

수학적 모형을 이용한 저서성 대형무척추동물 군집지수-조사면적 관계 해석

공동수 · 김아름[†]

경기대학교 생명과학과

Analysis on the Relationship between Biological Indices and Survey Area of Benthic Macroinvertebrates Using Mathematical Model

Dongsoo Kong · Ah Reum Kim[†]

Department of Life Science, Kyonggi University

(Received 18 August 2015, Revised 1 October 2015, Accepted 8 October 2015)

Abstract

This study was conducted to find out the influence of sample size (accumulated survey areas) on the seven biological indices of benthic macroinvertebrates. BMI, the index similar to Zeilika-Marvan's saprobic index, tended to be independent on the variations of sample size. The other indices (Shannon-Weaver's diversity, Margalef's richness, Menhinick's richness, Pielou's evenness, and Lenat's EPT index) showed the considerable variations along with the increase of sample size and environmental conditions. To get the appropriate index values, it should be sampled at least 6 replicates more based on 30×30cm Surber sampler. In addition, the habitat heterogeneity index of benthic macroinvertebrates suggested in this study, it will be able to be used for evaluating the heterogeneity of habitats.

Key words : Benthic macroinvertebrates, Biological index, Habitat heterogeneity, Sample size, Survey area

1. Introduction

일반적으로 종수 및 개체수는 표본크기(조사면적 또는 채집횟수)에 의해 변동되기 때문에 표본크기가 다른 표본군집의 군집지수를 직접비교하여 환경을 평가하는 경우 오류가 있을 수 있다(Kim et al., 2013). 일정수준 이하의 면적에서 저서성 대형무척추동물의 군집지수 값은 조사면적에 따라 민감하게 반응할 수 있다고 알려져 있다(Duggan and Collier, 2002; Kim et al., 2013; Vlek et al., 2006). 생태학적 분석에서 나타날 수 있는 오류의 요인 중 표본크기는 가장 중요한 요인으로 작용할 수 있으며(Morin, 1997), 이에 따라 종 다양성 및 풍부도와 유사성은 물론 먹이망 구조에 대한 해석이 달라질 수 있다(Bagon et al., 1986; Cao et al., 2002).

국외에서는 군집에 대한 대표성과 비용효율을 고려한 표본크기의 연구(Bartsch et al., 1993; Resh and Price, 1984)를 비롯하여 개체수(Duggan and Collier, 2002; Lorenz et al., 2004)와 채집면적(Vlek et al., 2006) 기준의 표본크기에 대한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이들 연구의 대부

분은 하천의 여러 지점들을 소수의 채집횟수로 조사한 결과를 누적하여 각국에서 사용되고 있는 주요 생물지수들이 표본크기에 따라 어떤 변화를 보이는지 파악하는데 중점을 둔 것이다.

국내에서는 Yoon et al. (1998)이 표본크기에 따른 출현종수와 다양도지수의 변화, 출현종수와 개체수의 상관관계를 분석한 바 있으나 다양한 군집지수나 생물지수의 관계에 대한 검토는 이루어지지 않았다. 이후 Kim et al. (2013)이 강원도의 한계천을 대상으로 조사면적에 따른 저서성 대형무척추동물의 종수와 개체수 및 여러 가지 군집지수의 변화 경향을 분석한바 있으나, 수질 및 물리적인 환경상태가 비교적 양호한 한 하천만을 대상으로 하였다는 한계점이 있었다. Kong and Kim (2015)은 다양한 서식환경을 대상으로 여러 가지 수학적 모형을 적용하여 저서성 대형무척추동물의 종수와 조사면적 간의 관계를 분석한 결과 여러 모형 중 와이불 모형(Weibull, 1951)이 가장 적합함을 확인하였으나 해당 연구에서 군집지수에 관한 검토는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 물리·화학적 상태가 다소 불량한 경기도 오산천의 상·중·하류 지점에서 각각 15회 연속 채집한 결과를 확률적으로 조합하여 누적조사면적에 따른 군집지수의 변화를 분석하였으며, 수학적 모형들을 적용하여 면적과 군집지수간의 관계를 해석하였다. 또한 Kong and Kim (2015)의 연구에서 서식처 이질성을 판단하는 지표로 제시되었던 반포화면적(이론적인 총 종수의 1/2에 해당하는 종수를 보

[†] To whom correspondence should be addressed.
dkdbag@nate.com

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.

이는 조사면적)과는 달리 서로 다른 하천들 간의 상대적인 비교가 가능한 무차원적인 서식처 이질성 지표를 새롭게 제시하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 조사 지점

조사대상 하천으로 선정된 오산천은 경기도 용인시·화성시·평택시 등 도심 사이를 흐르는 하천으로 수질 및 물리적 환경이 다소 양호하지 못하다. 조사지점은 고도에 따라 상류, 중류, 하류의 각 1개 지점이었다(Fig. 1).

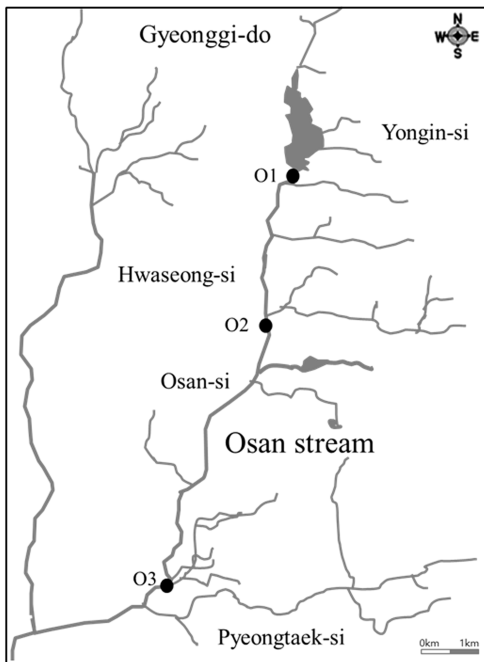


Fig. 1. Location of the survey sites.

2.2. 물리적 환경요인 및 수질 현황

각 지점의 고도(altitude)와 하폭(channel width), 수폭(water width), 유속(water current), 하상(substratum) 등의 자료는 Kong and Kim (2015)의 측정 자료를 이용하였다. 수질은 2012년 수질측정망자료(MOE, 2012) 중 해당 조사지점의 연 평균치 자료이다. 평가에 이용된 수질 항목은 용존산소(Dissolved Oxygen)와 BOD₅ (5-day Biochemical Oxygen Demand), T-N (Total-Nitrogen), T-P (Total-Phosphorus) 등이었다. Sládeček (1969, 1973)의 방법을 이용하여 BOD₅를 기준으로 부수성(saprobity)을 판정하였고, Vollenweider (1974)의 방법을 이용하여 총 인 농도에 따라 영양상태(trophic state)를 분류하였다(Kong and Kim, 2015).

2.3. 데이터의 조합 및 분석

2.3.1. 데이터의 조합

Kong and Kim (2015)의 오산천 지점별 방형구(30×30cm Surber sampler) 데이터를 이용하였다. 군집지수는 각 방형구별 출현종과 종별 개체수를 어떻게 누적하는지에 따라 변화 경향이 다르게 나타나기 때문에 이전의 연구(Kim et al., 2013; Kong and Kim, 2015)에 따라 각 조사단위(sampling unit)의 합에 대한 모든 경우의 수를 조합하여(Table 1) 분석하였다.

2.3.2. 군집분석

출현종수와 더불어 군집구조의 분석 또는 환경상태를 평가하기 위해 흔히 이용되고 있는 7가지의 군집지수를 선정하여 검토하였다(Table 2).

2.3.3. 수학적 모형을 이용한 분석

Kong and Kim (2015)은 와이블 모형이 저서성 대형무척추동물의 종수-조사면적 관계를 해석하는데 적합함을 확인하였다. 최대 종수(S_m)에 대한 측정 종수(S)의 비(S/S_m)가 조사면적에 따라 와이블 모형의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)(식 (1))를 따를 때, 측정 종수가 자연수임을 고려하여 $S_m - 0.5$ 를 가지는 면적을 근사최대 면적(z_{ma})이라 하면 이는 식 (2), 이론적인 총 종수의 1/2에 해당하는 종수를 보이는 조사면적인 반포화면적(z_m)은 식 (3)과 같다.

$$F(z) = \frac{S}{S_m} = 1 - e^{-(z/\lambda)^k} \quad (1)$$

$$S_m - 0.5 = S_m \left[1 - e^{-\left(\frac{z_{ma}}{\lambda}\right)^k} \right], \quad z_{ma} = \lambda [\ln(2S_m)]^{1/k} \quad (2)$$

$$z_m = \lambda (\ln 2)^{1/k} \quad (3)$$

종수와 마찬가지로 조사면적에 따른 다양도지수, 우점도지수, 균등도지수, EPT 지수, Margalef의 종풍부도지수의 변화는 와이블 모형을 적용하여 분석하였다. 최대 지수값(I_m)에 대한 측정 지수값(I)의 비(I/I_m)를 종속변수, 조사면적(z)을 독립변수로 할 경우 조사면적에 따른 와이블 모형의 누적분포함수는 식 (4)가 된다. 이때 α 값은 $z=0$ 의 조건에서의 이론적인 지수치 및 조사면적의 증가에 따른 지수의 변화정도와 관련된 계수다.

$$F(z) = \frac{I}{I_m} = 1 - \alpha e^{-(z/\lambda)^k} \quad (4)$$

Table 1. Combined numbers of sampling units and cumulative survey areas (z) according to cumulative sample size number (n)

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| ${}_{15}C_n$ | 15 | 105 | 455 | 1,365 | 3,003 | 5,005 | 6,435 | 6,435 | 5,005 | 3,003 | 1,365 | 455 | 105 | 15 | 1 |
| $z(m^2)$ | 0.09 | 0.18 | 0.27 | 0.36 | 0.45 | 0.54 | 0.63 | 0.72 | 0.81 | 0.90 | 0.99 | 1.08 | 1.17 | 1.26 | 1.35 |

Table 2. Biological indices used in this study

| Indices | Equation (reference) | Component |
|---------------------------------|---|---|
| Species diversity index | $H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$ (Shannon-Weaver, 1949) | <i>S</i> : Total number of species <i>i</i> : Number assigned to the species <i>p_i</i> : Proportional abundance of <i>i</i> th species (<i>N_i</i> / <i>N</i>) <i>N</i> : Total number of individuals <i>N_i</i> : Number of individuals in species <i>i</i> <i>N₁</i> : Number of individuals in 1 st dominant species <i>N₂</i> : Number of individuals in 2 nd dominant species |
| Dominance index | $DI = \frac{N_1 + N_2}{N}$ (McNaughton, 1967) | |
| Species richness Index | $R1 = \frac{S-1}{\ln N}$ (Margalef, 1958) | |
| | $R2 = \frac{S}{\sqrt{N}}$ (Menhinick, 1964) | |
| Species evenness index | $J = \frac{H'}{\log_2 S}$ (Pielou, 1975) | |
| Intolerant order category index | $EPT = \frac{E+P+T}{S}$ (Lenat, 1988) | <i>E, P, T</i> : Number of species in Ephemeroptera (<i>E</i>), in Plecoptera (<i>P</i>), in Trichoptera (<i>T</i>) |
| Benthic macroinvertebrate Index | $BMI = \left(4 - \frac{\sum_{i=1}^n s_i h_i g_i}{\sum_{i=1}^n h_i g_i} \right) \times 25$ (Kong et al., 2012) | <i>n</i> : Number of taxa <i>s_i</i> : Saprobic valency of <i>i</i> th taxon <i>h_i</i> : Frequency of <i>i</i> th taxon <i>g_i</i> : Indicator weight value of <i>i</i> th taxon |

밀도가 일정할 경우(본 연구에서는 조사단위의 함에 대한 모든 경우의 수를 조합하여 평균한 것이므로 누적조사면적에 따른 밀도는 일정) Menhinick (1964)의 종풍부도지수의 분모에 해당하는 총 개체수(*N*)는 밀도(ρ)와 면적(*z*)의 관계로 나타낼 수 있다(식 (5)). 식 (5)의 분자인 종수를 이에 대한 와이블 함수로 대치하면 누적밀도함수는 식 (6)이 된다.

$$R2 = \frac{S}{\sqrt{N}} = \frac{S}{\sqrt{\rho \cdot z}} = \frac{S}{\sqrt{\rho} \cdot \sqrt{z}} \tag{5}$$

$$F(z) = \frac{a}{\sqrt{z}} \left[1 - be^{-(z/\lambda)^k} \right] \tag{6}$$

조사면적에 따른 저서동물지수(Benthic Macroinvertebrate Index: BMI)의 변화는 가장 높은 적합성을 보인 코사인 함수를 적용하여 분석하였다(식 (7)).

$$F(z) = a + b \cos(cz + d) \tag{7}$$

2.3.4. 서식처 이질성 지수

Kong and Kim (2015)은 식 (3)의 반포화면적(*z_m*)을 서식처의 이질성을 판단하는 지표로 제시한 바 있다.

본 연구에서는 근사최대면적(식 (2))과 반포화면적(식 (3))의 비로 표현되는 무차원 지표를 새로이 제시하며(식 (8), 식 (9)), 이를 Habitat heterogeneity index (*h*) (서식처 이질성 지수)로 명명한다.

$$h = \frac{z_m}{z_{ma}} = \frac{\lambda (\ln 2)^{1/k}}{\lambda [\ln(2S_m)]^{1/k}} = \left[\frac{\ln 2}{\ln(2S_m)} \right]^{1/k} \tag{8}$$

$$h = (1 + \text{Log}_2 S_m)^{-1/k} \tag{9}$$

3. Results and Discussion

3.1. 조사지점의 물리·이화학적 조건

오산천은 비교적 하위고도에 위치하고 있으며 상류에서 하류로 갈수록 하폭과 수폭이 넓어지는 일반적인 하천 특성을 보였다. 오산천의 상류 지점에는 큰자갈 및 자갈의 비율이 높았으나 하류로 갈수록 잔자갈과 모래/실트의 비율이 높아져 상류에서 하류로 갈수록 중위입경(median diameter)이 작아지는 경향을 보였다(Table 3).

오산천의 상류 지점은 빈부수성(oligosaprobic) 상태였고 중류 지점은 β-중부수성(β-mesosaprobic), 하류 지점은 α-중부수성(α-mesosaprobic) 상태였으며, 전체적으로 유기오염도가 높은 과영양(hypertrophic)상태를 보였다(Kong and Kim, 2015).

3.2. 조사면적에 따른 출현 종수의 변화

Kong and Kim (2015)이 와이블 모형을 적용하여 추정된 오산천 각 지점의 최대종수는 하류 지점(52종), 상류 지점(36종), 중류 지점(27종)의 순이었고(Fig. 2(a)), 누적조사면적이 증가함에 따라 종수의 증가율은 감소하였다(Fig. 2(b)).

오산천은 상대적으로 환경상태가 좋지 않음에도 불구하고

Table 3. Physicochemical conditions of the survey sites (Kong and Kim, 2015)

| Code | Altitude (m, HSL) | Width (m) | Water width (m) | Velocity (cm/s) | Substratum $\dagger \Phi_{0.5}$ | *DO (mg/L) | BOD ₅ (mg/L) | T-N (mg/L) | T-P (mg/L) | **Saprobic state | ***Trophic state |
|------|-------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------------------------|------------|-------------------------|------------|------------|------------------------|------------------|
| O1 | 37 | 78 | 10-20 | 63 | -5.0 | 13.4 | 2.3 | 5.40 | 0.25 | oligosaprobic | hypertrophic |
| O2 | 21 | 135 | 26 | 88 | -3.3 | 11.2 | 3.2 | 6.24 | 0.13 | β -mesosaprobic | hypertrophic |
| O3 | 18 | 100-150 | 40-70 | 86 | -1.0 | 10 | 7.5 | 8.47 | 0.56 | α -mesosaprobic | hypertrophic |

$\dagger -\text{Log}_2(\text{mediandiameter, mm})$

* Average annual water quality

** Sládeček (1969, 1973), BOD₅ (mg/L) 0~1: xenosaprobic, 1~2.5: oligosaprobic, 2.5~5: β -mesosaprobic, 5~10: α -mesosaprobic, >10: Polysaprobic

*** Vollenweider (1974), T-P (mg/L) 0~0.01: oligotrophic, 0.01~0.02: mesotrophic, 0.02~0.1: eutrophic, >0.1: hypertrophic

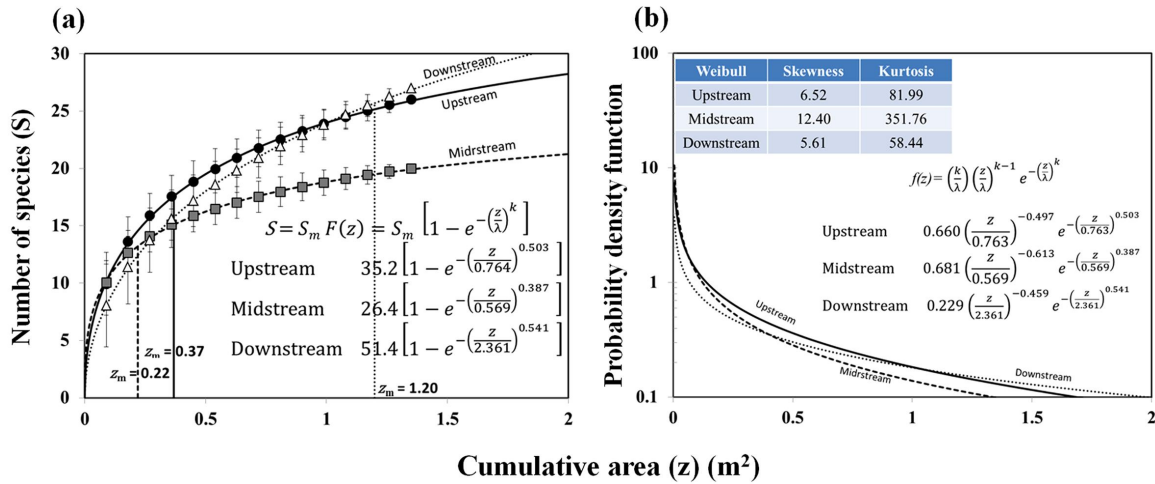


Fig. 2. Weibull cumulative distribution function and Weibull probability distribution function results between number of species and cumulative survey area in the Osan stream (Kong and Kim., 2015).

청정하천인 한계천에 대한 Kim et al. (2013)의 연구결과와 같이 조사면적이 누적됨에 따라 출현 종수의 변화가 컸다.

3.3. 조사면적에 따른 군집지수의 변화

선정된 수학적 모형들은 각각 조사면적의 증가에 따른 각 지수의 변화를 해석하는데 적합하였다(Fig. 3~5).

3.3.1. 다양도지수

조사면적이 증가함에 따라 다양도지수의 값은 증가하였으나 채집횟수 6회에 해당하는 누적조사면적에 이를 경우 최대치에 가까운 수준에 달하고 그 이상의 면적에서는 비교적 일정한 값으로 유지되었다(Fig. 3(a)).

이 결과로 비추어 볼 때 조사면적이 적을 때는 면적이 증가함에 따라 개체수비율이 큰 보통 종들이 가입되면서 다양도지수를 증가시키지만 조사면적이 증가하면 주로 개체수비율이 작은 희소종들이 가입되어 다양도지수의 증가율이 낮아지는 것으로 추정된다(개체수 비율이 작은 희소종의 개별 다양도지수치는 상대적으로 작다). Dufrene and Legendre (1997)은 희소종의 수가 많을 때 다양도지수의 적용성에 문제가 있음을 지적한 바 있다.

Kim et al. (2013)은 청정하천인 한계천에서도 채집횟수 5~6회에 해당하는 면적보다 조사면적이 커지면 다양도지수의 값이 거의 변화되지 않았다고 보고하였는데, 본 연구의 결과와 종합할 때 다양도지수의 값은 환경상태와 크게 관계

없이 일정수준 이상의 면적에서는 조사면적의 규모와는 독립적인 것으로 판단된다.

3.3.2. 우점도지수

우점도지수 값은 조사면적이 증가할 때 감소 또는 증가하였으나, 채집횟수 6회에 해당하는 면적 이상의 조사면적에서는 거의 일정하게 유지되었다(Fig. 3(b)). 와이블 모형의 형상모수(shape parameter) k 값이 음의 값을 보이는 종류 지점과 하류 지점은 조사면적이 증가할 때 지수 값이 감소하였으며, 최대 조사면적에 해당하는 지수 값의 평형치는 이론적인 최대치보다 약 20% 정도 작은 수준으로 나타났다.

종류 지점과 하류 지점의 지수 값이 조사면적의 증가에 따라 감소한 것은 다양한 미소서식처가 조사 시 추가되면서 우세종 외의 종들이 가입되어 특정 우세종의 비율을 감소시키기 때문인 것으로 보인다.

상류 지점의 지수 값은 조사면적이 증가하면서 약한 증가 추세를 보였으나 전체적으로 큰 변화는 없었다. 이는 여러 미소서식처에서 일반적으로 출현하는 종이 우세종으로 나타난 경우라고 판단된다.

한계천에서도 채집횟수 5~6회에 해당하는 면적 이상의 조사면적에서는 우점도지수 값의 변화가 거의 없었으므로 (Kim et al., 2013), 우점도지수 역시 다양도지수와 마찬가지로 환경상태와 큰 관계없이 일정수준 이상에서는 조사면적과 독립적인 것으로 여겨진다.

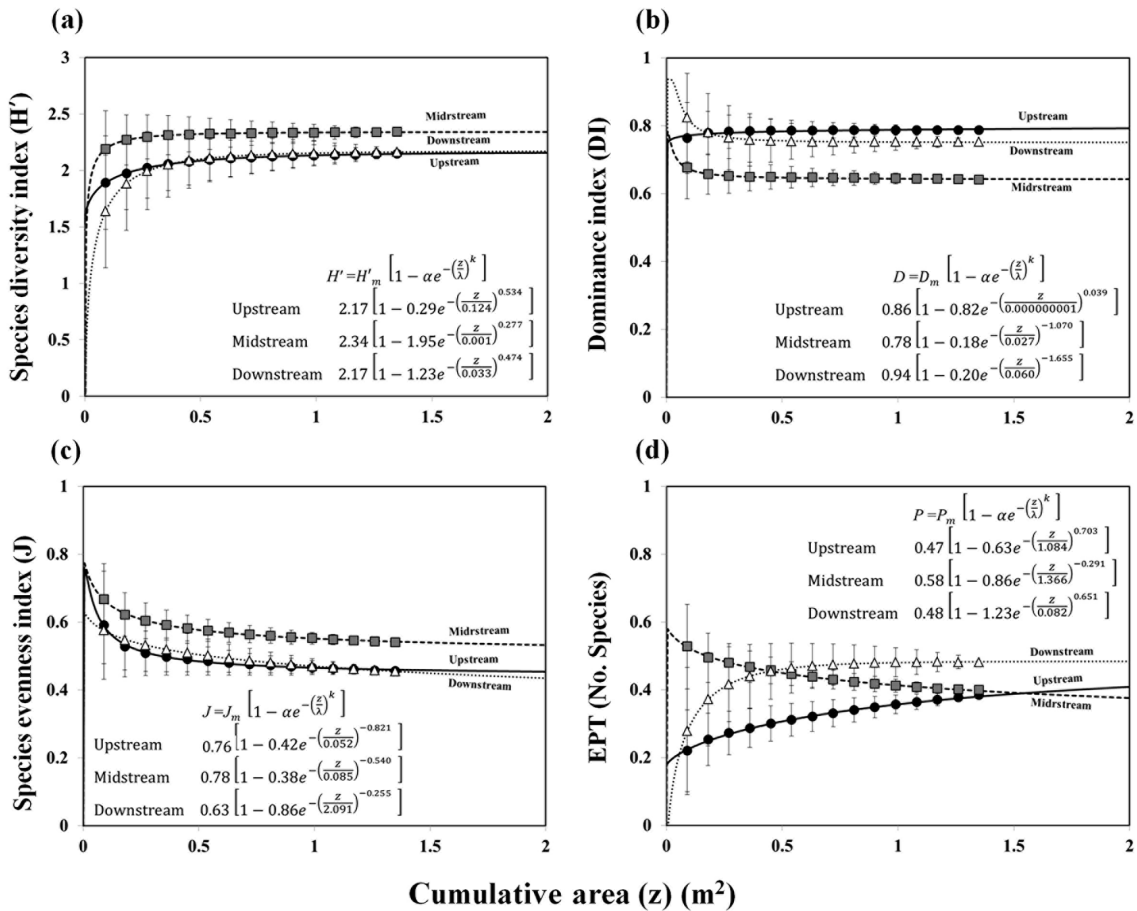


Fig. 3. Weibull cumulative distribution function results between each biological index and cumulative survey area in the Osan stream. (a) Species diversity index, (b) Dominance index, (c) Species evenness index, (d) EPT (based on the number of species)

3.3.3. 균등도지수

균등도지수 값은 조사면적의 증가에 따라 계속하여 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3(c)). 와이블 모형을 적합시킨 결과 최대 조사면적에 해당하는 지수 값의 평형치는 이론적인 최대치보다 40~90% 작은 수준으로 나타났다.

균등도지수의 분모에 해당되는 값(즉 특정 종수에서의 이론적인 최대다양도)은 출현종수만의 함수이며(Table 2), 분자는 실제의 다양도 값이다. 따라서 조사면적이 증가하여 개체수비율이 작은 희소종들이 가입될 때 종수의 증가율에 비해 다양도지수 값의 증가율은 낮아지기 때문에 균등도는 감소하게 된다.

3.3.4. 비내성범주지수

오산천의 조사지점들은 고도가 낮고 대체로 환경상태가 불량하기 때문에 EPT 종들이 적게 출현하여 상대적으로 낮은 EPT(S) (종수기준) 값을 보였으며(0.6 이하), 조사면적이 증가에 따라 지수 값이 중류 지점은 감소하였고 다른 지점은 증가하였다(Fig. 3(d)).

고도가 높아 유속이 빠르고 수온이 낮으며 하상의 대부분이 조립질인 한계천에 대한 Kim et al. (2013)의 조사결과에서는 상류부터 하류까지 모든 지점들의 EPT 지수 값이

0.6 이상으로 높았으며 조사면적이 증가해도 그 지수 값의 변화가 거의 없었다. EPT 지수 값의 변화가 적었던 것은 미소서식처가 전체적으로 EPT 종들이 선호하는 상태로 구성되어 있었기 때문인 것으로 판단된다.

한계천과 비교할 때 오산천은 고도가 낮고 여울과 소 및 흐름 영역이 혼재하여 종횡으로 유속과 하상상태가 다르다. 이러한 하천에서는 EPT 종들이 선호하는 미소서식처가 많고 적음에 따라 조사면적이 증가할 때 EPT 지수 값의 변화경향이 달리 나타날 수 있다.

즉 미소서식처의 상태가 복잡한 조건에서 유속이 빠르고 조립질 하상이 상대적으로 우세한 경우엔 이를 선호하는 EPT 종들이 조사단위가 누적될수록 새로이 가입되어 조사면적의 증가에 따라 EPT 지수의 값이 증가될 수 있는데, 오산천의 상류 지점과 하류 지점이 이에 해당하는 것으로 보인다. 이와 반대로 non-EPT 종들이 선호하는 미소서식처가 우세한 경우엔 조사면적이 증가할수록 EPT 지수 값이 낮아질 수 있음을 추론할 수 있다.

오산천 중류 지점은 인위적인 하천정비로 인해 중앙부의 대부분이 큰 돌의 하상을 가진 여울을 이루고 있었다. 이에 따라 EPT 종 중 절반이 모든 방형구에서 공통적으로 출현하였고, 작은 면적의 조사결과에도 EPT 지수의 값이 컸다.

이처럼 미소서식처가 특이적으로 균질해진 경우에는 주요 서식처인 여울부의 조사면적이 증가해도 새로운 EPT 종의 가입이 적고, non-EPT 종들이 선호하는 일부 미소서식처가 조사에 추가되면 지수의 값이 감소함을 추론할 수 있다.

EPT 지수는 미소서식처의 상태와 그 조성비가 다를 경우 조사면적의 규모에 따라 지점 간에 값의 차이가 크게 나타나기 때문에 동 지수로 서로 다른 지점의 군집구조 또는 환경교란을 평가하고자 할 때는 조사면적을 신중히 고려하여야 할 것이다.

3.3.5. 종풍부도지수

종풍부도지수는 총 개체수에 대한 총 종수로 평가하는 지수이기 때문에 조사면적이 늘어남에 따라 변동되는 종수와 개체수에 의해 지수 값이 변하게 된다(Ludwig and James, 1988). 또한 Margalef의 종풍부도지수(R1)는 개체수의 대수치를, Menhinick의 종풍부도지수(R2)는 개체수의 제곱근을 인자로 쓰기 때문에 조사면적에 따른 지수 값의 변화경향에 차이가 있을 수 있다.

와이블 모델을 적용하여 Margalef의 종풍부도지수(R1)의 경향을 파악한 결과 종수와 마찬가지로 조사면적이 증가함에 따라 지수 값이 꾸준히 증가하는 추세를 보였다(Fig. 4(a)). 반면에 변형 와이블 모델을 적용하여 파악된 Menhinick의 종풍부도지수(R2)의 경향은 조사면적의 증가에 따라 지수 값이 소폭씩 계속하여 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 4(b)).

조사면적에 따른 Margalef의 종풍부도지수(R1)의 값과 Menhinick의 종풍부도지수(R2)의 값의 변화를 수학적으로 해석한 결과는 아래와 같다.

Kong and Kim (2015)은 가평천과 오산천의 저서성 대형 무척추동물의 종수(S)와 조사면적(z)의 관계에 대한 연구에서 Arrhenius 식($S = az^b$) (Arrhenius, 1921)을 적용한 결과, 계수 a (누적조사면적 1 m²에서의 출현종수)의 값이 가평천은 45~60, 오산천은 19~24였으며, 면적지수 b의 값은 가평천이 0.28~0.42, 오산천이 0.24~0.44였다고 보고하였다.

밀도가 일정한 조건에서 분자인 종수를 이에 대한 Arrhenius 함수로 대치하면 지수 R1은 식 (10)과 같이 변형되며, 이를 면적으로 미분하면 식 (11)이 된다.

$$R1 = \frac{az^b - 1}{\ln(\rho z)} \tag{10}$$

$$\frac{dR1}{dz} = \frac{abz^{b-1}}{\ln(\rho z)} - \frac{az^b - 1}{z [\ln(\rho z)]^2} \tag{11}$$

$z = 1$ (누적조사면적 1 m²)의 특정조건에서 R1의 변화량이 0보다 작은 조건(즉 R1의 값이 작아지는 조건)은 식 (12)가 되며, 이에 부합하는 면적지수 b의 조건은 식 (13)이 된다. 즉 누적조사면적 1 m²의 조건에서 R1 값이 감소하려면 출현종수는 극단적으로 작지 않고 면적지수 b의 값과 밀도는 매우 작은 조건이어야 한다.

$$\left. \frac{dR1}{dz} \right|_{z=1} = \frac{ab}{\ln \rho} - \frac{a-1}{(\ln \rho)^2} \leq 0 \tag{12}$$

$$b \leq \frac{a-1}{a \ln \rho} \tag{13}$$

일반적인 하천에서 나타나는 결과는 이상의 조건에 부합되지 않으며, 이에 따라 오산천 역시 조사면적의 증가에 따라 R1 값이 크게 증가하는 것으로 나타났음을 알 수 있다. Kong and Kim (2015)의 연구에서 나타난 오산천 하류 지점의 예(a=24, b=0.44)를 들면 $z = 1$ 의 조건에서 R1의 변화량이 감소하기 위한 밀도는 식 (13)으로부터 약 9 Ind./m²로 계산되는데, 실제 밀도는 2,413 Ind./m²였기 때문에 위 조건과는 큰 차이가 있는 것이다.

또한 Menhinick의 종풍부도지수(R2)의 분자인 종수를 이에 대한 Arrhenius 함수로 대치하면 지수 R2는 식 (14)와

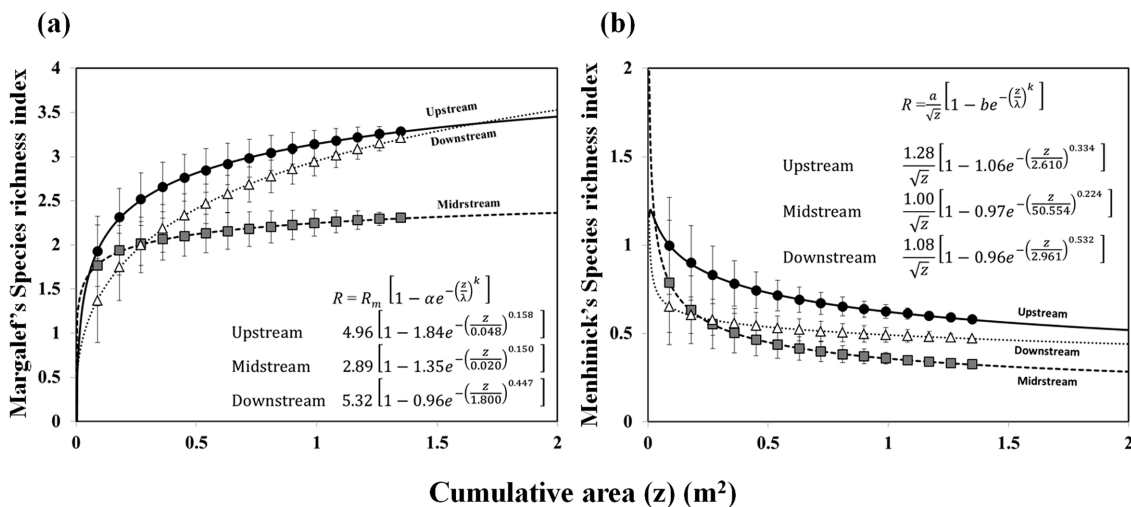


Fig. 4. Response of species richness index to the increase of cumulative survey area. (a) Margalef's species richness index (R1), (b) Menhinick's species richness index (R2) in the Osan stream.

같이 변형된다. 즉 면적지수 b 의 값이 0.5보다 커야만 조사면적이 증가할 때 R2의 값이 증가하게 되는데, 오산천의 b 값은 0.24-0.44의 범위이므로 조사면적의 증가에 따라 R2의 값은 감소할 수밖에 없다.

$$R2 = \frac{S}{\sqrt{N}} = \frac{az^b}{\sqrt{\rho} \cdot \sqrt{z}} = cz^{b-0.5} \quad (14)$$

Boyle et al.(1990)은 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 사용하여 Margalef의 종풍부도지수(R1)가 군집구조에 민감하게 반응하며, 군집 내 종수의 작은 손실로도 종풍부도지수(R1) 결과가 엉뚱한 반응으로 이어질 수 있음을 밝혔다.

본 연구의 결과로 볼 때 조사면적에 따른 두 가지 종풍부도지수의 변화경향은 서로 다르고, 충분히 큰 조사면적에 의한 값도 모군집의 값을 대표할 수 없었다. 또한 채집횟수 5회 이하에서는 지점 간 값의 대소마저 모군집의 속성을 왜곡시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.3.6. 저서동물지수

조사대상 하천의 유기오염을 지표하는 저서동물지수(BMI)는 각 지점의 수질에 따라 지점 간에 값의 차이가 크게 나타났다(Fig. 5). 내성치가 다른 분류군들의 구성에 따라 조사면적에 따른 BMI의 변화경향은 지점별로 진폭과 주기가 다른 진동형태를 보였지만 그 변동은 매우 작은 수준이었다.

본 연구에서 검토된 지수 중 전체 중 또는 상위분류군의 종수나 개체수에 의해 결정되는 다른 지수와 달리, BMI는 개별 지표생물군의 출현도에 따른 영향을 받기 때문에(Kong et al., 2012) 지수 값이 조사면적에 독립적으로 나타난 것으로 판단된다. 즉 누적조사면적이 증가함에 따라 새로이 가입되는 분류군이 유사한 내성치를 가짐에 따라 지수 값의 변동이 적은 것으로 판단된다(Kim et al., 2013).

상류 지점과 하류 지점은 작은 규모의 조사면적에서 BMI의 오차가 상대적으로 크게 나타났는데(Fig. 5(a),(c)), 이는 내성치가 다른 일부 분류군이 특정 미소서식처에서 집중 출현한데 따른 것이었다.

3.4. 서식처 이질성 지수

Kong and Kim (2015)은 반포화면적(식 (3))을 서식처 이

Table 4. Comparison between half-saturation area (z_m) and the habitat heterogeneity index (h) in the survey sites

| Code | Half-saturation area (z_m, m^2) | Habitat heterogeneity index (h) |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| O1 | 0.37 | 0.027 |
| O2 | 0.22 | 0.011 |
| O3 | 1.20 | 0.030 |

질성의 지표로 제시한 바 있다. 서식처의 이질성이 클수록 조사면적의 증가에 따라 종 다양성이 증가(Benton et al., 2003; MacArthur and Wilson, 1967)하기 때문에 반포화면적이 클수록 최대종수에 달하는 조사면적이 커지게 되며 그만큼 서식처의 이질성이 높은 곳으로 평가할 수도 있다(Kong and Kim, 2015).

그러나 같은 반포화면적을 갖는 경우에도 환경용량의 차이로 인해 최대 종수가 다른 경우에는 조사면적에 따른 종수의 변화 경향이 달라지기 때문에 반포화면적만을 가지고는 서로 다른 하천들 간의 서식처 이질성을 객관적으로 비교하기 어렵다.

본 연구에서는 근사최대면적과 반포화면적의 비로 표현되는 무차원 지수(h)를 새로이 도출하고 기준에 제시되었던 반포화면적(Kong and Kim, 2015)과의 적용성을 비교 분석하였다(Table 4).

반포화면적(z_m)과 서식처 이질성 지수(h)의 지점 간 값의 순위는 차이가 없었으나, 하류 지점과 상류 지점 간 값의 차이는 반포화면적이 서식처 이질성 지수보다 크게 나타났다. 상류 지점과 중류 지점의 다양도지수 등의 군집지수는 절대 값에는 다소 차이가 있었으나 조사면적의 증가에 따른 변화는 큰 차이가 없었음을 고려할 때, 반포화면적에 의한 평가는 이질성의 차이를 크게 왜곡시키는 것으로 보이며 이보다는 서식처 이질성 지수가 지표로서 더욱 적합한 것으로 판단된다.

또한 중류 지점의 서식처 이질성 지수 값은 특히 작았는데 이는 인위적인 하천정비로 인해 서식처가 단순하고 균질화된 점과 관련이 있는 것으로 보인다.

4. Conclusion

경기도에 위치한 오산천을 대상으로 누적조사면적과 저

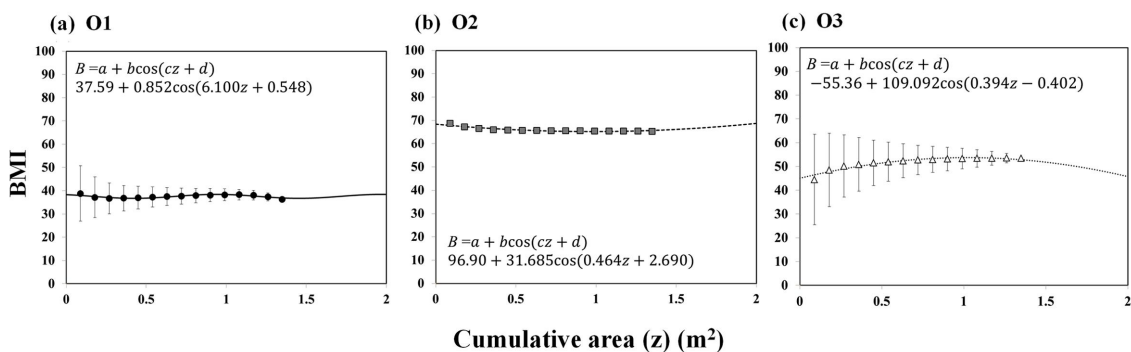


Fig. 5. Response of BMI to the increase of cumulative survey area in the Osan stream.

서성 대형무척추동물 군집지수간의 관계를 수학적 모형을 적용하여 분석하고, 서식처 이질성 지수를 새로이 제시하여 그 적용성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 작은 규모의 조사면적(30×30cm Surber sampler로 3~4회 채집)에 의한 군집지수는 모군집의 지수 값을 대표할 수 없을 뿐만 아니라 지점 간 군집구조의 차이는 물론 환경교란에 대한 평가를 왜곡시킬 수 있다.
 - 환경상태가 상이한 한계천과 오산천의 모든 지점에서 다양도지수와 우점도지수는 채집횟수 5~6회에 해당하는 면적 이상의 조사면적에서는 큰 차이를 보이지 않으므로 이러한 지수를 파악하기 위한 비용효율적인 채집횟수는 최소 6회로 볼 수 있다.
 - 균등도지수, ETP 지수, 종풍부도지수는 조사면적의 증가에 따라 그 변화가 계속되고 작은 규모의 조사면적에서는 지점 간 지수 값의 차이가 각각의 모군집의 값과 달리 나타날 수 있다. 따라서 지점 간 지수 값의 비교를 위해서는 조사횟수를 동일하게 해야 하며 지점 간 차이에 대한 평가를 왜곡시키지 않으려면 최소 6회 이상의 채집횟수가 필요하다.
 - 다른 지수와 달리 BMI는 조사면적(채집횟수)에 따른 변화가 적어 작은 규모의 조사면적으로도 모군집의 값을 추정하는데 큰 무리가 없으나 표본오차를 고려할 때 가용비용 범위에서 표본크기를 증가시키는 것이 적정할 것이다.
- 2) 본 연구에서 제시한 서식처 이질성 지수는 기존에 제시된 지표인 반포화면적에 비해 서식처의 이질성을 보다 합리적으로 대변하는 것으로 판단된다.

References

- Arrhenius, O. (1921). Species and Area, *Journal of Ecology*, 19, pp. 95-99.
- Bagon, M., Harper, J. L., and Townsend, C. R. (1986). *Ecology: Individuals, Populations and Communities*, Blackwell Science, Oxford, pp. 876.
- Bartsch, L. A., Richardson, W. B., and Naomi, T. J. (1993). Sampling Benthic Macroinvertebrates in a Large Flood-Plain River: Considerations of Study Design, Sample Size, and Cost, *Environmental Monitoring and Assessment*, 52, pp. 425-439.
- Benton, T. G., Vickery, J. A., and Wilson, J. D. (2003). Farmland Biodiversity: is Habitat Heterogeneity the Key?, *Trends in Ecology & Evolution*, 18(4), pp. 182-188.
- Boyle, T. P., Smillie, G. M., Anderson, J. C., and Beeson, D. R. (1990). A Sensitivity Analysis of Nine Diversity and Seven Similarity Indices, *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 62, pp. 749-762.
- Cao, Y., Williams, D. D., and Larsen, D. P. (2002). Comparison of Ecological Communities: The Problem of Sample Representativeness, *Ecological Monographs*, 72(1), pp. 41-56.
- Duggan, I. C. and Collier, K. J. (2002). Evaluation of Invertebrate Biometrics and the Influence of Subsample Size Using Data from Some Westland, New Zealand, Lowland Streams, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 36, pp. 117-128.
- Dufrene, M. and Legendre, P. (1997). Species Assemblages and Indicator Species: the Need for a Flexible Asymmetrical Approach, *Ecological Monographs*, 67(3), pp. 345-366.
- Kim, A. R., Oh, M. W., and Kong, D. S. (2013). The Influence of Sample Size on Environment Assessment Using Benthic Macroinvertebrates, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(6), pp. 790-798. [Korean Literature]
- Kong, D. S., Son, S. H., Kim, J. Y., Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Chon, T. S., Lee, J. E., Park, J. H., Kwak, I. S., Kim, J. S., and Ham, S. A. (2012). Development and Application of Korean Benthic Macroinvertebrates Index for Biological Assessment on Stream Environment, *Proceedings of the 2012 Spring Conference and Water Environmental Forum of Yeongsan River*, Korean Society of Limnology, pp. 33-36. [Korean Literature].
- Kong, D. S. and Kim, A. R., (2015). Analysis on the Relationship between Number of Species and Survey Area of Benthic Macroinvertebrates Using Weibull Distribution Function, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(2), pp. 142-150. [Korean Literature]
- 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, pp. 222-233.
- Lorenz, A., Kirchner, L., and Hering, D. (2004). 'Electronic Subsampling' of Macrobenthic Samples: How Many Individuals are Needed for a Valid Assessment Result?, *Hydrobiologia*, 516, pp. 299-312.
- Ludwig, J. A. and James, F. R. (1988). *Statistical Ecology: A Primer on Methods and Computing*, Wiley-Interscience Publication, New York, pp. 86.
- MacArthur, R. H. and Wilson, E. O. (1967). *The Theory of Island Biogeography*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Margalef, R. (1958). Information Theory in Ecology, *General Systems*, 3, pp. 36-71.
- Menhinick, E. F. (1964). A Comparison of Some Species-Individuals Diversity Indices Applied to Samples of Field Insects, *Ecology*, pp. 859-861.
- McNaughton, S. J. (1967). Relationship among Functional Properties of California Grassland, *Nature*, 216, pp. 168-169.
- Ministry Of Environment (MOE). (2012). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do> (accessed Jun. 2012).
- Morin, A. (1997). Empirical Models Predicting Population Abundance and Productivity in Lotic Systems, *Journal of the North American Benthological Society*, 13, pp. 319-337.
- Pielou, E. C. (1975). *Ecological Diversity*, Wiley-Interscience Publication, pp. 165.
- Resh, V. H. and Price, D. G. (1984). Sequential Sampling: A Coast-Effective Approach for Monitoring Benthic Macroinvertebrates in Environmental Impact Assessments, *Environmental Management*, 8(1), pp. 75-80.
- Shannon, C. E. and Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana.
- Sládeček, V. (1969). The Measures of Saprobity, *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 17, pp. 546-559.

- Sládeček, V. (1973). System of Water Quality from Biological Point of View, *Archiv für Hydrobiologie, Beiheft. Ergebnisse der Limnologie*, Stuttgart, 7, pp. 218.
- Vlek, H. E., Sporka, F., and Krno, I. (2006) Influence of Macro-invertebrates Sample Size on Bioassessment of Streams, *Hydrobiologia*, 566, pp. 523-542.
- Vollenweider, R. A. (1974). *A Manual on Methods for Measuring, Primary Production in Aquatic Environments*, IBP Handbook No. 12, International Biological Programme, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 225.
- Weibull, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *Journal of Applied Mathematics*, 18, pp. 293-296.
- Yoon, I. B., Bae, Y. J., Ro, T. H., Lee, S. J., and Park, J. H. (1998). Determination on the Optimal Sample Size in the Aquatic Insect Community Analysis - Pangtae Creek Model, *Korean Journal of Ecology and Field Biology*, 21(5), pp. 409-418.