

국내에 서식하는 담수어류 4종에 대한 유영능력 평가

Bold Misheel · 김규진 · 민건우 · 장민호*

공주대학교 생물교육과

Swimming Performance Evaluation of Four Freshwater Fish Species from the South Korea. Bold Misheel (0000-0002-5334-4603), Kyu-Jin Kim (0000-0002-7826-9961), Kun-Woo Min (0000-0003-0639-3282) and Min-Ho Jang* (0000-0003-2331-4232) (Department of Biology Education, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea)

Abstract Swimming performance of fish is an important factor in the survival of fish. Also, swimming performance of fish is used in the form of habitat, or as a condition to consider when creating a fish ladder. However in Korea, researches in swimming performance of Korean freshwater fish were scarce and inadequate in some part, thus fish ladders were installed without considering their swimming performance. Therefore, in this study, we measured swimming performance of 4 Korean freshwater fish species to consider importance of swimming performance test. The fish used in this study were *Carassius auratus*, *Zacco koreanus*, *Gnathopogon strigatus*, *Acheilognathus lanceolata intermedia* species which was collected during October to November, 2018 at Geum River, and measurement for swimming speed of each fish was done by using Loligo[®] System, swim tunnel respirometer in January to February of 2019. The average value of the burst critical swimming speed (U_{crit}) for each species was $0.8 \pm 0.04 \text{ m s}^{-1}$ for *C. auratus*, $0.77 \pm 0.04 \text{ m s}^{-1}$ for *Z. koreanus*, $0.95 \pm 0.04 \text{ m s}^{-1}$ for *G. strigatus*, $0.73 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$ for *A. lanceolata intermedia* and the average value of prolonged critical swimming speed was 0.54 m s^{-1} for *C. auratus*, 0.67 m s^{-1} for *Z. koreanus*, 0.7 m s^{-1} for *G. strigatus*, 0.54 m s^{-1} for *A. lanceolata intermedia*. Since the fish used in this experiment were collected from a small part of the water system in Korea and there were only 4 species, they were not enough to represent the species that inhabit the entire Korean water system. It will be necessary to continue evaluating the swimming performance of other freshwater species in Korea.

Key words: freshwater fish, swimming performance, swim tunnel respirometer, burst critical swimming speed, prolonged critical swimming speed

서 론

어류의 유영능력은 어류의 회유를 포함한 서식처 간 이동 능력을 나타내며, 시공간 분포를 결정짓는 중요한 영향 요인이다(Drucker, 1996). 또한, 유영능력은 어류에 있어 피-포식,

배우자, 서식처 선택 등 많은 종의 어류와 다른 수생 동물들 사이에서 생존을 결정짓는 중요한 특징으로 작용되는데 (Taylor and McPhail, 1986), 대부분 어류는 포식자에 대항할 물리적 방어 수단이 부족하므로, 포식자의 공격을 피하는 방법으로 유영을 통한 회피를 사용한다(Videler, 1993; Reidy et al., 1995; Watkins, 1996). 따라서 유영능력 측정을 실행하여 생태 복원 시 생태 유량 선정, 서식처 적합도 평가 등 서식처 조성 및 평가에 활용할 수 있다.

어류 유영속도는 순항속도(Sustained swimming speed), 전

Manuscript received 29 May 2019, revised 14 June 2019,
revision accepted 14 June 2019

* Corresponding author: Tel: +82-41-850-8285, Fax: +82-41-850-8842,
E-mail: jangmino@kongju.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

진속도(Prolonged swimming speed), 돌진속도(Burst swimming speed)의 세 가지 범주로 구분된다(Beamish, 1966). 순항속도는 유산소 운동으로서 근육의 피로감 없이 오랜 시간 동안 [240분 초과(Beamish, 1966) 혹은 200분 초과(Brett, 1967)] 유지할 수 있는 속도로 정의된다. 전진속도 또한 유산소 운동이지만, 순항속도보다 조금 더 짧은 일정 기간(20초 이상 200분 이하) 동안 유지되는 속도로(Beamish, 1978), 어류가 육체적으로 과도하게 피로하지 않으면서 장시간 유지할 수 있는 유영속도를 의미한다. 일반적으로 순항속도는 현장에서의 피로도 측정이 어렵기 때문에 자연 서식지에서 전진속도와 구분하기 어렵다는 문제가 있다. 이로 인해 피로도 판단이 용이한 유영능력측정기구를 활용하여 속도를 측정한다(Beamish, 1978). 돌진속도는 아주 짧은 기간(20초 미만)만 유지할 수 있는 어류의 가장 빠른 유영속도이며(Beamish, 1978), 무산소 운동으로 고려되고 있다. 이와 같은 돌진속도는 포식과 피식 활동, 그리고 갑작스럽게 강한 수류 변화가 생겼을 때 주로 사용되고 측정된다(Reidy *et al.*, 2000).

어류의 유영능력은 어류의 구조적 특징과 행동적 특징으로 다음과 같은 요인에 의해 좌우된다(Videler, 1993). 1) 유영능력은 종 특이적 신체 형상(Webb, 1984), 지느러미 유형(Webb, 1984; Videler, 1993), 근기능(Webb and Weihs, 1983), 유영방식(Webb and Weihs, 1983)에 의해 측정된다. 2) 임계유영속도는 개체크기에 따라 증가한다(Beamish, 1978; Videler, 1993). 3) 변온동물의 유영능력은 온도 의존적이다(Wardle, 1980; Taylor *et al.*, 1996). 4) 유영능력은 어류의 개체발생 단계에 따라 달라진다(Webb and Weihs, 1986).

국외 연구는 어류 유영능력 및 속도와 관련하여 다양한 어류 종들을 대상으로 수행되었으며(Videler and Wardle, 1991; Drucker, 1996; van Damme and van Dooren, 1999) 전장대비속도(per unit body length speed, TL s⁻¹)(van Damme and van Dooren, 1999)가 임계유영속도(U, m s⁻¹)보다 생태계와 적절한지에 대한 논란이 부각되어 왔다(Drucker, 1996). Tierney (2011)은 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)를 대상으로 전진속도와 돌진속도 및 산소 소비율과 같은 기초적인 유영능력을 평가하였다. Jain *et al.* (1998)은 어류의 상태 및 수질 상황을 고려하여 홍연어(*Oncorhynchus nerka*)에 대한 유영 특성 및 회복 시간에 대해 실험하였다(Kang and Kim, 2016). Brett (1964)은 홍연어를 여러 수온 조건(5, 10, 15, 20, 24°C)에서 호흡대사 혹은 산소 소비를 다양한 유영속도를 통해 측정된 결과 수온의 영향은 돌진속도보다 순항속도에 더 많은 영향을 끼친다고 보고하였다. Anderson *et al.* (2001)은 도미과의 식용어(*Stenotomus chrysops*)와 별상어(*Mustelus canis*)를 대상으로 어종별 꼬리를 이용한 유동 상태를 측정하여 운동 메커니즘에 대

한 연구를 수행하였다. Penghan *et al.* (2015)은 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus*) 치어를 상대로 개체의 유영능력과 굽주림의 연관성을 15°C와 25°C 수온 조건에서 실험하였으며, *R. ocellatus*의 전진속도와 돌진속도는 4~6주에 의한 굽주림으로 반 치사 상태가 되어도 정상 상태와 비교했을 때 확연한 차이는 없었다는 결과가 나왔다.

어류의 유영능력 및 소상에 대한 국내 연구 분석 자료는 어도의 효과 검증, 효율성을 위한 연구가 대부분이다(Kang and Kim, 2016). 어도는 구조에 따라 유속 및 유량, 흐름의 방향 등이 상이하므로 어류의 유영능력에 따라 다양한 어도 내에서의 이동 가능성과 이로 인한 통과정도가 달라질 수 있다. Kang and Kim (2016)은 외래어종 관리를 위해 큰입우럭(*Micropterus salmoides*)과 파랑볼우럭(*Lepomis macrochirus*)을 대상으로 소상 실험을 실행하였으며, 실험 결과 개체 크기나 어종에 상관없이 유속이 빠를수록 소상하는 외래어종은 감소하는 것으로 나타났다. Hwang과 Hur (2000)는 남대천과 오십천의 어도와 소하성 어류를 조사한 결과 어도의 구조는 소하성 어류의 이동에 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다. Park *et al.* (2008)은 피라미의 유영 특성에 관한 실험적 연구를 실행한 결과 어류의 한계유영속도가 체장뿐만 아니라 물고기의 체형과 습성에 따라 차이가 있다는 것이 확인되었으며, 향후 피라미의 유영 특성에 관한 연구는 치어, 유어, 성어를 대상으로 실행하여 어도의 합리적인 설계기준을 제시하였다. Bae *et al.* (2011)은 PIV (Particle Imaging Velocimetry)를 이용하여 기수영역에서 소상 및 소하를 하며 어도를 이용하는 대표적인 어류인 은어(*Plecoglossus altivelis*)의 유영능력을 측정하여 효과적인 어도 설계를 위한 기초자료로 활용하였으며, 향후 어도를 이용하는 다양한 주요 어종을 대상으로 어류 형태에 따른 유영 특성을 분석하여 대상 어종에 맞는 맞춤형 어도를 설계하는 것이 중요하다고 판단했다.

국내에서는 담수어류의 유영능력 평가에 대한 연구가 외국에 비해 부족한 면이 있어 어류의 유영능력이 고려되지 않은 상태에서 어도들이 설치되었다. 따라서 향후 효율성 높은 어도를 현장에 적용하기 위해서는 국내에 서식하는 보다 다양한 어종의 유영능력을 평가하고, 이 결과가 어도의 설계, 시공에 반영되어야 한다. 특히, 어도의 효율을 높이기 위해서는 국내 수계의 우점종 어류, 어도초 이용하는 회유성 담수어류에 대한 유영능력 평가가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 일반적으로 서식하는 담수어류인 잉어과(*Cyprinidae*) 4종 붕어(*Carassius auratus*), 참갈겨니(*Zacco koreanus*), 줄몰개(*Gnathopogon strigatus*), 납자루(*Acheilognathus lanceolata intermedia*)를 대상으로 실험을 실행하여 유영능력 평가의 필요성을 제고하고자 한다.

Table 1. Burst swimming speed measurement result of *Cyprinidae*.

Species name	No.	Total length (mm)	Body weight (g)	U_i ($m s^{-1}$)	T_i (Seconds)	$U_{crit} \pm s.e.$ ($m s^{-1}$)	$TL s^{-1} \pm s.e.$
<i>C. auratus</i>	1	68	3.5	0.72	14.4	0.79 ± 0.02	11.65 ± 0.21
	2	85	8.3	0.86	10.2	0.91 ± 0.03	10.72 ± 0.23
	3	95	8.8	0.56	16.6	0.64 ± 0.04	6.77 ± 0.41
	4	100	15.3	0.64	8.2	0.68 ± 0.04	6.81 ± 0.36
	5	115	19.8	0.84	5.72	0.87 ± 0.06	7.55 ± 0.41
	6	120	26.2	0.84	8.4	0.88 ± 0.03	7.35 ± 0.18
	7	180	94.5	0.74	12.8	0.80 ± 0.03	4.47 ± 0.21
	8	190	99.3	0.84	9.4	0.89 ± 0.09	4.67 ± 0.48
	9	195	103.5	0.66	15	0.74 ± 0.04	3.77 ± 0.23
<i>Z. koreanus</i>	1	90	6.8	0.56	13.4	0.63 ± 0.06	6.97 ± 0.56
	2	92	10.5	0.82	11.8	0.88 ± 0.04	9.55 ± 0.28
	3	95	6.5	0.7	11.8	0.76 ± 0.03	7.99 ± 0.27
	4	100	8.2	0.76	11.8	0.82 ± 0.02	8.19 ± 0.19
	5	110	9.2	0.68	12.4	0.74 ± 0.03	6.75 ± 0.24
	6	110	9.7	0.76	6.2	0.79 ± 0.03	7.19 ± 0.2
	7	115	12.3	0.7	10.2	0.75 ± 0.04	6.53 ± 0.29
<i>G. strigatus</i>	1	68	3.5	1	10.2	1.05 ± 0.01	15.46 ± 0.1
	2	75	4.5	0.96	9.8	1.01 ± 0.06	13.45 ± 0.49
	3	75	4.9	0.82	13.2	0.89 ± 0.04	11.81 ± 0.39
	4	80	5.5	0.82	10.4	0.87 ± 0.03	10.9 ± 0.28
	5	85	7.2	0.88	6	0.91 ± 0.04	10.71 ± 0.36
<i>A. lanceolata intermedia</i>	1	80	5.2	0.72	9.8	0.77 ± 0.03	9.6 ± 0.28
	2	80	5.8	0.68	9.8	0.73 ± 0.02	9.11 ± 0.19
	3	93	8.5	0.76	8.4	0.80 ± 0.02	8.62 ± 0.15
	4	95	10.2	0.58	12.8	0.64 ± 0.03	6.78 ± 0.31
	5	100	10.2	0.66	9.2	0.71 ± 0.03	7.06 ± 0.26

이 중 붕어(*C. auratus*), 참갈겨니(*Z. koreanus*)와 납자루(*A. lanceolata intermedia*)는 국내 수계 전반에 서식하고 있는 종으로 어도 설치구간에 주로 분포하고 있는 종이다.

재료 및 방법

1. 어류 채집

본 연구에서는 국내 수계 전반에 걸쳐 서식하고 있는 대표적인 담수어류인 잉어과 4종을 대상으로 수영능력을 평가하였다. 실험에 사용된 어류는 2018년 9월부터 11월까지 금강 수계의 지류인 초강(충청북도 영동군 황간면 우천리), 갑천(대전광역시 유성구 구즉동)에서 투망(망목 7 mm)과 족대(망목 4 mm)를 이용하여 채집하였으며, 채집된 붕어(*C. auratus*) 9개체(평균 전장 127.56 ± 45.45 mm), 참갈겨니(*Z. koreanus*) 7개체(평균 전장 101.71 ± 9.21 mm), 줄몰개(*G. strigatus*) 5개체(평균 전장 76.6 ± 5.68 mm), 납자루(*A. lanceolata intermedia*) 5개체(평균 전장 89.6 ± 8.16 mm)를

실험에 사용하였다. 채집된 어류는 25°C 조건에서 7일 동안 순치시킨 후 실험에 사용하였다.

2. 수영능력 측정 방법

임계유영속도 측정은 1월에서 2월까지 진행되었으며, 측정방법은 다음과 같다. 먼저 Ethyl 3-aminobenzoate methanesulfonate salt (Sigma-Aldrich Corporation of United States of America)를 이용하여 마취제(1 g/1 L)를 제조하여 채집한 개체들을 마취시켰다. 그 후, 각 개체별 전장(Total Length, mm), 체중(Body weight, g)을 측정하였다(Table 1). 개체 크기 측정이 완료된 개체들은 회복 및 실험을 위하여 실험실에 조성된 25°C 순치용 사육 수조(43.5×32×29 cm)에서 24시간 회복기간을 가졌다.

휴식기를 거친 개체들을 수영능력측정기(Swim tunnel respirometer, Loligo® System)로 옮긴 후 15분 동안 0.1 m s⁻¹의 유속에서 순치시켰다(Loligo® System Swim Tunnels User Manual). 이후 0.2 m s⁻¹부터 돌진속도 실험의 경우 20 초 간격으로, 전진속도 실험의 경우 10분 간격으로 0.1 m s⁻¹

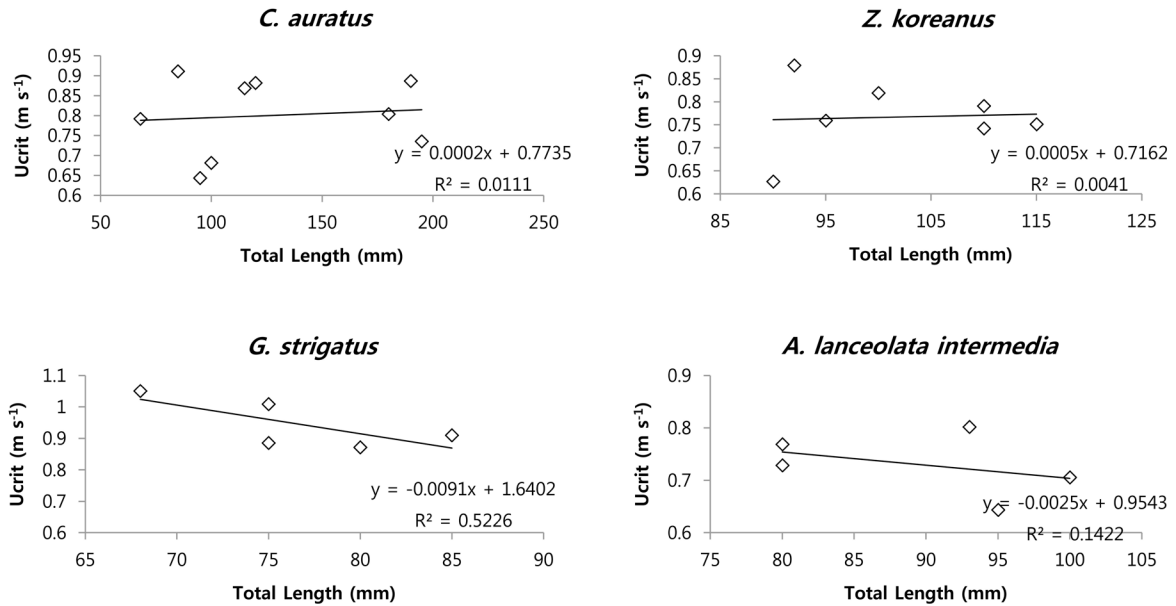


Fig. 1. Burst critical swimming speed in relation to total length of *C. auratus*, *Z. koreanus*, *G. strigatus* and *A. lanceolata intermedia*.

씩 유속을 높여 유영능력을 측정하였다. 개체가 3초간 유영하지 않거나, 못할 시 측정을 종료하였다(Tierney, 2011). 유영능력 측정을 수행한 개체는 24시간의 휴식시간을 제공하였다. 어류의 돌진속도 측정은 최소 5번, 전진속도 측정은 1번만 실행하였다.

이렇게 측정된 돌진속도와 전진속도를 이용해 U_{crit} (Critical swimming speed)와 $TL s^{-1}$ (Relative swimming speed)를 산출하였다(Table 1). U_{crit} 를 계산할 때에는 다음과 같이 산출하였다(Brett, 1964).

$$U_{crit} = U_i + (U_{ii} \times (T_i/T_{ii})) \quad (1)$$

여기서 U_i 는 최종 유지 속도, U_{ii} 는 실험에서 설정한 구간별 유속 차로 본 실험에서는 $0.1 m s^{-1}$ 로 설정하였으며, T_i 는 개체가 U_i 에서 버틴 시간, T_{ii} 는 각 구간별 설정 시간이다. $TL s^{-1}$ 를 계산할 때에는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$TL s^{-1} = U_{crit} / TL \quad (2)$$

이는 해당 개체의 U_{crit} 값을 전장(Total Length)으로 나눈 값이다.

결과 및 고찰

1. 각 종별 임계유영속도(U_{crit})

각 종별 돌진속도의 U_{crit} 평균값은 붕어(*C. auratus*) $0.8 \pm$

$0.04 m s^{-1}$, 참갈겨니(*Z. koreanus*) $0.77 \pm 0.04 m s^{-1}$, 줄몰개(*G. strigatus*) $0.95 \pm 0.04 m s^{-1}$, 납자루(*A. lanceolata intermedia*) $0.73 \pm 0.03 m s^{-1}$ 로 측정되었다(Table 1).

전장(Total Length)에 대한 돌진속도 U_{crit} 의 값을 종별로 그래프로 나타낸 결과, *C. auratus*와 *Z. koreanus*는 양의 상관관계를 보였으며, *G. strigatus*와 *A. lanceolata intermedia*는 음의 상관관계를 보였다(Fig. 1). Videler and Wardle (1991)에 의하면 *C. auratus*의 전장과 돌진속도는 양의 상관관계를 보여 본 실험과 유사하게 나타났다. 반면 Penghan *et al.* (2015)에 의하면 납자루아과 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus*)의 전장과 돌진속도는 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났는데, 이는 실험에서 사용된 *R. ocellatus*가 먹이 섭식을 하지 않은 점과 체장 길이(평균 34.7 mm)가 짧은 것과 연관이 있을 것으로 추측된다.

각 종별 전진속도의 U_{crit} 평균값은 *C. auratus* $0.54 m s^{-1}$, *Z. koreanus* $0.67 m s^{-1}$, *G. strigatus* $0.7 m s^{-1}$, *A. lanceolata intermedia* $0.54 m s^{-1}$ 로 측정되었다(Table 2). Park *et al.* (2008)의 전진속도 실험 결과 8개체의 붕어(평균 전장±표준편차, $143 \pm 14 mm$)는 $0.5 m s^{-1}$, 6개체의 피라미(*Zacco platypus*, $89 \pm 11 mm$)는 $0.7 m s^{-1}$, 3개체의 납자루아과 각시붕어(*Rhodeus uyekii*, $42 \pm 6 mm$)는 $0.4 m s^{-1}$ 로 나타나 본 실험과 유사하게 나타났다. Park *et al.* (2015)의 유영능력 평가에서는 *Z. platypus*와 갈겨니(*Zacco temminckii*)의 전진속도는 각각 평균 $0.42 m s^{-1}$ 와 $0.44 m s^{-1}$ 로 본 실험의 *Z. koreanus*와 차이를 보였는데, 이는 해당 개체들의 체장이 비

Table 2. Prolonged swimming speed measurement result of *Cyprinidae*.

Species name	No.	Total length (mm)	Body weight (g)	U_i ($m s^{-1}$)	T_i (Seconds)	U_{crit} ($m s^{-1}$)	$TL s^{-1}$
<i>C. auratus</i>	1	68	3.5	0.40	78	0.41	6.07
	2	85	8.3	0.60	303	0.65	7.65
	3	95	8.8	0.50	600	0.60	6.32
	4	100	15.3	0.40	150	0.43	4.25
	5	115	19.8	0.50	178	0.53	4.61
	6	120	26.2	0.50	76	0.51	4.27
	7	180	94.5	0.70	485	0.78	4.34
	8	190	99.3	0.50	180	0.53	2.79
	9	195	103.5	0.40	194	0.43	2.22
<i>Z. koreanus</i>	1	90	6.8	0.70	90	0.72	7.94
	2	92	10.5	0.50	30	0.51	5.49
	3	95	6.5	0.50	130	0.52	5.49
	4	100	8.2	0.70	157	0.73	7.26
	5	110	9.2	0.80	352	0.86	7.81
	6	110	9.7	0.60	289	0.65	5.89
	7	115	12.3	0.70	200	0.73	6.38
<i>G. strigatus</i>	1	68	3.5	0.80	358	0.86	12.64
	2	75	4.5	0.60	290	0.65	8.64
	3	75	4.9	0.60	120	0.62	8.27
	4	80	5.5	0.80	220	0.84	10.46
	5	85	7.2	0.50	334	0.56	6.54
<i>A. lanceolata intermedia</i>	1	80	5.2	0.60	60	0.61	7.63
	2	80	5.8	0.40	583	0.50	6.21
	3	93	8.5	0.50	120	0.52	5.59
	4	95	10.2	0.60	30	0.61	6.37
	5	100	10.2	0.40	366	0.46	4.61

교적 짧기 때문으로 판단된다. 한편, Penghan *et al.* (2015)의 실험에서는 *R. ocellatus*의 전진속도가 평균 $0.53 m s^{-1}$ 로 제시되어 본 실험의 *A. lanceolata intermedia*의 전진속도인 $0.54 m s^{-1}$ 와 유사하게 나타났다.

전장에 대한 전진속도 U_{crit} 의 값을 종별로 그래프로 나타낸 결과, *C. auratus*와 *Z. koreanus*는 양의 상관관계를 보였으며, *G. strigatus*와 *A. lanceolata intermedia*는 음의 상관관계를 보였다(Fig. 2). Videler and Wardle (1991)에 의하면 *C. auratus*의 전장과 전진속도는 양의 상관관계를 보여 본 실험과 유사하게 나타났다. Park *et al.* (2015)에 의하면 *Z. platypus*의 전장과 전진속도는 음의 상관관계를 보였지만, *Z. temminckii*의 경우 양의 상관관계를 보이며 본 실험의 *Z. koreanus*도 양의 상관관계를 보여 유사한 결과를 보여주었다. Penghan *et al.* (2015)에 의하면 *R. ocellatus*의 전장과 전진속도는 양의 상관관계를 보인 것과 다르게, 본 실험의 *A. lanceolata intermedia*는 음의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 개체의 크기가 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

실험에 사용된 *Cyprinidae*의 돌진속도와 전진속도를 분

석한 결과, *G. strigatus*가 다른 개체들에 비해 가장 빨랐고, *A. lanceolata intermedia*가 가장 느렸다. *C. auratus*와 *Z. koreanus*은 돌진속도에서 비슷한 유속을 보였으나, 전진속도에서는 *C. auratus*가 *Z. koreanus*에 비해 속도가 느려지는 경향이 나타났으며, *A. lanceolata intermedia*와 비슷한 전진속도를 보이며 *C. auratus*의 피로한도가 낮다는 것을 보여주었다. *Z. koreanus*의 전진속도와 돌진속도의 차이를 비교한 바, *Z. koreanus*가 유영속도를 다른 개체들에 비해 높게 유지하는 경향을 보이며 지구력이 높은 것으로 나타났다. 또한, *Z. koreanus*의 1번과 5번 개체의 전진속도가 각각 $0.72 m s^{-1}$; $0.86 m s^{-1}$ 로 개체의 돌진속도($0.63 m s^{-1}$; $0.74 m s^{-1}$)보다 빠른 것으로 나타나, 개체별 컨디션이나 개별 반응양식에 따라 다른 결과가 도출될 것으로 판단된다.

2. 각 종별 전장대비속도($TL s^{-1}$)

각 종별 돌진속도의 $TL s^{-1}$ 평균값은 *C. auratus* $7.08 \pm 0.3 TL s^{-1}$, *Z. koreanus* $7.6 \pm 0.29 TL s^{-1}$, *G. strigatus* $12.47 \pm 0.32 TL s^{-1}$, *A. lanceolata intermedia* $8.24 \pm 0.24 TL s^{-1}$ 로

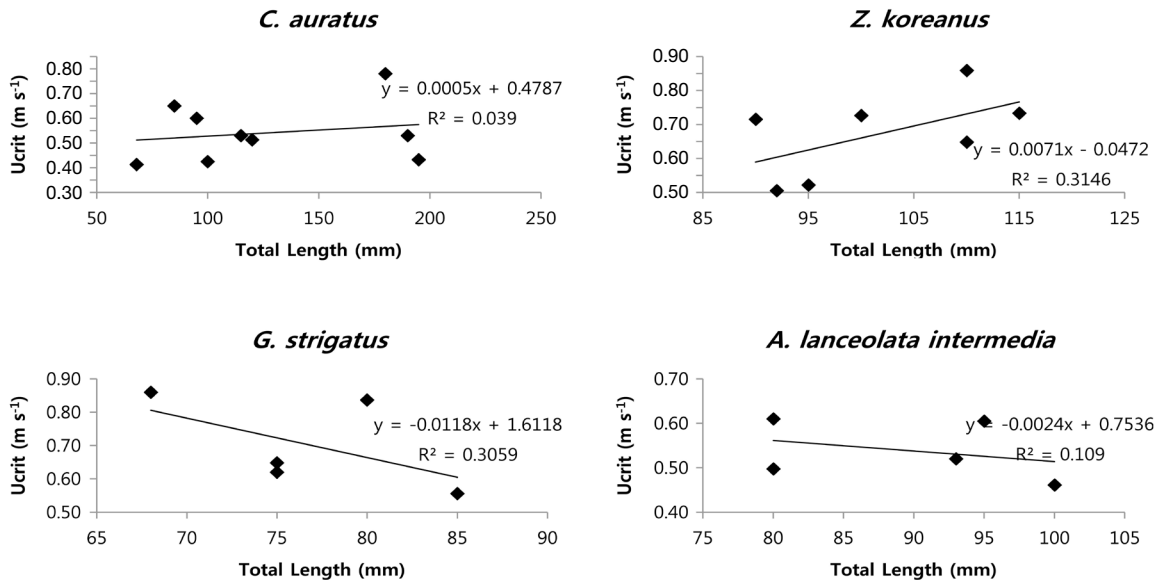


Fig. 2. Prolonged critical swimming speed in relation to total length of *C. auratus*, *Z. koreanus*, *G. strigatus* and *A. lanceolata intermedia*.

측정되었다(Table 1, Fig. 3 (A)). 실험에 사용된 *Cyprinidae* 종별 돌진속도의 U_{crit} 값을 전장에 따라 비교한 결과 80~89 mm 범위 개체의 경우 80 mm의 *G. strigatus*가 $10.9 TL s^{-1}$ 로 가장 빠르며, 80 mm의 *A. lanceolata intermedia*가 $9.11 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다. 90~99 mm의 경우 92 mm의 *Z. koreanus*가 $9.55 TL s^{-1}$ 로 가장 빠르며, 95 mm의 *C. auratus*가 $6.77 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다. 100~109 mm의 경우 100 mm의 *Z. koreanus*가 $8.19 TL s^{-1}$ 로 가장 빨랐고, 100 mm의 *C. auratus*가 $6.81 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다. 110~119 mm의 경우 115 mm의 *C. auratus*가 $7.55 TL s^{-1}$ 로 가장 빨랐고, 115 mm의 *Z. koreanus*가 $6.53 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다.

각 종별 전진속도의 $TL s^{-1}$ 평균값은 *C. auratus* $4.72 TL s^{-1}$, *Z. koreanus* $6.61 TL s^{-1}$, *G. strigatus* $9.31 TL s^{-1}$, *A. lanceolata intermedia* $6.08 TL s^{-1}$ 로 측정되었다(Table 2, Fig. 3 (B)). 실험에 사용된 *Cyprinidae* 종별 전진속도의 U_{crit} 값을 전장에 따라 비교한 결과 80~89 mm 범위 개체의 경우 80 mm의 *G. strigatus*가 $10.46 TL s^{-1}$ 로 가장 빠르며, 80 mm의 *A. lanceolata intermedia*가 $6.21 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다. 90~99 mm의 경우 90 mm의 *Z. koreanus*가 $7.94 TL s^{-1}$ 로 가장 빠르며, 92 mm와 95 mm의 *Z. koreanus*가 $5.49 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다. 100~109 mm의 경우 100 mm의 *Z. koreanus*가 $7.26 TL s^{-1}$ 로 가장 빨랐고, 100 mm의 *C. auratus*가 $4.25 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다. 110~119 mm의 경우 110 mm의 *Z. koreanus*가 $7.81 TL s^{-1}$ 로 가장 빨랐고, 115 mm의 *C. auratus*가 $4.61 TL s^{-1}$ 로 가장 느렸다.

전장에 대한 $TL s^{-1}$ 의 값을 종별로 그래프로 나타낸 결과,

본 실험에서 사용된 *Cyprinidae*는 전체적으로 음의 상관관계를 보였다(Fig. 3). 이는 Videler and Wardle (1991)에서 사용된 *C. auratus*와 Park et al. (2015)에서 사용된 *Z. platypus*와 *Z. temminckii*의 결과가 본 실험과 유사한 것으로 나타났다. Penghan et al. (2015)에서는 *R. ocellatus*의 전장에 대한 $TL s^{-1}$ 그래프는 본 실험의 *A. lanceolata intermedia*가 음의 상관관계를 보인 것과 다르게 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 개체의 크기가 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

어류의 유연능력은 종별로 차이가 있으며, 서식환경에 영향을 받는다. 어류의 유연능력은 어류가 선호하는 서식환경 파악에 중요한 특성뿐 아니라 회유성 어종의 이동을 파악하는데 있어 중요한 요인이 된다. 본 실험에서 측정된 어종별 속도는 어도 설치 시 서식하는 종에 대한 기초자료, 생태 하천 복원 시 어류의 서식 및 산란장 조성, 생태유량 산정 시 자료로 활용할 수 있다. 본 실험에서는 금강 수계에서 채집된 *Cyprinidae* 어류 4종에 한하여 수행되었으므로, 추후 지속적인 실험을 통해 다양한 어종에 대한 체장 및 전장의 길이에 대한 유연능력 정보를 정량화하여 데이터를 확보할 경우, 대상 수계 어류 군집에 대한 보다 정확한 결과와 이에 대한 활용방안이 도출될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 *G. strigatus*의 경우 해당 종에 대한 특성 연구가 부족한 실정으로 향후 다양한 학술적 조사 연구가 필요하다. 또한 어종별 유연에 필요한 용존 산소량에 대해 추가적으로 센서를 도입하여 산소 소모량을 산출하거나 온도 등의 변수에 따른 유연능력의 변화를 분석함으로써 대상 수체의 수질에 의한 유

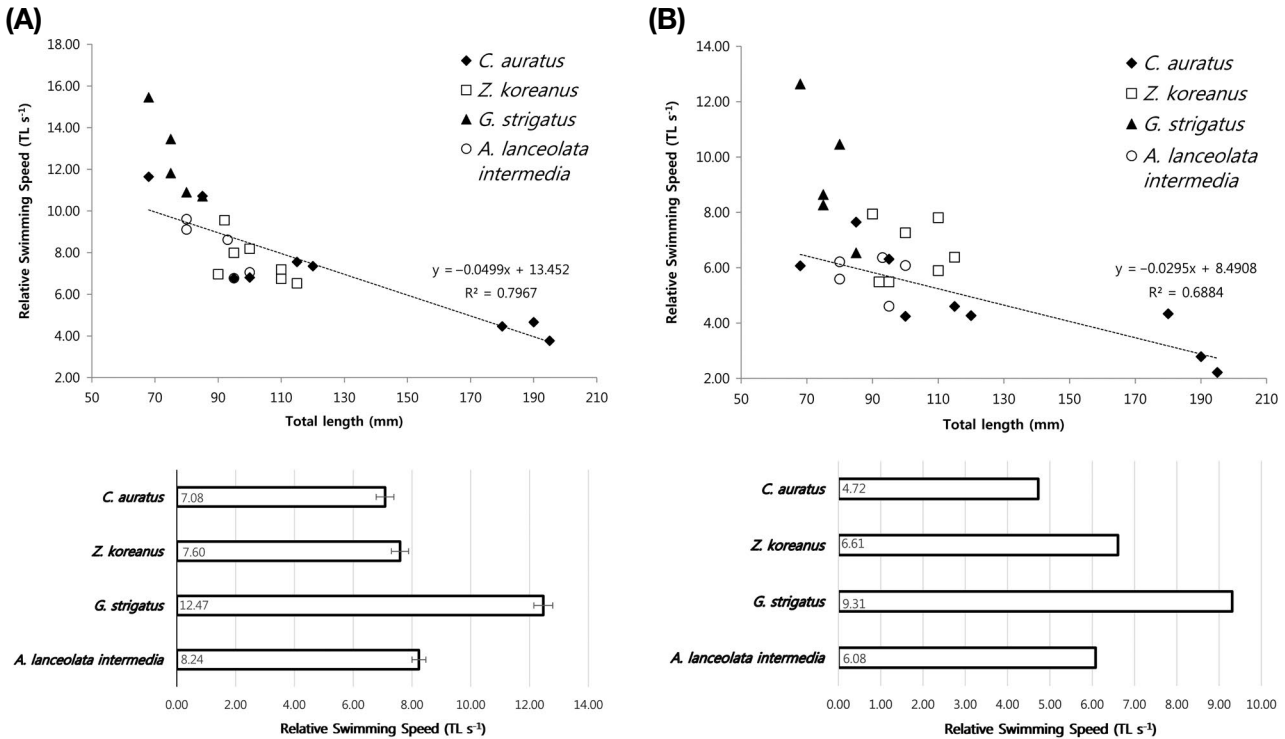


Fig. 3. Relative swimming speed relation to total length of *C. auratus*, *Z. koreanus*, *G. strigatus* and *A. lanceolata intermedia*. (A) Burst swimming speed (B) Prolonged swimming speed.

영능력의 반응양식에 대한 분석이 가능할 것으로 판단된다. 추후 이러한 점을 보완하여 연구가 지속적으로 진행되면 국내에서 서식하는 어류의 종별, 체장별 유영능력을 정확하게 평가하여 어도를 통한 하천의 연결성 확보에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

어류의 유영능력은 어류의 생존을 결정짓는 중요한 요인이다. 또한, 어류의 유영능력 측정값은 어도 설치 시 서식하는 종에 대한 기초자료, 생태 하천 복원 시 어류의 서식 및 산란장 조성, 생태유량 산정 시 자료로 활용할 수 있다. 그러나 국내의 경우 담수어류의 유영능력에 대한 연구가 거의 이루어지지 않거나, 부족한 면이 있기 때문에 어류의 유영능력이 고려되지 않은 상태에서 어도들이 설치되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 금강 수역에서 서식하는 붕어(*Carassius auratus*), 참갈겨니(*Zacco koreanus*), 줄몰개(*Gnathopogon strigatus*), 납자루(*Acheilognathus lanceolata intermedia*)를 대상으로 유영능력측정기(Swim tunnel respirometer, Loligo® System)를 사용하여 돌진속도, 전진속도를 포함한

유영속도를 측정하였다. 종별 평균 돌진속도의 U_{crit} (임계 유영속도) 값은 붕어(*C. auratus*) $0.8 \pm 0.04 \text{ m s}^{-1}$; 참갈겨니(*Z. koreanus*) $0.77 \pm 0.04 \text{ m s}^{-1}$; 줄몰개(*G. strigatus*) $0.95 \pm 0.04 \text{ m s}^{-1}$; 납자루(*A. lanceolata intermedia*) $0.73 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$ 로 측정되었고, 각 종별 평균 전진속도의 U_{crit} 값은 *C. auratus* 0.54 m s^{-1} , *Z. koreanus* 0.67 m s^{-1} , *G. strigatus* 0.7 m s^{-1} , *A. lanceolata intermedia* 0.54 m s^{-1} 로 측정되었다. 본 실험에서 사용된 어류는 금강 수계에서 채집된 담수어류 중 4종만을 선정하여 실험이 진행되었기 때문에 한국의 전체 수계에 서식하는 해당 종을 대표하기에는 부족한 면이 있지만, 해당 수계에 서식하는 종의 특성 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 국내에 서식하는 보다 다양한 담수어류에 대한 유영능력 평가가 필요하며, 이들 자료를 활용한 어도를 통한 하천의 연결성 확보가 요구된다.

저자기여도 개념설정: 장민호, 방법론: 장민호, 자료수집 및 분석: Bold Misheel, 김규진, 민건우, 원고 초안작성: Bold Misheel, 장민호, 원고 교정: 김규진, 민건우, 원고 편집: Bold Misheel, 민건우, 과제관리: 장민호. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 이 논문은 2017년 공주대학교 학술연구지원사업 (2017-0157-01)의 연구지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Anderson, E.J., W.R. McGillis and M.A. Grosenbaugh. 2001. The Boundary Layer of Swimming Fish. *Journal of Experimental Biology* **204**: 81-102.
- Bae, J.H., K.H. Lee, J.K. Shin, Y.S. Yang and J.H. Lee. 2011. Measurement of Swimming Ability of Silver Fish (*Plecoglossus altivelis*) using a Particle Imaging Velocimetry. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology* **47**(4): 411-418.
- Beamish, F.W.H. 1966. Swimming endurance of some Northwest Atlantic fishes. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **23**: 341-347.
- Beamish, F.W.H. 1978. Swimming capacity. *Fish Physiology* **7**: 101-187.
- Brett, J.R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **21**: 1183-1226.
- Brett, J.R. 1967. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **24**: 1731-1741.
- Drucker, E.G. 1996. The use of gait transition speed in comparative studies of fish locomotion. *Integrative and Comparative Biology* **36**(6): 555-566.
- Hwang, C.S. and H. Hur. 2000. Fish Migration through Fishways on Namdae-cheon in Yangyang and Osib-cheon in Yungdeok. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **42**(5): 70-77.
- Jain, K.E., I.K. Birtwell and A.P. Farrell. 1998. Repeat Swimming Performance of Mature Sockeye Salmon following a Brief Recovery Period. *Journal of Zoology* **76**(8): 1488-1496.
- Kang, J.G. and J.T. Kim. 2016. Experiment and Assessment of Ascending Capability for Management of Exotic Fish Species. *Journal of the Korea Academia-Industrial* **17**(9): 265-278.
- Park, S.Y., S.J. Kim, S.H. Lee and B.M. Yoon. 2008. An Experimental Study on the Swimming Performance of Pale Chub (*Zacco platypus*). *Journal of Korea Water Resources Association* **41**(4): 423-432.
- Park, S.D., M.W. Yoon and S.Y. Park. 2015. Evaluation of Swimming Ability of *Zacco platypus* and *Zacco temminckii* by Fish-hydraulic Experiments. *KSCE 2015 CONVENTION 2015 CIVIL EXPO & CONFERENCE*, 2015. 10, 171-172.
- Penghan, L.Y., X. Pang and S.J. Fu. 2015. The effects of starvation on fast-start escape and constant acceleration swimming performance in rose bitterling (*Rhodeus ocellatus*) at two acclimation temperatures. *Fish physiology and biochemistry*.
- Reidy, S.P., J.A. Nelson, Y. Tang and S.R. Kerr. 1995. Post-exercise metabolic rate in Atlantic cod and its dependence upon the method of exhaustion. *Journal of Experimental Biology* **47**: 377-386.
- Reidy, S.P., S.R. Kerr and J.A. Nelson. 2000. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod. *Journal of Experimental Biology* **203**: 347-357.
- Remen, M., F. Solstorm, S. Bui, P. Klebert, T. Vagseth, D. Solstorm, M. Hvas and F. Oppedal. 2016. Critical swimming speed in groups of Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquaculture Environment Interactions* **8**: 659-664.
- Richard, B. 1957. The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat. *Journal of Experimental Biology* **1958** **35**: 109-133.
- Taylor, E.B. and J.D. McPhail. 1986. Prolonged and burst swimming in anadromous and freshwater sticklebacks, *Gasterosteus aculeatus*. *Canadian Journal of Zoology* **64**: 416-420.
- Taylor, S.E., S. Egginton and E.W. Taylor. 1996. Seasonal temperature acclimatisation of rainbow trout: cardiovascular and morphometric influences on maximal sustainable exercise level. *Journal of Experimental Biology* **199**: 835-845.
- Tierney, K.B. 2011. Swimming Performance Assessment in Fishes. *Journal of Visualized Experiments*. **51**: 2572.
- Van Damme, R. and T.J.M. van Dooren. 1999. Absolute versus per unit body length speed of prey as an estimator of vulnerability to predation. *Animal Behaviour* **57**: 347-352.
- Videler, J.J. and C.S. Wardle. 1991. Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance. *Review in Fish Biology and Fisheries* **1**: 23.
- Videler, J.J. 1993. *Fish Swimming*. London: Chapman & Hall.
- Wardle, C.S. 1980. Effects of temperature on the maximum swimming speed of fishes. In: *Environmental Physiology of Fishes*. NATO Advanced Study Institutes Series (Ali M.A. eds.). *Series A: Life Science* **35**: 519-531.
- Ware, D.M. 1978. Bioenergetics of pelagic fish: Theoretical change in swimming speed and ration with body size. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **35**: 220-228.
- Watkins, T.B. 1996. Predator-mediated selection on burst swimming performance in tadpoles of the Pacific tree frog, *Pseudacris regilla*. *Physiological Zoology* **69**: 154-167.
- Webb, P.W. 1984. Form and Function in Fish Swimming. *Scientific American* **251**: 72-83.
- Webb, P.W. and D. Weihs. 1983. *Fish Biomechanics*. Praeger Publisher, New York: 398.
- Webb, P.W. and D. Weihs. 1986. Functional locomotor morphology of early life history stages of fishes. *Transactions of the American Fisheries Society* **115**: 115-127.