

다양한 하천복원 기술을 통한 원주천의 어류 서식처 향상에 대한 연구

A Study on the Improvement of Fish Habitat through Various River Restoration Techniques in the Wonju-cheon Stream, Korea

김종주¹ · 최종근¹ · 최흥식^{2*}

¹상지대학교 토목공학과 석사과정, ²상지대학교 토목공학과 교수

Jongjoo Kim¹, Jonggeun Choi¹ and Heung Sik Choi^{2*}

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

Received 10 September 2019, revised 16 September 2019, accepted 16 September 2019, published online 30 September 2019

ABSTRACT: The present study performed the impact of the change of low-flow channel on aquatic habitat in a reach of the Wonju-cheon Stream, Korea. The target species was *Zacco platypus*, a dominant species in the middle- and upper-stream of Wonju Cheon. The River2D model was used for the computation of the flow and the habitat suitability index model was used to estimate the quantity and quality of fish habitat using habitat suitability curves. First, for the restoration to low-flow channel, the restoration was conducted in a form close-to-nature flow channel, and the width of the low-flow channel was expanded and reduced. The results indicated that the Weighted Usable Area (WUA) of the target species improved by about 72% when the width of the low-flow channel was expanded, and that the fish habitat decreased by about 25% when the width of the low-flow channel was reduced.

KEYWORDS: Change of low-flow channel, Close-to-nature flow channel, Dominant species, Physical habitat simulation, Weighted usable area

요약: 본 연구는 저수로 변화를 통한 하천 복원이 수생 서식처에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원주천을 대상으로 물리서식처분석을 수행하였다. 대상 어종은 원주천에 서식하는 우점종인 파리를 대상으로 하였다. 흐름 분석은 2차원 모형인 River2D 모형을 사용하였으며, 서식처 분석은 서식처 적합도 곡선을 이용하여 서식처의 양과 질을 산정하는 서식처 적합도 모형을 사용하였다. 먼저 저수로 복원을 위하여 자연 하도에 가까운 형태로 복원을 하고 저수로 폭을 확대 및 축소하여 설계하였다. 그 결과 저수로 폭의 변화를 확대하였을 때 대상 어종의 가중가용면적은 각각 약 72% 향상되었으며, 저수로 폭을 축소하였을 때는 서식처가 약 25% 악화되는 것으로 나타났다.

핵심어: 저수로 변화, 자연형 하도, 우점종, 물리 서식처 분석, 가중가용면적

1. 서론

하천은 과거부터 인간의 삶과 함께 문화적, 환경적, 생태적으로 중요한 가치를 가진 자연자원이다. 20세기

초까지는 하천은 인간에게 수운, 관개, 친수 등의 주된 기능을 제공하였다. 그러나 20세기 초부터는 하천을 이용한 수력 발전이 등장하면서 하천 개발이 시작되었다. 또한 이와 더불어 인구가 증가하고 산업이 발전하면서

*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.

하천 정비 사업이 적극적으로 시작되었고 이에 따라 인공 제방의 축조와 하도 정비를 하는 상황이 발생되었다. 이는 이수 및 치수 기능의 극대화를 가져왔고, 상대적으로 환경 기능은 위축 및 저하되고 일부 하천은 소멸되는 상황에 이르게 되었다. 그러나 최근에는 오염된 하천이나 도시개발의 일환으로 인위적으로 조성된 하천을 원래의 모습으로 복원하고자 하는 하천복원 사업이 수행되기 시작했고, 하천에 서식하는 수생물의 서식처 복원에 초점을 맞춘 연구가 활성화되고 있다 (Tieggs et al. 2005, Choi and Choi 2009, Choi and Kim 2013).

하천 복원은 어떤 기준에 의해서 하천을 복원할지를 정의하기 매우 어렵기 때문에 복원의 정의는 복잡하다고 할 수 있다. 하천복원은 하천 정비 사업의 일환으로 훼손된 하천을 원래 교란 전 하천이 지니고 있는 생태적 구조와 기능에 가깝게 되돌리는 것이다. 일반적인 하천 복원은 유역 차원의 복원과 하천 복원을 통해 생태적 건전성을 회복하도록 도와주는 도구가 될 수 있다. 이러한 하천 복원이 수생물에게 주는 영향을 분석하기 위해 최근에는 다양한 모니터링 사업 및 물리서식처 분석이 수행되고 이를 통해 계획이 수립되고 있다. 하천복원 사업을 통한 수생물의 서식처 향상을 위한 생태유량 재산정 (Tharme 2003, Papadaki et al. 2014, Choi et al. 2019), 하천 복원 기법을 통한 수생물에 미치는 영향 파악 (Gard 2006, Hesselink et al. 2006, Schwartz and Herricks 2007, Schwartz et al. 2015, Kim et al. 2015, Chegal et al. 2016, Choi et al. 2019) 등을 들 수 있다. 하지만 기존 연구는 일반적인 하천의 복원 사례에 집중되어 있다는 한계점이 있다. 그러나 도시하천 복원은 도시하천이라는 특성을 어떠한 방향으로 설정하느냐가 관건이다. 도시하천의 복원방향은 원래의 자연하천에서부터 도시의 특수성을 감안하여 수생태의 상태가 되돌리는 것까지 다양하게 시도될 수 있다.

따라서 본 연구는 도시하천에서 자연에 가까운 하도 형상 복원 및 저수로 폭의 변화를 통한 복원기법이 우점종에 미치는 영향을 파악하기 위하여 물리서식처 분석을 수행하였다. 대상 구간은 원주천 중·상류 1.1 km 구간을 대상으로 하였으며, 대상 어종은 우점종인 피라미 (*Zacco platypus*)를 선정하였다. 2차원 흐름모형 중 하나인 River2D 모형을 이용하여 수리분석을 수행하고 서식처 적합도 모형을 이용하여 서식처 분석을 수행하였다. 현단면인 복단면 형태를 기준으로 자연 하도 형

태에 가까운 복원과 저수로 폭의 확대 및 축소를 통해 다양한 복원기법을 적용하였다. 그리고 서식처 분석을 통하여 저수로 복원 설계 전·후에 대한 서식처의 질적·양적 변화를 비교 및 분석하였다.

2. 연구대상 지역 및 대상 어종

원주천은 원주시 판부면 금대리에서 발원하여 섬강으로 유입하는 국가하천으로 유로연장 25.66 km, 유역면적 152.9 km²인 도시하천이다. 원주천은 원주시를 남북으로 관류하는 하천으로 과거부터 꾸준히 하천 조성 사업이 진행되어 왔다. 원주천의 상류는 하천 조성 사업이 진행되지 않은 구간이 많지만, 중류부터 하류까지는 치수적으로 안전하고 생태적인 요소도 고려하여 다양하게 조성되어 있는 실정이다. Fig. 1은 연구대상 지역인 원주천을 나타내고 있으며, 1.1 km 구간을 대상으로 하였다. 본 연구대상구간은 하천정비사업이 조성되어 있는 구간인 원주천 중·하류에 위치하는 복단면 하천으로 치수적으로 안전한 구간이다. 원주천 하천정비기본계획(MOCT 1999)에 의하면 대상 구간의 평균 중앙입경은 19.9 mm로 자갈하상인 것으로 나타났다. 연구대상지역의 갈수량 (Q_{355}), 저수량 (Q_{275}), 평수량 (Q_{185}), 풍수량 (Q_{95})은 각각 0.401, 0.885, 1.596, 그리고 3.095 m³/s 이다.

본 연구에서 물리서식처분석에 사용된 어종은 대상 구간에 우점종으로 서식하고 있는 피라미를 대상으로 선정하였다. 원주천의 구간별 군집 분석의 결과에 따라 피라미를 선정하였으며, 피라미의 경우 다른 어우점종의 어종보다 상대적으로 모니터링 자료 및 개체수가 많이 분포하기 때문에 물리서식처분석의 결과가 대상 구간의 서식처 특성을 잘 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

3. 물리 서식처 분석

3.1 흐름 모형

본 연구에서는 수리분석 및 서식처 분석을 수행하기 위하여 2차원 수심평균 모형인 River2D를 사용하였다 (Steffler and Blackburn 2002). 지배방정식은 연속방정식과 종방향 (x)과 횡방향 (y)의 운동량 방정식으로 이루어지며 각각 다음 Eqs. 1 - 3과 같다.

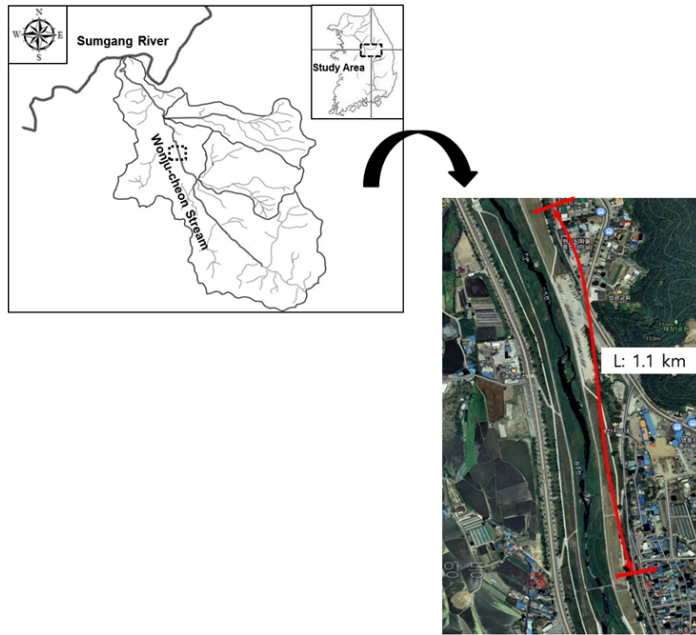


Fig. 1. Study area.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \tag{Eq. 1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial x} \\ & = gH(S_{ox} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) \right\} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \right\} \end{aligned} \tag{Eq. 2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial y} \\ & = gH(S_{oy} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) \right\} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right\} \end{aligned} \tag{Eq. 3}$$

여기서 t 는 시간, x, y 는 각각 흐름방향과 횡방향 좌표, H 는 수심, U, V 는 각각 x, y 방향의 수심평균된 유속, $q_x (= HU), q_y (= HV)$ 는 각각 x, y 방향 단위 폭 당 유량, S_{oi}, S_{fi} 는 각각 방향 하상경사와 마찰경사이며, τ_{ij} 는 난류 응력 텐서이다. Eqs. 2 and 3의 x 와 y 방향의 마찰경사를 표현하면 다음과 같다.

$$S_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{gHC_s^2}, S_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{gHC_s^2} \tag{Eq. 4a, 4b}$$

여기서 C_s 는 무차원 Chezy 계수로 유효조도 높이 (k_s , 단위: m)와 관련이 있으며, 본 연구에서 사용된 모형이 유효조도 높이를 통하여 하상 마찰경사의 변화를 잘 반영하고 이를 통해 다양한 흐름 특성을 갖는 실제 하천의 모의를 매우 잘 수행하는 것으로 알려져 있다 (Steffler and Blackburn 2002). 본 연구에서는 해당 구간의 적절한 한 모의 결과를 도출하기 위해 유효조도 높이를 1.12 m - 1.34 m의 값을 사용하여 적용하였다. 본 연구에서 사용된 격자는 3,481 개의 노드와 6,737 개의 격자수로 구성되어 있다. 상류단 경계조건은 유량을 사용하였으며, 하류단은 HEC-RAS 모형을 이용하여 동일 대상 구간에서의 유량 조건에 따른 하류단 단면의 수위 조건을 적용하였다.

3.2 서식처 모형

본 연구에서 서식처 분석을 수행하기 서식처 적합도 모형을 사용하였다. 서식처 적합도 모형은 수심, 유속, 기층과 같은 물리적 인자들의 서식처 적합도 곡선을 구축하고 이를 이용하여 물리적 인자들 간의 관계를 통해 최종 대상 어종이 갖는 서식처의 적합도 정도를 산정하는 방법이다. 이때의 서식처 적합도를 복합 서식처 적합도 지수라 하며 일반적으로 곱셈법을 이용하여 산정한다. 본 연구에서는 곱셈법을 이용하여 복합 서식처

적합도 지수 (Composite Suitability Index, CSI)를 산정하였으며, 이를 연구 대상 구간 내 대상어종이 차지하는 서식처의 면적을 정량적으로 나타내는 가중가용면적 (Weighted Usable Area, WUA)을 산정하는데 이용하였다. 본 연구에서 사용된 복합 서식처 적합도 지수와 가중가용면적 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$CSI_i = f_v(v_i) \times f_h(H_i) \times f_s(s_i) \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 $f_v(v_i)$, $f_h(H_i)$, $f_s(s_i)$ 각각 수심, 유속, 기층에 대한 서식처 적합도 값이다.

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i \times CSI_i = f(Q) \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서 Q는 유량을 나타내며, CSI_i 와 A_i 는 각각 i 셀에서의 복합 서식처 지수와 셀의 면적을 나타낸다.

Fig. 2는 본 연구에서 대상어종으로 선정한 피라미의 인자별 서식처 적합도 곡선을 나타낸 것이다. 서식처 적합도 곡선은 Gosse (1982)의 방법을 이용하여 모니터링 자료 (Ministry of Science and Technology 2007, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2011)를 이용하여 구축하였다. 이 방법은 모니터링 자료에서 각각의 물리적 인자들 조건에 대한 범위를 설정 및 개체수를 정리하고 각각의 인자별 개체수 분포가 전체 대상 어종 개체수의 상위 50%, 75%, 90%, 그리고 95%의 구간에 해당하는 값에 각각 서식처 적합도 지수의 값을 1.0, 0.5, 0.1, 그리고 0.05를 부여하는 방법이다. 구축된 서식처 적합도 곡선을 이용하여 최적의 물리적 인자들의 조건을 살펴보면 대상어종이 선호하는 서식처 조건 및 특성을 파악할 수 있다. 피라미의 경우 선호하는 수심은 0.25 m - 0.45 m의 범위이며, 유속은 0.25 m/s - 0.65 m/s의 범위에서 최적의 조건을 보이는 것으로 나타났다. 기층의 경우 자갈을 선호하는 것으로 나타났다. 피라미의 경우 선호하는 인자의 범위가 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 어느 정도 수심이 확보되고 유속이 잘 발달되어 있는 곳을 선호하는 유수성 어종인 것으로 나타났다. 또한 본 대상구간은 하천 정비 사업이 수행된 곳으로 기층은 대부분 자갈로 구성되어 있다. 따라서 기층의 인자는 서식처 변화에 거의 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

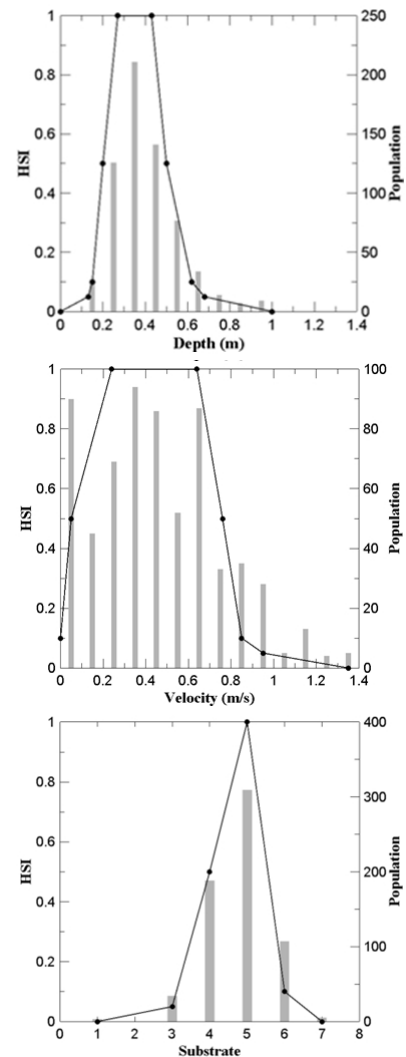


Fig. 2. Habitat suitability curves for *Zacco platypus*.

4. 결과

4.1 저수로 하도 형성 유량에 따른 저수로 폭 변화 적용

Fig. 3은 본 연구 대상 지역의 강터유향 조건에서의 수심과 유속의 분포 결과를 나타내고 있다. 일반적으로 강터유향은 하도 형성 유량으로 알려져 있으며, 안정하도에서의 강터유향은 1년에서 2.5년 재현빈도를 갖는 유량 사이에 분포하는 것으로 연구되고 있다 (Leopold et al. 1964, Andrews 1980, Lee and Choi 2017). 원주천의 강터유향은 $31.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었으며, 이를 이용하여 저수로 물길을 파악하고 수심과 유속의 분포 결과

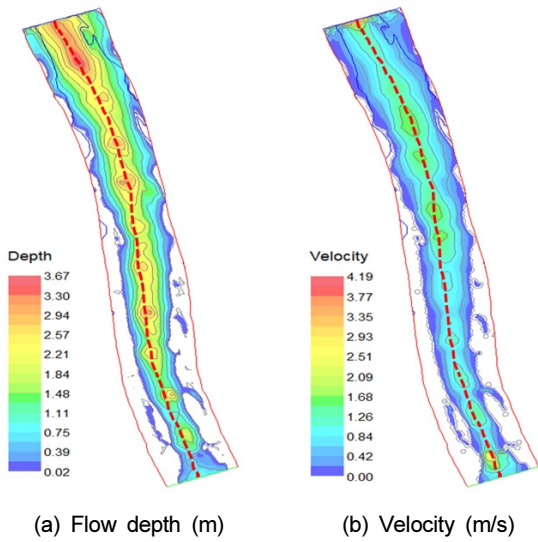


Fig. 3. Results of the flow modelling ($Q=31 \text{ m}^3/\text{s}$).

에 따라 대상구간의 중심부를 나타내었다. 이 중심부를 기준으로 하여 본 연구에서 적용한 다양한 복원 기법에 대해 지형자료를 조성하였다. Fig. 3에서 보면 알 수 있듯이, 대상 구간의 지형학적인 특성이 잘 반영되어 모의되었음을 확인할 수 있다. 특히, 대상구간은 치수적으로 안전한 복단면의 형태를 나타내고 있을 뿐만 아니라 지형고의 높고 낮음이 반복되는 여울-소 구조가 형성되어 있었는데, 수심과 유속의 결과가 이를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 강턱유량 조건에 따른 수심은 최대 약 3.67 m, 유속은 최대 4.19 m/s까지 저수로 중앙을 따라 발생하는 것으로 나타났으며, 이를 제외하고는 수심은 0.3 m - 1.0 m 사이에 분포하며 유속은 0.4 m/s - 0.8 m/s의 분포를 가진다.

Figs. 4 and 5는 저수로의 폭을 다양하게 변화시킨 결과를 나타내고 있다. 또한 Table 1에서도 각각의 경우에 대해 복원기법에 대해 정리하여 나타내었다. Case 0

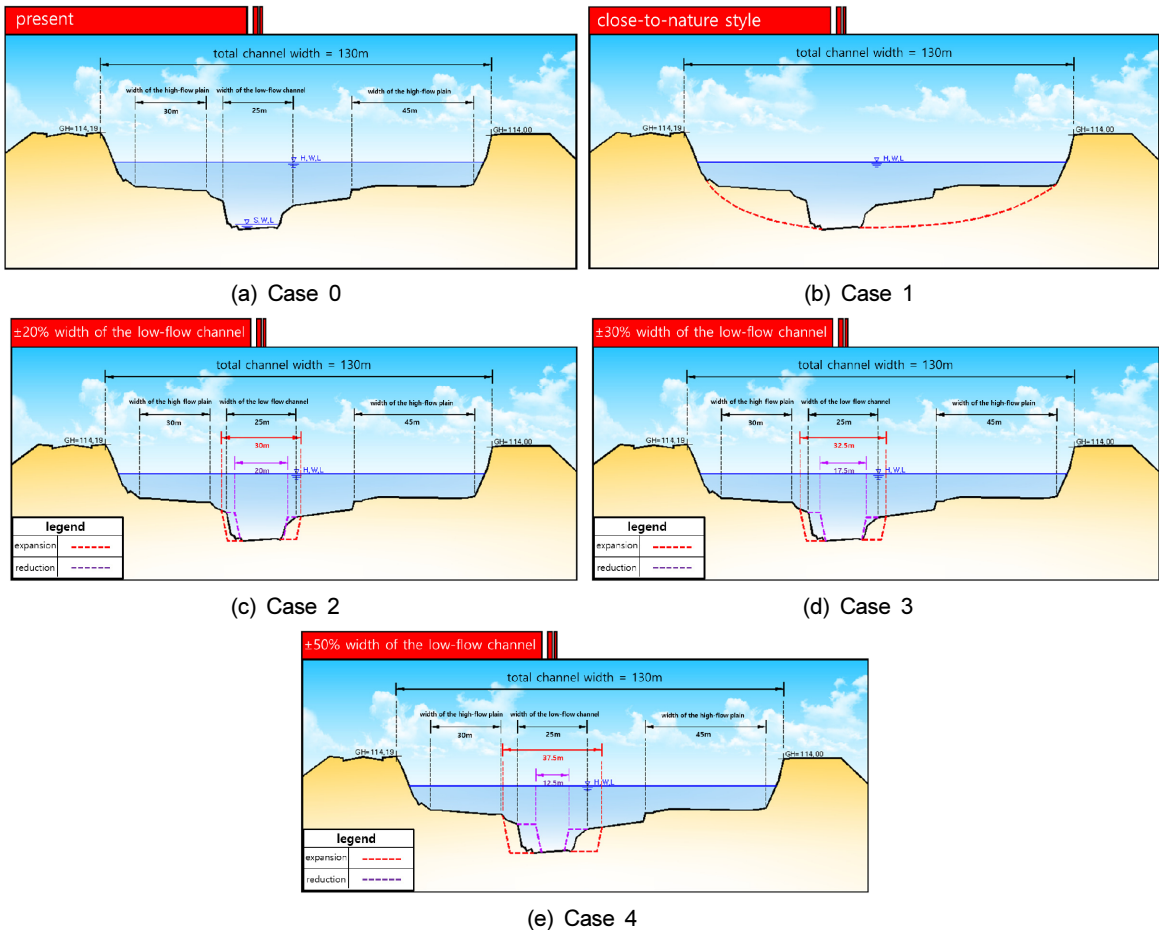


Fig. 4. The change of low flow channel for each cross section.

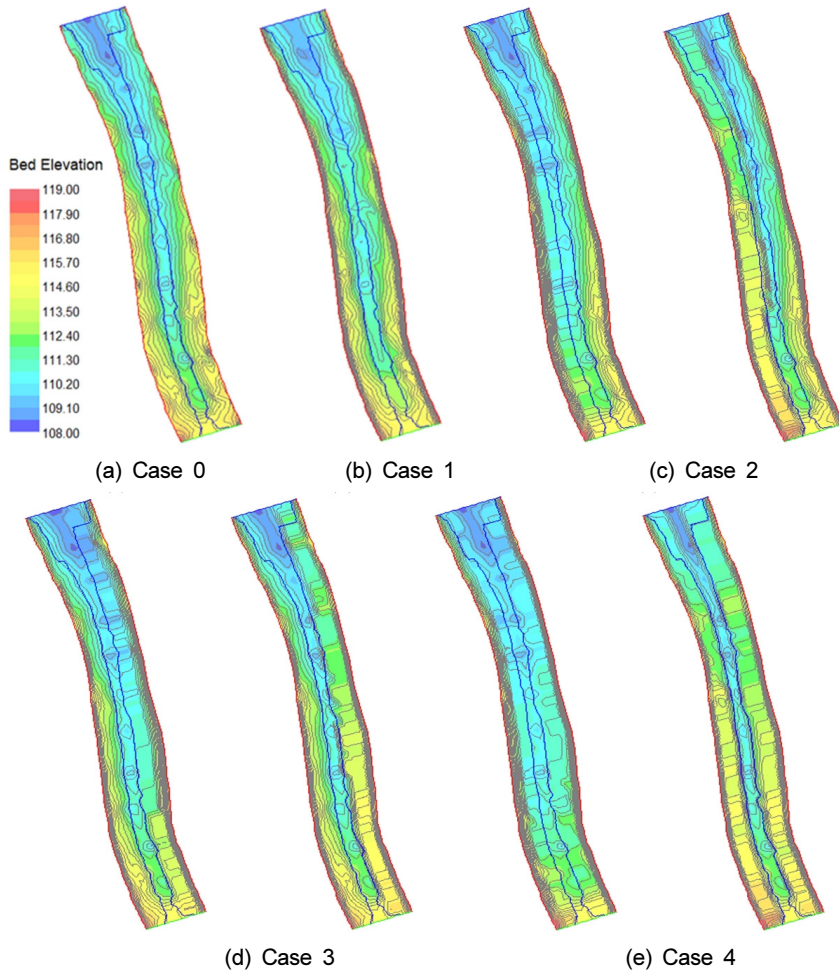


Fig. 5. Results of the various restorations of low flow channel.

Table 1. Restoration techniques for each case

Case	Restoration techniques	WUA variation (%)
Case 0	Present	-
Case 1	Close-to-nature style	10.8
Case 2	+20% width of the low-flow channel	83.8
	-20% width of the low-flow channel	-10.0
Case 3	+30% width of the low-flow channel	42.9
	-30% width of the low-flow channel	-25.5
Case 4	+50% width of the low-flow channel	148.5
	-50% width of the low-flow channel	-40.2

은 대상구간의 현상태인 복단면의 형태를 나타내며, Case 1은 복단면의 형태에서 자연하도에 가까운 홍수터가 존재하지 않는 단단면의 형태를 나타내고 있다. Case 2 - Case 4는 현상태인 복단면의 하도 형태에서 저

수로 구간만 좌·우안으로 각각 20%, 30%, 50%를 확대 및 축소하는 경우를 나타내고 있다. 최대 50%까지 저수로 구간을 확대 및 축소한 이유는 현재 대상구간의 홍수터는 친수 활동 및 주차장 등으로 활용도가 매우 높기

때문에 설정하게 되었다. 기존의 복단면 형태보다 다양한 저수로 폭을 조성하였을 때, 대상 어종의 서식할 수 있는 공간의 변화뿐만 아니라 수리 특성이 변하게 되므로 서식처의 질적 및 양적 변화가 발생될 것으로 판단된다.

4.2 복합 서식처 적합도 지수 분포 및 가중가용면적

Fig. 6은 현상태와 각각의 복원기법을 적용하였을 때 유량이 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 조건에서의 피라미에 대한 복합서식처 적합도지수 분포를 나타낸 그림이다. 유량 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 조건으로 모의를 수행한 이유는 대상 구간의 피라미에 대한 유량에 따른 가중가용면적의 변화를 살펴보았을 때, 가중가용면적이 최대가 발생하는 유량이 $5 \text{ m}^3/\text{s}$

로 이는 연구 대상구간의 피라미에 대한 최적 생태유량이라고 할 수 있다. 현상태의 경우 복단면의 형태로 수심과 유속이 빠르게 분포하는 저수로 중심부보다 상류 및 저수로 끝부분에 서식처가 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Case 1의 경우 복단면에서 단단면의 형태로 자연 하도에 가깝게 복원하였으며, 이는 현상태의 저수로보다 하폭이 증가하였다. 그 결과 현상태보다 서식처가 향상된 것을 확인할 수 있으며, 이는 대상 어종이 선호하는 수심과 유속의 범위에 포함되어 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. Case 2 - Case 4의 경우 저수로의 폭을 확대 및 축소할 경우를 나타낸 것으로 앞선 Case 1의 결과와 같이 저수로의 폭을 확대한 경우 현상태보다 서식처가 매우 향상되는 것을

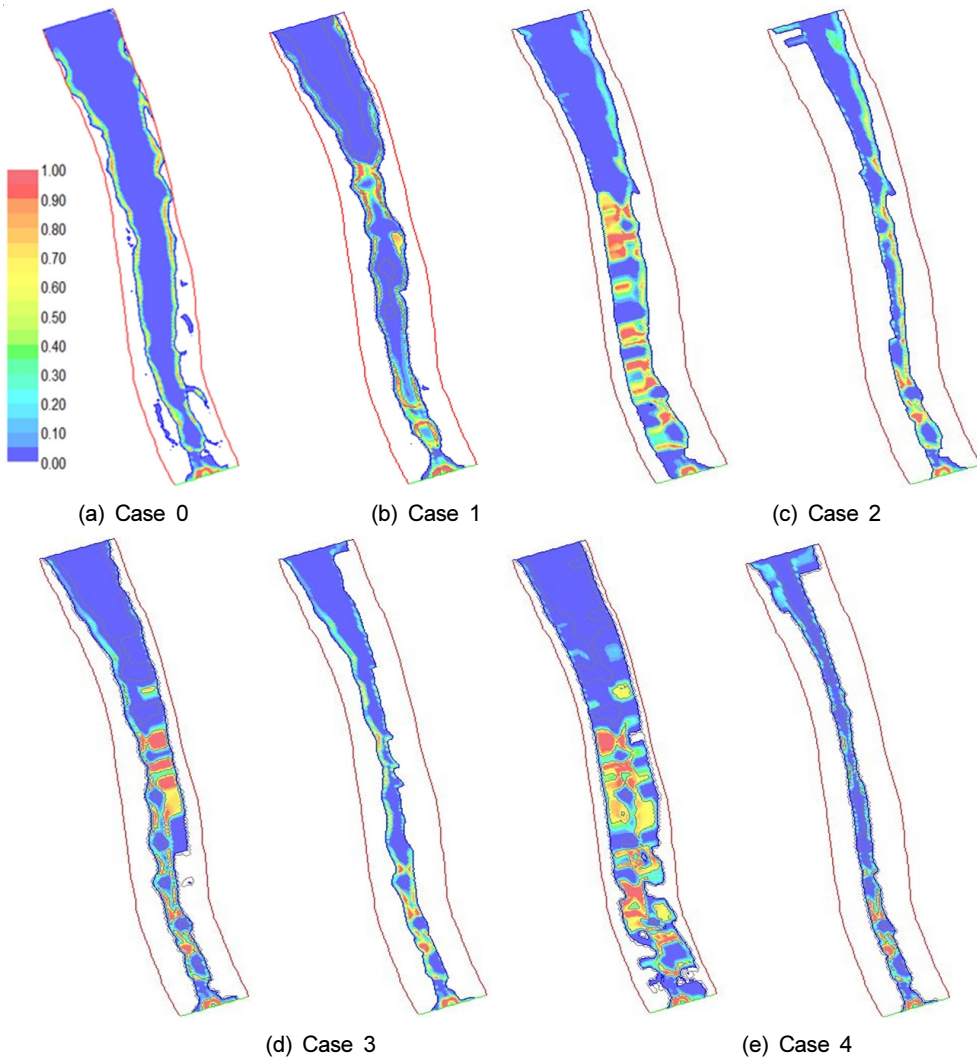


Fig. 6. Distributions of CSI for the target species ($Q=5.0 \text{ m}^3/\text{s}$).

확인할 수 있다. 그러나 저수로의 폭을 축소할 경우는 부분적으로 서식처가 향상되는 것을 확인할 수 있지만, 현상태보다 저수로 면적이 감소하였기 때문에 정량적으로는 대상어종이 서식하는데 필요한 적합한 서식처의 면적은 작아질 것으로 판단된다.

정량적으로 서식처의 변화를 살펴보면, 가중가용면적이 현상태는 8,747 m², Case 1은 9,693 m², Case 2는 저수로 폭 확대 및 축소의 경우 각각 16,081 m², 7,876 m², Case 3은 저수로 폭 확대 및 축소의 경우 각각 12,501 m², 6,514 m², 마지막으로 Case 4는 저수로 폭 확대 및 축소의 경우 각각 21,737 m², 5,235 m²로 나타났다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 현상태 대비 저수로 폭을 50% 확대하였을 때 서식처의 변화가 가장 많이 발생하였으며, 저수로 폭을 확대하였을 때 평균적으로 약 72% 서식처가 향상된 것으로 나타났다. 또한 치수적으로 안전한 복단면의 형태는 피라미가 서식하기에는 적합하지 않은 공간임을 확인할 수 있었으며, 자연 하도에 가까운 형태 또는 저수로의 폭을 확대하는 것이 서식 공간을 확보하는데 유용한 것임을 확인하였다. 추후에 하천 복원 사업을 수행하였거나 생태하천 복원 사업을 수행할 예정에 있는 하천이라면 자연 하도에 가까운 형태 또는 복단면으로 하도를 조성하고 저수로 폭을 다양하게 조성함으로써 치수 안전성을 확보하고 더불어 어류의 서식 공간을 확보하는데 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 치수적으로 안전성을 확보하고 있는 원주천 중·상류 지역 1.1 km 구간을 대상으로 현단면을 기준으로 자연 하도에 가까운 단면 형태 복원과 저수로 폭의 확대 및 축소를 통한 복원기법 도입을 통해 물리서식처 분석을 수행하였다. 대상 어종은 원주천의 중·상류에 서식하는 우점종인 피라미를 목표로 하였다. 수리분석과 서식처분석은 River2D 모형과 서식처 적합도 모형을 사용하였다. 서식처 적합도 모형에 사용된 서식처 적합도 곡선은 Gosse (1982)의 방법을 이용하여 구축하였으며, 수심, 유속, 기층을 모두 고려하여 물리 서식처 분석을 수행하였다.

그 결과 자연형 단면 형태에 가깝게 복원한 경우 서식처가 약 11% 향상되는 것으로 나타났으며, 저수로 폭 확대 및 축소의 경우 현상태를 기준으로 축소할 경우

10.0% - 40.2% 서식처가 악화되며, 확대시에는 42.9% - 148.5% 서식처가 향상된 것으로 나타났다. 하천 정비 가 완료된 급회 대상구간의 경우 현재 이용되고 있는 둔치폭은 유지하되, 저수로 완경사 구간을 통해 저수로 폭을 50% 확대 시 대상 어종인 피라미의 서식처 공간이 가장 많이 향상되었다. 저수로 폭 50% 확대 단면을 통해 거석배치 및 사형조성 등 다양한 복원기법을 추가적으로 도입하여 서식처 변화 여부를 추가적으로 연구할 예정에 있다. 본 연구를 통하여 치수적으로 안전하고 어류의 서식처 향상을 조성할 수 있는 적용 사례를 분석함에 있어 하천 복원 및 생태적으로 건강한 하천을 조성할 수 있는 통합적인 측면에서 매우 유용한 사례가 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 연구비지원 (NRF-2018R1D1A3B07049297)에 의해 수행되었습니다.

References

- Andrews, E.D. 1980. Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa river basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology*, 46(3-4): 311-330.
- Bovee, K.D., Lam, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taklor, J., and Henriksen, J. 1998. *Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. Biological Resources Division Information and Technology Report. USGS, Fort Collins, Colorado, USA.
- Chegal, S.D. Cho, G.J., and Kim, C.W. 2016. Development of Hydraulic Analysis and Assessment Models for the Restoration of Ecological Connectivity in Floodplains Isolated by Levees. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 3(4): 307-314.
- Choi, J.K., Byeon, H.K., and Seok, H.K. 2000. Studies on the dynamics of fish community in Wonju Stream. *Korean Journal of Limnology* 33: 274-281. (in Korean)
- Choi, H.S. and Choi, J.G. 2009. Analysis of channel habitat characteristics for soundness of fish community at Wonju-stream. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE 29: 311-317. (in Korean)
- Choi, H.S. and Kim, S.M. 2013. Optimization of channel structure for fish Habitat Suitability Enhancement. *Journal of Korea Water Resources Association* 46: 267-276. (in Korean)
- Choi, J., Choi, H.S., and Choi, B. 2019. A Case Study of

- the Habitat Changes due to the Restoration of Low-Flow Channel. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(1): 58-68.
- Choi, H.S., Choi, J., and Choi, B. 2019. Impact on Fish Community by Restoration of Ecological Waterway using Physical Habitat Simulation. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(1): 1-11.
- Gard, M. 2006. Modeling changes in salmon spawning and rearing habitat associated with river channel restoration. *International Journal of River Basin Management*, 4(3): 201-211.
- Gillenwater, D., Granata, T., and Zika, U. 2006. GIS-based modeling of spawning habitat suitability for walleye in the Sandusky River, Ohio, and implications for dam removal and river restoration. *Ecological Engineering*, 28(3): 311-323.
- Gosse, J.C. 1982. Microhabitat of rainbow and cutthroat trout in the Green River below Flaming Gorge Dam. Final report, contract 81 5049. Utah Division of Wildlife Resources, Salt Lake City. p. 114.
- Hesselink A.W., Kleinhans M.G., and Boreel G.L. 2006. Historical discharge measurements in three Rhine branches. *Journal of Hydraulic Engineering* 132: 140-145.
- Im, D., Kang, H., Kim K-H., and Choi, S-U. 2011. Changes of river morphology and physical fish habitat following weir removal. *Ecological Engineering*, 37: 883-892.
- Kim, S.H. Kim, D., and Cho, K.-H. 2015. Evaluation of Habitat Improvement Using Two-Dimensional Fish Habitat Modeling after the Connectivity Restoration in an Isolated Former Channel. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 2(2): 137-146.
- Lee, W.H. and Choi, H.S. 2017. Characteristics of bankfull discharge and its estimation using hydraulic geometry in the Han River basin. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-10.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P. 1964. Fluvial processes in geomorphology. W. H. Freeman and Company.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2011. Development of Techniques for Creation of Wildlife Habitat Environment. Seoul (in Korean).
- Ministry of Science and Technology 2007. Technology for Surface Water Resources Investigation. Seoul (in Korean).
- MOCT. 1999. Basic plan for river maintenance of Wonju Stream, Ministry of Construction & transportation, Korea. (in Korean)
- Papadaki, C., Ntoanidis, L., Zogaris, S., Martinez-Capel, F., Muñoz-Mas, R., Evelpidou, N., and Dimitriou, E. 2014. Habitat hydraulic modelling for environmental flow restoration in upland streams in Greece. In 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment, 385-392.
- Schwartz, J.S. and Herricks, E.E. 2007. Evaluation of pool-riffle naturalization structures on habitat complexity and the fish community in an urban Illinois stream. *River Research and Applications*, 23(4): 451-466.
- Schwartz, J.S., Neff, K.J., Dworak, F.E., and Woockman, R.R. 2015. Restoring riffle-pool structure in an incised, straightened urban stream channel using an ecohydraulic modeling approach. *Ecological Engineering*, 78: 112-126.
- 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.
- 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: 397-441.
- Tiegs, S.D., O'leary, J.F., Pohl, M.M., and Munill, C.L. 2005. Flood disturbance and riparian species diversity on the Colorado River Delta. *Biodiversity and Conservation* 14: 1175-1194.
- Tomsic, C.A., Granata, T.C., Murphy, R.P., and Livchak, C.J. 2007. Using a coupled eco-hydrodynamic model to predict habitat for target species following dam removal. *Ecological Engineering*, 30(3): 215-230.