

해삼사료원료로서 육상순환여과양식장 고형오물의 이화학적 특징과 해삼(*Apostichopus japonicus*)의 소화흡수율

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

경상대학교 해양식품생명과학과

Fecal Solid Feed from the Recirculating Aquaculture System of the Renewable Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*

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

Department of Seafood and Aquaculture Science, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Pollution caused by fecal solids released from recirculating aquaculture systems (RAS) is a growing global concern requiring immediate attention. Thus, this study investigated the physicochemical characteristics of fecal solid feed from RASs used for eel and rainbow trout farming. The concentrations of proteins, lipids, crude ash, and moisture in eel fecal solids were 10.9%, 1.2%, 85.8%, and 72.2%, respectively, while those in rainbow trout fecal solid feed were 20.5%, 3.2%, 70.9%, and 87.0%, respectively. The control group was fed a mixture of sea cucumber and dried sea mud. The protein digestibilities of eel and rainbow trout fecal solids were 25.43% and 23.96%, respectively, while the respective lipid digestibilities were 35.62% and 36.80%, respectively.

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

서 론

전 세계 해양에서 이루어지고 있는 어업에 의한 수산물 생산량은 지난 20년 동안 연간 9,000만 톤 수준에서 정체되고 있지만, 수산물에 대한 수요는 꾸준히 증가하여 현재 1억 5천만 톤에 이르고 있기 때문에 그 부족분을 수산양식에 의한 생산으로 충족시키고 있다(FAO, 2010). 현재 수산양식에 의한 수산물 생산방법은 육상의 노지양식과 연안의 가두리 양식에 의하여 이루어지고 있다. 이들 두 양식방법은 기후변화 및 환경변화의 영향으로 생산이 불안정하고 생태과피, 질병전파, 적조발생과 같은 연안환경 오염 문제를 유발하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 변온동물인 양식생물을 연중 사육할 수 있고, 적조 및 태풍과 같은 자연재해를 극복할 수 있는 육상순환양식 시스템(Recirculating Aquaculture Systems, RAS)이 적극적으로 도입되고 있다(Aruety et al., 2016). 그러나 대부분의 육상 RAS 양식장은 인공배합사료를 사용하여 고밀도로 양식생물을 생산하기 때문에 이들 생산결과에 의해서 생겨난 고형오물의 처리는 새로운 사회적 문제로 대두되고 있다(Mirzoyan et al.,

2008). 양식장에서 배출된 고형오물은 어류가 섭식하지 못한 잔여사료와 소화되지 못한 영양소로 구성되어 유기물 함량이 50-92% 차지한다(Piedrahita, 2003; Gebauer, 2004; Gebauer and Eikebrokk, 2006). 어류 1 kg을 생산하기 위하여 인공배합 사료 1-2 kg을 급이해야 하고 그 중에서 약 36%는 고형오물 형태로 배출된다(Naylor et al., 2000). 지금까지 육상어류양식장에서 배출된 고형오물을 처리하기 위한 방안으로 유기질비료로 사용(Danaher et al., 2009), 바이오가스로 활용(Luo et al., 2013), 식물환경복원(Ghaly et al., 2005) 등을 시도하였지만 아직 실용화되지 못하고 있다. 또한 고염류와 고농도 유기물 때문에 하수폐수처리장에서 처리가 곤란할 뿐만 아니라(Mirzoyan et al., 2008), 2016년부터 해양환경관리법에 의하여 해양투기가 금지되기 때문에 이에 대한 대책이 시급하고도 절실하다.

해삼(*Apostichopus japonicus*)은 주로 한국 전 연안, 중국 발해만, 일본 그리고 러시아의 태평양연안에서 한대 해역까지 북동 태평양 전역에 이르고 있으며 한국과 중국 그리고 일본에서 중요한 수산양식생물이다(Slater and Carton, 2007). 해삼은 저서생물로서 바닥의 퇴적물 중에 섞여 있는 미세조류, 박

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2016.0330>



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(3) 330-336, June 2016

Received 11 March 2016; Revised 2 June 2016; Accepted 15 June 2016

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

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

테리아, 식물성플랑크톤 그리고 동식물 채설을 포함한 유기물 질과 무기입자를 먹이로 섭취하는 것으로 알려져 있다(Paltzat et al., 2008). 최근의 연구에 의하면 해삼은 비늘비단가리비 (*Chlamys farreri*), 해만가리비(*Argopecten irradians*), 참가리비(*Patinopecten yessoensis*), 참굴(*Carsosostrea gigas*), 초록입홍합(*Perna canaliculus*)의 배설물을 먹이로 이용하여 성장이 좋았다는 연구결과가 보고되고 있으며(Yuan et al., 2006; Zhou et al., 2006), Neonardo et al. (2011) 의 연구에서도 패류와 전복에 의해서 배출된 변을 해삼이 잘 이용하고 정상적으로 성장한다고 보고되고 있다. 또한 해삼은 다영양입체양식(Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA)에서 여과생물로 활용되고 있으며(Paltzat et al., 2008; Zamora and Jeffs, 2011; Nelson et al., 2012), IMTA에서 발생한 저층의 배설물만으로 상프크기까지 성장하였다고 보고되고 있다(Yokoyama, 2013; Yu et al., 2014). 이들 연구는 해삼이 다른 생물의 배설물을 활용하여 성장할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 그러나 육상어류양식장에서 배출된 고행오물 처리하기 위한 방안으로 해삼에게 급여한 연구는 전무할 뿐만 아니라 육상어류양식장에서 배출된 고행오물에 대한 이화학적 특성에 대해서는 알려진 바가 거의 없다. 따라서 해삼사료원료 물질로서 육상순환여과양식장에서 배출된 고행오물의 이화학적 특성을 알아보고, 해삼에게 급여하여 해삼사료원료물질로서 이용가능성을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

고행오물 채취

고행오물 채취는 충청북도 충주시 금가면에 소재하고 있는 뱀장어양식장과 무지개송어 양식장의 배설물 침전조에 축적된 고행오물을 각각 채취하여 비닐봉지에 담아 스티로폼 박스에 포장하여 실험실로 운반하여 사용하였다.

일반성분 분석

일반성분 분석은 AOAC (1995)방법에 준하였으며, 수분은 상압가열 건조법으로 105℃의 dry oven에서 6시간 동안 건조 후 측정하였다. 조단백질 분석은 Kjeldahl법으로 하였으며, 시료 0.5 g과 단백질 분해 촉진제와 황산(H₂SO₄)를 15 mL 넣고 분해하고 분해가 종료된 시료는 50 mL 정용플라스크에 정용 후 하루 실온 보관한다. 다음 날 삼각플라스크에 0.01 N H₂SO₄ 10 mL를 넣고 혼합지시약을 3 방울 떨어뜨려 준비해 놓았다. 킬달중류장치를 이용하여 시료 중의 N(질소)을 배출시키고 배출된 질소가 첨가된 삼각플라스크에 0.01 N NaOH용액을 사용하여 적정하여 측정하였다. 조지방 분석은 Chloroform과 Methanol을 2:1 비율로 혼합한 용액을 용매로 한 Bligh and Dyer 추출법(1959)에 준하였다. 비커에 시료 5 g을 취하여 세포 분쇄기(homogenizer AM-12, Nihonseiki Kaisha Co. Ltd., Tokyo, Japan)에서 15,000 rpm로 5분간 분쇄한 후, Chloroform과

Methanol을 2:1로 혼합한 추출 용매를 시료의 2 배량 넣어 하루 동안 방치한 다음 chloroform 층만을 분리하기 위하여 둥근 플라스크 위에 깔때기를 놓고, 그 위에 Na₂SO₄를 넣어 서서히 chloroform층만 흘러내리게 하였다. 분리된 chloroform 층은 진공회전농축기(Rotavapor R-114, BUCHI)를 사용하여 40℃ 이하에서 용매를 완전히 증발시킨 후, 추출된 총 지질을 측정하였다. 조회분은 직접회화법으로 600℃ 회화로에서 4시간 동안 태운 후 정량하였으며, 탄수화물 함량은 Choi et al. (1984)의 방법에 따라 측정하였다.

중금속 분석

분석항목은 셀레늄, 비소, 납, 카드뮴, 크롬, 수은에 대해 사료표준 분석방법과 식품공전에 준한 성분분석으로 실시하였으며, 셀레늄 분석을 위한 시료 전처리하는 시료 3 g을 정확히 분해 플라스크에 취한 후에 HNO₃:H₂O=1:1 용액 10 mL를 첨가한 후 시료를 분해하기 위해 가열하였으며, 분해 완료 시까지 HNO₃ 용액을 일정량 추가하면서 가열 분해하였다. 분해가 완료된 시료는 H₂O₂ 용매를 일정량 첨가하여 완전 분해시켰다. 얻어진 분해액을 5 mL 정도 될 때까지 농축 시킨 후 일정량으로 정용하여 기기 분석을 실시하였다. 분석은 digestion tube에 sample 50 mL을 넣은 후 HNO₃ (1+1) 1 mL, HCl (1+1) 0.5 mL를 혼합하여 넣고, digestion tube를 heating block에 넣어 95℃에서 25 mL까지 증발시켜 농축한 후 tube cap을 닫고 30분간 환류시켰다. 환류된 시료는 식힌 후 일정량으로 정용하였고, 정용된 시료액을 Perkin Elmer ICP/MS 6100 (Made in U.S.A) 기기를 이용하여 분석하였으며, RF power는 1,500 watts로 하였다. 이때 Carrier gas는 아르곤(Ar)으로 하였으며, Sample flow rate는 100 µL/min으로 하였다.

비소 분석을 위한 시료의 전처리하는 분해 플라스크에 정확히 시료 5 g을 취하고 수분함량을 80% 정도 되도록 증류수를 넣은 다음 질산 20 mL을 넣어 혼합하여 실온에서 15분간 방치한 후 황산 10 mL를 넣어 서서히 약하게 가열하였다. 혼합물이 암색이 되기 시작하면 질산을 30 mL씩 넣어 가열을 계속하고, 혼합물이 미황색에서 무색으로 될 때 분해를 완료하고 냉각한 뒤, 증류수 40 mL를 가하여 아황산가스(SO₂)의 흰 연기가 발생 될 때까지 가열 한 후 냉각하고 증류수로 일정량을 제조한 시료액을 분석하였다. 분석은 digestion tube에 sample 50 mL를 넣은 후 HNO₃ (1+1) 1 mL, HCl (1+1) 0.5 mL를 혼합하여 넣고, digestion tube를 heating block에 넣어 95℃에서 25 mL까지 증발시켜 농축한 후 tube cap을 닫고 30분간 환류 시켰다. 환류된 시료는 식힌 후 일정량으로 정용하였고, 정용된 시료액을 ICP-OES 2000DV (Perkin Elmer Co. Ltd., USA) 기기를 이용하여 분석하였으며, RF power는 1,300 watts로 하였다. 이 때 Plasma Flow는 15 L/min으로 하였으며, Sample Flow rate는 1.5 mL/min으로 하였다. 비소의 측정 wavelength는 193.696 nm로 하였다.

납 및 카드뮴 분석을 위한 시료의 전처리에는 자제도가니에 시료 5 g을 정확히 취하여, 500°C 회화로에 48-72시간 동안 회화한 후 방냉하여 소량의 증류수로 회분을 씻어 툴비커에 넣고 염산용액(1:1) 30 mL로 도가니의 나머지 회분까지 씻어 넣은 다음, 그 분해액이 무색이 될 때까지 가열 분해한 후 얻어진 용액을 시료 액으로 사용하였다. digestion tube에 sample 50 mL을 넣은 후 HNO₃ (1+1) 1 mL, HCl (1+1) 0.5 mL를 혼합하여 넣고, digestion tube를 heating block에 넣어 95°C에서 25 mL까지 증발시켜 농축한 후 tube cap을 닫고 30분간 환류 시켰다. 환류된 시료는 식힌 후 일정량으로 정용하였고, 정용된 시료액을 ICP-OES 2000DV (Perkin Elmer Co. Ltd., USA) 기기를 이용하여 분석하였으며, RF power는 1,300 watts로 하였다. 이 때 Plasma Flow는 15 L/min로 하였으며, Sample Flow rate는 1.5 mL/min으로 하였다. 또한 납의 측정 wavelength는 220.352 nm로 카드뮴의 wavelength는 228.802 nm로 하였다.

항생물질 분석

잔류 항생물질 분석은 Aflatoxin B₁, Aflatoxin B₂, Aflatoxin G₁, Aflatoxin G₂, Ochratoxin A, Amoxicillin, 그리고 Oxytetracycline 7종을 대상으로 하였다. 분석방법은 Aflatoxin B₁, Aflatoxin B₂, Aflatoxin G₁, Aflatoxin G₂, 그리고 Ochratoxin A는 HPLC를 사용하여 분석하였으며, Amoxicillin과 Oxytetracycline는 LC-MS/MS를 사용하여 분석하였다.

실험해삼

실험에 사용한 해삼(*Apostichopus japonicus*)은 경상대학교 어류양식 및 사료실험실 배양장에서 사육중인 것을 사용하였다. 실험은 아크릴수조(60×40×50 cm, 수량 80 L)를 사용하여 수조당 각각 20마리씩 수용하였으며, 각각의 실험사료를 이용하여 3개의 실험구에 3회 반복으로 총 180마리로 해삼을 사용하였으며, 평균 습중량 11.5±0.20 g이었다. 성장은 8주간 측정하였으며, 측정 전일은 절식시킨 후, 각 수조의 해삼을 수집하여 전 개체의 습중량을 측정하여 증체율(Weight gain, %), 일일 성장율(Specific growth rate, %/day) 그리고 생존율(Survival rate, %)을 측정하였다.

사육장치

실험에 사용한 사육장치는 유수식을 겸한 해수순환여과시스템장치로서 전체순환수의 수량은 20 Ton으로 시스템 전체 순환율은 9.8회전/일이었고, 사육조의 순환율은 2.5회전/일이었다. 수온조절은 냉각기(DA-3000W, Dae-il Inc., Korea)와 히터(HB-100, Periha Inc., China)를 이용하여 사육수온을 18.0±0.5°C로 조절하였다. 보충수는 해수를 직접 취수하여 고압모래여과기와 마이크로필터(1 μm×3 inch)로 여과시킨 후 저장조에 저장하여 공급하였다. 저장조는 FRP 정사각형탱크(2 m×2 m 1.2 m, 유효수량 4톤) 2개를 사용하여 내부에는 바이오필터망을 5 cm 간격으로 설치하였으며 소형펌프(PH-037M,

Wilco Inc., Korea)를 이용하여 연속적으로 순환하도록 하였다. 염분농도는 32±2.0 psu, pH 8.3±0.3을 유지하였다.

실험사료

실험에 사용된 사료는 뱀장어양식장 고휘오물과 무지개송어양식장 고휘오물 그리고 대조구인 상품분말사료(Qingdao hiford ecology technology Inc, China)로 하였다. 고휘오물 사료는 채취된 고휘오물을 항온건조기(J-NDS-2, JISCO)로 60°C에서 48시간 건조시킨 후 반죽기로 분쇄하여 볼밀(SJB-250A, Dongwon Science, Korea)로 입자를 고르게 만든 후, 망목을 이용하여 150-200 μm로 가공하였다. 분쇄된 고휘오물 입자에 Cr₂O₃ 1%, Cellulose 1% 그리고 Sodium Alginate 0.5%를 혼합하여 반죽한 후, 건조하여 크럼블 형태로 성형하여 사용하였다. 1회/일 오후 6시에 사료를 급여하였으며, 급여 전 사이펀을 이용하여 배설된 해삼의 변을 채집하여 탈염 후, 동결 건조시켜 분석에 사용하였다.

Cr₂O₃의 적정

Cr₂O₃의 측정은 Furukawa and Tsukahara (1966) 방법에 준하여 분석하였다. 분석을 시작하기 전 Sodium molybdate 10 g에 증류수 150 mL를 첨가하고 H₂SO₄ 150 mL를 천천히 가하여 방냉시킨 후 70% HClO₄ 200 mL 첨가한 혼합액을 준비하였다. 켈달플라스크에 HNO₃ 10 mL와 건조된 시료 1 g을 가하여 가루만 남을 때까지 가열한 후, 충분한 시간 동안 방냉하였다. 실험 전 준비해둔 혼합액 15 mL를 첨가한 후 열을 가했을 때 Cr₂O₃의 농도에 따라 녹색, 황색, 적색으로 변하기 시작하면 30초간 분해 후 방냉하였다. 시료에 증류수 60 mL를 첨가하여 희석한 후 정용삼각플라스크에 옮기고 H₂SO₄ 20 mL를 첨가하여 무기물 침전을 위해 하루 방치하였다. 정용된 시료는 광학식 플레이트에 150 μL씩 넣어 UV-Vis spectrometer를 이용하여 350 nm에서 3 반복으로 분석하였다. 분석 후 결과 값과 Y=0.2089X+0.0032 (Y=흡광도, X=Cr₂O₃ mg/100 mL) 공식을 이용해 Cr₂O₃값을 측정하였다.

통계처리

모든 자료는 SPSS 18.0 프로그램을 이용하여 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하여 Duncan's multiple range test (Duncan, 1955)로 평균간의 유의성(P<0.05)을 검정하였다.

결과 및 고찰

일반성분 분석

뱀장어양식장과 무지개송어양식장에서 채취한 고휘오물의 일반성분 분석 결과는 Table 1에 나타난 바와 같다. 뱀장어양식장에서 채취한 고휘오물의 경우 수분함량 72.2%, 조단백질 10.9%, 지질 1.2%, 탄수화물 2.1% 그리고 조회분 85.8%였으며, 무지개송어 양식장에서 채취한 고휘오물의 경우 수분함량

Table 1. Proximate compositions of the fecal solids from RAS fish farm (%)

Sample	Moisture	Nutrient content			
		Protein	Lipid	Carbohydrate ¹	Ash
Eels' fecal solids	72.2±0.6	10.9±0.2 ^b	1.2±0.1 ^c	2.1±0.2 ^c	85.8±3.1 ^a
Rainbow trout's fecal solids	87.0±2.7	20.5±0.8 ^a	3.2±0.2 ^a	5.4±0.5 ^b	70.9±0.8 ^b
Commercial feed	5.4±0.2	21.0±0.1 ^a	1.7±0.1 ^b	36.3±0.1 ^a	41.0±0.2 ^c

Nutrient content data were calculated on a dry matter basis. Data with different letters in the same column means significant difference among different diet treatments ($P<0.05$). ¹ Carbohydrate=100-(crude protein+crude lipid+ash).

은 87.0%, 조단백질 20.5%, 지질 3.2%, 탄수화물 5.4% 그리고 조회분 70.9%였다. 상품사료의 수분함량은 5.4%, 조단백질 21.0%, 지질 1.7%, 탄수화물 36.3% 그리고 조회분 41.0%로 나타났다. 대조구로서 해삼사료로 사용되는 상품사료의 조단백질 함량이 21.0%로 무지개송어양식장의 고형오물의 조단백질 함량이 20.5%로 상품사료와 차이가 없는 것으로 나타났다 ($P<0.05$). 무지개송어양식장에서 채취한 고형오물의 경우 조단백질 함량이 20.5%였으며, 뱀장어 양식장 고형오물의 조단백질 함량은 10.9%로 무지개송어양식장 고형오물의 조단백질 함량이 높게 나타났다. 이러한 차이는 두 어종의 소화흡수나 생리적 차이보다는 급여하는 사료의 형태에서 기인한 것으로 사료된다. 무지개송어양식장에서는 펠렛형 침강사료를 급여하였고, 뱀장어양식장에서는 반죽사료를 급여하였다. 무지개송어양식장의 고형오물 속에는 먹다 남은 침강사료의 일부가 포함되기 때문에 두 양식장에서 채집한 고형오물의 단백질함량이 차이를 나타낸 것으로 사료된다. 또한 무지개송어양식장 고형오물의 단백질 함량이 시판용 해삼 상품사료의 조단백질 함량 21%와 비슷하게 나타난 점은 해삼사료로서 재이용가능성을 더욱 높여준다. 또한 뱀장어양식장고형오물의 경우 회분함량이 85.8%로 높게 나타난 것이 특이적이었다. 이는 양식장에 공급되는 지하수로부터 유입된 미세토양입자에서 기인된 것으로 판단된다. 미세토양입자의 크기와 정도는 해삼사료의 원료로 사용되고 있는 갯벌과 거의 유사한 크기와 형태였다. 갯벌은 해삼사육 과정에서 해삼사료와 혼합해서 공급해 주어야 되기 때문에 고형오물에 포함되어 있는 미세토양입자는 갯벌 대체물질로서 활용이 가능할 것으로 사료된다. 이전의 연구결과들에서 해삼사료 내 최적 단백질 함량이 18-24%에서 가장 높은 성장을 보인다는 연구결과가 보고되고 있다(Huiling et al. 2004; Seo and Lee, 2011). 이러한 결과는 무지개송어 고형오물 단백질 함량이 20.5%로 해삼사료원료로서 사용이 가능할 것으로 사료된다. 또한 해삼은 탄수화물로부터 유래하는 에너지를 효율적으로 이용하는 생리적 특성을 가지고 있다고 보고되고 있다(Slater et al., 2009; Xia et al., 2015). 따라서 무지개송어양식장 고형오물에서는 탄수화물의 비율이 3.2%였으며, 뱀장어양식장 고형오물에서는 탄수화물의 비율이 2.1%로 해삼사료에서의 36.3%에 비해서 현저히 낮아 고형오물을 해삼사료원료 물질로서 이용할 경우 탄수화물원의 보완이 필수적으로 이루어

어져야 할 것으로 판단된다.

중금속 분석

뱀장어양식장과 무지개송어양식장에서 채취한 고형오물의 중금속의 함량은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 뱀장어양식장 고형오물의 경우 비소는 검출되지 않았으며, 크롬은 39.404 ppm으로 허용기준치 100 ppm이하였으며, 납은 7.759 ppm으로 허용기준치 10 ppm이하로 나타났다. 또한 수은은 검출되지 않았으며, 카드뮴은 1.539 ppm으로 허용기준치 50 ppm이하였고, 셀레늄은 1.760 ppm으로 허용기준 2 ppm이하로 나타났다.

무지개송어양식장 고형오물의 경우 비소는 검출되지 않았으며, 크롬은 16.862 ppm으로 허용기준 100 ppm이하였고, 납은 2.238 ppm으로 허용기준 10 ppm 이하였다. 또한 수은은 검출되지 않았으며, 카드뮴은 0.482 ppm으로 허용기준치 50 ppm이하였으며, 셀레늄은 0.338 ppm으로 허용기준 2 ppm이하로 나타났다. 뱀장어양식장과 무지개송어양식장 고형오물의 중금속 잔류량 분석 결과 비소, 크롬, 납, 수은, 카드뮴 그리고 셀레늄에서 허용기준치 이하로 나타났다. 이로서 두 양식장 고형오물에서 비소와 수은은 모두 검출되지 않았으며, 납, 카드뮴, 셀레늄과 크롬은 검출되었으나 사료 내 유해물질의 범위 및 허용기준치 이하로 나타남으로 해삼사료원료 물질로서 이용이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 무지개송어양식장 고형오물에 비해 뱀장어양식장 고형오물에서 전체적으로 검출 농도가 높았던 것은 배설물 침전조에 축적된 고형오물이 장시간 축적되어 나타날 가능성이 있는 것으로 사료되지만 이에 대한 자세한 연

Table 2. Heavy metal of eels and rainbow trout's fecal solids (PPM, parts per million)

Sample	Eels' fecal solids	Rainbow trout's fecal solids	Commercial feed
Arsenism	N.D. ¹	N.D.	N.D.
Chromium	39.404	16.862	N.D.
Plumbum	7.759	2.238	N.D.
Hydrargyrum	N.D.	N.D.	N.D.
Cadmium	1.539	0.482	N.D.
Selenium	1.760	0.338	N.D.

¹N.D.: Not Detected.

구는 향후 요망된다.

항생물질 분석

뱀장어양식장과 무지개송어양식장에서 채취한 고형오물의 잔류 항생물질 함량은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 뱀장어양식장 고형오물의 경우 Aflatoxin B₁, Aflatoxin B₂, Aflatoxin G₁, 그리고 Aflatoxin G₂는 모두 검출되지 않았으며, Ochratoxin, Amoxicillin 그리고 Oxytetracycline도 모두 검출되지 않았다. 무지개송어양식장 고형오물의 경우도 Aflatoxin B₁, Aflatoxin B₂, Aflatoxin G₁, 그리고 Aflatoxin G₂는 모두 검출되지 않았으며, Ochratoxin, Amoxicillin 그리고 Oxytetracycline도 모두 검출되지 않았다. 이로서 뱀장어양식장과 무지개송어양식장 고형오물의 잔류항생물질은 모든 구에서 검출이 되지 않아 해삼 사료원료원으로 사용함에 있어 잔류항생물질은 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 최근에 안전식품생산 차원에서 양어용 배합사료에 항생제를 첨가하지 않은 결과에서 유래된 것으로 사료된다.

성장도

뱀장어양식장과 무지개송어양식장 고형오물을 이용한 해삼 사육 결과는 Table 4에 나타낸 바와 같다. 실험 초기 개체의 평균 습중량은 11.50 g의 해삼을 뱀장어양식장 고형오물 공급구, 무지개송어양식장 고형오물 공급구 그리고 대조구로서 시판용 상품사료구에서 각각 25.28 g, 24.98 g 그리고 32.16 g으

로 성장하였으며($P<0.05$), 증체량(Weight gain, WG)은 각각 119.83%, 115.48% 그리고 179.65%로 나타났다. 일일성장률(Specific growth rate, SGR)은 뱀장어 고형오물구, 무지개송어 고형오물구 그리고 상품사료구에서 각각 0.5701, 0.5557 그리고 0.7444였으며, 이 때 생존율은 모든 구에서 폐사개체가 없이 100% 생존하였다. 이로서 뱀장어양식장 고형오물과 무지개송어양식장 고형오물을 해삼에게 급여하였을 때 상품사료구에 비해서 성장은 낮게 나타났지만($P<0.05$), 성장을 확인함에 따라 해삼사료 원료원으로서 이용가치는 증명되었다. 하지만 성장이 낮은 점에 대해서는 영양학적인 부족현상때문으로 판단되며 향후 해삼사료 제조 시 이러한 영양학적인 부분을 보완을 한다면 해삼사료로서 이용이 가능할 것으로 사료된다.

소화흡수율

뱀장어양식장 고형오물과 무지개송어양식장 고형오물을 해삼에게 급여하였을 때 단백질 소화흡수율은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 단백질 소화흡수율은 뱀장어양식장 고형오물과 무지개송어양식장 고형오물에서 각각 25.43%와 23.96%로 차이가 없는 것으로 나타났으며($P<0.05$), 대조구인 상품사료는 40.96%로 뱀장어양식장 고형오물과 무지개송어양식장 고형오물에 비해서 높게 나타났다($P<0.05$). 또한 지질 소화흡수율은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 뱀장어양식장 고형오물과 무지개송어양식장 고형오물에서 각각 35.62%와 36.80%로 차이가 없

Table 3. Antibiotic of eels *Anguila japonica* and rainbow trout's *Oncorhynchus mykiss* fecal solids (PPB, parts per billion)

Sample	Eels' fecal solids	Rainbow trout's fecal solids	Commercial feed
Aflatoxin B ₁	N.D. ¹	N.D.	N.D.
Aflatoxin B ₂	N.D.	N.D.	N.D.
Aflatoxin G ₁	N.D.	N.D.	N.D.
Aflatoxin G ₂	N.D.	N.D.	N.D.
Ochratoxin A	N.D.	N.D.	N.D.
Amoxicillin	N.D.	N.D.	N.D.
Oxytetracycline	N.D.	N.D.	N.D.

N.D.: Not Detected.

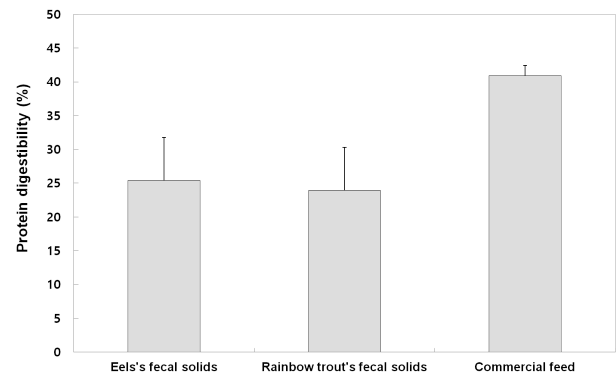


Fig. 1. Protein digestibility of eels *Anguila japonica* and rainbow trout's *Oncorhynchus mykiss* fecal solids.

Table 4. Monthly changes in biometrics and other growth measurement of *Apostichopus japonicus* grown in the load different RASs for 8 weeks

Sample	Initial mean weight (g)	Final mean weight (g)	Weight Gain ¹ (%)	SGR ²	Survival ³ (%)
Eels' fecal solids	11.50±0.21 ^a	25.28± 0.66 ^b	119.83	0.5701 ^b	100
Rainbow trout's fecal solids	11.50±0.19 ^a	24.98± 0.62 ^b	115.48	0.5557 ^b	100
Commercial feed	11.50±0.20 ^a	32.16± 0.85 ^a	179.65	0.7444 ^a	100

¹Weight Gain (%): [(final fish weight-initial fish weight)/initial fish weight]×100. ²SGR (Specific growth rate, %/day)=[(loge final fish weight-loge initial fish weight)/days]×100. ³Survival rate (%): (final fish/initial fish)×100.

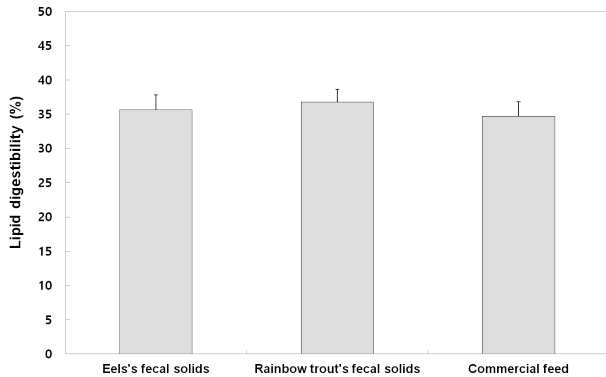


Fig. 2. Lipid digestibility of eels *Anguila japonica* and rainbow trout's *Oncorhynchus mykiss* fecal solids.

는 것으로 나타났으며($P<0.05$), 대조구인 상품사료는 34.69%로 뱀장어양식장 고행오물과 무지개송어양식장 고행오물과 차이가 없는 것으로 나타났다($P<0.05$). 이로서 고행오물을 해삼에게 급여하여 소화흡수율 측정 결과 해삼이 이를 섭취하고 고행오물 중의 단백질과 지질을 이용할 수 있는 것을 확인하였다. 각각의 고행오물은 상품사료에 비해서 단백질 소화흡수율이 낮게 나타났지만, 지질 흡수율에 있어는 차이가 없는 것으로 나타나 고행오물의 영양소를 해삼이 이용한다는 것을 확인하였다. 어류에서 배출된 변은 가소화 단백질로 쉽게 소화 흡수가 되고, 소화 흡수되지 못한 불소화물이 변의 형태로 배출되기 때문에 다른 생물에 의해서도 이용하기 힘든 것으로 생각된다. 그러나 이러한 불소화물의 영양소가 침전조에 머무르는 동안 자체 발효가 일어남으로서 영양소의 물성 및 상태가 소화하기 쉬운 상태로 전환될 것 일 수도 있다는 가능성과 해삼의 유기퇴적물 특성으로 소화흡수생리의 특수성에 기인하여 해삼사료원료로서 이용가능성은 높다고 판단된다.

사 사

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

References

Aruety T, Brunner T, Ronen Z, Gross A, Sowers K and Zilberg D. 2016. Decreasing levels of the fish pathogen *Streptococcus iniae* following inoculation into the sludge digester of a zero-discharge recirculating aquaculture system (RAS). *Aquaculture* 450, 335-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.08.002>
 AOAC. 1995. Official method of analysis. 16th ed. Associa-

tion of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA, 1-43.
 Bligh EG and Dyer WJ. 1959 A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Physiol* 37, 911-917.
 Danaher J, Rakocy J, Shultz R, Bailey D and Pantanella E. 2009. Dewatering and composting aquaculture waste as a growing medium in the nursery production of tomato plants. 223-229.
 Duncan DB. 1955. Multiple range and multiple F test. *Biometric* 11, 1-42.
 FAO. 2010. The state of world fisheries and aquaculture. <http://www.fao.org/docrep/013/i1820e/i1820e00.htm> (accessed October 18, 2010).
 Furukawa A and Tsukahara H. 1966. On the acid digestion method for the determination of chromic oxides as an index substance in the study of digestion of fish feed. *Nippon Suisan Gakkaishi* 32, 502-506.
 Gebauer R. 2004. Mesophilic anaerobic treatment of sludge from saline fish farm effluents with biogas production. *Bioresour Technol* 93, 155-167.
 Gebauer R and Eikebrokk B. 2006. Mesophilic anaerobic treatment of sludge from salmon smolt hatching. *Bioresour Technol* 97, 2389-2401.
 Ghaly AE, Kamal M and Mahmoud NS. 2005. Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed. *Environ Int* 31, 1-13.
 Huiling S, Mengqin L, Jingping Y and Bijuan C. 2004. Nutrient requirements and growth of the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. *Advances in Sea Cucumber Aquaculture and Management*, FAO Fisheries Technical 46, 327-331.
 Luo G, Li P, Tan H, Du J and Liang W. 2013. The start-up and saline adaptation of mesophilic anaerobic sequencing batch reactor treating sludge from recirculating aquaculture systems. *Aquacult Eng* 54, 9-15.
 Mirzoyan N, Parnes S, Singer A, Tal Y, Sowers K and Gross A. 2008. Quality of brackish aquaculture sludge and its suitability for anaerobic digestion and methane production in an up flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Aquaculture* 279, 35-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.04.008>.
 Naylor RL, Goldberg RJ, Primavera JH, Kautsky N, Beveridge MCM, 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* 370-371, 19-25.
 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.2007.07.230>.
- Piedrahita RH. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226, 35-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.07.230>.
- Slater MJ and Carton AG. 2007. Survivorship and growth of the sea cucumber *Australostichopus (stichopus) mollis* (hutton 1872) in polyculture trials with green-lipped mussel farms. *Aquaculture* 272, 389-398.
- Slater MJ, Jeffs AG and Carton AG. 2009. The use of the waste from green-lipped mussels as a feed source for juvenile sea cucumber, *Australostichopus mollis*. *Aquaculture* 292, 219-224.
- Seo JY and Lee SM. 2011. Optimum dietary protein and lipid levels for growth of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicas*. *Aquacult Nutr* 17, 56-61.
- 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 japonicas* (Selenka). *Aquaculture* 448, 63-70.
- Yokoyama H. 2013. Growth and food source of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* cultured below fish cages potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture* 372-375, 28-38.
- 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* 426-427, 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.
- 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.
- 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.