

## 가평천 저서성 대형무척추동물의 물리적 서식처 적합성 평가

공동수 · 김아름<sup>†</sup>

경기대학교 생명과학과

### Estimation on the Physical Habitat Suitability of Benthic Macroinvertebrates in the Gapyeong Stream

Dongsoo Kong · Ah Reum Kim<sup>†</sup>

Department of Life Science, Kyonggi University

(Received 15 November 2016, Revised 26 January 2017, Accepted 22 February 2017)

#### Abstract

Habitat suitability index (HSI) of 17 benthic macroinvertebrate taxa, which were lotic insects of generic category except Potamanthidae in mayfly, was developed for three physical habitat factors (current velocity, water depth and substrate) based on an ecological monitoring in a Korean stream (Gapyeong). Weibull model was used as a probability density function to analyze the distribution of individual abundance related with physical factors, which showed it was so available. Number of species and total individual abundance increased along with the increase of current velocity and the mean diameter of substrate, and decreased along with the increase of water depth. Most taxa showed a clear preference for a fast current velocity, shallow water depth and coarse substrate except *Ephemera*, Potamanthidae (mayfly), and *Plectrocnemia* (caddisfly) which were rheophobic, potamophilic and lithophobic. Based on the canonical correspondence analysis, the relative importance of each factor was determined as follows: current velocity > substrate > water depth.

**Key words** : Benthic macroinvertebrates, Environmental flow, Gapyeong stream, Habitat Suitability Index

#### 1. Introduction

환경유량(environmental flow)이란 용어는 1970년대 중반에 대두된 이래, 최근에는 담수와 기수 생태계뿐만 아니라 인간 생활과 복지를 유지하기 위한 수문학적 체계를 정의하기 위해서 널리 이용되고 있다(Acreman, 2016).

우리나라에서는 법정용어로 ‘환경생태유량’이 사용되고 있다. 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 제22조의 3에서는 환경생태유량을 ‘수생태계 건강성 유지를 위하여 필요한 최소한의 유량’이라 정의하고, 같은 조항에서 이에 대한 고시 및 확보와 관련된 사항을 규정하고 있으며 2018년 1월 18일부터 시행을 앞두고 있다.

비슷한 의미로 세계적으로 통용되는 용어는 ‘환경유량’이다. 일반적으로 유역의 환경유량은 하도내(instream)와 하도밖(outstream)에서 이용되며(Li et al., 2009), 하도내 환경유량은 하도의 구조와 수생태계의 다양성을 보호하기 위해 요구되는 유량에 해당된다(Thame, 2003).

환경유량을 산정하는 방법은 수문학적(hydrological) 방법, 수리학적(hydraulic) 방법, 서식처 방법, 전체론적(holistic) 방법의 4개의 범주로 분류될 수 있다(Ahmadi-Nedushan et al., 2006; Halleraker et al., 2007; Li et al., 2009; Thame, 2003). 정량적인 생물학적 정보를 바탕으로 한 서식처 방법은 유량을 포함한 서식처의 변화가 목표 생물군에 미치는 영향을 통합적으로 고려하는 것이기 때문에 최근에 가장 믿을만한 방법으로 지지되고 있다(Thame, 2003; Yang and Zhang, 2003). 하도유량증분법(instream flow incremental method, IFIM)은 가장 널리 알려지고 지지되어 온 서식처 방법 중 하나이다(Stalnaker et al., 1995; Waddle, 2001).

역사적으로 IFIM의 적용을 통한 환경유량의 산정은 주로 어류에게 적합한 서식처를 제공하기 위해 이루어진 반면 저서성 대형무척추동물을 대상으로 수행된 IFIM 관련 연구는 일부(Gore et al., 2001; Jowett et al., 1991; Li et al., 2009; Thame, 2003)에 불과하다. 그러나 대부분의 낮은 차수의 작은 하천은 저서성 대형무척추동물이 다양하고 풍부한 반면에 어류상은 빈약하다(Barbour et al., 1999; Gore et al., 2001). 따라서 이러한 수계에서는 환경유량 산정을 위한 저서성 대형무척추동물의 적용성이 상대적으로 커질 수 있다(Gore et al., 1998; Gore et al., 2001; Smith et al., 1999)

저서성 대형무척추동물의 밀도는 수심, 유속, 하상기질,

<sup>†</sup> 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.

수질, 수온과 같은 복잡한 환경요인과 관련되어 있다. 최근의 연구는 수심, 유속, 하상기질과 같은 주요 요인에 더 중점을 두고 수행되고 있다(Gore et al., 2001; Jowett and Richardson, 1990; Quinn and Hickey, 1990).

IFIM을 적용하기 위해 필요한 서식처 지수로서 가장 흔히 이용되는 서식처적합도지수(habitat suitability index, HSI)는 다양한 환경요인에 대한 수중생물의 선호도를 표현하기 위해 이용되는 해석 수단이다(Vadas and Orth, 2001; Vismara et al., 2001). HSI는 1) 전문가의 의견 또는 문헌 모형, 2) 서식처 이용 모형(habitat utilization model), 3) 서식처 선호도 모형(habitat preference model)을 통해 개발된다(Ahmadi-Nedushan et al., 2006; Waddle, 2001).

저서성 대형무척추동물의 서식처 적합도는 서식하는 생물군의 지역적 특이성에 따라 지역에 따라 다를 수밖에 없다. 또한 환경유량을 산정하기 위한 대상 또는 목표를 군집단위로 설정할 것인가 개별 분류군으로 설정할 것인가에 따라 다를 수 있으며, 개별 분류군에서도 그 분류학적 범주(category)의 수준에 따라 차이가 날 수 있다.

외국의 경우와 마찬가지로 우리나라에서도 어류를 중심으로 환경유량 또는 서식처 적합도에 대한 연구가 수행되어 왔다. Lee et al. (2006)은 한강수계의 4개 지류에서 어류를 대상으로 IFIM 기법을 적용하여 환경유량을 산정한 바 있으며, Kang et al. (2011)은 금강수계에서 어류의 서식처 적합도를 연구한 바 있고, 최근에도 여러 하천에서 관련 연구가 수행되고 있다(Hur et al., 2014; Kim et al., 2016).

우리나라에서는 저서성 대형무척추동물을 대상으로 물리적 환경요인의 적합도를 정량적으로 조사하여 보고한 사례를 아직 찾아 볼 수 없다. 본 연구는 경기도에 소재한 하천 중 비교적 높은 자연성을 유지하고 있는 가평천에서 유속, 수심, 하상기질과 저서성 대형무척추동물군을 동시 조사하여, 흔히 출현하는 속(Genus) 단위의 주요 분류군들이 가지는 서식처 적합도를 분석한 것이다. 환경요인의 구간별 생물 출현도를 확률질량함수로 변환하고 이에 부합하는 확률밀도함수를 적용함으로써 HSI를 통계학적으로 도출하였는데, 이와 같은 통계학적 접근은 국내에서는 첫 사례에 해당한다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. 조사지점

고도에 따른 물리적 서식환경 및 계절별 생물군집의 변화를 고려하여 가평천의 상·중·하류 3개를 조사지점으로 선정하였다(Fig. 1).

### 2.2. 현장조사 및 동정

본 연구에서 사용된 실측자료는 본 연구진이 참여하여 2014년에 수행한 환경부의 「환경생태유량 산정기준 연구 및 시범산정 연구」를 통해 얻어진 것이며, 본 연구의 주요 결과인 HSI는 이를 재해석하여 도출한 것이다. 현장조사는 2014년 5월 22~23일(1차), 8월 13~14일(2차), 11월 27~29

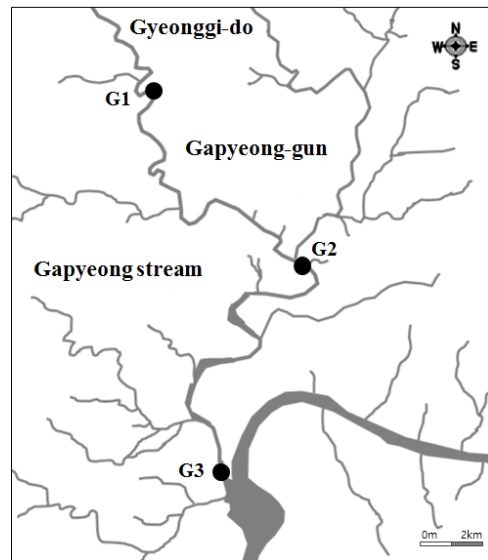


Fig. 1. Location of the survey sites.

일(3차) 총 3회에 걸쳐 실시되었다. 동일한 조사자가 각 조사지점에서 하류에서 상류로 지그재그(zigzag)로 이동하며 조사하였다. 각 지점별로 10개 정점을 선정하여 Surber net (30 × 30 cm, mesh size 1 mm)로 저서성 대형무척추동물을 정량 채집하였으며 총 조사단위(sampling unit)는 90개(10개 방형구/지점/회 × 3지점 × 3회)였다. 채집물은 각 조사단위별로 번호를 부여한 후 플라스틱 병에 넣어 현장에서 95% Ethyl alcohol에 고정하였다. 실험실에서 각 방형구별 채집물로부터 생물시료를 개별적으로 골라낸 후 동정하였다.

### 2.3. 물리적 환경요인

채집 전에 각 방형구 설치장소의 유속, 수심, 하상을 조사하였다. 유속과 수심은 각각 유속측정계(Flow-Mate Model 2000)와 쇠자로 측정하였으며, 하상기질의 입도는 격자망 (50 cm × 50 cm, mesh size 5 cm)을 이용하여 수평 표면에서의 면적비를 기준으로 산출하였다. 무게비를 기준으로 한 입도분석은 측정 과정에 저서성 대형무척추동물이 유실될 수 있으므로 적용하기 어렵다. 육안적인 하상구조의 분석은 조사자가 다를 경우의 재현성 및 정밀도(precision) 부족이 문제점으로 제기될 수 있지만, 빠르고 쉬운 방법이며 무게 조성비로는 알 수 없는 세립질 하상재료의 표면적인 배열을 평가할 수 있다(IFASG, 1986). 즉 깨끗한 잔돌위에 세사(silt)가 베니어합판처럼 얇게 덮여 하상의 간극을 메우고 있다면 그 무게비는 적지만 어떤 생물들에게는 큰 영향을 줄 수 있기 때문이다(IFASG, 1986). 같은 이유로 Li et al., (2009)도 이러한 시각적 평가를 채택하여 면적비를 기준으로 서식처 적합도 평가에 적용한 바 있다. 하상의 입도는 Cummins (1962)의 기준에 따라 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,  $\Phi \geq -1$ )의 5단계로 구분하여 측정하였다.

하상의 입경가적곡선은 와이블(Weibull) 모형을 적용하여 도출하고 해당 함수식으로부터 평균입경을 산출하였다. 와이블 모형은 Fréchet (1927)가 고안하였는데, 그 후 Rosin and Rammler (1933)는 광물질의 입도분석을 위해 와이블 모형을 적용하였으며, 스웨덴의 물리학자 Weibull이 이를 체계화하였다(Weibull, 1951). 이 모형은 금속 및 복합재료의 강도나 전자 및 기계부품의 수명분포를 나타내는 데 활용되고 있으나, 생물종수와 면적과의 관계 해석에 적용되는 등(Flather, 1996; Kong and Kim, 2016; Rørslett, 1991) 생태학적 연구에서도 활용되고 있다.

2.4. 군집분석

저서성 대형무척추동물의 군집구조 및 분류군별 분포에 미치는 환경요인의 영향을 파악하기 위해 정준대응분석(Canonical Correspondence Analysis, CCA)을 하였다.

2.5. 생물의 서식처적합도 평가

본 연구에서 저서성 대형무척추동물의 서식처 적합도를 파악하기 위한 대상 요인은 유속(U), 수심(H), 하상의 평균 입경( $\phi_m$ )이었다.

서식처 적합도의 기준이 되는 값은 환경요인의 특정 구간을 기준으로 특정 분류군의 출현유무만을 고려한 상대출현 빈도 또는 평균개체수, 이 두 요인을 복합한 값(Dufrene and Legendre, 1997), 목표 생물군의 상대수도(relative abundance) (Li et al., 2009), 출현개체수를 가중치로 한 특정 요인의 가중평균치(Jowett et al., 1991) 등이 될 수도 있다.

본 연구에서는 각 방형구 조사에서 나타난 요인(유속, 수심, 하상의 평균입경)의  $i$ 구간별 총 출현개체수( $N_i$ )를 해당 생물 분류군이 출현한 방형구 수( $n_i$ )로 나눈 값 즉 해당 분류군이 출현한 방형구 기준 평균개체수( $a_i$ )를 서식처 적합도의 기준 값으로 적용하였다(식 (1)).

$$a_i = N_i/n_i \tag{1}$$

즉 요인의  $i$ 구간에서 조사시점에 특정 생물군이 출현하지 않은 경우 그 이유가 분석대상인 환경요인외에 다른 요인(수질, 수온, 먹이원 등)에 의한 것일 수도 있기 때문에 이러한 조사결과는 분석대상에서 제외하는 것이 합리적이라고 본 것이다.

본 조사에서 사용한 도구(Surber net)의 규격과 조사단위의 수는 동일하므로 각 요인의 구간별 각 생물종의 평균개체수의 기대치는 동일하다. 따라서 요인구간별로 출현한 평균개체수의 상대적인 값은 서식처적합도를 의미하며 분류군별 계산 절차는 다음과 같다.

- a. 각 요인의  $i$ 구간별 출현 조사단위 기준의 평균개체수( $a_i$ )를 구한다(식 (1)).
- b. 구간별 평균개체수( $a_i$ )를 누적하여 누적개체수( $A_i$ )를 구한다.

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \tag{2}$$

- c. 요인 값( $x$ )과 누적개체수( $A_i$ )의 관계를 적합하게 해석할 수 있고 이론적인 최대치( $A_m$ )를 추정할 수 있는 모형을 선택한 후, 실측치와 모형 추정치의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)가 최소가 되는 모수를 구한다.
- d. 관련 모형에서 누적밀도함수(cumulative density function, CDF)와 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 추출하여, 각 분류군의 통계량(평균, 중위수, 최빈수, 분산, 4분위수, 특정 출현확률에 해당하는 요인 값)을 구하고 이를 서식처적합도 평가에 활용한다.

HSI를 산정하는 일반적인 방법은 환경요인의 어떤 값에서 출현한 최대개체수로 그 요인의 다른 값에서 출현한 개체수를 나누는 것이기 때문에 HSI는 0~1의 범위 값을 가지게 되며(Ahmadi\_Nedushan et al., 2006) 환경요인의 HSI 값을 이으면 도수절선의 형태로 나타나게 된다. 그러나 도수절선과 같은 도형적인 HSI는 특정 환경요인에 대한 해당 HSI 값을 도출하는 과정에 일일이 보간법으로 계산해야 하는 불편함이 있으며, 기록적인 측면에서도 관리가 어렵다.

본 연구에서는 각 물리적 요인들에 따른 분류군의 출현도를 해석하기 위해서 와이블 모형을 적용하였다. 이러한 연속함수는 특정 환경요인 값에 해당하는 HSI를 함수로부터 직접 구할 수 있기 때문에 편리하며, 함수식 자체로 기록관리가 용이하고 항상 동일한 재현성을 보일 수 있는 장점이 있다.

$A_i/A_m$ 가 각 요인 값( $x$ )에 따라 식 (3)과 같은 와이블 모형의 누적밀도함수  $F(x)$ 를 따른다고 가정할 때, 누적밀도함수와 확률밀도함수  $f(x)$ 는 식 (4)와 같다.

$$F(x) = A_i/A_m = 1 - e^{-[(x+c)/\lambda]^k} \tag{3}$$

$k$ : 형상모수(shape parameter)

$\lambda$ : 척도모수(scale parameter)

$c$ : 위치모수(location parameter) 또는 역치모수(threshold parameter)

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left( \frac{x+c}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^k} \tag{3}$$

이때  $f(x)$ 의 최대값  $f(x)_m$ 은  $f'(x) = 0$ 의 값을 가지는  $x$ 값에 대응하는 값이다.

$$x = \lambda \left( \frac{k-1}{k} \right)^{1/k} - c \quad \left| \quad f'(x) = 0 \tag{4}$$

$$f(x)_m = \frac{k}{\lambda} \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{k-1}{k}} e^{-\frac{k-1}{k}} \quad \left| \quad f'(x) = 0 \tag{5}$$

HSI는  $f(x)$ 의 값을  $f(x)_m$ 의 값으로 나눈 값(식 (10))으

로서 0~1의 범위를 가지게 된다.

$$HST = \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1-k}{k}} \left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^{k-1} e^{\frac{k-1}{k} - \left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^k}$$

$$= \frac{\lambda}{k} e^{\frac{k-1}{k}} \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1-k}{k}} weibull(x+c) \tag{6}$$

요인 값(x)과 누적개체수(A<sub>i</sub>) 관계식의 모수(A<sub>m</sub>, c, λ, k)는 추정치와 실측치의 평균제곱근오차(RMSE)가 최소가 될 때까지 시행착오법으로 추출하였다.

이 모형에서 평균(μ), 분산(σ<sup>2</sup>), 중위수( $\tilde{x}$ ), 최빈수( $\hat{x}$ ), 특정 확률(p)에 해당하는 값(x<sub>p</sub>)은 x값의 범위에 따라 달라진다.

① -c ≤ x ≤ ∞ 또는 -∞ ≤ x ≤ ∞

요인이 수십인 경우처럼 생물군의 출현에 대한 요인 값이 역치 값을 가지거나(즉 c 값이 음의 값을 가질 경우), 하상입도의 ϕ처럼 음의 큰 값을 가지는 경우를 예로 들 수 있다. 이 식의 통계량은 와이불 기본모형의 통계량에서 역치 값만큼 수평이동한 값이 된다.

$$\mu = \lambda\Gamma(1+1/k) - c \tag{7}$$

$$\sigma^2 = \lambda^2\Gamma(1+2/k) - (\mu+c)^2 \tag{8}$$

$$\tilde{x} = \lambda(\ln 2)^{1/k} - c \tag{9}$$

$$\hat{x} = \lambda\left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} - c \tag{10}$$

$$x_p = \lambda[-\ln(1-p)]^{1/k} - c \tag{11}$$

② 0 ≤ x ≤ ∞

요인이 유속인 경우처럼 요인 값이 0이어도 생물이 서식할 수 있는 경우를 예로 들 수 있으며, 이 경우  $\int_0^\infty f(x) dx = [F(x)]_0^\infty = e^{-(c/\lambda)^k} = \alpha \neq 1$ , F(0) = 1-α가 되기 때문에 최빈수를 제외한 통계량이 α 값에 영향을 받는다.

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \left[ \lambda\Gamma(1+1/k) - \int_0^c xf(x) dx \right] - c \tag{12}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\alpha} \left[ \lambda^2\Gamma(1+2/k) - \int_0^c x^2f(x) dx \right] - (\mu+c)^2 \tag{13}$$

$$\tilde{x} = \lambda[\ln(2/\alpha)]^{1/k} - c \tag{14}$$

$$\hat{x} = \lambda\left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} - c \tag{15}$$

$$x_p = \lambda\{-\ln[\alpha(1-p)]\}^{1/k} - c \tag{16}$$

해석 해를 구하기 어려운 적분항은 수치해석으로 구했다.

$$\int_0^c xf(x) dx \approx \sum_{x_i=0}^{c-\Delta x} \frac{(x_i+\Delta x)f(x_i+\Delta x) + x_if(x_i)}{2} \Delta x \tag{17}$$

$$\int_0^c x^2f(x) dx \approx \sum_{x_i=0}^{c-\Delta x} \frac{(x_i+\Delta x)^2f(x_i+\Delta x) + x_i^2f(x_i)}{2} \Delta x \tag{18}$$

특정 환경요인에 대한 각 분류군의 적응 유형은 각 분류군의 최빈수에서 총 출현 분류군 최빈수의 4분위수 중앙치를 뺀 값(Q\_Mode)을 X축으로, 각 분류군의 표준편차에서 총 출현 분류군 표준편차 4분위수 중앙치를 뺀 값(Q\_STD)을 Y축으로 하여 16단계로 유형화하였다.

$$Q\_Mode = Mode - (Q_{m1} + Q_{m3})/2$$

$$Q\_STD = STD - (Q_{s1} + Q_{s3})/2$$

Q<sub>m1</sub>: 최빈수의 제1사분위수(1st Quartile of modes)

Q<sub>m3</sub>: 최빈수의 제3사분위수(3rd Quartile of modes)

Q<sub>s1</sub>: 표준편차의 제1사분위수(1st Quartile of modes)

Q<sub>s3</sub>: 표준편차의 제3사분위수(3rd Quartile of modes)

Q\_Mode의 값이 크고 Q\_STD의 값이 작은 분류군은 큰 값의 환경요인에 대해 제한된 범위에 적응되어 있는 혐호성(stenophilic), Q\_Mode의 값이 작고 Q\_STD의 값이 큰 분류군은 작은 값의 환경요인을 선호하지만 광범위한 범위에 적응되어 있는 광혐성(euryphobic)으로 분류하였다(Table 1).

**Table 1.** Scheme on preference and adaptation of benthic macroinvertebrates for habitat factors

Preference		Adaptation	
$Q\_Mode \leq Q_{m1}$	phobic	$Q\_STD \leq Q_{s1}$	steno
$Q_{m1} < Q\_Mode \leq 0$	phobious	$Q_{s1} < Q\_STD \leq 0$	m-steno
$0 < Q\_Mode \leq Q_{m3}$	philous	$0 < Q\_STD \leq Q_{s3}$	m-eury
$Q\_Mode > Q_{m3}$	philic	$Q\_STD > Q_{s3}$	eury

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. 물리적 요인과 저서성 대형무척추동물의

##### 종수/총개체수의 관계

가평천에서 각 방형구별 저서성 대형무척추동물의 출현 종수 및 총개체수는 유속이 빠를수록 뚜렷하게 증가하고, 수심이 깊어지거나 하상의 평균입경이 작아질수록(즉 ϕ 값이 커질수록) 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 유속은 종수

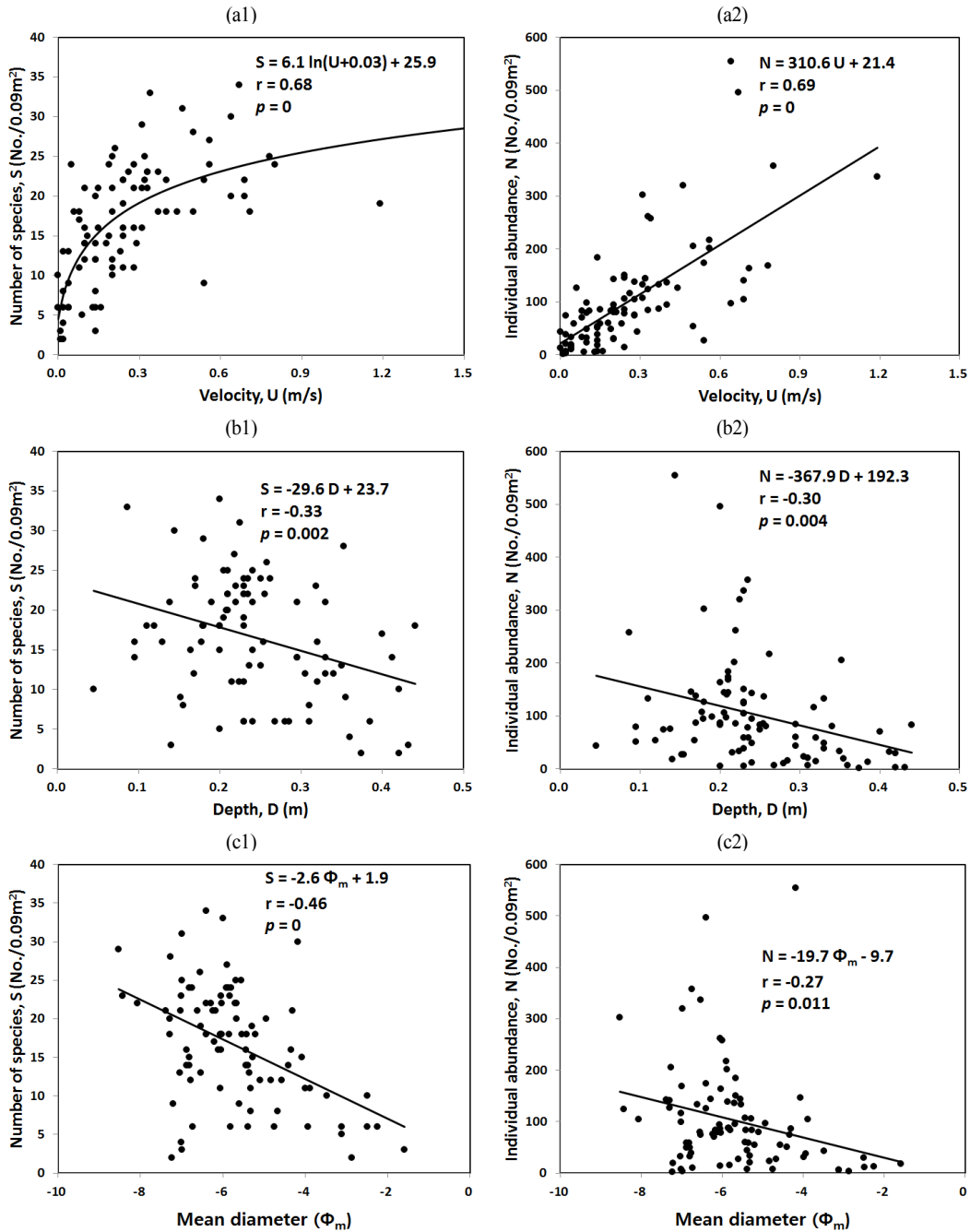


Fig. 2. Relationship between number of species/total individual abundance and three habitat factors (a) current velocity, (b) water depth and (c) mean diameter of substrate of each quadrat.

와 개체수에 대하여 가장 높은 상관성과 유의성을 보였다. 하상의 평균입경은 종수에 대하여 높은 상관성과 유의성을 보였다. 수심은 종수와 개체수에 대하여 약한 상관성을 보였으나 표본크기가 크기 때문에 유의성은 높았다. 하상의 평균입경과 총개체수는 전체적인 요인관계 중 가장 낮은 상관성을 보였으며 유의성은 있으나 높은 수준은 아니었다 ( $p < 0.05$ ).

유속에 대한 종수의 관계는 비선형으로 나타났으며 0.6 m/s 내외의 유속 범위에서 비교적 많은 종수가 출현하였다 (Fig. 2(a1)). 조사단위 중 1 m/s 이상의 유속을 보인 것은

1개뿐이었기 때문에 상위 한계유속은 판단할 수 없었다. 개체수는 유속의 증가에 따라 선형으로 증가하였다(Fig. 2(a2)). 프루드 수(Froude number,  $Fr$ )에 따른 종수와 개체수의 변화는 유속과 같은 유사한 경향을 보였다[종수  $S = 5.61 \ln(Fr + 0.02) + 27.5, r = 0.68, p = 0$  개체수  $N = 436.3 Fr + 22.8, r = 0.69, p = 0$ ]. 이는 빠른 유속을 가진 서식처에서 날도래 등의 붙는무리가 선택적으로 증가했기 때문인 것으로 보인다. 이러한 점으로 보았을 때 빠른 유속 조건이 저서성 대형무척추동물의 종 다양성 및 풍부성을 증가시키는 데 관련이 있는 것으로 볼 수 있다.

일반적으로 수심이 증가하면 유속이 느려지고 하상이 세립질화되어 서식하는 종수 및 개체수의 변화가 생긴다. 조사결과에서 수심이 깊어지고 하상이 세립질화됨에 따라 종수 및 개체수 모두 감소하는 경향을 보였으나 분산도는 큰 편이었다(Fig. 2.(b,c)).

Gore (1978)는 몬타나의 Tongue 강에서 얻은 조사자료로부터 저서성 대형무척추동물의 군집단위에서 최고의 다양성을 가지는 조건은 유속 75~125 cm/s, 수심은 20~40 cm로 보고하였다. 또한 이 연구결과에서 군집단위에서 최적 서식조건은 유속 76 cm/s, 수심은 28 cm이고 하상기질은 중간크기의 호박돌(medium cobble) 이상의 조립질이라고 제시하였다. 또한 최고의 군집 다양성과 부합되는 지표종으로 *Rhithrogena hageni*를 제시하고 이 종이 출현하는 경우 적절한 유량 조건을 갖추고 있다고 보았다.

Jowett et al. (1991)는 뉴질랜드 강에서 얻은 자료로부터 대부분의 저서성 대형무척추동물 분류군은 0.75 m보다 얇은 곳의 잔돌(gravel) 또는 그 이상의 조립질 하상에서 더 풍부하였던 반면, 세립질 하상(모래, 작은 잔돌) 또는 깊은 물을 뚜렷이 선호하는 분류군은 없었다고 보고하였다.

Dewson et al. (2007)은 세계 여러 지역에서 조사된 자료들을 종합하여 분석한 결과 유량이 감소할 때 저서성 대형무척추동물의 개체수가 증가 또는 감소하지만, 종수는 감소하는데 이는 서식처의 다양성이 떨어지는데 이유가 있다고 하였다.

Brooks et al. (2005)은 호주 Kangaroo 강의 세 여울에서 조사된 자료로부터 저서성 대형무척추동물의 종수와 개체수는 유속과 전단속도(shear velocity), 조도레이놀즈수(roughness

Reynolds number), 프루드 수(Froude number)와 모두 음의 상관관계를 보였으며, 수심과 개체수 역시 음의 상관관계를 보였다고 하였다.

본 연구의 결과는 Gore (1978)의 결과와 매우 유사하며 Jowett et al. (1991) 또는 Dewson et al. (2007)의 결과와도 전반적으로 차이가 없었다. Brooks et al. (2005)의 결과는 기존의 다른 연구결과는 물론 본 연구의 결과와도 상당부분 상반된다. 즉 Brooks et al. (2005)의 결과에서 수심과 개체수의 관계가 음의 상관관계를 보인다는 점은 본 연구의 결과와 같지만, 종수와 개체수는 본 연구에서 유속과 프루드 수에 대하여 모두 음의 상관관계를 보인다는 점에서 차이가 있다. 이는 Dewson et al. (2007)의 조사지역이 여울로 한정되어 대체로 일정한 수심과 일정한 하상기질 하에서 유속요인만을 고려하였다는 점에서 다른 연구와 차이가 있을 수 있겠으나 그 상반성에 대한 정확한 이유는 확인하기 어렵다.

### 3.2. 주요 저서성 대형무척추동물 분류군의 서식처 적합도 평가

가평천에서 출현한 저서성 대형무척추동물 중 상대적으로 출현빈도가 높았던 속(Genus) 단위 이상 범주의 17개 분류군을 대상으로 환경요인별 출현특성을 분석하였다.

정준대응분석(CCA) 결과 생물군에 대한 각 주성분의 점수에 대한 상관도는 제 I 주성분에 유속이 -0.653, 제 II 주성분에 하상의 평균  $\phi$  값이 -0.500, 제 III 주성분에 수심이 0.274로 가장 높았으며, 분류군 분포의 분산도를 결정하는 세 가지 물리적 요인 중 유속이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타

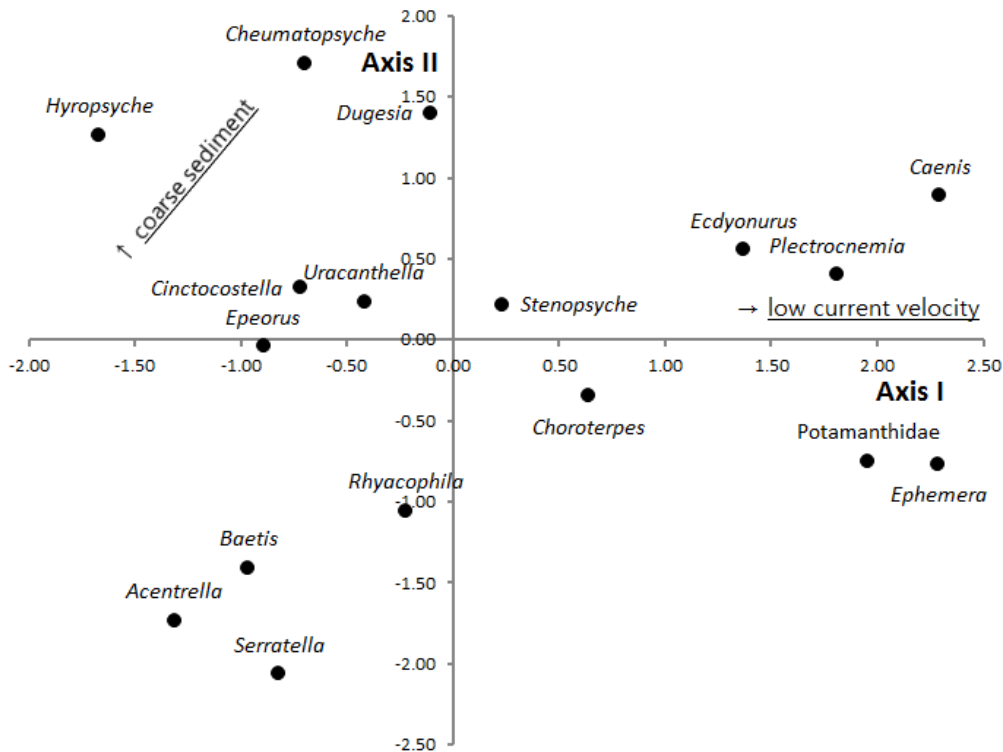


Fig. 3. Canonical correspondence analysis (CCA) ordination diagram with benthic macroinvertebrates and habitat factors (current velocity, water depth, composition of substrate) in the Gapyeong stream.

났다. 제 I 주성분 축의 오른쪽으로 갈수록 유속이 느린 곳에 주로 서식하는 생물들이 위치하였고(예로 Potamanthidae, *Ephemera*, *Caenis*), 조립질 하상을 선호하는 생물일수록 제 II 주성분 축의 위쪽에(예로 *Cheumatopsyche*, *Hydropsyche*, *Dugesia*) 위치하였다(Fig. 3).

Nelson and Lieberman (2002)은 미국 Sacramento 강의 환경요인과 저서성 대형무척추동물의 관계에 대한 정준 대응분석(CCA) 결과 군집조성을 설명하는 가장 중요한 요인은 유속이며, 부착조류의 생물량, 고도, 교란도 등이 부차적인 요인이라 분석하였다. 또한 이들은 상기한 이유로 유량의 인위적 변경은 신중히 고려되어야 한다고 주장하였다. 유속이 가평천의 저서성 대형무척추동물의 군집조성에 큰 영향을 미친다는 것은 Nelson and Lieberman (2002)의 결과와 같은 맥락에서 이해될 수 있다.

가평천에서 출현한 저서성 대형무척추동물 중 서식특성이 상이한 3개 분류군을 선정하여 환경요인에 HSI의 분포

를 비교 분석한 바, 헤엄치는 무리인 *Baetis*(꼬마하루살이 속)는 0.7 m/s 내외의 유속에서 높은 적합도를 보이며 부적편포하였고(Fig. 4(a)), 물 흐름이 느린 곳의 하상에 굴을 파고 사는 *Ephemera*(무늬하루살이 속)는 0.1~0.4 m/s의 느린 유속에서 적합도가 높은 정규분포의 양상을 보였으며(Fig. 4(b)), 조립질 하상에 집을 짓고 붙어사는 *Hydropsyche*(줄날도래 속)는 빠른 유속에서 적합도가 크고 부적편포하였다(Fig. 4(c)).

Li et al. (2009)은 중국의 Xiangxi 강에서 시행된 장기 모니터링에서 나타난 최우점종인 *Baetis* spp.를 목표 종(target species)으로 정하여 수심, 유속, 하상기질에 대한 서식적합도모델(habitat suitability model, HSM)을 구축한 바 있다. 이 연구에서 *Baetis* spp.의 적합 수심은 0.1~0.3 m(최적의 수심은 0.2 m)였으며 0.9 m보다 깊은 곳에서는 해당 종이 출현하지 않았다고 한다. 적합 유속은 0.3~0.7 m/s였고 유속이 1.5 m/s보다 빠르면 생육이 제한받는 것으

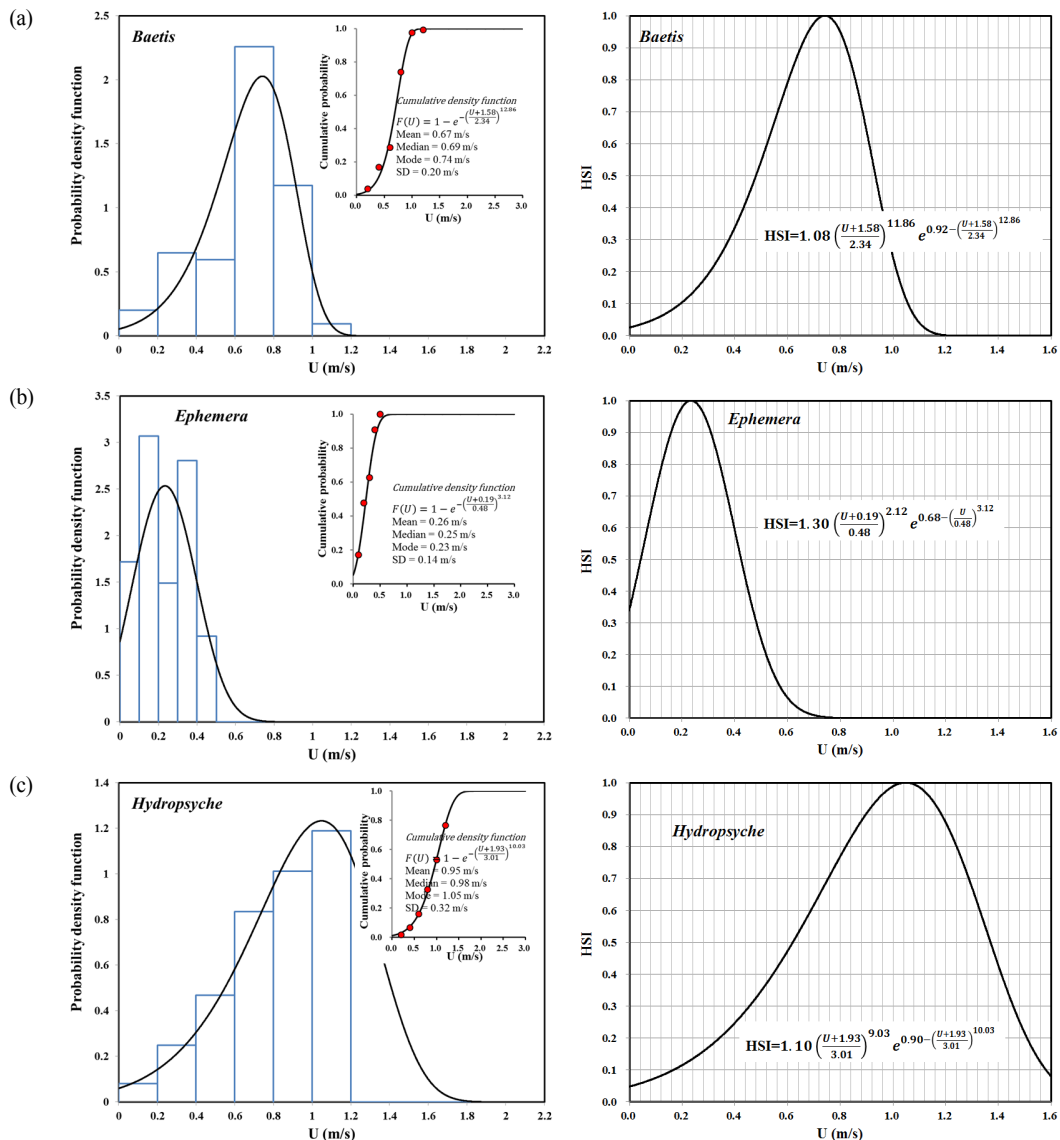


Fig. 4. Current velocity preference curves and the function of habitat suitability index for (a) *Baetis*, (b) *Ephemera* and (c) *Hydropsyche* developed in the Gapyeong stream.

로 보았다. 적합한 하상기질은 호박돌(cobble)이었다. 이들의 분석결과 *Baetis* spp.의 생육에 미치는 요인은 하상기질 > 유속 >> 수심 순으로 기여도가 큰 것으로 나타났다. 또한 적당한 수심과 유속, 충분한 빛과 풍부한 먹거리의 측면에서 여울은 *Baetis* spp.에게 가장 적합한 서식처라고 판단하였다.

가평천에 대한 본 연구의 결과 *Baetis*류의 적합 유속은 0.6~1.0 m/s 수준이었고 유속이 1 m/s를 넘는 곳에서는 출현도가 급감하였다. 이러한 결과는 가평천의 *Baetis*류가 Li et al. (2009)의 보고에 비해 좀 더 빠른 유속에 적응해 있는 것으로 보인다. 그러나 가평천 조사결과는 매우 빠른 유속 범위의 자료가 부족하기 때문에 *Baetis*류의 생육 한계 유속을 파악하기는 어렵다.

가평천에서 *Baetis*류는 수심이 얇은 곳에서 많이 출현하였으며 수심이 증가할수록 출현개체수가 지수적으로 감소

하는 경향을 보였다(Fig. 5(a)). 그러나 하천과 강뿐만 아니라 호수에까지 서식하는 *Ephemera*류는 본 조사에서 조사된 수심 범위의 최고치가 포함된 구간(0.4~0.5 m)까지 높은 출현도를 보였다(Fig. 5(b)). 여울의 하상에 붙어사는 무리인 *Hydropsyche*는 0.1~0.2 m의 수심에서 최대치를 보였고 0.4m가 한계수심으로 나타났다(Fig. 5(c)).

본 연구에서 나타난 *Baetis*류의 적합수심은 Li et al. (2009)의 결과에 비해 더 얇은 것으로 나타났다. 생육 한계수심 Li et al. (2009)이 제시한 0.9 m보다 얇은 것으로 보이는데 본 연구가 단기간에 걸쳐 조사되어 제한점이 있는 만큼 추후 충분한 자료를 축적한 후 판단할 사항으로 보인다. 또한 *Ephemera*류는 수심이 깊어질수록 출현개체수에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았고 조사대상 최대수심(0.5 m) 이상의 조건에 대해서는 단지 통계적인 추정치일 뿐이므로 이에 대해서는 향후보다 깊은 수심에서의 조사자료로 보완

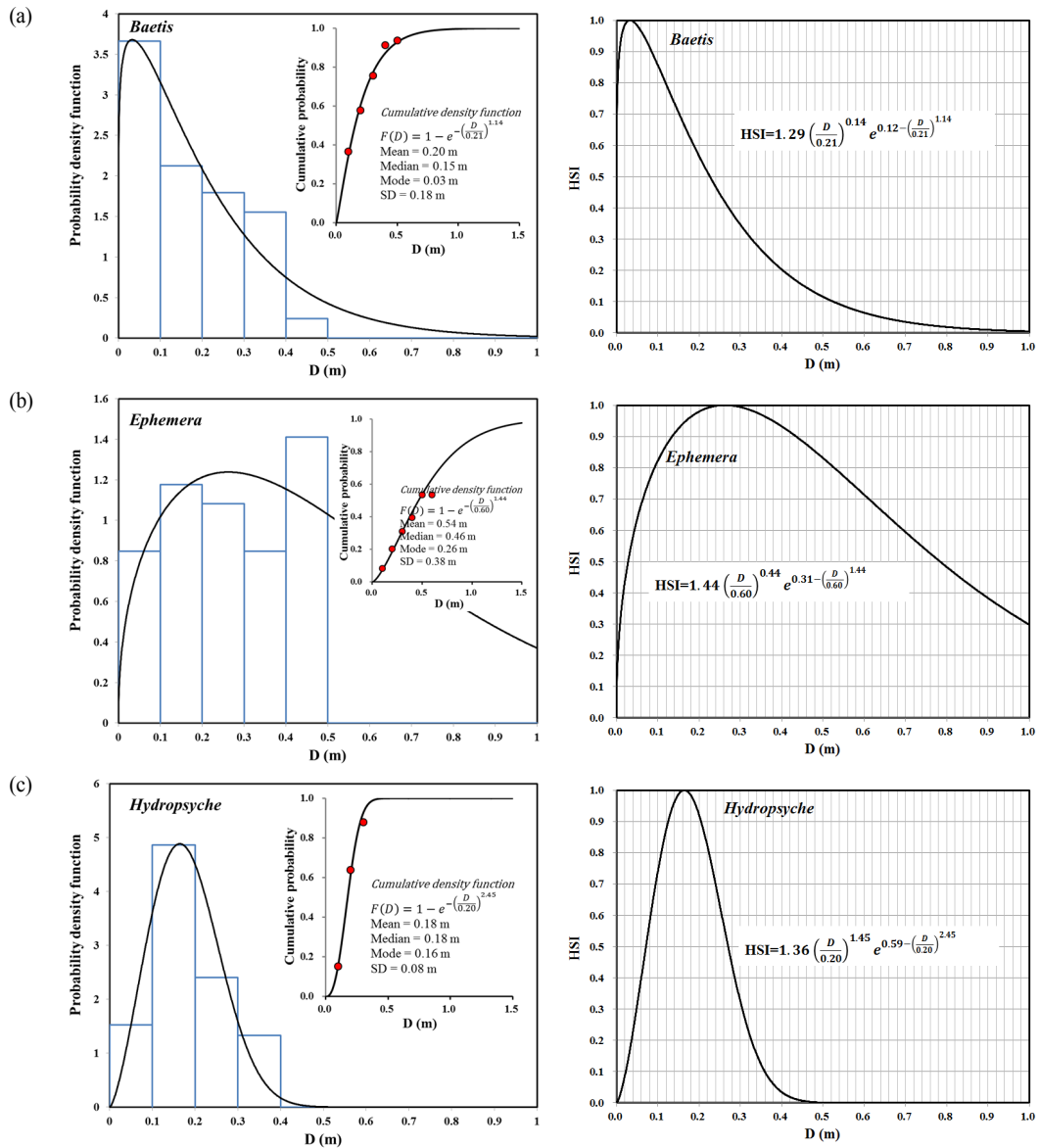


Fig. 5. Depth preference curves and the function of habitat suitability index for (a) *Baetis*, (b) *Ephemera* and (c) *Hydropsyche* developed in the Gapyeong stream.



할 필요가 있다.

하상의 평균입경에 따른 출현개체수에서 *Hydropsyche*는 조립질 하상쪽에서 높은 HSI 값을 보이는 반면 *Baetis*와 *Ephemera*는 상대적으로 덜 조립화된 쪽에서 HSI 값이 높았다(Fig. 6).

유속에 따른 각 분류군의 출현도를 와이블 모형으로 해석하여 각 요인의 평균, 4분위수와 중위수, 최빈수, 90% 확률 범위를 산출하여 도시화한 결과는 Fig. 7과 같다(Appendix 1 참고). *Epeorus*, *Uracanthella*, *Rhyacophila*, *Cheumatopsyche*, *Hydropsyche*류는 빠른 유속 범위에서 출현하는 경향이 뚜렷하였다(Fig. 7(a)). 생물군별 유속의 최빈수와 중위수는 대체로 평균에 비해 크거나 같아 정규분포를 이루거나 부적편포하는 경향을 보임을 알 수 있었으나 *Cincticostella*와 *Caenis*류는 최빈수<중위수<평균의 경향이 뚜렷하여 느린 유속에서 집중 출현하고 정적편포하고 있음을 알 수 있다.

수심에 대해서는 거의 모든 생물군이 최빈수 < 중위수 <

평균의 경향이 뚜렷하여 주로 얕은 수심에서 집중 출현하고 정적편포함을 알 수 있다(Fig. 7(b)). 특히 *Potamanthidae*, *Ephemera*, *Plectrocnemia*류는 수심이 깊은 곳까지 적응해 있음을 보여 주었다(Appendix 2 참고).

생물군별 하상입경의 최빈수와 중위수는 대체로 평균과 비슷하거나 약간 크게 나타나 정규분포를 이루거나 약간 부적편포하는 경향을 보임을 알 수 있었으나 *Ecdyonurus*와 *Caenis*류는 최빈수<중위수<평균의 경향이 뚜렷하여 정적편포하고 있음을 알 수 있다(Fig. 7(c))(Appendix 3 참고).

출현개체수의 분포로 도출된 유속의 최빈수 및 표준편차를 기준으로 생물군의 적응유형을 구분할 때, *Epeorus*는 중광호류성(*m-euryrheophilic*), *Uracanthella*와 *Cheumatopsyche* 및 *Hydropsyche*는 광호류성(*euryrheophilic*)으로서 이러한 종들은 빠른 유속을 선호하지만 변이는 큰 것으로 볼 수 있다(Fig. 8, Table 2). 이와 반면 *Ephemera*와 *Choroterpes*는 협협류성(*stenorheophobic*), *Plectrocnemia*는 중협협류성(*m-*

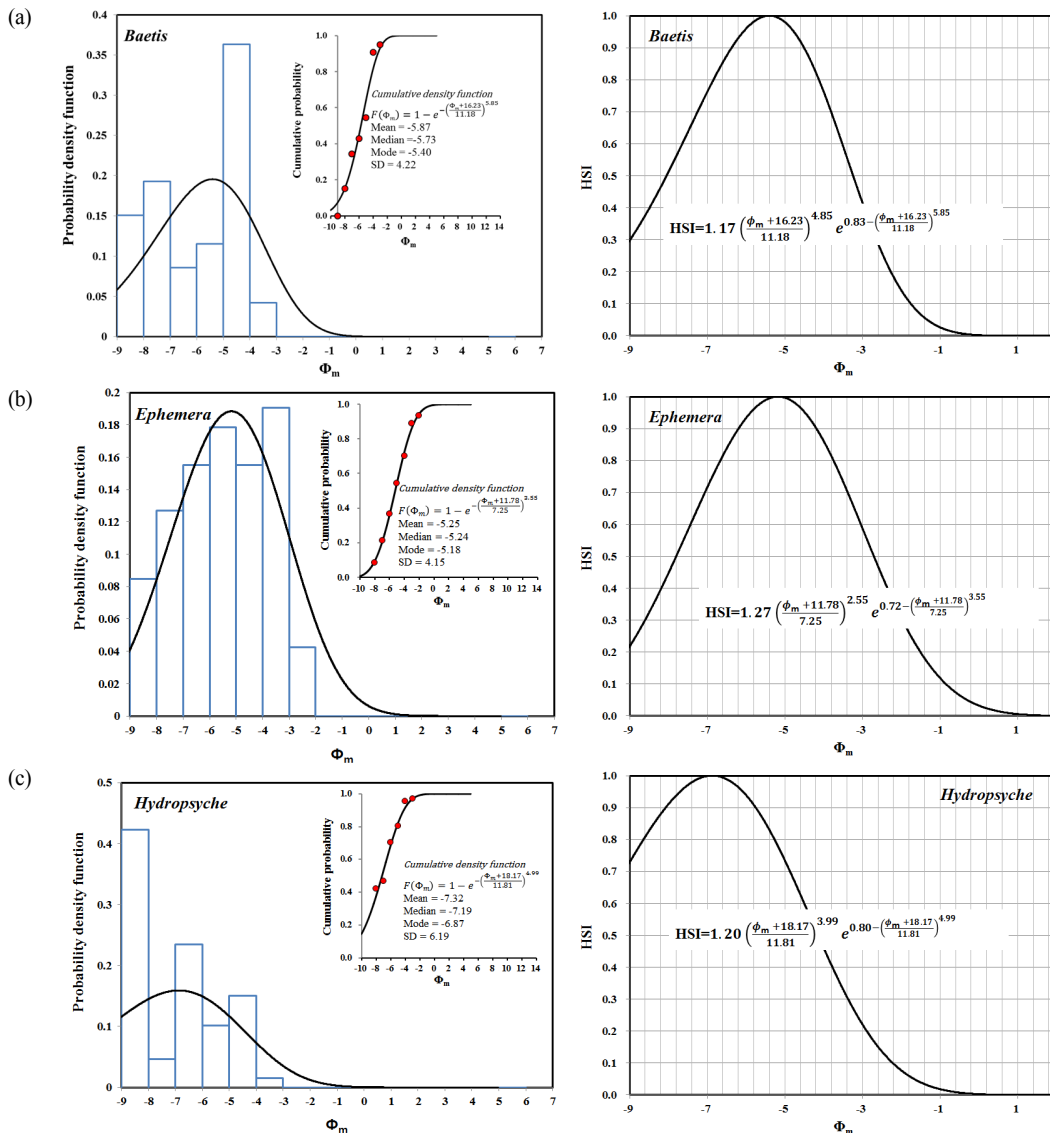
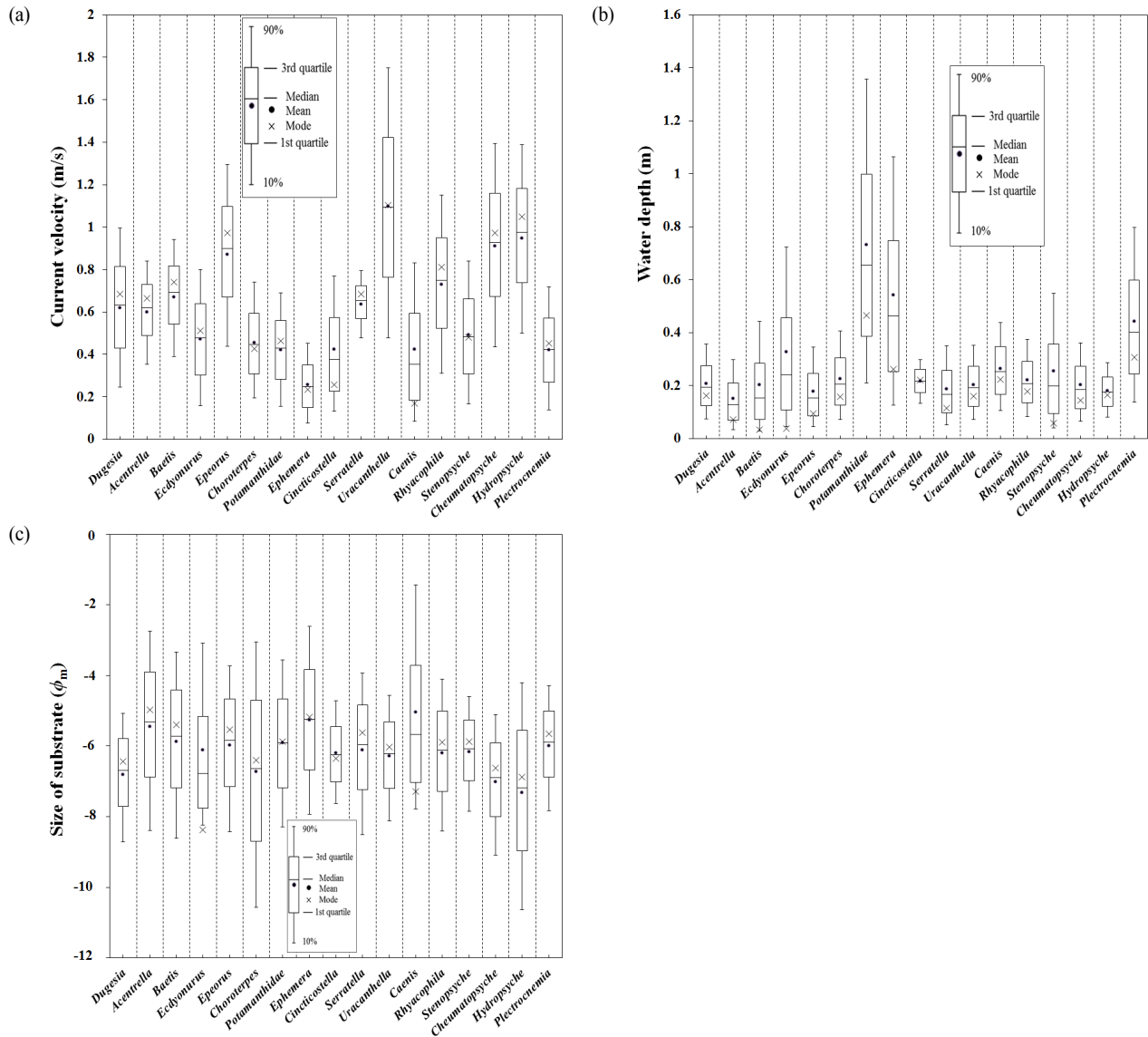


Fig. 6. Substrate preference curves and the function of habitat suitability index for (a) *Baetis*, (b) *Ephemera* and (c) *Hydropsyche* developed in the Gapyeong stream.



**Fig. 7.** Distribution patterns of 17 benthic macroinvertebrate taxa according to physical habitat factors (a) current velocity, (b) water depth, (c) substrate in the Gapyeong stream.

stenorheophobic), *Cincticostella*는 중광협류성(m-eyrheophobic), *Caenis*는 광협류성(Euryrheophobic)으로 느린 유속을 선호하는 생물군으로 볼 수 있다.

수심에 대한 유형은 *Cincticostella*, *Plectrocnemia*, *Potamanthidae*, *Caenis*류는 약호심성 ~ 호심성(potamophilous ~ potamophilic), *Acentrella*, *Ecdyonurus*, *Stenopsyche*, *Baetis*, *Cincticostella*는 약협심성 ~ 협심성(potamophobious ~ potamophobic)이었다.

하상의 입도에 대한 유형은 *Dugesia*, *Cheumatopsyche*, *Ecdyonurus*, *Caenis*, *Hydropsyche*는 호조성(lithophilic), *Cincticostella*, *Uracanthella*, *Choroterpes*류는 약호조성(lithophilous), *Serratella*, *Plectrocnemia*, *Stenopsyche*, *Potamanthidae*, *Rhyacophila*류는 약협조성(lithophobic), *Ephemerella*, *Baetis*, *Acentrella*, *Epeorus*류는 협조성(lithophobic)이었다.

생물군의 출현도를 기준으로 환경요인에 대한 최빈수와 표준편차의 절대값을 이용하여 생물군을 유형화하는 것은

주관적이란 점에서 논란이 있을 수 있다. 본 연구에서는 각 생물군의 최빈수와 표준편차의 상대적인 값으로 적응유형을 구분하였는데 이는 객관성은 보장된다 하더라도 범용적으로 그 유형화가 인정되기 위해서는 국내에 서식하는 많은 생물군에 대하여 다양한 시기에 많은 장소에서 조사된 자료로 보완되어야 할 것이다.

본 연구에서 나타난 주요 결과는 대부분의 저서성 대형 무척추동물은 빠른 유속, 얕은 수심, 조립질 하상을 선호한다는 것이다. 이러한 세 개의 요인 중 가평천 저서성 대형 무척추동물 군집의 구성에 가장 중요한 요인은 유속이다. 반면 수심이 증가하면 유속이 느려지고 하상이 세립화되며, 빛의 제한으로 먹이원이 되는 생산자의 현존량이 낮아진다. 이러한 이유로 수심이 깊어지면 유수성 종들의 서식처 적합성이 연쇄적으로 낮아지게 되는 것으로 추정된다.

가평천과 같이 유속이 빠르고 수질이 양호한 하천에서는 대체로 다양한 저서성 대형무척추동물이 서식하고 있는데,

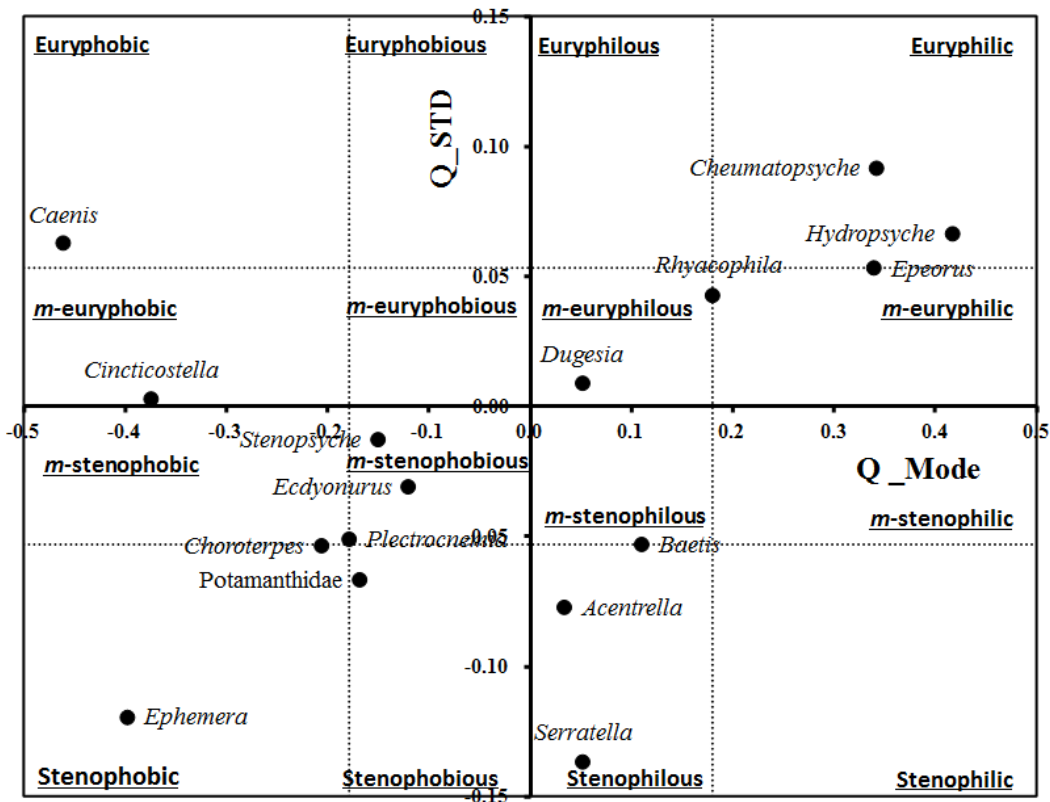


Fig. 8. Rheophility of 17 benthic macroinvertebrate taxa in the Gapyeong stream(Q\_Mode and Q-STD indicate the adjusted level of modal value and standard deviation of current velocity, respectively).

Table 2. Types of preference and adaptation of benthic macroinvertebrates for habitat factors in the Gapyeong stream

Taxa	Rheophility	Potamophilia (Depth)	Lithophility
<i>Dugesia</i>	m-euryphilous	Stenophilous	Stenophilic
<i>Acentrella</i>	Stenophilous	Stenophobic	m-euryphobic
<i>Baetis</i>	m-stenophilous	m-euryphobic	m-euryphobic
<i>Ecdyomurus</i>	m-stenophobious	Euryphobic	Euryphilic
<i>Epeorus</i>	m-euryphilic	m-stenophobic	m-stenophobic
<i>Choroterpes</i>	Stenophobic	m-stenophilous	Euryphilous
Potamanthidae	Stenophobious	Euryphilic	m-stenophobious
<i>Ephemera</i>	Stenophobic	Euryphilous	m-euryphobic
<i>Cincticostella</i>	m-euryphobic	Stenophilic	Stenophilous
<i>Serratella</i>	Stenophilous	m-stenophobious	m-stenophobious
<i>Uracanthella</i>	Euryphilic	Stenophilous	Stenophilous
<i>Caenis</i>	Euryphobic	m-stenophilic	Euryphilic
<i>Rhyacophila</i>	m-euryphilous	m-stenophilous	m-stenophobious
<i>Stenopsyche</i>	m-stenophobious	m-euryphobic	Stenophobious
<i>Cheumatopsyche</i>	Euryphilic	m-stenophilous	m-stenophilic
<i>Hydropsyche</i>	Euryphilic	Stenophilous	Euryphilic
<i>Plectrocnemia</i>	m-stenophobic	Euryphilic	Stenophobious

위에서 살펴본 바와 같이 각 분류군 및 환경요인별로 HSI의 유형은 크게 달리 나타난다. 그러므로 임의의 특정 종을 깃대종(flagship species)으로 선별하여 환경생태유량을

산정하는 것은 주관적일 수 있다. 만일 멸종위기종 혹은 상징성과 상업성을 지닌 저서성 대형무척추동물이 서식하고 있는 것이 밝혀졌거나 또는 이들의 잠재적인 서식 가능성이 있다면 이러한 종들을 목표종으로 우선적으로 선정하여 HSI를 개발하고 환경유량 산정에 활용할 수 있을 것이다.

그러나 대부분의 보통종(common species)에 대한 환경유량의 산정은 고차소비자인 어류와의 먹이망 측면에서 접근하는 것이 현실적일 것으로 판단된다. 즉 저서성 대형무척추동물의 생육이 저해되는 조건이라면 대상 어류의 생육이 억제될 수 있으므로 특정 어류의 생태유량 산정 시 그 먹이원이 되는 저서성 대형무척추동물의 서식을 위한 유량이 함께 고려되어야 한다.

환경유량 산정을 위한 목표의 대상은 저서성 대형무척추동물 전체 군집의 다양성과 풍부성이 될 수도 있으며 특정 분류군이 될 수도 있다. 후자의 경우에는 저서성 대형무척추동물이 수중 먹이망에서 허리 역할을 한다고 볼 때 Li et al. (2009)의 예처럼 해당 수체의 먹이망은 물론 생태학적 구조와 기능면에서 역할이 뚜렷한 우점 분류군을 목표로 둘 수 있다.

환경유량이 필요한 곳은 조철하천이나 도심하천과 같이 물순환이 인위적으로 교란된 하천이다. 특히 도심하천은 불건전한 물순환에 의해 건천화되거나 하상이 세립화된 곳이 많다. 이러한 수체에서는 저서성 대형무척추동물 군집 자체는 물론 어류로 이어지는 기본적인 수준의 먹이망을 유지하기 위한 한계유속을 정하고 이를 기준으로 환경유량을 산정할 수 있다.

#### 4. Conclusion

본 연구의 결과를 종합하여 볼 때 유속은 가평천 저서성 대형무척추동물의 생육을 위해 가장 중요한 물리적 요인이며 하상기질과 수심은 부차적인 요인이라고 할 수 있다.

대부분의 저서성 대형무척추동물은 빠른 유속, 얕은 수심, 조립질 하상을 선호하는 것으로 나타났는데, 수심이 깊어지면 유속이 느려지고 하상이 세립화될 뿐만 아니라 먹이원이 되는 생산자가 빛 제한을 받아 성장이 저해되는 등 유속성 종류의 생육에는 불리한 조건이 될 수 있다.

서식적합도지수(habitat suitability index, HSI) 개발과정에 확률밀도함수를 접목하여 그 적용성을 검토한 결과 와이블 함수의 적용에는 무리가 없는 것으로 나타났다. 확률밀도함수의 적용으로 HSI의 활용도와 용이성이 제고될 수 있을 것으로 판단된다.

멸종위기종 혹은 상징성과 상업성을 지닌 저서성 대형무척추동물이 아닌 보통종(common species)에 대한 환경생태유량의 산정은 고차소비자인 어류와의 먹이망 측면에서 접근하는 것이 현실적일 것으로 판단된다. 즉 어떤 어류 종을 환경유량 산정의 대표종으로 선정한 경우 이 종의 먹이원이 되는 특정한 저서성 대형무척추동물종의 생육을 위한 환경유량이 함께 고려되어야 한다는 것이다.

또한 하천의 저서성 대형무척추동물은 종류가 다양하기 때문에 특정 종류를 기준으로 환경생태유량을 정하는 것은 왜곡될 가능성이 크기 때문에 저서성 대형무척추동물 전체 군집의 다양성(종수)과 풍부성(개체수)을 확보할 수 있는 환경유량을 검토하는 것도 바람직하다고 본다.

본 연구를 통해 하천의 생물군에 대한 물리적 서식요인의 적합성에 대하여 많은 정보를 도출하였으나 이러한 결과는 가평천이라는 단일 하천에서 단기간에 얻어진 것이기 때문에 제한점을 안고 있다. 특히 유속 1.2m/s 이상과 수심 0.5m 이상의 조건에 대한 자료가 전무하여 생물군 분포의 확장성을 평가하기가 어려운 경우가 있었다. 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 보다 광범위한 지역에서 장기적인 조사가 후속될 필요가 있다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2015학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- Acreman, M. (2016). Environmental Fows-Basics for Novices, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(5), 622-628.
- Ahmadi-Nedushan, B., St-Hilaire, A., Bérubé, M., Robichaud, É., Thiémonge, N., and Bobée, B. (2006). A Review of Statistical Methods for the Evaluation of Aquatic Habitat Suitability for Instream Flow Assessment, *River Research and Applications*, 22(5), 503-523.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B., and Stribling, J. B. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish, (Second editoon)*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water; Washington, D.C., 3.
- Brooks, A. J., Haeusler, T., Reinfelds, I., and Willams, S. (2005). Hydraulic Microhabitats and the Distribution of Macroinvertebrate Assemblages in Riffles, *Freshwater Biology*, 50(2), 331-344.
- Cummins, K. W. (1962). An Evaluation of Some Techniques for the Collection and Analysis of Benthic Samples with Special Emphasis on Lotic Water, *The American Midland Naturalist*, 67(2), 477-504.
- Dewston, Z. S., Alexander B. W. J. and Russell G. D. (2007). A Review of the Consequences of Decreased Flow for Instream Habitat and Macroinvertebrates, *Journal of the North American Benthological Society*, 26(3), 401-415.
- Dufrene, M. and Legendre. P. (1997). Species Assemblages and Indicator Species: the Need for a Flexible Asymmetrical Approach, *Ecological Monographs*, 67(3), 345-366.
- Flather, C. H. (1996). Fitting Species-Accumulation Functions and Assessing Regional Land Use Impacts on Avian Diversity, *Journal of Biogeography*, 23(2), 155-168.
- Fréchet, M. (1927). Sur la loi de probabilité de l'écart maximum, *Annales de la Société Polonaise de Mathématique, Cracovie*, 6, 93-116.
- Gore, J. A., Crawford, D. J., and Addison, D. S. (1998). An Analysis of Artificial Riffles and Enhancement of Benthic Community Diversity by Physical Habitat Simulation (PHABSIM) and Direct Observation, *River Research and Applications*, 14(1), 69-77.
- Gore, J. A., Layzer, J. B., and Mead, J. (2001). Macroinvertebrate Instream Flow Studies after 20 Years: A Role in Stream Management and Restoration, *Rivers Research and Management*, 17(4-5), 527-542.
- Gore, J. A. (1978). A Technique for Predicting In-Stream Flow Requirements of Benthic Macroinvertebrates, *Freshwater Biology*, 8(2), 141-151.
- Halleraker, J. H., Sundt, H., Alfredsen, K. T., and Dangelmaier, G. (2007). Application of Multiscale Environmental Flow Methodologies as Tools for Optimized Management of a Norwegian Regulated National Salmon Watercourse, *River Research and Applications*, 23(5), 493-510.
- Hur, J. W., Kim, D. H., and Kang, H. (2014). Estimation of Optimal Ecological Flowrate of Fish in Chogang Stream, *Ecology and Resilient Infrastructure*, 1(1), 39-48. [Korean Literature]
- Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG). (1986). Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology, *Biologic report. Instream flow information paper No. 21*, National Ecology Center.
- Jowett, L. G. and Richardson, J. (1990). Microhabitat Preferences of Benthic Invertebrates in a New Zealand

- River and the Development of In-Stream Flow-Habitat Models for *Deleatidium* spp., *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 24(1), 19-30.
- Jowett, I. G., Richardson, J., Biggs, B. J. F., Hickey, C. W., and Quinn, J. M. (1991). Microhabitat Preferences of Benthic Invertebrates and the Development of Generalized *Deleatidium* spp. Habitat Suitability Curves, Applied to Four New Zealand Rivers, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 25(2), 187-199.
- Kang, H., Im, D., Hur, J. W., and Kim, K. H. (2011). Instream of Habitat Suitability Index of Fish Species in the Geum River Watershed, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 31(2B), 193-203. [Korean Literature]
- Kim, K. O., Park, Y. K., Kang, J. I., and Lee, B. S. (2016). Estimation of Ecological Flow and Habitat Suitability Index at Jeonju-Cheon Upstream, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 38(2), 47-55. [Korean Literature]
- Kong, D. 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), 142-150. [Korean Literature]
- Kong, D. and Kim, J. Y. (2016). Development of Benthic Macroinvertebrates Streambed Index (BMSI) for Bio-assessment of Stream Physical Habitat, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 1-14. [Korean Literature]
- Lee, J. H., Jeong, S. M., Lee, M. H., and Lee, Y. S. (2006). Estimation of Instream Flow for Fish Habitat Using Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) for Major Tributaries in Han River Basin, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(2B), 153-160. [Korean Literature]
- Li, F., Cai, Q., Fu, X., and Liu J. (2009). Construction of Habitat Suitability Models (HSMs) for Benthic Macroinvertebrate and Their Applications to Instream Environmental Flow: A Case Study in Xiangxi River of Three Gorges Reservoir Region, China, *Progress in Natural Science*, 19(3), 359-365.
- Nelson, S. M. and Lieberman, D. M. (2002). The Influence of Flow and Other Environmental Factors on Benthic Invertebrates in the Sacramento River, U.S.A., *Hydrobiologia*, 489(1), 117-129.
- Quinn, J. M. and Hickey, C. W. (1990). Characterisation and Classification of Benthic Invertebrate Communities in 88 New Zealand Rivers in Relation to Environmental Factors, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 24(3), 387-409.
- Rørslett, B. (1991). Principal Determinants of Aquatic Macrophyte Richness in Northern European Lakes, *Aquatic Botany*, 39(1-2), 173-193.
- Rosin, P. and Rammler, E. (1933). The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal, *Journal of the Institute of Fuel*, 7, 29-36.
- Smith, M. J., Kay, W. R., Edward, D. H. D., Papas, P. J., Richardson, K. St. J., Simpson, J. C., Pinder, A. M., Cale, D. J., Horwitz, P. H. J., Davis, J. A., Yung, F. H., Norris, R. H., and Halse, S. A. (1999). AusRivAS: Using Macroinvertebrates to Assess Ecological Condition of Rivers in Western Australia, *Freshwater Biology*, 41(2), 269-282.
- Stalnaker, C. B., Lamb, B. L., Henriksen, J., Bovee, K., and Bartholow, J. (1995). *The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM*, Biological Report 29, United States Geologi Survey Press, Washington, D.C., 17-19.
- Thame, R. (2003). A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, *River Research and Applications*, 19(5-6), 397-441.
- Vadas, R. L. and Orth, D. J. (2001). Formulation of Habitat Suitability Models for Stream Fish Guilds: Do the Standard Methods Work?, *Transactions of the American Fisheries Society*, 130(2), 217-235.
- Vismara, R., Azzellino, A., Bosi, R., Crosa, G., and Gentili, G. (2001). Habitat Suitability Curves for Brown Trout (*Salmo trutta fario* L.) in the River Adda, Northern Italy: Comparing Univariate and Multivariate Approaches, *River Research and Applications*, 17(1), 37-50.
- Waddle, T. J. (2001). *PHABSIM for Windows: user's manual and exercises*, Opne File Report No. 2001-340, United States Geologi Survey Press, Washington, D.C., 1-288.
- Weibull, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *Journal of Applied Mathematics*, 18(3), 293-296.
- Yang, Z. F. and Zhang, Y. (2003). Comparison of Methods for Ecological and Environmental Flow in River Channels, *Journal of Hydrodynamics*, 18(3), 294-301.

**Appendix 1.** Values of Weibull distribution function parameters, central tendency and standard deviation of current velocity according to major benthic macroinvertebrate taxa in the Gapyeong stream

Taxa	Parameters in Weibull function			mean ( $\mu$ , m/s)	median ( $\tilde{x}$ , m/s)	mode ( $\hat{x}$ , m/s)	Standard deviation (m/s)
	Shape ( $k$ )	Scale ( $\lambda$ )	Threshold ( $c$ , m/s)				
<i>Dugesia</i>	9.88	2.72	2.01	0.62	0.63	0.68	0.27
<i>Acentrella</i>	15.17	2.41	1.74	0.60	0.62	0.67	0.18
<i>Baetis</i>	12.86	2.34	1.58	0.67	0.69	0.74	0.20
<i>Ecdyonurus</i>	10.62	2.71	2.17	0.47	0.48	0.51	0.23
<i>Epeorus</i>	11.61	3.38	2.38	0.87	0.90	0.97	0.31
<i>Choroterpes</i>	2.67	0.57	0.05	0.46	0.45	0.43	0.20
<i>Potamanthidae</i>	11.02	2.22	1.74	0.42	0.43	0.46	0.19
<i>Ephemera</i>	3.12	0.48	0.19	0.26	0.25	0.23	0.14
<i>Cincticostella</i>	1.56	0.44	-0.03	0.42	0.38	0.26	0.26
<i>Serratella</i>	17.12	1.73	1.04	0.64	0.65	0.68	0.12
<i>Uracanthella</i>	3.55	1.69	0.44	1.10	1.09	1.10	0.47
<i>Caenis</i>	1.37	0.47	0.01	0.42	0.35	0.17	0.32
<i>Rhyacophila</i>	10.53	3.15	2.31	0.73	0.75	0.81	0.30
<i>Stenopsyche</i>	3.71	0.99	0.43	0.49	0.48	0.48	0.24
<i>Cheumatopsyche</i>	5.38	1.84	0.80	0.91	0.93	0.97	0.35
<i>Hydropsyche</i>	10.03	3.01	1.93	0.95	0.98	1.05	0.32
<i>Plectrocnemia</i>	9.78	2.27	1.79	0.42	0.42	0.45	0.21

**Appendix 2.** Values of Weibull distribution function parameters, central tendency and standard deviation of water depth according to major benthic macroinvertebrate taxa in the Gapyeong stream.

Taxa	Parameters in Weibull function			mean ( $\mu$ , m)	median ( $\tilde{x}$ , m)	mode ( $\hat{x}$ , m)	Standard deviation (m)
	Shape ( $k$ )	Scale ( $\lambda$ )	Threshold ( $c$ , m)				
<i>Dugesia</i>	1.97	0.23	-	0.21	0.19	0.16	0.11
<i>Acentrella</i>	1.42	0.17	-	0.15	0.13	0.07	0.11
<i>Baetis</i>	1.14	0.21	-	0.20	0.15	0.03	0.18
<i>Ecdyonurus</i>	1.10	0.34	-	0.33	0.24	0.04	0.30
<i>Epeorus</i>	1.49	0.20	-	0.18	0.15	0.09	0.12
<i>Choroterpes</i>	1.77	0.25	-	0.23	0.21	0.16	0.13
<i>Potamanthidae</i>	1.65	0.82	-	0.73	0.66	0.47	0.46
<i>Ephemera</i>	1.44	0.60	-	0.54	0.46	0.26	0.38
<i>Cincticostella</i>	3.80	0.24	-	0.22	0.22	0.22	0.06
<i>Serratella</i>	1.62	0.21	-	0.19	0.17	0.11	0.12
<i>Uracanthella</i>	1.95	0.23	-	0.20	0.19	0.16	0.11
<i>Caenis</i>	2.16	0.30	-	0.26	0.25	0.22	0.13
<i>Rhyacophila</i>	2.03	0.25	-	0.22	0.21	0.18	0.11
<i>Stenopsyche</i>	1.19	0.27	-	0.26	0.20	0.06	0.22
<i>Cheumatopsyche</i>	1.78	0.23	-	0.20	0.18	0.14	0.12
<i>Hydropsyche</i>	2.45	0.20	-	0.18	0.18	0.16	0.08
<i>Plectrocnemia</i>	1.75	0.50	-	0.44	0.40	0.31	0.26

**Appendix 3.** Values of Weibull distribution function parameters, central tendency and standard deviation of substrate according to major benthic macroinvertebrate taxa in the Gapyeong stream [ $D_m$ : mean diameter (mm),  $\Phi = -\text{Log}_2^{D_m}$ ].

Taxa	Parameters in Weibull function			mean ( $\mu$ , $\Phi$ )	median ( $\tilde{x}$ , $\Phi$ )	mode ( $\hat{x}$ , $\Phi$ )	Standard deviation ( $\Phi$ )
	Shape ( $k$ )	Scale ( $\lambda$ )	Threshold ( $c$ , $\Phi$ )				
<i>Dugesia</i>	6.76	8.76	14.99	-6.81	-6.69	-6.43	2.02
<i>Acentrella</i>	5.61	11.51	16.09	-5.45	-5.31	-4.98	4.81
<i>Baetis</i>	5.85	11.18	16.23	-5.87	-5.73	-5.40	4.22
<i>Ecdyonurus</i>	1.05	2.47	8.52	-6.10	-6.78	-8.37	5.26
<i>Epeorus</i>	6.06	10.27	15.51	-5.98	-5.84	-5.54	3.35
<i>Choroterpes</i>	4.18	11.80	17.45	-6.73	-6.64	-6.40	8.35
<i>Potamanthidae</i>	3.44	6.25	11.53	-5.91	-5.91	-5.87	3.26
<i>Ephemera</i>	3.55	7.25	11.78	-5.25	-5.24	-5.18	4.15
<i>Cincticostella</i>	2.69	3.13	8.99	-6.20	-6.25	-6.35	1.25
<i>Serratella</i>	7.04	11.43	16.81	-6.11	-5.96	-5.62	3.20
<i>Uracanthella</i>	5.04	6.58	12.33	-6.29	-6.21	-6.03	1.89
<i>Caenis</i>	1.28	3.64	8.41	-5.04	-5.67	-7.29	7.01
<i>Rhyacophila</i>	4.94	7.82	13.37	-6.19	-6.11	-5.90	2.76
<i>Stenopsyche</i>	5.82	6.87	12.52	-6.16	-6.07	-5.87	1.60
<i>Cheumatopsyche</i>	6.45	9.21	15.59	-7.01	-6.89	-6.62	2.42
<i>Hydropsyche</i>	4.99	11.81	18.17	-7.32	-7.19	-6.87	6.19
<i>Plectrocnemia</i>	6.01	7.70	13.13	-5.99	-5.89	-5.66	1.91