

## 배합사료의 크기, 사육밀도 및 용존산소 농도가 넙치 (*Paralichthys olivaceus*)의 성장에 미치는 영향

김성삼 · 이진혁 · 김강웅 · 김경덕 · 이봉주 · 이경준\*

국립수산과학원 사료연구센터, <sup>1</sup>제주대학교 해양생명과학과

### Effects of Feed Particle Size, Stocking Density, and Dissolved Oxygen Concentration on the Growth of Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*

Sung-Sam Kim, Jin-Hyuck Lee, Kang-Woong Kim, Kyoung-Duck Kim, Bong-Joo Lee and Kyeong-Jun Lee<sup>2</sup>

*Aquafeed Research Center, National Fisheries Research and Development Institute, Pohang 791-923, Korea*

*<sup>1</sup>Department of Marine Life Science, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea*

We performed three sets of feeding trials to establish the optimal feed size (Exp-I), stocking density (Exp-II), and dissolved oxygen level (DO) (Exp-III) for olive flounder *Paralichthys olivaceus*. In Exp-1, four replicate groups of fish (53.6±0.9 g) were fed commercial diets with three particle sizes (small, medium, and large). In Exp-II, fish (30.0±0.1 g) were reared at four stocking densities (1.8, 3.5, 5.3, and 7.1 kg/m<sup>3</sup>). In Exp-III, fish (187±1.48 g) were reared under two different DO levels (2–3 and 6–7 mg/L). In Exp-I, fish fed the large-particle diet gained significantly more weight and had a lower feed conversion ratio than fish fed the small- and medium-particle diets. In Exp-II, fish reared at 1.8 and 3.5 kg/m<sup>3</sup> gained slightly more weight and had lower feed conversion ratios than fish reared at 5.3 and 7.1 kg/m<sup>3</sup>, although these differences were not significant. In Exp-III, negative effects were observed in the low DO groups. Therefore, under our experimental conditions, the optimal feed particle size, stocking density, and DO level for olive flounder were 9-9.4 mm, 3.5 kg/m<sup>3</sup>, and 6-7 mg/L, respectively.

Key words: Olive flounder, Feed particle size, Stocking density, Dissolved oxygen, Growth performance

## 서 론

배합사료의 공급방법 및 적절한 사육환경의 조성은 양식어류의 성장과 건강에 직접적인 영향을 미치는 요인이며(Brett and Groves, 1979), 개별 양어장의 운영방법에 따라 경제성에 큰 영향을 미친다(Oh et al., 2013). 양어용 배합사료는 양식어종의 성장단계에 맞춰 다양한 크기로 성형되어 판매되고 있지만 각 성장단계별 크기의 구분이 광범위하여 양식어업인들이 적정 사료크기를 선택하는데 다소 어려움이 있다. 양식어종별로 상품 크기가 다르고 성장속도의 차이가 있어 사료의 크기는 큰 차이를 보인다. 넙치의 경우 시판 배합사료의 크기는 1 mm에서 18 mm까지 매우 다양하다. 넙치 배합사료 크기에 대한 연구로는 사육수온별(고수온, 적수온 및 저수온) 및 성장단계별(치어, 육

성어 및 미성어)로 수행되었으며 사료크기가 커질수록 성장률과 사료효율 등이 증가되는 경향을 보였고, 적수온에 육성어기 넙치를 대상으로 동일한 사료량을 공급한 결과 사료크기가 큰 실험구가 유의적으로 높은 성장률을 보였다(Heo, 2011). 사료 크기는 결국 사료섭취량 및 소화와 밀접한 관계가 있고 결국 성장에 영향을 미치므로 적정 사료크기의 선택은 매우 중요하다(Jobling, 1987). 국내 주요 양식어종 중 하나인 조피볼락에 대상으로 3가지(small, medium, large) 배합사료 크기를 설정하여 사육실험을 실시한 결과 성장률에서 유의적인 차이를 보이지 않았지만 사료 크기가 증가함에 따라 성장률이 감소하는 경향을 보였고, 사료계수 및 단백질전환효율에서는 크기가 작은 사료 그룹이 크기가 큰 사료 그룹과 비교하여 유의적으로 높은 효율을 보였다(Oh et al., 2013). 이것은 조피볼락의 경우 적정

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0314>



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.

Korean J Fish Aquat Sci 48(3) 314-321, June 2015

Received 11 December 2014; Revised 12 February 2015; Accepted 17 February 2015

\*Corresponding author: Tel: +82. 64. 754. 3423 Fax: +82. 64. 756. 3493

E-mail address: kjlee@jejunu.ac.kr

크기 보다 큰 사료를 공급할 경우 성장저하 및 사료효율이 감소한다는 것을 의미하며, Tibaldi et al. (2006)의 연구에서도 배합사료 크기가 크면 소화효소와의 접촉과 작용면적의 감소에 의해 소화효율이 저하될 수 있다고 보고되었다. 따라서 배합사료 사료크기 분류 기준에 대한 과학적인 근거확립 자료가 필요한 실정이다.

사육밀도는 먹이 및 공간에 대한 경쟁으로 어류의 성장, 사료섭취 및 양식생산성 등에 직접적인 영향을 미친다(Refstie, 1977; Rowland et al., 2006). 고밀도 양식은 어류에게 스트레스 요인으로 작용하여 성장에 악영향을 끼칠 수 있으며, 저밀도 사육은 먹이경쟁의 감소로 사료섭취량에 악영향을 미칠 수 있으므로 어종에 따른 적정 사육밀도를 찾는 것은 중요하다(Oh et al., 2013). 적정 사육밀도는 어종에 따라 다르게 보고되고 있으며, 대상어종과 성장단계에 따라 차이가 있기 때문에 각 환경조건에 맞는 규명이 필요하다(Baker and Ayles, 1990; Bjornson, 1994; Jorgensen et al., 1993). 따라서 안정적인 양식환경 조성을 위해서는 대상어종에 적합한 사육밀도에 대한 정확한 규명이 요구된다.

용존산소는 어류의 성장과 생존에 필수적인 요인이다(Dalla Via et al., 1998). 용존산소는 어류의 활동성 및 수온에 영향을 받기 때문에 야간 보다는 활동성이 높은 오전 및 주간에 폐사율이 높고, 사육수온이 상승할수록 산소 소비율이 증가하는 것으로 나타났다(Oh et al., 2006). 일반적으로 어류에서 용존산소 함량이 임계값(critical value) 이하로 떨어지면 사료섭취율, 성장률 및 사료전환효율이 감소하는 것은 일반적인 현상이다(Thetmeyer et al., 1999; Foss et al., 2002). Foss et al. (2002) 연구에 의하면 용존산소의 감소는 사료섭취량에 영향을 주며, 용존산소량이 저농도(4.0 mg/L)에서 고농도(9.6 mg/L)로 갈수록 일일사료공급률 및 총사료섭취량이 증가하여 일간성장률이 유의적으로 높은 결과를 보였다. 따라서 넙치와 같이 고밀도 양식의 경우 지속적인 적정 농도의 산소 공급이 필요하다.

넙치를 대상으로 사료크기, 사육밀도 및 용존산소량에 대한 선행연구들이 있지만 체계적 사육기술 구축을 위한 기초연구는 여전히 미비한 실정이다. 따라서 이 연구는 넙치의 안정적인 사육기술 구축을 위한 기초연구의 일환으로, 배합사료의 크기(실험 1), 사육밀도(실험2) 및 용존산소(실험3)에 따른 넙치의 성장과 혈액학적 조성에 미치는 영향을 알아보기 위해 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 실험사료

각 실험에 사용된 실험사료는 상업용 시판 넙치 배합사료를 사용하였으며, 실험사료의 일반성분 분석 결과는 Table 1에 나타내었다. 실험 1은 예비사육기간 동안은 중간 크기의 사료 (medium, 5-5.3 mm)를 공급하여 실험환경에 적응시켰으며, 실험사료 크기는 사료회사에서 제공하는 권장급이율표를 참고

Table 1. Proximate analysis of the commercial diets of the olive flounder (*Paralichthys olivaceus*; % of dry matter basis)

	Diets		
	Small	Medium	Large
Moisture (%)	8.0	7.2	9.7
Crude protein (% DM)	55.0	56.0	56.2
Crude lipid (% DM)	15.5	15.9	14.5
Crude ash (% DM)	19.8	17.7	17.9
Size (mm)	3.0-3.2	5.0-5.3	9.0-9.4

<sup>1</sup>Commercial diets were purchased from Suhyup Feed Co. Ltd., Uiryeong, Korea.

하여 실험어류의 평균체중에 적합한 사료 (medium, 5-5.3 mm)를 기준으로 실험어류가 섭취 가능한 범위에서 크기가 큰 사료 (large, 9-9.4 mm)와 작은 사료 (small, 3-3.2 mm)로 총 3단계의 사료를 선택하여 공급하였다. 실험2와 3의 실험에 사용된 실험사료 역시 동일한 상업용 시판 넙치배합사료를 사용하였으며, 실험 2는 작은 사료 (small, 3-3.2 mm), 실험 3은 큰 사료 (large, 9-9.4 mm)를 사용하였다.

### 실험어 및 사육관리

사양실험에 사용된 실험어류는 제주도내 양어장에서 제주대 학교 소속 해양과환경연구소로 운송되어 2주 동안 시판 배합사료를 공급하면서 실험환경에 적응할 수 있도록 순치시킨 후 사료공급실험에 사용되었다. 실험 1은 예비사육 후 실험어류(초기 평균무게: 53.6 ± 0.9 g)는 총 12개의 200 L 원형수조에 각 수조 당 30 마리씩 무작위로 선택하여 배치되었다. 사료공급실험은 실험구당 4 반복구를 두었으며, 사육수는 여과해수를 사용하여 2-3 L/min의 유수량이 공급되도록 조절되었고, 모든 실험수조에 용존산소 유지와 원활한 사육수 순환을 위하여 에어스톤을 설치하였다. 광주기는 자동타이머가 설치된 형광등을 이용하여 12L:12D 조건으로 유지되었고, 전 실험기간 동안 평균 수온은 22℃에서 27℃ 범위로 자연수온에 의존되었다. 실험사료는 1일 2회 (오전 08:00, 오후 18:00)에 나눠서 8주 동안 반복으로 공급하였다.

실험 2는 제주도내 종묘배양장에서 구입하여 예비사육 후 실험어류(초기 평균무게: 30.0 ± 0.1 g)는 사육밀도를 달리하여 총 12개의 200 L 원형수조에 무작위로 선택하여 배치되었다. 사육밀도는 저밀도부터 고밀도까지 각각 1.8, 3.5, 5.3, 7.1 kg/m<sup>3</sup>이 되도록 실험어류의 마리수를 달리하여 3반복으로 배치하였다. 사육수는 여과해수를 사용하여 2-3 L/min의 유수량이 공급되도록 조절되었고, 모든 실험수조에 용존산소 유지와 원활한 사육수 순환을 위하여 에어스톤을 설치하였다. 광주기는 자동타이머가 설치된 형광등을 이용하여 12L:12D 조건으로 유지되었고, 전 실험기간 동안 평균 수온은 23℃에서 26℃ 범위로 자연수온에 의존되었다. 실험사료는 1일 2회(오전 08:00, 오후

18:00)에 나눠서 8주 동안 반복으로 공급하였다.

실험 3은 제주도내 양어장에서 구입하여 예비사육 후 실험어류(초기 평균무게:  $187 \pm 1.48$  g)는 용존산소량을 총 8개의 200 L 원형수조에 무작위로 선택하여 배치되었다. 용존산소는 일반적인 넙치의 용존산소 범위보다 낮은 저농도(2-3 mg/L)와 적정농도(6-7 mg/L)가 되도록 설정하여 각 실험구 당 20마리씩 4반복으로 배치하였다. 사육수는 여과해수를 사용하여 2-3 L/min 의 유수량이 공급되도록 조절되었고, 저농도 실험구는 용존산소함량을 낮추기 위해 에어레이션 공급을 하지 않았으며, 적정농도 실험구는 용존산소 유지를 위해 에어레이션을 공급하였다. 광주기는 자동타이머가 설치된 형광등을 이용하여 12L:12D 조건으로 유지되었고, 전 실험기간 동안 평균 수온은 23°C에서 27°C 범위로 자연수온에 의존되었다. 실험사료는 1일 2회(오전 08:00, 오후 18:00)에 나눠서 5주 동안 반복으로 공급하였다.

실험1, 2 및 3은 같은 시기에 동시에 시작되지 않고 실험기간이 달라 자연수온에 의존하여 실험이 수행되었기 때문에 평균 수온이 다르며, 이 연구들은 제주대학교 동물윤리위원회의 규정에 따라 진행되었다.

### 샘플수집

사료공급 실험 후, 어류의 최종 평균무게를 측정하여 증체율(weight gain), 사료효율(feed efficiency), 일간성장률(specific growth rate), 단백질이용효율(protein efficiency ratio) 및 생존율(survival)을 계산하였다. 최종 무게측정 후, 혈액분석을 위해 각 수조마다 4마리씩 무작위로 선별하여 마취용액(MS-222, 100 mg/L)으로 마취시켜 헤파린 처리가 된 주사기를 사용하여 미부동맥에서 채혈한 후, hematocrit 및 hemoglobin 함량을 측정하였다. 분석 후, 남은 혈액은 ALT (alanine aminotransferase), AST (aspartate aminotransferase), total protein 및 glucose 분석을 위해 원심분리기(Micro 17TR, Hanil Science, Korea)를 이용하여 5,000 rpm으로 10분간 원심분리하여 혈장을 분리하였다.

### 일반성분 분석

실험사료의 일반성분 분석은 AOAC (2000) 방법에 따라 수분은 상압가열건조법(125°C, 3 h), 조회분은 직접회화법(550°C, 12 h)으로 측정하였고, 단백질은 자동 조단백분석기(Kejltec system 2300, Sweden)로 분석되었으며, 지방은 Folch et al. (1959)의 방법에 따라 Soxhlet 추출장치(Soxhlet heater system C-SH6, Korea)를 이용하여 분석되었다.

### 혈액 분석

Hematocrit은 헤파린이 처리된 미세혈관채혈튜브(Micro hematocrit capillary tubes)에 혈액을 채운 다음 고무판(Wax plates)에 세운 후, 혈액진단원심분리기(Micro Hematocrit VS-12000, Vision Scientific, Korea)에서 10분간 원심분리하여 값

을 측정하였다.

Hemoglobin, ALT, AST, total protein 및 glucose 함량은 각각의 시약과 반응시킨 후 혈액생화학분석기(Express plus system, Bayer, USA)를 이용하여 분석하였다. ALT와 AST는 kinetic, hemoglobin, total protein 및 glucose 함량은 end point방법으로 분석되었다.

### 용존산소 분석

용존산소는 전자 용존산소 측정기(Oxi 315i, WTW GmbH, Germany)를 이용하여 매일 사료공급 후 환수하기 전에 모든 수조에서 측정하였다.

### 통계학적 분석

실험사료군의 배치는 완전확률계획법(Completely randomized design)에 따라 실시하였고, 성장 및 분석결과는 SPSS (Version 12.0) 프로그램을 이용하여 One-way ANOVA로 통계 분석되었다. 실험 데이터 값의 유의차는 Duncan's multiple test ( $P < 0.05$ )로 비교되었다. 데이터는 평균값  $\pm$  표준편차 (mean  $\pm$  SD)로 나타내었다. 백분율 데이터는 arcsine 변형 값으로 계산하여 통계 분석되었다.

## 결과 및 고찰

실험 1은 넙치 치어( $53.6 \pm 0.9$  g)를 대상으로 배합사료의 크기가 성장에 미치는 영향을 알아보기 위해 총 8주간 사료공급 실험을 수행하였으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 생존율 및 사료섭취율은 모든 실험구에서 유의적인 차이를 보이지 않았다. 하지만 최종무게, 성장률, 사료효율 및 단백질 전환효율에서는 사료크기가 증가함에 따라 증가하다가 적정사료크기 보다 큰 사이즈인 Large (9호) 실험구가 Small (3호) 및 Optimum (5호) 실험구 보다 유의적으로 높은 결과를 보였다. 실제 사료 회사에 권장하는 적정호수와 실제 어류의 성장결과와는 다소 차이가 있음을 관찰할 수 있었다. 일반적으로 배합사료의 크기는 어류의 사료섭취율 및 소화능력(Jobling, 1987), 사료가 소화관을 통과하는 시간과 밀접한 관계가 있다(Hossain et al., 2000; Azaza et al., 2010). 따라서 각 성장단계에 적합한 크기의 사료공급은 효율적인 에너지 이용과 최대성장을 유도할 수 있다(Wang et al., 1994). 배합사료 크기에 대한 다른 어종의 연구결과를 살펴보면, Oh et al. (2013)은 조피볼락을 대상으로 사료크기를 달리하여 실험한 결과 사료 크기가 커질수록 성장률이 감소하였으며, Tibaldi et al. (2006)의 연구에서도 배합사료 크기가 크면 소화효소와의 접촉 및 작용면적이 감소하여 소화효율이 저하될 수 있다고 보고하고 있다. 본 연구에서는 다른 어종에서 보고된 연구결과와 반대로 사료크기가 커질수록 어류의 성장이 증가하는 경향을 보였다. 이것은 넙치가 다른 어종과 달리 입이 아주 큰 어류로 실제 적정 사료 사이즈 보다 큰 사료를 섭취할 수 있기 때문으로 판단된다. 본 연구에서도 적정 사이즈인

Table 2. Growth performance of olive flounder *Paralichthys olivaceus* fed the commercial diets with different pellet size for 8 weeks in Exp- I <sup>1</sup>

	Diets		
	Small	Medium	Large
Initial mean body weight (g/fish)	53.1±2.6	54.6±1.3	52.9±3.1
Final mean body weight (g/fish)	158.4±8.8 <sup>a</sup>	167.7±5.2 <sup>a</sup>	182.5±5.2 <sup>b</sup>
Weight gain (%) <sup>2</sup>	198.0±2.1 <sup>a</sup>	206.8±2.2 <sup>a</sup>	245.6±24.7 <sup>b</sup>
Feed conversion ratio <sup>3</sup>	0.98±0.01 <sup>a</sup>	0.95±0.03 <sup>a</sup>	0.89±0.03 <sup>b</sup>
Protein efficiency ratio <sup>4</sup>	1.86±2.3 <sup>a</sup>	1.88±0.05 <sup>a</sup>	2.02±0.06 <sup>b</sup>
Feed intake (g) <sup>5</sup>	95.6±4.0	102.8±5.8	101.1±4.7
Daily feed intake (%) <sup>6</sup>	1.64±0.03	1.67±0.05	1.60±0.04
Survival (%) <sup>7</sup>	94.4±1.9	96.7±0.0	92.2±1.9

<sup>1</sup>Values are means from quadruplicate groups of fish where the values in each row with different superscripts are significantly different ( $P<0.05$ ). <sup>2</sup>Weight gain (%) = (final weight - initial weight) × 100 / initial weight. <sup>3</sup>Feed conversion ratio = dry feed fed/wet weight gain. <sup>4</sup>Protein efficiency ratio = wet weight gain / total protein given. <sup>5</sup>Feed intake = consumed feed / fish. <sup>6</sup>Daily feed intake = total dry feed intake × 100 / {(initial total wt. + final total wt. + dead fish wt.) / 2} × days fed. <sup>7</sup>Survival = number of fish at end of experiment / number of fish stocked × 100.

5호 보다 훨씬 큰 9호를 공급했음에도 불구하고 사료섭취에는 아무런 문제가 나타나지 않았다. 사료크기의 차이는 어류가 한번에 섭취하는 사료 양의 차이를 의미한다. 본 연구에서도 사료 섭취량의 경우 유의적인 차이는 보이지 않았지만 Medium 및 Large 실험구가 Small 실험구 보다 높은 사료섭취율을 보였다 (Table 2). 넙치의 먹이 섭취 패턴은 바닥에 있다가 사료를 공급하면 부상하고 있는 배합사료를 먹고 다시 바닥으로 내려간다. 따라서 사료사이즈가 작으면 적정섭취량을 먹기 위해 보다 더 자주 움직여야 한다. 하지만 이와 반대로 사료사이즈가 크면 보다 한번에 충분한 양을 섭취할 수 있어 활동성이 줄어들기 때문에 에너지 소비가 낮아진다. 따라서 사료크기가 작은 Small 사료(3호)와 적정 크기인 Optimum 사료(5호) 실험구가 가장 큰 크기인 Large (9호) 실험구에 비해 성장이 떨어진 이유는 한번에 섭취되는 사료의 양이 상대적으로 적고 보다 더 사료섭취를 위해 활동성이 증가하였기 때문으로 판단된다. 이전 연구에서도 넙치를 대상으로 사육수온별(고수온, 적수온 및 저수온) 및 성장단계별(치어기, 육성기 및 성어기)로 배합사료 크기에 대한 연구를 수행한 결과, 모든 실험에서 사료크기가 성장에 영향을 미쳤으며, 본 연구결과와 비슷하게 사료크기가 커질수록 성장율과 사료효율이 증가하는 결과를 보였다. 또한 이것이 반복까지 도달하는 시간을 측정한 결과 사료크기가 커질수록 사료 공급시간이 단축되었다. 적정수온에 사료크기를 달리하고 동

일한 양의 사료를 공급하여 반복시킨 결과 사료크기가 큰 실험구의 성장률과 사료효율이 유의적으로 높은 값을 보였다(Heo, 2011). 따라서 양식현장에서 배합사료를 공급할 때는 섭취 가능한 범위 내에서 큰 크기의 사료를 공급하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다. 또한 어류가 성장함에 따라 사료 크기를 그에 맞게 교체하면 성장을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이러한 사료의 적정크기 선정은 수온, 밀도, 성장단계, 선별 주기 등 양어장환경 및 사육관리 방법에 따라 달라질 수 있으므로 다양한 환경에서 비교 연구를 통해 최종결론을 내려야 할 것이다.

사료크기에 어류의 건강도를 평가하기 위해 혈액분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 3에 나타내었다. Hematocrit, hemoglobin, protein, glucose, AST 및 ALT 결과에서는 모든 실험구에서 유의적인 차이가 없었다. 배합사료의 크기에 따른 혈액 성분 분석 결과의 변화가 없는 것으로 보아 배합사료의 크기는 넙치의 혈액학적 조성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 53-183 g 크기의 넙치는 적정사이즈 보다 상대적으로 큰 사료를 섭취해도 배합사료의 소화 및 어류의 건강에 부정적인 영향을 미치지 않고 오히려 높은 성장을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

실험 2는 넙치 치어(30.0±0.1 g)를 대상으로 사육밀도가 성장에 미치는 향을 알아보고자 총 8주간 성장실험을 수행하였으며 그 결과는 Table 4에 나타내었다. 실험 시작 시 30 g의 넙치를 대상으로 사육 밀도가 각각 1.8, 3.5, 5.3, 및 7.1 kg/m<sup>3</sup>가 되도록 하였으며, 최종 성장무게는 각각 100, 101, 89 및 88 g으로 성장 하였으나 모든 실험구에서 유의적인 차이는 보이지 않았다. 하지만 고밀도 그룹(7.1 kg/m<sup>3</sup>)에서는 저밀도 그룹(1.8 kg/m<sup>3</sup>)에 비해 약 15%의 낮은 성장률이 관찰되었다. 증체량은 실험 종료 시 저밀도 그룹 (1.8 및 3.5 kg/m<sup>3</sup>)에서 각각 236%와 230%, 고 밀도 그룹(5.3 및 7.1 kg/m<sup>3</sup>)에서는 195%와 192%씩 성장하였다. 일간성장률 역시 성장률과 비슷한 경향으로 사육밀도 1.8

Table 3. Hematological parameters olive flounder *Paralichthys olivaceus* fed the commercial diets with different pellet size for 8 weeks in Exp- I <sup>1</sup>

	Diets		
	Small	Medium	Large
Hematocrit (%)	38.7±1.5	38.7±0.3	37.8±3.3
Hemoglobin (g/dL)	6.18±0.36	6.22±0.36	6.28±0.56
Total protein (mg/dL)	4.84±0.79	5.46±0.61	4.82±0.35
Glucose (mg/dL)	16.7±0.9	18.5±5.1	15.1±2.5
ALT (U/L) <sup>2</sup>	4.65±0.22	3.21±0.60	3.37±0.94
AST (U/L) <sup>3</sup>	16.4±2.6	17.1±2.8	18.3±1.2

<sup>1</sup>Values are means from quadruplicate groups; values are presented as mean±SD. No significant differences were found between treatment groups ( $P<0.05$ ). <sup>2</sup>ALT = Alanine aminotransferase, unit per liter (U/L) is the amount of enzyme which oxidizes one μmol/L of NADH per minute. <sup>3</sup>AST = Aspartate aminotransferase.

Table 4. Growth performance of olive flounder *Paralichthys olivaceus* reared in the four different densities for 8 weeks in Exp- II<sup>1</sup>

	Density (kg/m <sup>3</sup> )			
	1.8	3.5	5.3	7.1
Initial mean weight (g/fish)	29.9±0.1	30.6±1.0	30.0±0.2	30.0±0.1
Final mean weight (g/fish)	100±9.6	101±14.0	89±10.0	88±9.0
Weight gain (%) <sup>2</sup>	236±31.0	230±36.0	195±35.0	192±29.0
Specific growth rate (%) <sup>3</sup>	2.24±0.17	2.21±0.19	1.99±0.23	1.98±0.19
Feed conversion ratio (%) <sup>4</sup>	1.39±0.29	1.51±0.50	1.93±0.06	2.56±0.25
Protein efficiency ratio <sup>5</sup>	1.31±0.17	1.31±0.25	1.19±0.03	1.07±0.16
Daily feed intake (%) <sup>6</sup>	2.11±0.52	2.25±0.61	2.66±0.10	2.60±0.11
Survival (%) <sup>7</sup>	90.5±26.0	92.3±1.4	89.2±4.2	90.1±5.2

<sup>1</sup>Values are means from quadruplicate groups; values are presented as mean±SD. No significant differences were found between diets for any growth parameter ( $P<0.05$ ). <sup>2</sup>Weight gain (%) = (final weight - initial weight) × 100 / initial weight. <sup>3</sup>Specific growth rate (%) = [(ln final body weight - ln initial body weight)/days] × 100. <sup>4</sup>Feed conversion ratio = dry feed fed/wet weight gain. <sup>5</sup>Protein efficiency ratio = wet weight gain / total protein given. <sup>6</sup>Daily feed intake = total dry feed intake × 100 / {(initial total wt. + final total wt. + dead fish wt.)/2} × days fed. <sup>7</sup>Survival = number of fish at end of experiment / number of fish stocked × 100.

및 3.5 kg/m<sup>3</sup>에서는 하루에 약 2.2%씩 성장하였으며, 고밀도 그룹(5.3 및 7.1 kg/m<sup>3</sup>)에서는 약 1.9%씩 성장하였다. 가장 낮은 밀도에서 가장 높은 성장률을 보였으며, 밀도가 증가함에 따라 성장률이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 실험기간동안 생존율은 모든 실험구에서 94% 이상의 높은 값을 보였다. 단백질이용효율과 사료전환효율에서도 모든 그룹에서 유의적인 차이를 보이지 않았지만 사육밀도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 일간사료섭취율은 사육밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 사육밀도는 용존산소, 암모니아 등 사육수의 환경에 직접적으로 영향을 미치며, 먹이 경쟁을 유도하여 사료섭취율에 영향을 미쳐 결국 양식어류의 성장과 건강에 영향을 미친다. Howell (1998)은 Dover Sole을 대상으로 밀도를 증가시켰을 때 성장은 저하되고 개체 간 크기 차이가 증가되었다고 보고하였다. 이와 반대로, Winter flounder *Pseudopleuronectes americanus*, Summer flounder *Paralichthys dentatus*, Yellowtail flounder 및 Turbot *Scophthalmus maximus*은 저밀도에서 특정 고밀도까지 밀도를 증가시켜도 성장에 영향을 미치지 않았으며(Boyce et al., 1998; King et al., 1998; Martinez-Tapia and Fernandez-Pato, 1991; Irwin et al., 1999; Fairchild and Howell, 2001), Atlantic halibut은 저밀도에서도 성장에 부정적인 영향을 미쳤다(Bjoernsson, 1994). 이처럼 어종에 따라 사육밀도의 차이가 크고 특정 고밀도까지는 성장에 영향을 미치지 않음으로 경제성을 고려해 가장 적절한 밀도로 수용하는 것이 중요하다. 본 연구에서도 사육밀도가 증가함에 따라 성장, 사료효율은 감소하고 사료섭취율은 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 고밀도 그룹이 저밀도 그룹에 비해 먹이 경쟁이 심하여 사료섭취량은 증가하였지만 고밀도로 인해 사육수 및 기타 사육환경에 영향을 미쳐 어류에 스트레스로 작용했기 때문으로 판단된다. Table 5는 사육밀도에 따른 혈액학적 분석 결과

Table 5. Hematological parameters olive flounder *Paralichthys olivaceus* reared in the four different densities for 8 weeks in Exp- II<sup>1</sup>

	Density (kg/m <sup>3</sup> )			
	1.8	3.5	5.3	7.1
Hematocrit (%)	32.6±3.17	37.4±1.68	36.2±3.27	35.8±3.18
Hemoglobin (g/dL)	5.0±0.26	5.4±0.12	5.3±0.63	5.4±0.36
Total protein (mg/dL)	4.3±0.16	4.9±0.07	4.8±0.42	5.0±0.23
ALT (U/L) <sup>2</sup>	11.3±9.35	19.5±5.20	21.5±7.77	22.5±9.11
AST (U/L) <sup>3</sup>	16.6±6.30	18.5±4.39	21.1±1.10	22.2±2.35

<sup>1</sup>Values are means from quadruplicate groups; values are presented as mean±SD. No significant differences were found between treatment groups ( $P<0.05$ ). <sup>2</sup>ALT = Alanine aminotransferase, unit per liter (U/L) is the amount of enzyme which oxidizes one  $\mu\text{mol/L}$  of NADH per minute. <sup>3</sup>AST = Aspartate aminotransferase.

를 보여주고 있다. 모든 분석결과 유의적인 차이는 관찰되지 않았지만, ALT 및 AST의 경우 저밀도 그룹에 비해 고밀도 그룹이 높은 수치를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. ALT와 AST는 일반적으로 척추동물에서 간의 기능과 상태를 나타내는 지표로서 자주 사용되며 일반적으로 스트레스의 지표로도 사용된다. 고밀도사육환경이 양식어류에 스트레스로 작용하여 ALT 및 AST 결과에 부정적인 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 따라서 넙치 치어(30.0±0.1 g)의 적정 사육밀도는 3.5 kg/m<sup>3</sup>가 적절한 것으로 판단되며, 고밀도가 되지 않도록 경제성을 바탕으로 사육환경에 적합한 사육밀도를 유지하는 것이 중요하다.

실험3은 육성기 넙치(187±1.48 g)를 대상으로 용존산소 농도가 성장에 미치는 영향을 알아보기로 총 5주간 성장실험을 수행하였으며 그 결과는 Table 6에 나타내었다. 5주간의 성장 실험 종료 후, 증체율, 일간성장률, 사료섭취율 및 단백질전환 효율에서 6-7 ppm의 적정 용존산소 실험구에서 2-3 ppm 그룹

Table 6. Growth performance of olive flounder *Paralichthys olivaceus* reared in the two different concentration of dissolved oxygen (DO) for 5 weeks in Exp-III<sup>1</sup>

	DO concentrations	
	6-7 mg/L	2-3 mg/L
Initial mean body weight (g/fish)	187±5.0	187±4.0
Final mean body weight (g/fish)	329±12.0 <sup>b</sup>	232±13.0 <sup>a</sup>
Weight gain (%) <sup>2</sup>	76.2±7.6 <sup>b</sup>	24.7±4.8 <sup>a</sup>
Feed conversion ratio <sup>3</sup>	1.19±0.11 <sup>b</sup>	1.72±0.43 <sup>a</sup>
Protein efficiency ratio <sup>4</sup>	1.95±0.18 <sup>b</sup>	1.41±0.40 <sup>a</sup>
Feed intake (g) <sup>5</sup>	152.1±2.4 <sup>b</sup>	50.1±5.3 <sup>a</sup>
Daily feed intake (%) <sup>6</sup>	1.76±0.04 <sup>b</sup>	0.70±0.06 <sup>a</sup>
Survival (%) <sup>7</sup>	97.5±1.9	80.0±16.3

<sup>1</sup>Values are means from quadruplicate groups of fish where the values in each row with different superscripts are significantly different ( $P<0.05$ ). <sup>2</sup>Weight gain (%) = (final weight - initial weight) × 100 / initial weight. <sup>3</sup>Feed conversion ratio = dry feed fed/wet weight gain. <sup>4</sup>Protein efficiency ratio = wet weight gain / total protein given. <sup>5</sup>Feed intake = consumed feed / fish. <sup>6</sup>Daily feed intake = total dry feed intake × 100 / {(initial total wt. + final total wt. + dead fish wt.) / 2} × days fed. <sup>7</sup>Survival = number of fish at end of experiment / number of fish stocked × 100.

보다 유의적으로 높은 값을 보였다. 생존율에서는 두 실험구간에 유의적인 차이를 관찰할 수 없었으나, 적정 용존산소 실험구에서는 약 98%의 높은 생존율을 보였으나 2-3 ppm 실험구에서는 80%의 낮은 생존율을 보였다. 초기무게 187 g 넙치를 5 주 동안 적정 용존산소에서 사육한 결과 평균체중이 329 g으로 정상적으로 성장한 반면, 저용존산소 그룹은 평균체중이 232 g으로 정상적인 성장이 이루어 지지 않았으며, 두 그룹간에 97 g의 무게차이를 보였다. 어류는 물이라는 특수환경에서 성장함에 따라 용존산소는 매우 중요한 환경적 요소 중 하나이다. 어류는 신체 유지, 활동 및 생합성과정을 위한 에너지를 생산하기 위해 산소를 필요로 한다(Van Dam and Pauly, 1995). 용존산소량은 사료공급 후 어류가 대사하여 분이나 암모니아를 배출함에 따라 감소하게 됨으로 반드시 어류양식시 에어레이션 또는 액화산소의 형태로 사육시설에 공급해 줘야 한다. 사육수에 용존산소량이 부족하게 되면 어류의 사료섭취율은 물론 성장에 영향을 미치고 결국 사망에 이르게 된다. 본 연구에서도 6-7 ppm 실험구에서는 정상적인 성장이 이루어진 반면 이보다 낮은 2-3 ppm 실험구에서는 낮은 성장률과 생존율을 보였다. 2-3 ppm의 농도에서도 넙치가 생존은 할 수 있으나, 사료공급 등 기타 외부적인 환경의 변화가 오면 그 농도가 더 낮아져 위험할 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 용존산소 농도가 감소하면 성장률, 사료섭취율, 사료효율 등이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이와 비슷하게 어느 특정 농도까지 용존산소를 증가시키면 어류의 성장률이 향상되는 연구결과 (Brett and Groves,

1979; Neill and Bryan, 1991)들이 보고되었으며, largemouth bass (Stewart et al., 1967), common carp (Chiba, 1966), coho salmon (Hermann et al., 1962), northern pike (Adelman and Smith, 1970), brook trout (Whitworth, 1968) 및 channel catfish (Buentello et al., 2000) 등 다양한 어종에서 보고되었다. 따라서 실제 넙치 양식현장에서는 용존산소량이 6-7 ppm 이상이 유지되도록 하여야 할 것이며, 용존산소량이 낮은 경우 사료공급을 중단하고 사육수를 환수해 주는 등 사육환경의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

용존산소 농도에 따른 혈액학적 분석 결과는 Table 7에 나타내었다. Hematocrit, hemoglobin, total protein 및 tryglyceride에서는 모든 실험구에서 유의적인 차이를 관찰할 수 없었다. 하지만 6-7 ppm 실험구에서 2-3 ppm 실험구 보다 다소 높은 값을 관찰할 수 있었다. Cholesterol 함량에 있어서는 6-7 ppm 실험구에서 2-3 ppm 실험구 보다 유의적으로 높은 값을 보였으며, ALT에서는 6-7 ppm 실험구에서 유의적으로 낮은 값을 보였다. AST에서는 두 실험구간에 유의적인 차이를 보이지 않았다. ALT는 스트레스 지표로 높은 값은 부정적인 효과를 의미한다. 따라서 낮은 용존산소 함량은 어류의 생리적 스트레스로 작용해 성장, 사료효율 및 생존율 등 양식어류에 부정적인 효과를 미칠 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 넙치의 적정 용존산소 규명을 위해 용존산소 함량을 보다 세부적으로 나누어 규명할 필요가 있으며, 2-3 ppm의 농도는 성장, 사료효율 및 생존율에 영향을 미쳐 넙치의 생산성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이번 연구에서 넙치의 사료크기 선정 및 적정 사육환경(밀도, 용존산소)에 대한 기초자료를 도출 할 수 있었다. 연구결과를 종합해 보면, 넙치 53-183 g 사이의 단계에서는 배합사료의 적정사이즈 보다 상대적으로 큰 사료가 성장률을 높이는데 긍정

Table 7. Hematological parameters olive flounder *Paralichthys olivaceus* reared in the two different concentration of dissolved oxygen (DO) for 5 weeks in Exp-III<sup>1</sup>

	DO concentrations	
	6-7 mg/L	2-3 mg/L
Hematocrit (%)	33.3±0.63	31.5±3.51
Hemoglobin (g/dL)	6.5±0.25	6.0±0.24
Total protein (mg/dL)	4.74±0.4	4.75±0.76
Tryglyceride (mg/dL)	2.1±1.2	1.1±0.3
Cholesterol(mg/dL)	345.7±61.2 <sup>b</sup>	282.5±29.7 <sup>a</sup>
ALT (U/L) <sup>2</sup>	1.14±0.6 <sup>a</sup>	14.1±4.11 <sup>b</sup>
AST (U/L) <sup>3</sup>	14.4±2.8	14.9±0.9

<sup>1</sup>Values are means from quadruplicate groups of fish where the values in each row with different superscripts are significantly different ( $P<0.05$ ).

<sup>2</sup>ALT = Alanine aminotransferase, unit per liter (U/L) is the amount of enzyme which oxidizes one  $\mu\text{mol/L}$  of NADH per minute. <sup>3</sup>AST = Aspartate aminotransferase.

적인 효과를 보였으며, 사료섭취률도 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 치어기(30.0±0.1 g) 넘치는 저밀도 혹은 고밀도에서 성장률이 향상되지 않았고, 오히려 고밀도에서는 감소하는 것을 관찰 할 수 있었으며, 3.5 kg/m<sup>3</sup>가 적정 사육밀도로 사료된다. 낮은 용존산소는 성장률, 사료섭취율 및 사료효율에 부정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 6-7 ppm의 용존산소는 넘치가 성장하는데 적절한 것으로 판단된다. 하지만 보다 더 정확한 넘치의 적정 용존산소 함량을 규명을 위해 보다 더 다양한 용존산소 범위를 설정한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구결과들은 향후 안정적인 넘치 생산을 위한 사육기술개발에 유용하게 이용될 것으로 판단되며, 체계적인 넘치 배합사료 공급체계를 확립하는데 중요한 자료로 활용될 것이다.

## 사 사

이 연구는 국립수산과학원(친환경 실용배합사료 개발 및 품질 관리 연구, RP-2015-AQ-004)의 지원에 의해 연구되었습니다.

## References

- Adelman IR and Smith LL, 1970. Effect of oxygen on growth and food conversion efficiency of northern pike. *Prog Fish Cult* 32, 93-96. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8640\(1970\)32\[93:EOOOGA\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8640(1970)32[93:EOOOGA]2.0.CO;2).
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th Edition. Cunniff P, ed. Association of Official Analytical Chemists, Inc, Arlington, VA, U.S.A.
- Azaza MS, Dhraief MN, Kraiem MM and Baras E. 2010. Influences of food particle size on growth, size heterogeneity, food intake and gastric evacuation in juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, L. 1758. *Aquaculture* 309, 193-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.09.026>.
- Baker RF and Ayles GB. 1990. The effects of varying density and loading level on the growth of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *World Aquacult* 21, 58-62. [http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)90064-7](http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(94)90064-7).
- Bjornsson B. 1994. Effects of stocking density on growth rate of halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) reared in large circular tanks for three years. *Aquaculture* 123, 259-270. [http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)90064-7](http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(94)90064-7).
- Boyce DL, Purchase CF, Puvanendran V and Brown JA. 1998. Designing rearing environments for on-growing of juvenile yellowtail flounder (*Pleuronectes ferrugineus* [*Limanda ferruginea*]). *Bull Aquacult Ass Can* 2, 23-24.
- Brett JR and Groves DD. 1979. Physiological energetics. In: Hoar WS, Randall DJ and Brett JR, Eds. *Fish Physiology*, VIII. Academic Press, New York, U.S.A., 280-352.
- Buentello JA, Gatlin III DM and Neill WH. 2000. Effects of water temperature and dissolved oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture* 182, 339-352. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00274-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00274-4).
- Chiba K. 1965. A study on the influence of oxygen concentration on the growth of juvenile common carp. *Bull Freshwater Fish Res Lab* 15, 35-47.
- Cho SH, Lee SM and Lee JH. 2005. Effects of the extruded pellets and raw fish-based moist pellet on growth and body composition of flounder, *Paralichthys olivaceus* L. for 10 months. *J Aquaculture* 18, 60-65.
- Della Via J, Villani P, Gasteiger E and Niederstatter H. 1988. Oxygen consumption in sea bass fingerling *Dicentrarchus labrax* exposed to acute salinity and temperature changes: metabolic basis for maximum stocking density estimations. *Aquaculture* 169, 303-313. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00375-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00375-5).
- Fairchild EA and Howell WH. 2001. Optimal stocking density for juvenile winter flounder *Pseudopleuronectes americanus*. *J World Aquacult Soc* 32, 300-308. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-7345.2001.tb00453.x>.
- Folch J, Lee M and Sloane-Stanley GH. 1959. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J Biol Chem* 226, 497-509.
- Foss A, Evensen TH and Øiestad V. 2002. Effects of hyperoxia on growth and food conversion efficiency in the spotted wolffish *Anarhichas minor* (Olafsen). *Aquac Res* 33, 437-444. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.2002.00693.x>.
- Heo SB. 2011. Effects of extruded pellet size, feeding frequency and water addition on growth and body composition of olive flounder *Paralichthys olivaceus* reared in different water temperature. Ph D Thesis. Pukyong National University, Busan, Korea.
- Hermann RB, Warren CE and Doudoroff P. 1962. Influence of oxygen concentration on the growth of juvenile coho salmon *Trans Am Fish Soc* 91, 155-167. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659\(1962\)91\[155:IOOCOT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659(1962)91[155:IOOCOT]2.0.CO;2).
- Howell BR. 1998. The effect of stocking density on growth and size variation in cultured turbot, *Scophthalmus*, and sole *Solea solea*. *Int Coun Explor Sea* 10, 198-208.
- Irwin S, O' Halloran J and Fitzgerald RD. 1999. Stocking density, growth and growth variation in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* (Rafinesque). *Aquaculture* 178, 1-2. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00122-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00122-2).
- Jobling M. 1987. Influences of food particle size and dietary energy content on patterns of gastric evacuation of fish: test of a physiological model of gastric emptying. *J Fish Biol* 30, 299-314. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.1987.tb05754.x>.
- Jorgensen EH, Christiansen JS and Jobling M. 1993. Effects of stocking density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*).

- Aquaculture 110, 191-204. [http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90272-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(93)90272-Z).
- Kim KD, Kang YJ, Lee HY, Kim KW, Kim KM and Lee SM. 2006. Evaluation of extruded pellets as a growing diet for adult flounder *Paralichthys olivaceus*. J Aquacult 19, 173-177. <http://www.dbpia.co.kr/Article/589780>.
- King N, Howell WH and Fairchild E. 1998. The effect of stocking density on the growth of juvenile summer flounder *Paralichthys dentatus*. In: Proceedings of the twenty-sixth U.S.-Japan Aquaculture Symposium. Howell WH, Keller BJ, Park PK, McVey JP, Takayanagi K and Uekita Y, eds. Durham Press, New Hampshire, U.S.A., 173-180.
- Martinez-Tapia C and Fernandez-Pato CA. 1991. Influence of stock density on turbot (*Scophthalmus maximus* L.) growth. Int Coun Explor Sea 20, 1-7.
- Neill WH and Bryan JD. 1991. Responses of fish to temperature and oxygen, and response integration through metabolic scope. In: Brune DE and Tomasso JR, Eds. Aquaculture and Water Quality, The World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA, U.S.A., 30-57.
- Oh DH, Song JW, Kim MG, Lee BJ, Kim KW, Han HS and KJ Lee. 2013. Effect of food particle size, stocking density and feeding frequency on the growth performance of juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegelii*. Korean J Fish Aquat Sci 46, 407-412. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0407>.
- Refstie T., 1977. Effect of density on growth and survival of rainbow trout. Aquaculture 11, 329-334. [http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486\(77\)90082-5](http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(77)90082-5).
- Rowland SJ, Mifsud C, Nixon M and Boyd P. 2006. Effects of stocking density on the performance of the Australian freshwater silver perch (*Bidyanus bidyanus*) in cages. Aquaculture 253, 301-308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.049>.
- Siikavuopio SI, Mortensen A and Christiansen JS. 2008. Effects of body weight and temperature on feed intake, gonad growth and oxygen consumption in green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. Aquaculture 281, 77-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.05.033>.
- Stewart NE, Shumway DL and Douddoroff P. 1967. Influence of oxygen concentration on the growth of Juvenile largemouth bass. J Fish Res Board Can 24, 475-494.
- Thetmeyer H, Waller U, Black KD, Inselmann S and Rosenthal H. 1999. Growth of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) under hypoxic and oscillating oxygen conditions. Aquaculture 174, 355-367. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00028-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00028-9).
- Tibaldi E, Hakim Y, Uni Z, Tulli F, Francesco M, Luzzana U and Harpaz S. 2006. Effects of the partial substitution of dietary fish meal by differently processed soybean meals on growth performance, nutrient digestibility and activity of intestinal brush border enzymes in the European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). Aquaculture 261, 182-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.026>.
- Van Dam AA and Pauly D. 1995. Simulation of the effects of oxygen on food consumption and growth of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). Aquac Res 26, 427-440. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.1995.tb00932.x>.
- Whitworth WR. 1968. Effects of diurnal fluctuations of dissolved oxygen on the growth of brook trout. J Fish Res Board Can 25, 579-584.