

각시붕어(*Rhodeus uyekii*)와 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus*) 잡종의 초기생활사 특징

박재민 · 한경호^{1*}

경상북도 토속어류산업화센터, ¹전남대학교 해양기술학부

Early Life History Characteristics of an Induced Hybrid between *Rhodeus uyekii* and *Rhodeus ocellatus*

Jae-Min Park and Kyeong-Ho Han^{1*}

Gyeongsangbuk-Do Native Fish Business Center, Uiseong 37366, Korea

¹Marine Technology Undergraduate, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

This study was conducted to identify taxonomic differences in the characteristics of *Rhodeus uyekii* and *Rhodeus ocellatus* during their initial life history via an interspecific hybridization experiment. Hybrids were compared to their parent species, and the findings were used to inform developmental research in commercially useful aquarium fish. The hatching rates of the cross-bred eggs were 75.9% for cross UO (*R. uyekii* ♀ × *R. ocellatus* ♂) and 71.9% for cross OU (*R. ocellatus* ♀ × *R. uyekii* ♂), which did not differ greatly from the hatching rates of the normal cross-bred group. Backcross experiments resulted in 100% egg mortality during development. Newly hatched larvae of the original hybrid crosses were similar to those of the maternal line, and the color of the egg yolk was similar to that of the paternal line; therefore, the respective traits of the interspecific parents were identifiable within the cross-bred offspring.

Key words: Acheilognathinae, Early life history, Hybrid, *Rhodeus uyekii*, *Rhodeus ocellatus*

서론

납자루아과(Acheilognathinae) 어류는 잉어과(Cyprinidae)에 속하는 소형 담수어류로서 세계적으로 70여종이 분포하는 것으로 알려져 있다(Arai, 1988; Banarescu, 1990; Chang et al., 2014). 우리나라에서 보고된 납자루아과 어류는 납줄개속(*Rhodeus*), 납자루속(*Acheilognathus*), 큰납지리속(*Acanthorhodeus*)의 3속 14종으로 기록하였으나(Kim et al., 2005), 북한지역에 서식하고 있는 납줄개(*Rhodeus sericeus*) 및 최근 Kim et al. (2014a)에 의해 신종으로 보고된 낙동납자루(*Tanaka latimarginata*)가 추가되면서 16종이 서식하는 것으로 알려져 있다. 보고된 납자루아과 어류 16종 가운데 8종이 고유종으로 고유화 빈도가 50%에 이르러 종 분화 연구의 귀중한 자료로 보고 있다(Kang et al., 2006). 이들은 석패과에 속하는 담수산 이매패류를 숙주로 이용하는 독특한 산란습성을 가지고 있어 난 내 발생과 전기자어 시기를 조개 안에서 보냄으로써 높은

생존율을 유지하도록 진화하였으나, 최근 하천 정비공사와 수질오염 등의 영향으로 민물조개가 감소하여 오히려 산란숙주에 의존하는 납자루아과 어류의 생존전략이 불리하게 작용하고 있다(Beak and Song, 2005; Kim et al., 2011). 또한 멸종위기종 1급인 임실납자루(*T. somjinensis*)와 한강납줄개(*Rhodeus pseudosericeus*), 묵납자루(*T. signifer*), 큰줄납자루(*Acheilognathus majusculus*) 등이 개체 수 감소에 의하여 멸종위기종 2급으로 법적보호를 받고 있어 보존의 필요성이 높은 분류군이다(NIBR, 2019). 각시붕어 수컷은 산란시기에 나타나는 혼인색이 아름다워 관상어류로 주목받고 있으며, 최근 싱가포르에서 개최된 국제 관상어박람회 AQUARAMA 2015에서 관상어 경쟁부문 3위를 입상하여 전 세계에 각시붕어의 아름다움을 널리 알리는 계기가 되기도 하였다.

흰줄납줄개(*R. ocellatus*)는 동해안으로 흐르는 하천을 제외한 전국의 하천 및 호수에 분포하고, 일본에 서식하는 *R. ocellatus kurumeus*는 별도의 아종으로 분류된다. 우리나라에 서식

*Corresponding author: Tel: +82. 61. 659. 7163 Fax: +82. 61. 659. 7169

E-mail address: aqua05@jnu.ac.kr



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.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0408>

Korean J Fish Aquat Sci 52(4), 408-417, August 2019

Received 17 July 2019; Revised 8 August 2019; Accepted 14 August 2019

저자 직위: 박재민(연구사), 한경호(교수)

하는 흰줄납줄개는 배지느러미 첫 번째 기조에 흰색 띠가 없으나 일본산 *R. ocellatus kurumeus*에서 확인 되어 형태적으로 구분된다(Hosoya et al., 2015).

어류를 대상으로 한 잡종유도는 우량형질을 가진 서로 다른 두 종간의 교잡을 통해 생산된 잡종으로부터 산업성 있는 획득형질, 즉 잡종강세를 획득하기 위하여 시도되고 있다(Ihssen et al., 1990; Kim et al., 1995).

어류에 있어서 종간 잡종은 진화학적 연구뿐만 아니라 산업적 측면에서도 매우 중요한 역할을 하고, 잡종강세를 통하여 상업적으로 유용한 형질을 발현 시킬 수 있으며(Bartley et al., 2001), 특히 잉어과 어류들은 자연에서의 잡종개체가 빈번하게 발견된다고 알려져 있다(Hubbs, 1955). 이를 토대로 잡종을 인위적으로 생산하기 위한 연구가 진행되어 왔으며, 납자루아과 어류에서는 종간 및 속간 교잡실험 등이 진행된 바 있다(Suzuki and Jeon, 1993).

납자루아과 어류의 잡종에 관한 연구는 각시붕어와 묵납자루, *A. signifer* (Kim et al., 2010), 한강납줄개와 묵납자루(Kim et al., 2014b), 묵납자루와 납자루, *T. lanceolatus* (Kim et al., 2015) 등의 자연 잡종 출현에 대한 연구가 진행되었고, *R. suigensis*와 각시붕어(Suzuki and Jeon, 1988a), 각시붕어와 일본산 흰줄납줄개(Suzuki and Jeon, 1988b), 각시붕어와 떡납줄개 *R. notatus* (Kang et al., 2006; Kim et al., 2012) 등 인공교잡을 통한 연구가 일부 진행되었다. 이 연구에서는 고유종인 각시붕어와 우리나라에 서식하는 흰줄납줄개의 인위적인 교잡실험을 통해 초기생활사에서 나타나는 특성을 부모종과 비교하여 분류학적 차이점을 분석하고, 자연에 유입되어 유전적 오염을 방지할 수 있도록 불임화 개체 생산 가능성을 평가함으로써 교잡종이 상업적으로 유용한 관상어로 개발되기 위한 기초연구 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

실험어 사육

실험에 사용된 각시붕어와 흰줄납줄개의 친어는 2015년 5월 낙동강 수계 하천인 위천과 이곳으로 유입되는 소지류 및 저수지에서 족대와 통발을 이용해 채집하였고, 연구실로 운반 후 유리 사각수조(45×30×45 cm)에서 스펀지 필터를 이용한 순환 여과식으로 사육하였다. 사육수온은 20-22°C (평균 21.0°C)를 유지해주었고, 산란유도를 위해 말조개 4마리를 수조 내부에 함사하였다.

인공수정

실험조건은 Kang et al. (2006)의 방법에 따라 각시붕어 정상교배(*R. uyekii* ♀ × ♂; UU), 흰줄납줄개 정상교배(*R. ocellatus* ♀ × ♂; OO), 각시붕어를 모계로 한 교잡(*R. uyekii* ♀ × *R. ocellatus* ♂; UO), 흰줄납줄개를 모계로 한 교잡(*R.*

ocellatus ♀ × *R. uyekii* ♂; OU) 등 4개의 실험조건으로 나누어 실시하였다.

인공수정에 사용된 각시붕어 친어의 전장은 5.10-5.90 cm (평균 5.55 ± 0.57 cm, n=10)였고, 흰줄납줄개 친어의 전장은 6.46-6.58 cm (평균 6.52 ± 0.08 cm, n=10)로 암컷은 산란관이 충분히 길어졌을 때 복부압박법을 이용해 채란하였다. 채란된 성숙란은 멸균처리 된 생리식염수(0.9% NaCl)가 담긴 패트리디쉬(지름 15 cm)에서 수컷으로부터 채정된 정액을 혼합하여 인공수정 하였다. 수정란은 1일 1회씩 50% 환수시켜 주었다.

난발생 및 자치어 형태발달

수정란의 사육수온은 친어사육과 동일하였고, 조건별로 10개씩을 임의로 선택하여 만능투영기(Nikon JP V-12BM, Japan)를 이용 난의 크기를 0.01 mm까지 측정하였고, 교잡구간은 실체현미경(Nikon JP SMZ800, Japan)으로 형태 및 난발생 과정을 관찰하고 사진촬영 하였다. 자치어는 부화 직후부터 유영이 시작되기 전까지 petri dish에서 사육하였고, 유영을 시작한 후 자어기에서 치어기까지는 유리 사각수조에서 순환여과식으로 사육하였다. 사육 수는 1주일에 1회 50% 정도를 환수시켜 주었다. 자치어의 먹이는 난황 흡수 후부터 45일까지 알테미아(*Artemia* sp.)의 nauplius 유생을 1 mL당 2-3개체 정도 공급하였고, 45일 이후에는 냉동 장구벌레(Blood worm, Hikari China)와 입자크기 500 μm 정도의 배합사료(dry feed, Jeil-feed, Korea)를 혼합 공급하였다.

부화 직후부터 5일까지 1일 5마리씩, 부화 후 6일부터 치어기에 달하기까지 5일에 5마리씩 채취 후 마취제(MS-222, Ethyl 3-aminobenzoate methanesulfonate, Sigma Aldrich Co., St. Louis, USA)를 이용하여 마취시킨 뒤 어체의 크기를 실체현미경과 만능투영기를 사용하여 관찰하였고, 0.01 mm까지 측정하였다.

결 과

난의 형태

각시붕어와 흰줄납줄개의 난 형태는 서양배 모양에 가까운 전구형으로 분리침성란 이었고, 유구는 없었으며, 난황의 색은 옅은 노란색과 불투명한 무색을 띠었다. 각시붕어의 난경은 장경이 3.39-3.97 mm (평균 3.68 ± 0.41 mm, n=10)였고, 단경은 1.36-1.55 mm (평균 1.45 ± 0.13 mm, n=10)였다. 흰줄납줄개의 난경은 장경이 2.53-2.71 mm (평균 2.62 ± 0.12 mm, n=10)였고, 단경은 1.47-1.60 mm (평균 1.53 ± 0.09 mm, n=10)였다.

수정율 및 부화율

종내 또는 종간 교잡의 수정율은 60-100% (평균 80%)로 나타났다. 종내 구간인 UU에서는 부화율 79.2%, 기형율 17.7%, OO는 부화율 63.8%, 기형율 14.8%로 나타났으며, 교잡구간인

OU에서는 부화율 71.9%, 부화 후 기형을 16.6%를 보였고, UO는 부화율 75.7%, 기형을 12.4%로 나타났다(Table 1). 부화율은 대부분 높은 편이었으나 각시붕어 종내 기형율이 교잡구간보다 높게 나와 특이점을 보였다.

자연개체와 교잡종 간의 수정율 확인결과 종내 또는 중간 교잡의 실험구와 동일하게 나타났으나 난발생 과정 중 세포분열 단계가 끝나지 않은 상태에서 모두 폐사하였다.

난발생 과정

UO (*R. uyekii* ♀ × *R. ocellatus* ♂)

수정 직후의 수정란은 물을 흡수하면서 난막이 형성되기 시작하였고, 난황과 완전히 분리되지 않았으며(Fig. 1A), 수정 후 50분이 경과하면서 난문부와 난황이 분리되기 시작하였고, 난황과 난막의 사이에는 틈이 생겼다. 수정 후 1시간 40분에는 난문쪽의 동물극 난황 상단부에 원형질이 분리되면서 난황의 1/5부분을 차지하는 배반을 형성하였다(Fig. 1B). 수정 후 2시간에는 배반의 중앙 윗부분이 두 갈래로 갈라지고, 수직 이등분된 할구가 만들어지면서 2세포기에 달하였다(Fig. 1C). 수정 후 2시간 20분에는 각 할구에서 수평 난황이 일어나 같은 크기로 이분되어 4세포기에 달하였다(Fig. 1D). 수정 후 3시간 20분에는 수평 난황이 같은 방식으로 일어나 8세포기에 달하였고(Fig. 1E), 수정 후 4시간 20분에는 16세포기에 달하였으며(Fig. 1F), 수정 후 5시간 20분에는 32세포기에 달하였다(Fig. 1G). 수정 후 6시간 20분에는 세포의 분열 수가 증가하면서 64세포기에 달하였고(Fig. 1H), 수정 후 8시간 20분에는 세포 수를 계수할 수 없을 정도로 분열하여 상실기에 달하였다(Fig. 1I). 수정 후 11시간 40분에는 할구의 크기가 점차 작아졌고, 표면이 곡선을 이루면서 포배기에 달하였다(Fig. 1J). 수정 후 17시간에는 배반의 가장자리가 비후해지면서 배환을 형성하였고, 상단부에서부터 난황을 덮어 내려와 원구가 폐쇄되어, 초기 낭배기에 달하였다(Fig. 1K).

수정 후 25시간에는 난황의 2/3를 덮어 내려오면서 중기 낭배기에 달하였고(Fig. 1L), 수정 후 30시간 20분에는 배환이 식물극을 완전히 덮어 내려오면서 배체를 형성했다(Fig. 1M). 수정 후 34시간 20분에는 머리 쪽에는 척추원기, 신경극 및 꼬리가 형성되었으며, 수정 후 44시간 20분에는 머리 쪽의 척추 원기와

꼬리 부분이 신장하였다(Fig. 1N).

수정 후 48시간 20분에는 배체의 머리 부분이 난문부의 반대편을 뚫고 나오면서 부화를 시작했고(Fig. 1O), 수정 후 50시간에는 전체 수정란의 50%가 부화하였으며, 수정 후 52시간에는 부화를 모두 완료하였다. 부화 직후의 자어는 움직이지 않았고, 꼬리는 난황의 아래쪽으로 말려 있었으며, 익상돌기는 가슴 쪽에 1쌍, 배 쪽에 1개가 형성되었다.

OU (*R. ocellatus* ♀ × *R. uyekii* ♂)

수정 직후의 난은 물을 흡수하기 시작하였으며, 난막과 난황이 완전히 분리되지 않았다(Fig. 2A). 수정 후 50분에는 난문부와 난황이 분리되기 시작하면서 난황과 난막 사이에 틈이 형성되기 시작하였다. 수정 후 1시간 40분에는 난문의 동물극 난황 상단부에 원형질이 분리되면서 난황의 1/4정도를 차지하는 배반이 형성되었다(Fig. 2B). 수정 후 2시간 30분에는 배반의 상단부 중앙이 갈라져 수직으로 이등분되었고, 2개의 할구가 형성되면서 2세포기에 달하였다(Fig. 2C). 수정 후 3시간 10분에는 2개로 이등분되었던 할구가 이분되어 같은 크기의 4개 세포로 나누어져 4세포기에 달하였다(Fig. 2D). 수정 후 4시간 10분에는 4개로 나누어졌던 할구가 8개로 나누어지면서 8세포기에 달하였다(Fig. 2E).

수정 후 5시간 10분에는 같은 세포의 분열 방식으로 진행이 되어 16세포기에 달하였고(Fig. 2F), 수정 후 6시간 10분에는 32세포기에 달하였으며(Fig. 2G), 수정 후 7시간 10분에는 64세포기에 달하였다(Fig. 2H). 수정 후 9시간 10분에는 세포의 수를 계수하기 어려울 정도로 세포의 분열이 이루어졌고, 할구의 크기가 작아지면서 상실기에 달하였다(Fig. 2I). 수정 후 12시간 30분에는 할구의 표면이 난황과 거의 곡선을 이루면서 포배기에 달하였고(Fig. 2J), 수정 후 18시간 10분에는 배환이 형성되면서 위쪽부터 아래쪽으로 난황의 1/3정도를 덮어 내려와 초기 낭배기에 달하였다(Fig. 2K). 수정 후 27시간 30분에는 난황의 2/3정도를 덮어 내려오면서 중기 낭배기에 달하였으며(Fig. 2L), 수정 후 31시간 30분에는 배환이 식물극까지 완전히 덮어 내려와 함입이 되면서 난황의 바깥쪽에는 유백색의 배체가 형성되었고, 신경극과 척추의 원기가 발달되기 시작하였다(Fig. 2M). 수정 후 36시간 30분에는 꼬리가 신장하면서 기저부분이 난황과 분리되었고, 머리 쪽에는 척추의 원기가 신장하였다. 수

Table 1. Comparison of fertilization rate, hatching rate and the deformity rate of hatched larvae among experimental groups

Experimental group	Fertilization rate (%)	Hatching rate (%)	Deformity rate (%)
UU, <i>Rhodeus uyekii</i>	85.0-94.4 (89.7)	72.7-85.7 (79.2)	5.55-30.0 (17.7)
UO, <i>R. uyekii</i> ♀ × <i>R. ocellatus</i> ♂	66.6-100 (83.3)	69.2-82.3 (75.7)	8.33-16.6 (12.4)
OU, <i>R. ocellatus</i> ♀ × <i>R. uyekii</i> ♂	61.5-100 (80.7)	53.8-90 (71.9)	11.1-22.2 (16.6)
OO, <i>Rhodeus ocellatus</i>	83.3-100 (91.6)	52.6-75.0 (63.8)	4.76-25.0 (14.8)
UU ♀ × UO ♂, UU ♀ × OU ♂	60-100 (80)	-	-
OO ♀ × OU ♂, OO ♀ × UO ♂		-	-

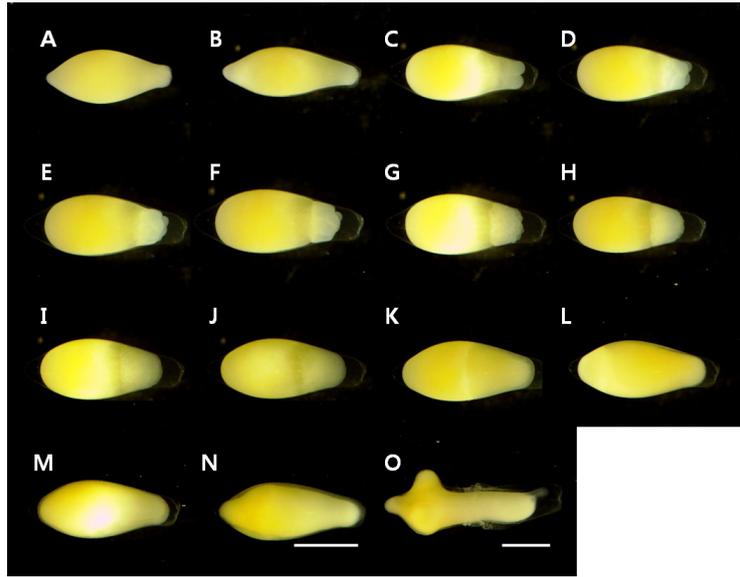


Fig. 1. Egg development of hybrid between UO (*Rhodeus uyekii* ♀×*R. ocellatus* ♂). Scale bars=1.00 mm. Shown in Table 2.

정 후 45시간 30분에는 머리의 앞쪽에 위치한 난황의 일부가 함입 되었고, 부화 직전에 이르게 되었다(Fig. 2N).

수정 후 49시간 30분에는 배체의 머리 부분이 난문부의 반대쪽을 뚫고 나오면서 부화가 시작되었고, 배체의 움직임은 관찰되지 않았다(Fig. 2O). 수정 후 53시간에는 전체 수정란의 50%

이상이 부화가 완료되었고, 54시간에는 모든 수정란의 부화가 완료되었다.

자치어 형태발달

UO (*R. uyekii* ♀ × *R. ocellatus* ♂)의 부화 직후 자어는 전장

Table 2. Eggs and embryonic development of hybrid between *Rhodeus uyekii* (♀) and *R. ocellatus* (♂) and at water temperature 21.0±1.0°C

Stage	Elapsed time	Characters	Fig. 1
Zygote period			
Fertilization	0 h 00 min	The egg absorbs water	A
Cell cleave period			
Blastodisc	1 h 40 min	Blastodisc is formed	B
Two cell	2 h 00 min	2-1 array of blastomeres	C
Four cell	2 h 20 min	2-2 array of blastomeres	D
Eight cell	3 h 20 min	2-4 array of blastomeres	E
Sixteen cell	4 h 20 min	4-4 array of blastomeres	F
Thirty-two cell	5 h 20 min	4-8 array of blastomeres	G
Sixty-four cell	6 h 20 min	8-8 array of blastomeres	H
Morula	8 h 20 min	The size of the blastomere is getting smaller	I
Blastula	11 h 40 min	The surface of the blastomere coincides with the egg yolk	J
Gastrulation 1/3	17 h 00 min	Covered 1/3 of egg yolk	K
Gastrulation 2/3	25 h 00 min	Covered 2/3 of egg yolk	L
Embryonic period			
	30 h 20 min	Development of embryo	M
Embryo just before hatching	44 h 20 min	The tail is getting longer	N
Hatching period	50 h	There was not movement of hatching larvae (Hatchability 50%)	O

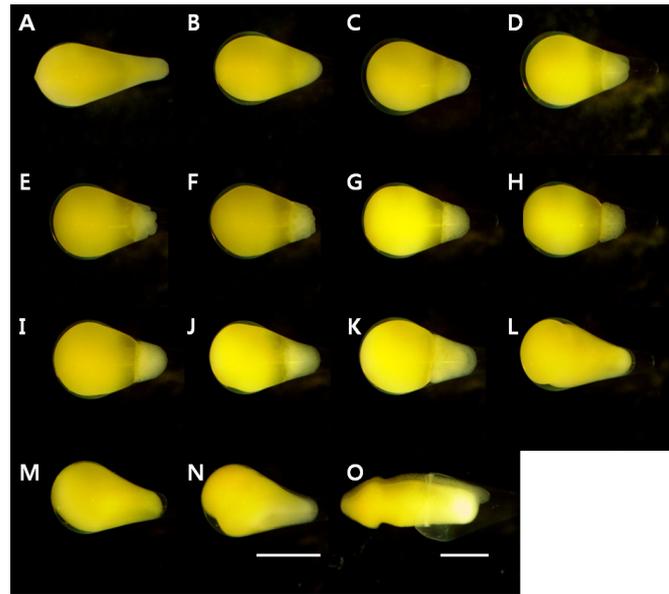


Fig. 2. Egg development of hybrid between OU (*Rhodeus ocellatus* ♀ × *R. uyeki* ♂). Scale bars=1.00 mm. Shown in Table 3.

4.36-4.55 mm (평균 4.45 ± 0.13 mm, $n=5$)로 난황의 앞쪽으로 1쌍의 익상돌기가 형성되어 있었고, 배 쪽에 1개의 돌기가 형성되어 있었다. 꼬리는 부화가 시작되면서 난황의 아래쪽으로 말려 있었으나 시간이 경과함에 따라 곧게 펴지면서 45°로 휘어졌다(Fig. 3; UO-0).

OU (*R. ocellatus* ♀ × *R. uyeki* ♂)의 부화 직후 자어는 전장 3.15-3.47 mm (평균 3.31 ± 0.23 mm, $n=5$)로 난황의 앞부분에는 짧은 익상돌기 한 쌍이 발달되어 있었고, 꼬리는 짧고 아래쪽으로 말려 있는 상태였다(Fig. 3; OU-0).

OU의 부화 후 1일째 전기 자어는 전장 5.42-5.77 mm (평균

Table 3. Eggs and embryonic development of hybrid between *Rhodeus ocellatus* (♀) and *R. uyekii* (♂) at water temperature $21.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$

Stage	Elapsed time	Characters	Fig. 2
Zygote period			
Fertilization	0 h 00 min	The egg absorbs water	A
Cell cleave period			
Blastodisc	1 h 40 min	Blastodisc is formed	B
Two cell	2 h 30 min	2-1 array of blastomeres	C
Four cell	3 h 10 min	2-2 array of blastomeres	D
Eight cell	4 h 10 min	2-4 array of blastomeres	E
Sixteen cell	5 h 10 min	4-4 array of blastomeres	F
Thirty-two cell	6 h 10 min	4-8 array of blastomeres	G
Sixty-four cell	7 h 10 min	8-8 array of blastomeres	H
Morula	9 h 10 min	The size of the blastomere is getting smaller	I
Blastula	12 h 30 min	The surface of the blastomere coincides with the egg yolk	J
Gastrulation 1/3	18 h 10 min	Covered 1/3 of egg yolk	K
Gastrulation 2/3	27 h 30 min	Covered 2/3 of egg yolk	L
Embryonic period			
	31 h 30 min	Development of embryo	M
Embryo just before hatching	45 h 30 min	The tail is getting longer	N
Hatching period	53 h 00 min	There was not movement of hatching larvae (Hatchability 50%)	O

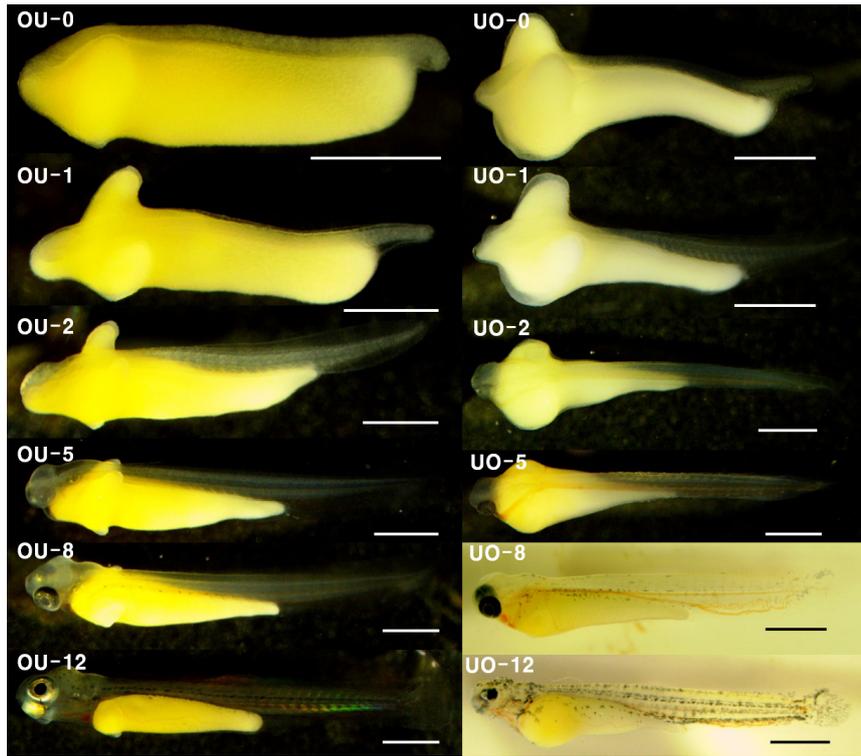


Fig. 3. Preflexion and flexion larvae development of hybrid between OU (*Rhodeus ocellatus* ♀×*R. uyekii* ♂ and UO (*R. uyekii* ♀×*R. ocellatus* ♂). Scale bars=1.00 mm.

5.60±0.25 mm)로 익상돌기는 신장하였고, 머리는 발달하여 주둥이가 앞으로 돌출되기 시작하였으며, 눈은 흔적 적으로 발달하였다. 꼬리에서는 움직임이 관찰되었다(Fig. 3; OU-1).

OU의 부화 후 1일째 전기 자어는 전장 4.21-4.40 mm (평균 4.31±0.13 mm)로 익상돌기는 신장하였고, 꼬리는 45° 위쪽으로 휘어지기 시작하였다. 꼬리가 움직이는 것이 관찰되었고, 머리 부분은 앞쪽으로 신장하였으며, 안포가 형성되었다(Fig. 3; OU-1).

UO의 부화 후 2일째 전기 자어는 전장 6.42-7.14 mm (평균 6.78±0.51 mm)로 익상돌기의 길이가 짧아졌고, 눈에는 흑색소포가 침착하였다(Fig. 3; UO-2).

OU의 부화 후 2일째 전기 자어는 전장 5.28-5.54 mm (평균 5.41±0.18 mm)로 배 쪽에 1개의 돌기가 형성되었고, 머리 부분에는 눈이 형성되었으며, 한 쌍의 이석이 관찰되었다(Fig. 3; OU-2).

UO의 부화 후 5일째 전기 자어는 전장 6.74-7.46 mm (평균 7.10±0.51 mm)로 심장에서부터 꼬리 미부를 따라 막지느러미까지 혈액의 흐름이 관찰되었고, 소리와 진동에도 몸의 움직임이 반응하였으며, 빠르게 움직였다가 정지하는 행동을 반복하였다(Fig. 3; UO-5).

OU의 부화 후 5일째 전기 자어는 전장 6.34-6.71 mm (평균

6.53±0.26 mm)로 눈에는 흑색소포가 침착하기 시작하였고, 막으로 연결되었던 지느러미는 분리되었으며, 심장으로부터 몸의 아래쪽을 따라 혈액이 흐르기 시작하여 꼬리지느러미 기부와 막지느러미를 지나 다시 심장까지 흐르는 것이 관찰되었다(Fig. 3; OU-5).

UO의 부화 후 8일째 중기 자어는 전장 7.29-7.86 mm (평균 7.58±0.40 mm)로 난황의 위쪽과 등 쪽, 막으로 된 꼬리지느러미에는 나뭇가지 모양의 흑색소포가 침착하였다. 꼬리의 끝은 미부봉상골이 45°로 휘어지면서 꼬리지느러미에 6개의 기조가 발달하였다(Fig. 3; UO-8).

OU의 부화 후 8일째 중기 자어는 전장 7.35-7.41 mm (평균 7.38±0.04 mm)로 난황 위쪽에는 반점모양 8개, 나뭇가지 모양 5개의 흑색소포가 침착하였다. 이 시기에는 꼬리 끝의 미부봉상골이 45°로 휘어졌고, 꼬리지느러미가 분화하면서 3개의 기조가 형성되었다(Fig. 3; OU-8).

UO의 부화 후 12일째 중기 자어는 전장 7.74-7.80 mm (평균 7.77±0.04 mm)로 나뭇가지 모양의 흑색소포는 두부의 상단 부분과 난황 위쪽, 등, 미부 및 몸의 중앙을 비롯하여 꼬리지느러미 기조까지 넓게 침착하였고, 꼬리지느러미에 형성된 줄기 수는 20개로 증가하였다(Fig. 3; UO-12).

OU의 부화 후 12일째 중기 자어는 전장 7.45-8.07 mm (평균

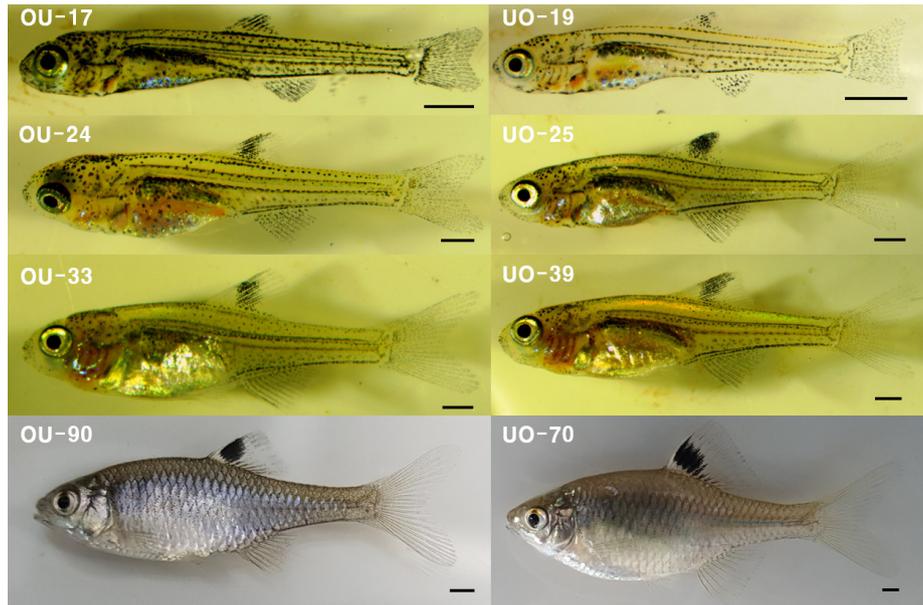


Fig. 4. Flexion larvae and juvenile development of hybrid between OU (*Rhodeus ocellatus* ♀ × *R. uyekii* ♂ and UO (*R. uyekii* ♀ × *R. ocellatus* ♂). Scale bars=1.00 mm.

7.76 ± 0.44 mm)로 머리 부분과 아가미 뚜껑부위에는 나뭇가지 모양의 흑색소포가 침착하였고, 각 부위별 지느러미의 기조 수는 등지느러미 4개, 뒷지느러미 5개로 발달하였으며, 꼬리지느러미는 12개로 증가하였다(Fig. 3; OU-12).

OU의 부화 후 19일째 후기 자어는 전장 8.59-8.64 mm (평균 8.61 ± 0.04 mm)로 아가미 뚜껑부위에는 나뭇가지 모양의 흑색소포가 침착되었다. 막으로 된 배지느러미를 제외한 각 부위별 지느러미는 분화하여 기조가 형성되었고, 등지느러미 10개, 뒷지느러미에 11개가 형성되었다. 이 시기에는 입이 열리고, 먹이를 섭취하기 시작하였으며, 수면 위에서 유영하는 것이 관찰되었다(Fig. 4; UO-19).

OU의 부화 후 17일째 후기 자어는 전장 8.42-8.60 mm (평균 8.51 ± 0.13 mm)로 난황을 모두 흡수하였고, 먹이를 섭취하기 시작하였다. 부레가 발달하였고, 부상하였다가 가라앉기를 반복하였으며, 각 부위별 지느러미 기조 수는 등지느러미 10개, 뒷지느러미 11개, 꼬리지느러미 20개로 증가하였고, 꼬리지느러미의 끝은 두 갈래로 갈라졌으며, 배지느러미는 막으로 되어 있었다(Fig. 4; OU-17).

OU의 부화 후 25일째 후기 자어는 전장 11.9-12.3 mm (평균 12.1 ± 0.28 mm)로 난황의 윗부분과 아래 복부에는 나뭇가지 모양의 흑색소포가 침착하였고, 등, 뒷, 꼬리지느러미에는 반점 모양의 흑색소포가 침착하였다. 각 부위별 지느러미 기조 수는 등지느러미 12개, 뒷지느러미 13개로 증가하였고, 배지느러미는 막으로 되어 있었다(Fig. 4; UO-25).

OU의 부화 후 24일째 후기 자어는 전장 10.4-11.2 mm (평균 10.8 ± 0.56 mm)로 수면에 정상적으로 유영하는 것이 관찰되

었고, 반점모양의 흑색소포는 등, 뒷, 꼬리지느러미에 반점모양으로 침착하였고, 각 부위별 지느러미의 기조 수는 등지느러미 13개, 뒷지느러미 12개로 증가하였다(Fig. 4; OU-24).

OU의 부화 후 39일째 후기 자어는 전장 13.1-13.7 mm (평균 13.4 ± 0.42 mm)로 각 부위별 지느러미 기조 수는 뒷지느러미 14개로 증가하였으며, 막으로 되어있던 배지느러미에는 3개의 기조가 형성되었다(Fig. 4; UO-39).

OU의 부화 후 33일째 후기 자어는 전장 13.3-14.7 mm (평균 14.0 ± 0.98 mm)로 각 부위별 지느러미 기조 수는 등지느러미 14개로 증가하였고, 막으로 되었던 배지느러미에는 4개가 형성되었다(Fig. 4; OU-33).

OU의 부화 후 70일째 치어는 전장 30.4-35.2 mm (평균 32.8 ± 3.39 mm)로 등지느러미 끝 부분에서부터 꼬리지느러미 시작 부분까지 파란색의 가로 줄이 선명하게 형성되었고, 각 부위별 지느러미 기조 수는 등지느러미 iii 10개, 뒷지느러미 iii 9개, 배지느러미 iii 4개로 모든 지느러미의 기조 수가 정수에 달하였다(Fig. 4; UO-70).

OU의 부화 후 90일째 치어는 전장 22.8-24.2 mm (평균 23.5 ± 0.98 mm)로 각 부위별 지느러미 기조 수는 등지느러미 iii 11개, 뒷지느러미 iii 9개, 배지느러미 iii 4개로 모든 지느러미의 기조 수가 정수에 달하였다(Fig. 4; OU-90).

고 찰

담수어류는 교잡을 통해 종종 자연에서 잡종개체가 출현하기도 하며, 중간 혹은 속간 인공교잡을 통해서 생식적인 격리와 계

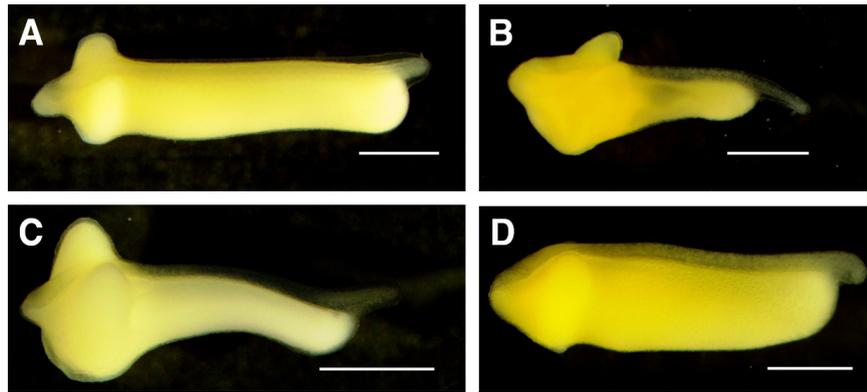


Fig. 5. Comparison of morphological of newly hatched larvae hybrid between (A) UU (*Rhodeus uyekii*) and (B) OO (*R. ocellatus*), (C) OU (*R. ocellatus* ♀×*R. uyekii* ♂) and (D) UO (*R. uyekii* ♀×*R. ocellatus* ♂). Scale bars=1.00 mm.

통 유연관계를 논의하기도 한다(Trautman, 1981). 각시붕어의 수정란 개수는 13-22개(평균 17개), 흰줄납줄개는 18-24개(평균 21개)로 각시붕어 보다 많거나 유사하였다. 납자루아과 어류의 난 형태는 납줄개속의 전구형(bulb type), 납자루속의 서양배형(pear shape), 방추형(fusiform), 타원형(ovoid type)으로 구분되고, 그 크기와 미세 형태의 차이는 각 종마다 차이가 있어 분류와 계통형질로 이용된다(Kim et al., 2011). 두 종의 난 형태는 옅은 노란색으로 서양배 모양에 가까운 전구형으로 납줄개속의 전형적인 난 형태를 나타냈으나 흰줄납줄개의 난은 각시붕어 보다 식물극이 뾰족하여 형태적인 차이를 나타냈다.

난의 크기는 각시붕어 장경 3.39-3.97 mm (평균 3.68±0.41 mm, n=10) 보다 흰줄납줄개 장경 2.53-2.71 mm (평균 2.62±0.12 mm, n=10)로 작게 나타나 난의 크기에서 차이를 보였다. 각시붕어의 난은 약한 점착성을 띠었고, 난끼리 혹은 기질에 부착되는 성질을 나타냈는데 이러한 점착성은 담수산 이매패류 내 수정란의 위치 및 강제배출을 막는 기작과 관계가 있을 것으로 사료된다(Yang, 2004; Kang et al., 2006).

현재까지 자연에서 확인된 납자루아과 어류 가운데 각시붕어와 흰줄납줄개 간의 잡종개체 출현은 보고된 바 없으며, 같은 수계 내에서 이들의 서식처가 다소 구분되어 있다는 점과 외부 형태가 육안으로 쉽게 구분되지 않는다는 점에서 자연 잡종개체의 확인이 어려웠을 것으로 생각된다. 우리나라 각시붕어와 일

본산 흰줄납줄개 사이의 수정율은 일본산 흰줄납줄개 우×각시붕어 ♂ 87.9-100%, 부화율 86.3-100%로 각시붕어 우×일본산 흰줄납줄개 ♂ 보다 높았으나 생존율은 8.6-26.9%로 보다 낮아 상반된 차이를 보였다(Suzuki and Jeon, 1988b). 본 연구에서는 UO 수정율 66.6-100%, 부화율 69.2-82.3%로 OU 보다 같거나 다소 높았으나 기형율은 11.1-22.2%로 보다 높게 나타나 일본산 흰줄납줄개 우×각시붕어 ♂의 실험결과와 유사하게 나타났다. Kang et al. (2006)의 연구결과에서는 각시붕어의 기형율이 전무한 것으로 나타났으나 본 연구에서 교잡개체 보다 기형율이 높은 원인은 어미의 건강상태에 따른 난질의 영향으로 사료된다.

각시붕어와 떡납줄개이의 경우 서식처가 동일하고, 산란기가 중복되어 자연 잡종개체가 출현할 수 있을 것으로 보고 있다(Kang et al., 2006). 그러나 본 연구의 각시붕어 채집 장소에서는 흰줄납줄개의 서식이 확인되지 않았고, 흰줄납줄개의 서식처는 하천으로 유입되는 상류의 저수지에서 확인 되어 서식처는 분리되어 있을 것으로 판단된다.

납자루아과 어류의 부화자어 형태는 익상돌기의 유무에 따라 구분되고, 주로 납줄개속 어류는 익상돌기의 형태를 나타내며, 납자루속 어류는 표피상돌기 형태를 가져 종에 따라 독특한 형태를 나타낸다(Kim et al., 2011). 이러한 난황 돌기형태는 납자루 종류의 부화자어가 담수산 이매패의 새강 내에서 탈락되지

Table 4. Comparison of meristic character counts of hybrid *Rhodeus uyekii* × *R. ocellatus* with parental type

Characters	<i>Rhodeus uyekii</i>			Hybrid		<i>Rhodeus ocellatus</i>		
	Kim (1997)	Kim et al. (2010)	Present study	<i>R. ocellatus</i> (♀) × <i>R. uyekii</i> (♂)	<i>R. uyekii</i> (♀) × <i>R. ocellatus</i> (♂)	Kim and Park (1985)	Suzuki and Jeon (1988b)	Present study
Dorsal fin rays	iii 8-9	iii 8-9	iii 9	iii 11	iii 10	iii 11-12	iii 10-12	iii 11
Anal fin rays	iii 8-10	iii 8-10	iii 10	iii 9	iii 9	iii 11-12	iii 9-11	iii 12
Ventral fin rays	-	-	iii 5	iii 4	iii 4	-	-	iii 5

않도록 하는 적응 형질인 것으로 보고되었다(Suzuki and Jeon, 1988a, b).

각시붕어 부화자어의 난황 형태는 긴 막대형으로 난황 전돌기는 짧은 막대형이었다. 반면 흰줄납줄개는 닳 모양으로 짧은 막대형의 돌기를 가지고 있었으며, 난황 전돌기는 각시붕어와 달리 45°로 휘어져 있어 형태적 차이를 보였다. OU 및 UO는 부화자어의 난황형태가 모계와 유사하였고, 난황의 색은 부계와 유사하여 교잡개체에서 두 종간의 형질을 각각 확인할 수 있었다. OU의 경우 난황 복부가 굴곡이 지면서 모계의 형질과 유사한 난황 형태를 갖추었으며, 막대형의 부계형질은 가지지 않았으나, 난황돌기가 수직으로 길게 발달하는 것이 부계의 영향을 일부 받은 것으로 보인다(Fig. 5). 부화 자어의 크기에서는 각시붕어가 가장 컸고, 흰줄납줄개는 OU보다 컸으며, UO보다 작았다. 교잡개체에서는 OU보다 UO가 컸다. UO는 각시붕어의 부화자어 크기범위 수치와 가까워 부계의 형질을 나타냈고, OU는 흰줄납줄개와 가까워 모계의 형질을 보이는 부분이 있는 것으로 생각된다. 치어기로 이행하였을 때 각시붕어와 흰줄납줄개의 크기는 유사하였고, OU보다 UO의 크기가 컸으며, 성장과정에서 나타나는 크기 차이는 먹이, 수질 및 사육환경 등 다양한 요인이 영향을 주었을 것으로 보인다. 지느러미 기조 수를 비교한 결과 Table 4와 같았다. 교잡개체인 OU, UO는 등지느러미 기조 수가 흰줄납줄개와 유사하였고, 뒷지느러미 기조 수는 각시붕어, 흰줄납줄개와 유사하였으나 배지느러미 기조 수는 각시붕어, 흰줄납줄개 보다 OU, UO에서 적게 나타나 차이를 보였다.

연구결과 교잡개체 수컷은 자연개체 암컷과 인공수정 시 난발생 과정 중 전량 폐사하여 교잡개체는 불임화로 보이며, 자연에서의 유전자 오염이 불가능 할 것으로 판단된다.

부화자어 시기에 형태적으로 부계보다 모계의 형질이 나타나는 것으로 보이며, 치어 이행시기 및 성장속도는 OU보다 UO가 빨랐고, OU 및 UO의 지느러미 기조 수는 흰줄납줄개와 가장 유사하였다. 이들은 부모의 형질을 각각 가지고 있어 성어로 성장하였을 때 나타나는 산란기 수컷의 추성, 혼인색에 대해 부모 또는 유년종 간의 비교 연구와 함께 새로운 관상어로 각광받기 위해 체색발현에 필요한 빛, 수온, 먹이, 사육환경 등 적정조건 규명을 위한 연구가 추가적으로 필요하다.

References

- Arai R. 1988. Fish systematics and cladistics. In: Ueno, T and M Okiyama (eds.), Ichthyology Currents 1988. Asakurashoten, Tokyo, Japan, 4-33.
- Baek HM and Song HB. 2005. Egg morphology and early life history of *Acheilognathus signifer* (Cyprinidae). Korean J Ecol 28, 281-286. <https://doi.org/10.5141/JEFB.2005.28.5.281>.
- Banarescu P. 1990. Zoogeography of fresh waters, vol. 1: General distribution and dispersal of freshwater animals. Aula-Velag, Wiesbaden, Germany, 71-94.
- Bartley DM, Rana K and Immink AJ. 2001. The use of inter-specific hybrids in aquaculture and fisheries. Reviews in Fish Bio and Fish 10, 325-337. <https://doi.org/10.1023/A:1016691725361>.
- Chang CH, Fan L, Shao KT, Lin YS, Morosawa T, Kim SM, Koo HY, Kim W, Lee JS, He S, Smith C, Reichard M, Miya M, Sado T, Uehara K, Lavoue S, Chen WJ and Mayden RL. 2014. Phylogenetic relationships of Acheilognathidae (Cypriniformes: Cyprinoidea) as revealed from evidence of both nuclear and mitochondrial gene sequence variation: Evidence for necessary taxonomic revision in the family and the identification of cryptic species. Mol Phylogenet Evol 81, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.08.026>.
- Hosoya K, Fujita A, Takeuchi H, Kawase N and Uchiyama R. 2015. Yamazaki handy encyclopedia Japanese freshwater fish book. Yamato and Tatsumi company, Sibuya, Japan.
- Hubbs CL. 1955. Hybridization between fish species in nature. Syst Zool 4, 1-20. <https://doi.org/10.2307/sysbio/4.1.1>.
- Ihssen PE, McKay LR, McMillan I and Phillips PB. 1990. Ploidy manipulation and gynogenesis in fishes: Cytogenetic and fisheries applications. Trans Am Fish Soc 119, 698-717. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1990\)119<0698:PMAGIF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1990)119<0698:PMAGIF>2.3.CO;2).
- Kang EJ, Kim CH, Park IS, Yang H and Cho YC. 2006. Early developmental characteristics of induced hybrids between *Rhodeus uyekii* and *R. notatus* (Pisces: Cyprinidae). Korean J Ichthyol 18, 339-346.
- Kim BS, Kang EJ, Jang H and Park IS. 2012. Morphometric traits and cytogenetic analysis in induced cross and reciprocal hybrid between *Rhodeus uyekii* and *R. notatus*. Korean J Ichthyol 24, 151-159.
- Kim CH, Lee WO, Lee JH and Beak JM. 2011. Reproduction study of Korean endemic species *Acheilognathus korensis*. Korean J Ichthyol 23, 150-157.
- Kim CH, Lee WO, Kang YJ and Baek JM. 2010. Occurrence of a natural intergeneric hybrid, *Rhodeus uyekii* × *Acheilognathus signifer* (Pisces: Cyprinidae) from Jojongcheon Bukhan River, Korea. Korean J Ichthyol 22, 225-229.
- Kim DS, Nam YK and Park IS. 1995. Survival and karyological analysis of reciprocal diploid and triploid hybrids between mud loach (*Misgurnus mizolepis*) and cyprinid loach (*Misgurnus anguillicaudatus*). Aquaculture 135, 257-265. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01031-9](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01031-9).
- Kim DM, Jeon HB and Suk HY. 2014a. *Tanakia latimarginata*, a new species of bitterling from the Nakdong River, South Korea (Teleostei: Cyprinidae). Ichthyol Explor Freshwaters 25, 59-68.
- Kim HS, Yoon SW, Kim HT and Park JY. 2015. Occurrence of a natural hybrid between *Acheilognathus signifer* and *A. lanceolatus* (Pisces: Cyprinidae). Korean J Ichthyol 27, 199-204.
- Kim HS, Yun SW, Ko JG and Park JY. 2014b. Occurrence of

- a natural intergeneric hybrid between *Rhodeus pseudosericeus* and *Acheilognathus signifer* (Pisces: Cyprinidae) from the Namhangang (river), Korea. Korean J Ichthyol 26, 153-158.
- Kim IS. 1997. Illustrated encyclopedia of fauna and flora of Korea. Vol. 37. Freshwater fishes. Ministry of Education, Seoul, Korea.
- Kim IS, Choi Y, Lee CL, Lee YJ, Kim BJ and Kim JH. 2005. Illustrated book of Korean fishes. Kyo Hak Publishing, Seoul, Korea, 130-132.
- Kim YU and Park YS. 1985. Egg development and larvae of the rose bitterling *Rhodeus ocellatus* (Kner). Bull Korean Fish Soc 18, 586-593.
- NIBR (National Institute of Biological Resources). 2019. Endangered wild animals and plants. Retrieved from https://species.nibr.go.kr/home/mainHome.do?cont_link=011&subMenu=011010&contCd=011010003 on Jul 12, 2019.
- Suzuki N and Jeon SR. 1988a. Hybridization experiments in Acheilognathine Fishes (Cyprinidae), An intragereric hybrid between *Rhodeus suigensis* and *R. uyeekii*. Korean J Lim 21, 57-78.
- Suzuki N and Jeon SR. 1988b. Hybridization experiments in Acheilognathine Fishes (Cyprinidae), An intragereric hybrid between *Rhodeus uyeekii* and *R. ocellatus smithi*. Korean J Lim 21, 129-142.
- Suzuki N and Jeon SR. 1993. Intergeneric hybridization experiment between *Acheilognathus lanceolatus* and *Rhodeus uyeekii*. J Basic Sci 7, 11-20.
- Trautman MB. 1981. The fishes of Ohio. Ohio State Univ Press, Columbus, U.S.A.
- Yang H. 2004. Ecology and speciation of two Korean bitterlings, *Acheilognathus koreensis* and *A. somjinensis* (Pisces: Cyprinidae) from Korea. Ph. D. Dissertation, University of Jeonbuk National, Jeonju, Korea, 100.