

해상에서 VIE 추적 조사에 의한 양성 기구의 수용 밀도 및 개체 크기별 해삼 (*Apostichopus japonicus*, Selenka)의 성장 비교

문선주[†] · 권인영^{1†} · 김태호^{2*}

국립수산과학원 남해수산연구소, ¹전남대학교 대학원 수산과학과, ²전남대학교 해양기술학부

Growth of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*, Selenka) to different stocking densities and body sizes, with monitoring and the use of VIE tags

Sunju MOON, Inyeong KWON¹ and Taeho KIM²

South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Republic of Korea

¹Department of Fisheries Science, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

²Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

The objective of this study was to investigate the growth rate and the optimal stocking density of sea cucumbers. Grow-out was studied in situ by conducting a follow-up survey using visible implant elastomer (VIE) tags. The rearing systems were made of polypropylene pipe for the frames and netting. The experiment ran for 70 days near Yeosu, Korea in the water depth of about 7 m. A total of 576 sea cucumbers which have three groups of body sizes (small: 5.15, medium: 12.34 and large: 23.26 g) were used. The five groups of stocking densities (150, 300, 450, 600 and 850 g/m²) in rearing system for sea cucumber were considered. Sea cucumbers were fed a mixed diet (mud, mineral, fish meal, etc.). The feed was supplied to 10% of their body wet weight once every 7 days. The survival rate (73%) of sea cucumber in 850 g/m² was lower than those of other density groups (150 g/m²: 89%, 300 g/m²: 84%, 450 g/m²: 78% and 600 g/m²: 86%). The survival rate of medium size group was higher than those of small and large groups regardless of the density ($P < 0.05$). Most of density groups have no significant difference except for 850 g/m² ($P > 0.05$). The growth rate of small size group (0.63% day⁻¹) was higher than those of medium (0.38% day⁻¹) and large (0.34% day⁻¹) group regardless of the density ($P < 0.05$). The threshold water temperature was 11.0°C for sea cucumber growth in winter season.

Keywords : *Apostichopus japonicus*, Stocking density, SGR, Rearing system for sea cucumber, VIE Tag

[†] Two authors equally contributed to this study.

*Corresponding Author: kimth@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7121, Fax: +82-61-659-7129

서론

해삼 (*Apostichopus japonicus*, Selenka)은 위도 35°N에서 44°N의 아시아 연안에 주로 분포하며 (Levin, 1982), 외해수의 영향을 받는 한국의 전 연안에 서식하는 수산 무척추 동물이다 (MIFAFF, 2012). 또한 해삼은 한국을 비롯하여 중국, 일본 등에서 전통적으로 중요한 수산 자원으로 취급되어져 왔으며 (Sloan, 1984), 개체군 보존 관리 보호종에 속하는 고부가가치 품종이다. 특히, 해삼은 중화권 시장에서 고가로 판매되고 있는 판매자 수요 품목으로 정부의 10대 수출 전략 품종으로서 상당한 가치가 있다 (MIFAFF, 2012).

한국의 해삼 생산량은 2002년도에 833 MT으로 가장 작았으나, 2007년에는 2,936 MT로 증가하였다. 그러나 그 후 생산량이 다소 감소하기 시작하여 2009년에는 2,789 MT이었고, 2012년에는 1,935 MT으로 감소하였다가 2014년에는 2,139 MT으로 생산량이 다시 증가하였다 (KOSIS, 2015). 이에 배해 해삼의 수출량은 지속적으로 상승하고 있는데, 2011년부터는 해삼 소비량이 가장 많은 중국 현지에서 양식된 해삼의 대량 공급으로 인해 한국의 해삼 수출량이 감소하였을 뿐 여전히 수요에 비해 생산량은 부족한 실정으므로 자연산 해삼만으로는 그 수요를 충족하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 한국에서도 해삼을 대량으로 생산하기 위해서는 해상의 환경 조건에서도 해삼을 안정적으로 양식할 수 있는 해삼 양식 기구의 개발이 필요하다. 그러나 지금까지 해삼 양식 기구 개발에 관한 연구는 전세계적으로 비교적 많이 시도되지 않았다. Kim (2005)은 통발형 해삼 양식 기구를 제작하여 그것의 성능을 조사하였으며, Qin et al. (2009)은 못에서 해삼 은신처의 재료를 달리하여 해삼의 생존율 및 성장률을 조사하였다. 그리고 Dong et al. (2010a)은 해삼의 성장에 적절한 은신처를 개발하기 위하여 원형 수조에서 은신처의 재료 및 색깔을 달리하여 해삼의 행동을 조사하였다. Oh (2013)는 침하식 해삼 양식 기구의 안정성을 검토하기 위해 수치 모델링에 의한 해삼 양식 기구의 구조 역학적 성능을 분석하고 튜브형 셀터로 구성된 침하식 해삼 양식 기구를 해상에 설치한 후 먹이 지급 및 미지급 조건에 따른 해삼의 생존율 및 성장률을 조사하였다. Kim et al. (2015)은 전산 유체 역학을 통해 해삼 전복 복합 양식 기구 내부의 용존 산소 농도를 해석한 후 실내 수조

에서 해삼과 전복의 생존율과 성장률을 조사하였다.

한편, 생물의 양성 시 수용 밀도는 생물의 생존, 성장, 행동, 건강과 섭식뿐만 아니라 수질에까지 직접적인 영향을 주는 중요한 요소 (Rowland et al., 2006)이다. Li and Li (2010)는 중국 용순에서 홍해삼 유생의 밀도, 수온 및 염분에 따른 생존율 및 성장률에 대해서 조사하였으며, Qin et al. (2009)은 지수식 양식장에서 해삼 (*A. japonicus*)의 먹이 지급 및 미지급 조건에 따른 최적 밀도를 조사한 결과, 초기 입식 밀도가 낮을수록 해삼에 성장의 긍정적인 영향을 끼침을 알 수 있었다. Asha and Diwaker (2013)는 수조에서 6가지 밀도에 따른 해삼의 부화율에 대해서 조사하였다. 그리고 Dong et al. (2010b)은 해삼 (*A. japonicus*) 개체 크기 및 양성 밀도에 따른 성장을 비교하였고, 그 외 밀도의 영향에 대한 해삼 (*Holothuria scabra*)의 생존 및 성장 평가를 위한 연구가 진행된 바 있다 (Battaglione et al., 1999; Pitt et al., 2004). Battaglione et al. (1999)은 초기 입식 밀도가 6~32 g/m²인 0.8~1.5 g 사이의 해삼 (*H. scabra*)의 경우 입식 밀도가 약 225 g/m²에 도달하면 성장이 감소한다고 하였다. Slater and Carton (2007)은 초기 평균 무게가 109.1 g인 해삼 (*Australostichopus*)을 대상으로 초기 입식 밀도에 대해 조사한 결과, 해삼의 성장에 적합한 적정 초기 밀도는 220~550 g/m²이며, Dong et al. (2010b)은 초기 무게 5~6 g 사이의 해삼 (*A. japonicus*)을 사용하여 27.95~300.5 g/0.1 m³의 초기 입식 밀도 조건에서 성장을 비교한 결과, 104 g/0.1 m³에서 해삼의 성장률이 가장 높게 나타났다. 상기에서와 같이 지금까지 해삼의 적정 수용 밀도를 구명하기 위한 연구가 비교적 많이 진행되었으나, 해삼 초기 무게와 초기 입식 밀도 조건에 차이가 있었으며, 초기 입식 밀도뿐만 아니라 해삼이 성장함에 있어 변화하는 입식 밀도의 영향에 대한 연구는 거의 진행된 바가 없다.

따라서 이 연구에서는 해삼의 적정 입식 밀도를 구명(究明)하기 위하여 해상에서 해삼 양식 기구의 단위 면적당 해삼의 초기 수용 밀도를 5종류로 달리하고 해삼을 무게에 따라 소형, 중형 및 대형으로 구분한 후 해삼의 표피에 엘라스토머 형광 태그 (visible implant elastomer; VIE) 표지표 (tags)를 주입하여 해삼의 크기별 생존율과 성장률을 추적 조사하였다.

재료 및 방법

실험 재료

이 실험에서 사용한 해삼은 전남 여수 연안에서 나잠 어업에 의해 채포된 것으로, 초기 무게에 따라 소형 그룹 (5.15 ± 1.14 g), 중형 그룹 (12.34 ± 2.29 g) 및 대형 그룹 (23.26 ± 2.23 g)으로 나누었으며, 총 개체수는 576마리이었다.

이 실험에서 사용한 해삼 양성 기구는 Fig. 1과 같이 길이가 0.96 m이고 폭이 0.67 m이며, 높이가 0.35 m인 사각 프레임과 은신처용 파이프로 구성되어 있다. 이 기구의 총 체적은 0.23 m^3 이고, 해삼이 서식처로 이용할 수 있는 면적은 양성 기구의 프레임 파이프를 포함하여 3.3 m^2 이다. 또한 해삼 입식 시 최소 입식 밀도 실험을 위해 길이가 0.96 m이고, 높이가 0.35 m이며, 두께가 2.56 mm인 검정색 PVC판을 삽입하여 부착 가능 면적을 4.01 m^2 으로 하였다. 그리고 해삼이 기구 밖으로 빠져나가지 못하도록 기구의 바깥쪽에 이중 그물을 씌웠다. 이 경우 안쪽 그물은 나일론 재질의 여자 그물감 (그물코 크기: 4.2 mm)을, 바깥 그물은 그물코의 크기가 5 mm인 PE 재질의 그물감 (Td 380×12)을 사용하였다.

실험 방법

이 실험은 수온, 염분 등 해양 환경 조건에서 양성 기구의 구조와 수용 밀도에 따른 해삼의 생존율과 성장률을 조사하기 위하여 2014년 10월 30일부터 2015년 1월 7일까지 70일간 Fig. 2와 같이 전라남도 여수시 신월동 신해양수산 가두리 양식장에서 수행하였다. 실험에서는 수심이 약 7 m인 해역의 저층에 총 5개의 해삼 양성 기구를 연승 수하식 방식으로 설치하였다. 또한

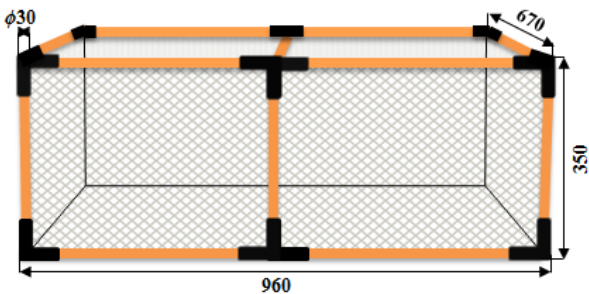


Fig. 1. Rearing system for sea cucumber grow-out used in the experiment (unit: mm).

수온, 염분 등 해상의 환경 조건과 개체 크기 및 수용 밀도에 따른 해삼의 크기별 성장 특성을 구명하기 위하여 초기 무게에 따라 총 세 그룹으로 나눈 해삼의 표피에 Fig. 3과 같이 VIE 표지표를 실험실에서 주입한 뒤 7일간 실내 순치 후 해상에 설치된 양성 기구에 입식하였다. 그런데 해삼은 어류나 갑각류와는 달리 코드화된 와이어 표지 (coded-wire tag; CWT)와 같이 표피에 삽입하는 표지의 경우 탈락되기가 쉽다 (Battaglione and Bell, 1999), 해삼의 표피에 상처를 내거나 표식을 하는 경우에는 비교적 짧은 기간 내에 표피의 상처 부위가 회복이 되므로 이들 표지를 이용하여 조사를 하는 경우 실험 기간에 매우 제한을 받는다 (Purcell et al., 2006). 따라서 이 연구에서는 장기간 표지를 유지하기 위하여 VIE 표지를 사용하였다 (Kirshenbaum et al., 2002; Purcell et al., 2006).

한편, 해삼의 초기 입식 밀도의 경우 Slater and Carton (2007)의 $220 \sim 550 \text{ g/m}^2$ 와 Dong et al. (2010b)의 20 ind./100 L ($102 \sim 122 \text{ g/0.1 m}^3$)를 기준으로 하여, 본 실험에서는 초기 수용 밀도를 (a) 150 g/m^2 (개체 크기별 15마리씩 총 45마리), (b) 300 g/m^2 (25마리씩 총 75마리), (c) 450 g/m^2 (35마리씩 총 105마리), (d) 600 g/m^2 (48마리씩 총 144마리) 및 (e) 850 g/m^2 (69마리씩 총 207마리)와 같이 5단계로 구분하였다. 실험에서는 펄, 해조분 (감태분, 모자반분, 미역분, 다시마분), 미네랄 등으로 구성된 해삼 양성용 건식 혼합 사료 (단백질 13%, 지방 2%, 조섬유 5%, 조회분 50%, 칼슘 1~4.5%, 인 0.8%)를 7일 간격으로 지급하였으며, 먹이 지급량은 해삼 습중량의 약 10%이었다 (Yang et al., 2005).

실험 시 약 23일 간격으로 해삼의 습중량을 측정하였으며, 이 경우 저층에 설치된 해삼 양성 기구를 들어 올려 각 기구에 들어 있는 해삼의 개체수를 확인한 후 전체 해삼의 30%를 약 1분 동안 타월로써 해삼의 몸에 묻어 있는 물기를 닦아내고 체내에 있는 물이 충분히 빠지도록 한 후 전자저울 (SW-1, CAS, 0~600 g, China)을 사용하여 해삼의 습중량을 측정하였다. 해삼의 습중량 측정이 완료되면 각 양성 기구에 해삼을 다시 넣고 양성 기구를 재설치하였다.

한편, mini-CTD (CTD-Diver, Eijkelpamp Soil & Water, Netherlands)를 양성 기구에 부착하여 매 10분 간격으로 실험 해역의 수온 및 염분을 연속으로 측정하

였고, 다항목 측정기 (YSI-556MPS, YSI, USA)를 사용하여 용존산소 (DO, 감도: 0~50 mg/L) 및 수소이온농도 (pH, 감도: 0~14)를 약 3일 간격으로 측정하였다.

결과 분석 방법

이 연구에서 해삼의 생존율은 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{생존율 (\%)} = (n_f/n_i) \times 100 \quad (1)$$

(1) 식에서 n_i 는 해삼의 초기 개체수이고, n_f 는 해삼의 최종 개체수이다.

해삼의 습중량을 이용하여 해삼의 일간 성장률 (specific growth rate; SGR), 즉 $SGR (\% \text{ day}^{-1})$ 은 다음 식과 같이 계산하였다.

$$SGR(\% \text{ day}^{-1}) = (\ln W_f - \ln W_i) \times 100/d \quad (2)$$

(2) 식에서 W_i 는 해삼의 초기 무게 (g)이고, W_f 는 해삼의 최종 무게 (g)이며, d 는 실험 일수이다.

측정한 자료에 대한 결과 분석은 모두 통계 분석을 통해 유의함을 증명하였다. 즉 밀도 (5개 그룹)와 해삼 크기 (3개 그룹)별 해삼의 생존율 및 성장률에 대해 일원 배치 분산 분석 (ANOVA test)을 이용하여 그룹 간 유의한 차이를 분석하였고, 이 경우 통계 분석에 사용된 소프트웨어는 SPSS v.21이었다. 또한 해삼의 성장에 대한 수온 및 밀도의 영향을 분석하기 위하여 통계 해석 소프트웨어인 EViews 4.0 (Quantitative Micro Software Corporation)을 이용해 회귀 분석을 하였다. 이 경우 종속 변수와 독립 변수의 관계를 분석하기 위

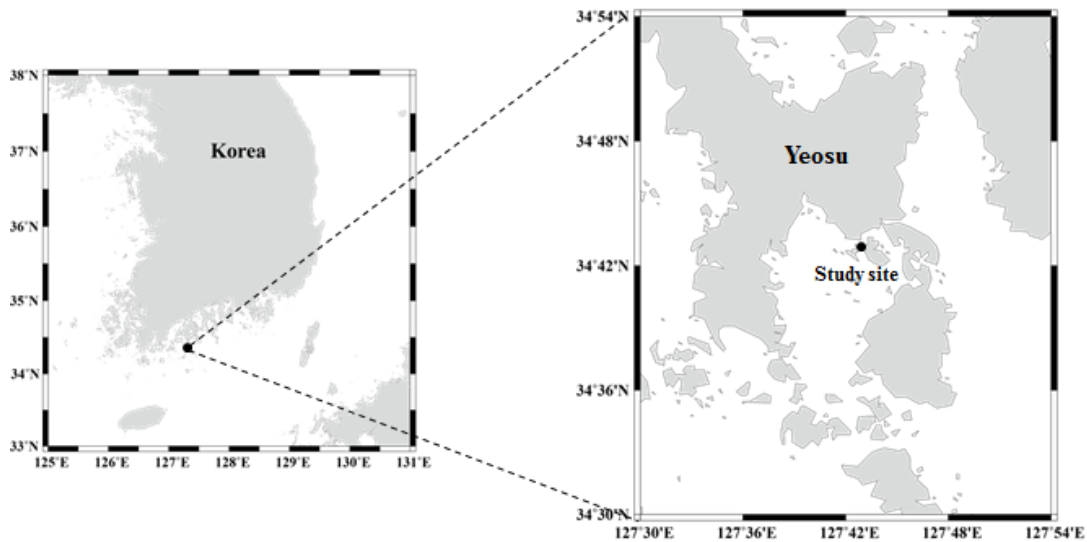


Fig. 2. *In situ* test area.



Fig. 3. Application of VIE tagging to sea cucumber.

해 각각 다음의 식과 같은 회귀 모형을 설정하였다.

$$SGR_t = \alpha + \beta_1 \times Temp._t + \beta_2 \times Temp._t^2 + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$SGR_f(A, L, M, S) = \alpha + \beta_1 \times D_density + \beta_2 \times D_density^2 + \varepsilon_f \quad (4)$$

(3) 식은 해삼이 성장 (SGR_t)함에 있어 수온 ($Temp.$)의 영향을 분석하기 위한 회귀모형이고, (4) 식은 해삼의 성장에 대한 입식 밀도의 영향을 분석하기 위한 회귀 모형으로 해삼의 개체 크기 [전체 (A), 대형 (L), 중형 (M), 소형 (S)]별 최종 성장률 (SGR_f)을 종속 변수로 하고 최종 입식 밀도에서 초기 입식 밀도의 차이 ($D_density$)를 독립 변수로 두었다. 또한 (3), (4) 식에서 ε 는 오차항(error term)이고, t 는 측정 시간이다.

결 과

해양 환경 조건

2014년 10월 30일부터 2015년 1월 7일까지 70일간 10분 간격으로 연속 측정된 시험 해역의 수온과 염분 자료는 Fig. 4와 같다. 이것에서 보면, 이 기간 동안 최고 수온은 19.75°C이었고, 최저 수온은 5.43°C이었으며, 평균 수온은 12.01°C이었다. 또한 염분의 경우 최고치는 33.34 psu이었고, 최저치는 28.73 psu이었으며, 평균은 30.06 psu이었다. 실험 기간 동안 측정된 용존산소

및 수소이온농도를 월별로 측정된 결과, 용존 산소는 7.32~11.79 ppm이었고, 수소이온농도는 7.77~8.0의 범위로 나타났다.

생존율과 성장률

생존율

수용 밀도에 따른 해삼 개체 크기별 생존율은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 밀도 (a)와 밀도 (e) 외의 다른 실험구의 경우 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다($P>0.1$). 개체 크기별 해삼의 생존율은 평균 89%로 높게 나타났고, 중형 (M) 개체에서 해삼의 생존율이 100%로 가장 높았으나, 소형 (S) 개체의 경우 생존율이 58%로 가장 낮았다 ($P<0.1$). 그리고 수용 밀도를 고려하는 경우 밀도 (e)에서 해삼의 생존율이 평균 73%로 다른 실험구의 생존율 (a: 89%, b: 84%, c: 78%, d: 86%)보다 낮게 나타났다. 그러나 입식 밀도와 관계 없이 전체적으로 중형 (M) 개체에서 해삼의 생존율이 높게 나타났다 ($P<0.05$).

성장률

해삼 양성 기구 내 수용 밀도 및 해삼 개체별 해삼의 성장률은 Table 1과 같다. Table 1에서 (a)~(d)의 밀도 그룹은 성장률이 크게 차이가 나타나지 않았으나 ($P>0.05$), (e)에서는 다른 그룹보다 성장률이 평균 0.3%

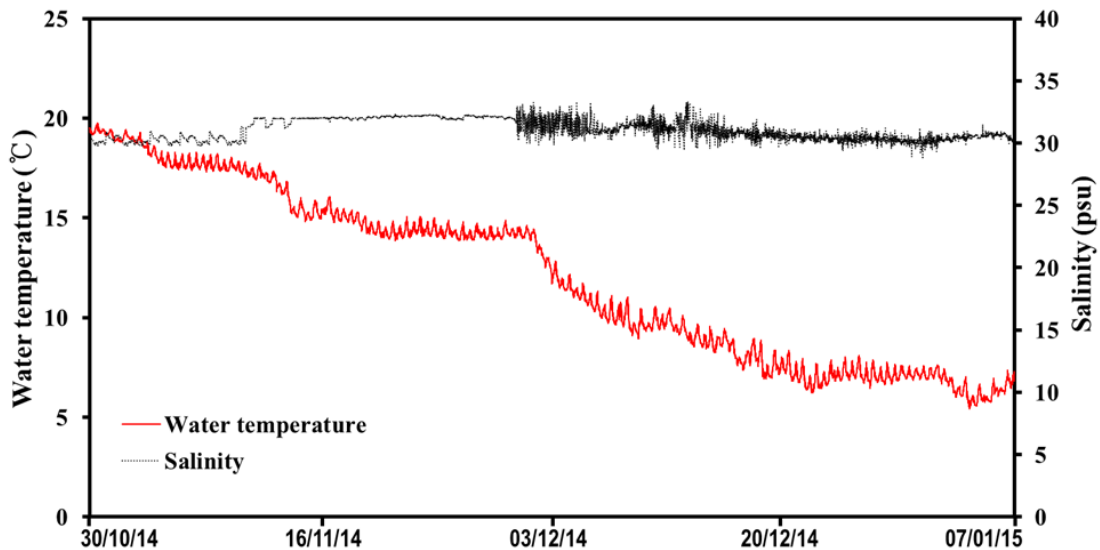


Fig. 4. Time series of water temperature and salinity *in situ*.

Table 1. Specific growth rate (SGR) of sea cucumbers by stocking density and body sizes *in situ* test

Stocking density (g/m ²)	Body size group	Initial wet body weight (g)	Final wet body weight (g)	SGR (% day ⁻¹)
150 (a)	Small	5.15 ± 1.14	8.41 ± 0.85	0.70
	Medium	12.34 ± 2.29	17.43 ± 2.28	0.49
	Large	23.26 ± 2.23	34.50 ± 5.07	0.56
300 (b)	Small	5.15 ± 1.14	9.00 ± 1.00	0.79
	Medium	12.34 ± 2.29	17.54 ± 2.29	0.50
	Large	23.26 ± 2.23	32.08 ± 3.49	0.46
450 (c)	Small	5.15 ± 1.14	8.00 ± 0.10	0.63
	Medium	12.34 ± 2.29	15.94 ± 2.61	0.37
	Large	23.26 ± 2.23	30.83 ± 6.38	0.40
600 (d)	Small	5.15 ± 1.14	7.55 ± 0.38	0.55
	Medium	12.34 ± 2.29	15.55 ± 1.83	0.33
	Large	23.26 ± 2.23	29.90 ± 3.58	0.36
850 (e)	Small	5.15 ± 1.14	7.19 ± 0.82	0.48
	Medium	12.34 ± 2.29	14.08 ± 1.08	0.19
	Large	23.26 ± 2.23	21.85 ± 1.92	-0.09

(a)~(e) : The sea cucumbers were divided into five groups on the stocking density.

day⁻¹가 낮게 나타났다 ($P < 0.05$). 또한 전체적으로 소형 (S) 개체 해삼의 성장률 (SGR)이 평균 0.63% day⁻¹로 중형 (M)의 0.38% day⁻¹과 대형 (L)의 0.34% day⁻¹보다 높게 나타났다.

회귀분석 결과

수온의 영향

해삼의 성장에 있어 수온의 영향에 대한 회귀 분석 결과는 (5) 식 및 Fig. 6과 같다. 먼저 실험 기간인 70일 간 측정할 수온인 19.75~5.43℃의 범위에서 회귀 분석을 해 보면, 수온 11℃에서 0.58% day⁻¹로 겨울철 해상에서 해삼이 성장 가능한 임계 수온으로 나타났다. 그

러나 결정 계수 (R -squared)의 값이 0.2로 매우 낮아 F -statistic의 값은 5% 유의 수준 (significant level)에서 기각시켰기 때문에 회귀 모델 전체가 통계적으로 유의성이 매우 높게 나타났다.

$$SGR_t = -0.587417 + 0.215952 \times Temp. - 0.009950 \times Temp.^2 \quad (5)$$

입식 밀도의 영향

전기한 바와 같이 Fig. 5와 Table 1에서 초기 입식 밀도에 대한 해삼의 생존율 및 성장률에 대한 영향을 통계 분석한 결과, 수온 밀도 (a)~(d)인 150~600 g/m² 사이에서는 큰 차이가 나지 않았다.

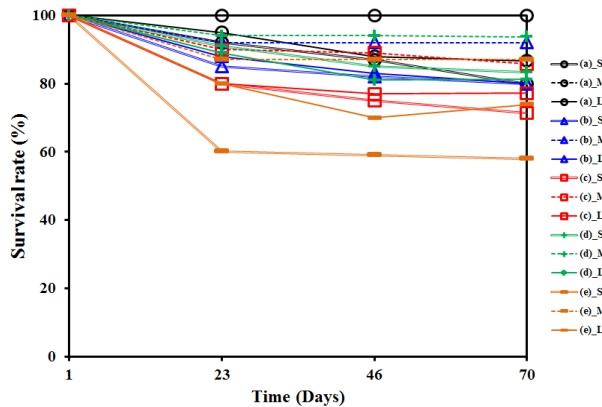


Fig. 5. Survival rates of sea cucumber by body size (S: small, M: medium and L: large) and stocking densities (a-e).

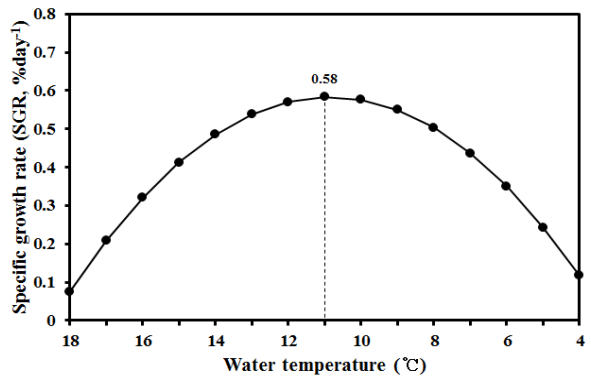


Fig. 6. Estimation of growth of sea cucumber as function of water temperature in Eq. 5.

Table 2 Results of the regression analysis for the effect of stocking density on growth of sea cucumbers

Variable	Eq. 6 (A)	Eq. 7 (L)	Eq. 8 (M)	Eq.9 (S)
	Coefficient (SGR_f)			
a	0.517150***	0.422247***	0.434523***	0.694644***
$\beta_1 \times D_density$	0.000972**	0.001666**	0.000707*	0.000542*
$\beta_2 \times D_density^2$	-0.000006**	-0.000008**	-0.000005*	-0.000005*
R ²	0.47	0.96	0.88	0.80

*** $P < 0.01$, ** $P < 0.05$, * $P < 0.1$

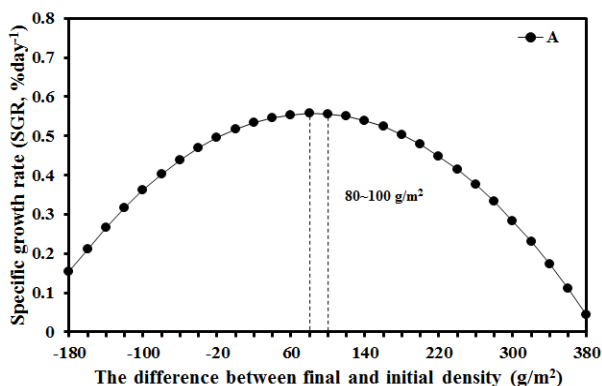


Fig. 7. Estimation of growth of all sea cucumbers (A) as function of stocking density in Table 2 (Eq. 6).

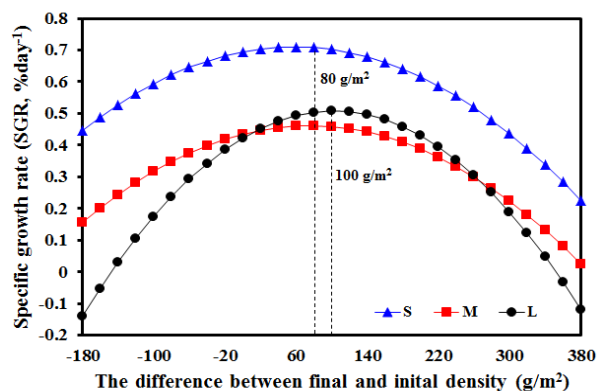


Fig. 8. Estimation of growth of small (S), medium (M) and large (L) sea cucumber as function of stocking density in Table 2 (Eqs. 7-9).

한편, 해삼이 성장함에 따라 변화하는 입식 밀도의 영향에 대해 분석한 결과는 Fig. 7과 8 및 Table 2와 같다. 이들에서 보면, 해삼 개체 크기의 구분 없이 전체적 (A)으로 초기 입식 밀도 (a)~(e)에서 각각 80~100 g/m² 만큼 증가한 경우, 해삼의 SGR이 0.56% day⁻¹로 성장 임계 입식 밀도로 나타났다 [Fig. 6, Table 2 (Eq.

6)]. 또한 개체 크기별로 구분하여 입식 밀도의 영향을 분석한 결과, 소형 (S)과 중형 (M)개체는 초기 입식 밀도에서 80 g/m² 만큼 증가한 경우 SGR이 각각 0.71과 0.46% day⁻¹로 성장 임계 입식 밀도로 나타났다. 그리고 대형(L) 개체의 경우 입식 밀도가 100 g/m² 만큼 증가한 경우 해삼의 SGR이 0.51% day⁻¹로 성장 임계 밀도로 나타났다 [Fig. 8, Table 2 (Eqs. 7~9)].

고찰

수온의 영향

수온은 해삼의 성장에 있어서 가장 중요한 요인 중의 하나이므로 (Dong et al., 2006; Yang et al., 2005), 해삼의 적수온에 대해 지금까지 비교적 많은 연구가 수행되었다. 해삼의 적수온에 대해 Yu and Song (1999)은 10~16°C, Chen (2004)은 10~20°C, Yang et al. (2005)은 14~15°C, Kang et al. (2012)은 8~15°C와 같이 연구 결과가 매우 다양하지만, 하한 수온에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 또한 해삼은 봄과 가을철에 빠르게 성장하고 (Bao et al., 2010), 수온이 높아지는 여름철과 수온이 낮아지는 겨울철에는 성장이 감소한다고 알려져 있다 (Chang et al., 2004). 특히, 수온이 20~25°C 이상이 되는 여름철에는 하면 상태에 들어가며 (Yang et al., 2005; Chen et al., 2007), 수온이 3°C 이하가 되는 겨울철에는 동면 상태에 들어간다 (Tanikawa et al., 1955; Yu and Song, 1999). 이와 같이 해삼이 하면 또는 동면 상태에 들어가면 먹이 섭식을 중단하고 활동이 줄어들며 (Bao et al., 2010), 대사율은 60~99%로 급격히 낮아진다 (Guppy and Withers, 1999; Buck and Brian, 2000; Wilz and Heldmaier, 2000; Jackson, 2002).

전기한 바와 같이, 이 실험은 수온 19.75~5.43°C 범위에서 수행되었는데, 수용 밀도 그룹에 상관없이 전체적으로 실험 46일째 해삼의 성장률이 가장 높게 나타났

고, 70일째에는 46일째에 비해 평균 SGR이 -0.13% day⁻¹로 해삼의 성장이 감소하였다. 그리고 실험 기간별 평균 수온을 비교하면 1~23일째 평균 수온은 16.55°C 이고, 24~46일째 평균 수온은 11.92°C , 47~70일째 평균 수온은 7.15°C 로서 수온 11°C 까지는 해삼이 지속적으로 성장하고 있는 것을 알 수 있다 (Fig. 6). 또한 해삼의 개체 크기별로 비교해 보면, 수온 밀도 그룹에 관계 없이 실험 후 46일째까지는 소형 그룹 해삼의 SGR은 0.84% day⁻¹로 중형 (0.47% day⁻¹)과 대형 그룹 해삼의 SGR (0.40% day⁻¹) 보다 높게 나타났다. 그러나 46일째 부터 70일째까지 소형 그룹 해삼의 SGR은 -0.21% day⁻¹로 중형 그룹 (-0.10% day⁻¹)과 대형 그룹 (-0.07% day⁻¹) 해삼보다 낮게 나타났다.

Chen (2004)의 연구 결과에 의하면, 25°C 이상의 고 수온에서는 25 g 이하의 해삼은 하면을 하지 않는다는 연구 결과가 있다. 그러나 이 실험에서는 수온이 감소하는 겨울철에 실험을 수행한 결과, 5 g 이하의 소형 개체는 수온 11°C 까지는 중형 (12 g)이나 대형 (23 g) 개체보다 성장률이 높았지만, 11°C 이하의 수온에서는 중형이나 대형 개체보다 성장에 있어 수온에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 상기와 같은 겨울철 해삼의 성장에 관한 연구 결과는 기존의 연구 결과에서도 잘 나타나 있다. 즉, 지수식 양어장에서 333일간 먹이 지급 및 미지급 상태에서 밀도에 따른 해삼의 성장률에 대해 조사한 Qin et al. (2009)의 연구 결과, 겨울철에는 해삼의 체중이 $0.22\sim 0.40\%$ 로 감소하였고, 반대로 봄과 가을철에는 해삼의 체중이 회복되었다. 그리고 해상에서 295일간 저층에 이종 튜브식 해삼 양식 기구를 연속 수하식 방식으로 설치하여 해삼의 생물학적 성능에 대해서 조사한 Oh (2013)의 연구 결과, 여름철에 감소하였던 해삼의 체중이 가을철에 점차 회복된 듯 보였으나, 겨울철에는 체중이 다시 감소하였다. 또한 못 양식으로 해삼을 양성한 Chang et al. (2004)의 연구 결과, 수온이 낮아지는 겨울철과 수온이 높아지는 여름철의 경우 성장이 감소하였다.

입식 밀도의 영향

밀도는 생물의 생존 및 성장 등에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이다 (Rowlanda et al., 2006). 즉 입식 밀도가 높으면 생물의 성장이 감소하고

(Qin et al., 2009), 수질을 악화시킬 뿐만 아니라 용존산소가 낮아져서 생물의 스트레스가 증가되어 사망의 원인이 된다 (Beveridge, 1996; Schmittou, 1996; Wu et al., 2000). 반면, 입식 밀도가 낮으면 해삼의 서식 공간이 너무 커져서 효율적인 양성이 어렵다 (Li et al., 2007; Liu et al., 2002).

Dong et al. (2010b)은 $27.95\sim 300.5$ g/0.1 m³의 초기 입식 밀도 조건에서 해삼 (*A. japonicus*)의 성장을 비교한 결과, 20 ind./100 L (104 g/0.1 m³)에서 해삼의 SGR이 1.16% day⁻¹로 성장률이 가장 높게 나타났으며, 이 밀도의 범위에서 낮거나 높은 실험구에서는 오히려 해삼의 성장률이 낮게 나타났다. Dong et al. (2010b)의 연구를 본 연구와 비교해 보면, 이 실험에서 사용한 양식 기구의 총 체적은 0.23 m³로 (앞에서는 면적의 단위로 3.3 m²이고 최대 4.01 m²로 함) 초기 입식 무게가 239 g일 때 해삼의 성장에 최적의 밀도가 되고, 150 g/0.23 m³에서 해삼의 평균 SGR이 0.59% day⁻¹로 가장 높게 나타났으나, 300~600 g/0.23 m³의 평균 성장률과 통계적으로 큰 차이가 나타나지 않았다 ($P>0.05$).

한편, Slater and Carton (2007)은 초기 평균 무게가 109.1 g인 해삼 (*Australostichopus*)을 대상으로 초기 입식 밀도에 대해 조사한 결과, $2.5\sim 5$ ind./m² 범위에서 해삼이 최대로 성장하였으며, 해삼의 성장에 적합한 적정 초기 밀도는 $220\sim 550$ g/m²로 본 실험의 성장 적정 초기 밀도 ($150\sim 600$ g/m²)와 유사하게 나타났다. 또한 26, 130 및 260 g/m²의 초기 입식 밀도 중 26 g/m²에서 해삼 (*Holothuroidea*)의 SGR이 0.6% day⁻¹로 가장 높게 나타났으며, 260 g/m²에서는 해삼의 성장률이 감소하였다 (Ramofafia et al., 1997). 그리고 Battaglene et al. (1999)은 초기 입식 밀도가 $6\sim 32$ g/m²인 해삼 (*H. scabra*)의 경우 입식 밀도가 약 225 g/m²에 도달하면 성장이 감소한다고 하였다. 또한 해삼 (*H. scabra*)은 초기 입식 밀도 33.84 g/m²에서 밀도가 317 g/m²로 증가하면 SGR이 0.4% 로 최대로 나타났으나, 그 이후에는 점차 성장이 감소하는 경향이 나타났다 (Pitt et al., 2004). Qin et al. (2009)은 먹이 지급 및 미지급 조건에서 해삼 (*A. japonicus*) 성장을 위한 적정 밀도를 22.3 ind./m² (111.5 g/m²)와 14.1 ind./m² (70.5 g/m²)로 제시하였다. Li and Li (2010)은 홍해삼 유생을 대상으로 입식 밀도 (0.05, 0.1, 0.2, 0.4 및 0.8 larvae/mL)를 달리하여 홍해

삼의 생존과 성장을 비교해 본 결과, 수용 밀도가 0.1 larvae/mL에서 생존율이 $93.0 \pm 2.2\%$ 로 0.8 larvae/mL (생존율 $68.3 \pm 3.0\%$)보다 높았다. 그리고 SGR의 경우에도 수용 밀도가 0.1 larvae/mL에서 $90.5 \pm 1.1\%$ 로 0.8 larvae/mL (SGR $65.8 \pm 1.5\%$)보다 높게 나타났다.

상기와 같이 해삼의 적정 수용 밀도를 구명하기 위한 연구가 비교적 많이 진행되었으며, 결론적으로 초기 입식 밀도가 낮을수록 해삼의 성장률이 높게 나타났다 (Ramofafia et al., 1997; Pitt et al., 2004; Slater and Carton, 2007; Li and Li, 2010). 즉, 해삼의 성장에 요구되는 임계 성장 밀도가 존재하였으나 (Ramofafia et al., 1997; Battaglione et al., 1999; Pitt et al., 2004), 본 연구에서는 밀도 그룹 150~600 g/m² 사이에서는 해삼의 성장률에서 큰 차이가 나지 않았다. 그러나 입식 밀도 (a)~(e) 그룹에서 각각 80~100 g/m² 만큼 증가하는 경우 해삼의 성장 임계 밀도가 나타났다 (Fig. 7). 그리고 해삼이 초기 밀도가 높거나 낮음에 상관없이 각 실험 밀도 (150~600 g/m²)에 적용한 이후부터는 초기 밀도와 상관없이 해삼의 성장은 증가하는 밀도의 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

해삼의 개체 크기별로 성장률을 분석해 보면, 대형 개체는 입식 밀도가 100 g/m² 만큼 증가하면 최대 성장률이 나타났으나, 소형 및 중형 개체의 경우 각 실험구의 밀도가 80 g/m² 만큼 증가한 경우 최대 성장이 나타났다 (Fig. 8). 이에 비해 Dong et al. (2010b)은 소형 (3.46 g), 중형 (6.40 g) 및 대형 (9.36 g)의 해삼을 대상으로 입식 밀도와 개체 크기에 대한 영향을 분석해 본 결과, 소형 개체는 대형 개체와 함께 서식하면 스트레스로 인하여 먹이 섭취량이 감소하여 성장에 영향을 받는다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 소형 개체의 SGR이 0.63% day⁻¹로 중형 (0.38% day⁻¹) 및 대형 (0.34% day⁻¹) 개체의 SGR보다 높게 나타났다. 따라서 소형 개체의 해삼은 개체 크기 간 영향보다는 수온이나 수용 밀도 등과 같은 요인들에 좀 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

결론

이 연구에서는 수온의 변화에 따른 해삼 양성 기구의 적정 입식 밀도를 구명하기 위하여 해삼 양성 기구의 단위 면적당 해삼의 초기 수용 밀도를 달리하고, 해삼

을 무게에 따라 소형, 중형 및 대형으로 나눈 총 576마리의 해삼 표피에 VIE 표지를 주입한 해삼을 대상으로 해상에서 70일간 추적 조사를 실시하여 해삼의 생존율과 성장률을 조사하였다. 먼저, 실험 해역의 수온인 19.75~5.43℃의 범위 중 수온 11℃에서 해삼의 성장률이 0.58% day⁻¹로 나타나 겨울철 해삼의 성장에 적합한 임계 수온이 11℃임을 확인하였다. 그리고 해삼이 성장함에 따라 변화하는 입식 밀도의 영향에 대해 분석한 결과, 해삼 개체 크기에 관계없이 초기 입식 밀도 (150~600 g/m²)에서 80~100 g/m² 만큼 증가하면, 해삼의 SGR은 0.56% day⁻¹로 증가하였다. 또한 해삼의 개체 크기별 입식 밀도의 영향을 분석한 결과, 소형 및 중형 그룹 개체의 경우 초기 입식 밀도에서 80 g/m² 만큼 증가하면 해삼의 SGR이 각각 0.71과 0.46% day⁻¹로 증가하였고, 대형 그룹 개체의 경우 입식 밀도가 100 g/m² 만큼 증가하면 SGR이 0.51% day⁻¹로 나타났다. 따라서 소형 개체의 해삼은 중형 및 대형 개체보다 수온 및 입식 밀도 변화와 같은 요인들의 영향에 더 민감하게 반응을 하였으므로 금후 이 부분에 대해서는 좀 더 나은 연구가 요구된다.

사사

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2016R1D1A1B03930185).

References

- Asha PS and Diwakar K. 2013. Effect of stocking density on the hatching rate, larval and early juvenile rearing of edible sea cucumber *Holothuria scabra* (Jaeger, 1883). Indian J Geo-Mar Sci 42, 191-195.
- Bao J, Dong S, Tian X, Wang F, Gao Q and Dong Y. 2010. Metabolic rates and biochemical compositions of *Apostichopus japonicus* (Selenka) tissue during periods of inactivity. Chin J Ocean Limnol 28, 218-223. (DOI:10.1007/s00343-010-9016-3)
- Battaglione SC and Bell JD. 1999. Potential of the tropical Indo-Pacific sea cucumber, *Holothuria scabra*, for stock enhancement. Stock enhancement and sea ranching. Oxford UK: Blackwell Science, 478-490.
- Battaglione SC, Seymour JE and Ramofafia C. 1999. Survival

- and growth of cultured juvenile sea cucumbers, *Holothuria scabra*. *Aquaculture* 178(3), 293-322. (DOI:10.1016/S0044-8486(99)00130-1)
- Beveridge MCM. 1996. *Cage Aquaculture*. Fishing News Books Carlton. 346.
- Buck CL and Barnes BM. 2000. Effects of ambient temperature on metabolic rate, respiratory quotient, and torpor in an arctic hibernator. *Am J Physiol Regulatory, Integrative Comp Physiol* 279, R255-R262.
- Chang YQ, Yu CQ, Song X. 2004. Pond culture of sea cucumber, *Apostichopus japonicus* in Dalian. In: Lovatelli A, Conand C, Purcell S, Uthicke S, Hamel J-F, Mercier Aeds. *Advances in Sea Cucumber Aquaculture and Management*. FAO Rome Italy. 269-272.
- Chen Y. 2004. Present status and prospects of sea cucumber industry in China. In: *Advances in sea cucumber aquaculture and management*. FAO Rome Italy, 269-272.
- Dong G, Dong S, Wang F and Tian X. 2010a. Effects of materials, incubation time and colors of artificial shelters on behavior of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquacult Eng* 43, 1-5. (DOI:10.1016/j.aquaeng.2010.01.002)
- Dong S, Liang M, Gao Q Wang F, Dong Y and Tian X. 2010b. Intra-specific effects of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) with reference to stocking density and body size. *Aquacult Res* 41(8), 1170-1178. (DOI:10.1111/j.1365-2109.2009.02404.x)
- Dong Y, Dong S, Tian X, Wang F and Zhang M. 2006. Effects of diel temperature fluctuations on growth, oxygen consumption and proximate body composition in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka. *Aquaculture* 255, 514-521. (DOI:10.1016/j.aquaculture.2005.12.013)
- Guppy M and Withers P. 1999. Metabolic depression in animals: physiological perspectives and biochemical generalizations. *Bio Rev* 74, 1-40. (DOI:10.1111/j.1469-185X.1999.tb00180.x)
- Jackson DC. 2002. Hibernating without oxygen: physiological adaptations of the painted turtle. *J Physiol* 543, 731-737. (DOI:10.1113/jphysiol.2002.024729)
- Kirshenbaum S, Feindel S and Chen Y. 2006. A study of tagging methods for the sea cucumber *Cucumaria frondosa* in the waters off Maine. *Fish Bull* 104(2), 299-302.
- Kang SJ, Kang SW, Kang JH, Jeong WC, Jin SD, Choi BD and Han JC. 2012. *Sea cucumber aquaculture technology*. *Aquainfo* 426.
- Kim BG. 2005. A study on the development of a fish trap-culture apparatus for sea cucumber. Master Thesis, Cheju Nat'l Univ 60 (in Korean with English abstract).
- Kim TH, Yoon HS, Shin SS, Oh MH, Kwon IY, Lee JH, Choi SD and Jeong KS. 2015. Physical and biological evaluation of co-culture cage systems for grow-out of juvenile abalone, *Haliotis discus hannai*, with juvenile sea cucumber, *Apostichopus japonicus* (Selenka), with CFD analysis and indoor seawater tanks. *Aquaculture* 447, 86-101. (DOI:10.1016/j.aquaculture.2014.07.001)
- KOSIS 2015. Total fishery production. Retrieved from <http://www.kostat.go.kr>.
- Levin VS. 1982. Japanese sea cucumber. *Academy of Sciences, Vladivostok, Union of Soviet Socialist Republics*, 191.
- Li L and Li Q. 2010. Effects of stocking density, temperature, and salinity on larval survival and growth of the red race of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquacul Int* 18, 447-460. (DOI:10.1007/s10499-009-9256-4)
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF). 2012. A study on pilot study for sea cucumber. 450 (in Korean).
- Li X, Dong S, Lei Y and Li Y. 2007. The effect of stocking density of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* on rice and crab seed yields in rice-crab culture systems. *Aquaculture* 273, 487-493. (DOI:10.1016/j.aquaculture.2007.10.028)
- Liu X, Gu B and Zhang X. 2002. Analyses and counter measures on common problems occurring in hatcheries of sea cucumber. *Mod Fish Mes* 26-27.
- Oh MH 2013. Performance evaluation of subsurface cage system for sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, grow-out by numerical modeling and in-situ tests. Ph.D. Thesis, Chonnam Nat'l Univ Korea, p. 32 (in Korean with English abstract).
- Pitt R, Duy NDQ, Duy TV and Long HTC. 2004. Sandfish (*Holothuria scabra*) with shrimp (*Litopenaeus Stylirostris*) co-culture tank trials. *SPC beche-de-mer Information Bull* 20, 12-22.

- Purcell SW, Blockmans BF and Nash WJ. 2006. Efficacy of chemical markers and physical tags for large-scale release of an exploited holothurian. *J Exp Mar Bio Eco* 334(2), 283-293. (DOI:10.1016/j.jembe.2006.02.007)
- Qin C, Dong S, Tan F, Tian X, Wang F, Dong Y and Gao Q. 2009. Optimization of stocking density for the sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka, under feed-supplement and non-feed-supplement regimes in pond culture. *J Ocean Univ Chin* 8(3), 296-302. (DOI:10.1007/s11802-009-0296-1)
- Ramofafia C, Foyle TP and Bell JD. 1997. Growth of juvenile *Actinopyga mauritiana* (Holothuroidea) in captivity. *Aquaculture* 152(1), 119-128. (DOI:10.1016/S0044-8486(96)01525-6)
- Rowlanda SJ, Mifsuda C, Nixon M and Boydb P. 2006. Effects of stocking density on the performance of the Australian freshwater silver perch (*Bidyanus bidyanus*) in cages. *Aquaculture* 253, 301-308. (DOI:10.1016/j.aquaculture.2005.04.049)
- 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(1), 389-398. (DOI:10.1016/j.aquaculture.2007.07.230)
- Tanikawa E, Akiba M and Yoshitani S. 1955. Studies on the nutritive value of the meat of sea cucumber (*Stichopus japonicus*, Selenka)- II. Seasonal changes of chemical components of the meat of *Stichopus japonicus*. *Bull Faculty Fish Hokkaido Univ* 5, 341-345.
- Schmittou HR. 1996. Freshwater cage fish culture and the environment in China. *Book of Abstracts, World Aquaculture '96 World Aquacul Soc*, 358-359.
- Sloan NA. 1984. Echinoderm fisheries of the world: A review. In: Keegan. BF. O'Connor BDS (eds) *Echinodermata* (Proceedings of the 15th international echinoderm conference). A A Balkema Publishers Rotterdam, 109-124.
- Wilz M and Heldmaier G. 2000. Comparison of hibernation, aestivation and daily torpor in the edible dormouse, *Glis glis*. *J Comp Physiol B*, 170, 511-521. (DOI:10.1007/s003600000129)
- Wu Z. 2000. Current status and sustainability of cage culture in reservoirs: a case study in China. In 1. *International Symposium on Cage Aquaculture in Asia, Tungkang, Pintung(Taiwan)*, 2-6 Nov 1999. AFS; WAS-SC.
- Yang H, Yuan X, Zhou Y, Mao Y, Zhang T and Liu Y. 2005. Effects of body size and water temperature on food consumption and growth in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) with special reference to aestivation. *Aquacul Res* 36, 1085-1092. (DOI:10.1111/j.1365-2109.2005.01325.x)
- Yu D and Song B. 1999. Variation of survival rates and growth characteristics of pond cultural juvenile *Apostichopus japonicus*. *J Fish Sci Chin* 6, 119-120.
-
2016. 12. 19 Received
2017. 02. 11 Revised
2017. 02. 11 Accepted