

하천 내 횡단구조물에 대한 수생태 연속성 평가 방안에 대한 연구

A Case Study of Assessment of the Ecological Connectivity of Cross Sectional Structures in the Flowing Stream

최흥식*

상지대학교 건설시스템공학과 교수

Heung Sik Choi*

Professor, Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

Received 17 November 2020, revised 15 December 2020, accepted 15 December 2020, published online 31 December 2020

ABSTRACT: The present study aimed to assess the longitudinal connectivity owing to migrant characteristics of the target fish. The study area was Wonju-cheon Stream, and the target species were *Zacco platypus* and *Minnows*. The HEC-RAS model was used for the computation of the flow, and the ICE (Information sur la Continuite Ecologique) method was used to analyze the longitudinal connectivity. The longitudinal connectivity was assessed using the minimum overflow height, velocity, and depth of the cross sectional structure of a plunge pool and considering the swimming speed of the target fish. Simulation results indicated that the longitudinal connectivity scores for the *Zacco platypus* and *Minnows* were approximately 76 and 23, respectively.

KEYWORDS: HEC-RAS, ICE method, Lateral structure, Longitudinal connectivity, Wonju-Cheon Stream, *Zacco platypus* and Minnows

요 약: 본 연구는 횡단구조물에서의 어류의 이동 특성에 따른 종적 연결성을 평가하였다. 대상 구간은 원주천이며, 대상 어종은 피라미와 잡고기를 대상으로 하였다. 흐름 분석은 HEC-RAS 모형을 사용하였으며, 종적 연결성 분석은 ICE 방법을 적용하였다. 종적 연결성을 분석하기 위하여 수리분석 결과물 중 횡단구조물 상·하류 수위차, 유속, 하류단 웅덩이 깊이에 따른 대상 어종의 유영 속도를 적용하였다. 그 결과 피라미의 경우 종적 연결성이 약 76점, 잡고기의 경우 종적 연결성이 약 23점으로 나타났다.

핵심어: HEC-RAS, ICE 방법, 횡단구조물, 종적 연결성, 원주천, 피라미와 잡고기

1. 서론

하천 내에서의 수생태계 연속성은 상류와 하류 간 또는 공공 및 수변지역 간에 물, 토양 등 물질의 순환이 원활하고 생물의 이동이 자연스러운 상태를 의미한다 (「물환경보전법」 제22조의2). 특히, 하천 내에서의 생물학적, 수문학적, 물리학적 관점의 측면에서 고려하

였을 때 종적 (longitudinal), 횡적 (lateral), 그리고 수직적 (vertical)인 경로의 유지는 수생태계 연속성의 주요한 구성 요소이며, 연속성 확보는 수생태 건강성 유지를 위한 핵심요소이다. 하천은 상류부터 하류까지 연속적으로 이어져 있으며, 물리적인 환경 뿐만 아니라 물리적인 환경 변화에 따라 서식하는 생물의 종도 연속적으로 변화하여 이어져 있다는 하천 연속성 개념은 매우

*Corresponding author: hsikchoi@sangji.ac.kr, ORCID 0000-0001-9703-3199

© 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.

중요하다 (Vannote et al. 1980).

우리나라를 살펴보면 하천 내 설치된 횡단구조물은 보 34,012개소로서 전국 하천 29,783 km에 대해 약 0.6 km 마다 하천 구조물이 자리 잡고 있어 종적 연결성에 큰 문제가 있는 것으로 나타났다. 최근 농어촌연구원서 전국 3,528개 하천 (국가 61개소, 지방 3,467개소)을 대상으로 보 및 어도 설치 실태를 조사한 결과 어도 설치율은 약 14.9%로 나타났고, 제 기능을 하는 어도는 4.9%에 불과하여 하천 연속성이 매우 열악한 상태이다. 특히, 경제성 어종, 회유성 어종, 법정 보호종과 같은 주요 어종의 경우 연속성이 확보되어야 하지만, 하천 중간에 설치된 횡단구조물로 인해 이동성에 제약을 받고 서식지가 단절되는 등의 악영향을 받고 있는 실정이다. 그러나 수생태 연속성을 확보하기 위해서 우리나라 각 부처에서는 다양한 사업을 추진하고 있다. 국토교통부는 하천에 설치된 보 등 횡단구조물에 대하여 어류의 이동통로인 어도를 설치하거나 기존 어도의 기능 발휘 여부에 대해 전수조사를 실시하여 개·보수의 작업을 실시하였다. 환경부는 옛물길(터) 복원 사업을 통하여 사라진 홍수터 확보, 안정적 치수효과, 다양한 생물 서식처 형성, 생태적 다양성 유지의 효과를 확인하였다. 또한, 생태·환경적 가치와 기능을 중시하는 하천 복원사업이 급증하면서 하천 자연성과 생태적 건강성 회복에 필요한 방법과 기술정보를 제공할 수 있는 가이드라인인 생태하천 복원사업 기술지침서를 제작하여 제공하고 있다. 해양수산부는 어도종합관리계획을 수립하여 하천 연속성 단절을 초래하는 인공구조물에 대한 조사 및 평가를 수행하고 어도를 개선하는 노력을 하고 있다.

수생태계 종적 연속성을 평가하는 방법에 대해서는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 구조물과 어류의 이동성을 통한 평가, 현장 탐사 평가, 하천지형학적 평가가 사용되고 있다. 구조물과 어류의 이동성을 통한 평가 방법에는 ICE (Information sur la Continuite Ecologique, Baudoin et al. 2015), ICF (Index de Connectivitat Fluvial, Sola et al. 2011), FMBAP (Fish Migration Barrier Assessment Protocol, Hansen et al. 2011), 현장 탐사 평가 방법에는 ROE (Referentiel national des Obstacles a l'Ecoulement, Gurnell et al. 2014)와 RBD+DRN (River Barrier Dataset+Detailed River

Network, Gurnell et al. 2014), 하천지형학적 평가 방법에는 DCI (Dendritic Connectivity Index, Cote et al. 2009), RCI (River Connectivity Index, Grill et al. 2014)이 적용되고 있다.

따라서 본 연구는 하천 내 설치된 횡단구조물에 대한 어류의 이동성을 파악하고 하천 내에서의 종적 연결성을 평가하였다. 대상 구간은 다양한 횡단구조물이 설치된 원주천을 대상으로 하였으며, 대상 어종은 잡고기 (*Minnow*)와 피라미 (*Zacco platypus*)를 선정하였다. 횡단구조물에서의 수리 변화를 살펴보기 위하여 미공병단에서 개발한 HEC-RAS 프로그램을 사용하였으며, 어류 이동성 평가는 ICE 방법을 적용하였다. 하천 내 횡단구조물에 대한 어류 이동성을 기반으로 종적 연결성을 정량적으로 평가하고 이를 분석하였다.

2. 연구대상 지역 및 대상 어종

대상 구간인 원주천은 섬강 제1지류인 총 길이 25.66 km 도시하천으로 원주시를 남북으로 관류하고 있다. 최근 원주천은 과거 지방하천에서 국가하천으로 승격되었다. Fig. 1은 연구 대상지역인 원주천을 나타내고 있으며, 본 연구에서는 횡단구조물에서의 어류 이동성을 평가하고 이를 통해 수생태 연속성을 평가하는 것이 목적이므로, 하천정비 사업이 실시된 구간만을 대상으로 하였다. 본 대상 구간에는 총 41개의 횡단구조물이 설치되어 있다. 원주천의 갈수량 (Q_{355}), 저수량 (Q_{275}), 평수량 (Q_{185}), 풍수량 (Q_{95})은 각각 0.401, 0.885, 1.596, 그리고 $3.095 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로, 대상 구간의 유량은 크지 않아 어느 정도의 큰 유량을 제외하고는 수생태 연속성이 확보되지 않을 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 어종은 우리나라 전역에서 우점종으로 분포하는 피라미와 잡고기를 대상으로 하였다. 국외에서는 다양한 어종에 대해 점포 가능 여부 및 유영속도의 기초자료를 구축하고, 이를 이용하여 수생태 연속성을 평가하는데 사용한다. 그러나 국내에서는 다양한 어종에 대한 특성 기초자료가 구축되어 있지 않아 국외의 구축된 자료에서 특성이 비슷한 어종을 대상으로 하였다는 한계점이 있다. 추후 대상 어종의 특성 자료가 확보된다면, 다양한 어종 특히 경제성 어종에 대해 연구를 진행할 예정이다.

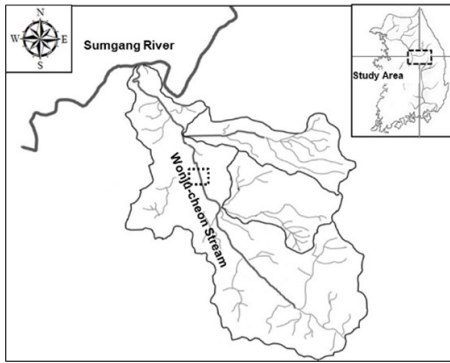


Fig. 1. Study area.

3. 수생태 연속성 분석

3.1 흐름 모형

본 연구에서는 미공병단에서 개발한 HEC-RAS 프로그램을 이용하여 횡단구조물에서의 수리 분석을 수행하였다 (Brunner 2002, U.S. Army Corps Engineers, USACE). HEC-RAS 프로그램은 1차원 정상류 흐름 및 비정상류 흐름 모의가 가능하며, 침전물 운반 계산도 가능하다. 모든 구성요소에서 중요한 요소는 일반적인 기하데이터 표현, 일반적인 기하와 수리 계산 과정을 적용한다. 또한, 3개의 수리 해석 요소와 함께 시스템은 기본 수면형이 계산되었을 때 나타낼 수 있는 수리 디자인 지형을 포함한다. HEC-RAS 프로그램은 그래픽 사용자 공유 (GUI)를 통해 사용자가 프로그램을 쉽게 이용할 수 있도록 구성되어 있다.

3.2 연속성 평가 모형

수생태계 종적 연속성을 평가하는 방법은 크게 4가지 방법으로 구분 가능하다. 구조물과 어류의 이동성을 통한 평가, 직접적인 현장 탐사 평가, 하천지형학적 평가, 그 외 하천 연계성 지수를 이용한 평가가 존재한다. 이들 방법의 대부분은 프랑스나 스페인 등의 유럽국가에서 개발되어 사용되고 있다. 각각의 방법론은 하천내 서식하는 어류를 대상으로 적용하고 있으며, 어류의 특성 기초자료와 함께 횡단구조물에서의 이동성을 평가하는 방법이 정립이 되어 다양하게 적용되고 있는 실정이다.

앞서 설명한 바와 같이 횡단구조물과 어류의 이동성을 평가하는 방법에는 대표적으로 ICE, ICF, FMBAP

방법이 있으며, 평가방법 중 프랑스에서 개발된 ICE 방법을 본 연구에서 종적 연속성 평가 모형으로 적용하여 분석하였다. ICE 방법은 다양한 어류의 특성 자료 (점프 가능 유·무, 유영 속도)와 함께 횡단구조물에서의 어류 이동성을 평가할 수 있다 (Fig. 2). ICE 방법을 이용하여 종적 연속성을 평가할 수 있는 방법론에 대한 자세한 내용은 Baudoin et al. (2015)에 나타나 있다.

4. 종적 연속성 평가 결과

Table 1은 ICE 방법론에서 적용 가능한 대상 어종, 점프 가능 유·무, 유영속도, 점프높이에 대해 나타낸 어류 기초 특성 자료를 나타내고 있다. 표를 살펴보면 대상 어종의 경우 프랑스 하천에 서식하는 어종이며 특히, 경제성 어종에 대해 조사된 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구대상에 적용하기 위한 대상 어종의 선정은 한계점이 존재한다. 그러나 우리나라에 서식하는 잡고기와 피라미의 경우, 해당 표에서 조사된 어종의 특성에 해당되기 때문에 종적 연속성을 평가하는데 적용하였다.

대상 어종 중 하나인 피라미의 경우, Table 1에서 군집 7a에 포함되며 점프가 불가능한 어종이다. 가능한 유영 속도의 범위는 최소 2.5 m/s - 최대 4.0 m/s로 조사되었다. 국내에 서식하는 피라미의 경우 Park et al. (2006)에 의하면 최소 0.49 m/s - 최대 0.73 m/s로 조사되어 ICE 방법론에 조사된 자료와 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 유영 속도의 경우 어종의 체장에 비례한다고 알려져 있으며, 국외의 경우 국내에 서식하는 어종의 경우보다 체장이 크기 때문에 유영 속도 차이가 발생한 것으로 판단된다. 이에 대해서 추후 국내 어종에 맞는 기초자료를 조사 및 구축하여 추가적인 연구가

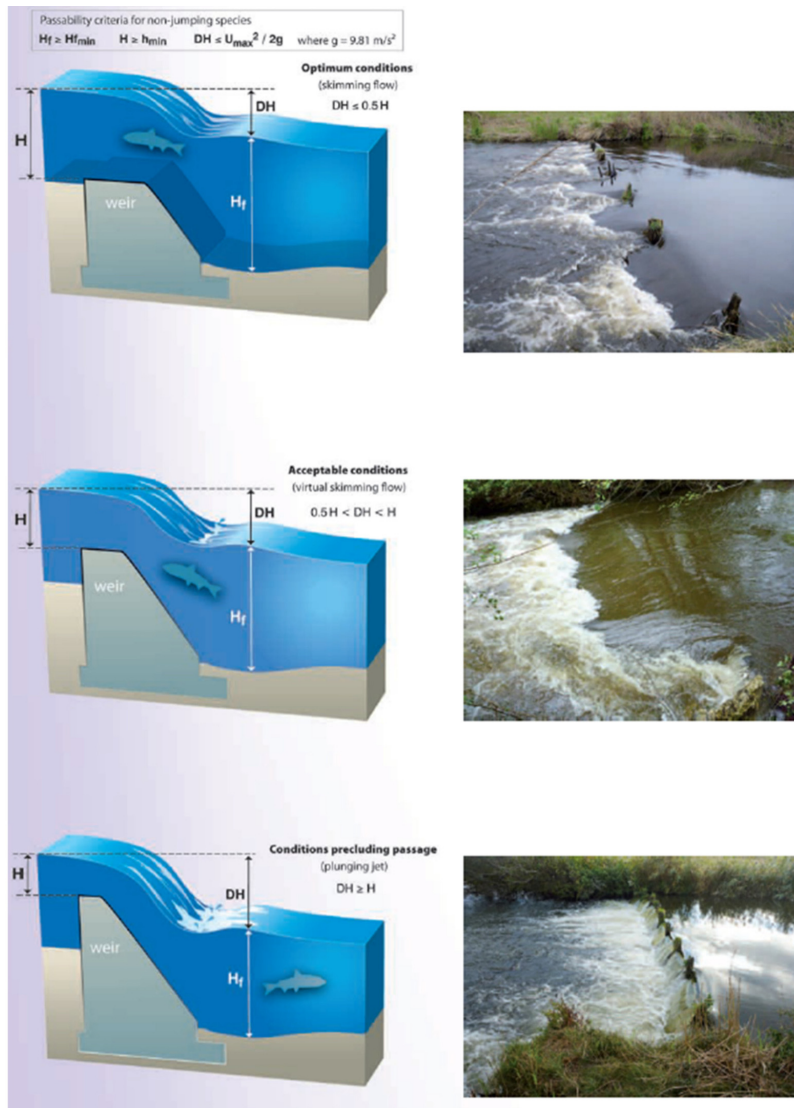


Fig. 2. Longitudinal connectivity concept of ICE method (Baudoin et al. 2015).

필요할 것으로 판단된다. 민물에 서식하는 잡고기의 경우, 군집 10에 포함되는 점프가 불가능한 어종에 속한다. 유영 속도의 범위는 최소 1.0 m/s - 최대 2.0 m/s로 나타났다. 잡고기의 경우는 피라미와 달리 유영 속도의 차이는 크게 발생하지 않는 것으로 나타났지만, 실제 횡단구조물에서의 어류 이동성 확률은 피라미에 비해 상대적으로 크지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 3은 대상 구간의 종적 연결성 평가를 위해 HEC-RAS 프로그램을 구축한 것을 나타낸다. 구간 내에는 41개의 다양한 형태의 횡단구조물이 설치되어 있으며, 대상 어종은 점프가 불가능한 어종이므로 종적 연결성

을 평가하는데 구조물 상·하류간 수위차, 유속, 하류단 웅덩이 깊이를 고려하여 평가하였다. 유량은 원주천의 풍수량 (3.098 m³/s)과 2년 빈도 홍수량 (구간 평균 약 63 m³/s)을 적용하였다. 이는 어류의 이동 특성 반영 인자의 경우, 횡단구조물로의 월류가 발생되어 해당 어종이 유영할 수 있는 유속이 발생되어야 하고, 구조물 상·하류를 기준으로 어느 정도의 수심이 확보되어야 평가를 수행할 수 있다. 다양한 유황 조건에 따라 분석을 하여 조건에 따라 평가를 해야 하지만, 추후에 국내 특성에 맞는 어종별 특성 기초자료를 구축하여 분석할 예정에 있음을 밝힌다.

Table 1. Characteristics of fish species (ICE method)

Cluster	Species	Jump	Swimming speed (m/s)			Jump height (m)		
			Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
1	Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i>)/Brown or sea trout [50-100] (<i>Salmo trutta</i>)	O	4.5	5.5	6.5	1	1.5	2.5
2	Mulletts (<i>Chelon labrosus</i> , <i>Liza ramada</i>)	O	4	4.75	5.5	0.8	1.1	1.8
3a	Allis shad (<i>Alosa alosa</i>)	X	3.5	4.25	5	-	-	-
3b	Twaite shad (<i>Alosa fallax fallax</i>)		3	3.75	4.5			
3c	Sea lamprey (<i>Petromyzon marinus</i>)							
4a	Brown or sea trout [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	O	3	4	5	0.5	0.9	1.4
4b	Brown trout [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)	O	2.5	3	3.5	0.3	0.5	0.8
5	Asp (<i>Aspius aspius</i>)/Pike (<i>Esox lucius</i>)	X	3.5	4.25	5	-	-	-
6	Grayling (<i>Thymallus thymallus</i>)	O	3	3.75	4.5	0.4	0.75	1.2
7a	Barbel (<i>Barbus barbus</i>)/Chub (<i>Squalius cephalus</i>) Nase (<i>Chondrostoma nasus</i>)	X	2.5	3.25	4	-	-	-
7b	River lamprey (<i>Lampetra fluviatilis</i>)		2	2.75	3.5			
8a	Common carp (<i>Cyprinus carpio</i>)	X	2	2.75	3.5	-	-	-
8b	Common bream (<i>Abramis brama</i>)/Pikeperch (<i>Sander lucioperca</i>)							
8c	White bream (<i>Blicca bjoerkna</i>)/Ide (<i>Leuciscus idus</i>) Burbot (<i>Lota lota</i>)/Perch (<i>Perca fluviatilis</i>)/Tench (<i>Tinca tinca</i>)							
8d	Daces (<i>Leuciscus spp. except Idus</i>)							
9a	Bleak (<i>Alburnus alburnus</i>)/Schneider (<i>Alburnoides bipunctatus</i>) Mediterranean barbel (<i>Barbus meridionalis</i>)/Bleageon (<i>Telestes souffia</i>) Crucian carp (<i>Carassius carassius</i>)/Prussian carp (<i>Carassius gibelio</i>) Roach (<i>Rutilus rutilus</i>)/Rudd (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) South-west European nase (<i>Parachondrostoma toxostoma</i>)	X	1.5	2.25	3	-	-	-
9b	Streber (<i>Zingel asper</i>)/Bullheads (<i>Cottus spp.</i>) Gudgeons (<i>Gobio spp.</i>)/Ruffe (<i>Gymnocephalus cernuus</i>) Brook lamprey (<i>Lampetra planeri</i>)/Stone loach (<i>Barbatula barbatula</i>) Spined loach (<i>Cobitis taenia</i>)	X	1	1.5	2	-	-	-
10	Sunbleak (<i>Leucaspius delineatus</i>)/Bitterling (<i>Rhodeus amarus</i>) Threespine stickleback (<i>Gasterosteus gymnurus</i>) Smoothtail ninespine stickleback (<i>Pungitius laevis</i>)/Minnows (<i>Phoxinus spp.</i>)	X	1	1.5	2	-	-	-
11a	European eel [yellow eel] (<i>Anguilla anguilla</i>)	X	< 1.5			-	-	-
11b	European eel [glass eel] (<i>Anguilla anguilla</i>)		< 0.5					

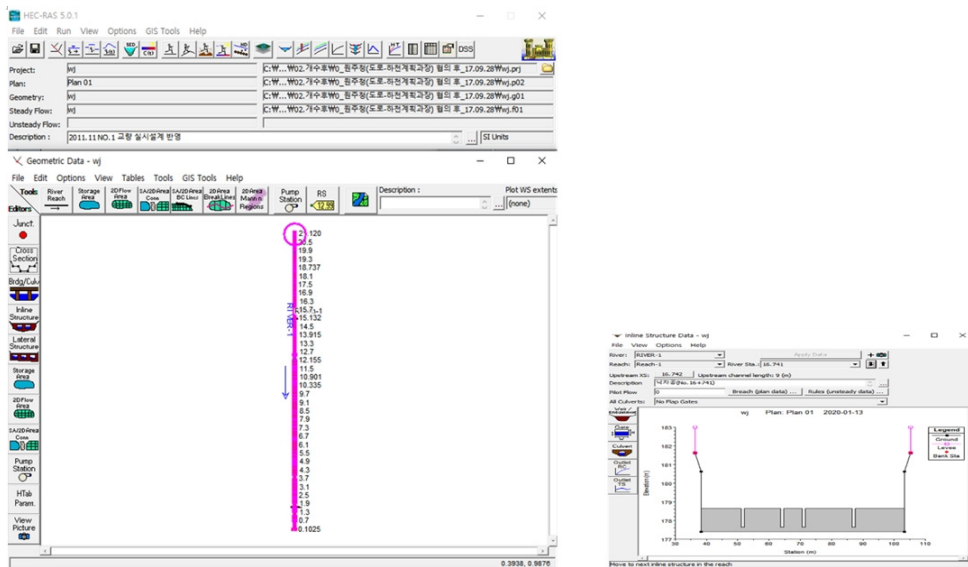


Fig. 3. Construction of HEC-RAS model.

Table 2. Results of the longitudinal connectivity

(a) For averaged-wet flow

Target species	Fish length (cm)	Obstacle + Fish passes		River connectivity score
		O	X	
<i>Minnows</i>	5	3	38	7.32
	8	5	36	12.20
	10	6	35	14.63
<i>Zacco platypus</i>	10	10	31	24.39
	18	14	27	34.15
	25	18	23	43.90

(b) For 2-year flood

Target species	Fish length (cm)	Obstacle + Fish passes		River connectivity score
		O	X	
<i>Minnows</i>	5	11	30	26.83
	8	25	16	60.98
	10	31	10	75.61
<i>Zacco platypus</i>	10	37	4	90.24
	18	41	-	100.00
	25	41	-	100.00

Table 2는 대상 구간 내 설치된 횡단구조물에서의 수리 분석 결과와 대상 어종의 특성을 반영하여 종적 연결성을 평가한 것이다. 종적 연속성에 대한 점수는 대상 구간 내 설치된 횡단구조물 중 대상 어종이 통과할 수 있는지 여부에 대해 산정하였다. 잡고기의 경우 풍수량일 때는 11.38점, 2년 빈도의 유량일 때는 34.15점으로 나타났으며, 피라미의 경우 풍수량일 때는 54.47점, 2년 빈도의 유량일 때는 96.75점으로 나타났다. 피라미의 경우 잡고기의 경우보다 유영 속도가 상대적으로 빠르기 때문에 저유량과 고유량 모두 종적 연결성 점수가 높게 분포한 것으로 판단된다. 상대적으로 저유량인 경우 횡단구조물로의 월류 및 하류단 웅덩이 조건을 만족하지 못하여 종적 연결성은 매우 떨어지는 것으로 판단된다. 그러나 어느 정도 풍족한 유량이 확보된다면 어류의 이동성은 확보되는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 하천 내 설치된 횡단구조물에서 어류의 이동 특성을 고려하여 종적 연속성을 평가하는 것이다. 대상 구간은 섬강 1지류인 원주천 상류 구간으로, 대상 어종은 점프가 불가능한 어종인 피라미와 잡고기를 목

표로 하였다. 수리 분석은 HEC-RAS 프로그램을 사용하였으며, 종적 연결성 평가는 프랑스에서 개발된 ICE 방법을 적용하였다. 종적 연결성은 횡단구조물에서의 상·하류 수위차, 유속, 하류단 웅덩이 깊이를 고려하여 분석하였다. 적용된 유량은 원주천의 풍수량과 2년 빈도 홍수량을 경계조건으로 적용하였다. 종적 연결성 분석을 수행한 결과, 피라미의 경우 약 76점으로 분석되었으며, 잡고기의 경우 약 23점으로 나타났다. 추후에 국외에서의 어종 특성 기초자료가 아닌 국내 어종에 맞는 자료에 대해 분석 및 구축된다면, 수생태 연속성 평가 및 복원 관점에서의 횡단구조물 관리 계획 및 다양한 정책 판단에 중요한 기초자료가 수립될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 상지대학교 2020년 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Baudoin, J.M., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., and Voegtle, B. 2015. Assessing

- the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application. Onema.
- Brunner, G.W. 2002. Hec-ras (river analysis system). In North American Water and Environment Congress & Destructive Water (pp. 3782-3787). ASCE.
- Cote, D., Kehler, D.G., Bourne, C., and Wiersma, Y.F. 2009. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landscape Ecology* 24(1): 101-113.
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C., and Liermann, C.R. 2014. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters* 10(1): 015001.
- Gurnell, A.M., Gonzalez Del Tanago, M., O'Hare, M.T., Van Oorschot, M., Belletti, B., Buijse, T., Garcia, D.J., Grabowski, R., Mountford, O., Rinaldi, M., Solari, L., Szweczyk, M., and Vargas-Luna, A. 2014. Influence of natural hydromorphological dynamics on biota and ecosystem function. Part 1 (chapters 1 to 3 of 6). Deliverable 2.2 Part 1 of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.
- Hansen, B., Nieber, J., Johnson, S., and Marr, J. 2011. Performance assessment of oversized culverts to accommodate fish passage. Final Report 2011-19, Department of Transportation Research Services Section, Minnesota, USA.
- Park, S.Y., Yoon, B.M., Lee, S.H., and Kim, S.J. 2006. A study on the characteristics of local migrating fish (*Zacco platypus*) in the experimental flume, Proceedings of Korean Society Civil Engineering Conference, Korean Society Civil Engineering, pp. 536-539. (in Korean)
- Sola, C., Ordeix, M., Pou-Rovira, Q., Sellares, N., Queralt, A., Bardina, M., and Munne, A. 2011. Longitudinal connectivity in hydromorphological quality assessments of rivers. The ICF index: A river connectivity index and its application to Catalan rivers. *Limnetica* 30(2): 0273-292.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., and Cushing, C.E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37(1): 130-137.