

인공하도식 어도에서 2차원 물리서식처 모형을 이용한 어류 유입 효율 평가 -피라미를 대상으로-

Assessment of Influx Efficiency at By-Pass Fishway Using Two-Dimensional Physical Habitat Simulation Model -Focused on *Zacco Platypus*-

백 경 오* / 박 지 현** / 김 영 도***

Baek, Kyong Oh / Park, Ji Hyun / Kim, Young Do

Abstract

In this study, the efficiency of the by-pass fishway installed at Kangjung-Goryong Weir in Nakdong River was assessed by using River2D which is a two-dimensional physical habitat simulation model. The model was calibrated and validated through the measured water elevation. The assessment was performed according to flow condition such as flood, normal, and low flow. Especially the low flow condition was focused on because the target fish, *Zacco Platypus*, have moved frequently up and downstream at the spawning season from April to June. From simulation results, it can be deduced that the influx efficiency and the passage efficiency of the fishway in the low flow is higher than that in the flood and normal flow due to occurrence of proper velocity at fishway entrance.

Keywords : by-pass fishway, Kangjung-Goryong Weir, River2D, attraction efficiency, passage efficiency

요 지

본 연구에서는 낙동강 본류의 강정고령보에 설치된 인공하도식 어도의 효율성을 2차원 물리서식처 모형인 River2D를 이용하여 평가해 보았다. 강정고령보 상하류단의 실측 수위를 이용하여 모형을 보정 및 검증하였다. 모의조건은 2012년 풍수량, 평수량, 저수량을 기준으로 어도 입구 및 어도 내부의 흐름장을 분석하였다. 특히 본 연구의 목표종인 피라미가 산란기인 봄철에 주로 이동을 하므로, 저수기를 기준으로 어도가 기능을 잘 유지하는지 살펴보았다. 분석결과, 풍수 및 평수기에는 본류 수위가 높아 어도로의 피라미 유입 효율성이 떨어져 보였다. 반면 저수기에는 본류의 낮은 수위로 인해 어도 입구에 상대적으로 적절한 유속이 발생하여 유입효율과 이동효율이 높아질 것으로 평가되었다. 어도 내 흐름은 어류가 소상하기에 무리가 없는 유속장이 발생하는 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 인공하도식 어도, 강정고령보, River2D, 유입효율, 이동효율

* 국립한경대학교 토목안전환경공학과 조교수 (e-mail: pko@hknu.ac.kr)
Assistant Professor, Department of Civil, Safety, and Environmental Engineering, Hankyong National University

** 인제대학교 환경공학과 석사과정 (e-mail: jihyun787@gmail.com)
Master Course, Department of Environmental Engineering, Inje University

*** 교신저자, 인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경연구센터) 조교수 (e-mail: ydkim@inje.ac.kr, Tel: 055-320-3252)
Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Inje University

1. 서 론

최근 수자원 활용을 위한 다목적 댐과 보 등의 지속적 건설로 인하여(Allan and Flecker, 1993; Thomas, 1996; Lemly et al., 2000) 전반적인 하천의 특성변화가 초래되고 있으며(Gray, 1992), 결과적으로 기존에 형성되어 있던 생태계의 변화가 발생하고 있다(Kinsolving and Bain, 1993; Yoon et al., 2011). 최근 4대강사업으로 인하여 16개의 다기능보가 설치되었으며, 각 다기능 보에는 인공하도식 어도나 아이스하버식 어도 등이 설치되어 있다. 하천 내 수공구조물은 하천에 서식하는 최상위 소비자 중 하나인 담수어류에 있어서 어류의 이동과 군집의 변화, 유전적 단절, 서식처 변화와 같은 다양한 문제를 유발한다(Moyle and Cech, 2000). 특히 특정한 시기에 산란을 위하여 하천의 유로를 따라 상류로 이동하고 혹은 하류로 이동하는 회유성 어류들에게는 심각한 문제를 초래하기도 한다. 그리하여 하천이 본래 갖고 있는 정상적인 유하기능과 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. 특히 큰 하천에 건설되는 대규모의 댐이나 보의 경우 소상하려는 어류가 어도의 입구로 잘 유인되는 것이 중요하다. 따라서 어도 이용효율을 증대시키기 위해서는 소상하려는 물고기를 유입시키기 위한 효율적인 어도 입구의 설계 및 시공이 필요하다(Bunt, 2001). 또한 이와 같은 어도의 효율을 평가하기 위해서는 다차원적인 수리학적 해석을 필요로 한다.

Park (2001a, 2001b)은 각각 사다리식 어도와 계단식 어도에 대하여 어도 생태수리실험을 실시하고, 유량과 어도경사의 변화를 통해 회유성 어류가 하천 하류에서 상류로 거슬러 올라가는 소상능력을 평가하였다. Kim (2008a, 2008b)은 어도 수리모형실험을 통하여 흐름에 따른 어류이동을 비교하는 방법으로 어도의 적정 형태를 결정하였다. Lee et al. (2012)은 수치해석 및 수리모형실험을 통하여 자연형 어도의 수리특성을 분석하였고, 유량점증방법론을 2차원 물리서식처 모의 모형인 River2D에 적용하여 백제보 자연형 어도의 어류서식처를 평가하였다. K-water (1995)와 Woo et al. (1998)은 경험적인 방법으로 유황 곡선을 이용하여 특정 추천 유량을 설정하였으며, Kim et al. (1996a, 1996b)은 물고기 서식처 환경 중 수심과 유속 등 수리조건을 유지하기 위한 최소 유량상정방법을 제시하였다. 또한 Kim (2000)과 Lee et al. (2006)은 어류 서식환경을 평가하기 위해 유량점증방법론을 1차원 물리적 서

식처 모의 시스템인 PHABSIM에 적용한 연구를 수행하였다. Kang et al. (2004)은 PHABSIM을 적용하여 최적유량을 산정하였으며 서식처 평가에 요구되는 수리인자의 모의를 위해 2차원 동수역학적 모형(RMA-2)을 이용하였다.

국외에서도 다양하게 변하는 어류의 서식처에서 보다 정확한 수심과 유속을 모의하기 위해 2차원 수리모형이 개발되어 이를 적용한 연구가 진행된 바 있다. Loar and Sale (1981), Gore and Petts (1989)은 유황 곡선을 이용하여 서식처의 추천 유량을 설정하였고, Lacey (2004)는 River2D 모형을 이용해서 송어 서식처 해석을 홍수 전과 홍수 후로 구분하고 유속과 수심을 비교하여 추천유량을 제시하였다. 또한 Wu and Mao (2007)는 1차원(PHABSIM) 및 2차원(River2D) 모형을 이용하여 하천 내 보 건설에 따른 유량별 가중가용면적 변화를 비교·분석하였다.

본 연구에서는 2차원 물리서식처 모형을 이용한 수치해석을 통하여 강정고령보의 좌안에 설치된 인공하도식 어도의 유입 효율을 분석하였다. 일반적으로 River2D는 하천의 지형자료와 유속장을 기반으로 어류의 서식 적합도를 평가하는데 사용되는 모형이다. 본 연구에서는 어도로의 유입효율과 어도내의 이동효율 등의 평가에 River2D 모형을 적용해 보았다. 어류의 유지속도와 돌진속도를 기준으로 어도 입구부에서 적절한 유속의 확보 여부를 평가하였으며, 특히 피라미의 이동이 활발한 봄철 산란기의 유량조건에 대하여 어도의 효율을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 River2D의 모형 개요

River2D는 수심 평균한 유한요소모형을 사용하는 2차원 수리 서식모형으로 Eq. (1)과 같은 질량보존의 개념과 Eqs. (2) and (3)과 같은 x, y 축의 운동량보존의 개념을 사용하여 미시적 규모의 서식처에서 공간적으로 섬세한 수리적 분석을 할 수 있는 모형이다. 또한 Eq. (4)와 Eq. (5)는 각각 유속과 관계된 유출량이다.

연속 방정식:

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

x 방향 운동량 방정식 :

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y} (Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 =$$

$$gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right)$$

y방향 운동량 방정식 :

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = \quad (3)$$

$$gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right)$$

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

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

여기서, H 는 흐름의 평균수심, U 와 V 는 각각 x 와 y 방향의 수심평균유속, g 는 중력가속도, 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 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ 와 τ_{yy} 는 수평응력 인자를 나타낸다(Lee et al., 2012). 바닥면 전단 응력에 영향을 받는 x 방향의 마찰경사는 Eq. (6)과 같이 수심 평균된 유속의 함수로 가정한다.

$$S_{fx} = \frac{\tau_{bx}}{\rho g H} = \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{gHC_s^2} U \quad (6)$$

여기서, τ_{bx} 는 x 방향으로의 바닥면 전단응력이고 C_s 는 Chezy 계수이다. Chezy 계수는 Eq. (7)과 같이 등가조고(roughness height) k_s 와 수심의 함수로 표현할 수 있다.

$$C_s = 2.5 + \frac{30}{e^2} \left(\frac{H}{k_s} \right) \quad (7)$$

River2D의 수리동역학적 모의과정은 천수방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며, 자연하천에서 상류 및 사류 등과 같은 모든 흐름상태의 모의가 가능하고 부정·부

등류 모의에도 적용될 수 있다. River2D 모형의 구성은 River2D_Bed, River2D_Mesh, River2D_Habitat 등 3가지 모형으로 구성되어 있으며, 모의 수행절차를 도식화하면 Fig. 1과 같다(Oh et al., 2008).

River2D 모형을 통해 계산되는 어류의 서식처 적합도는 물리서식처 모의 시스템에서 사용되는 가중가용면적(WUA: Weighted Usable Area)에 근거하여 산출된다. WUA는 대상어종의 특정 성장단계별, 서식처특성별로 주어 진 구간을 이용할 수 있는 순수적합도(net suitability)에 대한 하나의 지표이다. 또한 WUA가 크다는 것은 그만큼 대상어종의 서식처 및 활동 영역이 크다는 것을 의미한다. WUA는 각 절점에서 평가되어지는 복합서식처 적합도 지수(C_i)에 의해 계산되어진다. 복합서식처 적합도 지수(C_i)는 유속·수심·하상지수에 대한 서식처 적합도 기준을 조합하여 산정한다. 산정방법에는 곱셈방법, 기하평균방법, 최소치방법 등이 있으며, 그 중 곱셈방법은 최적 상태인 지수 1.0의 경우에만 존재하다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 곱셈방법을 적용하여 복합 서식처 적합도 지수를 선정하였고, 곱셈방법의 수식은 다음 Eq. (8)과 같다.

$$C_i = f(v)_i \times f(d)_i \times f(c)_i \quad (8)$$

여기서 v_i 는 유속 적합도 지수, d_i 는 수심 적합도 지수, c_i 는 하상지수 적합도 지수를 나타낸 것이다. River2D 모형은 하나의 수심과 두 개의 유속을 계산함으로써 입력된 복합서식처 적합도 지수(C_i)에 맞춰 변환되어져 WUA를 각 셀에 대해 계산한다. 여기서 WUA는 셀 면적(A_i)에 복합서식처 적합도 지수(C_i)를 곱하여 계산하고, 이용되는 수식은 다음 Eq. (9)과 같다.

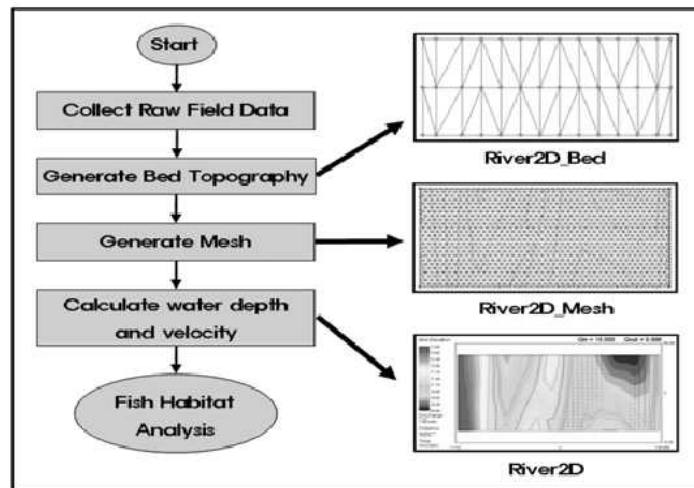


Fig. 1. River2D Modeling Process

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (9)$$

여기서, A_i 는 i 셀의 면적이고, C_i 는 i 셀의 복합 서식처 적합도 지수이다(Lee et al., 2012).

2.2 연구대상 지역

낙동강에 설치된 강정고령보는 사문진교 상류 3.82 km, 성주대교 하류 10.02 km에 위치한다. Fig. 2는 강정고령보의 위치와 조감도이다. 가동보(경간 길이 120 m, 높이 11.6 m, 2련)와 고정보(경간 길이 833.5 m, 높이 11.5 m) 및 소수력 발전소, 인공하도식 어도, 인공형 어도(아이스하버식), 공도교 등으로 구성되어 있다. 인공하도식 어도는 강정고령보 좌안에 위치하며 인공형 어도는 강정고령보의 우안 부근에 위치하고 있다(Yoon, 2012).

강정고령보 좌안에 설치된 인공하도식 어도는 보 설치

로 인해 발생하는 하천단절을 극복할 목적으로 설치되었으며, 일반적으로 콘크리트 구조물로 이루어진 어도와 다르게 저서어류나 저서동물 등 다양한 수중생물들과 어류들의 이동 및 서식이 가능하다. 어도의 형식은 회유성 어종의 보호 방안 조사를 통하여 소상능력이 뛰어나지 않으며, 계절에 따라 하류에서 상류로 또는 상류에서 하류로 이동하는 국지 회유성 어종인 피라미와 썩리(KRA, 2005)를 대상으로 어류의 진·출입에 최적인 인공하도식(by-pass) 어도로 설치되어 있다. Fig. 3은 인공하도식 어도의 평면도를 나타낸 것이며, Fig. 4는 인공하도식 어도의 횡단면도를 나타낸 것이다. Table 1은 인공하도식 어도의 제원을 나타낸 것으로 총 길이 520 m, 높이 5.2 m, 경사 1/100로 설치되었다.

2.3 유향 분석

강정고령보가 위치한 유역의 유향특성은 강정고령보

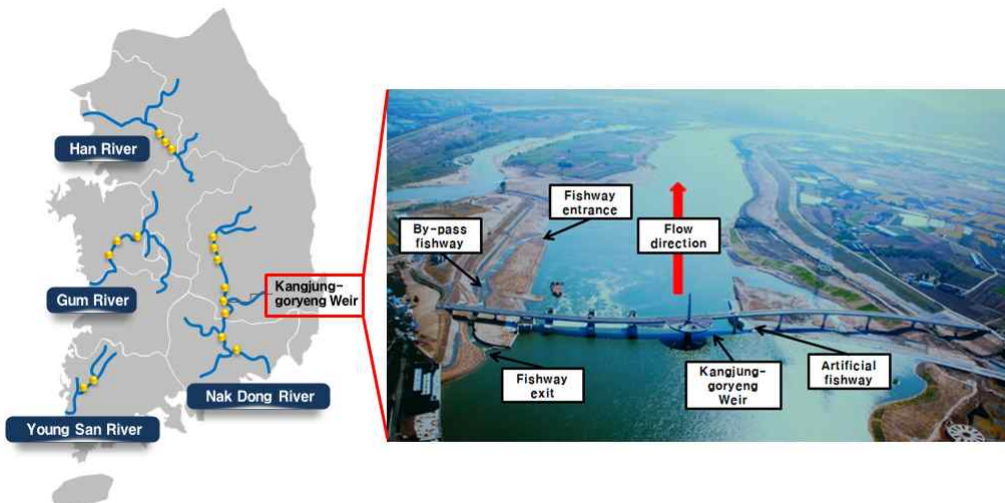


Fig. 2. Location and Aerial View of Kangjung-Goryeng Weir in Nakdong River

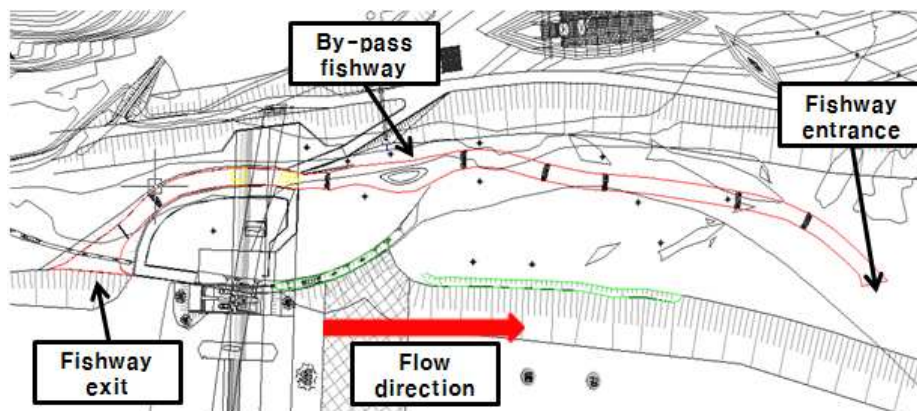


Fig. 3. Plan View of By-pass Fishway

상·하류에 인접한 성주수위표와 화원수위표의 WAMIS 실측 수위 자료와 수위-유량관계곡선식을 이용하여 유량을 산정하여 분석하였다(MLTM, 2010). 성주수위표의 경우 강정고령보 기준 상류 10.02km에 위치하고 있고, 화원수위표의 경우 하류 3.82km에 위치하고 있다. Fig. 5는 낙동강 성주수위표의 유황곡선이며, Table 2는 성주수위표의 유량과 화원수위표의 수위를 요약하여 나타낸 것이다. 강정고령보 상류에 위치한 성주수위표의 유량은 풍수기 178.65m³/s, 평수기 101.3m³/s, 저수기 62.48m³/s, 갈수기 54.48m³/s이고 하류에 위치한 화원수위표의 수위는 풍수기 EL. 14.27m, 평수기 EL. 13.1m, 저수기 EL. 9.5m, 갈

수기 EL. 8.55m이다. 성주수위표는 경상북도 성주군 선남면 선원리 (신)성주대교에 위치하여 강정고령보와 성주수위표 간에 사이의 거리가 10.02km로서 본 연구에서 인공하도식 어도의 접근 유속모의의 상류경계조건으로 활용하기에 부적절하였다. 그래서 HEC-RAS를 이용하여 부정류모의를 수행한 다음 성주수위표로 검보정을 한 후에 모의 결과를 임의 단면에서의 경계조건으로 사용하였다.

Fig. 6은 강정고령보 상류에 위치한 왜관 수위표와 성주 수위표를 나타낸 것으로 왜관 수위표 자료를 HEC-RAS 부정류 모의의 상류 경계조건으로 이용하였고, 성주수위표의 실측수위를 이용하여 검보정을 실시하였다. 모

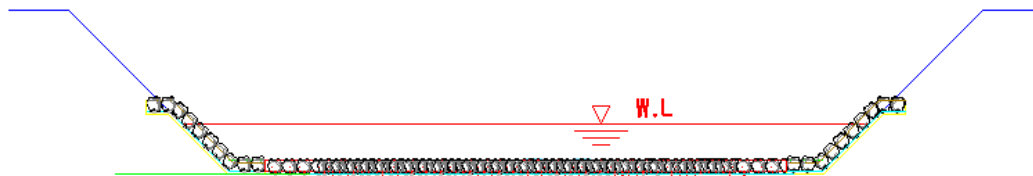


Fig. 4. Cross-Sectional View of By-pass Fishway

Table 1. Specification of By-pass Fishway

Name	Length (m)	Slope	Fishway Entrance (El.m)	Fishway Exit (El.m)
By-pass Fishway	520	1/100	18.50	13.30

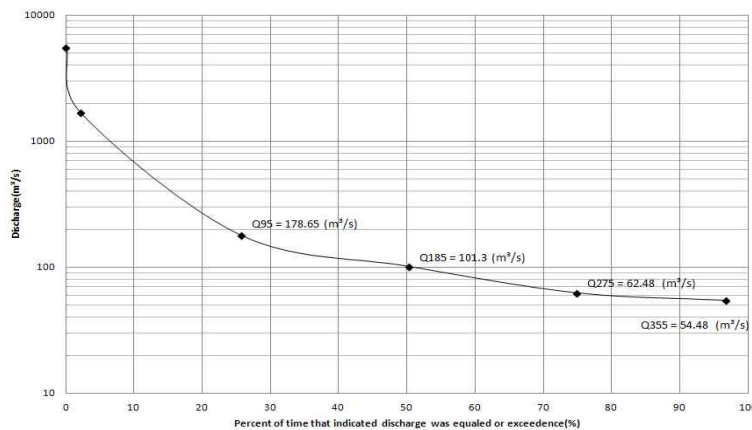


Fig. 5. Flow Duration Curve of Seongju Gaging Stations in Nakdong River

Table 2. Flow Regime of Seongju and Hwawon Gaging Stations (2012)

Gaging Stations	Flood Flow (Q95)	Normal Flow (Q185)	Low Flow (Q275)	Drought Flow (Q355)
Seongju	Flow (m ³ /s)			
	178.65	101.3	62.48	54.48
Hwawon	Water level (El.m)			
	14.27	13.10	9.54	8.55

의 기간은 2012년 일별 수위 관측자료를 활용하였으며, 모형의 정확성 평가하기 위해 결정계수(R^2), 절대평균오차(AME), 평균제곱근오차(RMSE) 등의 오차분석 지표를 사용하였다(Table 3).

Fig. 7은 성주 수위관측소의 실측 수위값과 HEC-RAS 모형의 모의 결과를 나타낸 것으로 모형의 정확성을 평가하기 위하여 통계지표를 표시하였다. 실측값과 관측값의 비교한 결과 R^2 는 0.751, AME는 0.223, RMSE는 0.239로 높은 상관관계를 보인다. 따라서 HEC-RAS의 모의 결과를 강정고령보의 상류단 경계조건으로 사용하기에 적합한 것으로 보였다. 본 연구에서는 낙동강 하천기본계획(MLTM, 2009) HEC-RAS 자료의 No. 366 단면인 대구광역시 달성군 다사읍 매곡리 지점으로 강정고령보 상류에서 1.5km에 위치한 곳을 2차원 수리해석의 상류경계조건으로 이용하였다.

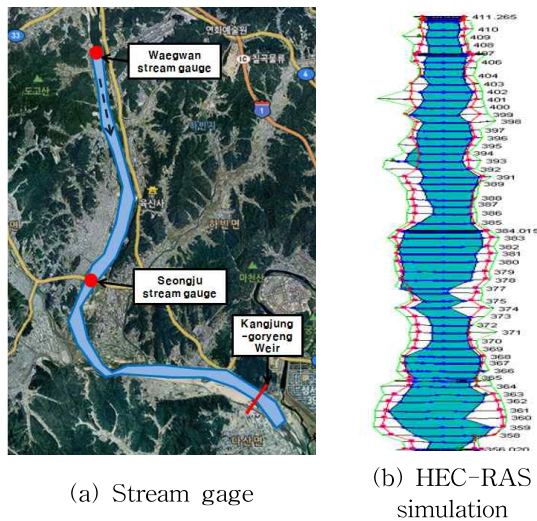


Fig. 6. Stream Gauge and HEC-RAS Setup in Nakdong River

3. 수치모의 결과

3.1 모형의 보정 및 검증

유황분석을 통하여 나타난 풍수기, 평수기, 저수기의 수위일 때, 인공하도식 어도의 입구부 흐름을 분석하기 위하여 2차원 수리모형인 River2D 모형을 적용하였으며, 강정고령보 지점에서 측정되고 있는 상·하류 수위 측정값으로 모형을 검보정하였다. 수치해석모형을 적용하기 위해서는 먼저 대상구간을 모형화하여야 하는데 강정고령보의 주변 지형도와 수치지도를 이용하여 절점과 요소로 구성된 지형파일을 구축하였고 River2D_Bed에서 구축된 지형파일을 바탕으로 유한요소망을 구축하였다. 절점은 총 2,372개, 요소는 총 4,483개로 구성되었으며, 구축된 유한요소망은 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 9는 구축된 지형자료를 통하여 River2D에서 표현되는 하상을 나타낸 것이다. 낙동강 본류의 상류 하상고는 EL. 8.52m이며, 하류의 하상고는 EL. 7.85m이다. 어도의 출구의 하상표고는 EL. 18.5m이며, 어도 입구는 EL. 13.3m로 구성되어 있다.

River2D 모형을 이용하여 강정고령보의 상·하류 경계조건을 입력조건으로 하여 수심과 유속에 대해 분석을 실시하였다. Table 4는 강정고령보의 상·하류 경계조건을

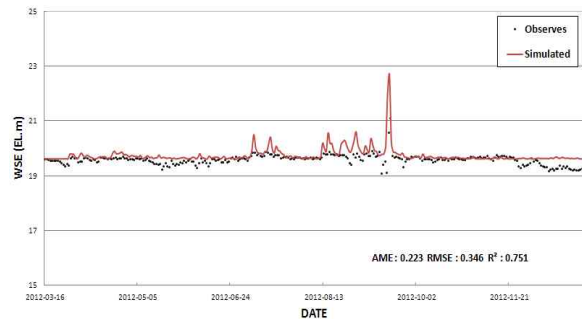


Fig. 7. Verification Result of WSE (Seongju Stream Gauge)

Table 3. Statistical Indices for Model Accuracy

Statistical Index	Equation	Desired value
Coefficient of Determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_f)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_{ave})^2}$	1
Absolute Mean Error	$AME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_f - Q_o $	0
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_f - Q_o]^2}$	0

Q_o : observations, Q_f : simulations, Q_{ave} : mean of observations, N : Total number of observations.

나타낸 것으로 풍수기, 평수기, 저수기의 3가지 조건으로 모의를 수행하였다. 인공하도식 어도 및 낙동강에 적용되는 조도계수는 낙동강 하천기본계획(MLTM, 2009)에서 제시된 사질하상 및 콘크리트의 조도계수로서 각각 0.023, 0.013로 적용하였으며, 상·하류 경계조건 및 조도계수는 Table 5에 제시하였다.

본 연구에서는 강정고령보의 상류단에서 측정되는 수위와 하류단에서 측정되는 수위를 이용하여 River2D 모형의 검보정을 실시하였다. 보정은 강정고령보 상류수위표를 이용하였으며, 검증은 강정고령보 하류수위표를 이

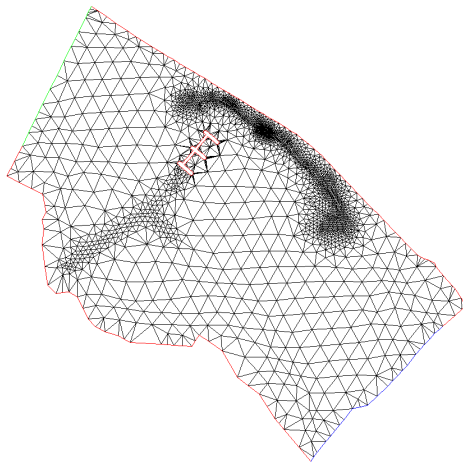


Fig. 8. River2D Finite Element Mesh

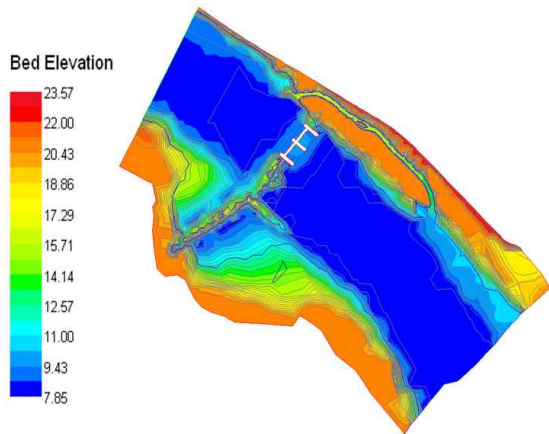


Fig. 9. Distribution of Bed Elevation

용하였다. 모형의 보정 기간은 2012년도 9월(풍수기 기준)으로 14일간을 보정기간으로, 12일간을 검증기간으로 선정하여 실시하였다. Fig. 10은 수치모의의 보정결과를 나타낸 것이며 Fig. 11은 검증 결과를 나타낸 것이다. 모형의 보정 및 검증 결과는 실측치와 모의치의 차이가 보정결과 최소 0.004 m에서 최대 0.118 m이며, 검증에서는 최소 0.005 m에서 최대 0.165 m로 나타났다. 또한 실측값과 관측값을 비교한 결과 보정시 R^2 는 0.789, AME는 0.036, RMSE는 0.050이었으며 검증시 R^2 는 0.821, AME는 0.071, RMSE는

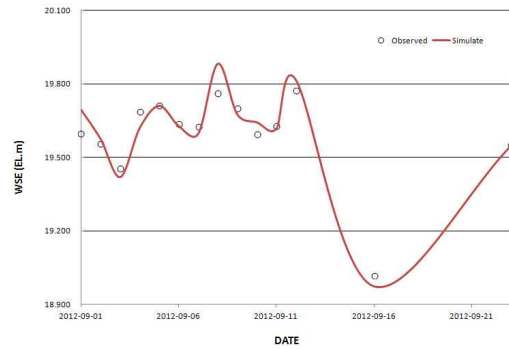


Fig. 10. Calibration of River2D Model

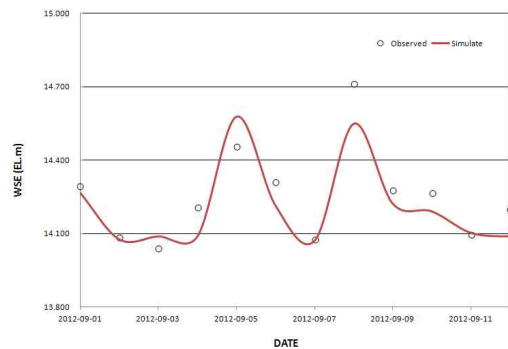


Fig. 11. Verification of River2D Model

Table 5. Roughness Coefficient

Channel	Roughness Coefficient
Concrete	0.013
Soil and Sand	0.023

Table 4. Upstream and Downstream Boundary Conditions

Boundary Conditions				
Spot	Unit	Flood Flow (Q95)	Normal Flow (Q185)	Low Flow (Q275)
Maegok-Ri	Flow (m ³ /s)	183.05	90.56	60.53
Hwawon	Water level (EL.m)	14.27	13.10	10.54

0.087로 높은 상관관계를 보였다.

3.2 2차원 모의 결과

검보정이 완료된 2차원 수치모형을 이용하여 강정고령보와 인공하도식 어도의 유입부의 유량조건별 수리해석을 실시하였다. 모의시 유황은 풍수량, 평수량, 저수량 세 가지로 나누어 분석하였다. 강정고령보의 운영계획을 살펴보면 평상시에는 가동보의 수문이 닫혀 있고 고정보로만 물이 월류하면서 관리수위(EL. 19.5m)를 유지하고, 우기에 가동보를 운영한다고 되어 있다(MLTM, 2009). 따라서 본 연구에서는 풍수량의 경우 가동보 수문을 개방하여 흐름을 모의하였으며, 평·저수량의 경우 수문을 닫고 모의를 수행하였다. 그 결과, Fig. 12는 낙동강 본류의 풍수

기, 평수기, 저수기의 유속장과 수심을 나타내었고, Fig. 13은 인공하도식 어도 입구 직하류의 유속장과 수심을 따로 확대하여 나타낸 것이다. 이 그림들에서 보듯이 각 유황에 따라 본류 및 어도 내부의 유속장은 서로 상이한 양상을 보이고 있다. 특히 가동보의 수문이 닫혀 있는 평수량과 저수량의 경우, 인공하도식 어도 유입부의 유속이 본류의 유속보다 최대 0.777 m/s, 최소 0.094 m/s 정도 차이를 보이며 빠른 것으로 나타났다. 유황에 상관없이 공통적으로 고정보 부근에서 빠른 유속을 볼 수 있는데 이것은 바닥고의 낙차에 의해 발생되었다고 사료된다.

Fig. 14는 인공하도식 어도 유입부 직하류 단면에서의 낙동강 좌안에서부터 누가거리별 유속 횡분포를 나타낸 것이다. 낙동강 본류의 유속 분포 형태가 평수기 및 저수

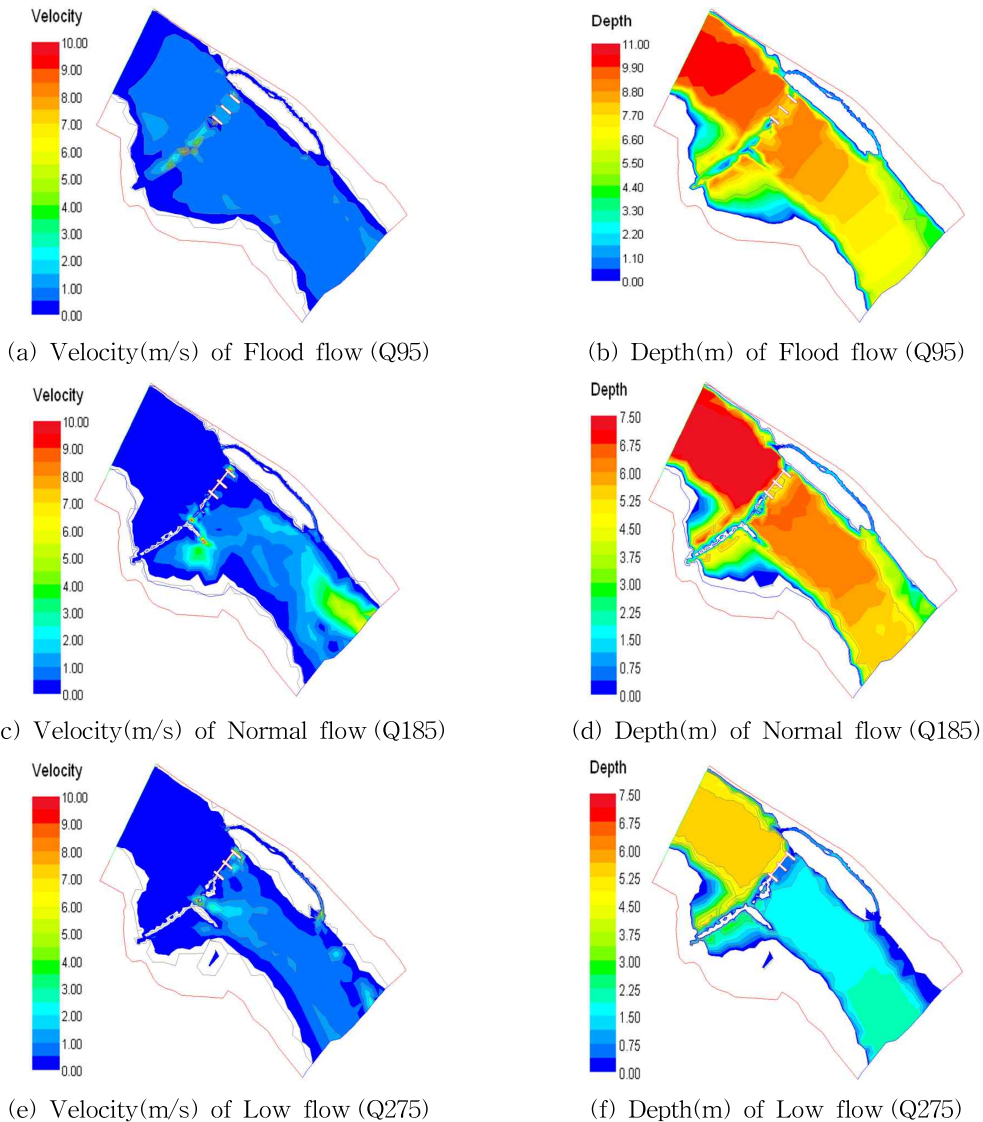


Fig. 12. Simulation Results of Main Channel

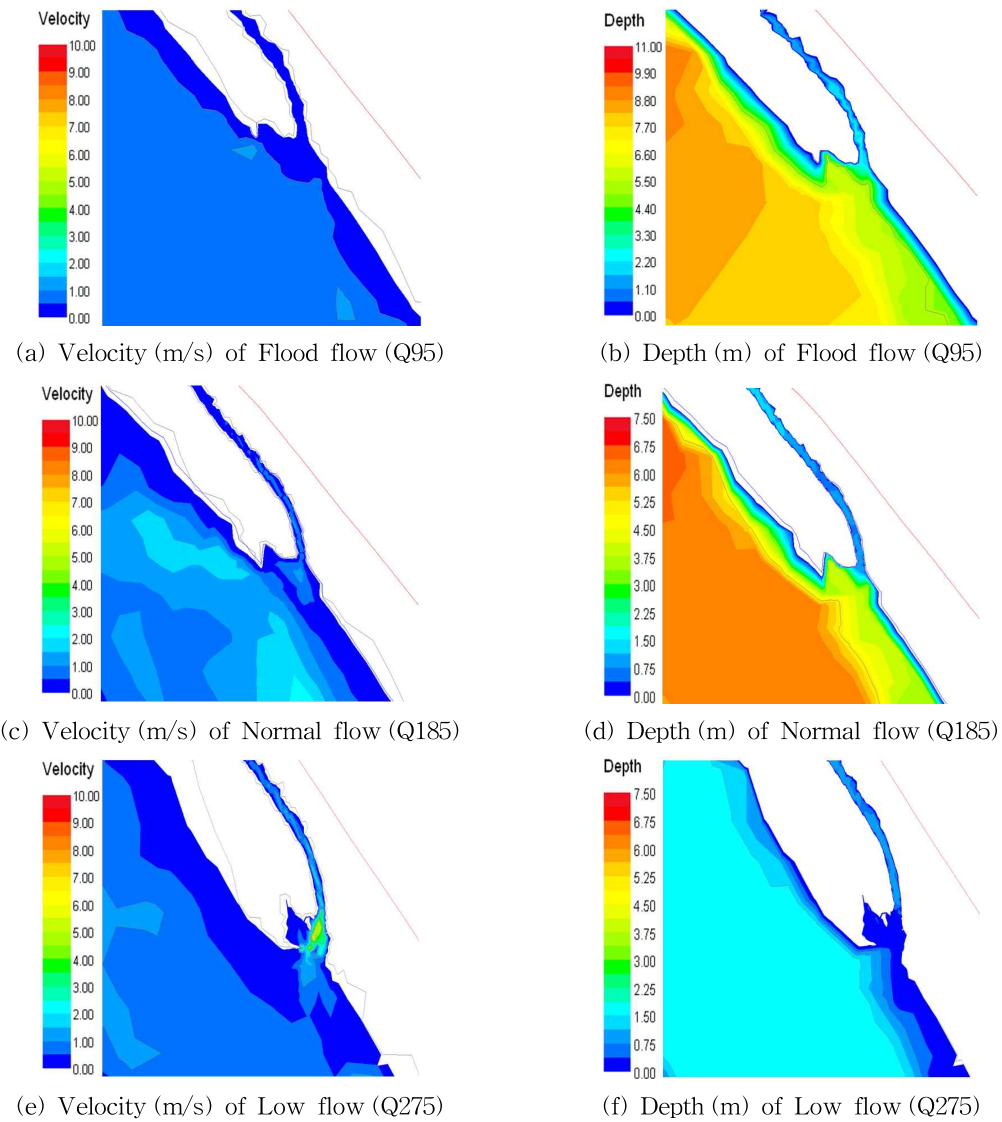


Fig. 13. Simulation Results of Fishway Entrance

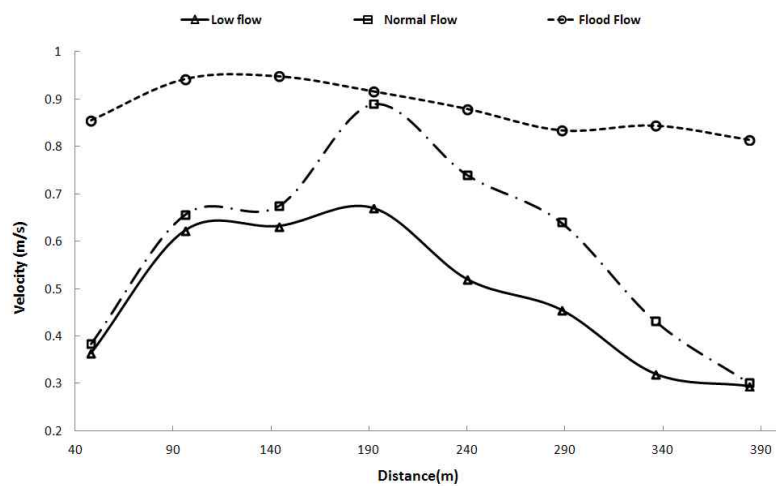


Fig. 14. Simulation Results of Velocity in Main Channel

기 때에 좌안이 우안보다 유속이 높은 것을 볼 수 있다. 이로 인하여 어류가 회유할 때 우안보다 좌안으로 몰릴 가능성이 높으며, 보다 많은 개체가 어도 입구부로 효율적으로 유입될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 6은 낙동강 본류와 인공하도식 어도 입구부의 유속을 평균, 최대, 최소로 나타내었다. 낙동강 본류의 하류의 평균 유속은 풍수기, 평수기, 저수기 각각 0.892 m/s, 0.583 m/s, 0.481 m/s로 나타났고, 인공하도식 어도 유입부의 평균 유속은 각각 0.115 m/s, 0.732 m/s, 0.575 m/s로 나타났다. 낙동강 본류의 유속은 풍수기 및 평수기에는 유속이 빠르고, 저수기에는 적은 유량으로 인하여 유속이 느린 것으로 나타났다. 풍수기의 인공하도식 어도 유입부의 유속이 낮은 이유는 가동보 개방으로 상류단의 수위가 낮아지기 때문이다. 반면 저수기의 인공하도식 어도 유입부에서는 낙동강 본류와 인공하도식 어도 유입부 간의 하상고와 수위가 각각 4.1 m, 3 m의 차이로 인하여 풍수기와 평수기 보다 높은 유속을 보였다. 평수기와 저수기의 평균 유속 차는 0.157 m/s로 유속의 변화가 크지 않다는 것을 확인할 수 있다.

Table 7은 평균 수심을 나타낸 것이다. 본류의 수심은 풍수기에서 갈수기로 갈수록 낮아지는 것을 알 수 있으며 인공하도식 어도 또한 낮아진다. 특히 저수기의 수심이 낮은 이유는 인공하도식 어도로 출구부로 들어오는 유량이 작아 입구부의 수심이 낮아지는 것으로 보인다.

4. 유입 적합도 평가

일반적으로 어류의 유영속도는 크게 장시간 유영이 가

능한 순항속도, 몇 분간 지속적으로 낼 수 있는 최대속도인 유지속도, 그리고 몇 초에 걸쳐 낼 수 있는 최대속도인 돌진속도 등으로 구분된다. 순항속도는 어류의 장거리 이동시, 유지속도는 장애물이나 구조물이 설치된 경우 유지 가능한 속도, 그리고 돌진속도는 적으로부터 급히 피하거나 먹이에 대한 반응 시 나타나는 속도이다. 본 연구에서는 인공하도식 어도의 입구부의 유속과 어류의 3가지 유영속도 중 장애물이나 구조물이 설치된 경우 유지 가능한 속도인 유지속도와 급히 피하거나 빠른 반응을 나타내는 돌진속도를 비교하였다.

본 연구에서는 대상어종을 선정하기 위하여 낙동강에서 수행된 어류 모니터링 결과를 분석하였다. Choi et al. (2007)은 낙동강 본류 6개 지점 중 금호강 합류부(S3)로 2004년 7월(풍수기)에 1차, 2005년 3월(갈수기)에 2차 어류조사 및 채집을 수행하였으며, 1차 조사에서 22종, 2차 조사에서 20종이 채집되어 총 28종이 채집되었다. 채집된 어류 중 과별 종다양도는 잉어과 어류가 17종으로 가장 높았고, 그 외에 미꾸리과 3종, 검정우럭과 2종 등의 순으로 나타났다. 또한 어류의 상대풍부도(Relative abundance) 분석에 따르면, 피라미(*Zacco platypus*) 59%, 꼬리(*Opsariichthys uncirostris amurensis*) 10%, 물개(*Squalidus japonicus coreanus*) 4% 순으로 피라미가 우점하는 것으로 나타났다. 특히 본 연구지점인 강정고령보 지점은 1·2차 조사 시 피라미(*Zacco platypus*)가 50.6%, 꼬리(*Opsariichthys uncirostris amurensis*) 30%로 나타났다 (Choi et al., 2007). 따라서 본 연구에서 어도의 효율을 평가하기 위한 대상어종은 피라미로 선정되었다.

Fig. 15는 피라미의 유속, 수심과 하도지수에 대한 적합

Table 6. Simulation Results of Velocity

	Velocity (m/s)					
	Main channel			By-pass Fishway Entrance		
	Ave.	Min.	Max.	Ave.	Min.	Max.
Flood Flow (Q95)	0.892	0.813	0.947	0.115	0.010	0.242
Normal Flow (Q185)	0.583	0.301	0.889	0.732	0.591	0.894
Low Flow (Q275)	0.481	0.295	0.670	0.575	0.192	0.874

Table 7. Simulation Results of Depth

	Average Depth (m)	
	Main channel	By-pass Fishway Entrance
Flood Flow (Q95)	7.373	3.081
Normal Flow (Q185)	5.923	3.801
Low Flow (Q275)	1.871	0.505

도 지수를 나타낸 것이다. 대상어종은 소상이 가능한 유속과 수심 방향으로 거슬러 올라가기 때문에 유속과 수심의 분포가 유입효율에 영향이 크다. 이에 실험과 선행연구를 통하여 적합도 지수를 나타내었다. 유속은 Park et al. (2006)이 실시한 증진유속방법을 이용한 피라미의 한계유영유속 측정 실험을 바탕으로 만들어졌다(Table 8). 이 증진유속방법은 MLTM (2005)에서 제시한 어도 유속 허용 범위인 0.5~1.0 m/s를 기준으로 실시하였다. 그리고 수심은 Oh et al. (2008)이 피라미의 물리서식처를 분석한 바 있으며 하도지수 적합도 지수는 낙동강유역조사(K-water, 2004)시 작성된 결과를 이용하였다.

피라미의 적합도 곡선에서 유속의 범위는 0.5~1.0 m/s 이고 수심은 0.1~1 m 사이로 나타났다. 피라미의 산란기는 6~8월 사이이고(Cho et al., 1998) 산란을 위하여 상하류로 움직임이 활발해지는 시기는 수온이 올라가는 4월부터이다. 이 시기 낙동강의 유황을 분석해 보면 저수량이 다수를 차지한다. 저수기 때 인공하도식 어도 입구부의 유속은 0.575 m/s이며 수심은 0.505 m로 소상하기에 적당한 유속 및 수심으로 나타났다. Fig. 16은 적합도 지

수를 바탕으로(Fig. 15) River2D 모형의 WUA 산정기능을 이용하여 피라미의 서식처를 나타낸 것으로, WUA가 클수록 대상어종의 서식처 및 활동영역이 크다. 풍수기에는 인공하도식 어도 입구부의 WUA는 산정되지 않았고, 평수기 및 저수기에는 WUA가 산정되었다. 물론 WUA가 크다고 모든 피라미가 어도로 유입되지는 않는다. 다만 서식하고 활동하기에 적합한 환경임을 나타내는 지표이기에 이를 기초로 평, 저수기에 대상어종이 어도 주변부로 몰릴 가능성이 크며, 흐름을 따라 어도로 유입할 가능성이 높다는 결론을 내릴 수 있다.

Table 9는 낙동강 우점종인 피라미의 유지속도와 돌진속도를 대상으로 인공하도식 어도의 유입부의 평균유속과 비교한 것이다. 피라미의 돌진속도는 최소 0.49 m/s에서 최대 0.73 m/s이며 유지속도는 최소 0.24 m/s에서 최대 0.43 m/s이다(Park et al., 2006). 피라미의 돌진속도와 유지속도를 모의한 인공하도식 어도 입구부의 유속과 비교한 결과 저수기 유속이 0.575 m/s로 어류의 유지속도보다 높고 돌진속도보다 낮은 유속을 보여 어류의 유입에 적합함을 보였다.

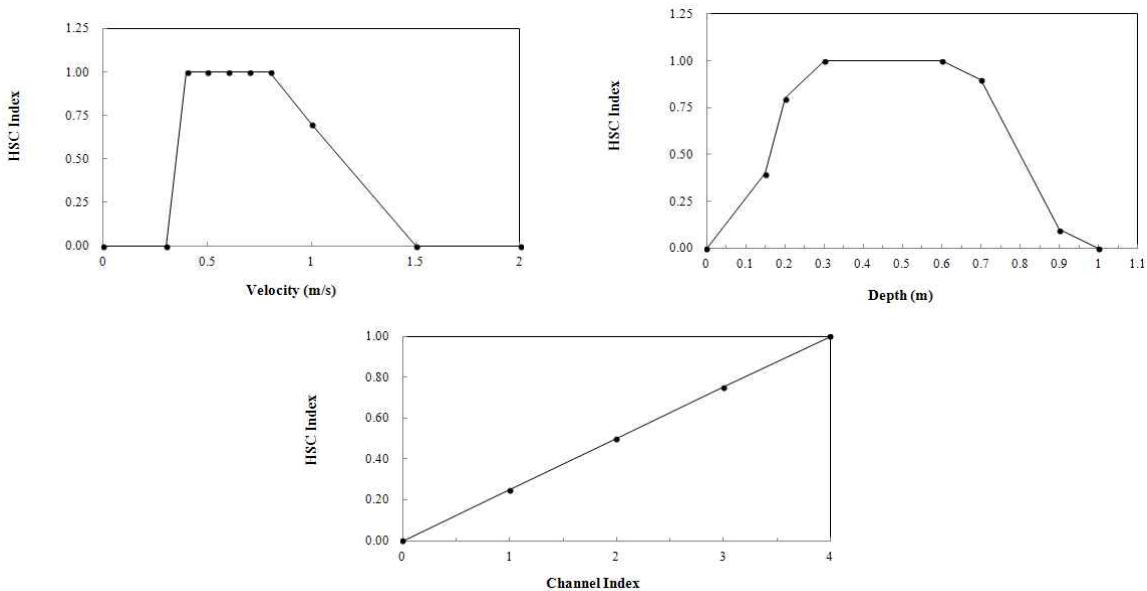


Fig. 15. Habitat Suitability Criteria (Spawning)

Table 8. Swimming Velocity Experiment of *Zacco Platypus*

<i>Zacco Platypus</i>					
	Velocity (m/s)	Movement of fish (%)		Velocity (m/s)	Movement of fish (%)
1	0.5	100	4	0.8	100
2	0.6	100	5	0.9	100
3	0.7	100	6	1.0	70

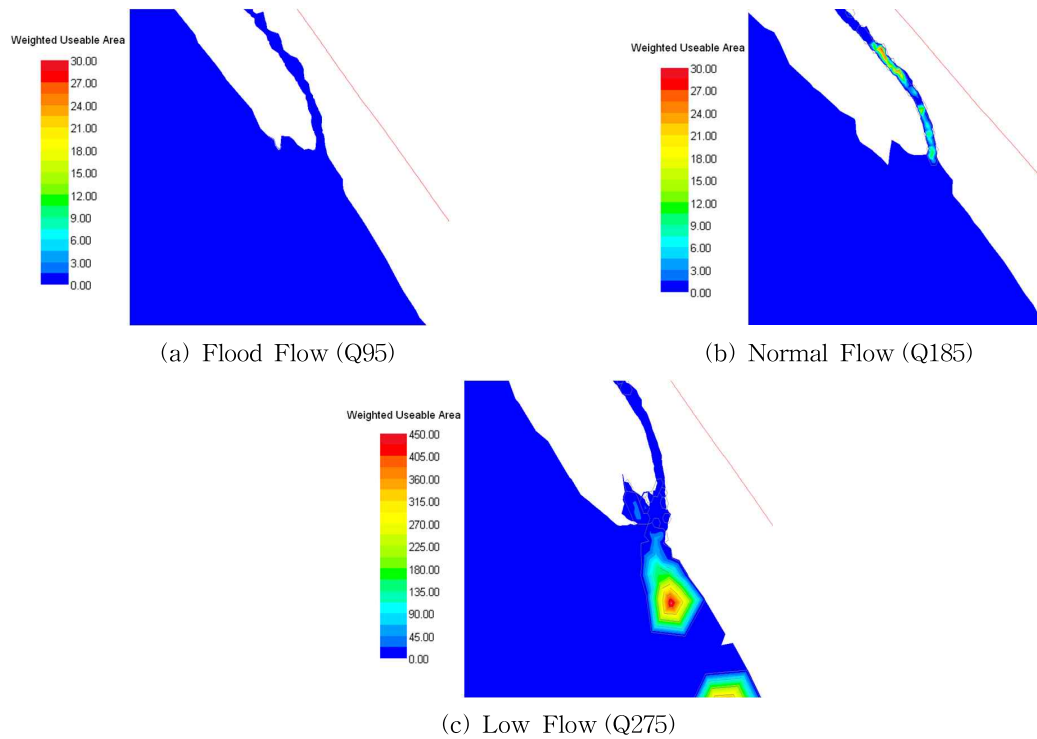


Fig. 16. Distribution of WUA for By-pass Fishway

Table 9. Comparison of Swim Speed and Velocity of By-pass Fishway

<i>Zacco Platypus</i>			Velocity (m/s)
	Maintenance speed (m/s)	Burst speed (m/s)	
Minimum	0.24	0.49	Flood Flow (Q95)
			Normal Flow (Q185)
Maximum	0.43	0.73	Low Flow (Q275)

5. 결 론

본 연구에서는 현재 낙동강에 설치된 다기능보 중에서 강정고령보의 인공하도식 어도에 대하여 2차원 물리식처 모의 모형인 River2D를 이용하여 인공하도식 어도의 유입부의 수리학적 영향을 분석을 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모의 구간에 대한 River2D 모형의 적용에 앞서 모형의 상류단의 경계조건을 부여하기 위하여 1차원 상용모형인 HEC-RAS를 이용하였다. 왜관수위표를 상류경계조건으로 성주수위표의 실측자료를 활용하여 검정을 실시하였다. 그 결과 R^2 값은 0.751, AME는 0.223, RMSE는 0.239로 높은 상관관계를 보였다.

HEC-RAS의 모의 결과를 바탕으로 강정고령보에서 1.5km 상류 지점의 유량을 산정하여 경계조건으로 사용하기에 적절한 것으로 보인다.

- 2) 2차원 모형의 검보정을 위해 강정고령보의 상·하류 실측 수위를 활용하였으며 2012년도 9월(퐁수기 기준)으로 14일간을 보정기간으로, 12일간을 검증기간으로 선정하여 실시하였다. 실측값과 관측값을 비교한 결과, 보정 시 R^2 는 0.789, AME는 0.036, RMSE는 0.050이고, 검증시 R^2 는 0.821, AME는 0.071, RMSE는 0.087으로 높은 상관관계를 보였다.
- 3) 인공하도식 어도의 유입부의 수리학적 분석을 하기 위해 2차원 모형을 적용한 결과 퐁수기 때의 평균 유속과 수심은 각각 0.115 m/s, 3.081 m이며, 평수기

때의 평균 유속과 수심은 각각 0.732 m/s, 3.801 m이었으며, 마지막으로 저수기의 평균 유속과 수심은 각각 0.575 m/s, 0.505 m로 나타났다.

- 4) 인공하도식 어도의 유입 적합도 분석에서는 낙동강에 분포하는 어종 중 우점종인 피라미를 선정하였다. 피라미를 대상으로 적합도 곡선과 유영속도를 비교한 결과 피라미의 산란기인 저수기 때의 유입부 유속이 강정고령보 하류 낙동강 본류의 유속보다 높은 0.575 m/s로 나타나, 어도입구로 피라미 유입에 무리가 없는 유속장이 형성되는 것으로 나타났다.

향후 16개 다기능보에 설치되어 있는 다양한 형태의 어도에 대한 유입 및 유인 효율 연구에 관한 개별적인 연구가 필요하며, 이에 대하여 현장 유속 측정 및 어류 모니터링 등의 자료 축적이 필요하다고 판단된다. 또한 별도의 유인수로가 없는 어도의 경우에는 가동보의 수문을 활용한 저수기 유입효율 개선에 관한 연구가 병행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11-기술혁신-C06)에 의해 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Allan, J.D., and Flecker, A.S. (1993). "Biodiversity conservation in running waters." *Bioscience*, Vol. 43, pp. 32-43.
- Bunt, C.M. (2001). "Fishway entrancemodifications enhance fish attraction." *Fisheries Management and Ecology*, Vol. 8, pp. 95-105.
- Cho, J.H., and Reu, D.S. (1998). "Ultrastructural study on the spermatogenesis of pale Chub (*Zacco platypus*)." *Journal of Korean Society of Microscopy*, HVEM, Vol. 28, No. 2, pp. 181-191 (in Korean).
- Choi, J.W., Lee, E.H., Lee, J.H., and An, K.G. (2007). "Biological water quality assessments using fish assemblage in Nakdong River watershed." *Journal of Korean Society of Limnology*, KSL, Vol. 40, No. 2, pp. 254-263 (in Korean).
- Gore, J.A., and Petts, G.E. (1989). *Alternatives in Regulated River Management*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Gray, A. (1992). *The Ecological Impact of Estuarine Barrages*. British Ecological Society/Field Studies Council, Shrewsbury.
- Kang, J.H., Lee, E.T., Lee, J.H., and Lee, D.H. (2004). "Estimation of river instream flow considering habitat conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 11, pp. 915-927 (in Korean).
- Kim, J.H. (2008a). "Suitability verification of by fishway hydraulic experiments" *Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 439-443.
- Kim, J.H. (2008b). "Fishway design considering fish passage efficiency" *Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 2000-2004.
- Kim, K.H. (2000). *Evaluation of habitat conditions and estimation of optimum flow for the freshwater fish*. Ph.D. dissertation, University of Yonsei, pp. 4-6, 25-35, 77-83.
- Kim, K.H., Kim, S.M., Lee, S.H., and Woo, H. (1996a). "Development of a method for determining the instream flow and its application: II. Application and result." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 29, No. 5, pp. 1161-1176 (in Korean).
- Kim, K.H., Lee, J.W., Hong, I.P., and Woo, H. (1996b). "Development of a method for determining the instream flow and its application: I. Estimation method." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 29, No. 5, pp. 185-202 (in Korean).
- Kinsolving, A.D., and Bain, M.B. (1993). "Fish assemblage recovery along a riverine disturbance gradient." *Ecological Application* 3: 531-544.
- KRA (Korea Racing Authority) (2005). *Nakdong River Diadromous Fish and Fishway Research Project*. Report, pp. 3-4 (in Korean).
- K-water (1995). *Development and application of maintenance flow discharge determination method*. K-water investigation plan place IDP-95-2 Research Report, pp. 127-434.
- K-water (2004). *Nakdong river basin investigation*. Technical Report, MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs).
- 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).
- Lee, J.H., Jeong, S.M., Lee, M.H., and Lee, Y.S. (2006). "Estimation of instream flow for fish habitat using Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) for major tributaries in Han River Basin." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 26, No. 2B, pp. 153-160 (in Korean).
- 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*, KWRA, Vol. 45, No. 3, pp. 317-329 (in Korean).
- Lemly, A.D., Kingsford, R.T., and Thompson, J.R. (2000). "Irrigated agriculture and wildlife conservation: conflict, on a global scal." *Environmental Management* 25, pp. 485-512.
- Loar, J.M., and Sale, M.J. (1981). "Alternatives of Environmental Issues Related to Small-Scale Hydroelectric Development: V. Instream Flow Needs for Fishery Resources." ORNL/TM-7861, Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. pp. 123.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2005). *Design criteria and Commentary of River*. Report, pp. 433-434
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009). *Nakdong river basin master plan (change)*. Technical Report, pp. 497-498.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010). *Annual Hydrological Repory on Korea*. Report (in Korean).
- Moyle, P.B., and Cech, J.J. (2000). "Fishes: an Introduction to Ichthyology." 4th edition. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Oh, K.R., Jeong, S.M., Lee, J.H., Choi, G.W., and Kim, D.H. (2008) "Estimation of optimum flow needed for fish habitat by application of one and two dimensional physical habitat simulation model: Focuse on Zacco Platypus." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 8, No. 1, pp. 117-123 (in Korean).
- Park, S.D. (2001a). "Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishways by eco-hydraulic experiments (I): Baffled fishway." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 34, No. 4, pp. 365-379 (in Korean).
- Park, S.D. (2001b). "Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishways by eco-hydraulic experiments (II): Pool and weir type fishway." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 34, No. 4, pp. 381-390 (in Korean).
- 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" *Korean Society Civil Engineering Conference*, KSCE, pp. 536-539.
- Thomas, D.H.L. (1996). "Dam construction and ecological change in the rioarian forest of the Hadejia-Jama' are floodplain, Nigeria." *Land Degradation and Development* 7: 279-295.
- Woo, H., Lee, J.W., and Kim, K.H. (1998). "Development of a method for determination of instream flow needs required for fish habitat conservation." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 18, No. II-4, pp. 339-350 (in Korean).
- Wu, R.S., and Mao, C.T. (2007). "The Assessment of River Ecology and Habitat Model." *Journal of Marine Science and Technology*, Vol 15, No. 4, pp. 322-330.
- Yoon, J.C. (2012). "An Essay on the Visit to Deagu Gangjeong-Goryeong, an Irrigation Reservoir." *Magazine of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 60, No. 7, pp. 55-56 (in Korean).
- Yoon, J.D., Kim, J.H., Joo, G.J., Seo, J., Hubert, P., and Jang, M.H. (2011). "Freshwater fish utilization of fishway installed in the Jangheung Dam." *Journal of Korean Society of Limnology*, KSL, Vol. 44, No. 3, pp. 264-271 (in Korean).

논문번호: 13-013	접수: 2013.02.06
수정일자: 2013.03.05/03.21	심사완료: 2013.03.21