

수질 및 하상기질이 저서동물지수(BMI)에 미치는 상호작용

이호주^a · 공동수^{b,*}

경기대학교 생명과학과

Interaction between Water Quality and Substrate on Benthic Macroinvertebrates Index (BMI)

Hyoju Lee^a · Dongsoo Kong^{b,*}

Department of Life Science, Kyonggi University

(Received 24 February 2023, Revised 11 June 2023, Accepted 14 June 2023)

Abstract

The benthic macroinvertebrates index (BMI) was developed based on the 5-day biochemical oxygen demand (BOD₅), which is the amount of biodegradable organic matter in stream water. However, benthic macroinvertebrates mainly live in the streambed substrate and are affected by the interaction of water quality and substrate. This study was conducted to examine the interactive relationship between water quality items (BOD₅, total phosphorus (TP), total suspended solids (TSS)) and substrate with BMI by performing statistical analyses (four-way analysis of variance, Pearson's correlation analysis, partial correlation analysis and multiple regression analysis). The data used in the analyses were collected from 19,915 sampling units at 1,937 sites in South Korea from 2010 to 2020. The interaction effect between BOD₅ and substrate types was confirmed through a four-way analysis of variance. Partial correlation analysis and multiple regression analysis estimated the degree of influence on the change in BMI value in the order of mean grain size of the substrate as (Φ_m) > BOD₅ > TP > TSS. BMI can be regarded as an index that evaluates the comprehensive effects of water quality and streambed status, although it is an index that was developed based on the amount of biodegradable organic matter in a water column.

Key words : Benthic macroinvertebrates, Benthic Macroinvertebrates Index (BMI), Biological assessment, Streambed substrate, Water quality

^a 석사과정(Master Student), gywn4555@kyonggi.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4093-3599>

^{b*} Corresponding author, 교수(Professor), dskong@kyonggi.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-8438-3229>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

저서성 대형무척추동물은 하천이나 호수 및 농경지, 연못, 인공수로 등의 담수생태계에 서식하며, 인위적이거나 자연적인 교란에 따라 군집 조성이 달라지기도 한다(Kwak et al., 2018; Mandaville, 2002; Park et al., 2007). 이러한 특성을 기반으로 저서성 대형무척추동물은 수생태계 건강성을 평가하는 지표생물로서 활발하게 활용되고 있다(Moon et al., 2020; Rosenberg and Resh, 1993; Won et al., 2022). 지표생물을 이용한 생물학적 수질평가는 측정 당시의 수질을 제한적으로 반영하는 이화학적 수질평가와는 달리 연간의 평균 수질을 반영하고 수생태계의 장기적인 영향에 대한 평가가 가능하다(Kong, 2002; Kong et al., 1999). 그중 저서동물지수(Benthic Macroinvertebrates Index, BMI)는 수중의 유기오염에 따른 저서성 대형무척추동물의 출현 특성을 바탕으로 개발된 평가지수이며, 출현 지표생물종의 오락계량치(saprobic valency)와 지표가중치(indicator weight value)를 이용하여 도출되어진다(Kong et al., 2018). BMI는 현재 환경부 생물측정망 중 하천생태계의 건강성 평가에 적용되고 있으며, 공인된 지수로서 국가적으로 활용되고 있는 만큼 BMI에 대한 환경요인의 다각적인 영향을 세밀하게 검토할 필요가 있다(NIER, 2019; 2021).

하천연속성개념(river continuum concept)에 의하면 하천은 상류부터 하류까지 생물군 및 환경 특성이 연속적으로 변하는 특성을 갖는다(Vannote et al., 1980). 일반적으로 상류에 위치하며 유속이 빠를수록 큰돌 및 작은돌 등 조립질 하상이 주를 이루며(Cummins, 1962), 하류로 유하하면서 수심이 깊어지고 유속이 느려질수록 모래와 실트 및 점토 위주의 단순한 세립질 하상구조로 변화된다. 하상의 기질은 저서성 대형무척추동물의 직접적인 서식처로서(Rabeni and Minshall, 1977), 하상구조 변화에 따른 서식지 교란은 저서성 대형무척추동물 군집구조에 영향을 미친다(Edgington, 1968; Lee et al., 1996; Lee et al., 2017; Park, 2011). 하천 내 생물의 서식지가 단순해지면 종의 분포도 단조로워지며, 이로 인해 하천생태계가 악화되는 경향이 나타난다(Barbour et al., 1999).

또한 하천의 상류부터 하류까지의 연속적인 흐름 과정에 따라 에너지원인 유기물의 기원과 성상이 달라지며 이러한 변화는 유속, 수심, 하상기질과 같은 물리적인 요인과 복합적으로 저서성 대형무척추동물의 군집에 영향을 미치게 된다(Kong et al., 2018). 육상으로부터 기인하여 상류하천으로 유입되는 낙엽 등의 외래성 조립질 유기물은 유하시에 저서성 대형무척추동물에 의한 유기물 쇄설(Organic processing) 과정을 통해 미세 유기물로 변형되며, 주로 하천의 중하류 유역에 밀집하여 있는 인위적인 오염원의 영향이 가중되어 하류의 미세 유기물의 농도는 일반적으로 상류에 비해 높다. 하류의 주요 하상기질인 실트나 점토는 비표면적이 커서 미세 유기물에 대한 흡착도가 높기 때문에(Horowitz, 1991) 수중의 미세 유기물의 양이 많아지면 하상 유기물의 축적도도 커진다. 이에 따라 하상구조의 물리적 변화는 수질의 악화를 야기할 수도 있다(Judy et al., 1984; Klemm et al., 1993). 저

서성 대형무척추동물은 세립질 하상에 비해 조립질 하상에서 비교적 다양하게 출현하거나 주 서식처인 하상기질의 조성에 따라 군집 구조가 변화할 수 있기 때문에 수질과 하상기질은 서로 관련된 요인으로서 저서성 대형무척추동물의 군집 조성에 동시에 영향을 미친다고 볼 수 있다.

BMI는 수질을 기반으로 개발된 지수이지만, 수질의 변화에 따라 하천의 물리적 요인이 영향을 받는것을 고려한다면 환경요인의 복합적인 특성을 기본적으로 반영하고 있는 지수라고 할 수 있다. 이에 따라 하천의 물리적 요인을 대변하는 하상기질이 수질과 복합적으로 BMI에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다. Lee et al. (2022)은 도심하천을 대상으로 저서성 대형무척추동물과 수질 간의 상관성 및 생물지수의 적용성을 분석한 바 있으나, 수질을 기반으로 개발된 생물지수에 미치는 하상기질의 영향 또는 수질과 하상기질의 상호작용에 대한 연구는 부족한 현황이다. 본 연구는 수질과 하상기질이 BMI에 어느 정도의 영향을 미치는지를 통계적으로 분석하여 지수의 특성을 세부적으로 파악하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. Materials and Methods

2.1 자료수집

본 연구에 이용된 자료는 한강물환경연구소의 “기후변화가 수생태계에 미치는 영향과 대응전략(‘10~’12)”, 환경부의 “환경생태유량 산정기준 연구 및 시범산정(‘14)”, 환경부·국립환경과학원의 “수생태계 건강성 조사 및 평가(‘12~’13)”, “하천 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가(‘14~’20)”, “수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 마련 연구(‘18)”, “4대강 보개방에 따른 수생태계 변화 조사(‘18~’20)”, 국립환경과학원의 “생물측정망 모니터링 및 평가기법 개발연구(‘17)”, 영산강·섬진강 수계관리위원회의 “영산강·섬진강 수계 수생생물의 서식지적합도(HSI) 지수 구축 연구(‘20)”의 지점 또는 정점 조사 결과이다. 총 5,452개 지점 중 분석에 필요한 수질 자료가 있는 지점은 1,937개였으며, 대부분 봄과 가을에 각 1회씩 수행된 조사의 결과이다(Fig. 1).

2.2 환경요인

수질요인으로는 각각 하천의 유기오염, 영양상태, 무기오염을 대변할 수 있는 5-day Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), Total Phosphorus (TP), Total Suspended Solids (TSS)를 고려하였다. 수질측정망 지점의 결과를 우선적으로 사용하였으며, 수질측정망 자료가 부재한 지점에 대해서는 생물측정망 수질자료를 적용하였다.

하상기질의 입경은 Cummins (1962)의 방법에 따라 5단계 [boulder($D_m > 256$ mm, $\phi < -8$, D_m : 입경(mm), $\phi = -\log_2 D_m$), cobble($D_m = 64 \sim 256$ mm, $\phi = -8 \sim -6$), pebble($D_m = 16 \sim 64$ mm, $\phi = -6 \sim -4$), gravel($D_m = 2 \sim 16$ mm, $\phi = -4 \sim -1$), sand 이하($D_m \leq 2$ mm, $\phi \geq -1$)]로 구분하였으며, 입도구간별 하상표면의 면적비를 기준으로 평균입경(ϕ_m)을 산출하였다(식 1).

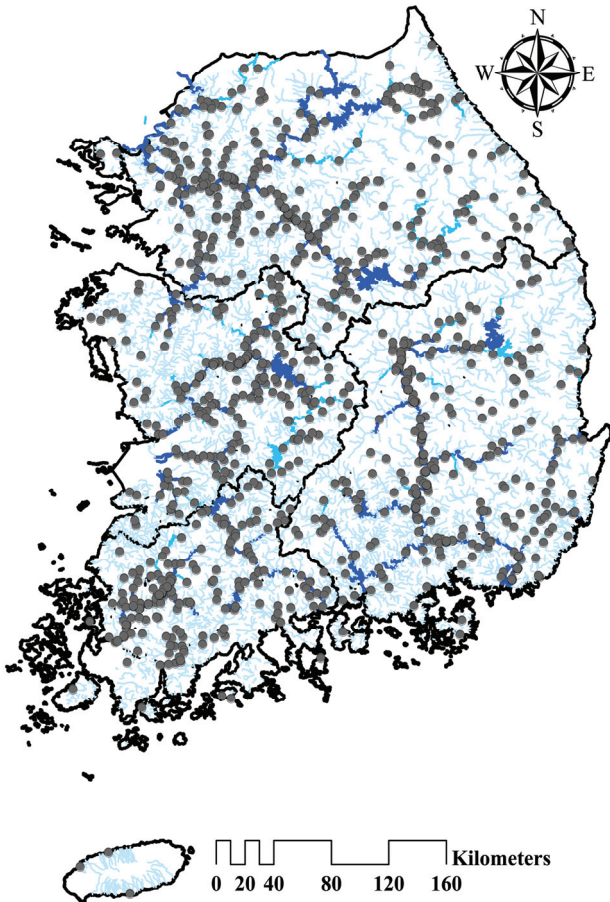


Fig. 1. The location of South Korea and the 1,937 sampling sites.

$$\Phi_m = \sum r_i \Phi_i \quad (1)$$

- Φ_m : 하상기질의 평균입경 Φ
(the mean Φ value of grain size in streambed)
- r_i : i 입도구간의 면적 비율
(the areal ratio of grain size i interval)
- Φ_i : i 입도구간의 중위입경 Φ
(the median Φ value of grain size i interval)

2.3 통계분석

분산분석, 상관분석 및 편상관분석, 다중회귀분석과 같은 통계적 분석에 기반하여 수질과 하상기질이 BMI에 미치는 복합적인 영향을 파악하였다. 통계분석 시 BMI 점수, 수질 및 하상 자료는 산술평균하여 적용하였으며, 범주형 자료를 사용하는 분산분석을 제외한 상관분석, 편상관분석 및 다중회귀분석 시 자료의 정규성을 검토하여 정규성을 벗어나는 환경요인 자료는 로그 변환 후 사용하였다. 통계적 유의성은 p -value로 판단하였다(Singh, 2013).

2.3.1 분산분석

4원 분산분석(four-way ANOVA)은 단일독립변수의 집단 내 평균치의 차이가 유의한지 검증하는 일원분산분석(one-way ANOVA)과 달리, 3개 이상의 독립변수 내 집단 간

Table 1. Scheme of water quality factors (Kong et al., 2018)

Water quality		
BOD ₅ (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)
≤ 1	≤ 0.010	≤ 2.5
≤ 2	≤ 0.035	≤ 5
≤ 4	≤ 0.100	≤ 10
≤ 8	≤ 0.300	≤ 20
8 <	0.300 <	20 <

Table 2. Classification of stream substrates and average of mean grain size diameter (Φ_m)

Classification	Substrate types	average of Φ_m	Number of sites
1	Bouldery cobble	-7.9	23
2	Pebbly cobble	-6.1	206
3	Gravelly cobble	-5.4	109
4	Cobbly pebble	-5.2	19
5	Copegra	-4.6	470
6	Pebble	-	0
7	Gravelly pebble	-3.9	9
8	Cobbly gravel	-3.3	285
9	Pebbly gravel	-2.9	284
10	Gravelly clay	-1.1	532

의 평균 차이를 확인하는 다원분산분석의 방법 중 하나이다. 이때 독립변수들이 종속변수에 미치는 각각의 영향을 주효과(main effect)라 하며, 독립변수들이 복합적으로 종속변수에 영향을 미치는 것을 상호작용효과(interaction effect)라 한다. 상호작용효과를 통해 두 개의 독립변수가 동시에 작용하여 종속변수에 미치는 영향이 유의한지 여부를 확인할 수 있다(Jung and Eom, 2011).

본 연구에서는 수질요인(BOD₅, TP, TSS)과 하상평균입경(Φ_m)이 복합적으로 BMI에 미치는 영향을 확인하기 위하여 4원 분산분석을 수행하였다. 분산분석에는 범주형 자료가 사용되므로 Kong et al. (2018)에서 제시한 기준에 따라 수질요인을 5등급으로 범주화하였다(Table 1). BOD₅는 농도의 2배수를 기준으로 구분되었으며, TP는 OECD (1982)의 영양상태 판정기준과 하천의 생활환경기준 경제치를, TSS는 하천과 호소의 생활환경기준을 참고하여 구분되었다.

하상평균입경은 Kong and Kim (2016)이 세립질 하상을 Sand, Silt, Clay의 구성비에 따라 유형화한 Shepard (1954)의 삼각도표를 응용하여 하천의 하상 유형을 10단계로 구분한 방법에 따라 10가지로 유형화하였다(Table 2).

2.3.2 상관분석 및 편상관분석

저서성 대형무척추동물은 수환경 내의 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 상태에 적응하여 살아가고 있기에, 이들과 여러 환경요인의 관계를 파악하는 것은 중요하다(Barbour et al., 1999; Yoon et al., 1992).

환경요인(수질요인, 하상평균입경) 간의 상관성을 파악하기 위하여 피어슨 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 수행하였으며, 환경요인과 BMI 간의 순수한 상관관계를 분석하고자 편상관분석(partial correlation analysis)을 수행하였다. 이때 BMI와 각 환경요인 간의 상관계수와 나머지 환경요인들을 통제하여 도출한 편상관계수를 비교분석하였다.

2.3.3 다중회귀분석

다중회귀분석(multiple regression analysis)은 생물학적 예측 모델을 개발하는데 유용한 통계 방법이며, 어떠한 생물학적 척도를 가장 잘 예측할 수 있는 환경 변수들을 선별하는 경우에는 단계입력방식(stepwise)을 사용하는 것이 적합하다(Norris and Georges, 1993). 단계입력방식은 설명력이 낮은 변수들은 제외되고 종속변수에 영향력이 있는 변수들만이 회귀식에 포함되는 방식이다. 단계입력방식의 다중회귀분석은 금강수계 저서성 대형무척추동물의 서식지 유형분류에 영향을 미치는 환경요인을 파악하거나(Park et al., 2011), 생물군집의 구조 및 기능에 영향을 미치는 환경요인을 분석하기 위하여 사용된 바 있다(Kim et al., 2012).

본 연구에서는 BMI에 영향력이 있는 환경요인들을 파악하기 위하여 다중회귀분석을 수행하였다. BMI에 대한 수질요인(BOD₅, TP, TSS)과 하상평균입경(ϕ_m)의 관계식을 도출하였으며, 회귀식의 결정계수(determination coefficient, R^2)와 각 독립변수의 유의성을 확인하였다.

3. Results and Discussion

3.1 수질요인과 하상평균입경의 상호작용효과

1,937개 지점의 하상은 Gravelly clay 유형이 가장 많았으며(27.4%) Pebble에 해당하는 유형의 지점은 없었으므로 분산분석 시 9개의 하상유형만을 사용하였다(Fig. 2).

4원 분산분석의 결과 BOD₅는 BMI에 고도로 유의한 수준의 차이를 보였으며($p < 0.001$), TP와 TSS는 유의하지 않았다(Table 3). 하상유형 또한 BMI에 고도로 유의한 수준의 차이

를 보였으며($p < 0.001$), 수질요인 외에 하상유형이 유의성을 보이는 것은 수질과 하상유형이 상관성을 지니고 있는 점과 더불어 저서성 대형무척추동물이 수질은 물론 하상의 기질에 동시에 영향을 받는데서 기인한 것으로 판단된다. BMI에 대한 하상유형과의 상호작용은 수질요인 중 BOD₅만이 매우 유의한 수준의 차이를 보였다($p < 0.01$). BMI는 BOD₅와 하상의 기질에 각각 영향을 받을 뿐만 아니라 그 복합적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

분산분석의 결과를 도표를 나타낼 경우 집단 간 요인의 평균값의 차이를 쉽게 이해할 수 있으므로, 상호작용효과가 있는 경우 도표를 이용하여 하상유형에 대한 BMI 평균값이 환경요인에 따라 달라지는 양상을 확인하였다. 5등급으로 범주화한 BOD₅의 농도에 따른 하상유형별 BMI의 평균값은 Table 4와 같다. 수중의 BOD₅의 농도가 비교적 낮은 경우(Group 1~3)에는 하상기질이 세립화될수록 BMI가 낮아지는 경향이 나타나는 반면 BOD₅의 농도가 높을수록(Group 4, 5) 하상유형과 유의미한 관계가 나타나지 않았다(Fig. 3). 수중의 BOD₅ 농도가 높은 경우에는 저서성 대형무척추동물 군집의 조성이 BOD₅ 농도에 주로 영향을 받지만 BOD₅ 농도가 낮은 경우에는 서식처의 하상기질이 군집조성에 복합적으로 영향을 미침을 알 수 있다.

Table 3. Four-way ANOVA table for BMI

Source	df	MS	F	p-value
BOD ₅	4	1814.07	12.83	0.000
TP	4	324.35	2.29	0.057
TSS	4	54.87	0.39	0.817
Substrate type	8	1393.67	9.86	0.000
BOD ₅ × Substrate type	22	295.68	2.09	0.002
TP × Substrate type	21	179.29	1.27	0.185
TSS × Substrate type	26	153.11	1.08	0.352
Error	1692	141.36		

$R^2 = 0.68$

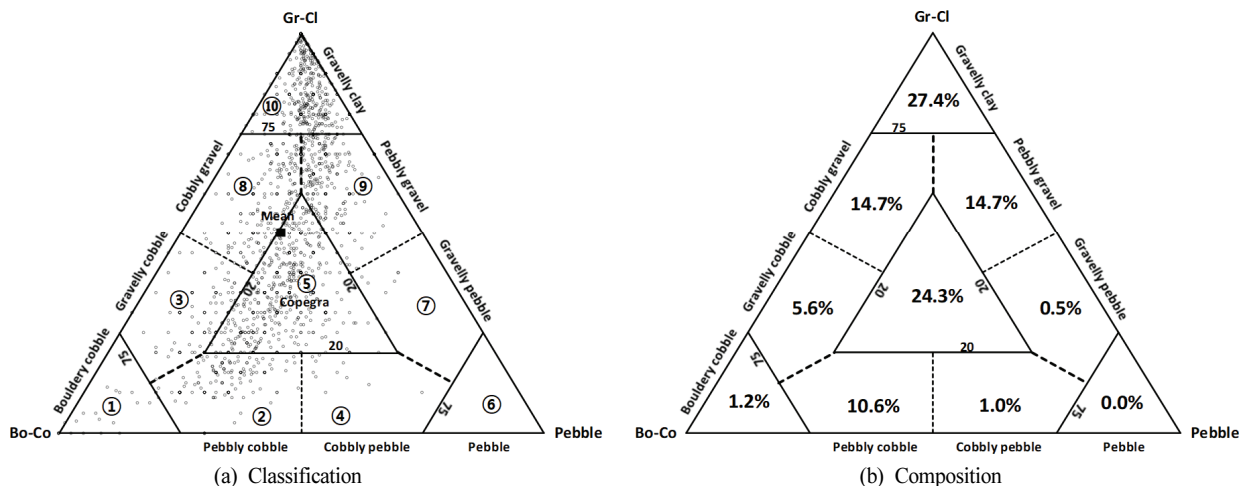


Fig. 2. Textural classification (a) and composition (b) of stream substrates in 1,937 sites.

Table 4. Average BMI values of each substrate type according to BOD₅ (Group 1~5)

Group	number of sites	Type of substrate									
		1	2	3	4	5	7	8	9	10	
1	570	81.9	84.6	77.0	80.7	78.4	78.6	73.2	72.3	60.0	
2	698	39.5	79.6	67.1	76.2	73.3	50.9	62.3	61.3	49.3	
3	488	50.8	71.9	55.1	66.9	62.1	45.7	49.4	52.3	41.2	
4	167	34.9	35.1	35.7	-	43.3	-	43.3	37.4	35.5	
5	14	-	-	-	-	48.9	-	21.8	40.6	32.0	

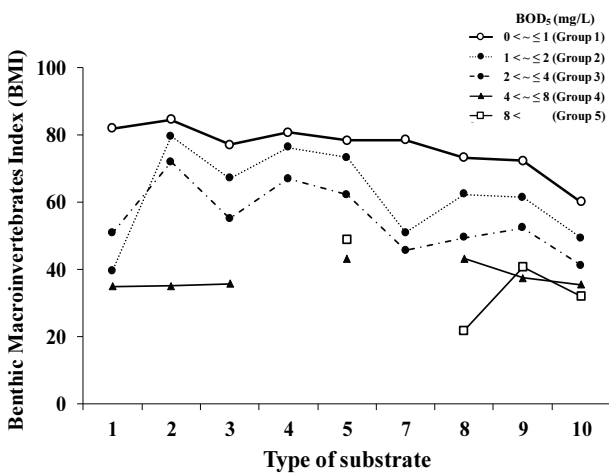


Fig. 3. Interaction effects between BOD₅ and substrate type on BMI.

3.2 환경요인과 생물지수 간의 상관분석 및 편상관 분석

환경요인 간의 단순상관분석 결과 각 수질요인(BOD₅, TP, TSS)은 고도로 유의한 수준의 높은 상관성을 보였으며 ($p < 0.001$, $r > 0.7$), 각 수질요인과 하상평균입경(ϕ_m)도 고도로 유의한 수준의 양의 상관성($p < 0.001$, $r \geq 0.49$)을 보였다 (Table 5). 즉 수질이 악화될수록 하상기질이 세립화되는 관계를 보여주고 있는데 이는 수질이 하상의 기질을 변화시키거나 하상구조의 물리적 변화가 수질을 변화시키는(Hong and Lee, 2006; Judy et al., 1984; Klemm et al., 1993) 인과관계의 결과일 수도 있고, 수질과 관계없이 하천의 연속성에 따른 하류역 하상의 세립화 및 중하류 유역에 밀집한 인위적 오염원의 영향이 잠재변수(Lurking variable)로 작용하여 나타난 무의미 상관(Nonsense correlation)일 수도 있다. BMI와 수질요인(BOD₅, TP, TSS)의 상관계수는 각각 -0.69, -0.64, -0.62이었으며, 하상평균입경(ϕ_m)과의 상관계수는 -0.68로 모두 고도로 유의한 수준의 음의 상관관계를 보였다 ($p < 0.001$)(Fig. 4).

다른 환경요인을 모두 통제된 조건에서 각 환경요인과 BMI와의 편상관계수는 하상평균입경(ϕ_m) > BOD₅ > TP > TSS의 순이었으며(Table 6), 이 중 TSS는 매우 유의한 수준의 차이를 보였고($p < 0.01$) 나머지는 고도로 유의한 수준의

Table 5. Pearson's correlation coefficient between environmental factors

Environmental factors	ϕ_m	ln(BOD ₅)	ln(TP)
ln(BOD ₅)	0.53***		
ln(TP)	0.49***	0.79***	
ln(TSS)	0.54***	0.73***	0.74***

*** $p < 0.001$

차이를 보였다($p < 0.001$). 각 환경요인을 범주화한 4원 분산분석에서 TSS와 BMI의 유의성이 나타나지 않았던 반면 편상관분석에서 TSS와 BMI의 관계가 유의한 수준의 유의성을 보이는 것은 표본크기(sample size)가 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 하상평균입경이 통제변수로 포함되었을 때 각 수질요인과 BMI의 편상관계수는 미통제 조건에서의 상관계수에 비해 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 하상기질이 개별적인 수질요인보다 BMI에 더욱 큰 영향을 미치고 있음을 시사하는 것이다.

3.3 다중회귀분석 결과

BMI에 대한 수질요인(BOD₅, TP, TSS)과 하상평균입경(ϕ_m)의 다중회귀분석 결과 각 독립변수의 공차(tolerance, TOL)는 0~1 사이의 값을 가졌고 분산팽창요인(variance inflation factor, VIF)은 10보다 작았으므로 독립변수들 간의 다중공선성은 문제가 없는 것으로 판단되었다(Table 7). BMI에 대한 회귀식은 식 2와 같이 나타났으며 결정계수는 0.63이었다. 식 2는 각 환경요인의 값이 증가할 때 BMI의 값이 감소하는 형태로서 이는 개별 요인 간의 단순상관의 경향과도 일치한다. 또한 식 2에서 각 요인의 표준화 회귀계수(Standardized regression coefficient)는 하상평균입경(-0.41), BOD₅(-0.31), TP(-0.14), TSS(-0.07)의 순으로 하상평균입경이 BMI에 미치는 영향도가 가장 큰 것으로 평가되었다 (Table 7).

식 2에서 하상평균입경을 제외하고 수질요인만을 독립변수로 고려하여 도출된 다중회귀식은 식 3과 같다. 식 3의 결정계수는 0.52로 식 2와 비교할 때 설명력이 약 11% 정도 낮아졌다. 반면에 식 2에서 수질요인을 제외하고 하상평균입경만을 독립변수로 고려하여 도출된 다중회귀식은 식 4와 같다. 식 4의 결정계수는 0.46으로 식 2와 비교할 때 설명력이 약 17% 정도 낮아졌다.

$$BMI = 44.17 - 4.30\phi_m - 9.23\ln BOD_5 - 3.21\ln TP - 1.70\ln TSS \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.63) \text{ (BOD}_5, \text{ TP, TSS: mg/L)}$$

$$BMI = 64.91 - 12.72\ln BOD_5 - 3.51\ln TP - 4.52\ln TSS \quad (3)$$

$$(R^2 = 0.52)$$

$$BMI = 36.70 - 7.21\phi_m \quad (R^2 = 0.46) \quad (4)$$

다중회귀의 각 요인별 표준화 회귀계수와 단계적 다중회귀

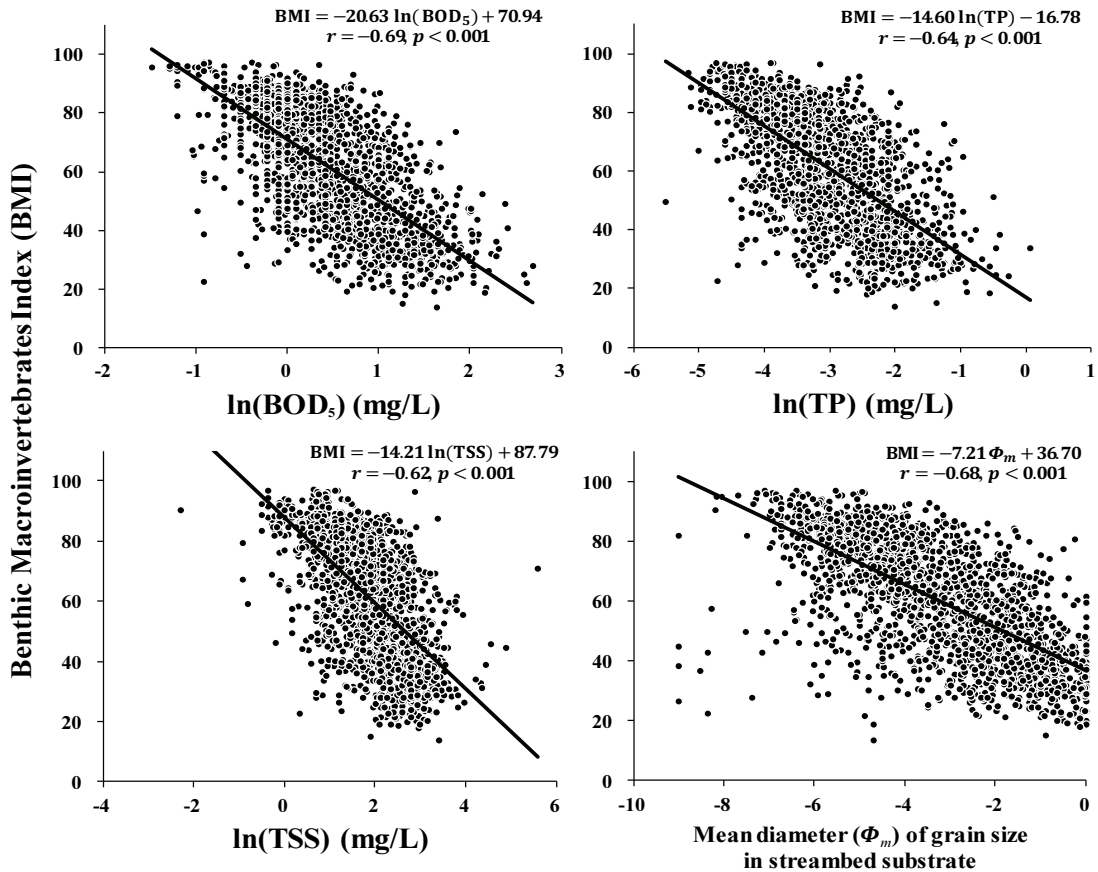


Fig. 4. Correlation between water quality factors and ϕ_m with BMI.

Table 6. Pearson’s correlation and partial correlation coefficient on BMI

Control Variables	Factors	<i>r</i>	<i>p</i> -value
None	Φ_m	-0.68	0.000
	ln(BOD ₅)	-0.69	0.000
	ln(TP)	-0.64	0.000
	ln(TSS)	-0.62	0.000
BOD ₅ , TP, TSS	Φ_m	-0.48	0.000
Φ_m , TP, TSS	ln(BOD ₅)	-0.27	0.000
Φ_m , BOD ₅ , TSS	ln(TP)	-0.13	0.000
Φ_m , BOD ₅ , TP	ln(TSS)	-0.07	0.001

Table 7. Results of multiple regression analysis between environmental factors and BMI

Variables	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	<i>t</i>	TOL	VIF
	B	SE	β			
(Constant)	44.17	2.57		17.16***		
Φ_m	-4.30	0.18	-0.41	-23.79***	0.67	1.50
ln(BOD ₅)	-9.23	0.74	-0.31	-12.48***	0.32	3.17
ln(TP)	-3.21	0.57	-0.14	-5.62***	0.31	3.22
ln(TSS)	-1.70	0.52	-0.07	-3.27**	0.38	2.65
<i>R</i> ²	0.63					

SE: standard error, ***p* < 0.01, ****p* < 0.001

시 설명력의 차이를 고려할 때 하상기질이 수질에 비하여 BMI의 변동에 상대적으로 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 그러나 이러한 결론에는 많은 한계점과 개선사항이 내포되어 있는데, 하상기질의 화학적 상태를 고려하지 않고 있다는 점이 그중 하나이다. 하상기질이 세립화될수록 오염 물질에 대한 흡착 및 축적도가 커지는 것이 일반적인 현상 (Horowitz, 1991)일지라도 오염물질의 유입 정도에 따라 하상기질의 화학적 상태가 다를 수 있으므로 이로 인한 생물의 영향을 변별할 수 있는 생물지수의 개선이 필요하다.

BMI 산정 시 적용되고 있는 실지렁이류와 깔따구류의 분

류학적 문제는 또 하나의 한계점이다. 광범위한 국가적 모니터링 사업의 특성 상 동정(identification)의 비용이성을 고려하여 BMI 산정 시 실지렁이류는 목(order) 수준의 단일 분류군으로 적용되고 있으며 깔따구류는 색깔로 구분되는 두 개의 형태군으로 적용되고 있다. 그러나 국내에 기록된 실지렁이류는 36종에 달하고(Park et al., 2013), 성충으로 기록된 깔따구류는 75종에 달하며 최근 유충의 동정 및 검색표에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다(Kwak, 2015). 향후 하상기질의 화학적 상태에 대한 조사와 더불어 세립질 퇴적물에 서식하는 굴착성 실지렁이류와 깔따구류의 지표성에 대한

연구를 통하여 수질과 퇴적질이 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 개별적 영향 및 복합적 영향을 종합적으로 평가할 수 있도록 BMI를 개선할 필요가 있다.

4. Conclusion

현재 환경부 생물측정망 중 하천생태계의 건강성 평가에 적용되고 있는 저서동물지수(BMI)는 수질을 기반으로 개발된 지수이다. 그러나 저서성 대형무척추동물은 주로 하상에 서식하고 있으므로 수질과 하상기질의 복합적인 영향을 받는다. 본 연구는 수질과 하상기질이 BMI에 미치는 복합적인 상호작용을 평가하기 위해 수행되었다. 환경요인과 BMI에 대한 분산분석, 상관분석, 편상관분석, 다중회귀분석을 통해 하상기질이 수질과 복합적으로 BMI 값에 영향을 미침을 확인하였다.

분산분석 결과 하상기질의 유형이 BMI 값의 변동에 고도로 유의한 영향을 미치며 수중의 BOD₅ 농도와 상호작용 효과 역시 고도로 유의한 수준이었다. 편상관분석, 다중회귀분석의 결과로 볼 때 BMI 값의 변동에 미치는 영향도는 하상평균입경 > BOD₅ > TP > TSS의 순이었다. 하상기질이 세립화될수록 입자의 비표면적이 커지고 오염물질의 흡착이 많아짐에 따라 서식처의 질이 악화되고 이는 저서성 대형무척추동물의 생육저해로 이어질 수 있다. 따라서 BMI는 수질만을 대변하는 지표라기보다는 수질과 하상기질의 복합적 영향도를 평가하는 지수로 간주되어야 한다. 수질과 무관하게 하상기질의 변화만으로도 BMI 값이 달라질 수 있으며, 수질과 하상기질을 복합적으로 개선하였을 때 BMI 값의 변화가 뚜렷해질 수 있음을 인식하여야 한다.

이상의 결과가 객관적인 통계를 통하여 도출된 것일지라도 본 연구에서 하상기질의 화학적 상태가 고려되지 않았다는 점과 아울러 연구에 적용된 BMI 산정 시 실지렁이류와 깔따구류의 분류가 절대적으로 미흡한 점은 주요 한계점이다. 또한 하천의 특성을 고려하거나 계절에 따른 영향을 분석하여 보완할 필요가 있다고 판단된다. 향후 한계점에 대한 개선을 통하여 수질과 퇴적질이 수생태계 건강성에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있도록 BMI를 개선할 필요가 있다.

References

Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., and Stribling J. B. (1999). *Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish*, Second Edition, EPA/841/B-99/002, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C, USA.

Cummins, K. W. (1962). An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters, *The American Midland Naturalist*, 67(2), 477-504.

Edington, J. M. (1968). Habitat preferences in net-spinning caddis larvae with special reference to the influence of water velocity,

The Journal of Animal Ecology, 37(3), 675-692.

Hong, I. and Lee, J. W. (2006). Studies on characteristics of water quality variation by the stream bed materials, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, 1093-1097. [Korean Literature]

Horowitz, A. J. (1991). *A primer on sediment-trace element chemistry*, Second Edition, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA, 1-136.

Judy, R. D. Jr, Seeley, P. N., Murray, T. M., Svirsky, S. C., Whitworth, M. R., and Ischinger, L. S. (1984). *1982 national fisheries survey, Volume I Technical report: Initial findings*, FWS/OBS-84/06, United States Fish and Wildlife Service, Washington, DC, USA, 1-140.

Jung, M. M. and Eom, H. J. (2011). Understanding and interpretation of interaction effects in multi-factor ANOVA designs, *The Korean Journal of Measurement and Evaluation in Physical Education and Sports Science*, 13(2), 1-15. [Korean Literature]

Kim, K. D., Park, Y. J., and Nam, S. H. (2012). Analysis and prediction for spatial distribution of functional feeding groups of aquatic insects in the Geum river, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(1), 99-118. [Korean Literature]

Klemm, D. J., Stober, Q. J., and Lazorchak, J. M. (1993). *Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters*, EPA/600/R-92/111, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C, USA, 1-348.

Kong, D. S. (2002). Necessity and approach of establishing biological water quality standards, *Korean Journal of Environmental Biology*, 20(Special issue), 38-49. [Korean Literature]

Kong, D. S. and Kim, J. Y. (2016). Development of benthic macroinvertebrates streambed index (BMSI) for bioassessment of stream physical habitat, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 1-14. [Korean Literature]

Kong, D. S., Ryu, J. K., and Yoon, I. B. (1999). Assessment and restoration of aquatic environment using benthosbiomonitoring, biomanipulation, ecotechnology, *Proceedings of Symposium on Environmental Changes and Insect Resources*, Korean Entomological Institute, Korea University, 69-92. [Korean Literature]

Kong, D. S., Son, S. H., Hwang, S. J., Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Jeon, T. S., Lee, J. E., Kim, J. H., Kim, J. S., Park, J. H., Kwak, I. S., Ham, S. A., Jun, Y. C., Park, Y. S., Lee, J. K., Lee, S. W., Park, C. H., Moon, J. S., Kim, J. Y., Park, H. K., Park, S. J., and Kim, P. J. (2018). Development of benthic macroinvertebrates index (BMI) for biological assessment on stream environment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(2), 183-201. [Korean Literature]

Kwak, I. S. (2015). *Introduction to chironomidae*, *A water*

- pollution indicator*, Chonnam National University, 1-169.
- Kwak, I. S., Lee, D. S., Hong, C., and Park, Y. S. (2018). Distribution patterns of benthic macroinvertebrates in streams of Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 51(1), 60-70. [Korean Literature]
- Lee, J. H., Han, H., Lee, J. Y., Cha, Y. S., and Cho, S. J. (2022). Ecological health assessment of Yangjaecheon and Yeouicheon, *Korean Journal of Environmental Biology*, 40(2), 172-186. [Korean Literature]
- Lee, J. W., Ryu, S. M., and Cha, J. Y. (1996). Study on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates in Hoe stream, *Journal of Natural Sciences*, Institute of Natural Science, Yeungnam University, 16, 277-298. [Korean Literature]
- Lee, S. H., Lee, M. J., Seo, E. W., and Lee, J. E. (2017). Analysis of functional habitat groups of benthic macroinvertebrates according to changes in the riverbed, *Journal of Environmental Science International*, 26(3), 373-380. [Korean Literature]
- Mandaville, S. M. (2002). *Benthic macroinvertebrates in freshwaters - Taxa tolerance values, metrics, and protocols*, Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax, Halifax, Canada, 1-48.
- Moon, M. Y., Ji, C. W., Lee, D. S., Lee, D. Y., Hwang, S. J., Noh, S. Y., Kwak, I. S., and Park, Y. S. (2020). Characterizing responses of biological trait and functional diversity of benthic macroinvertebrates to environmental variables to develop aquatic ecosystem health assessment index, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 53(1), 31-45. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2019). *Guidelines on the current status survey of aquatic ecosystems and methods of evaluation of health, etc - River Part -*, No. 2019-52. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2021). *Stream/river ecosystem survey and health assessment*, NIER-SP2021-123. [Korean Literature]
- Norris, R. H. and Georges, A. (1993). *Analysis and interpretation of benthic macroinvertebrate surveys*, Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates, Rosenberg, D. M. and Resh, V. H. (eds.), Chapman and Hall, New York, USA, 234-286.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (1982). *Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control*, OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters, OECD, 1-154.
- Park, H. J., Timm, T., and Bae, Y. J. (2013). Taxonomy of the Korean freshwater Oligochaeta (Annelida) with eight species new to Korea, *Entomological Research Bulletin*, 29(2), 180-188.
- Park, Y. J. (2011). *Study on the distribution and its prediction of benthic macroinvertebrate communities in the Geum river*, Ph. D. thesis, Daejeon University, 1-153. [Korean Literature]
- Park, Y. J., Kim, K. D., Cho, Y. H., Han, Y. G., Kim, Y. J., and Nam, S. H. (2011). Habitat classification and distribution characteristic of aquatic insect functional feeding groups in the Geum river, Korea, *Korean Journal of Environment and Ecology*, 25(5), 691-709. [Korean Literature]
- Park, Y. S., Song, M. Y., Park, Y. C., Oh, K. H., Cho, E. C., and Chon, T. S. (2007). Community patterns of benthic macroinvertebrates collected on the national scale in Korea, *Ecological Modelling*, 203(1-2), 26-33.
- Rabeni, C. F. and Minshall, G. W. (1977). Factors affecting microdistribution of stream benthic insects, *Oikos*, 29(1), 33-43.
- Rosenberg, D. M. and Resh, V. H. (1993). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*, Chapman and Hall, New York, USA, 1-9.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios, *Journal of Sedimentary Petrology*, 24(3), 151-158.
- Singh, P. (2013). P value, statistical significance and clinical significance, *Journal of Clinical and Preventive Cardiology*, 2(4), 202-204.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., and Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), 130-137.
- Won, D. H., Lim, S. H., Park, J. H., Moon, J. S. and Do, Y. N. (2022). Research trend of estuarine ecosystem monitoring and assessment, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 55(1), 1-9. [Korean Literature]
- Yoon, I. B., Kong, D. S., and Ryu, J. K. (1992). Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (2) - Effects of environmental factors to community -, *Korean Journal of Environment Biology*, 10(1), 40-55. [Korean Literature]