

수리모형실험과 수치해석을 통한 자연형어도의 어류서식처 평가

An Assessment of Fish Habitat of Natural Fishway by Hydraulic Model Experiments and Numerical Analysis

이 성 현* / 오 국 열** / 정 태 성*** / 정 상 만****

Lee, Sung Hyun / Oh, Kuk Ryul / Cheong, Tae Sung / Jeong, Sang Man

Abstract

It is increasing to make an efforts on preventing natural river environment and preserving natural river ecosystem as development is unavoidable. In the case of inconsistent river flow caused by reservoir development, fishway is an alternative to secure fish diversity and preserve existing river ecosystem but existing fishway was established without full study for their functions. In this study, hydraulic characteristics of natural fishway established on Beakje weir's right side were analyzed. The results show that the fishway has reasonable depth and velocity condition which inhabit condition is enough for a dominant species. For assessing the optimal design of fishway, the Weighted Usable Area (WUA) was calculated by using two dimensional numerical model under the ordinary flow condition. The comparison results for various pool widths in the fishway show that the designed width has maximum WUA for adult *Zacco platypus* but WUA is maximized with 1m wider pool width than designed width for spawning.

Keywords : Beakje weir, hydraulic model experiments, River2D, fish habitat, *Zacco platypus*

요 지

최근 하천환경을 보전하고 하천개발이 필요한 경우라도 가급적 자연에 가까운 하천생태계를 보전하려는 노력이 점차 증가하고 있다. 하천에 보설치 등 단절이 발생할 경우, 어종 다양성을 확보하고 기존생태계를 보전하기 위한 노력으로 어도를 설치운영하고 있으며, 현재 하천에 설치되어 있는 어도에 대하여 그 기능에 대한 충분한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 백제보 우안에 설치된 자연형어도의 수리특성을 분석하였다. 수리특성분석결과, 어도의 흐름은 우점종인 피라미 서식조건 범위내의 수심과 유속을 갖는 것으로 나타나 적정 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다. 자연형어도의 적정성을 평가하기 위하여 2차원 수치해석모형을 이용하여 평수량 흐름에 대한 가중가용면적을 산정하였다. 자연형 어도의 웅덩이 폭을 변화시켜가면서 가중가용면적을 비교 검토한 결과 피라미의 성어기에서는 현재 웅덩이 폭이 가장 적정한 것으로 나타났으며, 산란기에서는 현재의 어도에 비해 웅덩이 폭을 1m 증가할 때 가장 큰 가용면적을 갖는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 백제보, 수리모형실험, River2D, 어류서식처, 피라미

* 국립방재연구원 연구원 (e-mail: lshsosa@korea.kr)

Researcher, National Disaster Management Institute, Seoul 121-719, Korea

** 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: kroh@kongju.ac.kr)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Env. Eng. Kongju National Univ. Cheonan 330-717, Korea

*** 국립방재연구원 대외협력팀장 (e-mail: bangaeman@korea.kr)

Head of External Affairs, National Disaster Management Institute, Seoul 121-719, Korea

**** 교신저자, 공주대학교 건설환경공학과 교수 (e-mail: smjeong@kongju.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Env. Eng. Kongju National Univ. Cheonan 330-717, Korea

1. 서론

하천이 본래 갖고 있는 정상적인 유하 기능과 함께 서식하는 어류들의 보호 및 자연 생태계의 보전을 위하여 보나 댐과 같은 횡단 수공 구조물의 건설시 어류들의 이동이 가능하도록 여러 가지 형태의 어도를 설치하게 된다. 어도란 어류의 이동을 곤란하게 하거나 또는 불가능하게 하는 장애가 있을 때, 이동의 목적을 달성할 수 있도록 만들어진 수로 또는 장치 등을 말하며, 이 어도에 대하여 국내에서는 많은 연구가 수행되었다.

어도에 대한 국내 연구는 김진홍과 김철(1994)이 수리모형실험을 통하여 계단식 어도의 흐름은 표면류가 중요하므로 계단식 어도에 잠공을 설치하는 경우 신중을 기하여야 한다고 밝혔다. 박상덕(2001a)은 사다리식 어도와 박상덕(2001b)은 계단식 어도에 대하여 어도 생태수리실험을 실시하고, 유량과 어도경사의 변화를 통해 회유성 어류가 하천 하류에서 상류로 거슬러 올라가는 소상능력을 평가하였다. 또한 박성천 등(2003)은 도류벽식 어도모형을 제작하여 수리실험을 실시하고 어도의 구배변화에 따른 수평 및 수직방향의 유속분포를 파악하였다. 그들은 연구를 통하여 회유성 어류의 소상능력을 비교하는 방법으로 유영능력을 발휘하기 유리한 어도형태를 제안하였다. 김진홍(2008a), 김진홍(2008b)은 어도 수리모형실험을 통하여 흐름에 따른 어류이동을 비교하는 방법으로 어도의 적정 형태를 결정하였다. 안민우(2008)는 하천의 생태복원을 위하여 기존의 하천에 설치되어 있는 어도의 기능 및 운영관리 실태를 조사·분석하여 중·소하천에 적합한 어도설계 연구를 진행하였다.

가중가용면적(Weighted Usable Area, WUA)은 하천내 하도 공간상의 물리적 서식처로 정의되며 대상어종의 서식조건을 각각 가중한 하도면적을 뜻한다(Bovee and Cochnauer, 1997). 이에 관한 국내 연구는 오국열(2009)이 보와 웅덩이를 인위적으로 변경하는 방법으로 어류물리서식처 변화를 연구하였고, 길준택 등(2009)은 도시하천인 대전천에 자연친화적 서식처 개선공법으로서 거석을 하도 내에 배치하고 이에 따른 가중가용면적의 변화를 비교·검토하였다. 또한 강형식 등(2010)은 댐 발전방류로 인한 피라미의 성장 단계별 가중가용면적 및 유량별 복합서식처 적합도 분포도를 산정하였다. 국외에서는 Lacey(2004)는 River2D 모형을 이용하여 홍수전과 홍수후의 유속과 수심을 비교·분석하여 송어의 생태에 적합한 추천유량을 제시하였고, Wu and Mao(2007)는 1차원(Phabsim) 및 2차원(River2D) 모형을 이용하여 하천내 보 건설에 따

른 유량별 가중가용면적 변화를 비교·분석하였다. 또한 Boavida et al. (2011)은 멸종위기어종의 물리서식처 향상을 위해 하천구조물에 대한 평가를 수행하였다. 기존의 가중가용면적에 관한 연구는 주로 하천의 어류서식처를 평가하기 위한 연구가 대부분으로 어류의 소통로인 어도내 가중가용면적(WUA)을 연구한 사례는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 수치해석 및 수리모형실험을 통하여 자연형 어도의 수리특성을 분석하였고, 유량점중 방법론(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM)의 2차원 물리서식처 모의 모형인 River2D를 적용하여 백제보 자연형 어도의 어류서식처를 평가하고자 한다. 또한, 공간상의 어류물리서식처인 가중가용면적(WUA)을 향상시키기 위한 방법을 모색하기 위하여 백제보 자연형 어도내 소의 횡단 폭을 인위적으로 변형시켜 최적의 가중가용면적(WUA) 향상 방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 수행한 연구방법을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 수리모형실험은 축척 1/60의 정상모형으로 자연형 어도를 제작하였고, 백제보의 관리수위 4.2El.m 일 때 자연형 어도의 유입유량 1.3 m³/s를 적용하여 자연형 어도의 수리특성을 분석하였다.
- 2) 2차원 수치모형(River2D)을 활용하여 자연형 어도의 유입유량 흐름에 대한 수심 및 유속을 계산하고, 이를 통하여 수리모형실험으로 측정된 수심과 비교하였다.
- 3) 검증된 수치모형을 활용하여 금강유역의 우점종인 피라미 성어기(Adult)와 산란기(Spawning) 등 두 개의 성장단계별 가중가용면적을 산정하고 자연형 어도의 어류서식처를 평가하였다.
- 4) 공간상 어류서식처인 가중가용면적의 변화를 검토하기 위하여 자연형 어도의 소 횡단폭을 인위적으로 변화시키면서 성어기와 산란기 두 개의 성장단계별 가중가용면적을 비교·분석하였다.

2. 백제보 및 자연형 어도의 특성

2.1 백제보 특성

금강에 설치되는 백제보는 백마강교 상류 2.15 km, 왕진교 하류 3.33 km에 위치하며 가동보(경간 길이 40 m, 높이 5.3 m, 3련)와 고정보(경간 길이 70 m, 높이 7.2 m) 및 소수력발전소, 자연형 어도, 공도교 등으로 구성되어 있다. 자연형어도는 백제보 우안에 위치하며 백제보의 위치와 조감도는 Fig. 1과 같다. 또한, 백제보가 위치한 유역의

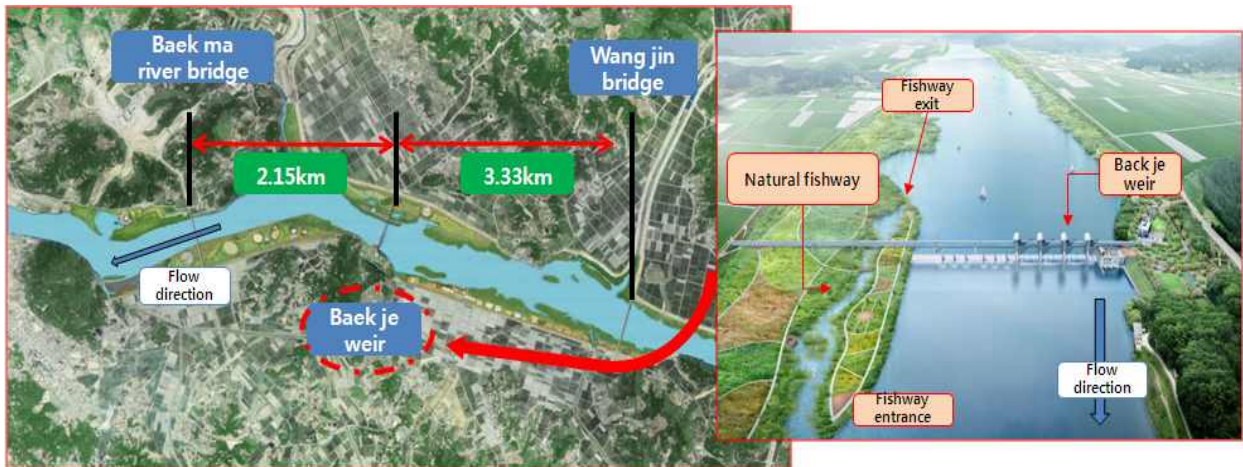


Fig. 1. Baekje Weir Installation Location and Aerial View

Table 1. Flow Regime of Gongju and Gyuam Gaging Stations

Gaging Stations	Flow(m ³ /s)			
	Flood Flow (Q95)	Normal Flow (Q185)	Low Flow (Q275)	Drought Flow (Q355)
Gongju	144.45	79.11	53.01	34.74
Gyuam	166.83	91.38	61.23	40.12

Table 2. Specification of Natural Fishway

Name	Length (m)	Slope	Fishway Entrance (El.m)	Fishway Exit (El.m)
Natural fishway	820	1/200	0.7	3.9

유황특성은 백제보 상·하류에 인접한 공주수위표와 규암 수위표의 유황을 조사하였다(국토해양부, 대전지방국토관리청, 2009). 공주수위표의 경우 백제보 기준 상류 26.5 km에 위치하고 있으며, 규암수위표의 경우 하류 6.4 km에 위치하고 있다. Table 1은 공주수위표와 규암수위표의 2009년의 유황조사 결과이다.

2.2 자연형 어도의 특성

백제보 우측에 설치되는 자연형어도는 보 설치로 인해 발생하는 하천단절을 극복할 수 있으며, 기존 콘크리트 구조물로 이루어진 인공식 어도와는 다르게 저서어류나 저서동물 등 다양한 수중생물들의 이동 및 서식이 가능하다. 어도의 형식은 회유성 어종의 보호방안 조사를 통하여 어류 진출입에 대한 최적안을 검토하여 선정하였고, 백제보 우측에 설치될 자연형 어도의 제원은 Table 2에 제시된 바와 같이 총 길이 820m, 경사 1/200로 설치될 예정이다.

3. 수리모형실험을 통한 수리특성분석

3.1 수리모형 설계

자연형 어도를 통과하는 흐름을 지배하는 힘은 중력과 관성력이므로, 본 실험에서는 원형과 모형의 Froude 수를 같게 하는 Froude 상사법칙을 적용하여 실험을 수행하였다. 모형의 설계는 수리모형실험의 목적 및 대상 영역의 수리적 특성, 실험조건 및 경제적 여건 등을 고려하여 모형의 축척을 결정하였으며, 모형제작에 착수하기 전에 모형 제작 및 수리모형실험에 필요한 각각의 요소들을 구성하여 원형의 재현이 올바르게 이루어질 수 있도록 하였다. 실험 조건에 따른 유량 공급 계획을 수립하여 필요한 유량의 공급이 이루어 질 수 있도록 설계하였으며, 각 하도 단면을 검토하여 모형 제작 및 수리모형실험 수행에 있어 발생할 수 있는 오차를 최소화 할 수 있도록 설계하였다. 이와 같은 모형 설계를 바탕으로 본 실험에서는 길이 축척을 1/60로 설정하였고, Froude 상사법칙에 의해 결정된 축척은 Table 3과 같다.

Table 3. Scale and Variable by Law of Froude Similarity

Variable	Scale	Length Scale Equation	Scale Change
Length	L_r	L_r	1/60
Area	A_r	L_r^2	1/3600
Time	T_r	$L_r^{1/2}$	1/7.746
Velocity	V_r	$L_r^{1/2}$	1/7.746
Acceleration	a_r	1	1
Discharge	Q_r	$L_r^{5/2}$	1/27,885
Force	F_r	L_r^3	1/216,000
Pressure	L_r	L_r	1/60
Roughness coefficient	n_r	$L_r^{1/6}$	1/1.98

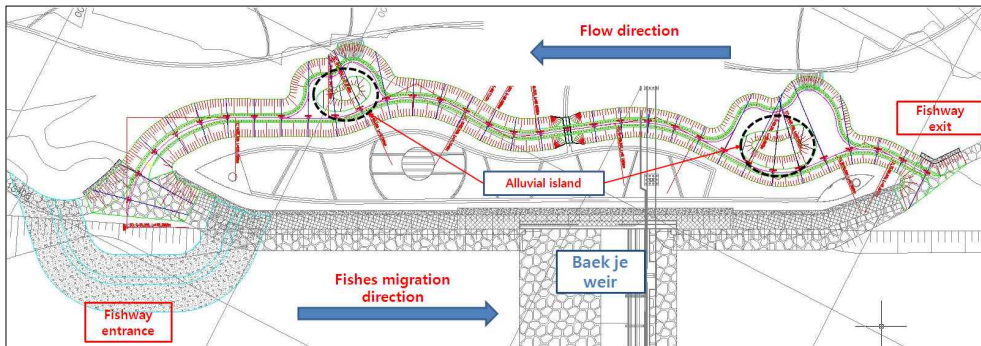


Fig. 2. Natural Fishway Floor Plan

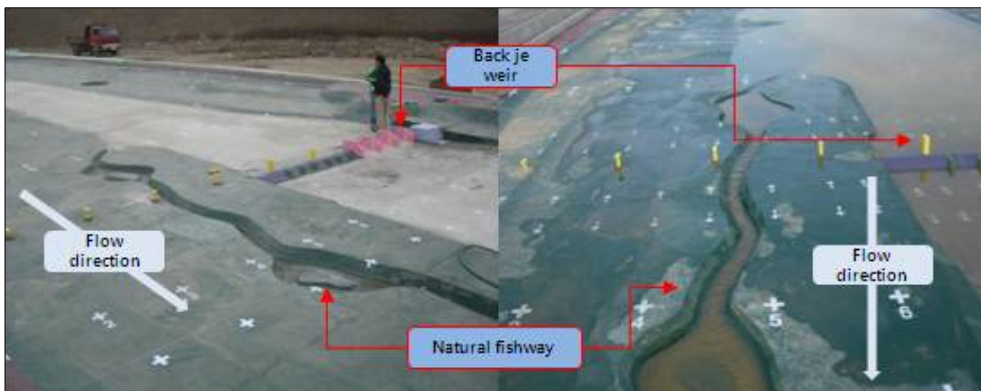


Fig. 3. Foreground of the Natural Fishway

본 수리모형실험에서는 모형의 설계 및 제작과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 할 수 있도록 모형을 설계하였고, 자연형 어도의 평면도는 Fig. 2와 같다.

먼저 실제 하천의 횡단면형과 하도 설계계획 자료를 근거로 1/60 축척에 대한 하천단면을 재현하였다. 재현된 하도 단면에 대해서는 단면 검측을 수행하였으며, 하류단에

는 수위 조절용 수문을 설치하여 수위를 조절할 수 있도록 하였다. 수리모형실험에 이용되는 물은 순환방식으로 사용되고, 저수조→양수펌프→고수조→유량측정장치→모형→귀환수로→저수조의 순서로 물이 순환되도록 설계하였다. 자연형 어도는 Fig. 3과 같이 백제보 우측에 주변 하도지형에 맞춰 설치하였다.

3.2 자연형 어도구간에서의 수리모형실험 수행

수리모형실험을 통하여 자연형 어도의 수심을 측정하기 위하여 백제보의 평수시 관리수위 4.2El.m일 때 자연형 어도로 유입되는 유입유량 $1.3\text{m}^3/\text{s}$ 를 적용하여 모형실험을 수행하였다. 자연형 어도의 수심 및 유속 측정 지점은 총 6개 지점으로 Fig. 4에 제시된 바와 같다.

금강 백제보 평수시 관리수위 4.2El.m를 유지하며 어도로의 유입유량($1.3\text{m}^3/\text{s}$) 유입시 자연형 어도의 우수흐름은 원활하게 소통되는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)는 백제

보 자연형 어도전체의 흐름모습이며, Figs. 5(b) and 5(c)는 어도의 출구 및 입구의 흐름모습이다.

모형실험을 통해 수심을 측정한 결과 $0.36\sim 1.08\text{m}$ 로 나타났으며, 이 결과에 하상고를 더하여 수위로 환산하면 $1.52\sim 4.26\text{El.m}$ 의 범위로 나타났다. 수리모형실험을 통한 수심 및 수위 측정 결과는 Table 4에 제시하였다.

최근에 금강유역의 어류상 조사결과(국토해양부, 대전지방국토관리청, 2009) 총 6과 22종으로 조사되었으며, 백제보 설치 지역의 어류 조사결과 피라미가 우점종으로 나타났으며, 우세종으로 밀어, 납지리, 붕어순으로 나타났다(Table

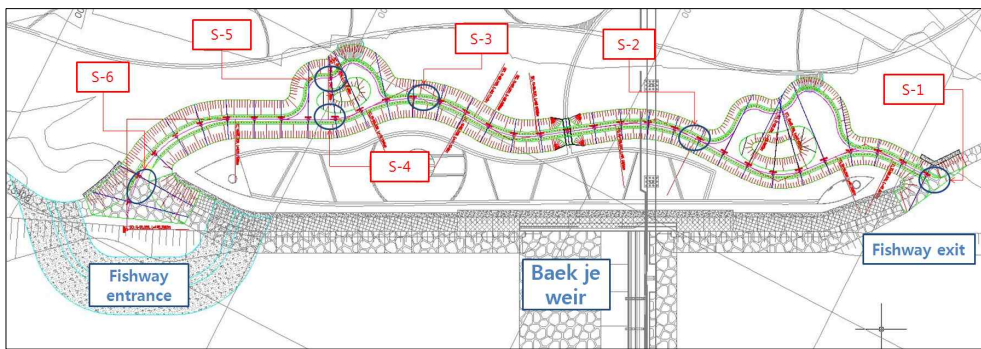
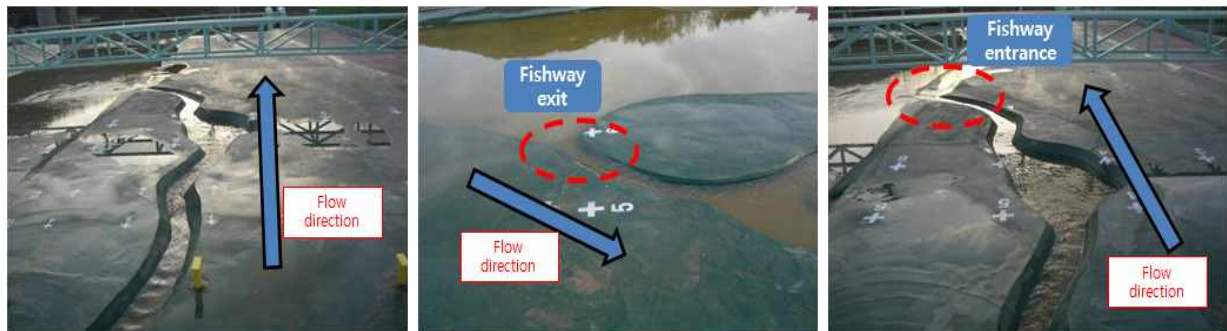


Fig. 4. Water Depth and Velocity Measuring Points

Table 4. Results of Hydraulic Model Experiments

Points	Bed Elevation (El.m)	Water Depth (m)	Water Surface Elevation (El.m)
	[A]	[B]	[A + B]
S-1	3.90	0.36	4.26
S-2	3.26	0.66	3.92
S-3	2.14	1.08	3.18
S-4	1.66	0.78	2.44
S-5	1.66	0.78	2.44
S-6	0.86	0.66	1.52



(a) Natural Fishway

(b) Fishway Exit

(c) Fishway Entrance

Fig. 5. Foreground of the Natural Fishway for Normal Flow

Table 5. Survey Results and Habitat Condition of Major Fish

Scientific Name (국명)	Population	Water Depth (m)
Zacco platypus (피라미)	34 (Max)	0.1 ~ 0.5
Rhinogobius brunneus (밀어)	16	0.1 ~ 0.5
Acheilognathus rhombea (납지리)	5	0.3 ~ 0.8
Carassius auratus (붕어)	5	0.1 ~ 1.5
Pseudogobio esocinus (모래무지)	4	0.1 ~ 0.5

5). 자연형 어도의 수심 분포는 백제보 설치구간 내에 분포하는 주요 어종 서식처 수리조건 범위에 포함되며, 자연형 어도는 설치구간 내 분포하는 주요 어종들이 서식하거나 활동 가능한 적정수심이 형성되는 것으로 나타났다.

4. 수치해석을 통한 자연형 어도구간의 서식처 특성분석

4.1 River2D의 모형 이론

본 연구에서 사용한 River2D는 수심 평균한 유한요소 모형을 사용한 2차원 수리 서식모형으로 Eq. (1)과 같은 질량보존의 개념과 Eqs. (2) and (3)과 같은 x, y축의 운동량보존의 개념을 사용하여 미시적 규모의 서식처에서 공간적으로 상세한 수리적 분석을 할 수 있는 모형이다. 또한 Eqs. (4) and (5)는 각각 유속과 관계된 유출량이다.

$$\text{연속방정식 : } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 방향 운동량 방정식 :

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

y 방향 운동량 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 \\ = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$q_x = HU \quad (4)$$

$$q_y = HV \quad (5)$$

여기서, H 는 흐름의 평균수심, U 와 V 는 각각 x 와 y 방향의 수심평균유속(depth averaged velocities), g 는 중력

가속도, ρ 는 물의 밀도, S_{0x} 와 S_{0y} 는 x 와 y 방향의 하상경사, S_{fx} 와 S_{fy} 는 각각 x 와 y 방향의 마찰경사이다. 그리고 τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} 와 τ_{yy} 는 수평응력 인자를 나타낸다. 즉 River2D의 수리동역학적 모의과정은 천수방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며, 자연하천에서 상류 및 사류 등과 같은 모든 흐름상태의 모의가 가능하고 부정·부등류 모의에도 적용될 수 있다. 그리고 River2D의 구성은 River2D_Bed, River2D_Mesh, River2D_Habitat으로 세 가지 모형으로 구성되어 있다. 먼저 River2D_Bed는 River 2D를 구동하기 위한 입력 자료로서 문서편집기로 작성된 지형파일을 입력하는 프로그램이다. 이 파일은 River2D_Mesh에서 유한요소망을 구축하기 위한 입력데이터로 볼 수 있다. 두 번째는 River2D_Mesh는 River2D_Bed에서 유한요소망을 구성하는 절점과 요소에 관한 정보를 읽어 들인다. 유한요소망은 절점(node)과 요소(element)로 구성되며, 하나의 유한요소망은 여러 개의 삼각형 또는 사각형 요소로 대상지역의 표면이라 할 수 있다. 마지막으로 River2D_Habitat 모형은 물리적 서식모의시스템 (Physical Habitat Simulation System, PHABSIM)에서 구상되어 사용되어진 WUA의 계산방법과 동일한 개념을 사용하고 있다. WUA는 각 절점에서 평가되어지는 복합 서식처 적합도 지수(C_i)에 의해 계산되어진다.

4.2 자연형 어도구간의 수치모형 검증

백제보의 평수시 관리수위 4.2El.m일 때 자연형 어도 내 흐름특성을 분석하기 위하여 2차원 수리모형인 River 2D를 적용하고, 수리모형실험을 통해 산정한 지점과 동일한 지점에 대하여 수심결과를 비교하는 방법으로 모형을 검증하였다.

수치해석모형을 적용하기 위해서는 먼저 대상구간을 모형화 하여야 한다. 따라서 백제보 건설지점의 수치지도를 이용하여 절점과 요소로 구성된 지형파일을 구축하였고, River2D_Bed에서 구축된 지형파일을 바탕으로 유한요소망을 구축하였다. 절점은 총 349개, 요소는 총 586개로 구

성되었으며, 구축된 유한요소망은 Fig. 6에 나타내었다.

또한, 구축된 지형자료를 통하여 River2D에서 표현되는 하상을 Fig. 7에 나타내었다. 어도 출구의 하상표고는 0.7El.m이며, 어도 입구는 3.9El.m로 구성되어있다.

River2D 모형을 이용하여 자연형 어도의 상·하류 경계조건을 입력조건으로 하여 수심과 유속에 대해 분석을 실시하였다. 자연형 어도의 상·하류 경계조건은 백제보에 평수시 관리수위 4.2El.m 일 때 자연형 어도로 유입되는 유량 1.3m³/s를 상류단 경계조건으로 설정하였고, 그때의 하류단 수위 1.5El.m를 하류단 경계조건으로 설정하였다. 또한, 자연형 어도에 적용되는 조도계수는 금강수계 하천 기본계획(국토해양부, 대전지방국토관리청, 2009)에 제시된 0.027을 적용하였고, 상·하류 경계조건 및 조도계수는 Table 6에 제시하였다.

본 연구에서는 자연형 어도의 수심과 유속모의를 위해

River2D 모형에 자연형 어도의 상·하류 경계조건을 바탕으로 수심과 유속에 대해 산정하였다. 수치해석을 통하여 산정된 자연형 어도의 수심 분포는 최소 0.31~최대 1.14 m의 범위로 산정되었으며, 어도 유입부에서 유출부까지 자연형 어도의 수위는 1.54~4.21 El.m의 범위로 나타났다. 또한 유속은 최소 0.12~최대 0.54m/s로 산정되었다. 자연형 어도의 수위 및 유속 산정결과는 Table 7에 제시하였으며, Figs. 8 and 9에 수위 및 유속 분포도를 도시하였다.

수리모형실험을 통하여 측정된 수심과 2차원 수치모형(River2D)으로 모의한 수심을 비교하였다. 자연형 어도의 수심 비교는 측정점 6개에 대하여 수행하였으며, 비교 결과 최소 0.05~최대 0.15m 차이를 보였으며, 측정된 모형 수심과 모의된 수심이 비교적 근사하게 나타나 수치해석 결과 백제보 우측에 설치되는 자연형 어도를 적절하게 모의한 것으로 나타났다. 수치해석과 모형실험 수위 비교 그

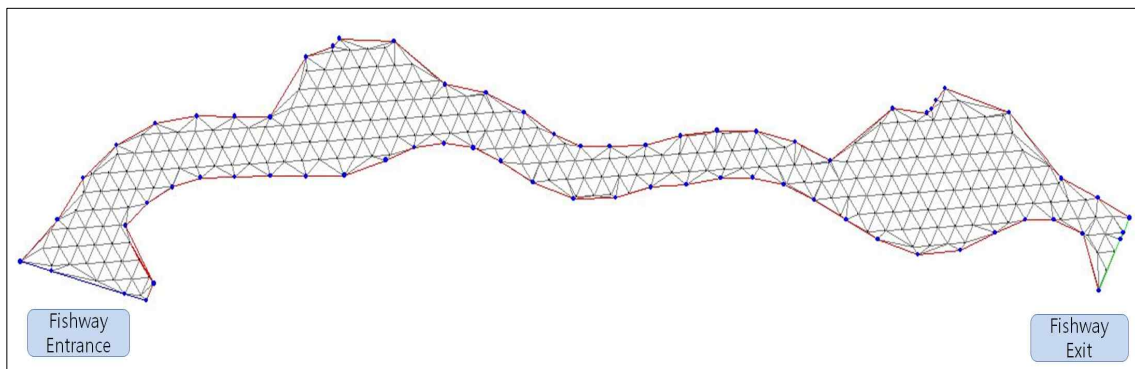


Fig. 6. River2D Finite Element Mesh

Table 6. Upstream and Downstream Boundary Conditions

Boundary Conditions		Roughness Coefficient
Upstream	Downstream	
1.3m ³ /s	1.5El.m	0.027

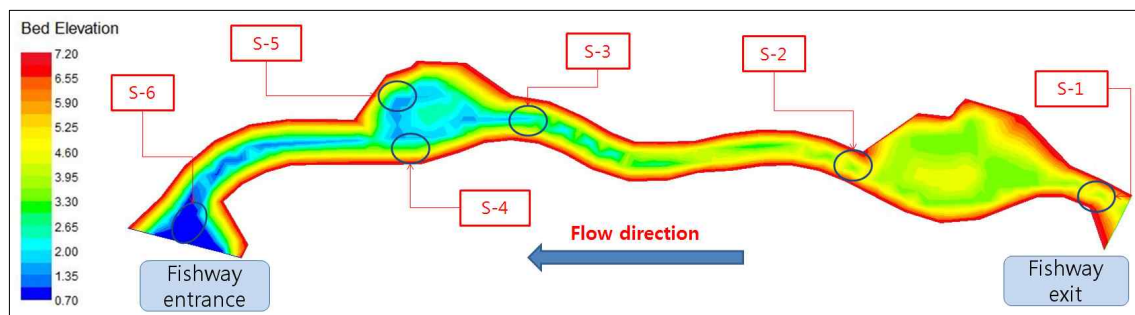


Fig. 7. Distribution of Bed Elevation

Table 7. Results of Numerical Analysis

Points	Bed Elevation (El.m)	Water Depth (m)	Water Surface Elevation (El.m)	Velocity (m/s)
	[A]	[B]	[A+B]	
S-1	3.90	0.31	4.21	0.38
S-2	3.26	0.81	4.07	0.54
S-3	2.14	1.14	3.28	0.51
S-4	1.66	0.85	2.51	0.39
S-5	1.66	0.85	2.51	0.12
S-6	0.86	0.68	1.54	0.34

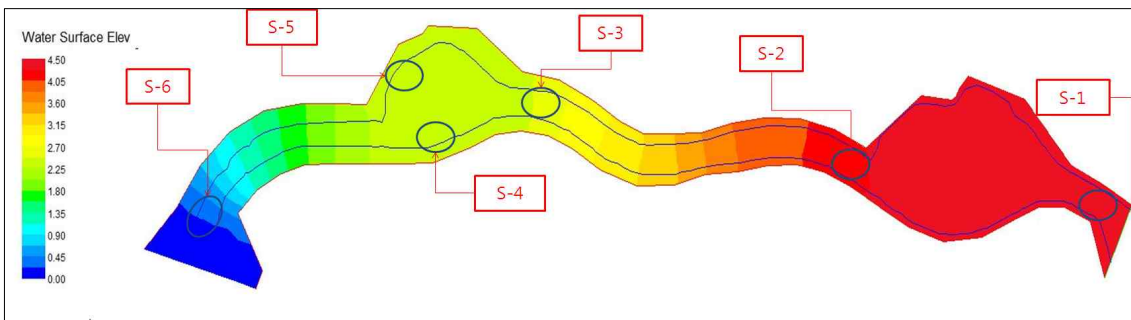


Fig. 8. Distribution of Water Surface Elevation

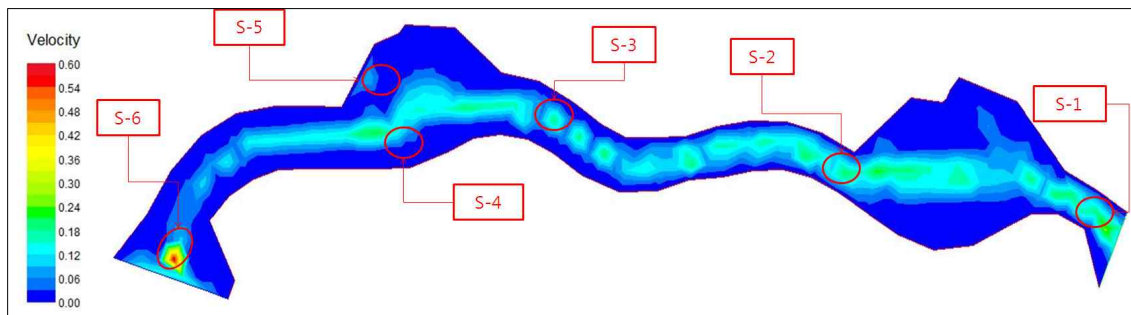


Fig. 9. Distribution of Velocity

래프는 Fig. 10에 제시하였다.

5. 자연형 어도의 어류서식처 평가

5.1 서식처 모의의 기본이론

서식처 모의는 하천구간에서 대상어종의 활동을 위한 물리적 서식처의 공간 면적을 양적으로 계산할 수 있는 과정이다. River2D의 서식처 모의에서 계산되어지는 물리적 서식처 공간인 가중가용면적(WUA)은 하도 공간상의 물리적 서식처로서 대상 어종의 성장단계별 수심, 유속, 하상재료의 서식처 적합도 지수를 각각 가중한 하도

면적으로 이 인자들은 Eq. (6)과 같이 서식처 적합도 지수에 의해 가중치가 부여되고, Eq. (7)과 같이 각 셀에 가중된 가용 면적은 가중된 선호도 인자인 복합 서식처를 각 셀 면적에 곱함으로써 WUA가 계산되어진다. WUA는 대상어종의 특정 성장단계별, 서식처특성별로 주어진 구간을 이용할 수 있는 순수적합도(net suitability)에 대한 하나의 지표이다. 또한 WUA가 크다는 것은 그만큼 대상어종의 서식처 및 활동 영역이 크다는 것을 의미한다. 가중가용면적은 각 절점에서 평가되어지는 복합서식처 적합도 지수(C_i)에 의해 계산되어진다.

복합서식처 적합도 지수(C_i)는 유속에 대한 서식처 적

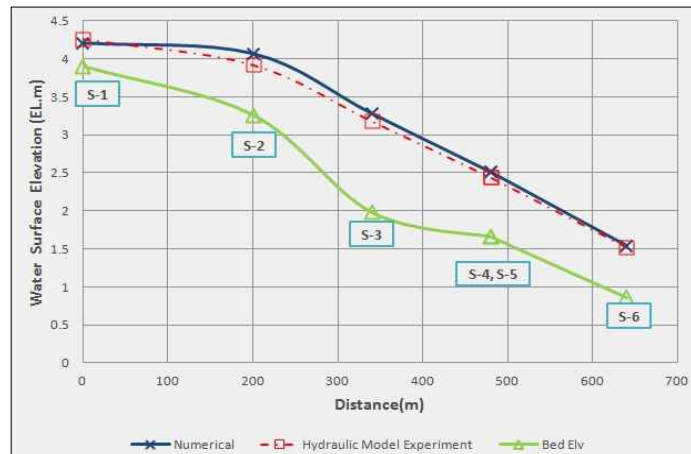


Fig. 10. Comparison of Hydraulic Model Experiments and Numerical Analysis Water Surface Elevation

합도 지수(v_i), 수심에 대한 서식처 적합도 지수(d_i), 하상 지수에 대한 서식처 적합도 지수(s_i)의 적합도 기준을 조합하여 산정하게 되는데 산정방법에는 곱셈방법, 기하평균 방법, 최소치 방법 등이 있으며, 본 연구에서는 모든 변수의 적합도 지수가 최적상태인 지수 1.0의 경우에만 존재하는 것을 의미하는 곱셈방법을 적용하여 복합 서식처 적합도 지수를 선정하였고, 곱셈방법의 수식은 다음 Eq. (6)과 같다.

$$C_i = f(v)_i \times f(d)_i \times f(s)_i \quad (6)$$

River2D 모형은 하나의 수심과 두 개의 유속을 계산함으로써 입력된 복합 서식처 적합도 지수(C_i)에 맞춰 변환되어져 WUA를 각 셀 별로 계산한다. 여기서 WUA는 셀 면적(A_i)에 복합 서식처 적합도 지수(C_i)를 곱하여 계산되고 이용되는 수식은 다음 Eq. (7)과 같다.

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (7)$$

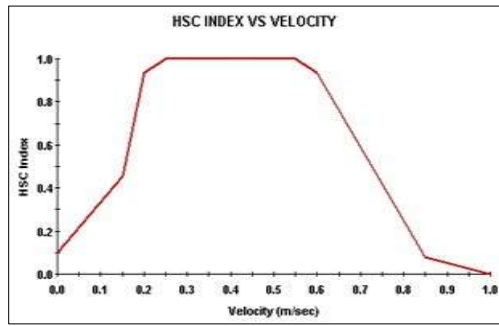
여기서, A_i 는 i 셀의 면적이고, C_i 는 i 셀의 복합 서식처 적합도 지수이다.

5.2 대상어종 및 서식처 적합도 선정

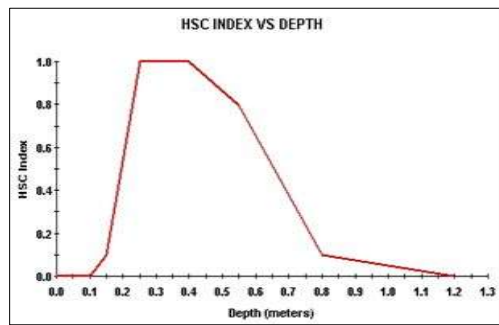
대상어종 선정을 위하여 최근 현장에서 조사한 결과를 사용하는 것이 바람직하므로, 최근에 조사된 결과인 금강수계 하천기본계획(국토해양부, 대전지방국토관리청, 2009)을 참고하였으며, Table 5에 제시한 바와 같다. 조사결과 출현 어종은 피라미, 밀어, 납지리, 붕어, 모래무지 순으로 나타났으며, 이 중에서 최다수가 출현한 우점종인 피라미를 대표어종으로 선정하였다.

River2D를 통해 어류서식처를 모의하는데 있어 서식처 적합도 곡선(Habitat Suitability Criteria, HSC)은 중

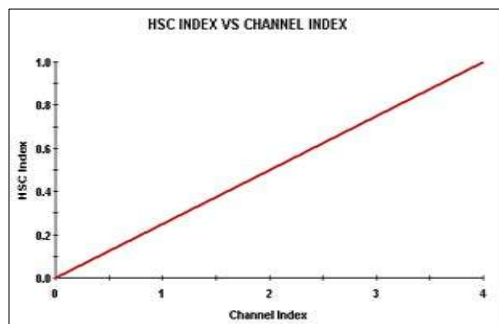
요 요소이며, 어류서식처 평가를 위해서는 어류에 대한 신뢰성이 있는 자료 수집을 통하여 실제 어류서식처를 반영할 수 있는 적합도를 마련하여 적용하는 것이 가장 중요하다(Bovee et al., 1998). 그러나 실제 어류의 개체 수만큼 채집이 안 되고, 조사 횟수의 부족 등 여러 가지 제약에 의해 부득이 한 경우 동일어종에 대해 다른 유역에서의 작성된 서식처 적합도 지수의 이용이 가능하다(USGS, 2001). 따라서 본 연구에서는 과거 낙동강유역조사(건설교통부, 한국수자원공사, 2004)시 작성된 피라미의 성어기와 산란기의 서식처 적합도 곡선을 적용하였으며, 본 적합도 곡선은 금강유역에(오국열 등, 2008; 오국열, 2009) 적용되어져 피라미의 물리서식처가 분석되어진 바 있다. 피라미의 서식처 적합도 곡선을 통해 유속, 수심, 하상재료의 적합도 지수를 Figs. 11 and 12에 나타내었다. 유속 적합도에 대한 적합도 지수는 성어기의 경우 유속 0.25~0.55 m/s의 범위에서 지수를 1.0으로 설정되었으며, 유속 1.0 m/s 이상에서는 피라미가 거의 서식하지 않기 때문에 그 이상의 유속에서는 지수를 0으로 설정하였다. 산란기의 경우 유속 0.30~0.55 m/s의 범위에서 지수 1.0으로 설정되었으며, 최대 1.8 m/s까지 지수를 설정하였다. 수심 적합도를 통해 설정된 지수는 성어기의 경우 0.25~0.40 m, 산란기의 경우 0.30~0.55 m에서 지수를 1.0으로 설정하였다. 지수 0의 경우는 피라미가 거의 서식하지 않는 수심범위로 성어기의 경우 수심 0.1 m 이하, 1.2 m 이상 산란기의 경우 수심 1.0 m 이상으로 설정하였다. 하상재료에 대한 적합도는 피라미의 경우 유속과 수심에 민감하게 반응하며, 하상재료에는 유속과 수심에 비해 영향을 받지 않기 때문에 하상재료의 적합도 지수는 자갈층을 1.0, 모래의 경우 0.5로 설정하였다.



(a) Velocity HSC

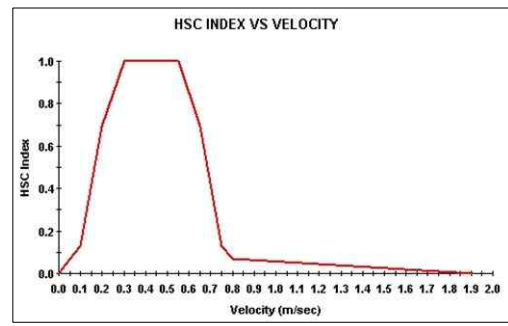


(b) Depth HSC

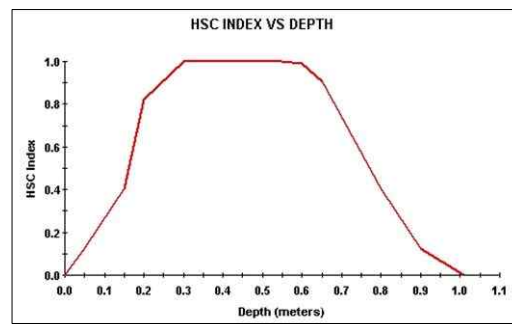


(c) Channel Index HSC

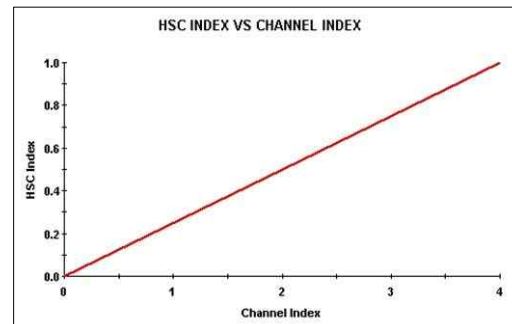
Fig. 11. Habitat Suitability Criteria (adult)



(a) Velocity HSC



(b) Depth HSC



(c) Channel Index HSC

Fig. 12. Habitat Suitability Criteria (spawning)

Table 8. Results of WUA

Discharge	WUA	
	Adult	Spawning
1.3 m ³ /s	195.39 m ²	334.47 m ²

5.3 자연형 어도의 어류서식처 평가

5.3.1 자연형 어도의 어류서식처 평가

자연형 어도의 인위적 변화가 없을 때에 백제보의 평수 시 관리수위 4.2El.m일 때 유입유량 1.3m³/s를 적용하여 대표어종 피라미의 성어기와 산란기 두 개의 성장단계별 가중가용면적(WUA) 산정결과 성어기의 WUA는 195.39

m², 산란기의 WUA는 334.47 m²로 산정되었으며, 모의 결과는 Table 8에 나타내었다.

피라미의 서식 및 활동영역으로 조성된 소의 S-2 일부 구간을 제외하고 하중도 주변으로 피라미에 적합한 가중가용면적(WUA)이 확보되는 것으로 나타났다. 이는 피라미의 서식 및 활동에 지장이 없을 것으로 판단되며, 가중가용면적(WUA)의 분포는 Fig. 13에 나타내었다.

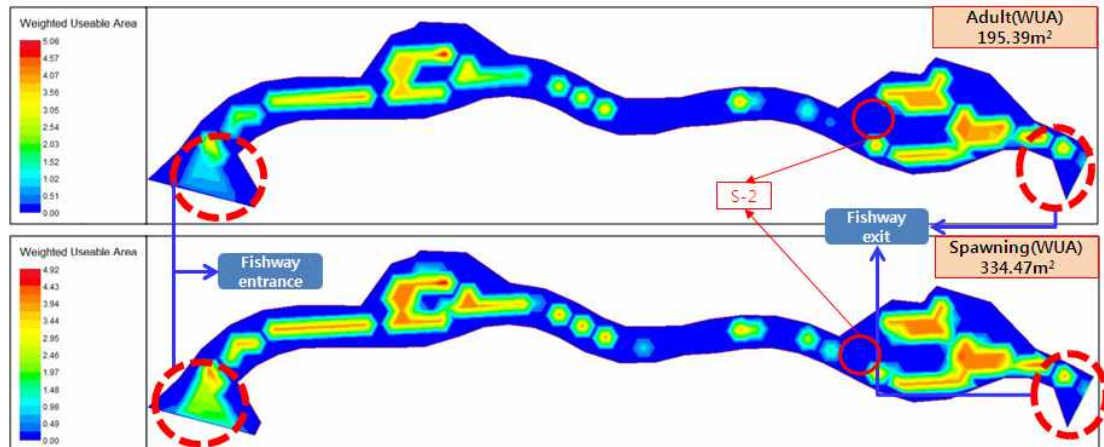


Fig. 13. Distribution of WUA for Natural Fishway

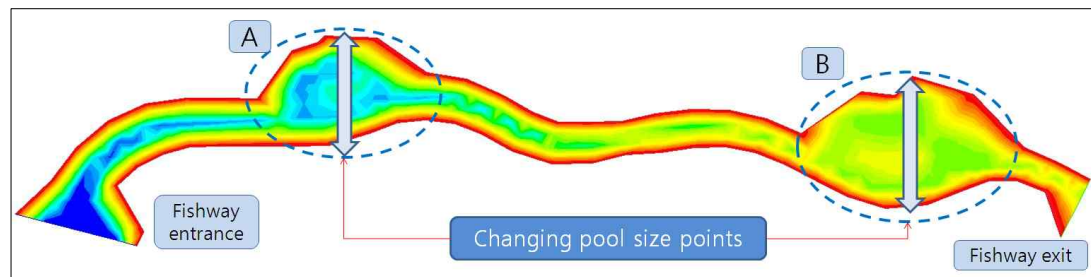


Fig. 14. Natural Fishway by Artificial Variation Points

Table 9. Results of WUA by Changing Pool Size Variation

Changing Pool Size	WUA			
	Adult (m ²)	Relative Area (%)	Spawning (m ²)	Relative Area (%)
[A]	[B]	[(B/A)×100]	[C]	[(C/A)×100]
+0 m (22,661.39 m ²)	(Max)195.39	0.86	334.47	1.48
+1 m (22,891.23 m ²)	174.09	0.76	(Max)352.33	1.54
+2 m (23,112.91 m ²)	160.78	0.70	324.87	1.41
+3 m (23,218.20 m ²)	145.45	0.63	301.09	1.30
+4 m (23,509.79 m ²)	119.48	0.51	264.75	1.13
+5 m (23,735.55 m ²)	135.96	0.57	252.95	1.07

5.3.2 자연형 어도의 인위적 변화에 따른 어류서식처 평가

백제보 자연형 어도에 인위적 변화를 주어 자연형 어도 형태의 물리적 변화에 따른 어류서식처를 산정하였으며, 자연형 어도의 변화 위치는 Fig. 14에 제시하였다. 또한, 인위적 변화에 따른 변화 시나리오는 총 5개의 Case로

Table 9에 제시하였으며, 소 A와 B의 횡단 폭을 각각 1m 씩 최대 5m까지 증가시킨 후 가중가용면적을 산정하여 자연형 어도의 어류서식처가 향상되는 조건을 검토하였다.

백제보 평수시(관리수위 El. 4.2m) 자연형 어도에 유입되는 유량 1.3m³/s를 소의 횡단 폭을 인위적으로 변화시킨 자연형 어도에 적용하여 대표어종 피라미의 성어기와 산란기 두 개의 성장단계별 가중가용면적 산정결과 성어

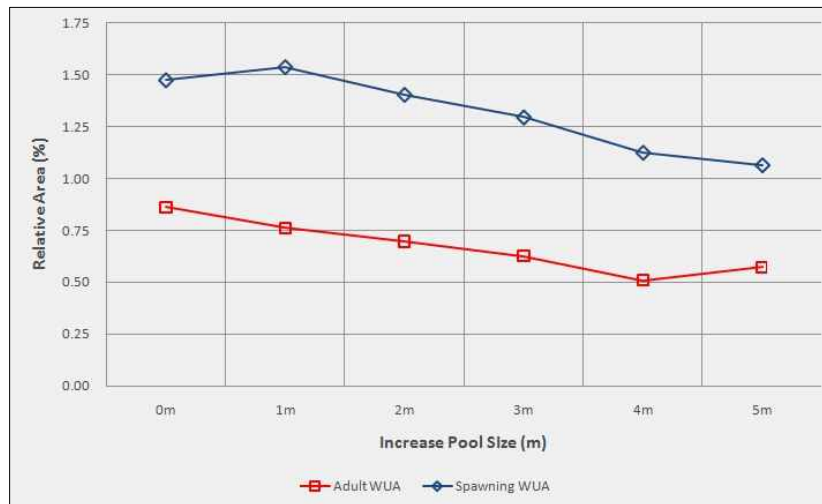


Fig. 15. Comparison of Relative Area by Changing Pool Size

기의 WUA는 소의 크기변화가 없을 때 가장 큰 WUA가 산정되었으며, 소의 크기가 증가할수록 감소하는 추세로 나타났다. 이는 소의 크기가 증가하면서 피라미의 성어기 시의 적정수심 및 유속을 확보하지 못하는 것으로 판단된다. 산란기의 WUA는 소의 횡단 폭이 1m 증가하였을 때에 352.33m²로 가장 큰 WUA가 산정되었으며, 전체면적 증가에 따른 WUA의 상대적 증가량도 가장 크게 산정되었다. 하지만 횡단 폭이 점차 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

가중가용면적의 주된 분포는 어류 휴식공간으로 조성된 소에 집중되어 분포하였으며, 소의 횡단 폭 증가량이 +0m일 때 성어기의 WUA는 195.39m², 소의 횡단폭 증가량이 +1m일 때, 산란기의 WUA는 352.33m²으로 가장 큰 가중가용면적이 산정되었다.

또한, 인위적 변화에 따른 자연형 어도의 전체면적에 대한 가중가용면적의 상대면적변화는 Fig. 15에 제시하였다. 성어기의 WUA의 경우 소의 횡단 폭이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 산란기의 WUA의 경우 소의 횡단 폭이 1m 증가하였을 때 최고치를 보이며, 소의 횡단 폭이 증가할수록 점차 WUA가 감소하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 금강유역에 시행되고 있는 금강살리기 백제보 건설사업중 백제보 우측에 설치중인 자연형 어도에 대하여 수리모형실험 및 수치해석을 통해 자연형 어도의 수리특성을 분석하였으며, 백제보 설치구간 내 분포하는 우점종인 피라미에 대하여 자연형 어도의 평수시 흐름

에 대한 가중가용면적을 산정하여 어류서식처를 평가하였다. 가중가용면적의 향상을 위해 자연형 어도의 소를 인위적으로 변화시켜 어류서식처가 향상되는 조건을 검토하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 축적 1/60의 수리모형실험을 통해 평수량에 대한 수심을 분석한 결과, 백제보 설치구간 내 분포하는 어종의 서식처 수리조건 범위 안에 포함되며, 이는 자연형 어도 내의 흐름이 주요 어종의 서식 및 활동에 적합한 적정수심을 형성하는 것으로 판단된다.

둘째, 수리모형실험을 통해 측정된 수심과 수치모형을 통한 모의수심의 비교를 통해 자연형 어도의 수리특성을 분석하였으며, 비교 결과, 최소 0.05~최대 0.15m의 차이로 모의 수심값이 측정수심을 비교적 근접하게 모의하는 것으로 나타났다.

셋째, 백제보 설치구간 내에 분포하는 어종 중 최우점종인 피라미를 선정하여 물리서식처 및 활동영역을 의미하는 가중가용면적을 성어기와 산란기 두 개의 성장단계별로 산정한 결과 성어기의 WUA는 195.39m², 산란기의 WUA는 334.47m²로 산정되었다.

넷째, 피라미의 성장단계별 WUA의 향상조건의 검토를 위하여 자연형 어도의 소 횡단폭을 인위적으로 변화시켜 WUA를 산정한 결과 성어기의 경우 소에 인위적인 변화가 없을 때 195.39m², 산란기의 경우 소의 횡단 폭이 1m 증가하였을 때 352.33m²로 가장 큰 WUA가 산정되었다.

참고문헌

강형식, 임동균, 김규호(2010). “댐 하류 하천에서 발전방류

로 인한 어류 물리서식처 변화 수치 모의.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제2B호, pp. 211-217.

건설교통부, 한국수자원공사(2004). 낙동강유역조사 보고서, 건설교통부.

국토해양부, 대전지방국토관리청(2009). 금강수계 하천기본계획, 국토해양부.

길준택, 이주현, 정상만, 오국열(2009). “하도내 어류서식처 조성을 위한 2차원 수리동역학 모형의 적용.” **한국수자원학회 2009년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 6-11.

김진홍(2008a). “어도 수리실험을 통한 어류 이동의 적합성 검증.” **한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 439-443.

김진홍(2008b). “어류 이동의 효율성을 고려한 어도 설계” **한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 2000-2004.

김진홍, 김철(1994). “어족의 소상을 위한 계단식어도 수리특성에 관한 연구.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제27권, 제2호, pp. 63-72.

박상덕(2001a). “어도 생태수리실험에 의한 회유성 어류의 소상능력 평가 - 사다리식 어도-.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호 pp. 365-379.

박상덕(2001b). “어도 생태수리실험에 의한 회유성 어류의 소상능력 평가 - 계단식 어도-.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호 pp. 381-390.

박성천, 김산원, 김용구(2003). “어도의 수리실험에 의한 어류 소상능력 검토.” **대한토목학회 2003년 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2798-2801.

안민우(2008). 하천의 생태복원을 위한 환경친화적 수로형 어도 개발. 박사학위논문, 건국대학교.

오국열(2009). 하천지형의 인위적 변화에 따른 어류물리서식처의 영향 평가. 석사학위논문, 공주대학교.

오국열, 정상만, 이주현, 최계운, 김도희(2008). “1차원 및 2차원 물리서식처 모의를 이용한 어류서식조건 유지에 필요한 최적유량 산정 : 피라미를 대상으로.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제8권, 제1호, pp. 117-123.

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.” *Aquat Ecol*, Vol. 45, pp. 113-124.

Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J., and Henriksen, J. (1998), Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology, U.S. Geological survey, Biological Resources Division information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, Fort Collins, Colorado.

Bovee, K.D., and Cochnauer, T. (1977). Development and evaluation of weighted criteria, probability-of-use curves for instream flow assessments: fisheries. Instream Flow Information Paper 3. United States Fish and Wildlife Service FWS/OBS-77/63. p. 38.

Lacey, R.W. (2004), Reach Scale Hydraulic Assessment of Instream Salmonid Habitat Restoration, Paper No. 01214 of Journal of the American Water Resources Association (JAWRA).

USGS (2001). PHABSIM for Windows-Users Manual and Exercises, Midcontinent Ecological Science Center.

Wu, R.S., and Mao, C.T. (2007). “The Assessment of River Ecology and Habitat Using a Two-Dimensional Hydrodynamic and Habitat Model.” *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 322-330.

논문번호: 11-116	접수: 2011.10.22
수정일자: 2012.01.10/01.12	심사완료: 2012.01.12