

계단식 어도에서의 어류 친화적 흐름 특성 연구

정찬진¹ · 김동현² · 김형석³ · 이승오^{4*}

¹홍익대학교 토목공학과 석사과정, ²홍익대학교 토목공학과 박사, ³군산대학교 토목공학과 교수, ⁴홍익대학교 토목공학과 교수

Study on Fish-friendly Flow Characteristic in Stepped Fishway

Chanjin Jeong¹, Dong Hyun Kim², Hyung Suk Kim³, and Seung Oh Lee^{4*}

¹Master Course Student, Department of Civil Engineering, Hongik University

²Ph.D., Department of Civil Engineering, Hongik University

³Professor, Department of Civil Engineering, Kunsan University

⁴Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

요약

하천에서는 어류의 상·하류 간의 이동을 위해 어도는 필수적으로 설치해야 하는 시설이다. 그러나 어도 내부의 흐름에 따라 이동효율의 차이가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 FLOW-3D를 통해 월류수심에 따른 계단식 어도 내의 어류 친화적 흐름을 검토하였고, 모형을 검증하기 위해 개수로 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 어류의 수영능력에 영향을 미치는 주요 항목으로는 유속, 난류운동에너지, 에너지소산을 등이 있으며, 이와 같은 항목으로 대상 어류를 피라미로 가정하여 어류 친화적 흐름의 적합성을 판단하였다. 월류수심은 피라미에게 유효한 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었으며, 어도의 낙차에 따라 적합한 월류수심이 요구된다. 향후, 본 연구결과는 계단식 어도 설계의 기초자료가 될 수 있을 것이라 기대된다.

핵심용어: 어류 친화적 흐름, 어도, 흐름해석, 수리실험

ABSTRACT

Fishways are essential structures that must be installed in rivers to facilitate the movement of fish between upstream and downstream areas. However, the efficiency of fish passage varies depending on the flow conditions within the fishway. Therefore, this study examined the fish-friendly flow characteristics within a stepped fishway at different overflow depths using FLOW-3D, and conducted experiments for model validation. The key parameters affecting fish swimming ability include velocity, turbulent kinetic energy, and energy dissipation rate. These factors were assessed using a simulated fish species, the zacco platypus, to evaluate the suitability of fish-friendly flow condition. It was confirmed that overflow depth significantly influences fish behavior, and an appropriate overflow depth is required for stepped fishway design. The results of this study are expected to serve as fundamental data for the design of stepped fishways in the future.

Keywords: Fish-friendly flow, Fishway, Flow analysis, Hydraulic experiment

*Corresponding author: Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1726-3694>

Received: 26 May, 2023, Revised: 30 May, 2023, Accepted: 14 June, 2023



1. 서론

하천에 서식하는 대부분의 어종은 연중 회유하는 특성을 가지고 있으며, 이는 어류의 번식과 생애주기에 큰 영향을 미친다. 그러나 하천에 설치된 보(weir)와 수문 등의 횡단구조물은 상·하류간의 어류의 이동을 방해하거나 불가능하게 만든다. 이로 인해 상·하류에서는 어종의 변화 또는 감소 등이 발생하게 된다. 이와 같은 생태계의 훼손을 방지하며, 하천의 생태환경 기능의 회복을 위해 어류의 상·하류간 이동이 가능하도록 하는 어도를 설치한다. 어도는 어류가 이동할 수 있는 길을 의미하며, 수산자원의 보호와 생태계의 보전을 위한 목적을 가지고 있다(Kim et al., 2010).

국내에서는 하천의 횡단을 가로막는 보나 낙차공을 설치할 경우, 반드시 어도를 설치하도록 규정하고 있다. 그러나 현재 국내 어도 설치율은 2022년 기준 16%에 불과하며, 보수가 필요한 어도는 67%로 국내 어도현황은 개선이 필요한 실정이다. 특히 어도의 표준형식에 어긋나는 비표준형식은 전체 어도의 38%를 차지하고 있으며, 이것은 하천 및 어도의 특성에 대한 충분한 연구검토가 이루어지지 못한 채 설치된 경우가 많았기 때문이다(Yeo and Yoon, 2005). 어도의 표준형식은 계단식, 도벽식, 아이스하버식, 버티칼슬롯식으로 구분되며, 이 중 계단식 어도는 국내와 일본 등에서 많이 시공하고 있는 일반적인 어도 형식이다(KRC, 2023). Fig. 1은 흔히 볼 수 있는 표준형식과 비표준형식의 계단식어도를 나타내고 있다.



Fig. 1. Standard (left) and non-standard (right) of stepped fishway (KRC, 2023)

어도는 형식 및 형태에 따라 어도 내부의 흐름양상이 다양하게 발생하기 때문에 하천환경에 적합한 어도를 선정할 수 있어야 한다. 국가어도정보시스템(KRC, 2023)에서 제시하는 하천환경에 적합한 어도란 다음과 같은 3가지의 기준을 만족할 수 있어야 한다. 첫째는 상류로 올라가는 어류들을 어도의 입구로 유인할 수 있어야 한다. 두 번째는 물의 흐름이 좋아 어류들이 신속하고 안전하게 이동할 수 있어야 한다. 마지막으로 시설이 견고하고 관리가 쉬워 어류들이 언제든지 이용할 수 있어야 한다. 이 중 어도 내부의 흐름은 어류의 소상능력에 영향을 미치는 주요 인자로 평가되고 있다. 어도 내부 흐름의 변화에 따라 어류 이동효율의 차이가 발생하며, 어도 내부의 흐름은 어도의 낙차, 유량 또는 월류수심의 영향을 받아 변화한다.

어도 내부의 흐름은 어류가 쉽게 유영할 수 있는 흐름을 유지할 수 있어야 하며, 이를 어류 친화적 흐름이라고 정의한다. 어류 친화적 흐름을 만족하기 위해서는 어도 내부의 흐름은 안정되어 어류가 쉽게 피곤하지 않고 유영할 수 있어야 하며, 어류의 유영능력이 최대한 발휘될 수 있어야 한다. 이와 같이 어류 친화적 흐름은 어도 내부의 유속, 난류운동에너지 그리고 에너지 소산율을 기준으로 판단할 수 있다(Zheng et al., 2022).

본 연구에서는 국내 어도의 약 20%를 차지하고 있는 계단식 어도를 선정하여 연구를 수행하였으며, 월류수심의 변화에 따른 어도 내부의 흐름을 검토하며, 어류 친화적 흐름에 적합한 월류수심을 제시하였다. 어도 내부의 흐름을 검토하기 위해 3차원 수치모형 FLOW-3D를 이용하였으며, 해당 모형의 정확도를 검증하기 위해 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용한 수로실험의 결과와 비교하였다. 월류수심에 따라 모의 케이스를 구성하였으며 어류 친화적 흐름에 적합한 케이스를 선정할 수 있었다.

2. 어류 친화적 흐름

어류 친화적 흐름이란 하천, 강 또는 구조물에서 어류가 쉽게 유영할 수 있는 흐름을 의미한다. 어류 친화적 흐름은 하천환경과 하천을 이용하는 어류에 따라 다를 수 있다. 본 연구에서는 어도 내부의 흐름을 검토할 것이며, 유속, 난류운동에너지 그리고 에너지 소산율이 기준을 만족하는 경우 어류 친화적 흐름이라 정의한다.

2.1 유속

어류 이동을 위한 첫 번째 우선순위는 어도 내의 유속을 대상 물고기의 최대 돌진속도 이하로 감소시키는 것이다(Cai et al., 2020). Bell(1973)은 돌진속도의 0.4배를 저속영역이라 정의하며, 어도 내부에서 저속 영역은 최소 30~50%를 차지해야 한다고 주장한다. 이는 이주하는 어류가 충분히 휴식할 수 있는 공간이 필요하기 때문이다. 그러나 어도 내부가 낮은 유속으로만 분포한다면 어류들을 어도로 유인할 수 없을 것이다(Tan et al., 2021). 이와 같이 어도 내부의 유속은 적절히 분포되어 있어야 어류 친화적 흐름의 기준을 만족할 수 있다. 본 연구에서는 어류의 돌진속도와 유도속도를 어류 친화적 흐름의 기준으로 설정하였다. 이로 인해 어류마다 유속의 기준이 다르며, 해당 환경의 어류에 맞는 유속 기준을 적용해야 할 것이다.

2.2 난류운동에너지

난류운동에너지는 어도를 통과하는 어류에게 영향을 미치는 주요 인자 중 하나이다. 과도한 난류는 어류가 올바른 방향으로 이동하는 것을 방해할 수 있다(Bermúdez et al., 2010; Marriner et al., 2016). 어도내부에서 난류운동에너지가 큰 값을 가진다면 어류가 어도를 통과하는 시간은 늘어날 것이다. 난류운동에너지는 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 를 기준으로 높음과 낮음을 구분할 수 있으며, 난류운동에너지가 낮은 지역이 높은 지역보다 어류의 선호도가 높은 것으로 나타났다(Marriner et al., 2014). Shahabi et al.(2021)은 실험을 통해 난류운동에너지가 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 이상의 값으로 증가할수록 어류에게 과도한 스트레스를 유발하고 상처 또는 폐사로 이어질 수 있다고 밝혔다.

2.3 에너지 소산율

에너지 소산율 또한 난류운동에너지와 같이 낮은 값을 가질수록 어류가 선호한다. 어도에서 어류의 이동을 방해하지 않기 위해서는 어도 내부의 부피당 에너지 소산율은 $150\sim 200 \text{ W}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않아야 한다(Larimier, 1998). 과도한 에너지 소산율은 난류 또는 공기유입을 유발하여 어류의 유영능력을 저하시킬 수 있다. 또한, Towler et al.(2015)은 에너지 소산으로 인해 난류 및 유속이 증가하여 어도 내부의 흐름이 악화될 수 있다고 주장하였다.

3. 수치모형: FLOW - 3D

FLOW-3D는 구조물을 포함한 자유수면을 갖는 복잡한 흐름을 해석하기 위해 널리 사용되고 있는 수치모형 프로그램이다. 자유표면, 곡면, 개수로 등을 모의할 수 있으며, 유한 체적법을 기반으로 다양한 스케일 및 복잡한 흐름을 해석할 수 있다. 또한, CAD를 이용하여 수리구조물을 구축하고, RNG, $k-\omega$, $k-\varepsilon$, LES 등 해당 흐름에 적합한 난류 모델을 선정하여 모의할 수 있다. 어도 내부에서는 구조물 특성상 복잡한 난류 흐름이 형성되고, 향후, 더욱 복잡한 난류 흐름을 가지는 다른 형식의 어도 또는 만곡부 구간을 가지는 어도에서 적용이 가능하기 때문에 FLOW-3D 모형을 선정하였다.

3.1 FLOW - 3D 지배방정식

FLOW-3D 모형에서 적용되는 지배방정식은 연속 방정식(식 (1))과 운동량 방정식(식 (2)~(4))이다.

- 연속 방정식(Continuity Equation)

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식(Momentum Equations)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left[\frac{1}{V_F} u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left[\frac{1}{V_F} u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \left[\frac{1}{V_F} u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서, V_F 는 유체의 요소체적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각 방향의 유속, A_x, A_y, A_z 는 각 방향의 요소 면적, G 는 체적력이며, f 는 점성력이다.

3.2 FLOW - 3D 모형구축

본 연구에서는 계단식 어도를 대상으로 어류 친화적 흐름을 검토하기 위해 수치모의를 수행하였다. 어도는 가장 기본적인 형태인 계단식 어도의 표준 형식으로 CAD 프로그램을 이용하여 구현하였으며, 격자망의 형태는 직사각형 모양의 직각격자를 사용하였다. 정밀한 흐름해석이 필요한 구간에서는 더 세밀한 격자간격으로 구축하였다. 상류단 경계조건은 flow rate를 적용하였으며, 하류단 경계조건은 outflow로 설정하였다. 어도의 형상은 Fig. 2와 같다.

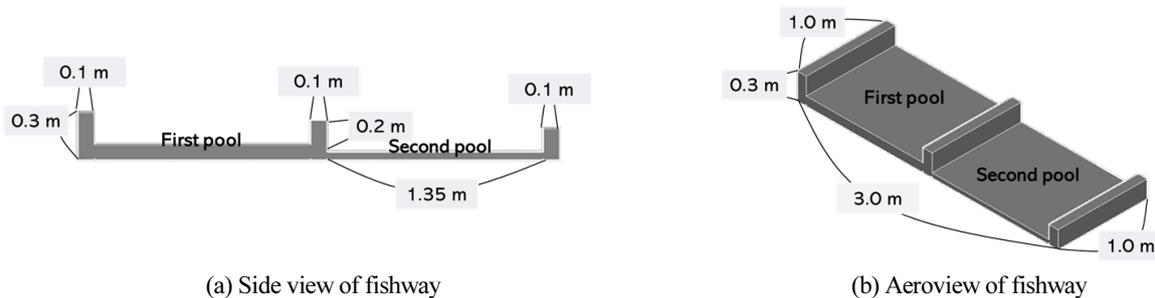


Fig. 2. Stepped fishway in solid form

3.3 FLOW - 3D 모형검증

3.3.1 수리실험 개요

본 연구에서는 수치모형의 검증을 위해 수리실험을 수행하였으며, 실험 결과와 FLOW-3D 모의 결과를 비교하였다. 수로

의 제원은 주수로가 30 m이고 수로의 단면은 직사각형 단면으로 수로 폭은 1 m이고, 실험수로는 Fig. 3과 같으며 수로의 제원은 Table 1과 같다. 수로의 설치한 어도는 FLOW-3D의 사용한 계단식 어도와 같은 제원으로 아크릴로 제작하였다. 수리 실험은 어도 내부의 유속측정을 위해 수행하였으며, 유속은 LDV(Laser Doppler Velocimeter)로 측정하였다. LDV는 도플러 효과를 이용한 유속측정 장치로, 유체의 속도를 비접촉식으로 측정할 수 있다. LDV는 일정한 각도로 두 개의 빔을 조사하여 물체로부터 반사되어 오는 빛의 주파수 차이에 따라 물체의 속도를 측정하게 된다. 실험에서 이용한 LDV의 제원은 Table 2와 같으며, LDV로 Table 3과 같은 조건으로 Fig. 3의 어도의 두 번째 풀(Pool)에서의 유속을 측정하였다. 실험의 결과를 수치모형과 비교하기 위해 FLOW-3D를 Table 4와 같은 조건에서 모의한 뒤 해당 구간의 유속 컨투어와 난류운동에너지 컨투어를 나타냈으며, 컨투어의 비교를 통해 FLOW-3D의 검증은 수행하였다.

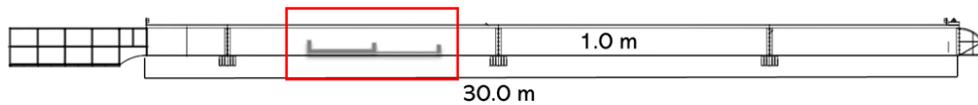


Fig. 3. Side view as an experimental channel

Table 1. Specification of experimental channel and fishway

Length × Width × Height of the channel (m)	Length × Width × Height of the fishway (m)	Height of fishway weir (m)	Bed slope	Fishway slope
30 × 1 × 1	3 × 1 × 0.3	0.2	0	1/10

Table 2. Specification of LDV

Model	Laser type	Wave length	Focal length	Bragg cell freq.
FlowExplorer DPSS	Continuous	(x) 514 mm, (y) 488 mm	1,000 mm	40 MHz

Table 3. Measurement condition of LDV

Degree	Time	Measurement points	Velocity direction
0	120 s	21	x, y (m/s)

Table 4. FLOW-3D validation simulation conditions

Cell size x × y × z (m)	Upstream (no structure) 2 × 2 × 2 Downstream 2 × 1 × 1	Upstream boundary condition	Flowrate (Q = 0.02125 m ³ /s, h = 0.36 m)
Number of cell (x, y, z)	608,480	Downstream boundary condition	outflow

3.3.2 수리실험과 수치모형의 결과 비교

수리실험은 최상류 월류수심을 6 cm로 설정하여 수행하였으며, Fig. 4에서 나타난 구간인 어도 두 번째 풀(Pool)에서의 유속을 측정하였다. 검증구간에서 총 21개 지점의 유속을 측정하여 유속 및 난류운동에너지의 컨투어를 구축하여 FLOW-3D와 수리실험을 통한 유속과 난류운동에너지의 결과는 각각 Fig. 5와 Fig. 6에서 나타나듯이 유사한 흐름양상을 나타낸 것을 확인할 수 있었고, 모형의 신뢰할 수 있다고 판단하였다.

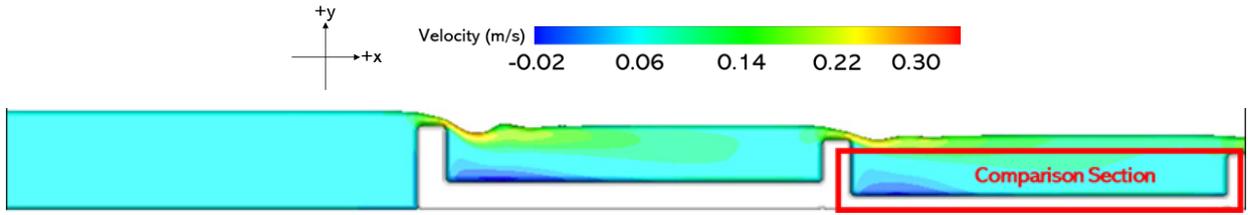
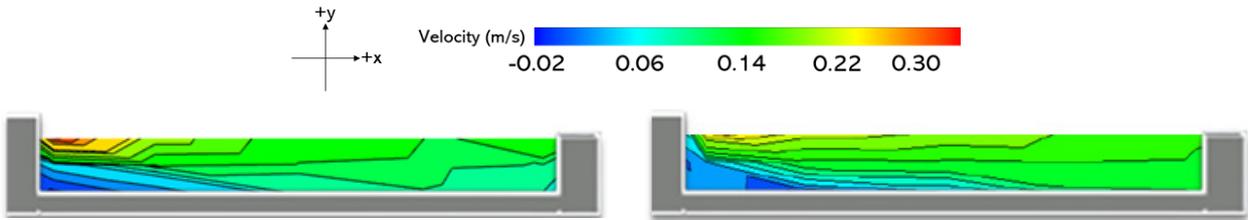


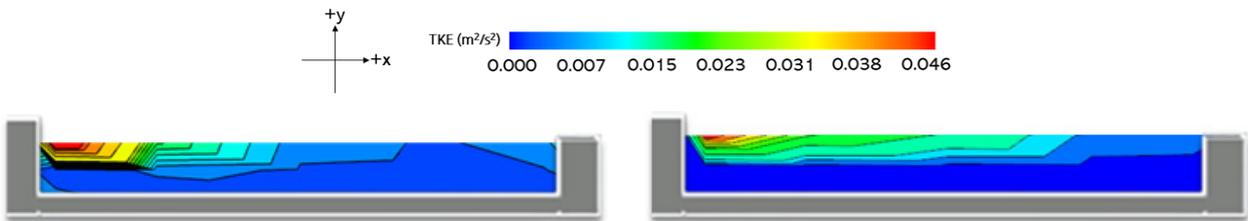
Fig. 4. FLOW-3D validation section for velocity and turbulent kinetic energy



(a) Velocity contour of FLOW-3D

(b) Velocity contour of LDV

Fig. 5. Comparison of velocity contour



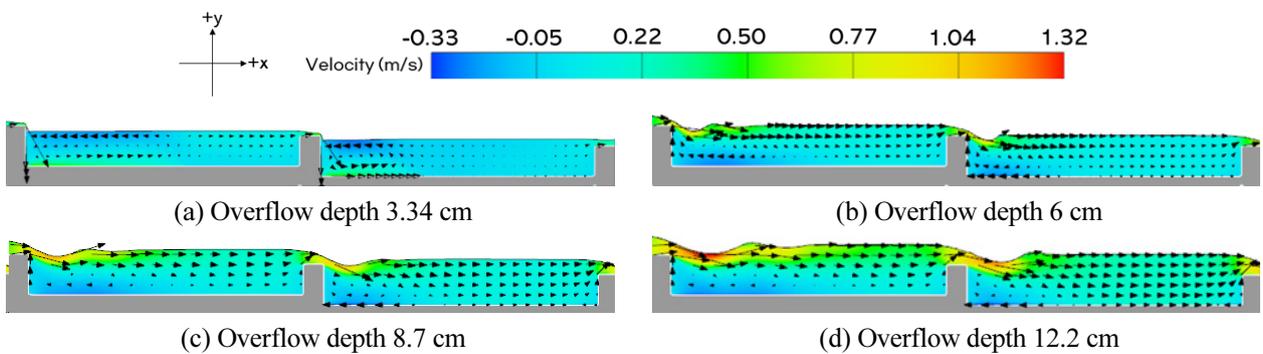
(a) TKE contour of FLOW-3D

(b) TKE contour of LDV

Fig. 6. Comparison of TKE contour

3.4 FLOW - 3D 모의수행

본 연구에서는 월류수심의 변화에 따른 어도 내부의 흐름변화를 검토하기 위해, 월류수심을 3.34, 6, 8.7, 12.2 cm로 변화시키며 총 4케이스의 모의를 수행하였다. 모의 조건은 검증 조건과 마찬가지로 상류단은 flowrate, 하류단은 outflow로 설정하였다. 다음 Fig. 7은 월류수심에 따른 수치모형의 결과를 나타낸다.



(a) Overflow depth 3.34 cm

(b) Overflow depth 6 cm

(c) Overflow depth 8.7 cm

(d) Overflow depth 12.2 cm

Fig. 7. FLOW-3D simulation results by overflow depth

4. 수치모형 결과

본 연구에서는 FLOW-3D 모의 결과를 이용하여 어도의 두 번째 풀에서의 어류 친화적 흐름을 검토하였다. 유속과 난류운동에너지는 Fig. 8과 같이 두 번째 풀을 10개의 단면으로 구분하여 각 구역의 평균유속과 평균 난류운동에너지로 계산하였다. 다만, 에너지 소산율은 풀 전체 부피에 대하여 계산하므로 구역을 구분하지 않는다. 먼저, 어류 친화적 흐름을 검토하기 위해서는 어류의 종마다 유영능력의 차이가 있기 때문에 대상 어류를 특정해야 한다. 본 연구에서는 대상 어류를 피라미로 가정하여, 어도 내부가 피라미에 대해 어류 친화적 흐름을 만족하는 지를 검토하였다.

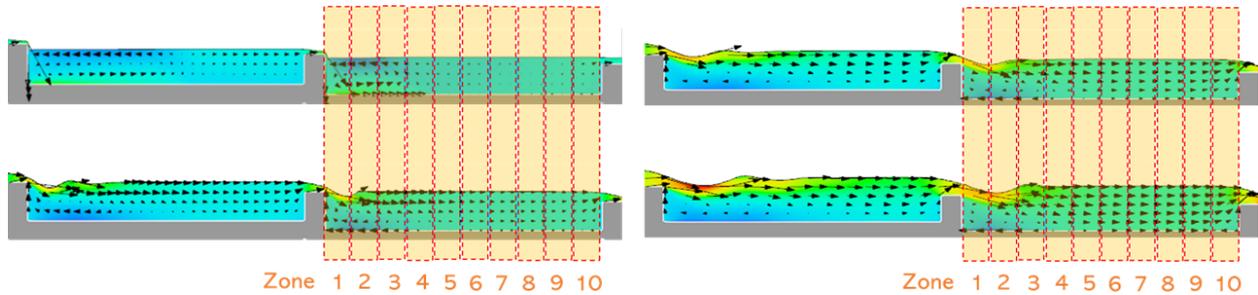


Fig. 8. Measurement zone in FLOW-3D results

Tan et al.(2021)은 피라미의 돌진속도(U_{st})와 유인속도(U_{in})를 연구하였으며, 각각 0.73 m/s, 0.08 m/s로 나타났다. 어도 내부의 유속이 피라미의 돌진속도를 초과할 경우에는 피라미는 앞으로 나아가지 못할 것이며, 반대로 유속이 피라미의 유인속도 보다 작을 경우에는 피라미는 어도 내부에서 정체될 수 있다. 이로 인해, 어도 내부의 유속이 피라미에 대해 어류 친화적 흐름을 만족하기 위해서는 저속영역($0.4U_{st}$)이 30% 이상 차지해야 하며, 유인속도보다 큰 유속 값을 가져야 한다. 난류운동에너지는 대부분의 어종에 대하여 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 미만의 값을 가진다면, 어류 친화적 흐름을 만족할 수 있다. 에너지 소산율 또한 $150\sim 200 \text{ W}/\text{m}^3$ 를 초과하지 않는다면, 어류 친화적 흐름을 만족하게 된다. 피라미처럼 작은 어종이라면, $200 \text{ W}/\text{m}^3$ 까지 어류 친화적 흐름의 기준에 대하여 만족할 수 있다.

먼저, Fig. 9(a)와 같이 월류수심이 3.34 cm일 경우는 모든 구역에서 피라미의 유인속도를 만족하지 못한다. 월류수심이 3.34 cm일 경우에만 너무 작은 유속으로 어류 친화적 흐름에 부적합하였으며, 다른 케이스에서는 유속은 모두 유인속도 이상 저속영역의 이하의 값을 가지며 어류 친화적 흐름에 대하여 적합하였다. Fig. 9(b)는 케이스별 난류운동에너지를 나타내고 있으며, 월류수심이 12.2 cm일 경우에 50%가 넘는 구역에서 난류운동에너지가 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 이상의 값이 나타났다. 이처럼

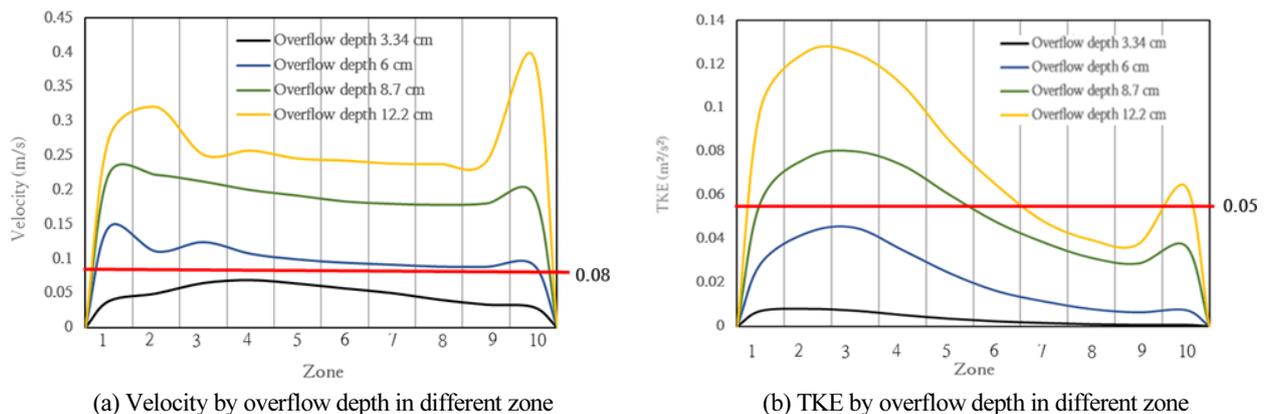


Fig. 9. Velocity and TKE in different zone

월류수심이 12.2 cm인 경우에는 난류운동에너지가 기준보다 큰 값을 가지며 어류 친화적 흐름에 부적합한 것으로 판단되었지만, 나머지 케이스에서는 모두 기준보다 작은 값으로 어류 친화적 흐름에 적합하였다. 마지막으로 에너지 소산율은 월류수심별로 32.125 W/m³, 110.298 W/m³, 168.329, 265.93 W/m³의 값을 나타냈다. 피라미에 대하여 어류 친화적 흐름의 기준을 만족하기 위해서는 200 W/m³를 초과하지 않아야 한다. 그러나 월류수심이 12.2 cm인 경우에는 이 기준을 초과하므로 어류 친화적 흐름에 대하여 부적합한 것으로 판단된다. 어류 친화적 흐름을 만족하기 위해서는 유속, 난류운동에너지, 에너지 소산율의 기준을 모두 만족할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 월류수심이 6, 8.7 cm인 두 개의 경우에만 위 3가지의 기준을 모두 만족하였다.

이후 어류 친화적 흐름을 만족하는 케이스를 산정했다면, 마지막으로 해당 케이스의 유량이 하천의 유지유량을 만족하는지 검토할 필요가 있다. 하천의 유지유량이란 생활·공업·농업·환경개선 등의 다양한 하천수의 사용을 고려하여 하천의 정상적인 기능 및 상태를 유지하기 위해 필요한 최소한의 유량을 말한다(MLTM, 2009). 하천의 유지유량은 해당 하천의 생물 분포 및 수질환경 등을 분석하여 산정할 수 있다. 어느 하천을 대상으로 어도를 설계하는지에 따라 하천의 유지유량은 차이가 있겠지만, 본 연구에서 월류수심이 3.34 cm인 경우에는 확실히 하천의 유지유량을 만족하지 못할 우려가 존재한다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 수치모형을 통해 월류수심에 따라 변화하는 계단식 어도 내부의 흐름을 검토하였다. 수치모형의 결과로 월류수심 3 cm 이하의 변화로 피라미에게 적합했던 흐름이 부적합한 흐름으로 변화하였고, 월류수심의 변화는 어도내부의 어류 친화적 흐름에 대하여 유효한 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 이로 인해 어도를 설계함에 있어서 적합한 월류수심 및 하천유량을 산정하는 것은 중요한 설계요소가 될 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 점은 향후 어도활용기준, 기간, 이용률을 산정하는 단계에서 충분히 기여할 수 있을 것이다.

어도 내부의 어류 친화적 흐름은 어도 내부 흐름을 평가하기에 중요한 요소이다. 해당 하천에 서식하는 종을 기준으로 어도 설치에 대한 기초자료로 활용할 수 있으며, 기존 어도의 효율 평가 시에도 활용할 수 있을 것이다. 국내의 경우 어류 친화적 흐름에 대한 연구가 미비하기 때문에 현재까지 어류 친화적 흐름이 고려되지 않은 상태에서 많은 어도들이 설치되어 왔다. 따라서 본 연구에서 제시한 어류 친화적 흐름을 활용하여 효율적인 어도 설치를 할 수 있을 것이라 기대된다. 그러나 어류 친화적 흐름을 적극적으로 활용하기 위해서는 정확한 월류수심의 범위 산정이 요구된다.

향후 정확한 월류수심의 범위를 산정하기 위해서 다양한 케이스에서의 추가적인 연구가 필요할 것이며, 월류수심에 따라 변화하는 흐름에 대한 상관관계 분석을 수행할 필요가 있다고 판단된다. 또한 실제 사용되는 어도의 형식과 스케일은 다양하게 존재하고 있으며, 월류수심은 어도의 흐름을 변화시킬 수 있는 변수들 중 하나일 뿐이다. 그렇기 때문에 본 연구로만 국내 어도의 부적합한 흐름을 개선하기에는 한계가 있으며, 현재 부족한 케이스의 추가적인 연구와 더불어 잠공, 노치 등을 설치한 계단식어도, 버티컬 슬롯식, 도벽식과 같은 다양한 형식에서의 어류 친화적 흐름에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 또한, 하천마다 서식하는 어류는 다양하기 때문에 다양한 어종에 대한 관련 연구가 선행되어야 할 것이다. 최종적으로는 어도의 모니터링 자료 기반으로 어도의 활용성 측면이 어느 정도 향상 되었는지 검증할 수 있는 연구가 필수적일 것이다.

Acknowledgments

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 22DPSC-C163022-0210582136170002).

References

- Bell, M. C. (1973). Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria. U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, OR.
- Bermúdez, M., J. Puertas, L. Cea, L. Pena, and L. Balairón. (2010). Influence of Pool Geometry on the Biological Efficiency of Vertical Slot Fishways. *Ecological Engineering*. 36(10): 1355-1364.
- Cai, L., J. Chen, D. Johnson, Z. Tu, and Y. Huang. (2020). Effect of Body Length on Swimming Capability and Vertical Slot Fishway Design. *Global Ecology and Conservation*. 22: e00990.
- Future Agriculture Research. (2023). National Fishway Information System. Naju : KRC.
- Kim, Kyoung-Ho, Ho-Jin Lee, and Sang-Do An. (2010). Flow Analysis in the Pool Type Fishway Using FLOW-3D Model. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*. 11(4): 241-245.
- Larinier, M. (1998). Upstream and Downstream Fish Passage Experience in France. In: M. Jungwirth et al. (eds.) *Fish Migration and Fish Bypasses*. England: Oxford. 127-145.
- Marriner, B. A., A. B. M. Baki, D. Z. Zhu, J. D. Thiem, S. J. Cooke, and C. Katopodis. (2014). Field and Numerical Assessment of Turning Pool Hydraulics in a Vertical Slot Fishway. *Ecological Engineering*. 63: 88-101.
- Marriner, B. A., A. B. M. Baki, D. Z. Zhu, S. J. Cooke, and C. Katopodis. (2016). The Hydraulics of a Vertical Slot Fishway: A Case Study on the Multi-species Vianney-Legendre Fishway in Quebec, Canada. *Ecological Engineering*. 90: 190-202.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2009). Guidelines for Instream Flow Evaluation. Sejong: MLTM.
- Shahabi, M., M. Ghomeshi, J. Ahadiyan, T. Mohammadian, and C. Katopodis. (2021). Do Fishways Stress Fish? Assessment of Physiological and Hydraulic Parameters of Rainbow Trout Navigating a Novel W-weir Fishway. *Ecological Engineering*. 169: 106330.
- Tan, J., H. Tan, E. Goerig, S. Ke, H. Huang, Z. Liu, and X. Shi. (2021). Optimization of Fishway Attraction Flow Based on Endemic Fish Swimming Performance and Hydraulics. *Ecological Engineering*. 170: 106332.
- Towler, B., K. Mulligan, and A. Haro. (2015). Derivation and Application of the Energy Dissipation Factor in the Design of Fishways. *Ecological Engineering*. 83: 208-217.
- Yeo, Kyu Dong and Kwang Seok Yoon. (2005). Study on Problems with Fishway and Suggestion for Improvement in Korea. *Proceedings of the Civil Expo 2005*. 2588-2591.
- Zheng, T., Z. Niu, S. Sun, W. Huang, C. Tu, H. Liu, G. Li, and H. Wang. (2022). Optimizing Fish-friendly Flow Pattern in Vertical Slot Fishway Based on Fish Swimming Capability Validation. *Ecological Engineering*. 185: 106796.

Korean References Translated from the English

- 국토해양부 (2009). 하천유지유량 산정요령. 세종: 국토해양부.
- 김경호, 이호진, 안상도 (2010). FLOW-3D 모형을 이용한 풀(pool)식 어도 내 흐름해석. *한국환경기술학회지*. 11(4): 241-245.
- 여규동, 윤광석 (2005). 국내 어도의 문제점 분석과 개선방안 연구. *대한토목학회 학술대회*. 2588-2591.
- 한국농어촌공사 (2023). 국가어도정보시스템. 나주: 한국농어촌공사.