

# 압출성형 배합사료 내 어분대체가 넙치(*Paralichthys olivaceus*)의 성장, 사료효율 및 소화율에 미치는 영향

김민기 · 이초롱 · 신재형 · 이봉주<sup>1</sup> · 김강웅<sup>2</sup> · 이경준\*

제주대학교 해양생명과학과, <sup>1</sup>국립수산과학원 사료연구센터, <sup>2</sup>국립수산과학원 양식관리과

## Effects of Fish Meal Replacement in Extruded Pellet Diet on Growth, Feed Utilization and Digestibility in Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*

Min-Gi Kim, Chorong Lee, Jaehyeong Shin, Bong-Joo Lee<sup>1</sup>, Kang-Woong Kim<sup>2</sup> and Kyeong-Jun Lee\*

Department of Marine Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

<sup>1</sup>Aquafeed Research Center, National Institute of Fisheries Science, Pohang 37517, Korea

<sup>2</sup>Aquaculture Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

This study investigated the effects of replacing fish meal (FM) with a mixture of four protein sources (wheat gluten, soy protein concentrate, tankage meal, and poultry byproduct meal) in an extruded pellet (EP) diet for olive flounder *Paralichthys olivaceus*. Five experimental diets were formulated with alternative proteins replacing 0%, 20%, 30%, 40%, and 50% of FM. Taurine and betaine were added as attractants in the diets. Triplicate groups of fish (initial body weight: 196±2 g) were fed the diets to apparent satiation. Over the course of a 6-month feeding trial, there were no significant differences between the groups in growth performance, feed utilization, survival, or villus height. The dry matter and protein digestibility of FM50 diet were significantly lower than those of the control diet at water temperatures below 18.5°C in months 4 and 6. This is a highly significant first report on FM replacement in an EP diet given to olive flounder over a 6-month-long feeding period. It shows that the proper mixture of protein sources can replace up to 50% of FM in olive flounder EP diets with taurine and betaine supplementation. It also shows that 40% of FM could be safely replaced in EP diets during periods of low water temperature.

Key words: Fish meal, Long-term feeding, Olive flounder, Low-fish meal diet, Extruded pellet

### 서론

넙치는 국내 양식산업의 대표 어종으로써 2017년에 약 41,207톤이 생산되었으며, 생산금액은 약 5,845억원에 달했다(KOSIS, 2017a). 넙치양식이 미래에도 지속 가능한 산업으로 발전하기 위해서는 사료 내 어분 함량을 낮춘 배합사료의 개발이 요구된다. 타 어종에서는 이미 extruded pellet (EP)을 이용하여 어분대체 연구를 하고 있으며(Overland et al., 2009), 6개월 이상의 장기간 실험도 진행되었다(Hansen et al., 2007). 넙치에서도 사료 내 어분을 대체하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔으며(Pham et al 2007; Kim et al., 2018), EP를 이용한 어분대체 연구도 진행되었다(Jang et al., 2013). 하지만 EP를 이

용하여 6개월 이상 장기간 진행된 어분대체 연구는 미흡한 실정이다.

성공적인 양식산업 경영을 위해서는 사료, 양식환경, 어병 등 다양한 요인을 고려해야 한다. 사료비는 어류양식 생산원가의 약 50%를 차지하는 매우 중요한 요인이다(KOSIS, 2017b). 넙치는 단백질 이용성이 높고(Kim et al., 2000), 탄수화물의 이용 능력이 낮아(Shin and Kim, 2002) 타 어종에 비해 사료 내 어분의 사용비중이 높다. 어분은 단백질 함량이 60-70%로 높고, 필수 아미노산, 지방산, 미네랄과 같은 영양소가 풍부할 뿐만 아니라 미지성장인자(unidentified growth factors)를 다량 함유하고 있는 최적의 단백질원료이다(Lee et al., 1996; Hardy, 2010). 세계 양식생산량은 양식기술이 발전함에 따라 증가하였고(Tacon

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

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0149>

Korean J Fish Aquat Sci 52(2), 149-158, April 2019

Received 26 February 2019; Revised 18 March 2019; Accepted 25 March 2019

저자 직위: 김민기(대학원생), 이초롱(대학원생), 신재형(대학원생), 이봉주(연구사), 김강웅(연구관), 이경준(교수)

and Metian, 2008), 어분의 사용량도 함께 증가하였다. 그러나, 어분은 계속된 남획으로 인한 어획량 감소와 생산국의 어분 소비 증가로 인해 공급이 불안정하다(Ha and Kim, 2018). 사료 내 어분을 대체하기 위한 다양한 연구가 진행되어왔으나, 한 종류의 단백질원료만을 이용하여 어분을 대체할 경우, 대체가능성의 한계를 드러냈다(Chen et al., 2010; Dawood et al., 2015). 특히, 단일 원료만으로 어분을 대체할 시, 제한아미노산과 항영양인자로 인한 소화율 저하 등의 문제가 발생하였다(Kim et al., 2000; Krogdahl et al., 2010). 다양한 단백질원료를 혼합하여 사용할 경우, 제한아미노산과 부족한 영양소를 서로 보완할 수 있어 한 가지 단백질원료를 사용하는 것 보다 효과적으로 어분을 대체할 수 있다고 보고되었다(Lee et al., 1996). 특히, 동·식물성 단백질원료의 혼합은 다량의 어분을 대체할 수 있는 최적의 방법으로 알려져 있다(Kissinger et al., 2016; Scerra et al., 2016).

따라서, 본 연구는 동·식물성 단백질원료들의 혼합을 통해 넙치 사료 내 어분을 대체하고자 하였다. 특히, EP 실험사료를 이용하여 6개월 간 semi-pilot 규모의 사양실험을 통해 넙치용 저어분사료 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 실험어 및 사육관리

실험에 사용된 넙치는 제주도 서귀포시 성산읍 신산리에 위치한 대형수산에서 구입하였다. 실험환경에 적응시키기 위해 시판용 넙치 배합사료를 공급하면서 순치하였다. 예비사육 후, 육성기 넙치( $196 \pm 2$  g)를 수조마다 40마리씩 각 사료구 당 3반복으로 2000 L 원형 propylene 수조에 무작위로 배치하였다. 실험사료는 1일 2회(08:30, 17:30), 6개월간 반복공급 되었고 사료공급 30분 후에 환수를 진행하였다. 사육수는 모래 여과된 해수가 사용되었고, 수조 당 유수량은 15-20 L/min이 되도록 조절하였다. 모든 실험수조에 에어스톤을 설치하였고, 사양실험 동안의 사육수온은 자연수온에 의존하였다(Table 1).

### 실험사료

실험사료(Table 2)에는 2종류의 어분(정어리, 멸치)이 사용되었다. 대조사료(Control)의 어분함량은 국내 배합사료의 어분 사용 평균치인 약 65%로 설정하였다. 실험사료는 4종의 원료(wheat gluten, soy protein concentrate, tankage meal, poultry

by-product meal)를 이용하여 대조사료 내 어분함량을 각각 20, 30, 40, 50% (FM20, FM30, FM40, FM50) 대체하였다. Taurine과 betaine은 사료의 기호성 증진을 위해 어분대체 실험사료에 첨가되었다. 실험사료는 국립수산물연구원 사료연구센터에서 압출성형기(ATXD-II Extruder, Fesco, Korea)를 이용하여 제조되었다. 성형된 실험사료는 70°C에서 3시간동안 열풍 건조되었으며, 수분분석기를 이용하여 건물(dry matter) 함량 계산 후, 어유를 첨가하였다.

### 어체측정

성장률과 생존율 조사를 위해 매달 수조 전체 어류를 측정하였다. 실험 넙치는 어체측정 18시간 전부터 절식되었다. 사양실험 종료까지 매달 평균무게(mean body weight, g), 사료섭취량(feed intake, g/fish), 사료전환효율(feed conversion ratio), 단백질전환효율(protein efficiency ratio)을 조사하였다. 사양실험 종료 후에는 비만도(condition factor), 간 중량지수(hepatosomatic index, %), 장 중량지수(viscerosomatic index, %)를 추가로 조사하였다.

### 샘플수집

최종무게 측정 후, 각 수조마다 3마리의 실험어를 무작위로 선별한 후, 2-phenoxyethanol 용액(200 ppm)으로 마취시켰다. 대상 어류의 용모길이(villus height) 관찰을 위해 유문부와 장의 접점을 기준으로 1 cm 떨어진 전장(anterior intestine)을 자르고, Bouin's solution에 고정하여 장 조직을 샘플하였다. 내장이 제거된 실험어(carass)는 -50°C에서 냉동시킨 후, 일반성분 분석에 사용하였다.

### 일반성분분석

실험사료, 전어체의 일반성분분석은 AOAC (2000) 방법에 따라 수분은 상압가열건조법(125°C, 3시간), 조회분은 직접회화법(550°C, 4시간)으로 분석되었다. 단백질은 자동조단백질 분석기(Keiltec system 2300, FOSS, Sweden)로 분석되었다. 지방은 Folch et al. (1957)의 방법에 따라 분석되었다.

### 조직학적 분석

전장 조직은 Bouin's solution으로 고정되었으며, 분석 시까지 70% ethyl alcohol에 고정되었다. 고정된 전장 조직은 적절한 크기로 절단되어 tissue processor (TP1020, Leica, Germany)

Table 1. Monthly water temperature during the feeding trial

	Water temperature (°C)						
	Overall	1 month	2 month	3 month	4 month	5 month	6 month
Average	19.7±4.5	25.3±2.4	23.3±1.4	21.8±1.1	18.5±1.5	15.3±0.8	13.7±1.1
Maximum		29.1	26.0	23.7	20.9	16.7	15.1
Minimum		20.8	21.0	19.8	15.4	13.4	11.4

에서 단계별 탈수과정을 거친 후, 파라핀(paraffin) 작업 후 hematoxylin and eosin (H&E) 염색을 하였다. 용모의 길이는 현미경(CKX-41, Olympus, Japan)을 이용하여 100배 확대 후 측정되었다.

**소화율 평가**

소화율 실험사료는 곱게 분쇄된 99%의 EP 실험사료와 1%의 chromium oxide (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, DaeJung, Korea)를 혼합하여 제작하였다. 혼합물 총 중량의 25%에 해당하는 증류수를 첨가하여 사료혼합기로 혼합·반죽한 후, 펠릿성형기(SP-50, Geumgang ENG, Korea)를 이용하여 펠릿사료 형태로 제작하였다. 제작된

실험사료는 건조기를 이용하여 25℃에서 24시간 건조시켰으며, -20℃에 보관하면서 소화율실험에 사용하였다. 소화율평가에 사용된 넙치는 실험환경에 대한 적응과 장내에 일반사료가 남아있지 않도록 1주간 순치되었다. 예비사육 후, 실험넙치는 5개의 400 L guelph system (분수집 장치 수조)에 각 수조 당 25마리씩 무작위로 선택되어 배치되었다. 사육수는 1차적으로 모래 여과된 해수를 카트리지필터가 장착된 필터하우징을 통해 여과되었다. 각 수조의 유수량은 1 L/min로 세팅하였으며, 실험기간 동안의 사육수온은 자연수온에 의존되었다. 소화율 평가는 실험 2개월차부터 6개월차까지 사양실험과 동시에 진행되었다. 매달 2주간 소화율 실험사료를 공급하면서 분을 수집

Table 2. Composition (% of dry matter basis) of the experimental diets for olive flounder *Paralichthys olivaceus*

	Diets				
	Control	FM20	FM30	FM40	FM50
Fish meal, sardine <sup>1</sup>	32.50	26.00	22.75	19.50	16.25
Fish meal, anchovy <sup>1</sup>	32.50	26.00	22.75	19.50	16.25
Soybean meal <sup>1</sup>	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Wheat flour	14.85	12.85	12.95	12.55	12.55
Wheat gluten <sup>1</sup>	1.00	3.50	4.50	5.50	6.50
Soy protein concentrate <sup>1</sup>	0.00	3.50	5.25	7.00	8.75
Tankage meal <sup>1</sup>	0.00	3.50	6.25	9.00	11.75
Poultry by-product meal <sup>1</sup>	0.00	3.50	4.00	4.50	5.00
Fish oil <sup>2</sup>	3.40	4.00	4.30	5.10	5.50
Mono calcium phosphate	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Mineral mixture <sup>1</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Vitamin mixture <sup>1</sup>	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Vitamin C <sup>3</sup>	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Vitamin E <sup>3</sup>	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Choline <sup>1</sup>	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Lecithin <sup>1</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Taurine <sup>1</sup>	0.00	0.40	0.50	0.60	0.70
Betaine <sup>1</sup>	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Anti-fungal agent	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<i>Proximate analysis</i> (% of dry matter)					
Moisture	6.47	5.98	4.62	5.93	4.70
Crude protein	58.8	60.1	59.5	59.9	60.1
Crude lipid	13.2	13.1	12.8	13.5	13.4
Crude ash	13.0	11.7	10.9	10.5	9.70

<sup>1</sup>Fish meal, sardine (crude protein 68.0%, crude lipid 8.6%, ash 17.1%), fish meal, anchovy (crude protein 69.4%, crude lipid 8.3%, ash 17.8%), Soybean meal (crude protein 52.7%, crude lipid 1.8%, ash 6.8%), wheat gluten (crude protein 83.2%, crude lipid 3.69%, ash 1.3%), soy protein concentrate (crude protein 68.9%, crude lipid 0.5%, ash 7.1%), tankage meal (crude protein 86.3%, crude lipid 9.0%, ash 7.5%) and poultry by-product meal (crude protein 71.6%, crude lipid 13.5%, ash 10.5%) were by The Feed Co., Ltd., Seoul, Korea. <sup>2</sup>Fish oil was by E-wha oil Co., Ltd., Busan, Korea. <sup>3</sup>Vitamin C and vitamin E were by AlphaAqua Co., Busan, Korea. FM20, 20% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM30, 30% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM40, 40% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM50, 50% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet.

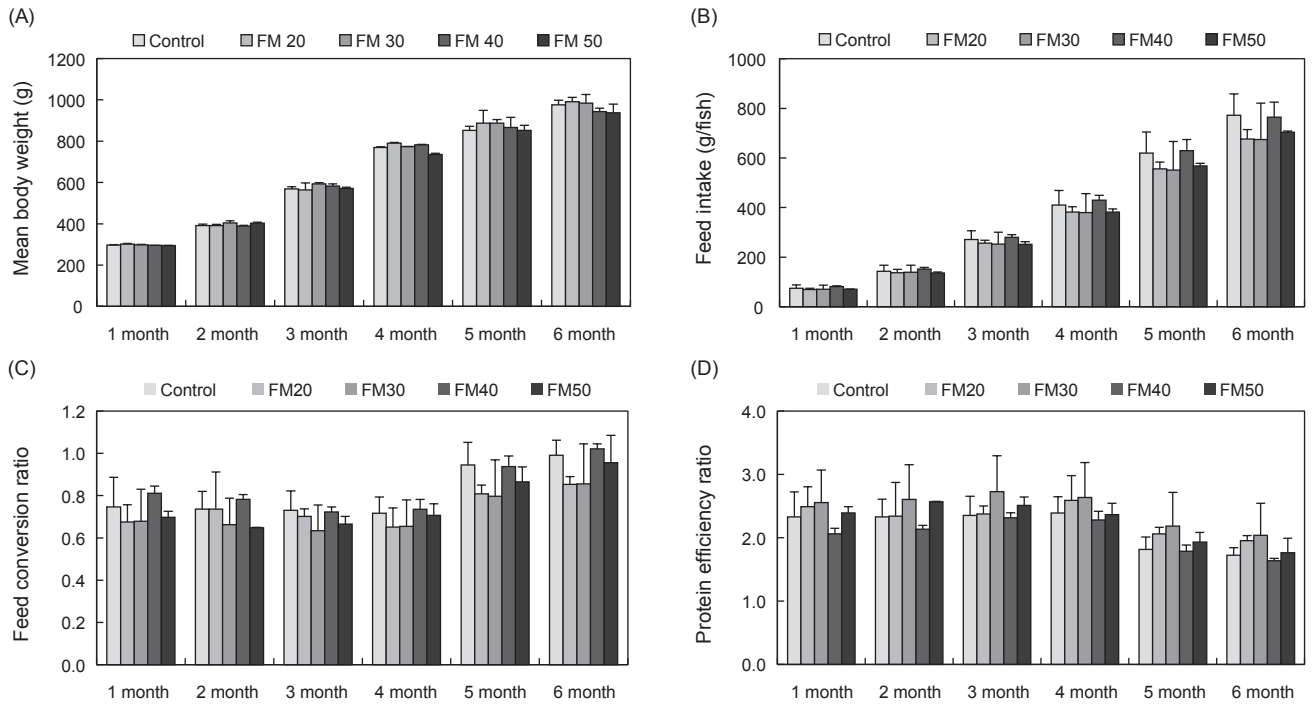


Fig. 1. Cumulative mean body weight (A), feed intake (B), feed conversion ratio (C) and protein efficiency ratio (D) of olive flounder *Paralichthys olivaceus* (initial mean body weight: 196±2g) fed the five experimental diets for 6 months [Feed intake (g/fish)=dry feed consumed (g)/fish, Feed conversion ratio=dry feed intake/wet weight gain, Protein efficiency ratio=wet weight gain/protein intake]. FM20, 20% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM30, 30% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM40, 40% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM50, 50% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet.

하였다. 매달 분을 수집한 후 다음 달 분 수집 전까지 EP 실험사료가 공급되었다. 분 수집 16시간 전 실험어를 소화율 실험사료로 반복 공급시켰다. 반복공급 후, 수조에 남은 사료 및 이물질을 깨끗이 청소하였다. 그 후, 카트리지 필터를 교체하여 다시 한 번 환수한 후, 1일 1회(09:00 h) 분 수집을 진행하였다. 수집한 분 샘플은 여과지를 이용하여 해수를 제거한 후 -50℃ 저온 냉동고에 보관하고, 동결냉동건조(freeze-dryer) 시킨 후 분석에 사용하였다. 실험사료와 분 샘플에서의 chromium oxide는 Divakaran et al. (2002)의 방법을 토대로 분석되었다. 실험사료의 단백질소화율은 Bui et al. (2014)의 방법으로 계산되었다.

### 통계분석

실험사료의 배치는 완전확률계획법(completely randomized design)으로 실시되었다. 실험결과들은 SPSS (version 18.0) 프로그램이 이용되어 One-way ANOVA로 통계분석 되었다. 데이터 값의 유의적인 차이는 Tukey's HSD를 통해 평균값 간의 유의성( $P \leq 0.05$ )이 비교되었다. 데이터는 평균값±표준편차(mean±SD)로 나타내었으며, 백분율 데이터는 arcsine 변형값으로 계산되어 통계분석 되었다.

### 결 과

6개월간 매달 측정된 성장, 사료섭취량, 사료효율 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 매월 평균무게, 사료섭취량, 사료전환효율 및 단백질전환효율은 대조구와 모든 실험구에서 유의적인 차이가 없었다. 사양실험 종료 후의 생존율, 비만도, 간중량지수 및 장중량지수 조사 결과에서도(Table 3) 대조구와 어분대체 실험구 간에 유의적인 차이는 없었다.

전어체 수분함량은 대조구에 비해 FM20, FM30 실험구가 유의적으로 낮았다(Table 4). 전어체 단백질과 회분은 경향적으로 FM30 실험구가 대조구에 비해 높았으나 유의적인 차이는 없었다. 전어체 지방분석 결과 FM20 실험구가 가장 높았으나 실험구 간의 유의적인 차이는 없었다.

5개월 간의 장내 용모의 길이를 측정된 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 1개월 차 측정에서는 683-958  $\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 이후 매월 816-1141  $\mu\text{m}$ , 1188-1417  $\mu\text{m}$ , 1479-1641  $\mu\text{m}$ 로 나타나 4개월차 측정까지 점점 증가되는 경향을 보였다. 5개월차 조사에서는 1372-1804  $\mu\text{m}$ 이었다. 모든 실험구 사이의 유의적인 차이는 없었다.

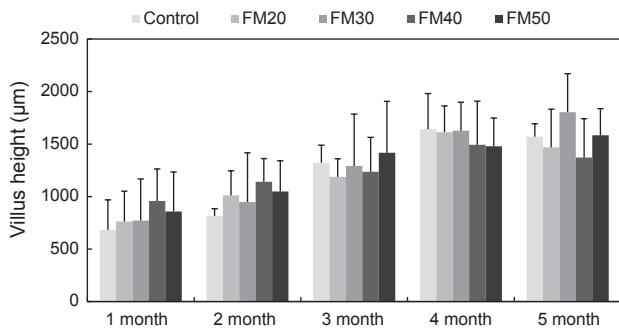


Fig. 2. Villus heights of olive flounder *Paralichthys olivaceus* fed the five experimental diets for 5 months. FM20, 20% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM30, 30% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM40, 40% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM50, 50% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet.

소화율 조사결과(Fig. 3), 건물소화율은 3개월째에 FM20 실험구가 FM50 실험구에 비해 유의적으로 높았다. 4개월차 조사에서는 FM50 실험구가 다른 모든 실험구에 비해 유의적으로 낮았다. 2, 5, 6개월차 조사에서는 모든 실험구에서 유의적인 차이가 없었다. 단백질소화율은 4개월차 조사에서 FM50 실험구가 다른 모든 실험구에 비해 유의적으로 낮았다. 6개월차 조사에서는 FM30 실험구가 FM40, FM50 실험구에 비해 유의적으로 높았다. FM50 실험구의 단백질 소화율은 다른 실험구에 비해 유의적으로 낮았다.

### 고찰

넙치사료 내 동·식물성 원료의 어분대체율은 대두박 17-30%, 주정박 18.5%, 우모분 18.8-26%, 돈모분 7.5-30%, 참치부산물 20-30%, 육골분 10-20%로 보고되었다(Kikuchi et al., 1994; Kim et al., 2008; Ye et al., 2011; Lee et al., 2012; Kim et al., 2014; Bae et al., 2015; Kim et al., 2018). 위의 연구결과 다양

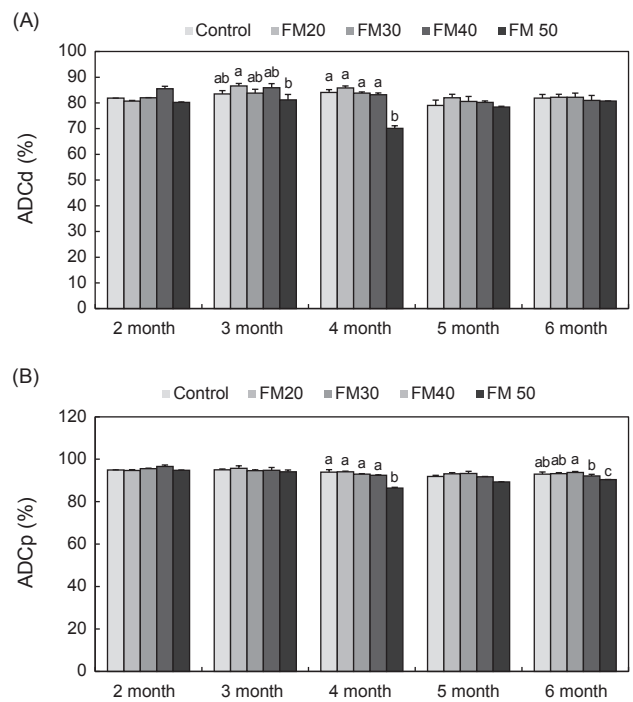


Fig. 3. Apparent digestibility coefficient (% ADC) of dry matter (A) and protein (B) in the experimental diets. Values (mean±SD) with different letter are significantly different ( $P < 0.05$ ). ADCd, apparent digestibility coefficient dry matter. ADCp, apparent digestibility coefficient protein. FM20, 20% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM30, 30% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM40, 40% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM50, 50% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet.

한 원료에서 7-30%의 어분대체 가능성이 보고되었는데, 모두 단일 단백질원료로 어분대체 연구가 진행되었다. 반면, 대두박, 건조 홍합살, 혈분, 콘글루텐밀을 혼합하였을 경우, 넙치사료 내 어분을 46%까지 대체 가능하다고 보고되었다(Kikuchi, 1999).

Table 3. Survival and morphological indexes of olive flounder fed five experimental diets for 6 months<sup>1</sup>

	Diets				
	Control	FM20	FM30	FM40	FM50
Survival (%) <sup>2</sup>	64.2±12.8	78.3±5.8	75.8±1.4	78.3±8.0	67.5±2.5
CF <sup>3</sup>	1.20±0.16	1.36±0.18	1.21±0.06	1.19±0.00	1.20±0.06
HSI (%) <sup>4</sup>	2.37±0.47	2.36±0.30	2.86±0.67	2.31±0.59	2.42±0.83
VSI (%) <sup>5</sup>	4.74±1.11	5.72±0.37	5.36±0.31	5.04±0.40	5.33±1.24

<sup>1</sup>The lack of superscript letter indicates no significant differences among treatments. <sup>2</sup>Survival (%)=Number of fish at end of feeding trial/number of fish stocked×100. <sup>3</sup>CF (Condition factor)=fish weight×100/total body length. <sup>4</sup>HSI [Hepatosomatic index (%)]=(liver weight/body weight)×100. <sup>5</sup>VSI [Viscerosomatic index (%)]=(visceral weight/body weight)×100. FM20, 20% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM30, 30% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM40, 40% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM50, 50% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet.



유럽농어(*Dicentrarchus labrax*)를 대상으로 진행된 연구에서 녹두박, 우도분, 혈분을 혼합하여 사료 내 어분을 50%까지 대체 가능하다고 보고되었으며(Scerra et al., 2016), 혈분, 대두농축단백, 콘글루텐밀, 밀글루텐, 채종박 혼합물로는 82% 까지 대체 가능하다고 보고되었다(Torrecillas et al., 2017). 본 연구에서도 4가지 단백질 원료(wheat gluten, soy protein concentrate, tankage meal and poultry by-product meal)의 조합을 통해 단일 원료 사용시에 부족하게 되는 영양소를 서로 보완해 줄 수 있었기 때문에 어분을 50%까지 대체함에도 성장과 사료효율에 문제가 없었던 것으로 판단된다.

Taurine은 어분과 동물성 원료에 다량 함유되어 있으나, 식물성 원료에는 함량이 적어 식물성 원료를 이용한 어분대체 연구 시 taurine의 첨가가 필요하다(Lunger et al., 2007; Lim et al., 2013). 넙치사료 내 taurine을 첨가할 경우 성장률, 사료효율이 유의적으로 향상된다고 보고되었다(Park et al., 2002; Kim et al., 2005). Taurine(a beta-amino sulfur amino acid)은 대부분의 동물조직에 고농도로 함유되어 있으며 식물조직에는 거의 존재하지 않는 황함유 아미노산의 일종이다. 세포막의 안정화와 항산화효과 및 삼투압 조절에 taurine이 중요한 역할을 하기 때문에 어류는 사료로부터 충분한 taurine이 공급되어야 한다. 특히, 사료에 식물성 단백질원료가 다량 함유되면 taurine이 반드시 첨가되어야만 하는 조건부 필수영양소로 알려져 있다(Lim et al., 2013). 넙치사료 내 taurine의 요구량은 참돔(*Pagrus major*, 0.5%, Matsunari et al., 2008), 유럽농어(0.2%, Martínez et al., 2004), 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*, 0.88%, Lim et al., 2013)에 비해 매우 높은 1.5-2.0%로 보고되었다(Park et al., 2001). Choi et al. (2004)는 betaine을 어분대체 사료에 첨가하면 넙치의 성장과 소화율을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서는 대조구를 제외한 모든 실험구에 taurine과 betaine을 첨가하였으며, 어분대체율이 10% 증가할수록 taurine을 0.1%씩 추가적으로 첨가하였다. 그 결과, 넙치의 성장률과 사료효율에 긍정적인 영향을 주어 어분대체 가능성을 향상시킨 것으로 판단된다.

육식성 어종의 경우 식물성 단백질원료 내 다양한 항영양인자

가 소화기관에 피해를 끼친다고 보고되었다(Martínez-Llorens et al., 2012). 농어(*Lates calcarifer*), 대서양연어(*Salmo salar*), 터봇(*Scophthalmus maximus*)을 대상으로 식물성 단백질원료가 사용된 사료를 공급하였을 때, 장세포 공포화, 흡수성 공포수 감소, 점막고유층과 점막하 조직의 넓이 및 세포침윤 증가와 같은 장변화가 관찰되었다(Boonyaratpalin et al., 1998; Øverland et al., 2009; Gu et al., 2016). 특히, 용모의 길이는 사포닌과 같은 항영양인자로 발생된 염증에 의해 감소된다(Zhang et al., 2018). 넙치사료 내 대두농축단백을 22% 이상 사용하면 용모길이의 감소가 나타났다(Khosravi et al., 2018). 반면, Tusche et al. (2012)는 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*) 사료 내 밀글루텐을 이용하여 어분을 대체할 시 항영양물질의 작용이 관찰되지 않는다고 보고하였다. 대서양연어를 대상으로 한 연구에서는 사료 단백질의 35%까지 밀글루텐을 사용해도 장 변화가 발생하지 않았다(Storebakken et al., 2000). 본 연구에서는 식물성 단백질원료로써 대두농축단백과 밀글루텐이 사용되었다. 대두농축단백의 함량은 최대 8.75%였으며, 어분대체율이 증가함에도 장 길이의 유의적인 변화가 없었던 것으로 보아 어분대체에 의한 장내 부작용은 없는 것으로 판단된다.

어분을 식물성 단백질원료로 대체할 경우 사료 내 섬유소와 항영양인자 함량이 증가할 수 있다(Gatlin et al., 2007). 대부분의 육식성 어류는 섬유소를 소화할 수 있는 능력이 부족하여 식물성 사료원료 사용시 소화율이 낮아진다(Apper-Bossard et al., 2013). 식물성 단백질원료 내 항영양인자에 의한 소화율 감소도 보고되었다(Krogdahl et al., 2010). 이전 연구에서 넙치사료 내 탈피대두박을 이용하여 어분을 30% 대체시 건물소화율과 단백질소화율이 감소하였다(Choi et al., 2004). 대두농축단백을 이용하여 어분을 25% 이상 대체시 건물, 단백질, 아미노산소화율이 유의적으로 감소하였다(Deng et al., 2006). 반면, 본 연구에서 사용된 식물성 단백질 원료 중 밀글루텐은 섬유소 함량이 낮고, 사료 내 사용시 항영양인자에 의한 부작용이 관찰되지 않는 식물성 단백질원료이다(NRC, 2011; Tusche et al., 2012). 은연어(*Oncorhynchus kisutch*), 무지개송어, 귀족도미(*Saparus aurata*), 틸라피아(*Oreochromis niloticus*), 대서

Table 4. Carcass composition (% of wet weight) of olive flounder *Paralichthys olivaceus* fed the five experimental diets for 6 months<sup>1</sup>

	Diets				
	Control	FM20	FM30	FM40	FM50
Moisture (%)	71.7±0.5 <sup>b</sup>	70.5±0.3 <sup>a</sup>	70.5±0.1 <sup>a</sup>	71.3±0.4 <sup>ab</sup>	70.8±0.4 <sup>ab</sup>
Protein (%)	20.8±3.0	20.9±1.9	22.0±0.6	20.7±1.9	19.8±0.2
Lipid (%)	3.22±0.62	4.70±0.10	3.93±0.25	3.48±0.48	3.93±0.25
Ash (%)	11.0±0.5	10.5±1.7	8.8±0.0	10.6±1.3	9.3±1.7

<sup>1</sup>Values are means form triplicate groups of fish where the values in each row the different superscripts are significantly different (P<0.05). The lack of superscript letter indicates no significant differences among treatment. FM20, 20% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM30, 30% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM40, 40% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet. FM50, 50% fish meal was replaced with mixture of protein sources in diet.

양대구(*Gadus morhua*)를 대상으로 원료소화율을 측정된 결과 밀글루텐이 어분에 비해 높은 단백질 소화율을 보였다(Sugiura et al., 1997; Kissil and Lupatsch, 2004; Schneider et al., 2004; Tibbetts et al., 2006). Storebakken et al. (2000)은 대서양연어 사료 내 어분을 밀글루텐으로 대체할 시 소화율이 향상된다고 보고하였다. 동물성 단백질원료는 뼈, 가축, 고기, 피와 같은 구성요소에 따라 영양소 함량 및 소화율이 다르다(Yigit et al., 2006). 본 연구에서 사용된 가금부산물분과 수지박은 각각 가금류와 육류의 가식부를 주로 사용하여 높은 단백질(crude protein, CP: 71.6%, 86.3%) 조성을 지닌 제품이다. 가금부산물분(CP: 64.9%)을 사용하여 킬라피아 사료 내 어분을 100% 대체한 연구에서 소화율이 감소하지 않았다고 보고하였다(Hernández et al., 2010). 본 연구에서는 4개월차, 6개월차 소화율 측정을 제외하면 어분을 50% 대체했음에도 소화율에 있어 대조구와 타 실험구 사이에 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 밀글루텐, 고품질의 가금부산물분과 수지박을 사용하였기 때문에 어분을 대체했음에도 소화율의 저하가 발생하지 않았던 것으로 판단된다.

선행 연구에서 대두박을 이용하여 사료 내 어분을 30% 대체 시 소화율이 감소하였으나, betaine이 포함된 섭이촉진제 첨가 시 대조구와 소화율에서 차이가 없었으며, 어분을 20% 대체한 사료 내 첨가시 대조구에 비해 소화율이 증가되었다(Choi et al., 2004). 코비아(*Rachycentron canadum*) 자어를 대상으로 한 연구에서는 사료 내 taurine 첨가시 amylase, lipase, trypsin, pepsin과 같은 소화효소의 활성이 증가하였다(Salze et al., 2012). 본 연구에서도 대조구를 제외한 모든 실험사료 내 betaine과 taurine이 첨가되었으며, 어분대체에 따른 소화율 감소를 보완해준 것으로 사료된다.

어류의 소화율은 사육수온과 같은 환경조건 등에 영향을 받을 수 있으며(Sullivan and Reigh, 1995), 항상 일정한 수준으로 유지되지 않는다(McGoogan and Reigh, 1996). 넙치의 최적사육수온은 21-24℃이다(Son et al., 2006). 본 연구에서 6개월 간의 수온측정 결과, 4개월차에 최적사육 수온 보다 낮은 평균수온을 나타내었으며, 15.4℃까지 수온이 내려간 것으로 나타났다. 6개월차 평균수온은 13.7℃, 최저수온 11.4℃까지 내려갔다. FM50 실험구가 4, 6개월차에 대조구에 비해 소화율이 감소한 이유는 수온저하에 민감하게 반응하였기 때문으로 판단된다.

따라서, 적정수온에서 넙치사료 내 taurine과 betaine 첨가시 밀글루텐, 대두농축단백, 수지박, 가금부산물분을 혼합하여 사료 내 어분의 50%까지 대체가 가능할 것으로 판단된다. 소화율 결과를 고려하였을 때, 저수온(18.5℃ 이하)에서는 40%까지 어분대체가 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 국립수산물과학원(R2017021) 및 해양수산부의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- AOAC (Association of Official Analytical chemists). 2000. Official methods of analysis. association of official analytical chemists Inc, Arlington, VA, U.S.A.
- Apper-Bossard E, Feneuil A, Wagner A and Respondek F. 2013. Use of vital wheat gluten in aquaculture feeds. *Aquat Biosyst* 2013, 9-21. <https://doi.org/10.1186/2046-9063-9-21>.
- Bae KM, Kim KW and Lee SM. 2015. Evaluation of rice distillers dried grain as a partial replacement for fish meal in the practical diet of the juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Korean Fish Aquat Sci*, 18, 151-158. <http://dx.doi.org/10.5657/FAS.2015.0151>.
- Boonyaratpalin M, Suraneiranat P and Tumpibal T. 1998. Replacement of fish meal with various types of soybean products in diets for the Asian seabass, *Lates calcarifer*. *Aquaculture* 161, 67-78. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00257-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00257-3).
- Bui HTD, Khosravi S, Fournier V, Herault M and Lee KJ. 2014. Growth performance, feed utilization, innate immunity, digestibility and disease resistance of juvenile red seabream (*Pagrus major*) fed diets supplemented with protein hydrolysates. *Aquaculture*, 418, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.046>.
- Chen Z, Ai Q, Mai K, Xu W, Ma H, Li Y and Zhang J. 2010. Effects of dietary canola meal on growth performance, digestion and metabolism of Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*. *Aquaculture* 305, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.03.031>.
- Choi SM, Wang X, Park GJ, Lim SR, Kim KW, Bai SC and Shin IS. 2004. Dietary dehulled soybean meal as a replacement for fish meal in fingerling and growing olive flounder *Paralichthys olivaceus* (Temminck et Schlegel). *Aquac Res* 35, 410-418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01046.x>.
- Dawood MAO, Koshio S, Ishikawa M and Yokoyama S. 2015. Effects of Partial substitution of Fish Meal by Soybean Meal with or without Heat-Killed *Latobacillus plantarum* (LP20) on Growth Performance, Digestibility, and Immune Response of Amberjack, *Seriola dumerili* Juveniles. *Biomed Res Int*. 2015, 132-135. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/514196>.
- Deng J, Mai K, Ai Q, Zhang W, Wang X, Xu W and Liufu Z. 2006. Effects of replacing fish meal with soy protein concentrate on feed intake and growth of juvenile Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture* 258, 503-513. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.04.004>.
- Divakaran S, Obaldo LG and Forster IP. 2002. Note on the methods for determination of chromic oxide in shrimp feeds. *J Agric Food Chem* 50, 464-467.
- 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* 226, 497-509.
- Gatlin III DM, Barrows FT, Brown P, Dabrowski K, Gaylord TG, Hardy RW, Herman E, Hu G, Krogdahl A, Nelson R, Overturf K, Rust M, Sealey W, Skongberg D, Souza EJ, Stone D, Wilson R and Wurtele E. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. *Aqua Res* 38, 551-579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704.x>.
- Gu M, Bai N, Zhang Y and Krogdahl Å. 2016. Soybean meal induces enteritis in turbot *Scophthalmus maximus* at high supplementation levels. *Aquaculture* 464, 286-295. <https://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.035>.
- Ha SS and Kim KJ. 2018. A Study on climate variability and its impact on anchoveta landing, correlation of fishmeal production and price in Peru. *Latin American and Caribbean Studies* 37, 161-210. <http://dx.doi.org/10.10.17855/jlas.2018.5.37.3.161>.
- Hansen AC, Rosenlund G, Karlsen Ø, Koppe W and Hemre GI. 2007. Total replacement of fish meal with plant proteins in diets for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) I-Effects on growth and protein retention. *Aquaculture* 272, 599-611. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.08.034>.
- Hardy RW. 2010. Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal. *Aqu Res* 41, 770-776. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02349.x>.
- Hernández C, Olvera-Novoa MA, Hardy RW, Hermosillo A, Reyes C and González B. 2010. Complete replacement of fish meal by porcine and poultry by-product meals in practical diets for fingerling Nile tilapia *Oreochromis niloticus*: digestibility and growth performance. *Aquac Nutr* 16, 44-53. <https://doi.10.1111/j.1365-2095.2008.00639.x>.
- Jang MS, Park HY, Nam KH, Han HS, Kim KW, Kim KD and Lee BJ. 2013. Effect of extruded pellets containing fermented soybean meal as a partial substitute for fish meal on growth performance and muscle quality of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *J Agric Life Sci* 47, 203-215.
- Khosravi S, Bui HTD, Herault M, Fournier V, Kim KD, Lee BJ, Kim KW and Lee KJ. 2018. Supplementation of protein hydrolysates to a low-fishmeal diet improves growth and health status of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *J World Aquac Soc* 49, 897-911. <https://doi.org/10.1111/jwas.12436>.
- Kikuchi K. 1999. Use of defatted soybean meal as a substitute for fish meal in diets of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture* 179, 3-11. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00147-7).
- Kikuchi K, Furuta T and Honda H. 1994. Utilization of feather meal as a protein source in the diet of juvenile Japanese flounder. *Fish Sci* 60, 203-206. <http://doi.org/10.2331/fish-sci.60.203>.
- Kim HS, Jung WG, Myung SH, Cho SH and Kim DS. 2014. Substitution effects of fishmeal with tuna byproduct meal in the diet on growth, body composition, plasma chemistry and amino acid profiles of juvenile olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture* 431, 92-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.03.025>.
- Kim SK, Takeuchi T, Yokoyama M, Murata Y, Kaneniwa M and Sakakura Y. 2005. Effect of dietary taurine levels on growth and feeding behavior of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture* 250, 765-774. <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.073>.
- Kim YC, Yoo GY, Wang X, Lee SH, Shin IS and Bai SC. 2008. Long term feeding effects of dietary dehulled soybean meal as a fish meal replacer in growing olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Asian-Australas J Anim Sci* 21, 868-872. <https://doi.org/10.5713/ajas.2008.70496>.
- Kim YJ, Shin JH, Kwon HW, Lee SY, Kim JM, Kim MG, Kim JD and Lee KJ. 2018. Evaluation of a Hydrolyzed Pig Bristle Meal as a Partial Fish meal Replacer in Diets for Juvenile Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*. *Korean Fish Aquatic Sci* 51, 148-156. <http://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0148>.
- Kim YS, Kim BS, Moon TS and Lee SM. 2000. Utilization of defatted soybean meal as a substitute for fish meal in the diet of juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Korean Fish Aquatic Sci*, 33, 469-474.
- Kissil GW and Lupatsch I. 2004. Successful replacement of fishmeal by plant proteins in diets for the gilthead seabream, *Sparus aurata* L. *Israeli J Aquacult* 56, 188-199. <http://hdl.handle.net/19114>.
- Kissinger KR, García-Ortega A and Trushenski JT. 2016. Partial fish meal replacement by soy protein concentrate, squid and algal meals in low fish-oil diets containing *Schizochytrium limacinum* for longfin yellowtail *Seriola rivoliana*. *Aquaculture* 452, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.10.022>.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2017a. Survey on the status of fish culture. Retrieved from <http://kosis.kr/publication/publicationThema.do?pubcode=JL> on Jan 7, 2019.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2017b. Expenditure per aquaculture. Retrieved from [http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=307&tblId=TX\\_30702\\_A018&conn\\_path=I2](http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=307&tblId=TX_30702_A018&conn_path=I2) on Jan 7, 2019.
- Krogdahl A, Penn M, Thorsen J, Resfistie S and Bakke AM. 2010. Important antinutrients in plant feedstuffs for aquaculture: an update on recent findings regarding responses in salmonids. *Aquac Nutr* 41, 333-344. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02426.x>.
- Lee HY, Choi SM and Ji HS. 2012. Effect of Partial Replacement of fish meal by new squid *Sepia esculenta* liver powders on the growth and body composition of juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Korean Fish Aquatic Sci* 45, 132-138. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0132>.
- Lee SM, Jeon IG, Lee JY, Park SR, Kang YJ and Jeong KS.



1996. Substitution of plant and animal proteins for fish meal in the growing Korean rockfish (*Sebastes schlegeli*) Feeds. Korean Fish Aquatic Sci 29, 651-662.
- Lim SJ, Oh DH, Khosravi S, Cha JH, Park SH, Kim KW and Lee KJ. 2013. Taurine is an essential nutrient for juvenile parrot fish *Oplegnathus fasciatus*. Aquaculture 414, 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.08.013>.
- Lunger AN, McLean E, Gaylord TG, Kuhn D and Craig SR. 2007. Taurine supplementation to alternative dietary proteins used in fish meal replacement enhances growth of juvenile coho (*Rachycentron canadum*). Aquaculture 271, 401-410. <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.07.006>.
- Martinez JB, Chatzifotis S, Divanach P and Takeuchi T. 2004. Effect of dietary taurine supplementation on growth performance and feed selection of sea bass *Dicentrarchus labrax* fry fed with demand feeders. Fish sci 70, 74-79. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2003.00773.x>.
- Martínez-Llorens S, Baeza-Ariño R, Nogales-Mérida S, Jover-Cerdá M and Tomás-Vidal A. 2012. Carob seed germ meal as a partial substitute in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) diets: Amino acid retention, digestibility, gut and liver histology. Aquaculture 338, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.01.029>.
- Matsunari H, Furuita H, Yamamoto T, Kim SK, Sakakura Y and Takeuchi T. 2008. Effect of dietary taurine and cysteine on growth performance of juvenile red sea bream *Pagrus major*. Aquaculture 274, 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.002>.
- McGoogan BB and Reigh RC. 1996. Apparent digestibility of selected ingredients in red drum (*Sciaenops ocellatus*) diets. Aquaculture 141, 233-244. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01217-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01217-6).
- NRC (National Research Council). 2011. Nutrient requirements of fish and shrimp. The National Academy Press, Washington DC, U.S.A.
- Øverland M, Sørensen M, Storebakken T, Penn M, Krogdahl Å and Skrede A. 2009. Pea protein concentrate substituting fish meal or soybean meal in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)-Effect on growth performance, nutrient digestibility, carcass composition, gut health, and physical feed quality. Aquaculture 288, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.12.012>.
- Park GS, Takeuchi T, Seikai T and Yokoyama M. 2001. The effects of dietary taurine on growth and taurine levels in whole body of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. Nippon Suisan Gakkaishi 67, 238-243. <http://doi.org/10.2331/suisan.67.238>.
- Park GS, Takeuchi T, Yokoyama M and Seikai T. 2002. Optimal dietary taurine level for growth juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. Fish Sci 68, 824-829.
- Pham MA, Lee KJ, Lim SJ and Park KH. 2007. Evaluation of cottonseed and soybean meal as partial replacement for fish-meal in diets for juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. Fish Sci 73, 760-769. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-2906.2007.01394.x>.
- Salze G, McLean E and Craig SR. 2012. Dietary taurine enhances growth and digestive enzyme activities in larval coho. Aquaculture 362-363, 44-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.07.021>.
- Scerra M, Foti F, Caparra P, Cilione C, Lutra B, Lamanna P and Chies L. 2016. Influence of partial substitution of dietary marine origin feed stuffs by a mixture of extruded pea seed meal and animal origin feedstuffs on fatty acid composition of fillet in sea bass (*Dicentrarchus labrax*). Ital J Anim Sci 15, 696-700. <http://dx.doi.org/10.1080/1828051X.2016.1229586>.
- Schneider O, Amirkolaie AK, Vera-Cartas J, Eding EH, Schrama JW and Verreth JAJ. 2004. Digestibility, faeces recovery, and related carbon, nitrogen and phosphorus balances of five feed ingredients evaluated as fishmeal alternatives in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. Aquacult Res 35, 1370-1379. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01179.x>.
- Shin SH and Kim JD. 2002. Growth and feed utilization of growing olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) fed extruded pellet (EP), moist pellet (MP) and single moist pellet (SMP) (Laboratory scale experiment using FRP tank). Ann Anim Resour Sci 13, 112-122.
- Son MH. 2006. Standard manual of olive flounder culture. National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), Busan, Korea.
- Storebakken T, Shearer Kd, Baeverfjord G, Nielsen BG, Åsgård T, Scott T and De Laporte A. 2000. Digestibility of macronutrients, energy and amino acids, absorption of elements and absence of intestinal enteritis in Atlantic salmon, *Salmo salar*, fed diets with wheat gluten. Aquaculture 184, 115-132. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)0031-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)0031-6).
- Sugiura SH, Dong FM, Rathbon CK and Hardy RW. 1997. Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. Aquaculture 159, 177-202. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00177-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00177-4).
- Sullivan JA and Reigh RC. 1995. Apparent digestibility of selected feedstuffs in diets for hybrid striped bass (*Morone saxatilis* ♀ X *Morone chrysops* ♂). Aquaculture 138, 313-322. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01071-8](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01071-8).
- Tacon AGJ and Metian M, 2008. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. Aquaculture 285, 146-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015>.
- Tibbetts SM, Milley JE and Lall SP. 2006. Apparent protein and energy digestibility of common and alternative feed ingredients by Atlantic cod, *Gadus morhua* (Linnaeus, 1758). Aquaculture 261, 1314-1327. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.08.052>.
- Torrecillas S, Mompel D, Caballero MJ, Montero D, Merri-

- field D, Rodiles A, Robaina L, Zamorano MJ, Karalazos V, Kaushik S and Izquierdo M. 2017. Effect of fishmeal and fish oil replacement by vegetable meals and oils on gut health of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture* 468, 386-398.
- Tusche K, Arning S, Wuertz S, Susenbeth A and Schulz C. 2012. Wheat gluten and potato protein concentrate Promising protein sources for organic farming of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 344, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.03.009>.
- Ye J, Liu X, Wang Z and Wang K. 2011. Effect of partial fish meal replacement by soybean meal on the growth performance and biochemical indices of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Aquacult Int* 19, 143-153. <https://doi.org/10.1007/s10499-010-9348-1>.
- Yigit M, Erdem M, Koshio S, Ergün S, Türker A and Karaali B. 2006. Substituting fish meal with poultry by-product meal in diets for black Sea turbot *Psetta Maeotica*. *Aquacult Nut* 12, 340-347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2006.00409.x>.
- Zhang C, Rahimnejad S, Wang YR, Lu K, Song K, Wang L and Mai K. 2018. Substituting fish meal with soybean meal in diets for Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*): Effects on growth, digestive enzymes activity, gut histology, and expression of gut inflammatory and transporter genes. *Aquaculture* 483, 173-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.10.029>.