

## 부착돌말류를 이용한 생물학적 수질평가지표 개발

노성유 · 변명섭<sup>†</sup> · 김미아 · 이재관<sup>\*</sup>

국립환경과학원 물환경연구부  
<sup>\*</sup>국립환경과학원 낙동강물환경연구소

### Development of Biological Criteria for Water Quality Assessment using Benthic Diatoms

Seongyou Noh · Myeongseop Byeon<sup>†</sup> · Miah Kim · Jaekwan Lee<sup>\*</sup>

Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research  
<sup>\*</sup>Nakdong River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research  
(Received 7 July 2009, Revised 16 September 2009, Accepted 17 September 2009)

#### Abstract

The present study was carried out to develop biological criteria for water quality assessment using benthic diatoms. Selecting of the indicator diatoms, three parameters were considered: broad distribution (180 taxa occurred over 3% at upper level), species abundance (158 taxa occurred over  $1.5 \times 10^5$  cells/cm<sup>2</sup>), and sensitivity (184 taxa occurred more than once as 1st and 2nd dominant species). Overall, total 208 taxa were selected, including 38 varieties, 170 species, 34 genera, 9 families, 3 orders, and 1 phylum. The most dominant taxonomic group (family) was Naviculaceae (52%), followed by Diatomaceae (15%), Nitzschiaceae (12%) and Achnantaceae (11%). COD and TP were proposed as new water quality standards (draft) to improve the existing BOD standard and to manage and control efficiently non-biodegradable organic pollutants. With this regard, we used TP standard (draft) in developing biological water quality criteria for diatoms. TP standards (draft) proposed as Ia = 0.02 mg/L or less, Ib = 0.05 mg/L or less, II = 0.1 mg/L or less, III = 0.2 mg/L or less, IV = 0.4 mg/L or less, V = 0.6 mg/L or less and VI = above 0.6 mg/L. Biological assessment system (4 class system) was developed and proposed for diatom using modified Tropic Diatom Index (TDI). Biological assessment of TDI appear B grade (Good).

**keywords** : Benthic diatom community, TP water quality standard, Trophic diatom index (TDI), Water quality assessment

## 1. 서론

미국, 유럽연합 등과 같은 선진국의 경우는 수자원의 생태적 온전성(ecological integrity) 회복을 위해 물관리 달성 목표를 설정하고 1990년 초반부터 수질에 대한 생물학적 평가체계를 도입하여 시행하고 있다. 특히 미국에서는 1981년부터 다변수 모델을 개발하여 수생태계 보전과 관리에 체계적으로 활용하고 있으며, EU도 물관리지침을 수립하여 2015년까지 하천의 수생태 건강성 회복을 위한 물관리 정책을 시행 중이다.

우리나라에서는 환경부에서 2006년에 ‘물환경관리기본계획(2006~2015)’을 수립하여 ‘물고기가 뛰놀고 아이들이 떠갈 수 있는 생태적으로 건강하고 유해물질로부터 안전한 물환경조성’을 장기계획의 목표로 설정하여 추진 중이다. 이를 뒷받침하기 위하여 환경부는 기존의 ‘수질환경보전법’을 ‘수질 및 수생태계보전을 위한 법률’(2007. 4)로 개정하여 제도적 기반을 마련하였다. 이 법을 바탕으로 환경부에

서는 수질측정망의 중권역 대표지점을 포함하여 전국의 하천('07년 540지점, '08년 640지점)을 대상으로 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류, 서식 및 수변환경 등에 대한 분포 및 서식현황을 포함하는 수생태계 건강성 조사를 수행하였다. 최근 생물학적 시스템을 이용한 평가방법이 연구되면서 부착돌말류의 경우 유기물지수(DAIpo)와 영양염지수(TDI)를 이용한 생물학적 수질평가지표에 대한 연구가 진행되고 있다(김용진과 이옥민, 2009; 환경부·국립환경과학원, 2004, 2006). 선행 연구에서 이화학적 수질과 생물학적 수질 간의 관계를 비교해 볼 때, 우리나라 하천에서는 BOD 및 유기물을 반영하는 유기물지수의 변이 보다는 영양염지수의 변이 차이가 적게 나타났다. 이와 같은 결과는 우리나라의 많은 하천에서는 잠재적으로 BOD 및 유기물 보다는 영양염에 의한 영향이 더 크게 작용한다고 판단된다(환경부·국립환경과학원, 2006). 그러나 아직 우리나라에서 부착조류를 이용한 생물학적 평가 방법 연구는 유기물지수를 이용한 연구가 주를 이루고 있으며(김용재, 2001; 박정원 등, 2004; 이정호, 1998; 이호원 등, 2002; 정승원 등, 2008), 영양염지수에 관한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다(김용진과 이옥민, 2009; 환경부·국립환경과학

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
zacco@korea.kr

원, 2004, 2006).

따라서 본 연구에서는 수생태계 건강성 조사사업에서 생산된 결과 중 부착돌말류를 대상으로 영양염류에 따른 분포, 민감성 등을 분석하고, 국내 실정에 맞는 생물학적 수질평가지표를 개발하기 위하여 하천의 총인 환경기준을 설정코자 하였다. 또한 이 환경기준에 따라 각 수계별 생물군이 가지는 특성을 반영하여 지표생물종의 매개변수를 국산화하고자 하며, 이를 기반으로 국내 수계에 서식하는 생물군을 이용한 수생태계의 건강성 평가지표(영양염지수)를 제시하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 조사지점, 시기 및 항목

‘수질측정망 운영계획’(환경부, 2008)에 의거하여 Table 1과 같이 2007년에는 총 540 지점으로, 한강 320 지점, 낙동강 60 지점, 금강 40 지점, 영산·섬진강 120 지점을 선정하였으며, 2008년에는 총 640 지점으로, 한강 320 지점, 낙동강 100 지점, 금강 100 지점, 영산·섬진강 120 지점을 대상으로 수행하였다. 조사 항목은 부착돌말류의 성장에 직접적인 영향을 미치는 요소인 TP(Total phosphorus; Jeffries and Mills, 1995)를 선정하여 조사하였다.

### 2.2. 지표생물종 선정

지표생물종 선정 기준은 전국적인 분포특성을 갖는 생물종을 선정하기 위하여 광역 분포성(출현빈도), 종풍부도를 고려하기 위하여 출현 개체수(밀도)를, 각 물환경에 따른 민감성을 고려하기 위해 우점종 및 아우점종을 선별하였고, 광역 분포성, 종풍부도 및 민감성의 기준에 따라 선별된 종을 합하여 최종 지표생물종으로 선정하였다.

### 2.3. 하천의 TP 환경기준 설정방법

하천의 TP 환경기준 마련을 위하여 4대강의 중권역 대표 지점(114개)을 중심으로 10년('98~'07)간 수질측정망의 연평균 자료를 이용하였으며, 자료 탐색 및 통계분석을 통해 COD, TP 환경기준을 마련하였고 검증 및 확정을 거쳐 최종 COD, TP 기준을 도출하였다. 수질환경기준은 현재 생활환경기준과 동일하게 Ia(매우 좋음)~VI(매우 나쁨)등급으로 구분하였고, TP의 수질환경기준은 수질평가지표 개발에 활용하였다.

### 2.4. 생물학적 수질평가지표 개발을 위한 지수산정방법

부착돌말류의 영양염지수(TDI)는 Kelly and Whitton(1995)이 제안한 것과 동일한 방법으로, 부착돌말류 종별 민감도(S)와 지표값(V)을 고려하여 산출한다. 민감도(S)는 TP의

수질환경기준 등급(I~V단계)에 따라 종별 출현빈도와 출현 개체수의 상대점유율을 산정하고, TP 수질환경기준 등급별 가중치를 적용하였다(Zelinka and Marvan, 1961). 지표값(V)은 독일의 DIN 38410과 윤일병 등(1992)을 참고하여 민감도의 분산도를 이용하였다. 여기서, Kelly and Whitton(1995)은 영양 단계를 5단계로 구분하고 영양염지수를 0~100으로 나타내었으나, 본 연구에서는 TP의 수질기준 등급이 6단계로서, TDI = WMS × 20의 변환식 (1)을 이용하여 영양염지수를 0~100으로 계산하였다.

$$TDI = (WMS \times 25) - 25 \quad (1)$$

$$WMS = \frac{\sum_{n=1}^i A_i \times S_i \times V_i}{\sum_{n=1}^i A_i \times V_i} \quad (2)$$

TDI : 영양염지수

WMS : Weighted Mean Sensitivity

A<sub>i</sub> : i종의 출현개체수

S<sub>i</sub> : i종의 민감도(0~5)

V<sub>i</sub> : i종의 지표값(1~5)

### 2.5. 수질평가지표개발

본 부착돌말류 평가등급은 현재 ‘수질 및 수생태계 상태별 생물학적 특성 이해표’에서 구분한 등급구분과 동일하게 4단계로 “A(최적)”, “B(양호)”, “C(보통)”, “D(불량)”으로 규정하여 구분하였다. 각 등급별 영양염지수 범위는 TP 수질환경기준과 영양염지수 간의 상관성 그래프를 이용하여 결정하였고, 등급별 상태 및 영양염지수는 Table 7과 같다(환경부·국립환경과학원, 2006). 영양염지수는 수치가 낮을수록 청정한 수계를 나타내어 0일 경우 전혀 오염이 진행되지 않은 수역을 의미하고 100은 오염이 가장 심한 수역을 나타내었다(Table 7).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 이화학적 환경요인

본 조사 수계의 TP 측정 범위는 0.001 mg/L('07 법천천) ~ 1.821 mg/L('08 칠장천02)의 범위를 보였으며, 평균 0.120 mg/L로 수질등급 보통을 나타내었다(Fig. 1). 수계별 TP의 변화를 보면 한강 수계에서 최저 0.001 mg/L('07 법천천)에서 최고 1.733 mg/L('07 굴포천02)의 범위로 평균 0.132 mg/L(TP 등급 : 보통), 낙동강 수계는 0.007 mg/L('07 영강02)에서 1.584 mg/L('07 내동천)의 범위를 보여

Table 1. The numbers of the sampling stations

Year	Total	Han River	Nakdong River	Geum River	Yeongsan and Seomjin Rivers
2007	540	320	60	40	120
2008	640	320	100	100	120

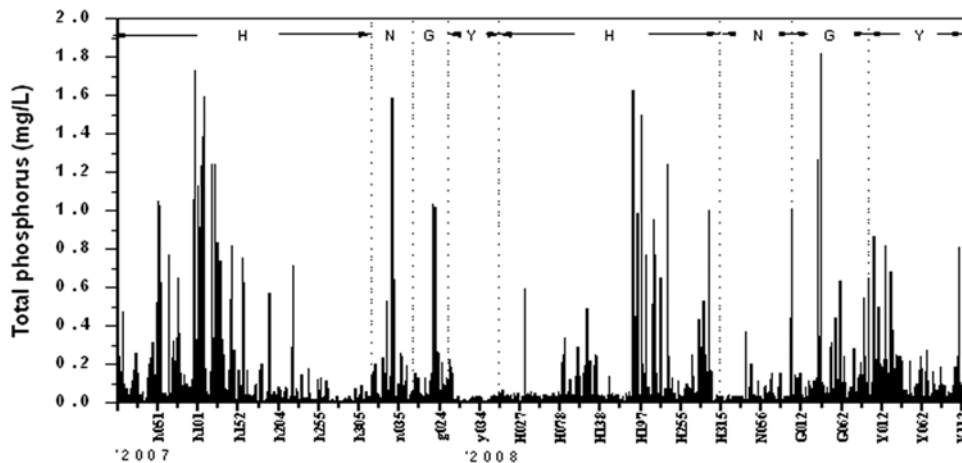


Fig. 1. Fluctuation of TP (Total phosphorus) in four largest rivers in Korea.  
(H: Han River, N: Nakdong River, G: Geum River, Y: Yeongsan and Seomjin Rivers)

평균 0.083 mg/L(TP 등급 : 약간 좋음)를 보였다(Fig. 1). 금강 수계를 살펴보면 가장 낮은 값이 0.006 mg/L('07 백천)에서 1.821 mg/L('08 칠장천02)로 평균 0.133 mg/L(TP 등급 : 보통)로 나타났으며, 영산·섬진강 수계는 0.003 mg/L('08 횡천강01)에서 0.870 mg/L('08 광주신천03)로 평균 0.098 mg/L(TP 등급 : 약간 좋음)을 보여 4대강 중 낙동강 수계에서 가장 낮은 평균(0.083 mg/L)을 보였으며, 금강에서 가장 높은 값(0.133 mg/L)을 보여 김지환 등(2000)과 같이 금강 수계는 과영양 수계를 보이는 것으로 판단하였다(0.100 mg/L 이상).

3.2. 지표종의 종조성 및 밀도

본 수계 총 1,180 조사 지점('07년 540 지점, '08년 640 지점)에서 출현된 부착돌말류는 총 619종으로 이들은 2강 8목 19과 53속 487종 132변종으로 조사되었다. 그 중, 광역 분포성(출현빈도), 종풍부도(출현개체수) 및 민감성(우점종)을 반영하여 부착돌말류의 지표생물종을 선정 한 결과,

광역 분포성을 고려할 시 180종, 종풍부도에서는 158종, 민감성에서는 184종으로 나타났고, 그 중 최종 지표생물종으로는 총 208종으로 1강 3목 9과 34속 170종 38변종이 선정되었다.

각 지점의 부착돌말류 지표생물종의 종조성은 각각 최저 2종('08 방태-소03; '08 길안천01)에서 최고 60종('08 임진강09)의 출현범위를 보였으며, 조사지점 당 평균 22종이 출현하였다(Fig. 2). 가장 적은 종수를 보인 지점은 각각 TP 수질등급 매우 좋음(Ia), 좋음(Ib)에 해당되었다.

조사 수계 부착돌말류 군집의 평균밀도는  $4.8 \times 10^5$  cells/cm<sup>2</sup>으로 나타났으며, 최저 27 cells/cm<sup>2</sup>('08 섬진강17)에서 최대  $1.1 \times 10^7$  cells/cm<sup>2</sup>('08 삼척오십천08)의 범위를 보였다(Fig. 2). 최저값을 보인 '08 섬진강17 지점에서는 11종이 출현하였고, 최대값을 보인 '08 삼척오십천08 지점은 8종이 출현하였으며(Fig. 2), 이 시기에 우점한 종은 *Achnanthes convergens*로 82% ( $3.1 \times 10^6$  cells/cm<sup>2</sup>)의 높은 우점도를 나타내었다.

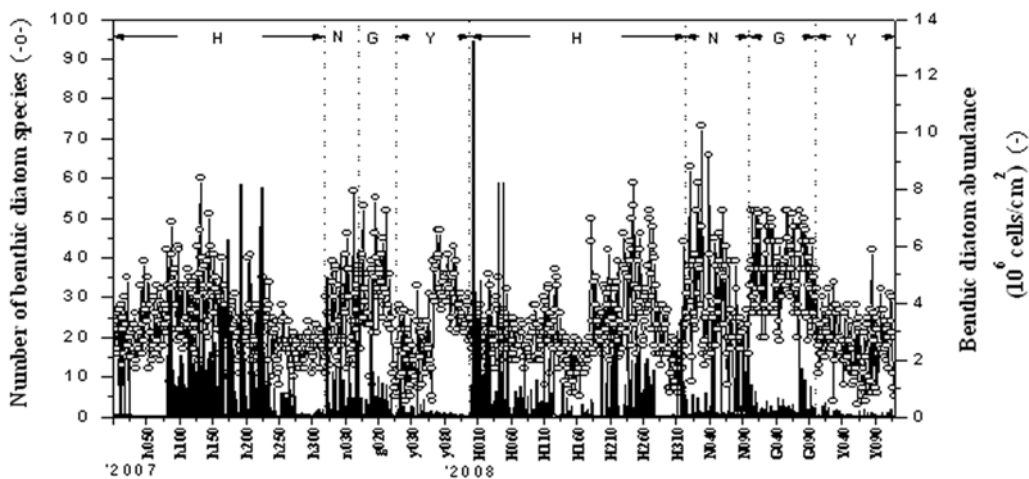


Fig. 2. Fluctuation in number of benthic diatom species and abundance of benthic diatom in four largest rivers in Korea.  
(H: Han River, N: Nakdong River, G: Geum River, Y: Yeongsan and Seomjin Rivers)

**Table 2.** The number of benthic diatom species of dominant taxonomic group (family)

Naviculaceae	Diatomaceae	Nitzschiaceae	Achnanthaceae	Thalassiosiraceae	ETC.
52%	10%	13%	11%	6%	8%

지표생물종 중 가장 많이 출현한 과(Family)는 Naviculaceae(52%), Diatomaceae(15%), Nitzschiaceae(12%), Achnanthaceae(11%) 순으로 나타났다(Table 2). Naviculaceae에서는 *Navicula* 속이 43종과 9변종으로 총 52종으로 가장 많은 출현을 보였으며, Nitzschiaceae에서는 *Nitzschia* 속이 총 23종, Achnanthaceae에서는 *Achnanthes* 속이 총 18종으로 가장 높은 출현을 보여주었다(Table 2).

지표생물종의 출현빈도는 전체 1,180 지점 중 *Achnanthes minutissima*가 740 지점, *Nitzschia palea*가 726 지점에서 출현하여 가장 높게 나타났으며, *Achnanthes convergens*, *Cymbella affinis*, *Gomphonema parvulum*, *Melosira varians*, *Navicula amphibia*도 50% 이상(590 지점 이상) 높은 출현빈도를 보여주었다. *Achnanthes minutissima*는 넓은 생태범위에서 출현하는 종으로 부영양호에서도 보편적으로 출현하는 종으로 알려져 있으며(Cumming et al., 1995; Hofmann, 1994; Round, 1990), 국내에서도 우점종으로 나타나(이정호, 1998; 이정호와 김용재, 1996) 본 연구와 일치하는 경향을 보였다. 또한 호청수성종으로 알려진 *Achnanthes convergens*, *Cymbella affinis*, 호오염종인 *Nitzschia palea*도 우리나라 수계에서 높은 출현빈도를 보이는 종으로(박정원 등, 2004; 이정호, 1998) 본 연구에서도 높은 출현빈도를 보였다. 조사 지점에서 나타난 총 출현 개체수는 *Achnanthes convergens*가  $8.8 \times 10^7$  cells/cm<sup>2</sup>로 가장 높은 밀도를 보였으며, *Achnanthes minutissima*도  $5.6 \times 10^7$  cells/cm<sup>2</sup>로 높은 밀도를 보여주었다. 민감성에서도 출현 개체수와 동일하게 *Achnanthes convergens* (224 지점)와 *Achnanthes minutissima* (205 지점)가 가장 높은 우점빈도를 나타내었으며, 그 밖의 *Nitzschia palea* (177 지점), *Melosira varians* (120 지점), *Nitzschia amphibia* (117 지점)의 순으로 상대적으로 높은 우점빈도를 보여주었다. 광적응성 생태종인 *Achnanthes minutissima*, 호청수성종인 *Achnanthes convergens*는 우리나라 수계에 우점하는 종으로(이정호, 1998; 이정호와 김용재, 1996) 본 연구에서도 호청수성종으로 우점하는 양상을 나타내었다.

**3.3. 하천의 TP 환경기준 마련을 위한 통계적 접근**

**3.3.1. 분포특성 파악**

하천의 TP 환경기준 마련을 위하여 4대강 중권역 대표지점의 10년간('98~'07) 자료를 기술통계한 결과, BOD, COD, TP의 평균과 증위수 간 큰 폭의 차이를 나타내고 있으며,

**Table 3.** Summary statistics of 4 river basins in the major stations during 1998~2007

Summary statistics		BOD	COD	T-P
N	Valid	4760	4760	4760
	Missing	0	0	0
Mean (mg/L)		3.0	4.6	0.177
Median (mg/L)		1.6	3.5	0.074
Skewness		5	4	12
Kurtosis		42	25	263

BOD, COD의 데이터 분포는 TP에 비해 비교적 넓게 분포되어 있다.

BOD, COD, TP의 왜도(Skewness)는 양(+)의(왼쪽) 치우쳐진 형태를 나타내어 모두 정규분포에서 벗어난 분포형태를 나타내고 있다(Table 3).

**3.3.2. TP 수질환경 기준**

BOD, COD 및 TP 자료의 기술통계 결과를 바탕으로 상관관계 및 빈도분석(percentile)결과, 하천의 BOD와 COD는 높은 상관성(하천 R ≥ 0.8, n = 4760)을 나타내었으며, TP의 경우 BOD, COD 모두 유사하게 높은 상관성을 나타냈으나, 데이터의 분포를 고려하여 비모수 상관분석도 함께 실행한 결과, COD와 더 유의한 관련성을 보였다(Table 4).

**Table 4.** Comparisons of correlations analyses in the major stations during 1998~2007

Correlations		BOD	T-P
Pearson (parametric)	COD	0.895**	0.805**
	BOD		0.806**
Spearman's rho (non-parametric)	COD	0.903**	0.827**
	BOD		0.802**

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level

BOD 중심의 유기오염물질에 의한 수질평가를 개선하고 난분해성 오염물질의 효율적 관리를 위하여 최종 확정된 COD, TP 기준을 Table 5에 제시하였다. COD, TP 기준은 최종 7등급으로 나타내었으며, Ia등급(매우 좋음)은 각각 2 mg/L 이하, 0.02 mg/L 이하로 제시되었으며, BOD 좋은물 기준(3 mg/L 이하)으로 볼 때 COD 6 mg/L 이하, TP 0.1 mg/L 이하로 산출되어 나타내었다.

**Table 5.** Proposed classification of water quality standards by COD and TP

Level	Ia	Ib	II	III	IV	V	VI
	Very good	Good	Fairly good	Moderate	Fairly poor	Poor	Very poor
BOD	≤ 1	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 8	≤ 10	> 10
COD	≤ 2	≤ 4	≤ 6	≤ 8	≤ 10	≤ 11	> 11
TP	≤ 0.02	≤ 0.05	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.4	≤ 0.6	> 0.6

**Table 6.** Sensitivities and indicator values of each indicator organism

Indicators	S	V	Indicators	S	V
Class Bacillariophyceae			Family Achnantheaceae		
Order Raphidineae			<i>Achnanthes alteragracillima</i>	1.03	2
Family Naviculaceae			<i>Achnanthes bioretii</i>	0.67	3
<i>Amphora pediculus</i>	2.15	3	<i>Achnanthes clevei</i>	3.79	3
<i>Cymbella affinis</i>	1.59	1	<i>Achnanthes convergens</i>	0.88	3
<i>Cymbella cistula</i>	4.50	3	<i>Achnanthes delicatula</i>	2.46	4
<i>Cymbella delicatula</i>	0.41	4	<i>Achnanthes exigua</i>	1.96	1
<i>Cymbella lacustris</i>	1.00	1	<i>Achnanthes japonica</i>	1.07	2
<i>Cymbella minuta</i>	0.73	2	<i>Achnanthes laevis</i>	0.80	5
<i>Cymbella silesiaca</i>	1.30	1	<i>Achnanthes lanceolata</i>	0.97	2
<i>Cymbella sinuata</i>	0.45	4	<i>Achnanthes lanceolata</i> var. <i>dubia</i>	4.74	5
<i>Cymbella tumida</i>	3.18	1	<i>Achnanthes minutissima</i>	0.91	2
<i>Cymbella turgidula</i>	1.23	1	<i>Achnanthes subhudsonis</i>	2.52	1
<i>Gomphonema angustatum</i>	3.21	3	<i>Cocconeis pediculus</i>	3.16	2
<i>Gomphonema angustum</i>	1.07	3	<i>Cocconeis placentula</i>	2.89	3
<i>Gomphonema christensenii</i>	0.29	5	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i>	2.95	3
<i>Gomphonema clevei</i>	1.53	1	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	2.81	3
<i>Gomphonema entolejum</i>	0.59	4	Family Nitzschiaceae		
<i>Gomphonema helveticum</i>	0.16	5	<i>Nitzschia amphibia</i>	2.88	2
<i>Gomphonema lagenula</i>	1.44	1	<i>Nitzschia capitellata</i>	4.62	4
<i>Gomphonema parvulum</i>	3.83	2	<i>Nitzschia dissipata</i>	1.08	3
<i>Gomphonema pseudoaugur</i>	4.34	3	<i>Nitzschia fonticola</i>	4.50	4
<i>Gomphonema quadripunctatum</i>	2.96	2	<i>Nitzschia frustulum</i>	3.54	4
<i>Navicula accomoda</i>	3.57	4	<i>Nitzschia inconspicua</i>	2.02	1
<i>Navicula amphiceropsis</i>	3.31	5	<i>Nitzschia microcephala</i>	3.78	5
<i>Navicula atomus</i>	4.73	5	<i>Nitzschia palea</i>	4.11	2
<i>Navicula bacillum</i>	3.60	4	Order Pennales		
<i>Navicula caterva</i>	1.49	3	Family Diatomaceae		
<i>Navicula cincta</i>	3.56	4	<i>Diatoma vulgare</i>	3.45	4
<i>Navicula confervacea</i>	3.42	3	<i>Fragilaria capitellata</i>	0.45	4
<i>Navicula cryptocephala</i>	2.99	2	<i>Fragilaria capucina</i>	1.32	1
<i>Navicula cryptotenella</i>	2.99	2	<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracilis</i>	1.00	2
<i>Navicula decussis</i>	2.01	2	<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>mesolepta</i>	0.55	3
<i>Navicula goeppertiana</i>	4.69	5	<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>vaucheriae</i>	2.81	1
<i>Navicula gregaria</i>	4.39	4	<i>Fragilaria construens</i>	2.92	3
<i>Navicula minima</i>	4.54	4	<i>Fragilaria crotonensis</i>	1.10	1
<i>Navicula mutica</i> var. <i>goeppertiana</i>	3.70	5	<i>Fragilaria elliptica</i>	2.71	2
<i>Navicula notha</i>	4.53	4	<i>Fragilaria intermedia</i>	0.43	4
<i>Navicula perminuta</i>	3.53	4	<i>Fragilaria vaucheriae</i>	1.74	1
<i>Navicula protracta</i>	4.26	5	<i>Hannaea arcus</i>	0.51	4
<i>Navicula pupula</i>	4.55	4	<i>Hannaea arcus</i> var. <i>subarcus</i>	0.35	5
<i>Navicula saprophila</i>	4.63	4	<i>Synedra acus</i>	2.63	3
<i>Navicula seminulum</i>	4.70	5	<i>Synedra ulna</i>	4.00	2
<i>Navicula seminulum</i> var. <i>radiosa</i>	4.48	3	Order Centrales		
<i>Navicula subminuscule</i>	4.61	4	Family Thalassiosiraceae		
<i>Navicula turgidula</i>	4.69	5	<i>Aulacoseira ambigua</i>	2.99	3
<i>Navicula veneta</i>	3.03	3	<i>Aulacoseira granulata</i>	2.88	3
<i>Navicula viridula</i> var. <i>rostellata</i>	3.57	4	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	3.37	2
<i>Neidium iridis</i>	0.20	5	<i>Cyclotella atomus</i>	3.23	3
<i>Pinnularia appendiculata</i>	4.78	5	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	4.00	2
<i>Pinnularia braunii</i>	3.51	4	<i>Cyclotella pseudostelligera</i>	2.84	2
<i>Reimeria sinuata</i>	1.14	2	<i>Cyclotella stelligera</i>	2.78	3
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	3.52	4	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	3.69	3

(S: Sensitivities, V: Indicator values)

3.4. 생물학적 수질평가지표 개발

3.4.1. 지수산정 매개변수의 지수화

3.4.1.1. 조사 수계 부착돌말류 군집의 민감도 및 지표값

총 1,180개 지점에서 출현한 부착돌말류의 주요 우점 속과 종을 중심으로 민감도와 지표값을 Table 6에 제시하였다. 민감도값은 오염내성종일수록 높고 호청수성종일수록 낮게 나타나, 민감도값이 높은 종으로 4.5 이상인 종은 총 14종으로, 그 중 *Navicula* 속이 가장 많이 선정되었으며(9종), 특히 *Navicula goeppertiana*, *Navicula minima*, *Navicula pupula*, *Navicula seminulum*, *Navicula subminuscule*, *Navicula capitellata*는 산업폐수 및 극오염수역 등에 서식하는 종으로(정준, 1993) 알려져 *Navicula* 속이 오염에 내성을 갖는 종을 많이 포함하고 있다고 판단되었다. 또한 낮은 민감도값(0.5 이하)을 갖는 종은 11종으로, *Cymbella* 속, *Fragilaria* 속, *Gomphonema* 속이 많이 나타났으며, 그 밖에 *Hannaea arcus* var. *subarcus*, *Neidium iridis*도 낮은 민감도를 보였다(Table 6). 정준(1993)은 *Cymbella delicatula*, *H. arcus* var. *subarcus*, *Ne. iridis*가 산악지역 및 빈영양 수계에 보편적으로 생육하는 종이라 하고 있으며, 본 조사에서도 빈영양 수계에서 서식하는 종으로, 민감도가 낮은 종들이 출현하였다고 사료된다.

3.4.2. 생물학적 수질평가지표

3.4.2.1. 수계별 영양염지수(TDI)

전체 조사 수계의 영양염지수(TDI) 분포는 Fig. 3과 같다. 영양염지수를 이용하여 전체 수계에 대한 수생태계 평가를 하면, 2007년 영산·섬진강 수계를 제외한 총 1,058 지점 중 4등급에서는 A등급 - 371 지점(35%), B등급 - 304 지점(29%), C등급 - 236 지점(22%), D등급 - 147 지점(14%) 순으로 나타나 A등급인 청정 수질상태가 가장 많이 나타났다(Fig. 3).

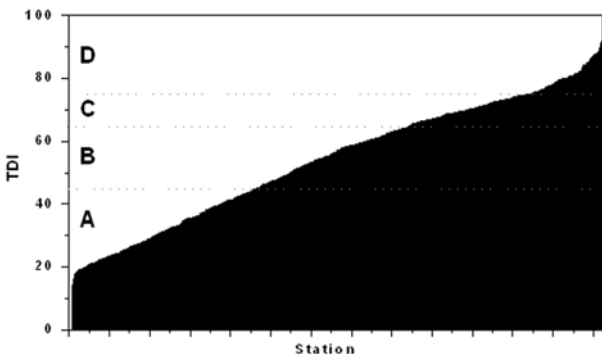


Fig. 3. Accumulation of TDI (Trophic diatom index) in four largest rivers in Korea.

각 수계별로 살펴보면, 한강 수계의 영양염지수(TDI)는 14('07 방태-소2, TP : 0.009 mg/L)~92('08 청담천, TP : 0.140 mg/L)의 범위를 나타내었으며, 평균 54를 보였다(Fig. 4). 부착돌말류의 영양염지수를 이용한 수질 평가 등급은 청정한 A등급이 217 지점(37%)으로 가장 많이 나타났다(Fig. 4). 낙동강 수계의 영양염지수(TDI)는 19('08 송천01, TP : 0.020 mg/L)~90('08 낙동강16, TP : 0.150 mg/L)의 범위를 보였고, 평균 53으로 B등급(양호)의 수질 상태를 보였다(Fig. 4). 낙동강 수계의 수질 평가 등급은 A등급이 49 지점(33%)으로 청정한 수계로 판정되었으며, B등급은 47 지점(32%)으로 양호, C등급은 32 지점(22%)으로 보통, D등급 19 지점(13%)으로 빈약으로 판정되었다(Fig. 4). 금강 수계의 영양염지수는 18('07 초강07, TP : 0.021 mg/L)~90('08 금강13, TP : 0.015 mg/L)의 범위를 보였고, 평균은 57로 B등급에 해당되었다(Fig. 4). 수질 평가 등급은 총 140 지점 중 B등급의 지점수가 42 지점(30%)으로 가장 많았고 다음으로 C등급이 40 지점(29%)으로 나타났다(Fig. 4). 영산·섬진강 수계의 영양염지수는 16('07 보성강12, TP : 0.015 mg/L)~78('08 섬진강06, TP : 0.065 mg/L)의 범위를 보였고, 평균 51로 B등급에 해당되었다(Fig. 4). 영산·섬진강 수계의 수질 평가 등급별 조사 지점의 분포는 A~C등급은 비슷한 지점 빈도를 보였으나(21%~38%) D등급(4%)은 매우 적게 나타나 다른 3개 수계와 차이점을 보였다(Fig. 4).

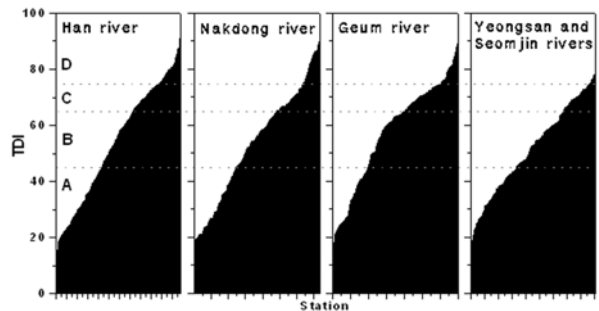


Fig. 4. Accumulation of TDI (Trophic diatom index) in each river.

전체적으로 볼 때 수계별 수질 평가는 평균 51~57로 B등급의 양호한 수계로 평가되었다.

4. 결론

이화학적 수질평가에 의존해온 그동안의 수질평가 방식은 여러 가지 한계점들이 있어 생물학적 수질평가를 도입하고자 부착돌말류를 이용하여 수질평가지표를 개발하였으

Table 7. Proposed classification of biological water quality criteria by benthic diatoms

Grade	Water grade	Environment quality	TP (mg/L)	TDI
A	Very good~Good	High	0.05 or less	0 ~ 45
B	Fairly good~Moderate	Good	0.2 or less	46 ~ 65
C	Fairly poor	Moderate	0.4 or less	66 ~ 75
D	Poor~Very poor	Bad	0.4 or above	76 ~ 100

며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 조사 수계의 TP(Total phosphorus) 측정결과 0.001 mg/L ('07 법천천)에서 1.821 mg/L('08 칠장천02)의 범위를 보였으며, 평균 0.120 mg/L로 수질등급 보통을 나타내었다. 수계별 TP는 4대강 중 낙동강 수계에서 가장 낮은 평균(0.083 mg/L, 약간 좋음)을 보였으며, 금강 수계에서 가장 높은 값(0.133 mg/L, 보통)을 보여 김지환 등(2000)과 같이 금강 수계에서 과영양상태를 보였다(0.100 mg/L 이상).
- 2) 부착돌말류의 지표생물종 선정시 고려한 광역분포성(상위 3% 이상)에서 180종, 종풍부도( $1.5 \times 10^5$  cells/cm<sup>2</sup> 이상)에서 158종, 민감성(우점종 및 아우점종)에서 184종으로 나타났고, 그 중 최종 지표생물종으로는 총 208종으로 1강 3목 9과 34속 170종 38변종이 선정되었으며, 가장 많이 출현한 과(Family)는 Naviculaceae(52%), Diatomaceae(15%), Nitzschiaceae(12%), Achnanteaceae(11%) 순으로 나타났다.
- 3) BOD 중심의 유기오염물질에 의한 수질평가를 개선하고 난분해성 오염물질의 효율적 관리를 위하여 COD, TP 기준치를 제안하였으며, 본 연구에서 부착돌말류의 생물지표개발에 TP 환경기준을 사용하였다.
- 4) 부착돌말류는 Kelly & Whitton이 제안한 영양염지수를 이용하여 각 분류군별 생물학적 수질평가지표를 4등급으로 개발·제안하였다.
- 5) 제안된 부착돌말류의 생물학적 수질평가지표를 조사지점에 적용시킨 결과, 4등급은 A등급 371 지점(35%), B등급 304 지점(29%), C등급 236 지점(22%), D등급 147 지점(14%)으로, 대부분 고르게 분포하는 특징을 보였다. 조사 수계의 영양염지수는 14~92의 범위로 평균 54로 나타나 B등급 “양호”로 평가되었다.

## 사 사

본 논문은 환경부·국립환경과학원의 '07~'08 수생태계 건강성 조사 및 평가사업의 일부분으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김용재(2001). 신천의 부착규조 군집을 이용한 유기오탁 판정. *한국육수학회지*, **34**(3), pp. 199-205.
- 김용진, 이욱민(2009). 부착규조류를 이용한 달천과 섬강의 생물학적 수질평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(4),

- pp. 606-614.
- 김지환, 이석준, 오희목(2000). 금강 부착조류 군집의 동태. *Algae*, **15**(4), pp. 287-297.
- 박정원, 최재신, 김미경(2004). 낙동강 중류 지역의 부착규조 군집의 변화와 유기오탁지수(DAIpo)에 의한 수질평가. *한국육수학회지*, **37**(1), pp. 70-77.
- 윤일병, 공동수, 유재근(1992). 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(I) -오탁계급치 및 지표가중치 산정을 중심으로-. *한국환경생물학회지*, **10**(1), pp. 24-39.
- 이정호(1998). 낙동강의 부착규조와 유기오탁지수(DAIpo). *한국육수학회지*, **31**(1), pp. 38-44.
- 이정호, 김용재(1996). 낙동강 수계 댐호의 부착규조 및 영양단계 평가. *환경생물학회지*, **14**, pp. 18-28.
- 이호원, 박문근, 김은희, 강현무, 이상명(2002). 남강의 부착규조 군집을 이용한 유기오탁 판정. *기초과학지*, **16**, pp. 89-104.
- 정승원, 박성환, 이진환(2008). 한강하류의 환경학적 연구 IIX. 갈수기 부착돌말류의 유기오탁지수(DAIpo index)에 의한 수질 평가. *한국환경생물학회지*, **26**, pp. 233-239.
- 정준(1993) *한국담수조류도감*, 아카데미서적.
- 환경부(2008). 수질측정망 운영계획.
- 환경부·국립환경과학원(2004). *물환경종합평가방법 개발조사연구(I) 최종보고서*.
- 환경부·국립환경과학원(2006). *물환경종합평가방법 개발조사연구(III) 최종보고서*.
- Cumming, B. F., Wilson, S. E., Hall, R. I., and Smol, J. P. (1995). Diatoms from British Columbia (Canada) lakes and their relationship to salinity, nutrients and other limnological variables. *J. Cramer, Berlin. Stuttgart.*, pp. 207.
- DIN 38410 Part2 (1990). German standard methods for the examination of water, waste water and sludge: biological-ecological analysis of water (group M); determination of the saprobic index (M2).
- Hofmann, G. (1994). Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. *Bibliotheca Diatomologica*, **30**, pp. 241.
- Jeffries, M. and Mills, D. (1995). Freshwater ecology. Principles and applications. John Wiley and Sons, New York, pp. 285.
- Kelly, M. G. and Whitton, B. A. (1995). The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology*, **7**, pp. 433-444.
- Round, F. E. (1990). The effect of limiting on the benthic diatom population in three Upland Welsh streams. *Diatom Research.*, **5**, pp. 129-140.
- Zelinka, M. and Marvan, P. (1961). Zur Präzisierung der biologischen klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Arch. Hydrobiology*, **57**, pp. 389-407.