KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 59(5), 523-537, 2026

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 59(5),523-537,2026

계절별 수온 변화에 따른 해삼(*Apostichopus japonicus*)의 성장과 서식 분포

황성일 · 전병현[1] · 박춘탁[1] · 최석진[1]*

(주)수중생태기술연구소, [1](유)씨캠

Distribution and Growth of the Sea Cucumber (*Apostichopus japonicus*) under Seasonal Temperature Change

Sungil Hwang, Byeonghyeon Jeon[1], Chuntak Park[1] and Sokjin Choi[1]*

Underwater Ecology Institute Co. Ltd., Yeosu 59769, Republic of Korea
[1]Seacam Co. Ltd., Jeju 63069, Republic of Korea

The distribution and habitat use of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* in relation to seasonal changes in bottom water temperature were investigated in nursery grounds located in the Jinchon and Yeonji areas of Baengnyeongdo, Korea. During the study period, the water quality index (WQI) was classified as Grade I at both sites, and bottom water temperatures ranged from 11.0 to 20.2°C. A total of 348 and 309 individuals were observed in Jinchon and Yeonji, respectively. The lowest combined abundance across both sites occurred in September, whereas the highest abundance at both sites was recorded in December. Mean total length and wet weight were 15.3 cm and 143.81 g in Jinchon, and 14.6 cm and 118.92 g in Yeonji, respectively. During periods of elevated water temperature, most individuals were found beneath natural stones, artificial reefs, and within bedrock crevices. In contrast, under lower temperatures, their distribution expanded to exposed stone surfaces, mixed-sediment areas around artificial structures, and shallower depths. These findings indicate that natural stone-based habitats provide important refuges for *A. japonicus*. Therefore, habitat management strategies should consider seasonal temperature variation and temperature-dependent sheltering behavior.

Keywords: *Apostichopus japonicus*, Sea cucumber, Aestivation, Habitat structure, Natural stone habitat

서 론

해삼은 극피동물문(Echinodermata) 해삼강(Holothuroidea)에 속하는 생물로, 전 세계적으로 약 1,834종이 알려져 있고(WoRMS, 2026), 우리나라 연안에는 약 30여 종이 서식하거나 채집되는 것으로 보고되고 있다. 이들 가운데 경제적·산업적 가치가 가장 높은 종은 돌기해삼(*Apostichopus japonicus*, 이명 *Stichopus japonicus*)으로, 국내에서는 일반적으로 해삼 또는 참해삼이라 불린다(Park et al., 2013a; Kim et al., 2024). 영어권에서는 sea cucumber, 중국에서는 海蔘, 일본에서는 나마코(ナマコ)로 알려져 있다.

우리나라의 연간 해삼 생산량은 1980년대에는 연평균 3,000톤 이상이었으나, 1990년대에는 약 2,000톤 수준으로 감소하였고, 2000년대 이후에는 1,000톤 내외로 줄어들어 연안 해삼 자원은 감소하는 경향을 보이고 있다(Kang et al., 2012). 국제적으로도 자원 감소 우려가 제기되는 품종임에도 불구하고, 건강기능성 및 고급 식재료로 인식되면서 생산과 소비가 꾸준히 증가하고 있다. 최근에는 중국의 경제성장과 함께 해삼 소비가 급증하면서 국내 해삼의 수출 수요 또한 크게 증가하였다(Chen, 2004). 이에 따라 해삼은 국내에서 고가 수산물로 유통되고 있으며, 어획량 감소로 인해 공급이 수요를 충족하지 못하는 상황이 지속되면서 해삼 양식산업의 필요성이 크게 대두되고 있

***Corresponding author:** Tel: +82. 42. 487. 2981 Fax: +82. 42. 487. 2982
E-mail address: sokjin@yahoo.co.kr

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

https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0523
Korean J Fish Aquat Sci 59(5), 523-537, October 2026
Received 1 June 2026; **Revised** 10 July 2026; **Accepted** 11 August 2026
저자 직위: 황성일(대표이사), 전병현(대표이사), 박춘탁(잠수팀장), 최석진(연구소장)

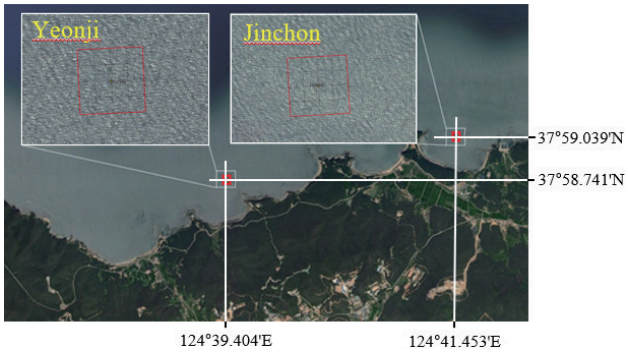


Fig. 1. Survey locations in the Jinchon and Yeonji sea areas.

다(Kang, 2012). 이와 같은 산업적 중요성을 반영하여 정부는 2013년부터 서해 5도 지원사업을 통해 수출 전략 품목으로서 해삼 양식산업을 집중 육성하고 있으며, 이를 통해 지역경제 활성화와 국가 경제 발전에 기여할 것으로 기대하고 있다.

최근 해삼 씨뿌림 사업과 해삼 자원조성사업이 활발히 추진되고 있고(Kim and Jeong, 2017), 해삼 서식장 조성을 위한 생리·생태학적 연구도 진행되고 있으나(Lee and Park, 1999; Park et al., 2007), 하절기 하면으로 인해 잠수조사 시 자원량 추정에 어려움을 겪고 있다. 해삼의 최적 서식 수온은 10–18℃로 알려져 있고(Li et al., 2002; Dong et al., 2006), 수온이 약 25℃ 이상으로 상승할 경우 대사활동을 최소화하여 성장을 멈추거나, 소화관이 퇴화되어 저서에 은신하는 하면(夏眠, aestivation) 현상을 나타내는 것으로 알려져 있다(Liu et al., 1996; Yang et al., 2005; Ji et al., 2008).

국내 해삼에 대한 본격적인 연구는 대중국 수출시장의 성장 가능성과 산업적 중요성이 부각되면서 시작되었다(Zhang and Liu, 1998). 현재까지 수행된 연구로는 서해안 해삼의 생식주기(Park et al., 2007), 고수온에서 해삼의 성장과 체지방 조성(Jeong et al., 2019), 서해안 돌기해삼 서식지의 저질 특성(Park et al., 2013b), 경북지역 해삼 종묘방류사업의 경제적 효과 분석(Park et al., 2013a; Lee et al., 2018) 등이 보고된 바 있다. 그러나 국내 자연환경에서 나타나는 여름철 해삼의 하면 특성 및 해삼 분포에 관한 현장 중심의 구체적인 조사 자료와 연구 사례는 부족한 실정이다.

본 연구는 백령도 진촌 및 연지 해역의 해삼 성육장에서 잠수조사를 실시하여 저층 수온 변화에 따른 돌기해삼(*A. japonicus*)의 출현 위치, 출현 개체수, 전장, 습중량 및 서식기질의 이용 특성을 해역별, 계절별로 수행하였다. 이를 토대로 고수온기 은신 행동과 저수온기 활동 특성을 해삼 성육장 관리 관점에서 분석하고, 해삼 서식단지의 서식환경과 서식기반 특성을 평가하여 향후 자원 관리 및 서식지 조성을 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

해삼 성육장 조사위치 선정 및 조사라인 설치

해삼 성육장의 현장조사 및 잠수조사는 2019년 8월부터 12월에 옹진군 백령도 진촌 해역과 연지 해역의 조사라인이 설치된 해역에서 각각 6회 조사를 실시하였다. Fig. 1은 옹진군 백령도 진촌, 연지 해역의 조사 위치를 나타내고, Table 1은 조사해역의 중심위치와 조사 차수별 조사일을 나타낸다.

잠수조사를 위한 해삼 성육장의 위치 선정은 조사해역의 진촌 어촌계와 연지 어촌계를 탐문하여 선정하였다. 어촌계 탐문으로 획득된 조사해역의 중심좌표를 설정하고, 각 1 ha (100 m × 100 m) 구역에 대해 상하 5개 라인, 좌우 5개 라인 총 10개 라인을 설치하였다. 조사구역은 25 m × 25 m 크기의 소구역 16개로 구분하였다. 조사라인은 연신로프(8 mm)를 이용하였으며, 로프의 고정을 위해 앵커볼트(경성기질)와 쇠말뚝(연성기질)을 이용하여 라인을 고정하였고 각 라인이 교차하는 지점은 쇠말뚝과 케이블타이를 이용하여 고정하였다. 조사라인에 대한 좌표는 차등위성항법장치(differential global positioning system, DGPS)가 연동된 수중 측위장치를 이용하여 획득하였고, 수중에서 라인의 식별이 쉽도록 라인별 고유식별 부호를 태깅(tagging)하여 조사 및 확인의 용이성을 더하였다.

해삼 성육장의 해양환경 및 수질평가

해양환경 및 수질평가를 위한 측정은 각각의 조사해역에서 표층과 저층을 대상으로 현장실측 및 Niskin sampler (Wildco, Yulee, FL, USA)를 이용하여 해수를 채수한 후, 분석실로 운반하여 분석하였다. 시료 채취 시 현장관측이 가능한 수온(℃), 염분(psu), 용존산소(dissolved oxygen, DO; mg/L 및 %)는 다항목 수질측정기(ProDSS 및 556 MPS; YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)를 이용하여 현장에서 계측하였다. 투명도는 투명도판(Secchi disk)을 사용하여 측정하였고, 그 외 수질항목인 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN), 용존무기인(dissolved inorganic phosphorus, DIP), 엽록소-a(chlorophyll

Table 1. Coordinates of the survey sites and survey dates

Station	Lat. (N)	Long. (E)	Survey date					
			1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Jinchon	37° 59.039'N	124° 41.453'E	6. Aug.	5. Sep.	22. Oct.	6. Nov.	21. Nov.	8. Dec.
Yeonji	37° 58.741'N	124° 39.404'E	9. Aug.	4. Sep.	21. Oct.	5. Nov.	20. Nov.	6. Dec.

Lat., Latitude; Long., Longitude.

a), 규산규소(silicate, SiO_2-Si), 부유물질(suspended particulate matter, SPM)은 조사 당시 적용된 「해양환경공정시험기준」(해양수산부 고시 제2018-143호)에 준하여 분석하였고 현장 수질 조사 결과를 바탕으로 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 생태기반 해수수질기준에 따라 수질평가지수(water quality index, WQI)를 산출하였다.

해삼 성육장의 서식생태 및 자연석 시설상태 조사

해삼 서식생태 및 성육장 시설 상태조사는 2인 1조로 구성된 잠수사가 설치된 라인을 중심으로 폭 2 m의 line transect method를 이용하여 서식생물상 조사 및 탐색, 수중촬영을 진행하였다. 조사해역 1 ha에 설치된 라인을 따라 이동하며 라인을 중심으로 수중촬영과 해삼 채집을 진행하였다. 해삼의 현존량이 잘 표현될 수 있도록 기질 틈새에 대한 탐색 및 채집을 진행하였으며 해삼 및 배설흔 발견 시, 기질 특성 및 수심, 위치에 대해 기록하고 영상을 촬영하였다. 탐색 과정에서 나타난 해삼은 채집되어 선상으로 이동 후, 형질 측정하였으며 채집지점에 대한 위치 및 기질환경에 대해 기록하였다. 형질측정이 완료된 해삼은 어촌계에 인계하거나 전량 방류하였다. 조사는 조사자의 안전과 시계 확보를 위해 소조기에 진행하였다.

성육장의 자연석 시설상태에 대하여 ①매몰, 침하, 지반특성 ②부착생물 ③유영생물 등 3가지 항목에 대해 육안관찰 및 항목별 광각 촬영하며, 대표적인 자료를 항목별로 한 가지씩 야장에 수록하였다. 수중촬영 및 수중관찰을 통해 나타난 기질별 분포 특성에 대해 수심이 고려된 분포도를 작성하였다.

해삼의 형질 측정 및 통계 분석

진촌·연지 두 해역 모두 동일한 방법으로 해삼의 형질을 측정하였다. 각 조사에서 라인 트랜섹트를 따라 채집된 돌기해삼은 선상으로 옮긴 직후 측정판 위에서 개체별로 형질을 측정하였다. 해삼은 체벽의 신축성이 커 수축·신장에 따라 전장 값에 변이가 발생할 수 있으므로, 개체가 충분히 신전(伸展)된 상태를 기준으로 전장(total length)을 0.1 cm 단위로 측정하였고, 습중량(wet weight)은 0.01 g 단위로 측정하였다. 측정된 전장과 습중량 자료는 해역별·조사 차수별로 정리하여 개체군의 크기 구조와 전장-습중량 관계 분석에 이용하였으며, 형질 측정을 마친 개체는 어촌계에 인계하거나 전량 재방류하였다.

전장-습중량 관계는 해역별 및 전체 개체를 대상으로 다음의 멱함수 모형을 이용하여 추정하였다.

$$W=aL^b \cdots\cdots (1)$$

여기서 W는 습중량(g), L은 전장(cm), a는 회귀상수, b는 상대성장계수를 의미한다. 식(1)은 로그 변환 후 선형회귀식으로 변환하여 분석하였다.

$$\ln W_i=\ln a+b \ln L_i+\varepsilon_i \cdots\cdots (2)$$

여기서 W_i와 L_i는 i번째 개체의 습중량과 전장이며, ε_i는 오차항이다. 추정된 상대성장계수 b가 등속성장 기준값인 3과 유의하게 다른지를 확인하기 위해 다음의 t-검정을 실시하였다.

$$t=(b-3) / SE_b \cdots\cdots (3)$$

여기서 SE_b는 상대성장계수 b의 표준오차이며, 자유도는 $n-2$로 설정하였다. 상대성장계수 b가 3과 유의한 차이를 보이지 않을 경우 등속성장(isometric growth), $b<3$일 경우 음성 상대성장(negative allometry), $b>3$일 경우 양성 상대성장(positive allometry)으로 해석하였다.

조사시기(1–6차) 간 전장 및 습중량의 차이는 자료의 정규성이 충족되지 않아 비모수 검정인 Kruskal–Wallis test로 검정하였다. Kruskal–Wallis 검정통계량은 다음과 같이 산출하였다.

$$H=[12 / N(N+1)] \sum_{i=1}^{k} (R_i^2 / n_i)-3(N+1) \cdots\cdots (4)$$

여기서 N은 전체 표본수, k는 비교 집단 수, n_i는 i번째 집단의 표본수, R_i는 i번째 집단의 순위합이다. 해역 간 차이, 즉 진촌과 연지 해역 간 전장 및 습중량의 차이는 Mann–Whitney U-test로 검정하였다. Mann–Whitney U 통계량은 다음 식에 따라 산출하였다.

$$U_1=n_1 n_2+[n_1(n_1+1) / 2]-R_1 \cdots\cdots (5)$$

$$U_2=n_1 n_2-U_1 \cdots\cdots (6)$$

$$U=\min(U_1, U_2) \cdots\cdots (7)$$

여기서 n_1과 n_2는 두 해역의 표본수이며, R_1은 첫 번째 집단의 순위합이다.

저층 수온과 조사 차수별 출현 개체수 및 평균 습중량의 관계는 Pearson 상관분석과 Spearman 순위상관분석을 병행하여 분석하였다. Pearson 상관계수는 다음 식으로 산출하였다.

$$r=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y}) / \sqrt{\{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2\}} \cdots\cdots (8)$$

여기서 x_i는 조사 차수별 저층 수온, y_i는 조사 차수별 출현 개체수 또는 평균 습중량을 의미한다. Spearman 순위상관계수는 각 변수의 순위 값을 이용하여 산출하였으며, 동순위가 없는 경우 다음 식을 적용하였다.

$$\rho=1-[6 \sum d_i^2 / n(n^2-1)] \cdots\cdots (9)$$

여기서 d_i는 두 변수의 순위 차이, n은 관측치 수이다. 동순위가 존재하는 경우에는 각 변수의 순위 값을 이용한 상관계수로 산출하였다. 모든 통계 분석은 Python 3.11의 SciPy 패키지(ver. 1.17.1)를 이용하였으며, 유의수준은 $P<0.05$로 설정하였다.

결 과

성육장 해양환경 및 수질평가지수(WQI)

조사해역의 해양환경 및 수질 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 조사해역의 저층 수온은 진촌 11.0–20.2℃, 연지 11.7–20.0℃의 범위로 조사되었고, 표층 수온은 진촌 11.0–20.5℃, 연지 11.7–20.3℃로 조사되었다. 표층 수온과 저층 수온의 계절적 변화는 정점별, 표층, 저층간 유의적인 차가 없었고, 1차 조사인 8월 여름에서 6차 조사인 12월 겨울로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다.

조사기간 중 염분의 계절적 변화는 진촌에서 최소 30.47 psu, 최대 32.4 psu, 연지에서 최소 31.36 psu, 최대 32.4 psu로 조사되어, 정점별, 표층, 저층간 유의적인 차가 없었다. 수소이온농도는 표층의 경우, 진촌 해역은 8.09–8.35, 연지 해역에서 8.14–8.94로 조사되었고, 저층은 진촌 해역 8.04–8.25, 연지 해역 8.08–8.71의 범위로 조사되어 표층, 저층간 유의적인 차는 없었다. 용존산소(DO)는 진촌 해역에서 1차 내지 5차의 경우 7.21–7.76 mg/L의 범위에 분포하였고 6차가 8.33–8.34의 값을 보여 겨울의 측정값이 높았다. 연지 해역은 1차 내지 5차의 경우 6.97–7.78 mg/L로 조사되었고, 6차 8.22–8.26 mg/L의 범위로 조사되어 겨울의 측정값이 높았다.

부유물질(SPM) 농도는 표층의 경우, 진촌 해역에서 11.2–21.2 mg/L, 연지 해역에서 12.73–17.27 mg/L로 조사되었고, 저층은 진촌 해역에서 10.6–23.4 mg/L, 연지 해역에서 11.82–18.18 mg/L로 조사되었다. 시기별로는 2차 조사 값이 높고 6차 조사 값이 낮았으며 표, 저층간 차이는 크지 않았으나, 표층보다 저층에서 다소 높게 나타났다. 규산규소의 농도는 진촌 해역에서 297.09–398.15 μg/L, 연지 해역에서 297.09–387.14 μg/L 범위로 측정되었다.

생태기반 해수수질기준에 의한 수질평가 지수 산정을 위해 해양환경기준 중에서 서해 중부해역의 기준 값을 사용하였다. 해양환경관리법에 따른 필요한 수질평가 항목인 저층용존산소포화도, 엽록소-a, DIN, DIP, 투명도 값을 반영하여 조사해역의 수질평가지수(WQI)를 계산한 결과, I등급(매우 좋음)으로 평

Table 2. Water quality and environmental parameters measured in the survey areas

Item		Survey area												Remarks
		Jinchon						Yeonji						
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	
Sal.	S	31.39	31.40	32.21	32.35	32.36	32.4	31.36	31.39	32.22	32.34	32.35	32.40	(psu)
	B	31.71	30.47	32.22	32.35	32.35	32.4	31.37	31.38	32.22	32.35	32.36	32.40	
Temp.	S	20.5	20.3	17.9	16.1	13.8	11.0	20.3	20.0	17.4	16.1	13.3	11.7	(°C)
	B	20.2	19.9	17.5	16.4	13.8	11.0	20.0	19.8	17.4	16.7	13.5	11.7	
pH	S	8.35	8.16	8.15	8.17	8.18	8.09	8.94	8.29	8.14	8.19	8.16	8.15	(-)
	B	8.25	8.04	8.14	8.16	8.18	8.05	8.71	8.31	8.14	8.18	8.15	8.08	
Trans	S	3.5	2.0	3.5	4.0	2.5	4.5	2.5	2.0	3.5	4.5	3.0	3.0	(m)
DO saturation	S	103.9	98.3	96.5	96.2	95.7	92.8	103.8	93.8	92.6	95.4	94.8	93.5	(%)
	B	102.1	94.9	96.9	96.1	96.1	93.1	102.0	90.4	92.1	95.6	95.4	94.5	
SPM	S	16.00	21.20	17.00	11.20	15.00	12.40	12.73	17.27	16.55	12.73	14.55	13.27	(mg/L)
	B	19.80	23.40	17.40	14.00	14.00	10.60	15.27	18.18	17.82	15.45	13.09	11.82	
DO	S	7.76	7.37	7.55	7.61	7.58	8.34	7.78	7.07	7.30	7.58	7.49	8.22	(mg/L)
	B	7.65	7.21	7.64	7.60	7.60	8.33	7.69	6.97	7.28	7.59	7.55	8.26	
DIN	S	163.63	172.00	168.10	161.41	181.48	170.70	171.82	189.54	160.13	169.79	184.94	168.54	(μg/L)
	B	168.25	177.50	172.23	161.60	187.92	172.83	174.49	198.00	170.61	157.43	193.43	176.51	
DIP	S	23.77	21.59	22.26	16.57	23.27	20.92	21.93	20.76	21.26	14.90	23.60	19.92	(μg/L)
	B	22.26	22.93	21.26	17.07	24.11	19.75	20.92	23.60	18.58	16.07	25.28	21.59	
Chl-a	S	1.52	1.49	1.28	1.39	1.82	1.72	1.40	1.45	1.36	1.39	1.63	1.49	(μg/L)
	B	1.39	1.41	1.21	1.20	1.38	1.57	1.47	1.54	1.22	1.21	1.48	1.45	
SiO_2	S	398.15	352.32	333.49	360.78	318.46	297.09	387.14	358.67	310.84	348.93	310.84	297.09	(μg/L)
	B	385.96	359.09	298.15	344.28	334.12	305.98	376.44	371.36	318.25	339.62	328.20	305.98	

S, Surface; B, Bottom; Sal., Salinity; Temp., Temperature; Trans., Transparency; DO, Dissolved oxygen; SPM, Suspended particulate matter; DIN, Dissolved inorganic nitrogen; DIP, Dissolved inorganic phosphorus; Chl-a, Chlorophyll a.

가되었다.

해역별 해삼 서식상태 및 현존량

조사 차수별로 진촌 및 연지 해역에서 확인된 해삼의 개체수와 평균 전장, 평균 습중량 및 총중량을 측정하여 정리한 결과를 Table 3에 나타내었다. 조사 시기별 채집 총중량은 1차 고수온기에서 6차 저수온기로 진행됨에 따라 뚜렷한 변동을 보였다. 진촌 해역의 채집 총중량은 1차 조사에서 12,026.01 g으로 높게 나타났으나, 4차 조사에서는 2,215.06 g으로 최솟값을 보였고, 이후 5차와 6차 조사에서 각각 10,767.86 g 및 14,787.23 g으로 증가하였다. 연지 해역 역시 1차 조사에서 9,011.77 g으로 나타난 후, 3차 조사에서 2,816.16 g으로 최솟값을 보였고, 6차 조사에서는 11,682.56 g으로 최대값을 보였다.

두 해역을 합산한 조사 차수별 채집 총중량은 4차 조사에서 5,678.54 g으로 가장 낮았고, 6차 조사에서 26,469.79 g으로 가장 높았다. Table 3의 서식밀도는 실제 시설면적을 기준으로 환산하였다. 시설면적 기준 평균 서식밀도는 진촌 해역이 152.6개체/ha, 연지 해역이 119.8개체/ha로 나타났으며, 조사기간 누적 서식밀도는 각각 915.8개체/ha 및 718.6개체/ha로 산정되었다. 조사기간 누적 총 채집중량은 진촌 해역 50,824.59 g, 연지 해역 37,513.35 g으로 산정되었다. 두 해역 모두 1차에서 6차 조사로 진행됨에 따라 저층 수온은 지속적으로 하강하였으나, 평균 습중량과 총중량은 2–4차 조사에서 감소한 후 5–6차 조사에서 다시 증가하는 양상을 보였다.

진촌 및 연지 해역에서 확인된 돌기해삼의 전장 및 습중량 분포 특성을 조사 차수별로 정리한 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 진촌 해역에서는 조사기간 동안 총 348개체의 돌기해삼이 채집되었다(Fig. 2). 1차 조사에서는 58개체가 확인되었고 전장은 6.6–24.6 cm(평균 15.8 cm), 습중량은 44.2–487.7 g(평균 207.35 g)으로 나타났으며, 조사 당시 저층 수온은 20.2℃였다. 2차 조사에서는 총 36개체가 채집되었고 전장은 4.7–22.1 cm(평균 13.6 cm), 습중량은 36.1–308.9 g(평균 172.87 g)으로 나타났고 저층 수온은 19.9℃였다. 3차 조사에서는 총 42개체가 확인되었으며, 전장은 9.0–23.3 cm(평균 16.0 cm), 습중량은 15.9–204.9 g(평균 114.40 g)으로 나타났고, 저층 수온은 17.5℃였다. 4차 조사에서는 총 58개체가 채집되었고, 전장은 5.1–20.5 cm(평균 12.1 cm), 습중량은 4.4–131.4 g(평균 38.19 g)으로 조사되었고, 저층 수온은 16.4℃였다. 5차 조사에서는 총 73개체가 확인되었고, 전장은 4.9–25.6 cm(평균 17.3 cm), 습중량은 8.8–333.1 g(평균 147.50 g)으로 나타났고, 저층 수온은 13.8℃였다. 6차 조사에서는 총 81개체가 채집되어 조사기간 중 가장 높은 출현 개체수를 보였다. 전장은 5.5–27.7 cm(평균 16.9 cm), 습중량은 15.1–441.1 g(평균 182.56 g)으로 나타났으며, 저층 수온은 11.0℃였다. 진촌 해역의 전장 및 습중량 분포는 8월 1차 조사부터 11월 초, 4차 조사까지 감소하는 경향을 보였으나, 이후 11월 말 5차 조사와 12월 6차 조사에서는 다시 증가하는 양상이 확인되었다. 해삼의 주요 출현 지역은 자연석 및 어초 시설지에 집중되었으며, 수온이 낮아질수록 출현 범

Table 3. Abundance, mean total length, mean wet weight, and total wet weight of *Apostichopus japonicus* in the Jinchon and Yeonji areas

Site / survey		Individuals	Mean total length (cm)	Mean wet weight (g)	Total wet weight (g)	Bottom water temp. (°C)	Facility-area density (ind./ha)	Habitat structure
Jinchon (0.38 ha)	1st	58	15.8	207.35	12,026.01	20.2	152.6	Natural stone Artificial reef
	2nd	36	13.6	172.87	6,223.45	19.9	94.7	
	3rd	42	16.0	114.40	4,804.98	17.5	110.5	
	4th	58	12.1	38.19	2,215.06	16.4	152.6	
	5th	73	17.3	147.50	10,767.86	13.8	192.1	
	6th	81	16.9	182.56	14,787.23	11.0	213.2	
	Mean	58.0	15.3	143.81	8,470.77	16.5	152.6	
	Total	348	-	-	50,824.59	-	915.8	
Yeonji (0.43 ha)	1st	52	17.4	173.28	9,011.77	20.0	120.9	Natural stone
	2nd	41	12.8	144.83	5,938.19	19.8	95.3	
	3rd	37	13.0	76.11	2,816.16	17.4	86.0	
	4th	50	13.7	69.27	3,463.48	16.7	116.3	
	5th	63	14.0	73.03	4,601.19	13.5	146.5	
	6th	66	16.7	177.01	11,682.56	11.7	153.5	
	Mean	51.5	14.6	118.92	6,252.23	16.5	119.8	
	Total	309	-	-	37,513.35	-	718.6	

Mean indicates the unweighted mean of the six survey means, whereas Total indicates the sum across the six surveys. Facility-area density was calculated based on the actual facility area (Jinchon, 0.38 ha; Yeonji, 0.43 ha).

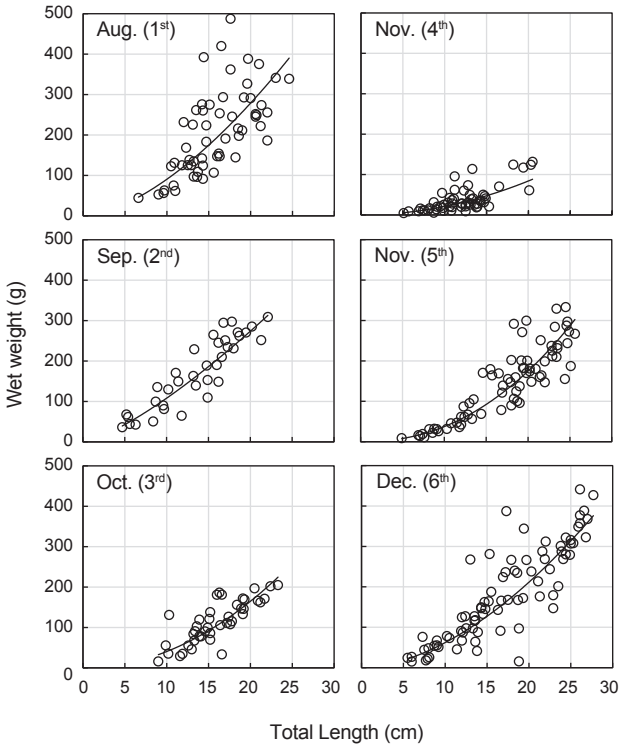


Fig. 2. Monthly changes in the total length and wet weight distributions of *Apostichopus japonicus* in the Jinchon area.

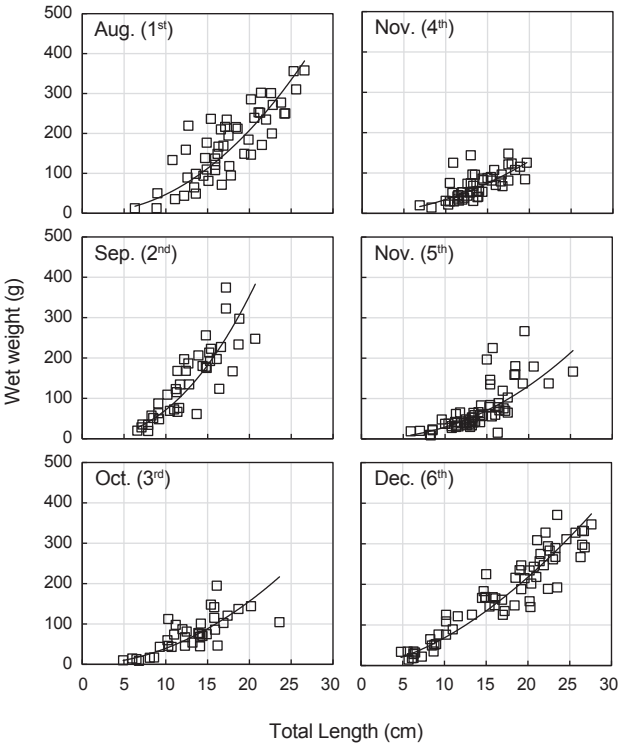


Fig. 3. Monthly changes in the total length and wet weight distributions of *Apostichopus japonicus* in the Yeonji area.

위가 주변 지역으로 확대되는 경향을 보였다.

한편, 연지 해역에서는 조사기간 동안 총 309개체의 돌기해삼이 채집되었다(Fig. 3). 1차 조사에서는 총 52개체가 확인되었으며, 전장은 6.3–26.6 cm(평균 17.4 cm), 습중량은 12.4–357.7 g(평균 173.28 g)으로 나타났고, 저층 수온은 20.0℃였다. 2차 조사에서는 총 41개체가 채집되었으며, 전장은 6.6–20.7 cm(평균 12.8 cm), 습중량은 7.9–347.3 g(평균 144.83 g)으로 나타났고 저층 수온은 19.8℃였다. 3차 조사에서는 총 37개체가 확인되었으며, 전장은 4.9–23.6 cm(평균 13.0 cm), 습중량은 8.7–194.8 g(평균 76.11 g)으로 나타났고, 저층 수온은 17.4℃였다. 4차 조사에서는 총 50개체가 채집되었으며, 전장은 6.9–19.7 cm(평균 13.7 cm), 습중량은 14.5–148.0 g(평균 69.27 g)으로 조사되었고 저층 수온은 16.7℃였다. 5차 조사에서는 총 63개체가 확인되었으며, 전장은 5.9–25.3 cm(평균 14.0 cm), 습중량은 8.6–266.8 g(평균 73.03 g)으로 나타났고 저층 수온은 13.5℃였다. 6차 조사에서는 총 66개체가 채집되었으며, 전장은 4.8–27.6 cm(평균 16.7 cm), 습중량은 14.5–371.1 g(평균 177.01 g)으로 나타났고 저층 수온은 11.7℃였다. 연지 해역의 전장, 습중량의 분포는 진촌 해역과 같이 1차 조사 8월에서 4차 조사 11월 초로 갈수록 감소하는 경향을 보였고, 11월 말 5차 및 12월 6차 조사 결과에서는 전장과 습중량이 다시 증가하는 경향을 보였다. 해삼의 주요 출현지역은 자연석 시설지에서 집중적으로 출현하였으며 수온이 하강함에 따라 점차 주변 지역 및 상부 낮은 수심 지역으로 확대되는 양상을 보였다.

특히, 백령 진촌 해역 2차 조사에서는 해삼 주변의 저질 표면에서 나선형 또는 끈형상의 분변 또는 장 내용물 배출 추정 흔적이 관찰되었으며(Fig. 4), 백령 연지 해역 3차 조사에서도 해삼 인접부에서 유사한 흔적이 확인되었다(Fig. 5). 이러한 흔적은 해삼의 섭식·배설 활동 또는 장 내용물 배출 가능성을 보여주는 현장 관찰자료로 기록하였다.

조사기간 동안 채집된 전체 개체(n=657)의 전장(L)과 습중량(W)으로부터 추정한 전장-습중량 관계식은 진촌 해역에서 $W=0.443L^{2.029}$ (R^2=0.60, n=348), 연지 해역에서 $W=0.496L^{1.967}$ (R^2=0.66, n=309)이었으며, 두 해역을 합산한 경우 $W=0.461L^{2.006}$ (R^2=0.63, n=657)이었다(Fig. 6, Table 4). 상대성장계수 b는 두 해역 모두 등속성장 기준 값인 3보다 유의하게 작았으며(t-검정, P<0.001), 이는 신축성이 큰 해삼의 전장 특성상 습중량이 전장의 세제곱보다 완만하게 증가하는 음성 상대성장(negative allometry)을 반영한다.

조사 시기별 전장과 습중량은 두 해역 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Kruskal–Wallis 검정; 진촌 전장 H=45.7, 습중량 H=115.8, 연지 전장 H=38.1, 습중량 H=83.3, 모두 P<0.001). 해역 간 비교에서는 습중량이 진촌 해역에서 유의하게 높았고(Mann–Whitney U-test, P=0.007), 전장은 유의한



Fig. 4. Putative fecal or intestinal-content traces observed near *Apostichopus japonicus* during the second survey in the Jinchon area of Baengnyeongdo. The red circle indicates spiral- or cord-like traces on the sediment surface, interpreted as possible fecal or intestinal-content discharge rather than direct evidence of evisceration.

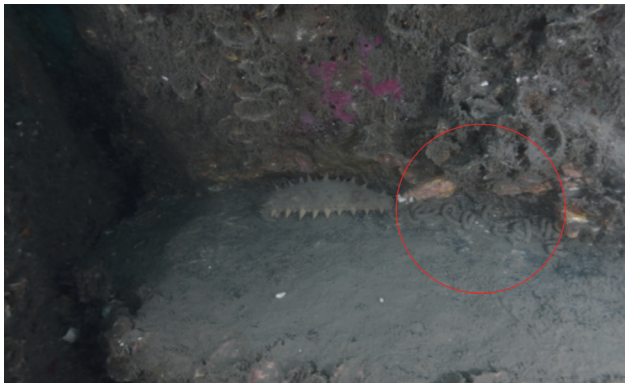


Fig. 5. Putative fecal or intestinal-content traces observed near *Apostichopus japonicus* during the third survey in the Yeonji area of Baengnyeongdo. The red circle indicates similar traces adjacent to a sea cucumber, interpreted as possible fecal or intestinal-content discharge rather than direct evidence of evisceration.

차이를 보이지 않았다(P=0.073). 조사 차수별 집계자료(n=12)를 이용한 상관분석 결과, 저층 수온과 출현 개체수 사이에는 유의한 음의 상관이 확인되어(Pearson r=-0.79, P=0.002; Spearman ρ=-0.69, P=0.013; Fig. 7), 수온이 낮아질수록 출현 개체수가 증가하는 경향이 통계적으로 뒷받침되었다. 반면 저층 수온과 평균 습중량 사이에는 유의한 상관이 나타나지 않아(r=0.09, P=0.79), 조사기간 중 관찰된 습중량 변동이 단순한 수온 변화만으로는 설명되지 않음을 시사하였다.

해삼 성육장의 자연석 시설상태 및 서식 생물상

진촌 해역에서 잠수조사로 확인된 해삼 성육장의 자연석 시설

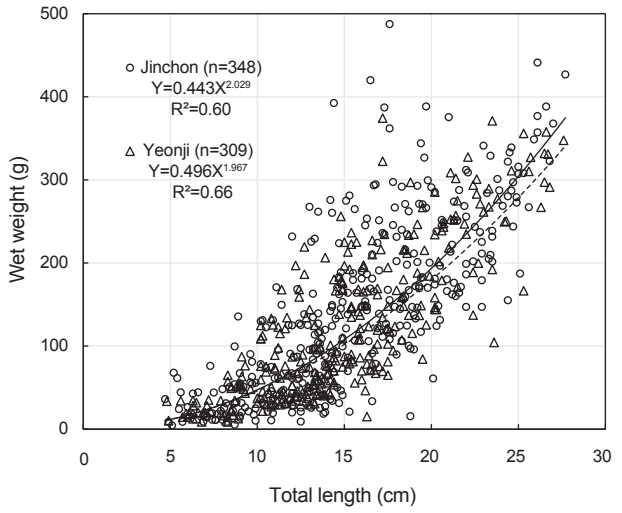


Fig. 6. Length–weight relationships of *Apostichopus japonicus* in the Jinchon (○) and Yeonji (□) areas.

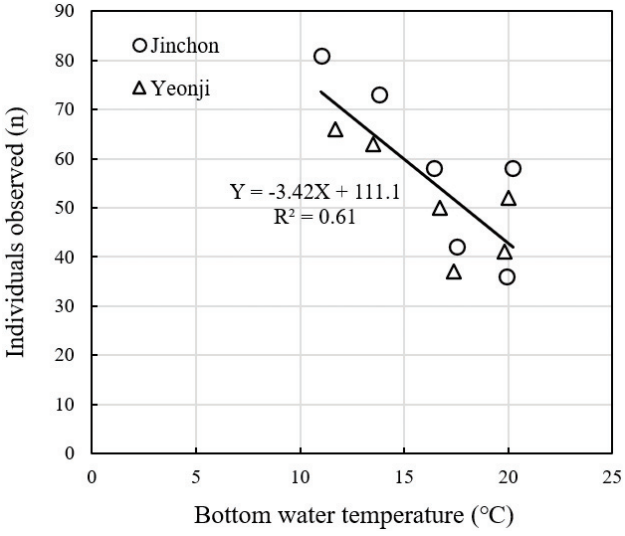


Fig. 7. Relationship between bottom water temperature and the abundance of *Apostichopus japonicus* observed during the survey period.

상태 및 서식 생물상을 위치별로 촬영한 사진을 Fig. 8에 나타냈고, Fig. 9에는 조사해역의 지형특성 및 자연석 시설분포를 모식화한 지형도를 나타냈다.

진촌 해역은 자연석이 시설되어 있으며, 단지 규모는 50 m×115 m인 것으로 나타났다. 대상지 저질은 니사질이 우세한 특성을 보이는 곳으로 자연석 시설은 약 0.3–1.0 m³ 크기의 자연석이 평면구조로 시설되어 있었으며 일부 시설은 적층 구조를 보였다. 시설지 주변에는 작은 크기의 사각형 어초가 수십기 관찰되었으며, 자연석과 혼재된 양상을 보였다. 자연석 침하

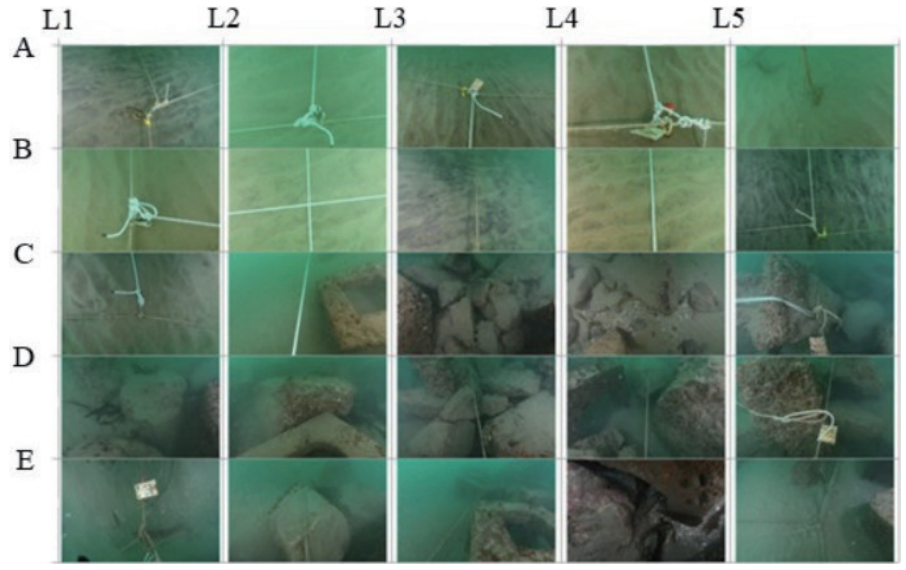


Fig. 8. Photographs showing natural stone habitats and associated biodiversity in the sea cucumber nursery ground of the Jinchon area.

정도는 초기 조사 시 10–30 cm의 침하 상태를 보였으나, 조사 기간 동안 침하의 상태변화가 뚜렷하게 관찰되지 않은 것으로 보아 시설지의 지반상태가 안정적인 것으로 조사되었다. 시설은 일부 파손되어 보였으나 투석 작업 시 자연석 간의 충돌로 발생한 것으로, 시설 후 발생한 것으로 보이는 파손흔은 나타나지 않았다. 자연석과 혼재되어 관찰된 인공어초의 시설상태는 대부분 양호하였으나 일부 파손이 관찰되기도 하였다. 침하 상태는 20–50 cm의 침하량을 보였으며 일부 집중 시설지 외의 니질에 안착한 어초의 경우, 완전히 매몰된 경우도 확인할 수 있었다. 진촌 해역 1 ha에 대한 line transect 조사 결과 조사구역 중부 이하부터 시설지가 관찰되었으며, 수심분포는 6.2–9.0 m로 비교적 완만한 경사도를 보였다. 대상지 1 ha 중 시설지(자연석+어초단지) 면적은 총 0.38 ha로 전체 조사면적의 약 38%에 해당한다.

연지 해역을 잠수 조사하여 확인된 성육장의 자연석 시설상태 및 서식 생물상을 위치별로 촬영한 사진을 Fig. 10에 나타냈고, Fig. 11에는 조사해역의 지형특성 및 자연석 시설분포를 위치별로 모식화한 지형도를 나타냈다. 연지 해역은 자연석이 시설되어 있으며, 단지 규모는 55 m × 75 m인 것으로 나타났다. 대상지는 니질이 우세한 니사질 지역으로 크기 약 0.3–1.0 m³의 자연석이 평면구조로 시설되어 있었으며 일부는 적층 구조를 보였다. 자연석 중 일부는 표면의 부착생물이 적은 것으로 보아 최

Table 4. Parameters of the length–weight relationships and results of statistical analyses for *Apostichopus japonicus*

Analysis	Site/data	*n*	Parameter/result	Statistic	P-value	Interpretation
Length–weight relationship	Jinchon	348	$W=0.443L^{2.029}$; $R^2=0.60$	$b<3$	<0.001	Negative allometry
	Yeonji	309	$W=0.496L^{1.967}$; $R^2=0.66$	$b<3$	<0.001	Negative allometry
	Combined	657	$W=0.461L^{2.006}$; $R^2=0.63$	$b<3$	<0.001	Negative allometry
Survey period effect	Jinchon length/ weight	348	Kruskal–Wallis test	$H=45.7$ / 115.8	<0.001	Significant temporal difference
	Yeonji length/ weight	309	Kruskal–Wallis test	$H=38.1$ / 83.3	<0.001	Significant temporal difference
Site difference	Jinchon vs Yeonji	657	Mann–Whitney *U*-test	wet weight	0.007	Jinchon higher
Temperature–abundance	Survey-level means	12	Pearson $r=-0.79$; Spearman $\rho=-0.69$	correlation	0.002 / 0.013	Negative relationship
Temperature–weight	Survey-level means	12	Pearson $r=0.09$	correlation	0.79	Not significant

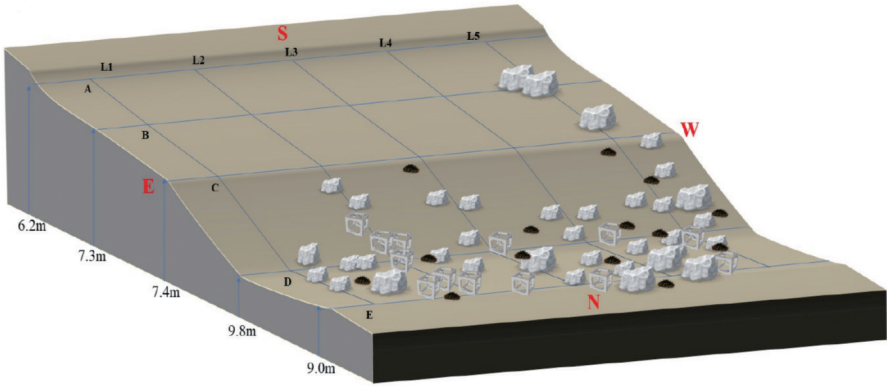


Fig. 9. Topographic map showing the geomorphological characteristics and distribution of natural stones in the Jinchon area.

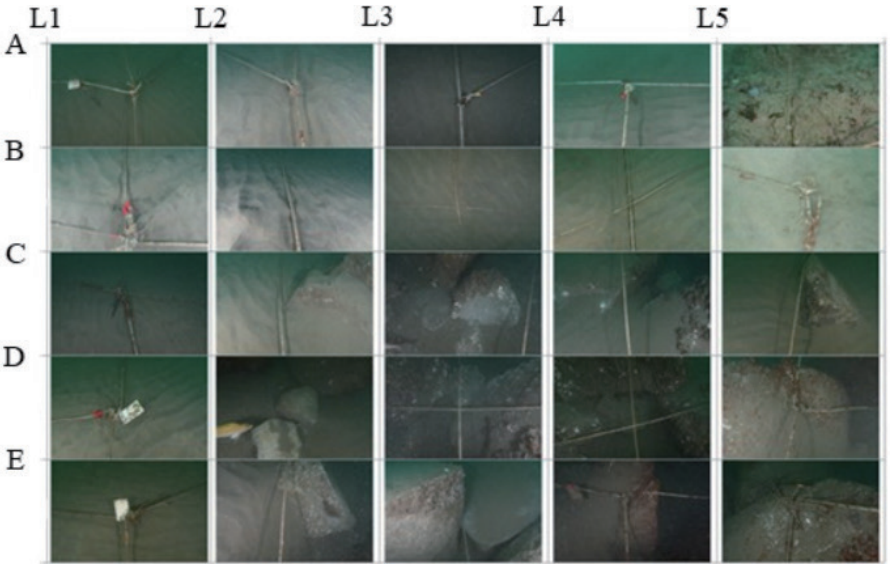


Fig. 10. Photographs showing natural stone habitats and associated biodiversity in the sea cucumber nursery ground of the Yeonji area.

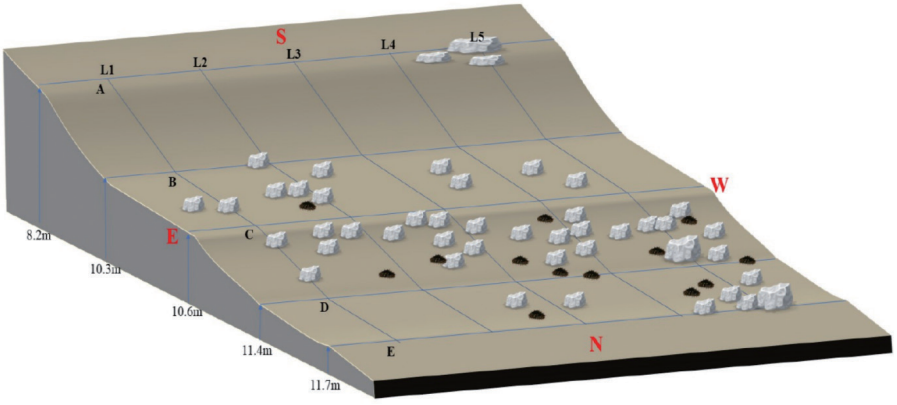


Fig. 11. Topographic map showing the geomorphological characteristics and distribution of natural stones in the Yeonji area.

근에 투석사업이 진행된 것으로 보이는 것이 관찰되었고, 자연석 시설지 주변에 기타 인위적인 시설은 관찰되지 않았다. 자연석 침하 정도는 초기 조사 시 10–20 cm의 침하 상태를 보였으나, 조사 기간 동안 침하의 상태변화가 뚜렷하게 관찰되지 않은 것으로 보아 시설지의 지반상태가 안정화 단계인 것으로 관찰되었다. 시설지의 일부에서는 파손흔이 보였으나, 이것은 투석 시 자연석 간의 충돌로 발생한 것으로, 시설 후 발생한 것으로 보이는 파손은 관찰되지 않았다. 백령 연지 해역 1 ha에 대한 line transect 조사 결과 조사구역 중부에서부터 시설지가 관찰되었고 수심분포는 8.2–11.7 m로 진촌과 유사한 수심분포를 보였다. 대상지 1 ha 중 시설지(자연석) 면적은 총 0.43 ha로 전체 조사면적의 약 43%에 해당한다.

두 해역의 시설지 면적과 해삼 현존량의 관계를 정량적으로 비교하면, 조사구역 1 ha 전체 기준 평균 출현밀도는 진촌 58.0개체/ha, 연지 51.5개체/ha였으며, 실제 자연석·어초가 시설된 면적(진촌 0.38 ha, 연지 0.43 ha)을 기준으로 환산한 평균 시설지 서식밀도는 진촌 152.6개체/ha, 연지 119.8개체/ha였다. 이는 조사구역 전체 평균보다 각각 약 2.6배 및 2.3배 높은 값으로, 해삼이 조사구역 전반에 균등하게 분포하기보다 자연석·어초 시설지에 집중적으로 분포함을 보여준다(Figs. 12, 13). 또한 조사기간 누적 출현량을 시설면적 기준으로 환산하면 진촌 915.8개체/ha, 연지 718.6개체/ha로 나타났다. 진촌 해역은 시설면적이 상대적으로 작음(0.38 ha<0.43 ha)에도 불구하고 총 채집 개체수(348개체)와 총중량(50,824.6 g)이 연지 해역(309개체, 37,513.4 g)보다 높게 나타났다.

성육장의 출현 식물, 부착생물 및 유영생물

진촌, 연지 해역에서 조사 기간 동안 출현한 해조류, 저서동물 및 유영생물을 관찰하여 각각 출현 종수를 정리하여 Table 5에 나타내었다. 진촌 해역에서 조사 기간 동안 출현한 해조류는 23종이었다. 시기별로 살펴보면 1차와 2차 조사에서 각 15종으로 가장 많은 출현종수를 기록하였다. 주요 출현 종으로는 다시마(*Saccharina japonica*), 미역(*Undaria pinnatifida*), 갈래곰보(*Meristotheca papulosa*), 막우뭇가사리(*Gelidium vagum*), 진두발(*Chondrus ocellatus*) 등이 출현하였다. 한편, 잘피류인 새우말(*Phyllospadix iwatensis*)이 관찰되었는데 군락(colony)이 아닌 개체(individual)가 관찰된 것으로 보아 인근 서식지에서 유실된 후 유입된 것으로 보인다. 무척추동물은 21종이 출현하였고, 1차 조사에서 가장 많은 14종이 출현하였다. 주요 출현 생물은 굴(*Magallana gigas*), 별불가사리(*Patiria pectinifera*), 아무르불가사리(*Asterias amurensis*), 이끼벌레류(*Caberea*), 가리비류(*Chlamys*) 등이 시기별 출현빈도가 높았다. 유영생물은 9종이 관찰되었고, 시기별 출현 종의 특성을 보면 3차 조사에서 6종이 출현하여 가장 높은 출현종수를 보였다. 주요 출현 종은 일곱동갈망둑(*Pterogobius elapoides*), 노래미(*Hexagrammos agrammus*), 조피볼락(*Sebastes schlegelii*) 등으로 나타났다.

연지 해역에서 조사 기간 동안 관찰된 해조류는 16종이 관찰되었다(Table 5). 시기별로 살펴보면, 2차 조사에서 12종으로

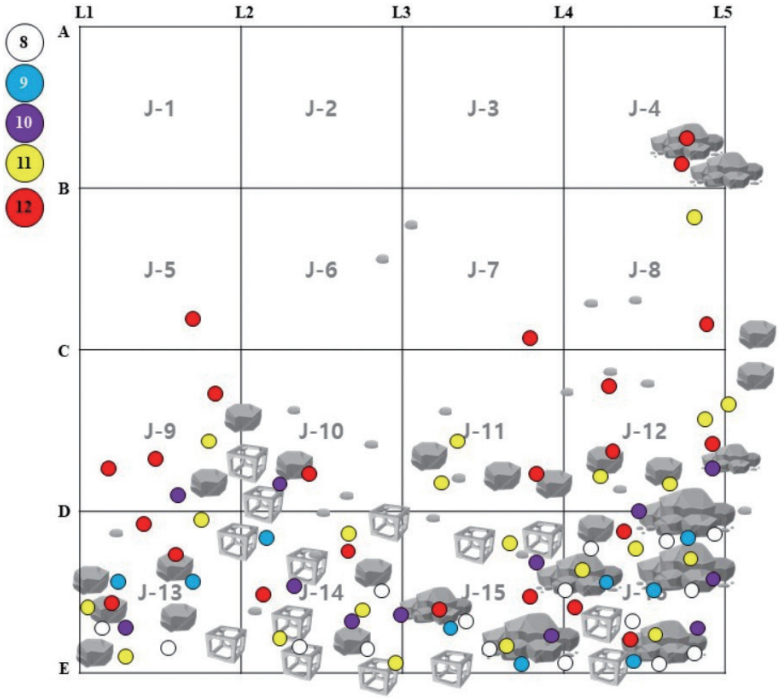


Fig. 12. Monthly distribution patterns of *Apostichopus japonicus* in the Jinchon area.

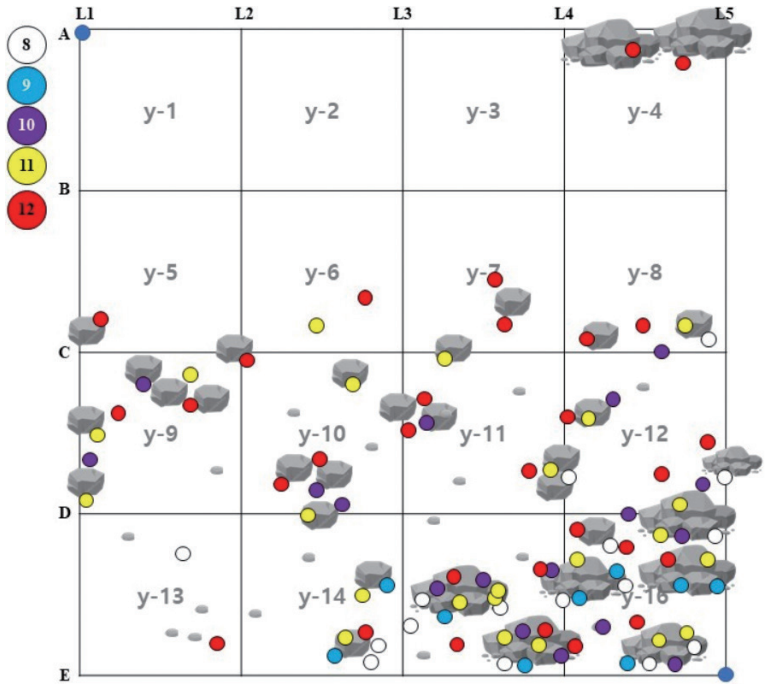


Fig. 13. Monthly distribution patterns of *Apostichopus japonicus* in the Yeonji area.

가장 많은 출현종수를 기록하였다. 주요 출현 종으로는 자루바다표고(*Peyssonnelia caulifera*), 갈래잎(*Schizymenia dubyi*), 참가시그물바탕말(*Dictyopteris pacifica*)과 대형갈조류인 다시마(*S. japonica*), 미역(*U. pinnatifida*) 등이다. 한편, 연지 해역에서도 잘피류인 새우말(*Phyllospadix iwatensis*)이 출현하였으며, 이는 인근에서 유입된 개체로 판단된다. 저서동물은 총 14종이 관찰되었고, 시기별로 1, 2, 5차 조사에서 각각 8종으로 가장 많이 출현하였다. 주요 출현 종은 굴(*Magallana gigas*), 별불가사리(*Patiria pectinifera*), 아무르불가사리(*Asterias amurensis*), 가리비류(*Chlamys*), 이끼벌레류(*Caberea*) 등이 주요 부착생물로 나타났다. 유영생물은 8종이 관찰되었고, 가장 많은 출현종수를 보인 시기는 2차 조사로, 6종이 출현하였다. 주요 출현 종은 일곱동갈망둑(*Pterogobius elapoides*), 노래미(*Hexagrammos agrammus*), 조피볼락(*Sebastes schlegelii*), 민꽃게(*Charybdis japonica*) 등으로 진촌 해역에서 나타난 유영생물의 종조성과 유사한 양상을 보였다.

Table 5. Species richness recorded in the Jinchon and Yeonji areas during the survey period

Jinchon	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Total
Seaweed	15	15	10	12	10	7	23
Benthic animals	14	9	11	9	10	8	21
Nekton	5	4	6	4	3	4	9
Yeonji	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Total
Seaweed	7	12	9	6	8	5	16
Benthic animals	8	8	7	7	8	6	14
Nekton	4	6	4	4	1	2	8

Total indicates the cumulative number of species recorded over the entire survey period and is not the sum of the values recorded in individual surveys. Nekton includes swimming fishes and mobile macroinvertebrates (e.g., *Charybdis japonica*, *Portunus trituberculatus*, and *Enteroctopus dofleini*).

고 찰

백령도 옹진군 진촌 및 연지 해역의 해양환경을「생태기반 해수수질기준」에 따라 평가한 결과, 두 해역 모두 I등급(매우 좋음)으로 나타났으며, 저층 수온 또한 해삼의 적정 서식 범위 내에서 유지되는 것으로 확인되었다. 일반적으로 해삼은 저층 환경의 영향을 크게 받는 대표적인 저서성 생물로 알려져 있고, 특히 수온은 활동성과 성장에 직접적인 영향을 미치는 주요 환경요인이다. 조사기간 동안 두 해역의 저층 수온은 11.0–20.2℃ 범위로 나타났고, 해역 간 수온 차이는 크지 않아 두 해역 모두 해삼의 생존과 성장에 적합한 환경조건을 유지한 것으로 판단된다(Table 2).

해삼은 수온 변화에 따라 성장과 생리적 반응이 크게 달라지는 종으로 알려져 있다(Dong et al., 2006). 일반적으로 16–17℃ 이하에서 성장률이 높고, 활동이 가장 활발한 수온 범위는 약 10–16℃로 보고된다(Yang et al., 2005; Ji et al., 2008). 반면 19℃ 이상에서는 활동성이 감소하고 소화관 위축 현상이 나

타나며, 25℃ 이상에서는 섭식을 중단하고 운동성이 현저히 감소하는 하면(夏眠) 상태에 들어가는 것으로 알려져 있다(Yang et al., 2005). 본 연구에서도 조사기간 동안 진촌 해역에서는 총 348개체(평균 58.0개체), 연지 해역에서는 총 309개체(평균 51.5개체)가 확인되었으며, 여름철에서 겨울철로 수온이 하강함에 따라 출현 개체수가 증가하는 경향을 보였다. 특히 수온이 16℃ 이하로 하강한 5·6차 조사에서는 두 해역 모두 출현 개체수가 증가하는 양상이 확인되었다. 이러한 결과는 겨울철에 출현 빈도가 증가하고, 여름철에는 감소하는 해삼의 계절적 활동 특성을 보고한 기존 연구(Yamana et al., 2009)와 유사한 경향을 보였다. 다만, 본 연구에서 저수온기에 확인된 출현 개체수의 증가는 실제 자원량 증가라고 해석하기보다는 고수온기에 은신하던 개체들이 수온 하강과 함께 활동성을 회복하면서 외부로 노출되어 잠수조사자의 관찰 가능성이 높아진 결과가 복합적으로 반영된 것으로 판단된다. 반대로 1차 조사(8월)의 고수온기에는 2·3차 조사 시기보다 상대적으로 높은 출현 개체수가 확인되었다(Table 3). 또한 1차 조사는 조사구역 설정 및 라인 설치 직후 수행되어 잠수조사자의 기질 틈새에 대한 탐색 강도가 상대적으로 높았던 영향이 일부 반영된 결과일 수 있으며, 이러한 조사 초기의 탐색 강도 차이는 고수온기임에도 1차 조사에서 출현 개체수가 비교적 높게 나타난 원인 중 하나로 판단된다. 따라서 본 연구에서 나타난 출현 개체수 변화는 실제 자원량 변동보다는 수온 변화에 따른 활동성, 출현성 및 은신 행동의 변화를 반영하는 지표로 해석하는 것이 타당하다.

한편, 1차 조사(8월)의 상대적으로 높은 출현 개체수와 2–4차 조사에서 나타난 평균 습중량 및 총중량의 변동은 단순한 수온 하강 효과뿐만 아니라 고수온기 은신, 조사 시기별 관찰 가능성, 산란 후 회복 및 관찰·채집된 개체군의 크기 조성 차이가 복합적으로 반영된 결과로 사료된다. 본 연구는 동일 개체를 표지하여 반복 측정한 것이 아니라, 각 조사 시기에 line transect 조사 과정에서 관찰·채집된 개체를 대상으로 전장과 습중량을 측정한 방식이므로, 조사 시기별 평균 습중량 변화에는 실제 습중량 변화뿐 아니라 관찰·채집된 개체군의 크기 조성 차이도 일부 반영되었을 가능성이 있다.

생리·생태적 측면에서는 1차 조사 시기인 8월이 산란 직후 또는 산란 후 회복기에 해당했을 가능성을 고려할 필요가 있다. 서해안에 서식하는 돌기해삼(*A. japonicus*)은 대체로 늦봄부터 초여름의 수온 상승기에 생식소가 성숙하고 산란하는 것으로 보고되어 있으며(Park et al., 2007), 방류해역 개체군에서도 7월 전후 산란 이후 8–11월에 방출후기(spent stage)가 나타나는 것으로 보고된 바 있다(Kang et al., 2017). 따라서 본 연구의 1차 조사 이후 2–4차 조사에서 확인된 평균 습중량 감소는 산란에 따른 생식소 방출, 생식활동에 따른 에너지 소모 및 산란 후 회복 과정과 관련되었을 가능성이 있다. 실제로 번식기 *A. japonicus*는 생식소 발달과 산란에 대한 에너지 투자가 증가하면서 섭식량, 섭취율 및 소화율이 감소하고, 체성장과 자기유지에 배분되는 에너지가 줄어드는 것으로 알려져 있다(Ru et al., 2018).

아울러 고수온기 하면 전후의 생리 변화도 습중량 감소 해석에서 함께 고려되어야 한다. 해삼은 수온 상승기에 활동성과 섭식이 감소하고, 하면기에는 소화관 위축, 장 중량 감소 및 장 내용물 감소가 나타날 수 있다(Yang et al., 2005; Gao et al., 2008; Gao et al., 2009). 본 연구에서도 진촌 해역의 평균 습중량은 1차 207.35 g에서 2차 172.87 g, 3차 114.40 g, 4차 38.19 g으로 감소하였고, 연지 해역 역시 1차 173.28 g에서 2차 144.83 g, 3차 76.11 g, 4차 69.27 g으로 감소하였다. 반면 5–6차 조사에서는 두 해역 모두 평균 습중량과 총중량이 다시 증가하였다. 이러한 양상은 조사기간 중 평균 습중량 변동이 단순한 수온 하강 효과만으로 설명되기 어렵고, 산란 후 회복, 고수온기 은신 또는 부분 잠입, 섭식 저하, 소화관 위축 및 관찰 개체군의 크기 조성 변화가 복합적으로 반영된 결과일 가능성을 시사한다. 특히 본 연구에서 저층 수온과 평균 습중량 사이에 유의한 상관이 나타나지 않은 점(r=0.09, P=0.79)은 습중량 변동이 수온 단일 요인보다는 생식 및 하면 관련 생리 변화와 함께 해석되어야 함을 뒷받침한다.

또한 백령 진촌 해역 2차 조사와 백령 연지 해역 3차 조사에서 해삼 주변에 분변 또는 장 내용물 배출로 추정되는 흔적이 관찰되었다(Figs. 4, 5). 이러한 현장 관찰은 2–4차 평균 습중량 감소가 산란 후 회복, 고수온기 은신, 섭식 저하, 소화관 위축 및 장 내용물 감소와 관련되었을 가능성을 보조적으로 시사한다. 다만 본 연구에서 관찰된 사진상의 흔적만으로는 내장배출(evisceration)을 직접 입증하기 어려우므로, 이를 내장배출의 직접적인 증거가 아니라 분변 또는 장 내용물 배출 가능성을 보여주는 현장 관찰자료로 제한적으로 해석하였다. 또한 생식소 성숙도, 생식소중량지수 및 조직학적 분석이 병행되지 않았고, 내장배출 개체가 직접 확인된 자료도 확보되지 않았으므로, 2–4차 조사에서 나타난 평균 습중량 감소를 산란 또는 내장배출의 직접적인 결과로 단정하기에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서 관찰된 습중량 감소는 산란 후 회복 과정과 하면 전후의 소화관 위축, 그리고 고수온기에 나타나는 은신 행동 등이 복합적으로 작용한 결과일 가능성이 높은 것으로 해석하였다. 아울러 백령도 해역은 상대적으로 고위도에 위치하므로 하면 개시 수온과 재활동 시점이 다른 해역과 차이를 보일 가능성도 고려할 필요가 있다. 향후 백령도 해역 돌기해삼(*A. japonicus*) 개체군을 대상으로 생식주기, 생식소 성숙도, 소화관 변화 및 주·야간 은신 행동을 함께 조사한다면, 고수온기 이후 습중량 변화와 출현성 변동의 원인을 보다 명확하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

조사기간 동안 출현한 해삼의 평균 전장과 평균 습중량은 진촌 해역에서 각각 15.3 cm, 143.81 g이었으며, 연지 해역에서는 각각 14.6 cm, 118.92 g으로 나타났다(Table 3). 또한 조사 해역의 합산 생체량은 재활동 전환기인 4차 조사에서 가장 낮

았고, 저수온 활동기인 6차 조사에서 가장 높게 나타났다. 두 해역의 수온 차이는 크지 않았음에도 진촌 해역의 해삼이 상대적으로 높은 성장도를 보였는데, 이는 단순한 수온 영향보다는 먹이생물 조성, 저질 내 유기물 함량, 조류 흐름 및 해조류 군집 구조 등 미세 서식환경의 차이에 영향을 받은 결과로 판단된다. 실제로 진촌 해역은 연지 해역에 비해 출현한 해조류 및 저서동물의 종다양성이 상대적으로 높게 나타났으며(Table 5), 자연석과 함께 사각형 어초시설이 복합적으로 조성되어 있었다. 이와 같이 자연석에 어초가 복합적으로 조성되어 은신 가능한 다양한 복합 서식구조는 해삼이 이용할 수 있는 틈새형 은신처를 다양하게 제공하고, 부착생물 및 유기물 축적을 증가시켜 먹이활동에 유리한 환경을 형성함으로써 단위 시설면적당 해삼 집적도가 높아지는 한편 해삼의 서식 성장에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

해삼은 은신 성향이 강한 저서성 생물로, 연안 조간대부터 수심 약 20 m 이내의 사니질 또는 사질 저질에 주로 분포하는 것으로 알려져 있다. 또한 어린 개체는 연안 암초 및 해조장 주변에, 성체는 암반·모래자갈·개흙이 혼합된 저질 환경에 주로 서식하는 것으로 보고되고 있다(Oh et al., 2015). 본 연구에서는 수온 변화에 따른 해삼의 서식분포 특성을 확인하기 위해 자연석 시설 분포 모식도 위에 조사 시기별 해삼 출현 위치를 중첩하여 분석하였다(Figs. 12, 13). 그 결과, 두 해역 모두 8–9월은 고수온 은신기로서 D–E 라인 사이의 상대적으로 깊은 수심대에서 해삼이 주로 관찰되었으며, 대부분 자연석 및 어초 하부, 암반 틈새와 같은 은폐 가능한 공간에 분포하였다. 특히 진촌 해역은 자연석과 어초가 혼재된 복합 구조를 보여 다양한 틈새형 은신처가 형성되어 있었고, 연지 해역은 자연석 중심 구조로 자연석 하부와 주변 저질이 주요 은신처로 기능한 것으로 판단된다. 이러한 분포 양상은 고수온기에 해삼의 활동성이 저하되고 은신성이 강화되는 생태적 반응을 반영하는 것으로 해석된다. 다만 본 연구에서 측정된 고수온기 저층 수온은 완전한 하면 상태를 직접 입증할 수준으로 보기는 어려우므로, 이를 하면 자체의 증거로 해석하기보다는 하면 전단계 또는 고수온기에 나타나는 은신성 강화 현상으로 보는 것이 타당하다. 10–11월은 재활동 전환기로서 D–E 라인 사이의 상대적으로 깊은 수심대뿐만 아니라, 상대적으로 낮은 수심인 C–D 라인에서도 해삼이 관찰되었다. 반면 11월 말–12월은 저수온 활동기로서 해삼의 출현 범위가 상대적으로 얕은 수심대인 A 라인까지 확대되는 양상이 확인되었다. 이 시기에는 자연석 및 어초 하부뿐 아니라 자연석 표면, 시설지 인접부, 암반 표면 및 혼합 저질에서도 출현빈도가 증가하였다. 이는 수온 하강에 따라 해삼의 활동성이 회복되면서 은신처 외부로 이동하는 개체가 증가함에 따라 잠수조사자에게 관찰될 확률이 높아진 결과로 판단된다. 특히 펄질 및 혼합 저질에서 확인된 개체는 완전한 저질 잠입이라기보다 몸체 일부를 저질에 묻거나 저질 표면에 밀착시키는 부분 잠입성 은신 행동으로 해석하는 것이 적절하다.

따라서 저수온기에 나타난 출현 범위 확대 역시 단기간 내 실제 자원량 증가보다는 수온 변화에 따른 활동성 증가와 은신 행동 변화가 복합적으로 반영된 결과로 판단된다. 그러나 해삼의 수심별 분포는 수온뿐만 아니라 저질 조성, 유기물 함량, 먹이환경 및 서식기질의 구조적 복잡성에도 영향을 받을 수 있다. 수심이 깊어질수록 펄 성분과 유기탄소·유기질소 함량이 증가하여 먹이환경이 달라질 수 있으며, 해삼의 서식 구조와 크기 분포 또한 암반 분포, 해조류 군집, 퇴적물 조성 및 수심과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다(Yamana et al., 2014; Kashio et al., 2016). 본 연구에서 확인된 수심별 출현 양상과 은신·부분 잠입성 분포 특성의 인과관계를 보다 명확히 규명하기 위해서는 향후 저질 입도, 유기물 함량, 주·야간 활동성 및 잠입 깊이에 대한 정량적 조사가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

다음으로 출현 기질 특성을 살펴보면, 대부분의 해삼은 자연석 또는 어초의 틈새와 하부 공간에서 확인되었다. 해삼은 광 회피성과 포식 회피 행동이 강한 종으로 알려져 있으며, 안정적인 은신 공간은 서식 유지에 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서 관찰된 은신 유형을 서식기질과 행동 특성에 따라 구분하면, 펄질 및 혼합 저질에서는 몸체를 펄이나 모래 속에 일부 묻는 저질 침투형이 주로 확인되었고, 자갈 및 암반 혼재 지역에서는 암반 틈이나 바위 사이에 은폐하는 형태가 주로 관찰되었다. 즉, 조사해역의 자연석 시설은 단순한 인공 구조물이 아니라 해삼의 은신 및 활동 공간으로 기능하는 중요한 서식기반으로 판단된다. 특히 자연석 주변은 유기물 축적과 미세 서식환경 형성에 유리하여 해삼의 장기적인 서식 기반으로 작용할 가능성이 높은 것으로 보인다. 시설 안정성 측면에서는 자연석 시설이 지반 순응성과 구조 안정성이 상대적으로 우수하여 해삼 서식기반 조성에 보다 적합한 것으로 판단되나, 일부 어초시설에서는 균열, 골절 및 침하 현상이 확인되었다. 특히 연질지반에 설치된 어초시설에서 침하율이 상대적으로 높게 나타난 바, 향후 해삼 성육장 조성사업 추진 시 지반 특성을 고려한 시설 설계와 구조 안정성 평가를 수행할 필요가 있다.

이상의 결과를 해삼 성육장 관리 관점에서 정리하면 다음과 같다. 첫째, 조사기간 중 출현 개체수는 저층 수온과 유의한 음의 상관을 보였고(r=-0.79, P<0.01), 고수온기에는 개체들이 자연석·어초 하부로 은신하는 경향이 뚜렷하였다. 따라서 성육장의 자원량 모니터링은 개체의 노출이 많고 하면의 영향이 적은 저수온 활동기(11–12월)에 수행하는 것이 관측 효율과 자료의 신뢰도 측면에서 유리하다. 둘째, 해삼은 시설지에 집중 분포하였으며, 시설면적 기준 평균 서식밀도는 조사구역 전체 기준보다 진촌 2.6배, 연지 2.3배 높게 산정되었다. 자연석과 어초가 복합적으로 조성된 진촌 해역에서 습중량이 유의하게 높게 나타난 점(P=0.007)은, 은신 가능한 틈새 구조를 다양하게 제공하는 복합 서식기반이 해삼의 성육에 유리함을 시사한다. 따라서 성육장 조성 시에는 자연석 위주의 단순 시설보다 어초를 병용한 복합 구조를 검토하되, 연질지반에서 침하율이 상대적으

로 높았던 어초시설의 특성을 고려하여 지반 안정성을 확보한 설계가 필요하다.

종합하면, 백령도 진촌 및 연지 해역은 수질, 수온 및 서식기반 구조 측면에서 해삼 서식에 적합한 환경조건을 유지하고 있는 것으로 판단된다. 특히 자연석 기반의 복합 서식구조는 해삼의 은신 및 활동 공간으로 효과적으로 기능하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 향후 해삼 자원 조성 및 성육장 관리방안 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

Chen J. 2004. Present status and prospects of sea cucumber industry in China. In: Lovatelli A, Conand C, Purcell S, Uthicke S, Hamel JF and Mercier A (eds), Advances in Sea Cucumber Aquaculture and Management. FAO Fisheries Technical Paper 463, Rome, 25-38.

Dong YW, Dong SL, Tian XL, Wang F and Zhang MZ. 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. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.12.013.

Gao F, Yang HS, Xu Q, Wang F, Liu G and German DP. 2008. Phenotypic plasticity of gut structure and function during periods of inactivity in *Apostichopus japonicus*. Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol 150, 255-262. https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.03.011.

Gao F, Yang HS, Xu Q, Wang F and Liu G. 2009. Effect of water temperature on digestive enzyme activity and gut mass in sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka, with special reference to aestivation. Chin J Oceanol Limnol 27, 714-722. https://doi.org/10.1007/s00343-009-9202-3.

Jeong UC, Anisuzzaman M, Jin F, Choi JK, Han JC, Choi BD and Kang SJ. 2019. Effect of high water temperature on the growth and lipid compositions of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Korean J Fish Aquat Sci 52, 400-407. https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0400.

Ji TT, Dong YW and Dong SL. 2008. Growth and physiological responses in the sea cucumber, *Apostichopus japonicus Selenka*: Aestivation and temperature. Aquaculture 283, 180-187. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.07.006.

Kang HW, Lee C, Yoo HK and Kim SH. 2017. Reproductive cycle and releasing time for increase of resource of adult sea cucumber *Apostichopus japonicus* released to seed breeding grounds. Anim Cells Syst 21, 53-62. https://doi.org/10.1080/19768354.2016.1266386.

Kang SJ, Kang SW, Kang JH, Jeong UC, Jin SD, Choi BD and Han JC. 2012. Sea Cucumber Aquaculture Technology. Aqua Info Press, Seoul, Korea, 16-30.

Kang SJ. 2012. Stocking and transportation of sea cucumber. In: Sea Cucumber Aquaculture Technology. Aqua Info Press, Seoul, Korea, 310-318.

Kashio S, Yamana Y, Furukawa N, Uekusa R and Goshima S. 2016. Seasonal microhabitat use patterns in Japanese sea cucumber *Apostichopus japonicus* in Funka Bay, Hokkaido, northern Japan. Aquac Sci 64, 371-378. https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.64.371.

Kim CW and Jeong DS. 2017. Study on the improvement effect of the seeds release of sea cucumber, *Stichopus japonicus*. J Pract Agric Fish Res 19, 15-23.

Kim SW, Kim GH, Kim BC, Lee YB, Lee GB, Gal SW, Kim CH, Bang WY and Bang KH. 2024. Examination of antioxidant and immune-enhancing functional substances in fermented sea cucumber. J Life Sci 34, 485-492. https://doi.org/10.5352/JLS.2024.34.7.485.

Lee CS and Park YJ. 1999. Influence of food and density on the growth and survival of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. J Aquac 12, 39-45.

Lee JW, Gil HW, Lee DH, Kim JK and Hur JW. 2018. Variations of size and density of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) released to the habitat conditions. Ocean Polar Res 40, 69-75. https://doi.org/10.4217/OPR.2018.40.2.069.

Li B, Yang H, Zhang T, Zhou Y and Zhang C. 2002. Effect of temperature on respiration and excretion of sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Oceanol Limnol Sin 33, 182-187.

Liu Y, Li F, Song B, Sun H, Zhang X and Gu B. 1996. Study on aestivating habit of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) I: Ecological characteristics of aestivation. J Fish Sci China 3, 41-49.

Oh YW, Kang MS, Wi JH and Lee IT. 2015. Development of ecologically suitable habitat model for the sustainable sea cucumber aquafarm. Ecol Resil Infrastruct 2, 64-79. https://doi.org/10.17820/eri.2015.2.1.064.

Park KI, Kim YJ and Kim DH. 2013a. Analyzing economic effectiveness of the sea cucumber seed releasing program in Gyeongsangbuk-do region. J Fish Bus Adm 44, 81-90. https://doi.org/10.12939/FBA.2013.44.1.081.

Park KJ, Park YJ, Kim SK, Choi SD, Kim YG and Choi NH. 2007. Histological study on the reproductive cycle of *Apostichopus japonicus* in the west coast of Korea. J Aquac 20, 26-30.

Park KJ, Ryu SO, Baek YS, Kim YS, Kang HW and Han HS. 2013b. Substrate characteristics of sea cucumber *Stichopus japonicus* habitats in the west coast of Korea. Korean J Fish Aquat Sci 46, 886-891. https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0886.

Ru XS, Zhang LB, Liu SL, Sun JC and Yang HS. 2018. Energy budget adjustment of sea cucumber *Apostichopus japonicus* during breeding period. Aquac Res 49, 1657-1663. https://doi.org/10.1111/are.13621.

WoRMS Editorial Board. 2026. Holothuroidea de Blainville, 1834. World Register of Marine Species. Retrieved from https://www.marinespecies.org on September 9, 2026.

Yamana Y, Hamano T and Goshima S. 2009. Seasonal distribu-

tion pattern of adult sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Stichopodidae) in Yoshimi Bay, western Yamaguchi Prefecture, Japan. Fish Sci 75, 585-591. https://doi.org/10.1007/s12562-009-0076-2.

Yamana Y, Furukawa Y, Kashio S and Goshima S. 2014. Environmental characteristics of the habitats of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* around Hokkaido–Several inferences from Southern Hokkaido. Aquac Sci 62, 163-182. https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.62.163.

Yang HS, 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. Aquac Res 36, 1085-1092. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01325.x.

Zhang Q and Liu Y. 1998. The Culture and Enhancement Techniques of Sea Cucumbers and Sea Urchins. Qingdao Ocean University Publishing House, Qingdao, China.