J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 52, No. S-2 (2019), pp. 811-822
doi: 10.3741/JKWRA.2019.52.S-2.811
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Analysis of weighted usable area and estimation of optimum environmental flow based on growth stages of target species for improving fish habitat in regulated and non-regulated rivers

Jung, Sanghwa[a] · Ji, Un[b] · Kim, Kyu-ho[c] · Jang, Eun-kyung[d]*

[a]Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Resesrach, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea
[b]Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Resesrach, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea
[c]Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Resesrach, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea
[d]Research Specialist, Department of Land, Water and Environment Resesrach, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 19-043
Received: 16 July 2019; Revised: 20 September 2019 / 8 October 2019; Accepted: 8 October 2019

Abstract

Environmental flows in the downstream sections of Yongdam Dam, Wonju Stream Dam, and Hongcheon River were estimated with selected target fish species such as Nigra for the site of Yongdam Dam, Splendidus for the site of Wonju Stream Dam, and Signifer for the site of Hongcheon River by considering endangered and domestic species. Physical habitat analysis was performed to estimate environmental flows for the study sites by applying the Physical Habitat Simulation (PHABSIM) and RIVER2D which combined hydraulic and habitat models. Based on the monitored data for ecological environment, the Habitat Suitability Index (HSI) for the target species was estimated by applying the Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG). In particular, based on the result of fish monitoring, the HSI for each stage of the growth for target species was analyzed. As a result, the Weighted Usable Area (WUA) was maximized at 4.9 m^3/s of flow discharge during spawning, 5.8 m^3/s during the period of juvenile, and 8.9 m^3/s during the adult fish season at the downstream section of Yongdam Dam. The result of the Wonju Stream Dam showed an optimal environmental flow of 0.4 m^3/s, 1.0 m^3/s, and 1.5 m^3/s during the period of spawning, juvenile, and adult. The habitat analysis for the site of Hongcheon River, which is a non-regulated stream, produced an optimum environmental flow of 5 m^3/s in the spawning period, 4 m^3/s in the juvenile stage and 6 m^3/s in the adult stage.

Keywords: Ecological environment, Environmental flow, Fish habitat, PHABSIM, Weighted usable area

조절 및 비조절 하천의 어류 서식처 개선을 위한 성장 단계별 가중가용면적 분석 및 최적 환경생태유량 산정

정상화[a] · 지 운[b] · 김규호[c] · 장은경[d]*

[a]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원, [b]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원
[c]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원, [d]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원

요 지

본 연구에서는 용담댐 하류, 원주천댐, 홍천강을 대상으로 환경생태유량을 산정하였으며, 멸종위기종 및 국내고유종을 고려한 대상어종으로 용담댐 하류는 감돌고기, 원주천댐은 쉬리, 홍천강은 묵납자루를 선정하여 각 하천에서 환경생태유량을 산정하였다. 환경생태유량을 산정을 위한 물리서식처 분석은 수리모형과 서식처 모형이 결합된 Physical Habitat Simulation (PHABSIM)과 RIVER2D를 적용하여 수행하였다. 생태 환경 모니터링을 통해 연구 대상지별 대상종의 서식처 적합도 지수를 Instream Flow and Aquatic Systems Group (IFASG) 방법을 적용하여 성장단계별 서식처 적합도 지수를 산정하였다. 특히 어류 모니터링 성과를 바탕으로 대상종의 성장단계별 서식처 적합도 지수를 산정하였다. PHABSIM을 활용한 분석 결과, 조절 하천인 용담댐 하류에서 산란기에는 4.9 m^3/s, 치어기 5.8 m^3/s, 성어기에는 8.9 m^3/s에서 가중가용면적이 최대인 최적 환경생태유량이었다. 원주천댐에서는 쉬리의 산란기에는 0.4 m^3/s, 치어기에는 1.0 m^3/s, 그리고 성어기에는 1.5 m^3/s의 최적 환경생태유량을 나타내었다. 또한 비조절하천인 홍천강에서는 묵납자루의 산란기 5 m^3/s, 치어기 4 m^3/s, 그리고 성어기에는 6 m^3/s의 최적 환경생태유량이 산정되었다.

핵심용어: 생태 환경, 어류 서식처, PHABSIM

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-910-0044
E-mail: jang@kict.re.kr (E.-K. Jang)

© 2019 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

지금까지의 많은 연구에서 인간과 자연이 더불어 살 수 있는 친환경적인 하천을 조성하기 위하여 기존의 훼손된 또는 변화된 하천을 복원하는 노력을 경주하여 왔다(K-water, 2018). 이러한 기술들은 하천의 이수 및 치수 기능을 보장하면서 환경 기능을 향상시키는 기술들로 이루어졌다(K-water, 2018). 하천의 생태적 기능 향상 즉, 최적의 서식환경을 조성하기 위해서는 흐름영역을 통한 하천생태계 서식처 공간 조성이 필요하다. 또한 이러한 흐름영역에 대한 생태 수리해석 및 생태 서식환경 조성을 위해서는 무엇보다도 최적 환경생태유량 산정 및 확보 기술에 대해 연구 할 필요가 있다. 이러한 연구 성과와 개발 기술들은 향후 하천의 물리적 구조 변화를 고려한 적정 유량 확보 및 서식 공간 조성을 위한 기술로 활용될 수 있다(K-water, 2018).

현재까지 하천의 서식처 기능을 유지하기 위한 환경생태유량 산정은 하천유지유량 산정을 위한 절차 중 어류의 서식처 기능을 확보하기 위한 환경생태유량 산정 방식으로 이루어져 왔다. 우리나라는 1990년대 PHABSIM (Bovee, 1982)을 활용하여 환경생태유량을 산정하기 시작하여 2000년대 중후반 RIVER2D를 이용한 생태수리모델링을 적용하였다. 국내의 생태 환경을 고려한 유지유량에 대한 연구는 금강에 어류서식처를 고려한 유량 연구(Woo *et al*., 1998), 괴산 달천에 유량 및 수질을 고려한 유량 연구(Kim *et al*., 2000), 낙동강 유역 어류 서식환경을 고려한 유량 연구(Sung *et al*., 2005) 및 한강 지류에 어류서식 조건을 고려한 유량 연구(Oh *et al*., 2008), 수문학적인 조건과 생물생태학적 조건을 복합적으로 고려한 하천유지유량에 관한 연구(Hur and Kim, 2009) 등이 있다. 이후 Jung and Choi (2015)가 RIVER2D와 함께 데이터마이닝 기법 중 Adaptive Neurofuzzy Inference System (ANFIS)을 활용하여 대상 어종의 물리 서식처 평가를 수행한바 있다.

이에 반해 해외에서는 여러 수치기법을 활용한 수치모형과 서식처 모형 연계를 통한 물리서식처 평가를 활발하게 수행하고 있으며, 현장 모니터링 데이터를 활용한 수치모의 수행을 통해 다양한 서식처 변화의 정보를 예측하고 있다. Bowen *et al*. (1988)은 PHABSIM을 이용하여 상류댐에서의 발전방류가 어류 서식처 적합도에 유리한 기간을 심하게 단축시킨다는 것을 확인하였다. Valentine *et al*. (1996)은 PHABSIM을 사용하여 발전방류 조건에서의 송어에 대한 서식처의 변화에 대해 연구하였으며, 발전방류로 인한 유량의 변동이 어류의 물리 서식처에 안 좋은 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. Yi *et al*. (2010)은 1D 부정류 모형과 HSI를 이용하여 양쯔강을 대상으로 잉어(*Cyprinus carpio*)에 대한 어류 물리서식처 분석을 수행하고, 어류의 서식처 영향을 최소화하는 최소 하천유지유량을 제시하였다(Kim and Choi, 2014).

현재 국내 환경생태유량 산정은 고시지점에 대한 물리서식처 모의 결과를 활용하여 최적 환경생태유량을 산정하고 이를 환경생태유량으로 적용하고 있으나 보다 하천 수생태계에 적합한 환경생태유량을 산정하기 위해서는 성장단계에 따라 요구되는 환경생태유량을 산정하고 이를 확보할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 하천유지유량 산정 과정 중 대상 구간하천 별 대상 어종을 선정하여 대상종의 성장단계에 따른 최적 환경생태유량을 산정하고 이러한 연구 성과를 바탕으로 조절하천과 비조절하천을 대상으로 각각 환경생태유량을 산정하는 것이 본 연구의 주된 목적이다. 본 연구의 성과는 향후 최적 환경생태유량을 확보하는 방안을 도출하고 어류 서식처 개선효과를 분석한 후 국내 하천 실정에 맞는 환경생태유량 확보 방안을 제시하는데 적극 활용될 수 있을 것이다.

2. 대상하천 선정 및 대상어종 선정

2.1 대상하천 선정 및 개요

생태수리모델링을 위해서는 모니터링이 가능한 서식처의 분류, 현장의 접근성 및 가용한 수문자료 현황 등이 종합적으로 고려하여 대상 하천 구간을 선정할 필요가 있다. 특히 PHABSIM을 적용하여 물리서식처 평가를 수행하기 전 물리서식처가 목표종 개체수를 제한하는 다양한 요소 중 하나인 경우 적용성이 현저하게 저하되는 문제가 나타날 수 있어 유의해야 한다. 이에 따라 물리서식처 모의 프로그램을 적용할 경우 서식처 변화에 따른 목표종의 개체수 변화를 정확하게 예측하기 위해 수질, 수온 등과 같은 거시적 관점의 서식처 특성, 영양물질, 하천 역동성, 하상변동 등과 같은 다양한 인자들을 함께 고려해야 한다. 특히 모니터링 DB의 수집시기를 검토하여 목표종의 생애주기 특성을 반드시 반영해야 하며, 신뢰성 있는 수문학적 시계열 자료의 가용범위를 검토하여 분석에 활용하여야 한다.

본 연구에서는 대상구간 선정을 위해 댐 건설 전·후의 하천 지형자료 및 어류 모니터링 자료 여부 등의 확보가 가능한 지점에 중점을 두었다. 우리나라 댐에 대해 준공된 연도별로 정리하였을 때, 최근 지형자료 및 어류 모니터링 자료를 확보할 가능성이 높은 2000년대 이후에 준공된 댐을 대상으로 설정하였다. 본 연구에서는 한국수자원공사와 한국환경정책·평

Table 1. Summary of study reach sections

	Yongdam Dam	Wonju Stream Dam	Hongcheon River
Analyzed section	8 km downstream from the dam	4 km downstream from the planned Wonju Stream Dam	5 km upstream of Gulungyo Bridge
Reasons for study selection	- Can be linked to flow dynamics research - Can be used with monitoring materials and existing research results - Gain a large number of analysis data	- Locally promoted dam construction - Can compare the conditions before and after dam construction	- Endangered species habitat - Possibility of comparisons of stream ecosystem health due to the presence of urban/non- urban sections - Possibility of application of various methods to secure environmental flow

Table 2. Summary of target fish species

	Yongdam Dam	Wonju Stream Dam	Hongcheon River
Representative species	*Coreoleuciscus splendidus*, *Zacco platypus*, *Acheilognathus yamatsutae*, *Zacco koreanus*, *S. variegatus wakiyae*, *Odontobutis platycephala*	*Zacco platypus*, *Rhynchocypris oxycephalus*, *Carassius auratus*, *Iksookimia koreensis*, *Pungtungia herzi*, *Coreoleuciscus splendidus*	*Zacco koreanus*, *Zacco platypus*, *Microphysogobio longidorsalis*, *Coreoleuciscus splendidus*, *Pungtungia herzi*, *Iksookimia koreensis*
Endangered species	*Pseudopungtungia nigra*, *Gobiobotia macrocephala*	*Cottus koreanus*	*Pseudopungtungia tenuicorpa*, *Acheilognathus signifer*
Rare species	-	-	*Hemibarbus mylodon*
Target species	*Pseudopungtungia nigra*	*Coreoleuciscus splendidus*	*Acheilognathus signifer*
Reason	Endangered species	Korean endemic species	Endangered species

가연구원의 연구 내용을 고려하여 Table 1과 같이 대상하천을 선정하였으며, 주요 선정 사유 및 특징에 대하여 요약하였다. 용담댐은 현재 운영 중인 댐으로 한국환경정책·평가연구원의 발전방류를 고려한 환경생태유량 산정 연구와 연계를 위한 중복 대상하천으로 선정되었다. 원주천댐은 지역 건의 댐 중 하나로 향후 댐이 건설될 계획이 있는 신촌천을 연구 대상지로 선정하였다. 마지막으로 홍천강의 경우 비조절하천으로 유량조절 구조물이 하천에 존재하지 않는다. 따라서 조절하천과 달리 경우에 따라 환경생태유량 확보를 위한 다양한 방안을 강구할 필요가 있는 하천이다. 그러나 현재 제시되어 있는 다양한 유량확보 방안은 실무에 적용하기 어려운 사항들이 많이 있어 제한이 있다. 본 연구에서는 기존의 하천특성이 유사한 지역에 대해 우점종을 대상으로 일반적인 환경생태유량의 특성을 도출하는 연구의 한계를 보완하고자 조절 및 비조절 하천을 대상으로 환경생태유량을 산정할 수 있는 여러 가지 방안들을 제시하고자 하였으며, 이를 고려하여 다음의 세 구간을 대상하천으로 선정하였다. 또한 조절하천의 댐 방류량 조건을 고려하기 위해 대상구간의 시간별, 구간별, 시나리오별로 발전방류를 고려하여 제시한 한국환경정책·평가연구원 (KEI, 2017)의 연구 내용을 참고하였다.

2.2 대상어종 선정

물리서식처 모의를 위해 중요한 사항은 대상 하천 수리 특성을 잘 반영할 수 있는 수리모델링과 어류 모니터링을 통해 수립되는 서식처 적합도 기준으로 집약할 수 있다. 특히 대상하천에 맞는 서식처 적합도 기준을 설정하기 위해서는 목표종의 선정이 중요한 연구 과정 중 하나이다. 이러한 목표종은 특정 환경조건이나 서식처 변화에 민감한 생물이나 관리 필요성이 있는 생물 등을 선정하며 하천에서는 일반적으로 어류를 대상으로 적용한다. 또한 수생태계 및 생물 전문가를 통해 대상 하천에 대한 서식처 변화를 검토하기 위해 다양한 생물을 선정하여 분석하거나 소수 또는 특정종이나 생애단계에 초점을 맞춰 검토한 후 연구를 수행하여야 한다. PHABSIM과 같은 물리서식처 모의 프로그램에서 반영하고 있는 서식처 적합도 지수는 유속, 수심, 하도지수(Channel Index)이다.

하천생태계에서 유량의 변화는 어류뿐만 아니라 하천의 모든 생물에 큰 영향을 미치며, 특히 어류의 서식지, 산란장소, 산란한 알 등에는 유량의 변화가 많은 영향을 미치기 때문에 하천유지유량의 산정 대상은 어류 생태계를 고려하는 것이 일반적이다(Choi, 1995). 기존의 방법에서는 대상어종의 선정에 있어 대부분 해당지점 또는 구간에서 우점종인 어종을 대표

어종 또는 대리어종으로 선정하여 해당 하천의 사회, 경제 및 문화 등 하천특성을 반영하지 못하였다. 과거의 하천유지유량 산정시 대표어종으로 활용된 피라미의 경우, 유량이 적은 소하천에서부터 규모가 큰 강이나 호소까지 우리나라 전역에 널리 분포하는 우점종이므로 유량산정에 적용하는 것이 비효율적이었다(MCT, 2007). 따라서 사회적 관심이 높고 상징성이 높은 종, 특정한 환경조건을 요구하여 환경의 지표성이 높은 종, 어류 군집의 중요성을 고려한 지표종, 멸종의 위험성이 높아 사회적 관심을 유지하기 위한 희귀종, 먹이 연쇄에서 중요한 위상을 갖고 있어 넓은 서식공간이 필요한 종 등을 기준으로 선정할 필요가 있다(Hur and Kim, 2011). 우리나라의 하천에 서식하는 담수어류는 61종의 고유종을 포함하여 215종이며, 외국에서 도입되어 정착한 어류는 12종으로 알려져 있다(Son and Song, 2006). 본 연구에서는 기존 우점종으로 목표종을 선정하지 않고 기존 목표종 선정 기준에 따라 멸종 위기종, 한국 고유종, 경제성 어종 등을 고려하여 각 대상하천별로 Table 2와 같이 목표종을 선정하였다.

3. 수리-서식처 모형 구성

3.1 서식처 적합도 지수 산정 및 물리서식처 모형

본 연구의 서식처 적합도 곡선은 단일변량곡선으로 나타내었고, IFASG 방법을 적용하여 서식처 적합도 곡선을 산정하였다. 다변량 곡선은 하나의 독립변수에 대한 지수 곡선을 나타낸 것으로서, 일반적인 물리 서식처 모델링에 가장 많이 이용되는 적합도지수이다. 특히 가장 대표적인 물리 서식처 모델인 PHABSIM 모형에서 사용되는 적합도 지수이며, 이러한 단변량 지수를 얻기 위해서는 기존 문헌검토 및 전문가의 경험에 의하거나 서식처의 물리적 인자에 대한 측정 데이터를 이용하여 서식처 곡선을 이용하는 방법이 있다. IFASG 방법은 1986년 미국에서 제시된 서식처 적합도 지수 산정 방식으로 수심 및 유속별 목표종 개체수 분포를 작성하여 전체 개체수에 대한 50%, 75%, 90%, 95% 범위에 있는 수리값을 각각 적합도 지수를 1.0, 0.5, 0.1, 0.05의 값으로 부여한다(KEI, 2010)(Fig. 1). 아직 국내에서는 서식처 적합도 곡선을 구축하는 기준이 개발된 사례가 없으므로 본 방법을 적용하여 분석하였으며, 목표종의 생애단계별로 곡선을 산정하기 위한 어류 모니터링을 실시하였다.

가장 대표적인 물리서식처 모형인 PHABSIM과 RIVER2D는 차원에 따른 차이가 있으나 기본적인 서식처 모의 절차 및 기법은 동일하다. 본 연구에서는 PHABSIM과 RIVER2D 두 모형을 모두 활용하여 물리서식처 모형을 구축하였다. 먼저

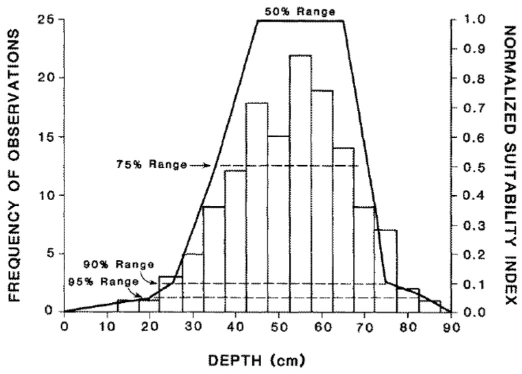


Fig. 1. Application of IFASG to depth factor (IFASG, 1986)

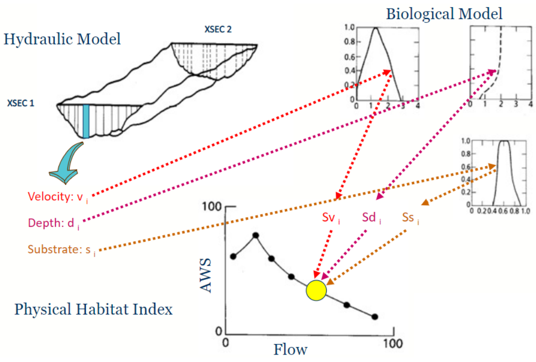


Fig. 2. Simulation concept of hydraulics-habitat model (K-water, 2018)

설정된 목표종에 대한 각 생장단계(Life Stage)에 따른 서식처 적합도 기준(Habitat Suitability Criteria, HSC)을 이용하여 서식처 모의를 수행한다. 서식처 모의는 하천구간에서 대상 생물의 성장단계별 생존 가능한 물리 서식처의 공간 면적을 양적으로 계산하는 것이다. 물리 서식처 모의에는 수심($f(d)$), 유속($f(v)$) 및 하도 지수($f(s)$)에 대한 서식처 적합도 지수를 활용한다. 각 서식처 적합도 지수는 사용자에 의해 가중치를 부여할 수 있으며, 하천의 상황에 따라 적절하게 설정하는 작업이 필요하다. 일반적으로는 각 서식처 적합도 지수를 대등하게 적용하는 곱셈법이 사용된다.

서식처 해석은 서식처 적합도 지수를 변환 함수로 이용하여, 하천의 구조와 수리 해석 결과(수심, 유속) 등에 관한 정보를 조합하는 것이다. 이러한 서식처 해석은 목표종이 활용할 수 있는 서식처의 질과 크기를 나타낼 수 있는 지수로 변환하는 것이다. PHABSIM에서 서식처의 질과 크기를 나타낼 수 있는 지수를 가중가용면적(Weighted Usable Area, WUA)라 하며, 모의되는 각각의 유량에 따라 가중가용면적을 계산한다(Fig. 2). 해석된 결과를 바탕으로 전체 연구 대상지의 유량 범위에 따른 서식처의 활용 가능성 관계를 설정할 수 있다.

3.2 모형의 검증

물리서식처 모의를 수행하기 이전에 수리조건에 대한 적절성을 검증하기 위한 과정을 수행하였다. 이를 위해 Table 3과 같은 어종별 서식처 적합성 구간을 기준으로 수리모의 결과를 비교한 후 적정성을 검증하였다. 용담댐 구간의 경우 대티교 지점, 원주천댐은 신촌천 구간에서 측정망이 없기 때문에 원주천댐 타당성보고서에 제시되어 있는 자료를 활용하였으며, 홍천강의 경우 굴운교 지점에 존재하는 수위관측소 자료를 활용하여 모의 결과를 검토하였다.

PHABSIM에서 각 단면에서 유량에 대한 수위는 수위-유량관계 곡선을 이용한 STGQ (Stage-discharge Relationship)와 표준축차계산법을 이용한 WSP (Water Surface Profile)를 연계하여 모의를 수행하였다. 본 연구에서 적용한 WSP 수위계산 모형은 물리현상을 가장 적절히 반영한다는 연구결과가 제시된 바 있다(Bovee, 1982). PHABSIM에서 각 단면의 횡방향 격자에 따라 조도계수를 설정할 수 있으며, 본 연구에서 적용한 조도계수 범위는 하천정비기본계획과 타당성보고서에 제시된 값으로 설정하였다. 유속 모의는 각 단면에서의 지형, 유량, 그리고 수위 자료를 구축하고 PHABSIM에서 제시하는 해석방법을 적용하여 산정하였다. 본 연구에서 적용하는 PHABSIM을 이용하여 산정된 수리인자에 대상하천 별 모의 결과는 다음과 같다.

3.2.1 용담댐

용담댐 하류하천 구간에 대한 물리서식처 모의를 수행하였으며, 대티교 지점에서 수위측정 자료를 활용하여 모의 적절성을 검증하였다. 본 성과를 바탕으로 연중 가중가용면적 등의 분석값을 제시하였다. Fig. 3은 성장단계에 따른 유속, 수심에 대한 서식처적합도 지수를 나타내었다. 감돌고기의 경우 보통 몸길이가 7 cm에서 10 cm 정도이며, 주요 습성으로 꺽지 산란장에서 산란하는 것이 특징이다. 그리고 금강, 만경강, 웅천 등지에서 주로 서식하는 국내 고유종이다.

서식처 적합도 지수 분석 결과, 산란기의 경우 유속이 0.2 m/s에서 0.3 m/s 일 때, 수심이 약 0.3 m일 때 적합도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 치어기의 경우 산란기에 비해 유속은 비슷한 값을 나타냈으나 적합한 수심은 다소 상승하는 것으로 나타났다. 마지막으로 성어기의 경우 유속 약 0.4 m/s 일 때, 수심은 약 0.4 m에서 0.5 m 일 때 감돌고기의 서식처로 가장 적합하였으며, 이는 어종별 서식처 적합성 구간과 일치함을 알 수 있다.

3.2.2 원주천댐

원주천댐 구간에서의 물리서식처 모의를 수행하였다. 이를 위해 대상어종으로 쉬리를 선정하였으며, Fig. 4와 같이 산란기와 치어기, 성어기로 구분하여 분석하였다. 쉬리의 경우 생태적으로 고유종 및 민감종으로 중요하며, 대상구간에서 우세종으로 알려져 있다.

원주천댐 구간에서의 쉬리에 대한 서식처 적합도 지수 (HSI) 분석 결과, 산란기의 경우 유속이 약 0.1 m/s에서 0.3 m/s 일 때, 수심이 약 0.1 m일 때 적합도가 가장 높은 것으로 나타났다. 치어기의 경우 유속이 약 0.2 m/s에서 0.4 m/s일 때, 수심은 0.1 m 에서 0.35 m 일 때, 마지막으로 성어기의 경우 유속이 약 0.2 m/s에서 0.6 m/s의 구간일 때, 수심은 약 0.1 m에서 0.6 m 구간일 때 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한 Table 3의 어종별 서식처 적합성 구간과 비교하여 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

Table 3. Velocity and depth distributions of collected fish species (Hur and Kim, 2009)

Species	Season (Month)	Velocity (m/s)	Depth (m)
Nigra	Spring (April)	0.2 − 0.5	0.2 − 0.4
	Summer (June)	0.2 − 0.7	0.3 − 0.6
	Autumn (September)	0.1 − 0.4	0.4 − 0.6
Splendidus	Spring (April)	0.1 − 0.4	0.3 − 0.5
	Summer (June)	0.2 − 0.6	0.2 − 0.6
	Autumn (September)	0.2 − 0.5	0.2 − 0.5
Signifer	Spring (April)	0.1 − 0.2	0.2 − 0.5
	Summer (June)	0.1 − 0.2	0.2 − 0.5
	Autumn (September)	0.1 − 0.3	0.2 − 0.8

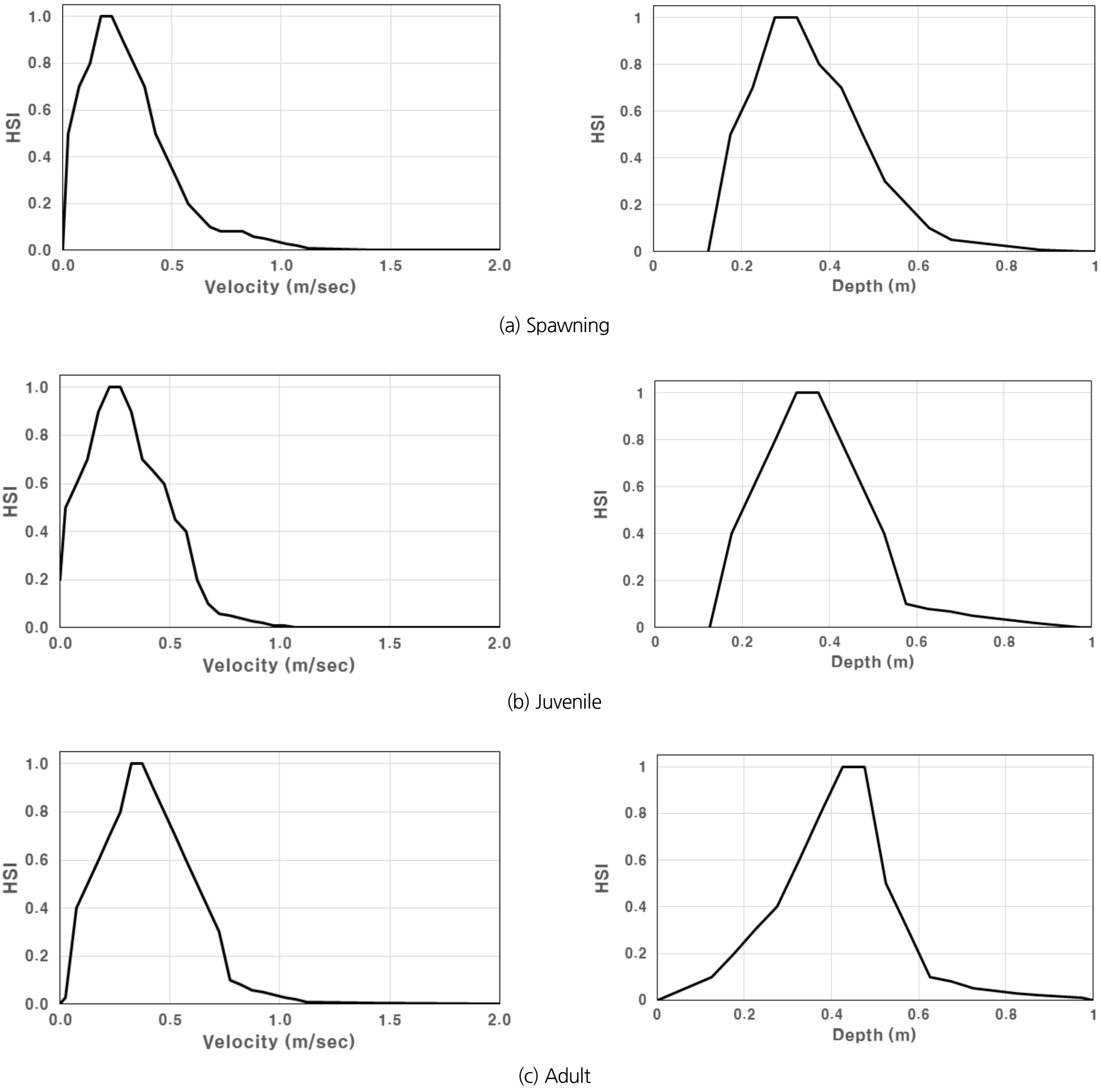
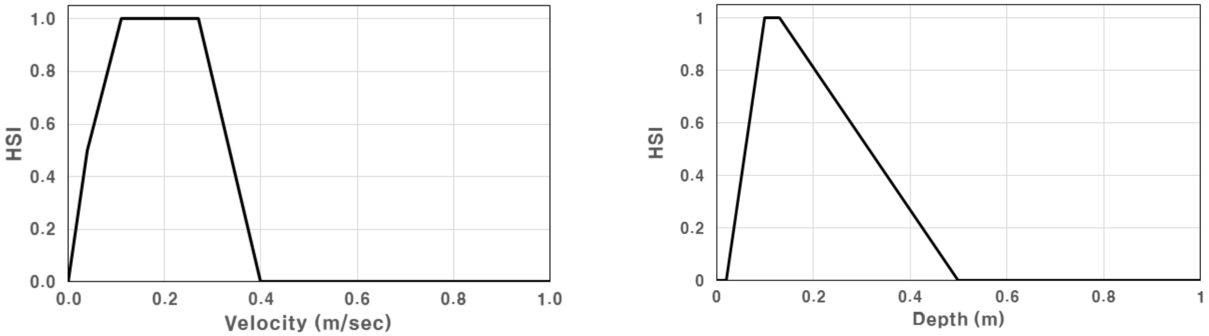


Fig. 3. Habitat suitability index (HSI) (*Pseudopungtungia nigra*) for the downstream section of Yongdam Dam

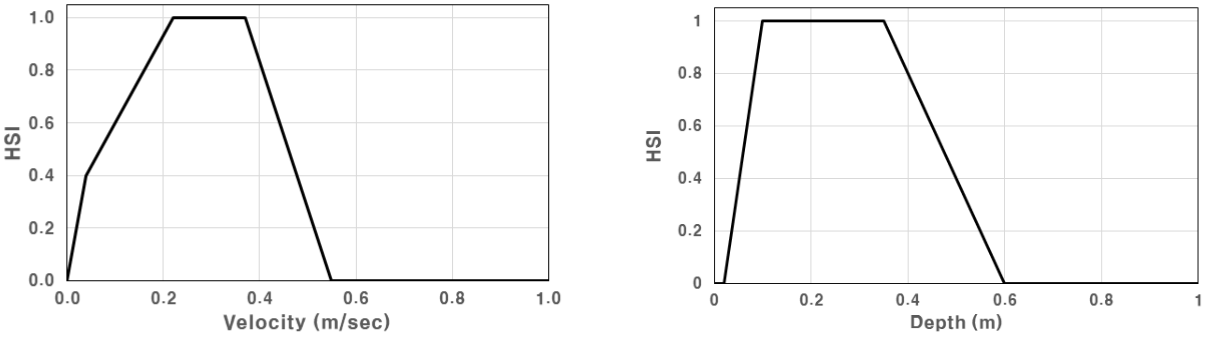
3.2.3 홍천강

마지막으로 홍천강의 물리서식처 모의를 수행하였으며, 대상어종은 묵납자루로 선정하였다. Fig. 5는 생애 주기별로 분석한 서식처 적합도 지수 분석 결과이다. 묵납자루는 맑은 하천 상류의 흐름이 완만한 곳 또는 여울과 여울사이에 서식하며, 모래와 자갈로 구성된 지역을 선호한다(K-water, 2018).

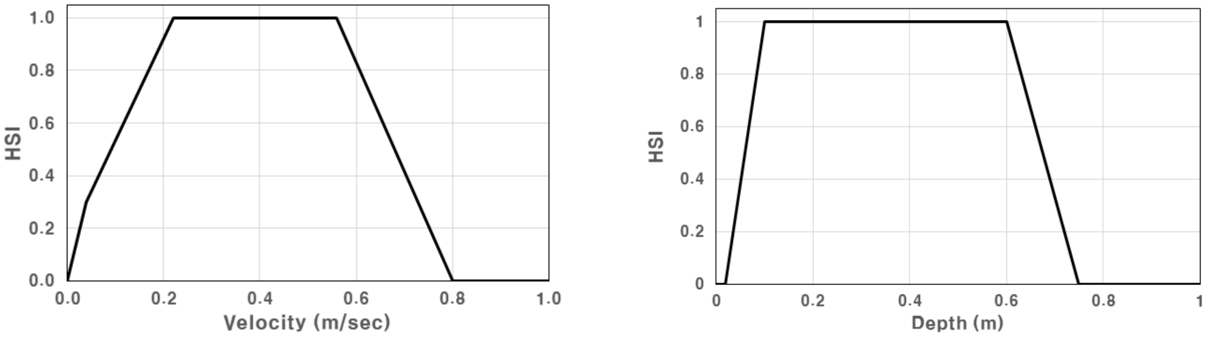
홍천강의 서식처 적합도 분석 결과 산란기의 유속은 0.1 m/s에서 0.4 m/s가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 수심의 경우 약 0.3 m에서 0.6 m가 가장 적합하였다. 치어기의 경우 유속의 구간은 산란기와 비슷하였으나 수심구간은 오히려 0.2 m에서 0.4 m로 감소하였다. 묵납자루의 성어기 서식처 적합도 지수를 보면 유속의 경우 0.1 m/s에서 0.6 m/s의 분포로 나타났으며, 수심은 0.3 m에서 0.5 m인 것으로 나타났다. 어종별 서식처 적합성 구간과 비교하여 모든 대상구간에서 본 연구에서 적용하는 PHABSIM을 이용하여 산정된 수리인자에 대한 모의값이 비교적 잘 모의되었다.



(a) Spawning



(b) Juvenile



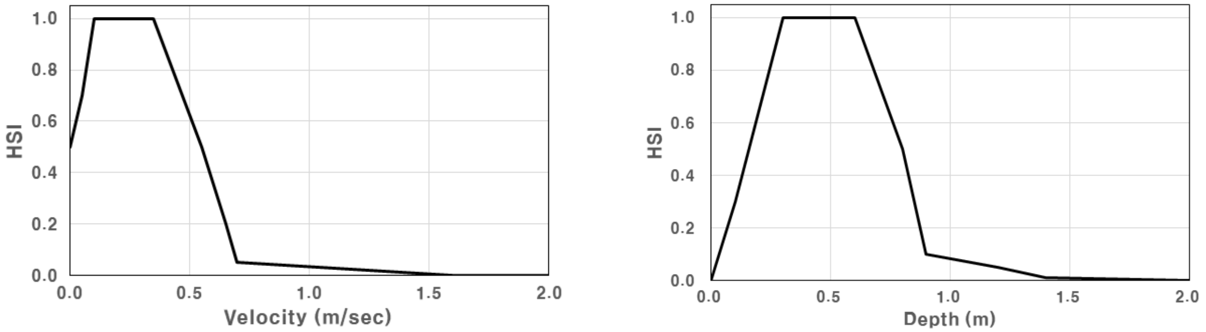
(c) Adult

Fig. 4. Habitat suitability index (HSI) (C*oreoleuciscus splendidus*) for Wonju Stream Dam

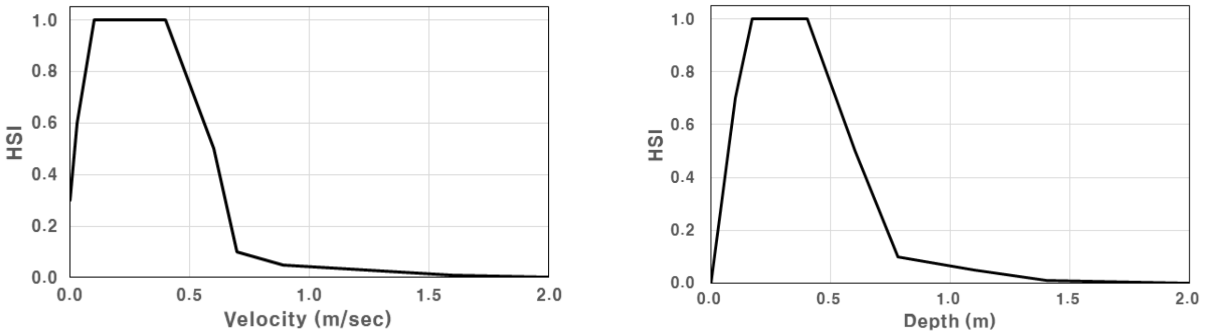
4. 환경생태유량 산정 및 가중가용 면적 검토

4.1 용담댐

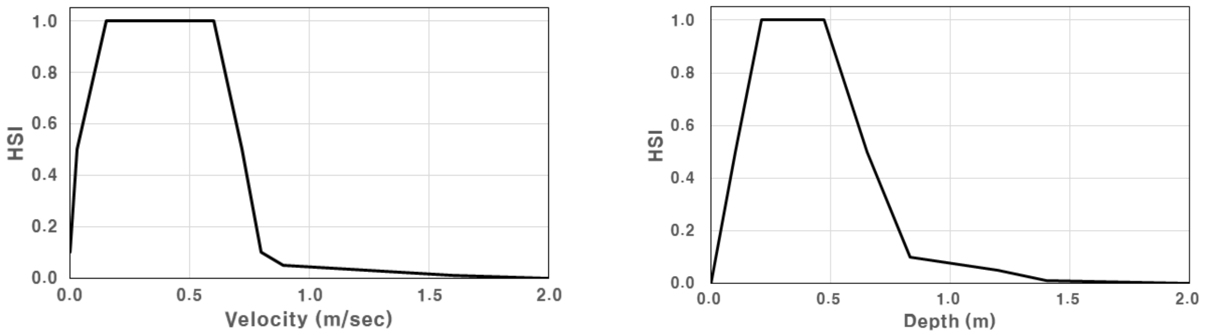
앞에서 획득한 수치모의 결과를 활용하여 용담댐 하류 구간에 대한 물리 서식처 모의를 수행하였으며, Fig. 6은 PHABSIM을 이용하여 유량에 따른 가중가용면적을 산정한 결과이며, 환경생태유량은 가중가용면적이 최대가 되는 유량이다. PHABSIM을 적용하여 산정한 용담댐의 최적 환경생태유량은 9.9 m^3/s로 계산되었다. 또한 용담댐 하류구간 대티교에서 감돌고기에 대한 산란기, 치어기 및 성어기에 대한 환경생태유량을 산정하였다. 그 결과 산란기에는 4.9 m^3/s, 치어기 5.8 m^3/s, 그리고 성어기에는 8.9 m^3/s의 최적 환경생태유량을 확인하였다(Fig. 6(a)). 이러한 최적 환경생태유량 산정 결과는 댐 방류 패턴을 수립하기 위한 하류 하천 생태계의 영향을 정량적으로 판단할 수 있는 근거를 마련할 수 있을 것이다. 그러나 댐 방류는 사회, 경제적 수요와 댐 운영 목적에 맞게 설정되어야 하며, 이와 관련된 다양한 이해당사자간의 지속적인 합의를 통해 목표가 달성되어야 한다. 따라서 본 연구에서 제안



(a) Spawning



(b) Juvenile



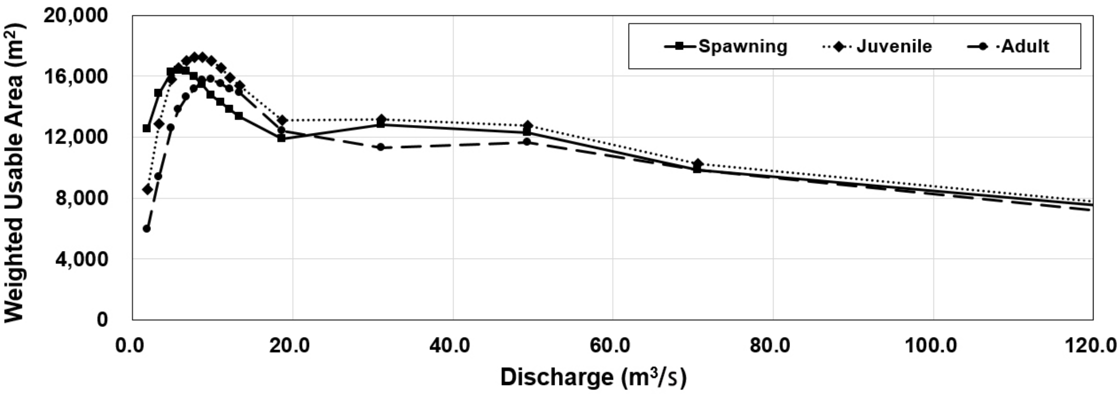
(c) Adult

Fig. 5. Habitat suitability index (HSI) (*Acheilognathus signifer*) for Hongcheon River

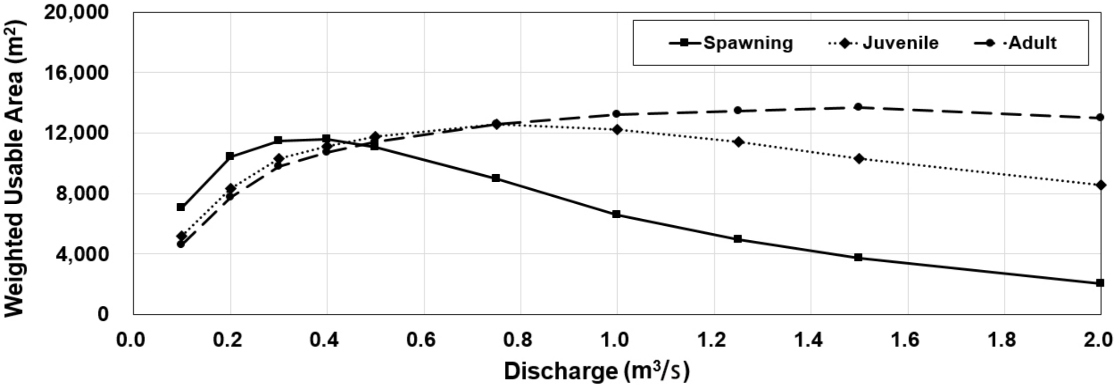
된 성장단계별 연중 환경생태유량 산정 결과와 이를 고려한 방류 패턴 결정 방법을 활용하여 다양한 의견을 반영하여 결과를 도출하고 이를 기반으로 과학적 합의 절차를 지원할 수 있는 의사결정지원시스템을 적용할 필요가 있다.

4.2 원주천댐

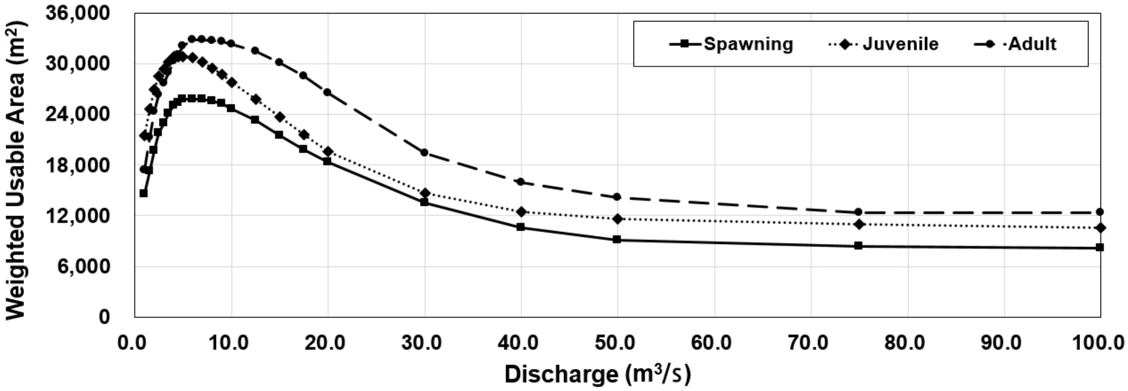
원주천댐 구간에는 쉬리를 대상종으로 하여 물리서식처 모의를 수행하였다. 또한 산란기, 치어기, 성어기의 성장단계별 최적 환경생태유량은 Fig. 6(b)와 같다. 분석 결과, 산란기에는 0.4 m^3/s, 치어기에는 1.0 m^3/s, 그리고 성어기에는 1.5 m^3/s의 최적 환경생태유량을 보였다(Fig. 6(b)). 원주천댐은 홍수조절 전용댐으로 쉬리의 환경생태유량을 성장단계별로 공급하기 위해서는 댐 운영에 대한 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 그러나 원주천댐 유역은 지속적으로 수리 및 어류 모니터링이 이루어지지 않은 지역으로 미계측값에 대한 신뢰도를 제고할 필요가 있으며, 아울러 홍수조절 전용댐으로 기능을



(a) Yongdam Dam (*Pseudopungtungia nigra*)



(b) Wonju Stream Dam (*Coreoleuciscus splendidus*)



(c) Hongcheon River (*Acheilognathus signifer*)

Fig. 6. Weighted usable areas for each life cycle of study sections

유지하면서 서식처의 질적 제고를 위한 기술적 해결을 위해 이차원 모형을 적용한 다양한 서식처 형성 공법에 대한 검토로 간접적인 환경생태유량 확보 효과를 증대할 필요가 있다.

4.3 홍천강

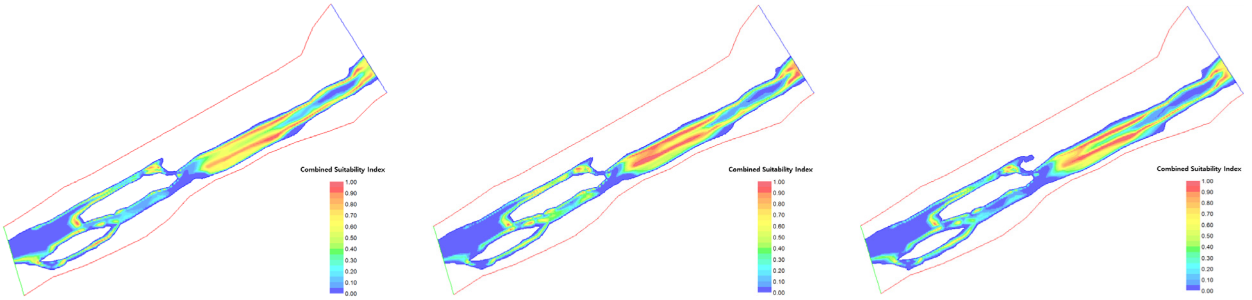
홍천강에 대한 지형자료와 수리모의 수행에 따른 결과를 활용하여 서식처모의를 수행하였다. 묵납자루의 성장단계별 최적 환경생태 유량 산정 결과, 산란기 5 m^3/s, 치어기 4 m^3/s, 그리고 성어기에는 6 m^3/s가 최적 환경생태유량으로 산정되었다(Fig. 6(c)). 따라서 본 구간의 대상어종인 묵납자루에 대한 가중가용면적을 확대하기 위한 서식처 질을 향상시키는 방안으로 여울을 형성하거나 제방 확대 및 수풀 조성을 통한 하

천 물리구조 개선등에 대한 검토가 요구된다. 이를 통해 직접적인 유량 공급이외의 가중가용면적 확대를 위한 하천 물리구조 개선으로 환경생태유량 산정방안 제시할 수 있을 것이다. 또한 홍천강은 상류에 댐이 존재하지 않는 비조절하천으로 유량에 대한 직접적인 조절을 통해 가중가용면적을 변화시킬 수 없는 하천이다. 따라서 직접적인 유량 조절이외에 서식처의 질적 제고를 통해 동일 유량으로 가중가용면적을 증가시켜 간접적으로 환경생태유량을 확보할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

5. 물리서식처 확보를 위한 공간 분석

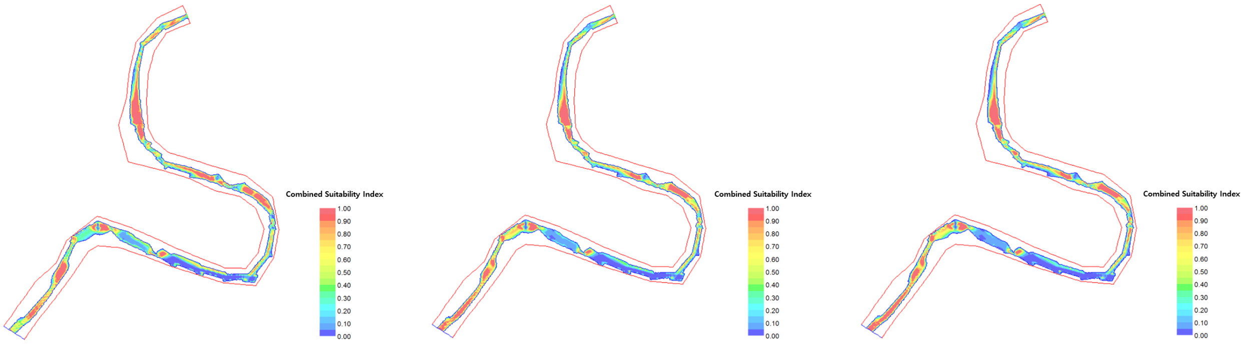
본 연구에서는 앞 절에서 수행된 PHASIM 최적 환경생태유량 산정 결과와 가중가용면적 확보방안 분석을 바탕으로 서식처 질적 제고 및 가중가용면적의 확대로 인한 환경생태유량의 간접적 확보에 대한 효과를 분석하기 위해 RIVER2D 모델을 추가적으로 분석하였다. 기존 PHASIM을 활용할 경우 2차원 평면에 대해 나타나는 특성들이 반영되기 어려운 것이 현실이다. 특히 용담댐 구간의 대상지점은 하천 중간에 사주 형태의 물리구조를 가지고 있어 1차원 모의에 한계를 가지고 있다. 이에 보다 더 정확하게 수생태계의 적합성을 평가하기 위하여 2차원 모형인 RIVER2D를 적용하여 대상 어종별 생애 주기에 따라 분석하였다. RIVER2D를 이용하여 계산되는 어류 서식처 적합도는 PHABSIM에서 사용되는 가중가용면적에 근거하여 산출된다. 그러나 앞서 분석되었듯이 원주천댐 유역은 지속적으로 수리 및 어류 모니터링이 이루어지지 않은 지역으로 미계측값에 대한 신뢰도를 제고할 필요가 있으며, 대상구간 중 대부분의 구간이 직선의 균일 단면으로 이루어져 2차원적인 평면 구조의 분석을 위한 RIVER2D 분석에서 제외하였다.

Fig. 7은 조절하천 구간인 용담댐 구간의 RIVER2D를 적용한 성장 단계별 최적 환경생태유량에 대한 서식도 적합 지수 분포 결과이다. 본 구간과 같이 사주 형태의 구조를 띠는 구간에서의 서식처 적합도 지수는 사주 구간을 지나기 전 더 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 생애 주기별 복합 서식처 적합도 지수의 공간 분포 형태는 매우 유사함을 알 수 있으나 치어기일 경우 최적 구간이 더 넓게 분포함을 확인 할 수 있다. 동일한 횡단 구조상에서도 좌우안의 적합도 지수 분포가 다름을 보았을 때 유속분포의 영향이 있었음을 알 수 있으며, 따라



(a) 4.9 m^3/s for Spawning (b) 5.8 m^3/s for Juvenile (c) 8.9 m^3/s for Adult

Fig. 7. Distribution of Habitat suitability index (HSI) for Yongdam Dam



(a) 4.5 m^3/s for Spawning (b) 3.5 m^3/s for Juvenile (c) 5.0 m^3/s for Adult

Fig. 8. Distribution of Habitat suitability index (HSI) for Hongcheon River

서 1차원 분석뿐만 아니라 2차원 분석을 통한 서식처 분석이 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구의 비조절하천 대상지인 홍천강의 경우 RIVER2D를 적용하여 성장단계별 최적 환경생태유량을 산정한 결과 (Fig. 8), 성장단계별 최적 환경생태유량에 대한 변화 양상이 가중가용면적의 결과와 유사하게 나타났다. 따라서 2차원 모형을 통해 확인된 결과를 바탕으로 서식처 향상을 위한 공법으로 여울 형성, 제방 확대 및 수풀 조성 등이 기존 계획보다 더 작은 유량에서 가중가용면적을 향상시키는 결과를 가져오는 것으로 판단되었다. 즉, 적은 유량으로 유사한 서식접합도 및 서식 가능면적을 확대할 수 있는 방안이 될 수 있는 것으로 예상된다. 공간 분포별로는 대상 어종의 생애 주기별로 거의 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있으며, 만곡부 통과 전 서식처 적합도 지수가 더 높은 것으로 나타났다. 이를 통해 묵납자루의 서식처 최적 유속인 0.1 m/s에서 0.6 m/s가 해당구간에서 형성됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 생태수리모델링을 통해 용담댐 하류, 원주천댐, 그리고 홍천강에서 최적 환경생태유량을 산정하였으며, 생태수리모델링은 PHABSIM과 RIVER2D를 적용하였다. 특히 1차원 모형과 2차원 모형을 적용하여 각 모형의 결과를 비교하였으며, 결과에 대한 비교 분석을 실시하였다. 또한 가중가용면적을 다양한 조건에서 산정하였으며 이를 통해 유량별, 생애주기별 최적 환경생태유량 산정을 위한 기초자료로 활용하였고 이를 기반으로 어류 성장단계별 최적 환경생태유량을 산정하는 방안을 제시하였다.

먼저 물리서식처 모의를 수행하기 위해 수리조건에 대한 적절성을 검증하기 위한 과정을 수행하였다. 감돌고기를 대상어종으로 한 용담댐 구간의 경우 서식처 적합도 지수분석 결과, 생애주기 별 평균 유속이 약 0.4 m/s, 수심은 약 0.4 m일 때 최적 적합도가 가장 높은 것으로 나타났다. 쉬리를 대상어종으로 한 원주천댐에서는 유속이 약 0.3 m/s일 때, 수심은 약 0.4 m일 때, 쉬리의 서식처로 가장 적합하였다. 목납자루를 대상으로 한 홍천강의 서식처 적합도 지수는 유속 0.4 m/s 및 수심은 0.4 m에서 가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 어종별 서식처 적합성 구간과 비교하여 모든 대상구간에서 본 연구에서 적용하는 PHABSIM을 이용하여 산정된 수리인자에 대한 모의값이 비교적 잘 모의되었다.

이러한 모형의 검증결과를 바탕으로 용담댐 하류에 대한 물리서식처 분석을 수행하여 대상 어종을 활용한 성장단계 조건에서의 서식처 변화에 대해 검토하였으며, 연구 결과 산란기에는 4.9 m^3/s, 치어기 5.8 m^3/s, 그리고 성어기에는 8.9 m^3/s에서 가중가용면적이 최대가 되었고 이를 통해 최적 환경생태유량을 확인하였다. 원주천댐의 대상종에 대한 분석결과 산란기에는 0.4 m^3/s, 치어기에는 1.0 m^3/s, 그리고 성어기에는 1.5 m^3/s의 최적 환경생태유량을 나타냈다. 마지막으로 비조절하천인 홍천강을 대상으로 서식처 분석을 수행하였으며 현재 자연유황에 대한 조건을 적용하여 분석하면, 산란기 5 m^3/s, 치어기 4 m^3/s, 그리고 성어기에는 6 m^3/s가 최적 환경생태유량으로 산정되었다.

마지막으로 용담댐과 홍천강을 대상으로 한 RIVER2D를 활용한 복합 서식처 적합도 지수 평가 결과 1차원 결과에서 확인이 어려운 공간 분포 별 대상 어종의 최적 서식처를 확인할 수 있었다. 또한 용담댐 대상구간에서는 사주 발생 전, 홍천강에서는 만곡부 시작 전에 최적 서식처 분포가 가장 크게 형성됨을 알 수 있었다. 이를 통해 2차원 분석을 통해 1차원 분석을 통해 반영되기 어려운 평면적인 특성 등을 반드시 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 다양한 유량 조건을 고려한 댐 운영과 어류의 성장단계를 바탕으로 환경생태유량을 산정하는 방안을 검토하였으며, 대상종의 성장단계별로 최적 환경생태유량 확보를 위한 자료를 제공하고자 하였다. 특히 가중가용면적을 확대하기 위해 서식처 질을 향상시키는 방안으로 여울 형성, 제방 확대 및 수풀 조성을 통한 하천 물리구조 개선이 필요할 것으로 판단되며, 이를 통해 직접적인 유량 공급이외의 가중가용면적 확대를 위한 하천 물리구조 개선으로 환경생태유량을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구와 같은 환경생태유량 결정시 유량을 확보할 수 있는 방안을 토대로 생태유량 확보를 위한 하천유지유량 확보, 기존 댐의 여유물량 활용 등의 검토가 요구된다. 그러나 효과적인 환경생태유량 결정 및 고시를 위해 정부 관련 자 및 전문가 등이 참여하여 환경생태유량의 설정 및 관리에 수반되는 영향들을 반드시 고려하여야 할 것이다. 본 연구에서는 조절 및 비조절 하천환경의 보전과 더불어 수생태계 건강성을 증진시키기 위한 목적으로 채택될 수 있는 환경생태유량 산정 방안에 대해 대상하천을 선정하여 검토하였으며, 향후 하천 생태가치 향상을 위한 의사결정 지원시스템 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2017R1A2B4007131)이며, 논문 내용의 일부는 한국건설기술연구원에서 수행한 2018년 K-water "환경생태유량 산정 및 확보방안 연구" 최종 보고서에 포함된 내용입니다.

References

Bovee, K. D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper No. 12, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, WS/OBS-82/26, Fort Collins, Colorado.

Bowen, Z. H., Freeman, M. C., and Bovee, K. D. (1998). "Evaluation of generalized habitat criteria for assessing impacts of altered flow regimes on warmwater fishes." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 127, No. 3, pp. 455-468.

Choi, G. C. (1995). *Korean freshwater fish*, Seomundang.

Hur, J. W., and Kim, J. K. (2009). "Assessment of riverine health condition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish habitat in downstream of Yongdam dam." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 6, pp. 481-491.

Hur, J. W., and Kim, J. K. (2011). "Fish monitoring guidelines and application cases for the calculation of ecological flows." *Water for Future*, Vol. 44, No. 2, pp. 82-86.

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.

Jung, S. H., and Choi, S. U. (2015). "Prediction of composite suitability index for physical habitat simulations using the ANFIS method." *Applied Soft Computing*, Vol. 34, No. 502-512.

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*, Vol. 33, No. 1, pp. 3-14.

Kim, S. K., and Choi, S. U. (2014). "Change of fish habitat in a downstream reach of a stream due to dam construction." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 1, No. 2, pp. 61-67.

Korea Environment Institute (KEI) (2010). *Study on estimation of fish habitat suitability index (HSI).*

Korea Environment Institute (KEI) (2017). *Study on dam operation considering river flow dynamics.*

K-water (2018). *A research on estimation and securing of environmental flow.* K-water.

Ministry of Construction and Transportation (MCT) (2007). *A study on the estimation of river maintenance flows for the improvement of natural and social environment.* Korea.

Oh, K. R., Lee, J. H., Choi, G. W., Kim, D. H., and Jeong, S. M. (2008). "Estimation of optimum flow needed for fish habitat by application of one and two dimensional physical habitat simulation model-focused on *Zacco platypus*." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 1, pp. 117-123.

Son, Y. M., and Song, H. B. (2006). *Damps with the light and color of freshwater fish in Geum river*. Jisungsa.

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*, KWRA, Vol. 38 ,No. 7, pp. 545-554.

Valentin, S., Lauters, F., Sabaton, C., Breil, P., and Souchon, Y. (1996). "Modelling temporal variations of physical habitat for brown trout (*Salmo trutta*) in hydropeaking conditions." *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol. 12, No. 2-3, pp. 317-330.

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*, KSCE, Vol. 18, No. 2-4, pp. 339-339.

Yi, Y., Wang, Z., and Yang, Z. (2010). "Impact of the gezhouba and three gorges dams on habitat suitability of carps in the Yangtze river." *Journal of Hydrology*, Vol. 387, No. 3-4, pp. 283-291.