

해상 실험에 의한 침하식 해삼 양성 기구의 생물학적 성능 평가

오무환 · 권인영¹ · 김태호^{2*}

써브오션(주), ¹전남대학교 수산과학과, ²전남대학교 해양기술학부

Biological performance evaluation of tubular subsurface cage system for sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, grow-out by *in-situ* tests

Moo-Hwan OH, Inyeong KWON¹, Taeho KIM^{2*}

SubOcean Co., Ltd, Ulsan 608-808, Republic of Korea

¹Department of Fisheries Science, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Republic of Korea

²Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Republic of Korea

The sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, is becoming an important aquaculture species in China, Japan and Korea. The purpose of this study is to evaluate the biological performance of a tubular type of subsurface cage for sea cucumber grow-out by *in-situ* tests. The cage structure was constructed of PP (polypropylene) frames and PP tubes ($\phi 130$ mm \times 24 pieces). A set of tests were conducted at a depth of 15 m near Seosaeng, Ulsan, Korea for 295 days (23 July, 2012 to 13 May, 2013). A total of 155 sea cucumbers were used and fed a mixed diet containing mud, mineral, wheat, fish meal, etc (3% of their body weight). At the end of the experiments, sea cucumber showed a higher survival rate in feed shelter (77.14%) rather than no feed shelter (64.71%). The specific growth rate (SGR) of sea cucumbers in feed condition (0.04% day⁻¹) was higher than that of no feed culture animals (-0.49% day⁻¹) during total experimental periods. The result was able to find a no significance difference in survival rate but a significance difference in SGR under feed and no feed treatments.

Keywords : Sea cucumber cage, Shelter, Tube, Growth rate, Survival rate

서 론

해삼 (*Apostichopus japonicus*)은 위도 35° N에서 44° N의 아시아 연안에 주로 분포하며, 외해수의 영향을 받는 우리나라의 전 연안에 서식하는 수산 무척추 동물이다 (Levin, 1982; MIFAFF, 2012). 또한 해삼은 우리나라를 비롯하여 중국, 일본 등에서 전통적으로 중요한 수산 자원으로 취급되어져 왔으나 (Sloan, 1984), 우리나라의 경우 자연산 해삼 생산량은 1990년에 2,491 MT이

었고 2000년에는 1,419 MT이었으며, 2002년에는 833 MT로 줄었다. 최근에는 인공 종묘에 의한 소규모의 씨뿌림 양식이 시도되면서 생산량이 회복되어 2010년에는 2,687 MT를 유지하고 있지만, 여전히 수요에 비해 생산량이 과부족한 실정이다 (Oh, 2013).

우리나라에서 자연산 해삼의 생산은 대부분 마을 어장에서 나잠 어업 (33%)과 근해 어업인 잠수기 어업 (28%)에 의해 이루어지고 있지만 생산성의 한계로 2009

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

년 이후로는 해삼의 생산량이 다소 감소 추세에 있으며, 최근에는 단가 급등으로 인해 해삼의 생산 금액이 지속적으로 상승되고 있다. 또한 우리나라와 중국 등에서 해삼의 소비량이 매년 지속적으로 증가하고 있으나 자연산 해삼만으로는 그 수요를 충족하지 못하고 있는 실정이다 (MIFAFF, 2012).

따라서 앞으로 우리나라에서도 해삼을 대량으로 생산하기 위해서는 해삼을 안정적으로 양성할 수 있는 새로운 해삼 양식 기구의 개발이 필요하다. 특히 우리나라의 경우 해삼 양식은 아직 개발 초기 단계로 국내 수요에 한정적이지만 향후 중국 등 해외 시장에서의 잠재력이 매우 큰 양식 산업으로 발전될 수 있기 때문에 새로운 환경 친화적 양식 방법에 의해 해삼을 대량으로 생산할 수 있는 적정 해삼 양식 기구의 개발이 필요하다.

지금까지 해삼 양식 기구의 개발을 통한 해삼의 생물학적 성능 평가에 대해 비교적 많은 연구가 수행되었다. 먼저 James (1999)가 인도산 해삼의 종묘 생산과 3종류의 소형 가두리에서 해삼의 생존과 성장에 관해 조사하였으며, Gavrilova and Kucheryavenko (2010)는 러시아 Peter the Great Bay의 해변 가두리 시설과 씨뿌림 양식장에서 해삼의 생존율과 성장률을 조사하였다. 그리고 Kim (2005)은 통발형 해삼 양식 기구를 제작하여 실내 수조 및 해상에서 그것의 성능 시험을 수행하였으며, NFRDI (2009)는 표층 및 반잠수식 해삼 가두리 시설을 제작하여 해상에서 해삼 단독 시험과 해삼 및 전복 복합 양식 시험을 실시하였다. 또한 Zhang et al. (2011)은 임시 물막이 시설인 코퍼 댐 (cofferdam)에서 해삼의 양성과 자원 증대를 위한 다층 구조의 해삼 어초를 개발하고 그것의 색상, 배치 간격 및 형태 등에 따른 해삼의 위집 상황에 관해 조사하였다. 최근에는 Purcell et al. (2012)이 열대 해역에서 해삼의 종묘 생산, 양식 방법 (못 양식, 복합 양식 및 해상 가두리 양식), 양식 밀도의 사회학적인 문제와 해삼 양식의 경제성 등에 대해 검토하였다. 그리고 Yokoyama (2013)는 어류 가두리 시설 아래에 해삼 양식 기구를 설치하여 해삼의 성장과 먹이 공급에 대해 조사하였으며, Yu et al. (2013)은 여름철 어류 양식장의 중층에 연승 수하식 해삼 양식 기구를 설치하고 저층에는 침하식 해삼 양식 기구를 설치하여 양식 기구의 설치 위치에 따른 해삼의 생존율과 성장률에 관해 비교 분석하였다.

이상에서와 같이 지금까지 해삼 양식 기구에 대한 생

물학적 평가는 대부분 표층에 설치되는 부유식 양식 기구를 대상으로 수행되었다. 그러나 표층에 해삼 양식 기구를 설치하여 해삼을 양성하는 경우에는 태풍, 높은 파도 등과 같은 대상 해역의 환경 외력에 시설물의 파손될 우려가 있을 뿐만 아니라 해삼이 해저에 있는 풍부한 유기물을 섭취할 수 없으므로 자연 상태와 같은 조건에서 해삼을 양성하기가 어렵다 (Oh et al., 2012).

따라서 파고와 수온의 변화 등 해상의 다양한 환경 조건에서도 해삼을 안정적으로 양성하기 위해 튜브형 셀터로 구성된 침하식 해삼 양식 기구를 연승 수하식 방법으로 해저에 설치한 후 장기간 해상 실험을 실시하고 수온 등 해양 환경의 변화와 자연 상태에서 먹이 지급 및 미지급 (유기물만 공급) 조건에 따른 해삼의 생존율과 성장률 등 침하식 해삼 양식 기구의 생물학적 성능을 조사하였다.

재료 및 방법

실험 재료

이 실험에서 사용한 해삼은 경남 창원시 진해 해역에서 잠수기 어업에 의해 채포된 초기 중량이 16.75 ± 9.17 g인 것으로 총 개체수는 155마리이었다.

이 실험에서 사용한 해삼 양성용 기구는 Fig. 1과 같이 길이가 1.1 m이고 폭이 1.1 m이며, 높이가 0.3 m인 이중 튜브 형태의 모델이다. 이 모델에는 해삼의 셀터로 사용되는 튜브가 프레임의 양 측면에 각 12개씩 총 24개가 설치되어 있다. 이 경우 셀터용 튜브의 길이는 550 mm이고 지름은 130 mm이며, 튜브안의 단면적은 0.13 m^2 이었다. 그리고 해삼이 밖으로 빠져 나가지 못하도록 튜브의 바깥쪽은 그물코의 크기가 5 mm인 플라스틱 그물감 형태로 구성되어 있다.

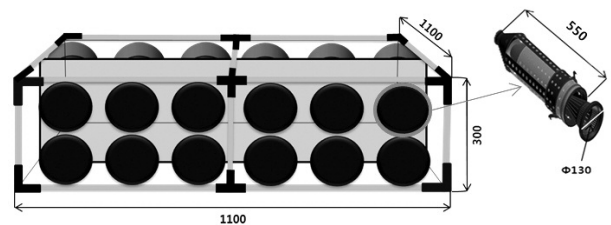


Fig. 1. Subsurface cage structure used in the experiment (unit: mm).

실험 방법

이 실험은 튜브형 해삼 양식 기구를 대상으로 수온의 변화와 먹이 지급 유무에 따른 해삼의 생존율과 성장률

을 비교하기 위하여 2012년 7월 23일부터 2013년 5월 13일까지 295일간 울산광역시 울주군 서생면 진하 해역

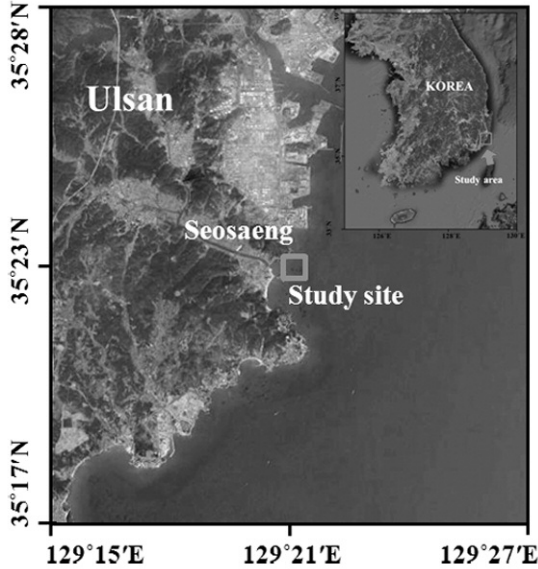


Fig. 2. Location of study area in Seosaeng, Ulsan, Korea.

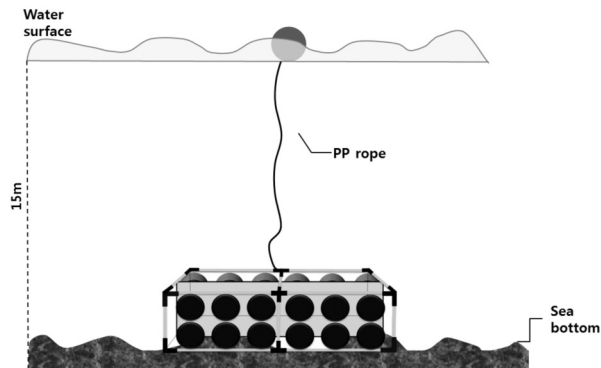
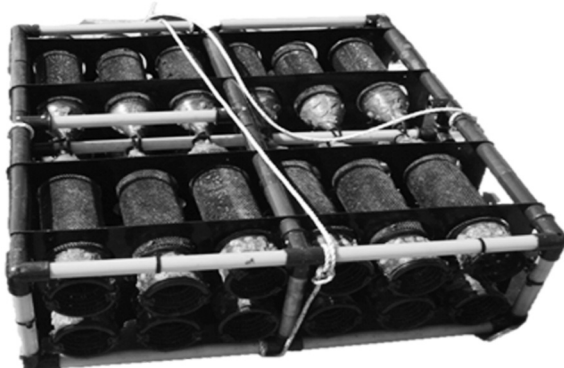


Fig. 3. Schematic of the subsurface cage system used in the experiment.



(N 35° 23' 15.5", E 129° 21' 19.4"; Fig. 2)에서 수행하였다. 실험 시 인근에 전복 양식장이 있고 저질이 펄이라서 유기물이 풍부한 수심 15 m 해역의 저층에 Fig. 3과 같이 이중 튜브식 해삼 양성 기구를 연승 수하식 방식으로 설치하였다. 실험을 위해 먼저 시료용 해삼을 튜브 안에 입식하였는데, 양성 기구의 좌측에 설치된 12개의 튜브형 셀터 중 7개의 셀터에는 해삼을 각 10마리씩 총 70마리를, 우측에 있는 12개의 셀터 중 9개의 셀터에는 총 85마리의 해삼을 넣되, 8개의 셀터에는 해삼 10마리, 1개의 셀터에는 해삼 5마리를 넣었다. 좌측 셀터에 입식된 70마리의 해삼에 대해서는 15일 간격으로 Fig. 4와 같이 먹이를 지급하였으며, 우측 셀터에 입식된 85마리의 해삼에 대해서는 먹이를 지급하지 않았다. 이 경우 먹이 지급 셀터에 사용된 먹이는 진흙, 보리, 어분, 미네랄, 연근 등으로 구성된 해삼 양성용 건식 혼합 사료였으며, 먹이 지급량은 해삼 습중량의 3%이었다 (Qin et al., 2009).

실험 시 저층에 연승 수하식으로 설치된 튜브식 해삼 양성 기구를 선박의 크레인으로 갑판 위로 들어 올려 각 셀터에 들어 있는 모든 해삼을 밖으로 꺼내서 각 셀터 안에 들어 있는 해삼의 개체수를 확인한 후 전자저울로 해삼의 습중량을 측정하였다. 이 경우 선박의 동요에 의한 저울의 흔들림을 최소화하기 위하여 스폰형 전자저울을 사용하였으며, 중량을 측정하기 전에 약 1분 동안 타월로 해삼의 몸에 묻어 있는 물기를 닦아내고 체내에 있는 물이 충분히 빠지도록 한 후 측정하였다. 전체 해삼에 대한 습중량 측정이 완료되면 각 셀터에 해삼을 다시 넣고 먹이 지급 셀터에는 먹이를 공급한 후 해삼 양성 기구를 다시 저층에 설치하였다.

한편, 해삼의 성장과 생존에 있어 수온이 매우 중요한 환경 요인 (Dong and Dong, 2006)이기 때문에 자기



Fig. 4. Feed supply to shelter for sea cucumber grow-out.

기록식 수온계 (TR-1060, RBR LTD, Canada)를 해삼 양생 기구에 부착하여 매 10분 간격으로 저층 수온을 연속 측정하였으며, 다항목 측정기 (YSI -556MPS)를 사용하여 염분, 용존산소 (DO) 및 수소이온농도 (pH)를 측정하였다.

결과 분석 방법

이 연구에서는 습증량을 이용하여 해삼의 일간 성장률 (specific growth rate: SGR)을 (1)식과 같이 계산하였다.

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

윗식에서 W_f 는 해삼의 최종 무게 (g)이고 W_i 는 해삼의 초기 무게 (g)이며, T 는 실험 일수이다.

해삼의 생존율 및 사망률은 각각 다음의 식으로 구하였다.

$$\text{생존율} (\%) = (n_f / n_i) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{사망률} (\%) = 100 - (\text{생존율}) \quad (3)$$

여기서 n_f 는 해삼의 최종 개체수이고, n_i 는 해삼의 초기 개체수이다.

실험 결과는 모두 통계 분석을 통해 상호간의 유의함을 증명하였으며, 해삼의 성장에 미치는 수온과 먹이 지급 유무의 영향에 따른 해삼의 성장을 두 부분으로 나누어 분석하였다. 먼저 해삼의 성장과 수온의 영향에 대해 상관 분석을 실시하였으며, 상관 분석은 두 변수 사이의 상관성을 알아보기 위한 것으로 Pearson의 상관 계수를 이용하여 두 연속형 변수 사이의 선형적인 상관성을 분석하였다. 그리고 먹이 지급 유무에 따른 해삼의 성장은 독립 표본 t 검정을 통해 두 집단 간 평균 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하였다. 이 검정은 students' s t-test라고도 불리며, 유의확률 $P < 0.05$ 보다 작으면 두 집단 간의 차이가 있으므로 귀무가설이 기각된다. 즉, 먹이 공급 유무에 따른 해삼의 성장이 두 집단 간에 차이가 나타난다는 것이다. 통계 분석에 사용한 소프트웨어는 SPSS ver. 21이었다.

결 과

해양 환경 조건

Fig. 5는 2012년 7월 23일부터 2013년 5월 13일까지 295일 동안 10분 간격으로 연속 측정된 시험 해역의 저층 수온 자료이다. 이것에서 보면 실험 기간 동안 최고

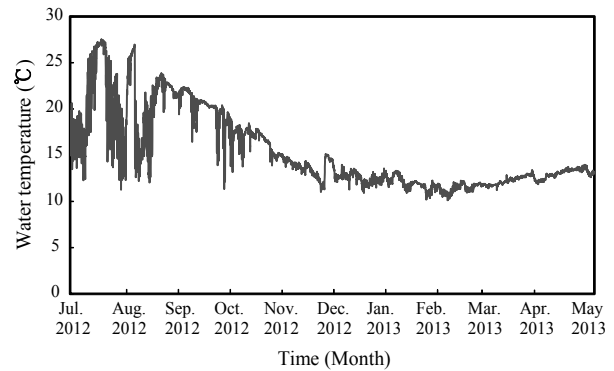


Fig. 5. Daily water temperature in study area.

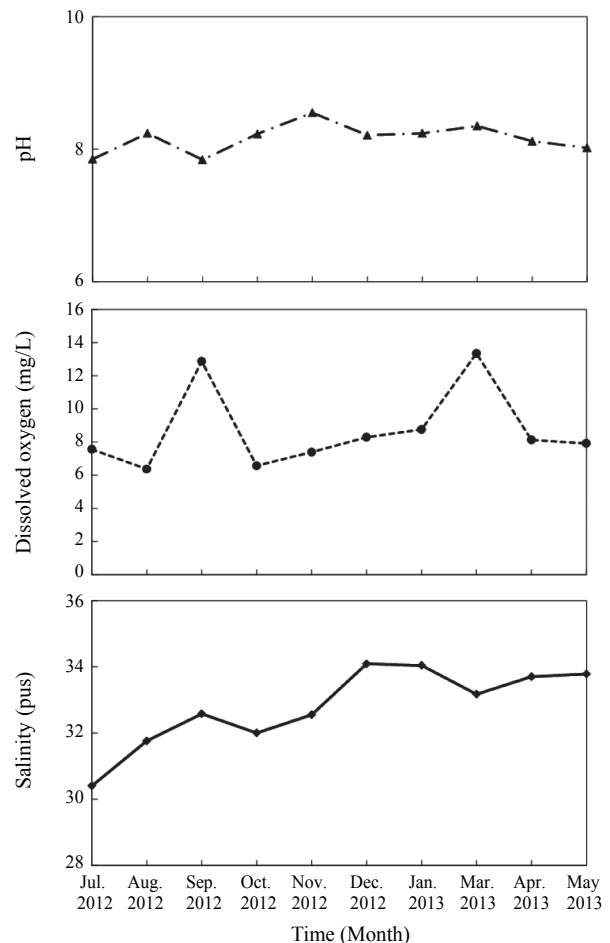


Fig. 6. Monthly variation of salinity, dissolved oxygen and pH in study area.

수온은 27.54°C이었고 최저 수온은 10.12°C이었으며, 평균 수온은 15.56°C이었다. 또한 이 그림에서 보면, 실험 해역의 경우 20°C 이상의 수온이 8월 2일부터 10월

17일까지 72일 동안 빈번하게 나타났으며, 특히 25°C 이상의 수온이 8월 4일부터 약 1주일간 지속되는 등 여름철에는 25°C 이상의 수온의 2차례나 나타났다. 그리고 여름철에는 동해안 냉수대의 영향으로 수온의 변동 폭이 매우 크게 나타났다.

실험 해역의 염분, 용존산소 (DO)와 수소이온농도 (pH)를 월별로 측정된 결과는 Fig. 6과 같다. 이것에서 보면, 실험 기간 동안 측정된 염분은 31.97~34.04 psu이고 용존산소는 6.37~13.35 mg/L이었으며, 수소이온농도는 7.84~8.55의 범위로 나타났다.

해삼의 생존율 및 성장률

Fig. 7은 먹이 지급 및 미지급에 따른 해삼의 생존율을 나타낸 것이다. 이것에서 보면, 실험 기간 295일 동안 튜브식 해삼 양식 기구에 입식한 해삼의 생존율은 먹이 지급 셀터가 먹이 미지급 셀터보다 높게 나타났다. 즉 먹이 지급 셀터의 경우 해삼의 생존율이 2012년 8월에는 90% (63마리)이고 10월에는 88.57% (62마리)이었으며, 최종 생존율은 77.14% (54마리)로 나타났다. 이에 비해 먹이 미지급 셀터의 경우 2012년 7월부터 9월까지 100% (85마리)의 생존율을 보였고, 10월부터 생존율이 감소하여 최종적으로 64.71% (55마리)가 생존하였다.

Table 1은 먹이 지급 및 미지급 셀터에서 해삼의 성장률을 조사한 것이다. 이것에서 보면, 먹이 지급 셀터에서 해삼의 초기 중량은 14.39±8.20 g이었고 최종 중량이 19.38±8.77 g으로 SGR은 0.04% (day⁻¹)로 나타났다. 이에 비해 먹이 미지급 셀터에서는 해삼의 초기 중량이 19.11±10.14 g이었고 최종 중량은 4.54±3.85 g이었으며,

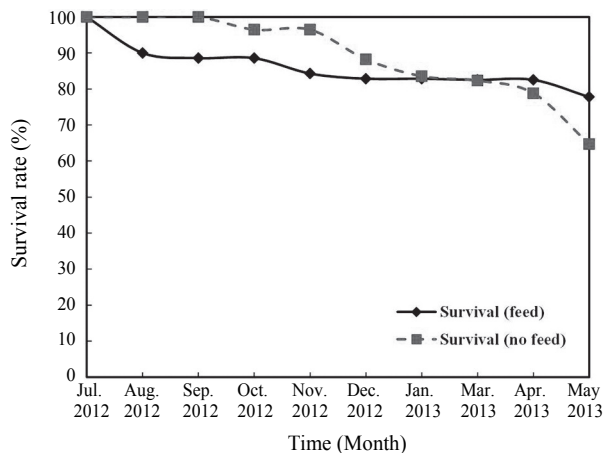


Fig. 7. Survival rate of sea cucumber in feed and no feed condition.

Table 1. Growth of the sea cucumber in feed and no feed condition

Condition	Initial wet body weight (g)	Final wet body weight (g)	SGR (% day ⁻¹)
Feed	14.39 ± 8.20	19.38 ± 8.77	0.04
No Feed	19.11 ± 10.14	4.54 ± 3.85	-0.49

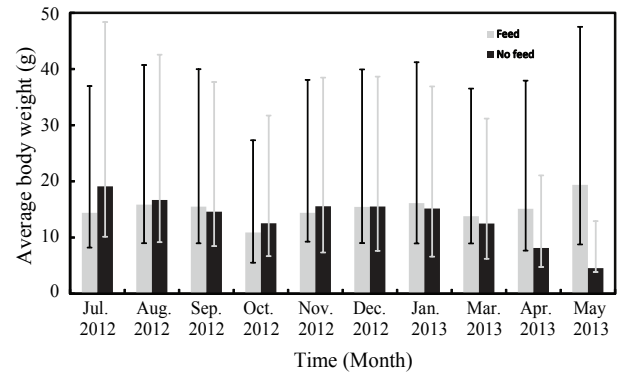


Fig. 8. Average body weight of sea cucumber in feed and no feed condition.

며, SGR은 -0.49% (day⁻¹)로 나타났다.

이상에서와 같이 먹이 지급 셀터에서는 해삼이 성장을 하였으나, 먹이 미지급 셀터에서는 해삼의 중량이 점차 감소하고 있다.

Fig. 8은 실험 기간 동안 해삼의 습중량 변화를 나타낸 것이다. 이것에서 보면 먹이 지급 및 미지급 셀터에서 모두 실험 초기부터 2012년 8월부터 10월까지 중량이 감소하였지만 여름철이 지나고 11월부터 점차 중량이 회복되었으며, 겨울철에는 감소하는 경향을 보였다. 그리고 2013년 3월 이후에는 먹이 지급 셀터에서는 해삼이 체중이 점차적으로 증가하였으나 먹이 미지급 셀터에서는 해삼의 체중이 급격히 감소하고 있다.

통계 분석 결과

Table 2는 해삼의 생존과 성장에 수온이 영향을 미치는 지에 대한 상관 분석을 수행한 결과이고, Fig. 9는 수온의 변화에 따른 해삼의 생존과 성장의 상관성을 나타낸 것이다. 이들 자료에서 보면, SGR의 경우 먹이 지급 및 미지급 셀터에서 모두 유의성이 나타나지 않았다. 이에 반해 생존율은 양쪽 모두 먹이 미지급 셀터의 경우 P<0.01, 먹이 지급 셀터의 경우 P<0.05 수준에서 유의함이 나타났다. 이와 같은 결과는 해삼의 생존에 수온이 영향을 미쳤다는 것을 의미한다.

Table 3은 먹이 지급과 미지급 셀터의 생물학적 성능

을 독립 표본 t검정한 결과이다. 이것에서 보면, 레벤 (Levene)의 등분산 검정을 통해 먹이 지급 및 미지급 셀터에서의 SGR은 P값이 0.429로 등분산성을 갖고, 생존율은 P값이 0.007이므로 등분산성을 갖지 않는다는 것

Table 2. Pearson product-moment correlation coefficient (values with different superscripts are significantly different) for survival rate and SGR of sea cucumber

Parameters		Feed	No feed
Survival rate	Pearson's correlation	0.593*	0.765**
	P-value	0.025	0.001
SGR	Pearson's correlation	0.144	-0.469
	P-value	0.624	0.091

*P<0.05, **P<0.01

을 알 수 있다 (P < 0.05). 또한 t검정을 통해 먹이 지급과 미지급 셀터에서 평균이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉, 생존율의 P값은 0.274이고 SGR의 P값은 0.003으로 나타나 P값이 0.050보다 작으므로 대립 가설이 채택되어 먹이 지급과 먹이 미지급 셀터 두 집단간의 평균이 같지 않다는 것이 검증되었다.

Table 4는 먹이 지급 및 미지급 셀터에서의 등분산 검정과 t검정 결과로서, 두 셀터에서 t 값이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것에서 보면, SGR이 두 집단간에 차이가 있다는 것을 전제로 하여 평균 값을 비교해 보면, SGR은 먹이 지급 셀터에서 0.11%로 더 높게 나타났으며, 생존율은 두 집단에서 차이가 나지 않았다.

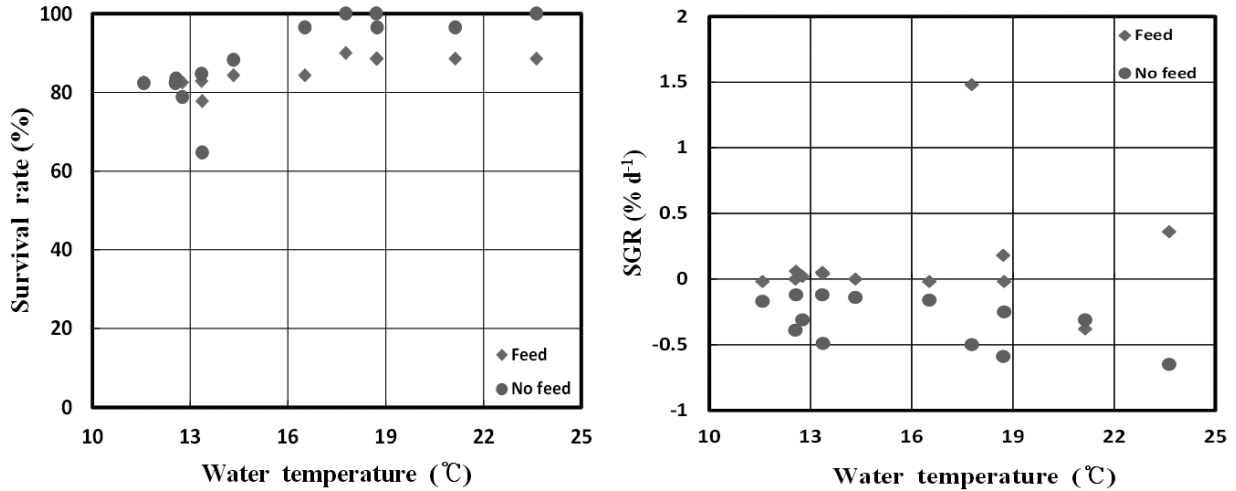


Fig. 9. Correlation for the survival and growth rates of sea cucumber according to the change of water temperature.

Table 3. Student's t-test for the coefficient the significance of difference in survival rate and SGR in feed and no feed condition (P<0.05)

Parameters		Levene's test for equality of variances		t-test for equality of means					95% confidence interval of the difference	
		F	P-value	t-score	df	P-value (2-sided)	Mean difference	Std. Error difference	Lower	Upper
Survival rate	Equal variances assumed (Student's Test)	8.506	0.007	-1.126	26	0.271	-3.584	3.184	-10.128	2.960
	Equal variances not assumed (Welch's Test)			-1.126	19.091	0.274	-3.584	3.184	-10.246	3.077
SGR	Equal variances assumed (Student's Test)	0.646	0.429	3.276	26	0.003	0.412	0.126	0.154	0.671
	Equal variances not assumed (Welch's Test)			3.276	18.352	0.004	0.412	0.126	0.148	0.676

Table 4. Results of student's *t*-test and descriptive statistics

Parameters	Condition	Variable	Mean	Standard deviation	Degree of freedom	t value
Survival rate	Feed	14	85.99	5.31	19.09	-1.126
	No feed	14	89.58	10.65		
SGR	Feed	14	0.11	0.42	26	3.276
	No feed	14	-0.30	0.20		

고찰

전 세계적으로 해삼의 소비는 점점 증가하고 있지만, 현재의 해삼 생산 시스템으로는 그 수요를 충족시키는 데에는 한계가 있다. 우리나라의 경우 자연산 해삼은 마을 어장의 해녀들과 근해 어업인 잠수기 어업에서 대부분 포획되고 있다. 그러나 이와 같은 해삼 채포 방법으로는 안정적인 해삼의 생산에 한계가 있기 때문에 최근 자연산 해삼의 생산량이 감소되고 있다. 따라서 해삼의 생산량을 늘리기 위해서는 새로운 해삼 양성용 전용 기구의 개발이 필요하다.

이 연구에서는 2012년 7월부터 2013년 5월까지 295일 동안 울산광역시 울주군 서생면 진하리에 위치한 해역의 저층에 튜브형 셀터로 구성된 침하식 해삼 양성 기구를 설치하고 각 셀터에 해삼을 입식시킨 후 먹이 지급 유무에 따른 해삼의 생존율과 성장률을 조사하였다. 조사 결과, 전기한 바와 같이 해삼의 생존율은 먹이 지급 셀터에서 77.14% (54마리), 미지급 셀터에서 64.71% (55마리)로 나타났으며, 성장률 SGR은 먹이 지급 셀터에서 0.04% (day^{-1})이고 먹이 미지급 셀터에서 -0.49% (day^{-1})로 나타났다.

이상에서와 같이 먹이 지급 유무에 따른 해삼의 성장을 비교해 보면, 먹이 지급 및 미지급 셀터에서 모두 실험 초기부터 8월부터 10월까지는 해삼의 체중이 감소하였지만 여름철이 지나고 11월부터 점차 체중이 회복되었으며, 겨울철에는 감소하는 듯하였으나, 3월부터 먹이 지급 셀터에서는 점차적으로 증가하였고, 이에 반해 먹이 미지급에서는 3월부터 급격히 감소하고 있다. 이와 같은 결과가 도출된 요인으로는 수온 등 대상 해역의 해양 환경 특성, 먹이 지급 유무, 셀터의 구조적 특성 등으로 사료된다.

수온 등 해양 환경 요인의 영향

수온은 해삼의 성장에 있어서 가장 중요한 요인 중의

하나이다 (Dong and Dong, 2006; Yang et al., 2006). 이 연구에서는 전 실험 기간 동안 실험 해역의 저층 수온은 10분간 연속으로 측정하였다. 전기한 바와 같이 실험 기간 중 최고 수온은 27.54°C 이었고 최저 수온은 10.12°C 이었으며, 평균 수온은 15.56°C 이었다. 해삼은 생존과 성장에 수온의 영향을 많이 받는데, 특히 수온이 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 이상이 되면 해삼이 하면 상태에 들어간다 (Liu et al., 1996; Yang et al., 2005; Dong and Dong, 2006; Chen et al., 2007; An et al., 2007). 이와 같이 해삼이 하면 상태에 들어가면 체중의 40~50%가 감소하고 대규모 폐사가 일어난다 (Wang et al., 2011).

그런데 실험 해역에서는 25°C 이상의 수온이 8월 4일부터 약 1주일간 지속되었고, 그 이후에도 8월 25일부터 7일까지 2일간 지속되었다. 그 후 8월과 9월의 평균 수온은 21°C 이었고, 10월의 평균 수온은 19°C 로 나타났다. 이 기간 중 먹이 지급 셀터에서 해삼의 SGR은 7월에는 1.48% (day^{-1})로 증가하였으나 8월부터 10월까지는 -0.38% (day^{-1})로 나타났다. 그리고 2012년 11월부터 2013년 1월까지의 경우 평균 수온이 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 로 내려감에 따라 먹이 지급 셀터에서 SGR이 다시 0.06% (day^{-1})으로 상승하였다. 그리고 2월부터는 수온이 12°C 이하로 내려감에 따라 해삼의 SGR이 다소 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 해삼의 SGR 변화는 실험 해역의 수온에 의해 영향을 받았다고 사료된다. 즉, 어린 해삼의 경우 최적 수온은 $12\sim 18^{\circ}\text{C}$ 이므로 (Dong and Dong, 2004), 실험 기간 중 평균 수온이 적수온 범위에 있었던 11월에서부터 1월까지의 해삼이 성장하였으나, 2월에는 수온이 12°C 이하로 내려감에 따라 SGR도 감소하였다. 그리고 3월부터 수온이 12°C 로 점차 올라갔으며, 이에 따라 먹이 지급 셀터에서는 해삼이 지속적으로 성장을 하였다.

한편, 무게가 25 g 이하인 해삼은 25°C 이상의 수온에서도 하면을 하지 않는다는 보고 (Chen, 2004)가 있으나, 이 연구에서 사용한 해삼의 초기 중량은 16.75 ± 9.17 g

인 어린 개체임에도 불구하고 SGR이 감소하였기 때문에 하면을 한 것으로 판단된다. 이에 비해, 먹이 미지급 셀터에서는 8월부터 1월까지의 먹이 지급 셀터와 비슷한 성장 유형을 보였으나, 수온이 12°C 이하로 내려가는 겨울철부터 SGR이 감소하기 시작하여, 3월부터 SGR이 급격하게 감소하였다.

이 연구에서 조사한 해삼의 SGR을 기존 연구 결과와 비교해 보면, 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다. Table 5에서와 같이 Yang et al. (2005)의 연구 결과, 수온 18°C에서 해삼의 SGR은 1.22~2.35% (day⁻¹)이었으며, Dong and Dong (2006)의 연구 결과, 어린 해삼의 SGR은 적정 수온인 15°C에서 1.7% (day⁻¹)이었고 10°C에서는 0.8% (day⁻¹)로 나타났다. 또한 Yokoyama (2013)가 해상 어류 가두리 양식장 밑에 해삼 양생용 셀터를 설치하여 다영양 입체 양식 (integrated multi-trophic aquaculture; IMTA)으로 238일간 실험한 결과, 해삼의 SGR은 2.4~4.1% (day⁻¹)로 나타났다. 이에 비해 An et al. (2007)의 경우 수온이 20°C 이상이 되면 해삼이 (-) 성장을 하였으며, 적정 수온인 16~18°C에서는 SGR이 0.1% (day⁻¹)로 이 연구 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 상기와 같은 해삼의 SGR에 관한 연구 결과는 실험 대상 해삼의 크기와 조사 장소, 시기 및 방법 등에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에 이들 결과를 직접 비교하는 것은 무리가 있으므로 금후 해삼의 SGR 조사에 관해 보다 나은 연구가 필요하다.

이상에서와 같이 해삼의 성장은 수온의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있는데, 먼저 실내 수조에서 수온을 인위적으로 변화시켜 수온과 해삼의 성장을 조사한 선행 연구 결과들을 검토해 보면, 해삼은 수온이 18°C가 되면 활동성이 줄어들고 20°C 이상이 되면 먹이 섭식을 중지하고 성장을 하지 않는다고 한다 (Sui and Liao 1988; Yang et al., 2005). 또한 일주기로 수온을 변화시킨 상태에서 해삼의 적수온을 조사한 연구에서는 16~18°C의 수온 범위에서 SGR이 1.48% (day⁻¹)로 가장 높게 나타났다 (Dong and Dong, 2006). 그리고 해삼의 체장과 수온의 변화에 따른 먹이 소비 및 성장률을 조사한 연구 (Yang et al., 2005)에서는 해삼의 적수온이 14~15°C이었고, An et al. (2007)의 경우 해삼의 적수온이 16°C라고 하는 등 해삼의 적수온에 대해서는 다양한 연구 결과가 있다.

그러나 이 연구에서는 수온을 인위적으로 변화시킨

것이 아니라 자연 상태의 계절적인 수온 변동 조건에서 해삼의 성장을 조사하였다. 즉, 변동 수온은 수산 생물에 스트레스 요인으로 작용하나 (Meeuwig et al., 2004), 해삼의 경우 생리적인 한계 수온인 0~30°C에서는 성장이 가속화 된다고 한다 (Dong and Dong, 2006). 이 연구와 유사한 조건에서 해삼의 계절적인 성장 유형을 조사한 연구 (Yamana et al., 2009)에서는 해삼의 출현 빈도가 겨울철에 증가하였고 여름철에는 감소하였다. 특히, 12월부터 다음 해 2월까지 겨울철에 해삼의 중량이 현저하게 증가하였다.

한편, 먹이 공급과 먹이를 공급하지 않는 상태에서 333일간 해상 가두리에서 해삼의 성장률에 대해 조사한 결과, 여름철 하면기와 겨울철에는 해삼의 체중이 감소하였으며, 봄과 가을철에는 반대로 해삼의 체중이 회복되었다 (Qin et al., 2009).

Fig. 7에서 보면, 해삼의 생존율은 먹이 지급과 미지급 셀터에서 모두 2013년 1월까지 80% 이상으로 높게 나타났으나, 수온이 내려가는 2013년 2월부터 생존율이 감소하여 해삼의 최종 생존율은 먹이 지급 셀터에서 77.14% (54마리), 미지급 셀터에서 64.71% (55마리)로 나타났다. 그런데 여름철에 25°C 이상의 고수온기가 2차례나 출현하였고, 특히 10일간 지속되었음에도 불구하고 해삼의 개체수는 거의 감소하지 않았다. 이와 같이 25°C 이상의 고수온에서도 해삼이 생존할 수 있었던 이유는 해삼의 서식 한계 수온의 범위가 0~30°C (Asha and Muthiah, 2005)이고, 이 연구에서 시료로 사용한 해삼의 경우 초기 중량이 16.75±9.17 g인 어린 개체였기 때문에 고수온이 해삼의 SGR에는 영향을 미쳤지만 생존율에는 거의 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

한편, 염분과 용존산소도 해삼의 생존과 성장에 영향을 미치는데, 먼저 해삼의 서식 염분 범위는 29~33 psu이고 최적 염분은 32 psu이다 (Chen, 2007). 그러나 실험 해역에서 측정된 염분은 31.97~34.04 psu로 해삼의 서식 염분 범위보다 다소 높았기 때문에 염분도 해삼의 성장에 다소 영향을 미친 것으로 사료된다. 그리고 저층에 해삼 양생 기구를 설치하여 해삼을 양생하는 경우에는 용존산소도 해삼의 생존과 성장에 영향을 미치지만, 용존산소량이 3.2 mg/L 이상이면 해삼의 성장에 거의 영향을 주지 않는다 (Yu et al., 2013). 따라서 이 연구에서는 실험 해역의 용존 산소량이 6.37~13.35 mg/L이었기 때문에 용존산소는 해삼의 생존과 성장에 영향을 미치

Table 5. Literature values for the specific growth rate (SGR) of sea cucumber in field studies and indoor culture experiments in terms of wet weight

Culture method	Variable	Periods (days)	Optimal water temperature (°C)	Initial body weight (g)	Final body weight (g)	SGR (% day ⁻¹)	Source
Indoor tank	Water temperature (constant and fluctuating)	35	18±2	2.75±0.09	6.19±0.27	2.35±0.29	Dong and Dong. (2006)
Indoor tank	Body size and water temperature	168	14–15	36.5±1.2	42.5±2.1	0.09	Yang et al. (2005)
Indoor tank	Water temperature	40	16	35.9	45.4	0.58	Ji et al. (2008)
Indoor tank	Water temperature (fluctuating)	70	15±2	9.68±0.79	31.82±2.48	1.78±0.23	Dong et al. (2006)
Indoor tank			18±2	8.88±0.27	29.92±2.56	1.74±0.12	
Subsurface sea cage	Feed and No feed	295	12–15 (Range : 10.91–27.54)	14.39±8.20	19.38±8.77	0.44	This study (feed)
				19.11±10.14	4.54±3.85	-0.49	This study (no feed)

지 않은 것으로 판단된다.

먹이 지급 유무의 영향

전기한 바와 같이 실험 기간 동안 먹이 지급 셀터에는 약 15일 또는 30일마다 진흙, 어분, 미네랄, 보리 등이 혼합된 해삼용 건식 사료를 해삼 체중의 3%만큼 공급하였다. 이와 같이 먹이를 지급한 셀터와 지급하지 않는 셀터에서 해삼의 생존율과 성장률을 비교해 보면, 먼저 생존율의 경우 먹이 지급과 미지급 셀터에서 모두 비슷한 감소 추세를 보여 유의성이 나타나지 않았으나 먹이 지급 셀터에서 최종 생존율이 77.14% (54마리)로 먹이 미지급 셀터의 64.71% (55마리)보다 높게 나타났다. 일반적인 경우 먹이를 공급하는 것이 먹이를 공급하지 않는 것보다 해삼의 성장이 더 좋고, 생존율도 더 높다 (Qin et al., 2009). 그런데 Fig. 7에서 보면, 2012년 7월부터 12월까지는 먹이 지급 셀터에 비해 먹이 미지급 셀터에서 생존율이 오히려 더 높게 나타났다. 일반적으로 하면 중에 있는 해삼은 먹이를 먹지 않지만 좁은 튜브형 셀터 안에 들어 있는 해삼의 경우 먹이가 공급되면 하면 중일지라도 먹이를 먹기 위해 몸을 적극적으로 움직였고 이로 인해 에너지가 소모되었기 때문에 먹이 지급 셀터에서의 폐사율이 더 높게 나타났다고 사료된다. 또한 튜브형 셀터의 경우 그물 구조의 개방형 셀터보다 조류 소통이 잘 되지 않기 때문에 하면 중에 있는 해삼이 먹이를 먹지 않는 경우에는 먹이가 부패되어 셀터 내의 수질이 나빠지고 이로 인해 먹이를 공급한 셀터가 먹이를 공급하지

않는 셀터에 비해 생존율이 낮게 나타난 것이라고 추론할 수도 있다. 그러나 먹이 지급 유무에 따른 하면 중에 있는 해삼의 생존율에 대해서는 금후 좀 더 나은 연구가 요구된다.

한편, 이 연구에서 조사한 해삼의 최종 생존율은 최대 77.14%로 Yokoyama (2013)의 95%에 비해 생존율이 17% 정도 낮게 나타났다. 따라서 이 연구에서 개발한 해삼 셀터의 실용화를 위해서는 해삼의 생존율을 최소 90%까지 유지할 수 있는 양성 방법의 개발이 필요하다.

성장률의 경우에도 먹이 지급 셀터에서 다소 높게 나타났다으며, 통계 분석 결과, 해삼의 성장률은 $P < 0.05$ 수준에서 유의하다고 나타났다 (Table 2). 그러나 통계 분석 결과만을 토대로 먹이 지급 조건이 미지급 조건보다 해삼의 성장 측면에서 더 좋다는 결론을 내리기는 어렵다.

따라서 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 실험 해역의 지형적인 특성과 유속 등의 해황을 고려할 필요가 있다. 즉, 해삼의 섭식은 해저에 있는 유기물의 양뿐만 아니라 광 주기나 유속 등의 영향도 받는다 (Hamel and Mercier, 1998; Singh et al., 1999). 특히 해삼은 0.04~0.4 m/s 범위의 유속에서 섭이 활동이 자유롭게 하며, 유속이 0.55 m/s 이상으로 다소 빨라지면 해삼의 섭이 활동이 줄어든다 (Holtz and Macdonald, 2009). 그러나 실험 해역의 경우 연간 평균 유속이 0.3 m/s 내외였기 때문에 (KEPRI, 2007), 이 해역에서는 해삼의 섭이 활동이 유속의 영향을 받지 않았을 것으로 판단된다.

양생 기구의 구조

해삼은 포식자로부터 몸을 보호하고 빛이 잘 들지 않는 곳에서 섭식 활동이 활발하게 이루어진다 (Zhongcheng and Yonglin, 1998; Zhang et al. 2011). 이와 같은 측면에서 은신처로서 해삼이 선호하는 색상은 자신의 몸 색깔과 비슷한 검정색과 회색이고, 이에 비해 파란색이나 녹색 또는 투명한 색은 선호하지 않은 것으로 나타났다 (Zhang et al. 2011). 또한 해삼은 그늘진 곳을 좋아하기 때문에 자신의 체색과 많이 다르거나 투명한 색상에서는 상대적으로 음영 효과가 떨어지기 때문에 이들 색상을 선호하지 않은 것으로 나타났다.

한편, Kim et al. (2012)의 연구 결과, 검은색 플라스틱으로 만든 성육장 아래에 자갈과 건축용 콘크리트 블록으로 만든 하면장으로 구성된 해삼 양생용 기구 모델을 실내 수조에 넣고 해삼의 행동 유형을 조사한 결과, 처음에는 해삼이 성육장과 하면장에서 활발하게 활동하다가 수조의 아랫쪽 모서리와 같이 구석진 곳으로 많이 이동하는 유형을 보였다. 이와 같은 행동 유형이 나타난 이유는 수조의 모서리 부분이 양생 기구의 모델이 설치된 곳보다 빛의 반사율이 적었기 때문이라고 사료된다.

이상에서와 같이 이 실험에서 사용한 해삼용 양생 기구는 Fig. 4에서와 같이 포식자로부터 몸을 보호할 수 있을 뿐만 아니라 해삼이 선호하는 검은색으로 제작되었기 때문에 해삼의 생존율과 같은 생물적인 성능을 최대한 높일 수 있는 기구라고 사료된다. 그러나 이 양생 기구에서 해삼의 생존율과 성장률을 높이기 위해서는 셀터 내의 조류 소통과 튜브형 셀터의 최적 밀도를 고려한 개체의 입식이 필요하다.

결 론

이 연구에서는 수온의 변화 등 해상의 다양한 환경 조건에서도 해삼을 안정적으로 양생하기 위해 튜브형 셀터로 구성된 침하식 해삼 양생 기구를 저층에 설치한 후 295일간 해상 실험을 실시한 결과, 해삼의 생존율은 먹이 지급 셀터에서 77.14% (54마리), 먹이 미지급 셀터에서 64.71% (55마리)로 나타났다. 그리고 해삼의 성장률 SGR (% day⁻¹)은 먹이 지급 셀터에서는 0.04로 나타나 해삼이 성장하였으나, 먹이 미지급 셀터에서는 -0.49로 나타나 성장을 하지 않았다.

수온과 해삼의 생존율과 성장률에 대해 통계 분석한 결과, SGR (% day⁻¹)의 경우 먹이 지급 및 미지급 셀터

에서 모두 유의성이 나타나지 않았다. 이에 비해 생존율은 양쪽 모두 먹이 미지급 셀터의 경우 $P < 0.01$, 먹이 지급 셀터의 경우 $P < 0.05$ 수준에서 유의함이 나타났다.

한편, 먹이 지급 셀터에서의 해삼의 생존율 및 성장률이 먹이 미지급 셀터보다 높았으며, 해삼의 성장률의 경우 통계적으로 유의성이 나타났다. 그러나 생존율은 먹이 지급과 미지급 셀터에서 모두 비슷한 감소 추세를 보여 유의함은 나타나지 않았다. 또한 해삼의 생존과 성장에 대한 수온의 영향을 분석해 본 결과, 수온이 해삼의 생존율에 가장 크게 영향을 미쳤다는 알 수 있었다.

그러나 이 연구에서 사용한 해삼 양생 기구에서 해삼의 생존율과 성장률을 보다 높이기 위해서는 튜브형 셀터의 최적 밀도를 고려한 개체의 입식이 필요하다. 따라서 급후 튜브형 해삼 양생 기구의 단위 면적당 해삼의 최적 입식 밀도를 구명(究明)하기 위한 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 해양수산부 수산실용화기술개발사업에 의 해 수행되었음.

References

- An Z., Dong Y.W., Dong S.L. 2007. Temperature effects on growth-ration relationships of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). *Aquaculture* 272, 644 – 648. (doi:10.1016/j.aquaculture.2007.08.038)
- Chen J. 2004. Present status and prospects of sea cucumber industry in China. In: *Advances in sea cucumber aquaculture and management*. FAO Rome Italy, 269 – 272.
- Chen Y., Gao F., Liu G.S., Shao L.P., Shi G.F. 2007. The effects of temperature, salinity and light cycle on the growth and behavior of *Apostichopus japonicus*. *J. of Fish of China* 5, 687 – 691 (in Chinese with English abstract).
- Dong Y.W., Dong S.L. 2006. Growth and oxygen consumption of the juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) at constant and fluctuating water temperature. *Aquaculture Res* 37, 1327 – 1333. (doi:10.1111/j.1365 – 2109.2006.01570)
- Dong Y.W., Dong S.L., Tian X.L., Wang F., Zhang M.Z. 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)
- GavriloVA G.S., Kucheravenko A.V. 2010. Commercial rearing of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* in Peter the Great

- Bay: Methodical peculiarities and results of the work of a mariculture farm in Sukhodol Bight. Russian J of Mar Biol 36 (7), 539 – 547. (doi:10.1134/S1063074010070072)
- Hamel J.F., Mercier A. 1998. Diet and feeding behaviour of the sea cucumber *Cucumaria frondosa* in the St. Lawrence estuary, eastern Canada. Canadian J of Zool 76 (6), 1194 – 1198. (doi:10.1139/z98 – 040)
- Holtz E.H., MacDonald B.A. 2009. Feeding behaviour of the sea cucumber *Cucumaria frondosa* (Echinodermata: Holothuroidea) in the laboratory and the field: Relationships between tentacle insertion rate, flow speed, and ingestion. Mar Biol 156, 1389 – 1398. (doi:10.1007/s00227 – 009 – 1179 – 0)
- James D.B. 1999. Hatchery and culture technology for the sea cucumber, *Holothuria scabra* Jaeger, in India. Naga, The ICLARM Quarterly 22 (4), 12 – 16.
- KEPRI. 2007. Environmental survey and assessment around the Gori nuclear power plant (2006 Annual Report), pp. 36.
- Kim B.G. 2005. A study on the development of a fish trap-culture apparatus for sea cucumber. Master Thesis, Cheju Nat' l Univ, pp. 60 (in Korean with English abstract).
- Kim K.I., Kang H.S., Jang J.W., Oh M.H., Kim T. 2012. Behaviour characteristics of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*, Slenka) by changing water temperature. Bull Inst Fish Tech, Chonnam Nat' l Univ, 5 (1), 9 – 17 (in Korean).
- Levin V.S. 1982. Japanese sea cucumber. Academy of Sciences, Vladivostok, Union of Soviet Socialist Republics, pp 191.
- Liu Y., Li F., Song B., Sun H., Zhang X., Gu B. 1996. Study on aestivating habit of sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka: Ecological characteristics of aestivation. J Fish Sci of China 3, 41 – 48 (in Chinese with English abstract).
- Meeuwig M.H., Dunham J.B., Hayes J.P., Vinard G.L. 2004. Effects of constant and cylindrical thermal regimes on growth and feeding of juvenile cutthroat of variable sizes. Ecol of Freshw Fish 13, 208 – 216. (doi:10.1111/j.1600 – 0633.2004.00052)
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF). 2012. A study on pilot study for sea cucumber, pp. 450 (in Korean).
- National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI). 2009. A practical trial of cage cultivation for *Stichopus japonicus*, pp. 118 (in Korean).
- Oh M.H., Kim T., Fredriksson D.W., DeCew J. 2012. Structural analysis of a subsurface cage for sea cucumber, *Stichopus japonicus* grow-out using numerical modeling techniques. Mar. Technol. Soc. J., 46 (5), 55 – 66. (doi:10.4031/MTSJ.46.5.8)
- Oh M.H. 2013. Performance evaluation of subsurface cage system for sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, grow out by numerical modeling and in-situ tests. Doctoral Thesis, Chonnam Nat' l Univ, pp. 125 (in Korean with English abstract).
- Purcell S.W., Hair C.A., Mills D.J. 2012. Sea cucumber culture, farming and sea ranching in the tropics: Progress, problems and opportunities. Aquaculture 368 – 369, 68 – 81. (doi:10.1016/j.aquaculture.2012.08.053)
- Qin C., Dong S., Tan F., Tian X., Wang F., Dong Y., 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 China 8 (3), 296 – 302. (doi:10.1007/s11802 – 009 – 0296 – 1)
- Singh R., MacDonald B.A., Thomas M.L.H., Lawton P. 1999. Patterns of seasonal and tidal feeding activity in the dendrochirote sea cucumber *Cucumaria frondosa* (Echinodermata: Holothuroidea) in the bay of fundy, Canada. Mar Ecol Prog Ser 187, 133 – 145. (doi:10.3354/meps187133)
- Sloan N.A. 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, pp. 109 – 124.
- Sui X. and Liao Y. 1988. Culture and enhance of sea cucumber. Monograph. China Agriculture Publishing House Beijing China (in Chinese with English abstract).
- Wang Q.L., Dong Y.W., Dong S.L., Wang F. 2011. Effects of heat-shock during pelagic stages on the thermal sensitivity of juvenile sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka. Aquacult Int 19, 1165 – 1175. (doi:10.1007/s10499 – 011 – 9436)
- Yamana Y., Hamano T., Goshima S. 2009. Seasonal distribution pattern of adult sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Stichopodidae) in Yoshimi Bay, western Yamaguchi Prefecture, Japan Fish Sci 3, 585 – 591. (doi:10.1007/s12562 – 009 – 0076 – 2)
- Yang H.S., Yuan X., Zhou Y., Mao Y., Zhang T., Liu Y. 2005. Effects of body size and water temperature on food consumption and growth in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Slenka) with special reference to aestivation. Aquaculture Res 36, 1085 – 1092. (doi:10.1111/j.1365 – 2109.2005.01325)
- Yang H.S., Zhou Y., Zhang T., Yuan X.T., Li X.X., Liu Y., Zhang F.S. 2006. Metabolic characteristics of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) during aestivation. J Exp Mar Ecol 330, 505 – 510. (doi:10.1016/j.jembe.2005.09.010)
- Yokoyama H. 2013. Growth and food source of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* cultured below fish cages-Potential for multi-trophic aquaculture. Aquaculture 372 – 375, 28 – 38.

(doi:10.1016/j.aquaculture.2012.10.022)

- Yu Z., Hu C., Zhou Y., Ki H., Peng P. 2013. Survival and growth of the sea cucumber *Holothuria leucospilota* brandt: A comparison between suspended and bottom cultures in a subtropical fish farm during summer. *Aquaculture Res* 44, 114 – 124. (doi: 10.1111/j.1365 – 2109.2011.03016)
- Zhang L., Yang H., Xu Q., Xing K., Zhao P., Lin C. 2011. A new system for the culture and stock enhancement of sea cucumber,

Apostichopus japonicus (Selenka), in cofferdams. *Aquaculture Res* 42, 1431 – 1439. (doi:10.1111/j.1365 – 2109.2010.02735)

Zhongcheng Y., Yonglin C., 1998. Habitat selection in animals. *Chinese J of Ecol* 17, 43 – 49.

2014. 4.14 Received

2014. 5.23 Revised

2014. 5.25 Accept