

## 어도 설계를 위한 붕어의 한계유영유속 결정 연구

# Determination of Critical Swimming Velocity for Crucian Carp for Fishway Design

이세원<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>전주대학교 토목환경공학과 겸임교수

Se Won Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Adjunct Professor, Jeonju University, Jeonju 15069, Korea

Received 19 December 2023, revised 21 December 2023, accepted 21 December 2023, published online 31 December 2023

**ABSTRACT:** Fishways installed in Korea usually generate high-velocity flows and low water depth that impede fish movement, despite the fact that most fish are migratory or move to survive. Moreover, domestic design standards for fishways fail to consider the swimming ability of various fish species that live in rivers. Therefore, it is necessary to establish design standards for fishways to function properly, which requires research on the swimming performance of domestic migratory fish and the hydraulic characteristics of fishways. Accordingly, in this research, the swimming performance of fish was objectively analyzed by applying the incremental velocity and fixed velocity methods to carp, respectively, and the critical swimming velocity was presented. As the result, it was appropriate to set the critical swimming velocity to 0.7 m/s - 0.8 m/s for incremental velocity and 0.8 m/s for fixed velocity. Comprehensively analyzing the two experimental methods, the critical swimming velocity for designing the fishway for carp can be determined to be about 0.8 m/s. In the future, it will be necessary to analyze the swimming performance of various migratory fish and prepare fishway design standards for each species.

**KEYWORDS:** Critical swimming velocity, Crucian carp, Fishway, Swimming performance

**요 약:** 대부분의 어류가 생존을 위해 회유 또는 이동하는 특성이 있음에도 불구하고 국내에 설치된 어도는 평상시에 고유속과 저수심의 흐름이 발생할 수 있어 어류의 이동에 장애가 되고 있는 실정이다. 또한 어도에 관한 국내 설계기준상 국내 하천에 서식하는 다양한 어종별 유영특성을 고려하지 못하는 한계가 있다. 따라서 어도의 기능을 확보하기 위한 설계기준의 마련이 필요하며, 이를 위해 국내 회유성 어종의 유영특성과 어도의 수리특성에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 붕어를 대상으로 증진유속방법과 고정유속방법을 수행하여 가능한 객관적인 어류의 유영특성을 분석하고 한계유영유속을 제시하였다. 증진유속방법 실험을 수행한 결과 붕어는 0.7 m/s ~ 0.8 m/s로 하는 것이 바람직한 것으로 확인되었다. 고정유속방법 실험을 수행한 결과 붕어의 경우는 0.8 m/s 정도로 확인되었다. 따라서 두 실험 방법을 종합적으로 분석한 결과 어도설계를 위한 한계유영유속을 결정하면 붕어의 경우는 약 0.8 m/s로 판단된다. 향후 다양한 회유성 어종에 대해 유영특성의 실험적 연구를 수행하여 어도설계를 위한 대상어종별 유영특성을 고려한 어도설계기준 마련이 필요하다.

**핵심어:** 한계유영유속, 붕어, 어도, 유영특성

\*Corresponding author: sh-eng@naver.com, ORCID 0009-0008-4065-0805

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

일반적으로 모든 어류는 서식지 내에서도 산란 및 먹이포획을 위해 이동하는데 이를 소규모 이동으로 국지 회유라 하며, 몇몇의 물고기는 산란을 위해 먼 거리를 회유하는 경우도 있다. 이러한 어류의 이동은 강 하구와 본류에 설치된 댐 및 보와 같은 횡단 수리구조물 때문에 이동경로가 단절되게 된다 (Baxter 1977, Harris 1984, Jacobs 1990, Mallen-Cooper et al. 1995). 어도는 이러한 어려움을 해결하기 위해 설치한 어류의 이동통로이다. 어도는 자연적인 어류의 이동통로와 달리 인공적으로 설치하는 것이기 때문에 대상구역의 어종 조사 및 어류의 유영능력을 고려하여 최적의 소상 조건이 되도록 설치되어야 한다.

어도에 대한 일반적인 기준으로 하천설계기준에서 어도 내 설계유속을 갈수 시 취수잔량이 유하될 때 모든 어종에 대해 0.5 - 1.0 m/s로 제시하고 있다. 또한 어류의 유영속도도 국내 어종에 대한 연구가 부족하여 외국의 회유성어종 연구 자료를 활용하여 순항속도를 어류체장의 2 - 4배, 돌진속도를 어류체장의 10배로 제시하고 있다. 그러나 실제 국내 어류의 유영특성은 어종별로 다르기 때문에, 어도내 설계유속과 수심기준이 외국과 같이 어종별로 다르게 제시되어야 어도기능을 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

이와같이 회유성 어종을 포함한 대부분의 어류가 생존을 위해 회유 또는 이동하는 습성이 있음에도 불구하고 국내에 설치된 어도는 평상시에 고유속과 저수심의 흐름이 발생할 수 있어 어류의 이동에 장애가 되고 있는 실정이다. 또한 어도에 관한 국내 설계기준상 국내 하천에 서식하는 다양한 어종별 유영특성을 고려하지 못하는 한계가 있다. 따라서 어도의 기능을 확보하기 위한 설계기준의 마련이 필요하며, 이를 위해 국내 회유성 어종의 유영특성과 어도의 수리특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 어도의 기능을 고려하여 붕어의 유영특성을 분석하는 것이다. 붕어의 유영특성을 정량적으로 분석하기 위해 증진유속방법과 고정유속방법에 대한 어도실험에서 나타난 유영특성을 분석하고 이동특성과 한계유영유속을 결정하였다.

## 2. 붕어의 한계유영유속 측정 실험

### 2.1 증진유속방법을 이용한 붕어의 한계유영유속 결정 방법

증진유속방법은 실험어종이 실험수로에서 유영하고 있는 상태에서 유속을 단계별로 점진적으로 증가시키면서 실험어종의 유영양상을 확인하여 한계유영유속을 결정하는 방법이다. 증진유속방법에서 한계유영유속은 다음 Eq. 1과 같이 결정한다.

$$U_{crit} = V_p + \left( \frac{t_f}{t_i} \right) V_i \quad (\text{Eq. 1})$$

$V_i$ : 단계별 유속증진간격 (cm/s)

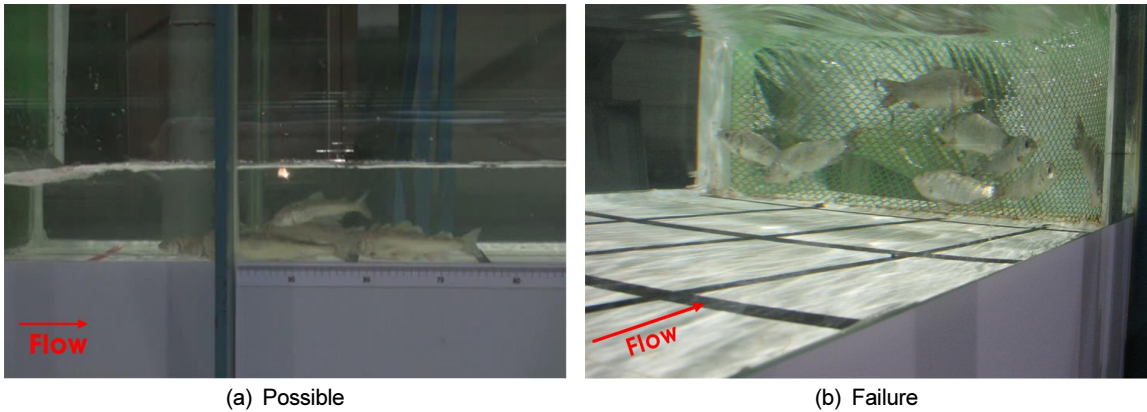
$V_p$ : 물고기가 피로를 느낀 유속단계의 전 단계 유속 (cm/s)

$t_f$ : 유속이 증가된 후부터 물고기가 피로를 느꼈을 때까지 유영한 시간 (s)

$t_i$ : 증진유속의 지속기간 (s)

증진유속방법에서 유속 단계별 지속기간에 대해서는 Brett (1964)은 지속기간을 60분으로 적용하였으나 Hammer (1995)는 문헌조사를 통해 유속단계의 간격이 30분이 적당하다고 하였다. 본 연구에서는 증진유속방법 실험을 하천설계기준 (2019)에서 제시하는 어도내 유속 허용 범위인 0.5 - 1.0 m/s를 기준으로 수행하였다. 실험 방법은 각 유속 단계별로 30분을 유영시키고, 5분간 유속을 변화시키는 방법으로 진행하였다. 유속 변화에 충분히 적응하면서 유영을 하기 때문에 물고기의 유영능력을 정확하게 평가할 수 있는 장점이 있다. 하지만 유영시간 결정에 있어서 정확한 규정이 없다는 단점이 있다. 이에 본 실험에서는 Hammer (1995)가 제안한 30분을 사용하였다.

증진유속방법을 통해 한계유영유속을 구하기 위해서는 유영능력을 정량적으로 평가하여야 하기 때문에 Fig. 1 (b)와 같이 물고기가 유영을 하지 못하고 뒤로 밀려서 하류의 그물망에 붙어버리는 상황을 유영이 불가능한 것으로 판정하고 각 유속단계별로 유영능력이 없는 마리수를 측정하였다. 이와 함께 유영양상을 관찰하여 유영능력을 평가하였다. 한계유영유속 결정은 첫째



(a) Possible

(b) Failure

Fig. 1. Criteria for determining swimming.

로 실험어종의 유영능력 측정과 동시에 유영양상을 관찰하여 가능한 실험어종이 돌진속도를 사용하여 전속력으로 소상하고 다시 밀려나가는 유영양상을 확인하여 돌진속도 사용 전 유속을 한계유영유속으로 결정한다. 또한 둘째로 한계유영유속 결정은 우선 유영하지 못하고 뒤로 밀리는 마리수가 10% 이상 되는 전단계의 유속을 결정하고, 유영양상을 관찰한 후 몸을 바닥에 붙이고 버티기에 들어가기 전단계 유속을 결정하였다. 마지막으로 두 가지 방법의 결과를 비교한 후 보수적으로 한계유영유속을 결정하였다. 본 실험에 사용한 붕어의 개체수는 30마리로 수행하였으며, 수로폭과 실험어종의 폭을 고려하여 자유로운 유영이 가능하도록 10마리씩 3 case를 수행하였다.

## 2.2 고정유속방법을 이용한 붕어의 한계유영유속 결정 방법

고정유속방법은 유속을 변화시키지 않고 같은 유속에서 실험어종을 유영시킨 후 유영하는 거리와 시간을 측정하여 유영특성을 파악하는 방법이다. 본 연구에서는 고정유속방법 실험을 하천설계기준에서 제시하는 어도내 유속 허용 범위인 0.5 - 1.0 m/s를 기준으로 수행하였다. 실험 방법은 각 유속 단계별로 30분을 유영시키면서 소상 여부를 확인하였다. 고정유속방법 실험에서는 각 단계별 유속에서 물고기를 유영시킨 후 꺼내어 휴식을 취할 수 있도록 하고, 유속단계를 올린 후 다시 유영을 시키는 방법으로 진행하였다. 각 유속 단계별 유영시간은 소상여부를 판정할 수 있도록 충분히 긴 시간을 사용하였다.

고정유속방법 실험을 통해 어도 설계에 필요한 한계유영유속을 구하는 방법은 물고기가 어도내 격벽 또는 baffle 뒤에서 휴식을 취할 수 있다고 가정을 하여 하천설계기준 (2019)에서 제시하는 최대 격벽간 거리인 2.5 m의 안전측인 5 m를 기준으로 수행하였다. 또한 5 m 구간은 실험수로 내에서 흐름특성 변화가 적은 3 - 8 m 내로 설정하였다. 따라서 본 실험에서는 실험어종의 소상여부를 Fig. 1과 같이 판정하여 50% 이상 소상이 가능한 유속을 구하여 한계유영유속으로 결정하였다. 실험에 사용한 모든 개체수를 소상시키는 것이 바람직하지만, 효율적인 어도 설계를 위해 평균치인 50%를 기준으로 사용하였다. 실험에 사용한 붕어의 개체수는 50마리로 수행하였으며, 수로폭과 실험어종의 폭을 고려하여 수로내에서 자유로운 유영이 가능하도록 10마리씩 5case를 수행하였다.

## 3. 붕어의 한계유영유속 측정 실험 결과

### 3.1 증진유속방법을 이용한 붕어의 한계유영유속 실험 결과

붕어의 증진유속방법 실험은 총 30 마리의 붕어 중 10 마리씩 3회에 걸쳐 진행하였다. 붕어의 유영시간은 각 유속 단계별로 30 분씩 유영을 하고, 각 단계 변화시 5 분 유영을 하여 총 205 분이였다. 증진유속방법을 통해 살펴본 붕어의 유영특성은 Fig. 2 - Fig. 7과 같다. 붕어는 유속이 어느 정도 빨라지는 0.5 m/s에서부터 소상을 시작하여 수로 상류부인 11 m 지점에서 멈추어 계속 유영을 하였고, 소규모로 모여서 이동하는 특성을 보였

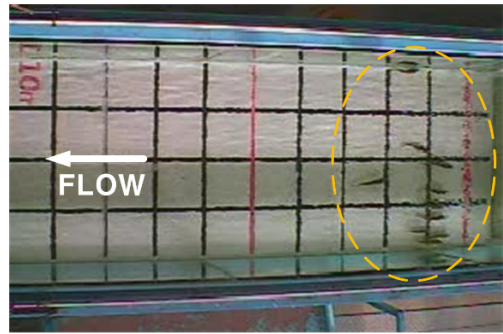
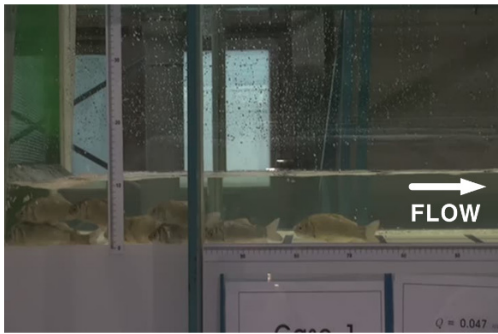


Fig. 2. Swimming performance of crucian carp at 0.5 m/s flow velocity.

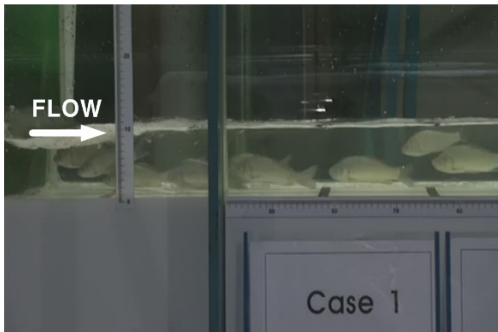


Fig. 3. Swimming performance of crucian carp at 0.6 m/s flow velocity.

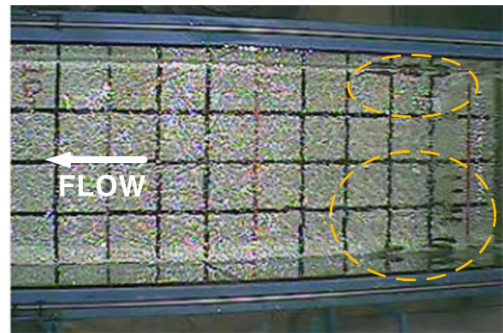
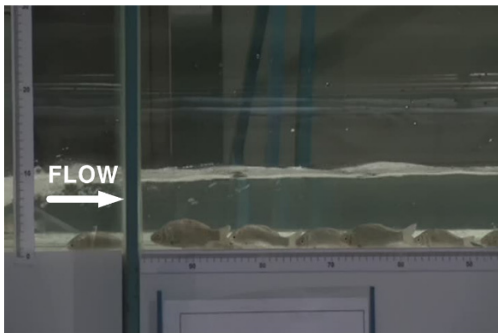


Fig. 4. Swimming performance of crucian carp at 0.7 m/s flow velocity.

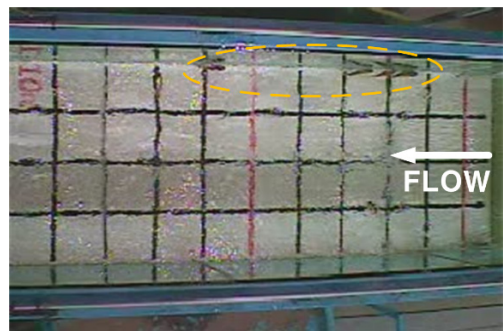
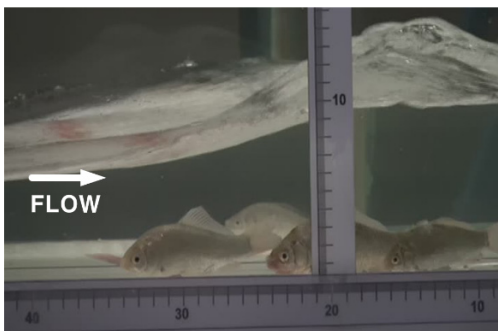


Fig. 5. Swimming performance of crucian carp at 0.8 m/s flow velocity.

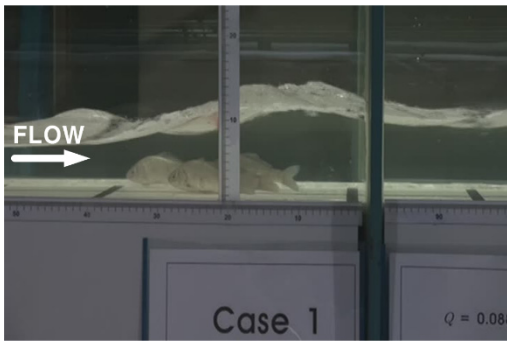


Fig. 6. Swimming performance of crucian carp at 0.9 m/s flow velocity.

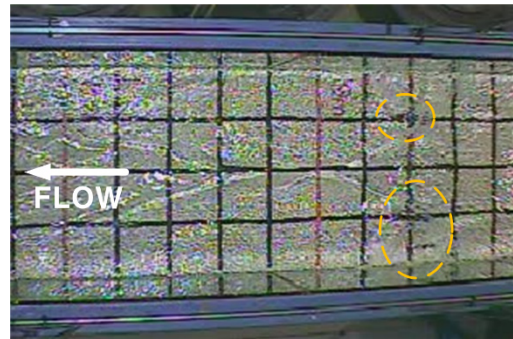
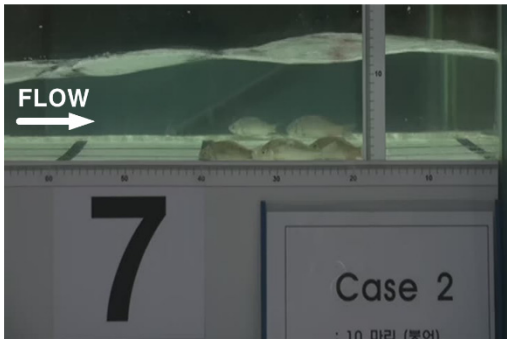


Fig. 7. Swimming performance of crucian carp at 1.0 m/s flow velocity.

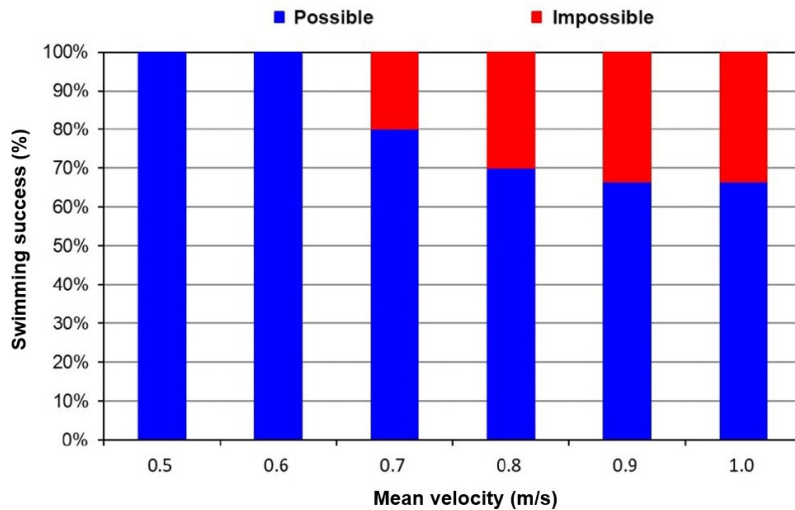


Fig. 8. Evaluation of swimming performance characteristics of crucian carp using the incremental velocity method.

다. 0.6 m/s에서는 유속이 작은 유리벽에 붙어서 수영하는 경향을 보였다. 그리고 0.7 m/s에서부터 붕어가 뒤로 밀려서 소상하지 못하는 개체가 나타나기 시작하였다. 또한 0.9 m/s에서부터는 개체군이 모여서 서로 자리를 교대하는 방식으로 빠른 유속에 버티는 양상을

확인하였다. 마지막으로 1.0 m/s에서는 수영하지 못하는 개체수가 많아졌으며 뒤로 밀렸다가 돌진속도로 소상하려는 수영양상을 보였다.

붕어의 경우 Fig. 8와 같이 0.5 m/s에서부터 1.0 m/s의 유속 단계까지 실험을 수행한 결과 0.7 m/s에서부터

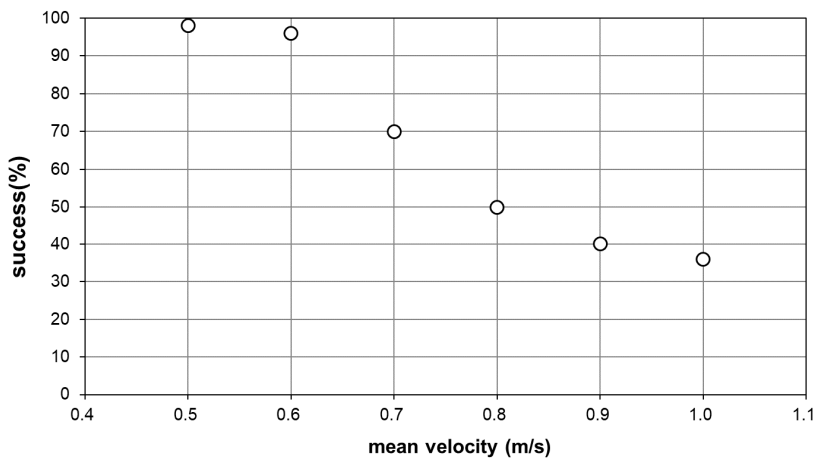
약 20 % 정도가 소상하지 못하는 것으로 확인되었다. 그리고 0.8 m/s에서는 약 35 % 정도가 소상하지 못하는 것으로 확인되었다. 하지만 Table 1과 같이 0.7 m/s에서 바닥에 붙어서 버티기 시작했으며, 뒤로 밀리는 경향을 보이므로 붕어의 한계유영유속을 0.7 m/s ~ 0.8 m/s로 결정하였다.

### 3.2 고정유속방법을 이용한 붕어의 한계유영유속 실험 결과

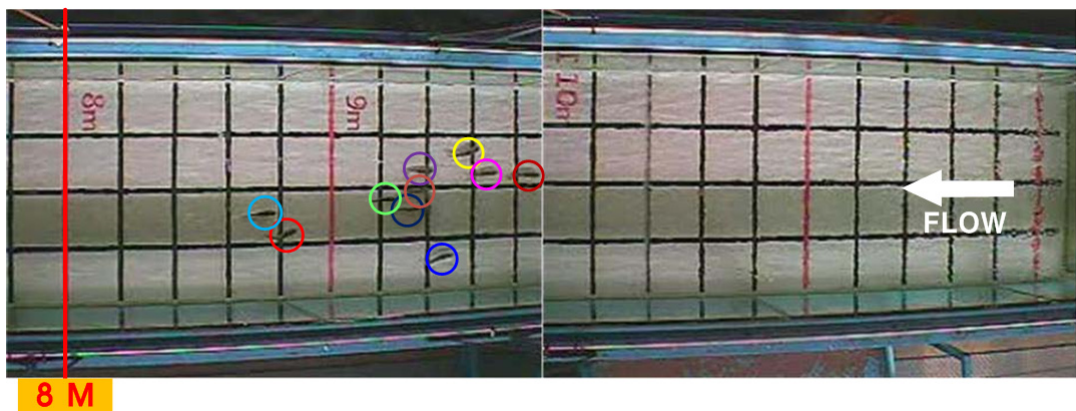
붕어의 경우 Fig. 9과 같이 0.5 m/s에서부터 1.0 m/s의 유속 단계까지 실험을 수행한 결과 5 m 구간의 소상 능력 평가시 약 50 %가 소상하는 유속은 0.7 m/s 정도로 확인되었다. 그리고 붕어의 유영양상은 Fig. 10 -

**Table 1.** Analysis results of swimming performance of crucian carp using the incremental velocity method

Velocity	Swimming performance	Possible or not
0.5 m/s	Swim freely by changing positions	○
0.6 m/s	Swim freely, change positions, some get left behind	○
0.7 m/s	Stick on the floor and move forward and backward repeatedly	△
0.8 m/s	Unable to move forward, stuck on the floor	×
0.9 m/s	Unable to move forward, stuck on the floor, gradually being pushed back	×
1.0 m/s	Unable to move forward, stuck on the floor, gradually being pushed back	×



**Fig. 9.** Evaluation of swimming performance characteristics of crucian carp using the fixed velocity method.



**Fig. 10.** Evaluation of ascending capacity of crucian carp at a flow speed of 0.5 m/s.

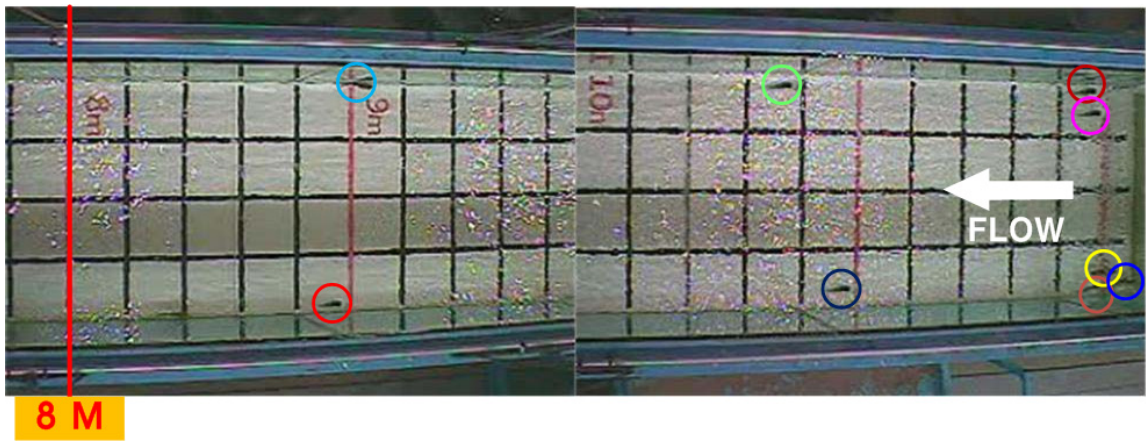


Fig. 11. Evaluation of ascending capacity of crucian carp at a flow speed of 0.6 m/s.

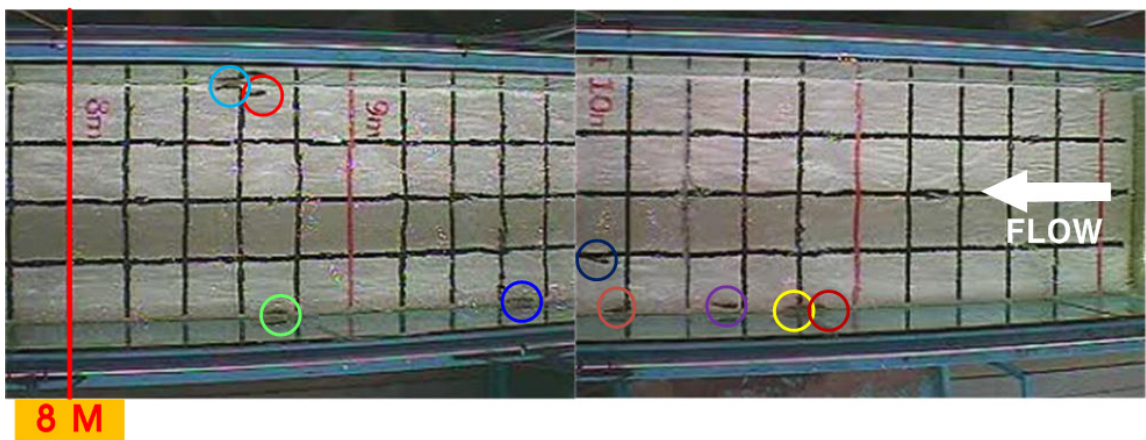


Fig. 12. Evaluation of ascending capacity of crucian carp at a flow speed of 0.7 m/s.

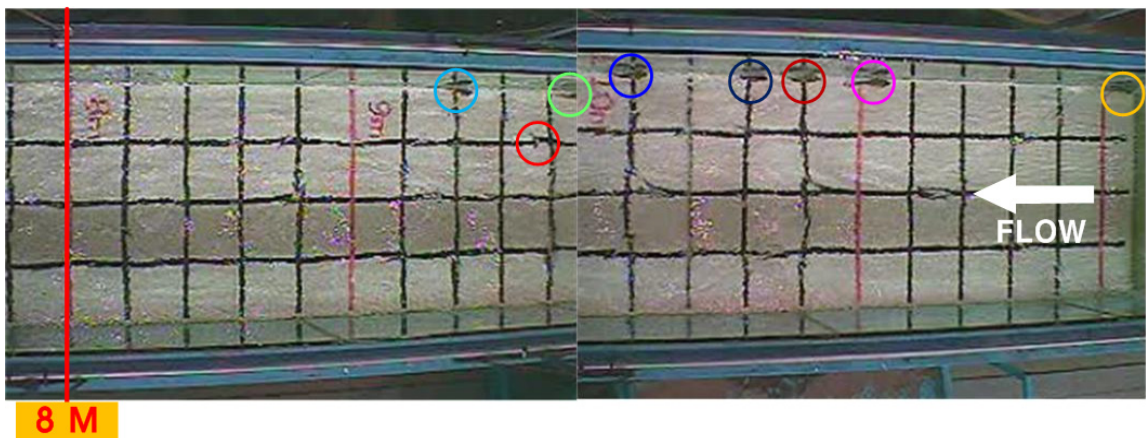


Fig. 13. Evaluation of ascending capacity of crucian carp at a flow speed of 0.8 m/s.

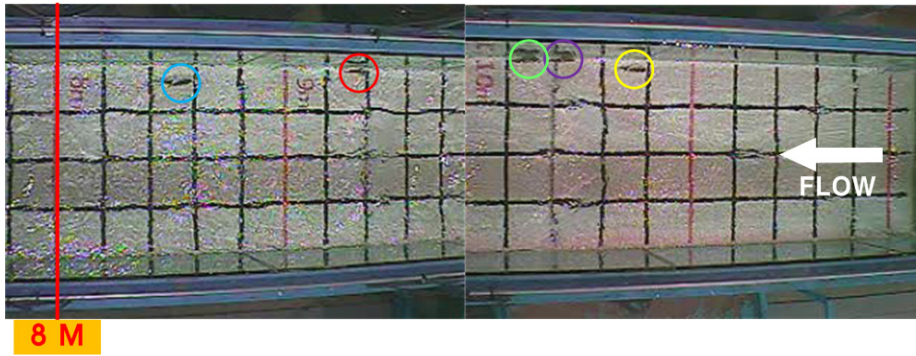


Fig. 14. Evaluation of ascending capacity of crucian carp at a flow speed of 0.9 m/s.

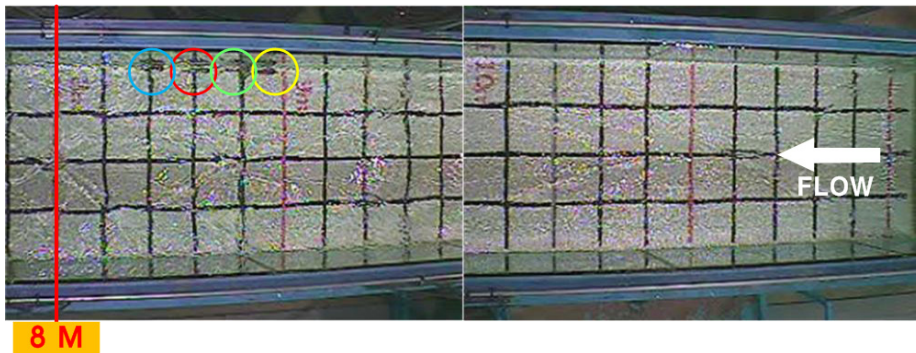


Fig. 15. Evaluation of ascending capacity of crucian carp at a flow speed of 1.0 m/s.

Fig. 15과 같았으며 8 m를 통과한 개체수와 그렇지 못한 개체수를 분리해서 정리하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 붕어를 대상으로 증진유속방법과 고정유속방법을 수행하여 가능한 객관적인 어류의 유영 특성을 분석하고 한계유영유속을 제시하였다. 증진유속방법 실험을 수행한 결과 붕어는 0.7 m/s ~ 0.8 m/s로 하는 것이 바람직한 것으로 확인되었다. 고정유속방법 실험을 수행한 결과 붕어의 경우는 0.8 m/s 정도로 확인되었다. 따라서 두 실험 방법을 종합적으로 분석한 결과 어도설계를 위한 한계유영유속을 결정하면 붕어의 경우는 약 0.8 m/s로 판단된다. 따라서 붕어 서식지에 어도를 설치할 경우 어도 내 최대 유속조건을 0.8 m/s 이하로 설계한다면 어도를 효율적으로 활용할 것으로 판단된다. 향후 붕어의 유영특성에 관한 실험적 연구는 치어 (fry), 유어 (juvenile), 성어 (adult) 등 다양한 체장길이별로 유영속도를 정량적으로 연구함으로써 어도 설계시 지침으로 활용되어야 할 것이다. 향후

다양한 회유성 어종에 대해 유영특성의 실험적 연구를 수행하여 어도설계를 위한 대상어종별 유영특성을 고려한 어도설계기준 마련이 필요하다.

#### References

- Baxter, R.M. 1977. Environmental effects of dams and impoundments. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8: 255-283.
- Brett, J.R. 1964. The respiration metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 21: 1183-1226.
- Hammer, C. 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comp. Biochem. Physiol.* 112A: 1-20.
- Harris, J.H. 1984. Impoundment of coastal drainages of south-eastern Australia, and a review of its relevance to fish migrations. *Aust. Zool.* 21: 235-250.
- Jacobs, T.A. 1990. River Regulation. In *The Murray* (Ed. D. Eastburn) 38-58.
- Mallen-Cooper, M., Stuart, I.G., Hides-Pearson, F., and Harris, J.H. 1995. Fish migration in the Murray River and assessment of the Torrumbarry fishway, Final Report, NRMS Project N002.