

타우린 영양 강화 로티퍼 공급이 방어(*Seriola quinqueradiata*) 부화 자어의 성장 및 부레 팽창에 미치는 영향

김재훈 · 박진우 · 조정현*

국립수산과학원 제주수산연구소

Taurine-enriched Rotifers Improve the Growth and Swim Bladder Inflation of Yellowtail *Seriola quinqueradiata* Larvae

Jae-Hoon Kim, Jin Woo Park and Jeong-Hyeon Cho*

Jeju Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Jeju 63610, Republic of Korea

We investigated the effects of taurine-enriched rotifers on larval growth and swim bladder inflation of yellowtail *Seriola quinqueradiata*. Rotifers were enriched with a commercial taurine supplement at two levels (0 and 800 mg/L). The larvae (initial notochord length=3.98±0.24 mm) were fed the enriched rotifers in triplicate from two days post-hatch for five days. The average taurine contents of the taurine non-enriched and enriched rotifers were 0.35±0.01 and 4.77±0.05 mg/g dry matter, respectively. The weight gain and specific growth rate of the fish fed enriched rotifers with the taurine supplement at 800 mg/L significantly improved compared with those of fish fed rotifers without taurine enrichment ($P<0.05$). The swim bladder inflation rate of larvae fed taurine enriched rotifers significantly ($P<0.05$). The results of the present study indicate that yellowtail larvae benefit from taurine concentrations compared with those typically reported to feed on non-aurine supplemented rotifers. Furthermore, taurine-enriched food for fish larval effectively improved the growth performance and swim bladder inflation of yellowtail larvae.

Keywords: Yellowtail, Taurine enrichment, Growth performance, Swim bladder

서론

전갱이과(family carangidae)에 속하는 방어(*Seriola quinqueradiata*)는 한반도, 일본, 대만 및 하와이 제도를 포함해 북서 태평양 해역 등에 널리 분포하는 온대성 회유 어종이다(Lee et al., 2000; Dong et al., 2020). 방어의 양식은 자연산 개체를 포획하여 양성하는 축양(fattening) 양식이 1960년대 일본에서 처음으로 시도되었다(Sicuro and Luzzana, 2016). 방어는 식용 가치가 높아 세계적으로 수요가 높은 고부가가치 어종이지만(Kolkovski and Sakakura, 2007; Sicuro and Luzzana, 2016), 2000년대 이후로 어획량의 지속적인 감소 추세가 나타나고 있다(FAO, 2019). 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 대상 생물의 자원량 유지 및 생산량 증대가 요구된다. 방어 양식에 관한 연구는 어미의 번식 생리 및 산란 유도(Higuchi et al., 2017; Corriero et al., 2021), 산란 조절(Higuchi et al., 2017,

2018), 치어 및 어미용 배합사료 개발(Matsunari et al., 2006; Takagi et al., 2008) 등의 연구가 수행되었다. 양식 생산량 증대를 위해서는 어미 관리뿐만 아니라 자어의 종자생산도 중요하게 고려되어야 한다. 그러나 자어기 방어의 성장과 발달에 관한 연구는 미비한 실정이며, 공급되는 먹이생물에 관한 연구는 전무하다. 현재 방어를 포함한 해산 어류의 종자생산에는 초기 부화 자어의 먹이로 로티퍼를 공급하고 있다(Yoshimatsu and Hossain, 2014; Gao et al., 2021). 로티퍼는 대량 배양이 용이하고 자어가 섭취하기 적합한 크기라는 장점이 있다. 그러나 로티퍼는 부화 자어 성장에 필요한 일부 영양성분들이 결핍되어 있거나 낮은 농도로 함유되어 있어 성장 불량의 원인으로 보고되고 있다(Hamre, 2016; Fu et al., 2021). 예를 들어, 자연에서의 초기 먹이 생물인 요각류(copepods)와 비교하여 산업용 로티퍼는 요오드, 셀레늄과 같은 미세 영양소(micronutrients) 및 타우린이 낮은 농도로 함유되어 있다(Mæhre et al., 2000; Hamre et

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 780. 5460 Fax: +82. 64. 780. 5409

E-mail address: cjh0123@korea.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.2022.0524>

Korean J Fish Aquat Sci 55(5), 524-532, October 2022

Received 31 August 2022; Revised 22 September 2022; Accepted 22 September 2022

저자 직위: 김재훈(박사 후 연구원), 박진우(연구사), 조정현(연구사)

el., 2008; Mæhre et al., 2012). 특히 로티퍼 내 타우린 함량은 알테미아와 요각류에 비해 10–400배 낮게 함유된 것으로 보고되고 있다(van der Meer et al., 2008; Mæhre et al., 2012). 타우린(2-aminoethanesulfonic acid)의 기능은 어류를 포함한 다양한 척추동물에 대해 연구되어 왔는데, 주요 기능으로 지질 소화 기능(Urbich et al., 2022), 항산화(Bavi et al., 2022), 근육조직의 발달 촉진(Nguyen et al., 2015; Wijayasinghe et al., 2017) 등을 향상시키는 것으로 밝혀졌다. 타우린은 카르복실기가 없기 때문에 체내 단백질 합성에 관여하지 않지만(Conceição et al., 2011), 많은 생리학적 역할과 어체 전반으로 분포하는 아주 중요한 영양소이다(Ripps and Shen, 2012). 이러한 타우린은 많은 동물들이 일련의 효소적 전환을 통해 methionine과 cysteine 그리고 4'-phosphopantetheine으로부터 타우린을 합성한다고 보고되고 있다(Andersen et al., 2016; Biasato et al., 2022). 그러나 이 과정에 필요한 두 가지 핵심 효소인 cysteine dioxygenase (CDO)와 cysteine sulfinate decarboxylase (CSD)는 포유류와 비교하여 어류에서 더 낮은 활성을 가지며, 어류에 따라 그 능력도 크게 다르다고 보고 된다(Goto et al., 2001, 2003; Yokoyama et al., 2001).

방어의 경우 타우린의 생합성을 제한하는 효소인 CSD가 본질적으로 결핍되어 있다고 알려져 있다(Yokoyama et al., 2001). 또한 방어의 급격한 초기 성장 단계에서 CDO 및 CSD의 낮은 활성은 타우린 합성 능력을 저하시켜 성장 부진의 원인으로 보고되었다(Takagi et al., 2005). Matsunari et al. (2006)과 Takagi et al. (2008)의 연구에서는 낮은 농도의 타우린이 함유된 사료를 공급한 방어 치어의 성장과 생존이 현저히 낮았고, 타우린이 결핍된 사료를 공급한 방어 어미에서는 산란 능력이 낮게 나타났다고 보고 하였다. 즉, 방어를 포함한 많은 해산 어류는 스스로 충분한 타우린을 합성할 수 없으며, 타우린은 해산 어류의 다양한 생애 단계에서 필수적인 영양소임을 시사한다(Yokoyama et al., 2001; Takagi et al., 2008). 많은 선행 연구에서 자어의 태평양 참다랑어(*Thunnus orientalis*), 황다랑어(*Thunnus albacares*; Katagiri et al., 2017), 잭방어(*Seriola dumerili*; Matsunari et al., 2013), 부시리(*Seriola lalandi*; Rotman et al., 2017), 참돔(*Pagrus major*; Chen et al., 2004; Kim et al., 2016), 명태(*Gadus chacogrammus*; Nakawaga et al., 2019), 넙치(*Paralichthys olivaceus*; Chen et al., 2005), 태평양 대구(*Gadus microcephalus*; Matsunari et al., 2005) 및 참조기(*Larimichthys polyactis*; Cho et al., 2022)를 대상으로 로티퍼의 타우린 영양 강화를 통한 성장 및 생존을 개선 효과를 보고하였지만, 방어를 대상으로 한 연구는 수행된 바가 없다.

현재 방어의 인공종자생산에는 초기 부화 자어 단계에서 성장 부진과 침강사로 인한 초기 감모가 생산성의 직접적인 원인이 되고 있다(Woolley and Qin, 2010; Sawada et al., 2021). 방어 부화 자어는 상층으로 유평하는 능력이 낮아 야간에 수조 바닥과 접촉하여 발생하는 침강사가 폐사의 주요 원인으로 보고된

다(Tanaka et al., 2009). 침강사로 인한 폐사는 부레 팽창 기능의 결핍이 주요 원인으로 보고되며(Takashi et al., 2006), 부레 팽창 기능은 부화 자어의 초기 생존에 있어서 매우 중요한 요소로 간주된다. 타우린은 초기 어체 발달에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나(Salze et al., 2011; Kim et al., 2016), 타우린이 부화 자어의 부레 팽창 기능에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 방어의 종자 생산 기술을 확립하는 일환으로서, 자어기에 공급되는 로티퍼의 타우린 영양 강화가 방어 자어의 성장 및 부레 팽창 기능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

실험어

실험어의 사육 관리 및 시료 채취는 국립수산물과학원 동물실험 계획(2021-NIFS-IACUC-21)에 따라 수행되었다. 국립수산물과학원 제주수산연구소(Jeju, Korea)에서 사육 관리 중인 방어 어미(5세어, 어체중 약 6–7 kg)로부터 자연 산란된(5월) 수정란을 얻어 폴리에틸렌 재질의 150 L 실내 원형 수조 6개에 수조당 3,000립씩 3반복구로 수용하여 부화시켰다(부화율 76.2±11.0%, $n=3$). 실험은 방어 부화 자어의 개구기(mouth-opening stage)가 진행된 2일령부터 수행하였다.

로티퍼 배양 및 타우린 영양 강화

본 실험의 먹이로 사용된 L-형 로티퍼(*Brachionus plicatilis*; AQUANET, Tongyeong, Korea) 100억 개체를 폴리프로필렌 재질 1,000 L 원형 수조에 수용하고, 상업용 chlorella를 해수로 5배 희석 후, 로티퍼 영양 강화 수조에 분당 5 mL가 공급되도록 자동공급기(AX1-51; Cheonsei Industry, Co., Ltd., Ansan, Korea)를 사용하여 배양하였다. 실험구는 타우린 미 영양 강화 로티퍼 공급구(taurine non-enriched 0 mg/L, T-0) 및 타우린 영양 강화 로티퍼 공급구(taurine-enriched 800 mg/L, T-800)의 2개 실험구를 설정하였다. 타우린 영양 강화 농도의 설정은 육식성 해산 어종을 대상으로 한 선행연구 결과를 참고하여 설정하였다(Matsunari et al., 2013; Kim et al., 2016; Katagiri et al., 2017). 영양 강화를 위해 20 L 아크릴 재질의 원형 수조에 로티퍼를 500,000 ind./L의 밀도로 분주하여 사용하였다. 합성 타우린(Food and feed grade 99.0%; Qianjiang Yongan Pharmaceutical Co., Ltd., Yongan, China)을 각각 0 및 800 mg/L의 농도로 22:00 및 익일 05:00에 첨가하여 12시간 및 18시간 강화하였고, 로티퍼의 DHA 강화를 위해 상업용 DHA 영양 강화제(Marine Glos EX; Marinetech, Aichi, Japan)를 20 mL씩 동일하게 첨가하였다. 영양 강화 중 수온은 25°C로 조절하였다.

사육 실험 조건

사육 실험 수조 내 로티퍼의 공급은 영양 강화 수조에서 12시

간 및 18시간 강화한 로티퍼를 채취하여 25°C 해수에 5분 이상 세척한 후 일 2회(10:00 및 16:00) 공급하였다. 로티퍼 공급 시에는 공급 전 사육 실험 수조 내 로티퍼의 개체 수를 확인하여 로티퍼 밀도가 10,000 ind./L가 유지되도록 하였다. 또한, 사육 실험 수조 내 상업용 chlorella (Fresh Chlorella V12, 14 milliard cell/mL; Chlorella Industry Co., Ltd., Tokyo, Japan) 240 mL를 일 3회 첨가하여 사육 실험 수조 내 로티퍼의 기아(starvation)를 방지하고 green water condition을 유지하였다. 사육수는 모래 여과 및 한외 여과 막 장치(ultrafilter membrane)를 이용한 여과 해수를 사용하여 사육 실험 수조에 100% tank/day의 비율로 교환하였다. 각 수조 마다 자어의 유영을 돕기 위하여 에어 스톤을 설치하고 포화 농도 수준까지 용존 산소를 공급하였다(0.3 L/min). 사육 실험 기간 동안 평균 사육 수온, 용존 산소 및 pH는 각각 21.2±0.5°C, 7.3±0.2 mg/L 및 pH 8.1±0.1이었다. 광주기는 09:00부터 21:00 동안 형광등을 사용하여 조절하였다(12L:12D).

로티퍼의 생화학적 분석

로티퍼는 타우린 영양 강화 전(0시간)과 영양 강화 후 12 및 18시간째에 25°C의 해수로 5분, 수돗물로 3분 세척 후 물기를 제거하여 채취하였고, 모든 시료는 분석 전까지 -80°C에서 보관하였다. 로티퍼 시료는 72시간 이상 동결건조기(LP-20; Ilshin BioBase, Yangju, Korea)로 동결 건조한 후, 곱게 균질화 하여 유리 아미노산 및 지방산 분석에 사용하였다. 유리 아미노산 분석은 high-performance liquid chromatography equipment (Dionex Ultimate 3000 system; Thermo Scientific, Vienna, Austria)와 column (Inno C18 column, 4.6 mm×150 mm, 5 µm; Youjinbiochrom Co., Ltd., Seongnam, Korea)을 사용하여 수행되었다. Injection volume은 0.5 µL, column의 온도는 40°C, 시료의 온도는 20°C, 유속(flow rate) 1.5 mL/min의 조건에서 분석하였으며, 완충용액 A (mobile phase A)는 40 mM sodium phosphate (pH 7), 완충용액 B (mobile phase B)는 3 차 증류수, acetonitrile 및 methanol (10%:45%:45%, v:v:v)을 사용하였다. 지방산 분석은 gas chromatography equipment (Agilent 7890A; Agilent, Santa Clara, CA, USA)와 column (DB-23, 120 mm×0.25 mm×0.25 µm; Agilent, Santa Clara, CA, USA)을 사용하여 수행되었다. 분석 조건은 injector의 온도 250°C, flame ionization detector의 온도 280°C, H₂는 35, Air는 350, He는 10 mL/min 조건에서 수행되었다.

방어 부화 자어의 성장도 측정

방어 자어는 어체 성장 분석을 위해 부화 후 0일령에서 7일령까지 매일 수조 당 30마리씩 무작위로 채취하여 척삭 길이(notochord length)와 어체중(weight)을 측정하고 척추 아래 부분 형성되는 부레 발달 유무를 확인하였다. 방어 자어의 척삭 길이 측정과 부레 발달 유무 확인은 stereoscopic microscope (SMZ745T; Nikon, Tokyo, Japan)과 image software (Optiv-

iew; Korea Lab Tech, Seongnam, Korea)을 이용하였고, 어체중은 미세 저울(Quintix124-1SKR; Sartorius, Goettingen, Germany)로 0.1 µg까지 측정하였다. 증체율(weight gain, WG), 일간 성장률(specific growth rate, SGR) 및 부레 팽창률(swim bladder inflation rate, SBIR)을 각각 아래와 같이 계산하였다.

$$WG (\%) = \frac{[\text{final wet weight (g)} - \text{initial wet weight (g)}]}{\text{initial wet weight (g)}} \times 100$$

$$SGR (\%/day) = \frac{[\ln \text{ final weight} - \ln \text{ initial weight}] \times 100}{\text{Time (days)}}$$

$$SBIR (\%) = [\text{inflation larvae} / \text{total larvae}] \times 100$$

통계처리

방어의 성장 결과는 Windows 용 IBM SPSS 19 software package (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하여 분석하였다. 데이터는 Shapiro-Wilk 및 Levene의 테스트를 각각 사용하여 분산의 정규성 및 동질성을 포함한 가정에 대해 평가되었으며 위반(violation)이 감지되지 않았다(P>0.05). 데이터의 통계적 분석은 95%의 유의 수준(P<0.05)으로 ANOVA를 사용하여 수행하였다. 유의한 차이(significant treatment effect)가 감지되면 t-검정을 사용하여 평균간의 유의적인 차이를 평가하였다.

결 과

로티퍼의 화학적 조성

타우린 강화 농도 0 mg/L (T-0)와 800 mg/L (T-800)에 따른 로티퍼의 아미노산 함량을 Table 1에 나타내었다. 초기(initial) 로티퍼(0.30 mg/g)와 T-0 (0.35 mg/g)의 타우린 함량은 유의한 차이가 없었으나, T-800과 비교하여 타우린 함량의 유의적인 차이가 나타났다(P<0.05). 로티퍼 내 타우린 함량은 T-800이 T-0와 비교하여 약 17배 높은 타우린의 농축량을 나타냈다(T-0, 0.35 mg/g 및 T-800, 4.77 mg/g). 로티퍼의 먹이로 사용된 chlorella에서는 타우린이 검출되지 않았다(Table 1). 각 실험구의 지방산 조성을 Table 2에 나타내었다. chlorella의 DHA는 검출되지 않았다. DHA 영양 강화를 하지 않은 초기 로티퍼의 지방산 내 DHA 함량은 0.27%를 나타냈으나, T-0 및 T-800의 DHA 함량은 각각 5.35% 및 5.43%로 DHA 영양 강화 효과가 확인되었다(Table 2).

어체 성장 및 부레 팽창률

사육 실험 종료 후 방어 자어의 성장을 Fig. 1에 나타내었다. 척삭 길이는 T-800구가 T-0구에 비해 길었으나, 유의적인 차이는 나타나지 않았다(P>0.05). 그러나 어체중은 T-800구가 T-0구보다 유의적으로 높았다(P<0.05). 증체율 및 일간 성장률에

서도 T-800구가 T-0구와 비교하여 유의적으로 높게 나타냈다 ($P<0.05$). T-0구 및 T-800구의 부레 팽창률 및 부레 발달 유무를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. 부레 팽창률은 T-0구의 경우 58.7%였으며, T-800구의 경우 84.4%로 T-0구와 비교하여 유의적으로 높았다($P<0.05$).

고 찰

본 연구는 타우린 영양 강화 로티퍼의 공급이 방어 부화 자어의 성장 및 부레 팽창에 미치는 영향을 조사하기 위해 수행되었다. 로티퍼에 타우린을 직접 영양 강화(direct enhancement)하는 방법은 로티퍼 내 타우린의 농축량을 증가시키는데 효과적인 방법이였으며, 타우린은 방어 부화 자어의 성장 및 부레 팽창 개선에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 로티퍼의 타우린 영양 강화는 800 mg/L (T-800)의 농도로 12시간 및 18시간 동안 실시하였다. 영양 강화 결과 T-800구의 타우린 농축 농도는 12시간 영양 강화의 경우 4.77 mg/g, 18시간 영양 강화의 경우 4.37

mg/g으로 초기(initial) 로티퍼 및 T-0구의 타우린 농도에 비해 약 17배 이상 증가한 농축량을 나타냈다. 그러나 본 연구와 동일한 타우린 농도(800 mg/L)로 강화한 선행 연구에서는, 로티퍼의 영양 강화 시간에 따라 로티퍼 내 타우린 함량에 차이가 나타났다. Kim et al. (2016)는 S-형 로티퍼(*Brachionus rotundiformis*)를 사용하여 800 mg/L 타우린 농도에서 각각 16시간 및 23시간 영양 강화를 하였다. 16시간 강화하였을 때 로티퍼 내의 타우린 함량은 9.11 mg/g에 반해 23시간 영양 강화를 하였을 때 15.57 mg/g으로 장기간 강화 시에 타우린 농축 함량이 증가하였다. Chen et al. (2005)의 연구에서도 L-형 로티퍼를 사용하여 800 mg/L 타우린 농도에서 각각 6시간 및 17시간 강화하였을 때, 로티퍼의 타우린 함량은 6시간에서 2.41 mg/g에 반해, 17시간에서 4.52 mg/g로 강화 시간이 길어질수록 로티퍼 내에 농축되는 타우린 함량이 증가하는 것을 밝혔다. Chen et al. (2004)의 또 다른 연구결과에서는 S-형 로티퍼와 L-형 로티퍼를 각각 6시간 및 17시간 영양 강화를 하여 로티퍼 내 타우린 농축 함량

Table 1. Free amino acid content of chlorella and rotifers (mg/g, dry-matter)

| | Chlorella | Initial rotifer | Enriched rotifer ¹ | | | |
|--|------------|-----------------|-------------------------------|------------|------------|------------|
| | | | 12 h | | 18 h | |
| | | | T-0 | T-800 | T-0 | T-800 |
| Non-essential amino acids² | | | | | | |
| Taurine | N.D. | 0.30±0.02 | 0.35±0.01 | 4.77±0.05 | 0.31±0.02 | 4.37±0.09 |
| Alanine | 4.80±0.14 | 0.85±0.04 | 0.64±0.00 | 0.63±0.01 | 1.04±0.04 | 1.53±0.06 |
| Aspartic acid | 0.17±0.03 | 0.43±0.02 | 0.25±0.01 | 0.24±0.00 | 0.48±0.02 | 0.51±0.06 |
| Glutamic acid | 3.01±0.06 | 1.67±0.01 | 1.33±0.01 | 1.35±0.01 | 2.19±0.12 | 3.57±0.45 |
| Glycine | 0.84±0.05 | 0.49±0.02 | 0.26±0.00 | 0.27±0.00 | 0.50±0.02 | 0.48±0.05 |
| Proline | 1.80±0.16 | 0.39±0.02 | 0.30±0.01 | 0.32±0.03 | 0.70±0.09 | 0.57±0.06 |
| Serine | 0.12±0.02 | 0.48±0.01 | 0.34±0.00 | 0.36±0.00 | 0.60±0.03 | 0.54±0.06 |
| Tyrosine | 0.19±0.04 | 0.85±0.04 | 0.53±0.01 | 0.49±0.00 | 0.90±0.04 | 0.84±0.06 |
| Total | 10.92±0.49 | 5.45±0.03 | 4.01±0.03 | 8.44±0.08 | 6.72±0.26 | 12.40±0.74 |
| Essential amino acids² | | | | | | |
| Arginine | 0.35±0.05 | 1.59±0.04 | 1.38±0.02 | 1.39±0.02 | 1.73±0.06 | 1.53±0.10 |
| Histidine | 0.14±0.02 | 0.46±0.03 | 0.19±0.01 | 0.20±0.00 | 0.35±0.03 | 0.33±0.03 |
| Isoleucine | 0.23±0.02 | 0.32±0.02 | 0.21±0.00 | 0.20±0.00 | 0.41±0.02 | 0.48±0.05 |
| Leucine | 0.19±0.08 | 0.66±0.02 | 0.37±0.01 | 0.36±0.00 | 0.78±0.04 | 0.79±0.12 |
| Lysine | 0.49±0.04 | 0.82±0.01 | 0.72±0.01 | 0.73±0.02 | 0.82±0.06 | 0.82±0.07 |
| Methionine | 0.05±0.02 | 0.18±0.00 | 0.06±0.00 | 0.08±0.00 | 0.19±0.01 | 0.20±0.02 |
| Phenylalanine | 0.18±0.05 | 0.54±0.02 | 0.33±0.01 | 0.31±0.00 | 0.61±0.02 | 0.53±0.06 |
| Threonine | 0.38±0.02 | 0.38±0.01 | 0.25±0.01 | 0.25±0.00 | 0.47±0.03 | 0.59±0.06 |
| Valine | 0.34±0.04 | 0.35±0.02 | 0.22±0.00 | 0.21±0.00 | 0.40±0.02 | 0.560±0.07 |
| Total | 2.37±0.34 | 5.31±0.16 | 3.72±0.04 | 3.75±0.01 | 5.76±0.27 | 5.82±0.58 |
| Total (Non-essential+essential) | 13.29±0.82 | 10.75±0.19 | 7.73±0.06 | 12.19±0.09 | 12.48±0.52 | 18.22±1.32 |

¹Three different taurine (T) enrichment levels, including 0 ppm (T-0) and 800 ppm (T-800). ²Values are means±standard deviation of triplicate ($n=3$). N.D., Not detected.

을 비교하였는데, S-형 로티퍼 및 L-형 로티퍼 모두 6시간 영양 강화와 비교하여 17시간에서 높은 타우린 농축량을 보였으며, S-형 로티퍼와 L-형 로티퍼 간의 비교에서는 농축된 타우린 함량의 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 상기 연구 결과들은 영양 강화 시간이 길어짐에 따라 로티퍼 내 타우린 농축 함량이 증가한다는 공통적인 결과를 나타냄과 동시에, 영양 강화 전 로티퍼의 타우린 함량 및 영양 강화 조건에 따라 농축 농도의 차이를 나타냈다. 본 연구에서는 12 및 18시간 영양 강화에 따른 타우린 농축량을 나타내었고, 영양 강화 시간이 길어짐에 따라 타우린 및 DHA 농축 함량이 감소하는 경향을 나타내었다. 앞서 제시한 선행연구 결과의 경우 영양 강화를 진행하는 동안 로티퍼 영양 강화 수조 내 지속적인 클로렐라 공급을 하였으나, 본 연구는 로티퍼 영양 강화 수조 내 초기 클로렐라를 1회 공급 후 추가적인 공급을 실시하지 않았다. Wacker and Martin-Creuzburg (2012)의 연구에 따르면 지방산, 스테롤 및 아미노산 등이 로티

퍼의 성장 및 번식에 중요한 요소로 간주되며 해당 영양소들의 결핍으로 인해 로티퍼의 주요 대사 및 기능이 제한될 수 있음을 밝혔다. 이에 따라 본 실험의 로티퍼는 공급된 클로렐라의 소진 후, 체내 타우린을 포함한 영양소를 생존 및 기능 유지를 위해 소비하였을 것으로 판단된다. 따라서 영양 강화 시간 및 클로렐라의 공급 여부 등과 같은 배양 조건 및 방법에 따라 농축되는 타우린의 함량은 변화할 수 있을 것으로 시사된다.

일반적으로 영양 결핍에 대한 생리학적 반응은 체내 영양소 축적이 적고 대사율이 높은, 외인성 영양소에 의존하는 어류의 초기 생활사에서 발생하기 쉽다(Dabrowski, 1986; Cahu and Infante, 2001). 어류의 자치어기에는 성장과 발달이 매우 빠르게 진행되며, 특히 변태 과정 중 체내 많은 기관의 형태적, 기능적 변화가 발생하므로, 체질량 당 자치어기의 영양 요구량은 성어보다 높다(Salze et al., 2011; Kim et al., 2016). 또한 체내 생합성 기능이 불안정한 이 시기는 영양 요구량의 결핍 시 성장

Table 2. Fatty acid composition (% of total fatty acids) of chlorella and rotifers

| Fatty acid (area, %) ² | Chlorella | Initial rotifer | Enriched rotifer ¹ | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------------|-------------------------------|------------|------------|------------|
| | | | 12 h | | 18 h | |
| | | | T-0 | T-800 | T-0 | T-800 |
| 14:0 | N.D. | 2.29±0.06 | 3.15±0.09 | 2.82±0.07 | 2.56±0.07 | 2.57±0.07 |
| 16:0 | 25.50±0.14 | 21.20±0.19 | 24.15±0.73 | 22.71±0.40 | 22.75±0.18 | 21.97±0.28 |
| 16:1 | 0.47±0.01 | 1.46±0.08 | 0.96±0.01 | 1.17±0.01 | 1.20±0.04 | 4.70±0.11 |
| 17:0 | N.D. | 1.46±0.00 | 1.19±0.04 | 1.20±0.07 | 1.18±0.01 | 1.11±0.03 |
| 18:0 | 0.32±0.01 | 5.81±0.02 | 7.11±0.21 | 6.76±0.17 | 6.23±0.02 | 5.70±0.09 |
| 18:1n-9 | 4.26±0.03 | 2.88±0.04 | 1.73±0.04 | 1.72±0.02 | 2.11±0.06 | 1.93±0.03 |
| 18:2n-6 | 63.38±0.09 | 48.00±0.19 | 37.20±1.02 | 38.95±0.48 | 42.49±0.18 | 41.88±0.67 |
| 18:3n-3 | 4.88±0.03 | 2.57±0.02 | 1.52±0.06 | 1.62±0.04 | 1.98±0.02 | 2.05±0.04 |
| 20:0 | 0.31±0.00 | 0.35±0.00 | 0.45±0.03 | 0.42±0.02 | 0.38±0.00 | 0.34±0.00 |
| 20:2 | 0.37±0.00 | 3.45±0.04 | 2.21±0.04 | 2.26±0.09 | 2.77±0.07 | 2.71±0.02 |
| 20:3n-6 | N.D. | 3.15±0.06 | 3.75±0.09 | 3.82±0.07 | 4.31±0.11 | 4.38±0.11 |
| 20:4n-6 | N.D. | 1.77±0.03 | 2.67±0.09 | 2.79±0.06 | 2.50±0.06 | 2.31±0.06 |
| 22:0 | N.D. | 0.54±0.01 | 0.88±0.05 | 0.84±0.04 | 0.71±0.02 | 0.67±0.02 |
| 20:5n-3 | N.D. | 0.29±0.01 | 1.01±0.04 | 1.01±0.04 | 0.89±0.03 | 0.67±0.03 |
| 22:1n-9 | N.D. | 0.79±0.01 | 1.06±0.09 | 0.97±0.08 | 0.86±0.02 | 0.75±0.03 |
| 23:0 | N.D. | 1.21±0.06 | 1.35±0.10 | 1.28±0.06 | 1.25±0.03 | 1.18±0.04 |
| 24:0 | N.D. | 1.53±0.00 | 2.85±0.15 | 2.84±0.11 | 2.17±0.09 | 2.11±0.08 |
| 24:1 | N.D. | 0.97±0.03 | 1.43±0.05 | 1.40±0.06 | 1.16±0.02 | 1.14±0.04 |
| 22:6n-3 | N.D. | 0.27±0.09 | 5.35±0.17 | 5.43±0.64 | 2.51±0.05 | 1.83±0.07 |
| Σn-3LC-PUFA ³ | N.D. | 0.56±0.10 | 6.36±0.20 | 6.43±0.68 | 3.39±0.06 | 2.51±0.09 |
| DHA (g/100 g, dry-matter) | N.D. | 0.01±0.00 | 0.12±0.01 | 0.13±0.02 | 0.07±0.00 | 0.05±0.00 |
| Σn-3LC-PUFA (g/100 g, dry-matter) | N.D. | 0.02±0.00 | 0.15±0.01 | 0.15±0.02 | 0.09±0.00 | 0.07±0.00 |

¹Three different taurine (T) enrichment levels, including 0 ppm (T-0) and 800 ppm (T-800). ²Values are means±standard deviation of triplicate (n=3). ³LC-PUFA, long chain polyunsaturated fatty acids; Σn-3LC-PUFA: 18:4n-3, 20:4n-3, 20:5n-3, 22:5n-3, 22:6n-3. N.D., Not detected.

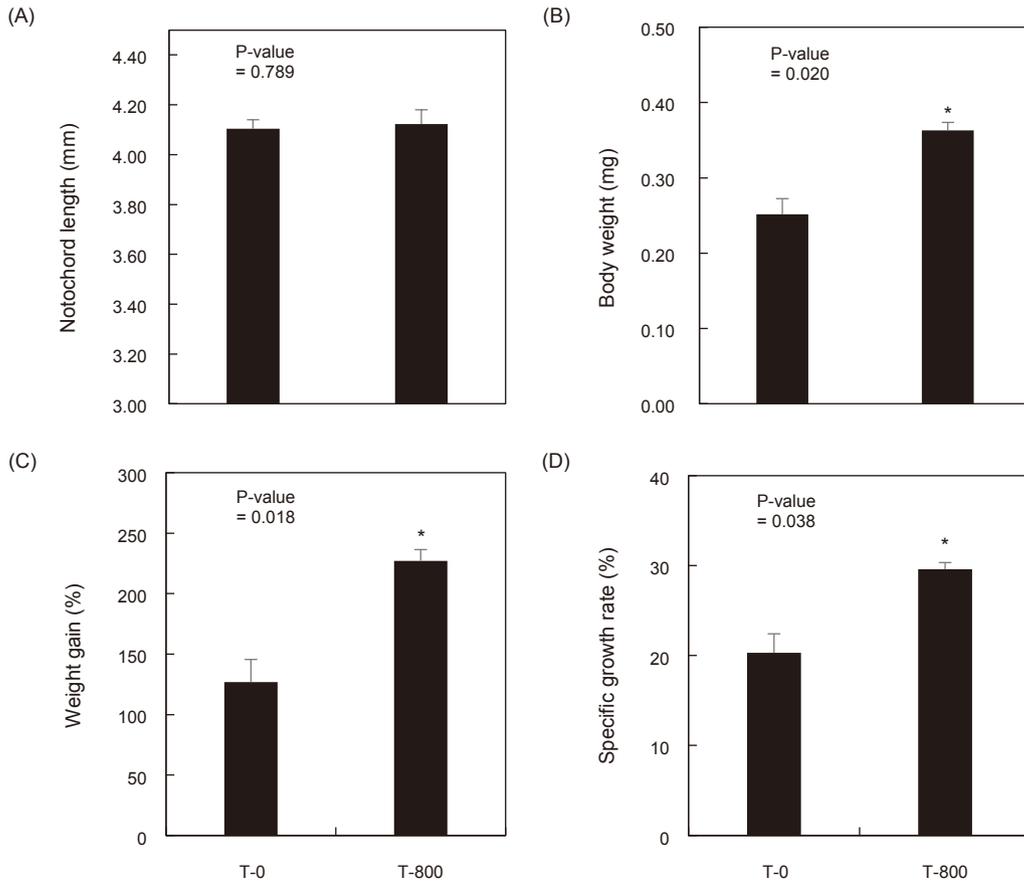


Fig. 1. Growth performance (A, notochord length; B, body weight; C, weight gain; D, specific growth rate) of yellowtail *Seriola quinqueradiata* larvae fed at the different taurine-enriched rotifers for 5 days ($n=3$ tanks; twenty pooled fish per tank). Vertical bar indicates the standard error of mean values of triplicate tanks. The asterisks indicate significant differences between T-0 and T-800 by t -test ($P<0.05$).

및 발달 부진과 같은 문제로 이어질 수 있다(Salze and Davis, 2015). Takahashi et al. (2005) 및 Takeuchi (2009)에 의하면, 로티퍼를 섭취한 부화 자어의 타우린 함량은 어체 성장 및 발달 과정에 따라 급격히 감소한다고 보고하였다. 즉, 어류의 타우린 요구량은 자어시기에 높으며, 공급되는 로티퍼에는 더 많은 타우린이 필요하다는 것을 시사한다. 실제로 로티퍼의 타우린 함량은 알테미아 및 요각류와 비교하여 현저히 낮은 수준의 타우린을 함유하고 있으며, 이는 종자 생산 시에 로티퍼의 장기간 단일 공급이 부화 자어의 타우린 결핍을 더욱 가속화한다는 것을 시사한다(Takeuchi, 2009). 따라서 타우린 결핍에 의한 자어의 성장 및 발달 저하의 문제점을 개선하기 위해 로티퍼의 타우린 영양 강화 연구가 다양한 어종에서 수행되었으며, 공통적으로 로티퍼의 타우린 영양 강화로 인해 성장이 개선됨을 확인하였다(Chen et al., 2004, 2005; Pinto et al., 2010; Salze et al., 2011; Matsunari et al., 2013; Hawkyard et al., 2014; Cho et al., 2022). 본 연구에서 대조구와 비교하여 타우린 영양 강화 공급구에서 유의적으로 높은 증체율 및 일간 성장률을 나타냈다. 척

삭 길이의 경우 대조구와 비교하여 유의적인 차이를 보이지는 않았다. Schreck and Moyle (1990)에 따르면 어류는 성장함에 따라 무게 성장(weight growth)이 길이 성장(length growth)보다 우선적으로 성장하며, Hopkins (1992)는 짧은 기간에 초기 자치어를 이용할 경우 길이 성장보다 무게 성장이 기하급수적으로 증가한다고 밝혔다.

어류의 종자 생산 시 부레 형성 및 부레 팽창률의 저하는 초기 대량 감모의 원인 중 하나인 침강사를 유발한다(Matsunari et al., 2013). 방어를 포함해 참다랑어, 갯방어 등의 어종에서도 침강사로 인해 자어의 폐사율이 높음을 보고하였다(Nakagawa et al., 2011; Kurata et al., 2014; Matsunari et al., 2013). Salze et al. (2011)의 연구에 따르면, 부화 후 3일령부터 27일령의 날새기(*Rachycentron canadum*) 부화자어의 타우린 영양 강화로 티퍼 공급구가 미 영양 강화 공급구보다 두개관 및 신경 형성, 측선 발달 등 개체 발달 측면에서 약 4-5일 정도 빠르게 발달하였음을 확인하였다. 또한 Kim et al. (2016)의 연구에 따르면 참돔 부화자어의 타우린 영양 강화 로티퍼 공급구가 미 공급구보

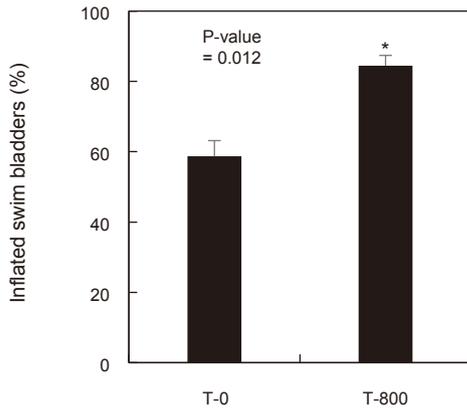


Fig. 2. The mean of the fractions of larvae with inflated swim bladders of yellowtail *Seriola quinqueradiata* larvae fed at the different taurine-enriched rotifers for 5 days ($n=3$ tanks; 30 fish per tank). Vertical bar indicates the standard error of mean values of triplicate tanks. The asterisks indicate significant differences between T-0 and T-800 by t -test ($P<0.05$).

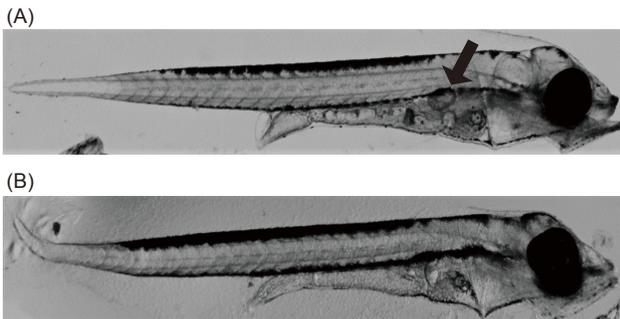


Fig. 3. Image of yellowtail *Seriola quinqueradiata* larvae showing successful (upper) and unsuccessful (lower) first swim bladder inflation. In (A) the swim bladder can be seen to be inflated via the presence of a bubble just above the gut while this feature is absent in (B).

다 높은 단백질 및 핵산 함량을 나타내었으며, 초기 발달 및 성장에 영향을 주는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에서는 대조구에 비하여 타우린 영양 강화 공급구에서 유의적으로 높은 부레 팽창률을 나타냈다.

본 연구는 로티퍼의 타우린 영양강화가 자어기 방어의 성장 및 부레 팽창을 개선에 효과적임을 시사하며, 상기 결과는 방어를 포함한 해산어의 종자 생산 시 로티퍼의 타우린 영양강화의 필요성을 더욱 이해하는데 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 종자생산 시 효과적인 타우린 영양 강화를 위해서는 최적 영양 강화농도 및 강화 시간 등을 구명하는 연구들이 수반되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2022년도 국립수산물과학원 수산시험연구사업 (R2022010)의 지원으로 수행되었다.

References

- Andersen SM, Waagbø R and Espe M. 2016. Functional amino acids in fish health and welfare. *Front Biosci* 8, 143-169. <https://doi.org/10.2741/757>.
- Bavi Z, Zakeri M, Mousavi SM and Yavari V. 2022. Effects of dietary taurine on growth, body composition, blood parameters, and enzyme activities of juvenile sterlet (*Acipenser ruthenus*). *Aquac Nutr* 2022, 1713687. <https://doi.org/10.1155/2022/1713687>.
- Biasato I, Chemello G, Caimi C, Oddon SB, Capucchio MT, Colombino E and Gasco L. 2022. Taurine supplementation in plant-based diets for juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth performance, whole body composition, and histomorphological features. *Anim Feed Sci Technol* 289, 115314. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115314>.
- Cahu C and Infante JZ. 2001. Substitution of live food by formulated diet in marine fish larvae. *Aquaculture* 200, 161-180. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00699-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00699-8).
- Chen JN, Takeuchi T, Takahashi T, Tomoda T, Koiso M and Kuwada H. 2004. Effect of rotifers enriched with taurine on growth and survival activity of red sea bream *Pagrus major* larvae. *Nippon Suisan Gakkaishi* 70, 542-547. <https://doi.org/10.2331/suisan.70.542>.
- Chen JN, Takeuchi T, Takahashi T, Tomoda T, Koiso M and Kuwada H. 2005. Effect of rotifers enriched with taurine on growth in larvae of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 71, 342-347. <https://doi.org/10.2331/suisan.71.342>.
- Cho JH, Kim JH and Park JW. 2022. A preliminary study on the effects of taurine-enriched rotifers on the growth and survival of the small yellow croaker *Larimichthys polyactis* larvae. *Animals* 12, 1403. <https://doi.org/10.3390/ani12111403>.
- Conceição L, Aragão C and Rønnestad I. 2011. Proteins. In: *Larval Fish Nutrition*. Holt J, ed. John Wiley and Sons Inc., West Sussex, U.K., 83-116.
- Corriero A, Wylie MJ, Nyuji M, Zupa R and Mylonas CC. 2021. Reproduction of greater amberjack (*Seriola dumerili*) and other members of the family Carangidae. *Rev Aquac* 13, 1781-1815. <https://doi.org/10.1111/raq.12544>.
- Dabrowski K. 1986. Ontogenetical aspects of nutritional requirements in fish. *Comp Biochem Physiol* 85, 639-655. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(86\)90272-0](https://doi.org/10.1016/0300-9629(86)90272-0).
- Dong CM, Lee MN, Kim EM, Park JY, Kim GD and Noh JK. 2020. Development and genetic diversity analysis of microsatellite markers using next-generation sequencing in

- Seriola quinqueradiata*. J Life Sci 30, 291-297. <https://doi.org/10.5352/JLS.2020.30.3.291>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2019. Statistic Database for Fishery and Aquaculture. Retrieved from http://fao.org/fishery/statistics-query/en/capture/capture_quantity on Mar 21, 2022.
- Fu Z, Yang R, Zhou S, Ma Z and Zhang T. 2021. Effects of rotifers enriched with different enhancement products on larval performance and jaw deformity of golden pompano larvae *Trachinotus ovatus* (Linnaeus, 1758). Front Mar Sci 7, 626071. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626071>.
- Gao YS, Chen YK, Wang QJ, Wang GQ, Lin LL, Chen XM and Zhang DM. 2021. L-carnitine can improve the population growth and anti-stress ability of rotifer (*Brachionus rotundiformis*) under ammonia stress. Aquac Rep 20, 100622. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100622>.
- Goto T, Matsumoto T, Murakami S, Takagi S and Hasumi F. 2003. Conversion of cysteate into taurine in liver of fish. Fish Sci 69, 216-218. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2003.00610.x>.
- Goto T, Tiba K, Sakurada Y and Takagi S. 2001. Determination of hepatic cysteinesulfinate decarboxylase activity in fish by means of OPA-prelabeling and reverse-phase high-performance liquid chromatographic separation. Fish Sci 67, 553-555. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2001.00271.x>.
- Hamre K. 2016. Nutrient profiles of rotifers (*Brachionus* sp.) and rotifer diets from four different marine fish hatcheries. Aquaculture 450, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.07.016>.
- Hamre K, Srivastava A, Rønnestad I, Mangor-Jensen A and Stoss J. 2008. Several micronutrients in the rotifer *Brachionus* sp. May not fulfill the nutritional requirements of marine fish larvae. Aquac Nutr 14, 51-60. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00504.x>.
- Hawkyard M, Laurel B and Langdon C. 2014. Rotifers enriched with taurine by microparticulate and dissolved enrichment methods influence the growth and metamorphic development of northern rock sole (*Lepidopsetta polyxystra*) larvae. Aquaculture 424-425, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.12.035>.
- Higuchi K, Gen K, Izumida D, Kazeto Y, Hotta T, Takashi T, Aono H and Soyano K. 2017. Changes in plasma steroid levels and gene expression of pituitary gonadotropins, testicular steroidogenesis-related proteins and insulin-like growth factors during spermatogenesis of the yellowtail *Seriola quinqueradiata*. Fish Sci 83, 35-46. <https://doi.org/10.1007/s12562-016-1035-3>.
- Higuchi K, Yoshida K, Gen K, Matsunari H, Takashi T, Mushiaki K and Soyano K. 2018. Effect of long-term food restriction on reproductive performances in female yellowtail, *Seriola quinqueradiata*. Aquaculture 486 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.032>.
- Hopkins KD. 1992. Reporting fish growth: A review of the basics. J World Aquac Soc 23, 173-179. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1992.tb00766.x>.
- Katagiri R, Sasaki T, Diaz A, Ando M, Margulies D, Scholey VP and Sawada Y. 2017. Effect of taurine enrichment in rotifer (*Brachionus* sp.) on growth of larvae of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* (Temminck & Schlegel) and yellowfin tuna *T. albacares* (Temminck & Schlegel). Aquac Res 48, 3013-3031. <https://doi.org/10.1111/are.13134>.
- Kim YS, Sasaki T, Awa M, Inomata M, Honryo T, Agawa Y, Ando M and Sawada Y. 2016. Effect of dietary taurine enhancement on growth and development in red sea bream *Pagrus major* larvae. Aquac Res 47, 1168-1179. <https://doi.org/10.1111/are.12573>.
- Kolkovski S and Sakakura Y. 2007. Yellowtail kingfish culture-opportunities and problems. World Aquac 38, 44-48.
- Kurata M, Ishibashi Y, Takii K, Kumai H, Miyashita S and Sawada Y. 2014. Influence of initial swimbladder inflation failure on survival of Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis* (Temminck and Schlegel), larvae. Aquac Res 45, 882-892. <https://doi.org/10.1111/are.12027>.
- Lee SK, Kim YU, Myoung JG and Kim JM. 2000. Dictionary of Korean Fish Names. Junginsa Publication Co., Seoul, Korea, 1-222.
- Matsunari H, Arai D, Koiso M, Kuwada H, Takahashi T and Takeuchi T. 2005. Effect of feeding rotifers enriched with taurine on growth performance and body composition of Pacific cod larvae *Gadus macrocephalus*. Aquac Sci 53, 297-304. <https://doi.org/10.1123/aquaculturesci.1953.53.297>.
- Matsunari H, Hamada K, Mushiaki K and Takeuchi T. 2006. Effects of taurine levels in broodstock diet on reproductive performance of yellowtail *Seriola quinqueradiata*. Fish Sci 72, 955-960. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2006.01243.x>.
- Matsunari H, Hashimoto H, Iwasaki T, Oda K, Masuda Y, Imaizumi H, Teruya K, Furuita H, Yamamoto T, Hamada K and Mushiaki K. 2013. Effect of feeding rotifers enriched with taurine on the growth and survival of larval amberjack *Seriola dumerili*. Fish Sci 79, 815-821. <https://doi.org/10.1007/s12562-013-0657-y>.
- Mæhre A, Rønnestad I, Fyhn HJ, Berg L and Waagbø R. 2000. Water-soluble vitamins in natural plankton (copepods) during two consecutive spring blooms compared to vitamins in *Artemia franciscana nauplii* and *metanauplii*. Mar Biol 136, 765-772. <https://doi.org/10.1007/s002270000280>.
- Mæhre HK, Hamre K and Elvevoll EO. 2012. Nutrient evaluation of rotifers and zooplankton: feed for marine fish larvae. Aquac Nutr 19, 301-311. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2012.00960.x>.
- Nakagawa T, Matsunari H, Yokota T, Tanaka H, Funamoto T, Ito S, Yamamoto T and Unuma T. 2019. Effects of taurine-enriched early live food (rotifer and *Artemia nauplii*) on the

- survival and growth of walleye pollock larvae. *Aquac Sci* 67, 157-170. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.67.157>.
- Nakagawa Y, Kurata M, Sawada Y, Sakamoto W and Miyashita S. 2011. Enhancement of survival rate of Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) larvae by aeration control in rearing tank. *Aquat Living Resour* 24, 403-410. <https://doi.org/10.1051/alr/2011150>.
- Nguyen HP, Khaioan P, Fukada H, Suzuki N and Masumoto T. 2015. Feeding fermented soybean meal diet supplemented with taurine to yellowtail *Seriola quinqueradiata* affects growth performance and lipid digestion. *Aquac Res* 46, 1101-1110. <https://doi.org/10.1111/are.12267>.
- Pinto W, Figueira L, Ribeiro L, Yúfera M, Dinis MT and Araújo C. 2010. Dietary taurine supplementation enhances metamorphosis and growth potential of *Solea senegalensis* larvae. *Aquaculture* 309, 159-164. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.08.031>.
- Ripps H and Shen W. 2012. Review: Taurine: a “very essential” amino acid. *Mol Vis* 18, 2673-2686.
- Rotman F, Stuart K and Drawbridge M. 2017. Effects of taurine supplementation in live feeds on larval rearing performance of California yellowtail *Seriola lalandi* and white seabass *Atractoscion nobilis*. *Aquac Res* 48, 1232-1239. <https://doi.org/10.1111/are.12964>.
- Salze G, Craig SR, Smith BH, Smith EP and McLean E. 2011. Morphological development of larval cobia *Rachycentron canadum* and the influence of dietary taurine supplementation. *J Fish Biol* 78, 1470-1491. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.02954.x>.
- Salze GP and Davis DA. 2015. Taurine: a critical nutrient for future fish feeds. *Aquaculture* 437, 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.12.006>.
- Sawada Y, Mizushima Y, Sera T, Honryo T, Kurata M and Agawa Y. 2021. Requirement of access to an air-water interface for initial swim bladder inflation and ontogenetic and day-night change of body-specific gravity in Japanese amberjack, *Seriola quinqueradiata*, larvae. *Aquac Res* 52, 6485-6496. <https://doi.org/10.1111/are.15516>.
- Schreck CB and Moyle PB. 1990. *Methods for Fish Biology*. American Fisheries Society, Bethesda, MD, U.S.A., 363-387.
- Sicuro B and Luzzana U. 2016. The state of *Seriola* spp. other than yellowtail (*S. quinqueradiata*) farming in the world. *Rev Fish Sci Aquac* 24, 314-325. <https://doi.org/10.1080/23308249.2016.1187583>.
- Takagi S, Murata H, Goto T, Endo M, Yamashita H and Ukawa M. 2008. Taurine is an essential nutrient for yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed non-fish meal diets based on soy protein concentrate. *Aquaculture* 280, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.05.012>.
- Takagi S, Murata H, Goto T, Ichiki T, Munasinghe DM, Endo M and Kuramoto T. 2005. The green liver syndrome is caused by taurine deficiency in yellowtail, *Seriola quinqueradiata* fed diets without fishmeal. *Aquac Sci* 53, 279-290. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci1953.53.279>.
- Takahashi T, Amano T and Takeuchi T. 2005. Establishment of direct enrichment methods of taurine to rotifer. *Aquac Sci* 53, 121-126. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci1953.53.121>.
- Takashi T, Kohno H, Sakamoto W, Miyashita S, Murata O and Sawada Y. 2006. Diel and ontogenetic body density change in Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis* (Temminck and Schlegel), larvae. *Aquac Res* 37, 1172-1179. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01544.x>.
- Takeuchi T. 2009. Nutritional studies on improvement of health and quality of marine aquatic animals larvae. *Nippon Suisan Gakkaishi* 75, 623-635. <https://doi.org/10.2331/suisan.75.623>.
- Tanaka Y, Kumon K, Nishi A, Eba T, Nikaido H and Shiozawa S. 2009. Status of the sinking of hatchery-reared larval Pacific bluefin tuna on the bottom of the mass culture tank with different aeration design. *Aquac Sci* 57, 587-593. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.57.587>.
- Urbich AV, Furuya WM, Michelato M, Panacevicz PAP, da Cruz TP, Furuya LB and Furuya VRB. 2022. Synergistic effects of dietary methionine and taurine on growth performance, blood parameters, expression in hepatic sulfur-metabolism genes, and flesh quality of large Nile tilapia. *Anim Feed Sci Technol* 288, 115291. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115291>.
- Van der Meeren T, Olsen RE, Hamre K and Fyhn HJ. 2008. Biochemical composition of copepods for evaluation of feed quality in production of juvenile marine fish. *Aquaculture* 274, 375-397. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.041>.
- Wacker A and Martin-Creuzburg D. 2012. Biochemical nutrient requirements of the rotifer *Brachionus calyciflorus*: co-limitation by sterols and amino acids. *Funct Ecol* 26, 1135-1143. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2012.02047.x>.
- Wijayasinghe YS, Tyagi A and Poddar NK. 2017. Regulation of cell volume by osmolytes. In: *Cellular Osmolytes*. Rajendrakumar SL and Dar T, eds. Springer, Singapore, 195-228. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3707-8_9.
- Woolley LD and Qin JG. 2010. Swimbladder inflation and its implication to the culture of marine finfish larvae. *Rev Aquac* 2, 181-190. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2010.01035.x>.
- Yokoyama M, Takeuchi T, Park GS and Nakazoe J. 2001. Hepatic cysteinesulphinate decarboxylase activity in fish. *Aquac Res* 32, 216-220. <https://doi.org/10.1046/j.1355-557x.2001.00017.x>.
- Yoshimatsu T and Hossain MA. 2014. Recent advances in the high-density rotifer culture in Japan. *Aquac Int* 22, 1587-1603. <https://doi.org/10.1007/s10499-014-9767-5>.