

남해 강진만 수하식 및 살포식 패류양식장의 다모류군집구조 양상과 저서생태계 건강도 평가

김선영* · 윤상필**† · 박소현*** · 정래홍****

* 국립수산과학원 해양환경연구과 연구원, ** 국립수산과학원 해역이용영향평가센터 해양수산연구사

*** 국립수산과학원 해양환경연구과 해양수산연구사, **** 국립수산과학원 남해수산연구소 기후환경자원과 해양수산연구관

Patterns in Benthic Polychaete Community and Benthic Health Assessment at Longline and Bottom Culture Shellfish Farms in Gangjin Bay, Namhae, Korea

Sunyoung Kim* · Sang-Pil Yoon**† · Sohyun Park*** · Rae Hong Jung****

* Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

** Senior Researcher, Marine Environmental Assessment Center, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

*** Senior Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

**** Principal Researcher, South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Korea

요 약 : 본 연구는 패류양식업이 밀집한 남해 강진만 해역에서 수하식 및 살포식 양식해역과 비양식해역을 구분하여 양식활동으로 인한 유기물 축적과 저서다모류군집 변화를 파악하고, 어장환경평가 기법을 활용하여 건강도를 평가하고자 수행되었다. 남해 강진만 해역의 평균 입도, 수온, 염분농도, 총유기탄소 등의 시·공간 분포는 정점간에 큰 차이가 없었던 반면, 출현 종수, 개체밀도와 종다양도 등은 살포식 양식해역의 정점이 다른 해역의 정점과 비교해 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 한편 집괴분석과 주요좌표분석 결과에서도 살포식 양식해역 정점의 저서다모류군집이 나머지 정점의 군집과 뚜렷하게 구분되었다. 수하식 양식해역의 정점과 비양식해역 정점에서는 오염지시종인 *Scolectoma longifolia*와 *Sigambra tentaculata*가 우점종으로 출현하였으나, 수심과 해수 유통 등의 물리적인 요인에 의한 영향을 받는 일부 정점을 제외하면 점유율이 높지 않았다. 강진만 해역의 저서생태계 건강도는 1~2등급으로 양호한 상태였다. 그러나, 다모류군집구조의 시·공간 분포와 저서생태계 건강도지수를 고려하면 살포식 양식해역의 퇴적환경은 양식으로 인한 물리적인 교란에 영향을 받는 것으로 보여진다.

핵심용어 : 저서다모류군집, 수하식 패류양식장, 살포식 패류양식장, 저서생태계 건강도 평가, 강진만

Abstract : This study was conducted to investigate the changes in the structure of benthic communities resulting from aquaculture activities and to assess the benthic health status of surface sediment in Gangjin Bay, a region known for concentrated shellfish aquaculture on the southern coast of Korea. Survey stations were divided into longline culture, bottom culture, and non-cultivation areas. The spatiotemporal distribution of physiochemical factors such as the grain size, water temperature, salinity, and total organic carbon in Gangjin Bay showed no significant differences between sampling stations. However, the species number, density, and diversity were relatively lower at the sampling stations in the bottom culture areas than at the other stations throughout the entire survey period. Cluster analysis and principal coordinates analysis also clearly distinguished the benthic communities in the bottom culture areas from those in the other sampling areas. At the sampling stations in the longline culture and non-cultivation areas, *Scolectoma longifolia* and *Sigambra tentaculata*, which are indicator species of organically enriched areas, appeared as dominant species. However, excluding some stations influenced by physical factors such as the water depth and current speed, the occupancy rate was not high. The health assessment results, conducted using the fisheries environment assessment method, revealed good conditions with Grades 1 and 2 across the entire area. However, an examination of the spatiotemporal changes in benthic communities and the benthic health index indicated that the benthic environment in the bottom culture areas was affected by physical disturbances.

Key Words : Benthic Polychaete Community, Longline Culture, Bottom Culture, Shellfish Farms, Benthic Health Assessment, Gangjin Bay

* First Author : syingk@naver.com, 051-720-2532

† Corresponding Author : spyoon@korea.kr, 051-720-2962

1. 서론

우리나라 패류 양식업 면허는 2022년에 약 5,220건으로 전체 천해양식 면허의 52%에 해당하여 높은 비중을 차지하며, 해조류 양식 다음으로 면허면적(43,097 ha)이 넓고 생산량(42만 톤)이 많다. 패류 양식의 생산량은 2007년에 최대 47.9만 톤까지 생산되기도 했으나, 대량폐사와 종패공급부족으로 2013년에는 29.1만톤까지 급감하였고, 최근에 41.5만톤의 수준에 머무르고 있다(KOSIS, 2022).

이러한 양식 생산성의 저하는 연안해역의 무분별한 개발 등으로 인한 육상기인 오염물의 유입증가 외에도 양식장의 과밀화, 장기간의 이용, 노후화된 시설 및 어장환경의 부실한 관리 등이 양식장 환경을 악화시키고, 양식생물의 성장 저하와 질병 발생, 대량폐사 등을 유발함으로써 발생된다(Choi et al., 2013; NIFS, 2016).

양식 활동이 주변 환경, 특히 저층 환경에 미치는 영향은 근본적으로 양식 과정에서 발생하는 부산물의 과다한 퇴적과 분해과정에서 심각한 수준의 환경 교란을 일으키기 때문이다. 이러한 교란은 사료를 직접 투입하는 어류 가두리양식장에서 더 높게 발생하며(Gowen et al., 1990; Holmer and Kristensen, 1992; Tsutsumi, 1995; Christensen et al., 2000; Yokoyama et al., 2004) 사료의 직접적인 공급이 없는 패류양식장이나 해조류양식장에서는 양식활동으로 인한 저층 교란이 상대적으로 적다고 알려져 있다(Baudinet et al., 1990; Grant et al., 1995; Buschmann et al., 1996; Cranford et al., 2007; Zhang et al., 2009). 그러나 패류양식의 경우에도 양식생물 및 부착생물들의 배설물과 위분, 양식과정에서 탈락한 생물체 등이 해저면으로 퇴적되어 부가적인 유기물 유입이 발생한다(Crawford et al., 2003). 특히 유속이 낮은 내만에서 장기간에 걸쳐 패류가 고밀도로 양식되는 경우, 유기물 오염에 의한 환경교란이 발생한다는 결과들이 보고되었다(Hartstein and Rowden, 2004; Giles et al., 2006; Metzger et al., 2007; Robert et al., 2013).

국내 패류 양식장에 대한 연구들은 양식장의 황산염 환원과 영양염 순환 특성(Kim et al., 2011, Hyun et al., 2013) 및 저서동물 군집(Yoon et al., 2009; Park et al., 2017; Park et al., 2021b)에 대해 조사해 왔지만 대부분 굴과 홍합 등을 생산하는 수하식 패류양식장을 중심으로 수행되었다. 반면 바지락과 고막류 등을 생산하는 살포식 양식장에 대한 연구는 표층 퇴적물 내 유기물과 미량금속의 분포(Choi et al., 2013; 2015; Lee et al., 2020)에 국한되어 있고, 저서동물군집에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다(Kang et al., 2002).

특히, 살포식 양식해역의 패류들은 수하식 양식으로 생산하는 패류들과 달리 퇴적물 내에 서식하여 퇴적환경의 영향을 직접적으로 받는다. 또한 살포식 양식해역에서 형망을 이용한 패류 채취는 퇴적물의 물리적 교란을 대규모로 일으키므로 주변해역의 저서동물 군집구조에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되어 그 변화를 파악할 필요가 있다.

남해 강진만은 수출용 패류생산 지정해역으로 관리가 이루어지고 있으며, 만의 남단에는 피조개와 새꼬막을 양식하는 살포식 양식장이, 만의 중앙부에는 수하식 굴양식장이 운영중이다. 이번 연구에서는 패류양식업이 밀집한 강진만에서 수하식 및 살포식해역과 비양식해역을 구분하여 양식활동으로 인한 유기물 축적과 이에 따른 저서다모류군집의 변화를 파악하고, 어장환경평가 기법을 활용하여 대상해역의 건강도를 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지 개황

남해 강진만은 경상남도의 남해군, 사천시와 하동군에 둘러싸여 있는 반폐쇄성 내만으로 남북길이 약 18 km, 동서길이 약 15 km에 평균수심은 약 3.6 m이다(Fig. 1). 연구해역은 지형적으로 북쪽의 남강과 주변의 소규모 하천에서 담수가 유입되며, 해수는 좁은 3개의 수로를 통해 유통된다. 특히 해수는 남쪽의 창선수로와 동쪽의 대방수로를 통해 남해와, 서쪽의 노량수로를 통해 여수만과 유통된다(Park et al., 2011).

강진만은 국내 주요 패류 생산해역 중 하나로 해면의 5,290 ha는 수출용 패류생산 지정해역 제7호로 지정되어 있으며(MOF, 2023), 수입국의 기준에 따라 해역의 수질과 패류의 위생 상태를 비롯하여 오염원에 대한 지속적인 감시와 관리가 이루어지고 있다(Park et al., 2010; Shin et al., 2018). 강진만의 패류양식장은 만의 남단부에 피조개와 새꼬막을 양식하는 살포식 양식장이 밀집해 있고, 남해군 설천면 인근의 만 중앙부에는 수하식 굴양식장이 운영중이다. 조사 기간 직후인 2016년에 강진만 지정해역 내부에는 총 182건에 1,118 ha의 어업권이 허가되어 있었다. 이 중 양식어업은 새꼬막 양식(103건, 594 ha)이 가장 많았고, 다음으로는 바지락(30건, 228 ha), 피조개(27건, 176 ha) 및 굴(22건, 120 ha) 순이었다. 또한, 지정해역 내의 패류 생산량은 굴 1,790톤, 새꼬막 1,204톤 및 피조개 285톤이었다(NIFS, 2018).

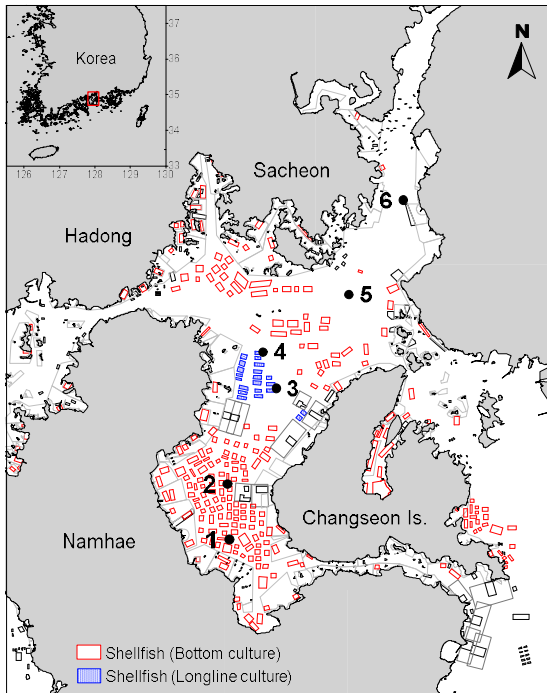


Fig. 1. Map of study area and 6 sampling stations in Gangjin Bay, Namhae, Korea.

2.2 시료채집 및 분석

남해 강진만 패류양식장의 저서다모류군집의 구조와 건강도를 파악하고자 살포식 양식해역(정점 1, 2), 수하식 양식해역(정점 3, 4)과 비양식해역(정점 5, 6)을 구분하여 2013년 4월부터 2015년 7월에 걸쳐 10회의 현장조사를 계절별로 실시하였다.

퇴적물 시료는 채집면적 0.05 m²의 채니기(van Veen grab)를 이용하여 정점 당 3회씩 채집하였으며, 이 중 2회 채집분은 저서동물군집 분석용으로, 1회 채집분은 표층퇴적물의 지화학적 특성 분석용으로 사용하였다.

저서동물 분석용 시료는 현장에서 망목 크기 1.0 mm의 체에 걸러 대형저서동물을 분리하였고, 10%의 중성포르말린으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서 분류군별로 선별작업을 거친 후 저서다모류에 대해 종 수준까지 동정하고, 종별로 계수하였다.

저층수에 대한 조사항목으로는 수온, 염분농도, 용존산소 농도를(Dissolved Oxygen, DO) 현장에서 다기능수질측정기(YSI 600QS)를 이용하여 측정하였다. 표층퇴적물 특성을 알아보기 위해 평균입도, 산휘발성황화물(Acid Volatile Sulfide, AVS) 및 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)를 분석하였다. 이 중 평균입도와 AVS 분석은 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에 따라 수행하였다. 한편 TOC는 동결건조시

킨 시료 0.5 g에 1 N HCl 10 mL를 첨가하여 탄산염을 제거하고, 70 °C에서 24시간 동안 수분과 잔류염소를 날려보냈다. 전처리된 시료는 105 °C에서 2시간 건조시키고, 실온이 될 때까지 데시케이터에서 보관한 후 3~5 mg의 시료를 주석박막으로 포장하여 CHN 원소분석기(PerkinElmer, US/2400)로 분석하였다.

저서다모류군집의 구조를 파악하기 위해 출현 종수, 출현 개체수, 종다양도 지수(H', Shannon and Weaver, 1963) 및 저서생태계건강도지수(Jung et al., 2023) 등을 계산하였다. 군집의 유사성 또는 이질성을 비교하고자 SIMPROF test를 적용하여 집괴분석(Cluster analysis)을 수행하였다. 또한, 군집간의 차이를 발생시킨 주요인을 알아보기 위해 주요좌표분석법(Principal Co-ordinates analysis, PCO)을 사용하였다(Gower, 1966). 이때 저서다모류의 개체수 자료를 fourth root로 변환하였고, Bray-Curtis similarity를 구하여 적용하였다(PRIMER-E Ltd., Ver6.0). 통계분석은 SPSS Statistics v21을 이용하여 수행하였고, 통계적 유의수준은 p-value<0.05로 하였다.

3. 결과

3.1 환경특성

조사 해역의 정점별 수심은 강진만 내측에 위치한 정점 1에서 평균 4.6 m로 가장 낮았고, 만 중앙부에 위치한 정점 5에서 평균 17.3 m로 가장 깊었다. 수심은 정점 5를 제외하면 정점간 차이는 크지 않았다(Table 1). 조사 해역의 저층수온은 5.8~24.6 °C(평균 15.8±6.4 °C)의 범위를, 염분농도는 29.0~33.7 psu(평균 32.0±1.2 psu)의 범위를 나타내 정점간 차이는 관찰되지 않았다. 조사 해역은 여름철에 고수온과 저염분 및 저산소 농도를 나타내 일반적인 온대 해역의 특성을 보였다. 용존산소는 2.69~11.06 mg/L(평균 7.7±2.4 mg/L)의 범위에 일부 조사 시기의 여름철에 정점 1~4에서 빈산소 또는 저산소가 관찰되었다.

표층퇴적물의 지화학적 특성분석 결과, 조사 정점의 평균 입도는 5.6~9.0 ϕ의 범위에 니질과 사니질 퇴적상이 우세하였으며, 정점 5의 평균 입도가 5.6 ϕ로 가장 조립하였다(Fig. 2). 표층퇴적물 내 총유기탄소(TOC) 농도는 9.40~17.15 mg/g dry의 범위였다. 정점별 총유기탄소의 평균 농도는 정점 6(평균 12.61 mg/g dry)에서 가장 낮았고, 정점 2(평균 15.02 mg/g dry)에서 가장 높았으나 그 차이가 크지 않았다(p<0.05). 강진만 조사 정점의 총유기탄소 농도범위는 어장환경평가의 기준으로 오염초기 해역의 기준 농도인 10.0~17.0 mg/g dry의 범위에 속해 전반적으로 약간 오염된 상태였다.

남해 강진만 수하식 및 살포식 패류양식장의 다모류군집구조 양상과 저서생태계 건강도 평가

Table 1. Summary of Physico-chemical parameters at each station in Gangjin Bay, Namhae, Korea

Station	Parameter	2013			2014				2015		
		Apr.	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Jan.	May	Jul.
St.1	Depth (m)	4.5	6.6	3.7	3.6	4.4	5.6	3.5	3.8	5.6	5.0
	Temp. (°C)	12.1	24.3	9.0	5.8	20.8	24.6	13.1	6.1	18.8	22.4
	Salinity (psu)	32.8	31.9	31.6	33.0	33.4	29.0	31.6	32.9	30.9	31.3
	DO (mg/L)	8.83	3.81	11.06	10.89	7.04	2.74	10.18	10.39	7.26	5.38
	TOC (mg/g dry)	13.35	14.33	13.73	16.30	15.10	12.70	15.75	15.80	15.55	15.80
St.2	Depth (m)	5.6	5.5	5.3	4.4	5.5	6.2	4.6	5.5	6.2	5.7
	Temp. (°C)	11.9	23.8	10.5	5.9	20.3	24.4	14.6	6.9	17.6	22.4
	Salinity (psu)	32.9	32.0	31.9	33.3	33.3	29.5	32.0	33.1	31.1	31.3
	DO (mg/L)	8.84	4.01	11.78	10.43	7.12	2.69	8.03	10.67	7.67	5.71
	TOC (mg/g dry)	12.19	14.85	15.90	14.55	14.00	14.55	15.40	17.15	15.95	15.70
St.3	Depth (m)	7	5.5	5.7	5.6	7.2	7.2	7.8	7.3	7.5	6.5
	Temp. (°C)	12.2	23.0	10.4	6.4	19.5	23.5	15.2	7.6	17.4	22.5
	Salinity (psu)	32.9	32.0	31.9	33.0	33.6	29.7	32.3	33.2	31.4	31.1
	DO (mg/L)	8.74	3.88	11.71	10.61	7.44	5.66	7.65	10.17	7.77	5.95
	TOC (mg/g dry)	11.84	13.65	15.20	13.00	12.35	12.35	11.85	11.25	14.30	13.85
St.4	Depth (m)	6.2	7.2	5.5	6.5	6.2	4.9	7.9	6.5	7.1	6.5
	Temp. (°C)	12.8	23.1	11.8	6.6	19.9	24.0	15.0	7.6	17.7	22.6
	Salinity (psu)	32.6	31.8	32.1	33.0	33.3	29.7	32.1	33.2	31.0	30.8
	DO (mg/L)	8.59	3.07	8.64	10.47	7.24	4.68	7.74	10.41	7.74	5.79
	TOC (mg/g dry)	11.70	13.95	11.50	14.40	12.75	10.90	13.30	12.00	14.20	14.60
St.5	Depth (m)	16.5	15	17.5	17.3	17.3	19	15	18	18.2	19
	Temp. (°C)	12.7	21.4	11.7	6.7	19.0	23.8	15.4	7.8	16.6	22.5
	Salinity (psu)	32.8	32.3	32.0	33.1	33.7	29.8	32.4	33.3	32.1	30.7
	DO (mg/L)	8.39	3.97	8.69	9.92	7.33	4.63	7.58	9.95	7.45	5.95
	TOC (mg/g dry)	14.16	13.90	12.25	14.75	16.35	13.50	14.00	14.95	14.70	14.50
St.6	Depth (m)	7.2	8.3	7.5	7.2	7.3	5.7	8.8	6.4	5.3	5.5
	Temp. (°C)	13.0	22.4	8.4	6.2	19.4	23.8	15.7	7.1	17.6	22.7
	Salinity (psu)	32.6	32.2	30.7	32.8	33.6	29.6	32.3	32.8	30.8	29.7
	DO (mg/L)	8.48	4.14	9.44	10.75	7.31	6.07	7.68	10.74	7.2	5.69
	TOC (mg/g dry)	15.82	14.50	10.45	13.30	13.15	9.40	12.35	13.70	11.00	12.45

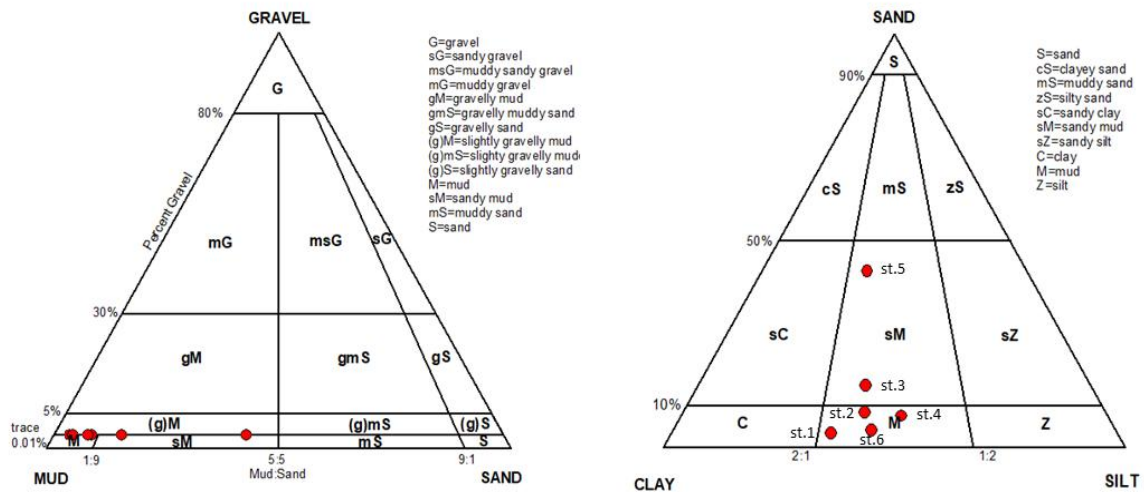


Fig. 2. Classification of surface sediment samples from the 6 stations in Gangjin Bay, Namhae, Korea.

3.2 저서다모류군집 생태지수

저서다모류는 조사 시기 동안 총 128종이 출현하였고, 정점별 출현 종수는 정점 1에서 0~8종(평균 5종), 정점 2에서 5~26종(평균 13종), 정점 3에서 7~45종(평균 33종), 정점 4에서 20~54종(평균 31종), 정점 5에서 18~50종(평균 32종), 정점 6에서 16~30종(평균 23종)의 범위를 나타내 살포식 양식해역의 정점 1과 정점 2에서 출현 종수가 상대적으로 적었다($p<0.05$). 특히 정점 1은 2013년 8월에 다모류가 출현하지 않았다(Fig. 3a).

저서다모류의 출현 밀도는 정점 1과 정점 2에서 각각 0~205 ind./m²(평균 72 ind./m²)와 30~345 ind./m²(평균 163 ind./m²)의 범위를 나타내었다. 수하식 양식해역의 정점 3과 정점 4는 55~1,895 ind./m²(평균 1,059 ind./m²)와 270~2,800 ind./m²(평균 905 ind./m²)의 범위였고, 만 중앙부의 정점 5에서는 285~3,675 ind./m²(평균 1,702)로 조사 시기에 따른 밀도 변화가 컸다. 마지막으로 정점 6의 밀도는 140~890 ind./m²(평균 578 ind./m²)의 범위였다(Fig. 3b). 저서다모류의 출현 밀도는 출현 종수의 경향과 유사하게 살포식 양식해역의 정점이 수하식 및 비양식해역의 정점과 비교해 상대적으로 적었다($p<0.05$).

저서다모류군집의 다양도(H')는 만 가장 내측의 정점 1에서 0.00~0.18(평균 1.18)의 범위로 다른 정점에 비해 낮았고, 조사 시기별로도 변화가 컸다($p<0.05$). 다음으로 정점 2는 1.56~3.03(평균 2.16), 정점 3은 1.80~3.14(평균 2.72), 정점 4는 2.71~3.11(평균 2.84), 정점 5는 1.93~2.99(평균 2.35), 정점 6은 2.33~2.76(평균 2.53)의 범위를 나타내 정점 1을 제외하면 통계적으로 유의미한 차이는 없었다($p<0.05$, Fig. 3c).

저서생태계 건강도지수(BHI)는 정점 1에서 0~67(평균 45), 정점 2에서 51~80(평균 64), 정점 3에서 49~73(평균 67), 정점 4에서 54~76(평균 68), 정점 5에서 44~80(평균 58), 정점 6에서 60~79(평균 72)의 범위를 나타내었다. 강진만 해역의 건강도는 오염초기의 상태(50~70)에서 오염된 상태(25~50)의 범위를 보였다(Fig. 3d). 건강도지수는 다양도와 유사하게 살포식 양식해역의 정점 1에서 낮게 나타났고, 다음으로 만 중앙의 비양식해역에 위치한 정점 5에서 다른 정점과 비교해 상대적으로 건강도지수가 낮았다($p<0.05$).

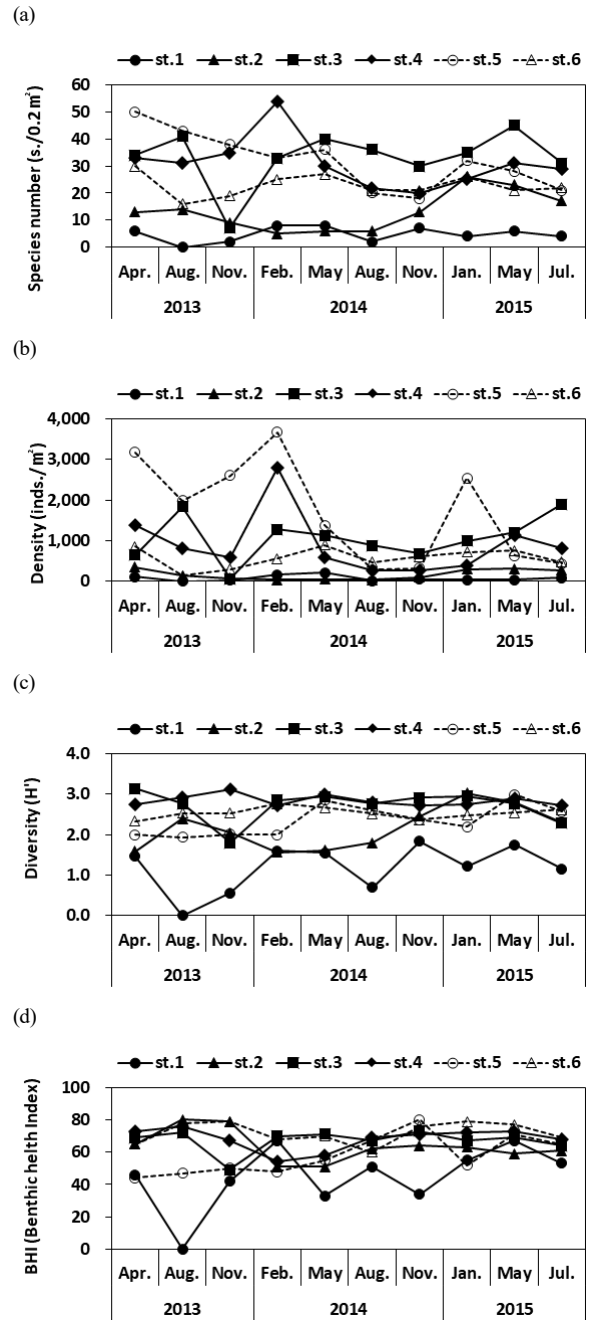


Fig. 3. Spatio-temporal variations of species number (a), density (b), diversity (c) and BHI (d) at each station in Gangjin Bay, Namhae, Korea.

남해 강진만 수하식 및 살포식 패류양식장의 다모류군집구조 양상과 저서생태계 건강도 평가

Table 2. List of dominant species at each station in Gangjin Bay, Namhae, Korea (In parenthesis, showing density (inds./m²) and proportion (%))

Rank	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6
1	<i>Sigambra tentaculata</i> (185, 26)	<i>Glycinde bonhourei</i> (260, 16)	<i>Praxillella affinis</i> (2370, 22)	<i>Scoletoma longifolia</i> (1480, 16)	<i>Scoletoma longifolia</i> (7530, 44)	<i>Sternaspis scutata</i> (855, 15)
2	<i>Scoletoma longifolia</i> (150, 21)	<i>Scoletoma longifolia</i> (165, 10)	<i>Mediomastus</i> sp. (1380, 13)	<i>Mediomastus</i> sp. (945, 10)	<i>Isolda pulchella</i> (1535, 9)	<i>Tharyx</i> spp. (675, 12)
3	<i>Pseudopolydora kemp</i> (55, 8)	<i>Polydora</i> spp. (110, 7)	<i>Terebellides kobei</i> (860, 8)	<i>Praxillella affinis</i> (735, 8)	<i>Tharyx</i> spp. (760, 4)	<i>Scoletoma longifolia</i> (550, 10)
4	<i>Amaeana occidentalis</i> (50, 7)	<i>Amaeana occidentalis</i> (105, 6)	<i>Scoletoma longifolia</i> (740, 7)	<i>Scoloplos armiger</i> (460, 5)	<i>Magelona japonica</i> (570, 3)	<i>Heteromastus</i> sp. (495, 9)
5	<i>Pseudopolydora paucibranchiata</i> (45, 6)	<i>Prionospio krusadensis</i> (100, 6)	<i>Sigambra tentaculata</i> (430, 4)	<i>Isolda pulchella</i> (410, 5)	<i>Prionospio krusadensis</i> (520, 3)	<i>Mediomastus</i> sp. (480, 8)
6	<i>Prionospio pulchra</i> (40, 6)	<i>Tharyx</i> spp. (95, 6)	<i>Glycera chirori</i> (325, 3)	<i>Heteromastus</i> sp. (365, 4)	<i>Mediomastus</i> sp. (515, 3)	<i>Sigambra tentaculata</i> (430, 7)
7	<i>Prionospio krusadensis</i> (30, 4)	<i>Sigambra tentaculata</i> (95, 6)	<i>Heteromastus</i> sp. (315, 3)	<i>Terebellides kobei</i> (330, 4)	<i>Glycera chirori</i> (410, 2)	<i>Glycinde bonhourei</i> (285, 5)
8	<i>Glycinde bonhourei</i> (25, 3)	<i>Heteromastus</i> sp. (70, 4)	<i>Scoloplos armiger</i> (310, 3)	<i>Sigambra tentaculata</i> (280, 3)	<i>Prionospio pulchra</i> (385, 2)	<i>Phylo felix</i> (195, 3)
9	<i>Mediomastus</i> sp. (20, 3)	<i>Paraprionospio cordifolia</i> (70, 4)	<i>Tharyx</i> spp. (265, 3)	<i>Tharyx</i> spp. (275, 3)	<i>Ampharete finmarchica</i> (365, 2)	<i>Aphelochaeta monilaris</i> (165, 3)
10	<i>Micronephthys oligobranchia</i> (20, 3)	<i>Spiochaetopterus koreana</i> (60, 4)	<i>Amaeana occidentalis</i> (200, 2)	<i>Glycera chirori</i> (265, 3)	<i>Micronephthys oligobranchia</i> (360, 2)	<i>Micronephthys oligobranchia</i> (135, 2)

3.3 우점종

각 조사 정점에서 상위 우점종으로 출현한 다모류 종의 밀도와 각 정점에서의 점유율을 Table 2에 나타내었다. 조사 해역에서 정점별로 10% 이상 우점한 다모류는 정점 1은 *Sigambra tentaculata*와 *Scoletoma longifolia*, 정점 2는 *Glycinde bonhourei*와 *S. longifolia*, 정점 3은 *Praxillella affinis*와 *Mediomastus* sp., 정점 4는 *S. longifolia*와 *Mediomastus* sp., 정점 5는 *S. longifolia*, 그리고 정점 6은 *Sternaspis scutata*, *Tharyx* spp., 및 *S. longifolia*였다.

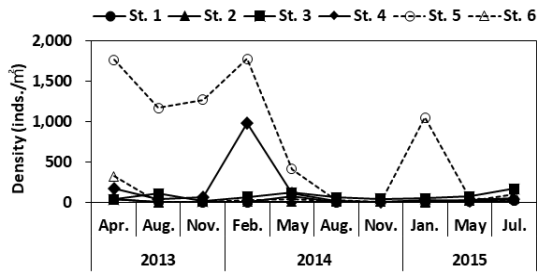
한편 조사 해역에서 총 개체수 대비 상위 10위 우점종의 시-공간 변화 양상은 크게 3가지 유형으로 제시할 수 있었다 (Fig. 4). 우선 1번째 유형은 전체 조사 정점에서 연중 우점한 종으로 *S. longifolia*와 *S. tentaculata*였다. *S. longifolia*는 조사 해역의 최우점종으로 살포식 양식해역의 정점에서는 봄철에만 출현하였고, 반면 수하식 및 비양식해역 정점에서는 연중 출현하였다. 특히 비양식해역의 정점 5에서 높은 밀도로 우점하였다. 다음으로 *S. tentaculata*는 정점 1의 최우점종으로 개체밀도는 수하식 양식해역의 정점과 정점 6에서 상대적으로 더 높았고, 연중 출현하였다. 2번째 유형으로 살포식 양식해역의 정점에서는 출현하지 않았거나 또는 극히 낮은 밀도로 출현하며, 수하식 양식해역과 비양식해역 정점에서 우점한 종들로 *Mediomastus* sp., *Isolda Pulchella*, *Tharyx* spp. 및 *Heteromastus* sp.가 포함되었다. 이 중 *Mediomastus* sp., *Tharyx* spp.와 *Heteromastus* sp.는 연중 출현하였고, *I. Pulchella*

는 겨울철에만 우점하였다. 3번째 유형은 수하식 양식해역에서만 우점한 종들로 *P. affinis*와 *Terebellides kobei*가 포함되었고, 두 종은 공통적으로 정점 3에서 밀도가 높았고 연중 출현하였다. 이밖에 우점종인 *G. bonhourei*와 *Prionospio krusadensis*는 일부 정점과 계절에 우점하였다.

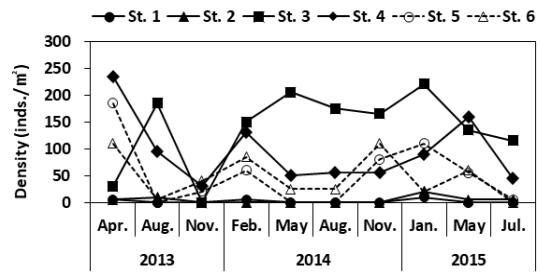
3.4 저서다모류군집분석

강진만 6개 정점의 10회 조사에서 생물이 출현하지 않은 1개 정점을 제외한 59개 정점을 대상으로 군집의 유사성 또는 이질성을 비교하고자 집괴분석(Cluster analysis)과 주요좌표분석법(Principal Co-ordinates analysis, PCO)을 적용하였다. 정점군의 구분은 SIMPROF test 결과를 기초로 구분하였다. 조사 해역에서 저서다모류군집은 크게 3개 정점군(G I, G II, G III)으로 구분되었고, 이 가운데 G III 군집은 다시 5개 소그룹으로 나뉘었다. G I 그룹은 정점 1의 겨울철 정점이 속하였으며, G II 그룹은 2013년 11월 정점 3을 제외한 살포식 양식해역 정점들로 구성되었다. 반면 G III은 2015년 정점 2로 구성된 그룹(G III-1), 수하식 양식해역 정점들로 구성된 그룹 (G III-2), 정점 6 위주로 이루어진 그룹(G III-3), 정점 5 위주로 이루어진 그룹(G III-4), 그 외 비양식해역 정점들 그룹(G III-5)으로 구성되었다. 강진만의 다모류군집은 조사 시기보다는 공간적 분포에 의해 구조를 달리하고 있음을 보여 주었다(Fig. 5a).

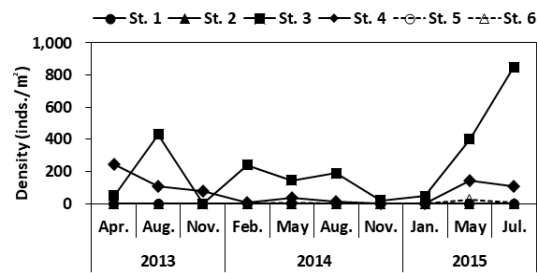
(a) *Scoletoma longifolia* (3)



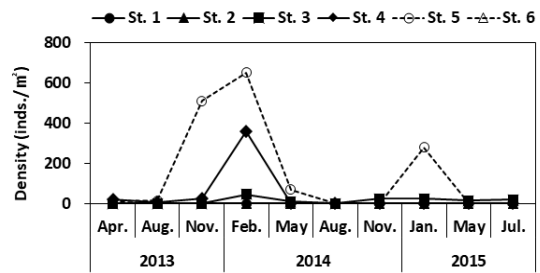
(b) *Mediomastus* sp. (1)



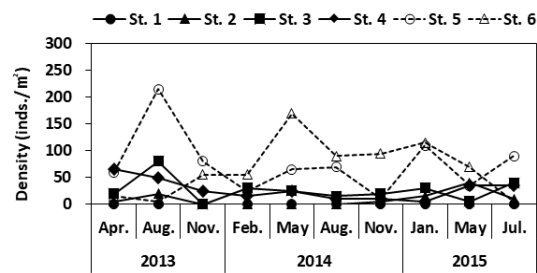
(c) *Praxillella affinis* (2)



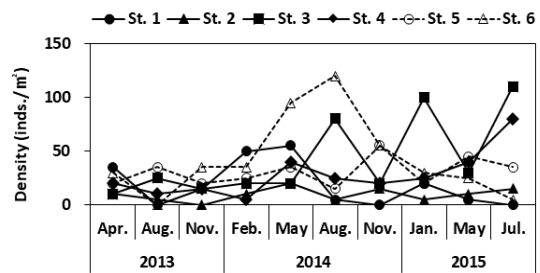
(d) *Isolda pulchella* (2)



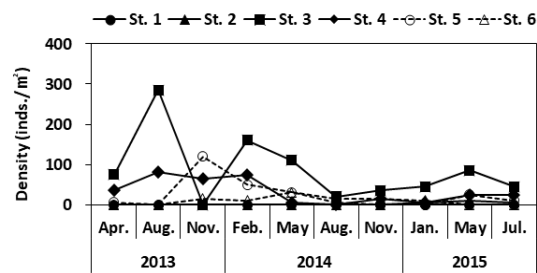
(e) *Tharyx* spp. (2)



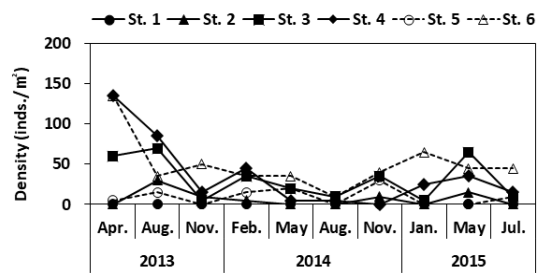
(f) *Sigambra tentaculata* (3)



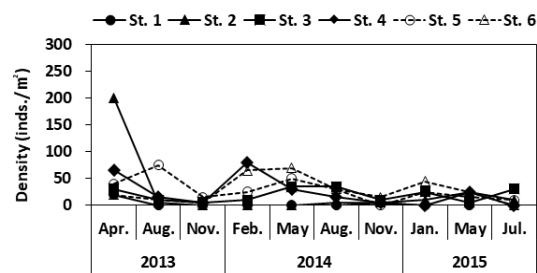
(g) *Terebellides kobei* (2)



(h) *Heteromastus* sp. (1)



(i) *Glycinde bonhourei* (2)



(j) *Prionospio krusadensis* (3)

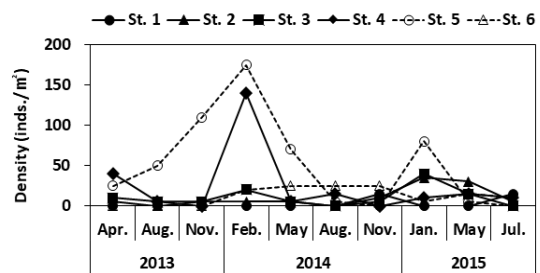


Fig. 4. Spatio-temporal variations of density in Gangjin Bah, Namhae, Korea (In parenthesis, showing ecological groups in BHI).

남해 강진만 수하식 및 살포식 패류양식장의 다모류군집구조 양상과 저서생태계 건강도 평가

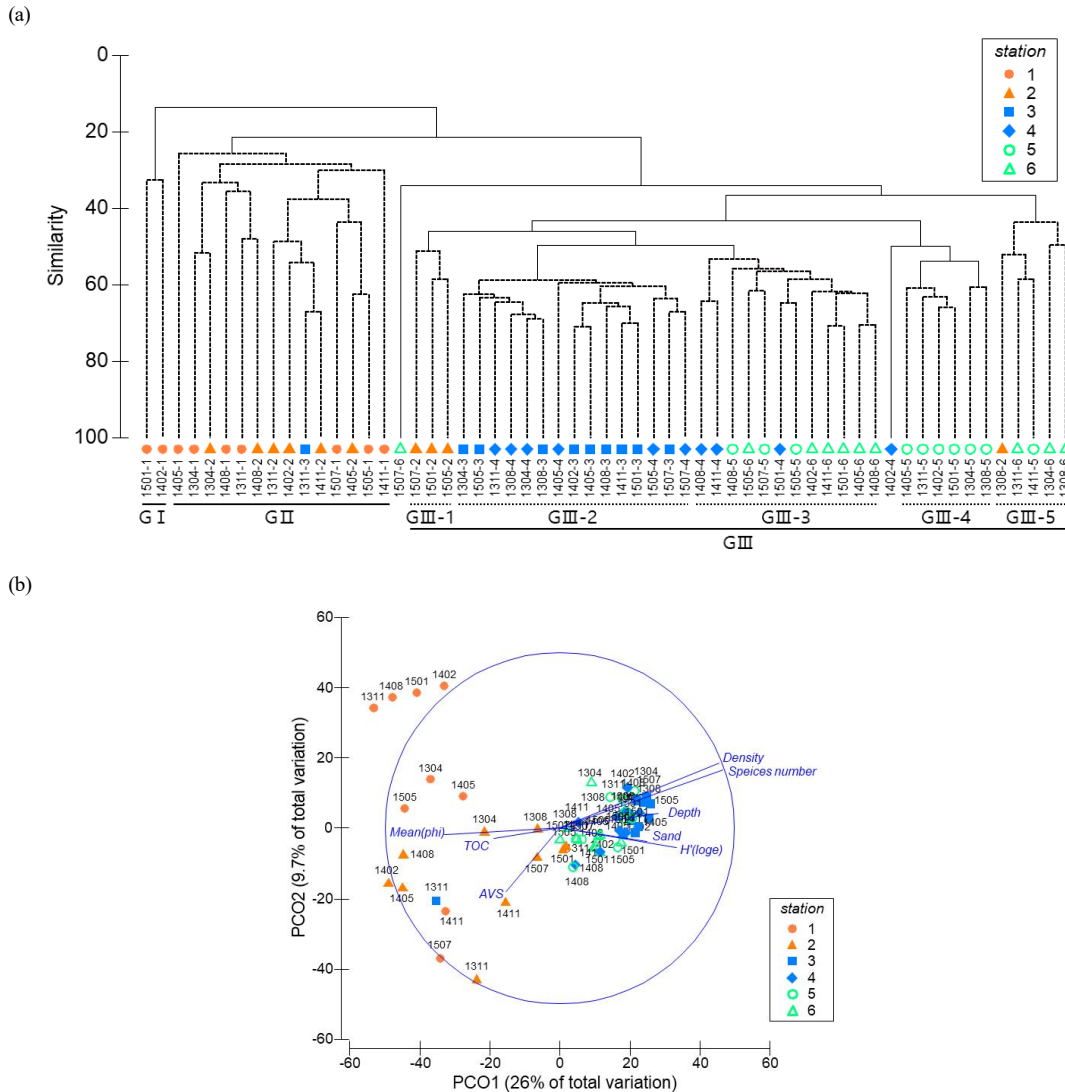


Fig. 5. (a) Dendrogram resulted from cluster analysis. Dotted lines within the dendrogram represent the result of SIMPROF test. (b) Principal Co-Ordinates based on Bray-Curtis similarity from fourth root transformed species abundance.

조사해역의 총 59개의 케이스를 대상으로 주요좌표분석을 수행하여 강진만의 저서다모류군집이 생물학 및 화학적 요인과 어떠한 상관성이 있는지를 파악하였다. 주요좌표분석 결과 첫 번째 축은 전체 변화의 26.0%, 두 번째 축은 9.7%를 설명하였다(Fig. 5). 살포식 양식해역의 정점 1과 정점 2는 평균입도와 유기물 관련 변수와 정방향성을 보였고, 출현 종수 및 밀도와는 역방향으로 2차원 평면상에서 축의 좌측에 넓게 산포되었다. 반면 수하식 양식해역의 정점 3과 정점 4는 2차원 평면 우측에 분포하였으며, 출현 종수, 밀도 그리고 다양도는 정방향의 관계를 보였다. 마지막으로 비양식해역 정점 5와 정점 6은 평면 중앙에 분포하였고, 일부 시기에서는 수하식 양식해역의 정점과 혼재하였다(Fig. 5b).

3.5 어장환경평가 등급

조사해역의 건강도는 어장관리법에서 적용하고 있는 어장환경평가 등급을 사용하여 평가하였다(Table 3). 총유기탄소점수는 2014년 8월의 정점 6을 제외한 모든 정점과 시기에 2등급으로 시·공간 변화가 적었다. 저서생태계 건강도지수(BHI)는 정점 1에서는 2013년 4월, 11월과 2014년 5월, 11월에, 정점 3에서는 2013년 11월에, 정점 5에서는 2013년 4월부터 11월과 2014년 5월에 공통적으로 3등급이었고, 정점 1은 2013년 8월에 4등급을 나타내었다. 반면 이들 시기 이외의 건강도지수는 1등급과 2등급이었다. 따라서 총유기탄소점수와 건강도지수를 합산한 어장환경평가 등급은 생물이 출현하지 않은 2013년 8월의 정점 1을 제외하면, 1등급 또는 2등

Table 3. Grade of fisheries environment assessment using TOC (Total organic carbon) and BHI (Benthic health index) at each sampling station in Gangjin Bah, Namhae, Korea

Station	Index	2013			2014				2015		
		Apr.	Aug.	Nov.	Feb.	May	Aug.	Nov.	Jan.	May	Jul.
St.1	TOC point	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	BHI point	3	4	3	2	3	2	3	2	2	2
	Benthic ecological quality	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2
St.2	TOC point	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2
	BHI point	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
	Benthic ecological quality	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
St.3	TOC point	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	BHI point	2	1	3	2	1	2	1	2	2	2
	Benthic ecological quality	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2
St.4	TOC point	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	BHI point	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2
	Benthic ecological quality	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2
St.5	TOC point	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	BHI point	3	3	3	3	2	2	1	2	1	2
	Benthic ecological quality	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2
St. 6	TOC point	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
	BHI point	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2
	Benthic ecological quality	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2

급을 나타내 건강도가 양호하거나 또는 약간 오염된 상태를 반영하고 있었다.

4. 고 찰

연구해역인 남해 강진만은 상대적으로 좁은 만의 입구에서 제한적으로 해수가 유통된다. 따라서 강진만은 전체가 제한된 유속으로 인하여 세립한 퇴적상이 우세하였으나, 대방수로 입구에 위치한 정점 5는 수심이 비교적 깊고 상대적으로 조립한 퇴적물로 구성되었다. 본 연구의 평균입도는 기존에 수행된 연구 결과와 유사하였고(Woo, 2007; Kang et al., 2002; Choi et al., 2013), 만 내측의 퇴적물 조성은 비교적 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 조사 해역의 총유기탄소농도는 전반적으로 약간 오염된 상태였으며, 양식장의 유무나 양식방법의 차이 그리고 계절에 따른 뚜렷한 차이가 없었다. 한편 출현종에 근거한 집괴분석 결과에서 다모류군집은 살포식 양식해역의 겨울철 정점(GI), 살포식 양식해역 정점(GII)과 그 외 조사 정점 및 시기(GIII)로 구분되고 있어 해역에서의 양식방법의 차이에 따라 저서다모류 군집의 공간분포가 결정되었음을 알 수 있었다. 그러나 총유

기탄소, 평균입도, 수온 및 염분농도 등의 시·공간 분포는 집괴분석 결과로 구분된 정점군에서 큰 차이가 없었다. 반면 다모류군집의 생태지수는 살포식 양식해역 정점군(GI, GII)이 그 외 정점군(GIII)과 비교해 현저히 낮았다. 특히 2013년과 2014년에 빈산소환경이 발생한 여름철에 살포식 양식해역 정점의 생태지수가 매우 낮았으며, 이 시기를 제외하여도 전 조사 기간동안 전반적으로 낮았다. 또한 주요좌표분석 결과에서는 살포식 양식해역의 정점들은 좌표의 좌측으로 넓게 산포하여 있는 반면에 비양식해역과 수하식 양식해역 정점은 상대적으로 좁은 범위에 분포하여 살포식 양식해역이 일정부분 교란된 상태에 있음을 보여주었다. 이와 같이 강진만은 물리·화학적 요인의 차이가 비교적 적은 환경임에도 불구하고, 다모류군집의 시·공간 분포와 정점군의 차이가 관찰되었다. 이것은 환경요인 이외의 인위적인 영향으로 판단되며, 패류의 수확시 발생하는 퇴적물의 물리적 교란이 원인으로 추정된다.

일반적으로 살포식 패류양식장에서 양식생물은 형망을 이용하여 저층 퇴적물을 긁으면서 채취하는 방법을 사용하기에 서식지 교란이 강하게 발생한다(Spencer et al., 1998; Dolmer et al., 1999). 강진만의 살포식 양식해역에서는 매년

봄철에 수확과 종묘 살포로 인하여 서식지가 교란되어 봄철 이후 생태지수가 감소하였다. 이후 새롭게 군집을 형성하는 과정에서 부유된 퇴적물이 재퇴적되는 환경에서 우점할 수 있는 기회종인 *Scoletoma longifolia*와 *Sigambra tentaculata*가 출현하였다. 이들 종은 상대적으로 낮은 개체밀도에서 높은 빈도로 출현하였기 때문에 다른 정점과 비교하여 건강도 등급 역시 높아 교란이 확인되었고, 특히 가장 남측에 위치한 정점 1에서 높았다. 이렇듯 조사 기간동안 살포식 양식해역에서 퇴적물의 물리적 교란은 생물 군집의 다양성 측면에서 일부 부정적인 영향을 주는 것으로 확인되었으나, 퇴적물의 화학적 요인으로는 상대적으로 영향이 적은 것으로 나타났다. 그러나 건강도 측면에서는 고려가 필요할 것으로 판단된다.

수하식 양식해역과 비양식해역의 정점은 집괴분석에서 구분된 3개 정점군에서 1차적으로 동일한 정점군에 포함되었고, 어장환경평가 산출시 3그룹중에 해당하는 *Scoletoma longifolia*와 *Sigambra tentaculata*가 연중 우점종으로 출현하였고, 이들 종의 밀도도 높았다. 그러나 유기물 농도가 높고, 교란된 서식환경에서 극우점하는 기회종의 밀도는 연구해역에서 낮았다. 기존 연구에서, 어류가두리양식장은 사료 공급으로 양식장 아래 및 주변 해역에 기회종이 급증하는 현상을 보이고 있다(Jung et al., 2002; Jung et al., 2007; Park et al., 2021a). 사료의 직접적인 공급이 없는 패류양식장의 경우에도 지형적으로 차폐되어 해수유동이 약하며, 양식패류의 입식량이 많은 해역에서는 저층 유기물농도가 어류가두리 양식장과 유사한 수준(8.35~51.00 mg/g)으로 높거나 소수의 기회종이 우점한다(Choi et al., 2017; Park et al., 2021b). 본 연구의 수하식 양식해역에서 유기물농도와 저서다모류군집을 분석한 결과, 국내의 다른 수하식 패류양식장과 비교해 건강도가 높았다. 이는 연구해역이 기존 연구들에 비해 육지와 이격된 만 중앙부에 위치한다는 점, 양식장 밀집도가 낮다는 점과 조사 정점이 수하식 양식해역의 외측에 위치한 점 등이 복합적으로 반영된 것으로 판단되며, 수하식 패류양식으로 인한 저층 교란은 어류양식장에 비해서 상대적으로 적다는 다수의 논문 결과와 유사하였다(Cranford et al., 2007; Zhang et al., 2009). 한편 양식해역과의 비교를 위한 실험 정점으로 조사한 정점 5는 건강도 등급이 수하식 패류양식해역보다 상대적으로 높아 양식장이 설치되어 있지 않은 정점임에도 군집이 유기물의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이것은 조사해역의 동, 서 및 남쪽의 3개 수로에서 유입되는 해수가 만의 중앙부에서 수렴하는 형태의 해수 유동을 가지기 때문이다. 특히 정점 5 인근에서 해수의 체류 시간이 상대적으로 길고, 육상 및 해양기원의 오염물질이 축적되었을 것으로 추정할 수 있다(Kim et al., 2021).

살포식 양식해역의 물리적 교란과 일정 수준의 유기물 농도에도 불구하고, 강진만에서 어장환경평가 등급은 1 또는 2 등급으로 「어장관리법」상의 제제 관리대상에 포함되지 않은 양호한 수준이었다. 그러나 1999년에 동일 해역에서 수행된 결과에서는 r-선택성 소형다모류로 기회종인 *Capitella capitata*가 만 전체에서 높은 출현 밀도로 서식하여 유기물 오염이 지속적으로 발생하고 있음을 보고한 바 있어 차이가 있었다(Kang et al., 2002). 본 연구결과에서는 전해역에서 *Capitella sp.*가 출현하지 않았으며, 이 종을 제외하여도 기회종의 비율이 낮았다.

이상에서와 같이 남해 강진만 해역은 우리나라의 대표적인 패류양식해역으로 퇴적환경은 유기물에 의한 오염이 비교적 적었고, 건강도에서도 양호한상태를 반영하고 있다. 그러나 살포식 양식해역은 양식생물의 채취 방법에 따른 물리적인 교란으로 인해 생물군집 측면에서는 일정부분 부정적인 영향이 확인되었다. 따라서 연구해역에 대한 지속적인 감시와 함께 저서환경의 교란을 줄일 수 있는 적절한 양식관리방안이 요구된다.

사 사

이 논문의 완성도를 높이기 위해 세심하게 검토해 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다. 이 논문은 2023년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(P2024049)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- [1] Baudinet, D., E. Alliot, B. Berland, C. Grenz, M. Plante-Cuny, R. Plante, and C. Salen-Picard(1990), Incidence of mussel culture on biogeochemical fluxes at the sediment water interface, *Hydrobiologia*, Vol. 207, pp. 187-196.
- [2] Buschmann, A. H., D. A. Lopez, and A. Medina(1996), A review of environmental effects and alternative production strategies of marine aquaculture in Chile, *Aquacultural Engineering*, Vol. 15, pp. 397-421.
- [3] Choi, M., H. C. Kim, D. W. Hwang, I. S. Lee, Y. S. Kim, Y. J. Kim, and H. G. Choi(2013), Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeosu Bay and Gangjin Bay, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, pp. 424-436.
- [4] Choi, M., I. S. Lee, H. C. Kim, and D. W. Hwang(2015), Distribution and contamination status of trace metals in surface sediments of shellfish farming areas in Yeosu and

- Gangjin Bays, Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 48, pp. 789-797.
- [5] Choi, M., I. S. Lee, D. W. Hwang, H. C. Kim, S. P. Yoon, S. Yun, C. S. Kim, and I. S. Seo(2017), Organic enrichment and pollution in surface sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with dense oyster farms, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 50, pp. 777-787.
- [6] Christensen, P. B., S. Rysgaard, N. P. Sloth, T. Dalsgaard, and S. Schwaerter(2000), Sediment mineralization, nutrient fluxes, denitrification and dissimilatory reduction to ammonium in an estuarine fjord with sea cage trout farms, Aquatic Microbial Ecology, Vol. 21, pp. 73-84.
- [7] Cranford, P. J., P. M. Strain, M. Dowd, B. T. Hargrave, J. Grant, and M. C. Archambault(2007), Influence of mussel aquaculture on nitrogen dynamics in a nutrient enriched coastal embayment, Marine Ecology Progress Series, Vol. 347, pp. 61-78.
- [8] Crawford, C. M., C. K. A. Macleod, and I. M. Mitchell(2003), Effects of shellfish farming on the benthic environment. Aquaculture, Vol. 224, pp. 117-140.
- [9] Dolmer, P., P. S. Kristensen, and E. Hoffmann(1999), Dredging of blue mussels (*Mytilus edulis* L.) in a Danish sound: stock sizes and fishery-effects on mussel population dynamic, Fisheries Research, Vol. 40, pp. 73-80.
- [10] Giles, H., C. A. Pilditch, and D. G. Bell(2006), Sedimentation from mussel (*Perna canaliculus*) culture in the Firth of Thames, New Zealand: impacts on sediment oxygen and nutrient fluxes, Aquaculture, Vol. 261, pp. 125-140.
- [11] Gowen, R. J., H. Rosenthal, T. Makinen, and I. Ezzi(1990), Environmental impact of aquaculture. In: Aquaculture Europe 89: Business joins Sciences, edited by de Pauw N. and R. Billard, European Aquaculture Society, Special Publication No. 12, Bredene, Belgium.
- [12] Gower, J. C.(1966), Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis, Biometrika, Vol. 53, No. 3-4, pp. 325-338.
- [13] Grant, J., A. Hatcher, D. B. Scott, P. Pocklington, C. T. Schafer, and G. V. Winters(1995), A multidisciplinary approach to evaluating impacts of shellfish aquaculture on benthic communities, Estuaries, Vol. 18, pp. 124-144.
- [14] Hartstein, N. D. and A. A. Rowden(2004), Effect of biodeposits from mussel culture on macroinvertebrate assemblages at sites of different hydrodynamic regime, Marine Environmental Research, Vol. 57, No. 5, pp. 339-357.
- [15] Holmer, M. and E. Kristensen(1992), Impact of marine fish cage farming on metabolism and sulfate reduction of underlying sediments, Marine Ecology Progress Series, Vol. 80 pp. 191-201.
- [16] Hyun, J. H., S. H. Kim, J. S. Mok, J. S. Lee, S. U. An, W. C. Lee, and R. H. Jung(2013), Impacts of long-line aquaculture of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) on sulfate reduction and diffusive nutrient flux in the coastal sediments of Jinhae-Tongyeong, Korea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 74, No. 1, 187-198.
- [17] Jung, R. H., H. S. Lim, S. S. Kim, J. S. Park, K. A. Jeon, Y. S. Lee, J. S. Lee, K. Y. Kim, and W. J. Go(2002), A study of the macrozoobenthos at the intensive fish farming ground in the southern coast of Korea, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 7, No. 4, pp. 235-246.
- [18] Jung, R. H., S. P. Yoon, J. N. Kwon, J. S. Lee, W. C. Lee, J. H. Koo, Y. J. Kim, H. T. Oh, and S. E. Park(2007), Impact of fish farming on Macrobenthic polychaete communities, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 12, No. 3, pp. 151-159.
- [19] Jung, R. H., S. P. Yoon, S. Park, S., S. J. Hong, Y. J. Kim, and S. Kim(2023), Introduction to the Benthic Health Index Used in Fisheries Environment Assessment, Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 29, No. 7, pp. 779-793.
- [20] Kang C. K., M. S. Baik, J. B. Kim, and P. Y. Lee(2002), Seasonal and spatial distribution of soft-bottom polychaetes in Jinju bay of the southern coast of Korea, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 35, No. 1, pp. 35-45.
- [21] Kim, B., A. Choi, S. An, H. C. Kim, R. H. Jung, W. C. Lee, and J. H. Hyun(2011), Rates of sulfate reduction and iron reduction in the sediment associated with abalone aquaculture in the southern coastal waters of Korea, Ocean and Polar Research, Vol. 33, No. 4, pp. 435-445.
- [22] Kim, J. H., S. E. Park, and W. C. Lee(2021), Modeling Variation in Residence Time Response to Freshwater Discharge in Gangjin Bay, Korea, Korean Journal of Fisheries Aquatic Science, Vol. 54, No. 4, pp. 480-488.
- [23] KOSIS(2022), Korean Statistical Information Service, Fishery Production Survey, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EW0005&conn_path=I3, accessed 2024.01.05.
- [24] Lee, G., H. Hwang, J. B. Kim, and D. W. Hwang(2020), Pollution Status of Surface Sediment in Jinju Bay, a Spraying Shellfish Farming Area, Korea, Journal of the Korean Society

- of Marine Environment and Safety, Vol. 26, No. 4, pp. 392-402.
- [25] Metzger, E., C. Simonucci, E. Viollier, G. Sarazin, F. Prevot, and D. Jezequel(2007), Benthic response to shellfish farming in Thau lagoon: pore water signature, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 72, pp. 406-419.
- [26] MLTM(2010), A Guidebook for the seawater, sediment and marine biota analyses in ocean environment. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Notice No. 2010-491, p. 495.
- [27] MOF(2023), Designated Shellfish Growing Area, Notice No. 2023-30, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea.
- [28] NIFS(2016), Research on the preparation of guidelines for fisheries environment assessment of shellfish and seaweed farms, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea, p. 68.
- [29] NIFS(2018), Sanitary Survey of Shellfish Growing Area in Gangjinman (Designated Shellfish Growing Area No. 7), National Institute Of Fisheries Science, Busan, Korea, p. 111.
- [30] Park, K., M. R. Jo, J. Y. Kwon, K. T. Son, D. S. Lee, and H. J. Lee(2010), Evaluation of the bacteriological safety of the shellfish growing area in Gangjinman, Korea, Korean Journal of Fisheries Aquatic Science, Vol. 43, No. 6, pp. 614-622.
- [31] Park, K., M. R. Jo, H. J. Lee, J. Y. Kwon, K. T. Son, and T. S. Lee(2011), Evaluation of the effect of the discharged water from Bong stream after events on the bacteriological water quality in Gangjinman, Korea, Korean Journal of Fisheries Aquatic Science, Vol. 44, pp. 622-629.
- [32] Park, S., S. Kim, B. R. Sim, S. J. Park, H. C. Kim, and S. P. Yoon(2021a), Changes in Benthic Polychaete Community after Fish Farm Relocation in the South Coast of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 27, No. 7, pp. 943-953.
- [33] Park, S., S. Kim, B. R. Sim, S. J. Park, H. C. Kim, and S. P. Yoon(2021b), Changes in the community structure of benthic polychaetes after the shellfish farm cessation in Tongyeong bay of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 27, No. 5, pp. 605-617.
- [34] Park, S., S. Kim, S. P. Yoon, R. H. Jung and W. C. Lee(2017), Effect of longline shellfish culture on benthic community structure, The Korean Journal of Malacology, Vol. 33, No. 1, pp. 21-34.
- [35] Robert, P., C. W. Mckindsey, G. Chaillou and P. Archambault(2013), Dose-dependent response of a benthic system to biodeposition from suspended blue mussel (*Mytilus edulis*) culture, Marine Pollution Bulletin, Vol. 66, pp. 92-104.
- [36] Shannon, C. E. and W. Weaver(1963), The Mathematical Theory of Communication, University of Illinois Press, Urbana, IL, p. 177.
- [37] Shin S. B., C. W. Lim, J. H. Lee, and S. H. Jung(2018), Evaluation of inland pollution sources impact in the Gangjin bay, Korea, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, Vol. 36, No. 6, pp. 2241-2248.
- [38] Spencer, B. E., M. J. Kaiser, and D. B. Edwards(1998), Intertidal clam harvesting: benthic community change and recovery, Aquaculture Research, Vol. 29, No. 6, pp. 429-437.
- [39] Tsutsumi, H.(1995), Impact of fish net pen culture on the benthic environment of a cove in south Japan, Estuaries, Vol. 18, pp. 108-115.
- [40] Woo, H. J.(2007), Characteristics of foraminiferal distributions in surface sediments of Gangjin bay, Korea, Journal of the Paleontological Society of Korea, Vol. 23, No. 1, pp. 1-13.
- [41] Yokoyama, H., M. Inoue, and K. Abo(2004), Estimation of the assimilative capacity of fish-farm environments based on the current velocity measured by plaster balls, Aquaculture, Vol. 240, pp. 233-247.
- [42] Yoon, S. P., R. H. Jung, Y. J. Kim, S. J. Hong, H. T. Oh, and W. C. Lee(2009), Spatio-temporal changes in macrobenthic community structure and benthic environment at an intensive oyster culturing ground in Geoje-Hansan bay, Korea, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 14, No. 4, pp. 213-228.
- [43] Zhang, J., P. K. Hansen, J. G. Fang, W. Wang, and Z. Jiang(2009), Assessment of the local environmental impact of intensive marine shellfish and seaweed farming-Application of the MOM system in the Sungo Bay, China, Aquaculture, Vol. 287, pp. 304-310.

Received : 2024. 02. 02.

Revised : 2024. 02. 20.

Accepted : 2024. 02. 23.