전주천 상류부의 서식처 적합도 지수 및 생태유량 산정 Estimation of Ecological Flow and Habitat Suitability Index at Jeonju-Cheon Upstream

김경오 · 박영기[†] · 강재일 · 이병석

Kyeong-Oh Kim · Young-Ki Park[†] · Jae-Il Kang · Byung-Suk Lee

전북대학교 토목공학과

Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

(Received December 2, 2015; Revised January 19, 2016; Accepted February 2, 2016)

Abstract : In this study, WUA (Weighted Usable Area) based on the Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) was calculated to determine ecological flow at Jeonju-Cheon by using River2D model. To calibrate River2D, simulation results for low flow conditions of River2D were compared with calibrated HEC-RAS simulation results and the optimum parameters were determined. The results were RMSE (0.18), NSE (0.71) and coefficient of determination (0.78) for velocity and RMSE (0.02), NSE (0.71), coefficient of determination (0.73) for water depth. The result shows that the model successfully simulates the water flows. A selected target fish species to build the habitat suitability index were composed of *Zacco platypus* and *Coreoleuciscus splendidus*. These species showed the highest occurrences over the past decade in fish monitoring. Also, The WUA-Discharge curve was calculated with the suitability index in a medium flow conditions. From the result, WUA is changed according to flowrate. In the flowrate-WUA/A graph, ecological flow can be determined at 1.8~2.0 m³/s for *Zacco platypus* 2.0 m³/s and *Coreoleuciscus splendidus* 1.8 m³/s at Jeonju-Cheon upstream. When compared with flow-duration analysis, it is demonstrative that simulation results fitted ecological flow considering quantity of available habitat for each fish species.

Key Words : IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), WUA (Weighted Usable Area), HSI, River2D, Ecological Flow

요약 : 본 연구에서는 유량점증방법론에 입각하여 물리 서식처 모의 시스템의 기반을 둔 2차원 수리 및 서식처 모의인 River2D를 적용하였다. 대상 지점은 전주천 상류부이며, 수리모의 결과에 대한 비교는 갈수량 조건에서 검증된 HEC-RAS 수리모의 결과를 바탕으로 River2D와 유속, 수심 모의 결과를 비교, 평가하였다. 그 결과 유속의 RMSE는 0.18, NSE는 0.71, 결정계수는 0.78이고, 수심의 RMSE는 0.02, NSE는 0.71, 결정계수는 0.73으로 수리모의 결과가 실측치에 잘 반영되는 것으로 평가된다. 서식처 적합도 지수를 구축하기 위해 선정한 대표 어종은 10년간 어류 모니터링을 통하여 가장 출현빈도가 높은 피라미, 쉬리 어종에 대하여 선정하였다. 또한 평수량, 조건에서의 서식처 적합도 지수를 바탕으로 가중가용면적-유량 관계곡선을 산출하였으며, 한강 및 금강 수계에서 적합도 지수를 구축한 강형식(2010)의 지수를 가지고 모의한 결과와 비교, 평가하였다. 생태유량 산정 결과 피라미는 1.5~2.0 m³/s 쉬리는 1.8~2.0 m³/s로 산정되었다. 대상구역의 수질, 하도 구성, 생물 다양성 등이 매우 양호한 생태이고, 모의 결과 값을 유황분석과 비교해볼 때, 산정된 어류별 생태유량은 전주천 상류부에 적합한 것으로 평가된다.

주제어 : 유량점증방법론, 가중가용면적, 서식처 적합도 지수, 생태유량, 물리서식처모의

1. 서론

도시의 급격한 공업화, 산업화로 인하여 하천은 본래의 형상과 기능이 소멸되고 인간의 편리함과 경제 성장에 중점을 둔 인공적인 형태로 변화되어 왔다. 이러한 하천의 무분별한 개발로 인하여 수생 동·식물은 급격하게 감소하고 있을 뿐만 아니라, 근처 야생동물들의 서식환경에도 많은 변화를 일으키고 있다. 또한 하천은 살아있는 유기체와 같아 하천 내 인위적인 구조물이 건설되면 주로 수리현상이 변화되고, 침식 및 퇴적 양상이 바뀌게 되며 이로 인해 하천 모습이 변화되고 이는 다시 하천 주변 환경을 변화시키는 원인이 된다.¹⁻⁴⁾ 특히 하천의 서식환경은 유량에 크게 영향을 받으며, 유량은 하천 구조, 수질, 유속, 수심 등에 매우 민감하기 때문에 최근 하천복원사업에 이·치수에 목적을

가졌던 과거와는 달리 다양한 생물종이 서식할 수 있도록 하천의 생태적 서식조건까지 고려하여 하천정비 사업이 진행되고 있다.

하천사업에 의해 변화된 수생생태계를 예측하기 위해 주로 유량점증방법론(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM) 개념을 도입한 어류에 대한 물리서식처 모의를 적용하고 있다.⁵⁾ 어류는 생태계의 먹이사슬에서 높은 단계에 위치하는 생물로 인간에 미치는 영향을 검토할 수 있다. 또한 수생태계의 변화에 대해 빠르게 반응하고 이동 및 이주가 빠른 기간에 나타나며 모니터링을 하기에 상대적으로 용이한 생물로 서식처 모의를 통한 서식조건 평가에 적합하다.⁶⁾ 미국은 1980년대부터 USGS (United States Geological Survey)에서 IFIM에 근거한 1차원 물리 서식처 모의(Physical Habitat Simulation System, PHABSIM)를 개발하여 어류 서

[†] Corresponding author E-mail: parkyk@jbnu.ac.kr Tel: 063-270-4790 Fax: 063-270-2421

식처 공간에서 수리조건에 적합한 가중가용면적(Weighted Usable Area, WUA)-유량관계를 구해 하천 서식처의 적합도를 평가하였고, 어류를 포함한 약 160여 동물에 대한 서식처 적합도 지수를 산정하여 생태유량 결정에 중요한 인자로 활용하고 있다.⁷⁾ 최근에는 1차원 서식처 모형인 PHABSIM의 단점을 극복하기 위해 2차원 및 3차원 모델들이 구축하고 있고, 이에 따른 하천생태계의 다양한 평가를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내의 경우 김규호는 달천에서 어류 서식처 적합성에 관하여 미시적(수심, 유속, 하상재료), 거시적(수온, 용존산소) 측면에서 상강단계별 어류 서식처 조건을 평가하여 생태유량을 산정하였다.⁸⁾ 강 등⁹⁾은 남한강 수계에서 PHABSIM 모형을 이용하여 하천의 필요유량을 산정하였다. 또한 기존의 생태유량 산정에 관하여 현장 모니터링 부족 등으로 인한 적합도 지수의 신뢰성 부족 등의 개선 방안으로 성 등¹⁰⁾은 낙동강 유역의 어류 현장조사를 2회 측정하여 적합도 지수를 산정하였고, 강⁷⁾은 4년간 한강수계 및 금강수계의 현장 모니터링을 통하여 서식처 적합도 지수를 산정하였으며, 적합도 지수를 산정하는 방법들 중에서 전문가의 판단을 고려한 적합도 지수와 비교하였을 때 현장 모니터링을 수행한 적합도 지수가 신뢰성면에서 더 크다는 것을 나타냈다. 최근 노¹¹⁾는 PHABSIM과 River2D를 비교하여 생태유량 산정에 관한 적합한 물리서식처모형 방안을 제안하였다. 또한 임 등,¹²⁾ 서 등¹³⁾은 River2D가 하천의 수공구조물에 의한 어류의 서식환경영향에 대해서 모의할 수 있기 때문에 River2D 모형을 이용하여 하천의 인공 구조물이 어류의 서식환경에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 하지만, 이와 같이 국내 하천의 생태적 측면을 고려한 유량확보방안의 활발한 연구에도 불구하고 국외의 지수평가 방법인 WDFW¹⁴⁾와 IFASG¹⁵⁾를 기준으로 산정하였으며, 국내에는 여전히 명확한 기준방안은 마련되어 있지 않다. 특히 어류를 기준으로 선정하는 서식처 적합도 지수는 꾸준한 모니터링을 기반으로 통계적 처리를 하는 것이 중요하지만, 장기간 모니터링 하는 것에 대한 여건과 기술 등의 문제점, 그리고 유지유량확보를 위한 수리구조물 등으로 인한 어류의 불명확한 서식조건들 때문에 국내의 어류 환경과 특성에 맞는 적합도 지수 구축이 필요하다.

따라서 본 연구는 인간이 필요로 하는 하천과는 별도로 하천 본래의 기능을 충족시키기 위한 유량을 선정하기 위해 하천의 서식하고 있는 담수 어류의 서식공간에서의 유속, 수심 그리고 먹이나 은신처 확보를 위해 필요한 하상재료의 조건에서의 생태 유량을 산정하였다. 또한 담수어류별로 물리적 서식환경에 적합한 지수를 산정하는 방법을 뒷받침할 수 있는 자료가 존재하지 않아서 적합도 지수 산정에 관한 어려움을 해결하고자 한다. 이에 따라 전주천 상류부에서 충분한 어류 데이터를 바탕으로 하천에 평소 유지되고 있는 유황자료의 물리적 인자와 결합하여 서식처 적합도 지수를 구축하고, 미소서식 환경에서의 2차원 수리

및 서식처를 해석할 수 있는 River2D 모형을 이용하여 생태유량을 산정하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 물리서식처 모의

물리서식처 모형은 흐름 또는 유량의 변화가 하천의 물리서식처에 영향을 분석할 수 있는 생태수리해석 모형으로, 수중 생물이 수리학적 환경 변동에 따라 직접 반응한다는 점을 주된 가정으로 하고 있다. 따라서 개별 수중 생물은 하도 내 공간상의 유속, 수심 그리고 휴식과 은신처 역할을 하는 하상재료상의 가장 선호하는 공간을 정량화 하여 각각의 기준에 가중치를 가한다. 이때 가중된 공간을 가중가용면적이라 하며, 이 조건들은 유량의 변화에 따라 민감하게 반응한다.

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

여기서,

A_i = 하도구간에서 분할된 i 셀의 거리와 폭을 곱한 면적

C_i = 하도구간에서 분할된 i 셀의 복합서식처 적합도 지수

Q = 유량

위 식의 복합서식처 적합도 지수 C_i 는 수심, 유속 그리고 하상재료에 대한 DSI (Depth Suitability Index), VSI (Velocity Suitability Index), CiSI (Channel index Suitability Index)이고 각각의 서식도 지수의 곱에 의해 복합 서식처 적합도 지수(Composite habitat Suitability Index, CbSI)가 산정되며, Fig. 1과 같다.¹⁶⁾

Fig. 1. Procedure of estimation for composite habitat suitability with cell i .¹⁶⁾

2.2. 수리학적 모의

수리학적 모의를 위해 이용한 River2D는 2002년 캐나다 Alberta 대학에서 개발되었으며, 지배 방정식은 수심 평균한 2차원 흐름 방정식으로 Petrov-Galerkin upwinding방법을 이용한 유한요소모형으로서 상류와 하류의 흐름모의가 가능하고 하천의 습지 구역이나 표층이 동결된 상태에서도 모의가 가능하다.¹⁷⁾

River2D의 동수역학적 요소는 2차원, 평균 수심을 보존 형태(conservative form)로 표현한 St. Venant Equation에 기반하고 있으며, 질량 보존의 3개의 지배방정식과 운동량 보존 방정식에서 x와 y방향의 두 요소로 구성된다.

- 질량 보존 방정식(conservation of mass)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

- x 방향 운동량 보존 방정식(conservation of x-direction momentum)

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \right) \lim_{\rightarrow \infty} \quad (3)$$

- y 방향 운동량 보존 방정식(conservation of y-direction momentum)

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xy}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right) \quad (4)$$

여기서 H는 수심, U, V는 x, y방향에서의 수심 평균 유속, q_x, q_y 는 각 유속 방향에 따른 유량($q_x = HU$, $q_y = HV$), g는 중력 가속도, ρ 는 물의 밀도, S_{0x}, S_{0y} 는 x, y 방향의 하상경

Table 1. Characteristics of the reach for study site

Site	River width (m)	Channel width (m)	Water depth (m)	Bottom structure* (%)					
				B	C	P	G	S	M
St. 1	80~100	15~20	0.5~1.5		20	40	30	10	
St. 2	100~150	15~20	0.5~1.5	10	20	30	20	10	10

*B: boulder (>256 mm), C: cobble (64~256 mm), P: pebble (16~64 mm), G: gravel (2~16 mm), S: sand (0.1~2mm), M: mud (~0.1 mm).

사, S_{fx}, S_{fy} 는 x, y방향의 마찰 경사, $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ 는 각 방향에 대한 전단응력이다.

2.3. 대상구간

본 연구대상으로 선정한 지점은 전주천 상류의 은석교에서 한벽보까지 약 2.7 km이다. 이 구간은 자연형 하천을 위한 생태조성 사업이 진행 중이며, 특히 쉬리 살리기 운동 등 다양한 어종을 보전하기 위한 노력을 하고 있는 전주천 생태조성사업의 대표지점으로써 수질도 양호한 미소 서식 공간으로 다양한 수생식물들이 서식하고 있다. 또한 Table 1에서 보는바와 같이 유역특성을 살펴보면 하쪽에 비해 수로가 15~20 m 정도로 소하천이며, 하상구조는 주로 자갈과 돌로 이루어져 있다.

2.4. 어류조사 방법

어류채집을 위한 현장조사는 어류가 서식처의 수온과 유량 등 주변환경에 따라 산란 및 먹이섭취, 월동을 위한 서식처를 이동하는 경향이 있으므로 현장조사 시기를 적절히 조절하여야 한다. 그리고 어류는 하상에서 먹이 활동을 하며 하상에서 주로 생활하는 종류, 흐르는 물에서 먹이 활동을 하며 흐르는 물에서 생활하는 종류 그리고 수초대에서 먹이 활동을 하고 생활하는 종류 등 각각의 생태적 특성에 따라 생활하는 영역이 크게 다르기 때문에 한 가지 조사방법으로 어류의 분포종과 분포량을 모두 적절히 조사하기는 어렵다.¹¹⁾ 따라서 다양한 서식조건에서의 어류 채집을 위해 전주생태하천협의회에서 주관한 어류 생태학 전문가를 통하여 연간 6회(4월, 5월, 6월, 9월, 10월, 11월)조사를 실시

Fig. 2. Location of the study site and reach.

Fig. 3. Location map of the fish sampling site.

한 10년 자료결과를 참조하였다.¹⁸⁾ 조사방법은 투망(망목 7×7 mm)과 족대(망목 5×5 mm)를 이용하고, 채집된 어류는 어족자원 보호를 위하여 현장에서 동정 및 개체수 확인 후 즉시 방류하였다.

2.5. 어류조사 결과

어류조사 결과 Fig. 4에서 보는바와 같이 피라미, 참갈겨

니, 쉬리, 돌고기 순으로 출현하였으며, 우점도 지수는 피라미 23.18%, 참갈겨니 23.13%, 쉬리 11.60%, 돌고기 9.76%의 출현 빈도를 나타냈었다. 따라서 어류조사를 바탕으로 물리 서식처 모의를 하기 위해 해당 구역에 서식하고 있는 출현 어종 중 가장 많이 출현하는 어종을 보편적으로 선정해야한다. 그와 더불어 해당 구역에 출현하는 어종 중 사회적으로 중요시되는 하천 어류 관리의 관심사와 하천환경 관리, 서식처 모의자료의 가용성에 따라 대상 어종을 채택하는 것이 일반적이다. 이에 따라 본 연구에서 선정한 대표어종은 현재 국내 대부분의 하천에서 가장 많이 서식하는 어종인 피라미와 전주천의 대표어종이자 한국 고유 어종인 쉬리를 대표어종으로 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수리학적 모의

본 연구에서 대상구역으로 선정한 전주천 상류부는 유역 길이가 약 2.7 km이며 지형자료는 2013년 전주천 하천기본계획에서 수립되어 있는 측량자료를 바탕으로 Fig. 5와 같

Fig. 4. Distribution of collected fish species (* : Korean Endemic Species, © : Alien Species).

Fig. 5. Constructed bed_reach by River2D.

Fig. 6. Constructed mesh by River2D.

이 River2D_Bed로 하상지형도를 구축하였으며, 이 하상지형 자료를 이용하여 River2D_Mesh로 Fig. 6과 같이 총 4,707개의 절점과 총 8,816개의 요소로 구성된 Mesh를 구축하였다.

River2D의 수리모의 과정에서 필요한 입력 자료는 유입부에서 유량과 유출부에서 수위 값이 필요하다. 따라서 갈수시 조건에 따라 유입부에는 유량 $0.97 \text{ m}^3/\text{s}$ 와 유출부에는 유량에 따른 하상고도 E.L = 56.67 m를 설정하여 수리모의를 실시한 결과 수심분포는 Fig. 7과 같고, 유속분포는 Fig. 8과 같다. 또한 수리모의의 검·보정을 하기 위해서는 해당 모의구간에 관측 값이 필요하고 부득이한 경우 수위관측소의 관측 값을 이용하여 검·보정을 실시하여야 한다. 하지만 전주천 전체구간 중 수위관측소는 전체 3개 지점에 불과하고, 본 연구의 대상 유역에는 유입부에 은석수위관측소와 중간부에 새장수위관측소가 포함되어 있다. 따라서 HEC-RAS 모의결과에 대한 검증은 두 관측소의 수위-유량 곡선을 이용하였고 이에 대한 검증결과를 Table 2에 게재하였다. River2D의 수리모의는 유출부에서 관측 값의 부재로 인하여 이 구간의 갈수량 조건으로 수리모의를 실시한 HEC-RAS의 모의 결과를 바탕으로 River2D와 수심, 유속 모의 결과를 비교, 평가하였다.

Table 2. Comparison results of measured water level and HEC-RAS simulation results

Gauging station	Measured water level h (El, m)	HEC-RAS simulation results h (El, m)	Error (m)
Eunseok	61.69	61.73	0.04
Saekjang	56.87	56.80	0.07

Fig. 7. Distribution of depth by River2D.

Table 3. Estimation for simulation by HEC-RAS and River2D

	RMSE	NSE	R^2
Depth (m)	0.02 very good	0.71 good	0.73 good
Velocity (m/s)	0.18 very good	0.71 good	0.78 good

측선 100 m 간격으로 총 27개의 단면에서 수심과 유속의 결과를 평가하기 위한 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 그리고 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)를 이용하였다.

Table 3에서의 오차평가 결과 RMSE의 경우 수심 0.02, 유속 0.18로 모두 매우 만족하는 결과를 나타냈고, NSE의 경우 수심 0.71, 유속 0.71로 만족하는 결과를 보였으며, 결정계수 R^2 의 경우 수심 0.73, 유속 0.78로 만족한다는 결과를 도출하였다.

3.2. 하상재료 및 수질에 대한 고려

일반적으로 하천 어류는 여울과 소가 반복되는 하상 구조에서 다양한 서식활동을 한다. 이때 하상 재료에 따라 산란과 포식, 휴식과 피난을 위한 은신처 등의 영향을 받는다. 보통 수심이 얇고 유속이 빠른 여울에서는 바닥에 자갈과 호박돌이 많고 햇빛을 충분히 받기 때문에 자갈과 호박돌 표면에는 많은 유기물이 생성되어 수서 곤충이나 무척추동물들은 이것을 주로 먹으며 어류들은 이곳에서 수서 곤충이나 무척추동물들을 포식하기 위해 모여든다. 또한 유속이 빠르기 때문에 호박돌과 같은 비교적 큰 돌과의 충격에

Fig. 8. Distribution of velocity by River2D.

Fig. 9. Compared depth of River2D with HEC-RAS.

Fig. 10. Compared velocity of River2D with HEC-RAS.

Table 4. Characteristics and distribution of bed material

No.	Substrate	Particle size	Habitat condition
1	Silt	less than 0.1 mm	poor
2	Sand	0.1~2 mm	
3	Small Gravel	2~16 mm	very good
4	Large Gravel	16~64 mm	
5	Cobble	64~256 mm	moderate
6	Boulder	more than 256 mm	
7	Bed Rock	-	poor

의해 와류가 발생되고 기폭작용 등으로 인하여 용존산소가 풍부해지기 때문에 산란과 부화에 적합하고, 돌 표면의 미생물과 원생동물은 풍부한 용존산소로 인해 혐기성 유기물을 분해하므로 수질이 정화된다. 또한 여울구간에서는 주로 자갈과 호박돌로 이루어져 있으며, 이때 어류들은 주변의 포식자로부터 몸을 숨길 수 있는 은신처를 제공한다. 그리고 야간이 되면 여울에서 활동하는 어류들은 유속이 낮고 수심이 비교적 깊은 소(pool)를 찾아와 휴식하게 된다. 이는 서식하는 생물 종마다 다르지만 일반적으로 하천에서는 여울과 소가 연속적인 중·상류 구간에서 생물이 다양하게 유지되고 있다.

본 연구에서 선정한 어종은 피라미와 쉬리이며, 이 두 어종은 Table 4와 같이 7종류의 하상재료 중 3~4에 해당하는 자갈 부분이 주 서식 어종들로 나타났다.⁷⁾ 따라서 실트, 모래, 자갈, 굵은 자갈, 왕 자갈, 호박 돌, 기반암으로 하상재료를 분리하여 자갈인 부분에서는 서식조건이 우수하고, 실트와 모래 그리고 기반암인 구간에서는 부적합한 구역으로 선정하여 서식처 적합도 곡선 산정에 반영하였다.

Table 5. Results of water quality survey

Site	pH	DO (mg/L)	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Total coliforms (mg/L)	
st. 1	3	7.4	8,5	0,8	1,3	2,0	1,029	0,019	$1,7 \times 10^2$
	6	6.8	9,1	1,2	1,7	3,8	4,144	0,031	$2,0 \times 10^2$
	9	7.6	8,0	1,0	2,4	4,0	4,236	0,039	$2,7 \times 10^2$
	12	7,5	10,4	1,2	2,0	3,3	3,188	0,032	$2,3 \times 10^2$
	Ave.	7,3	9,0	1,1	1,9	3,3	3,149	0,03	$2,2 \times 10^2$
st. 2	3	7.6	8,8	1,2	1,2	1,5	0,933	0,013	$1,2 \times 10^2$
	6	7,0	9,0	1,0	1,0	3,0	3,247	0,020	$1,3 \times 10^2$
	9	7,2	8,3	1,3	1,6	3,6	4,074	0,035	$2,0 \times 10^2$
	12	7,4	9,1	1,0	1,3	2,7	3,052	0,028	$2,1 \times 10^2$
	Ave.	7,3	8,8	1,1	1,3	2,7	2,827	0,024	$1,7 \times 10^2$

Table 6. Preferable microhabitat for fish species at jeonju-chon

Species	Factors		Velocity			Substrate				Depth			Food organisms	Spawning period (Month)
	Riffle	Run	Pool	Silt	Sand	Gravel	Plant	High	Middle	Low				
Coreoleuciscus splendidus	●	○				●					●	Aquatic insects	5~6	
Zacco platypus	●	○				●		●				Periphytons	5~6	

또한 어류가 서식하기에 적합한 조건을 평가하기 위해 거시적 측면에서의 수온과 수질 등의 이화학적 요소는 미시적 측면인 물리적 요소와 더불어 어류의 서식환경에 중요한 요소들이다. 따라서 어류 모니터링 지점과 동일한 지점에서 2013년 3월, 6월, 9월, 12월 총 4회 모니터링을 하였다. 수질 측정 항목은 pH, DO, SS, BOD, COD, T-N, T-P, 총대장균수를 측정하였고, 실험은 수질오염공정시험법에 준하는 방법¹⁹⁾으로 진행하였다.

Table 5는 수질측정 결과이며 지표수질(하천) 환경기준으로 보면 대부분의 항목들은 1~2등급으로 매우 양호한 상태를 보여주고 있다. 따라서 어류 서식에 적합한 수질이 유지되고 있는 하천에서 생태 유량은 거시 수질조건보다는 미시 수리조건에만 의존한다고 가정하였다.

3.3. 서식처 적합도 지수

하천 내 동·식물의 서식처 유지에 적절한 수심, 유속 등 수리조건에 해당하는 유량을 선정하기 위해서는 지역 및 환경 조건에 따라 차이를 보일 수 있어 대상 유역에 따라 지속적인 현장 모니터링이 필요하고, 전문가 판단에 의한 지수 산정도 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전주천에 대해서 지속적으로 생태 모니터링을 수행한 전문가의 판단에 의한 미소서식환경에서의 어류별 유속, 수심, 하상구조 조건에 대해 대상지점으로 선정한 색강 부근에서의 평수시 조건에 대한 수리모의를 통하여 유속, 수심의 분포를 가지고 정량적으로 평가하여 적합도 곡선을 작성하였다.

Table 6에서 보는 바와 같이 대표어종으로 선정한 두 어종에 대해 하천에서 서식하기에 적합한 공간의 물리적 요소로 유속, 하상구조 그리고 서식수층으로 ●는 주 서식 환경이고, ○는 주 서식 환경은 아니나 서식 가능환경을 의미한다.

하천에서의 유속은 물이 고여 있고, 흐름이 거의 없는 “정수역”, 소에서 여울로 이어지는 곳에서 수심이 얕고 유속이 느린 “민 여울”, 여울에서 깊은 소로 이어지는 곳에서 유속이 빠른 “빠른 여울”이 형성된다. 이때 쉬리, 피라미의 경우 주로 빠른 여울에서 서식하며 민 여울에서도 서식하는 어종이다. 서식수층의 경우 쉬리는 주로 저층에서 서식하고 피라미는 표층에서 서식한다. 하상수조는 펄, 모래, 자갈, 수초로 나뉘며 두 어종모두 자갈인 부분에서 서식하기 적합한 어종이다.

어류 서식처 적합도 곡선은 Table 7에서 보는바와 같이 대상유역의 전체 물리적 범위 중 가장 적합한 물리적 서식 범위에서 1.0으로 설정하고 나머지의 최적 범위에 대한 상대

Fig. 11. Habitat suitable index with fish species.

Table 7. Optimum range of velocity, depth and substrate

species	Velocity (m/s)	Depth (m)	Substrate
Zacco platypus	0.43~0.73	0.19~0.28	3~4
Coreoleuciscus splendidus	0.43~0.73	0.05~0.17	3~4

비율로 결정하였다. Fig. 11은 두 어종의 물리적 서식 범위에 대한 서식처 적합도 곡선으로 대상 어종의 서식환경요인에 따라 최적 유속 및 수심의 범위는 같거나 다른 양상을 보인다. 따라서 주 서식환경이 빠른 여울이고, 주 서식 환경은 아니나 서식 가능한 민 여울에서 서식하는 피라미, 쉬리의 경우 최적 유속범위가 같고, 최적 수심범위의 경우 피라미는 표층, 쉬리는 저층에서 선호하는 서식처이기 때문에 다른 범위를 나타내고 있다.

3.4. 생태유량 산정

평수시 조건($Q = 1.54 \text{ m}^3/\text{s}$)에서의 서식처 적합도 지수 산정을 바탕으로 유량 변화에 따른 가중가용면적을 산정 후 유역의 흐름영역의 전체 하도면적(A)으로 나누어 총면적에 대한 가중가용면적의 비율을 Table 8과 같이 나타냈다. 그 결과 Fig. 12에서 보는바와 같이 가중가용면적비는 유량에 따라 미소하게 변화되며 일정하게 증가하거나 감소하는 형상을 보여주고 있다. 이는 각 유량별로 어종들이 서식할 수

는 있으나, 가장 서식하기에 적합한 조건에서의 유량을 평가하기 위한 것으로 어종별 최적의 유량을 살펴보면 피라미의 경우 $2 \text{ m}^3/\text{s}$, 쉬리 $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 가중가용면적이 가장 큰 구간으로 선정되었다.

Fig. 13은 금강 수계유역의 4년간 현장 조사를 통해 산정한 적합도 지수를 이용한 가중가용면적을 비교한 것이다. 적합도 지수는 하천에 서식하는 어류를 대상으로 가중치를

Table 8. Results of WUA to discharge

Discharge (m^3/s)	Zacco platypus	Coreoleuciscus splendidus
	WUA/A (%)	WUA/A (%)
0.3	1.41	1.86
0.5	2.27	2.61
0.7	3.07	2.98
0.9	3.73	3.22
1	4	3.29
1.2	4.33	3.37
1.5	4.51	3.44
1.8	4.63	3.52
2	4.64	3.5
2.5	4.54	3.48
3.5	4.4	3.41
5	4.33	3.2

Fig. 12. Variations of WUA to discharge.

Fig. 13. Comparison of Jeonju-chon and Geum-river for WUA to discharge curve.

산정하는 것이기 때문에 하천 특징보다는 어류의 특징(피라미, 쉬리)을 파악하는 것이 중요하다. 또한 하천의 유황은 유량에 따라 조금 다를 수는 있으나 국내 대부분의 하천에서 피라미, 쉬리가 서식하고 있기 때문에 최적범위는 유사하며, 다른 하천에서 선정할 적합도 지수를 이용할 수 있다는 연구내용²⁰⁾을 살펴 볼 수 있기 때문에 유역의 유사성을 따로 기술하지는 않았다.

Fig. 13의 (a)는 피라미의 서식처 적합도 지수에 따라 선정한 가중가용면적비-유량 곡선관계로서, 그 크기를 살펴보면 본 연구와 금강의 적합도 지수 구축 방식의 차이와 유역의 특성 등으로 가중가용면적의 크기가 다소 차이는 있지만, 곡선의 형태는 일정 유량까지 증가하다가 다시 조금씩 감소하는 비슷한 형태를 보여주고 있다. 최적의 WUA/A를 나타내는 유량의 경우, 전주천은 2.0 m³/s이고 금강의 경우 1.5 m³/s를 나타낸다.

Fig. 13의 (b)는 쉬리를 대상으로 선정한 서식처 적합도 지수에 따른 가중가용면적비-유량 곡선관계이다. 최적의 WUA/A를 나타내는 유량은 전주천의 경우 1.8 m³/s이고, 금강의 경우 2.0 m³/s로 피라미의 생태유량 산정 결과와 큰 차이는 없었다. 이는 피라미와 쉬리의 미소서식환경요인에서 수심 범위는 표층과 저층으로 다소 차이가 있지만, 유속의 범위는 빠른 여울과 민 여울구간에서 서식하기 적합한 점으로 볼 때 하천 유량의 변화는 수심보다 유속에 따라 민감하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 어류의 물리적 서식 특성에 부합하는 적합한 하천의 생태유량 산정방식을 도입하기 위해, 대상 유역으로 전주천 상류부를 선정하였다. 그리고 유역특성에 맞는 어류별 서식처 적합도 지수의 구축과 미소서식환경에서의 공간적 특성을 잘 반영할 수 있는 2차원 수리 및 서식처모의를 할 수 있는 River2D 모형을 이용하여 생태유량을 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) River2D 수리모의 검정과정은 검정된 HEC-RAS모의를 실측값으로 보고 각 단면에서의 평균유속과 최대수심과 비교하여 오차평가를 실시한 결과 유속의 RMSE는 0.18, NSE는 0.71, 결정계수는 0.78이고, 수심의 RMSE는 0.02, NSE는 0.71, 결정계수는 0.73으로 수리모의 결과가 실측치에 잘 반영되는 것으로 평가된다.

2) 연구 대상 구간의 10년간 어류생태조사결과 우점종인 피라미와, 한국고유어종이며 출현빈도가 높은 쉬리를 대표어종으로 선정하였다. 또한 평수량 조건에서 유속 및 수심 분포도가지고 미소서식환경요인으로 정량화하였고, 그 결과 피라미의 경우 유속 0.43~0.73 m/s, 수심 0.19~0.28 m, 쉬리의 경우 유속 0.43~0.73 m/s, 수심 0.05~0.17 m인 최적의 범위를 선정하였다.

3) 평수량 조건에서의 어류별 최적의 유속 범위와 수심 범위결과를 기존의 문헌에서 산정한 조건과 비교하면, 대상유역 특성과 조사 방법 등 여러 변수들을 고려해 볼 때 많은 차이는 보이지 않았다. 그리고 서식처 적합도 곡선 산정결과 두 조건의 유속분포에서의 최적 범위는 다르지만 비슷한 형태의 넓이를 보였으며, 수심의 경우도 대체적으로 비슷한 형태로 나타났다.

4) 본 연구에서 산정한 생태유량과 강형식(2010)의 적합도 지수를 이용하여 구축한 생태유량 결과 피라미 1.5~2.0 m³/s, 쉬리 1.8~2.0 m³/s를 나타냈다. 이는 전체적으로 현재 대상 유역의 유황분석과 비교해 볼 때 산정된 어류별 생태유량은 전주천 상류부에 적합한 것으로 평가된다.

KSEE

References

1. Ligon, F. K., Dietrich, W. E. and Trush, W. J., "Downstream ecological effects of dams," *Bioscience*, **45**(3), 183~192(1995).
2. McCully, P., "Silenced rivers-the ecology and politics of large dam zed books," London(1996).
3. Wu, J. G., Huang, J. H., Han, X. G., Xie, Z. Q. and Gao, X. M., "Three-gorges dam-experiment in habitat fragmen-

- tation," *Science*, **300**, 1239~1240(2003).
4. Kang, H. S., Im, D. K. and Kim, K. H., "Numerical investigation of physical habitat changes for fish induced by the hydropeaking in the downstream river of dam," *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **30**(2B), 211~217(2010).
5. Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J. and Henriksen, J., "Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology," U. S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report, USGS/BRD(1998).
6. Jung, S. H., Jang, J. Y. and Choi, S. U., "Physical habitat modeling in dalcheon stream using fuzzy logic," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **45**(2), 229~242(2012).
7. Kang, H. S., "Development of physical fish habitat suitability index," Korea Environment Institute(2010).
8. Kim, K. H., "Evaluation of habitat condition and estimation of optimum flow for the freshwater fish," The Graduate School Yonsei University in Korea(1999).
9. Kang, J. H., Lee, E. T., Lee, J. H. and Lee, D. H., "Estimation of river instream flow considering fish habitat conditions," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **37**(11), 915~927(2004).
10. Sung, Y. D., Park, B. J., Joo, G. J. and Jung, L. S., "The estimation of ecological flow recommendations for fish habitat," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **38**(7), 545~554(2005).
11. Roh, K. B., "Study on habitat conservation fish and management using ecological model in seomjin river," The Graduate School Dong-shin University(2011).
12. Im, D. K., Jung, S. H., Ahn, H. K. and Kim, K. H., "Application of physical habitat simulation system (PHABSIM) in the reach of small dam removal for zacco platypus," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **40**(11), 909~920(2007).
13. Seo, I. W. and Park, I. H., "Determination of ecological flow at the confluence of nakdong river and gumho river using river2d," *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **33**(3), 947~956(2013).
14. Washington Department of Fish and Wildlife., "Instream flow study guidelines: technical and habitat suitability issues," (2004).
15. Instream Flow and Aquatic systems Group, "Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology: biologic report," Instream flow information paper, 20, National Ecology Center (1986).
16. USGS, "PHABSIM for windows, user manual and exercises," Midcontinent Ecological Science Center(2001).
17. Steffler, P. and Blackburn, J., "River2D: two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat," University of Alberta(2002).
18. Ecological River Council in Jeonju, <http://www.ecoriver21.com>(2014).
19. Ministry of Environment, "Standard method of examination of water," (2007).
20. Bovee, K. D., "A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology," instream flow information paper, 12(1982).