

# 피라미와 각시붕어의 소상능력에 관한 실험적 연구

An experimental study on the swimming ability  
of Pale Chub and Korean rose bitterling

박성용\*: 윤병만\*\*: 이승희\*\*\*. 김서준\*\*\*\*

Park, Seong-yong·Yoon, Byung-man·Lee, Seung-Hwi·Kim, Seo-jun

## 요    지

하천내에서 작은 물고기의 국지적인 회유 또는 이동 습성은 먹이를 구하고, 산란 및 성장과 집단에서 분산하고, 위험으로부터 도피하는 것에 밀접한 연관이 있다. 하천의 합류부와 연결부에 제방(levee), 도로(road) 등이 설치되는 경우 일반적으로 암거형태의 인공수로로 상하류를 연결되는데, 암거내 수리특성상 평수시 저유량, 고유속, 저수심의 수리특성을 보인다. 이러한 수리특성은 물고기가 이동하는데 장애(barrier)가 되어 생태적으로 하천내 종다양성 감소와 일부 어종의 멸종을 초래한다.

어도 설치시 설계기준에서 가장 주목할 부분은 어도를 이용할 대상어종의 범위와 유영능력이다. 하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에서 제시된 물고기의 유영능력은 대부분 국외 어종을 대상으로 외국에서 실험한 결과를 이용하고 있다. 그러므로 이러한 기준이 국내 어종에 대해 적합한지에 대한 검토가 필요하다.

본 실험의 목적은 국지회유성인 피라미와 각시붕어가 인공수로를 통과할 때의 유영행동 중 소상성공율과 유영속력을 평가하고자 함이다. 유영행동의 실험방법은 Brett(1967)에 의해 제안된 2가지 방법인 증진유속방법과 고정유속방법중에서 물고기의 이동경로와 소상능력을 확인하기에 용이한 고정유속방법을 사용하였다. 또한, 효과적인 실험을 위해 실험어종(피라미 100마리, 각시붕어 100마리)이 실험 중에 최적의 건강상태를 유지할 수 있도록 물고기의 적응기간(24시간)과 실험 중 휴식기간을 두었다.

실험결과 체형이 방추형(fujiform)인 피라미의 경우 평균유속 0.7 ~ 0.8m/s 구간에서 소상성공율이 61%에서 26%로 급격하게 하락하는 현상이 나타났다. 그리고 측편형(compressiform)의 체형을 가진 각시붕어의 경우 평균유속 0.4m/s에서 소상성공율이 25%로 나타났으며 그 이상의 유속에서는 10%이하로 나타났다. 실험어종의 이동경로를 분석한 결과 대부분 수로바닥에 밀착하여 최저유속구간을 이용하여 이동하는 것으로 나타났으며, 이동경로의 지점유속은 평균 유속의 70%정도로 나타났다. 실제 하천에 설치된 인공수로가 생태통로의 기능을 유지하기 위해서는 평상시 수리특성이 대상어종의 유영능력을 초과하지 않도록 설계되어야 한다. 특히, 하천에 설치된 인공수로의 길이가 5 ~ 10m정도일 경우라면 피라미의 소상 가능성을 50% 이상 확보하기 위해서는 평수시 설계유속이 0.7m/s를 초과하지 않아야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유영행동, 유영속력, 소상성공율, 지점유속

## 1. 서 론

하천내에서 작은 물고기의 국지적인 회유 또는 이동 습성은 먹이를 구하고, 산란 및 성장과 집단에서 분산하고, 위험으로부터 도피하는 것에 밀접한 연관이 있다. 하천의 합류부와 연결부에 제방(levee), 도로(road) 등이 설치되는 경우 일반적으로 암거형태의 인공수로로 상하류를 연결되는데, 암거내 수리특성상 평수시 저유량, 고유속, 저수심의 수리특성을 보인다. 이러한 수리특성은 물고기가 이동하는데 장애(barrier)가 되어 생태적으로 하천내 종다양성 감소와 일부 어종의 멸종을 초래한다.

\* 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사과정·공학석사·E-mail : sypark@dohwa.co.kr

\*\* 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : bmyoon@mju.ac.kr

\*\*\* 비회원·호남대학교 생명과학과 교수·이학박사·E-mail : seunghwi@honam.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 석사과정 · E-mail : seojuny79@hanmail.net

국내에서도 이러한 문제점을 인식하여 하천의 횡단 구조물을 설치할 때, 수생생물의 이동로를 확보하도록 하는 관련법과 설계기준이 제정되어 있다. 그러나 대부분 보에 설치되는 어도에 관한 내용으로 암거와 같은 인공수로에서 발생하는 고유속, 저수심 등의 수리특성이 물고기의 이동에 어떤 장애를 일으키는지와 이에 대한 해결방법이 구체적으로 언급되지 않은 실정이다. 어도설치 시 설계기준에서 가장 주목할 부분은 어도를 이용할 대상어종의 범위와 유영능력이다. 하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에서는 대상어종의 범위를 회유성 어류이외에 하천에 서식하는 모든 어종이 산란시기뿐만 아니라 연중 소상하는 특성을 가지므로 이러한 물고기의 생태적 특성을 고려하여 어도가 조성되도록 제시되어 있다. 그러나 외국의 실험결과를 기준에 반영한 것이므로 이러한 기준이 국내 어종에 대해서도 적합한지에 대한 검토가 필요하다.

본 실험적 연구의 목적은 국지회유성인 피라미와 각시붕어가 인공수로를 통과할 때의 유영행동 중 소상성공율과 유영속력을 평가하고자 함이다. 유영행동의 실험방법은 Brett(1967)에 의해 제안되어 현재까지 많이 사용하고 있는 고정유속방법을 사용하였다.

## 2. 기준 이론 및 실험방법

### 2.1 유영행동의 구분

물고기의 유영행동은 크게 순항(sustained)행동, 전진(prolonged)행동, 돌진(burst)행동으로 구분된다. 이러한 유영행동의 분류 기준은 유영한 시간과 근육으로 에너지를 공급하는 생화학적 과정에 의해 구분된다(Beamish 1978). 유영행동의 분류에 관한 적정한 구분은 물고기 종류별로 유영속력(swimming velocity)과 에너지의 소비시간(time to exhaustion)의 관계에 관한 실험을 통해 파악할 수 있다. 따라서 유영행동의 분류는 유영속도(swimming speed)로 많이 표현된다. 물고기의 종류에 따라 유영속력과 유영시간의 관계 그래프에서의 기울기를 통해 순항(sustained)유영과 전진(prolonged)유영 그리고 전진(prolonged)유영과 돌진(burst)유영 사이를 구분할 수도 있지만, 그래프 변화로 나타나지 않기도 한다(Peake et al. 1997).

#### (1) 순항속도(sustained speed)

물고기의 순항행동은 근육의 피로감이 없이 200분을 초과하여 유지하는 속도범위에 해당한다(Beamish 1987). 순항행동에서 최대순항속도(the maximum sustained speed)란 피로감이 없이 유지할 수 있는 최대속도이다. 순항속도보다 빠른 유영속도는 전진 또는 돌진속도 분류에 해당된다.

#### (2) 전진속도(prolonged speed)

물고기의 전진행동은 20초이상부터 200분이하의 범위내에서 마지막에 피로감을 느끼는 속도범위에 해당한다(Beamish 1987). 전진속도의 분류는 순항속도와 돌진속도사이의 유영속도 범위에 해당한다. 전진속도에서는 물고기가 과도한 육체적 피로감을 느끼지 않으면서 비교적 장시간 유영할 수 있는 속도이다. 이 속도는 암거의 평가와 설계에 일반적으로 적용되는 속도로, 국외의 설계지침서에서도 암거를 통과하는 어도의 평가 또는 설계시 사용을 추천하고 있다.

#### (3) 돌진속도(burst speed)

물고기의 돌진행동은 20초미만의 아주 짧은 시간동안 유지하는 가장 빠른 속도범위에 해당한다(Beamish 1987). 물고기가 암거의 유입 또는 유출부와 같이 고유속의 짧은 구간을 통과할 때 돌진속도를 자주 사용한다.

암거와 같은 인공수로가 생태통로 기능을 하기 위해서는 평상시 평균유속이 전진속도(prolonged speed)를 초과하지 않도록 하여 물고기가 소상 후에도 피로감을 많이 느끼지 않도록 하는 것이 좋다. 전진속도는 물고기가 장시간동안 육체적으로 과도한 긴장감 없이 유지할 수 있는 속도로써 일반적으로 생태통로 기능이 필요한 암거의 설계시 사용된다.

### 2.2 유영행동의 실험방법

물고기가 이동할 때 얼마나 빨리 유영할 수 있는지 그리고 그 유영속도를 유지하는 능력이 얼마나 되는지에 대한 관심과 연구는 18세기 중반부터 지금까지 지속되고 있다. 물고기의 유영행동에 관한 실험방법은 Brett(1964,1967)에 의해 소개된 2가지 실험방법이 많은 학자들의 수많은 견해 차이를 거치면서 지금까지 일반적으로 사용되고 있다.

Brett(1964,1967)의 2가지 실험방법은 고정유속 실험(fixed velocity test)과 증진유속 실험(incremental velocity test)으로 구분되며 물고기의 한계유영속력( $U_{crit}$ )으로 정의되는 물고기의 유산소 유영행동의 극한값을 정량화하기 위한 실험이다. Brett(1964,1967)의 실험 이후 여러 학자들에 의해 수행되는 실험에서는 실험방법별로 유속단계와 실험

시간 등에 관한 기준을 다르게 적용하고 있다. 이는 물고기의 한계유영유속에 영향을 미치는 여러 요소들을 면밀히 분석하고 자연상태에서 가질 수 있는 한계유영속력의 근사치를 파악하기 위함이다.

증진유속방법 실험은 증가되는 유속의 흐름속에서 물고기가 유영하는 힘을 파악하는 실험으로 흐름유속은 절진적으로 증가시키지 않고, 단계별로 유속을 증가시켜 피로가 발생될 때까지 시간을 측정한다. 고정유속방법 실험은 물고기가 흐르는 물속에 노출된 상태로 지정된 유속단계에서 유속의 변화없이 실험하는 방법이다. 실험어종으로 선택된 물고기는 수조에서 적응과정을 거치게 되며 흐름유속은 꾸준히 증가시킨다(Beamish, 1966, 1968; Rulifson, 1977; Davison and Goldspink, 1984). 실험유속에 도달하게 되면 물고기가 피로를 느낄 때까지의 시간을 측정하고 다음 단계를 반복한다. Brett(1967)는 고정유속방법 실험을 통하여 물고기의 50%가 피로를 느낄 때 평균최고순항속력에 해당한다고 보았다.

본 실험적 연구에서는 Brett(1967)에 의해 제안된 2가지 방법인 증진유속방법과 고정유속방법 중에서 물고기의 이동경로와 소상능력을 확인하기에 용이한 고정유속방법을 사용하였다. 또, 효과적인 실험을 위해 실험어종(파라미 100마리, 각시붕어 100마리)이 실험 중에 최적의 건강상태를 유지할 수 있도록 물고기의 적응기간(24시간)과 실험 중 휴식기간을 두었다.

### 3. 고정유속방법 실험

#### 3.1 모형수로와 측정 장비

물고기의 유영행동을 평가하기 위한 실험장비는 크게 모형수로와 측정 장비로 구분된다. 먼저 모형수로는 그림 1과 같이 측면이 유리로 된 실제 수로크기의 실험수로(폭 0.8m, 높이 0.77m, 길이 20m)에 10m 구간에 한하여 거리를 측정할 수 있도록 눈금자와 격자망을 부착하였다. 실험수로에는 펌프시설, 유량조절용 웨어, 정수판, 수로경사가 설치되어 있어 0.1m/s 유속단계별 조절이 가능하다. 그럼 2는 실험수로에서 물고기가 이동하는 유영행동을 수로 위에서 동영상으로 촬영하기 위한 평면 촬영장비(DVR set)이며, 측면촬영은 캠코더를 이용하였다. 유속측정은 그림 3과 같이 1차원 유속계를 이용하여 수행하였으며 수로 횡단면 방향으로 20cm 간격 및 수심방향으로 5구간으로 구분하여 지점유속을 측정한 후 실험수로 횡단면의 유속분포를 구하였다.

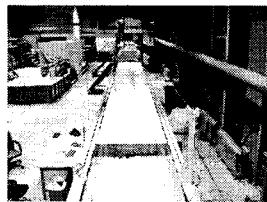


그림 1. 실험 수로

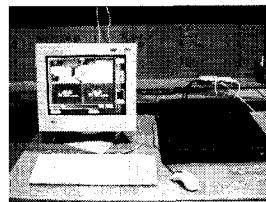


그림 2. 촬영장비

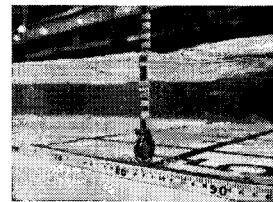


그림 3. 유속계

#### 3.2 유영행동 실험 조건

고정유속방법 실험은 실험수로 내 10m 구간에서 물고기를 유속단계별로 유영시킨 후, 각 유속단계별 소상을 파악함으로써 물고기가 이동 가능한 평균유속을 평가하였다. 고정유속방법 실험은 표 1과 같이 9가지의 유속단계별로 수행하였다.

표 1. 고정유속 실험방법

| Level | 유량( $m^3/s$ ) | 평균수심(m) | 평균유속(m/s) | 경사(%) | 수온(°C) |
|-------|---------------|---------|-----------|-------|--------|
| 1     | 0.008         | 0.038   | 0.28      | 0.1   | 18     |
| 2     | 0.019         | 0.057   | 0.39      | 0.1   |        |
| 3     | 0.030         | 0.071   | 0.48      | 0.1   |        |
| 4     | 0.044         | 0.087   | 0.58      | 0.1   |        |
| 5     | 0.065         | 0.108   | 0.71      | 0.1   |        |
| 6     | 0.082         | 0.124   | 0.83      | 0.1   |        |
| 7     | 0.103         | 0.144   | 0.90      | 0.1   |        |
| 8     | 0.065         | 0.078   | 1.02      | 0.37  |        |
| 9     | 0.057         | 0.065   | 1.1       | 0.50  |        |

### 3.3 소상성공율 측정

#### 3.3.1 소상성공율 측정방법

소상율의 측정은 평면영상을 통하여 수행하였으며, 평면영상 촬영은 실험수로 상부에 CCTV 카메라를 3대 설치하여 10m 구간 전체를 촬영하였다. 소상율의 판단기준은 그림 4~5와 같이 피라미가 실험수로 구간의 중간지점인 5m지점을 통과하는 물고기만 소상한 것으로 평가하였다.

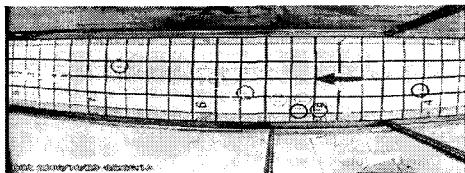


그림 4. 소상을 실험 (소상 전)

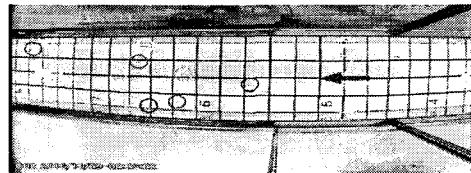


그림 5. 소상을 실험 (소상 후)

#### 3.3.2 소상성공율 측정결과

소상성공율을 측정한 결과 그림 6과 같이 피라미의 경우 평균유속 0.3~1.0m/s까지 유속이 빨라질수록 소상성공율이 감소하는 경향을 나타내다 1.1m/s에서는 소상하지 못하는 것으로 나타났다. 각시봉어의 경우 평균유속 0.3m/s에서는 소상성의지를 보이지 않다가 0.4~0.6m/s까지 소상성공율이 경향을 나타내다 0.7m/s 이상부터는 소상하지 못하는 것으로 나타났다.

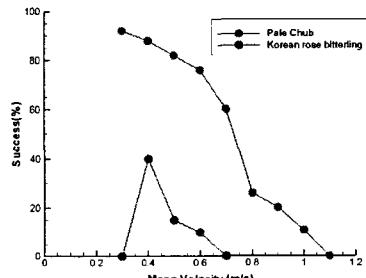


그림 6. 소상성공율 비교 I

표 2. 소상성공율 비교 II

| 평균유속 | 피라미    | 각시봉어   |
|------|--------|--------|
| 0.28 | 92.0 % | 0.0 %  |
| 0.39 | 88.0 % | 25.0 % |
| 0.48 | 82.1 % | 8.0 %  |
| 0.58 | 76.2 % | 3.0 %  |
| 0.71 | 60.7 % | 0.0 %  |
| 0.83 | 26.4 % | 0.0 %  |
| 0.90 | 19.7 % | 0.0 %  |
| 1.02 | 11.5 % | 0.0 %  |
| 1.1  | 0.0 %  | 0.0 %  |

### 3.4 유영속력 측정

#### 3.4.1 유영속력 측정방법

피라미의 유영속력을 측정하기 위해서 먼저 수로 바닥에 0.2m간격으로 격자망을 만들었다. 피라미와 각시봉어는 그림 7~8에서와 같이 수로 바닥에 붙어서 유영하는 것을 확인할 수 있기 때문에 그림 9~10과 같은 수로평면영상을 0.2sec 간격의 이미지를 분석하여 피라미의 이동거리와 시간을 측정함으로써 피라미의 상대속력을 구하였다. 이에 따라 피라미의 상대속력에 수로의 지점유속을 합하여 최종적으로 피라미의 유영속력을 구하였다.



그림 7. 피라미의 유영모습



그림 8. 각시봉어의 유영모습

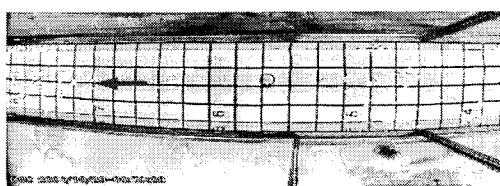


그림 9. 유영속력측정 I

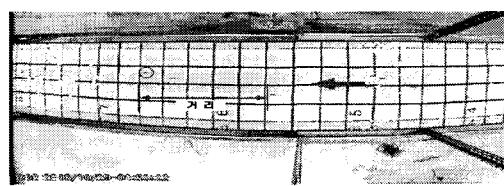


그림 10. 유영속력측정 II

### 3.4.2 유영속력 측정결과

피라미와 각시붕어의 유영속력을 측정한 결과 동일한 평균유속 조건에서도 다양한 유영속력을 보였다. 이는 물고기가 전진속도(prolonged speed)만 사용하여 소상하는 것이 아니라 전진속도와 돌진속도(burst speed)를 번갈아 사용하기 때문으로 추정된다. 평균유속별 피라미와 각시붕어의 유영속력 범위는 그림 10~11과 같다.

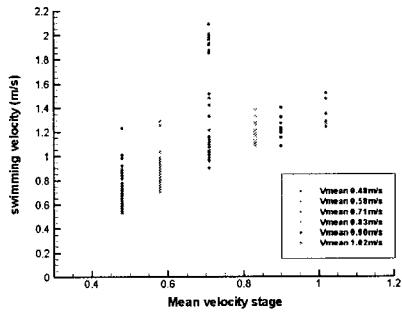


그림 10. 피라미의 유영속력

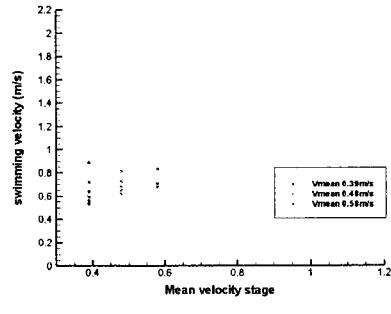


그림 11. 각시붕어의 유영속력

## 4. 결 론

실험결과 방추형(fujiform)인 피라미의 경우 평균유속 0.7~0.8m/s 구간에서 소상성공율이 61%에서 26%로 급격하게 하락하는 현상이 나타났다. 측편형(compressiform)인 각시붕어의 경우 평균유속 0.4m/s에서만 소상성공율이 25%로 나타났으며 나머지 유속에서는 10%이하로 나타났다. 실험어종의 이동경로를 분석한 결과 대부분 수로횡단면내에서 저유속인 수로바닥의 지점을 따라 이동하는 것으로 나타났으며, 이동경로의 지점유속은 평균유속의 70%정도로 나타났다. 실제 하천에 설치된 인공수로가 생태통로의 기능을 유지하기 위해서는 평상시 수리특성이 대상어종의 유영능력을 초과하지 않도록 설계되어야 한다. 특히, 하천에 설치된 인공수로의 길이가 5~10m정도일 경우라면 피라미의 소상 가능성을 50% 이상 확보하기 위해서 평상시 유량조건에서 설계유속이 0.7m/s를 초과하지 않아야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Bates, K., B. Barnard, B. Heiner, J.P. Klavas, P. Powers. (2003) "Design of Road Culverts for Fish Passage." Wash. Dept. Fish & Wildlife, Hab. and Lands Program Env. Eng Div.
2. Chris Bice and Brenton Zampatti (2005) "Swimming ability of small native fish species in the Lower River Murray : suggestions for providing fish passage at culverts"
3. Bestgen,K. R., B. Mefford, J. Bundy, C. Walford, B. Compton, S. Seal, and T. Sorensen. (2003) "Swimminmg performance of Rio Grande silvery minnow."Final Report U. S. Bureau of Reclamation, Albuquerque Area Office, New Mexico. Colorado State University, Larval Fish Laboratory Contribution 132
4. Brett, J. R., (1964) "The respiratory metabolism and performance of young sickeye salmon." J. Fish . Res. Board of Canada, 21, 1183-1226.
5. Blaxter, J. H. S., (1967) "Swimming speeds of fish."FAO Conf. Fish Behav. Relation Fish. Tech. Tactics, Bergen, Norway. Rev. Pap., N0.3, 1-32
6. Hammer C., (1995) "Fatigue and exercise tests with fish." Comp. Biochem. Physiol. 112A, 1-20.
7. FishXing (2006) "FishXing software : version 3." USDA Forest Service, Available : [www.stream.fs.fed.us/fishXing/](http://www.stream.fs.fed.us/fishXing/).