Ecology and Resilient Infrastructure (2015) 2(2): 137-146
http://dx.doi.org/10.17820/eri.2015.2.2.137

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

2차원 어류 서식처 모의를 이용한 격리된 구하도의 연결성 복원에 따른 서식지 개선 평가

Evaluation of Habitat Improvement Using Two-Dimensional Fish Habitat Modeling after the Connectivity Restoration in an Isolated Former Channel

김석현 · 김다나 · 조강현*

인하대학교 생명과학과

Seog Hyun Kim, Dana Kim and Kang-Hyun Cho*
Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Received 21 May 2015, revised 1 June 2015, accepted 23 June 2015, published online 30 June 2015

ABSTRACT: Lateral connectivity between a main channel and a former channel plays an integral role in maintaining ecological functions of stream-floodplain ecosystems. This study virtually restored the connectivity of the former channel, which is currently isolated by channelization, in the Mangyeong River, Korea. Fish habitat improvement after the connectivity restoration was evaluated using River2D, two-dimensional depth-averaged hydraulic modeling, depending on normal and flood flow conditions. Target fish species were crucian carp (*Carassius auratus*), which are known as lentic species, and pale chub (*Zacco platypus*), known as lotic species. The weighted usable area (WUA) of the two species was increased after the connectivity restoration: the two-way connection between the main and formal channels was more effective than the one-way connection. The result of the physical habitat simulation at a flood flow condition demonstrated an increased rate of the WUA than during a normal flow condition. In particular, the WUA of pale chub increased about four times on the two-way connectivity restoration. This result suggests that habitat availability of both lentic and lotic fish species will increase after a connectivity restoration, and a two-way connectivity restoration may be more effective. In addition, the restored formal channel would function as a shelter for fish during the flood season.

KEYWORDS: Former channel, Lateral connectivity, Physical habitat simulation, Two-dimensional hydraulic modeling

요 약: 하천 본류와 구하도 사이의 횡적 연결성은 하천–홍수터 생태계에서 생태적 기능을 유지하는데 매우 중요하다. 본 연구는 2차원 평균수심 유한요소 모형인 River2D를 사용하여 만경강에서 직강화로 인해 격리된 구하도의 연결성을 가상으로 복원하고 평수기와 홍수기 조건에서 어류 서식처 변화를 평가하였다. 평가 대상 어종은 정수성 어종인 붕어 (*Carassius auratus*)와 유수성 어종인 피라미 (*Zacco platypus*)를 선정하였다. 물리서식처모의 결과에 의하면, 연결성 복원 전후의 붕어와 피라미의 가중가용면적 (weighted usable area, WUA)은 복원 후에 증가하였으며 양방향 복원이 일방향 복원보다 어류 서식처 복원에 효과적이었다. 또한 가중가용면적의 증가율은 평수기보다 홍수기에 더 높았다. 특히 피라미의 경우 홍수기에 구하도의 연결성이 양방향 복원되었을 때 구하도 내의 가중가용면적이 복원 전 대비 약 4배로 크게 증가할 것으로 예측되었다. 본 연구 결과 만경강에서 본류와 구하도의 연결성이 복원되었을 때 정수성 어류와 유수성 어류의 서식처가 모두 증가할 것으로 예상되며, 일방향 복원보다 양방향 복원이 더 효과적인 것으로 나타났다. 또한 복원된 구하도는 홍수기 때 어류의 피난처 역할을 할 것으로 기대되었다.

핵심어: 구하도, 횡적 연결성, 물리서식처모의, 2차원 수리 모형

***Corresponding author:** khcho@inha.ac.kr

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

하천 생태계에서 범람 파동 개념 (flood pulse concept)은 생태적으로 중요한 개념으로 하도와 홍수터의 횡적 연결성 (lateral connectivity)을 기반으로 한다. 하천에 서식하는 일부 생물의 생활사는 하도와 홍수터에서 발생하는 주기적인 수위 변동과 연관되어 있다 (Kwak 1988, Miranda 2005). 특히 일부 어류의 생활사는 본류와 홍수터의 횡적 연결성과 밀접한 관계를 가진다 (Kingsford 2000). 이들 어류는 수위가 높아졌을 때 홍수터로 이동하고 이곳에서 산란 및 치어 성장과 같은 생식 활동을 하거나, 홍수기간에 홍수터로 피난, 은신하고 다시 수위가 낮아지면 본류로 돌아가서 생활사를 잇는다 (Ross and Baker 1983, Turner et al. 1994).

우리나라의 하천 대부분은 하천정비에 의해 인공제방이 축조되었다. 또한 정비된 하천에서 대부분의 홍수터는 본류와 단절되어 농경지, 주택지 등으로 이용되고 있다. 본류 하도와 단절된 홍수터와 구하도는 본류와 에너지와 물질의 교환이 저해되어 물리 환경이 변형된다 (Junk et al. 1989, Schiemer 2000). 이처럼 본류와 단절된 홍수터와 구하도의 환경에서는 어류 군집이 횡적 연결성이 확보된 곳에 비하여 교란된 특성을 보이게 된다 (Erskine et al. 2005, Andrews et al. 2014). 따라서 본류 하도와 홍수터 또는 구하도의 횡적 연결성 확보는 하천 생태계의 건강성을 유지하고 개선하는데 매우 중요하다 (Tockner et al. 1999).

만경강은 유역면적 1,527 km^2, 유로 약 77 km인 하천으로 전라북도 완주군에서 발원하여 전라북도 김제시에서 서해로 유입된다 (K-water 2007). 만경강의 하류 지역은 과거에 사행이 심하였으나 정비사업으로 직강화되었고 현재 사행하도 구간이 본류와 절단되어 제내지에 약 7개의 구하도 구간이 형성되어 있다 (Hong et al. 2012). 이러한 구하도는 본류와 연결성이 단절되어 어류가 본류와 구하도를 이동할 수 없는 실정이다. 만경강에서 어류에 대한 연구는 주로 하천의 본류를 중심으로 전반적인 어류상 조사가 이루어 졌으며 (Kim and Lee 1998, Lee et al. 2008) 만경강의 구하도에 대한 어류 군집 연구는 Kim et al. (2015)에 의해 수행된 바 있다. 현재 만경강 구하도의 어류 군집은 오랜 시간 동안 단절되어 본류 어류 군집과 차이를 보이고 있으며, 일부 구하도는 매립이 진행되어 교란 정도가 심한 실정이다 (Kim et al. 2015).

하천에서 어류에게 요구되는 서식지를 파악하고 이를 하천 생태계 복원에 적용하는 것은 매우 중요하다 (Bovee 1986). 최근에는 다양한 생물 모델링 기법을 사용하여 생물 종의 분포 예측 또는 이들에게 필요한 환경을 제시하는데 적용되고 있다. 특히, 수리모형과 물리서식처모의 (physical habitat simulation, PHABSIM)를 사용하여 하천유지유량을 산정하는 연구인 유량증진방법론 (instream flow incremental methodology, IFIM)이 개발되었다 (Bovee 1986). 이 방법론은 주로 생물에게 적합한 생태유량을 산정하는데 사용된다. 최근에는 2차원 모형을 사용하여 하천 내의 다양한 물리적 환경, 어도, 수제 등에 의한 어류 서식처 변화에 대한 연구 또한 이루어지고 있는데, 이러한 연구는 생태유량 산정뿐만 아니라 서식지의 물리적 환경을 개선하는데 응용이 되고 있다 (Lee et al. 2010, Boavida et al. 2011, Chou and Chuang, 2011, Baek et al. 2013, Boavida et al. 2013).

하천 본류와 홍수터의 횡적 연결성이 단절된 만경강에서 본류 하도와 구하도의 연결성 복원은 구하도뿐만 아니라 본류에 서식하는 어류에게도 중요하다 (Kim et al. 2015). 이러한 수리적 연결성을 복원하고자 하는 전략 수립에서 어류 서식처로서 구하도의 수리적, 생태적 기능을 예측하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구는 만경강에서 본류 하도와 단절된 구하도에서 1) 2차원 수리모형을 활용하여 구하도의 연결성을 가상으로 복원한 후, 2) 평수기와 홍수기의 상황에서 물리서식처모의를 수행하여 3) 수리적 연결성을 복원하였을 때에 구하도에서 어류 서식처 가용성을 예측하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지 개황

연구 대상지는 전라북도 익산시 석탄동의 제내지에 위치한 습지형 구하도 (35°54‘ N, 126°58‘ E)를 포함하여 인접한 만경강 본류 약 3.5 km를 연구지역으로 선정하였다 (Fig. 1). 연구 대상지의 평균하상경사는 1/2,100이었으며 하상재료는 주로 모래와 미사

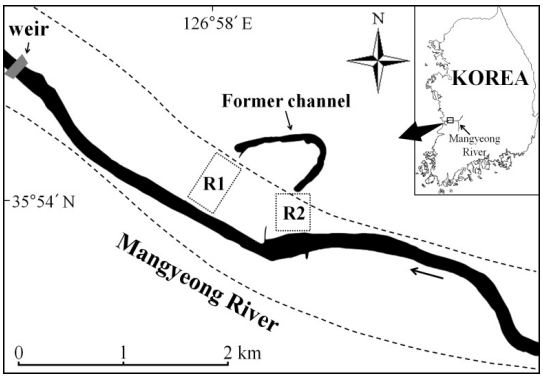

Fig. 1. Map showing study area in the Mangyeong River. The dotted rectangles (R1 and R2) indicate lateral connectivity restoration locations. The thick dotted lines indicate river levee.

(silt)로 이루어져 있어서 중앙입경 (D_{50})은 0.038 mm 이었다 (RIMGIS 2012). 선정한 구하도는 수로 폭이 약 40 m이고 하도 길이는 약 0.9 km이며 수변을 따라서 수생식물 생육지와 개방수면이 잘 발달되어 있었다. 구하도 주변 유역은 주로 주거지와 농경지로 이루어져 있었다. 복단면으로 정비된 만경강 본류는 저수로 폭이 약 80 m로 넓었다. 연구 대상지의 본류 하류에는 보가 설치되어 보 상류에 물가를 따라서 갈대와 버드나무 식생이 잘 발달하였다. 제외지 고수부는 물가에서 제방까지 농경지가 넓게 위치하였다. 구하도와 본류의 연결성은 제방에 의해 격리되어 있었으며, 구하도 하류단에 수문이 1개소 설치되어 있었다.

2.2 수리모의

본 연구에서 본류와 구하도의 수리를 모의하기 위하여 2차원 평균수심 유한요소 모형인 River2D를 이용하였다 (Steffler and Blackburn 2002). 이 모형은 환경이 수시로 변하는 홍수터 습지에 포함하는 하천에 적용될 수 있는 유용한 모형이다. 또한 River2D를 이용하면 이것의 보조 소프트웨어인 R2D_Bed와 R2D_Mesh에서 생성된 지형 자료와 유한요소망을 기반으로 어류의 물리서식처모의가 가능하다.

본 연구에서는 지형과 하상재료에 대한 River2D의 입력자료는 만경강 하천기본계획 (RIMGIS 2012)에서 얻었다. 지형 파일을 입력하는 프로그램인 R2D_Bed를 이용하여 만경강 본류와 구하도의 연결성을 2가지 방법으로 복원하였다 (Steffler 2002). 즉 구하

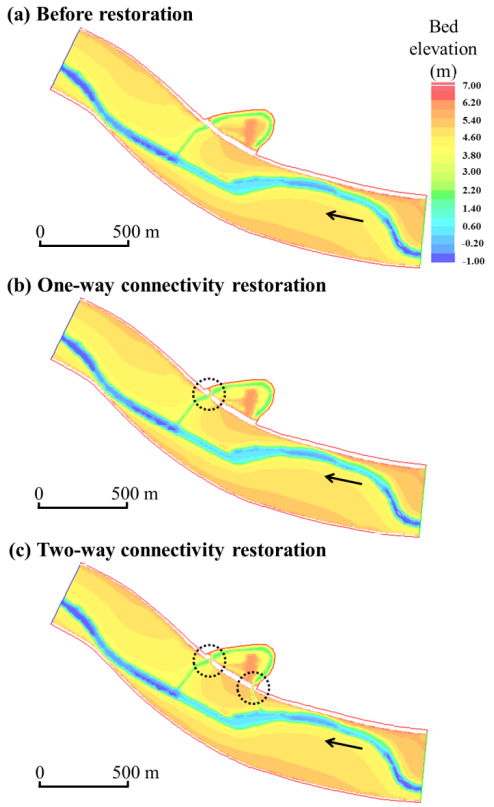

Fig. 2. Bed elevation of the study area in the Mangyeong River. Dotted circles indicate the connectivity restoration points. (a) before restoration, disconnected with the main channel; (b) one-way connectivity restoration; (c) two-way connectivity restoration.

도에서 수문이 있는 하류단의 한 곳만 연결하는 일방향 복원 (one-way connectivity restoration)과 하류단과 상류단 모두 복원하는 양방향 복원 (two-way connectivity restoration)을 복원의 시나리오로 산정하였다 (Fig. 2). 복원 후 결과와 비교하기 위하여 연결성이 단절된 복원 이전 현재 상황도 모의하였다.

만경강 유역의 중앙에 위치한 전라북도 완주군 삼례읍 삼례리의 대천 관측소에서 수위자료 및 수위-유량 관계식을 사용하여 만경강의 유황 분석 결과, 갈수량 (Q_{355}), 저수량 (Q_{275}), 평수량 (Q_{185}) 및 풍수량 (Q_{95})은 각각 2.73, 6.63, 11.44 및 21.63 $m^3\ s^{-1}$이었다 (RIMGIS 2012). 하지만 대천 관측소에서 산출한 수위-유량 관계식의 산출기간이 10년에 미치지 못하여 이 식을 이용한 유황분석의 정확도를 보장하기 어려울 것으로 판단되었다 (RIMGIS 2012). 그러므로 수리모의에 필요한 유량 정보는 유황 자료 대신 일

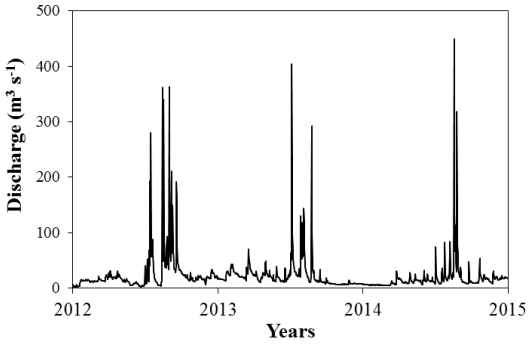

Fig. 3. Variability of daily discharge at the Daecheon flow measurement station, located on the upper part of study area, in the Mangyeong River. The daily discharge was collected from 2012 to 2014 (WAMIS 2015).

평균 유량 자료를 사용하였다. 이 유량 자료는 연구 대상지로부터 약 8 km 상류에 위치한 대천 관측소에서 얻었다 (WAMIS 2015). 참고한 유량 정보는 2012년부터 2014년까지 3년간의 유량자료이었다 (Fig. 3). 모의 구간의 상류 경계조건을 설정하기 위하여, 평수기인 2015년 5월에 GPS 측량장비 (ProMark 700, Spectra Precision, USA)를 사용하여 상류 경계부터 하류 경계까지 100−200 m 간격으로 수위를 측정하였다. 측정된 경계수위와 조사 당시 일 평균 유량 (18.66 m^3 s^{-1})을 사용하여 수리모의를 실시 하였다. 본 연구에 이용한 River2D에서 수리모의 보정을 위한 매개변수인 유효조고 (roughness height)는 만경강 하천기본계획 (RIMGIS 2012)에서 제공하는 하상의 중간입경 (median particle size) 자료를 기반으로 유효조고를 구하였는데, 중간입경에 5배를 곱한 값을 최종적인 유효조고로 채택하였다 (Yalin 1977, Bray 1980). 수리모의 결과의 정확성을 평가하기 위하여 실측한 수위 값과 수리모의를 통해 얻어진 수위 값으로 χ^2 검정을 실시하였다.

만경강 구하도의 연결성이 복원 되었을 때 구하도가 평수기 및 홍수기 때 어류 서식처에 미치는 영향을 보기 위하여 두 가지 조건에서 수리모의를 수행하였다. 3년간 유량 자료를 기반으로 평수기 유량인 18.66 m^3 s^{-1}과 홍수기 유량인 400 m^3 s^{-1}에서 수리모의를 수행하였다 (Fig. 3). 그러므로 수리모의는 구하도의 연결성 유무에 따른 3가지 경우와 유량 조건에 따른 2가지 경우를 조합하여 총 6가지 경우를 비교 분석 하였다.

2.3 어류 서식처 모의

River2D의 서식처모형은 1차원 모형인 물리서식처모의 (PHABSIM)와 동일한 가중가용면적 (weighted usable area, WUA) 개념을 이용하였다.

$$WUA = \sum_{i=0}^{n} A_i \times C_i \quad (1)$$

여기서 A_i는 셀 i에 해당하는 유한요소의 면적이고, C_i는 셀 i에서의 복합적합도지수 (combined suitability index, CSI)이다. 복합적합도지수는 각 물리 환경에 대한 서식처적합도지수 (habitat suitability index, HSI)의 기본적인 곱셈법을 사용하였다.

$$C_i = f(v)_i \times f(d)_i \times f(c)_i \quad (2)$$

여기서 $f(v)_i$, $f(d)_i$ 및 $f(c)_i$는 각각 유속, 수심 및 하도지수 (channel index)에 대한 서식처적합도이다.

Kim et al (2015)에 의하면 연구지역의 만경강 본류에는 피라미, 끄리, 밀어 등이 서식하고 있으며 서식처 모의 대상인 구하도에는 붕어, 떡붕어, 대륙송사리 등이 서식하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구의 대상 어종은 상이한 환경을 선호하는 두 어종으로서 유수 및 여울성 어류인 피라미 (*Zacco platypus*)와 정수 및 호소성 어류인 붕어 (*Carassius auratus*)를 선정하였다.

유속과 수심에 대한 두 종의 서식처적합도지수는 Fig. 4에 나타내었다. 피라미의 유속과 수심에 대한 서식처적합도지수와 붕어의 유속에 대한 서식처적합도지수는 Kang (2012)이 제시한 것을 사용하였다. 그러나 수심에 대한 붕어의 서식처적합도지수는 Kang (2012)의 것을 따르지 않고 Kang (2012)에서 제시한 기준에 따라서 0.3−2.0 m를 최적 수심으로 하는 이분법 (binary method)으로 나타내었다. 일반적으로 붕어는 수심이 얕은 하천부터 수심이 깊은 대형 하천과 호소 등에 서식하는 종이다 (Kim and Park 2002, Kim et al. 2005). 하지만 Kang (2010)에서 붕어의 서식처적합도지수는 최적 수심을 0.4−0.6 m로 산정하여 이들이 실제로 선호하는 최적 수심을 적절하게 반영하지 못하고 있는 것으로 판단하였다. 한편, 붕어와 피라미는 하상재료에 의한 영향을 크게 받지 않

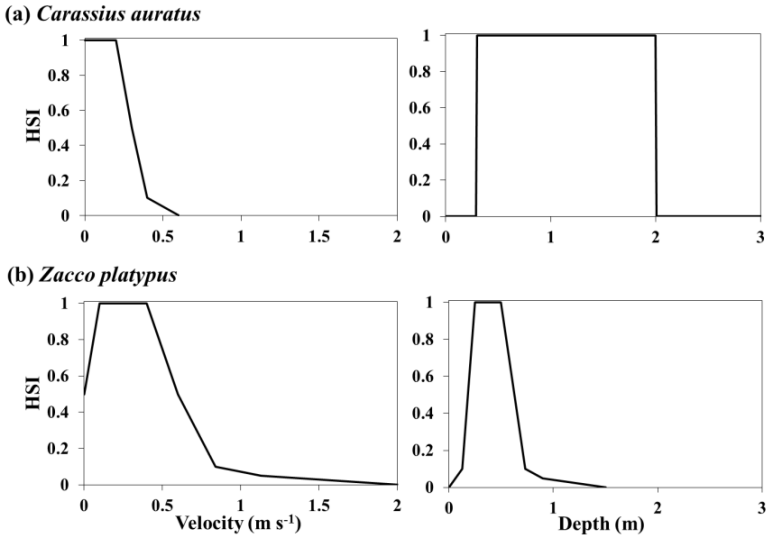

Fig. 4. Habitat Suitability Index (HSI) of *Carassius auratus* and *Zacco platypus*. The depth suitability of *C. auratus* was developed by the binary method based on Kang (2012), and the others refer to Kang (2012).

기 때문에 하상재료의 적합도 지수는 모두 1.0로 설정하였다 (Lee et al. 2012).

3. 결 과

만경강의 연구 대상지에서 일 평균 유량 18.66 $m^3 s^{-1}$을 기준으로 100−200 m 간격으로 총 20 개 지점의 수위를 측정한 결과 상류단의 수위는 3.824 m이었으며 하류단의 수위는 3.793 m로서 수위 차이가 적었다. 측정된 수위를 사용하여 수리모의를 실시하였고, 연구지역의 수위 실측 값과 모의 값의 차이는 최소 0.000 m에서 최대 0.018 m이었고, χ^2 검정을 실시한 결과 두 값 사이에 유의한 차이가 없었다 (p = 0.44) (Fig. 5).

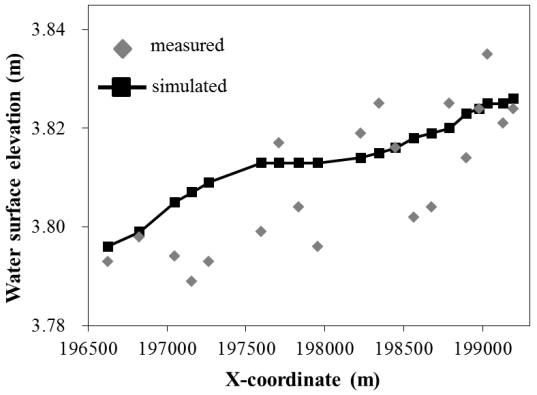

Fig. 5. Comparison of measured and simulated water surface elevation during the normal flow condition (Q = 18.66 $m^3 s^{-1}$). The solid line with the closed squares indicates the result of hydraulic modeling (River2D) and the grey rhombuses indicate the measured data. The result of χ^2 test showed that there was no significant difference between measured and simulated water surface elevation (P = 0.44).

물리서식처모의는 본류 하도와 구하도의 연결성 복원 전, 일방향 복원 후, 양방향 복원 후의 세가지 경우에서 붕어와 피라미를 대상으로 수행하였는데, 평수기 유량인 18.66 $m^3 s^{-1}$과 홍수기 유량인 400 $m^3 s^{-1}$에서 모의 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 평수기 조건에서 붕어와 피라미의 가중가용면적은 각각 132,772−139,228 m^2과 21,212−22,318 m^2로서 붕어가 더 넓은 면적을 사용할 수 있는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 두 종 모두 본류 하도에서 주로 양안을 따라서 서식지가 적합하였다. 구하도에서 붕어는 하안을 포함하여 하도를 따라서 적합한 서식지가 넓은 반면 피라미는 하안을 따라서 적합한 서식지가 좁게 분포하였다. 붕어의 가중가용면적은 복원 후에 다소 증가하였으나 모의 대상지 전체의 가중가용면적에 대한 구하도 내 가중가용면적의 비율은 크게 증가하지 않았다 (Table 1). 반면 피라미의 경우 복원 전 가중가용면적은 2,629 m^2에서 일방향 복원과 양방향 복원 시 각각 3,832 m^2 및 4,725 m^2로 증가하였으며, 가중가용면적의 비율은 복원전 12.4%에서 양방향

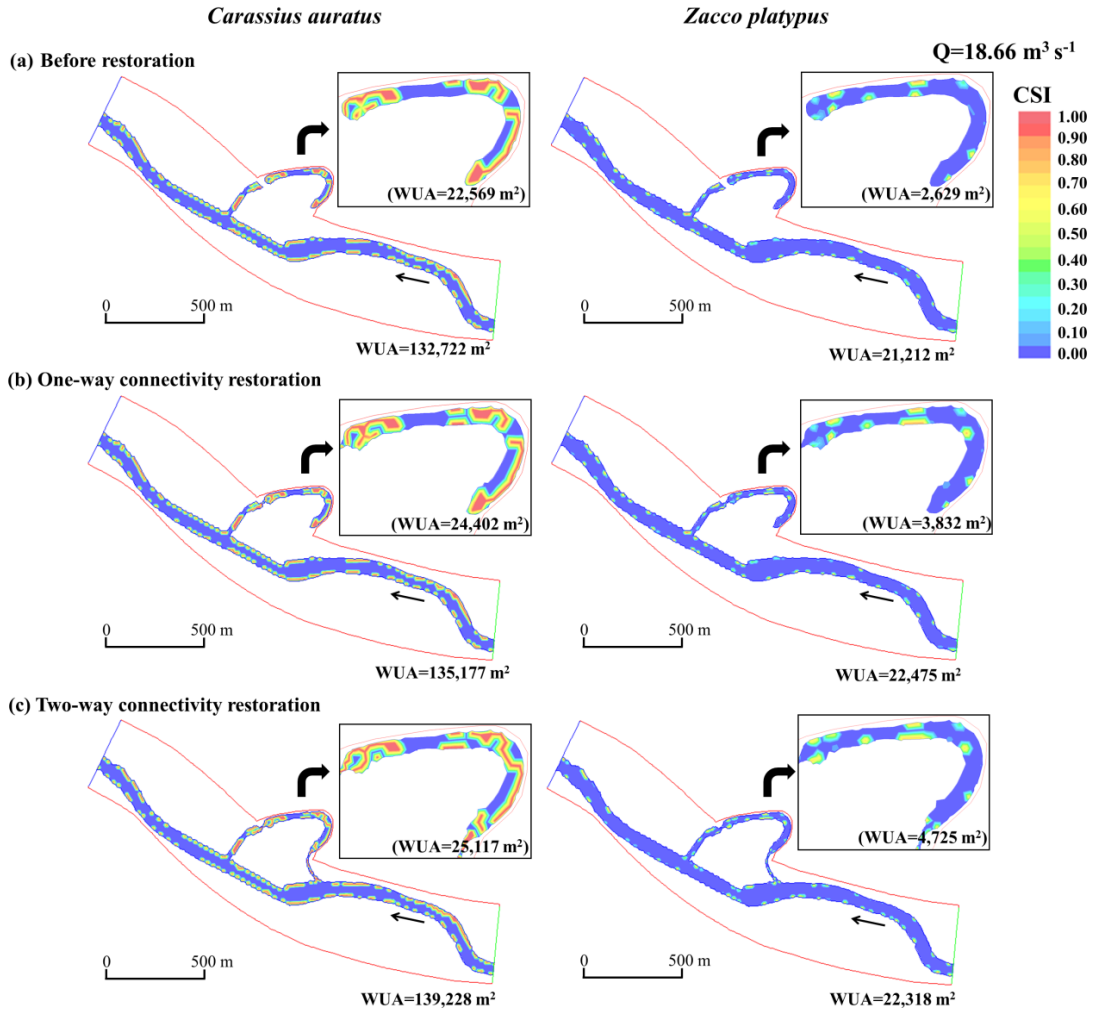

Fig. 6. Combined suitability index (CSI) and weighted usable area (WUA) of *Carassius auratus* and *Zacco platypus* based on each restoration case under the normal flow (Q = 18.66 m^3 s^{-1}). The closed rectangles show CSI and WUA in the formal channel. (a) before restoration, disconnected with main channel, (b) one-way connectivity restoration and (c) two-way connectivity restoration.

복원 시 21.2%로 크게 증가하였다.

홍수기 조건에서 붕어와 피라미의 가중가용면적은 각각 119,249−127,780 m^2과 155,485−166,268 m^2로 피라미가 붕어보다 가중가용면적이 넓었다 (Fig. 7). 본류 하도에서 두 종의 적합한 서식지는 주로 홍수에 의하여 침수되는 구간이었다. 특히 상류 부분의 사행구간과 구하도 유입부에 적합한 서식지가 집중되었다. 붕어는 구하도 내에서 하안과 하도를 따라서 적합한 서식지가 넓었으며 평수기에 비해 가중가용면적이 증가하였다. 피라미는 주로 구하도 내에서 침수되는 구간을 따라서 적합한 서식지가 증가하였다. 붕어의 가중가용면적은 복원 전과 복원 후를 비교하였을 때 24,757 m^2에서 일방향 복원과 양방향 복원 시 각각 27,004 m^2 및 29,490 m^2로 증가하였으며 가중가용면적의 비율은 복원전 20.8%에서 양방향 복원 시 23.1%로 증가하였다. 피라미는 복원 전에 4,773 m^2이었으나 일방향 복원과 양방향 복원 시 각각 13,154 m^2와 20,193 m^2로 크게 증가하였고 가중가용면적 비율은 본원 전 3.1%에서 양방향 복원 후 12.1%로 크게 증가하였다.

4. 고 찰

본 연구의 대상지인 만경강은 과거에 사행이 심한

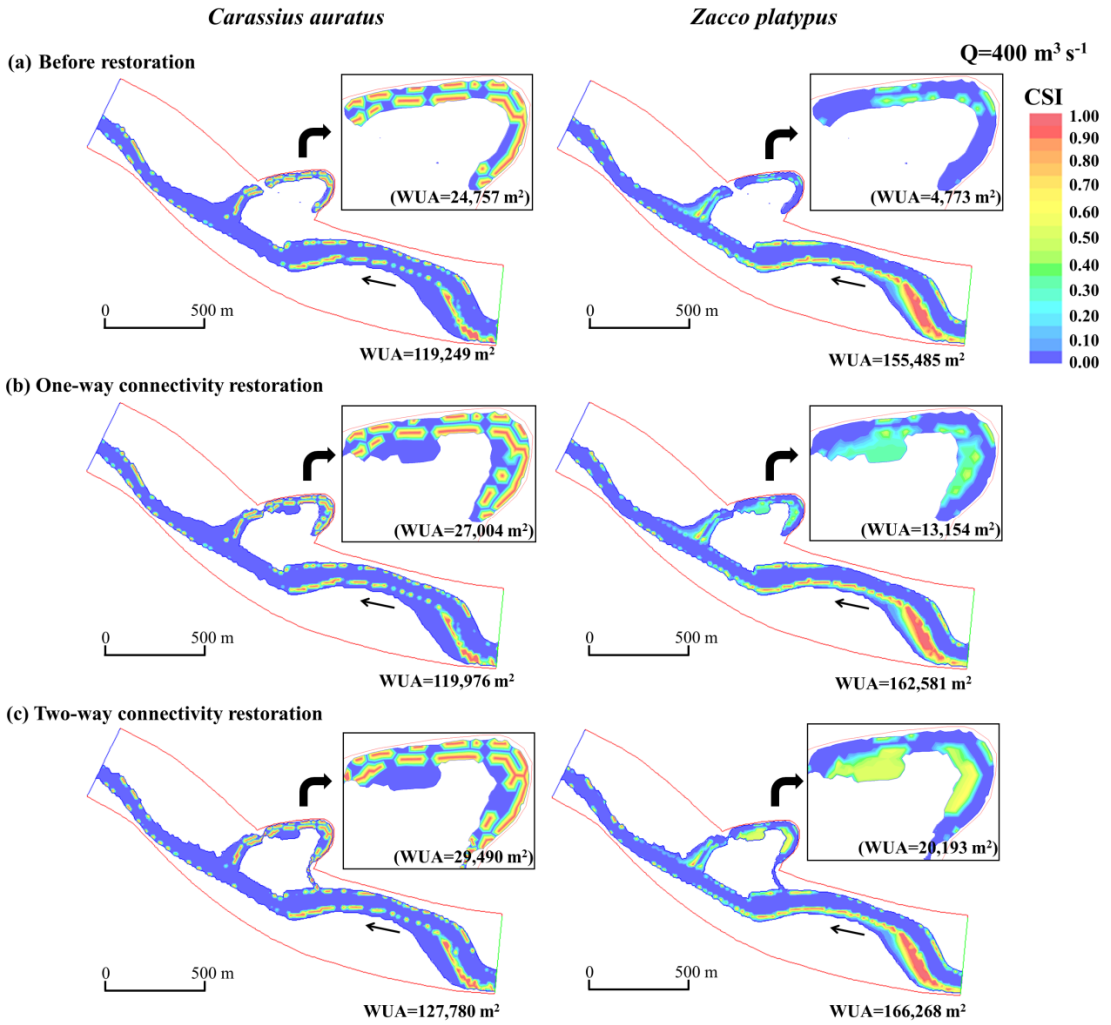

Fig. 7. Combined suitability index (CSI) and weighted usable area (WUA) of *Carassius auratus* and *Zacco platypus* based on each restoration case under the flood flow (Q = 400 m^3 s^{-1}). Closed rectangles show CSI and WUA in the formal channel. (a) before restoration, disconnected with main channel, (b) one-way connectivity restoration and (c) two-way connectivity restoration.

Table 1. The percentage of weighted usable area (WUA) of the formal channel compared to the overall study area in the Mangyeong River. The value of each WUA is provided in Fig. 6 (Q = 18.66 m^3 s^{-1}) and Fig. 7 (Q = 400 m^3 s^{-1}).

Simulation scenario		Percentage of WUA (%)	
Flow discharge (m^3 s^{-1})	Restoration alternative	*Carassius auratus*	*Zacco platypus*
18.66	Before restoration	17.0	12.4
	One-way connectivity restoration	18.1	17.1
	Two-way connectivity restoration	18.0	21.2
400	Before restoration	20.8	3.1
	One-way connectivity restoration	22.5	8.1
	Two-way connectivity restoration	23.1	12.1

하천이었으나 직강화 사업으로 인하여 하도가 절단되었고 제내지에 본류와 단절된 구하도가 형성되어 있다 (Hong et al. 2012). 하천 생태계에서 본류 하도와 홍수터가 단절되면 홍수터의 정상적인 생태 기능이 상실되면서 본류와 홍수터에 서식하는 모든 어류에게 영향을 미친다 (Schiemer and Spindler 1989). 즉 본류와 홍수터를 이동하는 특이한 생활사를 가지는 어류 뿐만 아니라 하천 본류 또는 구하도에서만 서식하는 어류 또한 영향을 받는다 (Andrews et al. 2014). 이러한 결과로 인하여 구하도는 본류와 전혀 다른 환경을 가지게 되었으며 어류 군집 또한 본류 하도와 큰 차이를 보이고 있기 때문에 본류와 구하도의 연결성 확보가 시급한 실정이다 (Kim et al. 2015). 그러므로 본 연구는 만경강에서 본류 하도와 격리된 구하도의 횡적 연결성을 복원하였을 때 어류의 서식처가 어떻게 변화되는지를 모의하였다. 특히 본류의 유수 환경과 구하도의 정체수역 환경을 선호하는 피라미와 붕어를 대상으로 물리서식처모의를 수행하였다.

만경강의 구하도에서 평수기에 복원 전후에 정수성 어종인 붕어의 가중가용면적은 큰 변화가 없었다 (Fig. 6). 그러나 홍수기에는 붕어의 가중가용면적은 양방향 복원 시 증가되는 것으로 예측되었다 (Fig. 7). 구하도의 연결성이 복원되면 홍수 기간에 제내지 구하도의 홍수터 일부가 침수되고 수심이 얕은 구간이 형성되는 것으로 나타났다. 따라서 구하도의 연결성이 복원되면 구하도 홍수터가 홍수기에 붕어의 피난처 기능을 수행할 것으로 예상되었다. 유수성 어종인 피라미의 경우 구하도의 연결성이 복원되면 평수기 때 사용 가능한 서식지 면적이 증가할 것으로 예상되었다. 현재 피라미는 만경강 본류에서 서식하고 있으나 구하도에서 서식하지 않고 있는 실정이다 (Kim et al. 2015). 따라서 구하도의 연결성 복원은 피라미 뿐만 아니라 유수 및 여울성 어류의 서식처 개선에 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 또한 홍수기 때 구하도에서 수심이 얕은 피난처가 형성되면서 피라미의 가중가용면적이 크게 증가하는 것으로 예측되었다 (Fig. 7). 일반적으로 많은 어류는 정수 구간과 같이 물 흐름이 크지 않는 곳에서 산란을 하기 때문에 홍수터는 어류의 생산성에 매우 중요한 역할을 한다 (Turner et al. 1994). 또한 홍수터와 구하도는 홍수기간에 피난처를 제공함으로써 하천에서 어류가 생존할 수 있는 기회를 제공한다 (Welcomme 1979, Henning 2004). 한편 구하도 연결성 복원 방식에 있어서 일방향 복원보다는 양방향 복원 시 홍수터의 침수지역에 미세한 물의 흐름이 발생하기 때문에 복원 전보다 가중가용면적이 크게 증가하는 것으로 예측되었다. 따라서 본 연구 결과에 의하면 구하도의 연결성이 어류 서식처 개선에 도움이 될 것으로 예상되며, 복원 방식은 일방향 복원보다 구하도의 상류와 하류를 모두 본류와 연결하는 양방향 복원이 더 효과적인 것으로 예상되었다.

본 연구에서 이용한 유량증진방법론은 물리서식처모의를 사용하여 하천 생태계를 유지하기 위한 생태유량을 산정하는데 개발의 목적이 있었다 (Bovee 1986). 하지만 최근에는 2차원 수리모형을 사용하여 하천 내의 다양한 물리적 환경과 인공 구조물에 의한 어류 서식처 변화 및 개선에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면 수제 설치에 따라 평수위와 홍수위에 어류에게 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었으며, 하천 내 다양한 물리환경에 따른 어류 서식처 변화에 대한 연구가 진행되었다 (Boavida et al. 2011, Chou and Chuang 2011). 국내의 사례로는 인공하도식 어도에서 어류 유입 효율에 대한 연구와 도심하천에서 물리적 구조물에 의한 어류 서식서 개선에 대한 연구가 이루어졌다 (Lee et al. 2010, Baek et al. 2013). 또한 보 철거에 따른 하천의 지형 변화와 어류 서식처 개선에 대한 평가가 이루어졌다 (Im et al. 2011). 이러한 기존 연구들은 생태유량 산정과 더불어 물리적 환경의 변화에 따라 어류 서식처가 어떻게 개선되는지 연구한 논문으로 2차원 수리모형을 사용한 연구가 다양한 방법으로 활용될 수 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서는 물리서식처모의 기법을 평수기와 홍수기에 횡적 연결성 회복에 의한 어류 서식처 개선에 대한 예측에 적용하였다.

홍수터와 구하도는 어류의 치어생산성에 매우 중요한 역할을 한다 (Ross and Baker 1983, Turner et al. 1994). 하지만 연구 대상 종인 피라미의 경우 Sung et al. (2005) 에 의해 산란기 때 서식처적합도지수가 제시 되었으나 본 연구지역은 대부분이 정수 구간이어서 적용이 되지 않았다. 붕어 또한 국내외로 산란기와 성어기에 대한 서식처적합도지수의 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 우리나라에 분포하는 어류의

서식처적합도지수를 시급히 개발하여야 할 것이다. 이와 더불어 다양한 어종에 대한 서식처적합도지수가 제시되면 실제로 만경강에 서식하는 지표가 될 수 있는 어종을 대상으로 본류 하도와 구하도의 연결성 복원 후 어류의 서식처 개선을 예측 및 평가하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

Andrews, C.S., Miranda, L.E., Goetz, D.B. and Kröger, R. 2014. Spatial patterns of lacustrine fish assemblages in a catchment of the Mississippi Alluvial Valley. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 24: 634-644.

Baek, K.O., Park, J.H. and Kim, Y.D. 2013. Assessment of influx efficiency at by-pass fishway using two-dimensional physical habitat simulation model -focused on *Zacco platypus*-. Journal of Korea Water Resources Association 146: 629-642. (in Korean)

Boavida, I., Santos, J.M., Cortes, R.V., Pinheiro, A.N. and Ferreira, M.T. 2011. Assessment of instream structures for habitat improvement for two critically endangered fish species. Aquatic Ecology 45: 113-124.

Boavida, I., Santos, J.M., Katopodis, C., Ferreira, M.T. and Pinheiro, A.N. 2013. Uncertainty in predicting the fish-response to two-dimensional habitat modeling using field data. River Research and Applications 29: 1164-1174.

Bovee, K.D. 1986. Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology. Washington, DC, USDI Fish and Wildlife Service. Instream Flow Information Paper. FWS/OBS-86/7. http://www.fort.usgs.gov/Products/Publications/pub_abstract.asp?PubID=1183.

Bray, D.I. 1980. Evaluation of effective boundary roughness for gravel-bed rivers. Canadian Journal of Civil Engineering 7: 392–397.

Chou, W.C. and Chuang, M.D. 2011. Habitat evaluation using suitability index and habitat type diversity: a case study involving a shallow forest stream in central Taiwan. Environmental Monitoring Assessment 172: 689-704.

Erskine, W.D., Saynor, M.J., Erskine, L., Evans, K.G. and Moliere, D.R. 2005. Preliminary typology of Australian tropical rivers and implications for fish community ecology. Marine and Freshwater Research 56: 253-267.

Henning, J. 2004. An Evaluation of Fish and Amphibian Use of Restored and Natural Floodplain Wetlands. EPA CD-97024901-1, Washington, D.C., USA.

Hong, I., Kang, J.G., Kang, S.J. and Yeo, H.K. 2012. Functional assessment for preservation and restoration of wetland-type old river channel: Mangyoung River. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 32: 213- 220. (in Korean)

Im, D.K., Kang, H.S., Kim, K.H. and Choi, S.U. 2011. Changes of river morphology and physical fish habitat following weir removal. Ecological Engineering 37: 883-892.

Junk, W.J., Bayley, P.B. and Sparks, R.E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106: 110-127.

Kang, H.S. 2010. Development of Physical Fish Habitat Suitability Index. Korea Environment Institute, Seoul, Korea. (in Korean)

Kang, H.S. 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: 71-78. (in Korean)

Kim, B.M. and Lee, C.L. 1998. A study on the fish community from the Mangyong River system. Korean Journal of Limnology 31: 191-203. (in Korean)

Kim, I.S., Choi, Y., Lee, C.L., Lee, Y.J., Kim, B.J. and Kim, J.H. 2005. Illustrated Book of Korean Fishes. Kyo-Hak Publishing Co., Seoul, Korea. (in Korean)

Kim, I.S. and Park, J.Y. 2002. Freshwater Fishes of Korea. Kyo-Hak Publishing Co., Seoul, Korea. (in Korean)

Kim, S.H., Cheon, H.T. and Cho, K.H. 2015. Fish community structure of the former channel isolated by channelization in the Mangyeong River, Korea: Implications for connectivity restoration. Ecology and Resilient Infrastructure 2: 22-32. (in Korean)

Kingsford, R.T. 2000. Ecological impacts of dams, water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia. Austral Ecology 25: 109-127.

Kwak, T.J. 1988. Lateral movement and use of floodplain habitat by fishes of the Kankakee River, Illinois. American Midland Naturalist 120: 241-249.

K-water. 2007. A guide book of Rivers in South Korea. K-water, Daecheon, Korea. (in Korean)

Lee, J.H., Jun, T.K. and Jeong, S. 2010. Evaluation of physical fish habitat quality enhancement designs in urban streams using a 2D hydrodynamic model. Ecological Engineering 36: 1251-1259.

Lee, S.H., Oh, K.R., Cheong, T.S. and Jeong, S.M. 2012. An assessment of fish habitat of natural fishway by hydraulic model experiments and numerical analysis.

Journal of Korea Water Resources Association 45: 317-329. (in Korean)

Lee, W.O., Kim, K.H., Kim, J.H. and Hong, K.E. 2008. Study of freshwater fish fauna and distribution of introduced species of Mankyeong River, Korea. Korean Journal of Ichthyology 20: 198-209. (in Korean)

Miranda, L.E. 2005. Fish assemblages in oxbow lakes relative to connectivity with the Mississippi River. Transactions of the American Fisheries Society 134: 1480-1489.

RIMGIS. 2012. http://www.river.go.kr. River Management Geographic Information System, Seoul, Korea. (in Korean)

Ross, S.T., and Baker J.A. 1983. The response of fishes to periodic spring floods in a Southeastern Stream. American Midland Naturalist 109: 1-14.

Schiemer, F. 2000. Fish as indicators for the assessment of the ecological integrity of large rivers. Hydrobiologia 422 / 423: 271-278.

Schiemer, F. and Spindler, T. 1989. Endangered fish species of the Danube River in Austria. Regulated Rivers: Research and Management 4: 397-407.

Steffler, P. 2002. River2D_Bed. Bed Topography File Editor. User's Manual. University of Alberta, Edmonton, Canada. http://www.river2d.ualberta.ca/download.htm.

Steffler, P. and Blackburn, J. 2002. River2D: Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat. Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual. University of Alberta, Edmonton, Canada. http://bertram.civil.ualberta.ca/download.htm.

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: 545-554. (in Korean)

Tockner, K., Schiemer, F., Baumgartner, C., Kum, G., Weigand, E., Zweimueller, I. and Ward, J.V. 1999. The Danube Restoration Project: species diversity patterns across connectivity gradients in the floodplain system. Regulated Rivers: Research and Management 15: 245-258.

Turner, T.F., Trexler, J.C., Miller, G.L. and Toyer, K.E. 1994. Temporal and spatial dynamics of larval and juvenile fish abundance in a temperate floodplain river. Copeia 1: 174-183.

WAMIS. 2015. http://www.wamis.go.kr. Water Resources Management Information System. Assessed 16 May 2015.

Welcomme, R.L. 1979. Fisheries Ecology of Floodplain Rivers. Longman, London, UK.

Yalin, M.S. 1977. Mechanics of Sediment Transport. Pergamon Press, New York, USA.