

수질 및 수생태계 평가를 위한 한국형 돌말지수의 개발 필요성

김하경¹ · 안은서² · 조인환¹ · 김영호¹ · 황은아¹ · 김용재³ · 황순진⁴ · 이재관⁵ · 김백호^{1,2,*}

¹한양대 환경과학과, ²한양대 생명과학과 및 자연과학연구소, ³대진대 생명과학과, ⁴건국대 환경과학과, ⁵국립환경과학원

Development Necessity of Diatom Indices for the Integrated Assessment of Water Quality and Aquatic Ecosystem of Korean Streams. *Ha-Kyung Kim*¹ (0000-0001-9279-8715), *Eun-Seo Ahn*² (0000-0001-9381-1651), *In-Hwan Cho*¹ (0000-0002-1945-3478), *Young-Hyo Kim*¹ (0000-0002-4559-440X), *Eun-A Hwang*¹ (0000-0002-7472-8702), *Yong-Jae Kim*³ (0000-0003-3326-8372), *Soon-Jin Hwang*⁴ (0000-0001-7083-5036), *Jae-Kwan Lee*⁵ (0000-0002-1399-8688) and *Baik-Ho Kim*^{1,2,*} (0000-0002-7144-0770) (¹Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea; ²Department of Life Science and Institute for Natural Science, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea; ³Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 11159, Republic of Korea; ⁴Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea; ⁵National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea)

Abstract River water quality and organisms have a very close relationship with the human living environment and health, so it is very important to ensure and maintain the ecological integrity of the aquatic ecosystem. In that sense, benthic diatoms have relatively little mobility, can explain the effects of long-term exposed pollution sources, and are very suitable indicator organisms for river ecosystem evaluation. Diatom ecologists have been developed various diatom indices to assess water quality and stream ecosystem over the world. However, they so far have insufficient identification of taxa, are strongly regional, and are difficult to apply as they are domestically. Unfortunately, there has not been developed an independent diatom index suitable for the Korean stream. Therefore, management of water quality and aquatic ecosystem suitable for domestic rivers can be made, and development or improvement of comprehensive multivariate diatom index for the integrated assessment of water quality and aquatic ecosystem is urgently needed.

Key words: aquatic ecosystem, bio-indicator, diatom indices, stream, water quality

서론

인구가 증가함에 따라 수자원의 수요가 날로 증가하고 있으며 물 사용량 증가에 따른 수질 오염원들 또한 급속도로 증가하고 있다. 또한 산업 생산력의 증가와 기술의 변화

에 따라 중금속과 새로운 유해물질이 환경으로 다량 배출되고 있으며 물질의 성상 역시 매우 다양해지고 있다. 이러한 화학물질에 의한 수질오염은 다양한 생물들의 생활사에 직접 또는 간접적인 과정을 거쳐 최종적으로 수중 생물군집이나 생태계 건강성에 심각한 피해를 미치게 된다(Naiman *et al.*, 1986). 그러나 특정 시간의 이화학적 수질조사만으로 수중 생물이나 생태계의 특성 및 변화를 정확하게 이해하는 것은 매우 어렵다. 따라서 하천의 수질 및 수생태계의 상태에 대한 평가는 해당 국가나 지역의 수자원 상황, 경제 및 산

Manuscript received 6 March 2019, revised 16 March 2019, revision accepted 20 March 2019
* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0960 Fax: +82-2-2220-0960, E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr

업 등의 특성에 따라 평가항목이나 기준들이 다양하며 하천의 환경변화에 따라 평가 기법도 지속적으로 개선하고 있다 (Kim, 2016).

대개 공공수역의 수질환경기준은 수자원 이용 및 인간의 생활환경 및 건강보호를 위해 필요하지만 궁극적으로는 수생태계의 건전성을 확보하고 유지될 수 있도록 설정하여야 한다(US EPA, 2002). 미국 및 유럽 등 많은 국가에서는 이미 오래전부터 건강한 수생태계를 보전하고 훼손된 생태계를 복원하기 위하여 수생 생물을 이용한 생물학적 수생태계 평가의 필요성을 주장하고(Schmitt and Dethloff, 2000), 다양한 생물지수를 개발하여 정기적인 생태계 조사를 실시하고 있다(Karr, 1981; OEPA, 1987; Ganasan *et al.*, 1998).

최근 국내에서도 이화학적 수질을 중심으로 하는 물관리제도 ‘수질보전법’을 수정하여 수질오염으로부터 건전한 수생태계를 유지하고, 물의 이용목적에 적합한 수질을 보전하기 위한 미래지향적이고 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 수환경을 조성하기 위하여 수질 및 수생태계 환경기준이라는 수질관리목표를 설정하고 이를 달성하기 위한 수생태계 건강성에 대한 기초적인 조사와 평가를 하는 이른바 ‘수질 및 수생태계 보전에 관한 법률’을 새롭게 제정하였다(MOE/NIER, 2007). 이와 관련하여 국내 실정에 알맞는 생물학적 평가방법을 개발하고, 전국의 대부분 하천에 대해 수생태계 건강성 조사 및 평가를 10여년 이상 계속해서 수행하고 있으며, 지표생물로는 부착돌말, 저서성 대형무척추동물, 어류, 수생식물 등이며 각 생물군의 특성을 반영하여 개발된 생물지수를 이용하고 있다(MOE/NIER, 2008-2018).

부착돌말을 이용한 하천의 수질평가는 오래 전부터 실시되어 왔으며 세계적으로 다양한 돌말지수가 개발되어 왔다(Table 1). 불행하게도 우리나라는 아직까지 자체적인 돌말지수를 개발한 적이 없다. 국내에서는 1990년대 이전까지는 주로 일본에서 개발된 유기물지표인 DAIPo 지수(Watanabe *et al.*, 1986)를 사용하였으나 그 이후부터는 몇몇 학자들에 의해 영국에서 개발된 영양염지표인 TDI 지수(Kelly and Whitton, 1995)를 사용하였다. 2000년대에 들어와 국내 육수학 및 조류학자들은 두 지수를 혼용하여 사용하여 왔다. 2008년 “수생태계 건강성 조사 및 평가”에서 전국의 하천에 대해 두 지수를 이용하여 건강성을 평가한 결과 부착돌말 성장에 직접적으로 영향을 미치는 영양염(PO₄-P)을 근거로 계산한 TDI 지수를 이용하는 것이 타당하다는 결론에 따라(MOE/NIER, 2008), 2009년 “수생태계 건강성 조사 및 평가”부터 최근까지 부착돌말의 생물지수로 TDI 지수만을 단독으로 사용하고 있다(MOE/NIER, 2009-2018).

오늘날 많은 나라에서 BOD에 근거한 DAIPo 생물지수보다 인산염(PO₄-P)을 기준으로 하는 TDI 지수를 선호하는

편이다. 그러나 두 지수의 평가방법은 근본적으로는 유사하고 조사지역의 수질 및 돌말류 특성에 따라 차이를 보이기 때문에 공통적으로 지역성이라는 한계를 가지고 있다. 국내 환경부에서는 2003년부터 3년 동안 국내 4대강 수계 80개 지점에서 출현한 돌말류를 이용하여 유기물 지수(DAIPo)와 영양염 지수(TDI)를 산출하고 대상 하천들에 대한 수생태계를 평가하였다(MOE/NIER, 2006). 두 지수의 개발에 사용되었던 출현종과 지표종들은 사실상 국내에서 출현한 종과는 상당한 차이를 보였으며, 많은 미동정종을 포함하고 있고, 조사대상 수역의 수질(PO₄-P와 BOD)의 구간 또는 범위가 국내와는 많은 차이를 나타냈다. 뿐만 아니라 국내에서 개발한 TDI 지수 역시 대부분 속 수준에서 오염민감도와 지표가중치를 분석하였으며 95분류군만을 중 수준에서 분석하였다(Kim, 2011). 따라서 이처럼 지역성이 강하고 단순한 수질에만 근거하여 개발된 단순형 돌말지수는 개선될 필요성이 있다고 판단된다. 특히 아직까지 국내에서는 개발된 바 없는 한국형 돌말지수의 개발이 요구되며, 이러한 지수들은 지역성에 상관없이 공통적으로 적용가능한 포괄적이고 광범위적 특성이 반영되어야 할 것이다.

본 연구에서는 세계적으로 하천의 수질 및 수생태계의 평가를 위해 개발되어 왔던 다양한 돌말지수의 특성을 비교, 검토하고, 지역에 상관없이 공통적으로 적용가능하고 특히 국내에 적용가능한 한국형 돌말지수의 개발 필요성 및 방향에 대하여 논의하였다.

수생생물을 이용한 수질 및 생태계 평가

하천은 다양한 물리 화학 생물적 요소들이 형태와 기능을 이루고 있고 서식하는 생물과 환경이 복잡하게 서로 작용하고 있어서 몇가지 이화학적 요소로만 생태계의 특성을 설명하기 어렵다. 하천 또는 주변에서 서식하는 생물들은 생활사의 일부 또는 일생 동안을 수중에서 보내기 때문에 갑작스런 영양물질이나 독성물질의 유입, 수온 증가, 강우에 의한 과다한 토사 유입 등 여러가지 환경스트레스나 수질 변화에 반응하며 각 요소들의 내성범위내에서 생존가능하다. 따라서 지금까지 하천이나 수계의 생물학적 수질 평가는 다양한 조사 지점의 이화학적 수질(예, PO₄-P, BOD)과 출현된 생물의 분포 특성을 근거로 생물지수를 개발하고, 이 개발된 생물지수를 이용하여 특정 지점에서 나타난 생물군의 특성 - 종 출현 및 현존량을 근거로 하여 하천의 생태학적 상태를 진단하고 수질개선 여부를 평가하는데 기초자료로 이용하여 왔다(Hwang *et al.*, 2006).

지금까지 하천의 생태학적 평가에는 다양한 지표 생물 -

어류, 저서성 대형무척추동물, 식생, 부착돌말 등이 사용되어 왔는데, 선정기준은 다음과 같다(Angus, 1990). 1) 누구나 쉽게 분류할 수 있어야 하며, 2) 빠르고 쉽게 정량 채집할 수 있고, 3) 지표성이 있으며, 4) 풍부한 개체생태학 자료가 축적되어 있어야 하며, 5) 장기간 오염에 어느 정도 내성을 가지며, 유전적, 생태적 변이 등이 적어야 한다.

1800년대 중반 유럽을 시작으로 미국 환경부(US EPA) 등 여러 지역에서 그 지역에 맞는 다양한 생물지수들이 개발되어 왔다(Stephens, 1835). 부착돌말 이외에도 어류를 이용한 지수에는 Index of Biological Integrity (IBI) (Karr, 1981), 저서성 대형무척추동물 - RBP(Plafkin, 1989), 식생 - AWQI

(Cooper *et al.*, 1998) 등이 있다. 저서성 대형무척추동물은 다양한 오염에 대한 분별적인 민감성이 높고(Metcalf-Smith, 1996) 대부분의 하천에서 다양한 종이 분포하기 때문에 채집이 용이하며, 이동성이 비교적 적어 수질을 잘 대변하는 등의 장점을 가진다(Won *et al.*, 2006). 어류는 먹이사슬의 최상위 소비자로서 대부분 어류에 대한 생활사가 널리 알려져 있고 스트레스를 잘 반영하고 종의 동정이 비교적 용이하다는 장점으로(Karr, 1981) 유럽과 미국 등에서 생태계 건강성을 평가하는 도구로 보편화되어 있다(Plafkin, 1989; US EPA, 2002).

국내에서는 1970년대부터 국외에서 개발된 생물지수를

Table 1. Chronology of various diatom indices developed over the world

Year	Symbols	References
1979	DES	Descy's Index (Descy, 1979)
1981	GDI	Generic Diatom Index (Bourelly, 1981)
1981	IDG	Indice Diatomique Generique (Bourelly, 1981)
1982	DCI	Diatom Community Index (Watanabe, 1982)
1982	SPI	Specific Pollution sensitivity Index (Cemagref, 1982)
1983	NDCI	New Diatom Community Index (Sumita and Watanabe, 1983)
1986	DAI	Diatom Assemblage Index (Watanabe <i>et al.</i> , 1986)
1986	DAIpo	Diatom Assemblage Index of Organic Water Pollution (Watanabe <i>et al.</i> , 1986)
1986	SI	Saprobic diatom Index (Sládeček, 1986)
1987	LMA	Leclercq and Maquet's Index (Leclercq and Maquet, 1987)
1987	SHE	Steinberg and Schiefele's index (Schiefele, 1987)
1991	CEC	Diatom index by Descy and Coste (Descy and Coste, 1991)
1991	CEE	Indice Diatomique de Descy et Coste (Descy and Coste, 1991)
1994	DI	Diatom Index (Hofmann, 1994)
1995	TDI	Trophic Diatom Index (Kelly and Whitton, 1995)
1996	APDI	Artois-Picardie Diatom Index (Prygiel <i>et al.</i> , 1996)
1996	BDI	Biological Diatom Index (Lenoir and Coste, 1996)
1996	EPI	Eutrophication/Pollution Index (Dell'Uomo, 1996)
1997	ROT	Rott's Saprobic index (Rott <i>et al.</i> , 1997)
1999	IBD	Diatom Biological Index (Prygiel and Coste, 1999)
1999	ROOT	Rott's trophic index (Rott <i>et al.</i> , 1999)
2000	PIBI	Periphyton Index of Biotic Integrity (Hill <i>et al.</i> , 2000)
2001	IDP	Pampean Diatom Index (Gómez and Licursi, 2001)
2002	LOBO	Lobo's index (Lobo <i>et al.</i> , 2002)
2004	CEN/TC230/WG2/G T3	The European Committee for Standardization (CEN) (Working Group 2-Biological and Ecological Assessment Methods)
2004	DMA	Diatom Model Affinity (Passy and Bode, 2004)
2005	IBI	Index of Biotic Integrity (Wang <i>et al.</i> , 2005)
2006	IDEC	The Eastern Canadian Diatom Index (Lavoie <i>et al.</i> , 2006)
2009	BDI-2006	Biological Diatom Index (Coste <i>et al.</i> , 2009)
2010	IDEC ver 2.0	Eastern Canadian Diatom Index (Lavoie <i>et al.</i> , 2010)
2010	MDIAT	Diatom multimetric index (Delgado <i>et al.</i> , 2010)
2010	AMD-DIBI	Acid mine drainage-diatom index of biotic integrity (Zalack <i>et al.</i> , 2010)
2012	D-IBI	Diatom-based index of biotic integrity (Wu <i>et al.</i> , 2012)
2013	DDI	Duero Diatom Index (Álvarez-Blanco <i>et al.</i> , 2013)
2014	DMPS	Diatom Mine Pollution Score (Schowe and Harding, 2014)
2015	TWQI	Trophic Water Quality Index (Lobo <i>et al.</i> , 2015)
2015	BD-IBI	Benthic Diatom Index of Biotic Integrity (Tan <i>et al.</i> , 2015)
2016	BD-IBI	Benthic Diatom Index of Biological Integrity (Kim, 2016)

적용하였으나 1990년초부터 국내 조건에 적합하게 오수생물지수(Yoon-Kong's SI)와 종합생물점수(Total biotic score, TBS) (Yoon *et al.*, 1992a), 그룹오염지수(Group Pollution Index, GPI) (Yoon *et al.*, 1992b), 저서성 대형무척추동물 생태점수(ESB) (Kong, 1997), 우점생물지수(Dominant Species Index, DSI) (Yoo *et al.*, 2005), 한국오수생물지수(Korean Saprobic Index, KSI) (Won *et al.*, 2006) 등이 개발되었다. 불행하게도 돌말지수는 아직까지 국내에서 자체 개발된 바가 없으며, 현재는 외국에서 개발된 돌말지수를 그대로 이용하거나 약간 수정하여 이용하고 있는 실정이다.

부착돌말류를 이용한 지수 개발

돌말류는 지구 총탄소고정량의 약 20%를 차지하며 수생태계 에너지 순환의 근간을 이루는 매우 중요한 독립영양체이다(Cox, 1996). 개체의 크기가 매우 다양하고, 단세포 또는 군체를 이루며, 부유하거나 기질에 부착하며, 극한 경우 얼음이나 눈 표면에서도 생장이 가능하다(Janech *et al.*, 2006). 또한 이처럼 다양한 서식처를 가질 뿐 아니라 화학물질에 대한 내성의 범위가 다양하다(Leira and Sabater, 2005; Watanabe, 2005). 비록 세포 크기가 작을 경우 동정하는데 상당한 시간과 해상도 높은 현미경을 요구하지만, 하천의 교란이 일어난 뒤에도 유입되거나 군체화 속도가 매우 빠르고 수온, 영양염, 유속 및 유량 등 환경요인 변화에 대해 생물량 변화가 뚜렷하다(Allen, 1995). 특히 하천의 바닥 기질에 부착하여 서식하는 이른바 저서성 부착돌말류는 강한 유속에도 이동성이 낮아 특정 지점의 누적된 오염정도를 파악하기 용이하며, 상위 생물군집의 변화를 예측할 수 있다는 장점이 있다(McCormick and Stevenson, 1998).

오래 전부터 이러한 장점을 이용하여 부착돌말에 의한 수질평가가 이루어져 왔으며, 최근 30여년 전부터는 유럽, 북미, 뉴질랜드, 일본 등을 중심으로 인간에 의한 간섭이나 교란 등의 영향을 모니터링하거나 생태계 진단도구로서 이용되고 있다(Prygiel *et al.*, 1999). 초기에 부착돌말류만을 이용해서 개발한 지수는 물론 다른 조류들이 포함된 Periphyton 군집이나 하천 수질의 오염지수(Saprobic index), 부영양화 지수(Eutrophication index), 유기오염 지수(Pollution index) 등 다양한 지수들이 개발되었다(Table 1). NDCI(Sumita and Watanabe, 1983), BDI-2006(Coste *et al.*, 2009), IDEC 2.0(Lavoie *et al.*, 2010) 등은 기존의 돌말지수의 계산식을 변경하기 보다는 지수 개발에 사용하였던 돌말 분류군들의 정의를 개정하며 보완하는 경향을 보였다. BDI-2006의 경우 기존의 BDI가 2003년에 사용되었을 때

특정 환경에서 수질을 측정하는데 정확성이 떨어지는 것을 발견하여 기존의 지수를 보완하여 개발되었다. 기존의 BDI(Lenoir and Coste, 1996)는 209개의 핵심종(key species) 중에서 호산성 생물(acido-biotic)이나 기수(brackish) 종들의 자료가 충분하지 않았고 그룹 분류 과정에서 형태학적으로 비슷하나 다른 생태학적 선호도를 가진 종들이 같은 그룹으로 분류되어 수질 측정을 할 때 이러한 그룹이 우세한 경우 문제가 발생하게 되었다. 따라서 BDI-2006은 기존의 BDI와 다르게 생태 지역의 모든 돌말 분류군을 고려하였으며 기존의 7가지 항목의 수질 기준들을 향상시키고 핵심종(key species)의 숫자도 증가시켰다(Coste *et al.*, 2009).

지금까지 개발되어온 돌말지수들은 영양염, 유기물 등과 같은 단일 환경요인 간의 상호 관련성을 근거로 종의 발생 빈도와 각 분류군의 오염민감도 값에 대한 지표값을 이용하여 개발되었다(Table 1). 조사된 지역에서 나타나는 종의 최적조건과 내성을 고려하여 Zelinka-Marvan (1961)의 식을 수정하여 적용하며 근본적인 지수의 형태와 계산의 방식은 거의 동일하다(Coste *et al.*, 2009). 그러나 최근에는 이러한 단일 환경요인을 이용하여 지수를 개발한 경우 영양염에 대한 반응 이외의 여러 무생물학적 구성요소들에 대한 생물의 다양한 반응을 반영하지 못한다는 한계가 있어 물리 화학적 환경변수 등 다양한 지표를 이용한 다중계량지수(Multimetric index) 평가방법의 필요성이 강조되고 있다(Hill *et al.*, 2003). 이러한 추세는 다른 생물군 - 어류(Karr, 1981), 저서성 대형무척추동물(Kerans and Karr, 1994)에서도 분명하다. 돌말을 이용한 다중계량지수는 최근에 들어 많은 연구자들에 의해 진행되고 있다(Wang *et al.*, 2005; Zalack *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2012; Schowe and Harding, 2014; Tan *et al.*, 2015). 지역적으로 특성화되어 만들어진 지수들은 유럽 - CEC (Descy and Coste, 1991), 캐나다 - IDEC (Lavoie *et al.*, 2006), 스페인 - DDI (Álvarez-Blanco *et al.*, 2013), 브라질 - TWQI (Lobo *et al.*, 2015) 등 다양하다. 국내에서는 비록 돌말지수가 개발된 적은 없지만, Kim(2016)이 최초로 선행 연구들(Wang *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2015)과 유사한 방법으로 다중계량지수를 개발하였으나 아직까지 현장에 적용된 사례는 보고된 바 없다.

국내 돌말지수의 현황

앞에서 언급한 바와 같이 국내에서는 하천 수생태계의 생물학적 평가를 위한 돌말지수를 개발한 사례가 없으며, 주로 일본에서 개발된 DAIPo, 영국에서 개발된 TDI와 같은 지수들을 다양한 하천에 적용하여 왔다(Hwang *et al.*, 2006;

Kim and Lee 2009; Kim and Lee, 2010; Kim *et al.*, 2010; Oh *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2017). 국내에 처음 이용된 돌말지수는 BOD 구배에 따라 개발된 DAIPo 지수(Watanabe *et al.*, 1986)를 이용하였는데 하천 유지용수가 적고 유기물 함량이 높은 국내 하천 실정에 적합하다고 보고하였다(Jung and Lee, 1990). 그러나 DAIPo는 돌말류와 유기물(BOD)의 상관성이 높을 뿐 돌말류 성장에 직접적인 영향을 주는 영양염으로 보기 어렵다는 단점이 있다(Kim, 2011). 반면 영양염(PO₄-P)을 기준으로 개발된 TDI가 영양염의 영향을 많이 받는 국내 하천에 더 타당하다고 보아 ‘하천 수생태계 건강성 조사’에서 사용하고 있다(MOE/NIER, 2008). 하지만 돌말류가 세계적으로 광범위한 지역에 분포하고 이들 성장에 대한 환경의 최적조건과 내성 범위는 기후나 유역환경 조건 등에 따라 다르게 나타날 수 있으며(Goma *et al.*, 2004; Lobo *et al.*, 2004) 일부 중은 특정한 지리학적 장소, 수체, 혹은 미소서식처에서만 나타나는 등 출현종의 지역성이 매우 강하다(Kociolek and Spaulding, 2000). 특히 돌말류와 같이 생활사가 빠른 1차 생산자는 기본적인 생리, 생태학적 특성을 감안한다면 종에 따른 분포의 공간적 변이 가능성이 매우 커질 수 있다. 결국 특정지역에서 개발된 생물지수를 그대로 다른 지역에 적용하게 되면 지역적으로 다른 환경과 수질에 대한 생물들의 차이와 적응의 결과로 부정확한 결과를 나타낼 수 있다(Philibert and Prairie, 1999, Taylor *et al.*, 2007). 이러한 문제점을 보완하기 위해 TDI를 국내 하천의 수질 환경과 돌말 조사를 통해 국내에 맞는 오염민감도와 지표가중치 및 지표종을 개선한 바 있으나(Kim, 2011), 국내수계에서 출현한 모든 돌말류에 대해 부여되지 않았으며, 동정이 아직 되지 않은 분류군이 많이 포함되어 있어, 기존 지수들과 크게 다르지 않았다.

일반적으로 돌말류의 분포는 수계의 영양물질, 기후와 수문학적 체계(Weckström and Korhola, 2001), 지형학적인 특징 및 토지이용도(Leland and Porter, 2000; Kim *et al.*, 2015), 이온의 강도 및 전도도(Potapova and Charles, 2003), 초식성 생물(Anderson *et al.*, 1999) 등 다양한 요인들의 영향을 받는다. 따라서 영양염에 대한 반응 외에도 다른 요인들과 관련된 보다 포괄적인 생물학적 반응을 파악하기 위해서는 다양한 환경적 측면을 고려하는 다항목 지수를 이용할 필요가 있다. 국내에서도 하천의 생물학적 온전성 평가방법으로서 돌말류를 이용한 Tan *et al.* (2015)과 Wang *et al.* (2005) 등의 이론을 근거로 국내 참조하천(Reference stream)을 기준으로 하는 BD-IBI(Benthic Diatom Index of Biological Integrity)를 개발한 바 있다(Kim, 2016). 다양한 측면에서 매트릭의 적합성과 지수의 변별력의 타당성을 입

증했으나 대표성이 높은 충분한 참조하천이 선정되지 않았고, 아직까지 현장에 적용한 사례는 보고된 바 없다. 따라서 국내 하천의 여건을 고려하여 충분한 조사, 대표성이 높은 지표종 선정, 돌말류 분포에 영향을 미치는 환경요인 등 우리나라 지역성이 반영되고 종합성이 높은 다중계량지수와 같은 생물지수가 개발되어야 할 것이다.

결 론

하천의 수질 및 생물은 인간의 생활환경 및 건강보호와 매우 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 수생태계의 건전성 확보 및 유지는 매우 중요하다. 그런 의미에서 부착돌말류는 비교적 이동성이 거의 없고 장기간 노출된 오염원의 영향을 파악할 수 있어 하천생태계 평가에 매우 적합한 지표생물이다. 그러나 지금까지 개발되었던 많은 돌말지수는 분류군의 동정이 미흡하고, 지역성이 강해서 국내에 그대로 적용하기에 어려움이 많다. 세계적으로 다양한 돌말지수가 개발되어 왔으나 국내에서는 아직까지 독자적으로 국내 환경에 적합한 돌말지수는 개발되지 않았다. 따라서 국내 하천에 적합한 수질 및 수생태계 관리 및 수생태계의 통합적인 평가를 위한 포괄적인 다항목 또는 다중계량지수 등의 개발 또는 개선이 절실히 필요하다.

저자기여도 개념설정: 김백호, 황순진, 자료수집: 안은서, 조인환, 김하경, 김영효, 황은아, 자료관리: 황순진, 김용재, 이재관, 원고 초안작성: 김백호, 안은서, 김하경, 최종 원고 검토: 김백호, 김하경, 안은서, 조인환, 김영효, 황은아, 김용재, 황순진, 이재관, 과제관리: 황순진, 이재관

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

사사 본 연구는 환경부/국립환경과학원의 하천 수생태 건강성 조사 및 평가 사업에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- Álvarez-Blanco, I., S. Blanco, C. Cejudo-Figueiras and E. Bécares. 2013. The Duero Diatom Index (DDI) for river water quality assessment in NW Spain: design and validation. *Environmental Monitoring and Assessment* **185**(1): 969-981.
- Allen, J.D. 1995. Structure and function of running waters. Stream ecology. Chapman and Hall, London.
- Anderson, E.L., E.B. Welch, J.M. Jacoby, G.M. Schimek and R.R.

- Horner. 1999. Periphyton removal related to phosphorus and grazer biomass level. *Freshwater Biology* **41**(3): 633-651.
- Angus, T. 1990. Criteria for Choosing Indicator Species for Ecological Risk Assessments at Superfund Sites (90-6402). Final report. North Carolina University, Chapel Hill, NC (United States).
- Bourelly, P. 1981. Les algues d'eau douce. Initialtion a la systematique. Tome II. Les Algues Jaunes et Brunes. Chrysophycees, Pheophycees, Xanthrophycees et Diatomees. Boubee & Cie, Paris. 518pp.
- Cemagref. 1982. Etude des méthodes biologiques quantitatives d'appréciation de la qualité des eaux. Rapport Division Qualité des Eaux Lyon-Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Pierre-Benite. 28pp.
- 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.
- Cooper, J., R. Rediske, M. Northup, M. Thogerson and J. van Denend. 1998. Agricultural water quality index. Scientific Technical Reports. p. 75.
- 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). *Ecological Indicators* **9**(4): 621-650.
- Cox, E.J. 1996. Identification of Freshwater Diatoms from Live Material. Chapman & Hall, London, 158 pp.
- Delgado, C., I. Pardo and L. Garcia. 2010. A multimetric diatom index to assess the ecological status of coastal Galician rivers (NW Spain). *Hydrobiologia* **644**(1): 371-384.
- Dell'Uomo, A. 1996. Assessment of water quality of an apennine river as a pilot study. In: Whitton B. A. and Rott E. (eds.) Use of algae for monitoring rivers II. E Rott, Institut für Botanik, Universitat Innsbruck: 17-25.
- Descy, J.P. 1979. A new approach to water quality estimation using diatoms. *Nova Hedwingia, Beiheft* **64**: 305-323.
- Descy, J.P. and M. Coste. 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* **24**(4): 2112-2116.
- Ganasan, V. and R.M. Hughes. 1998. Application of an index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the rivers Klan and Kshipra (Madhya Pradesh), INdia, *Freshwater Biology* **40**: 367-383.
- Goma, J., R. Ortiz, J. Cabra and L. Ector. 2004. Water quality evaluation in Catalonian Mediterranean rivers using epilithic diatoms as bioindicators. *Vie et Milieu-Life and Environment* **45**: 81-90.
- Gómez, N. and M. Licursi. 2001. The Pampean Diatom Index (IDP) for assessment of rivers and streams in Argentina. *Aquatic Ecology* **35**(2): 173-181.
- Hill, B.H., A.T. Herlihy, P.R. Kaufmann, R.J. Stevenson, F.H. McCormick and C.B. Johnson. 2000. Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *Journal of the North American Benthological Society* **19**(1): 50-67.
- Hill, B.H., A.T. Herlihy, P.R. Kaufmann, S.J. DeCelles and M.A. Vander Borgh. 2003. Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecological Indicators* **2**: 325-338.
- Hofmann, G. 1994. Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. *Bibliotheca Diatomologica*. **30**: 1-241.
- Hwang, S.J., N.Y. Kim, D.H. Won, K.K. An, J.K. Lee, C.S. Kim and J.K. Shin. 2006. Special Issue : Review ; Current Status and Perspective of Biological Assessments of Water Environment in Korea. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**(5): 757-767.
- Janech, M.G., A. Krell, T. Mock, J.S. Kang and J.A. Raymond. 2006. Ice-binding proteins from sea ice diatoms (bacillariophyceae). *Journal of Phycology* **42**(2): 410-416.
- Jung, M.H., H.J. Cho, J.H. Yun and H.Y. Lee. 2014. Epilithic Diatom Communities in Streams of Jeju Island. *Korean Journal of Environment Biology* **32**(1): 16-25.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of Biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**(6): 21-27.
- 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**(4): 433-444.
- Kerans, B.L. and J.R. Karr. 1994. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee valley. *Ecological Applications* **4**: 768-785.
- Kim, B.H., Y.S. Park and Y.J. Kim. 2010. Periphytic Diatom Communities and Water Environment in the Donghwa Constructed Wetlands. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 91-102.
- Kim, H.K., Y.S. Kwon, Y.J. Kim and B.H. Kim. 2015. Distribution of Epilithic Diatoms in Estuaries of the Korean Peninsula in Relation to Environmental Variables. *Water* **7**(12): 6702-6718.
- Kim, H.N., H.K. Park, S.J. Park and O.M. Lee. 2012. Biological Water Quality Assessment of Joyang-river Located at the Upper Region of North Han-river Using DAIPo and TDI. *Korean Journal of Limnology* **45**(3): 289-301.
- Kim, M.K. 2016. Study on the development of biological integrity assessment method using benthic diatoms in Korean stream ecosystem. Ph.D thesis Konkuk University.
- Kim, N.Y. 2011. Study on the improvement of biological water quality assessment method using the distribution of benthic diatoms in Korean streams. Ph.D thesis Konkuk University.
- Kim, Y.J. and O.M. Lee. 2009. Assessment of Water Quality in the Sum-river and the Dal-stream using Epilithic Diatom-based Indices. *Journal of Korean Society on Water Environment* **25**(4): 606-614.
- 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. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 117-128.
- Kociolek, J.P. and S.A. Spaulding. 2000. Freshwater diatom biogeography. *Nova Hedwigia* **71**: 223-241.
- Kong, D.S. 1997. Benthic Macroinvertebrate Fauna of Yesan, Seosan, Hongseong and Mountain Kayasan, Natural Environment of Yesan, Seosan, Hongseong (6-11, 12), 155-204.
- Lavoie, I., M. Grenier, S. Campeau and P.J. Dillon. 2010. The Eastern Canadian Diatom Index (IDEC) version 2.0: including meaningful ecological classes and an expanded coverage area that encompasses additional geological characteristics. *Water Quality Research Journal* **45**(4): 463-477.
- Lavoie, I., S. Campeau, M. Grenier and P.J. Dillon. 2006. A diatom-based index for the biological assessment of eastern Canadian rivers: an application of correspondence analysis (CA). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **63**(8): 1793-1811.
- Leclercq, L. and B. Maquet. 1987. Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante: application au Samson et à ses affluents (Bassin de la Meuse Belge), comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénologiques et diatomiques. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique.
- Lee, S.J. and K.C. Chung. 1990. Seasonal variation of water qualities in the upper and middle reaches of the Han River (1998.8~1989.9). *Korean Journal of Preventive Medicine* **23**(1): 106-116.
- Leira, M. and S. Sabater. 2005. Diatom assemblages distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors. *Water Research* **39**: 73-82.
- Leland, H.V. and S.D. Porter. 2000. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology* **44**(2): 279-301.
- Lenoir, A. and M. Coste. 1996. Development of a practical diatom index of overall water quality applicable to the French National Water Boqrd network. In: Whitton B. A. and Rott E. (eds.) Use of algae for monitoring rivers II. E Rott, Institut für Botanik, Universität Innsbruck: 29-45.
- Lobo, E.A., V.L.M. Callegaro and P. Bender. 2002. Utilização de algas diatomáceas epilíticas como indicadoras da qualidade da água em rios e arroios da Região Hidrográfica do Guáíba, EDUNISC, RS, Santa Cruz do Sul, Brasil.
- Lobo, E.A., M. Schuch, C.G. Heinrich, A.B. Da Costa, A. Düpont, C.E. Wetzel and L. Ector. 2015. Development of the Tropic Water Quality Index (TWQI) for subtropical temperate Brazilian lotic systems. *Environ Monitoring and Assessment* **187**(56): 354.
- Lobo, E.A., V.L.M. Callegaro, G. Hermany, N. Gomez and L. Ector. 2004. Review of the use of microalgae in South America for monitoring rivers, with special reference to diatoms. *Vie et milieu-Life and Environment* **54**: 105-114.
- McCormick, P.V. and R.J. Stevenson. 1998. Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the Florida Everglades. *Journal of Phycology* **34**(5): 726-733.
- Metcalf-Smith, J.L. 1996. Biological water quality assessment of rivers: use of macroinvertebrate communities. pp. 17-43 in Petts, G. and P. Calow (eds), *Rivers Restoration*, Blackwell Science, p. 231.
- MOE/NIER. 2006. Researches for integrative assessment methodology of aquatic environments (III): Development of aquatic ecosystem health assessment and evaluation system. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea (in Korean)
- MOE/NIER. 2007. Detailed survey on the selection of survey areas for the construction of an ecosystem health survey and evaluation system The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea (in Korean)
- MOE/NIER. 2007~2018. Nationwide Aquatic Ecological Monitoring Program. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea (in Korean)
- Naiman, R.J., J.M. Melillo and J.H. Hobbie. 1986. Ecosystem alternation of boreal forest streams by beaver (*Castor canadensis*). *Ecology* **67**: 1254-1269.
- Oh, M.W., O.M. Lee, H.B. Song, S.J. Park, M.Y. Song and D.S. Kong. 2011. Comparative Analysis on the Application of Biotic Indices for Environmental Assessment of a Polluted Stream (Jinwi Stream). *Journal of Korean Society on Water Environment* **27**(6): 760-768.
- Ohio Environmental Protection Agency (OEPA). 1987. Biological Criteria for the Protection of Aquatic Life: Volume II. Users Manual for Biological Field Assessment of Ohio Surface Waters. Division of Water quality Monitoring and Assessment, Surface Water Section. Columbus, OH. 257pp.
- Park, Y.J., H.S. Kim, Y.J. Ban and H.S. Lee. 2017. Dynamics of Epilithic Diatom Communities and Biological Water Quality Assessment in Geum River and Downstream Yongdam. *Journal of the Korea Society for Environmental Analysis* **20**(3): 138-144.
- Passy, S.I. and R.W. Bode. 2004. Diatom model affinity (DMA), a new index for water quality assessment. *Hydrobiologia* **524**(1): 241-251.
- Philibert, A. and Y.T. Prairie. 1999. Diatom inferred paleolimnological reconstructions: do they work in nutrient rich lakes. In Proceedings of the 1999 Sustainable Forest Management Network Conference. Edmonton, Alberta, Canada. pp. 155-160.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, S.K. Gross and R.M. Hughes. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrates and fish. EPA. Washington, D.C
- Potapova, M. and D.F. Charles. 2003. Distribution of benthic diatoms in US rivers in relation to conductivity and ionic

- composition. *Freshwater Biology* **48**(8): 1311-1328.
- Prygiel, J., L. Leveque and R. Iserentant. 1996. Un nouvel indice diatomique pratique pour l'évaluation de la qualité des eaux en réseau de surveillance. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science* **9**(1): 97-113.
- Prygiel, J. and M. Coste. 1999. Progress in the use of diatoms for monitoring rivers in France. In Prygiel, J., B. A. Whitton & J. Bukowska (eds), *Use of Algae for Monitoring Rivers III*. Agence de l'Eau Artois-Picardie, Douai: 39-56.
- Prygiel, J., M. Coste and J. Bukowska. 1999. Review of the major diatom-based techniques for the quality assessment of rivers. State of the art in Europe. pp. 122-127. In: *Use of algae for monitoring rivers III*, Prygiel, J., B.A. Whitton and J. Bukowska (eds).
- Rott, E., E. Pipp, P. Pfister, H. van Dam, K. Ortler, N. Binder and K. Pall. 1999. Indikationslisten für Aufwuchsalgen in österreichischen Fließgewässern Teil 2: Trophieindikation. Bundesministerium fuer Land und Forstwirtschaft, Wien: 248.
- Rott, E., P.G. Hofmann, K. Pall, P. Pfister and E. Pipp. 1997. Indikationslisten für Aufwuchsalgen in österreichischen Fließgewässern, Teil 1: Saprobienindikation. Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaftskataster, Wien, Austria.
- Schiefele, S. 1987. Indikationswert benthischer Diatomeen in der Isar zwischen Mittenwald und Landshut. - Diploma thesis, Inst. f. Syst. Bot., Universität München.
- Schmitt, C.J. and G.M. Dethloff. 2000. Biomonitoring of environmental status and trends (BEST) program; selected methods for monitoring chemical contaminants and their effects in aquatic ecosystems. U.S Geological Survey, Biological Resources Division, Information and Technology Report, USGS/BRD/ITR-2000-0005
- Schowe, K.A. and J.S. Harding. 2014. Development of two diatom-based indices: a biotic and a multimetric index for assessing mine impacts in New Zealand streams. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **48**(2): 163-176.
- Sládeček, V. 1986. Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* **14**(5): 555-566.
- Stephens, J.F. 1835. Illustrations of British entomology Vol. v. 9 (Mandibulata v. 5) Baldwin & Cradock, London.
- Sumita, M. and T. Watanabe. 1983. New General Estimation of River Pollution Using New Diatom Community Index (NDCI) as Biological Indicators Based on Specific Composition of Epilithic Diatoms Communities. *Japanese Journal of Limnology* **44**(4): 329-340.
- Tan, X., P. Ma, S.E. 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. *Journal of Environmental Management* **151**: 286-294.
- Taylor, J.C., J. Prygiel, A. Vosloo, A. Pieter and L. van Rensburg. 2007. Can diatom-based pollution indices be used for bio-monitoring in South Africa? A case study of the Crocodile West and Marico water management area. *Hydrobiologia* **592**(1): 455-464.
- USEPA. 2002. Biological Assessments and Criteria. EPA 822-F-02-006
- Wang, Y.K., R.J. Stevenson and L. Metzmeier. 2005. Development and evaluation of a diatom-based Index of Biotic Integrity for the Interior Plateau Ecoregion, USA. *Journal of the North American Benthological Society* **24**(4): 990-1008.
- Watanabe, T. 1982. Numerical assessment of river pollution based on the water quality chart. *Research report on Environmental Science*, B121-R-12-10. 92-95 (in Japanese)
- Watanabe, T., K. Asai and A. Houki. 1986. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage-diatom assemblage index (DAIpo). *Science of the Total Environment* **55**: 209-218.
- Watanabe, T. 2005. Picture book and ecology of the freshwater diatoms. Uchida Rokakuho Publishing Co. Tokyo, Japan.
- Weckström, J. and A. Korhola. 2001. Patterns in the distribution, composition and diversity of diatom assemblages in relation to ecoclimatic factors in Arctic Lapland. *Journal of Biogeography* **28**(1): 31-45.
- Won, D.H., Y.C. Jun, S.J. Kwon, S.J. Hwang, K.G. Ahn and J.K. Lee. 2006. Development of Konan Saprobic Index using Benthic Macroinvertebrates and Its Application to Biological Stream Environment Assessment. *Journal of Korean Society on Water Environment* **22**(5): 768-783.
- Yoo, D.H., J.O. Jin, H.H. Mo, Y.J. Bae and K.J. Cho. 2005. Comparing Acute and Swimming Endpoints to Evaluate the Response of Two Freshwater Midge Species, *Chironomus yoshimatsui* and *Chironomus riparius* to Heavy Metals. *Korean Journal of Environment Biology* **23**(2): 98-105.
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu. 1992a. Studies on the Biological Evaluation of Water Quality by Benthic Macroinvertebrates (1) - Saprobic Valency and Indicative Value -. *Korean Journal of Environmental Biology* **10**(1): 24-39.
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu. 1992b. Studies on the Biological Evaluation of Water Quality by Benthic Macroinvertebrates (3) - Macroscopic simple water quality evaluation -. *Korean Journal of Environmental Biology* **10**(2): 77-84.
- Wu, N., Q. Cai and N. Fohrer. 2012. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity (D-IBI) for rivers impacted by run-of-river dams. *Ecological Indicators* **18**: 108-117.
- Zalack, J.T., N.J. Smucker and M.L. Vis. 2010. Development of a diatom index of biotic integrity for acid mine drainage impacted streams. *Ecological Indicators* **10**(2): 287-295.
- Zelinka, M. and P. Marvan. 1961. Zur prazisierung der biologischen klassifikation des Reinheit fließender gewasser. *Archiv Fur Hydrobiologie* **57**: 389-407.