



An analysis of hydraulic characteristics of stepped boulder fishway installed in mountain stream

Kim, Ki Heung^{a*}

^aProfessor, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

Paper number: 21-118

Received: 30 November 2021; Revised: 6 January 2022; Accepted: 6 January 2022

Abstract

This study was intended to suggest the applicability of stepped boulder fishway using the concept of traditional boulder weir, focusing on the problems of existing concrete pool-and-weir fishways installed in mountain streams. To achieve this purpose, a stepped boulder fishway was designed and constructed as a pilot project in consideration of ascending capacity of the selected target fishes. Under the given discharge conditions, the hydraulic characteristics of the fishway were investigated in the field, and the characteristics and ascending capacity of the fishes were compared and analyzed. The fishway had a short length and steep slope, but the mean drops between each baffle were the range of 0.15 to 0.29 m, and this range satisfied the limit condition of about 0.40 m, which was in the limit of the drop that target fishes can ascend. The mean velocities of each baffle and pool were 0.82 to 0.87 m/sec and 0.13 to 0.24 m/sec. This result satisfied the conditions of burst speed (10 to 30 times of body length) and mean velocity of the resting pool (7 to 25% of burst speed) for target fishes. Since the bottom surface of the pool formed of boulders had a gentle reverse slope and rotational flow did not occur, the efficiency of fishway can be increased, and it will also be possible to solve the maintenance problem by flushing bed materials.

Keywords: Pool-and-weir fishway, Ascending capacity, Target fishes, Burst speed, Resting pool

산지하천에 설치된 계단식 전석 어도의 수리 특성 분석

김기흥^{a*}

^a경상국립대학교 토목공학과 교수

요 지

본 연구는 산지하천에 설치된 기존의 콘크리트 계단식 어도의 문제점에 착안하여 전통적인 돌보의 개념을 응용한 계단식 전석 어도의 적용성을 제시하고자 하였다. 이러한 목적을 달성하기 위해 선정된 대표어종의 소상능력을 고려하여 계단식 전석 돌보를 설계, 시공하였다. 현장측정을 통하여 주어진 유량조건 하에서 어도의 수리특성을 조사하고 대표어종의 소상능력과 비교, 분석하였다. 어도의 길이가 짧고 급경사인 구조이지만, 각 배플 사이의 평균낙차가 0.15~0.29 m 범위였으며, 이 범위는 대표어종이 소상할 수 있는 낙차의 한계조건인 약 0.40 m를 만족시킬 수 있었다. 각 배플과 풀의 평균유속은 0.82~0.87 m/sec와 0.13~0.24 m/sec 이었다. 이 결과는 대표어종이 소상 가능한 돌진속도(체장의 10~30 배)와 휴식처 평균유속(돌진속도의 7~25%)의 조건을 충족시켰다. 전석으로 형성된 풀의 바닥면이 완만한 역경사면으로 되어 회전류가 발생하지 않기 때문에 어도의 효율을 증가시킬 수 있고, 또한 토사퇴적을 차단하여 어도의 유지관리 문제점을 해소할 수 있을 것이다.

핵심용어: 계단식 어도, 소상능력, 목표어종, 돌진속도, 휴계플

*Corresponding Author. Tel: +82-55-772-3294
E-mail: khkim1@gnu.ac.kr (K. H. Kim)

1. 서론

산지하천의 하도특성은 굴입하도로서 좁은 하폭, 급경사 하상, 입경이 큰 거석 하상 등의 영향으로 형성된 스텝-풀 및 여울-소 구조가 일반적이며, 주변의 경관이 수려할 뿐 아니라 생태 자연도가 아주 양호한 편이다. 그러나 하천 주변에 형성된 곡저평야의 주거지와 농경지를 보호하기 위하여 치수 및 이수 측면에서 하천에 설치된 보 및 낙차공과 같은 하천횡단 구조물은 환경측면에서 여러 가지 문제를 초래할 뿐 아니라 실제로는 비교적 광범위하게 지형을 변화시키고, 많은 수서 동물의 서식에 큰 영향을 미친다.

하천정비사업에서는 이수 및 치수 안전도를 확보하기 위하여 보와 낙차공 등의 하천횡단구조물은 콘크리트 구조물을 설치하는 것이 일반적이다. 콘크리트로 설치된 하천횡단구조물은 하도의 종적 연속성을 차단하여 생태통로를 단절시킬 뿐 아니라 상류로부터 이동하는 전석 등의 하상재료에 의하여 파괴되는 경우가 빈번하며, 아름다운 산지 계곡의 고유 경관을 훼손한다.

1970년대부터 가장 일반적인 구조재료로서 콘크리트가 보급됨에 따라 이전에 설치되어 있던 전통적인 계단식 돌보는 대부분 콘크리트보로 대체되어 지금은 전국 어디에서도 볼 수 없다. 전통 돌보는 홍수시에 구조적으로 불안정한 단점이 있었지만 어도 설치 필요 없을 뿐 아니라 재포기 효과가 있어 수질 개선에도 기여했다고 볼 수 있다. 이러한 전통적인 계단식 돌보의 문제점을 개선하여 친환경적인 하천횡단구조물로서의 기능을 할 수 있도록 전통 하천공법에 대한 재조명이 필요하다고 본다. 1970년대 이후에 설치된 콘크리트 보는 시간의 경과에 따라 열화가 진행되고, 홍수시 상류에서 이송되는 전석, 호박 돌 및 자갈 등의 굵은 하상재료가 충돌하면서 파손되기도 한다. 특히, 상류 산지하천은 하폭이 좁고 하상경사가 급하여 하상안정 및 농업용수 취수를 위하여 설치되는 보 및 낙차공 등의 하천횡단구조물은 높고 개소 수도 많다. 2020년 기준으로 전국에는 33,914개소의 보가 설치되어 있으며, 어도는 5,393개소에 설치되어 설치율은 15.9%이고, 양호한 것으로 평가된 어도는 1,618개소에 불과하다(MOF, 2021).

경상남도의 경우 지방하천 671 개소의 총연장 3,741 km내에 7,730개소의 하천횡단구조물이 설치되어 있어서 1 km당 약 2개소씩 분포하는 것으로 조사되었으며, 이 중 하폭이 50 m 이하인 하천구간에 설치된 구조물 개소 수는 6,851 개소(88.6%)이고, 높이 1.0 m 이상은 3,897 개소(51%)이다(Kim *et al.*, 2016).

보 및 낙차공에 설치되는 어도의 형식은 풀형식(pool type), 수로형식(stream type) 및 조작형식(operation type)으로 구

분되며, 일반적으로 하천에 적용되는 어도형식은 대부분 풀형식과 수로형식이다. 현재 우리나라와 일본 하천의 농업용 취수보에 설치되는 어도형식은 풀형식이 대부분이며, 월류 형태에 따라 계단식(계단형, 노치형, 노치+잠공형, 잠공형), 버티컬슬롯식(vertical slot) 및 아이스하버식(Ice harbor) 등으로 분류되고, 격벽에 의하여 형성되는 풀이 계단식으로 연속되어 있는 구조가 특징이다. 계단식 어도는 구조가 간단하므로 시공이 간편하고 경제적이며 유지관리가 용이한 장점이 있으나 어도내의 유황이 고르지 못하고 풀 내에 순환류가 발생할 수 있으며, 도약력과 유영력이 좋은 어종만 소상할 수 있는 단점이 있다.

일본의 경우 수로식 어도의 한 형태인 도류벽식(stream type) 어도(28%)를 제외한 대부분의 어도가 계단식(pool type)으로서 주류를 이루고 있다(Nakamura, 1995). 우리나라 하구 어도의 문제점과 그 개선책에 관한 연구에서 보면 동해안 지방하천 20개 하천의 하구어도를 조사한 결과를 보면 계단식 어도 중에서 고전적 어도에 속하는 전면월류형 계단식 어도(pool-and-weir fishway)가 약 50%, 근대적 어도로 분류되는 부분월류형 계단식 어도(pool and partial weir fishway)인 Ice-Habor 및 Vertical-Slot 등이 약 17.5% 전후였다(Lee *et al.*, 2016).

이러한 문제를 해결하기 위하여 보, 낙차공 설계 및 시공과 관련된 우리나라의 기준으로는 하천설계기준(MOLIT, 2019) 및 댐설계기준(MLTM, 2011) 등이 있다. 또한, 계단식 어도에 대한 수리특성 분석(Kim *et al.*, 1994; Park, 2001), 한강 잠실수중보의 계단식 어도에 대한 어류 소상기능 평가(Park *et al.*, 2004) 등 다수의 연구가 행해져 왔다. 국외에서는 일본의 경우 하천사방기술기준(안) (MLIT, 2021)이 있으며, 미국의 경우에는 각 주별로 대상어종에 따라 다른 기준을 적용하고 있으며, 대표적으로 Fishway guideline for Washington State (WDFW, 2000)가 있다.

우리나라에서는 2000년 이후 생태통로 확보를 위하여 산지하천의 보 및 낙차공에 설치되는 콘크리트 어도는 굵은 하상재료의 충돌로 파괴되거나 토사의 퇴적 등으로 기능을 상실하는 경우가 발생할 뿐만 아니라 1/20 이하의 완경사 기준 때문에 낙차공의 높이가 1 m 이상인 경우에는 하루 또는 상류 방향으로 또 다른 콘크리트 구조물을 설치해야 하므로 경관성 및 경제성 측면에서 불리하다. 일본의 하천사방기술기준(안) (MLIT, 2021)에서는 계단식 어도의 경우 경사 기준을 1/10~1/20의 범위로 하고 있으며, 하천지형 및 현장 여건에 따라 어도 경사 기준을 준수할 수 없는 경우인 1/5의 급경사 어도도 기능을 발휘할 수 있다(Atsushi *et al.*, 2008)는 연구결과도 제

시되고 있다.

따라서, 상류 산지하천의 현장여건을 고려하여 고유 생태계 및 경관 훼손을 경감하고 기존의 콘크리트 보 및 낙차공을 구조적으로 안전한 하천횡단구조물로 개량할 수 있는 설계 및 시공법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 어도가 없는 노후화된 기존 콘크리트 보 및 낙차공을 개량해야 하는 경우에 기존 콘크리트 보의 문제점을 조사·분석하고, 시범사업으로 전통적인 계단식 돌보의 개념을 적용하여 경관·생물 친화적 구조로서 기존의 콘크리트 어도를 대체할 수 있는 보의 어도를 설계 및 시공하였다. 시공한 후 현장조사를 통하여 수리특성을 분석하고, 산지하천에서 식하는 대표어종에 대한 유영능력을 고려하여 전통 계단식 전석 어도의 수리특성 및 적용성을 제시하고자 한다.

2. 연구 대상지 및 방법

2.1 연구대상지

단계천은 낙동강의 제 4 지류로서 남강댐 상류 유역에 위치하며, 유역면적 55.72 km², 유로연장 23.30 km, 하천연장 21.08 km, 하상경사 1/217~1/10 인 경상남도의 지방하천이다.

연구대상지는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 경남 산청군 차황면 철수리의 철수저수지 직상류에 위치하는 단계천 남정보 개량사업 시행구간으로서 하상경사 1/49 인 급경사 구간이

며, 하폭은 48~53 m이다. Fig. 2은 남정보의 항공사진으로 시공 후의 현황을 나타낸 것이다. 하도의 평면형상은 남정보 상류에서 약간 우안쪽으로 만곡된 후 직선으로 흘러 보를 월류한 후 하류에서는 우안에서 우안으로 천이하는 구간이다.

2.2 연구방법

2.2.1 대상지 현황 및 설계

(1) 대상지 현황

본 연구는 노후화된 기존 콘크리트 보의 개량사업에 있어 구조적 안정성, 생태 및 경관 등을 고려한 전통 계단식 전석 어도로 대체하기 위하여 지방하천인 산청군 차황면의 단계천 남정보를 대상으로 선정하였다. 단계천의 남정보의 개량 계획 및 설계를 위하여 조사한 현장조건은 경사 1/49의 급경사 구간으로 계획홍수량 560 m³/s 유하시 보 상·하류의 평균유속은 3.0~4.0 m/s 범위이다(ME, 2021). 하상재료는 암반, 전석, 호박돌 및 자갈 등으로 구성되어 있으며, 어도가 설치되지 않은 보이다. 단계천의 남정보의 현황과 문제점을 정리하면 Table 1과 같다.

(2) 대상지 어도의 설계 및 시공

단계천에는 신등천 합류점으로부터 상류 약 6.85 km 지점에는 울현저수지, 8.9 km 지점에는 철수저수지가 위치하고 있으며, 남정보는 10.66 km 지점에 설치되어 있다. 철수저수지 상류에는 65 개소의 보 및 낙차공이 설치되어 있어 하천의

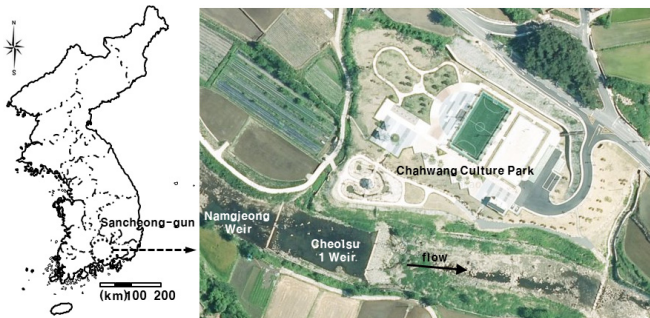


Fig. 1. Location map of site



Fig. 2. Aerial photograph of site

Table 1. Current status and problems of existing weir

Weir name	Plan type	Height (m)	Length (m)	Current status and problems.
Namjeong weir	Orthogonal type.	1.86	35	- As concrete weir, concrete cracks and dropout due to concrete aging have appeared, and the drop impact of bed materials larger than cobbles during flooding destroyed the apron. - Fishway have not been installed.



종적 연속성이 심하게 단절되어 있으므로 철수저수지에 서식하는 어류 및 수서동물이 소상하기 위해서는 남정보가 첫 번째 장애물이므로 어도를 계획하였다. 남정보의 어도는 하천구조물의 안정성, 하천의 종적 연속성 및 경관의 관점에서 부채꼴의 계단식 전석 어도 형식으로 계획하였으나 석재 가공 등의 문제로 직선형으로 변경하였다. 남정보는 Table 1의 사진과 같이 콘크리트 균열 및 하상재료에 의한 물받이공과 바닥 보호공이 파괴되었다. 따라서, 이를 반영하여 풀 형식의 전석 놓기로 하고, 상하류 주수로가 연결되는 우안측에 계단식 전석 어도를 설치하는 것으로 유량이 적은 갈수기에는 전량 어도로 유입되도록 설계·시공하였다(Fig. 3). 어도의 출구는 Fig. 4 and 5와 같이 3개의 노치(notch)로 구성되어 있으며 각각 $L_1 = 1.00\text{ m}$, $L_2 = 1.00\text{ m}$, $L_3 = 1.00\text{ m}$, $H_1 = 0.10\text{ m}$, H_2 는 배플의 월류수심이다.

어도에 대한 평면도와 측면도는 각각 Figs. 6 and 7에 제시되어 있다. 어도의 길이는 8.9 m, 폭은 5.60 m, 출구 폭은 3.1 m이며, 경사는 약 1/5 이다. Figs. 6 and 7에 나타낸 바와 같이 어도에는 7 개의 배플(baffle)과 풀(pool)로 구성되며, 풀은 전석으로 형성된 직선배플에 의해 분할된다.

풀의 길이는 Fig. 6과 같이 흐름 방향을 따라 0.8~1.1 m 이고 풀과 배플의 단차는 0.26~0.52 m 이며, 배플과 배플 사이의 높이는 0.14~0.32 m 이다. 계단식 전석 어도에서 각 배플은 풀이 형성되도록 하기 위하여 Fig. 7과 같이 역경사 전석 놓기 공법으로 시공하였다. 다양한 월류수심이 발생하도록 가급적 수평을 피하였고 전석 접속부는 자연스럽게 노치를 형성하여 적은 유량에도 월류되도록 하였으며, 풀의 수심은 Fig. 7과 같이 역경사로 놓인 전석 배플에 의하여 확보된다.



Fig. 3. Stepped boulder fishway installed at Namjeong weir



Fig. 4. Critical flow at fishway exit

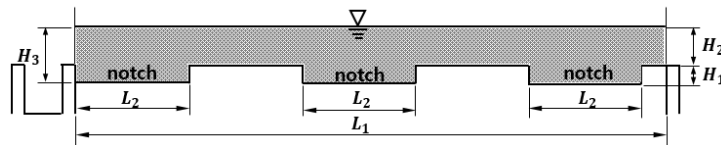


Fig. 5. Dimension of fishway exit

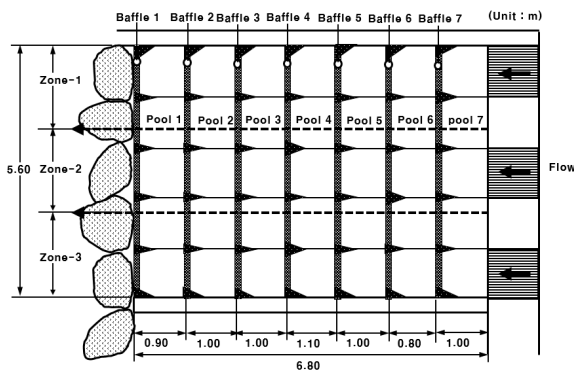


Fig. 6. Plan view and observation zone

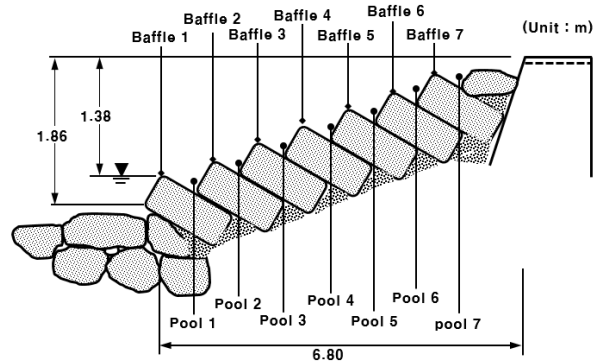


Fig. 7. Side view

2.2.2 현장조사

Fig. 6에 나타난 각 영역은 우측 측벽을 따라 연장되는 zone-1, 어도 중심을 연결하는 zone-2 및 좌측 측벽을 따라 연장되는 zone-3 이며, 측정지점은 폭 5.6 m를 3 등분하고 각 영역의 주 흐름선을 대표지점으로 선정하였다. 검정색 삼각형 부분(▲ 및 ▼)은 배플의 노치를 나타내며, 전석으로 형성된 배플은 수평면이 아니므로 수심과 유속은 Table 5에 제시한 바와 같이 각 배플 및 풀에서 각 영역별 가장 큰 월류수심이 발생하는 3개 지점에서 측정되었으며, 총 42개 지점이다. 어도 출구 노치, 각 배플 및 풀의 유속은 얇은 수심으로 인하여 측정범위 0~5 m/s, 정밀도 ±0.005 m/s, 최소측정수심 3 cm인 1축 1방향 하천용 전자유속계를 사용하여 1 점법으로 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

3.1.1 어도의 유입 유량

유량은 Figs. 4 and 5에 나타난 어도 출구에서 위어의 노치 유속과 수심을 측정하여 산정되었으며, 유량 측정결과는 Table 2와 같고, 1966년부터 2018년까지의 남강댐 유역 유황으로 환산한 대상구간의 53개년에 대한 평균 유황은 Table 3과 같다(ME, 2021).

Table 2. Observed discharges

No.	Date. time	Q (m ³ /s)
Case-1	8/18. 09:47	0.205
Case-2	7/20. 15:20	0.307
Case-3	8/16. 09:17	0.331
Case-4	7/17. 17:07	0.359
Case-5	8/20. 09:50	0.418
Case-6	7/16. 16:30	0.429
Case-7	7/15 10:15	0.532

Table 3. Flow duration of site

Basin area (km ²)	Discharge (m ³ /s)				
	Q _d	Q ₉₅	Q ₁₈₅	Q ₂₇₅	Q ₃₅₅
33.04	560	0.67	0.25	0.15	0.08



Fig. 8. Flow structure in baffles and pools

Fig. 8는 어도의 흐름 구조를 표시한 것으로서 유량의 증가에 따라 흐름은 잠입류(plunging flow)에서 표면류(streaming flow)로 전환될 수 있는 구조가 일반적이지만, 이를 확인하기 위해서는 다음 단계의 연구에서 3차원 유속측정 및 흐름구조 해석이 필요하다.

계단식 전석 어도의 각 배플에서 유량측정은 각 배플의 마루가 수평이 아닐 뿐 아니라 각 전석의 접속에서 불규칙한 노치가 형성되어 신뢰성이 있는 단면적과 유속을 측정할 수 없기 때문에 구조가 간단하여 균일한 수심 및 유속이 형성되는 어도 출구의 노치와 배플에서 측정된 자료를 근거로 유량을 산정하였다.

또한, Table 2의 제시된 측정유량은 Figs. 4 and 5에 나타난 어도출구의 사각형 노치에서 낙차로 인한 저하곡선으로 천이하는 지배단면이 형성되어 한계류가 발생하는 조건으로 다음 Eq. (1) (Masayuki and Ayako, 2009)을 사용하여 비교하였다.

$$Q = L_2(H_1 + H_2) \sqrt{g(H_1 + H_2)} + (L_1 - L_2)H_2 \sqrt{gH_2} \quad (1)$$

여기서 Q는 유량, L₁은 배플의 흐름방향에 수직인 길이, L₂는 배플의 노치 전체 길이, H₁은 노치의 높이, H₂는 배플의 수심, g는 중력가속도이다. H₁+H₂는 노치 H₃의 수심을 나타내며,

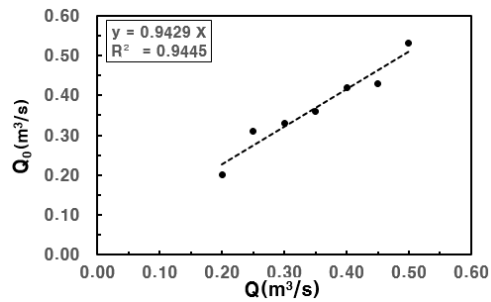


Fig. 9. Relationship between observed discharge Q₀ and estimated discharge Q

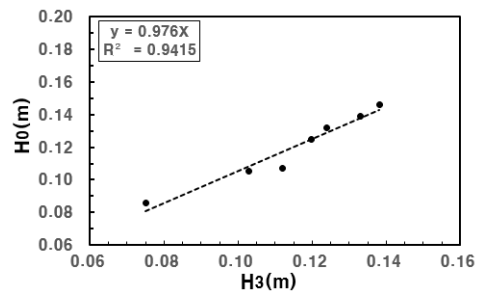


Fig. 10. Relationship between observed depth H₀ and estimated depth H₃

Table 4. Mean, standard deviations and coefficients of variation of depth in baffles and pools (unit : m)

No.	Baffles					Pools				
	Min.	Mean	Max.	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Min.	Mean	Max.	Standard Deviation	Coefficient of Variation
1	0.13	0.16	0.18	0.02	0.11	0.26	0.29	0.32	0.02	0.07
2	0.09	0.11	0.13	0.01	0.13	0.23	0.26	0.29	0.02	0.08
3	0.12	0.14	0.16	0.02	0.11	0.22	0.26	0.28	0.02	0.09
4	0.15	0.17	0.19	0.02	0.09	0.26	0.29	0.32	0.02	0.07
5	0.16	0.19	0.22	0.02	0.12	0.38	0.42	0.45	0.03	0.06
6	0.11	0.13	0.16	0.02	0.13	0.43	0.46	0.49	0.02	0.05
7	0.10	0.12	0.15	0.02	0.14	0.29	0.32	0.35	0.02	0.07

여기서, H_3 은 H_1 보다 크다.

Table 2에 나타난 측정유량(Q_0)과 Eq. (1)에 의한 산정유량(Q)을 비교한 결과는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 아주 양호한 상관성을 보이고 있으며, 측정유량과 산정유량에 사용한 노치의 측정수심(H_0)과 산정수심(H_3)의 상관성을 분석, 비교한 결과도 Fig. 10에 제시한 바와 같이 아주 양호한 것으로 나타났다.

3.1.2 어도 배플 및 풀의 수리 특성

어도에서 배플은 낙차에 의한 낙하 유속으로 인하여 어류 소상에 장애물이 되고, 풀은 상대적으로 느린 유속이므로 어류의 유영소상이나 도약소상을 위한 휴식 및 도약 환경을 제공한다. 풀 내의 흐름형식은 노치 부분을 월류하는 흐름이 풀 바닥면 부근까지 도달한 후, 유향을 하류방향으로 변화시키는 잠입류(Plunging flow)와 노치부를 월류하는 흐름이 수면부근을 통과하여 다음 풀에 도달하는 표면류(Streaming flow)의 두 가지로 분류된다(Rajaratnam *et al.*, 1988). 따라서, 어류는 어종 및 체장 등에 관계되는 유영능력에 따라 소상형식을 결정하므로 배플의 월류에 의한 낙차 및 흐름형식은 어도에서 가장 중요한 수리 특성이다.

(1) 수심 및 낙차

계단식 전석 어도의 배플에서의 월류수심은 유량의 크기에 따라 부분월류 또는 전면월류가 형성되므로 소상 어류가 소상위치를 선택할 수 있으며, 풀의 수심은 배플에서의 월류형식이 잠입류 또는 표면류인가에 따라 어류가 유영소상 또는 도약소상을 선택할 때에 가장 중요한 변수이다.

Table 2에 나타난 각 유량별 조건하에서 측정된 각 배플 및 풀에서의 수심은 Table 4와 Fig. 11과 같이 조사되었다. 각 배플에서의 최소월류수심은 0.09~0.16 m, 최대월류수심은 0.13~0.22 m, 평균월류수심은 0.11~0.19 m의 범위이며, 각 풀에서의 최소수심은 0.22~0.43 m, 최대수심은 0.28~0.49 m,

Table 5. Mean depths of each zone in baffles and pools (unit : m)

No.	Baffles			Pools
	Zone-1	Zone-2	Zone-3	
1	0.14	0.07	0.14	0.27
2	0.08	0.10	0.08	0.24
3	0.04	0.12	0.06	0.23
4	0.07	0.07	0.15	0.27
5	0.11	0.05	0.17	0.39
6	0.06	0.13	0.10	0.44
7	0.11	0.11	0.11	0.30

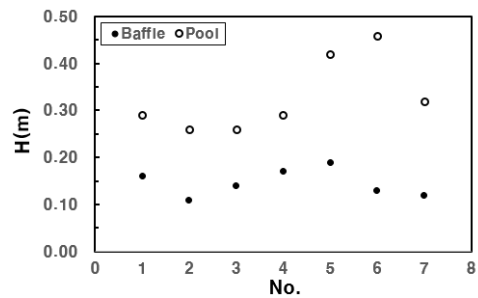


Fig. 11. Mean depths of each zone in baffles and pools

평균수심은 0.26~0.46 m의 범위인 것으로 분석되었다. No. 5와 No. 6 풀에서의 수심이 0.38~0.49 m로 다른 풀에 비하여 깊은데, 이것은 전석을 거치하는 시공단계에서 역경사의 각도가 약간 크게 배치됨에 따라 풀의 수심이 깊고 낙차가 0.21~0.30 m로 높게 되는 결과를 초래했다. 이러한 문제는 향후 모니터링 단계에서 배플을 구성하는 각 전석의 모따기를 통하여 개선할 필요가 있다.

각 배플 및 풀의 수심 측정치에 대하여 분석된 표준편차 및 변동계수의 결과는 계단식 전석 어도의 구조상 배플에서 전석 접촉부의 노치로 월류하기 때문에 월류수심의 변동폭이 안정적이며, 풀의 수심도 흐름에 대하여 전석이 역경사로 놓인 구

조적인 효과로 안정적임을 나타내고 있다.

계단식 전석 어도는 배플의 상단이 수평이 아닌 불규칙한 면이므로 유량에 따라서 각 배플마다의 주 흐름이 형성되는 영역이 다르다. Table 5는 최소 유량 조건에서 각 배플 및 풀에서 측정된 수심을 기준으로 어류가 소상할 수 있는 영역을 분석한 결과이며, 배경색으로 채워진 각 배플의 영역이 주 흐름 영역이다.

배플 사이의 낙차는 어류의 소상형식 즉, 유영소상 또는 도약소상을 결정하는 가장 중요한 변수이며, 어종에 따라서는

도약소상을 할 수 없을 뿐만 아니라 유영력이 약한 어류는 소상이 불가능하게 된다. Table 2에 나타난 각 유량별 조건하에서 측정된 각 배플 사이의 낙차는 Table 6 및 Fig. 12와 같이 분석되었다. 각 배플 사이의 최소낙차는 0.14~0.29 m, 평균낙차는 0.15~0.29 m, 최대낙차는 0.16~0.30 m이며 표준편차 및 변동계수를 분석한 결과 아주 안정적인 것으로 나타났다.

(2) 유속

보 및 낙차공은 산란과 서식처로 활용하기 위해 어류가 상류로 이동하는 것을 차단하거나 지연시킬 수 있으며, 산란 어류의 소상을 완전히 차단하는 것은 서식지 상실보다 더 큰 영향을 미친다. 산란어류의 일시적인 지연은 어류소상에 매우 중요한 영향을 줄 수 있고, 어류가 소상을 위해 높은 에너지를 소비하면 산란을 방해할 수 있기 때문이며, 또한 소상 지연은 동물에 의한 포식으로 이어질 수 있다.

계단식 전석 어도의 배플에서의 월류구조는 유량의 크기에 따라 부분월류 또는 전면월류가 형성될 뿐 아니라 월류 형식이 잠입류(plunging flow) 또는 표면류(streaming flow)로 흐르기 때문에 어류의 유영능력에 따라 소상의 성공 여부가 결정된다.

Table 2에 나타난 각 유량별 조건하에서 측정된 각 배플 및 풀에서의 유속은 Table 7 및 Fig. 13과 같이 분석되었다. 각 배

Table 6. Mean, standard deviations and coefficients of variation of drop heights in baffles and pools

No.	Drop height (m)				
	Min.	Mean	Max.	Standard Deviation	Coefficient of Variation
1	0.15	0.18	0.20	0.02	0.10
2	0.14	0.15	0.16	0.01	0.05
3	0.15	0.16	0.17	0.01	0.05
4	0.17	0.18	0.19	0.01	0.06
5	0.29	0.29	0.30	0.01	0.03
6	0.21	0.22	0.28	0.01	0.04
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

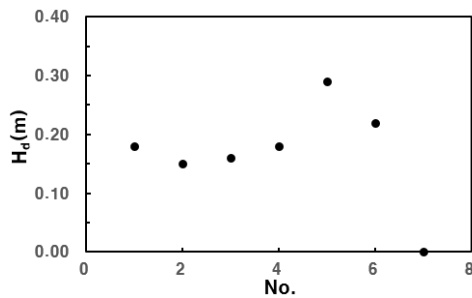


Fig. 12. Mean drop heights in pools

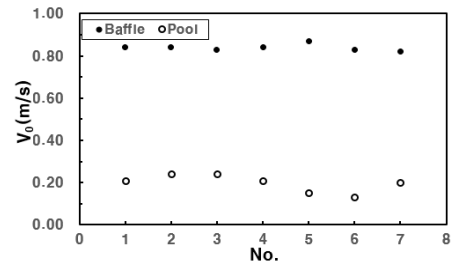


Fig. 13. Mean velocities in baffles and pools

Table 7. Mean, standard deviations and coefficients of variation of velocities in baffles and pools

(unit : m/s)

No.	Baffles					Pools				
	Min.	Mean	Max.	Standard Deviation	Coefficient of Variation	Min.	Mean	Max.	Standard Deviation	Coefficient of Variation
1	0.71	0.84	0.95	0.09	0.11	0.14	0.21	0.28	0.05	0.24
2	0.71	0.84	0.96	0.09	0.11	0.16	0.24	0.31	0.05	0.23
3	0.68	0.83	0.96	0.10	0.12	0.16	0.24	0.32	0.06	0.24
4	0.73	0.84	0.96	0.09	0.10	0.14	0.21	0.28	0.05	0.24
5	0.78	0.87	0.94	0.05	0.06	0.09	0.15	0.20	0.04	0.27
6	0.68	0.83	0.96	0.10	0.12	0.08	0.13	0.18	0.04	0.27
7	0.71	0.82	0.89	0.07	0.08	0.13	0.20	0.26	0.05	0.24

플에서의 최소유속은 0.68~0.78 m/sec, 최대유속은 0.94~0.96 m/sec, 평균유속은 0.82~0.87 m/sec의 범위이며, 각 플에서의 최소유속은 0.08~0.16 m/sec, 최대유속은 0.18~0.32 m/sec, 평균유속은 0.13~0.24 m/sec의 범위로 분석되었다. 따라서, 어도내의 유속은 하천설계기준(MOLIT, 2019)에서 제시하는 유속조건 0.5~1.0 m/s의 범위를 만족시키고 있다.

각 배플 및 플의 유속 측정치에 대하여 분석된 표준편차 및 변동계수는 계단식 전석 어도의 구조상 배플에서 전석 접촉부의 노치로 월류하고 전석이 역경사로 놓인 구조적인 효과로 안정적인 흐름을 나타내고 있다.

(3) 흐름 특성

기존의 콘크리트로 설치된 계단식 어도는 격벽 마루와 플의 바닥면이 수평이지만 계단식 전석 어도의 배플과 플의 구조는 향후 자연석에 가까운 전석을 적용하는 것을 전제로 독립적으로 전석을 배치하여 유량의 변화에도 월류가 발생할 수 있도록 하였다. 따라서, 유량이 적을 경우에는 부분월류가 발생하고 유량이 증가함에 따라 점차적으로 전면월류의 형식으로 전환된다.

각 배플과 플에서의 흐름상태를 파악하기 위하여 측정된 수심 및 유속에 대한 Froude 수를 산정하였으며, 그 결과는 Table 8과 같다. 각 배플에서의 최소 Froude 수는 0.60~0.76, 최대 Froude 수는 0.64~0.85, 평균 Froude 수는 0.64~0.81의 범위이며, 각 플에서의 최소 Froude 수는 0.04~0.11, 최대 Froude 수는 0.08~0.19, 평균 Froude 수는 0.06~0.15의 범위로 분석되었다.

현장조사시 측정된 유량조건에서 전체적으로 상류 상태를 유지하는 것으로 나타났으며, 각 배플과 플에서 Froude 수의 차이가 나는 것은 주어진 유량에 따라 월류수면 폭과 수심이 다르기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

3.2 고찰

계단식 전석 어도는 풀식(pool type)과 수로식(stream type)의 혼합특성을 복합형 어도로서 산지하천에서 전석으로 형성된 계단식(cascade) 구조와 유사하며, 배플에서의 월류는 박리(separation)없이 흘러내리는 흐름이다. 연속적인 얇은 플로 구성된 이 어도는 과거의 돌보의 특성을 재현하여 산지하천에 서식하는 주요 어종 및 수서곤충 등 다양한 수서생물이 이용할 수 있도록 고안되었다.

하천설계기준(MOLIT, 2019)을 적용하면 대상어도는 높이가 1.86 m이므로 약 40 m의 길이가 필요하지만 계단식 전석 어도는 약 7 m로서 어도의 기능을 확보하므로써 경제성 및 경관적 측면에서 장점이 있다.

계단식 전석 어도는 일반적인 콘크리트 계단식 어도와 같은 플의 연속이지만, 일반적인 풀식 어도에는 격벽의 마루가 수평이면서 연속으로 부분 위어(노치) 등을 가지고 있어도 수위 변화에 대응이 어려웠던 반면, 계단식 전석 어도는 전석을 늘어놓은 배플 구조로 되어 있기 때문에 전석 접촉부에 노치를 형성하여 작은 유량에서도 도약하지 않고 소상경로를 확보할 수 있는 형상으로 되어 있다.

단계전에 서식하는 어종은 참갈겨니, 자가사리, 큰줄납자루, 미꾸리, 미꾸라지, 버들치, 꺾지, 돌마자, 참붕어, 참종고기, 참물개, 동사리, 돌고기, 밀어, 각시붕어, 긴물개, 칼납자루, 피라미, 기름종개, 치리 등이며, 우점종은 피라미, 참갈겨니, 긴물개, 자가사리, 돌마자, 칼납자루, 참붕어, 치리, 돌고기 등이며 대표어종은 피라미와 갈겨니인 것으로 조사되어 있다 (ME, 2021).

본 연구에서는 배플 및 플의 수심, 낙차 및 유속에 대한 현장조사 결과와 대상하천의 대표어종인 피라미와 갈겨니의 유영 및 소상 능력에 관련된 수리특성을 비교하고 검토하였다. 그러나, 계단식 전석 어도의 소상 효율성을 검증하기 위한 대표

Table 8. Depth, velocity and froude number in baffles and pools

No.	Baffles									Pools								
	depth (m)			velocity (m/s)			Froude Number			depth (m)			velocity (m/s)			Froude Number		
	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.
1	0.13	0.16	0.18	0.71	0.84	0.95	0.63	0.67	0.72	0.26	0.29	0.32	0.14	0.21	0.28	0.09	0.12	0.16
2	0.09	0.11	0.13	0.71	0.84	0.96	0.76	0.81	0.85	0.23	0.26	0.29	0.16	0.24	0.31	0.11	0.15	0.18
3	0.12	0.14	0.16	0.68	0.83	0.96	0.63	0.71	0.77	0.22	0.26	0.28	0.16	0.24	0.32	0.11	0.15	0.19
4	0.15	0.17	0.19	0.73	0.84	0.96	0.60	0.65	0.70	0.26	0.29	0.32	0.14	0.21	0.28	0.09	0.12	0.16
5	0.16	0.19	0.22	0.78	0.87	0.94	0.62	0.64	0.64	0.38	0.42	0.45	0.09	0.15	0.20	0.05	0.07	0.10
6	0.11	0.13	0.16	0.68	0.83	0.96	0.65	0.74	0.77	0.43	0.46	0.49	0.08	0.13	0.18	0.04	0.06	0.08
7	0.10	0.12	0.15	0.71	0.82	0.89	0.72	0.76	0.73	0.29	0.32	0.35	0.13	0.20	0.26	0.08	0.11	0.14

어종의 소상 모니터링 및 3차원 흐름구조 해석을 수행하지 못한 한계가 있으므로 이에 대한 추가연구가 필요하다.

3.2.1 대상어종의 낙차에 대한 소상형식 검토

풀형식 어도에서 풀 사이의 낙차는 어류의 소상물에 가장 중요한 변수이며, 소상어류는 낙차의 크기에 따라 유영소상 또는 도약소상 중에서 유영능력에 따라 소상형식을 선택한다.

Onitsuka *et al.* (2008)은 풀 사이의 낙차 0.05~0.20 m의 범위에서는 피라미 및 갈겨니는 모두 유영소상을 했지만, 0.275~0.425 m의 범위에서는 갈겨니만이 도약소상을 했으며, 0.425 m 이상에서는 갈겨니가 도약소상을 시도하지만 모두 실패했다는 결과를 제시하였다. 그러나, Onitsuka *et al.* (2008)은 풀형식 어도에서 피라미의 도약소상과 수리특성의 관계를 규명하기 위한 실험을 통하여 풀 사이의 낙차 0.37 m에서도 피라미는 도약소상을 시도한다는 결과도 제시하였다.

본 연구의 계단식 전석 어도에서 측정된 유량에 대한 각 배플 사이의 최소낙차는 0.14~0.29 m, 평균낙차는 0.15~0.29 m, 최대낙차는 0.16~0.30 m의 범위로서 5번 및 6번 배플의 낙차가 대상어종인 피라미와 갈겨니가 유영소상을 할 수 없는 범위이나 모든 배플에서 피라미와 갈겨니가 도약소상이 가능한 범위인 것으로 분석되었다. 그러나, 모든 대상어종이 유영소상을 할 수 있도록 하기 위해서는 5번 및 6번 배플의 낙차 범위를 보완하기 위하여 전석 사이의 노치 형상을 부분적으로 수정해야 하는 것으로 나타났다.

3.2.2 대상어종의 유속에 대한 소상능력 검토

어류의 유영능력을 평가하는 유영속도는 지속유영속도(sustained swim speed)(Beamish, 1978; Webb, 1994), 중간유영속도(prolonged swim speed)(Beamish, 1978; Webb, 1994) 및 돌진유영속도(burst swim speed)(Bell, 1973; Blaxter, 1969; Bainbridge, 1960)가 대표적이다. 이 연구 결과는 어도 설계에서 중요한 유영속도는 중간유영속도와 돌진유영속도이며, 중간유영속도는 어류가 20초에서 200분 동안 유지하고 피로에서 벗어날 수 있는 속도로서 지속유영속도와 돌진유영속도 사이의 범위로서 크기는 체장의 2~4배이고, 돌진유영속도는 어류가 소상, 공격 및 도피를 위하여 아주 단시간(1~5 sec, 5~10 sec 및 1 minute 미만)내에 유영하는 속도로서 어종에 따라 다르지만 체장의 10~30 배 정도를 제시하고 있다. 이러한 어류 유영이론을 바탕으로 어도설계시 유속에 대한 검토가 이루어져야 한다.

피라미 및 갈겨니의 돌진속도와 체장의 비는 체장의 증가에 따라 감소하고, 유속의 증가에 따라 증가하며, 일반적으로

돌진속도가 체장의 10 배라고 하지만(Nakamura, 1995), 자연하천에서 스테미너 터널을 이용한 고유속 실험에서 최대 체장의 30 배 이상이라는 결과도 있다(Izumi *et al.*, 2007, 2009; Kouki *et al.*, 2008). 도움닫기 거리는 체장의 크기에 따라 증가하나 유속의 증가에 따라 감소하고, 체장의 2배 정도의 길이가 있으면 충분하다고 하였다(Onitsuka *et al.*, 2008). 또한, 피라미와 갈겨니는 돌진속도의 약 7~25% 유속 범위에서 휴식하며, 피라미의 휴식 장소는 수심 방향으로 분산되는 반면, 갈겨니는 반수심 부근에 밀집되어 있다. 이것은 수심 부근의 유속이 갈겨니의 선호 유속인 것 외에도 갈겨니는 군집성이 강한 어종이기 때문인 것으로 추정된다고 밝혔다(Onitsuka *et al.*, 2008).

본 연구의 각 유량별 조건하에서 측정된 각 배플에서의 최소유속은 0.68~0.78 m/sec, 최대유속은 0.94~0.96 m/sec, 평균유속은 0.82~0.87 m/sec의 범위이며, 각 풀에서의 최소유속은 0.08~0.16 m/sec, 최대유속은 0.18~0.32 m/sec, 평균유속은 0.13~0.24 m/sec의 범위로 분석되었다.

일반적으로 성어인 경우에 피라미의 체장은 8~20 cm, 갈겨니의 체장은 10~17 cm 범위로서 체장이 8 cm인 피라미의 돌진속도는 0.80~2.40 m/sec, 체장이 10 cm인 갈겨니의 돌진속도는 1.00~3.00 m/sec 로서 배플의 최대유속의 범위보다 크므로 소상이 가능한 것으로 판단된다. 또한 피라미의 휴식장소의 유속 조건은 체장이 8 cm인 피라미의 경우 0.06~0.60 m/sec, 체장이 10 cm인 갈겨니의 경우 0.07~0.75 m/sec 로서 풀의 최대유속 0.18~0.32 m/sec 보다 크므로 대표어종인 피라미 및 갈겨니의 휴식 장소의 조건을 만족시키는 것으로 분석되었다. 대상어종이 유영 및 도약 소상에 필요한 도움닫기 거리는 체장의 약 2 배로서 풀의 길이가 0.80~1.10 m 이므로 풀의 유속, 수심 및 길이도 소상 및 휴식에 필요한 환경조건을 만족시키는 것으로 검토되었다.

3.2.3 흐름구조 및 토사퇴적

본 연구는 풀 내의 회전류 발생, 수위변동이나 토사퇴적에 대한 대응 등 기존의 풀형식 어도가 안고 있는 여러 문제를 해결하기 위해 고안된 계단식 전석 어도의 수리특성을 밝히는 데 목적이 있다.

일반적으로 콘크리트 계단식 어도의 풀에서는 격벽이 수직으로 되어 있기 때문에 월류수가 수직벽면을 따라 바닥으로 향하고 이어서 바닥면을 따라 하류측의 수직벽면에 이르러 상승하기 때문에 풀에 대류와 비슷한 회전류가 생기게 되고, 이 흐름에 대해 유수성 어류는 진행 방향을 좌각하는 행동이 확인되고 있다(Izumi *et al.*, 2000; 2002). 반면에 계단식 전석

어도는 유량이 적을 경우에도 전석이 연결되는 노치부로 월류하는 구조이고, 약 25°의 경사로 배플을 형성하는 전석면을 따라 물이 박리되지 않고 유하하므로 기본적으로 어류가 쉽게 유영소상을 할 수 있도록 배려한 구조이다. 계단식 전석 어도는 실제로 하천에 존재하는 전석 사이를 흘러내리는 흐름을 모방하고 있기 때문에 특히 도움단기와 휴식공간을 마련할 필요가 없으며, 기존 어도에 비해 얇은 폴로서 설치가 가능하기 때문에 어류가 진행 방향을 잃어버리는 회전류도 발생하지 않는다. 또한 기존의 계단식 어도는 폴의 수심이 깊게 형성되기 때문에 홍수시 유출토사가 폴에 퇴적되어 어도의 기능을 발휘할 수 없게 되고, 이를 제거하는 작업 등의 유지관리에 소요되는 노력과 비용이 과제가 되고 있다. 계단식 전석 어도는 폴 수심을 얇게 했을 뿐만 아니라 격벽에서 폴 바닥 사이가 완만한 역경사면 형상으로 되어 있기 때문에 홍수시 유입되는 토사가 급류에 소류되어 폴에는 퇴적이 발생하지 않게 된다.

따라서, 계단식 전석 어도는 기존의 콘크리트 계단식 어도에서 제기된 유량 감소시 수위변동 및 폴 내의 회전류 발생으로 인한 소상물 감소와 홍수시 폴에 퇴적된 토사제거 및 유지관리 등에 대한 문제점을 해소하거나 경감할 수 있는 장점이 있다.

4. 결론

전국의 하천에는 많은 콘크리트 계단식 어도가 설치되어 있지만, 수리특성 분석 및 모니터링을 통한 개별 어도의 어류 소상물 평가 및 유지관리 등에 대한 분석이 미비한 실정이다. 따라서, 생태적으로 하천의 종적 연속성을 확보하기 위해서는 지금까지 설치된 어도에 대한 성능평가를 확대할 필요가 있다. 본 연구에서는 과거의 전통 돌보의 개념을 응용한 계단식 전석 어도의 적용성을 검토하기 위하여 시범사업으로 대상하천에 설계 및 시공하였다. 현장조사에서 조사·분석된 어도의 수리특성과 대상하천에 서식하는 대표어종인 피라미 및 갈겨니의 소상능력을 비교, 검토하였으며, 요약하면 다음과 같다.

어도의 길이를 크게 감소시킬 수 있으므로 하폭이 좁고, 입경이 큰 하상재료의 유출이 많은 산지하천 등에서 발생하는 어도의 파손과 주변부 국부세굴 등의 문제점을 보완할 수 있으며, 경제성 및 경관성 측면에서 유리하다.

전석 연결부에 노치가 형성되어 소유량시에도 소상경로가 확보되고, 유량의 변화에도 어류 소상에 필요한 수심을 확보할 수 있으며, 폴 사이의 낙차도 대상어종에 따라 유영소상 또는 도약소상 중 소상형식을 선택할 수 있음을 확인하였다. 배플의 월류유속 및 폴의 유속은 대상어종의 돌진속도 및 휴식

에 필요한 유속 조건을 만족시키므로써, 대상어종의 소상물을 증가시킬 수 있는 흐름특성을 형성할 수 있음을 제시하였다. 전석으로 형성된 폴의 바닥면이 낮은 역경사면으로 되어 회전류가 발생하지 않고, 토사퇴적을 차단함으로써 급경사 하천에 설치된 계단식 어도의 회전류 발생으로 인한 소상물 저하 및 토사퇴적으로 인한 어도의 유지관리 문제점을 해소할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 얻은 결과는 물리적인 수리특성의 조사에 의한 것이므로 대상어종에 대한 소상 모니터링 및 3차원 유속 측정 및 흐름구조 해석을 통하여 추가적인 계단식 전석 어도의 적용성을 검증할 필요가 있다. 또한, 기초연구로서 우수력에 대한 구조적인 안정성에 초점을 맞추어 사용한 전석이크고 높기 때문에 기타 수서곤충 등의 이동을 고려하지 못하였으므로 향후 연구에서는 최대한 자연석을 활용하는 방안을 후속연구로서 추진할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2020~2021년 경상국립대학교 대학회계 연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- Atsushi, N., Masahiro, G., and Hiroyasu, K. (2008). "Flow structure and swimming behavior of *Leuciscus Hakonensis* at pool-and-weir type fishway with slope 1/5." *Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 52, pp. 1189-1194.
- Bainbridge, R. (1960). "Speed and stamina in three fish." *Journal of Experimental Biology*, Vol. 37, pp. 129-153.
- Beamish, F.W.H. (1978). "Swimming capacity." *Fish physiology*, Edited by Hoar, W.S., and Randall, D.J., Vol. 7, Academic Press, London, pp. 101-187.
- Bell, M.C. (1973). *Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria*. Fisheries Engineering Research Program, U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, OR, U.S., pp. 51-59.
- Blaxter, J.H.S. (1969). "Swimming speeds in fish." *Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in relation to Fishing Techniques and Tactics*, Bergen, Norway, pp. 69-100.
- Izumi, M., Kudo, A., and Azuma, N. (2000). "A field on flow characteristics and ascending of fishes in Ice-Harbor type fishway of Mitumenai headworks." *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol.18, No. 2, pp. 169-178.
- Izumi, M., Takaya, D., Kudo, A., and Azuma, N. (2002). "The ascending

- characteristics of fishes in the wall of Ice-Harbor type fishway of Akaishi-The number 2 Headworks on The Akaishi River.” *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, No. 217, pp. 55-63.
- Izumi, M., Yamamoto Y., Yataya, K., and Kamiyama, K. (2009). “Burst speed of wild fishes under high-velocity flow conditions using stamina tunnel with natural guidance system in river.” *Irrigation, Drainage and Rural Engineering Journal*, No. 261, pp. 73-82.
- Izumi, M., Yataya, K., Azuma, N., Kudo, A., and Kato, K. (2007). “On-site swimming experiment of burst speed of Pale Chub with a stamina tunnel using natural river down-flow water.” *Proceedings of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 51, pp. 1285-1290.
- Kim, J. H., and Kim, C. (1994). “Study on hydraulic characteristics for upstream migration of fish in a pool-and-weir fishway.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 27, No. 2, pp. 63-72.
- Kim, K.H., Lee, H.R., and Jung, H.R. (2016). “Improvement study of river-crossing structures in Geyongnam prefecture.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 10, pp. 809-821.
- Kouki, O., Juichiro, A., Akiyoshi, Y., and Yohei, I. (2008). “Variation of burst speed of Zacco Platypus with changing body length and flow velocity.” *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 52, pp. 1183-1188.
- Lee, H.R., Kim, K.H., and Jung, H.R.. (2016). “A study on improvement of existing fishways - Focusing on fishways located at downstream of Eastern coast rivers in Korea.” *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, Vol. 19, No.4, pp. 61-79.
- Masayuki, F., and Ayako, F. (2009). “A simple estimation of flow Structure in a fan-shaped fishway.” *Journal of Rainwater Catchment Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 29-33.
- Ministry of Environment (ME) (2021). Korea, accessed 13 August 2021, <<http://www.wamis.go.kr>>.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2021). accessed on 12 September 2021, <https://www.mlit.go.jp/river/sakana_tebiki/>.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Dam design standard*. Korea Water Resources Association, pp. 199-202.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2019). *Rivers design standard*. Korea Water Resources Association, pp. 427-450.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2021). Fishway information system. accessed on 28 August 2021, <<http://www.fishway.go.kr>>.
- Nakamura, S. (1995). *The story of fishways*. Sankaido, Japan, pp. 141-158.
- Onitsuka, K., Akiyama, J., Yamamoto, A., and Iiguni, Y. (2008). “Variation of burst speed of zacco platypus with changing body length and flow velocity.” *Proceedings of hydraulic engineering*, JSCE, Vol. 52, pp. 1285-1290.
- Park, S.D. (2001). “Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishway by eco-hydraulic experiment (Ⅱ) - Pool and weir type fishway -.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 381-390.
- Park, S.D., Shin, S.S., Ahn, H.Y., Ma, S.B., and Hwang, C.S. (2004). “An assessment of ascending functions of the pool-and-weir fishway at Jamsil weir in the Han River.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 74, pp. 541-552.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Mainali, A. (1988). “Plunging and streaming flows in pool and weir fishways.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, pp. 939-944.
- Washington State (WDFW) (2000). *Fishway guideline for Washington State*. Washington Department of Fish and Wildlife, WA, U.S., pp. 22-26.
- Webb, P.W. (1994). *Mechanics and physiology of animal swimming*. Harvard University Press, Cambridge, MA, U.S., pp. 45-62.