

육상어류양식장 고품오물을 공급한 해삼(*Apostichopus japonicus*)의 성장과 에너지 수치

Feng Jin · 정우철 · 최종국 · Anisuzzaman Md · 김경덕¹ · 최병대 · 강석중*

경상대학교 해양식품생명의학과, ¹국립수산과학원 사료연구센터

Effect of Fish Farm Fecal Solid Diets on the Growth and Energy Budget of Juvenile Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*

Feng Jin, U-Cheol Jeong, Jong- Kuk Choi, Anisuzzaman Md, Kyoung-Duck Kim¹,
Byeong-Dae Choi and Seok-Joong Kang*

Department of Seafood and Aquaculture Science, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea
¹Aquafeed Research Center, National Institute of Fisheries Science, Pohang 37517, Korea

We conducted a 90-day feeding experiment to evaluate the growth and energy budget of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Sea cucumbers with a mean initial wet body weight of 3.03 ± 0.06 g were fed one of the following three diets: an eel fecal solid diet, rainbow trout fecal solid diet, or a commercial diet at a water temperature of $17 \pm 1^\circ\text{C}$ and salinity of 32 ± 1 psu. The results suggested that the diets affected the final body weight, specific growth rate (SGR), food ingestion, feces production ratio, and hence the growth and energy budget of the sea cucumbers. Sea cucumbers fed the eel and rainbow trout fecal solid diets showed poorer energy absorption, assimilation, and growth than those fed the commercial diet. The sea cucumbers fed the commercial diet had a significantly higher SGR and proportion of energy used for growth than those fed the other two diets. Sea cucumbers fed the rainbow trout fecal solid diet showed a comparatively higher ingestion rate and feces production ratio than those fed the commercial diet. The eel and rainbow trout fecal solid diets, therefore, were not suitable for sea cucumbers in intensive cultivation. Our findings will facilitate further development of more appropriate diets for culture of sea cucumber.

Key words: Fecal solids, Sea cucumber, Energy budget, *Apostichopus japonicus*, Recirculating aquaculture system

서 론

해삼(*Apostichopus japonicus*)은 바다의 인삼으로 불리며 기 능성 극피동물로서 우리나라를 비롯한 중국과 일본 등 동양권 에서 큰 시장을 형성하고 있는 양식생물이다(Park et al., 2015). 해양수산부에서는 수출 10대 전략 품종의 하나로 선정하였으 며, 일부 광역자치단체에서도 미래양식 전략 대상으로 선정 하고 대량생산을 위한 투자 계획을 밝히고 있다(Kang et al., 2012).

해삼의 식성은 퇴적물식자(Deposit feeder)로 알려져 있으 며 사니질 속에 함유되어 있는 동식물 쇠설을 포함한 유기물 질과 무기입자를 먹이로 섭식한다(Moriarty, 1982; Ramofafia

et al., 1997; Roberts et al., 2000; Michio et al., 2003; Kang et al., 2012). 또한 해삼은 가리비(*Chlamys farreri*, *Argopecten irradians*, *Patinopecten yessoensis*), 굴(*Carssostrea gigas*), 홍합(*Perna canaliculus*)의 배설물을 섭이하여 정상적인 성장을 한다는 연구가 발표되었다(Ahlgren, 1998; Yuan et al., 2006; Paltzat et al., 2008; Zamora and Jeffs, 2011; Slater et al., 2009). 이러한 해삼의 식성을 활용하여 다영양입체양식(Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA)의 여과생물로서 이 용되고 있다(Kang et al., 2003; Zamora and Jeffs, 2011; Nel-son et al., 2012; Hannah et al., 2013). IMTA에서 배출된 저층 배설물로 상품크기까지 성장시키고 있다(Yokoyama, 2013; Yu et al., 2014). 나아가 해삼의 이러한 퇴적물식자의 식성을 이용

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0168>



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 49(2) 168-175, April 2016

Received 24 March 2016; Revised 11 April 2016; Accepted 12 April 2016

*Corresponding author: Tel: +82. 55. 772. 9154 Fax: +82. 55. 648. 3089

E-mail address: sjkang@gnu.ac.kr

하여 육상어류양식장의 고행오물을 처리하려는 시도가 행해지고 있다. Jeong et al. (2016)의 연구결과에 의하면 육상고형오물의 이화학적 성질로서 사료 내 잔류 중금속과 항생물질의 안정성을 밝혔으며, 이를 해삼에게 공급했을 때 이들을 효율적으로 이용할 수 있는 소화흡수율을 밝히고 있다. 고행오물을 사료 자원으로 활용하기 위한 발효방법을 제시하기도 하였다(Kang et al., 2004). 따라서 본 연구는 육상양식장에서 배출된 고행오물을 해삼에게 공급했을 때 해삼의 성장과 에너지 수치 차원에서 이용가능성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

실험해삼

실험에 사용한 해삼(*Apostichopus japonicus*)은 경남 통영시 산양면에 위치하고 있는 해삼종묘 생산업체에서 분양 받아 경상대학교 어류양식 및 사료 실험실의 배양장으로 운반하여 1,000 L 수조에 수용하였다. 이 때의 실험환경은 수온 17±1℃, 염분 32±1 psu, 용존산소 5.0-7.2 mg/L에서 인공배합사료를 공급하면서 5주간 예비사육을 하였다.

실험사료의 제조

실험에 사용한 실험구 사료는 뱀장어(*Anguila japonica*) 양어장에서 배출된 고행오물과 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*) 양어장에서 배출된 고행오물로 하였으며, 대조구 사료는 중국에서 수입한 해삼사료와 갯벌 1:1로 혼합하여 사용하였다. 이 혼합 비율은 해삼양식장에서 일반적으로 널리 사용하고 있는 비율을 기준으로 하였다. 고행오물의 채취는 충청북도 충주시 금가면 오석리에 소재하고 있는 뱀장어 양어장과 인근의 무지개송어 양어장의 배설물 침전조에 축적된 고행오물을 각각 채취하여 실험실로 운반하였다. 실험사료의 제조는 채집한 고행오물을 건조기(KDNavien ODS-2511F, Korea)에서 65℃로 건조시키고 건조물은 불밀(Seojin SJB-250A, Korea)을 이용하여 45 µm 밀 때까지 충분히 분쇄시켰다. 이 분쇄된 고행오물 입자에 Cr₂O₃ 0.5%와 Cellulose sodium alginate 0.5%를 완전하게 섞어 반죽한 후, 펠렛제조기(Dongwen EP-C220, Korea)로 펠렛 형태로 압출성형 하였다. 성형된 고행오물을 65℃에서 건조시킨 후, 다시 분쇄시켜 표준체(200SMP, 150 Endecotts, UK)

로 입자크기가 90-120 µm인 크럼블 사료를 만들어 실험사료로 하였다. 대조구의 상용사료도 실험사료와 동일한 제조공정을 거쳤다. 실험사료의 일반성분은 Table 1에 나타난 바와 같다.

실험디자인

예비사육을 거친 해삼을 24시간 절식시킨 후 평균 체중 3.03±0.06 g인 개체를 90 마리 선별하여 9 개의 직사각형 아크릴수조(45×60×50 cm, 수량 80 L)에 각각 10 마리씩 무작위로 분배하여 3 개의 실험구를 설정하였다. 각 실험구마다 각각 다른 실험사료를 공급하여 총 3개 실험구를 3회 반복으로 실험을 수행하였다.

사육관리

실험기간 동안 pH 7.8-8.2, 광주기는 12L:12D으로 하였다. 사육수의 순환율은 5회전/일였다. 사료 공급량은 해삼 체중의 5%를 1회/일로 오후 5시에 공급하였으며 전체 사육실험 기간은 90일이었다.

시료 채취와 계산

해삼의 초기체중은 실험개시와 동시에 10마리를 채집하여 65℃에서 건조시킨 후 생체중량과 건조중량을 측정하여 초기 샘플로 하였다. 변과 잔여사료의 시료 채취는 사료를 공급하기 전에 사이펀을 이용하여 수조 바닥에 있는 잔여사료와 변을 채집하였으며, 이를 증류수로 세척하여 65℃에서 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 해삼의 최종체중은 사육실험이 종료되었을 때, 실험해삼을 48시간 절식시킨 후 초기샘플과 동일한 방법으로 체중을 측정하였다. 사료와 배설물 그리고 실험생물의 에너지 함량은 열량분석기(Bomb Calorimeter, parr-6200, USA)로 측정하였으며, 질소함량은 원소분석기(Vario EL III, Elementar, Dortmund, Germany)로 분석하였다.

일반성분은 AOAC (1995)방법에 따라서 조단백질은 Kjeldahl법으로 분석하였으며, 조지방은 Bligh and Dyer (1959)방법에 준하여 Chloroform과 Methanol을 2:1 비율로 혼합한 용액으로 추출하였다. 수분은 상압가열 건조법으로 105℃의 건조기(Dongwon, dry oven, Korea)에서 6시간 동안 건조 후 측정하였으며, 조회분은 직접회화법으로 600℃ 회화로에서 4시간 동안 태운 후 정량하였다. 탄수화물 함량은 시료의 수분, 단백질, 지질 및 회분의 함량을 뺀 값으로 하였다.

Table 1. Proximate composition experimental diets

Treatments	Ingredient (%)				
	Dry matter	Protein	Crude lipid	Ash	Carbohydrate
EF	98.92±0.02 ^a	10.01±0.86 ^a	1.14±0.02 ^a	85.8±0.32 ^c	3.05±0.06 ^a
RF	98.68±0.18 ^a	20.50±0.86 ^a	3.29±0.10 ^b	70.9±0.42 ^b	5.31±0.08 ^a
CF	98.71±0.53 ^a	10.79±0.42 ^a	1.71±0.02 ^a	50.1±0.46 ^a	37.40±0.47 ^b

Data (mean±SE) were calculated on a dry matter basis. Data with different letters in the same column means significant difference among different diet treatments (P<0.05). EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud.

일일성장율(Specific growth rate, SGR), 사료섭식율(Ingestion rate, IR), 변배설율(Feces production rate, FPR), 결보기 소화흡수율(Apparent digestibility, AD)의 계산식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{SGR (\%/day)} &= 100 (\ln W_2 - \ln W_1) / T \\ \text{IR (mg/g/day)} &= C / [T \times (W_2 + W_1) / 2] \\ \text{FPR (mg/g/day)} &= F / [T \times (W_2 + W_1) / 2] \\ \text{AD (\%)} &= 100 - 100 \times \text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ in diet} / \text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ in feces} \end{aligned}$$

W_1 과 W_2 는 실험전과 후 각 수조에 있는 해삼의 건조중량; T 는 사육기간; C 는 섭취한 사료의 건조중량 그리고 F 는 배설된 변의 건조중량이다.

에너지 수지의 계산식은 다음과 같다(Liu et al., 2009).

$$C = G + F + U + R$$

암모니아로 배설된 에너지 U 는 Wang et al. (2003)에 의한 공식으로 다음과 같이 계산하였다.

$$U = (C_N - G_N - F_N) \times 24,830$$

C 섭취한 사료의 에너지, G 성장에 축적된 에너지, F 변으로 배출된 에너지 U 암모니아로 배설된 에너지이다.

C_N 은 섭취한 사료의 질소함량, G_N 은 실험생물에 축적된 질소함량, F_N 은 배설물의 질소함량이고, 24,830은 배설된 암모니아의 에너지함량이다.

Cr_2O_3 함량은 Furukawa (1966) 방법에 따랐으며, 광학식 플레이트에 150 μL 씩 넣어 UV-Vis spectrometer을 이용하여 350 nm에서 3 반복으로 분석하였다. 분석 후 결과 값과 $Y = 0.2089X + 0.0032$ (Y = 흡광도, $X = \text{Cr}_2\text{O}_3$ mg/100 mL)공식을 이용해 Cr_2O_3 값을 구하였다.

통계처리

모든 자료의 통계처리는 SPSS 19.0로 분산분석(ANOVA test)을 실시하였고 Duncan's multiple rang test (Duncan, 1955)로 평균간의 유의성($P < 0.05$)을 검정하였다.

결 과

성장

전 실험기간을 통하여 얻어진 성장 결과는 Table 2와 같다. 뱀

장어 고행오물을 공급한 실험구는 초기 3.04 g에서 6.65 g으로 성장하였으며, 무지개송어 고행오물을 공급한 실험구는 초기 3.03 g에서 6.85 g으로 성장하였다. 이때 상품사료구는 초기 3.05 g에서 11.14 g으로 성장하였다. 두 종류의 고행오물사료 실험구간의 성장 차이는 없었으나($P < 0.05$), 상품사료구와는 큰 차이를 나타냈다. 일일성장율(SGR)은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 대조구인 상품사료가 1.44%/d로서 가장 높게 나타났다. 뱀장어 고행오물구와 무지개송어 고행오물구는 각각 0.86%/d과 0.90%/d으로서 유의적 차이($P < 0.05$)는 없었다. 전 실험구간을 통하여 폐사체는 없었다.

사료섭식율 및 변배설율

사료섭식율(IR)은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 뱀장어 고행오물 실험구, 무지개송어 고행오물 실험구 및 대조구인 상품사료는 각각 0.27 g/g/d, 0.16 g/g/d 및 0.26 g/g/d로 나타났다. 두 종류의 실험구인 뱀장어 고행오물구는 무지개송어 고행오물구에 비하여 높은 사료 섭식율을 나타냈고($P < 0.05$), 상품사료구와는 유의적인 차이가 없었다($P < 0.05$). 변배설율(FPR)은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 뱀장어 고행오물 실험구, 무지개송어 고행오

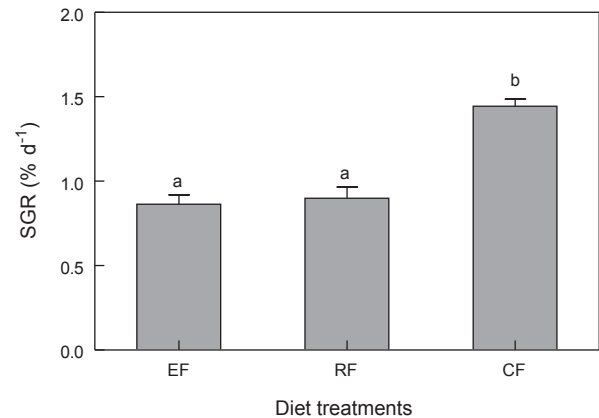


Fig. 1. Specific growth rate (SGR) of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* fed different test diets. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between treatments and bars represent standard errors. EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud.

Table 2. Initial and final weight of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* in different treatments

Treatments	Wet weight (g)		Dry weight (g)	
	Initial	Final	Initial	Final
EF	3.04±0.02 ^a	6.65±0.32 ^a	0.23±0.01 ^a	0.50±0.03 ^a
RF	3.03±0.01 ^a	6.85±0.42 ^a	0.23±0.00 ^a	0.51±0.32 ^a
CF	3.05±0.02 ^a	11.14±0.46 ^b	0.23±0.00 ^a	0.84±0.36 ^b

Data (mean ± SE) with different letters in the same column means significant difference among different diet treatments ($P < 0.05$). EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud.

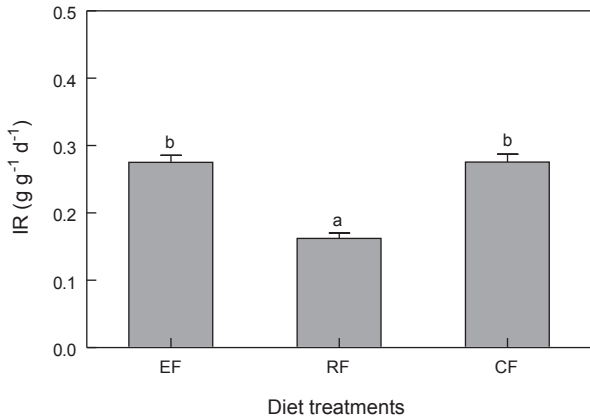


Fig 2. Ingestion rates (IR) of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* fed different test diets. Different letters indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments and bars represent standard errors. EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud.

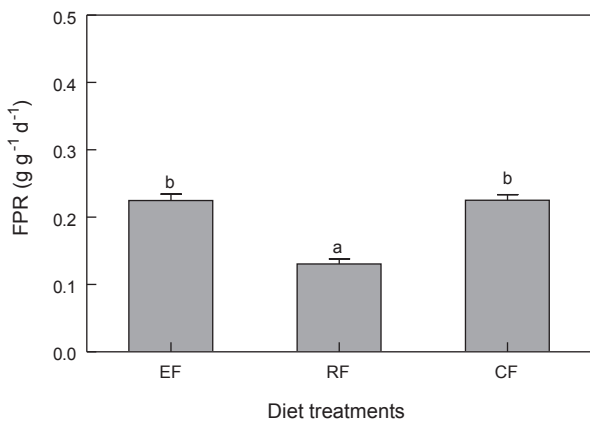


Fig. 3. Feces production rates (FPR) of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* fed different test diets. Different letters indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments and bars represent standard errors. EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud.

물 실험구 및 대조구인 상품사료는 각각 0.23 g/g/d, 0.13 g/g/d 및 0.23 g/g/d로 나타났다. 실험구인 뱀장어 고행오물구는 무지개송어 고행오물구에 비하여 높은 사료 변배설율을 나타냈고($P<0.05$), 상품사료구와는 유의적인 차이가 없었다($P<0.05$).

겉보기소화율

겉보기소화흡율(AD)은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 뱀장어 고행오물 실험구, 무지개송어 고행오물 실험구 및 대조구인 상품사료는 각각 15.57%, 15.31% 및 17.25%로 나타났다. 두 종류의 고행오물사료 실험구간의 차이는 없었으나($P<0.05$), 상품사료구와는 큰 차이를 나타냈다.

에너지수지

전 사육기간을 통한 에너지수지는 Table 3에 나타난 바와 같다. 섭취에너지(C)는 뱀장어 고행오물구, 무지개송어 고행오물구 및 상품사료구에서는 각각 1.22 KJ/g/g, 1.52 KJ/g/g 및 1.24 KJ/g/g으로 나타났다. 실험구인 뱀장어 고행오물구는 무

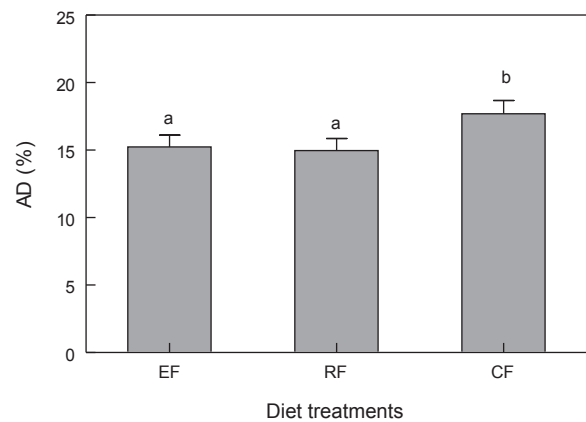


Fig. 4. Apparent digestibility (AD) of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* fed different test diets. Different letters indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments and bars represent standard errors. EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud.

Table 3. Energy budget of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* fed the test diets (mean ± SE)

Treatments	Energy parameters				
	C (KJ/g/d)	G (%)	F (%)	U (%)	R (%)
EF	1.22±0.04 ^a	9.05±0.24 ^b	53.31±1.03 ^b	3.14±0.07 ^b	34.50±0.06 ^b
RF	1.52±0.07 ^b	5.57±0.13 ^a	60.30±0.92 ^c	2.78±0.06 ^b	31.35±0.17 ^a
CF	1.24±0.05 ^a	9.33±0.16 ^b	45.53±0.47 ^a	1.13±0.08 ^a	39.95±0.43 ^c

Data with different letters in the same column means significant difference among different diet treatments ($P<0.05$). EF, Eels' fecal solids; RF, Rainbow trout's fecal solids; CF, Commercial feed with sea mud. C: Ingested; G: energy deposited as growth; F: energy lost in feces; U: energy lost in excretion; R: energy lost in respiration.

지개송어 고행오물구에 비하여 유의한 차이로 낮게 나타났으나($P<0.05$), 대조구인 상품사료와는 유의차가 없었다($P<0.05$).

성장 에너지(G)는 뱀장어 고행오물구, 무지개송어 고행오물구 및 상품사료구에서는 각각 섭취에너지(C)의 9.05%, 5.57% 및 9.33%로 나타나 모든 실험구에서 유의차를 나타냈다($P<0.05$). 뱀장어 고행오물구는 무지개송어 고행오물구에 비하여 높게 나타났으나($P<0.05$), 대조구인 상품사료보다는 낮으며($P<0.05$), 무지개송어 고행오물구는 대조구인 상품사료구보다 낮게 나타났었다($P<0.05$).

변으로 배출된 에너지(F)는 뱀장어 고행오물구, 무지개송어 고행오물구 및 상품사료구에서는 각각 섭취에너지(C)의 53.31%, 60.30% 및 45.53%로 나타나 모든 실험구에서 유의차를 나타냈다($P<0.05$). 뱀장어 고행오물구는 무지개송어 고행오물구에 비하여 낮게 나타났으나($P<0.05$), 대조구인 상품사료보다는 높게 나타났으며($P<0.05$), 무지개송어 고행오물구는 대조구인 상품사료구보다 높게 나타났었다($P<0.05$). 암모니아로 배출된 에너지(U)는 뱀장어 고행오물구, 무지개송어 고행오물구 및 상품사료구에서는 각각 섭취에너지(C)의 3.14%, 2.78%, 및 1.13%로 나타났다. 실험구인 뱀장어 고행오물구는 무지개송어 고행오물구에 비하여 유의적 차이가 없었으나($P<0.05$), 대조구인 상품사료보다 높게 나타났었다($P<0.05$).

대사에너지(R)는 뱀장어 고행오물구, 무지개송어 고행오물구 및 상품사료구에서는 각각 섭취에너지(C)의 34.50%, 31.35%, 및 39.95%로 나타나 모든 실험구에서 유의차를 나타냈다($P<0.05$). 뱀장어 고행오물구는 무지개송어 고행오물구에 비하여 높게 나타났으나($P<0.05$), 대조구인 상품사료보다는 낮으며($P<0.05$), 무지개송어 고행오물구는 대조구인 상품사료구보다 낮게 나타났었다($P<0.05$).

고 찰

육상양식장에서 배출된 두 종류의 고행오물을 단독으로 해삼에게 공급했을 때 90 일간의 사육 기간을 통하여 평균 체중 3 g 크기의 해삼이 6 g 크기로 성장하여 성장배수 2를 나타내어 육상고행오물을 단독 공급만으로도 폐사하는 개체가 없이 정상적으로 성장함을 알 수 있었다. 그러나 그 성장의 정도는 대조구인 상품사료를 공급한 체중 11 g에 비하여 낮은 약 60% 수준을 나타냈다. 성장 부진의 원인으로 여러 가지 요인을 생각할 수 있다. 먼저 영양소 측면에서 고찰해 보면 뱀장어 고행오물구와 상품사료구는 단백질 함량이 동일한 10% 였는데도 불구하고 성장 및 일일성장율(Fig. 1)에서 많은 차이를 나타내고 있다. 심지어 무지개송어 고행오물구는 단백질 함량이 두 배나 높은 20% 수준을 함유하고 있는데도 불구하고 상품구에 비하여 성장이 저조하였다. 이는 해삼과 같은 퇴적물식자인 양식생물의 경우에는 사료 가치의 판단 기준으로 단백질 외의 요인에 대해서도 검토하는 것이 중요하다. 첫째, 탄수화물 조성을 보면 뱀장어 고행오물구와 무지개송어 고행오물구의 탄수화물 함량은 각

각 3.0%와 5.3%로서 상품사료구의 37.4%에 비하여 현저히 부족하다. 해삼은 어류와는 달리 사료원으로서 대형해조류 분말을 다량으로 사용해야 함에도 불구하고(Yingst, 1976; Hamel and Mercier, 1998; Zhou et al., 2006; Liu et al., 2010; Slater et al., 2011; Xia et al., 2012; Wu et al., 2015), 단백질 위주의 양어사료에서 유래하는 고행오물에는 탄수화물 부족현상이 이러한 결과를 초래한 것으로 사료된다. 둘째, 회분의 조성을 보면 뱀장어 고행오물구와 무지개송어 고행오물구는 각각 85.8%와 70.9%로서 상품사료구 50%에 비하여 회분함량이 너무 높다. 퇴적물식자인 해삼의 사료원으로 갯벌의 중요성에 대하여 많은 연구가 되어 있다(Liu et al., 2009; Moore et al., 1995; Xu, 1999; Dar and Ahmad, 2006; Shi et al., 2015). 그러나 뱀장어 고행오물구와 무지개송어 고행오물구의 과다한 회분함량이 해삼의 성장 부진과 관련 있는 것으로 사료된다. 셋째로, 단백질 측면에서 보면 사료단백질은 해삼의 성장에 중요한 영향을 미치는 영양소로 알려져 있다(Wang et al., 2007; Liu et al., 2009; Seo and Lee, 2011; Bao et al., 2014; Shi et al., 2013). 두 종류의 고행오물은 단백질 함량 10%와 20%인데 반하여 상품사료는 10% 수준이다. 이는 단백질함량 20%인 해삼사료와 갯벌을 1:1로 혼합하였기 때문에 절반 수준인 10%였다. 이러한 낮은 단백질 수준이었으나, 일일성장율 1.44%로서 높은 성장율을 나타냈다. 단백질 수준과 성장관계를 보면 기존의 연구(Seo and Lee, 2011; Zhu et al., 2005)는 최적단백질 수준을 18-24%를 제시하였으나, 그 뒤 연구(Bai et al., 2016)에서는 11% 수준으로 제시하고 있다. 본 연구에서 10% 수준에서 정상적으로 성장한 점에서는 이와 유사한 결과를 나타냈다.

다른 양식생물의 고행오물을 이용한 연구로서 Yuan et al. (2006)은 이매패류 굴(*Crassostrea gigas*)과 가리비(*Chlamys farreri*)의 분을 건조하여 해삼의 사료로 시도한 결과 마이너스 성장을 나타냈는데 그 이유는 65°C에서 36 시간의 건조과정에서 습상태의 이매패류 변이 갖고 있는 유용성분인 박테리아, 비타민, 지방산의 파괴로 그 원인을 제시하고 있으나, 본 연구에서도 동일한 방법으로 건조과정을 거쳤음에도 불구하고 일일 성장율이 뱀장어 고행오물구와 무지개송어 고행오물구에서는 각각 0.86%와 0.90%를 나타내어 다른 결과를 나타냈다. Shi et al. (2015)의 연구에 의하면 사료에 첨가되는 갯벌의 입자크기가 해삼의 성장에 중요한 역할을 한다고 하였으며, 미세한 입자일수록 빠른 성장이 빠르다고 하였다. Yuan et al. (2006)은 180-200 μm 크기의 큰 입자를 실험에 적용하였지만, 본 연구에서는 45-50 μm 의 미세입자로 구성되었기 때문에 이러한 차이를 나타낸 것으로 사료된다.

해삼의 섭취율은 단백질 수준 혹은 에너지 함량 또는 펄의 입자 크기가 다름에 따라 달라지고(Shi et al., 2013), 먹이가 풍부한 계절에 식욕조절을 통하여 섭취율을 감소시킨다(Hudson et al., 2004)고 하였다. 본 실험에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 사료섭식율(IR)은 단백질 함량이 높은 실험구(Table 1)와는 역

관계를 나타냈다. 이러한 결과는 McBride et al. (1998) (Del et al., 2004; Yuan et al., 2006; Shi et al., 2013; Bai et al., 2016)의 연구와 유사한 경향을 나타냈다.

겉보기소화율(AD)는 15-20%수준으로 나타났다. 이는 섭취한 사료의 80-85%는 변으로 배출되어 버리고 어류소화율이 90%수준인 점(Barrows et al., 2007)을 감안하면 월등히 낮은 수준이다. 이는 Xia et al. (2012)의 연구와도 동일한 수준이다. 이러한 현상은 해삼의 식성이 퇴적물식자에 기인된 것으로 사료된다. 에너지수치는 양식생물이 사료를 섭취한 후 성장과 배출의 관계를 종합적으로 설명할 수가 있어서 양식생물의 소화생리를 이해하는데 있어 대단히 유용하다(Kaushik and Teles, 1985). 해삼류가 단백질 유래의 에너지를 효율적으로 이용하지 못하고 탄수화물로부터 유래하는 에너지를 효율적으로 이용하는 생리적 특성을 가지고 있다(Slater et al., 2011, Xia et al., 2015). 따라서 뱀장어 고행오물구에서는 탄수화물의 비율이 단지 3%에 불과하기 때문에 사료 탄수화물로부터 유래하는 에너지를 얻을 수 없었기 때문인 것으로 사료된다. 무지개송어 고행오물구는 실험구 중에서 가장 많은 에너지 섭취하였으나, 성장에너지로는 가장 저조한 5.57%만을 성장에 기여하고 나머지 63.08%를 변과 암모니아로 배출하였다. 그러나 대조구 상품 사료는 섭취한 에너지를 성장에 13.21% 축적하고 변과 암모니아로의 배출은 46.84%였다. 고행오물의 특성상 어류가 잘 소화시키지 못하고 남은 불소화물로 구성되어 있기 때문에(Reid et al., 2010; Orr et al., 2014) 이러한 차이를 나타내낼 뿐만 아니라 해삼은 저작기관이 없고 장내소화효소도 활성이 낮으며 소화과정은 미생물의 작용에 크게 의존하므로(Zhang et al., 2010; Zhao et al., 2012; Wang et al., 2015) 이러한 요인들이 복합적으로 연관되어서 일어난 현상으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2015년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (수산실용화기술개발사업의 육상순환양식시스템에서 배출된 고행오물의 해삼사료자원화)

References

- Ahlgren MO. 1998. Consumption and assimilation of salmon net pen fouling debris by the red sea cucumber *Parastichopus californicus*: implications for polyculture. *J World Aquacult Soc* 29, 133-139.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1995 Official Methods of Analysis, vol. 4(16th ed.) Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, U.S.A., 1-45.
- Bai Y, Zhang L, Xia S, Liu S, Ru X, Xu Q, Zhang T and Yang H. 2016. Effects of dietary protein levels on the growth, energy budget, and physiological and immunological performance of green, white and purple color morphs of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. *Aquaculture* 450, 375-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.08.021>.
- Bao J, Jiang H, Tian X and Dong S. 2014. Growth and energy budgets of green and red type sea cucumbers *Apostichopus japonicus* (Selenka) under different light colors. *Aquaculture* 418, 139-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.10.015>.
- Barrows F, Gaylord T, Stone D and Smith C. 2007. Effect of protein source and nutrient density on growth efficiency, histology and plasma amino acid concentration of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *Aquacult Res* 38, 1747-1758.
- Bligh EG and Dyer WJ. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Physiol* 37, 911-917.
- Dar MA and Ahmad HO. 2006. The feeding selectivity and ecological role of shallow water holothurians in the Red Sea. *SPC Beche-de-mer Information Bull* 24, 11-21.
- Del MOV, Kelly MS and Burnell G. 2004. How diet influences energy partitioning in the regular echinoid *Psammechinus miliaris*; constructing an energy budget. *J Exp Mar Biol Ecol* 304, 159-181.
- Duncan DB. 1955. Multiple range and multiple F tests. *Biometrics* 11, 1-42.
- Furukawa A. 1966. On the acid digestion method for the determination of chromic oxide as an index substance in the study of digestibility of fish feed. *Nippon Suisan Gakkaishi* 32, 502-506.
- Hamel J and Mercier A. 1998. Diet and feeding behaviour of the sea cucumber *Cucumaria frondosa* in the St. Lawrence estuary, eastern Canada. *Can J Zool* 76, 1194-1198.
- Hannah L, Pearce CM and Cross SF. 2013. Growth and survival of California sea cucumbers (*Parastichopus californicus*) cultivated with sablefish (*Anoplopoma fimbria*) at an integrated multi-trophic aquaculture site. *Aquaculture* 406-407, 34-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.04.022>.
- Hudson IR, Wigham BD and Tyler PA. 2004. The feeding behaviour of a deep-sea holothurian, *Stichopus tremulus* (Gunnerus) based on in situ observations and experiments using remotely operated vehicle. *J Exp Mar Biol Ecol* 301, 75-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.02.004>.
- Kang JC, Jee JH, Song SY, Moon SW, Kang JW, Lee YD and Kim SJ. 2004. Effects of oral administration with fermented product from sewage in land-based seawater fish farm on haematological factors of olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *J Fish Pathol* 17, 57-66.
- Kang KH, Kwon JY and Kim YM. 2003. A beneficial coculture: charm abalone *Haliotis discus hannai* and sea cucumber *Stichopus japonicus*. *Aquaculture* 216, 87-93. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00203-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00203-X).
- Kang SJ, Kang SW, Kang JH, Jung UC, Choi BD and Han JC.

2012. Sea cucumber aquaculture technology. Aqua info., Seoul, Korea, 32-36.
- Kaushik SJ and Teles AO. 1985. Effect of digestible energy on nitrogen and energy balance in rainbow trout. *Aquaculture* 50, 89-101.
- Liu Y, Dong S, Tian X, Wang F and Gao Q. 2010. The effect of different macroalgae on the growth of sea cucumbers (*Apostichopus japonicus* Selenka). *Aquacult Res* 41, e881-e885.
- Liu Y, Dong S, Tian X, Wang F and Gao Q. 2009. Effects of dietary sea mud and yellow soil on growth and energy budget of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture* 286, 266-270. [http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00338-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00338-X).
- McBride S, Lawrence J, Lawrence A and Mulligan T. 1998. The effect of protein concentration in prepared feeds on growth, feeding rate, total organic absorption, and gross assimilation efficiency of the sea urchin *Strongylocentrotus franciscanus*. *J Shellfish Res* 17, 1563-1570.
- Michio K, Kengo K, Yasunori K, Hitoshi M, Takayuki Y, Hideaki Y and Hiroshi S. 2003. Effects of deposit feeder *Stichopus japonicus* on algal bloom and organic matter contents of bottom sediments of the enclosed sea. *Mar Pollut Bull* 47, 118-125.
- Moore H, Manship B and Roberts D. 1995. Gut structure and digestive strategies in three species of abyssal holothurians. *Echinoderm Res* 111-119.
- Moriarty D. 1982. Feeding of *Holothuria atra* and *Stichopus chloronotus* on bacteria, organic carbon and organic nitrogen in sediments of the Great Barrier Reef. *Mar Freshwater Res* 33, 255-263.
- Naylor RL, Goldburg RJ, Primavera JH, Kautsky N, Beveridge MC, Clay J, Folke C, Lubchenco J, Mooney H and Troell M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017-1024.
- Nelson EJ, MacDonald BA and Robinson SMC. 2012. The absorption efficiency of the suspension-feeding sea cucumber, *Cucumaria frondosa*, and its potential as an extractive integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) species. *Aquaculture* 370, 19-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.09.029>.
- Orr LC, Curtis DL, Cross SF, Gurney-Smith H, Shanks A and Pearce CM. 2014. Ingestion rate, absorption efficiency, oxygen consumption, and fecal production in green sea urchins (*Strongylocentrotus droebachiensis*) fed waste from sablefish (*Anoplopoma fimbria*) culture. *Aquaculture* 422, 184-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.030>.
- Paltzat DL, Pearce CM, Barnes PA and McKinley RS. 2008. Growth and production of California sea cucumbers (*Parastichopus californicus* Stimpson) co-cultured with suspended Pacific oysters (*Crassostrea gigas* Thunberg). *Aquaculture* 275, 124-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.12.014>.
- Park SJ, Hong SG, Yoon IH and Lovatelli A. 2015. Chapter 23 - *Apostichopus japonicus*: "Dolgi Haesam" in the Republic of Korea (South Korea). *Dev Aquacult Fish Sci* 39, 423-431.
- Pyeun JH and Ro JI. 1984. Studies on Lipids in Fresh Water Fishes; Study on Lipid Components of Carp, *Cyprinus carpio*. *Korean J Fish Aquat Sci* 17, 260-261.
- Ramofafia C, Foyle TP and Bell JD. 1997. Growth of juvenile *Actinopyga mauritiana* (Holothuroidea) in captivity. *Aquaculture* 152, 119-128. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01525-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01525-6).
- Reid GK, Liutkus M, Bennett A, Robinson SMC, MacDonald B and Page F. 2010. Absorption efficiency of blue mussels (*Mytilus edulis* and *M. trossulus*) feeding on Atlantic salmon (*Salmo salar*) feed and fecal particulates: Implications for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture* 299, 165-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.12.002>.
- Roberts D, Gebruk A, Levin V and Manship B. 2003. Feeding and digestive strategies in deposit-feeding holothurians. *Oceanogr Mar Biol Annu Rev* 38, 257-262.
- Seo J and Lee S. 2011. Optimum dietary protein and lipid levels for growth of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquacult Nutr* 17, 56-61.
- Shi C, Dong S, Wang F, Gao Q and Tian X. 2013. Effects of four fresh microalgae in diet on growth and energy budget of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture* 416-417, 296-301. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.050>.
- Shi C, Dong S, Wang F, Gao Q and Tian X. 2015. Effects of the sizes of mud or sand particles in feed on growth and energy budgets of young sea cucumber (*Apostichopus japonicus*). *Aquaculture* 440, 6-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.01.028>.
- Slater MJ, Jeffs AG and Carton AG. 2009. The use of the waste from green-lipped mussels as a food source for juvenile sea cucumber, *Australostichopus mollis*. *Aquaculture* 292, 219-224.
- Slater MJ, Lassudrie M and Jeffs AG. 2011. Method for determining apparent digestibility of carbohydrate and protein sources for artificial diets for juvenile sea cucumber, *Australostichopus mollis*. *J World Aquacult Soc* 42, 714-725.
- Wang F, Dong S, Huang G, Wu L, Tian X and Ma S. 2003. The effect of light color on the growth of Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*. *Aquaculture* 228, 351-360.
- Wang J, Jiang X, Zhao L, Su J and Sun P. 2007. Effects of dietary protein sources on growth in juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus*). *Feed Rev* 10, 9-13.
- Wang J, Zhao L, Liu J, Wang H and Xiao S. 2015. Effect of potential probiotic *Rhodotorula benthica* D30 on the growth performance, digestive enzyme activity and immunity in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Fish Shellfish Immunol* 43, 330-336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2014.12.028>.

- Wen B, Gao Q, Dong S, Hou Y, Yu H and Li W. 2016. Effects of dietary inclusion of benthic matter on feed utilization, digestive and immune enzyme activities of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture* 458, 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.01.028>.
- Wu B, Xia S, Rahman MM, Rajkumar M, Fu Z, Tan J and Yang A. 2015. Substituting seaweed with corn leaf in diet of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*): Effects on growth, feed conversion ratio and feed digestibility. *Aquaculture* 444, 88-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.03.026>.
- Xia S, Yang H, Li Y, Liu S, Zhou Y and Zhang L. 2012. Effects of different seaweed diets on growth, digestibility, and ammonia-nitrogen production of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture* 338, 304-308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.01.010>.
- Xia B, Gao Q, Wang J, Li P, Zhang L and Zhang Z. 2015. Effects of dietary carbohydrate level on growth, biochemical composition and glucose metabolism of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture* 448, 63-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.05.038>.
- Xia S, Zhao P, Chen K, Li Y, Liu S, Zhang L and Yang H. 2012. Feeding preferences of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) on various seaweed diets. *Aquaculture* 344-349, 205-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.03.022>.
- Xu ZF. 1999. Effect of Different Feed on Growth and Color-change of Juvenile Sea Cucumbers. *J Shandong Fish* 16, 30-33.
- Yingst JY. 1976. The utilization of organic matter in shallow marine sediments by an epibenthic deposit-feeding holothurian. *J Exp Mar Biol Ecol* 23, 55-69.
- Yokoyama H. 2013. Growth and food source of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* cultured below fish cages — Potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture* 372, 28-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.10.022>.
- Yu Z, Zhou Y, Yang H, Ma Y and Hu C. 2014. Survival, growth, food availability and assimilation efficiency of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* bottom-cultured under a fish farm in southern China. *Aquaculture* 426, 238-248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.02.013>.
- Yuan X, Yang H, Zhou Y, Mao Y, Zhang T and Liu Y. 2006. The influence of diets containing dried bivalve feces and/or powdered algae on growth and energy distribution in sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) (Echinodermata: Holothuroidea). *Aquaculture* 256, 457-467. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.01.029>.
- Zamora LN and Jeffs AG. 2011. Feeding, selection, digestion and absorption of the organic matter from mussel waste by juveniles of the deposit-feeding sea cucumber, *Australostichopus mollis*. *Aquaculture* 317, 223-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.04.011>.
- Zhang Q, Ma H, Mai K, Zhang W, Liu FZ and Xu W. 2010. Interaction of dietary *Bacillus subtilis* and fructooligosaccharide on the growth performance, non-specific immunity of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. *Fish Shellfish Immunol* 29, 204-211.
- Zhao Y, Zhang W, Xu W, Mai K, Zhang Y and Liufu Z. 2012. Effects of potential probiotic *Bacillus subtilis* T13 on growth, immunity and disease resistance against *Vibrio splendidus* infection in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Fish Shellfish Immunol* 32, 750-755.
- Zhou Y, Yang H, Liu S, Yuan X, Mao Y, Liu Y, Xu X and Zhang F. 2006. Feeding and growth on bivalve biodeposits by the deposit feeder *Stichopus japonicus* Selenka (Echinodermata: Holothuroidea) co-cultured in lantern nets. *Aquaculture* 256, 510-520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.02.005>.
- Zhu W, Mai K, Zhang B, Wang F and Xu G. 2005. Study on dietary protein and lipid requirement for sea cucumber, *Stichopus japonicus*. *Mar Sci* 29, 54-58.