, AAN; % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*), NAC; % No. of *Achnanthes* species, NFRA; % No. of *Fragilaria* species, NGO; % No. of *Gomphonema* species, AFDM; Ash-free dry-matter.

1995). 본 지수 개발 시 사용한 TDI는 국내 실정에 맞게 변경하여 사용하였으며, 하천의 영양염 ( $PO_4\text{-P}$ )의 농도가 증가할수록 TDI는 반대로 감소한다 (MOE/NIER 2009~2018).

**(2) Diatom Assemblage Index of Organic Pollution (DAIPo)**

이 메트릭은 유기오염지수로서 특정 지점에서 출현된 돌말류들을 호청수성종 (Saproxenous taxa), 광적응성종 (Indifferent taxa), 호오탁성종 (Saprophilous taxa) 등으로 각각 구분하고 호청수성종과 호오탁성종의 상대풍부도를 이용하여 수체의 유기오염 정도를 평가한다 (Watanabe et al. 1986). 하천의 오염도가 증가할수록 DAIPo는 감소한다.

**(3) % motile individuals in total diatoms (MOT)**

이 메트릭은 운동성 돌말류의 빈도가 높을수록 오염도

가 증가함을 의미하는 것으로 하천의 퇴적 정도와 관련된 지표이며, 많은 선행 연구에서도 다중형 지수의 잠재적 메트릭으로 사용되어 왔다 (Hill et al. 2000; Wang et al. 2005). 출현된 종은 운동성에 따라 분류하고 (Passy 2007; Berthon et al. 2011), 각 지점에서 출현한 모든 부착돌말 개체수에 대한 motile diatoms 개체수의 비율로 계산하였다. 하천 내 퇴적이 증가함에 따라 MOT와 오염도가 증가한다.

**(4) % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*) (AAN)**

이 메트릭은 출현된 돌말류 속 수준에서 청수성 *Achnanthes*와 운동성을 가지고 있으며 영양염을 선호하는 *Navicula*에 대한 상대 비율을 의미하는 것으로 (Wang et al. 2005), 하천의 오염이 증가할수록 AAN는 감소한다.

**(5) % number of *Gomphonema* species (NGO)**

이 메트릭은 Wang et al. (2005)은 출현된 속 수준에

**Table 3.** Method of calculating scores using the 0–10 scaling system. A distinction was made between those whose value increases after disturbance and those whose value decreases after disturbance (Hill *et al.* 2003)

Response to impairment	Score	Calculation
+	0 to 10	(Metric value/90 <sup>th</sup> percentile of reference sites) × 10
-	0 to 10	(1 - Metric value/90 <sup>th</sup> percentile of impaired sites) × 10

**Table 4.** Relationship between five diatom metrics and environmental parameters. Biological and environmental data were collected from 923 sites in Korean streams between 2013–2017, and estuaries between 2010–2017, respectively

Parameters	FOR	WT	DO	pH	EC	TUR	BOD	TN	TP
TDI	0.72**	-0.59**	0.29**	-0.28**	-0.20**	-0.28**	-0.41**	-0.45**	-0.32**
DAIpo	0.64**	-0.52**	0.22**	-0.38**	-	-0.23**	-0.36**	-0.38**	-0.24**
MOT	-0.39**	0.35**	-0.21**	0.12**	0.16**	0.15**	0.30**	0.35**	0.28**
AAN	0.65**	-0.48**	0.30**	-0.24**	-0.09**	-0.25**	-0.35**	-0.41**	-0.30**
NGO	0.49**	-0.40**	0.22**	-0.28**	-0.25**	-0.24**	-0.32**	-0.29**	-0.20**

\*\*;  $p < 0.01$ , TDI; Trophic Diatom Index, DAIpo; Diatom Assemblage Index of Pollution, FOR; %Forest, WT; Water temperature, DO; Dissolved Oxygen, EC; Electric conductivity, MOT; % Motile individual, AAN; % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*), NGO; % No. of *Gomphonema* species

서 돌말류를 청수성과 오락성으로 구분하고 *Achnanthes*, *Cocconeis*, *Cyclotella*, *Cymbella*, *Fragilaria*, *Frustulia*, *Gomphonema*, *Rhoicosphenia*, *Synedra* 등을 청수성으로, *Amphora*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Surirella* 등을 오락성으로 구분하였다. 이 중 하천의 오염이 증가할수록 *Gomphonema* 속의 출현종수(NGO)는 감소한다.

### 3) KMDI의 특성 및 적용

앞에서 선정된 후보 메트릭들은 모두 표준화 과정을 거쳤으며 (Barbour *et al.* 1999), 선정된 5개 메트릭을 점수화하기 위해 각 메트릭들은 0~10 점수 체계를 적용하였다 (Hill *et al.* 2003). 교란에 대해 값이 감소하는 메트릭의 경우, 각 메트릭 값을 90<sup>th</sup> percentile 값으로 나누고 10을 곱하여 계산하였고, 교란에 대해 값이 증가하는 메트릭의 경우, 각 메트릭 값을 90<sup>th</sup> percentile 값으로 나누고 이 값을 1에서 뺀 후 10을 곱하여 계산하였다. 메트릭 값이 10이 넘는 경우는 ‘버림’하여 10점으로 계산하였다 (Table 3).

또한 선정된 메트릭의 90<sup>th</sup> percentile 값은 TDI; 91.5, DAIpo; 90.7, % ratio motile individuals in total diatoms; 69.5, % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*); 99.0, % number of *Gomphonema* species; 16.7로 나타났다. 각 메트릭은 0~10 점을 가지게 되고, 5개 메트릭의 합계에 2를 곱한 값이 지수의 점수가 된다. KMDI 지수의 점수는 각 메트릭의 최대값과 최소값을 기준으로 5등분하였으며, 참조상태에 가까울수록 A, 교란정도가 심할수록 E등급으로 구분하였다. 새롭게 개발된 KMDI 지수의 설명력을 검증하기 위하여 환

경요인과 Pearson’s 상관분석을 실시하였다. KMDI 지수의 현장 적용은 2017년 5월에 독립적으로 실시한 금강수계 (금강, 만경강, 동진강, 삽교천) 233개 지점을 대상으로 생물학적 온전성을 평가하고 다른 지수들과 비교 및 검토하였다. 이상의 모든 통계적 분석은 IBM SPSS software (ver. 24. SPSS Inc. Korea)를 이용하였다.

## 결 과

### 1. KMDI의 메트릭 선정

다중형 돌말지수를 개발하기 위하여 후보 메트릭 선정 과정을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 변이성 (Variability) 검증에서는 (Fig. 2, Table 2), 후보 중 중간값이 0인 메트릭은 % Erect individuals, Eutraphentic diatom ratio 등으로 나타나 총 16개를 제거하고, 평균값, 사분범위 사이에 변이가 크고, CV값 (표준편차/평균)이 큰 메트릭은 % Stalked individuals, % Unattached individuals 등으로 나타나 추가적으로 15개 메트릭을 제거하여 총 31개 메트릭이 제거되었다. 한편, 중복성 (Redundancy) 검증에서는 (Fig. 2, Table 2), Fig. 3a, b, c에서와 같이 다양성지수 ( $r^2 = 0.92$ ), 우점도지수 ( $r^2 = 0.86$ ), 균등도지수 ( $r^2 = 0.80$ )는 서로 매우 높은 상관관계를 보였고, 이들 중 변이성 검증 단계에서 CV값이 더 작은 균등도지수를 선정하였다. 출현 종수와 풍부도지수는  $r^2 = 0.88$ 를 가지며 중복성을 보였고 (Fig. 3d), 1 단계에서의 CV값이 더 작은 출현 종수를 선정하였다. %



*Nitzschia* individuals과 % Motile individuals는  $r^2=0.98$ 로 거의 선형과 유사한 관계를 보였다(Fig. 3e). *Nitzschia* 속은 교란 정도에 따라 일정한 반응을 예상하기 어려우므로 % Motile individuals을 선정하였다. 이 과정을 통해 4개 메트릭이 제거되었다. 변별력(Discriminatory) 검증에서는(Fig. 2, Table 2), SP값이 3점이 되지 않은 메트릭은 No. of species, Evenness Index 등으로 나타나 총 6개 메트릭을 제거하였다. 환경에 대한 부착돌말의 민감도(Sensitivity) 검증을 위해 상관분석을 실시한 결과는 Table 4과 같이 DAIPo와 전기전도도 간의 상관성을 제외한 5개의 메트릭이 모두 환경요인과의 유의미한 상관성( $p<0.01$ )을 보여 최종 메트릭으로 선정되었다(Fig. 2, Table 2).

## 2. KMDI의 특성

KMDI는 앞에서 최종적으로 선정한 5가지 메트릭(TDI, DAIPo, % Motile individual, % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*), % No. of *Gomphonema* species)을 산술적으로 합한 다중형 돌말지수를 개발하였으며(Karr et al. 1986; Barbour et al. 1999; Hill et al. 2000; Jun et al. 2012), 각 메트릭의 점수는 0~10 체계를 적용하였다(Table 3, Hill et al. 2003). 기존에 사용해왔던 단일형 돌말지수 TDI와 DAIPo는 0~100점으로 만들어져 있어, 이들과 비교하기 용이하게 새롭게 개발한 KMDI 역시 0~100 범위를 가지며 이를 5등급으로 구분하였다(Table 5). 다중형 돌말지수는 다음과 식에 의해 계산된다.

$$KMDI = (TDI + DAIPo + MOT + AAN + NGO) \times 2$$

KMDI 지수의 메트릭 중 TDI, DAIPo는 종(species)을 기반으로, % Motile individual, % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*), % No. of *Gomphonema* species 등은 속(genus)을 기반으로 측정하였다. 일반적으로 속을 기반으로 동정 및 측정은 부착돌말을 분류하거나 동정이 용이하기 때문에 이런 방법이 생물학적 수질판정에 사용되고 있다(Wang et al. 2005). 한편, Bahls (1993)와 Wang et al. (2005)에 따르면 *Achnanthes*, *Cocconeis*, *Cyclotella*, *Cymbella*, *Fragilaria*, *Frustulia*, *Gomphonema*, *Rhoicosphenia*, *Synedra* 속은 청정수역, *Amphora*, *Navicula*, *Nitzschia* 속은 오락수역을 각각 대변한다. 본 연구에서 % *Achnanthes* / (*Achnanthes* + *Navicula*), % No. of *Gomphonema* species은 영양염(TN, TP), 토지이용(% Forest)과 매우 높은 상관을 보

**Table 5.** Grades and ranges of stream biological integrity classified by Multi-metric Diatom index based on data from 923 sites in streams between 2013–2017, and estuaries between 2010–2017, respectively

Grades	Ranges of biological integrity
A	100–76.9
B	76.8–53.8
C	53.7–30.6
D	30.5–7.5
E	7.4–0.0

**Table 6.** Relationship between each metric of Korean Multi-metric Diatom index and environmental parameters for 223 studying sites in Geum River basin in May 2017

Parameters	Unit	r
Urban	%	-0.114
Forest	%	0.497**
Agriculture	%	-0.318**
Other land-use	%	-0.219**
pH		0.193**
Conductivity	$\mu S \cdot cm^{-1}$	-0.272**
Turbidity	NTU	-0.265**
BOD	$mg \cdot L^{-1}$	-0.300**
NH <sub>3</sub> -N	$mg \cdot L^{-1}$	-0.131*
NO <sub>3</sub> -N	$mg \cdot L^{-1}$	-0.246**
TN	$mg \cdot L^{-1}$	-0.274**
PO <sub>4</sub> -P	$mg \cdot L^{-1}$	-0.265**
TP	$mg \cdot L^{-1}$	-0.242**

\*\*;  $p<0.01$ , \*;  $p<0.05$ , BOD; Biochemical oxygen demand, TP; Total phosphorus, TN; Total nitrogen

였다(Table 4).

KMDI의 신뢰성을 검토하기 위하여 독립적으로 조사한 금강수계 233개 지점의 환경요인과 다중형 돌말지수와 상관을 분석한 결과, KMDI는 도시 토지이용을 제외하면 모든 물리적, 화학적인 수질환경과 높은 상관성을 보였다(Table 6). 특히 토지이용 중 숲의 비율( $r=0.497$ )과 높은 상관성을 보였고, 그 외 농경지 비율( $r=-0.318$ ), BOD( $r=-0.300$ ), TN( $r=-0.274$ ), 전기전도도( $r=-0.272$ ) 등 나머지 수질환경과도 비교적 높은 상관성을 보였다.

## 3. KMDI의 적용

본 연구에서 개발한 KMDI와 단일형 돌말지수(TDI, DAIPo)를 동일한 조사 지점에 대하여 비교 검토하였다(Table 7). TDI의 경우, 등급을 각 A; 100–90, B; 89–70, C; 69–50, D; 49–30, E; 29–0으로 DAIPo의 경우 A; 100–80, B; 79–60, C; 59–40, D; 39–20, E; 19–0 등으로 구분했다(MOE/NIER 2008~2018). KMDI는 A, B, C 등급에 집중

**Table 7.** Biological integrity assessment of 223 studying sites in Geum River basin in May 2017

Grades	KMDI (%)	DAIpo (%)	TDI (%)
A	69 (29.6)	42 (18.0)	11 (4.7)
B	89 (38.2)	53 (22.7)	59 (25.3)
C	72 (30.9)	97 (41.6)	47 (20.2)
D	3 (1.3)	33 (14.2)	40 (17.2)
E	0 (0.0)	8 (3.4)	76 (32.6)

KMDI; Korean Multimetric Diatom index, TDI; Trophic Diatom Index, DAIpo; Diatom Assemblage Index of Pollution

되었으며, E 등급은 나타나지 않았다. 대체적으로 DAIpo의 경우 KMDI와 비슷한 경향을 보였으나, D등급이 상대적으로 많이 나타났다. TDI의 경우 E 등급이 76개 지점으로 가장 높았다. 결과적으로 KMDI는 두 단일형 돌말지수보다 생물학적 온전성이 상대적으로 높게 평가되었다.

## 고 찰

하천의 생물학적 수질판정을 위한 단일형 또는 다중형 돌말지수는 오래전부터 개발되어왔으나(Kim *et al.* 2019), 지수의 근거가 되는 자료는 사실상 매우 제한적이다. 지금까지 가장 많은 나라에서 이용하고 있는 단일형 돌말지수 TDI의 경우(Kelly and Whitton 1995) 지수 개발을 위해 총 70개 지점, Wang *et al.* (2005)의 diatom-based IBI의 경우 총 26개 지점, Hill *et al.* (2003)의 PIBI는 총 272개 지점, Kim (2016)에 의해 개발된 온전성 평가 지수의 경우 총 151개 지점 등이 이용되었다. 결국 제한된 지점의 자료를 근거로 개발한 돌말지수들은 특정 지역을 대표할 뿐 다른 수계에 그대로 적용하는 것은 무리가 있다. 본 연구에서 개발된 KMDI는 1) 국내 다양한 하천 및 하구역 923개 지점을 독립적으로 조사하여 자료의 범위나 대표성에서 지금까지 연구들보다 다양한 지점에 대한 조사가 이루어졌으며, 2) 다른 조사에서 시행한 적이 없는 하구에 대한 자료가 추가됨으로 기존 지수들보다 자료의 대표성이 상대적으로 높다.

수체의 온전성을 평가하기 위해 돌말지수를 개발하는 과정에서 인간의 간섭이 가장 적은 참조하천의 선정은 다른 장소의 교란 정도를 평가하는데 기준이 되기 때문에 매우 중요하다. 다만 참조 상태나 참조하천의 기준은 지리적 특성이나 학자의 견해에 따라 차이가 있을 수 있어 동일한 기준으로 일괄 적용하는 것은 결과를 왜곡할 가능성

이 높다. IBI의 경우 Wang *et al.* (2005)은 조사한 지점의 토지 이용도 (land-use)를 근거로 비교란하천(참조하천)을 설정하였으며, Hill *et al.* (2003)은 acid neutralizing capacity (ANC),  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , TP, TN 등 영양염 및 화학물질 농도를 근거로 하였다. 물론 돌말류의 출현특성을 이용한 하천의 온전성을 평가방법 자체가 가지고 있는 지역성의 한계는 과학적으로 극복하기 어려움이 있을 수 있다(Kim *et al.* 2019). 본 연구에서도 토지이용(숲 비율) 이외에도 화학적(BOD, TN, TP), 생물학적(TDI) 요인 등을 사용하였다. 본 연구자들은 다른 연구에서 Wang *et al.* (2005)과 Hill *et al.* (2003)의 기준을 근거로 참조하천을 선택하고 현장조사를 실시한 결과, 단일형 돌말지수(TDI)의 5등급에서 C등급 수준의 낮은 온전성을 보이기도 하였다. 이는 참조상태를 갖는 하천이라 할지라도 단일형 또는 다중형 돌말지수에 의한 온전성 평가는 교란하천으로 해석될 수도 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 대조군 또는 참조하천의 선정은 현장 조사를 먼저 실시하고 분석된 결과를 토대로 온전성 1단계에 속하는 상위 2.4%에 해당되는 지점만을 참조하천으로 선정하였다. 그러나 상위 1단계에 속하는 지점 중에는 인간의 간섭(예, 도로) 현상이 있는 지점도 포함되어 있었다. 본 연구에서 참조하천을 선정하기 위해 각 매트릭의 기준값을 설정하였다(Table 1). 그 중 단일형 돌말지수(TDI)의 기준은 57.6 이상으로 설정하였으나, 선정된 참조하천 중 TDI의 최소값은 67.1로 나타났다(not shown). 참조하천에 해당되는 각 매트릭의 기준값은 조사 지점의 온전성에 대한 평가에 영향을 미치는 주요인자가 될 수 있다. 결국 대표성이 높은 온전성 평가를 위해서는 보다 다양한 지점이나 시기에 현장 조사를 거쳐 매트릭의 범위에 대한 충분한 자료를 축적할 필요가 있다.

KMDI의 돌말지수는 모든 매트릭에 대하여 0~10 점수 체계 (scoring)를 사용하였다. 지금까지 일반적으로 사용되고 있는 것으로 어류, 대형무척추동물의 1-3-5 점수체계는(Karr 1981; Kerans and Karr 1994; Barbour *et al.* 1999) 교란에 대해 값(score)이 증가하는 매트릭은 각각 5점: 참조하천의 75% >, 3점: 75% > 참조하천 > 50%, 1점: 참조하천의 50% < 으로 구분하고, 교란에 대해 값(score)이 감소하는 매트릭은 5점: 참조하천의 75% <, 3점: 75% < 참조하천 < 50%, 1점: 참조하천의 50% > 등으로 구분하였다. 본 연구에 적용된 0~10 점수체계는 1-3-5 점수체계보다 다소 세밀한 표현이 가능하고, 세포 동정이 비교적 용이한 돌말류를 이용한다는 점에서 장점을 가지고 있으나(Wang *et al.*

2005), 다른 생물군과 비교하여 차별성은 크지 않을 것으로 판단된다. 다만 본 연구가 다른 연구들에 비해 조사 지점의 범위(하구, 하천)나 지점수(923 지점) 등에서 대표성이 높고 넓은 점수체제로 인하여 다소 생물학적 온전성 평가 범위가 넓을 것으로 판단되었다. 이는 추후 자료가 더욱 축적이 될 경우 점수체제를 단순화(1,3,5) 하는 것보다 유리할 것이다.

Bahls (1993)에 의하면 *Achnanthes*, *Cocconeis*, *Cyclotella*, *Cymbella*, *Fragilaria*, *Frustulia*, *Gomphonema*, *Rhoicosphenia*, *Synedra* 등의 종들은 보다 청정수역에서 출현하는 종으로 평가하였다. Wang *et al.* (2005)에 의해 개발된 diatom-based IBI의 경우 % No. of *Cymbella* species가 메트릭의 하나로 포함되어 있으며, 본 연구에서 개발된 KMDI 역시 % No. of *Gomphonema* species가 포함되어 있다. Watanabe (2005)에 따르면 *Cymbella*에 속하는 종들은 모두 광적응종이나 호청수종들이었고, *Gomphonema*에 속하는 종들은 대부분 광적응종, 호청수종들이 대부분이었으나, 예외로 *G. pseudoaugur*는 호오탁성종으로 나타났다. 이러한 결과들은 출현하는 돌말류가 속 또는 종 수준에서 환경을 지표하는 성질이 다르다는 것을 의미한다. 결국 돌말류의 생리-생태적인 연구가 더욱 진행된다면 환경지표성에 대한 정확도가 증가할 것으로 판단된다. 기존에 사용하는 단일형 돌말 지수인 TDI (Kelly and Whitton 1995)와 DAIPo (Watanabe *et al.* 1986)는 출현 종수와 상관없이 특정종의 출현밀도에 따라 해당 수체의 건강성을 평가하였다. 결국 돌말류를 이용한 생물학적 온전성의 평가는 출현된 속들의 지표성과 특정 종의 현존량 특히 상대적인 밀도가 정확하게 분석되어야 할 필요가 있다.

## 적 요

수생태계 생물학적 온전성을 평가하기 위하여 국내 하천 및 하구 923개 지점의 자료를 근거로 한국형 다중형 돌말지수(KMDI)를 개발하고, 이를 금강수계 233개 지점을 대상으로 온전성평가를 실시하여 단일형 돌말지수들과 비교 검토하였다. KMDI의 개발은 1) 먼저 선행문헌들을 참고로 300개 이상의 메트릭을 추출하고, 2) 이 중 설명력이 높은 46개 후보 메트릭을 선택하며, 3) 각 메트릭 값들의 변이성, 중복성, 변별력, 환경에 대한 민감성 등을 검증하고, 최종적으로 5가지의 메트릭을 선정하였다. KMDI

는 매트릭의 단순함으로 표현하고, 환경요인들에 대한 신뢰성 검토 결과, 토지이용, BOD, TN, 전기전도도 등에 대해 높은 민감성 및 설명력을 보였으나 단일형 돌말지수들 보다는 동일 지점의 생물학적 온전성은 다소 높게 평가되는 특성을 보였다. 추후 국내는 물론 지역에 상관없이 적용가능한 설명력 높은 매트릭의 발굴 및 정확한 돌말류 분석 연구가 뒷따라야 될 것으로 판단되었다.

## 사 사

본 연구는 하천 및 하구 수생태 건강성 조사 및 평가(2008~2018)에 의하여 수행되었음.

## REFERENCES

- Allen JD. 1995. Structure and Function of Running waters. Stream Ecology. Chapman and Hall, London.
- APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association, New York.
- Bahls LL. 1993. Periphyton bioassessment methods for Montana streams. Montana Department of Health and Environmental Sciences. Montana Department of Health and Environmental Sciences Helena, Montana, USA.
- Barbour MT, J Gerritsen, BD Snyder and JB Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish, second edition. US Environmental Protection Agency. Office of Water, Washington DC.
- Berthon V, A Bouchez and F Rimet. 2011. Using diatom life-forms and ecological guilds to assess organic pollution and trophic level in rivers: a case study of rivers in south-eastern France. *Hydrobiologia* 673:259-271.
- Chang CH, CG Wen, SM Chuang, CS Lee, SP Chang, JL Wu and PW Liu. 2004. Pollution and water quality evaluation for Tseng-Wen Reservoir. pp. 1-9. In *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*. World Water and Environmental Resources Congress, Salt Lake City, UT, USA.
- Coste M, S Boutry, J Tison Rosebery and F Delmas. 2009. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecol. Indic.* 9:621-650.
- Ganasan V and RM Hughes. 1998. Application of an index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the rivers

- Khan and Kshipra (Madhya Pradesh), India. *Freshwat. Biol.* 40:367–383.
- Hwang SJ, NY Kim, DH Won, KK An, JK Lee, CS Kim and JK Shin. 2006. Current status and perspective of biological assessments of water environment in Korea. *J. Korean Soc. Water Environ.* 22:757–767.
- Hill BH, AT Herlihy, PR Kaufman, RJ Stevenson, FH McCormick and CB Johnson. 2000. Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 19:50–67.
- Hill BH, AT Herlihy, PR Kaufmann, SJ DeCelles and MA Vander Borgh. 2003. Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecol. Indic.* 2:325–338.
- Janech MG, A Krell, T Mock, JS Kang and JA Raymond. 2006. Ice-binding proteins from sea ice diatoms (Bacillariophyceae) 1. *J. Phycol.* 42:410–416.
- Jun YC. 2011. Development of Korean benthic macroinvertebrate index of biological integrity based on ecological characteristics. Ph. D. thesis, Konkuk University.
- Jun YC, DH Won, SH Lee, DS Kong and SJ Hwang. 2012. A multimetric benthic macroinvertebrate index for assessment of streams biotic integrity in Korea. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 9:3599–3628.
- Jung SW, SH Park and JH Lee. 2008. Environmental studies in the Lower part of the Han river IIX. Assessment for water quality using epilithic diatom assemblage index to organic water pollution (DAIpo) in dry season. *Korean J. Environ. Biol.* 26:233–239.
- Karr JR. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* 6:21–27.
- Karr JR. 1999. Defining and measuring river health. *Freshwat. Biol.* 41:221–234.
- Kelly MG and BA Whitton. 1995. The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *J. Appl. Phycol.* 7:433–444.
- Kelly MG. 1998. Use of the trophic diatom index to monitor eutrophication in rivers. *Water Res.* 32:236–242.
- Kerans BL and JR Karr. 1994. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecol. Appl.* 4:768–785.
- Kim HN, HK Park, SJ Park and OM Lee. 2012. Biological water quality assessment of Joyang-river located at the upper region of North Han-river using DAIpo and TDI. *Korean J. Limnol.* 45:289–301.
- Kim HK, YS Kwon, YJ Kim and BH Kim. 2015. Distribution of epilithic diatoms in estuaries of the Korean Peninsula in relation to environmental variables. *Water* 7:6702–6718.
- Kim HK, ES Ahn, IH Cho, YH Kim, EA Hwang, YJ Kim, SJ Hwang, JK Lee and BH Kim. 2019. Development and perspectives of diatom indices for the integrated assessment of water quality and aquatic ecosystem of Korean streams. *Korean J. Limnol.* 52:1–8.
- Kim MK. 2016. Study on the development of biological integrity assessment method using benthic diatoms in Korean stream ecosystem. Ph. D thesis. Konkuk University.
- Kim YJ, KA Shin and KM Lee. 2009. Water quality assessed by DAIpo and TDI of Bokha stream and Dal stream in South-Han River. *Korean J. Environ. Biol.* 27:414–424.
- Krammer K and H Lange-Bertalot. 2007. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae, Elsevier Book Company, Berlin, Germany.
- Leira M and S Sabater. 2005. Diatom assemblages distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physio-graphical factors. *Water Res.* 39:73–82.
- Leland HV and SD Porter. 2000. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshw. Biol.* 44:279–301.
- Mac MJ, PA Opler, CE Haecker and PD Doran. 1998. Status and trends of the nation's biological resources. Volume 1. US Geological Survey, Washington DC.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology, *General Systems: Yearbook of the International Society for the Systems Sciences.*
- McCormick PV and RJ Stevenson. 1998. Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the Florida Everglades. *J. Phycol.* 34:726–733.
- McNaughton SJ. 1967. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature* 216:168–169.
- MOE/NIER. 2008–2018. Nationwide aquatic ecological monitoring program. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea.
- MOE/NIER. 2016. A study on the selection and use of reference stream in aquatic ecosystem. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea.
- National assembly of Korea. 2019. Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy. Presidential Decree No. 29514.
- OEPA. 1987. Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol II: The role of biological data in water quality assessment. Ecological Assessment Section, Division of Water Quality Planning and Assessment, Ohio Environmental Protection Agency. Columbus, Ohio.
- Passy SI. 2007. Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters. *Aquat. Bot.* 86:171–178.

- Pielou EC. 1975. Ecological diversity. Wiley, New York.
- Pipp E. 2001. A regional diatom-based trophic state indication system for running water sites in Upper Austria and its over-regional applicability. *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* 27:3376–3380.
- Potapova M and DF Charles. 2003. Distribution of benthic diatoms in US rivers in relation to conductivity and ionic composition. *Freshw. Biol.* 48:1311–1328.
- Potapova M and Charles DF. 2007. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. *Ecol. Indic.* 7:48–70.
- Reid MA, JC Tibby, D Penny and PA Gell. 1995. The use of diatoms to assess past and present water quality. *Aust. J. Ecol.* 20:57–64.
- Shannon CE and W Weaver. 1959. A mathematical theory of communication, University of Illinois Press.
- Schmitt CJ and GM Dethloff. 2000. Biomonitoring of Environmental Status and Trends (BEST) Program: selected methods for monitoring chemical contaminants and their effects in aquatic ecosystems (No. USGS/BRD/ITR-2000-0005). Biological Resources Division, Geological survey, Columbia.
- Schowe KA and JS Harding. 2014. Development of two diatom based indices: a biotic and a multimetric index for assessing mine impacts in New Zealand streams. *N.Z. J. Mar. Freshwat. Res.* 48:163–176.
- Simonsen R. 1979. The diatom system: ideas on phylogeny. *Bacillaria* 2:9–71.
- Tan X, P Ma, SE Bunn and Q Zhang. 2015. Development of a benthic diatom index of biotic integrity (BD-IBI) for ecosystem health assessment of human dominant subtropical rivers, China. *J. Environ. Manage.* 151:286–294.
- Urrea-Clos G and S Sabater. 2012. Identifying reference benthic diatom communities in an agricultural watershed (Guadiana River, SW Spain). *Hydrobiologia* 695:171–184.
- Wang YK, RJ Stevenson and L Metzmeier. 2005. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity for the interior Plateau Ecoregion, USA. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 24:990–1008.
- Watanabe T, K Asai and A Houki. 1986. Numerical estimation of organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage - Diatom Assemblage Index (DAI<sub>po</sub>). *Sci. Total Environ.* 55:209–218.
- Weckström J and A Korhola. 2001. Patterns in the distribution, composition and diversity of diatom assemblages in relation to ecoclimatic factors in Arctic Lapland. *J. Biogeogr.* 28:31–45.
- Wu JT. 1999. A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan. *Hydrobiologia* 397:79–87.
- Xue H, B Zheng, F Meng, Y Wang, L Zhang and P Cheng. 2019. Assessment of aquatic ecosystem health of the Wutong River based on benthic diatoms. *Water* 11:727.
- Zalack JT, NJ Smucker and ML Vis. 2010. Development of a diatom index of biotic integrity for acid mine drainage impacted streams. *Ecol. Indic.* 10:287–295.
- Zelinka M and P Marvan. 1961. Zur prazisierung der biologischen klassifikation des Reinheit fliessender gewasser. *Archiv Für Hydrobiologie.* 57:389–407.