



Evaluation technique for efficiency of fishway based on hydraulic analysis

Baek, Kyong Oh^{a*}

^aAssociate Professor, Department of Civil, Safety, and Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong, Korea

Paper number: 19-038

Received: 27 June 2019; Revised: 15 September 2019; Accepted: 15 September 2019

Abstract

The efficiency of fishway installed in rivers can be directly evaluated by means of fish monitoring. On the other hand, when it is difficult to monitor the fish in certain conditions, or when planning a fishway, the efficiency can be evaluated indirectly through the hydraulic analysis. In this study, the hydraulic analysis technique for evaluating the efficiency of a fishway was presented. The River-2D model with the fish physical habitat module was used for the analysis of the attraction efficiency, and the weighted usable area was proposed as an index of the efficiency. In the analysis of passage efficiency, the three-dimensional model, Flow-3D, was used as an evaluation tool to describe the fluid behavior on a hydraulic structure with free surface. The ice-harbor type fishway at Baekgok weir in the Deokcheon River was selected as a test-site, and the efficiency was estimated using the hydraulic analysis. And then it was compared with fish monitoring data acquired from the river. As a result, it is difficult to replace the hydraulic analysis results with the efficiency quantitatively, but it can help to grasp the general tendency.

Keywords: Hydraulic analysis, Fishway, Attraction efficiency, Passage efficiency, Deokcheon River

수리해석을 기반으로 어도 효율을 평가하는 기법

백경오^{a*}

^a국립한경대학교 토목안전환경공학과 부교수

요 지

어류의 어도 이용효율평가를 위해서는 유인효율과 통과효율로 분리하여 분석할 때, 각각의 효율을 증대시킬 수 있는 방향으로 어도 설치 및 관리 계획이 수립될 수 있다. 기 설치된 어도는 어류 모니터링을 통해 보다 직접적으로 각각의 효율을 평가할 수 있다. 반면 어도를 계획할 때, 또는 여건 상 어류 모니터링이 어려운 경우, 수리해석을 통해 간접적으로 어도 효율을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 어도의 효율평가가 가능한 수리해석 기법을 제시하였다. 유인효율 분석에는 어류 물리서식처 모듈이 장착된 River-2D모형을 사용하였고, 효율의 지표로 가중가용면적을 제안하였다. 통과효율 분석에는 자유 수면을 가지고 수리구조물상의 유체거동을 해석할 수 있는 3차원 모형(Flow-3D)을 해석 도구로 이용하였다. 그리고 덕천강 백곡보에 설치된 아이스하버 어도를 선택하여 어도 효율을 가능해 보았고, 실제 어류 모니터링자료와 비교해 보았다. 그 결과 수리해석 자료를 정량적으로 어도 효율로 치환하기는 어렵지만, 대체적인 경향성 파악에는 도움을 줄 수 있었다.

핵심용어: 수리해석, 어도, 유인효율, 통과효율, 덕천강

1. 서 론

어도의 기능을 평가함에 있어서 유인효율(attraction efficiency)과 통과효율(passage efficiency)로 분리하여 평가할 필요성이

있다. 여기서 유인이란 어도 입구로 어류를 유인하는 것이 목적이고, 통과는 어도로 들어온 어류를 안전하게 어도 출구로 통과시키는 것이 목적이다(Lucas and Baras, 2001). 구체적으로 유인효율은 소상하려는 어류 중 어도 입구부로 유인되는 개체수의 비로 정의될 수 있으며, 통과효율은 어도 입구로 들어온 어류들 중 어도 출구로 완전히 빠져나간 개체수의 비로

*Corresponding Author. Tel: +82-31-670-5141
E-mail: pko@hknu.ac.kr (K. O. Baek)

정의될 수 있다. 어도의 기능평가에 있어서 이와 같이 유인과 통과효율로 분리하여 평가하는 이유는 Fig. 1과 같이 어도 형식에 따라 그 효율이 서로간 편차가 있기 때문이다. 이 그림은 Bunt *et al.* (2012)이 지금까지 논문이나 보고서로 소개된 어도 효율 자료를 통계적으로 분류한 것이다. Fig. 1(a)를 보면 풀(pool/weir) 형식의 어도가 비교적 어류 유인에 유리한 반면, 자연형 어도(nature-like)는 상대적으로 유인효율이 떨어진다. 하지만 통과효율 측면에서는 자연형 어도가 가장 높은 효율을 보이며, 풀 형식 어도가 통과율이 가장 낮다(Fig. 1(b) 참조). 자연형 어도의 경우, 하천횡단구조물을 우회하는 by-pass 어도를 지칭하는 것으로, 어도 입구가 하천 제방에 연결되어 있어 어도 입구를 찾기가 용이하지 않다. 또한 어도 내부 기류가 완만하여 어도입구부에 큰 유속이 발생하지 않는다는 점에서 유인기능이 떨어진다는 지적은 타당하다. 반면 어도 내부에서 약한 유속이 발생해 한번 어도로 들어간 어류는 유영력에 크게 구애받지 않고 통과할 수 있기 때문에 통과효율이 높아진다. 풀 형식(계단식, 아이스하버형식도 여기에 포함됨)은 경사가 자연형에 비해 상대적으로 커서 내부에 강한 유속이 발생해 작은 어류의 경우 통과효율이 자연형 어도에 비해 떨어질 수밖에 없지만, 입구부에 비교적 강한 흐름이 형성되므로 어류를 유인하는데 자연형 어도보다 유리할 수 있다.

국내 중소하천에 설치된 어도의 대부분은 풀(pool/weir) 형식이므로 어도의 기능을 평가함에 있어서 통과효율에 집중할 필요성이 있다. 그러나 국내 수문특성상 집중강우가 잦으며 이에 따른 하상변동이 외국하천에 비해 상당하므로, 유인효율이 저하되지 않았는지 지속적인 점검 또한 필요한 실정이다. 버티컬 슬롯(vertical slot) 형식은 유인 및 통과효율 공히 큰 편차를 가지고 있어 유지관리에 유의할 필요가 있어 보이고, 데닐(Denil) 형식은 유인과 통과효율이 다른 형식의

어도에 비해 평균 이상임을 Fig. 1을 통해 또한 확인할 수 있다.

어도 효율평가를 이처럼 두 가지로 분리하여 분석할 때, 각각의 효율을 증대시킬 수 있는 방향으로 어도 설치 및 관리 계획이 수립될 수 있다. 물론 기 설치된 어도는 어류 모니터링을 통해 보다 직접적으로 효율을 평가할 수 있다. 하지만 어도를 계획할 때, 또는 여건상 어류 모니터링이 어려운 경우, 수리해석을 통해 간접적으로나마 어도 효율을 평가할 수 있다. 일반적으로 유인효율은 어도 주변부의 수리적 특성을 거시적으로 파악해야 할 것이고, 통과효율은 어도 내부의 수리 특성을 보다 세밀히 분석하는 것이 필수적이다. 때문에 유인효율 분석에는 평면 2차원적 해석으로 충분하고, 이동효율 분석에는 3차원적 해석이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 유인과 통과 효율 각각을 평가할 수 있는 수리해석 기법을 제시하였다. 유인효율 분석에는 어류 물리식적 모듈이 장착된 River-2D모형을 사용하였고, 효율의 지표로 가중가용면적(weighted usable area)을 제안하였다. 통과효율 분석에는 자유 수면을 가지고 수리구조물 상의 유체 거동을 어려움 없이 해석할 수 있는 Flow-3D모형을 사용하였다. 평가 대상 어도는 산청군 덕천강 백곡보에 설치된 아이스하버 형식 어도를 택하였다. 수리해석을 통해 평가된 효율은 해당 어도에서 PIT-tag기법을 통해 수행된 어류 모니터링 자료와 비교하여 그 정확도를 가늠해 보았다.

2. 효율평가 기법

2.1 유인효율 평가 도구; River 2D

유인효율과 관련하여 가장 중요한 요소 중 하나는 “하천횡단구조물 어느 위치에 어도가 설치되어 있는가”이다. 특히 단

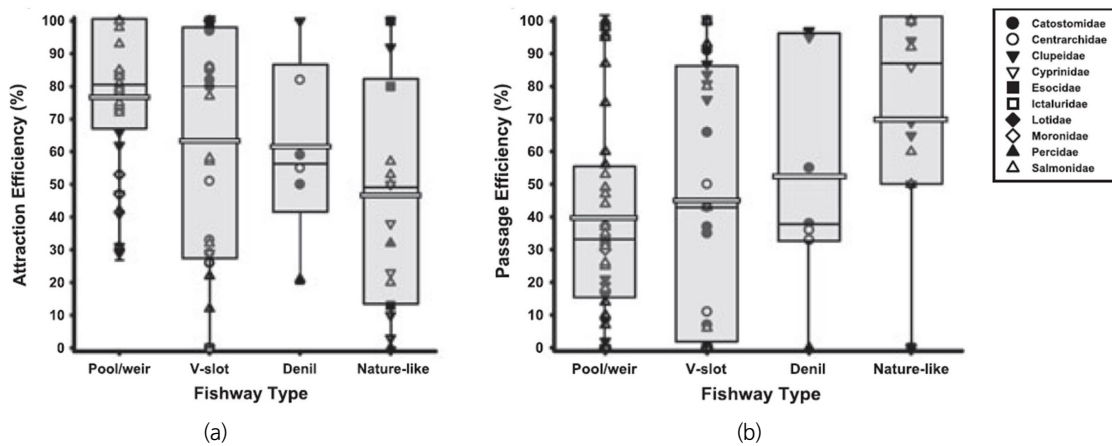


Fig. 1. Attraction and passage efficiency according to fishway type (after Bunt *et al.*, 2012)

차가 크지 않은 중소규모의 보에 설치된 어도의 경우 더욱 위치에 민감하다. 최적의 방안은 하나의 횡단구조물에 어도를 2개 이상 설치하는 것이다. 여러 개의 어도가 시설되어 있다면 설령 한 두 개의 어도가 기능을 제대로 발휘하지 못하더라도 나머지 어도들을 통해 어류 소상이 가능하기 때문이다. 그러나 초기 예산의 문제로 하나의 횡단구조물에 오직 하나의 어도를 설치해야 한다면 다음 4가지 기준을 고려해야 한다 (Baek and Kim, 2014). ① 상류와 가까운 곳; 보가 흐름방향과 직각방향으로 설치되어 있지 않는 경우, 소상하려는 어류는 횡단구조물을 만나면 구조물을 따라 보다 상류방향으로 향하려는 움직임이 있는바, 상류와 가까운 하안쪽에 어도를 설치하는 것이 어류가 어도 입구를 찾기에 용이하다. ② 최심선(最深線) 인근; 저·갈수기에는 유량이 줄어 흐름이 주로 최심선을 따라 발생하게 되므로 어도 내 유량을 확보하기 위해서는 최심선의 인근 위치에 어도를 설치해야 한다. ③ 유심선(流心線) 인근; 어류의 유영 특성은 주흐름의 최대유속 인근을 따라 소상한다고 알려진바, 유심선과 가까운 곳에 어도를 설치해야 한다. ④ 세굴, 퇴적이 활발하지 않은 곳; 어도의 입구 주변이 세굴되면 구조물이 하천바닥과 분리되어 어류가 소상을 못하며, 어도 출구가 퇴적되면 어도 내로 물이 흘러들지 않아 어도의 기능을 상실하게 되므로, 세굴이나 퇴적이 상대적으로

활발하지 않은 곳에 어도를 설치해야 한다.

이외에도 Cowx and Welcomme (1998), Clay (1995), Lundqvist *et al.* (2008) 등이 어도의 위치를 선정해야 하는 여러 기준들을 제시한바 있다. 문제는 실제 하천 횡단구조물에 어도를 계획·설치하는 경우, 복잡다기한 하천의 상황에 의해 기준을 일률적으로 따르기 어려운 경우가 많다. 또한 목표 어종의 특성에 따라 유인이 용이한 수리적 상황이 달라지기도 한다. 결국 원칙적인 언명으로 제시된 이러한 기준들을 대신하여 목표 어종의 유인효율을 구체적인 수치로 평가할 수 있는 지표 개발이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 Baek *et al.* (2015)의 결과를 따라 가중가용면적(Weighted Usable Area, WUA)이 유인효율의 지표로 활용될 수 있음을 제안한다.

WUA는 1차원 물리 서식처 모형인 PHABSIM (Physical Habitat Simulation)의 기본 지표로서 서식적합도 지수(Habitat Suitability Index, HSI)를 기초로 작성된다. HSI는 유속 및 수심 등과 같은 서식처의 물리적 속성과 고려대상 종의 물리적 속성에 대한 적합성간의 관계를 정량적으로 나타낸 지수이다. 일반적으로 어류 서식처 적합도 지수는 특정한 조사 지점이나 구간에서 출현한 어종의 개체수 중 최대 개체수를 1.0으로 설정하고 나머지는 최대 개체수에 대한 상대적인 비율로 나타낸다. 가장 일반적인 서식처 적합도 지수에 대한 예는

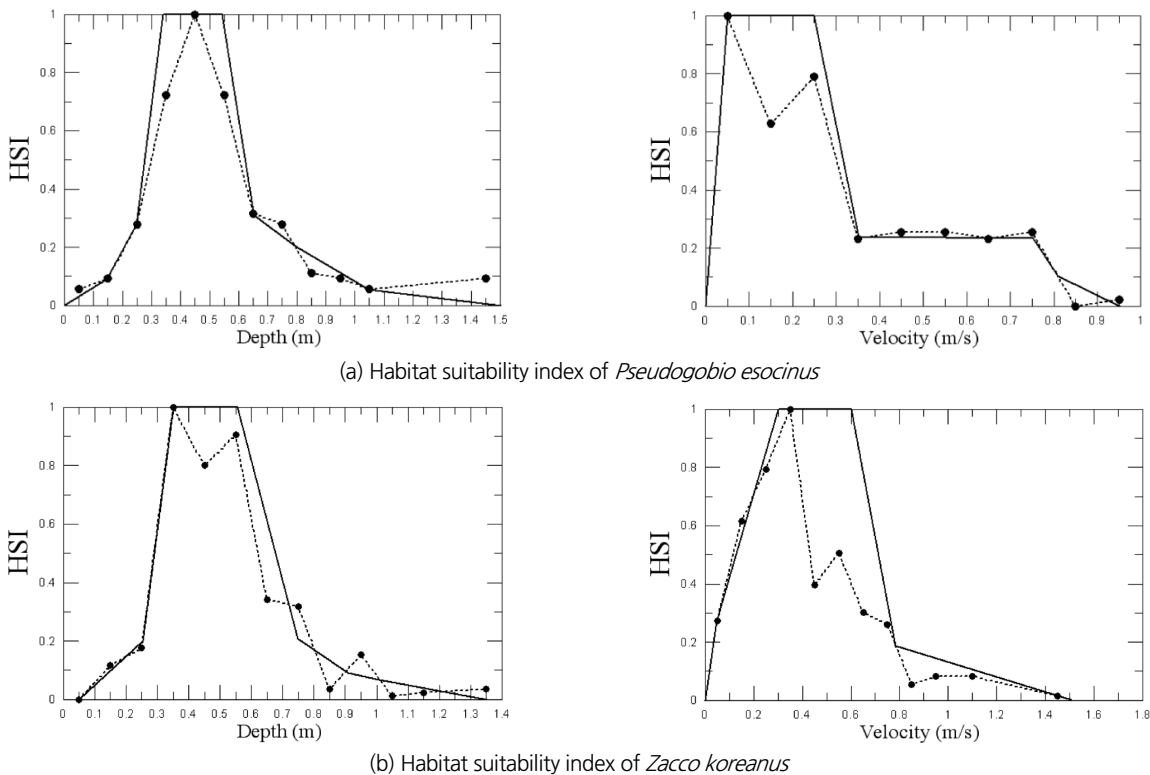


Fig. 2. HSI of target fishes in streams (after Kang *et al.*, 2011)

Fig. 2와 같다. 이 그림에서 가로축이 의미하는 것은 물리적 조건인 수심 및 유속변수이고, 세로축이 의미하는 것은 적합도 지수로 그 값이 1에 가까울수록 대상 종의 서식처 조건에 적합한 수심 및 유속이 된다. PHABSIM에서는 평가 성분인 유속, 수심, 하도지수를 총합하여 복합서식처 적합도 지수 (Combined Suitability Index, CSI)를 산정하는데, 이 방법에는 곱셈법(standard computation), 기하평균법(geometric mean), 최소치법(lowest limiting factor), 가중치법 등이 있다. 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 곱셈법을 이용하였다.

PHABSIM 모형은 수리모의와 서식처모의라는 두 가지 모델이 있으므로 연구 대상지역의 수리모의를 통해 기본적인 수리량을 획득한다. 이때 하도에서 평균수심과 유속조건을 이용하거나 하도구간을 좀 더 정밀한 물리적 서식처 분포로 나타낼 수 있는 작은 면적의 사각형 셀로 나누어 부분적으로 실행할 수 있다. 서식처 모의는 수리모의에서 획득된 수심, 유속 및 하도 지수를 이용하여 대상 어종의 물리적 서식처 공간 면적을 양적으로 계산한다. 그 결과물인 WUA는 다음 Eq. (1)을 통해 계산된다.

$$WUA = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times C_i}{Reach\ length(1000ft)} \quad (1)$$

여기서 A_i 하도구간에서 분할된 i 셀의 거리와 폭을 곱한 면적, C_i 하도구간에서 분할된 셀의 복합서식처 적합도 지수이다. 이상의 설명을 도식화하면 Fig. 3과 같다.

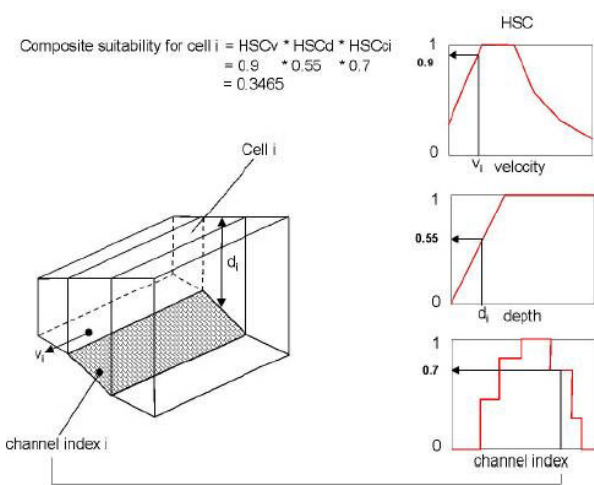


Fig. 3. Simulation process of WUA (after USGS, 2001)

문제는 PHABSIM이 1차원 모형이라 2차원적 판단이 필요한 어도 위치(하천횡단구조물 어디에 어도를 부착하느냐) 선정에는 어려움이 있다. 따라서 2차원 모형 중 PHABSIM을 하나의 모듈로 장착하고 있는 RIVER-2D를 본 연구에서 사용하였다. RIVER-2D는 다음과 같은 수심 평균된 연속방정식과 운동량방정식을 통해 평면 2차원 흐름장을 모의한다.

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

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

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

여기서 $q_x = HU$, $q_y = HV$, 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 τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} 와 τ_{yy} 는 수평응력 인자를 나타낸다(Lee *et al.*, 2012). 본 모형의 매개변수는 Manning의 조도계수와 와점성계수이며, 자연하천에서 상류 및 하류 등과 같은 다양한 흐름상태의 모의가 가능한 유한요소 모형이다.

2.2 통과효율 평가도구; Flow-3D

통과효율과 관련하여 감안해야 할 가장 중요한 요소는 어도 내부의 유속구조이다. 어도 내부의 유속구조는 유입유량, 기울기 등 어도 외부 변수에 크게 좌우되므로 쉽게 예측되기 어렵다. 또한 어도 내부에 설치된 구조물(격벽, 노치, 잠공 등)의 모양, 크기, 간격 등에 따라 흐름양상이 다양하게 발생한다. 그림에도 불구하고 국내 하천설계기준(KWRA, 2009)에는 어도 내의 평균유속 범위(0.5~1 m/s) 정도만 설계 기준으로 제시하고 있다.

풀 형식(pool/weir type) 어도(국내 중소하천에 가장 많이 시설된 어도형식)내의 유속구조는 일반적으로 표면류(streaming flow)와 잠입류(plunging flow)로 구분된다고 알려져 있다(Rajaratnam and Katopodis, 1988). 이를 Fig. 4에 간략히 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 표면류의 경우 어도 바닥 부근에 반대방향 흐름이 발생하므로, 바닥 인근에서 유영종인

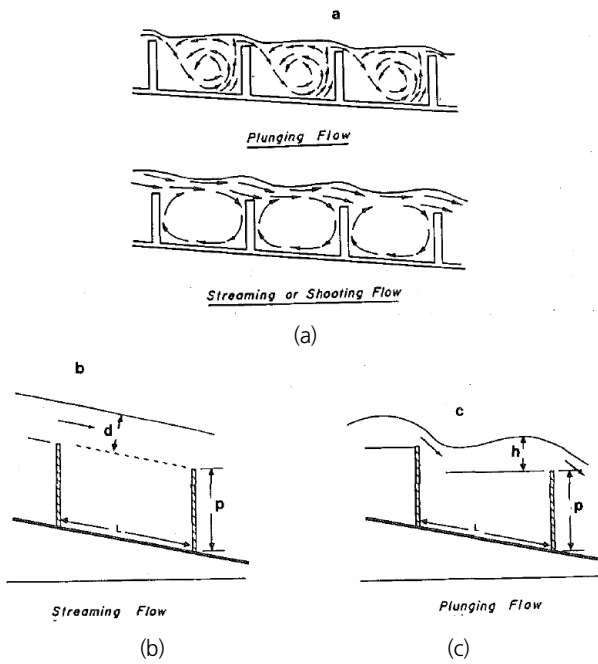


Fig. 4. Flow pattern in pool/weir fish way (after Rajaratnam and Katopodis, 1988)

어류에게는 종종 상류방향을 잃어버리고 소상에 실패할 확률이 높다. 반면 잠입류의 경우 적절한 흐름특성으로 어류가 쉽게 소상할 수 있다. 표면 인근으로 유영하는 어류의 경우라면 이와 반대로 표면류가 어류 소상에 유리한 흐름 구조라 할 수 있다. 따라서 구체적인 어도 내부 유속구조(표면류/잠입류)가 통과효율의 지표가 될 것이며 결국 이를 파악하기 위해 3차원 수리해석이 필요하다. 본 연구에서는 여러 가지 3차원 수리 모형 중 자유 수면을 가지고 수리구조물 상의 유체거동을 어렵음 없이 해석할 수 있는 Flow-3D모형을 사용하였다.

FLOW-3D모형은 다음 식처럼 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균한 Reynolds 방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 하고, 난류모형으로 k-ε모형, LES모형 등 다양한 옵션을 선택할 수 있다.

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} (u_{\rho} A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_{\rho} A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (w_{\rho} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) \quad (4)$$

여기서, V_F 는 유체에 접하고 있는 체적, ρ 는 유체의 밀도, R_{DIF} 는 난류확산항, u, v, w 는 x, y, z 방향으로의 유속, A_x, A_y, A_z 는 Cell의 x, y, z 방향 유체의 접촉 면적을 의미한다(Lim, 2010).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u \quad (5a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \quad (5b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w \quad (5c)$$

여기서, G_x, G_y, G_z 는 Body Acceleration 이고, R_{SOR} 는 질량생성항, f_x, f_y, f_z 는 Viscous Acceleration, b_x, b_y, b_z 는 구조물을 통과하면서 발생하는 손실을 표시한다.

3. 덕천강 백곡보 어도 적용 사례

농어촌연구원은 2015년에 산청군 덕천강 2개보에 대해 어도 개보수사업을 수행한 후 어도 효율분석을 위해 어류 모니터링을 수행한 바 있다(Rural Research Institute, 2015). 본 연구에서는 이 중 백곡보에 개수된 아이스하버(ice-harbor) 형식 어도(Fig. 5 참조)의 유인 및 통과효율을 River-2D 모형과 Flow-3D 모형을 이용하여 평가해 보았다. 참고로 백곡보에는



Fig. 5. Photograph of Baekgok weir and ice-harbour type fishway in Deokcheon River (after Rural Research Institute, 2015)

개보수 이전에 폭 4.6 m, 길이 25 m의 수로식 어도가 설치되어 있었다. 이것의 폭을 5 m로 확대하고, 길이를 50 m로 연장하여 경사를 완만하게 하면서 형식을 아이스하버로 변경하였다. 어도의 위치는 변경하지 않고 그대로 두었는데, Fig. 5에서 보듯이 우안측에 설치되어 있다.

3.1 유인효율 평가

백곡보의 유인효율 평가를 위해 대상 어도의 상·하류 약 1.3 km를 연구 범위로 삼아 Fig. 6(a)와 같이 관측된 하천지형자료를 토대로 계산 격자를 구성하였다. 이를 기반으로 River-2D의 수리모듈을 통해 저수기에 수심 및 유속장을 Figs. 6(b) and 6(c)과 같이 획득하였다. 유황을 저수기로 설정한 이유는 국내 하천에 서식하는 대부분의 어류 산란기가 봄철(4~6월)이며, 이때 상하류 이동이 많아져 어도 이용률이 증가하는데, 이 시기가 통상 저수기에 해당하기 때문이다. 저수량은 백곡보(No. 67.4) 상류 약 3.5 km에 있는 태수관측소(No. 82) 2015년 유량자료로 유황분석을 실시하니 1.2 m³/s로 산출되었다. 그러나 이 값을 그대로 할당하지 않고, 어류 모니터링자료와 비교하기 위해 현장 조사 날짜의 유량을 참고하였다. 현장에서 어류 모니터링 기간 중 1.2 m³/s에 근접하는 유량이 2015년 6월 7일에 발생한 1.66 m³/s 이었다. 이를 모형의 상류경계(No. 70)조건으로 할당하였다. 하류단 경계는 백곡보 하류 약 10 km에 위치한 창촌 관측소(No. 27) 2015년 6월 7일 자료를 활용하였다. 이날 창촌 관측소의 수위가 El. 52.31 m이었는데, 이를 HEC-RAS모형을 이용하여 본 연구도메인의 하류단 경계지점(No. 65)으로 끌어오니 El. 76.06 m가 되어 이 값을 하류 경계조건으로 할당하였다. 모형의 매개변수인 Manning의

조도계수는 덕천강하천계본계획보고서(Gyeongsangnamdo, 2010)를 참고하여 0.025로 할당하였다. 실측유속자료를 통해 계산된 유속치를 검증하여야 하나, 덕천강 본류에 유속측정을 하지 않아서 대신 어도 내부의 평균 유속치를 비교하였다. 그 결과 관측치 0.7 m/s와 River-2D로 모의한 계산치가 잘 일치하는 결과를 얻었다.

어도 개수 후 백곡보 상하류 어류 채집을 통해 백곡보 상류 우점종이 모래무지(*Pseudogobio esocinus*)이고, 보 하류 우점종은 참갈겨니(*Zacco koreanus*)임을 확인하였다(Rural Research Institute, 2015). 본 연구에서는 따라서 목표어종을 모래무지와 참갈겨니 2가지로 선정하였다. 모래무지는 모래가 깔린 하천의 중·하류 바닥에 주로 서식하고, 잡식성으로 소형 곤충과 갑각류, 부착 조류 등을 모래와 같이 섭식한 후 모래는 아가미 밖으로 뱉어내는 것으로 알려져 있다. 참갈겨니는 물이 맑고 깨끗한 하천의 중·상류의 유속이 빠른 지역에 서식한다고 알려져 있다(doopedia, 2019). 본 연구에서는 모래무지 및 참갈겨니의 유속, 수심에 대한 HSI를 Kang *et al.* (2011)의 연구결과를 참고하여 Fig. 2에 도시하였다. 이를 기반으로 목표종의 WUA를 River-2D로 모의하면 Fig. 7과 같다. 이 그림에서 보듯이 어도 입구부에 비교적 큰 값의 WUA값이 나타나 개보수된 어도가 모래무지 및 참갈겨니 유인에 효과가 있음을 확인할 수 있다. 특히 Figs. 5 and 6에서 보듯이 흐름이 어도뿐만 아니라 배사구를 통해 하류 두 갈래로 유하는데, 이중 좌측보다는 우측 어도쪽 물줄기를 따라서 더 큰 WUA 값이 발생하고 있어(Fig. 7 참조) 어도의 위치가 잘 선정되었다고 평가할 수 있다. 그리고 참갈겨니보다는 모래무지의 WUA 수치가 약간 더 크지만 그 차이는 유의미해 보이지 않는다.

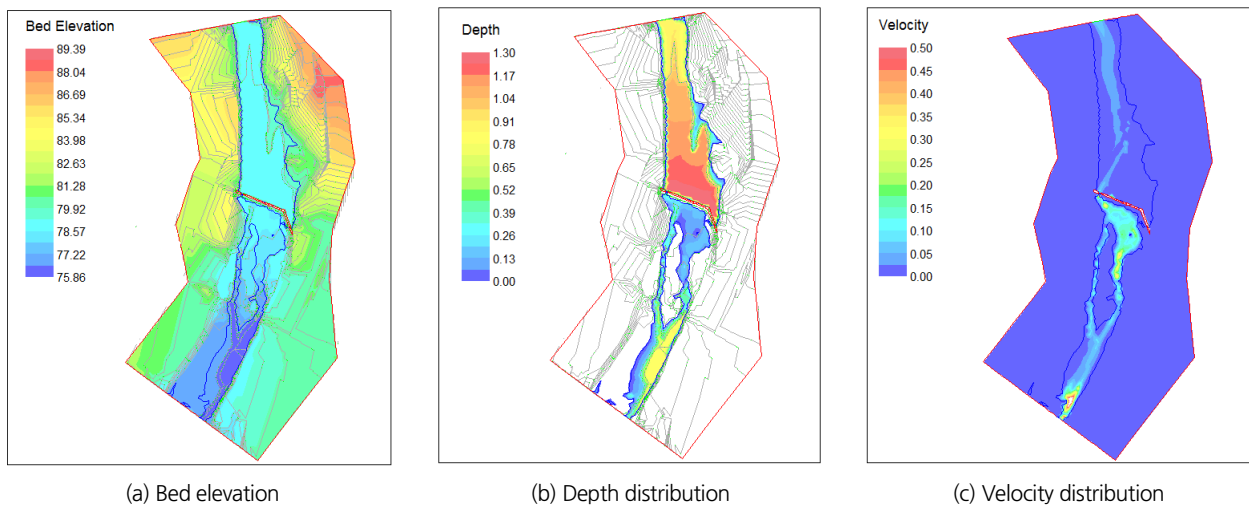


Fig. 6. Distribution of bed elevation, depth, and velocity around Baekgok weir

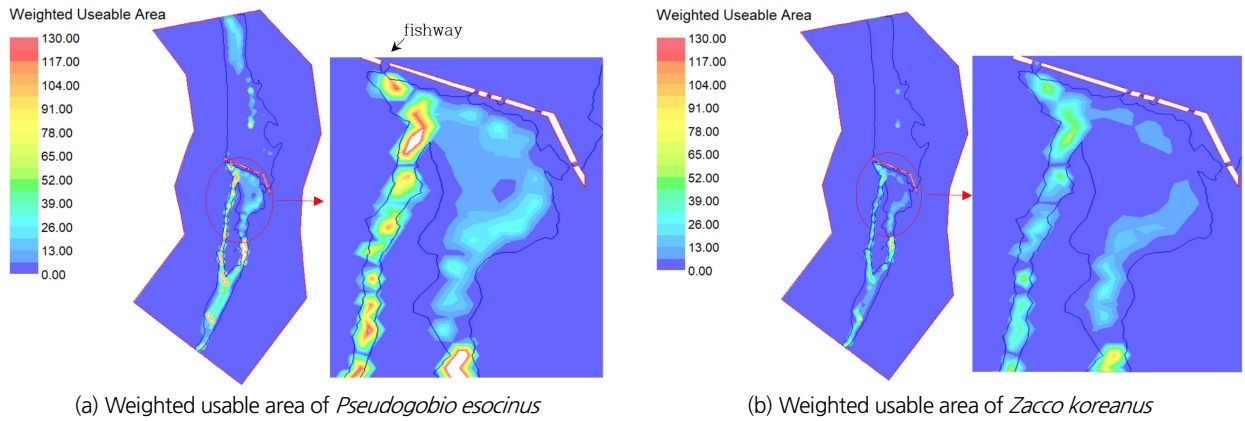


Fig. 7. WUA of around the fishway at Baegkok weir

3.2 통과효율 평가

통과효율은 어도 내부의 유속장에 따라 결정된다. 유속장은 앞서 지적했듯이 잠입류와 표면류로 크게 분류할 수 있다. Rajaratnam and Katopodis (1988)에 따르면 표면류는 유입유량이 많고, 어도 경사가 심하며, 격벽간 사이가 상대적으로 좁을 때 발생한다고 몇 가지 요인을 제시한 바 있다. 하지만 어도 내부에 설치된 구조물(격벽, 노치, 잠공 등)의 모양, 크기, 간격 등 조합에 따라 이러한 두 가지 흐름 이외에 매우 다양한 흐름 양상이 발생할 수 있다. 따라서 이미 다수의 연구자들(Barton and Keller, 2003; Cheong *et al.*, 2006; Heimerl *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2012)에 의해 어도 내 유속장은 3차원적으로 해석, 분석되고 있다. 본 연구의 대상지 백곡보 아이스하버 어도에는 여러 3차원 모형 중 FLOW-3D를 적용하였다. 그리고 난류 모형은 와류 재현에 우수하다고 알려진 LES 모형을 선택하였다. 백곡보 아이스하버 어도내 유속장 모의 과정을 Fig. 8에

도시하였다. Fig. 8(b)는 모의결과를 측면도로 나타낸 것으로, 어도 출구부로부터 하류방향으로 5번째와 6번째 pool 내부의 흐름장이다. 5번째 pool까지는 회전 cell이 두 개 나타나며 복잡한 흐름 양상을 보여 어류 소상에 불리할 수 있다. 반면 6번째 pool에서부터 명확한 잠입류가 발생하여, 모래무지와 같이 바닥 인근으로 유영하는 어류에게는 소상에 적합한 흐름 양상이 형성되었음을 확인할 수 있다. 이렇듯 어도 내부의 유속장은 각 pool에서도 다양한 흐름 양상을 보이므로 평균적인 수리량(평균유속, 수심 등)만으로 어도 통과효율을 평가하기에는 무리가 있어 보인다.

3.3 어류 모니터링 결과와 비교 분석

이상과 같이 수리 모델링을 통해 간접적으로 평가한 유인 및 통과효율을 어류 모니터링을 통해 직접 산정한 어도 효율과 비교해 볼 필요성이 있다. Rural Research Institute (2015)는

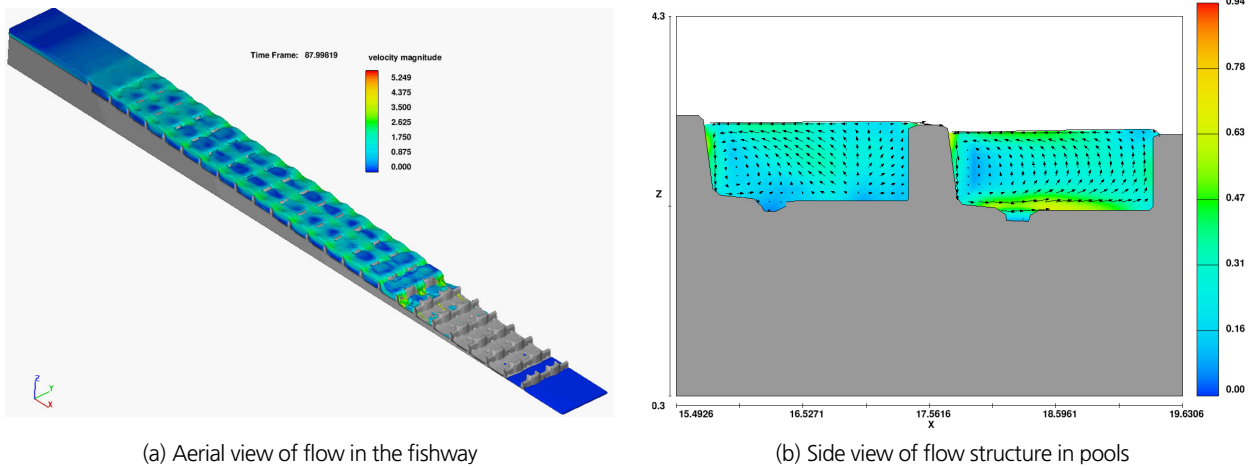


Fig. 8. Flow structure in the ice-harbor fishway at Baegkok weir

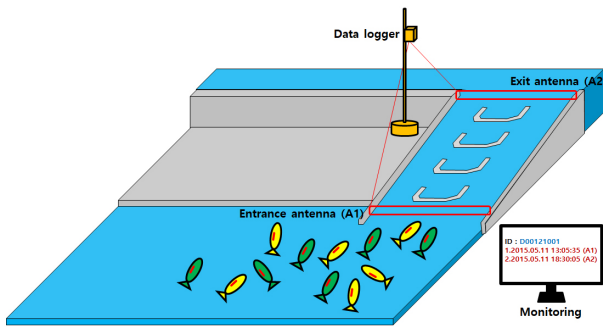


Fig. 9. Diagram of fish monitoring with PIT Telemetry (after Rural Research Institute, 2015)

PIT (Passive Integrated Transponder) Telemetry 방법으로 해당 어도에서 어류 모니터링을 실시한 바 있다. 이 방법은 Fig. 5의 사진과 Fig. 9의 모식도와 같이 tag를 삽입한 어류가 어도 내 고정된 안테나를 통과할 때 자동으로 감지되는 방식으로 유인 및 통과효율을 구분하여 산정할 수 있는 장점이 있다. 또한 PIT Telemetry 방법은 주야간에 상관없이 지속적인 모니터링이 가능하고 어류의 어도 내 체류시간, 통과시간 등에 대해서도 평가할 수 있어 국외에서도 어도 효율평가에 자주 이용되고 있다(MOE, 2015).

해당 보 하류부에 총 어류 15종 401개체에 tag를 부착하여 방류 후 어도 이용효율을 모니터링한 결과를 표로 정리하면 Table 1과 같다(RRI, 2015). 앞서도 언급했듯이 유인효율은 방류된 개체 중 어도 입구부 안테나에 감지된 개체의 비율로, 통과효율은 어도 내에 감지된 개체 중 어도 출구부 안테나에서 감지된 개체의 비율로 정의하였다. Table 1에서 보듯이 모래무지와 참갈겨니의 유인효율은 각각 10.9%와 12.5%로 둘 사이에 큰 차이를 보이지 않았다. 그 외 다른 어종도 유인효율이 10% 내외를 보이고 있다(개체수가 작은 참마자는 제외). 통과효율은 두 어종이 각각 50%와 73.7%로 유인효율에 비해

상당히 높은 수치를 보였다. 그 외 어종도 50%를 상회하였다. 이러한 수치는 Fig. 1에서 제시된 기존 풀(pool/weir)형식 어도의 통과효율을 상회하는 것으로, 어도 내에 형성된 유속구조(3차원 수리해석으로 확인된 잠입류)나 유량 등이 모래무지와 참갈겨니, 또는 제담수어 소상에 적합함을 추정할 수 있다. 반면 유인효율은 Fig. 1의 기존 통계자료보다 훨씬 낮은 수치를 보여주고 있다. 더욱이 2차원 수리해석에 의하면 좌안 측보다 우안의 어도 입구쪽으로 높은 값의 WUA가 발생하여 유인효율이 높을 것으로 기대하였으나, 모니터링 결과는 그렇지 않았다.

이러한 원인으로 어류 모니터링과 수리해석 각자 가지고 있는 한계점을 지적할 필요성이 있어 보인다. PIT Telemetry 방식으로 어류 모니터링 할 때 tag를 부착한 어류 모두가 보를 극복하고 상류로 소상하려는 의지가 있다는 가정이 필요한데, 실제 국내 하천에서 국지회유하는 어류들은 그렇다고 볼 수 없다. 연어와 같이 강한 회유성을 가진 어류들이 본 방식으로 모니터링하기에 적합할 것이다. 수리해석의 경우 WUA를 유인효율의 지표로 삼았는데, 엄밀히 따져 WUA는 서식 적합도 지수를 바탕으로 산정되는 것이므로 어류가 살기에 적합함을 표현한 것이지 유인에 적합하다고 단정하기 어렵다. 향후 연구에서는 유인에 적합한 지수를 개발하여 이를 바탕으로 WUA를 산정할 필요성이 있겠다.

4. 결론

본 연구에서는 어도의 유인효율과 통과효율을 간접적으로 평가할 수 있는 수리해석 기법을 제시하였다. 유인효율 분석에는 어류 물리서식적 모듈이 장착된 River-2D모형을 사용하였고, 효율의 지표로 가중가용면적을 제안하였다. 통과

Table 1. Results of fish monitoring at fishway of Baekgok weir with PIT telemetry (after Rural Research Institute, 2015)

Fish species	Number of release	Number of sensing	Number of passage	Efficiency of attraction (%)	Efficiency of passage (%)
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	12	1	-	8.3	-
<i>Coreoperca herzi</i>	16	2	2	12.5	100.0
<i>Pseudogobio esocinus</i>	55	6	3	10.9	50.0
<i>Zacco koreanus</i>	152	19	14	12.5	73.7
<i>Hemibarbus longirostris</i>	2	1	-	50.0	-
<i>Acheilognathus koreensis</i>	38	3	2	7.9	66.7
<i>Zacco platypus</i>	82	8	4	9.8	50.0
Others	44				
Sum	401	40	25	10.0	62.5

효율 분석에는 자유 수면을 가지고 수리구조물상의 유체거동을 해석할 수 있는 3차원 모형을 해석 도구로 이용하였다. 그리고 덕천강 백곡보에 설치된 아이스하버 어도를 선택하여 어도 효율을 가늠해 보았고, 실제 어류 모니터링자료와 비교해 보았다. 결론적으로 수리해석 결과를 정량적으로 어도 효율로 치환하기는 어려웠지만, 대체적인 경향성 파악에는 도움을 줄 수 있었다.

3차원 해석의 결과, 어도 내부의 유속장은 각 pool마다 유사한 흐름구조가 나타나기보다는 다양한 흐름 양상을 보였다. 어도 통과효율을 평가, 개선하기 위해서는 평균적인 수리량(평균유속, 수심 등)뿐만 아니라 이런 정교한 모델링의 결과를 활용하는 것이 필요해 보인다. River-2D 수리해석의 결과를 보면 좌안측보다 우안의 어도 입구쪽으로 높은 값의 가중가용면적이 발생하여 유인효율이 높을 것으로 기대하였으나, 실제 어류 모니터링 결과는 그렇지 않았다. 특히 10%대의 낮은 유인효율 값을 보여 다른 나라 어도들의 유인효율에 훨씬 못 미치는 현상을 보였다. 이는 회유성이 강하지 않는 어류를 대상으로 관찰한 결과일 수도 있고, 어도의 구조적 한계에 기인한 것일 수도 있다. 어도 유인효율의 개선을 위해 향후 심도있는 연구가 필요해 보인다. 이러한 한계점에도 불구하고 어도를 계획할 때 또는 여건상 어류 모니터링이 어려운 경우, 본 연구와 같은 수리해석은 간접적으로나마 어도 효율을 평가할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 환경대학교 교비(해외)파견 연구비의 지원에 의한 것임.

References

- Baek, K. O., and Kim, Y. D. (2014). "A case study for optimal position of fishway at low-head obstructions in tributaries of Han River in Korea." *Ecological Engineering*, Vol. 64, pp. 222-230.
- Baek, K. O., Ku, Y. H., and Kim, Y. D. (2015). "Attraction efficiency in natural-like fishways according to weir operation and bed change in Nakdong River, Korea." *Ecological Engineering*, Vol. 84, pp. 569-578.
- Barton, A., and Keller, R. (2003). "3D free surface model for a vertical slot fishway." *Proceedings XXX IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece.
- Bunt, C. M., Castro-Santos, T., and Haro, A. (2012). "Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration." *River Research Applications*, Vol. 28, No. 4, pp. 457-478.
- Cheong, T., Kavvas, M., and Anderson, E. (2006). "Evaluation of adult white sturgeon swimming capabilities and applications to fishway design." *Environmental Biology Fish*, Vol. 77, No. 2, pp. 197-208.
- Clay, C. (1995). *Design of fishways and other fish facilities*. Lewis Publishers, Florida.
- Cowx, I., and Welcomme, R. (1998). *Rehabilitation of rivers for fish*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Fishing News Books, Australia.
- doopedia (2019). accessed 20 June 2019, <<https://www.doopedia.co.kr>>.
- Gyeongsangnamdo (2010). *Deokcheon River basic plan report*.
- Heimerl, S., Hagmeyer, M., and Ehteler, C. (2008). "Numerical flow simulation of pool-type fishways: new ways with well-known tools." *Hydrobiologia*, Vol. 609, pp. 189-196.
- Kang, H., Im, D., Hur, J. W., and Kim, K. (2011). "Estimation of habitat suitability index of fish species in the Geum river watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 2B, pp. 193-203.
- Kim, S., Yu, K., Yoon, B., and Lim, Y. (2012). "A numerical study on hydraulic characteristics in the ice harbor-type fishway." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 16, No. 2, pp. 265-272.
- Korean Water Resources Association (KWRA) (2009). *River design standard*.
- 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.
- Lim, S. Y. (2010). *An analysis of hydraulic characteristic characteristics and fish swimming performance associated with distance between baffles in the ice-harbor fishway*. Master Thesis, Myungji University, Korea.
- Lucas, M. C., and Baras, E. (2001). *Migration of freshwater fishes*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd.
- Lundqvist, H., Rivinoja, P., Leonardsson, K., and McKinnell, S. (2008). "Upstream passage problems for wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in a regulated river and its effect on the population." *Hydrobiologia*, Vol. 602, No. 1, pp. 111-127.
- Ministry of Environment (MOE) (2015). *Evaluation and improvement of fishway efficiency*.
- Rajaratnam, N., and Katopodis, C. (1988). "Plunging and streaming flows in pool and weir fishways." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 939-944.
- Rural Research Institute (RRI) (2015). *Monitoring and analysis for remodeling of fishway*. Korea Rural Community Corporation.
- US Geological Survey (USGS) (2001). *PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises*, Open File Report 01-340.