



하천 수질에 대한 어류의 서식처적합도지수 산정 - 피라미를 대상으로 -

Estimation of Fish Habitat Suitability Index for Stream Water Quality - Case Species of *Zacco platypus* -

홍록기^a · 박진석^b · 장성주^c · 송인홍^{d,†}

Hong, Rokgi · Park, Jinseok · Jang, Seongju · Song, Inhong

ABSTRACT

The conservation of stream habitats has been gaining more public attention and fish habitat suitability index (HSI) is an important measure for ecological stream habitat assessment. The fish habitat preference is affected not only by physical stream conditions but also by water quality of which HSI was not available due to the lack of field data. The purpose of this study is to estimate the HSI of *Zacco platypus* for water quality parameters of water temperature, dissolved oxygen (DO), and biochemical oxygen demand (BOD) using the water environment monitoring data provided by the Ministry of Environment (ME). Fish population data merged with water quality were constructed by spatio-temporal matching of nationwide water quality monitoring data with bio-monitoring data of the ME. Two types of the HSI were calculated by the Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG) method and probability distribution (Weibull) fitting for the four major river basins. Both the HSIs by the IFASG and Weibull fitting appeared to represent the overall distribution and magnitude of fish population and this can be used in stream fish habitat evaluation considering water quality.

Keywords: Habitat suitability index; water quality; fish; *Zacco platypus*

1. 서론

1999년 하천법의 개정으로 이수, 치수와 더불어 생태, 환경 측면의 기능을 고려한 하천복원 사업이 시작되고, 2000년대에 들어서면서 하천의 환경기능과 생태에 관한 관심이 증가하며 하천에서의 어류 서식처에 관한 연구가 시작되게 되었다. 하천복원 사업을 통해 서식처를 복원하는 것과 더불어 하천의 환경생태유량을 산정하는데 어류 서식처를 정량적으로 평가하는 것이 중요하다.

환경생태유량은 하천 구조와 수생태계 다양성 보호를 위해

요구되는 최소한의 유량이다 (Tharme, 2003). 환경생태유량의 산정에는 미국 어류 및 야생동물관리국 (United States Fish and Wildlife Service, FWS)에서 제시된 유량증분방법론 (Instream Flow Incremental Methodology, IFIM)이 적용되고 있다. 이는 유량을 점차 증가시키며 어종별, 성장단계별 어류의 서식처에 가장 적합한 유량을 산정하는 방법으로, 현재까지 환경생태 유량 산정을 위해 널리 지지되어온 방법이다 (Stalnaker et al., 1995; Sung et al., 2005; Lee et al., 2006).

이러한 환경생태유량의 산정을 위해서는 어종별 서식처적합도지수 (Habitat Suitability Index, HSI)를 구축해야만 한다. 이는 다양한 물리적 환경변수에 대한 대상 종의 선호도를 정량적으로 표현하는 지표이자 해석수단이다 (Vadas and Orth, 2001; Vismara et al., 2001). 미국에서는 USGS에서 약 60여 종의 어류에 대한 HSI를 산정해 환경생태유량 결정에 이용하고 있다. HSI에 관한 연구는 하천을 넘어 호수, 하구 지역까지 확장되는 추세이며 (Luz and Loucks, 2003; Vinagre et al., 2006), 최근에는 로지스틱 회귀, 인공지능경망 등 다양한 통계적 방법이 적용되고 있다 (Jorde et al., 2001; Olden and Jackson, 2002; Ibarra et al., 2003; Ahmadi-Nedushan et al., 2006; Inglis et al., 2006; Santos et al., 2006; Vincenzi et al., 2007; Jung et al., 2012).

^a Undergraduate Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b Ph.D Student, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^c M.S. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^d Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Global Smart Farm Convergence Major, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4581, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: inhongs@snu.ac.kr

Received: October 14, 2021

Revised: October 20, 2021

Accepted: November 08, 2021

국내에서는 HSI에 관한 연구가 Kim (1999)에 의해 처음으로 시도되었으며, 남한강 달천 구간에서 피라미 등 6개 어종에 대한 HSI를 제시했다. 하지만, 현장 모니터링 자료의 부족으로 인해 대부분이 전문가의 판단에 의존해 준 이분법으로 산정되었다. Kang et al. (2004)는 남한강 수계에서 Washington Department of Fish and Wildlife (WDFW, 1996)의 지침에 따라 유속, 수심, 하상 재료에 대한 피라미의 HSI를 도출했으며, Sung et al. (2005)는 낙동강 유역의 현장 모니터링을 바탕으로 피라미와 참갈겨니에 대한 HSI를 산정하고 환경생태유량을 제시한 바 있다. Lee et al. (2006)은 한강 수계 주요 지천 모니터링을 바탕으로 피라미에 대한 HSI를 산정했다. Kang et al. (2011)은 금강수계 지류에서 피라미 등 6개 어종의 HSI를 산정했으며, Kang (2012)는 한강수계와 금강수계의 피라미, 참갈겨니, 쉬리의 HSI를 비교·분석한 바 있다. Hur et al. (2014)는 금강수계 초강천에서 감돌고기, 참갈겨니, 쉬리의, Kim et al. (2016)은 전주천 상류에서 피라미와 쉬리의 수심, 유속, 하상 재료에 대한 HSI를 제시한 바 있다. 국내에서 HSI 산정을 위한 통계적 접근은 Kong et al. (2017)에 의해 처음으로 시도되었으며 가평천에서 피라미 등 9개 종의 수심, 유속, 하상 재료에 대한 HSI를 Weibull 확률분포형으로 제시한 바 있다.

국내에서 어류의 HSI에 관한 연구 사례와 현장 조사자료는 부족한 실정이다. 특히 수심, 유속 등 하천의 수리조건과 어류 개체를 연계한 HSI는 다수 제시된 바 있으나, 하천의 수질을 바탕으로 각 수질 인자별 HSI를 제시한 연구는 없었다. 일반적으로 어류 서식처에 영향을 미치는 환경요인은 수심, 유속과 같은 물리적 인자뿐 아니라 영양물질, 독성, 용존산소 등의 화학적 인자도 포함된다 (Arthington et al., 2006). 부착조류는 질소, 인 등의 영양염의 영향을 받아 성장하며, 이는 조류를 먹이

로 삼는 어류의 서식 적합성에 영향을 미친다. 어류 서식처에 영향을 미치는 각각의 인자들은 수계, 지천 특성에 따라 다르며 물리적, 화학적 인자는 하나가 변화함에 따라 다른 인자에 대한 HSI에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 어류의 HSI를 산정하는데 물리적 인자뿐 아니라 수체의 수질 인자를 함께 고려할 필요가 있다. 국내에서 수질 등급에 따른 수질 인자의 범위, 적정 서식 어종을 분류한 사례는 있으나, 수질 인자에 대한 정량적인 HSI의 산정 사례는 존재하지 않는다.

본 연구에서는 환경부에서 운영 중인 국내 하천 물환경측정망의 수질·생태 모니터링 자료를 바탕으로 수질 인자에 대한 피라미의 HSI를 수계 단위로 산정하며, 상시 운영되는 물환경 측정자료를 통해 HSI를 산정하는 방법론을 제시하는 데 목적을 둔다. 물환경정보시스템에서 제공되는 수질, 총량, 생물 측정자료를 공간간적으로 연계하고, 물리적 인자에 대한 HSI 산정에 적용되어 온 Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG, 1986)의 방법과 Kong et al. (2017)에 의해 제시된 통계학적 방법론을 바탕으로 수온, 용존산소량 (DO), 생화학적 산소요구량 (BOD)에 대한 HSI를 도출하였다.

II. 재료 및 방법

수질 인자에 대한 HSI를 산정하기 위해 수질측정망과 생물 측정망을 GPS 좌표와 하천 흐름을 기반으로 공간적으로 연결했다. 이후 측정자료의 시간 정보에 기반하여 공간적으로 연결된 지점 간의 측정자료를 시간적으로 연결했다. HSI를 산정할 수계 단위를 바탕으로 가용자료를 추출하고 이를 바탕으로 수질 인자별 HSI를 산정했다. 본 연구의 흐름을 Fig. 1에 도시하였다.

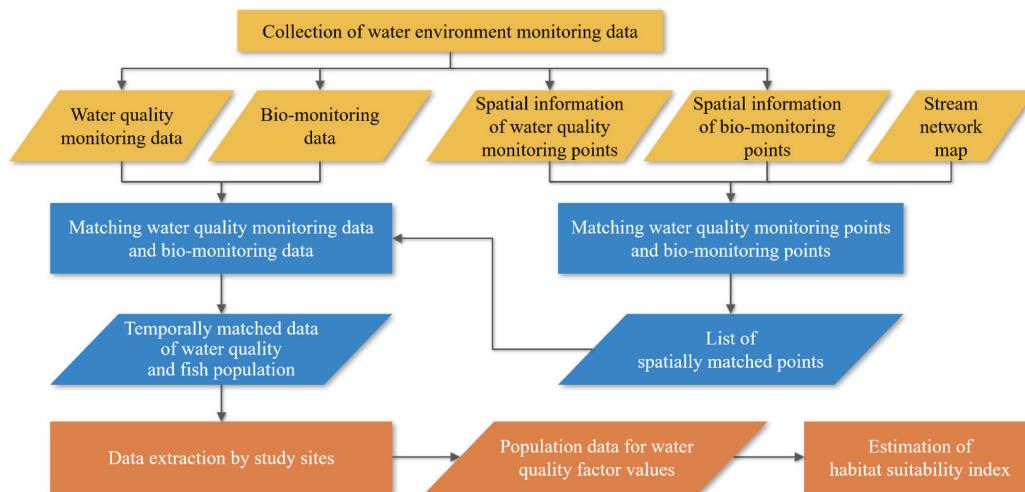


Fig. 1 Schematics of the study procedure

1. 자료 구축

가. 측정자료 수집

본 연구에서는 환경정책기본법과 물환경보전법을 토대로 환경부에서 운영하는 물환경측정망의 하천 측정자료로써 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>, 2021.01.17. access)의 자료를 활용하였다. 물환경측정망 설치·운영 계획 (ME, 2018)에 따른 운영 중인 하천 수질, 총량, 생물 측정지점 현황은 Table 1, Fig. 1과 같으며, 측정망 별 주요 측정항목과 측정주기는 Table 2와 같다.

본 연구에서는 생물측정망에서 관측된 어류 출현 개체수와 수질, 총량 측정망에서 관측된 수질 측정치를 바탕으로 어종별 HSI 산정을 위해, 하천 측정지점 전체의 2011~2020년 측정자료를 수집했다.

나. 생물 측정지점 - 수질 측정지점의 공간적 연계

수질 인자에 대한 어종별 서식처 적합도 지수 산정을 위해서는 어류 개체밀도를 측정할 지점의 수질 측정자료가 필요하다. 즉, 생물 관측지점과 수질 측정지점의 공간적 연계가 요구된다. 두 측정지점의 공간적 연결을 위해 측정지점의 GPS 좌표와 하천망도를 이용했다. 측정지점의 GPS 좌표는 ME (2018)의 물환경측정망 설치·운영 계획에 따른 것이며, 하천망도는 1/25,000 국가 기본도를 바탕으로 작성된 것으로 국가공간정보포털 오픈마켓 (<http://data.nsdi.go.kr/dataset/12608>, 2021.01.21. access)에서 제공된 것이다. 수질 측정치는 어류가 채집된

공간의 상태를 대표할 수 있어야 하므로 각각의 생물 관측지점에 대해 0.5 km 범위에서 동일 하천 흐름 내에 있는 최단 거리의 수질 또는 총량 측정지점을 연계했다. 연계된 생물 측정지점과 수질 측정지점 현황을 Table 3과 Fig. 2에 나타내었다.

다. 생물 측정자료 - 수질 측정자료의 시간적 연계

측정지점 간의 공간적 연계와 더불어 어류 관측자료에 대한 수질 측정자료는 시간적으로도 해당 어류가 관측된 시점의 환경을 대표해야 한다. 어류 관측자료 각각에 대해 해당 측정지점과 연결된 수질, 총량 지점의 측정자료 중 시간상으로 가장 가까운 자료를 연결했다. 한편, 두 측정자료는 시간상으로 동일 시점이 되도록 시간 차이를 최대 1일로 제한하였다.

2. 연구의 범위

가. 시간·공간적 범위

본 연구는 한강, 북한강, 남한강 중권역을 포함하는 한강 수계와, 금강, 낙동강, 영산강·섬진강 수계 각각을 대상으로 하였다 (Fig. 2). 수계 상으로 영산강과 섬진강은 분리되어있으나 하나의 대권역으로 통합되어 있으며, 다른 수계에 비해 측정지점 수가 적은 점을 고려해 본 연구에서는 두 수계를 하나로 통합하여 고려했다. 대상 어종 피라미에 대하여, 각 대상 수계 내에 속하는 지점에서 시간·공간적으로 연계된 생물·수질 측정자료의 수는 Table 4와 같고, 그 분포는 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Status of water environment monitoring points in river (ME, 2018)

Drainage system	Normal water quality monitoring network	TPLM (Total Pollution Load Management) water quality monitoring network	Bio-monitoring network
Total	683	337	3,039
Han river	261	126	907
Geum river	147	61	617
Nakdong river	190	93	898
Yeongsan / Seomjin river	85	57	617

Table 2 Major parameters and measurement frequency of water quality and bio-monitoring network (ME, 2018)

Monitoring network	Monitoring frequency	Major parameters
Normal water quality	12 times/year	Temperature, pH, DO, BOD, COD, TOC, SS, T-N, Dissolved total nitrogen (DTN), NH ₃ -N, NO ₃ -N, T-P, Dissolved total phosphorus (DTP), PO ₄ -P, Phenols, Fecal coliforms (FC), Total coliforms (TC), EC, Chl-a, etc.
TPLM water quality	more than 36 times/year	Temperature, pH, DO, BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P, EC
Bio (fishes)	2 times/year* (spring and fall)	Number of appearances and populations of domestic, benthic, sensitive, resistant, carnivorous, abnormal, and omnivorous species

* Representative and main points are inspected every year, and others are inspected every three years.

Table 3 Number of pairs of water quality- and bio-monitoring points

Drainage system	Total	Points connect with bio-monitoring network	
		Normal water quality monitoring network	TPLM water quality monitoring network
Total	483 (74)	379	178
Han river	186 (27)	159	54
Geum river	87 (12)	71	28
Nakdong river	136 (28)	103	61
Yeongsan / Seomjin river	74 (7)	46	35

* The values in () represent the number of monitoring points serving for both normal and TPLM water quality monitoring.

Table 4 Number of available data for HSI calculation

Drainage system	Total	Time difference between water quality- and bio-monitoring date (days)	
		0 day	1 day
Total	942	338	604
Han river	336	109	227
Geum river	213	80	133
Nakdong river	251	95	156
Yeongsan / Seomjin river	142	54	88

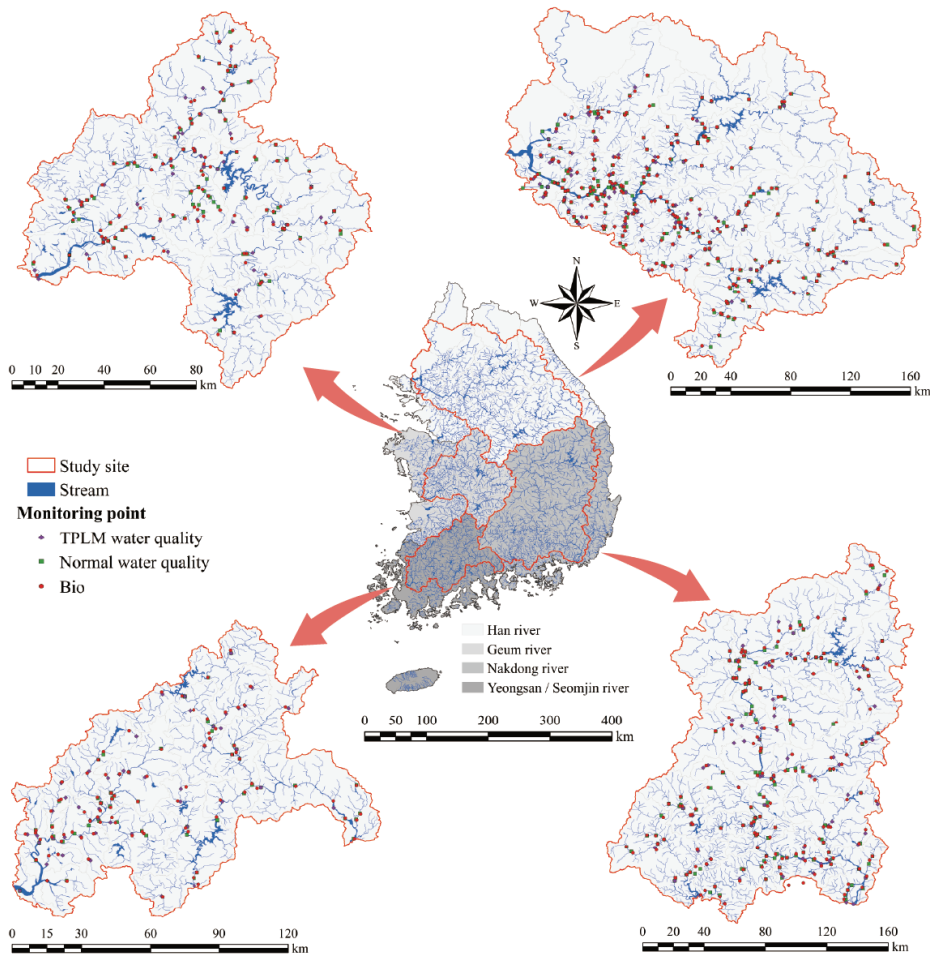


Fig. 2 Study sites and monitoring points

나. 대상 수질 인자

물환경 측정자료를 기반으로 HSI를 산정함에 있어 많은 데이터의 종합적 분석을 통한 합리적 결과 도출을 위해 수질(일반)측정망과 총량측정망에서 공통으로 측정하는 수질 인자인 수온, pH, DO, BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P, EC를 수질 인자로 적용할 수 있다. 본 연구에서는 각 수질 인자별로 대상 어종인 피라미의 개체밀도 분포를 작성하고, 단변량 곡선으로 뚜렷한 경향을 보인 수온, DO, BOD에 대한 HSI를 산정하였다. 이들 수질 인자들은 서로 상관성이 있는 것으로 알려져 있으나 (Part et al., 2008; Kim et al., 2013), 수생태 어류와 상관성이 본 연구의 주요 관심사항이므로 개별 수질인자에 대해 HSI를 산정하였다.

3. 서식처 적합도 지수 산정

국내에서 서식처 적합도 지수의 산정에 대한 명확한 기준은 존재하지 않으며, 수질 인자에 대한 서식처 적합도 지수 사례는 해외에서도 흔치 않다 (Kang, 2012). 이에 본 연구에서는 해외에서 하천 수심, 유속에 대한 서식처 적합도 지수의 산정을 위해 제시된 방법에 대해 검토했다. 미국에서 IFASG (1986)와 WDFW (1996)에 의해 제시된 방법이 널리 적용되고 있다.

WDFW 방법은 특정 수심 및 유속이 차지하는 면적 백분율에 따른 개체 수의 기댓값을 바탕으로 지수를 산정하여 개체 수만 적용하는 것보다 더 타당한 결과를 얻을 수 있지만, 이를 달성하기 위해서는 매우 정밀하고 많은 하천 측량, 수리량 측정 데이터가 필요하다 (Kang, 2012). 또한, 한 단면의 모든 생물을 채집하는 것이 전제되는데, 투망, 족대 등을 조사 도구로 사용하는 우리나라의 환경에서 적용상의 한계가 있다 (Kong et al., 2017). 이 방법은 세부 구간별 자세한 흐름 측정 데이터 획득이 가능할 때 사용할 수 있는 방법으로, 특정 하천이 아닌 유역의 복수의 하천에서 관측된 자료를 이용해 어류의 서식처 적합도 지수를 산정하기 위해 적용하기에 한계가 있다 (KEI, 2010). IFASG 방법은 WDFW 방법보다 비교적 간편한 방법으로, 대상 인자의 구간별 개체 수 분포를 작성하여 전체 개체 수에 대한 50%, 75%, 90%, 95% 범위에 있는 인자 값을 각각 적합도 지수 1.0, 0.5, 0.1, 0.05의 값으로 부여한다 (Fig. 3).

한편, IFASG 방법에 따른 HSI의 산정 방법은 환경요인의 특정 값에서 출현한 최대 개체 수로 다른 값에서 출현한 개체 수를 나누어 0~1의 값을 갖도록 한다 (Ahmadi-Nedushan et al., 2006). 각각의 환경요인 값에서 산출된 HSI를 이으면 직선의 조합으로 구성되는 그래프로 표현되어 모든 절점의 좌표를 저장해야 하는 기록관리 문제와 절점 사이 구간에서 HSI를 보간해야 하는 문제가 존재한다. 이를 보완하기 위해 Kong et al.

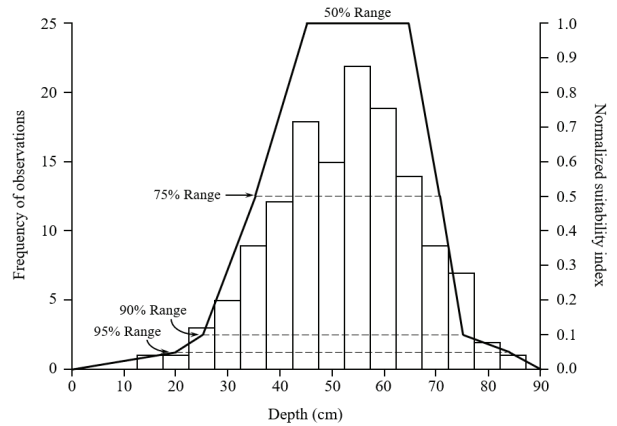


Fig. 3 Application of the IFASG method to a depth factor (IFASG, 1986)

(2017)은 Weibull 분포 모형을 적용하여 수심, 유속의 물리적으로 요인에 대한 HSI를 연속함수식으로 산정한 바 있으며, 이러한 연속함수로의 회귀는 환경요인 값에 대한 HSI를 직접 계산할 수 있고, 수식의 매개변수를 통해 기록관리가 쉬우며, 재현성을 지닌다는 장점이 있다.

Weibull 분포 모형은 금속, 복합재료의 강도나 전자 부품의 수명을 표현하기 위해 사용되어왔으나 환경 인자에 대한 생물 종 수, 개체 크기, 생존율 등의 관계를 규명하는데 적용되는 등 생태학에서도 활용되고 있다 (Pinder et al., 1978; Flather, 1996; Fleming, 2001; Ulrich et al., 2018). 특히 Weibull 분포의 밀도함수 형태는 형상 모수에 따라 변화하여 Pareto 분포, 지수 분포, 정규분포 등 다양한 확률분포 모형의 재현이 가능하여 범용성이 높다.

본 연구에서는 국내 존재하는 관측 데이터의 형태를 고려해 다량의 측정치를 종합하여 수계별 통합 지표를 마련할 수 있도록 IFASG 방법과 Weibull 확률분포형을 적용하여 수질 인자에 대한 HSI를 산정하고 그 적용성에 대해 고찰했다.

한편, 다량의 데이터에 기반하여 환경요인 구간별로 개체 수를 합산하는 경우 서식처 적합도 지수가 구간별 표본 크기에 따라 왜곡될 수 있다. 또한, 다량의 데이터 그 자체로써 HSI를 산정하는 경우 전체적인 경향성에서 벗어나는 자료의 영향으로 과적합의 문제가 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 2011~2020년 기간에 대상 지점에서 관측된 수질 인자의 최대, 최소값 사이 범위를 20개의 구간으로 나누고, 각 수질 인자의 구간 내에 관측된 개체밀도의 평균치를 해당 구간을 대표하는 개체밀도로 적용한다. HSI 산정의 상세과정은 다음과 같다.

가. IFASG 방법

수질 인자 (수온, DO, BOD) x 의 관측치 중 최댓값, 최솟값

사이 범위를 구간의 수 $n=20$ 으로 나누어 각 구간의 길이를 산정하고 (식 (1)), 20개 구간의 범위를 설정했다 (식 (2)).

$$CI = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n} \quad (1)$$

$$I_i = [x_{\min} + (i-1)CI, x_{\min} + iCI]; i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

여기서 x_{\max} , x_{\min} 은 각각 수질 인자 x 의 관측치 중 최댓값, 최솟값이고, CI 는 구간의 길이, I_i 는 i 번째 구간의 범위이다. 가용자료에서 수질 인자 구간별로 대응되는 어류 개체밀도를 합산하고, 이를 대응된 자료의 수로 나누어 해당 수질 인자 구간에서의 평균 개체밀도를 산정했다 (식 (3)).

$$\bar{p}_i = \frac{\sum_{x_k \in I_i} p_k}{c_i} \quad (3)$$

여기서 x_k , p_k 는 수질 측정치와 이에 대응되는 개체밀도, c_i 는 구간 I_i 에 속하는 자료의 수, \bar{p}_i 는 구간 I_i 에서의 평균 개체밀도다.

구간별 평균 개체밀도를 바탕으로 Fig. 3과 같이 전체 개체 수의 50, 75, 90, 95%가 속하는 인자 값에 각각 HSI 1.0, 0.5, 0.1, 0.05의 값을 부여하고, 이들을 선분 연결했다. HSI는 수계별로 피라미가 출현한 사례가 있는 수질 인자 구간 내에서 산정하였으며, IFASG (1986)에 제시된 Somerville (1958)의 non-parametric tolerance limit에 따라 HSI에 따른 수질 구간별 개체 수에 대해 90%의 confidence level을 갖도록 했다.

나. Weibull 분포형 회귀 방법

식 (3)으로부터 산정된 구간별 평균 개체밀도의 합이 1이 되도록 각 구간의 평균 개체밀도를 전체 구간의 개체밀도 합으로 나누었다 (식 (4)).

$$f(x_i^*) = \frac{\bar{p}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{p}_k} \quad (4)$$

여기서 $f(x_i^*)$ 는 어류에 대해 수질 인자 구간 I_i 가 적합한 서식지일 확률을 의미하며 x_i^* 는 구간 I_i 의 중심점으로 식 (5)와 같이 표현된다.

$$x_i^* = x_{\min} + \left(i - \frac{1}{2}\right)CI \quad (5)$$

이에 따라 $f(x_i^*)$ 는 수질 인자 값 x_i^* 에서의 서식 적합도를 표현하는 확률밀도함수가 된다. 이를 식 (6)의 Weibull 분포의 확률밀도함수로 회귀하며, 매개변수 c , λ , k 는 확률밀도함수에 의한 값과의 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)가 최소가 되는 값으로 시행 착오법에 의해 산정했다.

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

여기서 k , λ , c 는 각각 형상모수 (shape parameter), 척도모수 (scale parameter), 역치모수 (threshold parameter)이다.

HSI는 0과 1 사이의 값을 지니므로 $f(x)$ 를 함수의 최댓값으로 나눈 식 (7)과 같은 함수로 표현했다.

$$HSI = \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1-k}{k}} \left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x+c}{\lambda}\right)^k} + \frac{k-1}{k} \quad (7)$$

III. 결과 및 고찰

1. IFASG 방법과 Weibull 분포형에 의한 HSI

수온, DO, BOD에 대한 피라미의 수계별 개체밀도를 분석해 IFASG 방법과 Weibull 분포형에 의해 산정된 서식적합도 지수는 Fig. 4와 같으며, Weibull 분포형의 매개변수와 중심치, 표준편차는 Table 5와 같다.

집중경향치 간의 관계는 최빈치와 평균의 대소관계에 따라 분석할 수 있다. Fig. 4에서 수온에 대한 개체밀도는 금강수계에서 상대적으로 저온측으로, 다른 수계는 고온측으로 편향되는 경향이 있다. IFASG 방법에 따른 HSI는 이러한 경향성을 잘 나타내며, Weibull 분포에 의한 곡선은 전체 수계에서 고온으로 편향성을 나타낸다. DO에 대해서는 영산강·섬진강 수계의 개체밀도가 저농도로, 이 외 수계에서는 고농도측으로 편향되어있는데 IFASG 방법과 Weibull 분포에 의한 곡선 모두 이를 재현하고 있다. BOD에 대해서는 낙동강 수계의 개체밀도만 고농도 편향성을 나타내며 IFASG 방법에 따른 HSI는 이를 잘 재현한다. 하지만 Weibull 분포곡선은 전체 수계에서 저농도 편향성을 보인다.

이러한 측면에서 원자료인 수질 인자 구간별 개체밀도의 집중경향치 분포를 잘 재현하는 것은 IFASG 방법에 따른 HSI 곡선이라 판단할 수 있다. 이는 IFASG 방법과 Weibull 분포형의 적합 과정의 차이 때문이다. IFASG 방법은 전체 개체 분포에서 일정 비율이 속하는 수질 인자 값에 일정한 HSI 값을 부여하는 방식으로 전체 분포를 일정한 비율로 분할하는 과정에서

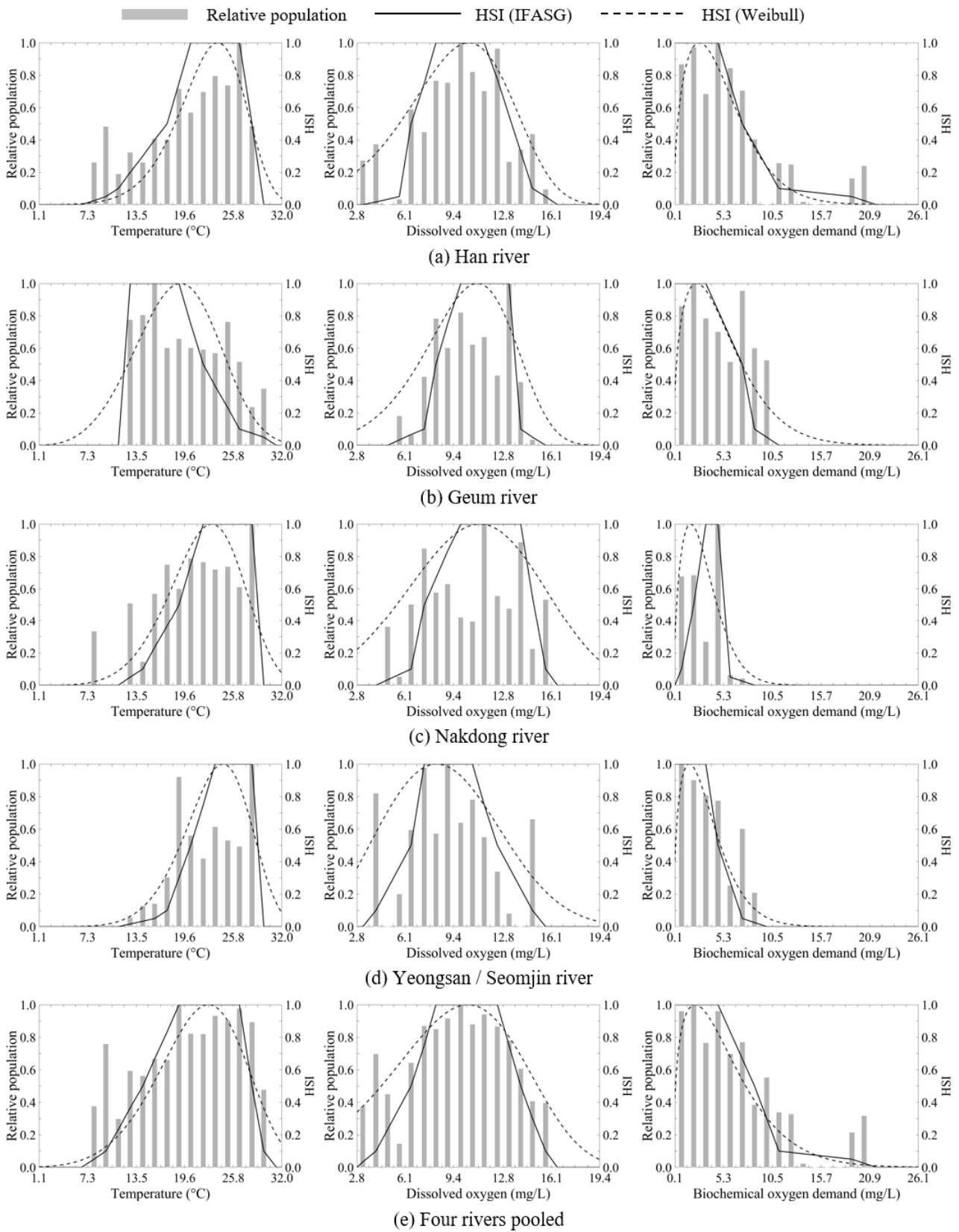


Fig. 4 Relative populations and HSI about temperature, DO, and BOD

Table 5 Statistical parameters of Weibull distribution for the different water quality parameters

Water quality factor	Drainage system	Weibull distribution parameters			Mean	Median	Mode	Standard deviation
		Shape (<i>k</i>)	Scale (λ)	Threshold (<i>c</i>)				
Temperature	Han river	7.76	29.99	5.61	22.59	23.00	23.85	4.30
	Geum river	4.04	20.51	0.00	18.60	18.73	19.12	5.17
	Nakdong river	5.45	23.94	0.00	22.09	22.38	23.07	4.68
	Yeongsan / Seomjin river	6.46	25.14	0.00	23.42	23.75	24.49	4.24
	Four rivers pooled	5.58	29.11	5.44	21.46	21.82	22.66	5.57
DO	Han river	7.91	26.53	15.64	9.33	9.69	10.44	3.74
	Geum river	7.66	22.01	10.58	10.10	10.40	11.03	3.20
	Nakdong river	3.93	17.03	4.60	10.82	10.91	11.20	4.40
	Yeongsan / Seomjin river	2.65	10.50	0.53	8.80	8.61	8.25	3.79
	Four rivers pooled	6.23	26.48	15.36	9.26	9.61	10.39	4.61
BOD	Han river	1.52	5.47	0.00	4.93	4.30	2.70	3.31
	Geum river	1.44	5.51	0.00	5.00	4.27	2.42	3.53
	Nakdong river	1.56	3.42	0.00	3.07	2.70	1.77	2.01
	Yeongsan / Seomjin river	1.43	3.79	0.00	3.44	2.93	1.64	2.44
	Four rivers pooled	1.36	5.98	0.00	5.48	4.57	2.25	4.07

* The units for threshold, mean, median, mode, and standard deviation are °C and mg/L for water temperature, and for DO and BOD, respectively.

집중경향치가 고려된다. 금강수계에서 수온에 대한 최빈값은 평균보다 저온에 치우쳐있으나, 수온 24.3~25.8°C 구간에서 비교적 큰 값을 갖는 개체밀도와의 적합을 위해 Weibull 분포 형이 집중경향치의 반대 방향으로 이동한 것으로 보인다. 이처럼 Weibull 분포형을 적합하는 과정은 각 수질 인자 값에 대한 개체밀도와의 차이를 최소화하는 방향으로 이루어지므로 집중경향보다는 전체 데이터의 분포 형상의 영향을 받는다.

한편, HSI 값 0에 해당하는 수질 인자의 한계 범위는 Weibull 분포곡선에서 더 넓다. IFASG 방법은 어떤 수질 값에서 충분히 큰 개체밀도를 갖더라도 집중경향치에서 벗어나게 되면 상대적으로 작은 HSI 값이 부여된다. 반면 Weibull 분포곡선은 이와 같이 집중경향치에서 멀리 떨어진 인자에 대한 개체밀도 값에 대한 적합이 이루어지기 때문에 IFASG 방법에 따른 것보다 상대적으로 큰 HSI 값이 부여된다. 이러한 이유로 Weibull 분포곡선이 상대적으로 넓은 한계 범위를 지니며, 수질 인자의 전 구간에 대한 개체밀도의 크기 특성을 잘 재현한다고 할 수 있다.

2. 수계별 서식처 적합도 지수 비교

Fig. 5는 Fig. 4의 HSI 산정 결과를 수질 인자와 산정 방식으로 구분해 도시한 것이다. 수온에 대한 HSI 곡선은 금강수계를

제외하고 고온측으로 편향된 분포다. 이는 근본적으로 수계마다 생물측정을 한 시기와 환경이 다른데, 금강수계의 경우 측정 기간의 수질 지표들의 변동 범위가 다른 수계와 다르게 고온 영역에 조사자료가 많이 포함되었기 때문으로 보인다. Choi and Choi (2018)에 따르면, 피라미는 2.5~32.5°C의 수온 범위에서 서식하며 최적 수온 범위로 17.5~22.5°C라 제시하였고, Shim et al. (2020)은 20°C 부근에서 피라미의 성장성이 가장 좋다고 제시한 바 있다. 한편, 금강수계에서 IFASG 방법에 따른 최적 수온 범위는 12.7~18.9°C로 다른 수계와 비교하여 낮게 산정되었다. 이는 생물측정망 조사 시기에 금강수계에서 수집된 수온 자료의 변화 폭이 다른 수계에 비해 상대적으로 좁아서 나타난 결과라 생각된다.

DO의 경우 7.4~14.0 mg/L, BOD는 0~4.7 mg/L 구간이 최적 구간으로 산정되었다. 생활환경 기준 수질 등급 (http://water.nier.go.kr/web/contents/contentView/?pMENU_NO=37, 2021.08.16. access)에 따르면 피라미는 수질 등급 III (IV)의 생물지표종이며, 해당 등급은 BOD 5 mg/L 이하 (8 mg/L 이하), DO 5 mg/L 이상 (2 mg/L 이상)에 해당한다. DO와 BOD에 대해 산정된 최적 수질 구간은 피라미가 서식하는 수질 기준에 부합한다.

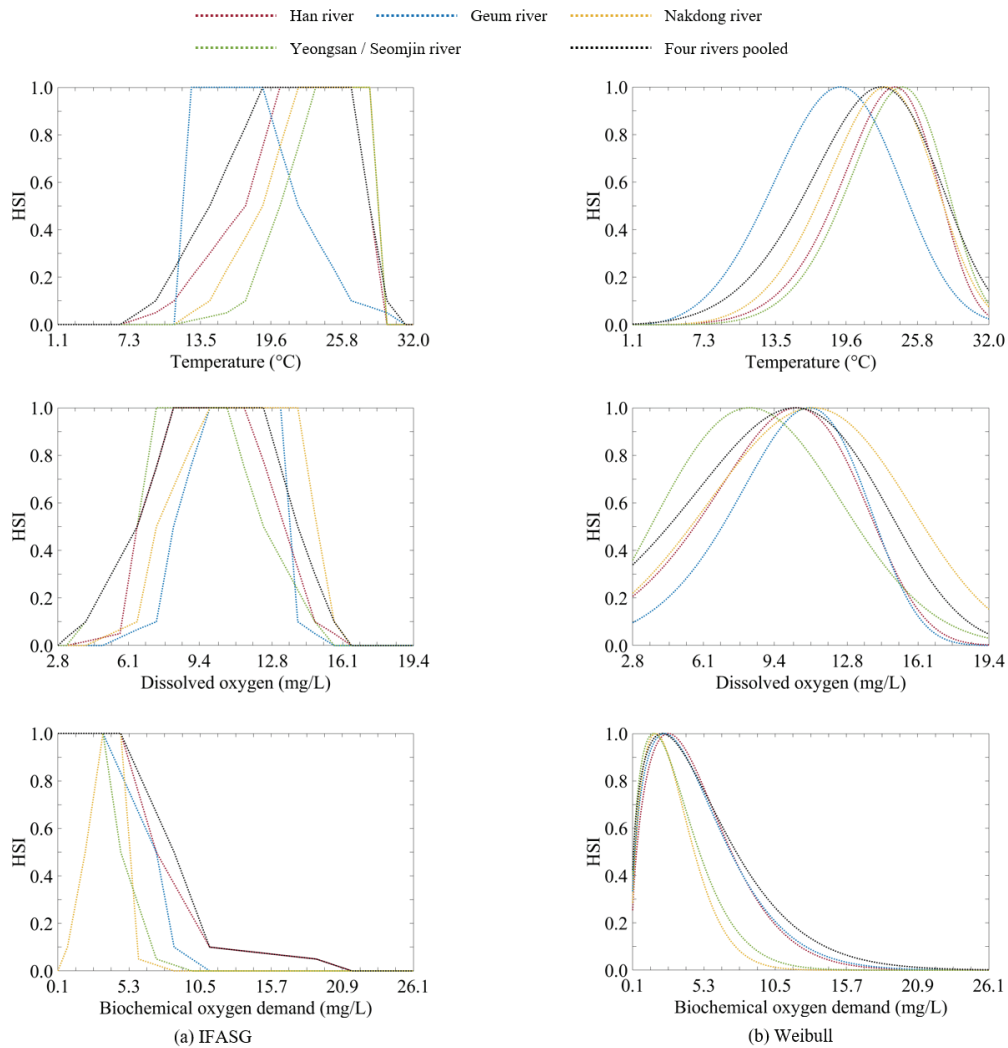


Fig. 5 HSI by the IFASG method and Weibull distribution

IV. 결론

본 연구는 물환경측정망의 수질·생태 모니터링 자료를 시공간적으로 연계하고, 데이터셋을 구축해 수질 인자에 대한 피라미의 HSI를 수계 단위로 산정하고 그 방법론을 제시하였다. IFASG 방법과 Weibull 분포형으로써 수온, DO, BOD에 대한 피라미의 출현 개체밀도를 HSI로 재현하였다.

환경요인별로 산정된 HSI는 기존에 발표된 연구와 수질 등급에서 제시된 범위와 큰 차이를 보이지 않았다. IFASG 방법과 Weibull 분포형에 의해 도출된 HSI 곡선을 중심치와 출현 개체밀도 재현성의 두 측면에서 비교 분석했다. IFASG 방법은 HSI 값을 부여하는 과정에서 집중경향치가 반영되어 이에 대한 재현성이 높았으며, Weibull 분포형은 전체 원자료를 대상으로 확률적 추정과 적합을 목적으로 두어 수질 인자의 전

구간에 대한 개체밀도 크기의 재현성이 높았다. 이러한 측면에서 Weibull 분포형이 어류 서식처의 한계 범위를 넓게 산정함을 고찰하였다.

본 연구에서는 수온, DO, BOD의 수질 인자에 대한 HSI를 4대강 수계와 전체 수계로 구분하여 산정했다. 이는 수계 단위로 산정된 HSI가 수계 내 하천 특성을 대표할 수 있고, 가능한 많은 자료를 바탕으로 HSI를 산정하기 위함이다. 본 연구에서는 개별 중·소하천 단위의 생물측정자료가 제한적인 상황을 고려하여 수계 단위로 범위를 확대하여 주요 수질 인자에 대한 HSI를 처음으로 제시했다는 데 의의가 있다. 본 연구에서 제시된 방법론은 수온, BOD, DO와 더불어 수질 측정망에서 측정되는 다양한 수질 인자에 대한 HSI를 산정하는 데 적용될 수 있다. 더 나아가 피라미뿐 아니라 다양한 어종에 대한 HSI 산정에도 활용될 수 있을 것이다. 또한, 본 연구의 결과를 바탕

으로 수질 인자를 고려한 환경생태유량의 산정에 관한 연구를 추진할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (2020003050001).

REFERENCES

- Ahmadi-Nedushan, B., A. St-Hilaire, M. Bérubé, E. 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. doi:10.1002/rra.918.
- Arthington, A. H., S. E. Bunn, N. L. Poff, and R. J. Naiman, 2006. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications* 16(4): 1311-1318. doi:10.1890/1051-0761(2006)016[1311:TCOPEF]2.0.CO;2.
- Choi, B., and S. U. Choi, 2018. Impacts of hydropeaking and thermopeaking on the downstream habitat in the Dal river, Korea. *Ecological Informatics* 43: 1-11. doi:10.1016/j.ecoinf.2017.10.016.
- Flather, C. H., 1996. Fitting species-accumulation functions and assessing regional land use impacts on avian diversity. *Journal of Biogeography* 23(2): 155-168. doi:10.1046/j.1365-2699.1996.00980.x.
- Fleming, R. A., 2001. The Weibull model and an ecological application: describing the dynamics of foliage biomass on Scots pine. *Ecological Modelling* 138(1): 309-319. doi:10.1016/S0304-3800(00)00410-5.
- Hur, J. W., D. H. Kim, and H. Kang, 2014. Estimation of optimal ecological flowrate of fish in Chogang stream. *Ecology and Resilient Infrastructure* 1(1): 39-48 (in Korean). doi:10.17820/eri.2014.1.1.039.
- Ibarra, A. A., M. Gevrey, Y. S. Park, P. Lim, and S. Lek, 2003. Modelling the factors that influence fish guilds composition using a back-propagation network: Assessment of metrics for indices of biotic integrity. *Ecological Modelling* 160(3): 281-290. doi:10.1016/S0304-3800(02)00259-4.
- IFASG (Instream Flow and Aquatic Systems Group), 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. Instream flow information paper No. 21. Washington D. C.: National Ecology Center.
- Inglis, G. J., H. Hurren, J. Oldman, and R. Haskew, 2006. Using habitat suitability index and particle dispersion models for early detection of marine invaders. *Ecological Applications* 16(4): 1377-1390. doi:10.1890/1051-0761(2006)016[1377:UHSIAP]2.0.CO;2.
- Jorde, K., M. Schneider, A. Peter, and F. Zoellner, 2001. Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. In *Proc. 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics*, Tempe, Ariz.St.: ISEH.
- Jung, S. H., J. Y. Jang, and S. U. Choi, 2012. Physical habitat modeling in Dalcheon stream using fuzzy logic. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(2): 229-242 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2012.45.2.229.
- Kang, H., 2012. Comparison of physical habitat suitability index for fishes in the rivers of Han and Geum river watersheds. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 32(1B): 71-78 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2012.32.1B.071.
- Kang, H., D. Im, J. W. Hur, and K. H. Kim, 2011. Estimation of habitat suitability index of fish species in the Geum river watershed. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 31(2B): 193-203 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2011.31.2B.193.
- Kang, J. H., E. T. Lee, J. H. Lee, and D. H. Lee, 2004. Estimation of river instream flow considering fish habitat conditions. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(11): 915-927 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2004.37.11.915.
- Kim, B. H., J. H. Byun, S. O. Hwang, S. K. Mun, and S. J. Hwang, 2013. Effect of temperature on water quality improvement of natural plant-mineral composites (PMC) in a eutrophic lake, Lake Shingal, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* 46(2): 225-233 (in Korean). doi:10.11614/KSL.2013.46.2.225.
- Kim, K. H., 1999. Evaluation of habitat conditions and estimation of optimum flow for the freshwater fish. Ph.D. diss., Seoul: Yonsei University (in Korean).
- Kim, K. O., Y. K. Park, J. I. Kang, and B. S. Lee, 2016. Estimation of ecological flow and habitat suitability index at Jeonju-cheon upstream. *Journal of Korean Society of*

- Environmental Engineers* 38(2): 47-55 (in Korean). doi:10.4491/KSEE.2016.38.2.47.
18. Kong, D., S. H. Son, J. Y. Kim, P. Kim, Y. Kwon, J. 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 (in Korean). doi:10.15681/KSWE.2017.33.6.626.
 19. Korea Environment Institute, 2010. Development of physical fish habitat suitability index. Working Paper 2010-05. Seoul: Korea Environment Institute (in Korean).
 20. Lee, J. H., S. M. Jeong, M. H. Lee, and Y. S. Lee, 2006. Estimation of instream flow for fish habitat using instream flow incremental methodology (IFIM) for major tributaries in Han river basin. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 26(2B): 153-160 (in Korean).
 21. Luz, L. D., and D. P. Loucks, 2003. Developing habitat suitability criteria for water management: A case study. *International Journal of River Basin Management* 1(4): 283-295. doi:10.1080/15715124.2003.9635213.
 22. Ministry of Environment, Water quality and aquatic ecosystem environmental standards: living environment standards. http://water.nier.go.kr/web/contents/contentView?pMENU_NO=37. Accessed 16. Aug. 2021.
 23. Ministry of Environment, 2018. Water quality monitoring program, 11-1480000-001481-14 (in Korean).
 24. National Spatial Data Infrastructure Portal. Stream network map. <http://data.nsd.go.kr/dataset/12608>. Accessed 21. Jan. 2021.
 25. Olden, J. D. and D. A. Jackson, 2002. Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. *Ecological Modelling* 154(1-2): 135-150. doi:10.1016/S0304-3800(02)00064-9.
 26. Park, Y., K. Cho, and C. Cho, 2008. Seasonal variation of water temperature and dissolved oxygen in the Youngsan reservoir. *Journal of Korean Society on Water Environment* 24(1): 44-53 (in Korean).
 27. Pinder, J., J. Wiener, and M. H. Smith, 1978. The Weibull distribution: A new method of summarizing survivorship data. *Ecology* 59(1): 175-179. doi:10.2307/1936645.
 28. Santos, K., C. Tague, A. C. Alberts, and J. Franklin, 2006. Sea turtle nesting habitat on the US Naval Station, Guantanamo Bay, Cuba: A comparison of habitat suitability index models. *Chelonian Conservation and Biology* 5(2): 175-187. doi:10.2744/1071-8443(2006)5[175:STNHOT]2.0.CO;2.
 29. Shim, T., Z. Kim, D. Seo, Y. O. Kim, S. J. Hwang, and J. Jung, 2020. Integrating hydraulic and physiologic factors to develop an ecological habitat suitability model. *Environmental Modelling & Software* 131: 104760. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104760.
 30. Somerville, P. N., 1958. Tables for obtaining non-parametric tolerance limits. *The Annals of Mathematical Statistics* 29(2): 599-601. doi:10.1214/aoms/1177706640.
 31. Stalnaker, C. B., B. L. Lamb, J. Henriksen, K. Bovee, and J. Bartholow, 1995. The instream flow incremental methodology: A primer for IFIM, 16-21. Biological report 29. Washington D. C.: United States Geologi Survey Press.
 32. Sung, Y. D., B. J. Park, G. J. Joo, and K. S. Jung, 2005. The estimation of ecological flow recommendations for fish habitat. *Journal of Korea Water Resources Association* 38(7): 545-554 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2005.38.7.545.
 33. Tharme, R. E., 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. doi:10.1002/rra.736.
 34. Ulrich, W., R. Nakadai, T. J. Matthews, and Y. Kubota, 2018. The two-parameter Weibull distribution as a universal tool to model the variation in species relative abundances. *Ecological Complexity* 36: 110-116. doi:10.1016/j.ecocom.2018.07.002.
 35. 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. doi:10.1577/1548-8659(2001)130<0217:FOHSMF>2.0.CO;2.
 36. Vinagre, C., S. Franca, and H. Cabral, 2006. Diel and semi-lunar patterns in the use of an intertidal mudflat by juveniles of Senegal sole, *Solea senegalensis*. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 69(1): 246-254. doi:10.1016/j.ecss.2006.04.017.
 37. Vincenzi, S., G. Caramori, R. Rossi, and G. A. De Leo, 2007. A comparative analysis of three habitat suitability models for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a North Adriatic coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy). *Marine Pollution Bulletin* 55(10-12): 579-590. doi:10.1016/j.marpolbul.2007.09.016.
 38. Vismara, R., A. Azzellino, R. Bosi, G. Crosa, and G.

- Centili, 2001. Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the River Adda, Northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches. *Regulated Rivers: Research & Management* 17(1): 37-50. doi:10.1002/1099-1646(200101/02)17:1<37::AID-RRR606>3.0.CO;2-Q.
39. Washington Department of Fish and Wildlife, 1996. Instream flow study guidelines.
40. Water Environment Information System. <http://water.nier.go.kr>. Accessed 17. Jan. 2021.