

저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용

원두희[†] · 전영철^{*} · 권순직 · 황순진^{*} · 안광국^{**} · 이재관^{***}

(주)생태조사단 부설 두희자연환경연구소

^{*}건국대학교 환경과학과

^{**}충남대학교 생명과학부

^{***}국립환경과학원 환경진단연구부

Development of Korean Saprobic Index using Benthic Macroinvertebrates and Its Application to Biological Stream Environment Assessment

Doo Hee Won[†] · Yung Chul Jun^{*} · Sun Jik Kwon · Soon Jin Hwang^{*} · Kwang Guk Ahn^{**} · Jae Kwan Lee^{***}

Doohee Institute of Ecological Research (DIER), Korea Ecosystem Service (KES) Inc.

^{}Department of Environmental Science, Konkuk University*

*^{**}School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University*

*^{***}Environmental Diagnostics Research Department, National Institute of Environmental Research (NIER)*

(Received 26 June 2006, Accepted 16 August 2006)

Abstract

Biological stream environment assessment has been an essential trend of aquatic ecosystems among advanced countries, because the chemical water quality assessment has limitations that only represent temporal water environmental status. Benthic macroinvertebrates are the most popular bioindicator group useful to biological water quality assessment for a long time. In addition, a number of indices using benthic macroinvertebrates have recently been developed not only for water quality assessment but also for ecological health assessment. In this paper Korean Saprobic Index (KSI) based on Zelinka-Marvan's saprobic valency concept is developed by applying DIN 38410 in Germany. The KSI value was widely applicable to most Korean streams with the exception of sand-based large streams, for example main stream of Nakdong River. But as a result of non-linear regression analysis the correlation between KSI and BOD₅ concentration was high and KSI reflected water quality alteration for mid and long-term period. In spite of applicability of KSI, it should be supplemented and developed to make it strong by accumulating field data as well as to manage integrated water environment in general through continuous biomonitoring.

keywords : Benthic macroinvertebrates, Bioindicator, Biological stream environment assessment, Korean Saprobic Index (KSI), Saprobic valency

1. 서론

최근 수질오염의 질적, 양적인 증가에 따라 물환경을 교란시키는 오염물질의 잠재적 유출 가능성은 더욱 커지고 있다. 따라서 화학적인 방법으로 수체에 내재되어 있는 수만종의 오염물질을 검색한다는 것은 인력과 경제적인 면에서 사실상 불가능하며, 오염물질의 복합 상승작용에 의해 생태계에 미치는 유해도의 증폭효과를 평가한다는 것은 더욱 어려운 일이다. 반면 생물군집은 환경의 영향을 받고 환경변화에 따라 기능적 변동을 하여 내재적 환경요인에 대한 종합적 정보를 담고 있으므로 생물학적 물환경 평가는 이화학적 수질평가에 앞서서 혹은 동시에 실시되어야 한다.

궁극적으로 생물학적 물환경 평가는 미지의 오염물질을 화학적으로 검출하기 위한 전제가 될 수 있다. 광범위한 수역에서 수질의 정밀 조사를 하고자 할 경우, 시간과 경제적인 비용이 적게 드는 생물학적 물환경 평가를 실시하여 오염 가능성이 있는 수역을 진단하고, 이후 화학적으로 오염물질을 추적한다면 매우 경제적인 것이다. 또한 제한된 이화학적 수질항목의 분석결과가 매우 양호한 것으로 판정된 수역에서도, 생물학적 물환경 평가 결과가 매우 불량하다면, 그 수역에 미지의 오염물질이 있다는 정보를 얻게 되며, 이런 경우 보다 광범위한 이화학적 수질항목에 걸쳐 정밀 조사 계획을 세우게 되는 것이다.

최근 들어 이화학적 분석결과가 물환경의 일시적, 단기적 상태의 반영이라는 단점을 극복하기 위한 방법으로 세계적으로 생물학적 물환경 평가에 대한 연구가 매우 활발하며

[†] To whom correspondence should be addressed.

drdoogy@kes.re.kr

실질적 응용단계로 접어들고 있다. 이는 수생생물이 생태계에서 일생의 전부 또는 대부분을 생활하므로 장기적인 물환경의 변화를 대변할 수 있기 때문이다. 다시 말해 장기간에 걸친 물환경의 변화는 종수 및 종조성의 변화로, 단기간의 변화는 개체수현존량 또는 생체량의 변화라는 반응으로 분석되어질 수 있기 때문이다.

생물학적 물환경 평가기법의 개발은 근본적으로는 하천에 서식하는 생물의 다양성을 보전하고 궁극적으로는 하천의 기능을 유지하며, 동시에 효율적인 수자원의 이용 및 관리를 가능케 하는 물환경 정책의 수립을 위해 필수적으로 요구되는 사항이다. 즉 물환경의 물리·화학적 요인에 대한 생물상의 반응 및 출현 정도에 대한 상관분석을 통하여 생물학적 물환경 평가기법을 정립하고, 이를 통한 지속적인 생물모니터링(biomonitoring)은 필수적인 것이다.

다양한 오염에 대한 물환경의 변화 분석에 있어서 저서성 대형무척추동물은 여러 가지 측면에서 그 유용성이 매우 높다(Metcalf-Smith, 1996). 이는 다음과 같이 정리될 수 있는데, 첫째, 다양한 오염에 대한 분별적인 민감성이 높다. 즉 분류군에 따라 민감한 오염원이 다르며, 오염에 대하여 빠른 반응을 보인다. 둘째, 대부분의 담수생태계,

특히 유수생태계에 다양한 종들이 풍부하게 분포하기 때문에 채집이 용이하고 보편성이 높으며 분류가 잘 정립되어 있다. 셋째, 이동성이 적어 지역적 환경을 잘 대변한다. 넷째, 환경질을 반영하기에 충분히 긴 생활사를 가진다. 마지막으로 각 분류군이 군집에서 다른 기능을 수행하며, 다양한 영양단계를 구성하고 있어 물환경의 변화에 따라 다양한 반응을 한다는 것이다. 저서성 대형무척추동물을 생물학적 물환경 평가에 이용하는 데에는 몇 가지 어려운 점도 있으나, 이러한 어려움에도 불구하고 저서성 대형무척추동물은 생물학적 물환경 평가에 오래전부터 가장 많이 이용되어오고 있는 생물군이며, 최근에도 저서성 대형무척추동물의 지표성을 이용한 생물학적 물환경 평가뿐만 아니라 수생태 건강성 평가에도 구미선진국을 비롯한 많은 국가에서 수행되고 있다(Table 1, 2).

본 연구에서는 국내의 하천에서 조사된 저서성 대형무척추동물 자료를 바탕으로 우리나라의 물환경에 적용이 가능한 생물학적 물환경 평가기법을 개발하는 데에 있다. 특히 우리나라 수계에 적용이 가능한 지표생물군을 선정하여 이들의 오락계급치와 지표가중치 산정을 통하여 생물학적 평가지수를 고안하고, 개발된 생물지수를 우리나라 수계에 적용여부를 파악하는 데에 목적이 있다.

Table 1. Biological water quality assessment index using benthic macroinvertebrates

Type	Index	Nation	References
Saprobic indices	Biologically Effective Organic Loading (BEOL)	Germany	Knöpp (1954)
	Saprobic index	Germany	Pantle et al. (1955)
	Saprobic valency	Germany	Zelinka et al. (1961)
	Coupling analysis	Germany	Buck (1974)
	Saprobic valency	Japan	Gose (1978)
	DIN system	Germany	Friedrich (1990)
	Saprobic index	Korea	Yun et al. (1992a)
	Integrated saprobic system	Austria	ÖNORM M6232 (1995)
Simplified indices	Family biotic index	USA	Hilsenhoff (1988)
	Group pollution index	Korea	Yun et al. (1992b)
	Higher taxa biotic index	Korea	Gong et al. (1995)
Biotic indices (formula based)	Biotic index	USA	Beck (1955)
	Biotic index	Japan	Tsuda (1964)
	Biotic index	South Africa	Chutter (1972)
	Biotic index	USA	Hilsenhoff (1977)
	Quality index	Netherlands	Tolkamp et al. (1977)
	Improved biotic index	USA	Hilsenhoff (1987)
	RIVAUD	Switzerland	Lang et al. (1989)
Biotic indices (based on standard tables)	Improved RIVAUD	Switzerland	Lang et al. (1995)
	Trent Biotic Index (TBI)	UK	Woodwiss (1964)
Biotic scores	Extended Trent Biotic Index (EBI)	UK	Woodwiss (1978)
	Biotic score	UK	Chandler (1970)
	Biological Monitoring Working Party Score (BMWP)	UK	Hellawell (1978)
	BMWP/Average Score Per Taxon (ASPT)	UK	Armitage et al. (1983)
	Total biotic score	Korea	Yun et al. (1992a)
Empirical model	Macroinvertebrates Community Index (MCI)	New Zealand	Stark (1993)
	River InVertebrate Prediction And Classification Scheme (RIVPACS)	UK	Wright et al. (1993)
	AUStralian RIVER Assessment System (AUSRIVAS)	Australia	Norris (1995)
	Benthic evaluation of ORegon rIverS (BORIS)	USA	Canale (1999)

Table 2. Ecological health assessment index using benthic macroinvertebrates

Type	System / Index	Nation	References
Integrated assessment system	The Development and Testing of an Integrated Assessment System for the Ecological Quality of Streams and Rivers throughout Europe using Benthic Macroinvertebrates (AQEM)	EU	AQEM Project Website (2006)
Multiple metric index	Rapid Bioassessment Protocols (RBPs)	USA	Plafkin et al. (1989) Barbour et al. (1999)
	Invertebrate Community Index (ICI)	USA	DeShon (1995)

2. 재료 및 방법

2.1. 문헌조사

과거에 조사되었던 저서성 대형무척추동물의 조사 자료를 파악하고, 분석을 위한 DB를 구축하였다. 현재 국내에는 1960년대부터의 저서성 대형무척추동물의 군집 자료가 존재하나, 분류체계 특히 하천에서 대부분을 차지하는 수서 곤충의 분류체계가 확립되고 환경부의 전국적인 수질측정망이 운영되었던 시기인 1989년도 이후의 자료를 주 대상으로 하였으며, 개체수 출현도를 비교하기 위하여 정량채집된 자료만을 분석대상으로 하였다.

2.2. 현장조사

생물학적 물환경 평가지수의 공간적 타당성 분석을 위하여 5대강 수계에서 지점을 선정하여 2004년도에 한강과 낙동강 수계에서 봄과 여름 조사를, 2005년도에는 금강, 영산강 및 섬진강 수계에서 겨울, 봄 및 여름 조사를 실시하였다. 또한 물환경의 시간적 변화에 따른 생물지수의 적용가능성 분석을 위하여 전년도 조사결과 및 수질측정망 자료를 바탕으로 오염 정도에 따라 3개 지점을 선정하여 2005년 3월부터 월별 조사를 실시하였다.

현장조사는 계류형 정량채집망인 Surber net(30×30 cm, 1.0 mm net mesh)을 이용하여 각 조사지점의 규모에 따라 여울(riffle)에서 2~4회씩 정량적으로 채집하는 것을 원칙으로 하였다. 채집된 시료는 현장에서 Kahle's solution(DW 59%, ethyl alcohol 28%, formaldehyde 11%, acetic acid 2%)에 고정하여 운반한 후, 골라내기(sorting)와 동정(identification)을 한 후에 80% 에탄올에 보존하였다.

2.3. 자료 분석

종출현도와 개체수 점유율은 생물군의 특성을 파악하는데 가장 기초적인 자료로 단위 종의 상대종출현도는 총 조사단위에서 종이 출현한 백분율로 산정하였으며, 단위면적당 출현개체수(inds./m²)는 각 종이 출현한 총 조사단위에서 평균·산출하여 지표생물군 선정, 오탁계급치 및 지표가중치의 산정에 이용하였다.

생물지수 중 Pantle 등(1995)에 의해 제안된 오수생물지수(S)는 상대출현도(h)의 범위에 정량적인 기준이 없고, 또한 Chandler(1970)에 의해 제안된 출현도 구간 역시 조사자와 조사범위에 따라 큰 변화가 있는 것으로 나타났다. 또한 윤 등(1992a)에 의하여 제안된 다양도지수를 근거로 한 4단계의 구분은 이화학적 수질을 정확하게 반영하지 못

한다는 단점이 있다.

따라서 각 종의 상대종출현도와 단위면적당 평균 출현개체수를 이용한 상대점유율을 산정하여 6개의 구간으로 구분·적용하여 각 지표생물군의 오탁계급치 및 평균 오탁계급치를 산출하였다. Zelinka 등(1961)의 오수생물계열 판정법에서는 정량적인 지수가 제안되지 않았던 바, 독일의 DIN 38410(1990)에서 제안한 계산방법을 이용하여 정량지수를 산출하였다. 지표가중치는 종래의 Sladeczek (1965)이나 Gose(1978)의 기준표에 통계적 근거가 약한 것으로 판단되어 윤 등(1992a)이 오탁계급치를 도수로 한 단위오탁지수의 분산도 분석에 의한 구간설정법을 표준으로 5단계로 구분하여 산출하였다. 한편 생물지수와 비교를 위하여 이용된 이화학적 수질은 모두 환경부 수질측정망 자료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 한국오수생물지수(Korean Saprobic Index, KSI)의 개발

3.1.1. 지표생물군의 선정

1989년 이후 하천에서 조사된 689개 및 2004~2005년 전국 수계에서 조사된 224개의 총 913개 조사단위의 정량 자료를 단위면적당 개체수(inds./m²)로 환산하여 출현개체수의 상대비교를 할 수 있도록 표준화하였다. 정리된 자료를 바탕으로 상대출현빈도 및 출현한 조사단위별 평균출현개체수를 산출하여 생물학적 수질평가기법에 이용될 수 있는 100개의 지표생물군을 선정하였다(Appendix).

유사한 오탁계급치를 보이는 분류군의 경우 가능한 단일한 지표생물군으로 묶는 방식을 취하여 저서성 대형무척추동물의 지표생물군을 재정리하였다. 이 중에는 속(Genus), 과(Family) 또는 목(Order) 수준에서 정리된 것이 있는데 이는 일부 종의 동정 또는 분류가 불명확한 경우가 있거나 한 분류 카테고리에 포함되는 주요 출현종들이 동일한 물 환경에서 출현한 경우가 있기 때문이다. 전자의 예로 깔다구류(Chironomidae)의 경우 상류 발원지로부터 연안에 이르기까지 대부분의 수역에 서식하고 있으나 국내에서는 유충에 대한 분류가 이루어지지 않았기 때문에 오염수역의 지표종으로 인정받고 있는 붉은 깔다구류만을 지표생물군으로 포함시켰다. 붉은깔따구류를 제외한 나머지 깔다구류는 전 수역에서 폭넓게 출현하고 있는 것으로 분석되어 지표성이 매우 감소되는 것으로 나타났다.

또한 후자의 경우 우리나라에 서식하는 하루살이류 중

민하루살이속에는 현재까지 두 종이 알려져 있는데 모두 수질기준 I 등급 중에서도 매우 청정한 수역에서만 출현하고 있는 것으로 분석되었으며, 마찬가지로 빨하루살이속도 같은 경우에 해당된다. 또한 강도래목의 경우는 전 분류군이 청정한 수질기준 I 등급에서만 서식하는 것으로 분석되어 하나의 지표생물군으로 정리하였다.

3.1.2. 오락계급치 및 지표가중치의 산정

총 913개의 조사단위에서 얻어진 정량자료를 바탕으로 선정된 지표생물군의 오락계급치 및 지표가중치를 산정하였다(Appendix). 각 지표생물군의 오락계급치는 각 생물군의 상대종출현도와 단위면적당 평균 출현개체수를 이용하여 상대점유율을 산정하고, 6개의 구간으로 구분·적용하여 산출하였다. 지표가중치는 종래의 Sladeczek(1965)이나 Gose(1978)의 기준표에 통계적 근거가 약한 것으로 판단되어, 윤 등(1992a)이 제안한 오락계급치를 도수로 한 단위오탁지수의 분산도에 따른 구간설정법을 이용하여 5단계로 구분·산출하였다.

3.1.3. 한국오수생물지수의 산출

Zelinka 등(1961)에 의해 제안된 바 있는 오수생물계열 판정법에서는 정량적인 지수가 제안되지 않았던 바, 이를 정량화하여 제안한 독일 DIN 38410(1990)을 기본으로 하고, 윤 등(1992a)의 계산법을 참고로 하여 정량지수를 산출하였다. 한국오수생물지수는 식 (1)에 의거하여 산출하였다.

$$KSI = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot A_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot G_i} \quad (1)$$

- KSI 한국오수생물지수
- i 지정된 지표생물군의 일련번호
- n 출현한 지표생물군의 총수
- si i 지표생물군의 오락계급치
- Ai i 지표생물군의 출현개체수
- Gi i 지표생물군의 지표가중치

3.2. 한국오수생물지수의 적용

3.2.1. 공간적 물환경 변화에의 적용

2004년도에 조사되었던 한강 및 낙동강 수계의 조사지점에 대하여 한국오수생물지수를 적용한 결과는 Fig. 1(a), 1(b)와 같다(Table 3, 4). 유의성이 떨어지는 지점은 두 가지의 경우로 구분하여 볼 수 있다. 한가지의 경우는 광려천1과 같이 하천 및 유역에서의 공사로 인한 서식처 파괴로 인한 것으로 이화학적인 수질요인보다는 물리적인 교란에 의한 경우이고, 두 번째는 낙동강 본류인 상주3, 남강3 등과 같이 하천의 규모가 크고 하상이 모래로 구성되어있어 채집이 어려운 지점의 경우로 실제 조사 시 물이 흐르

는 주요부분에서의 채집이 곤란하여 결국 하천의 변에 가까이서 채집이 시도되므로 수변부(lotic-margin)의 퇴적층에 주로 서식하는 오염에 내성이 있는 종들만이 채집되게 되므로 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 이들 지역들은 BOD₅ 농도에 의하여 나타날 수 있는 지수값보다 두 배 이상 증가되어 나타났다.

첫 번째의 경우에는 사후 서식처가 안정화되면 저서성 대형무척추동물의 군집이 회복될 가능성이 있으며, 또 하나 중요한 점은 하상교란과 같은 물리적 환경변화도 한국오수생물지수가 반영할 수도 있다는 가능성을 내포하고 있다는 점이다. 그러나 두 번째의 경우에는 하천의 기본적인 형상이므로 채집방법의 변화가 있어야 되나 보트를 이용하는 등의 시간적, 경제적 비용이 따르게 될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 걸어서 건널 수 있는 하천(streams and wadable rivers)이 주 대상이므로 이들 지역은 자료 분석에

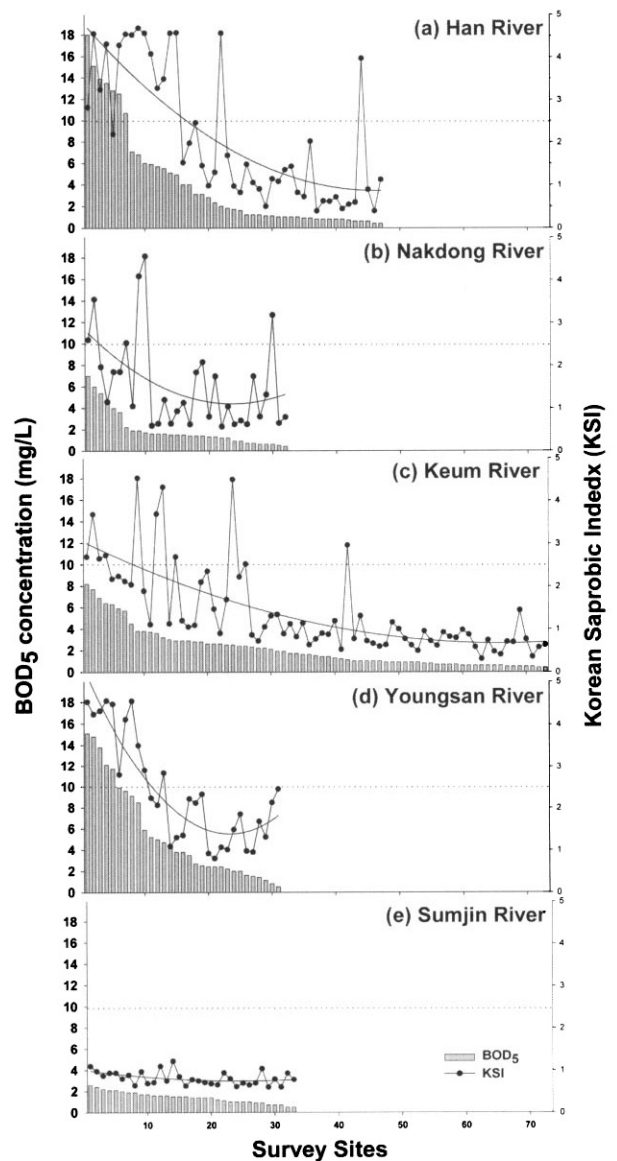


Fig. 1. Relationship between KSI and BOD₅ concentration at each river.

Table 3. Comparison between BOD₅ concentration and Korean Saprobic Index in Han River, 2004

Site	Season	BOD ₅ (mg/L)		KSI		Remark
		Value	Class ¹	Value	Class	
Gapyeong stream 1	Spring	0.8	Ia / I	0.39	I	
	Summer	0.4	Ia / I	0.39	I	
Gapyeong stream 2	Spring	0.9	Ia / I	0.72	I	
	Summer	0.6	Ia / I	0.59	I	
Gapyeong stream 3	Spring	1.7	Ib / I	0.97	II	
	Summer	0.8	Ia / I	0.62	I	
Gyoungan stream 3	Spring	15.1	VI / -	4.55	V	
	Summer	18.0	VI / -	2.82	IV	
Gyoungan stream 4	Spring	13.5	VI / -	4.31	V	
	Summer	12.8	VI / -	2.19	III	
Golji stream 2	Spring	-	-	-	-	
	Summer	0.4	Ia / I	1.12	II	
Naerin stream 1	Spring	0.8	Ia / I	0.61	I	
	Summer	-	-	-	-	
Naerin stream 2	Spring	0.7	Ia / I	0.54	I	
	Summer	-	-	-	-	
Bokha stream 1	Spring	1.8	Ib / I	1.69	II	
	Summer	1.2	Ib / I	1.48	II	
Bokha stream 3	Spring	5.7	IV / III	3.27	IV	
	Summer	3.1	III / III	2.46	III	
Sin stream 1	Spring	6.8	IV / IV	4.68	V	
	Summer	6.0	IV / IV	4.56	V	
Sin stream 2	Spring	4.9	III / III	4.57	V	Sub. ² sand
	Summer	5.1	III / III	4.56	V	Sub. ² sand
Youngpyoung stream 1	Spring	0.6	Ia / I	3.97	V	Sub. ² perturbation
	Summer	1.6	Ib / I	0.82	II	
Odae stream 1	Spring	1.1	Ib / I	0.50	I	
	Summer	0.9	Ia / I	2.02	III	
Odae stream 2	Spring	0.8	Ia / I	0.71	I	
	Summer	0.8	Ia / I	0.44	I	
Wangsuk stream 1	Spring	2.8	II / II	0.98	II	
	Summer	1.0	Ib / I	1.08	II	
Wangsuk stream 2	Spring	2.3	II / II	1.29	II	
	Summer	1.0	Ib / I	1.35	II	
Wonju stream 1	Spring	1.1	Ib / I	1.14	II	
	Summer	1.0	Ib / I	1.43	II	
Wonju stream 2	Spring	2.0	II / I	4.56	V	Sub. ² perturbation
	Summer	5.9	IV / III	4.08	V	Sub. ² perturbation
Cheongmi stream 1	Spring	10.7	VI / -	4.54	V	
	Summer	7.1	IV / IV	4.52	V	
Cheongmi stream 3	Spring	3.1	III / III	1.45	II	
	Summer	4.0	III / III	1.52	II	
Tan stream 2	Spring	12.5	VI / -	4.28	V	
	Summer	13.9	VI / -	3.24	IV	
Tan stream 3	Spring	5.5	IV / III	3.49	V	
	Summer	4.0	III / III	1.98	III	
Pyoungchang River 1	Spring	0.6	Ia / I	0.89	II	
	Summer	1.2	Ib / I	1.05	II	
Pyoungchang River 2	Spring	1.0	Ib / I	0.82	II	
	Summer	1.2	Ib / I	0.90	II	

¹ New class of water quality / Existing class of water quality² Substrate

서 배제되어도 무방할 것으로 판단된다.

금강 수계에서 한국오수생물지수와 수질등급(BOD₅ 농도)을 비교한 결과는 Fig. 1(c)와 같다(Table 5). 조사지점 중에서 대전천3과 갑천4의 경우 BOD₅ 농도와 한국오수생물지수를 통한 수질등급에 있어 큰 차이를 보였는데, 대전천3의 경우 조사시기를 기준으로 BOD₅에 의한 수질이 II ~ III 등급으로 평가되었으나 한국오수생물지수값에 의해서는 V

등급으로 나타났다. 이러한 결과는 오염지표생물인 실지렁이와 붉은깔따구류 두 종의 높은 개체수 현존량 때문으로 지수의 산출과정에 이들의 특정 분류군의 매우 높은 점유율이 지수값 자체에 많은 영향을 주기 때문이다. 일반적으로 군집 내에서 생체량이 큰 종일수록 그 개체수 현존량은 낮게 나타나는 반면 생체량이 적을수록 개체수 현존량이 높아지므로 일반적으로 군집 내에서 소수의 개체수를 가지

Table 4. Comparison between BOD₅ concentration and Korean Saprobic Index in Nakdong River, 2004

Site	Season	BOD ₅ (mg/L)		KSI		Remark
		Value	Class ¹	Value	Class	
Gyoungho River 1	Spring	-	-	-	-	
	Summer	1.6	Ib / II	0.59	I	
Kwangnyeo stream 1	Spring	1.9	Ib / II	4.09	V	Sub. ² perturbation
	Summer	4.8	III / III	1.15	II	
Kwangnyeo stream 2	Spring	1.4	Ib / II	2.08	III	
	Summer	1.4	Ib / II	1.84	III	
Kwangnyeo stream 3	Spring	3.6	III / III	1.85	III	
	Summer	2.6	II / II	-	-	
Keumho River 1	Spring	1.5	Ib / II	0.64	I	
	Summer	1.3	Ib / II	0.80	II	
Keumho River 3	Spring	6.0	IV / IV	3.55	V	
	Summer	5.4	IV / III	1.97	III	
Keumho River 6	Spring	7.0	IV / IV	2.60	IV	
	Summer	4.0	III / III	1.85	III	
Nam River 1	Spring	1.3	Ib / II	1.75	III	
	Summer	1.9	Ib / II	1.05	II	
Nam River 3	Spring	-	-	-	-	
	Summer	2.2	II / II	2.53	IV	Sub. ² sand
Naesung stream 1	Spring	0.5	Ia / I	0.65	I	
	Summer	0.9	Ia / I	0.62	I	
Naesung stream 2	Spring	0.7	Ia / I	1.75	III	Sub. ² sand
	Summer	0.7	Ia / I	0.62	I	Sub. ² sand
Miryang River 1	Spring	0.9	Ia / I	0.71	I	
	Summer	1.5	Ib / II	1.13	II	
Sangju 1	Spring	0.6	Ia / I	1.32	II	
	Summer	1.4	Ib / II	0.62	I	
Sangju 3	Spring	0.6	Ia / I	3.18	IV	Sub. ² sand
	Summer	1.7	Ib / II	4.56	V	Sub. ² sand
Yangsan stream 1	Spring	1.2	Ib / II	1.04	II	
	Summer	1.6	Ib / II	1.20	II	
Yongjeon stream 2	Spring	0.6	Ia / I	0.80	II	
	Summer	1.6	Ib / II	0.64	I	
Imcheon River 1	Spring	-	-	-	-	
	Summer	1.2	Ib / II	0.57	I	
Cheoram stream	Spring	-	-	-	-	
	Summer	0.4	Ia / I	0.79	I	
Hamyang Wyi stream 1	Spring	-	-	-	-	
	Summer	1.5	Ib / II	0.93	II	

¹ New class of water quality / Existing class of water quality

² Substrate

는 지표분류군이 상대적으로 작은 생체량과 높은 개체수 현존량을 나타내는 지표분류군에 의하여 그 가치가 줄어드는 문제는 현재 고안되어 시험 중이다. 특히 한국오수생물지수 값이 이화학적 수질보다 높게 평가된다면 이화학적인 수질오염보다는 물리적 교란(하상 교란, siltation 등)이나 미지의 독성물질의 유입 등과 같은 다른 요인이 있음을 추측할 수 있는데 이는 장기적인 모니터링을 통하여 검증할 필요가 있다. 반면 수질 IV ~ V 등급을 보이는 갑천4의 경우 한국오수생물지수에서는 III등급으로 나타나 비교적 좋은 환경으로 나타났으나, 수질측정지점보다 상류에 위치한 탐립돌보에서 조사가 이루어져 물리적인 서식처의 안정 등으로 인한 생물상 회복에 의한 것으로 판단된다.

영산강 수계의 한국오수생물지수와 수질등급(BOD₅ 농도)을 비교한 결과는 Fig. 1(d)와 같다(Table 6). 이 수계에서도 상대적으로 일변동 및 월변동값이 다소 있는 BOD₅ 농

도에 따른 수질등급과 한국오수생물지수에 의한 등급은 거의 일치하는 양상을 보이고 있다. 하지만 광주천1의 경우 낮은 BOD₅ 농도에 비하여 한국오수생물지수는 낮게 평가되고 있는 것으로 나타났다. 실제로 이 지점은 주변도로 확장을 위하여 공원화와 같은 하천 정비가 이루어진 지역으로 정확한 수질측정지점의 확인이 필요하다. 현지조사 시에는 물에서 냄새가 나는 등 일견 좋은 수질은 아닌 것으로 판단되었기 때문이다.

섬진강 수계의 한국오수생물지수와 수질등급을 비교한 결과는 Fig. 1(e)와 같다(Table 7). 섬진강의 경우 전 조사 지점에 걸쳐 월별 BOD₅ 농도는 다소 적은 변동값을 보였으며 이에 따른 수질등급과 한국오수생물지수에 의한 등급은 유사하게 나타났다. 이는 섬진강 수계가 상류에서 하류까지 매우 양호한 물환경을 유지하고 있으며, 아울러 수질도 매우 좋은 상태를 유지하고 있다. 이러한 물리·화학적

Table 5. Comparison between BOD₅ concentration and Korean Saprobic Index in Keum River, 2005

Site	Season	BOD ₅ (mg/L)		KSI		Remark
		Value	Class ¹	Value	Class	
Gamak	Winter	1.4	Ib / II	0.90	II	
	Spring	1.2	Ib / II	0.52	I	
	Summer	0.9	Ia / I	1.16	II	
Yongpo	Winter	0.6	Ia / I	0.58	I	
	Spring	0.5	Ia / I	0.35	I	
	Summer	0.8	Ia / I	0.72	I	
Jaewon	Winter	0.5	Ia / I	0.70	I	
	Spring	0.4	Ia / I	0.63	I	
	Summer	1.0	Ia / I	0.59	I	
Yeongdong	Winter	0.7	Ia / I	0.61	I	
	Spring	0.7	Ia / I	0.79	I	
	Summer	0.9	Ia / I	0.49	I	
Okcheon	Winter	0.6	Ia / I	0.30	I	
	Spring	0.8	Ia / I	0.95	II	
	Summer	0.9	Ia / I	0.62	I	
Hyundo	Winter	0.7	Ia / I	0.82	II	
	Spring	0.9	Ia / I	1.00	II	
	Summer	0.5	Ia / I	1.44	II	
Yeongi	Winter	2.6	II / II	1.47	II	
	Spring	3.8	III / III	1.89	III	
	Summer	5.9	IV / III	2.24	III	
Gongju 1	Winter	2.8	II / II	1.09	II	
	Spring	2.9	II / II	1.20	II	
	Summer	5.7	IV / III	2.12	III	
Bonghwang stream	Winter	0.6	Ia / I	0.98	II	
	Spring	1.4	Ib / II	0.87	II	
	Summer	2.1	Ib / II	1.31	II	
Yeongdong stream 1	Winter	0.5	Ia / I	0.69	I	
	Spring	0.5	Ia / I	0.76	I	
	Summer	1.0	Ia / I	1.31	II	
Yeongdong stream 2	Winter	0.6	Ia / I	0.87	II	
	Spring	0.9	Ia / I	0.77	I	
	Summer	1.6	Ib / II	1.14	II	
Choi River 2	Winter	1.0	Ia / I	0.66	I	
	Spring	0.4	Ia / I	0.57	I	
	Summer	0.6	Ia / I	0.74	I	
Bocheong stream 1	Winter	0.9	Ia / I	0.63	I	
	Spring	0.6	Ia / I	0.40	I	
	Summer	0.6	Ia / I	0.47	I	
Bocheong stream 2	Winter	1.0	Ia / I	0.77	I	
	Spring	0.7	Ia / I	0.92	II	
	Summer	1.0	Ia / I	0.72	I	
Okcheon stream	Winter	1.7	Ib / II	1.12	II	
	Spring	2.2	II / II	1.05	II	
	Summer	3.7	III / III	1.11	II	
Daejeon stream 1	Winter	2.5	II / II	1.69	II	
	Spring	1.9	Ib / II	1.34	II	
	Summer	2.4	II / II	2.52	III	
Daejeon stream 3	Winter	3.2	III / III	4.32	V	Sub. ² perturbation
	Spring	2.5	II / II	4.50	V	Sub. ² perturbation
	Summer	3.8	III / III	4.53	V	Sub. ² perturbation
Yudeung stream 1	Winter	1.5	Ib / II	0.76	I	
	Spring	1.6	Ib / II	0.63	I	
	Summer	1.9	Ib / II	0.89	II	
Yudeung stream 5	Winter	2.6	II / II	2.35	III	Sub. ² perturbation

	Spring	2.9	II / II	2.69	IV	Sub. ² perturbation
	Summer	3.6	III / III	3.69	V	Sub. ² perturbation
Gap stream 1	Winter	1.7	Ib / II	0.82	II	
	Spring	2.3	II / II	0.86	II	
	Summer	2.9	II / II	1.05	II	
Gap stream 2	Winter	2.2	II / II	0.72	II	
	Spring	2.6	II / II	0.90	II	
	Summer	3.0	II / II	1.13	II	
Gap stream 4	Winter	6.3	IV / IV	2.17	III	
	Spring	8.2	V / V	2.69	IV	
	Summer	6.9	IV / IV	2.65	IV	
Miho stream 3	Winter	2.4	II / II	2.22	III	
	Spring	2.6	II / II	N/A	N/A	
	Summer	4.3	III / III	N/A	N/A	
Miho stream 6	Winter	4.5	III/ III	2.04	III	
	Spring	6.4	IV / IV	2.73	III	
	Summer	7.7	IV / IV	3.68	V	
Nonsan stream 2	Winter	1.3	Ib / II	1.19	II	
	Spring	1.1	Ib / II	2.96	IV	?
	Summer	2.8	II / II	2.10	III	

¹ New class of water quality / Existing class of water quality

Table 6. Comparison between BOD₅ concentration and Korean Saprobic Index in Youngsan River, 2005

Site	Season	BOD ₅ (mg/L)		KSI		Remark
		Value	Class ¹	Value	Class	
Kwangju 1	Winter	2.5	II / II	2.33	III	
	Spring	5.9	IV / III	2.91	IV	
	Summer	3.5	III / III	2.22	III	
Kwangju 2	Winter	11.7	VI / -	4.48	V	
	Spring	15.1	VI / -	4.53	V	
	Summer	13.8	VI / -	4.32	V	
Kwangsan	Winter	5.0	III / III	2.07	III	
	Spring	5.2	IV / III	2.24	III	
	Summer	9.9	V / V	2.80	IV	
Naju	Winter	4.7	III / III	2.84	IV	
	Spring	8.5	V / V	3.51	V	
	Summer	9.6	V / V	4.12	V	
Hwangryong River 2	Winter	1.6	Ib / II	0.98	II	
	Spring	2.4	II / II	0.92	II	
	Summer	1.5	Ib / II	0.95	II	
Hwangryong River 3	Winter	4.4	III / III	1.09	II	
	Spring	3.8	III / III	1.30	II	
	Summer	3.8	III / III	1.35	II	
Kwangju stream 1	Winter	0.8	Ia / I	2.13	III	Unreliable site
	Spring	0.5	Ia / I	2.45	III	Unreliable site
	Summer	2.7	II / II	2.12	III	Unreliable site
Kwangju stream 2	Winter	9.1	V / V	4.55	V	
	Spring	12.1	VI / -	4.56	V	
	Summer	14.8	VI / -	4.24	V	
Jiseok stream 1	Winter	1.4	Ib / II	1.68	II	
	Spring	1.1	Ib / II	1.31	II	
	Summer	2.0	Ib / II	1.49	II	
Jiseok stream 2	Winter	2.2	II / II	1.01	II	
	Spring	2.4	II / II	0.80	II	
	Summer	2.4	II / II	1.07	II	
Hampyeong stream 2	Winter	2.0	Ib / II	1.85	III	
	Spring	2.4	II / II	N/A	N/A	
	Summer	3.0	II / II	N/A	N/A	

¹ New class of water quality / Existing class of water quality

Table 7. Comparison between BOD₅ concentration and Korean Saprobic Index (KSI) in Sumjin River, 2005

Site	Season	BOD ₅ (mg/L)		KSI		Remark
		Value	Class ¹	Value	Class	
Gwanchon	Winter	0.7	Ia / I	0.60	I	
	Spring	0.7	Ia / I	0.60	I	
	Summer	1.0	Ia / I	0.65	I	
Unam	Winter	1.5	Ib / II	1.22	II	
	Spring	1.1	Ib / II	0.94	II	
	Summer	0.9	Ia / I	1.04	II	
Imsil	Winter	1.0	Ia / I	0.80	II	
	Spring	1.0	Ia / I	0.70	I	
	Summer	0.7	Ia / I	0.79	I	
Jeokseong	Winter	1.4	Ib / II	0.75	I	
	Spring	0.5	Ia / I	0.78	I	
	Summer	2.4	II / II	0.98	II	
Namwon	Winter	1.6	Ib / II	0.71	I	
	Spring	1.5	Ib / II	0.63	I	
	Summer	2.0	Ib / II	0.80	II	
Godal	Winter	1.4	Ib / II	0.68	I	
	Spring	1.9	Ib / II	0.89	II	
	Summer	4.4	III / III	0.94	II	
Gokseong	Winter	0.9	Ia / I	0.70	I	
	Spring	1.6	Ib / II	1.10	II	
	Summer	2.6	II / II	1.10	II	
Gyesan	Winter	1.2	Ib / II	0.66	I	
	Spring	1.9	Ib / II	0.64	I	
	Summer	1.6	Ib / II	0.75	I	
Gurye	Winter	1.4	Ib / II	0.78	I	
	Spring	2.2	II / II	0.87	II	
	Summer	2.1	II / II	0.94	II	
Yo stream	Winter	1.7	Ib / II	0.97	II	
	Spring	0.5	Ia / I	0.93	II	
	Summer	1.7	Ib / II	0.69	I	
Boseong stream	Winter	1.0	Ia / I	0.61	I	
	Spring	1.4	Ib / II	0.71	I	
	Summer	1.5	Ib / II	0.85	II	

¹ New class of water quality / Existing class of water quality

물환경을 반영하여 생물학적 물환경 상태도 매우 양호한 것으로 나타나고 있다.

5대강 수계에 대한 전체적인 등급비교를 하면 하상이 모래로만 구성되어있는 낙동강 본류 수계의 조사지점을 제외하면 대부분의 조사지점에서 수질등급과 한국오수생물지수는 많은 부분에서 일치하는 것으로 나타나 전국 수계에의 적용에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 단지 조사지점의 환경 및 조사시기별로 보면 약간의 차이가 나타나는데, 이는 계절적인 요인(집중호우 등) 및 인위적인 간섭(하천정비 공사 등)에 의한 것으로 이러한 물리적 교란요인에 관한 것들만 조사 시에 파악될 수 있다면 전국 수계에 적용하는 데에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

3.2.2. 시간적 물환경 변화에 대한 적용

한국오수생물지수의 시간적 적용성의 분석을 위해 선정된 조사지점의 2000년 이후의 각 수질항목별 평균 측정치는

Table 8과 같다. 각 월별 평균 BOD₅ 농도는 청정한 자연환경을 유지하고 있는 가평천¹의 경우 농도의 변화가 매우 적고, 수질오염 등 다양한 교란요인이 존재하는 탄천³의 경우에는 그 농도의 변화가 매우 심하게 나타났다(Fig. 2).

한국오수생물지수와 BOD₅ 농도와의 관계를 보면 조사지점 전부에서 월 BOD₅ 농도가 현지조사 전 1년 평균 BOD₅ 농도의 변화폭보다 크게 나타났으며, 이에 비하여 한국오수생물지수의 변화폭은 매우 적은 것으로 나타났다(Table 9, Fig. 2). 이러한 결과는 BOD₅ 농도와 같은 화학적인 수질은 시간별, 일별, 주별, 월별 등의 시간적 요인과 조사정점 등의 상황에 따라 매우 민감하게 변화하는 것에 반하여 한국오수생물지수의 경우에는 일시적인 변화보다는 중·장기적 수질의 변화양상에 따라 반응하는 것으로 판단할 수 있다. 이에 대한 모니터링은 차후 더 진행되어야 명확한 판단을 할 수 있을 것으로 보이며, 어떠한 경우이든 한 번의 조사로 이전의 물환경 변화양상을 대변할 수 있는 한국오

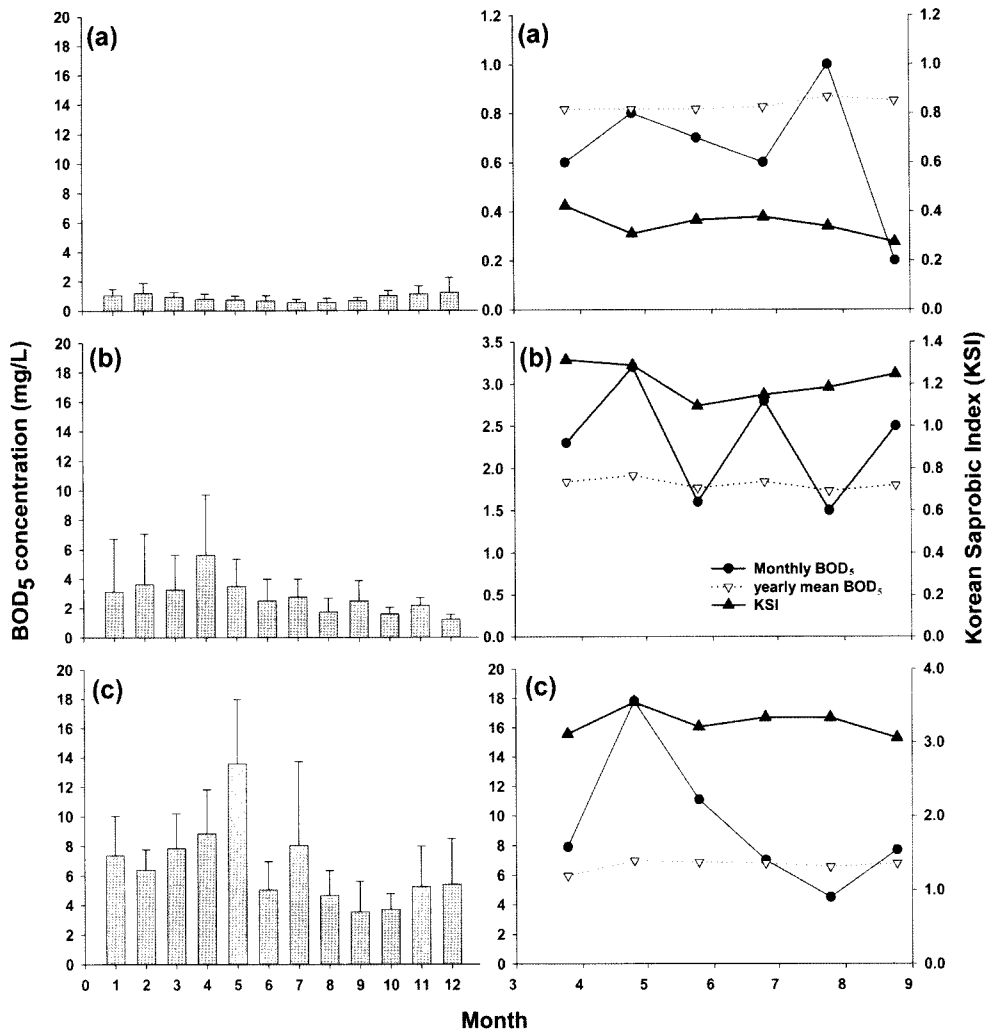


Fig. 2. Monthly changes of average BOD₅ concentration (left) and relationship between KSI value, and monthly and yearly mean BOD₅ concentration at each sites from 2000. (a) Kapyeong stream 1, (b) Wangsug stream 2, (c) Tan stream 3.

Table 8. Mean chemical water quality factors in each sites from 2000 to 2006

Site / Item		pH	DO (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Gapyeong stream 1	AVG	7.4	10.1	0.9	1.4	0.8	2.336	0.054
	STD	0.4	1.7	0.5	0.4	0.6	1.079	0.075
	MIN	6.9	8.0	0.2	0.6	0.4	0.763	0.001
	MAX	8.4	16.2	3.0	2.4	4.0	6.461	0.322
Wangsug stream 2	AVG	7.9	9.8	2.8	4.8	5.0	7.070	0.105
	STD	0.8	2.3	2.3	2.2	3.1	2.915	0.103
	MIN	4.7	5.3	0.8	1.8	1.0	2.680	0.007
	MAX	10.0	14.8	11.0	12.3	15.5	15.820	0.553
Tan stream 3	AVG	7.7	9.2	6.9	8.5	12.6	8.275	0.475
	STD	0.6	2.3	3.9	2.5	10.3	3.081	0.321
	MIN	6.6	4.6	2.2	3.9	1.0	2.961	0.034
	MAX	9.2	13.8	19.4	15.5	57.0	16.880	1.510

수생물지수의 개발 및 적용은 매우 필수적인 것으로 판단된다.

3.3. 이화학적 수질과의 연계성

생물학적 하천환경 평가기법의 도입 목적은 이화학적 수질이 시간적 변화에 따라 조사정점에 따라 많은 변이 폭을

보이고, 그 순간만의 물환경을 나타내주기 때문에 월 조사라고 해도 이화학적 수질의 변화폭과 한국오수생물지수의 변화폭에는 많은 차이가 있다. 시간적 변동에 대한 검토에서 한국오수생물지수는 단기간에 변화하는 수질농도를 반영하는 것이 아니고 중·장기적인 수질의 변화양상을 직접적으로 반영하는 것이므로 최소한 현지조사 전 1년 정도의

Table 9. Monthly comparison between KSI and BOD₅ concentration in each sites

Site / Item	BOD ₅ (mg/L)				KSI		
	Yearly mean value	Class ¹	Monthly value	Class ¹	Value	Class ²	
Gapyeong stream 1	Mar	0.8	Ia / I	0.6	Ia / I	0.42	Ia / I
	Apr	0.8	Ia / I	0.8	Ia / I	0.31	Ia / I
	May	0.8	Ia / I	0.7	Ia / I	0.37	Ia / I
	Jun	0.8	Ia / I	0.6	Ia / I	0.38	Ia / I
	Jul	0.9	Ia / I	1.0	Ia / I	0.34	Ia / I
	Aug	0.9	Ia / I	0.2	Ia / I	0.28	Ia / I
Wangsug stream 2	Mar	1.8	Ib / II	2.3	II / II	1.31	II / II
	Apr	1.9	Ib / II	3.2	III / III	1.29	II / II
	May	1.8	Ib / II	1.6	Ib / II	1.10	Ib / II
	Jun	1.8	Ib / II	2.8	II / II	1.15	Ib / II
	Jul	1.7	Ib / II	1.5	Ib / II	1.18	Ib / II
	Aug	1.8	Ib / II	2.5	II / II	1.25	II / II
Tan stream 3	Mar	6.0	IV / III	7.9	IV / IV	3.11	IV / IV
	Apr	7.0	IV / IV	17.8	VI / -	3.55	V / V
	May	6.9	IV / IV	11.1	VI / -	3.21	IV / IV
	Jun	6.8	IV / IV	7.0	IV / IV	3.34	IV / IV
	Jul	6.6	IV / IV	4.5	III / III	3.33	IV / IV
	Aug	6.8	IV / IV	7.7	IV / IV	3.06	IV / IV

¹ new / existing water quality standard

² proposed biological 7 classes / 5 classes

평균 수질자료와의 비교가 필요하다. 이러한 점에서 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 물환경 평가기법의 적용은 낮은 비용에 의한 높은 물관리 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

이화학적 수질과 한국오수생물지수와의 연계성을 파악하기 위하여 각 조사지점에서 측정된 유기물, 영양염류 등과 한국오수생물지수 간의 비선형회귀분석을 통한 상관성을 파악하였다. 여기서는 한국오수생물지수가 반영하는 수질항목을 파악하기 위하여 물리적인 물환경 변화에 의하여 한국오수생물지수가 영향을 받은 지점은 제거하고 분석을 실시하였다. 분석한 결과 유기물지표로 이용되는 BOD₅ 농도와 COD 농도와는 높은 상관성을 가지며, 그 다음으로 영양염류(TN, TP 등) 및 전기전도도와도 비교적 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 부유물질(SS)과는 매우 낮은 상관성을 지니는 것으로 나타났다(Fig. 3).

2004년도 한강과 낙동강에서 조사된 자료를 바탕으로 이화학적 수질, 특히 유기물의 정도를 의미하는 BOD₅ 농도와 한국오수생물지수의 상관성($r=0.972$, $r^2=0.944$, $p<0.0001$)은 매우 높게 나타났으며, 5대강을 대상으로 한 한국오수생물지수와 BOD₅ 농도의 상관성($r=0.933$, $r^2=0.870$, $p<0.0001$)도 상당히 높게 나타났다(Fig. 4). Fig. 4(a)는 한강과 낙동강을 대상으로 한국오수생물지수와 이화학적 수질, 특히 BOD₅ 농도와의 상관성을 보기위한 비선형회귀분석을 실시한 결과이며, 이화학적 수질과의 직접적인 관계를 설정하기 위하여 7등급으로 구분한 것이다. Fig. 4(b)는 5대강 자료를 바탕으로 비선형회귀분석을 실시한 결과로 이화학적 수질에 앞서 생물을 고려하여 5개의 등급으로 구분하여 나타낸 것이다. 결과로 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학

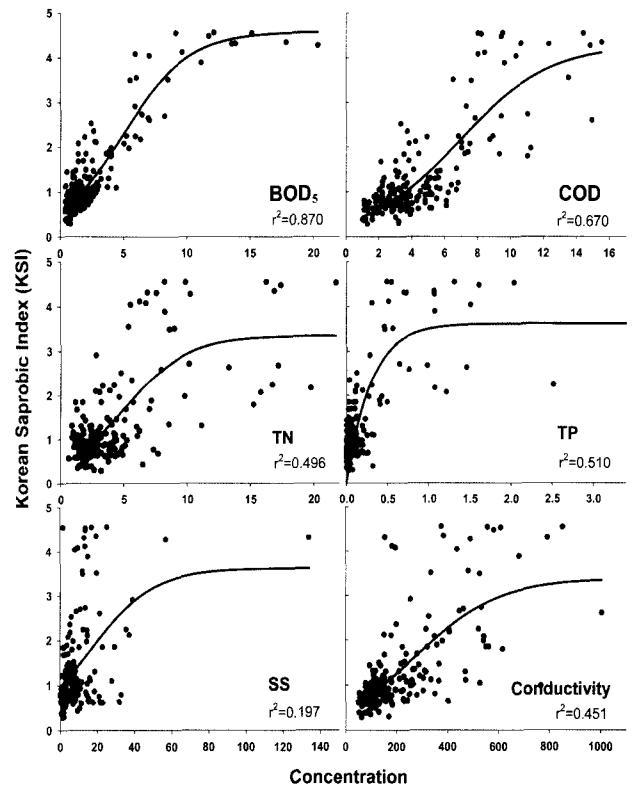


Fig. 3. Relationship between KSI and chemical water quality factors.

적 물환경 평가지수, 즉 한국오수생물지수는 하천생태계의 변화를 전반적으로 반영하면서도 하상교란 등의 물리적 변화가 거의 없다면 이화학적인 요인의 변화에 따라 반응한다는 것을 보여주고 있어 한국오수생물지수가 유기물 오염

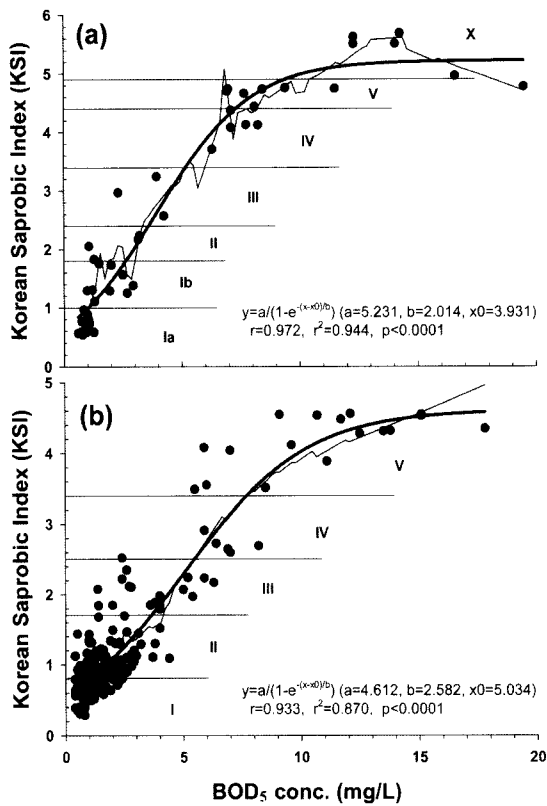


Fig. 4. Relationships between KSI and BOD₅ concentration (Korean Saprobic Index(KSI), (a) 7 classes, (b) 5 classes).

의 직접적인 지표로서 뿐만 아니라 생태계의 건강성을 평가하는 데에도 이용가능하다는 것을 잘 나타내 주고 있다.

3.4. 생물 기준안

생물기준 7등급안(Table 10)은 이화학적 수질과의 연계성을 우선으로 고려하여 구분된 것으로 실제로 저서성 대형무

척추동물 군집이 Fig. 4(a)의 결과와 같이 전체적으로 높은 상관성을 가지며 유기물 농도를 직접적으로 반영한다고 하여도 수질 Ib~II 등급의 경우에는 예민하게 반응하기 어려운 단점이 분석결과 일부 나타났으며, 이러한 문제는 지표생물군의 단위오탁계급치 산정 시에도 나타난 문제로 실제로 이 정도의 등급범위를 한국오수생물지수로서 명확히 구분한다는 것에는 많은 무리가 따르는 것으로 판단된다.

그래서 한국오수생물지수로서 구분이 모호한 등급의 해결 및 저서성 대형무척추동물이 단순히 이화학적인 수질만을 반영하는 것이 아니라 하천생태계의 건강성을 총체적으로 반영한다는 기초적인 이론 하에서 Table 11과 같은 생물만의 독립적인 등급안을 제시하게 되었으며, 여기에 BOD₅ 농도의 범위를 기재함으로써 이화학적 수질에 의존하지 않는 생태계의 건강성을 총체적으로 반영하는 생물만의 독자적인 기준안을 제시하고자 하였다. 이러한 5등급안을 적용한 결과는 일정 부분 이화학적 수질을 반영하면서 나아가 생태계의 다양한 교란 요인까지도 반영할 수 있다는 것을 잘 나타내주고 있다.

4. 결론

1989년 이후 하천에서 조사된 저서성 대형무척추동물 정량자료와 환경부의 수질측정망 자료를 바탕으로 지표생물군을 선정하고, 각 지표생물군의 오탁계급치 및 지표가중치의 산정을 통하여 한국오수생물지수를 산출하였으며, 이화학적 수질과의 연계성을 분석하였다. 이를 통하여 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 물환경 평가기법 및 기준안을 제시하였다. 또한 시간적 적용타당성을 검토하기 위하여 선정된 3개의 지점에서 월별조사를 실시하였다.

하천에서 조사된 문헌자료 689개 및 2004~2005년도에 조사된 224개의 총 913개 조사단위의 정량채집된 자료를

Table 10. Saprobic Water Quality Standard (SWQS) using Korea Saprobic Index (7 classes)

Class	Organic pollution	Saprobity range	KSI	Color in maps	BOD ₅ range
Ia	No or very little polluted	Oligosaprobic	≤1.0	Dark-blue	≤1
Ib	Slightly polluted	Oligosaprobic to β-mesosaprobic	≤1.8	Light-blue	≤2
II	Moderate polluted	β-mesosaprobic	≤2.4	Blue-green	≤3
III	Moderate to heavily polluted	β-mesosaprobic to α-mesosaprobic	≤3.4	Yellow-green	≤5
IV	Heavily polluted	α-mesosaprobic	≤4.4	Yellow	≤8
V	Heavily to very heavily polluted	α-mesosaprobic to Polysaprobic	≤4.9	Orange	≤10
X	Very heavily polluted	Polysaprobic	>4.9	Red	>10

Table 11. Saprobic Water Quality Standard (SWQS) using Korea Saprobic Index (5 classes)

Class	Condition	KSI	Color in maps	BOD ₅ range
I	High	≤ 0.8	Blue	0-1
II	Good	≤ 1.7	Green	1-4
III	Fair	≤ 2.5	Yellow	3-7
IV	Poor	≤ 3.4	Orange	6-10
V	Bad	> 3.4	Red	> 8

단위면적당 개체수(inds./m²)로 환산하여 출현개체수의 상대 비교를 할 수 있도록 표준화하였다. 정리된 자료를 바탕으로 상대출현빈도 및 출현한 조사단위별 평균출현개체수를 산출하여 생물학적 수질평가법에 이용될 수 있는 100개의 지표생물군을 선정하였으며, 오탁계급치와 지표가중치를 산정하고, DIN 38410의 지수산출방식을 이용하여 정량지수를 개발하였다.

5대강 수계에서 하상이 모래로 되어있는 대규모 하천의 조사지점을 제외하면 이화학적 수질과 한국오수생물지수는 많은 부분에서 일치하여 전국 수계에의 적용이 가능한 것으로 나타났다. 조사지점의 환경 및 조사시기별로 보면 약간의 차이가 나타나는데, 이는 계절적인 요인(집중호우 등) 및 인위적인 교란(하천정비공사 등)에 의한 것으로 한국오수생물지수에 의한 종합적인 판단을 할 경우 물환경 관리에 진일보할 수 있을 것으로 본다.

물환경 변화에 대한 시간적 적용가능성에 대한 분석 결과 한국오수생물지수와 BOD₅ 농도의 관계를 보면 월 BOD₅ 농도가 현지조사 전 1년 평균 BOD₅ 농도의 변화폭보다 크게 나타났으며, 이에 비하여 한국오수생물지수의 변화폭은 매우 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 BOD₅ 농도와 같은 화학적인 수질은 시간적 요인, 조사정점 등의 상황에 따라 매우 민감하게 변화하는 것에 반하여 한국오수생물지수의 경우에는 일시적인 변화보다는 중·장기적 수질의 변화양상에 따라 반응한다.

한강과 낙동강의 조사 자료에서 이화학적 수질, 특히 유기물의 정도를 의미하는 BOD₅ 농도와 한국오수생물지수와 상관성은 매우 높게 나타났다. 5대강에서 얻어진 자료를 바탕으로 산출된 한국오수생물지수와 이화학적 수질과의 회귀 분석 결과 높은 유의수준에서 수질, 특히 유기오염도인 BOD₅ 농도와 상관성을 가지는 것으로 나타나 저서성 대형무척추동물이 유기물 오염의 직접적인 지표로서 이용 가능하다.

이화학적 수질과의 연계성을 우선 고려하여 7등급안을 제시하였다. 또한 한국오수생물지수로서 구분이 모호한 등급의 해결 및 저서성 대형무척추동물이 단순히 화학적인 수질만을 반영하는 것이 아니라 생태계의 건강성을 총체적으로 반영한다는 기초이론 하에서 생물만의 독립적인 5등급안을 제시하고, 여기에 BOD₅ 농도의 범위를 기재함으로써 이화학적 수질에 의존하지 않는 생태계의 건강성을 총체적으로 반영하는 생물만의 독자적인 기준안을 제시하였다. 이를 적용한 결과 일정 부분 이화학적 수질을 반영하면서 나아가 생태계의 다양한 교란 요인까지도 반영하고 있다는 것을 잘 나타내주고 있다.

사 사

본 연구는 환경부 · 국립환경과학원의 「물환경종합평가방법 개발 조사연구」 사업의 일환으로 이루어진 것으로 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 공동수, 류홍일, 류재근, 윤일병, 저서성 대형무척추동물 상 위분류군 생물지수의 고안 및 적용, *한국환경독성학회 추계학술대회 요약집*, pp. 1-11 (1995).
- 윤일병, 공동수, 류재근, 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(I) - 오탁계급치 및 생물가중치 산정을 중심으로, *한국환경생물학회지*, **10**, pp. 24-39 (1992a).
- 윤일병, 공동수, 류재근, 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가 연구(III) - 육안적 간략수질 평가방법을 중심으로, *한국환경생물학회지*, **10**, pp. 77-84 (1992b).
- AQEM Project Website, <http://www.aqem.de> (accessed Jul 2006).
- Armitage, P. D., Moss, D., Wright, J. F. and Furse, M. T., The Performance of a New Biological Water Quality Score System based on Macroinvertebrates over a Wide Range of Unpolluted Running-water Sites, *Water Res.*, **17**(3), pp. 333-347 (1983).
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D. and Stribling, J. B., *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*, 2nd Edition. EPA 841-B-99-002, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C., USA (1999).
- Beck, W. M., Jr., Suggested Method for Reporting Biotic Data, *Sewage Industr. Wastes*, **27**, pp. 1-1193 (1955).
- Buck, H., Die Kopplungsanalyse, ein Rationelles Ökologisches Verfahren zur Gütebewertung von Fließgewässern, *Interner Kurzbericht Landesstelle für Gewässerkunde und Wasserwirtschaftliche Planung Baden-Württemberg*, pp. 1-10 (1974).
- Canale, G., *BORIS - Benthic evaluation of Oregon River*, Draft report, Department of Environmental Quality Laboratory, Biomonitoring Section, Portland, Oregon, (1999).
- Chandler, J. R., A Biological Approach to Water Quality Management, *Water Poll. Control*, **69**, pp. 415-422 (1970).
- Chutter, F. M., An Empirical Biotic Index of the Quality of Water in South African Streams and Rivers, *Water Resource*, **6**, pp. 19-30 (1972).
- DeShon, J. E., Development and Application of the Invertebrate Community Index (ICI), pp. 217-243 in Davis, W. S. and Simon T. P. (eds.), *Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida (1995).
- DIN 38410, Part 2, *Biological-ecological Analysis of water (group M): determination of the saprobic index(M2)*, German Standard Methods for the Examination of Water, Waste Water and Sludge, p. 10 (1990).
- Friedrich, G., Eine Revision des Saprobien-systems, *Z. Wasser-Abwasser-Forsch.*, **23**, pp. 141-152 (1990).
- Gose, K., Trial to Application of Saprobic Value and Indicator Value on Macroscopic Animals by Zelinka-Marvan, *Jap. J. Water Treat. Biol.*, **14**, pp. 9-17 (1978).
- Hellawell, J. M., *Biological Surveillance of Rivers*, Water Research Center, Stevenage, England, p. 322 (1978).
- Hilsenhoff, W. L., An Improved Biotic Index of Organic

Stream Pollution, *Great Lakes Entomologist*, **20**, pp. 31-39 (1987).

Hilsenhoff, W. L., Rapid Field Assessment of Organic Pollution with a Family-level Biotic Index, *Journal of North American Benthological Society*, **7**, pp. 65-68 (1988).

Hilsenhoff, W. L., *Use of Arthropods to Evaluate Water Quality of Streams*, Technical Bulletin No. 100, Department of National Resource, Madison Wisconsin, p. 15 (1977).

Knöpp, H., Ein Neuer Weg zur Darstellung Biologischer Vorfluteruntersuchungen, Erläutert an einem Gütelängs Schnitt des Maines, *Wasserwirtschaft*, **45**, pp. 9-15 (1954).

Lang, C. and Reymond, O., An Improved Index of Environmental Quality for Swiss Rivers based on Benthic Invertebrates, *Aquatic Sciences*, **57**(2), pp. 172-180 (1995).

Lang, C., L'Eplattenier, G., and Reymond, O., Water Quality in Rivers of Western Switzerland: Application of an Adaptable Index based on Benthic Invertebrates, *Aquatic Sciences*, **51**(3), pp. 224-234 (1989).

Metcafe-Smith, J. L., Biological Water Quality Assessment of Rivers: Use of Macroinvertebrate Communities, pp. 17-43 in Petts, G., and Calow, P. (eds.), *River Restoration*, Blackwell Science, p. 231 (1996).

Norris, R. H., Biological Monitoring: The Dilemma of Data Analysis, *Journal of North American Benthological Society*, **14**, pp. 440-450 (1995).

ÖNORM M6232, *Richtlinien für die Ökologische Untersuchung und Bewertung von Fließgewässern*, Österr. Normungsinstitut, Wien (1995).

Pantle, R. and Buck, H., Die Biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse, *Gas und Wasserfach*, **96**, p. 604 (1955).

Plafkin, J. L., Barbour, M. T., Porter, K. D., Gross, S. K. and Hughes, R. M., *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers: Benthic macroinvertebrates and Fish*, EPA 440-4-89-001, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards, Washington, D.C. (1989).

Sladeczek, V., The Future of the Saprobity System, *Hydrobiologia*, **25**, pp. 518-533 (1965).

Stark, J. D., Performance of the Macroinvertebrate Community Index: Effects of Sampling Method, Sample Replication, Water Depth, Current Velocity, and Substratum on Index Values, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **27**, pp. 463-478 (1993).

Tolkamp, H. and Gardeniers, J., Hydrobiological Survey of Lowland Streams in the Achterhoek (The Netherlands) by Means of a System for the Assessment of Water Quality and Stream Character based on Macroinvertebrates, *Mit. Inst. f. Wasserwirt. d. TH Hannover*, **41**, pp. 215-237 (1977).

Tsuda, M., *Biology of Polluted Waters*, Hokuryu-kan Co., Ltd., Tokyo, p. 258 (1964).

Woodiwiss, F. S., *Comparative Study of Biological-Ecological Water Quality Assessment Methods*, Summary Report. Commission of the European Communities. Severn Trent Water Authority. UK, p. 45 (1978).

Woodiwiss, F. S., The Biological System of Stream Classification used by the Trent River Board, *Chem. indust.*, **11**, pp. 443-447 (1964).

Wright, J. F., Furse, M. T., and Armitage, P. D., RIVPACS: A Technique for Evaluating the Biological Quality of Rivers in the UK. *European Water Pollution Control*, **3**(4), pp. 15-25 (1993).

Zelinka, M. and Marvan, P., Zur Präzisierung der Biologischen Klassifikation der Reinheit Fließender Gewässer, *Arch. Hydrobiolog*, **57**, pp. 389-407 (1961).

Appendix. Saprobic value and weighting factor of each indicator organisms (100 groups)

No.	Indicator organism	Frequency						Saprobic value (s)	Weighting factor (G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
Phylum Turbellaria									
1	<i>Dugesia</i>	6.9	3.1					0.31	4
Class Gastropoda									
2	<i>Parafossarulus manchouricus</i>		3.3	4.3	2.4			1.91	1
3	<i>Semisulcospira</i>	3.1	5.3	1.6				0.85	2
4	<i>Austropeplea ollula</i>		6.1	3.9				1.39	4
5	<i>Radix auricularia</i>		3.1	5.5	1.4			1.83	2
6	<i>Physa acuta</i>					4.5	5.5	4.45	3
Class Lamellibranchiata									
7	<i>Limnoperna fortunei</i>	1.2	6.3	2.5				1.13	3
8	<i>Anodonta arcuiformis</i>		6.5	2.4	1.1			1.46	2
9	<i>Unio douglasiae</i>	1.6	4.1	2.7	1.6			1.43	1
10	<i>Corbicula</i>	2.1	6.8	1.1				0.90	3
Class Oligochaeta									
11	<i>Branchiura sowerbyi</i>				0.9	4.2	4.9	4.40	2
12	<i>Limnodrilus gotoi</i>					4.4	5.6	4.56	2

No.	Indicator organism	Frequency						Saprobic value (s)	Weighting factor (G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
Class Hirudinea									
13	<i>Glossiphoniidae</i>		4.3	4.5	1.2			1.69	2
14	<i>Arhynchobdellidae</i>		1.1	4.7	4.2			2.31	2
Class Crustacea									
15	<i>Asellus</i>		1.5	4.7	3.8			2.23	2
16	<i>Gammarus</i>	10.0						0.00	5
17	<i>Cardinia</i>		6.0	3.1	0.9			1.49	2
Order Ephemeroptera									
18	<i>Siphonurus chankae</i>	10.0						0.00	5
19	<i>Ameletus</i>	10.0						0.00	5
20	<i>Acentrella</i>	5.3	4.7					0.47	3
21	<i>Alanites muticus</i>	7.6	1.5	0.9				0.33	2
22	<i>Baetiella tuberculata</i>	6.3	3.7					0.37	4
23	<i>Baetis</i>	1.8	4.7	2.7				1.01	2
24	<i>Nigrobaetis</i>	2.1	6.1	1.8				0.97	2
25	<i>Isonychia</i>	9.7	0.3					0.03	5
26	<i>Bleptus fasciatus</i>	10.0						0.00	5
27	<i>Cinygmula</i>	8.7	1.3					0.13	5
28	<i>Ecdyonurus</i>	6.2	2.8	1.0				0.48	2
29	<i>Ecdyonurus levis</i>	1.8	5.1	3.1				1.13	2
30	<i>Epeorus curvatus</i>	8.7	1.3					0.13	5
31	<i>Epeorus pellucidus</i>	6.4	3.6					0.36	4
32	<i>Heptagenia</i>	10.0						0.00	5
33	<i>Iron</i>	10.0						0.00	5
34	<i>Rhithrogena</i>	8.7	1.3					0.13	5
35	<i>Choroterpes altioculus</i>	6.3	3.7					0.37	4
36	<i>Paraleptophlebia chocoata</i>	9.3	0.7					0.07	5
37	<i>Potamanthus</i>	2.7	6.4	0.9				0.82	3
38	<i>Rhoenanthus coreanus</i>	3.7	6.3					0.63	4
39	<i>Ephemera orientalis</i>	1.9	6.4	1.7				0.98	3
40	<i>Ephemera separigata</i>	10.0						0.00	5
41	<i>Ephemera strigata</i>	7.5	2.5					0.25	4
42	<i>Cincticostella</i>	9.6	0.4					0.04	5
43	<i>Drunella</i>	8.7	1.3					0.13	5
44	<i>Ephemerella</i>	7.1	2.9					0.29	4
45	<i>Serratella</i>	6.8	3.2					0.32	4
46	<i>Uracanthella</i>	1.3	5.2	3.5				1.22	2
47	<i>Caenis</i>	2.7	5.1	2.2				0.95	1
Order Odonata									
48	<i>Cercion</i>		6.7	2.1	1.2			1.44	1
49	<i>Ischnura asiatica</i>		6.5	3.5				1.35	4
50	<i>Davidius lunatus</i>	8.5	1.5					0.15	4
51	<i>Nihonogomphus</i>	4.1	4.0	1.9				0.78	1
52	<i>Onychogomphus ringens</i>	2.3	4.7	1.7	1.3			1.20	1
53	<i>Ophiogomphus obscura</i>	6.9	3.1					0.31	4
54	<i>Sieboldius albardae</i>	4.8	5.2					0.52	3
55	<i>Stylurus annulata</i>		5.3	3.7	1.0			1.57	2
56	<i>Macromia</i>		6.3	3.7				1.37	4
57	<i>Orthetrum</i>		4.1	5.3	0.6			1.65	3
58	<i>Tramea virginia</i>		3.6	6.4				1.64	4
Order Plecoptera									
59	<i>Plecoptera</i>	10.0						0.00	5

No.	Indicator organism	Frequency						Saprobic value (s)	Weighting factor (G)
		I (0)	II (1)	III (2)	IV (3)	V (4)	- (5)		
Order Megaloptera									
60	<i>Parachauliodes continentalis</i>	4.2	5.8					0.58	3
61	<i>Protohermes grandis</i>	6.6	3.3					0.33	4
Order Coleoptera									
62	<i>Neonectes natrix</i>	10.0						0.00	5
63	<i>Elmidae</i>	4.5	5.5					0.55	3
64	<i>Psephenidae</i>	4.1	5.9					0.59	4
Order Diptera									
65	<i>Antocha</i>	5.8	4.2					0.42	3
66	<i>Dicranota</i>	6.1	3.9					0.39	4
67	<i>Hexatoma</i>	10.0						0.00	5
68	<i>Tipula</i>	4.7	3.5	1.8				0.71	1
69	<i>Psychoda</i>					3.3	6.7	4.67	4
70	<i>Simulium</i>	6.1	4.9					0.49	3
71	<i>Ceratopogonidae</i>	3.8	6.2					0.62	4
72	<i>Chironomidae (red-type)</i>				1.3	4.6	4.1	4.28	2
73	<i>Atherix</i>	7.8	2.2					0.22	4
74	<i>Suragina</i>	9.2	0.8					0.08	5
75	<i>Tabanus</i>	5.3	3.1	1.6				0.63	1
76	<i>Eristalis</i>					1.6	8.4	4.84	4
Order Trichoptera									
77	<i>Stenopsyche</i>	9.6	0.4					0.04	5
78	<i>Philopotamidae</i>	10.0						0.00	5
79	<i>Psychomyia</i>	6.4	3.6					0.36	4
80	<i>Plectrocnemia</i>	9.4	0.6					0.06	5
81	<i>Ecnomus tenellus</i>		2.4	7.6				1.76	4
82	<i>Arctopsyche ladogensis</i>	10.0						0.00	5
83	<i>Cheumatopsyche</i>	5.7	4.3					0.43	3
84	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	1.1	4.8	4.1				1.30	2
85	<i>Hydropsyche orientalis</i>	6.7	3.3					0.33	4
86	<i>Hydropsyche valvata</i>		4.6	3.6	1.8			1.72	1
87	<i>Macrostemum radiatum</i>	3.2	6.1	0.7				0.75	3
88	<i>Apsilochorema</i>	9.4	0.6					0.06	5
89	<i>Rhyacophila</i>	8.7	1.3					0.13	5
90	<i>Glossosomatidae</i>	8.6	1.4					0.14	5
91	<i>Hydroptila</i>	2.3	6.7	1.0				0.87	3
92	<i>Apatania</i>	5.3	4.7					0.47	3
93	<i>Goera</i>	4.8	5.2					0.52	3
94	<i>Hydatophylax nigrovittatus</i>	10.0						0.00	5
95	<i>Neophylax ussuriensis</i>	7.9	2.1					0.21	4
96	<i>Notopsyche</i>	1.8	8.2					0.82	4
97	<i>Goerodes</i>	10.0						0.00	5
98	<i>Psilotreta kisoensis</i>	10.0						0.00	5
99	<i>Ceraclea</i>	5.7	4.3					0.43	3
100	<i>Mystacides</i>	7.9	2.1					0.21	4