KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 53(4), 530-537, 2020

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 53(4),530-537,2020

다양한 Rotifer (*Brachionus plicatilis*) 영양강화가 태평양 대구(*Gadus macrocephalus*) 자어의 성장 및 지방산 조성에 미치는 영향

최진 · 한경식[1] · 변순규[1] · 임현정[1] · 이창환[2] · 이다연[2] · 김희성[2]*

국립수산과학원 양식관리과, [1]국립수산과학원 동해수산연구소, [2]경상대학교 해양식품생명의학과

Effect of Different Rotifer Enrichment Products on Survival, Growth, and Fatty Acid Composition of Larval Pacific Cod *Gadus macrocephalus*

Jin Choi, Gyeong Sik Han[1], Soon-Gyu Byun[1], Hyun Jeong Lim[1], Chang-Hwan Lee[2], Da-Yeon Lee[2] and Hee Sung Kim[2]*

Aquaculture Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
[1]Aquaculture Industry Research Division, East Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gangneung 25435, Korea
[2]Department of Marine Seafood and Aquaculture Science, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

This study compared the survival rates, growth, and fatty acid content of larval Pacific cod *Gadus macrocephalus* fed with rotifers raised on different enrichment diets. We used four commercial rotifer enrichment products (one domestic, ER1, and three imported, ER2, ER3 and ER4). Twelve 200-L tanks were used, with three replicates per treatment. Larvae were fed rotifers 3 times daily at a rate of 5 rotifers/ml/feeding from 7 to 21 days post-hatch. At the end of the feeding trial, the survival rate and total length of larvae fed ER3 were greater than those of larvae fed ER1, ER2, or ER4. ER3 had the highest proportions of eicosapentaenoic acid (EPA), docosahexaenoic acid (DHA), and polyunsaturated acid (PUFA). Partially reflecting this composition, larvae fed ER3 had the highest proportions of DHA and PUFA. These results show a positive effect of rotifer DHA and PUFA proportions on the survival and growth rates of Pacific cod larvae.

Keywords: Rotifer, Larval pacific cod, Enrichment, Growth, Fatty acid composition

서 론

태평양 대구(*Gadus macrocephalus*)는 한국과 일본 해역 및 오호츠크해, 베링해, 알래스카만과 캘리포니아 연안까지 광범위하게 분포하고 수심 40-500 m에서 서식하는 대표적인 한해성 어종이다(Westrheim, 1996; NOAA, 2010). 국내 연근해 어획량은 1982년에 약 4,500톤으로 가장 높았으나, 1990년대에 약 500톤 이하로 급격하게 감소하였다. 이에 따라 대구의 자원 회복을 위한 다양한 초기 종자생산 기술 개발 연구(Kim et al., 2007; Lee et al., 2007; Gwak, 2010; Choi et al., 2011; Gwak et al., 2012; Shin et al., 2019)가 이루어졌으며, 이를 통한 수정란 및 치어 방류사업을 통해 최근 2019년에는 어획량이 약 1만톤으로 상승하여 자원이 회복되고 있는 추세이다(KOSIS, 2020). 그러나 보다 안정적이고 건강한 종자를 대량 생산하기 위해서는 다양한 분야의 연구가 수행될 필요가 있으며, 특히 초기 자어의 영양학적 연구가 반드시 수행되어야 한다.

일반적으로 난황 흡수 직후 자어의 영양 결핍과 기아는 비정상적인 소화기관의 발달, 먹이 효율의 감소 및 먹이섭취 활동의 감소 등과 밀접한 관계가 있다(Heming et al., 1982; Taylor and Freeberg, 1984; Rice et al., 1987; Gisbert et al., 2004). 또한 자어의 입 크기를 고려한 적정 먹이생물의 선택과 이들 먹이생물 내 필수영양소의 함량은 초기 개체발생 단계의 영양요구량 측면에서 매우 중요하다(Hamre, 2016). 대부분의 해산어 초기 자어의 먹이로서 대량 생산과 영양강화를 통한 영양소

***Corresponding author:** Tel: +82. 55. 772. 9154 Fax: +82. 55. 772. 9159
E-mail address: bluesonn@gnu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial Licens (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.2020.0530
Korean J Fish Aquat Sci 53(4), 530-537, August 2020
Received 18 June 2020; **Revised** 15 July 2020; **Accepted** 15 July 2020
저자 직위: 최진(연구사), 한경식(연구보조원), 변순규(연구관), 임현정(과장), 이창환(대학생), 이다연(대학생), 김희성(조교수)

함량 조절이 용이한 rotifer와 *Artemia*를 주요 먹이생물로 공급한다(Yoshimura et al., 1997; Dhert et al., 2001; Kotani et al., 2009). 특히, rotifer *Brachionus plicatilis*는 난황 흡수 후 자어가 섭취하기에 용이한 크기와 섭취 자극 움직임 등의 특징을 가지고 있어 개구 후 첫 먹이로서 주로 공급된다. Rotifer는 *Chlorella* 또는 빵 효모를 먹이로 이용하여 대량 배양이 가능하지만, 초기 자어의 발달과 생존율 향상을 위한 필수영양소가 결핍이 발생하기 때문에 먹이내 필수영양소의 함유를 위한 영양강화가 필요하다(Coutteau and Sorgeloos, 1997; Sargent et al., 1997, 1999a; Cutts et al., 2006). 특히 docosahexaenoic acid (DHA, C22:6n-3), eicosapentaenoic acid (EPA, C20:5n-3) 및 arachidonic acid (ARA, C20:4n-6)과 같은 다가불포화지방산(poly unsaturated fatty acid, PUFA)은 세포막 인지질 이중층의 주요 구성 요소로서 초기 자어의 망막과 뇌 등의 신경 발달에 필수영양소인 것으로 알려져 있으며(Sargent et al., 1997,1999a; Benítez-Santana et al., 2007), 자어의 변태, 체색소 및 스트레스 내성에 효과적인 것으로 알려져 있다(Kanazawa, 1997; Rainuzzo et al., 1997; Watanabe and Kiron, 1994; Weirich and Reigh, 2001).

이와 같이 초기 자어의 성장과 발달을 위해서는 rotifer의 PUFA 함유를 위한 영양강화는 필수적이기 때문에 다양한 상업용 시판 영양강화제가 개발 및 판매되고 있으며, 이를 이용한 영양강화 rotifer의 공급에 따른 다양한 해산어 자어의 생산성에 미치는 영향에 대한 연구가 다수 수행된 바 있다(Coutteau and Sorgeloos, 1997; Dhert et al., 2001; Sorgeloos et al., 2001; Harel et al., 2002; Park et al., 2006; Cavalin and Weirich, 2009). 그러나 태평양 대구 자어의 첫 먹이로서 PUFA가 함유된 상업용 시판 영양강화제를 이용한 영양강화 rotifer의 이용성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 상업용 시판 영양강화제를 이용한 rotifer의 영양강화가 태평양 대구 자어의 생존율, 성장 및 지방산 조성에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

Rotifer 영양 강화

실험에 이용된 rotifer는 국립수산과학원 동해수산연구소(Gangneung, Korea)에서 Yoo et al. (2016)의 방법으로 약 155 L 저온성 먹이생물 배양장치에서 10℃에 순치된 rotifer를 이용하여 영양강화 하였다. 영양강화는 수온 10℃ 및 염분 20 psu 배양수가 수용된 원형 배양수조(6 L)에 개체 밀도가 5,000개체/L가 되도록 접종하여 10℃로 조절된 배양기(Cryste, NOVAPRO Co., Ltd., Gwangmyeong, Korea)에서 24시간동안 영양강화 하였다. 영양강화에 이용된 영양강화제는 국내에서 시판되고 있는 영양강화제 1종(ER1)과 국외 시판용 영양강화제 3종(ER2, ER3 및 ER4)을 사용하였다. 준비한 영양강화제는 1일 2회, 각 로티퍼 배양 수조에 제품사에서 권고하는 첨가 용량에 따라 첨가하였으며, 영양강화한 rotifer는 담수로 잘 세척한 후 먹이원으로 공급하였다.

자어 사육

2019년 1월 경상남도 진해만에서 어획된 대구 어미 5마리를 복부 압박을 통해 확보한 성숙란과 정액을 건식법으로 인공 수정하였다. 수정란은 세란 작업을 거친 후 국립수산과학원 동해수산연구소에 위치한 여과 및 살균 해수가 수용된 5톤 원형 polyethylene 수조의 바닥에 수정란을 고르게 분산시켜 부화를 유도하였다. 부화 전까지 사육수의 평균 수온은 Seo et al. (2007)에 따라 부화 적정 수온인 7℃ 내외를 유지하였고, 환수량은 1회전/일, 용존산소와 염분은 각각 9.14±0.26 mg/L와 33.24±0.28 psu를 유지하였다. 수정 후 272시간째에 부화가 관찰되기 시작하였으며, 288시간째에 거의 모든 수정란이 부화하였다. 부화한 자어는 핸들링에 매우 민감하므로 바로 사육실험에 이용하지 않고, 폐사 발생이 안정적인 시기(부화 후 13일)까지 부화 수조에서 사육을 실시하였으며, 이때 먹이의 공급 영양강화 하지 않은 rotifer를 1일 3회, 3-4개체/mL 밀도로 공급하였다. 이후 사육 실험을 위하여 마리당 평균 6.0 mm의 부화 후 14일령 자어를 자외선살균기와 마이크로필터(ø 50 μm)로 살균 및 여과한 해수(33.4 psu)가 담긴 12개의 300 L 원형 fiber-reinforced plastic 수조(수량, 200 L)에 500마리씩을 각각 분산 수용하였다. 사육 실험기간 동안 수온은 평균 7.2℃를 유지하였고, 환수량은 실험 시작 시에는 3 L/min에서 종료 시에는 5 L/min로 점차적으로 증가시켰다. 광주기는 12 L (light): 12 D (dark) 조건을 유지하였고, 영양강화 rotifer의 공급은 1회 공급 시 5개체/mL밀도로 1일 3회(09:00, 13:00 및 17:00), 2주간 공급하였으며 총 3반복구로 진행하였다.

샘플링 및 성장 평가

2주간의 사육 실험 종료시 각 실험수조에서 생존한 자어 50마리를 무작위로 샘플하였으며, 각 자어의 전장은 digital caliper (Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Japan)를 이용하여 0.01 mm단위까지 전장을 측정하였고, 측정한 자어는 일반성분 및 지방산 조성 분석 전까지 초저온(-70℃) 냉동고에 보관하였다.

영양강화 rotifer와 자어의 일반성분 및 지방산 분석

일반성분 및 지방산 분석을 위해 사육 실험 시작시 샘플링한 자어 500마리와 종료시 자어 50마리 및 먹이로 공급된 실험구별 영양강화 rotifer는 증류수로 깨끗하게 세척한 후 분석에 이용하였다. 일반성분분석은 AOAC (1990)의 방법에 따라 조단백질(N×6.25)은 KD310-A-1015 KjelROC Analyzer (OPSIS Liquid LINE, Sweden)을 이용하여 분석하였고, 조지질은Soxtec extractor (ST 243 Soxtec™; FOSS, Hillerod, Denmark)를 사용하여 Soxhlet 추출법으로 분석하였다. 수분은 105℃ dry oven에서 24시간 건조시킨 후 측정하였으며, 회분은 550℃ 회

화로에서 4시간동안 태운 후 정량하였다. 지방산 분석은 Folch et al. (1957)의 분석 방법에 따라 chloroform과 methanol 혼합액(2:1 v/v)으로 영양강화 rotifer와 사육 종료시 자어의 총 지질을 추출하여 BF_3-MeOH (Sigma, St. Louis, MO, USA)으로 지방산을 methylation 시킨 후 SP-2560 capillary column (100 m × 0.25 mm i.d., 0.2 μm film thickness; Supelco, Bellefonte, PA, USA)이 장착된 perkinElmer clarus 600 gas chromatograph (Shelton, CT, USA)으로 지방산 조성을 분석하였다.

통계 분석

SPSS program version 25.0 (SPSS Michigan Avenue, Chicago, IL, USA)를 이용하여 One-way ANOVA와 Duncan's multiple range test (Duncan, 1955)로서 각 실험구간의 유의성을 검증하였다.

결 과

시판용 영양강화제로 영양강화한 rotifer의 일반성분 및 지방산 조성 결과는 Table 1에 나타내었다. 영양강화 rotfier의 수분, 조단백질, 조지질 및 회분 함량은 각각 70.1-71.4%, 13.7-14.5%, 10.8-11.8% 및 2.1-2.4%의 범위로 나타났다. 그러나 linoleic acid (C18:2n-6)의 함량은 ER2 실험구에서 44.46%로 가장 높게 나타났지만, EPA와 DHA 함량은 ER3 실험구가 각각 7.03%와 24.06%로 다른 실험구에 비하여 비교적 높게 나타났다. 또한 ER3 실험구의 SFA과 n-6 FA 함량 및 EPA/DHA은 다른 실험구에 비하여 낮았으나, PUFA 함량과 n-3 FA 함량 및 n-3/n-6은 다른 실험구에 비해 높게 나타났다.

다양한 상업용 영양강화제로 영양강화한 rotifer를 2주간 공급 시 자어의 생존율과 전장은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 생존율은 ER3 공급구가 유의적으로 가장 높게 나타났으며 ($P<0.05$), ER4 공급구가 유의적으로 가장 낮은 생존율을 보였다($P<0.05$). 전장은 ER4 공급구가 ER3 공급구보다 유의적으로 낮았으나($P<0.05$), ER1과 ER2 공급구와는 유의적인 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$).

시판 영양강화제로 영양강화한 rotifer를 2주간 공급받은 대구 자어의 일반성분 및 지방산 조성 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 사육 종료시 자어의 일반성분은 공급된 영양강화 rotifer에 따른 유의한 영향이 나타나지 않았다($P<0.05$). Oleic acid (C18:1n-9)의 함량은 ER1, ER2 및 ER4를 공급한 실험구가 ER3 공급구에 비하여 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$). Linoleic acid (C18:2n-6)의 함량은 ER4를 공급받은 실험구가 다른 모든 실험구에 비하여 유의적으로 높게 나타났으나 ($P<0.05$), α-linolenic acid (C18:3n-3)의 함량은 ER2를 공급받은 실험구가 다른 모든 먹이 공급구에 비하여 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$). EPA 함량은 ER2와 ER3을 공급받은 실험구가 ER1을 공급받은 실험구에 비하여 유의적으로 높게 나타났으나($P<0.05$), ER4를 공급받은 실험구와는 유의적인 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$). DHA 함량은 ER3을 공급받은 실험구가 나머지 다른 모든 먹이 공급구에 비하여 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$). SFA의 함량은 ER4 공급구가 다른 먹이 공급구에 비하여 유의적으로 높게 나타났으며($P<0.05$), PUFA, n-3 FA, n-3/n-6 및 DHA/EPA은 ER3을 공급받은 실험구가 ER1, ER2 및 ER4를 공급받은 실험구에 비하여 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$).

고 찰

Rotifer는 *Brachionus* 속으로 인위적으로 필수영양소의 함량을 영양강화를 통하여 조절이 가능할 뿐만 아니라 다양한 기호적인 특성(부유성, 움직임 등) 때문에 대다수 해산어류 자어의

Table 1. Proximate composition (% wet weight) and fatty acid composition (% total fatty acids) of rotifers enriched with commercial enrichment products

	Experimental diets			
	ER1	ER2	ER3	ER4
Moisture	71.4	71.2	70.3	70.1
Crude protein	14.5	13.7	14.5	14.4
Crude lipid	10.8	11.5	11.5	11.8
Ash	2.4	2.1	2.1	2.1
Fatty acid				
C10:0	0.10	0.11	0.08	0.10
C12:0	0.37	0.30	0.18	0.44
C14:0	1.80	1.70	1.59	1.72
C16:0	19.44	19.70	16.62	19.59
C18:0	4.92	4.94	3.97	5.01
C20:0	0.32	0.35	0.24	0.34
C23:0	1.36	1.44	1.37	1.45
C18:1n−9	6.77	6.65	8.00	9.74
C18:2n−6	36.79	44.46	35.04	40.53
C18:3n−3	2.06	2.48	2.15	2.37
C20:4n−6	0.23	0.30	0.22	0.25
C20:5n−3	2.12	1.05	7.03	1.09
C22:6n−3	9.59	5.10	14.45	3.60
SFA	28.30	28.54	24.06	28.65
PUFA	50.79	53.39	58.89	47.83
n−3 FA	13.77	8.63	23.63	7.06
n−6 FA	37.01	44.76	35.26	40.78
n−3/n−6	0.37	0.19	0.67	0.17
DHA/EPA	4.53	4.86	2.06	3.30

ER, enriched rotifer; SFA, saturated fatty acid; PUFA, polyunsaturated fatty acid, DHA, docosa hexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

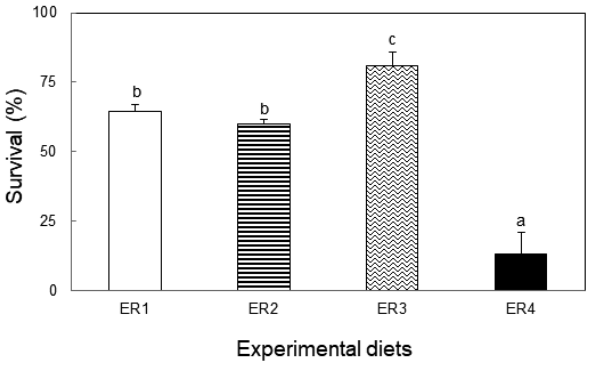

Fig. 1. Survival (%) of larval Pacific cod *Gadus macrocephalus* fed different enriched rotifers at the end of feeding trial. Values are means of triplicate±SE. Different letters in each bar indicated significant (P<0.05) by Duncan's multiple range test. ER, enriched rotifer.

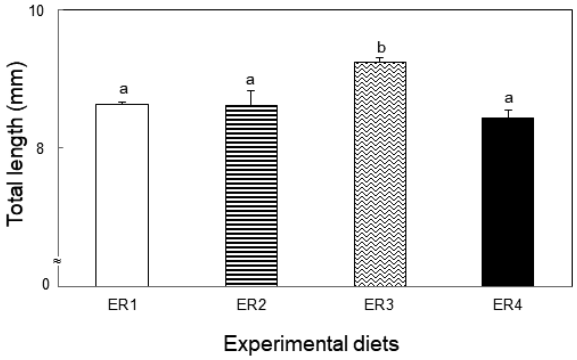

Fig. 2. Total length (mm) of larval Pacific cod *Gadus macrocephalus* fed different enriched rotifers at the end of feeding trial. Values are means of triplicate±SE. Different letters in each bar indicated significant (P<0.05) by Duncan's multiple range test. ER, enriched rotifer.

Table 2. Proximate composition (% wet weight) and fatty acid composition (% of total fatty acids) of larval Pacific cod *Gadus morhua* fed rotifers enriched with four different enrichment products

	Initial	Experimental diets			
		ER1	ER2	ER3	ER4
Moisture	81.2±0.21	81.6±0.24^{a}	82.0±0.20^{a}	81.8±0.23^{a}	81.2±0.19^{a}
Crude protein	13.8±0.17	14.1±0.19^{a}	14.2±0.23^{a}	14.3±0.12^{a}	14.1±0.18^{a}
Crude lipid	1.4±0.09	1.6±0.12^{a}	1.7±0.09^{a}	1.6±0.12^{a}	1.5±0.12^{a}
Ash	1.7±0.15	1.7±0.15^{a}	1.7±0.12^{a}	1.8±0.15^{a}	1.7±0.15^{a}
Fatty acid					
C10:0	0.01±0.005	3.10±0.046^{b}	3.02±0.099^{b}	2.15±0.105^{a}	2.12±0.153^{a}
C12:0	0.72±0.155	2.54±0.365^{a}	3.23±0.202^{a}	3.26±0.387^{a}	7.06±0.572^{b}
C14:0	1.20±0.050	1.43±0.124^{a}	1.40±0.123^{a}	1.79±0.091^{a}	1.28±0.091^{a}
C16:0	19.71±0.167	22.14±0.879^{a}	23.04±0.885^{a}	21.36±0.161^{a}	22.45±0.472^{a}
C18:0	12.30±0.155	14.16±0.651^{a}	15.21±0.688^{a}	13.40±0.391^{a}	16.42±0.798^{a}
C20:0	0.71±0.043	1.67±0.120^{a}	1.47±0.195^{a}	1.99±0.078^{a}	1.50±0.100^{a}
C23:0	1.75±0.168	2.54±0.218^{a}	2.24±0.096^{a}	2.71±0.101^{a}	4.04±0.112^{b}
C18:1n−9	7.60±0.358	11.53±0.770^{b}	12.23±0.533^{b}	8.07±0.242^{a}	11.17±0.615^{b}
C18:2n−6	16.83±0.293	15.09±0.460^{a}	17.14±0.487^{b}	17.24±0.580^{b}	19.13±0.664^{c}
C18:3n−3	1.44±0.202	2.00±0.087^{a}	3.12±0.160^{b}	2.06±0.079^{a}	1.82±0.099^{a}
C20:4n−6	3.57±0.227	3.46±0.217^{a}	3.55±0.082^{a}	4.17±0.088^{a}	3.62±0.227^{a}
C20:5n−3	4.11±0.015	3.82±0.128^{a}	4.46±0.222^{b}	4.38±0.181^{b}	3.91±0.103^{ab}
C22:6n−3	25.57±0.325	19.52±0.646^{a}	19.32±0.550^{a}	28.03±0.852^{b}	18.74±0.922^{a}
SFA	36.38±0.324	47.57±0.953^{a}	49.60±1.848^{a}	46.66±1.039^{a}	54.87±1.017^{b}
PUFA	51.19±1.032	43.88±1.111^{a}	47.59±0.244^{b}	55.89±0.911^{c}	47.22±0.873^{b}
n−3 FA	30.79±0.512	25.33±0.651^{ab}	26.90±0.301^{b}	34.47±0.712^{c}	24.47±0.943^{a}
n−6 FA	20.40±0.520	18.55±0.677^{a}	20.69±0.444^{b}	21.41±0.518^{bc}	22.75±0.444^{c}
n−3/n−6	1.51±0.013	1.37±0.047^{b}	1.30±0.040^{b}	1.61±0.048^{c}	1.08±0.054^{a}
DHA/EPA	6.15±0.102	5.12±0.202^{a}	4.37±0.345^{a}	6.43±0.414^{b}	4.78±0.114^{a}

ER, enriched rotifer; SFA, saturated fatty acid; PUFA, polyunsaturated fatty acid, DHA, docosa hexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid. Values (means of triplicate±SE) in the same row sharing a common superscript are not significantly different (P>0.05)

개구 후 첫 먹이로서 널리 이용되고 있다(Hagiwara et al., 2001; Kobayashi et al., 2008; Kotani et al., 2009). Rotifer의 영양강화는 영양소(지방산 등) 조성에 효과적으로 반영되지만(Frolov et al., 1991; Kotani et al., 2013), 배양 조건과 영양강화제의 종류에 따라 몇몇 영양소의 결핍이 나타날 수 있다(Hamre, 2016). 본 연구에서는 국내·외 시판용 영양강화제를 통한 영양강화가 rotifer의 PUFA 함량을 증가시키는 것으로 나타났다. 특히 ER3의 PUFA 함량이 다른 실험 먹이구에 비하여 높게 나타났으며, 필수지방산인 EPA와 DHA 함량 또한 다른 실험구보다 높게 나타났다.

이전 다수의 연구결과(Cho et al., 2001; Faulk and Holt, 2005; Faulk et al., 2005; Park et al., 2006; Garcia et al., 2008)와 유사하게 본 연구에서도 상업용 영양강화제를 통한 영양강화 rotifer의 공급이 태평양 대구 초기 자어의 생존율, 성장 및 지방산 조성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 영양강화를 통한 먹이생물내 필수지방산 함량의 차이는 해산어 자어의 생산성에 영향을 크게 미치는 것으로 알려져 있다(Bautista and De la Cruz, 1988; Sargent et al., 1997, 1999a, 1999b; Kanazawa, 2003; Tocher, 2003). 본 연구에서도 사육 실험에 이용된 각 영양강화 rotifer내 DHA와 EPA 함량 차이에 따라 생존율과 성장이 각각 차이가 나타났으며, PUFA 함량이 높은 ER3 공급구가 다른 먹이 공급구에 비하여 우수한 생존율과 성장을 보였다.

DHA 및 EPA와 같은 PUFA는 해산어 세포막의 인지질 층의 주요 구성 성분이며(Sargent et al., 1999a), 초기 자어 발달에 있어 중요한 에너지원으로 이용된다(Tocher, 2003). Craig et al. (1994)에서 PUFA 함량이 낮은 rotifer의 공급은 홍민어(*Sciaenops ocellatus*) 자어의 성장을 감소시켰으며, yellowtail flounder *Limanda ferruginea*는 rotifer 영양강화를 통한 PUFA 함량의 증가가 자어의 성장 향상에 효과적으로 나타났다(Copeman et al., 2002). 특히, PUFA 함량이 우수한 AlgaMac 2000 (Aquafauna Bio-Marine), Aquagrow Advantage 및 Aquagrow Advantage+ARA (Advanced BioNutrition Corporation, Columbia, Maryland, USA)과 같은 상업용 시판 영양강화제를 이용한 영양강화 rotifer의 공급은 비교적 PUFA 함량이 낮은 미세조류(*Isochrysis galbana* 또는 *Nannochloris oculate*)를 이용한 영양강화 rotifer 공급보다 yellowtail snapper *Ocyurus chrysurus* 자어의 성장을 향상시켰다(Faulk et al., 2005). Faulk and Holt (2005)의 연구에서도 PUFA 함량이 높은 상업용 영양강화제인 Algamac 2000, Algamac 2000+AquagrowARA 및 AlgaMac 3050 (Aquafauna Bio-Marine)로 영양강화한 rotifer를 cobia *Rachycentron canadum* 자어에 공급시 PUFA 함량이 낮은 미세조류 영양강화 rotifer 공급구보다 높은 성장을 보였다. 특히 냉수성 어종인 대서양 대구(*G. morhua*) 자어는 영양강화 rotifer의 PUFA 함량이 증가할수록 생존율과 성장 향상에 효과적이었다(Park et al., 2006). 이처럼 시판용 영양강화제를 이용한 rotifer의 영양강화는 PUFA 함량의 증가를 통한 대다수 해산어 자어의 생존율과 성장 향상에 효과적인 것으로 사료된다. 또한 태평양 대구 자어의 생산성 향상을 위해서는 먹이생물의 PUFA 영양강화가 필수적인 것으로 사료되지만, 먹이생물내 적정 PUFA 함량에 대한 연구는 추후 수행될 필요가 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 해산어 부화 직후 자어의 난황내 DHA/EPA 비율은 약 2인 것으로 알려져 있으며(Parrish et al., 1994; Sargent et al., 1997), 이에 따라 대부분의 해산어 초기 자어의 영양강화 rotifer내 적정 DHA/EPA비율은 2인 것으로 알려져 있다(Tocher and Sargent, 1984; Sargent et al., 1999). 본 연구에서 또한 DHA/EPA 비율이 2인 ER3 공급구가 다른 공급구에 비하여 우수한 생존율과 성장을 보였다. 그러나 대서양 대구 자어는 DHA/EPA비율이 증가할수록(10까지) 생존율과 성장 향상에 효과적이었으며(Park et al., 2006), yellowtail flounder 자어는 DHA/EPA 비율이 8인 공급구가 2인 공급구에 비해 높은 성장과 생존율을 보였다(Copeman et al., 2002). 그러나 turbot과 넙치 자어의 성장은 DHA/EPA비율에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Estevez et al., 1999; Furuita et al., 1999). 이와 같이 해산어 자어의 성장과 생존율에 있어서 먹이생물 내 적정 DHA/EPA 비율은 종 특이적인 것으로 사료되며, 본 연구 조건에서 태평양 대구 자어의 생산성 향상을 위한 영양강화 rotifer 내 DHA/EPA 비는 2가 적절한 것으로 판단된다.

또한, Watanabe (1993)는 부화 자어가 성장과 발달함에 따라 어체 내 DHA 함량이 감소하기 때문에 먹이생물의 영양강화를 통한 DHA 공급의 필요성을 강조한 바 있다. 본 연구에서는 사육 실험 종료시 태평양 대구 자어의 DHA 함량은 ER1, ER2 및 ER3 공급구(각 19.52%, 19.32% 및 18.74%)가 시작시 자어의 DHA 함량(25.57%)에 비하여 감소하였으나, ER3을 공급받은 자어의 DHA 함량(28.03%)은 시작시에 비하여 다소 증가하였지만 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이와 유사하게 Park et al. (2006)의 연구에서 사육 실험 시작시 대서양 대구 자어의 DHA 함량이 사육종료 시까지 큰 변화없이 유지된 공급구가 우수한 성장과 생존율을 보였으며, 이는 상대적으로 높은 DHA 함량과 높은 DHA/EPA 비율을 가진 영양강화 rotifer의 공급에 따른 결과인 것으로 보고하였다. 그러나 본 연구에서 사육 실험 종료시 자어의 DHA 함량을 제외한 다른 필수지방산인 EPA와 ARA 함량은 성장과 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며, 이는 태평양 대구 자어의 성장과 생존율에 있어 영양강화 rotifer 내 필수지방산 중 EPA와 ARA 보다 DHA에 대한 이용성이 우수한 것으로 판단된다.

이상의 결과를 고려하면 본 연구 조건에서 DHA/EPA 비율이 2인 영양강화 rotifer의 공급은 태평양 대구 자어의 성장과 생존율을 향상시키며, PUFA 함량이 높은 영양강화제를 이용한 rotifer의 영양강화는 먹이의 영양학적 가치를 향상시킬 뿐만 아니라 태평양 대구 자어의 종자 생산에도 효과적인 것으로 판단

된다. 본 연구결과는 태평양 대구 자어를 양식 생산하는데 있어 기초 자료로서 적극 활용될 것으로 기대되며, 추후 보다 안정적인 대량 종자생산을 위한 초기 먹이생물의 필수지방산, 유리아미노산, 수용성 단백질 함량 등을 고려한 영양학적 연구가 필요한 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2020년도 국립수산과학원 수산과학연구사업 동해 특산품종 양식기술 개발(R2020009)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

AOAC (Association of official analytical chemists). 1990. Official methods of analysis. 17th edition. Washington DC, U.S.A.

Bautista MN and De la Cruz MC. 1988. Linoleic (ω6) and linolenic (ω3) acids in the diet of fingerling milkfish (*Chanos chanos* Forsskal). Aquaculture 71, 347-358. https://doi.org/10.1016/0044-8486(88)90204-9.

Benítez-Santana T, Masuda R, Juárez Carillo E, Ganuza E, Valencia A, Hernández-Cruz CM and Izquierdo MS. 2007. Dietary n-3 HUFA deficiency induces a reduced visual response in gilthead seabream *Sparus aurata* larvae. Aquaculture 264, 408-417. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.10.024.

Cavalin FG and Weirich CR. 2009. Larval performance of aquacultured Florida pompano *Trachinotus carolinus* fed rotifers *Brachionus plicatilis* enriched with selected commercial diets. Aquaculture 292, 67-73. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.03.042.

Cho SH, Hur SB and Jo JY. 2001. Effect of enriched live feeds on survival and growthrates in larval Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* Hilgendorf. Aquac Res 32, 199-208. https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2001.00547.x.

Choi Y, Park H and Oh S. 2011. Effects of stocking density and feeding frequency on the growth of the Pacific cod, *Gadus macrocephalus*. Korean J Fish Aquat Sci 44, 58-63. https://doi.org/10.5657/kfas.2011.44.1.058.

Copeman LA, Parrish CC, Brown JA and Harel M. 2002. Effects of docosahexaenoic, eicosapentaenoic, and arachidonic acids on the early growth, survival, lipid composition and pigmentation of yellowtail flounder *Limanda ferruginea*: a live food enrichment experiment. Aquaculture 210, 285-304. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00849-3.

Coutteau P and Sorgeloos P. 1997. Manipulation of dietary lipids, fatty acids and vitamins in zooplankton cultures. Freshw Biol 38, 501-512. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00239.x.

Craig SR, Arnold CR and Holt GJ. 1994. The effects of enriching live foods with highly unsaturated fatty acids on the growth and fatty acid composition of larval red drum *Sciaenops ocellatus*. J World Aquac Soc 25, 424-431. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1994.tb00226.x.

Cutts CJ, Sawanboonchun J, Mazorra de Quero C and Bell JG. 2006. Diet induced differences in the essential fatty acid (EFA) compositions of larval Atlantic (*Gadus morhua* L.) with reference to possible effects of dietary EFAs on larval performance. ICES J Mar Sci 63, 302-310. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.11.002.

Dhert P, Rombaut G, Suantika G and Sorgeloos P. 2001. Advancement of rotifer culture and manipulation techniques in Europe. Aquaculture 200, 129-146. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00697-4.

Duncan DB. 1955. Multiple range and multiple *F* tests. Biometrics 11, 1-42.

Estevez A, McEvoy LA, Bell JG and Sargent JR. 1999. Growth, survival, lipid composition and pigmentation of turbot *Scophthalmus maximus* larvae fed live-prey enriched in arachidonic and eicosapentaenoic acids. Aquaculture 180, 321-343. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00209-4.

Faulk CK and Holt GJ. 2005. Advances in rearing cobia *Rachycentron canadum* larvae in recirculating aquaculture systems: live prey enrichment and greenwater culture. Aquaculture 249, 231-243. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.03.033.

Faulk CK, Holt GJ and Davies DA. 2005. Evaluation of fatty acid enrichment of live food for yellowtail snapper *Ocyurus chrysurus* larvae. J World Aquac Soc 36, 271-281. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2005.tb00331.x.

Folch J, Lees M and Sloane-Stanley GH. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. J Biol Chem 22, 497-509.

Frolov AV, Pankov SL, Geradze KN, Pankova SA and Spektorova LV. 1991. Influence of the biochemical composition of food on the biochemical composition of the rotifer *Brachionus plicatilis*. Aquaculture 97, 181-202. https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90264-8.

Furuita H, Konishi K and Takeuchi T. 1999. Effect of different levels of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acid in *Artemia* nauplii on growth, survival and salinity tolerance of larvae of the Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. Aquaculture 170, 59-69. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00386-X.

Garcia AS, Parrish CC and Brown JA. 2008. A comparison among differently enriched rotifers *Brachionus plicatilis* and their effect on Atlantic cod *Gadus morhua* larvae early growth, survival and lipid composition. Aquac Nutr 14, 14-30. https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00500.x.

Gawk W. 2010. Fecundity of Pacific cod *Gadus macrocephalus* in Jinhae bay during spawning period. Korean J Ichthyol 22, 121-125.

Gwak W, Choi B and Lee So. 2012. Spawning time and early growth of Pacific cod *Gadus macrocephalus* in Jinhae Bay, Korea. Korean J Ichthyol 24, 110-117.

Gisbert E, Conklin DB and Piedrahita RH. 2004. Effects of delayed first feeding on thenutritional condition and mortality of California halibut larvae. J Fish Biol 64, 116-132. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2004.00289.x.

Hagiwara A, Gallardo WG, Assavaaree M, Kotani T and De Araujo AB. 2001. Live food production in Japan; recent progress and future aspects. Aquaculture 200, 11-127. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00696-2.

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.

Harel M, Koven W, Lein I, Bar Y, Behrens P, Stubblefield J, Zohar Y and Place AR. 2002. Advanced DHA, EPA and ARA enrichment materials for marine aquaculture using single cell heterotrophs. Aquaculture 213, 347-362. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00047-9.

Heming TA, McInerney JE and Alderdice DF. 1982. Effect of temperature on initial feeding in alevins of shinook salmon *Oncorhyncus tshawytscha*. Can J Fish Aquat Sci 39, 1154-1562. https://doi.org/10.1139/f82-210.

Kanazawa A. 1997. Effects of docosahexaenoic acid and phospholipids on stress tolerance of fish. Aquaculture 155, 131-137. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00123-3.

Kanazawa A. 2003. Nutrition of marine fish larvae. J Appl Aquacult 13, 103-143. https://doi.org/10.1300/J028v13n01_05.

Kim TJ, Park C, Lee S and Gwak W. 2007. Morphological development of eggs and larvae of the Pacific cod, *Gadus macrocephalus*. Korean J Ichthyol 19, 343-349.

Kobayashi T, Nagase T, Hino A, Takeuchi T., 2008. Effect of combination feeding of *Nannochloropsis* and freshwater *Chlorella* on the fatty acid composition of *rotifer Brachionus plicatilis* in a continuous culture. Fish Sci 74, 649-656. https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2008.01570.x.

KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2020. Expenditure per aquaculture. Retrieved from http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01&vwcd=MT_ZTITLE&parmTabId=M_01_01#SelectStatsBoxDiv on May 14, 2020.

Kotani T, Genka T, Fushimi H, Hayashi M, Dierckens K and Sorgeloos P. 2009. Effect of cultivation methods on nutritional enrichment of euryhaline rotifer *Brachionus plicatilis*. Fish Sci 75, 975-984. https://doi.org/10.1007/s12562-009-0105-1.

Kotani T, Fushimi H, Ohta Y, Miyashima A, Sudoh K, Hayashi M, Satoh N and Satoh S. 2013. Effect of graded levels of dietary DHA included in rotifers *Brachionus plicatilis* on larviculture performance of red sea bream *Pagrus major*. Aquacult Sci 61, 321-330. https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.61.321.

Lee JY, Lee C, Kim WK, Park SU and Min BH. 2007. Effects of water temperature on egg development, hatching and larval growth rearing of the Pacific cod *Gadus macrocephalus*. J Aquacult 20, 260-264.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2010. Alaska fisheries science center. Retrieved from http://www.afsc.noaa.gov/species/Pacific_cod. php on Mar 12, 2020.

Park HG, Puvanendran V, Kellett A, Parrish CC and Brown JA. 2006. Effect of enrichedrotifers on growth, survival, and composition of larval Atlantic cod (*Gadus morhua*). ICES J Mar Sci 63, 285-295. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.10.011.

Parrish CC, Castell JD, Brown JA, Boston L, Strickland JS and Somerton DC. 1994. Fatty acid composition of Atlantic halibut eggs in relation to fertilization. Bull Aquac Assoc Can 94, 36-38.

Rainuzzo JR, Reitan KI and Olsen Y. 1997. The significance of lipids at early stages of marine fish: a review. Aquaculture 155, 103-115. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00121-X.

Rice JA, Crowder LB and Binkowski FB. 1987. Evaluating potential sources of mortality for larval bloater *Corengonus hoyi*: starvation and vulnerability to predation. Can J Fish Aquat Sci 44, 467-472. https://doi.org/10.1139/f87-055.

Sargent J, McEvoy LA and Bell JG. 1997. Requirements, presentation and sources of polyunsaturated fatty acids in marine fish larval feeds. Aquaculture 155, 117-127. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00122-1.

Sargent J, Bell G, McEvoy L, Tocher D and Estevez A. 1999a. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish. Aquaculture 177, 191-199. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00083-6.

Sargent J, McEvoy L, Estevez A, Bell G, Bell M, Henderson J and Tocher D. 1999b. Lipid nutrition of marine fish during early development: current status and future directions. Aquaculture 179, 217-229. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00191-X.

Seo Y, Park M, Kim J and Lee S. 2007. Egg development and juvenile growth of the Pacific cod *Gadus macrocephalus* (Korean East Sea population). Korean J Fish Aquat Sci 40, 380-386. https://doi.org/10.5657/kfas.2007.40.6.380.

Shin M, Lee S, Jeon H, Joo J and Kwak W. 2019. Effects of starvation and delayed feeding on growth and survival of Pacific cod *Gadus macrocephalus* larvae. Korean J Ichthyol 22, 121-125.

Sorgeloos P, Dhert P and Candreva P. 2001. Use of the brine shrimp, Artemia spp., in marine fish larviculture. Aquaculture 200, 147-159. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00698-6.

Taylor WW and Freeberg MH. 1984. Effects of food abundance

on larval lake whitefish, *Coregonus lupeaformis* Mitchell, growth and survival. J Fish Biol 25, 733-741. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1984.tb04919.x.

Tocher D. 2003. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. Rev Fish Sci 11, 107-184. https://doi.org/10.1080/713610925.

Tocher DR and Sargent JR. 1984. Analysis of lipids and fatty acids in ripe roes of some Northwest European marine fish. Lipids 7, 492-499.

Watanabe T. 1993. Importance of docosahexaenoic acid in marine larval fish. J World Aquacult Soc 24, 152-161. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1993.tb00004.x.

Watanabe T and Kiron V. 1994. Prospects in larval fish dietetics. Aquaculture 124, 223-251. https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)90386-7.

Weirich CR and Reigh RC. 2001. Dietary lipids and stress tolerance of larval fish. In: Webster CD and Lim C. (Eds.), Nutrition and fish health. Haworth Press, Inc., Binghampton, New York, NY, U.S.A., 301-312.

Westrheim SJ. 1996. On the Pacific cod *Gadus macrocephalus* in British Columbia waters, and a comparison with Pacific cod elsewhere, and Atlantic cod *G. morhua*. Can Tech Rep Fish Aquat Sci 2092, 390.

Yoo H, Byun S, Choi J, Nam M, Lee HM, Kang HW and Lee C. 2016. Optimal enrichment temperature, time and materials for L-type rotifer *Brachionus plicatilis* cultured at a low temperature. J Korean Soc Mar Environ Saf 22, 500-507. https://doi.org/10.7837/kosomes.2016.22.5.500.

Yoshimura K, Usuki K, Yoshimatsu T, Kitajima C and Hagiwara A. 1997. Recent development of a high density mass culture system for the rotifer *Brachionus rotundiformis* Tschugunoff. Hydrobiologia 358, 139-144. https://doi.org/10.1023/A:1003169414996.