

진위천의 수질과 저서성 대형무척추동물 군집지수의 상관관계

최아름 · 박선진¹ · 김진영 · 송미영² · 공동수*

(경기대학교 생명과학과, ¹경기대학교 기초과학연구소, ²경기개발연구원)

The Correlation between Water Quality and Benthic Macroinvertebrate Community Indices in the Jinwi Stream. Choi, Ah Reum, Sun Jin Park¹, Jin Young Kim, Mee Young Song² and Dongsoo Kong* (Department of Life Science, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea; ¹Research Institute for Basic Science of Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea; ²Department of Environmental Policy, Gyeonggi Research Institute, Gyeonggi-do 440-290, Korea)

The Jinwi stream, which is located in the Gyeonggi Province, shows a large variation in water quality from the upper stream to downstream. Therefore the Jinwi stream is suitable for assessing changes to the benthic macroinvertebrate community structure according to saprobity. This study was conducted to find out the applicability of biotic indices for water quality pollution through an analysis of the correlation between water quality and benthic macroinvertebrate indices for the Jinwi stream. Along with the pollution of water, the species composition of Ephemeroptera decreased, while that of Annelida increased. The ecological score for the benthic macroinvertebrate community (ESB) showed more significant correlations than any other biotic index (H', DI, R1, J, EPT and KSI) with the water quality items.

Key words : benthic macroinvertebrate, biotic indices, ESB, Jinwi stream, saprobity

서 론

수질에 대한 평가 방법으로는 이화학적인 방법과 지표생물을 이용한 생물학적 방법이 있다. 과거의 수질평가는 주로 이화학적인 방법을 통해서 이루어졌다. 이러한 이화학적 방법은 측정하기에 간편한 것이 장점이나 제한된 항목으로 측정 당시의 수질만을 나타내므로 수시로 변하는 수질을 종합적으로 대변하는데 한계가 있다. 반면 지표생물을 이용한 생물학적 수환경 평가 방법은 연간의 평균적인 수질을 대변하고 과거 오염물질의 임의적 유출

에 대한 추정을 가능케 해줌과 동시에 오염물질의 복합 효과 등에 따른 종합적 영향을 반영해 준다(Kong, 2002).

특히 다양한 오염에 대한 물환경의 변화 분석에 있어서 저서성 대형무척추동물은 여러 가지 측면에서 그 유용성이 매우 높다(Metcalf, 1996). 그 이유로는 첫째, 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. 마

* Corresponding author: Tel: (031) 249-9649, Fax: (031) 624-9649, E-mail: dskong@kgu.ac.kr

지막으로 각 분류군이 군집에서 다른 기능을 수행하며, 다양한 영양단계를 구성하고 있어 물환경의 변화에 따라 다양한 반응을 한다는 것이다 (Yoon *et al.*, 1992). 이러한 이점으로 환경변화 특히 수질오염에 대한 지표군으로서 저서성 대형무척추동물에 대한 관심은 이미 18세기 중엽 유럽을 중심으로 대두되었다 (Liebman, 1962).

생물학적 수질평가의 방법으로는 지표성이 높은 개체군 (population)을 이용한 방법과 군집 (community)을 분석하는 방법으로 구분되나 다양한 조건에서 출현하는 생물의 지표성을 따지기 위해서는 군집단위에서의 분석이 일반적이다. 군집분석에는 모든 종의 지표성을 균일하게 두고 평가하는 수리군집지수 (mathematical community index)와 지표종에 따른 내성치를 부여하여 분석하는 지표군집지수 (indicator community index)로 구분할 수 있다. 수리군집지수는 오염에 따른 종의 선별과 자원에 대한 종간경쟁의 변화에 따라 나타나는 종수와 개체수 혹은 생물량 변화의 규칙성에 근거를 둔 것이다. 수리군집지수는 객관적인 반면 수질평가지수라기 보다는 군집의 안정도 혹은 엔트로피를 대변하는 지수로 볼 수 있다. 이에 반해 지표군집지수는 지역적이고 특수한 상황을 잘 반영하는 평가지수이나 지표종의 선정과 내성치의 적용이 주관적인 한계가 있다. 생물학적 수질평가방법은 Kolkwitz and Marsson (1902, 1908, 1909)이 처음으로 하천 생태계를 네 등급의 오수생물체계 (Saprobic system)로 구분한 이후 무수한 방법으로 세분되었다 (MOE/NIER, 2010). 국내의 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질평가는 주로 수리군집지수에 의존하여 왔으며 지표종 및 지표군집에 관한 연구로는 Ahn (1973)이 만경강에서 저서생물을 대상으로 한 것을 시작으로 꾸준히 이루어져 왔다 (Yoon *et al.*, 1992a, b, c; Kong *et al.*, 1997; MOE/NIER, 2007). 이어서 최근에 국내에서는 생물학적 수질평가를 위해 환경부에서 3년 (2003~2006)간의 연구를 통해 국내 4대강 수계의 80개 구간을 대상으로 연 2~3회의 조사를 통해 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질평가방법을 개발하고 이를 통해 수생태계 건강성을 평가한 바 있다 (Won *et al.*, 2006).

반면 이러한 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물지수들이 수질과 어떠한 상관관계를 가지는지에 대한 연구는 최근 환경부·국립환경과학원 주관 2008, 2009, 2010 “수생태계 건강성 조사 및 평가”에서 KSI와 수질 간 상관성 분석을 하고 있지만 충분히 이루어지지 않은 실정이며 각 생물지수들의 적용성을 파악하기 위하여 이에 대한 연구가 필요하다. 본 연구의 대상하천인 진위천 수계는 중·하류 유역에 수원시, 오산시 등의 대도시가 위

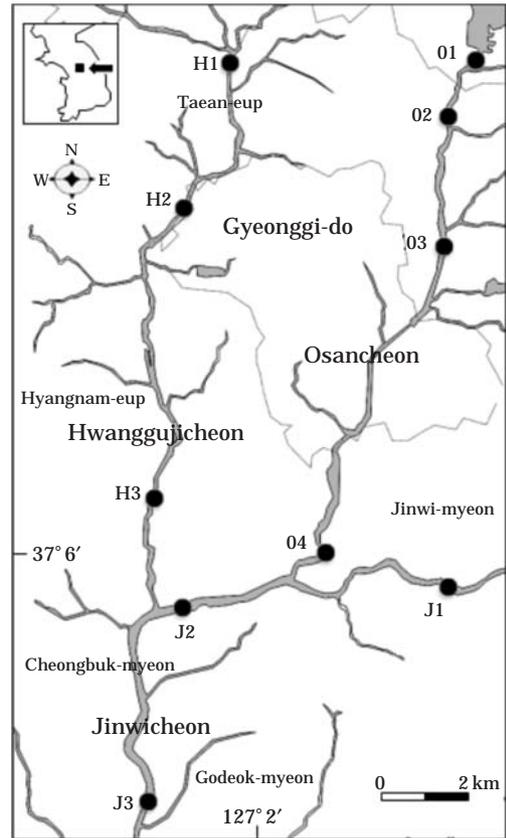


Fig. 1. Location map of the study site.

치하여 상·하류간 수질이 큰 차이를 보이고 있어 수질 오염의 정도에 따른 생물군집의 변화를 파악하기에 적합한 하천이라 할 수 있다.

따라서 진위천 수계에서 조사된 저서성 대형무척추동물의 군집지수들과 수질간의 상관관계를 분석하여 수질 오염의 지표로서 각 생물지수의 적용성을 파악하는 데에 목적이 있으며 이러한 연구는 향후 저서성 대형무척추동물을 이용한 수환경 평가와 지표개발의 발전에 기여할 것으로 예상된다.

재료 및 방법

1. 조사지점

생물군집의 조사결과와 수질과의 상관관계를 도출하기 위하여 환경부 수질측정망이 있는 진위천 수계의 10개 지점 (황구지천, 오산천, 진위천 본류)을 선정하여 조사하였다 (Fig. 1).

2. 자료수집

2010년 이전의 생물군집 자료는 2007년부터 2009년까지 환경부·국립환경과학원 주관으로 수행된 “수생태계 건강성 조사 및 평가”의 결과를 활용하였다(J3지점은 수생태계 건강성 조사 및 평가의 조사지점이 아니기 때문에 2010년 진위천 수생태계 현장조사의 자료만 사용).

진위천의 이화학적 수질특성은 2007~2010년까지 4년간 환경부에서 측정한 수질측정망 자료(물환경정보시스템, www.nier.go.kr)를 이용하였다. 수질항목은 여러 일반수질항목중 생물학적 산소요구량(Biological oxygen demand, BOD)과 총부유물(Total suspended solids, TSS) 2개 항목을 선정하였다. 이 중 BOD₅는 진위천과 같이 오염된 수역에서는 용존산소의 부족을 야기하여 수중생물의 생육을 저해할 수 있는 항목이며, 부유물질은 서식처 교란과 먹이활동에 장애를 초래하여 유기물질과 더불어 생물군집의 풍부도와 다양성을 감소시킬 수 있는 항목이기에 선정하였다.

3. 현장조사

현장조사는 2010년도 7, 9, 11월에 각 1회씩 총 3회에 걸쳐 실시되었으며 Surber net (30×30, 1 mm mesh size)를 사용하여 정량 채집하였다. 또한 필요한 경우 미소서식체에 대하여 휴대용 뜰채를 이용하여 정성채집을 실시하였다. 채집물은 플라스틱 병에 넣어 현장에서 Ethyl alcohol 95%에 고정하고, 실험실로 운반하여 생물시료를 골라 낸 후 동정하여 80% Ethyl alcohol에 보존하였다. 저서성 대형무척추동물 채집에 관한 자세한 내용은 MOE/NIER (2008)에 명시되어 있다.

동정과 분류는 기존의 분류학적 문헌을 참고하였다. 참고하였다(McCafferty, 1981; Wiederholm, 1983; Yoon, 1988; Pennak, 1989; Merritt and Cummins, 1996; Throp and Covich, 2001; Kawai and Tanida, 2005). 동정된 학명의 체계 및 국명은 한국곤충명집(The entomological society of korea, 1994)을 따랐다.

4. 오수생물계열 구분

각 지점의 연평균 BOD₅ 농도에 따라 Sládeček (1966)의 기준(Table 1)으로 오수생물계열을 구분하였다.

5. 군집분석

군집분석은 정량으로 채집된 자료를 바탕으로 아래의 공식에 의하여 산출하였다.

Table 1. Comparison of saprobity zones within limnosaprobity (Sládeček, 1966).

Saprobity	BOD ₅ (mg L ⁻¹)
Xenosaprobic	~ ≤ 1
Oligosaprobic	≤ 2.5
β-mesosaprobic	≤ 5
α-mesosaprobic	≤ 10
Polysaprobic	≤ 50

1) 우점도지수 (Dominant index: DI)

각 조사지점의 출현 개체수에서 제1우점종과 제2우점종을 선정하였고, McNaughton's dominant index (DI)를 이용하여 산출하였다.

$$DI = \frac{N_1 + N_2}{N}$$

N: 총개체수

N₁, N₂: 제1, 2우점종의 개체수

2) 다양도지수 (Species diversity index: H')

Margalef의 정보이론에 의하여 유도된 Shannon-Weaver function (H') (Shannon & Weaver, 1949)을 Lloyd & Gheraldi가 변형한 공식을 이용하였다.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i, \quad p_i = \frac{N_i}{N}$$

N_i: i번째 종의 개체수

p_i: i번째 종의 개체수 비율

3) 종풍부도지수 (Species richness index: RI)

군집의 종구성이 풍부함을 나타내는 것으로 Margalef (1958)의 지수를 적용하였다.

$$RI = \frac{S-1}{\ln N}$$

S: 총종수

N: 총개체수

4) 균등도지수 (Evenness index: J)

군집내 종구성의 균일한 정도를 나타내는 것으로 Pielou (1975)의 지수를 적용하였다.

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

H'=Shannon 지수

S: 총종수

6. 수환경 평가

수환경 평가를 위해 사용된 저서성 대형무척추동물 군집지수는 전국자연환경 조사지침(MOE/NIER, 2006)에서 제안한 저서성 대형무척추동물생태점수(Ecological score of benthic macroinvertebrate community, ESB)와, 환경부의 수생태계 건강성 조사 및 평가에 사용되는 한국오수생물지수(Korean Saprobic Index, KSI) 및 목(Order) 수준에서 강도래(Plecoptera), 하루살이(Ephemeroptera), 날도래(Trichoptera)가 전체 군집에서 차지하는 비율인 비내성범주 지수(Intolerant order category index, EPT)를 이용하였으며 비내성범주지수(EPT)는 종수를 기준으로 한 지수를 EPT(s), 개체수를 기준으로 한 지수를 EPT(a)로 구분하였다. 각 지수들의 산출방식은 아래와 같다.

1) 저서성 대형무척추동물생태점수(ESB)

Kong(1997)은 Yoon *et al.*(1992)의 지표생물표 등을 이용하여 개별 종의 환경질 score를 1~4의 4단계로 구분하였으며, 맑고 양호한 수환경에서 출현하는 종일수록 높은 score를 갖도록 하였다. ESB 지수는 개체수출현도를 고려하지 않고 환경질에 따른 특정 종의 출현유무만 고려한 것으로 Beck-Tsuda의 BI 지수와 유사한 특성을 가지나 생물종의 지표치를 4단계로 세분함으로써 평가의 변별력을 높인 것이다.

$$ESB = \sum_{i=1}^4 (S_i Q_i)$$

S_i: 환경질에 대한 출현종수
 Q_i: 개별 분류군에 대한 환경질 점수

2) 한국오수생물지수(KSI, Korean Saprobic Index)

한국오수생물지수(KSI, Korean Saprobic Index)는 MOE/NIER(2007)에서 국내의 저서성 대형무척추동물의 내성치를 재검토하여 Zelinka-Marvan의 오수생물지수를 인용한 지수이다(MOE/NIER, 2006).

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

i: 지정된 지표생물군의 일련번호
 n: 출현한 지표생물군의 총수
 S_i: i번째 지표생물군의 오락계급치
 A_i: i번째 지표생물군의 출현개체수
 G_i: i번째 지표생물군의 지표가중치

3) 비내성 범주 지수(Intolerant order category index, EPT)

하루살이(Ephemeroptera), 강도래(Plecoptera), 날도래(Trichoptera)는 일반적으로 청정한 하천에서 출현도가 높다(Kamsia bukin, 2008). 따라서 개별 종 단위의 지표성을 무시하고 목(order) 수준에서 강도래류, 하루살이류, 날도래류가 전체 군집에서 차지하는 비율은 환경상태를 반영하는 간편한 지수로 이용될 수 있다(Lenat, 1988).

$$EPT = \frac{E+P+T}{A}$$

E: Ephemeroptera(하루살이목)의 종수 또는 개체수
 P: Plecoptera(강도래목)의 종수 또는 개체수
 T: Trichoptera(날도래목)의 종수 또는 개체수
 A: 총 종수 또는 개체수

7. 상관관계 분석

2007~2009 국립환경과학원 주관 “수생태계 건강성 조사 및 평가” 결과와 2010년도에 총 3회에 걸쳐 실시된 현장조사를 통해 군집지수(DI, H', R1, J, ESB, KSI, EPT)를 산출하고 환경부 수질측정망의 연평균 BOD₅와 부유물질(SS) 농도와의 상관관계를 분석하였다.

분석은 SPSS(한글 ver. 12.0)의 Pearson 상관계수를 이용하였으며 유의수준값(p-value)은 p<0.01일 때 유의한 결과로 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 오수생물계열 구분

Sládeček(1966)의 기준에 따라 지점별 2007~2010년의 평균 BOD₅ 농도로 각 지점의 오수생물계열을 구분한 결과, J1은 빈부수성(oligosaprobic), O2와 O3은 베타중부수성(β-mesosaprobic), H3, J2, J3, O1, O4는 알파중부수성(α-mesosaprobic), H1과 H2는 강부수성(polysaprobic) 전체 평균 알파중부수성 계열의 하천이었다(Table 2). 이 같은 결과로 진위천이 상류부터 하류에 이르기까지 다양한 수질을 나타냄을 알 수 있다.

2. 저서성 대형무척추동물상

2007년부터 2010년의 현장조사까지의 정량채집을 통하여 전체 조사구간에서 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 4문 6강 14목 43과 90종이었다. 수질에 따른 저서

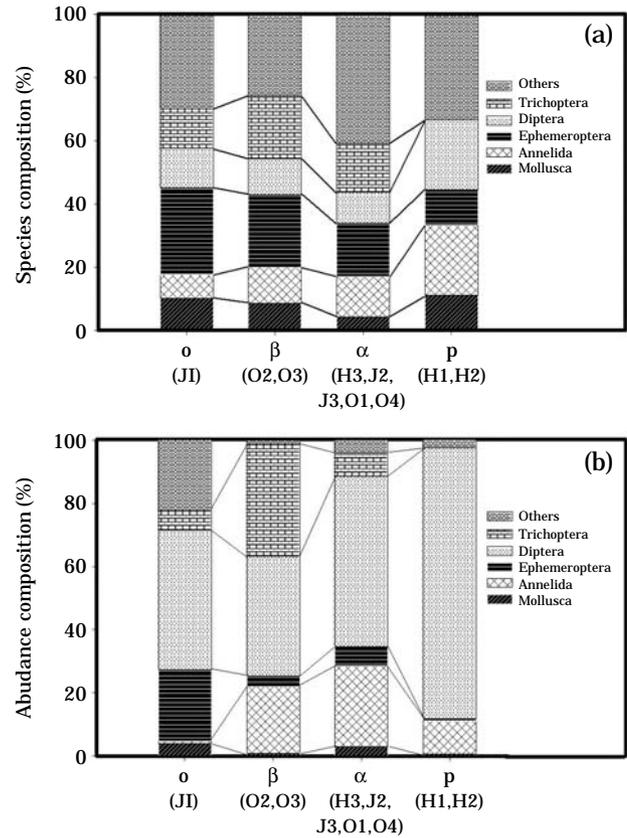
Table 2. BOD₅ concentration and saprobity in the Jinwi stream.

Site	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Saprobic
J1	1.8	Oligosaprobic
O2	4.5	β-mesosaprobic
O3	4.3	
H3	9.1	α-mesosaprobic
J2	6.6	
J3	7.9	
O1	5.3	
O4	7.6	
H1	13.2	Polysaprobic
H2	15.7	

성 대형무척추동물의 변화상은 빈부수성 계열로부터 강부수성 계열의 수역으로 갈수록 하루살이류의 종구성비가 감소하는 경향을 보였고, 날도래류는 강부수성 계열에서 전혀 출현하지 않았다. 반면 강부수성 계열로 갈수록 환형동물류는 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2(a), (b)).

빈부수성 수역에서 출현한 하루살이류는 Baetidae, Heptageniidae, *Ephemera orientalis*, Ephemerellidae, *Caenis* KUa였으며, 베타중부수성 수역과 알파중부수성수역에서는 Baetidae, Heptageniidae가 강부수성 수역에서는 Baetidae만이 출현하였다. Baetidae는 주로 하상구성물 위에서 서식하기 때문에 토사로 인한 미세 입자가 하상구성물 간 공간(interstitial space)에 많이 누적되더라도 별반 영향을 받을 가능성이 없기 때문에 (Nuttall, Bielby, 1973; Hellawell, 1986) 하상이 오염된 세립질로 구성된 진위천의 중하류에 이르기까지 넓게 출현한 것으로 판단된다.

일반적으로 하천에 하루살이, 날도래, 강도래의 비율(EPT)이 높을수록 수환경질이 양호하다고 판단되는데 (Davis et al., 2003; Peitz, 2003) 이는 본 조사의 강부수성 계열의 수역에서 날도래류가 전혀 출현하지 않은 것과 일치한다. 알파중부수성과 베타중부수성 수역에서 많은 비율을 차지하는 날도래는 대부분이 줄날도래과 (Hydropsychidae)로 우리나라의 하천에 매우 풍부하게 분포하고 있는 수서곤충이다. 줄날도래류 중 가장 많이 출현한 *Cheumatopsyche brevilineata*는 다소 오염된 수질에서도 어느 정도 내성을 지니고 있으며 (Ross, 1959) 두 번째로 많이 출현한 *Hydropsyche kozhantschikovi*는 줄날도래의 대표적인 종류로써 생물지리학적으로 널리 분포할 뿐만 아니라, 수질오염에 대한 내성의 범위가 넓기 때문에 우리나라에서 도시나 마을 주변의 유기물 오염이 다소 진행된 하천에서 매우 풍부하게 나타나는 종류이다 (Hur et

**Fig. 2.** (a) Species and (b) abundance composition of macroinvertebrate according to saprobity.

al., 2000a) 진위천 수계에서 청정한 수계에서 출현하는 강도래류는 전혀 출현하지 않았다. 강부수성 계열에서 환형동물의 종구성비가 급격하게 증가하였는데 이는 오염이 심화되면서 환형동물 이외의 비내성종들이 선택적으로 감소함에 따른 것이었다.

개체수 현존량을 기준으로 할 때 전체 지점에서 깔따구류가 평균 50% 이상을 차지할 정도로 우점율이 높았다 (Fig. 2(b)). 특히 강부수성 수역에서 깔따구의 개체수 비율이 85.6%를 차지할 정도로 우점율이 매우 높았다. 반면 다른 분류군의 개체수 구성비는 오수생물계열에 따라 특별한 경향성을 보이지 않았다.

3. 군집분석

1) 군집지수

진위천 조사지점에서 수리군집지수인 우점도 (DI)는 0.77, 다양도 (H')는 1.63, 풍부도 (R1)는 1.08, 균등도 (J)는 0.66이었으며, 지표군집지수인 ESB는 12.6, KSI는 3.24, EPT (s)는 0.21, EPT (a)는 0.16이었다 (Table 3).

우점도는 빈부수성에서 강부수성 수역으로 갈수록 높

아지고 다양도, 풍부도, 균등도는 낮아지는 경향을 나타냈으나 모든 지수에서 알파중부수성 수역에서는 그러한 경향이 일관적이지 않았다.

중수를 기준으로 한 EPT (s)와 개체수를 기준으로 한 EPT (a) KSI 지수 모두 빈부수성에서 높고 강부수성에서 낮아 유기물 오염에 따른 계절별 환경상태를 잘 대변하였다.

ESB 점수는 빈부수성에서 19로 뚜렷이 높고 강부수성에서 5로 뚜렷이 낮아 환경상태를 비교적 잘 반영하였지만 베타중부수성과 알파중부수성 수역에서는 다 같이 14로 차이가 나지 않았다.

2) 생물지수와 수질과의 상관관계

수리객관적 군집지수 중 균등도를 제외한 모든 지수가 BOD₅와 유의한 상관관계를 보였다. 우점도지수 (DI)는 생물군집의 현존량에 대하여 특정종이 차지하는 비율을 나타내는 것으로 생물군집이 소수의 특정종에 의해 구조 및 기능이 좌우되는지를 판단할 수 있는 척도가 된다. 본 연구에서 우점도지수는 BOD₅에만 통계적으로 유의한 수준에서의 양의 상관관계를 ($r=0.53, p<0.01$) 보였다.

생물군집을 이루는 출현종수와 각 출현종의 현존량을 고려한 종다양도지수 (H')는 BOD₅에만 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 ($r=-0.51, p<0.01$) 나타냈으며 이 지수는 우점도지수가 증가할 때 감소하는 반비례 경향을 나타낸다.

종풍부도지수 (RI)는 종다양도와 중수에 비례하는 경향을 나타내며 본 연구의 결과에서 BOD₅, SS 두 항목 모두에 통계적으로 유의한 음의 상관관계 ($r=-0.51, p<0.01, r=-0.41, p<0.01$)를 보였다.

균등도지수 (J)는 종이 균일하게 분포한 정도를 나타내는 척도로 동일 서식처에 개체수가 동일하게 분포할수록 높게 나타나며, 풍부도와 마찬가지로 중간 자원에 대한 경쟁이 적을수록 높은 경향이 있다. 본 연구에서 균등도지수는 BOD₅, SS 두 항목 모두에 통계적으로 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 일반적으로 유기물 오염에 의한 교란은 출현종수를 감소시키지만, 특정종의 개체수를 증가시키는 양상을 보이며 이것이 전체적인 군집수준에서의 개체수 현존량의 증가로 연결되는 경우가 많다 (MacKenthun, 1969). 그리고 이러한 경우 균등도는 매우 낮아지게 된다. 또한 미세한 무기퇴적물에 의해 교란된 수계에서도 깔따구류 및 환형동물류 등의 개체수현존량의 증가를 보이기도 한다. 하지만, 무기퇴적물 및 부유물질의 양이 매우 많거나 또는 지속적으로 수계에 유입될 경우에는 오히려 전반적인 개체수 현존량이 감소하는 것

Table 3. Average community indices at sites using saprobity in the Jinwi stream.

	Total	Oligo	β-meso	α-meso	Poly
Species. No.	6	8	7	8	3
Abundance (Inds. m ⁻²)	477	106	473	636	134
Dominance (DI)	0.77	0.67	0.74	0.74	0.90
Diversity (H')	1.63	2.01	1.65	1.81	0.95
Richness (RI)	1.08	1.56	1.12	1.26	0.52
Evenness (J)	0.66	0.79	0.66	0.66	0.54
EPT (species No.)	0.21	0.29	0.37	0.22	0.02
EPT (abundance)	0.16	0.27	0.31	0.12	0.01
KSI	3.24	2.30	2.76	3.52	3.82
ESB	13	19	14	14	5

Table 4. Pearson correlation coefficient and significance among measured parameters.

Biotic indices	BOD ₅	SS
Species dominance (DI)	0.53*	0.34
Species diversity (H')	-0.51*	-0.41
Species richness (RI)	-0.56*	-0.51*
Species evenness (J)	-0.29	0.05
Korean saprobic index (KSI)	0.49*	0.23
Ecological score of BMs (ESB)	-0.61*	-0.56*
EPT (species)	-0.52*	-0.37
EPT (abundance)	-0.45*	-0.33

*: $p<0.01, N=35$

으로 알려진다 (Dudgeon, 1994; Armitage, 1995). 이러한 것은 유기물의 경우도 마찬가지이다. 즉 유기물의 농도나 부유물질의 농도가 일정수준을 넘어 생물이 생존할 수 없는 정도가 되면 각 출현종에 따른 개체수 현존량이 매우 낮아지게 되어 오히려 균등도가 증가하게 된다. 본 연구의 조사지점인 진위천은 빈부수성부터 강부수성까지 다양한 수질의 차이를 보이며 특히 황구지천의 경우 환경상태가 매우 불량하기 때문에 생물의 출현 종수 뿐만 아니라 출현 개체수 역시 소수에 불과하다. 따라서 수질의 오염도와는 관계없이 균등도가 높게 산출되었으며, 이러한 이유가 본 연구에서 균등도가 BOD₅, SS와 높은 상관관계를 가지지 않은 것으로 판단된다 (Fig. 3).

지표군집 지수 중 중수를 기준으로 한 EPT (s)와 개체수를 기준으로 한 EPT (a) 모두 BOD₅에만 유의한 음의 상관관계를 가졌다 ($r=-0.52, p<0.01, r=-0.45, p<0.01$). EPT 지수는 그 값이 높을수록 청정한 수질임을 나타내는데, BOD₅가 5 mg L⁻¹ 미만으로 낮아 유기물의 오염이 적은 청정한 수질에서 특히 넓은 산포도를 보였다 (Fig. 3). 이는 EPT 지수가 수질 외에 하상의 조건이나 다른 물

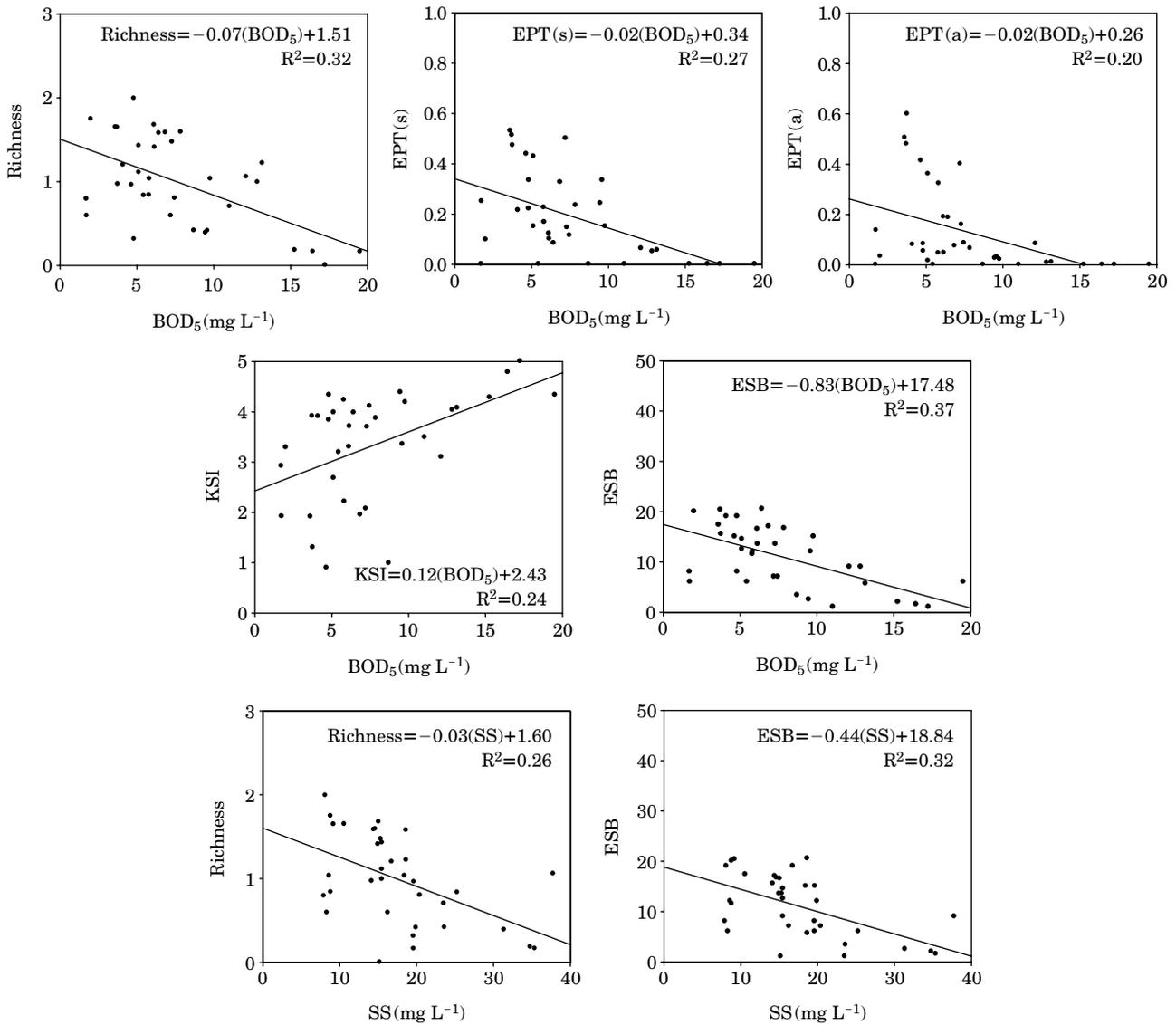


Fig. 3. The relationship between BOD₅ and biotic indices.

리적 요건에도 큰 영향을 받기 때문이라고 판단되며 이는 Nerbonne *et al.* (2001)의 연구에서도 같은 결과를 보여주고 있으며 Kil *et al.* (2010)에 의한 연구에서도 유속과 바닥물질의 평균 크기가 EPT-group의 풍부도와 유의한 상관성이 있다는 결과를 보여주어 이 같은 결과를 뒷받침해주고 있다. 또한 하루살이, 강도래, 날도래 목 이외에 편형동물문의 산골플라나리아, 갑각강의 옆새우류, 곤충강의 톱톡이류, 물삿갓벌레류, 잠자리목의 계류성 잠자리류, 딱정벌레목의 여울벌레류, 파리목의 멧모기류, 개울등에류, 먹파리류 등은 환경상태가 양호한 중·상류 하천에서 흔히 출현하기 때문에 EPT 군의 비율만으로 환경상태를 판단하는 것은 무리가 있다. 아울러 생물의 생

육을 극단적으로 저해할 수 있는 수준으로 수질이 악화되지 않은 상태라면 단지 EPT 군의 비율이 낮다고 하여 건강하지 않은 생태계라고는 말할 수 없다. 중하류 하천의 일반적인 물리적 조건에서 이를 선호하는 다양한 생물들이 출현한다면 역시 건강한 생태계라고 보아야 하고 그런 관점에서 EPT 지수는 직접적인 수질오염의 지표로 보기 어렵다 (Gyeonggi Research Institute, 2010).

한국오수생물지수인 KSI는 BOD₅와 통계적으로 유의한 양의 상관관계 ($r=0.49$, $p<0.01$)를 보였으며 이는 최근 수행되고 있는 환경부 주관 수생태계 건강성 조사 및 평가의 2008, 2009, 2010년의 결과와도 같다 (MOE/NIER, 2008, 2009, 2010). 이와 반면 부유물질과는 상대적으로

유의하지 않은 낮은 상관성을 보였으며 Won *et al.* (2006)에 의해 수행된 결과와도 일치한다. 이러한 점은 KSI가 출현생물종의 유기물 오염에 대한 수질 판정을 근거로 만들어진 지수(Won *et al.*, 2006)이기 때문에 BOD₅의 영향은 대변하고 있지만 주로 무기물에 의해 좌우되는 부유물질의 영향은 대변하지 못하는 것으로 판단된다.

반면 ESB는 BOD₅, 부유물질(SS) 모두와 통계적으로 유의한 음의 상관관계($r = -0.61$, $p < 0.01$, $r = -0.56$, $p < 0.01$)를 보였으며 다른 지수들에 비해 상관도가 높았다. 진위천과 같이 오염된 하천에서 KSI에 비하여 ESB가 BOD₅ 농도에 더욱 민감하게 반응하는 이유는 비슷한 오타계급치를 가진 내성종(tolerant species)이라 하더라도 오염도가 심화될 경우 특정 종이 단계적으로 소실될 수 있는데 생물종의 풍부도를 반영하는 ESB가 이를 대변하기 때문인 것으로 사료된다(Oh *et al.*, 2011).

결론적으로 진위천에서 수행된 저서성 대형무척추동물의 군집지수들과 BOD₅, SS 농도와의 상관관계를 분석하였을 때 분석에 사용된 지수 중 균등도지수를 제외한 나머지 지수들은 BOD₅ 농도에만 유의한 상관관계를 나타냈다. 반면 ESB와 풍부도지수 BOD₅, SS 두 항목 모두에 유의한 상관관계를 가짐으로써 유기물의 오염뿐만 아니라 무기물에 의한 교란 등도 반영 할 수 있는 지표로 판단된다. 하지만 진위천 조사지점 중 빈부수성 계열의 지점도 있었지만 다소 오염된 지점의 비율이 높아 이를 보완하기 위해서 추후 더 넓은 시공간적 범위의 조사가 이루어져야 한다.

적 요

본 연구는 상류부터 하류까지 오염도가 상이한 진위천에서 나타나는 생물군집지수와 수질과의 관계를 파악하기 위하여 실시되었다. 수질의 오염도가 증가할수록 하루살이류는 감소하였으며, 날도래류는 강부수성 수역에서 전혀 출현하지 않았다. 반면 환형동물류는 증가하는 경향을 나타냈으며 파리류는 강부수성 수역에서 크게 증가하였다. 상관분석의 결과, 종풍부도지수(RI)와 ESB는 BOD₅와 부유물질(SS)에 유의한 음의 상관관계를 보인 반면, 우점도지수(DI), 다양도지수(H'), EPT, KSI는 BOD₅에만 유의성을 보였고 균등도지수(J)는 두 항목 모두와 유의성을 보이지 않았다. EPT의 경우 수질과 더불어 물리적 요인에도 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 오타계급치의 평균치로 산정되는 KSI의 경우 유기물 오염에 대한 지표로서 적용성이 높으나 부유물질의 영향은 나타내지

못하는 반면 ESB 지수는 유기물과 무기물 오염은 물론 군집의 다양성과 풍부도도 함께 대변할 수 있는 지표로 판단된다.

사 사

본 연구는 2010년도 경기개발연구원 「진위천 수생태계 조사 및 건강성 제고 방안」의 일환으로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Ahn, Y.G. 1973. The pollution of the river (Man Kyung) and its influence to the Benthos. *Korean Journal of Limnology* **6**(3): 7-20.
- Armitage, P.D. 1995. Faunal community change in response to flow manipulation, p. 59-78. *In: The ecological basis of river management* (Harper, D.M. and A.J.D. Ferguson, eds.). Wiley, Chichester.
- Brinkhurst, R.O. and D.G. Cook. 1974. Aquatic earthworms (Annelida: Oligochaeta), p. 143-156. *In: Pollution ecology of freshwater invertebrates* (Harst, C.W.Jr. and S.L.H. Fuller, eds.), Academic Press, New York.
- Budin, K., Z. Jubok, D. Gabda, N. Abullah and A. Ahem. 2008. Effect of water parameters on ephemeroptera abundance in Telipok River, Sabah Malaysia. *Wseas transactions on Environment and Development* **5**(4): 447-451.
- Davis, S.D., S.W. Golladay, G. Vellidis and C.M. Pringle. 2003. Macroinvertebrate biomonitoring in intermittent coastal plain stream impacted by animal agriculture. *Journal of Environmental Quality* **32**: 1036-1043.
- Dudgeon, D. 1994. The functional significance of selection of particles by aquatic animals during building behaviour, p. 289-312. *In: The biology of particles in aquatic systems* (Wotton, R.S. ed.). Lewis Publishers, London.
- Gyeonggi Research Institute. 2010. Survey and recovery measures on the aquatic ecosystem of Jinwi stream.
- Hellawell, J.M. 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management. Elsevier, London. 546pp.
- Hur, J.M., J.H. Hwang, T.H. Ro and Y.J. Bae. 2000a. Association of immature and adult stages of *Hydropsyche kozhantschikovi* Martynov (Trichoptera: Hydropsychidae). *Korean Journal of Entomology* **30**: 57-61.
- Kawai, T. and K. Tanida. 2005. Aquatic Insects of Japan:

- Manual with Keys and Illustrations. Tokai University Press, Kanagawa.
- Kil, H.K., D.G. Kim, S.W. Jung, Y.H. Jin, J.M. Hwang, K.S. Bae and Y.J. Bae. 2010. Impacts of impoundments by low-head and large dams on benthic macroinvertebrate communities in Korean streams and Rivers. *Korean Journal of Limnology* **43**(2): 190-198.
- Kolkwitz, R. and M. Marsson. 1908. Ökologie der pflanzlichen asprobien. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* **26A**: 505-519.
- Kolkwitz, R. and M. Marsson. 1909. Ökologie der tierischen saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologischen Gewässerbeurteilung. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* **2**: 126-152.
- Kolwitz, R. and M. Marsson. 1902. Grundsätze für die biologische Beurteilung des wassers nach seiner flora and fauna. *Mitteilungen der königlichen Prüfungsanstalt für Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung* **1**: 33-72.
- Kong, D.S. 1997. Benthic Macroinvertebrates in Hongseong and Yesan County, in Ministry of Environment (eds.), Natural Environment in Yesan, Seosan and Hongseong, pp. 155-204.
- Kong, D.S. 2002. Biological evaluation criteria of water quality. *Korean Journal of Environmental Biology* **20**: 38-49.
- Lenat, D.R. 1988. Water quality assessment of streams using a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* **7**: 222-233.
- Liemann, H. 1962. Handbuch der Frischwasser und Abwasserbiologie. 2nd edit. R. Oldenbourg, München. 588pp.
- MacKenthun, K.M. 1969. The practice of water pollution biology. U.S. Federal Water Pollution Control Administration, Wasnington, pp. 152-211.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* **3**: 36-71.
- McCafferty, W.P. 1981. Aquatic entomology. Jones and Bartlett, Boston. 448pp.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 1984. An introduction to the Aquatic Insects of North America. 2nd ed. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 1996. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.
- Metcalf, J.L. 1996. Biological Water Quality Assessment of Rivers: Use of Macroinvertebrate Communities. in Petts, G. and P. Calow. River Restoration. Blackwell Science, Oxford, UK.
- MOE/NIER. 2006. Guideline for national survey on the natural environment
- MOE/NIER. 2007. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea.
- MOE/NIER. 2008. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea.
- MOE/NIER. 2009. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea
- MOE/NIER. 2010. The survey and evaluation of aquatic ecosystem health in Korea.
- Nerbonne, B.A. and B. Vonderacek. 2001. Effects of local land use on physical habitat, benthic macroinvertebrates, and fish in the Whitewater River, Minnesota, USA. *Environmental Management* **28**(1): 87-99.
- Nuttal, P.M. and G.H. Bielby. 1973. The effect of china-clay wastes on stream invertebrates. *Environmental Pollution* **5**: 77-86.
- 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 Quality* **27**(6): 760-768.
- Peckarsky, B.L., P.R. Fraissinet, M.A. Penton and D.J. Conklin Jr. 1990. Freshwater Macroinvertebrates of North-eastern North America. Connell Univ. Press, Ithaca and London. 442pp.
- Peitz, D.G. 2003. Macroinvertebrate monitoring as an indicator of water quality. Status Report for Pipestone Creek, Pipestone National Monument, 1989~2002. National Park Service Republic, 1-13.
- Pennak, R.W. 1989. Fresh-Water Invertebrates of the United States. Protozoa to Mollusca, John Wiley & Sons, Interscience. 628pp.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological Diversity, Wiley, New York. 165pp.
- Ross, H.H. 1959. Trichoptera. p. 1024-1049. In: Fresh water Biology. 2nd edition (W.T. Edmondson ed.). Wiley, New York.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Sládeček, V. 1966. Water quality system. *Verhandlungen International Verein Limnology* **16**: 809-816.
- The entomological society of korea. 1994. Check list of insects from Korea. Konkuk Univ. Press, Seoul, Korea.
- Throp, J.H. and A.P. Covich. 2001. Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. Academic Press, San Diago.
- Wiederholm, T. 1983. Chironomidae of the Holarctic region Keys and diagnose. Part I - Larvae. *Entomologica Scan-*

- dinavica Supplement* **19**: 457.
- Won, D.H., S.J. Kwon and Y.C. Jun. 2005. Aquatic insects of Korea. Korea Ecosystem Service, Seoul. 410pp.
- Won, D.H., Y.C. Jun, S.J. Kwon, S.J. Hwang, K.G. Ahn and J.W. Lee. 2006. Development of Korean saprobic index using benthic macroinvertebrates and its application to biological stream environment assessment. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**(5): 768-783.
- Yoon, I.B. 1988. Illustrated Encyclopedia of Fauna & Flora of Korea, Vol. 30 Aquatic Insects, Ministry of Education Republic of Korea.
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu. 1992a. Studise on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (I) - Saprobic valency and indicative value -. *Korean Journal of Environment Biology* **10**(1): 24-39.
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu. 1992b. Studise on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (II) - Effects of environmental factors to community. *Korean Journal of Environment Biology* **10**(1): 40-55.
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu. 1992c. Studise on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (III) - Macroscopic simple water quality evaluation -. *Korean Journal of Environment Biology* **10**(2): 77-84.
- Zelinka, M. and P. Marvan. 1961. Zur Prazisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit flisender Gewasser. *Archiv für Hydrobiologie* **57**: 389-407.

(Manuscript received 14 July 2011,
 Revised 27 January 2012
 Revision accepted 30 January 2012)