

Original article

한국산 멸종위기 무척추동물 염주알다슬기 (연체동물문, 복족강)의 물리적 서식처 특성

김진영 · 김예지¹ · 김아름¹ · 유인성 · 김 황 · 공동수^{1,*}

국립생태원 멸종위기종복원센터, ¹경기대학교 생명과학과

Physical Habitat Characteristics of the Endangered Macroinvertebrate *Koreoleptoxis nodifila* (Martens, 1886) (Mollusca, Gastropoda) in South Korea. Jin-Young Kim (0000-0002-7146-4510), Ye Ji Kim¹ (0000-0003-2816-2258), Ah Reum Kim¹ (0000-0002-6380-1417), In-Seong Yoo (0000-0002-6720-6025), Hwang Kim (0000-0003-2713-1433) and Dongsoo Kong^{1,*} (0000-0001-8438-3229) (Research Center for Endangered Species, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea; ¹Department of Life Science, Kyonggi University, Suwon 16227, Republic of Korea)

Abstract *Koreoleptoxis nodifila* (Martens, 1886) is an endangered species only living in the central and north streams of South Korea. However, there is a lack of information on physical habitat characteristics of *K. nodifila*. We aimed to determine preference ranges for water depth, current velocity, streambed substrate of *K. nodifila*. The weibull model was used to estimate the habitat suitability based on distribution of individual abundance by physical factors. Optimal depth preferences ranged from 0.53~17.17 cm, current preferences ranged from 48.40~81.03 cm s⁻¹ and substrate (Φ_m) preferences ranged from -4.36~-2.26. Median values of central tendency were determined as follows: water depth 16.73 cm, current velocity 65.23 cm s⁻¹, substrate -3.51. Mean values of central tendency were determined as follows: water depth 21.32 cm, current velocity 65.65 cm s⁻¹, substrate -3.63. Mode values of central tendency were determined as follows: water depth 5.17 cm, current velocity 64.77 cm s⁻¹, substrate -3.24. Based on the habitat suitability analysis, the microhabitat types of *K. nodifila* were determined as riffle and coarse-grained streambed.

Key words: current velocity, endangered species, *Koreoleptoxis nodifila*, streambed substrate, water depth, weibull model

서 론

야생생물 보호 및 관리에 관한 법률 제5조에 의거한 ‘제3차 야생생물 보호 기본계획(’16~’20)’의 실행계획과 동법 제13조에 의거한 ‘멸종위기 야생생물 보전 종합계획

(’18~’27)’에서는 멸종위기 야생생물을 복원하는 방법에 있어 개체수 중심의 종 복원에서 서식지 보전 중심으로 패러다임의 변화를 강조하고 있다. 멸종위기 야생생물의 서식지를 온전히 보전하기 위해서는 복원대상 생물의 물리적 서식처 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다. 하천은 상류에서 하류 방향으로 흐름에 따라 경사도, 조도, 유속 등 물리적 환경이 변화하며 생물군집 구성에 영향을 미친다(Vannote *et al.*, 1980). 특히, 하천에 서식하는 저서성 대

Manuscript received 14 February 2022, revised 16 March 2022,
revision accepted 30 March 2022

* Corresponding author: Tel: +82-31-249-9649, Fax: +82-31-253-1165
E-mail: dskong@kyonggi.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

형무척추동물의 군집 구성에는 유속, 수심, 하상이 가장 중요한 요인이다(Pan *et al.*, 2015). 빠른 유속에서는 바위, 자갈 등의 조립질 하상이 주를 이루는 Church, 2002) 반면, 느린 유속에서는 모래 등의 세립질이 높은 비중을 차지한다(Colby, 1964). 조립질 하상에서는 주로 하상표면에 붙어 서식하는 붙는 무리(clinger)가 우점하며, 세립질 하상에서는 수생식물의 줄기 등을 기어오르는 무리(climber)로 점차 서식기능군(habitat orientation group, HOG)의 형태가 변화한다(Kim *et al.*, 2017).

염주알다슬기(*Koreoleptoxis nodifila*)는 한강 수계인 남한강 상류와 임진강, 한탄강 등 국내 중·북부의 수질이 양호한 하천에 서식하는 한국 고유종(NIBR, 2012)이다. 주로 여울구간의 조립질 하상에 서식하는 것으로 알려져 있으나 물리적 서식처에 대해 정밀한 연구는 진행된 바 없다. 현재 염주알다슬기는 물리적 서식처 교란 등에 의한 개체수 감소를 이유로 2012년에 환경부로부터 멸종위기 야생생물 2급으로 지정되었으며, 국가적색목록에는 위기(EN) 등급으로 평가되어 있다. 또한, 염주알다슬기는 식용으로 이용되는 다슬기속(*Semisulcospira*) 채집 시 무분별하게 포획될 가능성이 높아 보호 및 관리가 필요한 실정이다. 다슬기속은 양식기술(Takami, 1995; Chang *et al.*, 2002), 생활사(Chang *et al.*, 2000), 환경지표(Kurozumi *et al.*, 2004; Karube *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2011; Pan *et al.*, 2011)에 대한 연구가 상대적으로 활발히 진행된 반면, 염주알다슬기는 유기오염(Kong *et al.*, 2018a, b; Kong *et al.*, 2019), 하상(Kong and Kim, 2016; Kim and Kong, 2019)에 대한 지표연구가 일부 진행되었을뿐 물리적 서식처에 대한 종합적인 생태특성 연구는 진행된 바 없다.

본 연구에서는 와이블 모형(Weibull, 1951)의 연속함수를 이용하여 염주알다슬기의 수심, 유속, 하상기질에 대한 서식처적합도지수(habitat suitability index, HSI)를 산출하였다. 서식처적합도지수는 수생생물의 환경별 선호도를 수치적으로 해석하여 표현할 수 있는 수단이다(Vadas and Orth, 2001; Vismara *et al.*, 2001). 일반적인 HSI 산정법은 환경요인의 특정 값에서 출현한 최대 개체수로 다른 값에서 출현한 개체수를 나누는 방식이다(Ahmadi-Nedushan *et al.*, 2006). 이는 HSI를 도출하는 과정에서 일일이 보간법으로 계산해야 하는 불편함이 있으며 기록하여 관리하기 어려운 단점이 있는 반면, 연속함수를 이용한 방법은 특정 환경요인값에 해당하는 HSI 값을 함수로부터 직접 구할 수 있으며 함수식의 기록이 쉽고 동일한 재현성을 갖는 장점이 있다(Kong and Kim, 2017). 이러한 수학적 모형은 조사면적 또는 개체수와 생물종수의 관계를 해석하는데 과거 오래 전부터 이용되어왔다(Arrhenius, 1921;

Gleason, 1922; Kylin, 1926; Preston, 1948, 1962; Weibull, 1951). Flather (1996)는 조류(鳥類)의 종수와 조사면적과의 관계 해석에 9가지 수학적 모형을 적용하였으며 이 중 와이블 모형이 가장 적합한 것을 확인하였다. Kong and Kim (2015)은 가평천, 오산천의 여울부를 대상으로 저서성 대형무척추동물의 종수와 조사면적 간의 관계를 분석하는데 5가지 수학적 모형을 적용한 결과 와이블 모형이 가장 적합함을 확인하였다. 최근에는 와이블 모형을 이용하여 어류 및 저서성 대형무척추동물의 물리적 서식처 적합도 지수를 산출하는 연구가 수행되었으며(Kong and Kim, 2017; Kong *et al.*, 2017; Kim and Kong, 2018), 이러한 연구사례들을 바탕으로 와이블 모형의 적합성은 충분히 검증되었다고 할 수 있다.

최근 기후변화에 의한 집중 강우 현상이 증가함에 따라 하상계수가 변화하여 물리적 서식처의 안정성에 위해를 가할 가능성이 증가하였을 뿐만 아니라 하천 공사 등 인위적인 서식처 훼손행위에 노출되어 있다(Kong and Kim, 2016). 특히, 유량 및 유속 등 수문학적인 변화는 담수 생태계의 먹이사슬 전체를 교란할 수 있다(Joo *et al.*, 2008). 일시적인 유량의 증가는 하상교란에 의한 부착조류 감소를 야기하며, 부착조류를 섭식하는 저서성 대형무척추동물의 개체수 감소로도 이어질 수 있다(Gafner and Robinson, 2007). 이러한 배경에서 본 연구는 한국고유종이자 멸종위기 2급인 염주알다슬기의 물리적 서식처 특성을 제시함으로써 서식지 보전에 필요한 실질적인 정보를 확보하기 위한 목적으로 수행되었다.

재료 및 방법

1. 염주알다슬기 포획 및 방사 허가

염주알다슬기는 환경부 멸종위기 야생생물 II급으로 지정되어 있다. 염주알다슬기의 보전을 위한 학술연구 목적으로 한강유역환경청(허가번호 제2021-5호), 원주지방환경청(허가번호 제2021-03호)의 허가를 받아 포획 및 방사를 진행하였다.

2. 염주알다슬기 조사자료 수집

염주알다슬기의 물리적 서식처 요인을 조사하는데 있어 동일한 수질조건 내에서 인위적으로 물리적 환경 조건만을 달리한 실험적인 방법을 적용할 수 있다. 하지만 이러한 접근으로는 통계적 해석에 필요한 충분한 표본수를 확보하기 어려울 뿐만 아니라, 자연의 모집단에 대한 유의미

한 통계결과를 얻는 것에도 한계가 있다(Kong and Kim, 2016). 따라서 본 연구에서는 환경부 ‘멸종위기 야생생물 전국분포조사’ 등 전국단위 조사결과를 기반으로 염주알다슬기가 1회 이상 출현한 기록이 있는 경기도 연천군, 강원도 춘천시·홍천군·횡성군·영월군 일원의 11개 지점을 대상으로 '21년 3월과 10월에 서식여부 및 개체밀도(개체 m^{-2})를 직접 표본조사하였다. 채집 방법은 국립환경과학원 공고 제2016-372호의 저서성 대형무척추동물 조사 및 평가 지침에 따랐다.

이 중 강원도 영월군의 동강, 서강, 평창강 일원 5개 지점에서만 염주알다슬기의 서식이 확인되었으며 확보한 표본수는 22개(총 98개체)였다. 염주알다슬기는 한강수계 일부 하천에서만 출현하는 등 서식범위가 넓지 않아 분석을 위한 표본 확보에 어려움이 있다. 조사방법에 따라 표본크기(조사면적 또는 채집횟수)가 서로 다른 경우 개체수가 변동되어 오류를 범할 수 있으므로(Kim *et al.*, 2013), 본 연구와 동일한 조사방법을 적용하는 환경부 생물측정망의 ‘하천 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가(’08~’18)’ 단일사업의 한강수계 결과를 추가하여 표본수를 보완하였다. 생물측정망 한강수계의 총 표본수는 7,642개였으며 이 중 염주알다슬기는 11년간 14개 지점에서 16번(총 100개체) 출현하였다. 최종적으로 염주알다슬기의 물리적 서식처 특성을 분석하는데 이용한 표본은 총 38개(총 198개체)였다.

3. 물리적 환경요인 측정

염주알다슬기의 물리적 서식특성을 분석하기 위해 측정 및 활용한 자료는 수심(cm), 유속($cm\ s^{-1}$), 하상기질(Φ_m)이었다. 수심(D)은 염주알다슬기가 발견된 미소 서식처의 하상기질 표면으로부터 수표면까지의 높이를 100 cm 최자로 측정하였다. 유속(U)은 하천 생물측정망 저서성 대형무척추동물 조사 지침에 따라 Craig method(Craig, 1987)를 이용하여 하천의 평행방향과 수직방향에서의 수심 차이를 적용하여 산출하였다[식(1)].

$$U = \sqrt{2g(D_2 - D_1)} \tag{1}$$

- D₁: 흐름의 평행방향 수심(cm)
- D₂: 흐름의 수직방향 수심(cm)
- g: 중력가속도($981\ cm\ s^{-2}$)

하상(Φ_m)은 Cummins(1962)의 기준에 따라 하상 표면의 면적비를 바탕으로 5단계로 구분하였다(Table 1). 하상기질의 표면적비는 무계조성비 보다 정밀도는 떨어지지만 측정과정에서 생물이 유실되지 않으며(Kong and Kim, 2017), 하상표면 재료의 배열을 평가하기에 용이하여

Table 1. Substrate particle size terminology and categories (Cummins, 1962).

Substrate	Particle diameter (D _m)	$\Phi = -\text{Log}_2 D_m$
Boulder	>256 mm	≤ -8
Cobble	64~256 mm	$< -8 \sim \leq -6$
Pebble	16~64 mm	$< -6 \sim \leq -4$
Gravel	2~16 mm	$< -4 \sim \leq -1$
Sand	$\leq 2\ mm$	> -1

(IFASG, 1986) 하상 기질의 표면에 붙어 서식하는 염주알다슬기의 생태특성 분석에는 더욱 적합할 수 있다. Kong and Kim(2016)에 따라 하상 표면의 면적비를 이용하여 평균입경을 산출하였다([식 (2)].

$$\Phi_m = \sum r_i \Phi_i \tag{2}$$

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

4. 수학적 모형을 이용한 염주알다슬기의 물리적 서식특성 분석

본 연구에서 염주알다슬기의 물리적 서식처 특성을 파악하기 위한 대상 요인은 수심(D), 유속(U), 하상의 평균입경(Φ_m)이었다. 환경요인별 염주알다슬기의 출현특성을 확인하기 위해 구간의 범위(D: 5 cm, U: $10\ cm\ s^{-1}$, Φ_m : 1)를 세분화하였으며, 구간별로 출현한 총 개체수를 출현 횟수로 나눠 출현도를 산출하였다. 환경요인별 적합 서식 범위는 HSI(Habitat Suitability Index)를 산정하여 분석하였으며, 어류와 저서성 대형무척추동물에 적용된 연구 사례를 바탕으로 [식(3)]의 변형된 와이블 모형을 따랐다(Kong and Kim, 2017). 누적밀도함수(Cumulative Density Function, CDF) [식(4)]와 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF) [식(5)]는 Kim and Kong(2018)에 따라 추출하여 서식처 적합도 분석에 활용하였다. 모형의 적합도를 판단하기 위해 요인값(x)과 누적개체수(A_i) 관계식의 모수(A_m, κ , λ , c)를 모형 추정치와 실측치의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)가 최소가 될 때까지 시행착오법으로 추출하였다(Kong and Kim, 2015). 여기서 κ 는 형상모수(shape parameter), λ 는 척도모수(scale parameter), c는 위치모수(location parameter) 또는 역치모

Table 2. Annual distribution patterns (frequency and abundance m^{-2}) of *Koreoleptoxis nodifila* along with Han River of South Korea

Year	Han River											Total (11 m ²)
	Namhan River										Mainstream Han River	
	Seokhang Stream	Dong River	Pyeongchang River	Namhan River	Joyang River	Gadae Stream	Kwanpyeong Stream	Hwayang Stream	Jucheon River	Dal Stream	Hantan River	
'08											1 (4)	1 (4)
'09	1 (33)											1 (33)
'10		1 (4)					1 (4)					2 (8)
'11			2 (17)	1 (4)				1 (7)				4 (28)
'12					2 (4)							2 (4)
'13												
'14				1 (4)	2 (4)	1 (4)						4 (12)
'15												
'16									1 (4)	1 (7)		2 (11)
'17												
'18												
Total (11 m²)	1 (33)	1 (4)	2 (17)	2 (8)	4 (8)	1 (4)	1 (4)	1 (7)	1 (4)	1 (7)	1 (4)	16 (100)

수(threshold parameter)라 하였다. 단, 유속(x)은 음의 값을 가질 수 없으나($0 \leq x < \infty$), $\Phi_m(-\infty \leq x \leq \infty)$ 의 요인값(x)과 수심($-c \leq x \leq \infty$)의 c 값은 음의 값을 가질 수 있다. 따라서, Kong and Kim (2017)에 따라 요인값(x)의 범위를 기준으로 평균·중위·최빈·중위수, 분산, 특정 확률에 해당하는 값을 계산하였다. HSI는 수치적으로 0~1의 범위를 가진다. 최종적으로 IFASG (1986)의 기준에 따라 수심, 유속, 하상별 임계값(50%, 75%, 90%, 95%)을 도출하였으며, 적합 서식범위는 50%를 기준으로 하였다.

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

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

κ = 형상모수(shape parameter)

λ = 척도모수(scale parameter)

c = 위치모수(location parameter) 또는

역치모수(threshold parameter)

$$F(x) = \frac{A_i}{A_m} = 1 - e^{-\left[\frac{(x+c)}{\lambda}\right]^k} \quad (4)$$

A_i = 각 요인의 구간별 출현조사단위 기준의 평균개체수를 누적한 값

A_m = 요인값과 누적개체수의 관계를 적합하게 해석할 수 있는 이론적 최대값

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^k} \quad (5)$$

결 과

1. 염주알다슬기의 시·공간적 출현 경향

본 연구에서 조사한 5개 지역(경기 연천, 강원 홍천·춘천·횡성·영월)의 11개 지점에서는 강원도 영월군의 동강, 서강, 평창강에서만 염주알다슬기가 확인되었다. 다만, 본 연구의 조사지점들은 장기모니터링된 결과가 아니며 염주알다슬기의 모든 서식지를 포함하고 있는 것도 아니므로, 염주알다슬기의 출현 경향 분석에는 하천 생물측정망의 조사결과만을 이용하였다. 하천 생물측정망 조사결과에서 염주알다슬기는 지난 11년간('08~'18년) 한강수계 11개 하천에서 총 16회 확인되었으며 대부분 4개체 m^{-2} 가 출현하였다(Table 2). 지역별로는 강원도 영월군(석향천, 평창강, 동강, 남한강) 5회, 정선군(조양강) 4회, 횡성군(주천강)에서 1회, 충청북도 단양군(가대천, 남한강) 및 괴산군(관평천, 화양천)에서 각 2회, 청원군(달천)에서 1회 출현하였으며,

Table 3. Values of Weibull distribution function parameters, central tendency, standard deviation of water depth and critical values of water depth preference range at adjusted HSI of *Koreoleptoxis nodifila*, which were transformed based on the IFASG (1986) guideline.

Water depth (cm)			
Parameters in Weibull function	Shape (κ)	1.20	
	Scale (λ)	22.68	
	Threshold (c)	-	
Central tendency	Mean	21.32	
	Median	16.73	
	Mode	5.17	
Standard deviation	STD	17.80	
IFASG (1986) guideline's HSI preference range	50%	Low	0.53
		High	17.17
	75%	Low	0.03
		High	29.79
	90%	Low	0.00
		High	45.38
	95%	Low	0.00
		High	56.47
	100%	Low	0.00
		High	90

그 밖에 경기도 연천군(한탄강)에서 1회 기록되었다. 수계 별로는 '08년 한강본류 수계(한탄강)에서 1회 채집된 기록을 제외하면 나머지 15회는 남한강 수계의 상류 하천에서 출현하였다. 하천별로는 전체 조사기간 동안 대부분 1, 2회 출현하여 뚜렷한 연간 변화 경향은 확인할 수 없었다.

2. 수심

염주알다슬기의 수심 구간별 출현특성을 분석하여 도출된 와이블 모형의 모수(κ, λ)와 중심치(평균, 중위값, 최빈값) 및 표준편차를 산출하였다. 모수는 각각 $\kappa = 1.20$, $\lambda = 22.68$, 중심치는 평균값 21.32 cm, 중위값 16.73 cm, 최빈값 5.17 cm, 표준편차는 17.80 cm였으며, 평균값에 비해 최빈값과 중앙값이 큰 정적편포(positively skewed distribution) 형태를 보였다(Table 3). 염주알다슬기는 10 cm 이하의 얕은 수심에서 가장 높은 출현도를 보였다(Fig. 1(a, b)). 수심에 대한 서식처 적합도 분석 결과를 바탕으로 In-stream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG, 1986)의 기준에 따라 조정된 HSI(adjusted HSI)를 산출한 결과 염주

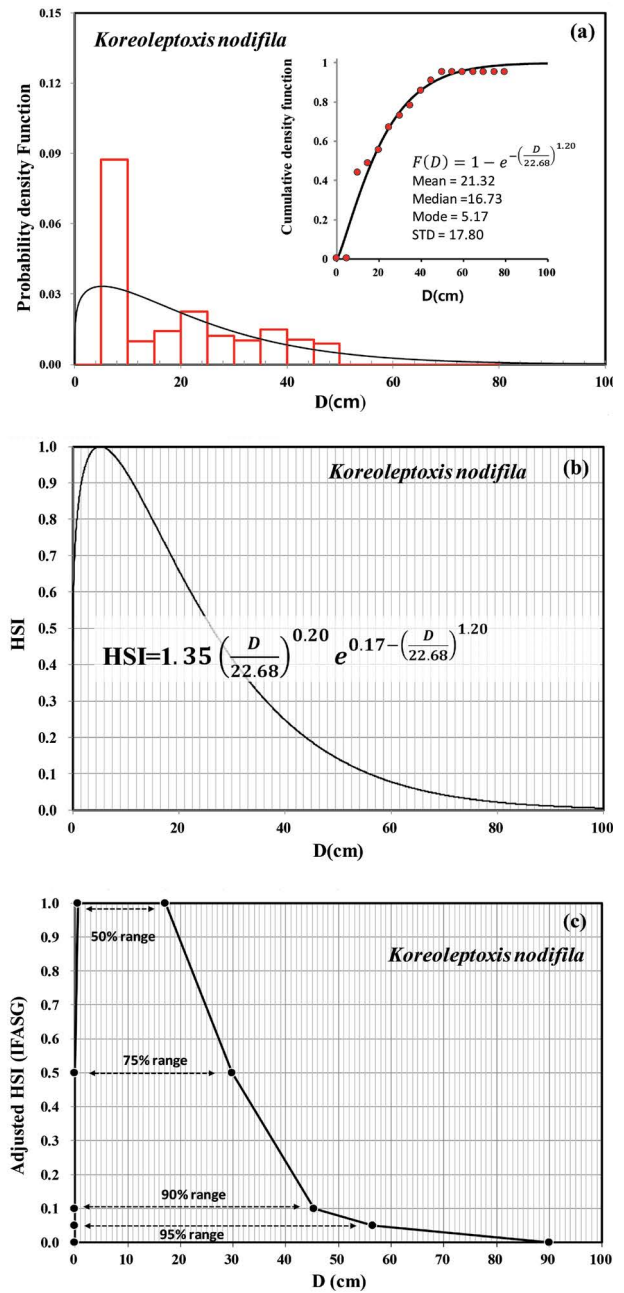


Fig. 1. Water depth (a) preference curves, (b) the function of habitat suitability index and (c) transformation of habitat suitability index according to the guideline of IFASG (1986) for *Koreoleptoxis nodifila*.

알다슬기의 적합수심 범위는 0.53~17.17 cm였다(Fig. 1(c)).

3. 유속

염주알다슬기의 유속 구간별 출현특성을 분석하여 도

Table 4. Values of Weibull distribution function parameters, central tendency, standard deviation of current velocity and critical values of current velocity preference range at adjusted HSI of *Koreoleptoxis nodifila*, which were transformed based on the IFASG (1986) guideline.

Current velocity (cm s ⁻¹)			
Parameters in Weibull function	Shape (κ)	3.11	
	Scale (λ)	73.97	
	Threshold (c)	0.51	
Central tendency	Mean	65.65	
	Median	65.23	
	Mode	64.77	
Standard deviation	STD	23.30	
IFASG (1986) guideline's HSI preference range	50%	Low	48.40
		High	81.03
	75%	Low	37.27
		High	92.17
	90%	Low	26.63
		High	103.38
	95%	Low	20.62
		High	110.33
	100%	Low	0
		High	140

출된 와이블 모형의 모수(κ, λ, c)와 중심치(평균, 중위값, 최빈값) 및 표준편차를 산출하였다. 모수는 각각 $\kappa=3.11$, $\lambda=73.97$, $c=0.51$, 중심치는 평균값 65.65 cm s^{-1} , 중위값 65.23 cm s^{-1} , 최빈값 64.77 cm s^{-1} 이었으며, 표준편차는 23.30 cm s^{-1} 로 나타났다. 유속의 평균값, 중위값, 최빈값에 큰 차이가 없어 정규분포 형태를 보였다(Table 4). 염주알다슬기는 $100\sim 110 \text{ cm s}^{-1}$ 의 매우 빠른 유속구간에서도 출현하였다(Fig. 2(a, b)). 유속에 대한 서식처 적합도 분석 결과를 바탕으로 IFASG (1986)의 기준에 따라 조정된 HSI (adjusted HSI)를 산출한 결과 염주알다슬기의 적합유속 범위는 $48.40\sim 81.03 \text{ cm s}^{-1}$ 였다(Fig. 2(c)).

4. 하상기질

염주알다슬기의 하상 평균입경(Φ_m) 구간별 출현특성을 분석하여 도출된 와이블 모형의 모수(κ, λ, c)와 중심치(평균, 중위값, 최빈값) 및 표준편차를 산출하였다. 모수는 각각 $\kappa=6.23$, $\lambda=9.09$, $c=12.09$, 중심치는 평균값 -3.63 ,

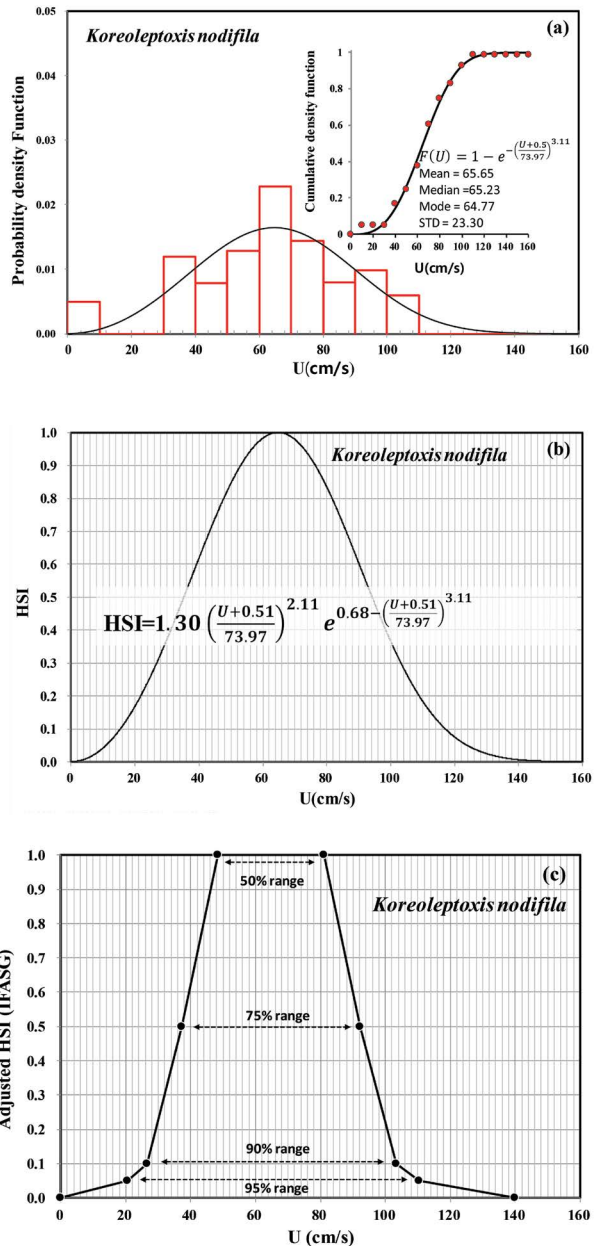


Fig. 2. Current velocity (a) preference curves, (b) the function of habitat suitability index and (c) transformation of habitat suitability index according to the guideline of IFASG (1986) for *Koreoleptoxis nodifila*.

중위값 -3.51 , 최빈값 -3.24 , 표준편차는 2.50 이었다. 하상 입경의 평균값, 중위값, 최빈값에 큰 차이가 없었으나, 평균값에 비해 중위값과 최빈값이 상대적으로 높아 정규분포에 가까운 부적편포(negatively skewed distribution) 형태를 보였다(Table 5). 염주알다슬기는 하상 평균입경이 조립질(gravel, $2\sim 16 \text{ mm}$, $-\text{Log}_2 D_m: -4 < \sim \leq -1$)인 하상

Table 5. Values of Weibull distribution function parameters, central tendency, standard deviation of substrate and critical values of substrate preference range at adjusted HSI of *Koreoleptoxis nodifila*, which were transformed based on the IFASG (1986) guideline.

Substrate (Φ_m)			
Parameters in Weibull function	Shape (κ)	6.23	
	Scale (λ)	9.09	
	Threshold (c)	12.09	
Central tendency	Mean	-3.63	
	Median	-3.51	
	Mode	-3.24	
Standard deviation	STD	2.50	
IFASG (1986) guideline's HSI preference range	50%	Low	-4.36
		High	-2.26
	75%	Low	-5.23
		High	-1.63
	90%	Low	-6.19
		High	-1.04
	95%	Low	-6.82
		High	-0.70
100%	Low	-8.00	
	High	1.00	

에서 주로 출현하였다(Fig. 3(a, b)). 하상 평균입경에 대한 서식처 적합도 분석 결과를 바탕으로 IFASG (1986)의 기준에 따라 조정된 HSI (adjusted HSI)를 산출한 결과 염주알다슬기의 적합 하상 평균입경 범위는 -4.36~ -2.26이었다(Fig. 3(c)).

고찰

염주알다슬기를 포함한 저서성 대형무척추동물의 서식에 영향을 미치는 대표적인 물리적 요인은 유속, 하상, 수심 등으로 알려져 있다(Orth and Maughan, 1983; Kim, 2014; Kong and Kim, 2017). 특히, 저서성 대형무척추동물의 서식기능군(habitat orientation group, HOG)은 서식처의 물리적 특성에 따라 구분된다. 염주알다슬기의 서식기능군은 하상의 표면을 기어다니는 서식형태에 따라 같은 다슬기과(Semisulcospiridae) 분류군들과 마찬가지로 기는 무리(sprawlers)로 구분할 수 있다(Park *et al.*, 2013). 하지만 염주알다슬기는 유속이 빠른 상류하천의 자갈 하상에

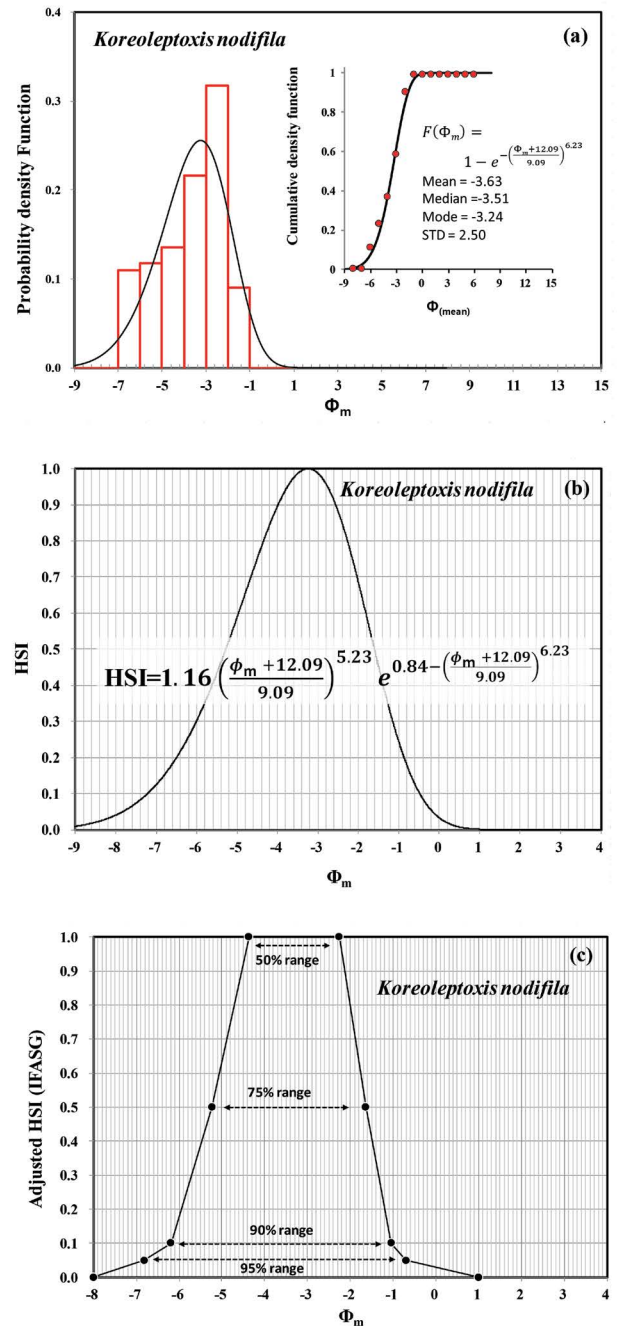


Fig. 3. Substrate (a) preference curves, (b) the function of habitat suitability index and (c) transformation of habitat suitability index according to the guideline of IFASG (1986) for *Koreoleptoxis nodifila*.

서 주로 발견되는 것으로 알려져 있으며 (NIBR, 2012), 빠른 유속에 대하여 하상기질에 부착력을 높이기 위해 연체부의 면적이 상대적으로 더 넓게 진화되어 왔기 때문에 (Kim, 2016) 다른 다슬기과 분류군과는 서식기능군에서

Table 6. Number and percentage of sampling units, average of mean grain size diameter and scheme of lithophilic series according to substrate types (Kong and Kim, 2016).

No.	Substrate type	Average of mean grain size diameter (Φ_m)	Number and percentage (%) of sampling units of <i>K. nodifila</i>		Lithophilic series
1	Bouldery cobble	-7.1	3	39.5	Lithophilous
2	Pebbly cobble	-6.1	12		
3	Gravelly cobble	-5.4	-	36.8	Psephophilous
4	Cobbly pebble	-5.2	14		
5	Pebble	-4.7	-	18.4	Moderate
6	Copegra	-4.5	1		
7	Gravelly pebble	-4.1	6		
8	Cobbly gravel	-3.5	-	5.3	Psammophilous
9	Pebbly gravel	-3.0	2		
10	Gravelly clay	-0.9	-	-	Pelophilous

차별되어야 한다. 또한, 염주알다슬기의 물리적 환경요인 별 적합서식범위를 수치적으로 분석하여 정량적으로 제시한 사례는 찾아볼 수 없었기 때문에 본 논문에서 이를 종합적으로 분석하였다.

Kim (2014)의 가평천의 저서성 대형무척추동물을 대상으로한 연구에서 기는 무리의 주요 출현범위는 유속 $5 \sim 15 \text{ cm s}^{-1}$, 수심 20~50 cm, 하상기질은 자갈(cobble) 또는 호박돌(boulder) 이상인 곳으로 보고하였다. Kim (2017)의 한강수계를 대상으로한 연구에서 기는 무리에 해당하는 다슬기속(*Semisulcospira*)의 환경요인별 중위값은 유속 29 cm s^{-1} , 수심 44 cm, 하상기질 -3.84 (gravel)로 제시하였다. 본 연구에서 염주알다슬기의 환경요인별 중위값은 유속 65.23 cm s^{-1} , 수심 16.73 cm, 하상기질은 -3.51 (gravel)로 기존 연구의 기는 무리와 비교했을 때 유속과 수심에서 가장 큰 차이를 보였다. 또한, 수심 40 cm 이하에서는 상대적으로 붙는 무리(clinger)와 같은 빠른 유속을 선호하는 생물의 출현도가 높으며(Kim *et al.*, 2017), 이는 결국 염주알다슬기가 다슬기속에 비해 상대적으로 유속이 빠른 구간을 선호하는 것을 대변하는 결과라 할 수 있다. 특히, 염주알다슬기의 유속 중위값이 65.23 cm s^{-1} 인데 반해 실출현 최대 유속구간이 $100 \sim 110 \text{ cm s}^{-1}$ 인 것을 고려했을 때 유속이 빠른 서식처로 생태학적 지위를 넓혀 적용했을 것으로 판단된다. 다만, 유속이 10 cm s^{-1} 이하의 구간에서도 일부 발견되었는데, 이는 모두 여울이 흐름 또는 소 구간으로 변경되면서 일시적으로 유속이 감소한 정점들이었으며, 유속은 느렸지만 다른 서식환경은 여울구간과 큰 차이

가 없었다. 이에 따라 염주알다슬기의 서식기능군은 붙는 무리(clinger)로 정의하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

생물이 서식처를 결정하는데 있어 먹이원은 가장 주요한 요인 중 하나이다. 서식환경에 따른 먹이원의 차이는 대상생물의 생체조직에서 추출한 지방산 조성을 통해 추정할 수 있으며(Shimma *et al.*, 1964), 저서성 대형무척추동물 지방산의 20:5 ω 3, 18:2 ω 6, 18:3 ω 3는 규조류와 녹조류의 생체지표로 활용할 수 있다(Shin *et al.*, 2012). Lim *et al.* (2009)의 다슬기류 지방산 분석결과 20:5 ω 3, 18:2 ω 6, 18:3 ω 3 비율은 여울구간에 서식하는 염주알다슬기가 흐름구간에 서식하는 곳체다슬기보다 약 1.7배 높았다. 또한, NFR & DI (2011)의 연구에서 다슬기속은 동물성 사료를 섭식한 반면, 염주알다슬기는 동물성 먹이에 반응을 거의 보이지 않았다. Park *et al.* (2013)의 저서성 대형무척추동물 도감에서도 다슬기속은 잡식성으로 제시한 반면, 염주알다슬기는 초식성으로 구분하고 있다. 일반적으로 여울구간은 유속에 의해 입자가 고온 유기물의 퇴적이 적은 반면, 바위 등 부착조류의 성장에 유리한 하상기질이 풍부한 점을 고려했을 때 염주알다슬기가 여울구간을 선호하는 이유에 먹이원이 주요한 요인임을 시사한다고 할 수 있다. 기후변화에 따른 집중강우의 빈도 증가는 하천 규조류의 생물량을 급격하게 감소시킬 수 있으며(Lee *et al.*, 2017), 토목이나 건설공사에 의한 토지절개 과정에서 발생하는 고농도 탁수의 유입은 빛을 차단하여 부착 규조류 군집의 성장을 억제할 수 있으므로(Kim *et al.*, 2011) 향후 염주알다슬기의 서식지 보전에 관한 연구에서는 먹이원과

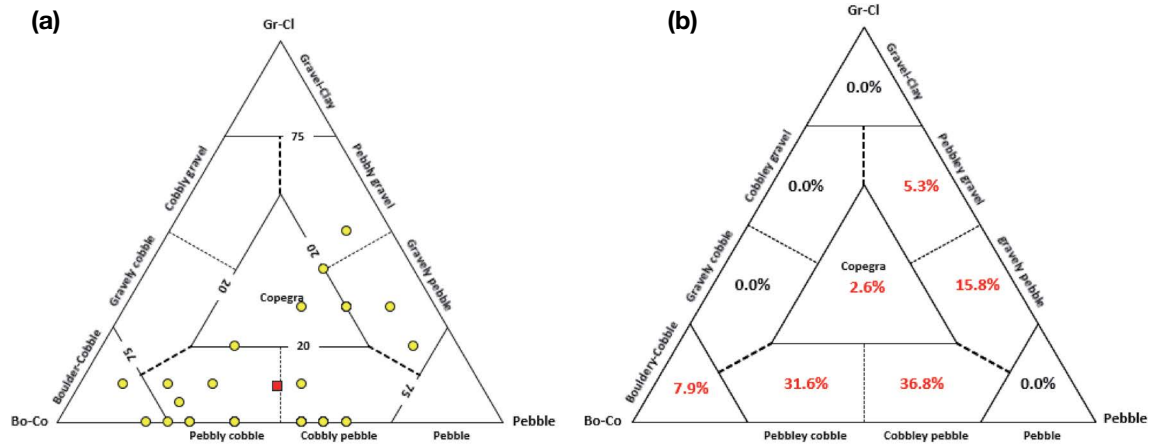


Fig. 4. Textural classification (a) and composition (b) of stream substrates in 38 sampling units of *Koreoleptoxis nodifila*.

Table 7. Classification of microhabitats based on composition rates of Habitat Orientation Groups according to habitat factors for current velocity, water depth, and mean diameter of substrate (Kim *et al.*, 2017).

Substrate range (Φ_m)	Current velocity range (cm s^{-1})	Water depth range (cm)	Microhabitat type	Stream current type
≤ -5.0	$\geq 30 \text{ cm s}^{-1}$	$< 40 \text{ cm}$	I	Riffle
		$\geq 40 \text{ cm}$	IV	Riffle
$-5.0 < \Phi_m \leq -2.0$	$< 30 \text{ cm s}^{-1}$	$< 40 \text{ cm}$	II	Riffle
		$\geq 40 \text{ cm}$	V	Run
	$\geq 30 \text{ cm s}^{-1}$	$< 40 \text{ cm}$	III	Riffle
		$\geq 40 \text{ cm}$	VI	Run
> -2.0	All	$< 40 \text{ cm}$	VII	Run
		$\geq 40 \text{ cm}$	VIII	Pool

이에 대한 위협요인을 대상으로한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Kong and Kim (2016)은 호수의 퇴적물을 Sand, Silt, Clay의 구성비에 따라 삼각도표 (triangle diagram)로 유형화한 Shepard (1954)의 방법을 응용하여 하상의 특성을 10 단계로 구분하였다. 하상 유형은 하상 평균 입경을 기준으로 큰돌선호성 (Lithophilous), 자갈선호성 (Psephophilous), 중간성 (Moderate), 모래성 (Psammophilous), 진흙성 (Pelophilous) 5가지 유형을 제안하였다 (Table 6). 본 연구에서 측정 및 수집한 염주알다슬기 채집점의 하상자료를 적용한 결과 전체 38개 표본의 평균하상은 Pebbly

cobble로 조립질 특성이 강하게 나타났다 (Fig. 4). 하상 유형 별로는 큰돌선호성이 전체에서 39.5%로 가장 높았으며, 자갈선호성 36.8%, 중간성 18.4%, 모래성 5.3% 순으로 조립질의 하상이 대부분을 차지하였다. Kim *et al.* (2017)은 하천의 수심, 유속, 하상기질에 대한 저서성 대형무척추동물 서식기능군의 분포 특성을 기반으로 미소서식처를 9가지로 유형화하였다 (Table 7). 본 연구에서 와이블모형을 이용해 도출된 염주알다슬기의 환경요인별 중위값 (수심 16.73 cm, 유속 65.23 cm s^{-1} , 하상 -3.51)과 평균값 (수심 21.32 cm, 유속 65.65 cm s^{-1} , 하상 -3.63)을 적용한 결과 서식처 유형은 모두 여울 (III) 영역으로 정의되었다. 이는 염주알다슬기가 선호하는 서식처의 물리적인 특성이 조립질 하상이 풍부한 여울구간임을 수학적으로 증명한 결과라고 할 수 있다.

적 요

환경부 생물측정망 ('08~'18) 조사결과를 이용하여 저서성 대형무척추동물인 멸종위기 2급 염주알다슬기 (연체동물문, 복족강)의 물리적 서식생태 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 적정 수심범위는 0.53~17.17 cm였으며, 중위값은 16.73 cm, 평균값은 21.32 cm, 최빈값은 5.17 cm였다. 둘째, 적정 유속범위는 48.40~81.03 cm s^{-1} 였으며, 중위값은 65.23 cm s^{-1} , 평균값은 65.65 cm s^{-1} , 최빈값은 64.77 cm s^{-1} 였다. 셋째, 적정 하상입경 (Φ_m) 범위는 -4.36~-2.26이었으며, 중위값은 -3.51, 평균값은 -3.63, 최빈값은 -3.24였다. 넷째, 염주알다슬기의 하천 내 물리적 미소서식처 특성은 여울구간

의 조립질 하상으로 확인되었다.

저자정보 김진영 (국립생태원 멸종위기종복원센터 전임연구원), 김예지 (경기대학교 생명과학과 박사과정), 김아름 (경기대학교 생명과학과 연구원), 유인성 (국립생태원 멸종위기종복원센터 전문위원), 김 황 (국립생태원 멸종위기종복원센터 전임연구원), 공동수 (경기대학교 생명과학과 교수)

저자기여도 개념설정: 공동수, 현장 및 문헌 조사: 김진영, 유인성, 김 황, 자료분석: 김진영, 김예지, 김아름, 원고초안 작성: 김진영, 원고교정: 공동수, 김예지, 김아름, 유인성, 김 황, 원고편집: 김진영

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 논문은 환경부 재원으로 국립생태원 멸종위기종복원센터에서 수행한 ‘멸종위기종 야생개체군 동태 및 원인 분석 연구(NIE-2021-기반연구-46)’와 환경부 물환경정보시스템 ‘하천생물측정망(’08~’18)’의 공개 정보를 이용하여 수행하였습니다.

REFERENCES

- Ahmadi-Nedushan, B., A. St.-Hilaire, M. Bérubé, É. Robichaud, N. Thiémonge and B. Bobée. 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.
- Arrhenius, O. 1921. Species and Area. *Journal of Ecology* **19**: 95-99.
- Chang, Y.J., H.J. Chang, B.H. Min and I.C. Bang. 2000. Reproductive cycle of the melania snail, *Semisulcospira libertina libertina*. *Development and Reproduction* **4**: 175-180.
- Chang, H.J. 2002. Reproductive cycle and parturition induction in three species of the Pleuroceridae. Pukyung University, MSc Thesis.
- Church, M. 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Fresh Water Biology* **47**(4): 541-557.
- Colby, B.R. 1964. Scour and fill in sand-bed streams. Vol. 462. United States Government Printing Office. Washington. D.C.
- Craig, D.A. 1987. Some of what you should know about water or, KISS* for Hydrodynamics (*Keeping It Stupidly Simple). *Bulletin of the North American Benthological Society* **4**(2): 178-182.
- 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.
- Flather, C.H. 1996. Fitting species-accumulation functions and assessing regional land use impacts on avian diversity. *Journal of Biogeography* **23**: 155-168.
- Gafner, K. and C.T. Robinson. 2007. Nutrient enrichment influences the responses of stream macroinvertebrates to disturbance. *Journal of the North American Benthological Society* **26**(1): 92-102.
- Gao, X., C.J. Niu and Z.J. Hu. 2011. Macroinvertebrate community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin. *The Journal of Applied Ecology* **22**(12): 3329-3336.
- Gleason, H.A. 1922. On the relation between species and area. *Ecology* **3**: 158-162.
- Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG). 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology: biological report, instream flow information paper No. 21. National Ecology Center.
- Joo, G.J., D.K. Kim, J.D. Yoon and K.S. Jeong. 2008. Climate changes and freshwater ecosystems in South Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers Special Feature* **30**(12): 1190-1196.
- Karube, Z.I., Y. Sakai, T. Takeyama, N. Okuda, A. Kohzu, C. Yoshimizu, T. Nagata and I. Tayasu. 2010. Carbon and nitrogen stable isotope ratios of macroinvertebrates in the littoral zone of Lake Biwa as indicators of anthropogenic activities in the watershed. *Ecological Research* **25**: 847-855.
- Kim, A.R., M.W. Oh and D. Kong. 2013. The influence of sample size on environment assessment using benthic macroinvertebrates. *Journal of Korean Society on Water Environment* **29**(6): 790-798.
- Kim, B.H., H.J. Park, H.N. Min, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2011. Short-term effects of turbid water and flow rate on the benthic diatom community in an artificial channel. *Journal of Korean Society on Water Quality* **27**(6): 855-861.
- Kim, D.H. and D. Kong. 2019. Analysis of water quality factors for benthic macroinvertebrates streambed index (BMSI) improvement in Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **35**(6): 539-549.
- Kim, J.H. 2014. Hydraulic habitat analysis of benthic macroinvertebrates at Gapyeong Stream. *Journal of Korea Water Resources Association* **47**: 63-70.
- Kim, J., A.R. Kim and D. Kong. 2017. Classification of microhabitats based on habitat orientation groups of benthic macroinvertebrate communities. *Journal of Korean Society on Water Environment* **33**(6): 728-735.
- Kim, M.C. 2016. State of legally protected species from freshwater or estuary in Korea. *The Korean Association for Conservation of Nature* **175**: 23-29.
- Kim, Y.J. 2017. Estimation of physical habitat suitability of benthic macroinvertebrates in Han River Basin. Kyonggi University, MSc Thesis.
- Kim, Y.J. and D. Kong. 2018. Estimation on physical habitat

- suitability of benthic macroinvertebrates in the Hwayang Stream. *Journal of Korean Society on Water Environment* **34**(1): 10-25.
- Kong, D. and A.R. Kim. 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.
- Kong, D. and A.R. Kim. 2017. Estimation on the physical habitat suitability of benthic macroinvertebrates in the Gapyeong Stream. *Journal of Korean Society on Water Environment* **33**(3): 311-325.
- Kong, D. and J.Y. Kim. 2016. Development of benthic macroinvertebrates streambed index (BMSI) for bioassessment of stream physical habitat. *Journal of Korean Society on Water Environment* **32**(1): 1-14.
- Kong, D., J.K. Min and S.Y. Noh. 2019. Development of benthic macroinvertebrates family-level biotic index for biological assessment on Korean stream environment. *Journal of Korean Society on Water Environment* **35**(2): 152-164.
- Kong, D., S.H. Son, S.J. Hwang, D.H. Won, M.C. Kim, J.H. Park, T.S. Jeon, J.E. Lee, J.H. Kim, J.S. Kim, J. Park, I.S. Kwak, Y.C. Jun, Y.S. Park, S.A. Ham, J.K. Lee, S.W. Lee, C.H. Park, J.S. Moon, J.Y. Kim, H.K. Park, S.J. Park, Y. Kwon, P. Kim and A.R. Kim. 2018a. Development of benthic macroinvertebrates index (BMI) for biological assessment on stream environment. *Journal of Korean Society on Water Environment* **34**(2): 183-201.
- Kong, D., S.H. Son, J.Y. Kim, P.J. Kim, Y.J. Kwon, J.W. Kim, Y.J. Kim, J.K. Min and A.R. Kim. 2017. Estimation of habitat suitability index of fish species in the Gapyeong stream. *Journal of Korean Society on Water Environment* **33**(6): 626-639.
- Kong, D., Y.j. Park and Y.R. Jeon. 2018b. Revision of ecological score of benthic macroinvertebrates community in Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment* **34**(3): 251-269.
- Kurozumi, T., K. Ozaki and J.i. Ohki. 2004. Species composition and ecological distributions of freshwater molluscs in dam lakes of Boso Hills, central Japan. *Journal of the Natural History Museum and Institute Chiba Special Issue* **7**: 33-42.
- Kylin, H. 1926. Über Begriffsbildung und Statistik in der Pflanzensoziologie. *Botaniska Notiser* **1926**: 81-181.
- Lee, Y.J., K. Kim and J. Cho. 2017. Distribution of epilithic diatom assemblages in an urban stream in Busan: effected of urban climatic conditions. *The Korean Journal of Environment Biology* **35**(2): 143-151.
- Lim, C.W., Y.K. Kim, D.H. Kim, J.I. Park, M.H. Lee, H.Y. Park and M.S. Jang. 2009. Comparison of quality characteristics of melania snails in Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **42**(6): 555-560.
- Martens, E. 1886. Zoology Accessions Register: Mollusca: 1900-1905. p. 164.
- National Fisheries Research & Development Institute. 2011. Study on the development of culture techniques for melania snail. p. 59.
- National Institute of Biological Resources. 2012. Red data book of endangered mollusks in Korea, red data book 6. Eonature. p. 207.
- Orth, D.J. and O.E. Maughan. 1983. Microhabitat preferences of benthic fauna in a woodland stream. *Hydrobiologia* **106**: 157-168.
- Pan, B.Z., Z.Y. Wang and X.B. He. 2011. Studies on assemblage characteristics of macrozoobenthos in the West River. *Acta Hydrobiologica Sinica* **35**: 851-856.
- Pan, B.Z., Z.Y. Wang, Z.W. Li, Y.J. Lu, W.J. Yang and Y.P. Li. 2015. Macroinvertebrate assemblages in relation to environments in the West River, with implications for management of rivers affected by channel regulation projects. *Quaternary International* **384**: 180-185.
- Park, J.H., J.S. Lee, H.S. Sim, H.K. Lee, G.S. Hwang, D.S. Kim and W.M. Hur. 2013. An illustrated guide to ecological restoration, benthic macroinvertebrate, Platyhelminthes·Nematomorpha·Mollusca·Annelida. Institute of aquatic ecological restoration. p. 175.
- Preston, F.W. 1948. The commonness and rarity of species. *Ecology* **29**: 254-283.
- Preston, F.W. 1962. The canonical distribution of commonness and rarity: Part I. *Ecology* **43**: 185-215.
- Shepard, F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology* **24**(3): 151-158.
- Shimma, Y. and H. Taguchi. 1964. A comparative study on fatty acid composition of shellfish. *Bulletin of the Japanese Society for the Science of Fish* **30**: 153-160.
- Shin, W.S., B.G. Kim and Y.D. Lee. 2012. The estimation of food sources for macroinvertebrates as *Stenopsyche marmorata* in Natory stream by fatty acid. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **34**(2): 97-102.
- Takami, A. 1995. Growth and number of newborns in *Semisulcospira kurodai* (Prosobranchia : Pleuroceridae) reared in the laboratory. *Venus* **54**: 123-132.
- Vadas, R.L. and D.J. Orth. 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.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.
- Vismara, R., A. Azzellino, R. Bosi, G. Crosa and G. Gentili. 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.
- Weibull, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mathematics* **18**: 293-296.