

가평천의 물리적 환경요인과 어류 군집구조 분석

공동수 · 손세환* · 김진영** · 김아름 · 권용주 · 김정우 · 김예지 · 민정기 · 김필재†

경기대학교 생명과학과
*국립생태원 생태기반연구실
**국립환경과학원 물환경연구부

Analysis of Physical Environmental Factors and the Structure of Fish Community in the Gapyeong Stream

Dongsoo Kong · Se-Hwan Son* · Jin-Young Kim** · Ah Reum Kim · Yongju Kwon · Jungwoo Kim · Ye Ji Kim · Jeong Ki Min · Piljae Kim†

Department of Life Science, Kyonggi University

*Division of Basic Ecology, National Institute of Ecology

**Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received 22 May 2017, Revised 25 August 2017, Accepted 28 August 2017)

Abstract

Physical environmental factors (water depth, current velocity and substrate) and fish community were surveyed in the Gapyeong stream, Korea. The fish group of Gapyeong Stream was divided into three types. Lithophilic fish, *Koreocobitis rotundicaudata* and *Pseudopungtungia tenuicarpa* preferred shallow depth, low-velocity current, and coarse bed condition, whereas *Coreoleuciscus splendidus* and *Microphysogobio longidorsalis* were adapted to high-velocity current and bed materials. Nektonic fish, *Zacco koreanus* and *Zacco platypus* appeared in a wide range of physical conditions. Intermediate fish, *Hemibarbus longirostris*, *Pungtungia herzi* and *Coreoperca herzi* adapted to moderate water depths and current velocities. Among them, *H. longirostris* and *C. herzi* were adapt to various bed materials. *C. splendidus*, *M. longidorsalis* and *P. herzi* showed high niche overlap for current velocity, water depth and substrate with *Z. koreanus* and *Z. platypus*. The occurrence of *M. longidorsalis* in a relatively low-velocity current compared to *Z. koreanus* and *Z. platypus* suggests that the current velocity act as a isolation factor for these species. The competition, isolation and character displacement among these species investigated detail in the future. Based on canonical correspondence analysis, the relative importance of each environmental factor was determined as substrate > water depth > current velocity.

Key words : Aquatic Habitat, Cluster Analysis, Fish Community, Gapyeong stream, Niche Overlap, Physical Environmental Factors

1. Introduction

어류는 그 자체로서 순수한 자연과학적 연구의 대상일 뿐만 아니라 인간에게는 가장 친숙한 생물 중 하나이자 중요한 수산자원이기 때문에 수중생물 중에는 상대적으로 많은 영역에서 연구가 이루어졌다고 할 수 있다. 국내에서도 분류 및 어류상은 물론 동물지리학적 분포와 구계에 대한 연구들이 바탕을 이루어 2000년대에 들어 정부 주도로 멸종위기종의 증식과 복원 사업까지 전개되고 있다(Chae et al., 2015; Kang et al., 2004; Ko et al., 2013).

수생태계의 건강성 평가와 복원 분야에서도 어류는 중요하게 다루어지는 분류군이다. 2017년에 물환경측정망에 생물측정망이 신설되고(환경부고시 제2017-74호) 부착돌말, 저서성 대형무척추동물과 더불어 어류의 조사 및 평가 지침(국립환경과학원 공고 제 2016-372호)이 마련되어 이에 따른 수생태 건강성 평가가 수행되고 있다. 또한 2000년대에 접어들어 확대되고 있는 각종 생태하천복원사업을 계획하는 단계에서 어류는 깃대종(flagship species)으로서 복원 목표 및 지표의 하나로 중시되고 있다.

이러한 배경에 더불어 국내에서 2000년대를 전후하여 환경유량에 대한 인식이 높아지면서 어류의 서식처에 대한 관심은 더욱 고조되고 있는 것으로 보인다. 우리나라 하천에서 어류의 서식처 해석과 관련된 연구가 시작된 것도 이 무렵이었다(Woo et al., 1998). 어류에게 중요한 물리적 서식처 요인인 수심이나 유속 등은 대부분 유량에 의존적이므로 적절한 환경유량을 산정하기 위해서는 대상 어류군

† To whom correspondence should be addressed.
dracon612@hanmail.net

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.

또는 대표 어종의 서식처 적합도에 대한 평가가 우선시 될 수밖에 없다.

국내에서 어류의 서식처 요인으로 수온이나 수질을 함께 고려한 연구가 일부 있으나 대부분의 관련 연구는 물리적 요인 특히 유속과 수심 또는 하상재료만을 다룬 것이 대부분이며, 대상 어종 역시 참갈겨니, 피라미, 쉬리, 돌고기, 감돌고기 정도이다(Hur et al., 2014; Kang, 2012; Kang et al., 2011; Kim et al., 2000; Kim, 1999; Kim et al., 2016; Lee et al., 2006; Seo et al., 2004; Sung et al., 2005).

국내에서는 아직 어류의 종조성과 해당 미소서식처의 환경요인을 동시에 정밀조사하여 군집구조를 해석한 사례가 많지 않기 때문에 관련 자료가 여전히 빈약하다. 본 연구는 이러한 배경에서 경기도에 소재한 하천 중 높은 자연성을 유지하고 있는 하천 중 하나인 가평천을 선정하여 물리적 환경요인(유속, 수심, 하상재료)과 어류군집의 구조를 분석한 것이다. 가평천은 상류에서 하류에 이르기까지 청정한 하천이기 때문에 어류의 출현도가 수질보다는 물리적인 서식요인에 의존한다고 가정할 수 있다.

현장조사 자료를 바탕으로 각 환경요인에 대한 어류종별 생태학적 지위(niche)와 중복도를 분석하고 정준대응분석(cannonical correspondence analysis)을 통한 서열분석(ordination)과 종간의 비유사도 분석을 통한 어류종의 집단화(clustering)를 수행하였으며 주요 어종의 환경요인에 대한 적응유형을 구분하였다. 현재까지 국내 어류 종의 서식 환경에 대한 통계학적 분석 사례가 미진함에 비추어 볼 때 이러한 연구의 결과는 해당 어류 종들의 고유한 서식특성에 대한 이해를 도울 수 있을 뿐만 아니라 향후 서식처 적합도지수(habitat suitable index)를 산정하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. Materials and Methods

2.1 현장조사 및 동정

본 연구에서 사용된 기초자료는 2014년도 환경부의 「환경생태유량 산정기준 연구 및 시범산정 연구」의 일환으로 확보된 것이다. 경기도의 명지산, 화악천, 연인산 등에서 발원하는 가평천은 우리나라의 하천 중 상류~중상류역의 하천에 해당된다. 고도에 따른 물리적 서식환경 및 계절별 생물군집의 변화를 고려하여 가평천의 상·중·하류 3개 지점에서, 2014년 5월 22~23일(1차), 8월 13~14일(2차), 11월 27~29일(3차) 총 3회에 걸쳐 현장조사를 실시하였다. 조사 지점의 행정구역명 및 위치는 다음과 같다.

St. 1(upstream) : 경기도 가평군 북면 도대리 도대리상교
(N37°92'86"52", E127°49'36"36")

St. 2(midstream) : 경기도 가평군 북면 목동리 목동교
(N37°88'32"28", E127°54'80"76")

St. 3(downstream) : 경기도 가평군 가평읍 읍내리 가평교
(N37°83'14"01", E127°51'72"35")

매회 동일한 조사자가 각 조사지점에서 하류에서 상류로 지그재그(zigzag)로 이동하며 조사하였다. 투망(10×10 mm 망목)과 족대(5×5 mm 망목)를 사용하여 소(pool), 여울(riffle) 및 흐름이 있는 곳(run)을 모두 포함하여 조사하였다. 채집된 어류 개체를 크기에 따라 선별하지 않았고 모든 개체를 군집분석의 대상으로 포함시켰다. 3개 조사지점별로 투망은 3차에 걸친 조사시간에 각각 15개 정점(총 조사단위 135개), 족대는 15~20개 정점(1차 조사 시 G2지점과 G3지점에서는 각 20개, 그 외는 각각 15개로 총 145개)으로 총 조사단위(sampling unit)는 280개였다. 채집된 어류는 현장에서 동정하였고 종수와 개체수를 확인한 후 방류하였다.

2.2 물리적 환경요인

채집 전에 각 조사점의 유속, 수심, 하상을 조사하였다. 유속과 수심은 각각 유속측정계(Flow-Mate Model 2000)와 쇄자로 측정하였으며, 하상재료의 입도는 격자망(50 cm × 50 cm, 망목 5 cm)을 이용하여 수평 표면에서의 육안적인 면적비를 기준으로 산출하였다. 무게비를 기준으로 한 입도 분석은 측정 과정에 어류가 회피할 수 있으므로 적용하기 어렵다. 육안적인 하상구조의 분석은 조사자가 다를 경우의 재현성 및 정밀도(precision) 부족이 문제점으로 제기될 수 있지만, 빠르고 쉬운 방법이며 무게조성비로는 알 수 없는 세립질 하상재료의 표면적인 배열을 평가할 수 있다(IFASG, 1986). 즉 깨끗한 잔돌위에 세사(silt)가 베니어합 판처럼 얇게 덮어 하상의 간극을 메우고 있다면 그 무게비는 적지만 어떤 생물들에게는 큰 영향을 줄 수 있기 때문이다(IFASG, 1986). 하상의 입도는 Cummins (1962)의 기준에 따라 boulder($D > 256$ mm, $\phi < -8$; D : 입경(mm), $\phi = -\log_2^D$), cobble($D = 64 \sim 256$ mm, $\phi = -8 \sim -6$), pebble($D = 16 \sim 64$ mm, $\phi = -6 \sim -4$), gravel($D = 2 \sim 16$ mm, $\phi = -4 \sim -1$), sand 이하($D \leq 2$ mm, $\phi \geq -1$)의 5단계로 구분하여 측정하였다.

하상의 입경가적곡선(粒徑加積曲線)은 와이블(Weibull) 모형(Weibull, 1951)을 적용하여 도출하고 해당 함수식으로부터 평균입경을 산출하였으며, 하상의 유형화는 Kong and Kim (2016)의 기준에 따랐다.

조사지점과 조사시기의 2요인 분산분석(analysis of variance)을 통하여 각 정점별 환경요인의 차이를 검정하였다.

2.3 기술통계량

본 연구에서 어종별 서식처 선호도의 기준치로 사용된 출현도(도수분포로 정리 시 도수 또는 빈도)는 환경요인의 구간에서 해당 어종이 출현한 조사단위 기준의 평균개체수였다. 즉 각 조사단위에서 나타난 요인(유속, 수심, 하상의 평균입경)의 i 구간별 총 출현개체수(N_i)를 해당 어종이 출현한 조사단위 수(n_i)로 나눈 값을 적용한 것이다(식 (1)).

$$a_i = N_i/n_i \quad (1)$$

a_i : Frequency of the environmental class i (i 환경계급의 빈도)

N_i : Total number of individuals of target species found in the environmental class i (i 환경계급에서 확인된 대상 종의 총 개체수)

n_i : Number of sampling units where target species occurred in the environmental class i (i 환경계급에서 대상 종이 출현한 조사단위 수)

국내의 관련 연구에서는 특정 환경요인의 구간에서 확인된 어류 개체수의 합을 서식처 선호도의 평가의 기준으로 적용한 것이 대부분인데, 이는 하천의 단면에서 분할단면별로 어류를 전수 조사하였을 경우에 적용 가능하다. 그러나 어류채집 시 전기충격기의 사용이 불허되어 있는 우리나라의 현실에서 인접 분할단면의 물고기가 회피하는 것을 방지하며 해당 분할단면의 물고기를 채집하는 것은 쉽지 않은 일이다. 또한 환경요인의 구간 범위를 고려하지 않고 임의의 표본크기(sample size)로 조사한 후 개체수를 합산한다면 출현빈도의 왜곡이 불가피하다.

본 연구에서 평균출현개체수를 서식처 선호도 평가의 기준으로 정한 것은 이상의 문제를 피하기 위한 것이었다. 또한 대상 종이 출현하지 않은 조사점의 수를 분석에서 배제한 것은 무출현의 이유가 분석대상인 환경요인 외에 다른 요인(수질, 수온, 먹이원, 지리적 격리 또는 하도단절)에 의한 것일 수도 있기 때문이다.

대상 종의 환경요인에 대한 지위(niche)의 평균(mean) 값은 출현빈도를 가중치로 한 요인 값의 가중평균치(Jowett et al., 1991)로 산정하였다(식 (2)).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} a_i CM_i}{\sum_{i=1}^{\infty} a_i} \quad (2)$$

\bar{X} : Average weighted by frequency (빈도가중평균)

a_i : Frequency of the class i (i 계급의 빈도)

CM_i : Mid-point of the class i (i 계급의 계급치)

지위의 표준편차(standard deviation)는 식 3)으로 산정하였다.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\infty} a_i (CM_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^{\infty} a_i - 1}} \quad (3)$$

STD : Standard deviation (표준편차)

p 백분위수의 출현빈도에 대한 환경요인 값은 p 백분위수가 포함되어 있는 계급에서 p 백분위수가 가질 수 있는 출현빈도에서의 해당분과 급구간에서의 해당분을 대비하여 산정하였다(식 (4)).

$$C: X_p - L = f_m : Ap/100 - F_c \left(A = \sum_{i=1}^n a_i \right)$$

C : Interval of the class including p percentile frequency

value (p 백분위 빈도수를 포함하고 있는 계급의 급구간)

X_p : p percentile frequency value (p 백분위 빈도수)

L : Lowest value of the class including p percentile frequency value (p 백분위 빈도수를 포함하고 있는 계급의 하한치)

f_m : Frequency of the class including p percentile frequency value (p 백분위 빈도수를 포함하고 있는 계급의 빈도)

A : Total frequency (총 빈도수)

F_c : Cumulative frequency at the upper value of the class just before the class including p percentile frequency value (p 백분위 빈도수를 포함하고 있는 계급 직전 계급의 상한치까지의 누적빈도)

$$X_p = L + C \left(\frac{Ap/100 - F_c}{f_m} \right) \quad (4)$$

식 (4)로부터 중위수(median) 값은 식 5)와 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{X} = L + C \left(\frac{A/2 - F_c}{f_m} \right) \quad (5)$$

\tilde{X} : Median (중위수)

최빈수(mode) 값은 최빈수가 포함되어 있는 계급 전후의 빈도의 변화를 고려하여 산정하였다(식 (6)).

$$\hat{X} = X'_m + C \left(\frac{f_{m+1}}{f_{m-1} + f_{m+1}} \right) \quad (6)$$

\hat{X} : Mode (최빈수)

X'_m : Lowest value of the modal class (최빈수를 포함하고 있는 계급의 하한치)

f_{m+1} : Frequency of the class just after the modal class (최빈수 계급 바로 다음 계급의 빈도)

f_{m-1} : Frequency of the class just before the modal class (최빈수 계급 바로 앞 계급의 빈도)

2.4 군집분석

각 조사단위에서 출현한 개체수를 기준으로 Bray and Curtis (1957)의 방법에 따라 어종간 비유사도를 산출하였으며, Ward 연결법에 따라 집단화(clustering)하였다.

각 조사점점을 많은 환경요인을 내포한 개별적인 공간 자원(resource)으로 보고 자원이용의 폭(niche breadth)과 지위중복도지수(niche overlap index, NOI)를 분석하였다. 자원이용의 폭에 대한 지수로는 식 (7)의 Levins 값(Levins, 1968)을 Hurlbert (1978)가 표준화한 식 (8)을 적용하였다. 이론적으로 식 (7)의 Levins 값은 1~ s (자원의 수)의 값을 가지므로 식 (8)의 표준화된 지수는 0~1의 범위를 보이게 된다.

$$B = \frac{N^2}{\sum_{j=1}^s n_j^2} \quad (7)$$

B : Levins' measure of niche breadth

n_j : Number of individuals found in or using resource state j

s : Number of possible resource states

$N = \sum_{j=1}^s n_j$: Total number of individuals sampled

$$B_a = \frac{B-1}{s-1} \tag{8}$$

B_a : Levins' standardized niche breadth(표준화된 Levins 지수)

현재까지 제안된 주요 지위중복도지수(NOI)는 Table 1과 같다. 이중 가장 흔히 이용되어온 지수는 백분율중복도(Percentage overlap)와 단순모리시타지수(Simplified Morisita index)이다(Smith and Zaret, 1982). 모리시타지수는 Table 1의 여러 지수 중 유일하게 비율만이 아니라 개체수의 크기도 고려하는 지수로서 자원을 이용하는 개체수가 클수록 1에 가까워지게 된다. 본 연구에서는 여러 지수 중 흔히 적용되는 백분율중복도와 결과의 편향(skewed)이 거의 없는 것으로 보고된(Smith and Zaret, 1982) 모리시타지수를 산출하여 비교 분석하였다.

어류 군집구조 및 어종별 분포에 미치는 환경요인의 영향을 파악하기 위해 정준대응분석(canonical correspondence analysis, CCA)을 하였는데, 물리적 환경요인 중에서 가장 중요하게 다루어지는 유속(U), 수심(H), 하상의 평균입경(Φ_m) (Gore et al., 2001)하였다.

Table 1. Dissimilarity index and niche overlap indices

Indices and references		Formula
Dissimilarity	Bray and Curtis (1957)	$PD = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^n \min(n_{ij}, n_{ik})}{N_j + N_k}$ $N_j = \sum_{i=1}^n n_{ij}, N_k = \sum_{i=1}^n n_{ik}$
	Percentage overlap Renkonen (1938)	$P_{jk} = \left[\sum_{i=1}^n \min(p_{ij}, p_{ik}) \right] 100$ $p_{ij} = n_{ij}/N_j, p_{ik} = n_{ik}/N_k$
	Morisita's index Morisita (1959)	$C = \frac{2 \sum_{i=1}^n p_{ij} p_{ik}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{n_{ij}-1}{p_{ij} N_j - 1} + \frac{n_{ik}-1}{p_{ik} N_k - 1} \right)}$
Niche overlap index	Simplified Morisita index Horn (1966)	$C_H = \frac{2 \sum_{i=1}^n p_{ij} p_{ik}}{\sum_{i=1}^n (p_{ij}^2 + p_{ik}^2)}$
	Horn's index Horn (1966)	$R_o = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \log_2^{1+p_{ij}/p_{ij}} + p_{ik} \log_2^{1+p_{ik}/p_{ik}})$
	Pianka's index Pianka (1973)	$O_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ij} p_{ik}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n p_{ij}^2 \sum_{i=1}^n p_{ik}^2}}$

n_{ij} : Number of individuals of species j that use resource category i
 n_{ik} : Number of individuals of species k that use resource category i

Table 2. Scheme on preference and adaptation of fish for habitat factors

Preference		Range of adaptation	
low MEAN	phobic	low STD	steno
high MEAN	philic	high STD	eury

MEAN: average of a habitat factor for a designated fish

STD: standard deviation of a habitat factor for a designated fish

2.5 적응유형 분석

출현개체수의 분포로부터 나타난 어종별 서식 환경요인의 평균과 표준편차를 가지고 해당요인에 대한 어종별 선호도와 적응범위를 구분하였다(Table 2). 서식 환경요인의 평균 값이 크고 표준편차 값이 작은 어종은 큰 값의 환경요인에 대해 제한된 범위에 적응되어 있는 협호성(stenophilic)이고, 반면에 평균 값이 작고 표준편차 값이 큰 어종은 작은 값의 환경요인을 선호하지만 광범위한 범위에 적응되어 있는 광협성(euryphobic)으로 분류될 수 있다.

3. Results and Discussion

3.1 물리적 환경

가평천의 물리적 환경요인은 공간적인 차이는 뚜렷하지 않았으나 시기적으로는 저수기에 해당하는 11월에 전반적으로 유속이 감소하고 수심이 낮아진 양상을 보였다(Table 3). 조사지점과 조사시기의 2요인 분산분석 결과 수심은 지점 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었으나($p=0.48$) 시기 별로는 극도로 유의한 차이($p=0$)가 있었다. 유속은 지점 간에 유의한 차이가 있었으나($p<0.05$) 시기 간에는 유의한 차이가 없었다($p=0.22$). 하상의 평균입경은 지점 간($p=0.06$) 및 시기 간($p=0.30$)에 모두 유의한 차이가 없었다.

조사점점의 하상유형은 주로 Boulder-Cobble(돌), Pebbly cobble(자갈성 작은돌), Gravely cobble(모래자갈성 작은돌), Cobbly gravel(작은돌성 모래자갈)로서 조립질(coarse)이었다(Fig. 1).

3.2 출현종수 및 개체수

가평천 3개 지점에서 3차에 걸친 조사로 확인된 어류는 총 3목 6과 18종이었으며(Fig. 2a), 잉어과 어류가 주를 이루었고 보호종으로는 멸종위기 야생동물 2급에 해당하는 가는돌고기(*Pseudopungtungia tenuicorpa*)와 천연기념물인 어름치(*Hemibarbus mylodon*)가 출현하였다.

전체 조사지점에서 출현빈도와 상대출현개체수가 가장 큰 종류는 참갈겨니(*Zacco koreanus*)였으며, 피라미(*Zacco platypus*), 배가사리(*Microphysogobio longidorsalis*) 순으로 우점하였다. 이들을 포함하여 상대적으로 출현도가 높았던 돌고기(*Pungtungia herzi*), 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*), 참마자(*Hemibarbus longirostris*), 꺾지(*Coreoperca herzi*), 가는돌고기(*Pseudopungtungia tenuicorpa*), 새코미꾸리(*Koreo-*

Table 3. Mean ± standard deviation of habitat factors in the Gapyeong stream.

		Upstream (G1)	Midstream (G2)	Downstream (G3)
Water depth (m)	May	0.38±0.195	0.34±0.126	0.32±0.091
	Aug.	0.31±0.112	0.32±0.102	0.33±0.086
	Nov.	0.24±0.089	0.28±0.089	0.23±0.060
Current velocity (m/s)	May	0.21±0.256	0.31±0.151	0.20±0.076
	Aug.	0.27±0.259	0.20±0.141	0.25±0.150
	Nov.	0.25±0.233	0.13±0.130	0.14±0.103
Substrate (ϕ_m)	May	-6.3±1.82	-7.1±1.55	-6.6±1.67
	Aug.	-7.0±2.24	-6.9±1.91	-7.4±1.46
	Nov.	-6.8±2.14	-7.4±1.51	-7.3±1.66

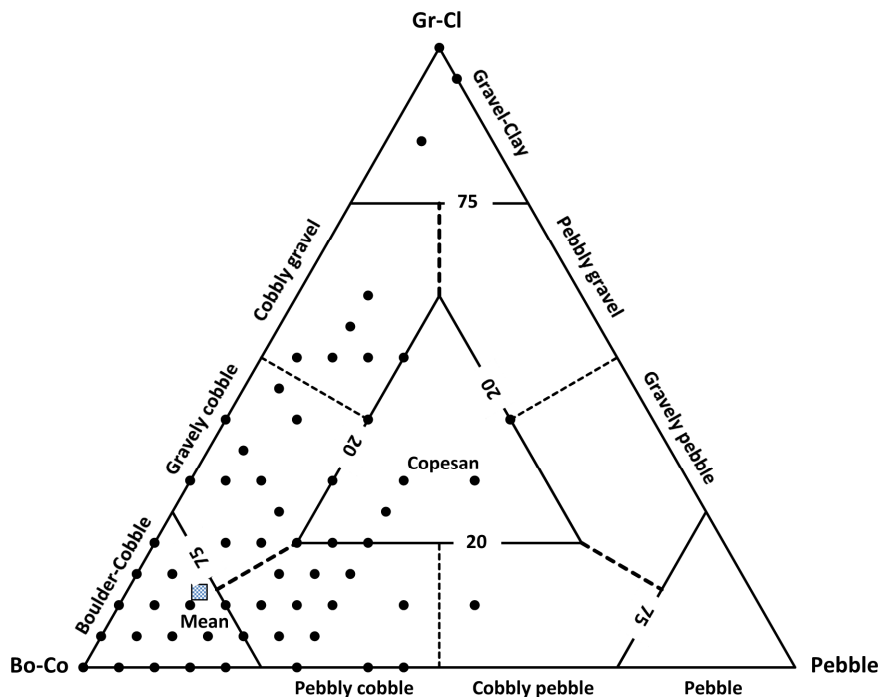


Fig. 1. Substrate types of sampling units for fish in the Gapyeong stream.

cobitis rotundicaudata)를 대상으로 서식처 선호도를 분석하였다.

가평천의 우점어종(참갈겨니, 피라미, 배가사리) 중 제3 우점종인 배가사리는 지점별로 고른 출현도를 보였으나 제1 우점종인 참갈겨니와 제2 우점종인 피라미는 중류와 하류에서 출현도가 높았고 상류에서는 상대적으로 낮았다 (Fig. 2).

시기별로 참갈겨니와 피라미의 출현도는 큰 차이가 없었던 반면 배가사리는 늦봄(5월 22~23일)에 다른 시기에 비해 약 10배 내외로 현저히 높았는데(Fig. 3b~d), 이는 산란기 schooling 현상으로 추측된다.

일반적으로 참갈겨니는 상류~중상류, 피라미는 중류~중상류에 주로 서식하는 어류이지만, 가평천으로 한정할 때는 참갈겨니와 피라미는 상류보다는 중·하류에서 연중 우세를 점하고 있으며 배가사리는 상류에서 하류에 걸쳐 고루 출현하는 종이라고 할 수 있다.

3.3 주요 종의 출현범위

본 조사에서 상대적으로 출현도가 높았던 어류 9종의 환경요인에 대한 평균, 중위수 및 4분위수와 90% 확률범위를 산출하여 도시한 결과는 Fig. 4와 같다.

저서성 여울종인 쉬리와 새코미꾸리와 더불어 암반지대나 큰 돌이 많은 곳에 주로 서식하는 가는돌고기는 얇은 수심에서 주로 분포하는 경향을 보였다(Fig. 4a). 돌고기, 배가사리, 참갈겨니, 피라미, 꺾지의 서식수심은 대체로 큰 중심치를 보였지만 변이가 큰 것으로 나타났다. 특히 유영성인 참갈겨니와 피라미는 넓은 수심범위에서 출현하였다.

본 연구에서는 환경요인에 따른 어류의 출현도를 연속함수로 분석한 것이 아니므로 최빈수와 중위수 및 평균의 크기순서만 가지고 편포방향과 정도를 파악하기는 어렵다. 그러나 대체로 수심에 대한 중심치 값이 ‘최빈수 < 중위수 < 평균’의 순인 참갈겨니, 피라미, 꺾지는 정적편포(positively

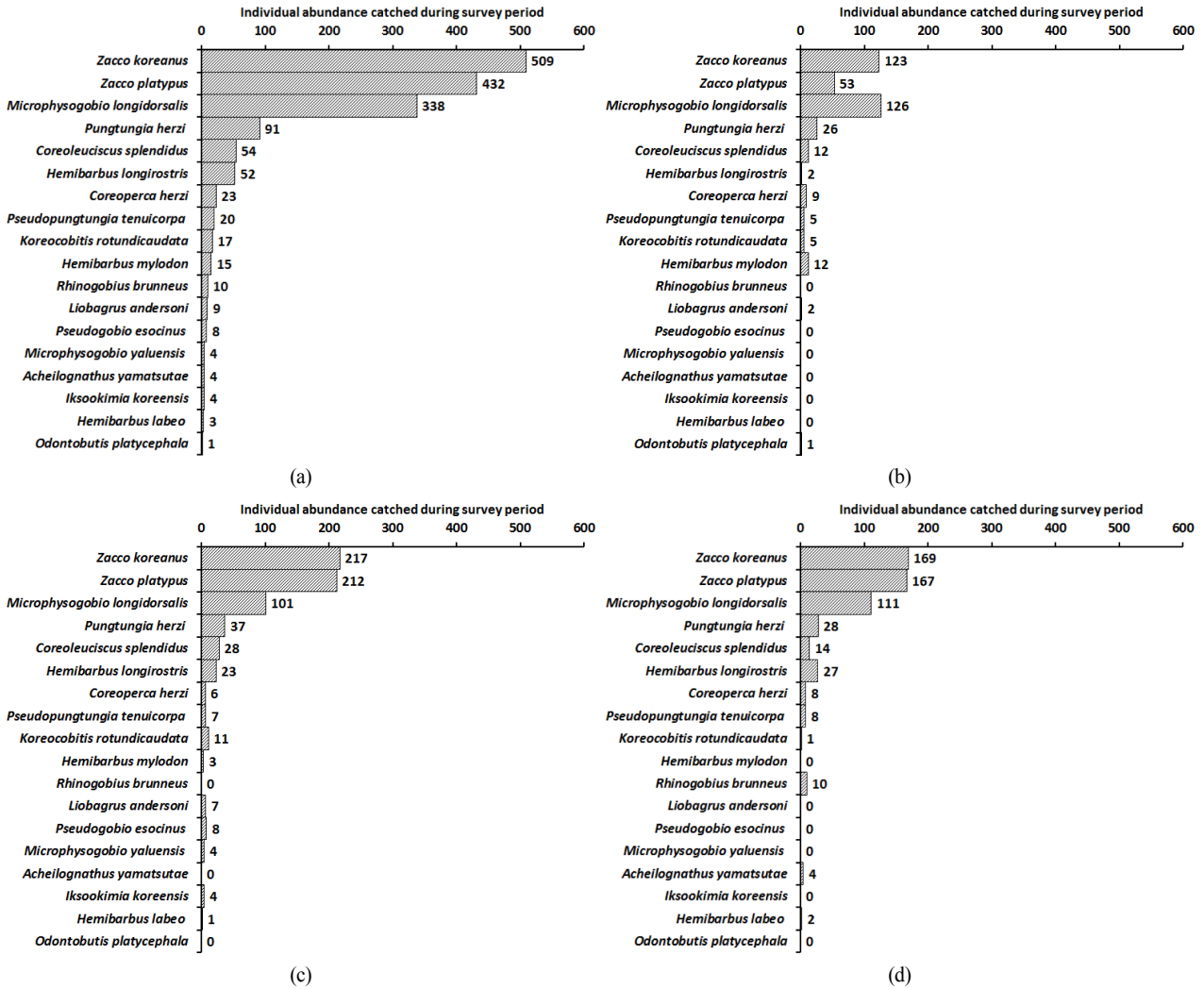


Fig. 2. Number of individuals of fish found at (a) all three sites, (b) the upstream site, (c) the midstream site and (d) the downstream site during May~November in 2014 in the Gapyeong stream

skewed distribution)하는 반면, 돌고기, 쉬리, 배가사리는 ‘최빈수 > 중위수 ≥ 평균’의 순으로 부적편포(negatively skewed distribution)함을 알 수 있다.

돌고기의 중위수심은 0.37 m로 Kang et al. (2011)이 보고한 최적수심 0.35 m와 비슷한 수준이었다.

쉬리의 중위수심은 0.31 m로 Kang et al. (2011)의 최적수심 0.35 m와 비슷한 수준이었고, 적합수심의 범위로서 Kim (1999)이 제시한 0.2~0.45 m(성어기 기준)와 Kang (2012)의 0.25~0.40 m, Hur et al. (2014)의 0.3~0.5 m에 포함되었으나 Kim et al. (2016)의 0.05~0.17 m는 벗어났다.

참갈겨니의 중위수심은 0.35 m로 Kang et al. (2011)의 최적수심 0.35 m와 일치하였고, 적합수심의 범위로서 Sung et al. (2005)이 제시한 성어기 0.35~0.55 m와 산란기 0.3~0.55 m, Kang (2012)의 0.27~0.52 m, Hur et al. (2014)의 0.2~0.4 m에 포함되었다.

피라미의 중위수심은 0.36 m로 Kang et al. (2011)의 최적수심 0.35 m에 근사하였으며, 적합수심의 범위로서 Kim (1999)이 제시한 성어기 0.1~0.5 m, Sung et al. (2005)의

성어기 0.25~0.4 m와 산란기 0.3~0.6 m, Kang (2012)의 0.24~0.47 m에 포함되었으나 Kim et al. (2016)의 0.19~0.28 m는 벗어났다.

유속의 중심치 값이 비슷한 어종들은 정규분포를 하고 있지만 쉬리, 참갈겨니, 피라미, 돌고기는 중심치 값이 최빈수 < 중위수 < 평균’의 순으로 정적편포함을 알 수 있었다 (Fig. 4b). 이들은 빠른 유속에도 적응된 양상을 보여 유속에 대한 서식범위가 넓은 종에 해당된다. 반면 참마자와 여울성 저서종인 가는돌고기 및 새코미꾸리는 느린 유속을 선호하는 경향을 보였다. 본 조사에서 유영성인 참갈겨니와 피라미에 이어 제3 우점종으로 출현한 배가사리는 주로 이들 종에 비해 상대적으로 느린 유속에서 좁은 범위로 출현하였는데, 이는 유속이 이들 종의 형질전환(character displacement) 또는 격리 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다.

돌고기의 중위유속은 0.30 m/s로 Kang et al. (2011)이 제시한 적합유속 0.1~0.3 m/s의 상한치에 해당하였다.

쉬리의 중위유속은 0.42 m/s로서 Kang et al. (2011)의 최적유속 0.45 m/s와 근사하였고, 적합유속의 범위로서

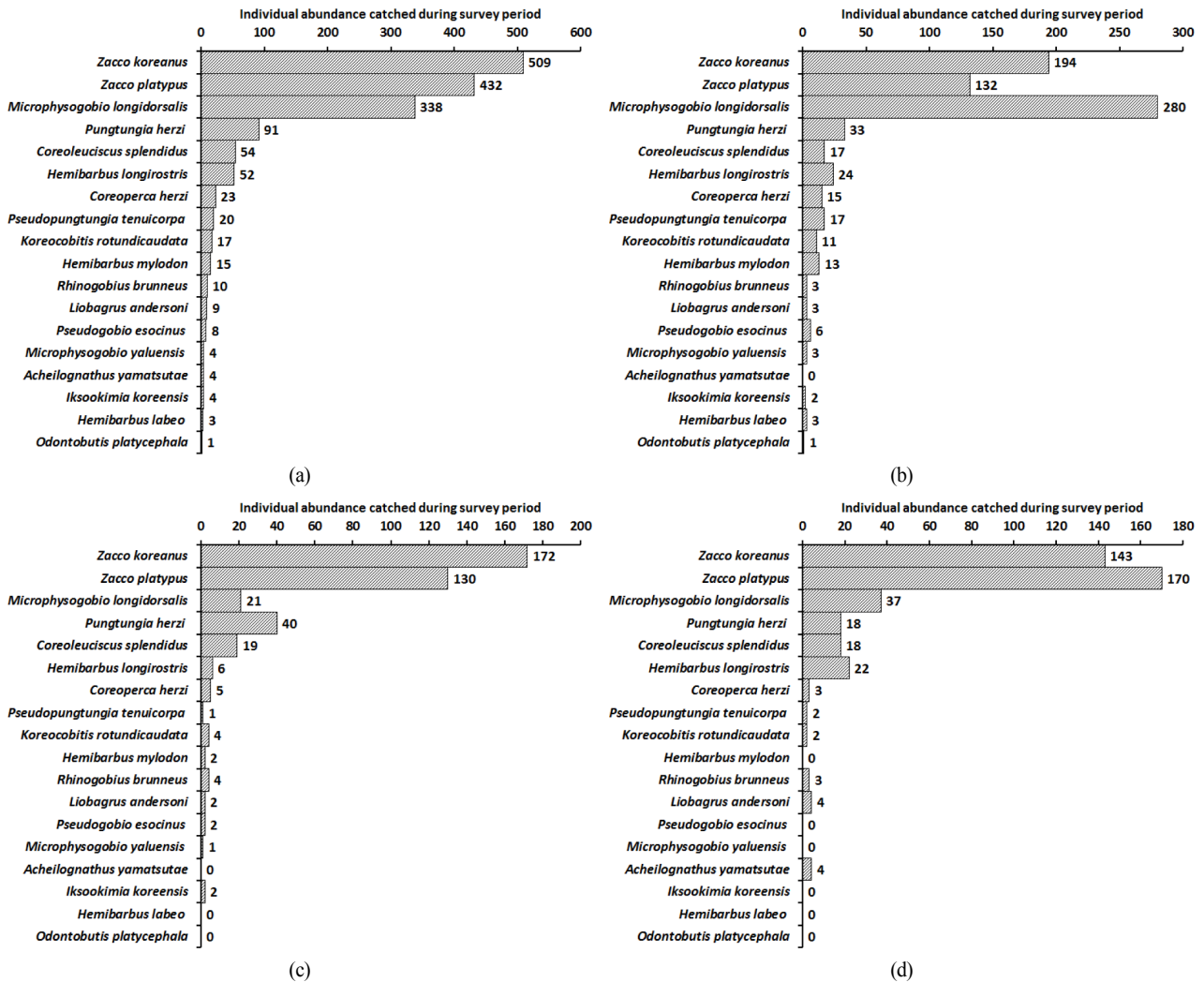


Fig. 3. Number of individuals of fish found (a) during May ~ November, (b) in May, (c) in August and (d) in November in 2014 at all three sites of the Gapyeong stream.

Kim (1999)이 제시한 성어기 0.3 ~ 0.8 m/s, Kang (2012)의 0.35 ~ 0.75 m/s, Hur et al. (2014)의 0.4 ~ 0.6 m/s에 포함되었으나 Kim et al. (2016)의 0.43 ~ 0.73 m/s는 벗어났다.

참갈겨니의 중위유속은 0.41 m/s로 Kang et al. (2011)의 최적유속 0.35 m/s보다 다소 크게 나타났으며, 적합유속의 범위로서 Sung et al. (2005)이 제시한 성어기 0.35 ~ 0.7 m/s와 산란기 0.3 ~ 0.55 m/s, Kang et al. (2011)의 0.3 ~ 0.6 m/s에 포함되었으나 Kang (2012)의 0 ~ 0.29 m/s, Hur et al. (2014)의 0.1 ~ 0.4 m/s는 벗어났다.

피라미의 중위유속은 0.39 m/s로 Kang et al. (2011)의 최적유속 0.25 m/s보다 컸으며, 적합유속이 범위로서 Kim (1999)이 제시한 성어기 0.22 ~ 0.57 m/s, Sung et al. (2005)의 성어기 0.25 ~ 0.55 m/s와 산란기 0.3 ~ 0.55 m/s, Kang et al. (2011)의 0.25 ~ 0.5 m/s, Kang (2012)의 0 ~ 0.42 m/s에 포함되었으나 Kim et al. (2016)의 0.43 ~ 0.73 m/s는 벗어났다.

수심과 유속 모두 중위수를 기준으로 할 때 본 연구의 결과는 기존의 연구에서 나타난 최적치와 큰 차이가 없거

나 적합 범위에 대체로 포함되어 있었으나 Kim et al. (2016)의 결과와는 모두 벗어나 있었다. Kim et al. (2016)의 결과는 전주천 상류의 일부 지역에서 얻어진 자료로서 수체의 유형이 다르기 때문일 수 있지만 관련 서식처 적합도 도출과정에 대한 자세한 기술이 없어 상세한 비교 분석이 어렵다.

하상의 평균입경의 중위수를 기준으로 할 때 참마자와 여울성 저서종인 가는돌고기와 새코미꾸리는 대체로 좁은 입경범위의 조립질 하상에서 출현하였다(Fig. 4c). 그 외의 종류들은 넓은 범위의 평균입경을 가진 하상에 걸쳐 출현하였으며 특히 돌고기와 참갈겨니, 피라미는 상대적으로 세립화된 하상에서도 출현하였다. 쉬리는 조립질 하상을 선호하지만 그 적응범위는 다소 넓은 것으로 나타났다. 모든 대상 어종의 평균입경에 대한 중심치가 ‘최빈수 < 중위수 < 평균’의 순으로 정적편포하고 있으나 가는돌고기, 배가사리, 새코미꾸리는 그 정도가 크지 않아 정규분포에 가까움을 추정할 수 있다.

기존의 여러 연구결과에서 물고기의 대표어종들이 주로

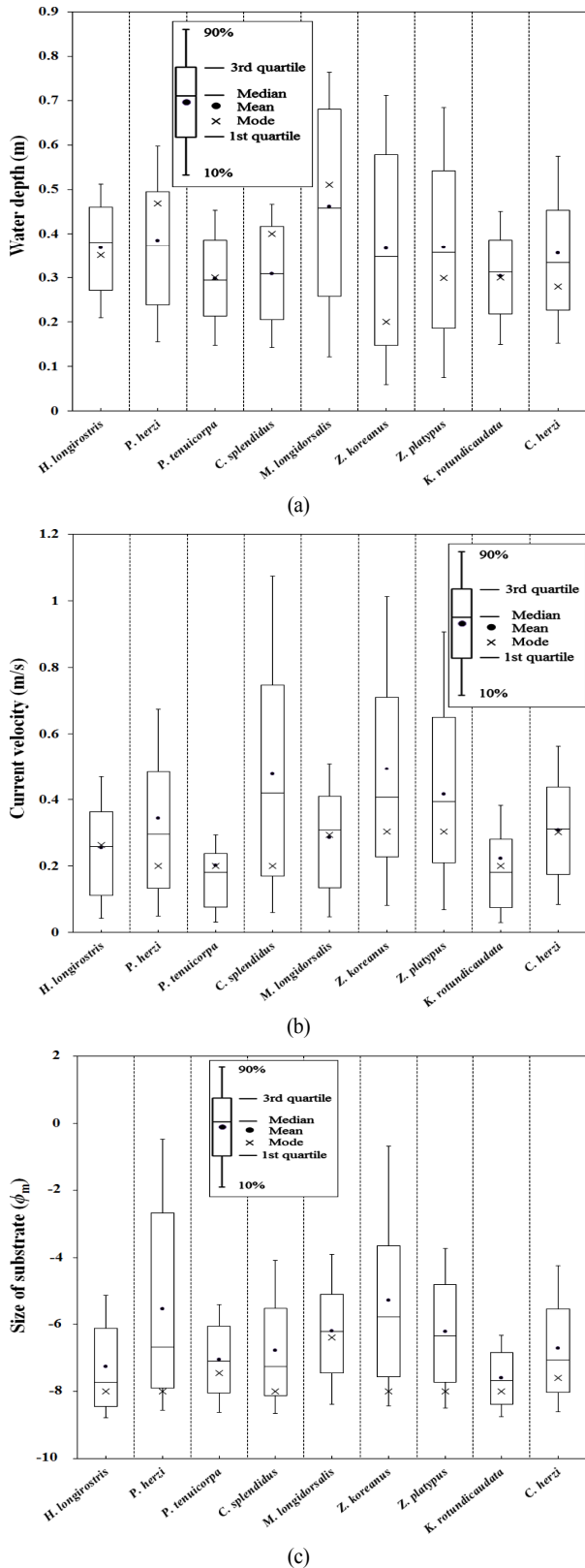


Fig. 4. Distribution patterns of fish species according to (a) water depth, (b) current velocity, (c) substrate in the Gapyeong stream

조립질 하상을 선호하는 것으로 보고 이분법적(binary)으로 서식처 적합도를 적용한 사례가 있다(Hur et al., 2014;

Kim et al., 2016; Kim, 1999; Sung et al., 2005). 그러나 Fig. 4(c)에서 보여주는 바와 같이 어종별로 하상재료의 입경에 대한 선호도가 많이 다르기 때문에 향후에는 종류별 세분화는 물론 연속적인 서식처 적합도가 적용되어야 할 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 참갈겨니와 피라미는 일차담수어로서 우리나라 하천의 중·상류에 폭넓게 분포하고 상류 계곡까지도 서식하며 각각 충식성 및 잡식성 어류라는 점(Kim, 1997)에서 서식처 평가의 대표어종으로서 흔히 적용되어 왔다. 그러나 피라미는 일반적으로 수질오염에 대한 내성을 가진 종으로 알려져 있기 때문에 건강한 생태계의 대표어종으로서의 가치가 작을 수 있다.

이들과 돌고기 및 쉬리를 제외하고 본 연구에서 새로이 다룬 5종(참마자, 가는돌고기, 배가사리, 새코미꾸리, 꺾지)에 대한 결과의 적정성은 기존에 조사된 자료가 없어 비교 분석이 불가하다. 이 중 배가사리는 한강수계에만 분포하는 종이지만 가평천의 경우 출현도가 높은 종류이고 참마자는 서식환경이 맞는 지역에서는 깃대종(flagship species)으로 고려될 수 있으므로 향후 더욱 많은 조사연구가 필요할 것으로 본다.

3.4 정준대응분석

각 정준별 출현종의 개체수와 환경요인을 가지고 정준대응분석(CCA)한 결과 각 주성분의 점수에 대한 상관도는 제 I 주성분에 하상의 평균입경 값이 0.528, 제II주성분에 수심이 0.319, 제III주성분에 유속이 0.206으로 가장 높았으며, 어종 분포의 분산도를 결정하는 세 가지 물리적 요인 중 하상재료가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 환경요인 간의 상관계수는 수심과 유속이 -0.25, 수심과 하상재료의 평균입경(ϕ)은 0.26, 유속과 하상재료의 평균입경(ϕ)은 -0.16으로 다중공선성(multicollinearity)의 문제가 고려될 수준은 아니었다.

제I주성분 축의 오른쪽으로 갈수록 세립질 하상을 선호하는 종이 위치하였고, 깊은 수심을 선호하는 종일수록 제II주성분 축의 높은 쪽에, 빠른 유속을 선호하는 종일수록 제III주성분 축의 높은 쪽에 위치하였다(Fig. 5).

3.5 군집분석

3.5.1 비유사도

어류의 출현개체수를 기반으로 산출된 Bray and Curtis (1957)의 비유사도 값을 기준으로 집단화(clustering)한 결과 크게 4개의 생물군으로 구별되었는데 제I군은 주로 여울성 저서종, 제II군과 제IV군은 대체로 느린 유속과 세립질 하상을 선호하지만 소수 개체로 출현하여 특정 지우기 어려운 종, 제III군은 빠르게 유영하는 종들이었다(Fig. 6). 특히 제III군에 속하는 종들은 가평천에서 제1~3우점종(참갈겨니, 피라미, 배가사리)으로서 가평천을 대표하는 어종이라 할 수 있다. 가평천에서 그 다음으로 흔한 보통종(common species)은 제I군을 이루고 있는 어종 중 돌고기, 참마자, 쉬리, 꺾지인데 가평천의 어류 군집은 크게 이들 두 집단

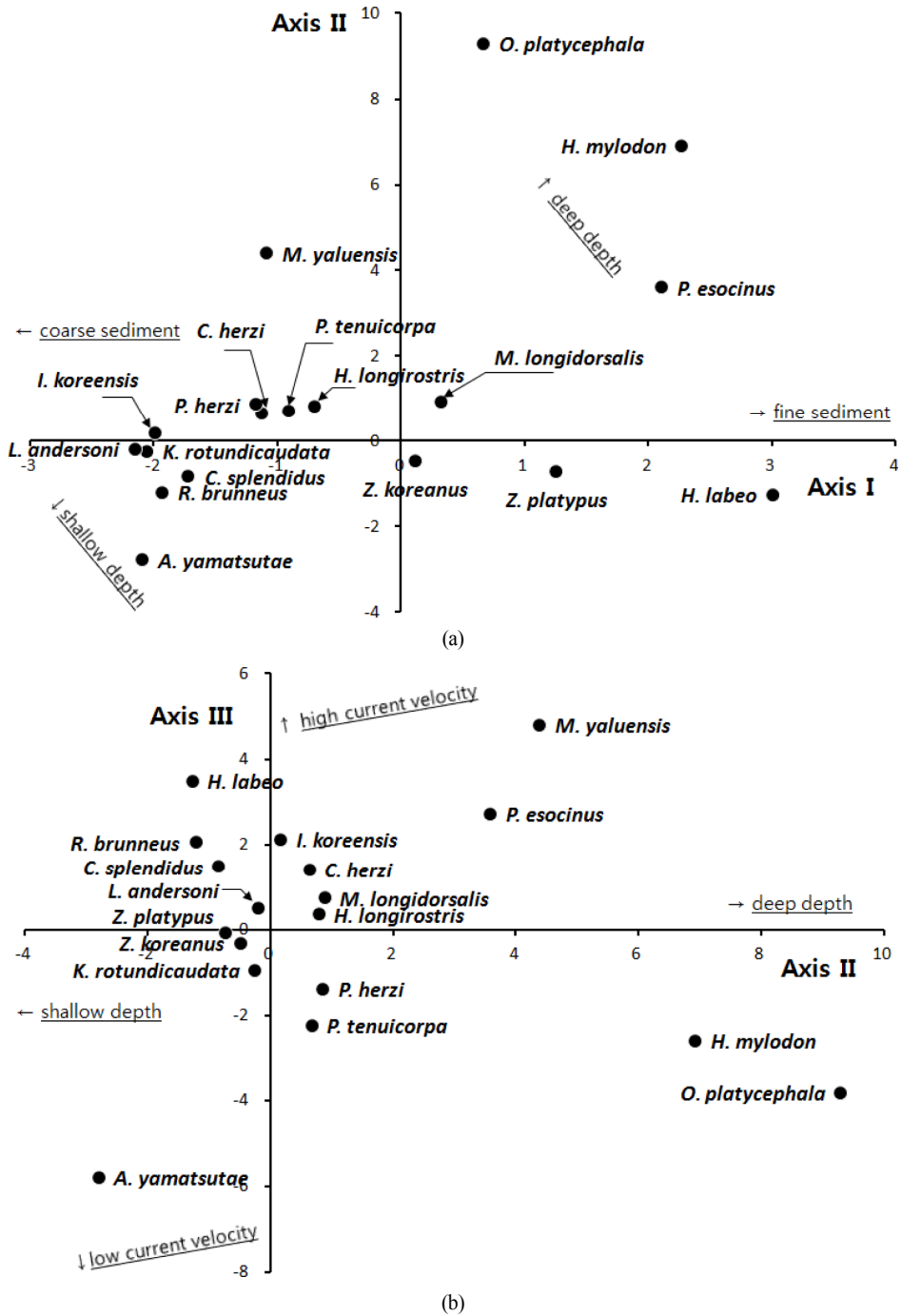


Fig. 5. Canonical correspondence analysis (CCA) diagram with fish and habitat factors (current velocity, water depth, composition of substrate) in the Gapyeong stream (a) Axis I vs. Axis II, (b) Axis II vs. Axis III

에 의해 구분되고 있다고 볼 수 있다.

3.5.2 자원중복도

가평천 어류의 자원폭에 대한 Hulbert (1978)의 표준화 Levins 값은 Fig. 7과 같다. 최우점종인 참갈겨니의 자원 폭이 가장 컸으며, 배가사리는 제3 우점종임에도 불구하고 비교적 작은 자원폭을 보인 반면, 들고기는 아우점종인 피라미보다도 더 자원폭이 컸고 쉬리도 출현도에 비해서는

상대적으로 큰 자원폭을 보여주었다(Fig. 7). 쉬리와 들고기는 공간과 시간적인 집중도가 적고(Fig. 2, 3), 각각 유속과 하상재료에 대해 넓은 지위를 가지고 있기(Fig. 4b~c) 때 문이라고 판단된다.

백분율지위중복도로 볼 때 참갈겨니와 피라미의 중복도가 가장 높았으며, 평균연결법에 의하면 참갈겨니-피라미-들고기 군과 참마자-배가사리 군으로 구분된 후 쉬리를 포함하여 하나의 군으로 묶였다(Table 4).

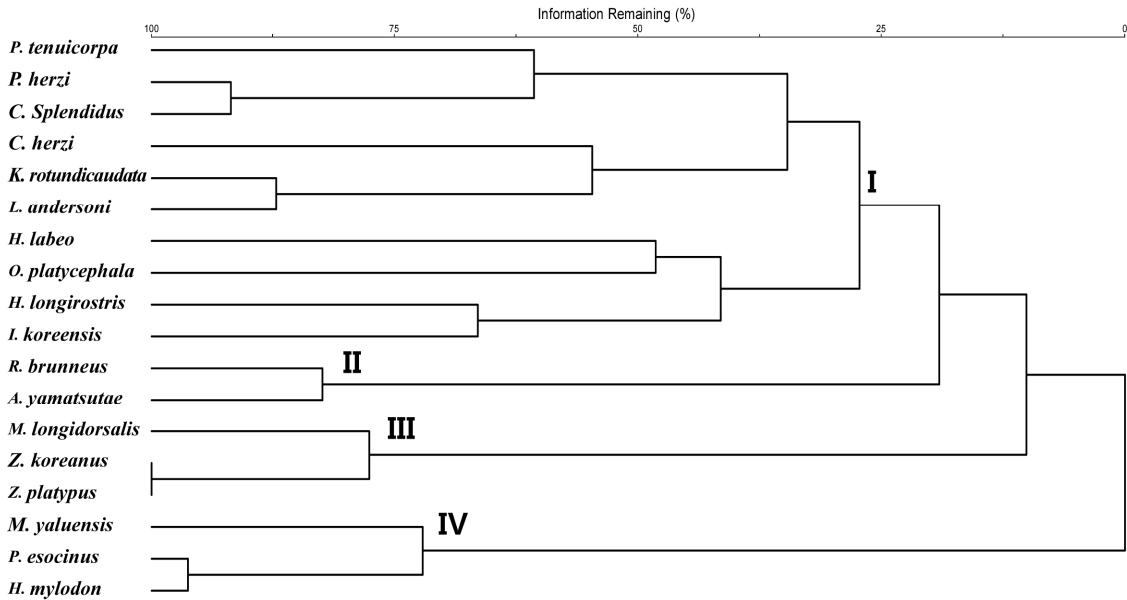


Fig. 6. Result of clustering analysis (Bray-Curtis's distance and Ward's linkage method) based on individual abundance of fish in the Gapyeong stream.

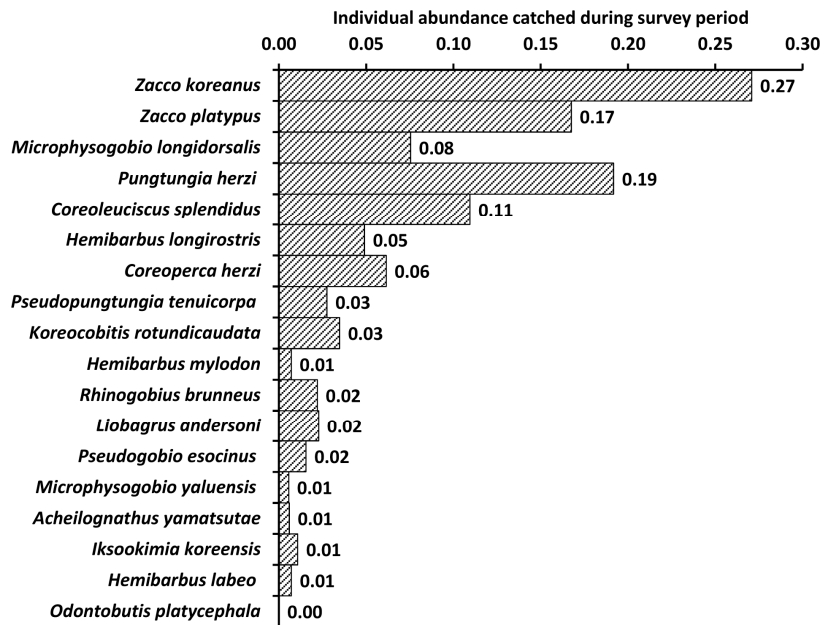


Fig. 7. Niche breadth of fish species in the Gapyeong stream.

모리시타지수를 적용할 경우 참갈겨니와 돌고기가 가장 높은 중복도를 보였으며, 참갈겨니-돌고기-피라미-쉬리 군과 참마자-배가사리 군으로 구분된 후 하나의 군으로 묶였다 (Table 5).

백분율중복도는 중복도가 커질수록 부적편향(negative bias)이 커지며, 표본크기가 커지면 이러한 편향이 줄어들기는 하지만 완전히 제거되지는 않는다고 보고되었다(Ricklefs and Lau, 1980). 연구에서 나타난 백분율지위중복도와 모리시타지수는 가장 높은 중복도를 가진 종의 조합과 군의 연결 순위에서 차이가 있을 뿐 전반적인 경향에는 큰 차이가 없었다.

그러나 중복도지수에서는 참마자와 배가사리가 하나의 같은 군으로 묶여 참갈겨니-돌고기-피라미 군과 분리되는 반면, 비유사도지수에서는 돌고기와 쉬리 군이 참갈겨니-피라미-참마자-배가사리 군과 분리된다(Fig. 3). 돌고기와 쉬리는 참갈겨니 등의 유영성 어종과는 생태에 차이가 있지만 두 종이 각각 하상재료와 유속에 대한 적응범위가 넓어 (Fig. 3) 자원에 대한 중복도가 높게 나타나는 것이 타당하다고 판단된다. 이들 종들 간의 자원중복과 경쟁, 격리(isolation) 또는 형질전환(character displacement)의 가능성에 대한 심도있는 연구가 추후 필요할 것으로 본다.

Table 4. Percent overlap of niche between each major fish species in the Gapyeong stream

	Pt	Ch	Ph	MI	Kr	Cs	Zk	HI
Ch	0.0							
Ph	6.3	2.9						
MI	6.8	10.5	<u>17.0</u>					
Kr	0.0	5.3	10.2	0.6				
Cs	4.1	8.2	14.6 ⁵⁾	12.8	4.1			
Zk	4.7	5.6	<u>23.9²⁾⁴⁾</u>	<u>22.3</u>	3.2	12.4		
HI	1.9	6.5	1.5	<u>18.1³⁾⁴⁾</u>	0.0	4.8	<u>15.0</u>	
Zp	3.0	1.2	13.0	10.9	0.0	6.0	<u>30.8¹⁾</u>	14.3

Pt: *Pseudopungtungia tenuicarpa*, Ch: *Coreoperca herzi*, Ph: *Pungtungia herzi*, MI: *Microphysogobio longidorsalis*, Kr: *Koreocobitis rotundicaudata*, Cs: *Coreoleuciscus splendidus*, Zk: *Zacco koreanus*, HI: *Hemibarbus longirostris*, Zp: *Zacco platypus*
 1): 1st linkage, 2): 2nd linkage, 3) 3rd linkage, 4) 4th linkage, 5) 5th linkage

Table 5. Morisita's niche overlap between each major fish species in the Gapyeong stream (Extensions of symbols are identical to those in Table 4)

	Pt	Ch	Ph	MI	Kr	Cs	Zk	HI
Ch	0.00							
Ph	0.06	0.02						
MI	0.06	0.08	0.17					
Kr	0.00	0.04	0.21	0.01				
Cs	0.04	0.10	<u>0.22</u>	0.16	0.10			
Zk	0.03	0.04	<u>0.31¹⁾</u>	<u>0.30</u>	0.04	<u>0.24⁴⁾⁵⁾</u>		
HI	0.01	0.08	0.03	<u>0.30²⁾⁵⁾</u>	0.00	0.13	<u>0.22</u>	
Zp	0.01	0.01	0.16	0.14	0.00	0.05	<u>0.27³⁾</u>	0.16

3.5.3 적응유형분석

출현개체수로 도출된 각 어종의 서식 수심의 평균 및 표준편차를 기준으로 적응유형을 구분할 때, 배가사리는 상대적으로 깊은 수심을 선호하되 적응범위가 넓은 광호심성(eurypotamophilic)이었으며, 여울성 저서종인 새코미꾸리, 가는돌고기, 쉬리는 협협심성(stenopotamophobic)이었다(Fig. 8a).

유속으로 구분할 때, 참갈겨니, 쉬리, 피라미, 돌고기는 빠른 유속을 선호하되 적응범위가 넓은 광호류성(euryrheophilic)이었으며, 참마자과 여울성 저서종인 가는돌고기, 새코미꾸리, 배가사리는 상대적으로 협협류성(stenorheophobic)이었다.

하상의 입도 유형에 대해서는 참마자와 꺾지 및 여울성 저서종인 새코미꾸리, 가는돌고기, 쉬리는 호조성(lithophilic)이었으며, 참갈겨니, 돌고기, 배가사리, 피라미는 상대적으로 혐조성(lithophobic)이었다.

4. Conclusion

그간 소수의 어종이 하천복원계획의 지표로 적용되어 왔는데 이 중 피라미는 수질오염에 대한 내성이 있기 때문에 건강한 수생태계의 지표로서는 적합하지 않다. 또한 어류종

별로 환경요인에 대한 생태학적 지위(niche)가 다르기 때문에 관련 복원계획을 수립하기에 앞서 환경요인에 대한 여러 어종의 선호도를 파악해야 한다.

가평천의 어류집단은 크게 세 가지 유형으로 구분할 수 있었다. 새코미꾸리와 가는돌고기는 얕은 수심, 느린 유속, 조립질 하상의 조건을 선호하는 반면, 쉬리와 배가사리는 각각 빠른 유속과 광범위한 하상재료에 적응해 있었다. 유영성 종인 참갈겨니와 피라미는 광범위한 수심과 유속 및 하상재료의 조건에서 출현하였다. 참마자, 돌고기, 꺾지는 중간수준의 수심과 유속에 적응된 상태였고 이 중 참마자는 조립질 하상에, 돌고기는 광범위한 하상재료에 적응되어 있다고 할 수 있다. 대체로 쉬리와 배가사리 및 돌고기는 유영성인 참갈겨니 및 피라미와 각각 유속, 수심, 하상재료에 대하여 상대적으로 높은 자원중복도를 보인다. 그리고 배가사리가 참갈겨니와 피라미에 비해 상대적으로 느린 유속의 좁은 범위에서 출현하는 것은 유속이 이들 종의 형질 전환(character displacement) 또는 격리(isolation) 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다. 이들 종들 간의 자원중복과 경쟁, 격리 또는 형질전환의 가능성에 대한 심도 있는 연구가 추후 필요할 것으로 본다.

수심에 대하여 정적편포하는 참갈겨니, 피라미, 꺾지의 적응방향은 깊은 쪽이고, 부적편포하는 돌고기, 쉬리, 배가

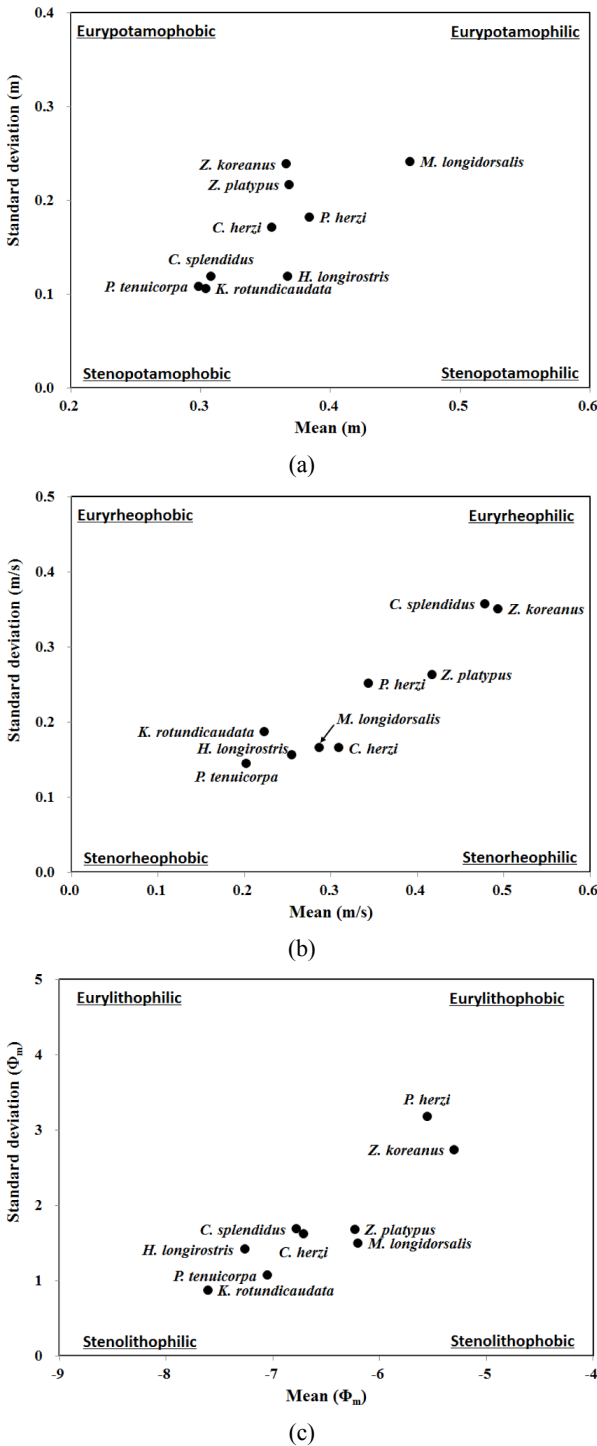


Fig. 8. Rheophily, potamophily, lithophily of nine fish species in the Gapyeong stream (Values of X axis and Y axis indicate the mean and standard deviation of the preferred factors, respectively).

사리의 적응방향은 얇은 쪽이라고 할 수 있다. 유속에 대하여 정적편포하는 쉬리, 참갈겨니, 피라미, 돌고기는 빠른 유속에 적응했음을 시사한다. 분석된 어종 모두 하상의 평균입경(Φ)에 대하여 정적편포하고 있는데 이는 해당 어종들이 조립질 하상을 선호하지만 세립질 하상으로 적응된 상태임을 의미하는 것이다.

어종별 적응유형은 수심에 대하여 배가사리는 광호심성(eurypotamophilic), 새코미꾸리, 가는돌고기, 쉬리는 협협심성(stenopotamophobic)이라 할 수 있다. 유속에 대하여 참갈겨니, 쉬리, 피라미, 돌고기는 광호류성(euryrheophilic), 참마자와 가는돌고기, 새코미꾸리, 배가사리는 협협류성(stenorheophobic)이었다. 하상의 입도 유형에 대해서는 참마자와 꺾지, 새코미꾸리, 가는돌고기, 쉬리는 호조성(lithophilic), 참갈겨니, 돌고기, 배가사리, 피라미는 혐조성(lithophobic)이었다.

환경요인과 어류 출현도에 대한 정준대응분석(CCA)의 결과 어종의 분포를 결정하는 세 가지 물리적 요인 중 하상재료, 수심, 유속의 순으로 영향도가 큰 것으로 나타났지만 요인 간 상관관계를 고려할 때(동일한 유량에서 유속은 수심에 음의 상관, 하상재료의 입경은 유속에 양의 상관 및 수심에 음의 상관) 하나의 요인만으로는 환경요인의 복합적인 영향도를 설명하기 힘들다고 할 것이다. 어류의 출현 개체수를 기반으로 집단화(clustering)한 결과를 보면 가평천의 어류 군집은 크게 참갈겨니, 피라미, 배가사리의 집단과 돌고기, 참마자, 쉬리, 꺾지 집단으로 양분된다고 볼 수 있다.

가평천의 수심, 유속, 하상재료에 대한 어류 9종의 선호도는 획일적이지 않고 몇 가지의 유형으로 구분되기 때문에 각 유형을 고려하여 수생태계의 평가 및 복원 계획 수립에 활용되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 2017학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었으며, 2014년도 환경부의 「환경생태유량 산정기준 연구 및 시범산정 연구」의 결과를 재분석 및 재해석한 것으로서 논문의 기초가 이루어지게 한 환경부에 감사드립니다.

References

Bray, J. R. and Curtis, J. T. (1957). An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin, *Ecological Monographs*, 27(4), 325-349.

Chae, B. S., Kim S. K., Kang Y. H., Heo N. S., Park J. M., Ha H. U., and Hwang U. K. (2015). Ichthyofauna and Fish Community Structure in Upper Reach of the Nakdong River, Korea, *Korean Journal of Ichthyology*, 27(2), 116-132. [Korean Literature]

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.

Gore, J. A., Layzer, J. B., and Mead, J. I. M. (2001). Macroinvertebrate Instream Flow Studies After 20 Years: A Role in Stream Management and Restoration, *River Research and Applications*, 17(4-5), 527-542.

Horn, S. (1966). Measurements of 'Overlap' in Comparative

- Ecological Studies, *The American Naturalist*, 100(914), 419-424.
- 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]
- Hurlbert, S. H. (1978). The Measurement of Niche Overlap and Some Relatives, *Ecology*, 59(1), 67-77.
- 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.
- Jowett, I. G., Richardson, J., Biggs, B. J., Hickey, C. W., and Quinn, J. M. (1991). Microhabitat Preferences of Benthic Invertebrates and the Development of Generalised 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. (2012). Comparison of Physical Habitat Suitability Index for Fishes in the Rivers of Han and Geum River Watersheds, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(1B), 71-78. [Korean Literature]
- Kang H., Im D., Hur, J. W., and Kim, K. H. (2011). Estimation 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]
- Kang J. H., Lee E. T., Lee J. H., and Lee D. H. (2004). Estimation of River Instream Flow Considering Fish Habitat Conditions, *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(11), 915-927. [Korean Literature]
- Kim, G. H, Jo ,W. C., and Jeon, B. H. (2000). Estimation of Suitable Flow Needs for Maintaining Fish Habitat Conditions Using Water Quantity and Quality Simulation, *Journal of Korea Water Resources Association*, 33(1), 3-14. [Korean Literature]
- Kim, I. S. (1997). *Freshwater Fishes. In: Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea*, The Ministry of Education, Korea, 37, 1-631 [Korean Literature]
- Kim, K. H. (1999). *Evaluation of Habitat Conditions and Estimation of Optimum Flow for the Freshwater Fish*, Ph. D. Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea. [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]
- Ko, M. H., Lee, I. R., and Bang, I. C. (2013). Egg Development and Early Life History of Endangered Species *Gobiobotia naktongensis* (Pisces: Cyprinidae), *Korean Journal of Ichthyology*, 25(1), 9-16. [Korean Literature]
- Kong, D. and Kim, J. Y. (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. [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]
- Levins, R. (1968). *Evolution of Changing Environments: Some Theoretical Explorations* (No. 2), Princeton University Press, 120.
- Morisita, M. (1959). Measuring of Interspecific Association and Similarity between Communities, *Reprinted from the Memoirs the Faculty of Science, Kyushu University, Series E*, 3(1), 64-80.
- Pianka, E. R. (1973). The Structure of Lizard Communities, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 53-74.
- Renkonen, O. (1938). Statistisch-ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore, *Annales Zoologici Societatis Zoologicae-Botanicae Fennicae Vanamo*, 6(1), 1-231.
- Ricklefs, R. E. and Lau, M. (1980). Bias and Dispersion of Overlap Indices: Results of some Monte Carlo Simulations, *Ecology*, 61(5), 1019-1024.
- Seo, J. W., Keum, J. D., Yang, H. J., and Kang, Y. H. (2004). The Fish Community Structure in the Middle of Nakdong River, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 37(2), 227-235. [Korean Literature]
- Smith, E. P. and Zaret, T. M. (1982). Bias in Estimation Niche Overlap, *Ecology*, 63(5), 1248-1253.
- Sung, Y. D., Park, B. J., Joo, G. J., and Jung, K. S. (2005). The Estimation of Ecological Flow Recommendations for Fish Habitat, *Journal of Korea Water Resources Association*, 38(7), 545-554. [Korean Literature]
- Weibull, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *Journal of Applied Mathematics*, 18(3), 293-296.
- Woo, H. S., Lee, J. W., and Kim, K. H. (1998). Development of a Method for Determination of Instream Flow Needs Required for Fish Habitat Conservation-Application to the Keum River, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 18(2-4), 339-339. [Korean Literature]