



Investigation for flow characteristics of ice-harbor type fishway installed at mid-sized streams in Korea

Baek, Kyong Oh^{a*} · Min, Byong Jo^b

^aProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong, Korea

^bStudent, Department of Civil and Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong, Korea

Paper number: 21-066

Received: 21 August 2021; Revised: 9 November 2021; Accepted: 19 November 2021

Abstract

In this study, flow patterns in the ice-harbor fishway were analyzed according to fluctuations of the upstream water level, an increase of weir interval, and the presence or absence of orifices using a three-dimensional commercial numerical model, Flow-3D. In order to prove the suitability of the numerical simulation results, the flow velocity and flow rate at the exit of the fishway were observed using a 3D ultrasonic velocimetry on an actual ice-harbor fishway installed downstream of the Daegok bridge in Gyeongang-Cheon. Four types of turbulence modules can be selected for the Flow-3D model. As a result of verification with observation data, the RNG model best described the flow characteristics in the ice-harbor fishway. The velocity structure in the fishway according to fluctuations of the upstream water level was simulated. The results showed that the plunging flow and the streaming flow were mixed at the lowest water level. When the water level increased about 10 cm or more from the lowest water level, the plunging flow disappeared in all pools and only the streaming flow occurred. Contrary to expectations, even when the water level is rose a little, the flow simply occurred mainly on the streaming flow. If the interval between the weirs is increased, both the plunging flow and the streaming flow are showed continued even if the water level rises. In addition, compared to the case where there are no orifices at the bottom of the weirs, the plunging flow tends to be generated in several pools. It is necessary to prevent blocking orifices through active management so that various flow patterns in the fishway can be generated in multiple pools.

Keywords: Ice-harbor fishway, 3D numerical modelling, Turbulence model, Plunging flow, Streaming flow

국내 중소하천에 설치된 아이스하버 어도 내부 흐름 특성 규명

백경오^{a*} · 민병조^b

^a국립환경대학교 건설환경공학부 교수, ^b국립환경대학교 건설환경공학부 학생

요 지

본 연구에서는 3차원 상용 수치모형 Flow-3D를 활용하여 상류 수위(유입유량) 변동, 격벽의 간격(pool의 길이) 변화, 잠공 유무 등에 따른 아이스하버 어도 내 흐름 양상을 분석하였다. 수치모의 결과의 적합성을 입증하기 위해 경안천 대곡교 하류에 설치된 실제 어도에서 3차원 초음파 유속계를 사용하여 어도 출구부 단면 유속과 유량을 관측하였다. Flow-3D 모형에는 난류 모듈로 4가지를 선택할 수 있는데, 관측 자료로 검증 결과 RNG 모형이 아이스하버 어도 내 흐름 특성을 가장 잘 재현하였다. 하천의 유량 전량이 어도로만 유입되어 흐른다는 조건에서 수위 변화에 따른 어도 내 유속구조를 모의해 보았다. 그 결과 최저수위에서는 잠입류와 표면류가 혼재하여 발생하였는데, 최저수위에서 약 10 cm 이상만 수위가 상승하여도 모든 pool에서 잠입류가 사라지고 오직 표면류만 발생하였다. 예상과 달리 수위가 조금 상승해도 흐름이 꽤 단순하게 표면류 위주로 발생하였다. 격벽간 간격을 늘려주면 수위가 상승하더라도 잠입류와 표면류가 혼재되어 나타나는 현상이 지속되었다. 그리고 격벽 하단에 잠공이 있는 경우가 없는 경우에 비해 잠입류가 여러 pool에서 생성되는 경향을 보였다. 보다 적극적인 어도 사후 관리로 잠공 폐색을 막아 어도 내 다양한 흐름이 생성될 수 있도록 유도하는 것이 필요해 보인다.

핵심용어: 아이스하버 어도, 3차원 수치모의, 난류 모형, 잠입류, 표면류

*Corresponding Author. Tel: +82-31-670-5141

E-mail: pko@hknu.ac.kr (K. O. Baek)

1. 서론

풀(pool/weir)형식 어도는 내부에 격벽(weir)을 설치해 풀(pool)을 형성시키고, 풀의 완속력을 이용해 유속을 줄이는 방식을 따른다. 그 종류로는 대표적으로 계단식 어도, 버티컬슬롯(vertical slot) 어도, 아이스하버(ice-harbor) 어도 등이 있다(KWRA, 2019). 하천설계기준에서 제시하는 폭 3 m 짜리 아이스하버 어도의 표준 형식을 Fig. 1에 도시하였다. 국내 중소하천에 설치된 어도의 대부분은 풀(pool/weir) 형식이고, 특히 아이스하버 어도가 절반 이상을 지하고 있는 실정이다(www.fishway.go.kr). 이런 상황임에도 표준형 아이스하버 내부의 흐름구조에 대한 분석을 수행한 연구를 국내에서는 찾아보기는 쉽지 않다, 어도 내부 유속구조는 어도가 제 기능을 수행하는지, 효율이 얼마나 좋은지 평가할 때 알아야 할 필수불가결한 요소이다. 특히 어도의 효율 중 통과효율(passage efficiency)에 집중할 필요성이 있다. 여기서 통과효율은 어도 입구로 들어온 어류들 중 어도 출구로 완전히 빠져나간 개체수의 비로 정의될 수 있는데, 어도로 유입된 어류들을 안전하게 어도 출구로 통과시키는 것이 효율 증대의 목적이라 할 수 있겠다(Lucas and Baras, 2001; Baek, 2019). 기 설치된 어도는 어류 모니터링을 통해 보다 직접적으로 효율을 평가할 수 있다. 하지만 어도를 계획할 때, 또는 여건상 어류 모니터링이 어려운 경우, 어도 내부에 생성되는 흐름장을 직접 관측한다거나 수치해석을 통해 간접적으로나마 어도 효율을 평가해 볼 수 있다.

풀 형식 어도 내 흐름 특성은 몇 가지 패턴으로 분류할 수 있으며 상류(어도 출구부) 수위, 유입 유량, 격벽의 간격 등에 의해 결정된다. 특히 어도 내의 유속구조는 일반적으로 표면류(streaming flow)와 잠입류(plunging flow)로 크게 구분되고, 이들이 복합적으로 발생한다고 알려져 있다(Rajaratnam and Katopodis, 1988; Ead et al., 2004). Fig. 2에서 보듯이 표면류의 경우 수표면에 주흐름이, 어도 바닥 부근에 주흐름과 반대방향 흐름이 발생하므로 어도 바닥 인근에서 유영중인 어류에게는 종종 상류 방향을 잃어버리고 소상에 실패할 확률이 높다고 알려져 있다(Kim et al., 2012). 바닥을 따라 유영하는 어류에게는 잠입류가 소상하기에 적절한 흐름이라 할 수 있다. 반면 수표면 가깝게 유영하는 어류의 경우라면 이와 반대로 표면류가 어류 소상에 유리한 흐름 구조이다. USFWS (2019)는 아메리칸 청어(American shad)와 같은 회유성 어종을 대상으로 표면류만 발생하도록 어도를 설계해야 한다고 지침에 기술하였다. 결국 풀 내에 형성되는 유속구조에 따라 목표 어종의 소상 효율이 좌우되므로 이를 파악하는 것은 중

요한 작업이다. 풀 형식 어도 내부의 유속장을 수치해석을 활용하여 파악한 연구는 다음과 같이 국내외의 다양한 연구자들에 의해 수행된 바 있는데, 비교적 최근(10년 내외)의 연구들을 소개하면 다음과 같다.

Heimerl et al. (2008)은 버티컬슬롯 어도 내 흐름장 파악을 위해 실험실에 조성된 소규모 어도(폭 1.13 m)를 대상으로 3차원 수치모의를 수행하여 관측 유속장과 비교적 일치된 결과를 도출하였다. Bermudez et al. (2010)은 유사한 규모의 버티컬슬롯 어도를 대상으로 3차원 대신 수심 적분된 2차원 모형에 k-ε 난류모형을 더해 pool 내 평면적 흐름장을 재현하였다. Alvarez-Vazquez et al. (2011)은 3차원 흐름 모의 결과를 어도 디자인에 활용하여 버티컬슬롯 어도의 슬롯과 격벽간 적절한

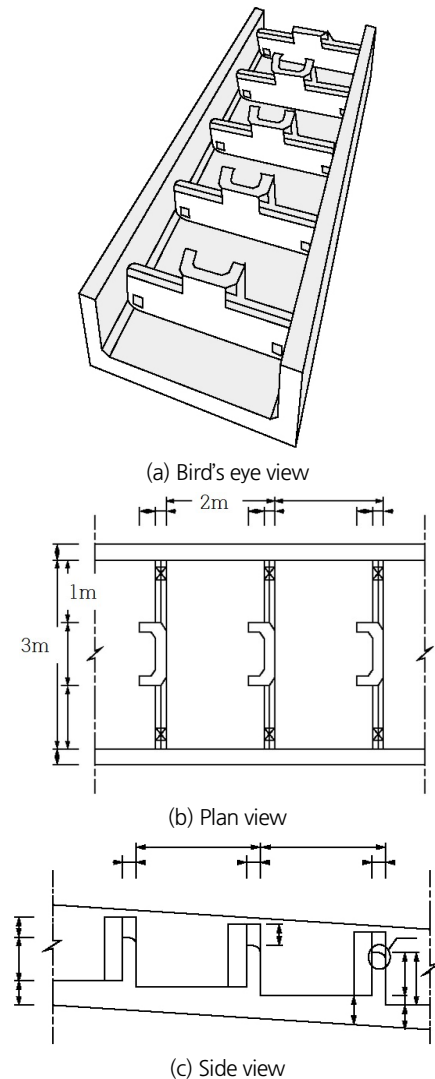


Fig. 1. Blueprint of standard ice-harbor type fishway with 3 m width (after KWRA, 2019)

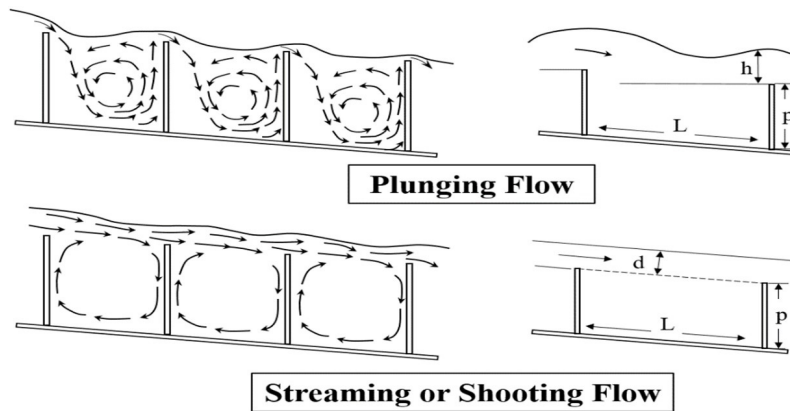


Fig. 2. Two types of flow structure in Pool-weir fishway (after Rajaratnam and Katopodis, 1988)

간격을 제안한 바 있다. Marriner *et al.* (2014)은 turning pool을 가진 어도 내 흐름양상을 3차원 수치모형을 활용하여 재현하였다. 극복해야 될 단차가 클 경우 어도 길이가 길어지게 되는데 이럴 때 180도 만곡수로 형태로 어도를 회전하는 경우를 turning pool이라 명한다. 이에 대한 연구들은 최근까지도 지속되고 있는데, Maniecki (2018)은 turning pool을 갖는 어도에서 잠공(orifice)과 노치(notch)의 위치까지 변화시키면서 흐름장의 특성을 3차원 모의로 분석한 바 있다. Song *et al.* (2019)은 준 3차원 모형인 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)를 활용하여 저수지 댐에 연결된 자연형 어도의 효율을 평가한 바 있다. 국내 연구자들 중 어도 내 흐름특성을 3차원 수치 모델링으로 분석한 사례는 외국에 비해 많지 않은데, 대표적으로 Ahn *et al.* (2012), Kim *et al.* (2012), Jo *et al.* (2013) 등이 있다. Ahn *et al.* (2012)은 아이스하버 어도 격벽 간격 변화에 따른 흐름특성을 분석하였고, Kim *et al.* (2012)은 실험실에 설치된 어도 내 관측 유속으로 모델링 자료를 검증하였고, Jo *et al.* (2013)은 낙동강 보에 설치된 큰 규모의 아이스하버 어도를 대상으로 모델링을 수행하였다. 상기 연구들 모두 관측된 점 유속을 기반으로 모형을 검증하였고 단면 전체에 대한 유속 분포는 검증하지 못하였다. 또한 3차원 모의 정확도를 좌우하는 난류모형에 대한 검증과정은 부재하였다.

본 연구에서는 3차원 상용 수치모형 Flow-3D를 활용하여 상류 수위(유입유량) 변화, 격벽의 간격 변화, 잠공 유무 등에 따른 아이스하버 어도 내 흐름 양상을 분석해 보았다. 그리고 해당 수치모의 결과의 적합성을 입증하기 위해 중소하천(경안천)에 설치된 실규모 아이스하버 어도에서 3차원 유속장을 관측하여 검증 자료로 활용하였다. 우선 ADCP의 일종인 stream-pro를 사용하여 어도 출구부 단면 유속 및 유량을 실측하였고, 2차원 점유속계를 사용하여 어도 내 주요지점의 유속을 관측하였다. 관측된 유속장을 기반으로 어도 흐름 모의에

적절한 난류모형과 조도를 선택하였다. 수치모형을 기반으로 보 수위변화에 따른 어도 내부 유속분포를 재현하고, 다양한 유속장을 구현할 방안을 제시하였다.

2. 관측 유속을 통한 3차원 수치모형의 검증

2.1 어도 내 유속 관측

먼저 경안천 용인시 대곡교 하류에 설치된 실규모 아이스하버식 어도(명칭: 경안천 004어도, KRC (2011))에서 유속계를 이용하여 어도 내 흐름 특성을 관측하였다. 해당 어도는 폭이 3 m인 Fig. 1에서 제시된 아이스하버 어도 표준 설계도대로 설치된 어도이다. 나머지 제원으로 길이가 24 m, 높이 1.1 m, 기울기 1/20 이며, 11개의 pool을 가지고 있다(Fig. 3). 흐름장 관측 시기는 2020년 10월 말이었으며 이는 저수기에 해당하므로 어류가 어도를 빈번히 이용할 시기의 유량과 일치한다고 볼 수 있다(국지회유하는 어류는 봄철이 산란기이며 이 시기에 활동 범위가 넓어 어도 이용이 잦은 것으로 알려져 있다. 국내 하천은 늦가을에서 이듬해 봄까지 대체로 저·갈수량을 유지한다). 그리고 이때는 하천의 유량 전량이 어도로만 유입되어 흐르고 있는 상황이었다. 어도 내 흐름은 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)의 일종인 3차원 유속계(Stream-pro, RDI)와 2차원 초음파 점 유속계 ADV (Flow-tracker, Sontek)를 함께 사용하였다. Stream-pro는 일반 ADCP에 비해 어도와 같이 수심 1.5 m 이하의 중소규모 개수로 흐름 관측에 유리하다. Stream-pro로 어도 출구부 단면과 3차원 유속분포를 관측하고, 어도 내로 유입하는 유량을 측정하였다. 2차원 초음파 유속계 ADV로는 어도 입구부와 출구부 직전 pool 내 몇몇 지점들의 유속을 관측하였다. 유속 관측을 수행하는 사진을 Fig. 3에 수록하였다.



(a) Aerial photograph of fishway



(b) Fishway located at left bank



(c) Measuring flowrate and velocity by ADCP

Fig. 3. Photograph of fishway at Gyeongan-cheon and measurement of flow velocity

2.2 3차원 수치모형의 재현성 검증

본 연구에서는 아이스하버 어도 내부에서 발생하는 흐름 특성을 모의하기 위해 상용 3차원 수치모형 중 자유 수면을 가지고 수리 구조물 상의 유체 거동을 어려움 없이 해석할 수 있는 Flow-3D 모형을 사용하였다. Flow-3D 모형은 다음 식 처럼 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균한 Reynolds 방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 하고, 난류모형으로 k-ε 모형, LES 모형 등 다양한 옵션을 선택할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_{\rho} A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v_{\rho} A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(w_{\rho} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

여기서, V_F 는 유체에 접하고 있는 체적, ρ 는 유체의 밀도, 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).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w \end{aligned} \quad (2c)$$

여기서, G_x, G_y, G_z 는 Body Acceleration 이고, R_{SOR} 는 질량 생성항, f_x, f_y, f_z 는 Viscous Acceleration, b_x, b_y, b_z 는 구조물을 통과하면서 발생하는 손실을 표시한다. 경안천 실규모 어도에서 수행된 유속 관측치와 Flow-3D 모의 결과 비교를 위해 Fig. 4와 같이 해당 보와 어도를 3차원 격자로 구현하였다. 통상적인 흐름 모의시 상류단에 유량을, 하류단에 수위를 할당하는 방법을 쓴다. 이에 따라 어도 출구부로 유입되는 유량을 모형의 상류단 입력자료로 할당해야 하지만, 어도는 보의 수위에 따라 유입 유량이 달라지므로 유량을 특정하기 쉽지 않다. 따라서 보에 수위를 할당하여 수위 변화에 따라 어도로 유입되는 유량이 달라지도록 경계조건을 구성하였다. 현장 관측시 보 바닥에서 수면까지 수심이 0.85 m여서 이를 상류단 수위로 환산하여 할당하였고, 어도 하류단에도 관측 수위를 부여하였다.

Flow-3D 모형에는 난류 모듈로 4가지(k-ε 모형, RNG모형, LES 모형, k-ω 모형)가 지원되는데 본 과업의 대상인 아이스하버식 어도 흐름 모의에 어떤 난류 모형이 적합한지 따져 볼 필요성이 있다. 여기서 k-ε 모형은 대표적인 two-equation 모형이며, RNG (Re-normalization Group)모형은 k-ε 모형을 기반으로 경험적으로 인용된 방정식 상수들을 외재하고 있으며, 저장도의 난류운동과 강한 전단력을 가지는 유동해석에 유리하다고 알려져 있다(Flow Science, 2000)). LES (Large Eddy Simulation)모형은 계산격자에 의해 해결될 수 있는 모든 기본 난류구조를 직접 계산하고 너무 작아 해결될 수 없는 양상들은 근사화한다. 각각의 모형으로 모의된 어도 내 흐름

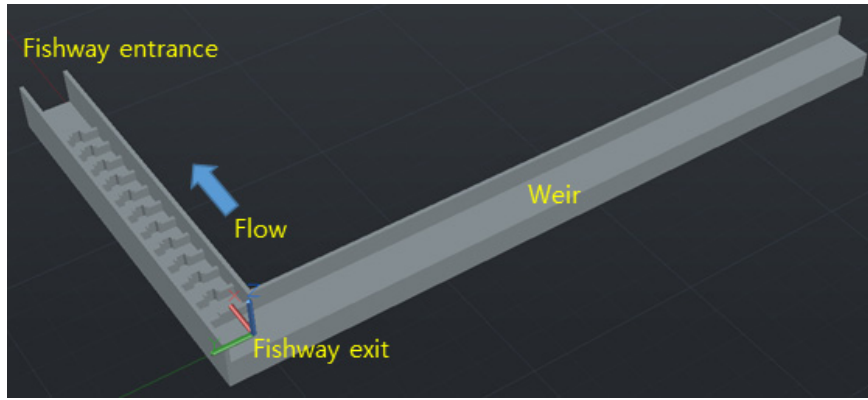


Fig. 4. Computational grid of weir and fishway at Gyeongan-cheon

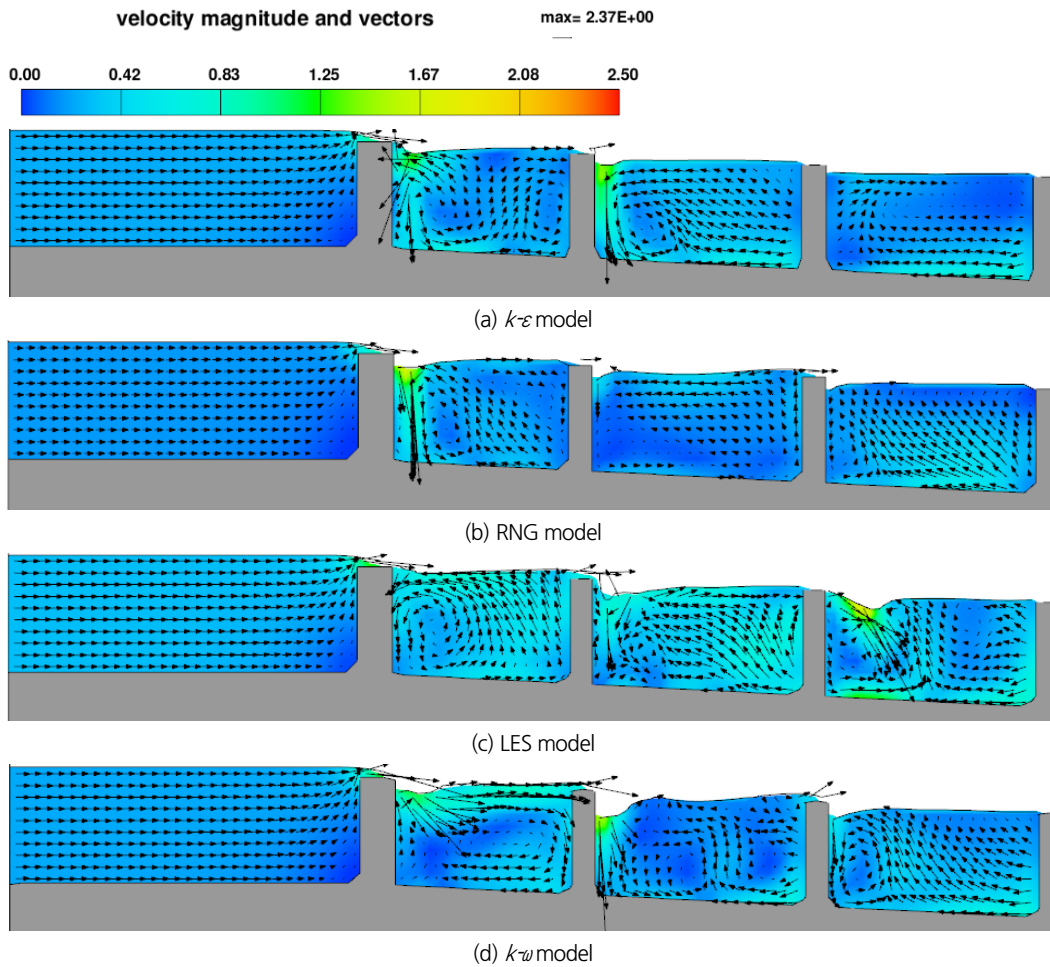


Fig. 5. Side view of flow structure in pools simulated by Flow-3D according to four turbulence modules

양상을 측면도로 도시하면 Fig. 5와 같다. 이 그림에서 보듯이 어도 출구부 직하류 첫 번째 pool에서 $k-\omega$ 모형을 제외한 $k-\epsilon$, RNG, LES 모형에서는 잠입류가 발생한다. 실제 현장 어도 흐름장 관측시 첫 번째 pool에서 낙엽이 잠입류의 회전류(반시

계방향으로 회전; Fig. 2)에 갇혀서 하류로 떠내려가지 못하고 지속적으로 pool 안에서 회전하고 있는 것을 확인한 바 있다. 즉 $k-\epsilon$, RNG, LES 모형이 일단 실제 상황을 잘 재현하였다. 다음으로 3가지 모형($k-\epsilon$, RNG, LES)으로 모의된 결과

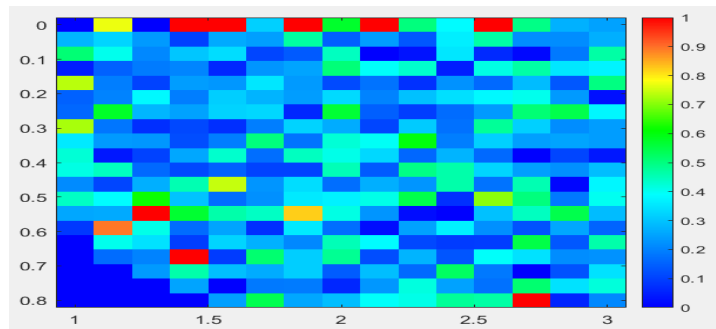
와 관측된 유속과 유량을 비교해서 정확도를 확인하였다. 모형으로 계산된 어도 유입 유량과 Stream-pro로 관측된 유량 값을 Table 1에 비교하고 Fig. 6에 도시하였다. 이 표에서 보듯이 RNG모형의 결과가 관측 유량과 가장 잘 일치하였고, LES와 k-ε모형은 유입 유량을 과대 산정하는 경향을 보였다. 특히 관측 유량과 계산 유량간의 상대오차를 보면 RNG모형은 약 6%에 불과하지만, LES와 k-ε모형은 각각 38%, 28%에 이르렀다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 어도 출구부 단면에 발생하는 유속분포도 관측치와 RNG 모의치가 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다. 특히 단면의 표층부 양측단에 강한 흐름이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이것은 보에 막힌 흐름이 어도로 전량 유입되는 상황을 잘 모사하고 있음을 증명한다. 반면 점 유속 계로 어도 출구부와 입구부 특정 지점들에서 유속을 관측한

결과를 모델링 값과 비교해 보면 방향이나 크기 등에서 정확히 일치하는 경우는 없었다(Table 1). 각 pool과 수심에 따라 복잡한 흐름 양상을 보이는 어도 내부 임의의 한 점에서 관측한 유속을 정확히 모의하기란 매우 어렵다. 이상을 종합해 보면 네 가지 난류 모형 중 아이스하버 어도 내 흐름 경향을 잘 재현하는 것은 RNG 모형이라 판단된다. 다음으로 Flow-3D 모형에서는 유동 마찰의 영향을 조고(roughness height)로 환산하여 입력한다. Henderson (1966)에 의하면 조고(k_s)와 Manning의 조도계수(n)의 관계는 다음의 식을 따른다. 본 어도는 콘크리트 재질이므로 n 값을 0.014 부여하였다.

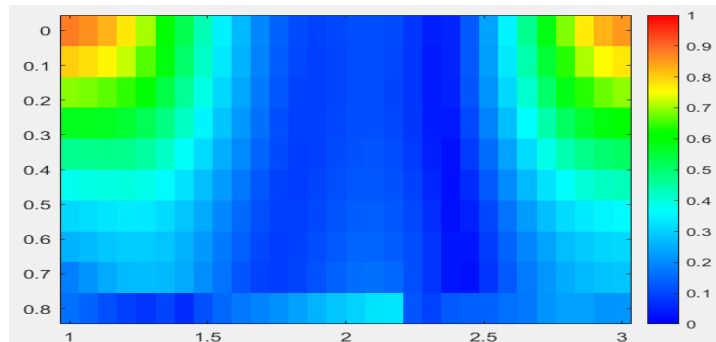
$$k_s = \left(\frac{8g}{0.113} \right)^3 (n^6) \tag{3}$$

Table 1. Comparison of simulated and observed values for flow rate and velocity

	Flow rate (cms)	Relative error (%)	Point velocity (m/s)				
			at exit section		at entrance section		
			h = 0.2 m	h = 0.4 m	W = 0.5 m	W = 2.5 m	
Observed	0.689	-	0.0314	0.110	0.063	0.087	
Turbulence Model	RNG	0.645	6.4	0.0768	0.130	0.114	0.130
	LES	0.955	38.6	0.094	0.076	0.105	0.116
	k-ε	0.882	28.0	0.114	0.141	0.099	0.104



(a) Observed velocity distribution by ADCP



(b) Simulated velocity distribution by RNG model

Fig. 6. Comparison of simulated and observed velocity distribution at the exit cross-section of the fishway

3. 다양한 조건에서 아이스하버 어도 내 흐름 양상 분석

3.1 수위에 따른 흐름 양상

관측 및 모의가 수행된 경안천 보에서는 하천의 유량 전량이 어도로만 유입되는 상황이라 보의 수위가 어도 내부로 유입되는 유량의 크기를 좌우한다. 일반적으로 수위가 내려가면 어도 유입 유량이 작아지면서 잠입류가 발생하고, 수위가 올라가면 유량이 커지면서 표면류가 발생하는 것으로 알려져 있다(Rajaratnam and Katopodis, 1988; Ead *et al.*, 2004). 경안천 어도에서 어느 범위의 수위에서 잠입류 혹은 표면류가 발생하는지 모의해 보았다. 앞서 현장 관측시 보 바닥에서 수면까지 수심을 계측하였으므로 설명의 편의를 위해 앞으로 수위 대신 수심을 기준으로 내용을 기술한다. 먼저 모의 가능한 어도 출구부(개수로의 상류)의 수심 최소치(보의 최저 수위로 간주)를 파악해 보고자 수심을 점차적으로 낮추면서 모의하였더니 0.78 m 미만이면 수치 모의에 어려움이 있었다

(어도 입구부까지 흐름이 도달하지 못함). 이때(수심 0.78 m)의 측면도를 Fig. 7(a)에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이 11개의 pool 중에서 잠입류가 상류 첫 번째와 두 번째 pool에서 발생하고(반시계방향 회전류가 미약하게 발생), 일곱 번째 pool에서 혼합된 형태, 그리고 나머지 pool에서는 표면류만 발생하였다. 상류단 수심을 조금씩 증가시킬수록 첫 번째 pool의 잠입류는 유지되지만 하류 pool들에서는 표면류가 주로 발생하였고, 표면류와 잠입류가 혼재하는 경우도 가끔씩 나타났다. 그리고 수심이 0.9 m 이상에 이르면 Fig. 7(b)와 같이 그나마 있던 잠입류도 사라지고 모든 pool에서 표면류만 발생하였다. 상류 수위 변동에 따라 잠입류와 표면류가 혼재하면서 발생하리라던 예상과 달리 흐름이 꽤 단순하게 표면류 위주로 발생하였고, 흐름 양상에 변화가 있는 수위 변화폭도 0.12(= 0.9-0.78) m에 불과하였다. 국지회유하는 어종은 하상을 따라 이동하는 모래무지부터 표면 근처를 유영하는 은어까지 다양하게 존재하므로 어도 내의 흐름 양상도 수위 변화에 대응하여 다양하게 발생해야 제 기능을 할 것으로 보인다.

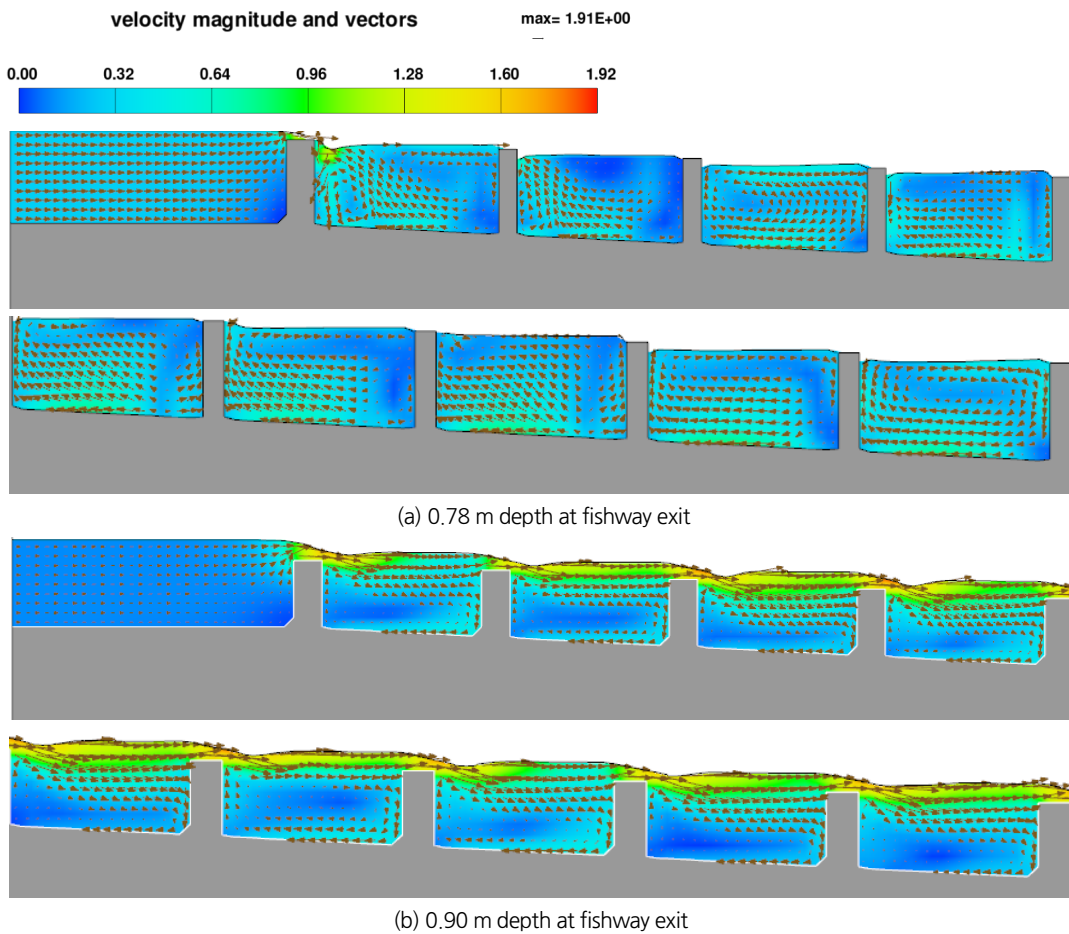


Fig. 7. Side view of simulated flow structure in pools according to variation of depth at fishway exit (upstream section)

3.2 격벽 간격에 따른 흐름 양상

어도 유입 유량이 일정하다는 가정하에 표면류 위주의 흐름장에서 잠입류의 비율을 높이는 방안 중 하나가 격벽의 간격(pool의 길이)을 증가시키는 것이다. 현재 표준형 아이스하버형 어도 내 격벽간 간격은 Fig. 1에서 보듯이 2m로 설정되어 있다. 이 간격을 3m로 늘렸을 경우 어도 내부 유속장의 변화, 특히 잠입류가 발생하는 빈도를 3차원 모의를 통해 살펴보았다. 그 결과를 정리해 보자면 3m로 격벽 간격을 늘려도 출구부 최소 수심은 격벽 간격 2m일 때와 동일한 0.78m이었다. 이때 첫 번째 pool에서 잠입류가 발생하는 현상도 동일하였다. 반면 격벽을 3m로 늘리면 어도 출구부 수심이 0.78~1.0m 범위에서는 잠입류와 표면류가 혼재하고, 수심이 1m 이상이 되면 오로지 표면류만 발생하였다. 즉 격벽의 간격이 3m일 경우, 0.22(=1.0-0.78)m의 범위에서 잠입류와 표면류가 혼재되어 나타나서 보다 넓은 조건에서 잠입류 발생이 가능하였다. 참고로 전술하였듯이 격벽의 간격이 2m인 경우에는 0.12m의 수위 변동에서만 잠입류와 표면류가 혼재하여 발생하였다. 결과적으로 격벽의 간격을 표준형에 비해 1.5배(2m → 3m)

증가시킬 경우, 보 수위가 약 10 cm 더 상승해도 혼합류(잠입류+표면류)를 관찰할 수 있었다. 따라서 향후 목표어종에 따라 소상에 효율적인 흐름양상 구현을 위해 격벽 간격을 조절하는 것도 필요해 보인다.

3.3 잠공의 유무와 형태에 따른 흐름 양상

아이스하버형 어도의 표준형식은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 잠공(orifice)이 각 격벽 하단부에 2개씩 존재한다. 하지만 실제 하천에 설치된 어도를 살펴보면 홍수시 떠내려 온 잡목이나 유사에 의해 대부분의 잠공이 막혀 있는 경우가 대다수이다. 본 연구의 현장 관측이 수행된 어도도 마찬가지로 상항으로 모든 격벽의 잠공이 폐쇄된 상태라 앞선 검증과정에서 잠공을 구현하지 않고 모델링을 수행하였다. 만일 홍수 이후 어도 관리를 매년 충실히 수행하여 격벽 내 잠공이 폐쇄되지 않았다는 가정하에 흐름 양상이 어떻게 달라지는지 모의를 통해 확인해 보았다. 우선 현장 관측이 수행된 수위 조건(수심 0.85 m)에서 수치모의 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 이 그림 (a)에서 보듯이 첫 번째 pool 뿐만 아니라 두 번째, 세 번째,

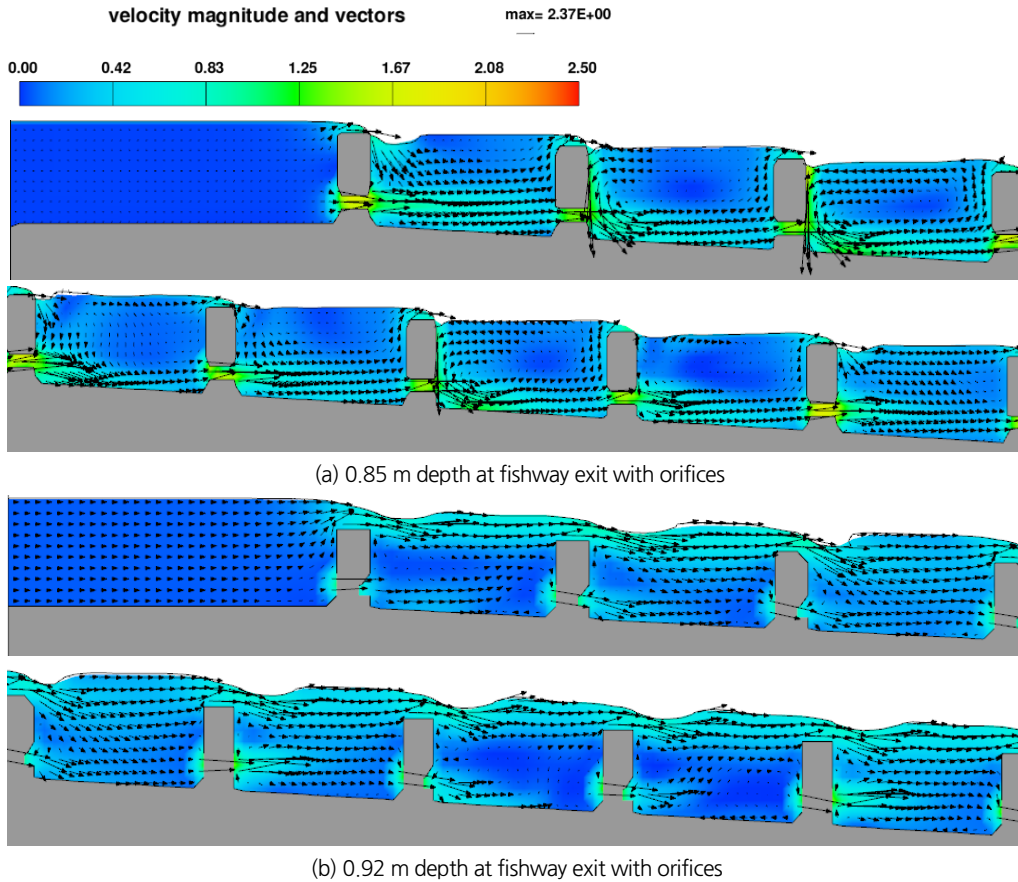


Fig. 8. Side view of simulated flow structure in pools according to variation of depth at fishway exit with orifices

여섯 번째 pool에서도 명확하게 잠입류가 생성되었다. 나머지 pool에서도 상층부에 반시계방향의 회전류가 비록 뚜렷이 발생하지는 않지만, 하단부 잠공을 주 흐름이 통과하면서 기본적으로 잠입류와 유사한 흐름이 발생하였다. 어도 출구부 수심을 점차적으로 증가시키면서 모의를 수행한 결과, 수심이 약 0.92 m 이상이 되면 Fig. 8(b)와 같이 모든 pool에서 잠입류가 사라지고 오직 표면류만 보였다. 잠공이 없는 경우(수심 0.9 m 이상에서 표면류만 발생)에 비해 큰 차이를 보이지는 않았다. 결론적으로 격벽 하단에 잠공이 있는 경우가 없는 경우에 비해 잠입류가 다수의 pool에서 생성되는 경향성을 보이므로, 보다 적극적인 어도 사후 관리로 잠공 폐색을 막아서 어도 내 다양한 흐름이 여러 pool에서 생성될 수 있도록 유도하는 것이 필요하리라 사료된다. 끝으로 하나의 격벽에 두 개의 잠공을 설치하는 것이 통과효율에 유리한지도 향후 엄밀한 검증이 필요해 보인다. 잠공을 하나만 뚫을 수 있고, 이때 일렬로(straight configuration) 뚫을 것인지, 지그재그 형태(offset configuration)로 만들 것인지 이슈가 될 수 있다. Silva *et al.* (2012)에 의하면 목표 어종을 Iberian barbel로 삼고 잠공이 격벽당 하나라면 일렬로 만들 때 효율이 28%, 지그재그로 뚫으면 68%로 소상효율이 증가한다고 제시한 바 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 상용 수치모형 Flow-3D를 활용하여 중소규모 하천에 설치된 아이스하버 어도 내 흐름 양상을 분석하였다. 수치모의 결과의 적합성을 입증하기 위해 경안천 대곡교 하류에 설치된 실제 어도에서 3차원 초음파 유속계를 사용하여 어도 출구부 단면 유속 및 유량을 관측하였다. 해당 어도는 하천설계기준에서 제시된 표준 설계도대로 설치된 아이스하버 어도이다. Flow-3D 모형에는 난류 모듈로 4가지(k- ϵ 모형, RNG모형, LES 모형, k- ω 모형)가 지원되는데, 관측 자료로 검증 결과 RNG 모형이 아이스하버 어도 내 흐름 경향을 가장 잘 재현하였다.

일반적으로 보 수위가 내려가면 어도 유입 유량이 작아지면서 잠입류가 발생하고, 수위가 올라가면 유량이 커지면서 표면류가 발생하는 것으로 알려져 있다. 하천의 유량 전량이 어도 로만 유입되어 흐른다는 가정하에 수위 변화에 따른 어도 내 유속구조를 모의해 보았다. 그 결과 최저수위에서는 잠입류와 표면류가 혼재하여 발생하였는데, 최저수위에서 약 10 cm 이상만 수위가 상승하여도 모든 pool에서 잠입류가 사라지고 오직 표면류만 발생하였다. 잠입류를 더 많은 pool에서 발생

시키고 싶다면 격벽간 간격을 늘려주는 것이 하나의 방법이다. 표준 설계도에는 격벽간 간격이 2 m인데 이를 3 m로 증가시킨 후 모의를 수행하였다. 그 결과 최저수위에서 보 수위 상승치가 약 20 cm 이내면 잠입류와 표면류가 혼재되어 나타났고 그 이상이 되면 표면류만 발생하였다.

아이스하버형 어도의 표준형식은 잠공(orifice)이 각 격벽 하단부에 2개씩 존재한다. 하지만 실제 하천에 설치된 어도를 살펴보면 홍수시 떠내려온 잡목이나 유사에 의해 대부분의 잠공이 폐색된 채 방치된다. 만일 홍수 이후 어도 관리를 매년 충실히 수행하여 격벽 내 잠공이 폐색되지 않았다는 가정하에 흐름 양상이 어떻게 달라지는지 모의를 통해 확인해 보았다. 그 결과 격벽 하단에 잠공이 있는 경우가 없는 경우에 비해 잠입류가 여러 pool에서 생성되는 경향성을 보였다. 보다 적극적인 어도 사후 관리로 잠공 폐색을 막아서 어도 내 다양한 흐름이 다수의 pool에서 생성될 수 있도록 유도하는 것이 필요하리라 사료된다. 끝으로 향후 연구에서는 이상의 쟁점들을 종합적으로 검토하여 목표 어종에 따라 아이스하버 어도의 표준 설계도를 제시하는 것이 바람직해 보인다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: 2016R1D1A1B02012110).

References

- Ahn, S., Lee, S., and Lee, Z. (2012). "Analysis of hydraulic Characteristics in ice-harbor fishway." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 21, No.11, pp. 1395-1406.
- Alvarez-Vazquez, L.J., Martinez, A., Vazquez-Mendez, M.E., and Vilar, M.A. (2011). "The importance of design in river fishways." *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 9, pp. 6-10.
- Baek, K.O. (2019). "Evaluation technique for efficiency of fishway based on hydraulic analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No, S2, pp. 855-863.
- Bermudez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., and Balairon, L. (2010). "Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishway." *Ecological Engineering*, Vol. 36, pp. 1355-1364.
- Ead, S.A., Katopodis, C., Sikora, G.j., and Rajaratnam, N. (2004). "Flow regimes and structure in pool and weir fishways." *Journal of Environmental Engineering Science*, Vol. 3, pp. 379-390.
- Flow Science (2000). USA, accessed 20 June 2021, <<https://www.flow3d.com>>.

- Heimerl, S., Hagemeyer, M., and Ehteler, C. (2008). "Numerical flow simulation of pool-type fishways: New ways well-known tools." *Hydrobiologia*, Vol. 609, pp. 189-196.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*, Macmillan Publishing Co., NY, U.S.
- Jo, J.A., Han, E.J., Kim, Y.D., and Baek, K.O. (2013). "Analysis of hydraulic passage efficiency of ice-harbor type fishway for flow-rate change." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1841-1850.
- Kim, S., Yu, K., Yoon, B., and Lim, Y. (2012). "A numerical study on hydraulic Characteristics in the ice harbor-type fishway." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 265-272.
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (2011). Korea, accessed 10 July 2021, <<https://www.fishway.go.kr>>.
- Korean Water Resources Association (KWRA) (2019). *River design standard*.
- 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.
- Lucas, M.C., and Baras, E. (2001). *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK.
- Maniecki, L. (2018). "Numerical modelling of fish passage with turning pools." *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 65, No. 1, pp. 41-66.
- Marriner, B.A., Baki, A.B. M., Zhu, D.Z., Thiem, J.D., Cooke, S.J., and Katopodis, C. (2014). "Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway." *Ecological Engineering*, Vol. 63, pp. 88-101.
- 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.
- Silva, A.T., Santos, M.T., Ferreira, Pinheiro, A.N., and Katopodis, C. (2012). "Passage efficiency of offset and straight orifices for upstream movements of Iberian Barbel in a pool-type fishway." *River Research and Applications*, Vol. 28, pp. 529-542.
- Song, W., Xu, Q., Fu, X., Wang, C., Pang, Y., and Song, D. (2019). "EFDC simulation of fishway in the diversion Dahaerteng River to Danghe reservoir, China." *Ecological Indicators*, Vol. 102, pp. 704-715.
- US Fish and Wildlife Service (USFWS) (2019). *Fish passage engineering design criteria*. MA, U.S.