

어장환경평가 기법과 저서다모류군집을 이용한 전복 가두리 양식장 및 주변 저서생태계 평가

김선영¹ · 박소현² · 홍석진² · 정래홍³ · 윤상필^{4†}

¹국립수산과학원 해양환경연구과 연구원

²국립수산과학원 해양환경연구과 해양수산연구사

³국립수산과학원 남해수산연구소 기후환경자원과 해양수산연구관

⁴국립수산과학원 해역이용영향평가센터 해양수산연구사

Benthic Ecosystem Assessment on Abalone Cage Aquaculture Farms using Polychaete Communities and Benthic Health Index

Sunyoung Kim¹, Sohyun Park², Sok-Jin Hong², Rae Hong Jung³, and Sang-Pil Yoon^{4†}

¹Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

²Senior Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

³Principal Researcher, South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Korea

⁴Senior Researcher, Marine Environmental Assessment Center, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약

전복 가두리 양식이 환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 전라남도 완도군의 전복 가두리 밀집지역에서 퇴적물의 유기물 성분과 저서다모류군집을 분석하였으며, 환경상태를 평가하기 위해 어장관리법상의 어장환경평가등급을 산출하였다. 전복 가두리 밀집해역의 총유기탄소량은 전반적으로 낮은 수준이나 가두리 양식장 아래 보다 대조구에서 확연히 낮았으며, 노화도 주변 양식장 퇴적물의 총유기탄소량이 상대적으로 높았다. 저서생태계 건강도지수(BHI)도 전반적으로 높아 생태계가 교란되지 않았으나, 총유기탄소량과 마찬가지로 노화도 해역의 양식장이 다른 해역에 비해 낮았다. 어장평가등급은 1, 2등급으로 양호한 상태였다. 완도 인근의 전복 가두리 양식장 밀집해역의 환경상태는 양식활동으로 인한 환경교란이 심각한 상태는 아니었으나, 총유기탄소량, 저서생태계 건강도지수 등을 대조구 해역과 비교하였을 때 양식으로 인한 영향은 분명히 존재하였다.

Abstract – To determine the impact of abalone cage farming on environmental quality, organic matter content of sediment and benthic polychaete communities were analyzed in areas where abalone cage farms were concentrated, and the environmental quality grade were calculated according to the Fisheries Management Act. Total organic carbon (TOC) under the abalone cage farms was generally low, but higher than the controls, and was relatively high in the farms around Nohwa Island. Benthic health index (BHI) also showed no signs of ecosystem disturbance, and grades were relatively low in the farms near Nohwa Island. The environmental quality in the densely concentrated area of abalone cage farms near Wando-gun were relatively good, but based on the TOC and BHI, the impact of aquaculture clearly existed.

Keywords: Fisheries Environment Assessment(어장환경평가), Benthic Polychaete Community(저서다모류군집), Abalone Cage Aquaculture Farm(전복가두리양식장), Shellfish Farming Impact(패류양식영향), Benthic Health Index(저서생태계건강도지수), Benthic Ecosystem Assessment(저서생태계평가)

†Corresponding author: spyoon@korea.kr

1. 서 론

전복 가두리 양식은 1980년대부터 기술개발이 시작되어, 1985년 목재를 이용한 해상 가두리 양식이 처음 시도되었다. 1990년대에는 전복 치패가 대량 생산됨에 따라 본격적인 해상 가두리 양식기술 개발이 시작되었으며, 2000년대부터 현재의 해상 가두리 양식이 보편화되어 대량 생산되기 시작하였다(NIFS[2019]). 양식기술의 발달에 따라 전복 생산량도 2002년까지는 100톤 이하였으나, 2003년 1,065톤으로 급격히 증가하였다. 이후 전복 생산량은 매년 꾸준히 증가하여 2021년 23만톤을 생산하기에 이르렀다(KOSIS[2023]). 이처럼 양식기술의 발달에 따라 전복 양식산업은 급성장하였으며, 완도주변 해역을 중심으로 양식 시설 또한 급격히 증가하였다. 양식어장의 장기간 사용, 가두리 시설량 증가와 밀집으로 인한 해수유통의 저하는 양식장 주변 환경을 악화시키는 원인으로 주목 받았다.

국내에서 해상 가두리 양식이 주변 생태계에 미치는 영향에 대한 연구는 유기물의 유입과 순환에 대한 정량적 연구(Shim *et al.*[1997]; Lee *et al.*[2004b]) 및 저서동물군집의 특징과 영향 범위에 대한 연구(Park *et al.*[2000]; Jung *et al.*[2002]; Lee *et al.*[2004a]; Jung *et al.*[2007]; Park *et al.*[2022]) 등 대부분 어류 가두리 양식장을 대상으로 수행되었으며, 가두리 양식에 의한 유기물 부하는 양식장을 중심으로 범위는 제한적이나 강도는 매우 크다는 공통적인 결과를 보고하였다. 반면 전복 가두리 양식장에 대한 연구는 퇴적물에서 황산염 환원(Kim *et al.*[2011])과 영양염 용출(Park *et al.*[2012])에 대한 결과만이 보고되었을 뿐이다. 특히 저서동물군집에 대한 연구는 수하식 패류 양식장에서의 연구 결과(Yoon *et al.*[2009]; Park *et al.*[2017]; Park *et al.*[2021])에 국한되어있다.

이번 연구에서는 우리나라 남서해안에 밀집되어 성행하고 있는 전복 가두리 양식장에서 유기물의 분포와 저서다모류군집을 분석하여 전복 가두리 양식활동이 저서생태계에 미친 영향을 파악하고자 하였다. 또한 국내 양식어장의 환경보전과 관리를 위해 어장관리법에서 시행중인 어장환경평가 방법을 적용하여 전복 가두리 양식장의 어장평가 등급을 산출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채집 및 분석

전복 가두리 양식장이 저서동물군집에 미치는 영향을 분석하기 위해 전복 가두리 양식장이 밀집한 전라남도 완도군 보길도, 노화도, 금일도에서 조사를 실시하였다. 보길도와 노화도에서는 각각 두 개의 조사선을 설정하여 해안선으로부터 바깥으로 나가면서 5개의 양식장 정점과 대조정점 1개씩을 조사하였다. 금일도의 경우 조사선을 설정하여 조사하는데 어려움이 있어서 7개의 양식장 정점과 대조정점 2개를 선정 조사하였

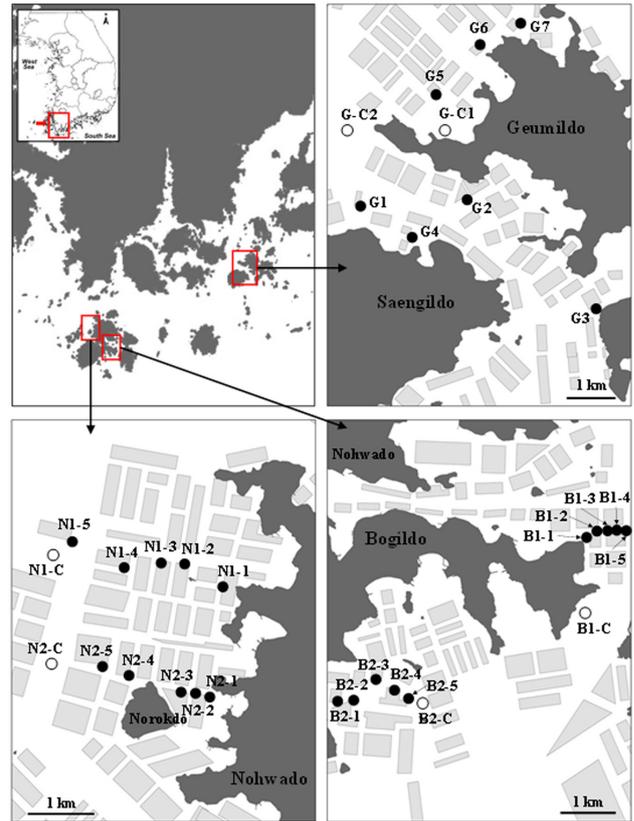


Fig. 1. Location of sampling stations in Nohwado, Bogildo and Geumildo, Southwest Coast of Korea.

다(Fig. 1). 대조정점은 가두리 양식장과 최소 100 m 이상 이격되어 양식활동의 영향이 최대한 미치지 않을 위치로 정하였다. 양식장 정점의 경우 양식중인 가두리 바로 아래에서 퇴적물을 채집하였다.

퇴적물은 채집면적 0.05 m²의 채니기(van Veen grab)를 이용하여 정점 당 4회 반복 채집하였다. 이 중 3회 채집 분은 저서동물군집 분석용으로, 1회 분은 표층퇴적물의 지화학적 특성 분석용으로 사용하였다.

저서동물 분석용 시료는 현장에서 1.0 mm 망목의 체를 이용하여 대형저서동물을 분리하였고, 10 %의 중성포르말린으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서 분류군별로 선별 후 저서다모류에 대해 종 수준까지 동정 후 계수하였다.

표층퇴적물 특성을 알아보기 위해 입도, 산취발성황화물(Acid Volatile Sulfide, AVS), 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)를 분석하였다. 이 중 입도와 AVS 분석은 해양환경공정시험기준(NIFS[2023])을 따랐다. TOC는 동결건조시킨 시료 0.5 g에 1 N 염산용액 10 ml를 첨가하여 탄산염을 제거하고, 70 °C에서 24시간 동안 수분과 잔류염소를 증발시켰다. 이후 105 °C에서 2시간 건조시키고, 실온이 될 때까지 데시케이터에서 보관한 후 3~5 mg의 시료를 주석박막에 싸서 CHN 원소분석기(Element analyzer, PerkinElmer, US/2400)로 분석하였다.

저서다모류군집의 구조를 파악하기 위해 종 수, 개체수, 종 다양도지수(H')(Shannon and Weaver[1963]), 저서생태계건강도지수(Benthic Health Index, BHI) (Jung *et al.*[2023])등을 계산하였다. 저서다모류군집의 차이와 차이를 발생시킨 주된 환경요인을 알아보기 위해 주요좌표분석법(Principal Co-ordinates analysis, PCO)을 사용하였으며, 이때 저서다모류의 개체수 자료를 Square root로 변형하여, Bray-Curtis similarity를 적용하였다(PRIMER-E Ltd., Ver6.0). 또한 전복가두리 양식장의 환경상태를 파악하기 위해 어장관리법 시행규칙 제3조의2의 방법으로 어장환경평가등급을 산정하였다.

3. 결 과

3.1 환경특성

조사해역 수심은 보길도 조사선 1(B1-1~5, B1-C)이 6.2~18.9 m(평균 10.6 m), 조사선 2(B2-1~5, B2-C)는 10.0~12.5 m(평균 11.3 m)로 조사선 1은 정점간의 차이가 큰 반면 조사선 2는 정점간 차가 매우 적었다. 노화도 조사선 1(N1-1~5, N1-C)은 6.5~17.0 m(평균 10.8 m), 조사선 2(N2-1~5, N2-C)는 5.0~7.1 m(평균 6.1 m)로 조사선 2의 수심이 낮고 일정하였다. 금일도 조사해역 수심은 15.0~28.0 m(평균 19.8 m)로 보길도와 노화도 조사해역에 큰 차이를 보였다(Table 1).

표층퇴적물의 평균입도는 보길도 조사선 1이 4.5~8.6 ϕ (평균 7.1 ϕ), 조사선 2는 5.3~7.0 ϕ (평균 6.1 ϕ)로 조사선 1의 퇴적상이 조금 더 세립하였다. 조사선 1의 대조구는 양식장 정점에 비해 사질함량이 높았다. 노화도 조사선 1은 6.5~8.2 ϕ (평균 7.3 ϕ), 조사선 2는 6.0~8.8 ϕ (평균 7.7 ϕ)로 두 조사선 모두 퇴적상이 세립하였으나, 조사선 2의 대조구는 양식장 정점에 비해 사질함량이 높았다. 금일도 조사해역의 표층퇴적물 입도도 6.2~9.2 ϕ (평균 7.94 ϕ) 범위로 세립한 퇴적상이었다. 세 해역 모두 퇴적상은 실트와 점토가 우세한 세립질로 구성되어있다(Table 1).

표층퇴적물의 산화발성황화물량은 보길도 조사선 1의 양식장 정점에서 0.01~0.26 mg/g(평균 0.15 mg/g), 대조구 정점에서 0.03 mg/g, 조사선 2의 양식장 정점은 0.01~0.28 mg/g(평균 0.10 mg/g)이며, 대조구 정점에서는 검출되지 않았다. 노화도 조사선 1의 양식장 정점은 0.05~0.63 mg/g(평균 0.30 mg/g)이며 대조구 정점은 0.50 mg/g이었다. 조사선 2의 양식장 정점은 0.00~0.13 mg/g(평균 0.06 mg/g), 대조구 정점에서는 검출되지 않았다. 노화도 해역은 조사선 1의 산화발성황화물량이 다소 높았다. 금일도 조사해역 양식장 정점의 산화발성황화물량은 0.01~0.52 mg/g(평균 0.22 mg/g), 대조구 정점은 각각 0.08 mg/g과 0.25 mg/g으로 전반적으로 낮은 수준이었다(Table 1).

표층퇴적물의 총유기탄소량은 보길도 조사선 1의 양식장 정점에서 4.4~11.2 mg/g(평균 7.8 mg/g), 대조구 정점에서는 2.0 mg/g이었다. 조사선 2의 양식장 정점은 2.0~5.5 mg/g(평균 3.7

Table 1. Physico-chemical parameters showing the conditions of the benthic environment of the sampling stations

Station	Textural parameters				AVS (mg/g)	TOC (mg/g)	Depth (m)
	Mean (ϕ)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)			
B1-1	6.3	22.9	46.7	30.4	0.01	7.6	6.2
B1-2	6.9	21.1	42.0	36.9	0.01	4.4	6.3
B1-3	8.0	6.1	44.8	49.2	0.25	10.3	7.3
B1-4	8.6	1.4	41.0	57.6	0.26	11.2	18.9
B1-5	8.0	7.9	39.5	52.6	0.24	5.8	15.0
B1-C	4.5	64.9	19.6	15.5	0.03	2.0	9.7
B2-1	6.1	29.5	43.2	27.3	0.28	5.5	10.0
B2-2	5.3	21.1	58.7	20.3	0.03	3.5	10.7
B2-3	5.8	34.1	41.5	24.4	0.08	2.8	10.8
B2-4	7.0	9.1	58.7	32.2	0.01	2.0	12.0
B2-5	5.4	24.2	56.1	19.7	0.08	5.0	12.0
B2-C	7.0	13.1	49.4	37.5	0.00	1.6	12.5
N1-1	8.2	2.3	44.1	53.6	0.40	11.9	6.5
N1-2	7.9	6.5	43.4	50.2	0.30	9.9	8.0
N1-3	6.5	24.5	43.2	32.3	0.14	3.3	8.0
N1-4	6.6	25.0	38.6	36.4	0.63	5.4	12.3
N1-5	7.6	7.4	52.3	40.3	0.05	5.7	12.8
N1-C	6.9	16.9	44.9	38.2	0.50	4.5	17.0
N2-1	8.8	1.4	38.8	59.8	0.13	15.1	5.8
N2-2	8.4	2.2	44.1	53.7	0.09	11.8	5.0
N2-3	7.1	1.8	59.3	38.9	0.08	12.5	5.9
N2-4	8.5	0.9	44.8	54.3	0.00	11.0	6.5
N2-5	7.8	4.5	49.8	45.8	0.02	9.1	7.1
N2-C	6.0	31.5	42.1	26.4	0.00	2.3	6.0
G1	8.0	1.1	50.0	49.0	0.19	10.3	20.0
G2	8.3	0.8	48.2	51.0	0.39	10.0	15.0
G3	8.6	5.2	36.6	58.2	0.05	5.5	20.0
G4	9.2	1.5	33.2	65.3	0.33	9.9	25.0
G5	6.2	27.3	43.6	29.0	0.01	3.4	15.0
G6	7.6	3.1	53.6	43.2	0.52	8.3	20.0
G7	7.5	2.7	56.0	41.3	0.08	7.0	20.0
G-C1	8.3	5.5	40.7	53.8	0.08	9.4	28.0
G-C2	7.8	1.9	53.1	45.0	0.25	7.9	15.0

mg/g), 대조구 정점은 1.6 mg/g으로 전반적으로 낮은 수준이었으며, 특히 대조구 정점들은 더 낮은 상태였다. 노화도는 조사선 1의 양식장 정점들은 3.3~11.9 mg/g(평균 7.2 mg/g), 대조구 정점은 4.5 mg/g 이었다, 조사선 2의 양식장 정점은 9.1~15.1 mg/g(평균 11.9 mg/g), 대조구 정점은 2.3 mg/g으로 조사선 2의 총유기탄소량이 다소 높았으며 보길도 해역과 마찬가지로 대조구 정점들의 총유기탄소량이 낮았다. 금일도 조사해역 양식장 정점들의 총유기탄소량은 3.4~10.3 mg/g(평균 7.7 mg/g), 대조구 정점은 9.4 mg/g과 7.4 mg/g으로 전반적으로 낮은 수준이었으며, 앞선 두 해역과는 달리 양식장 정점들과 대조구 정점들 간의 차이는 없었다(Table 1).

3.2 저서다모류군집 생태지수

출현 종 수는 보길도 조사선 1의 양식장 정점에서 19~29 종

(평균 24 종), 대조구 정점은 31 종이었으며, 조사선 2에서는 양식장 정점이 9~36 종(평균 18 종), 대조구 정점에서는 21 종이 었다. 노화도 조사선 1의 출현 종 수는 양식장 정점에서 13~28 종(평균 19 종), 대조구 정점에서 20 종이 었다. 조사선 2에서는 19~31 종(평균 24 종)의 범위였으며, 대조구 정점에서는 21 종 이 출현하였다. 금일도 해역의 양식장 정점에서 출현 종 수는 6~23 종(평균 11 종)의 범위였고, 대조구 정점은 각각 14 종과 4 종이 었다(Fig. 2a). 출현 종 수의 분포는 세 해역 모두에서 양식장 정점과 대조구 정점간 차이는 없었으나, 금일도 해역에서 가장 적어 해역간에는 차이가 있는 것으로 나타났다.

다모류 밀도는 보길도 조사선 1의 양식장 정점에서 733~

3,580 ind./m²(평균 2,039 ind./m²), 대조구 정점은 3,787 ind./m² 이 었으며, 조사선 2에서는 167~2,547 ind./m²(평균 824 ind./m²), 대 조구 정점에서는 467 ind./m² 이 었다. 노화도 조사선 1의 밀도 는 양식장 정점에서 167~2,313 ind./m²(평균 952 ind./m²), 대조 구 정점에서 952 ind./m² 이 었다. 조사선 2의 양식장 정점에서는 1,807~3,933 ind./m²(평균 2,700 ind./m²)의 범위였으며, 대조구 정점에서는 2,327 ind./m² 이 었다. 금일도 해역 양식장 정점들의 밀도는 73~420 ind./m²(평균 172 ind./m²)범위였고, 대조구 정점 은 각각 220 ind./m²와 40 ind./m²이 었다(Fig. 2b). 다모류 밀도 분 포는 해역간 조사 정점간 변화폭이 컸으나, 종 수 분포와 유사 하게 양식장 정점과 대조구 정점간 유의한 차이는 없었으며,

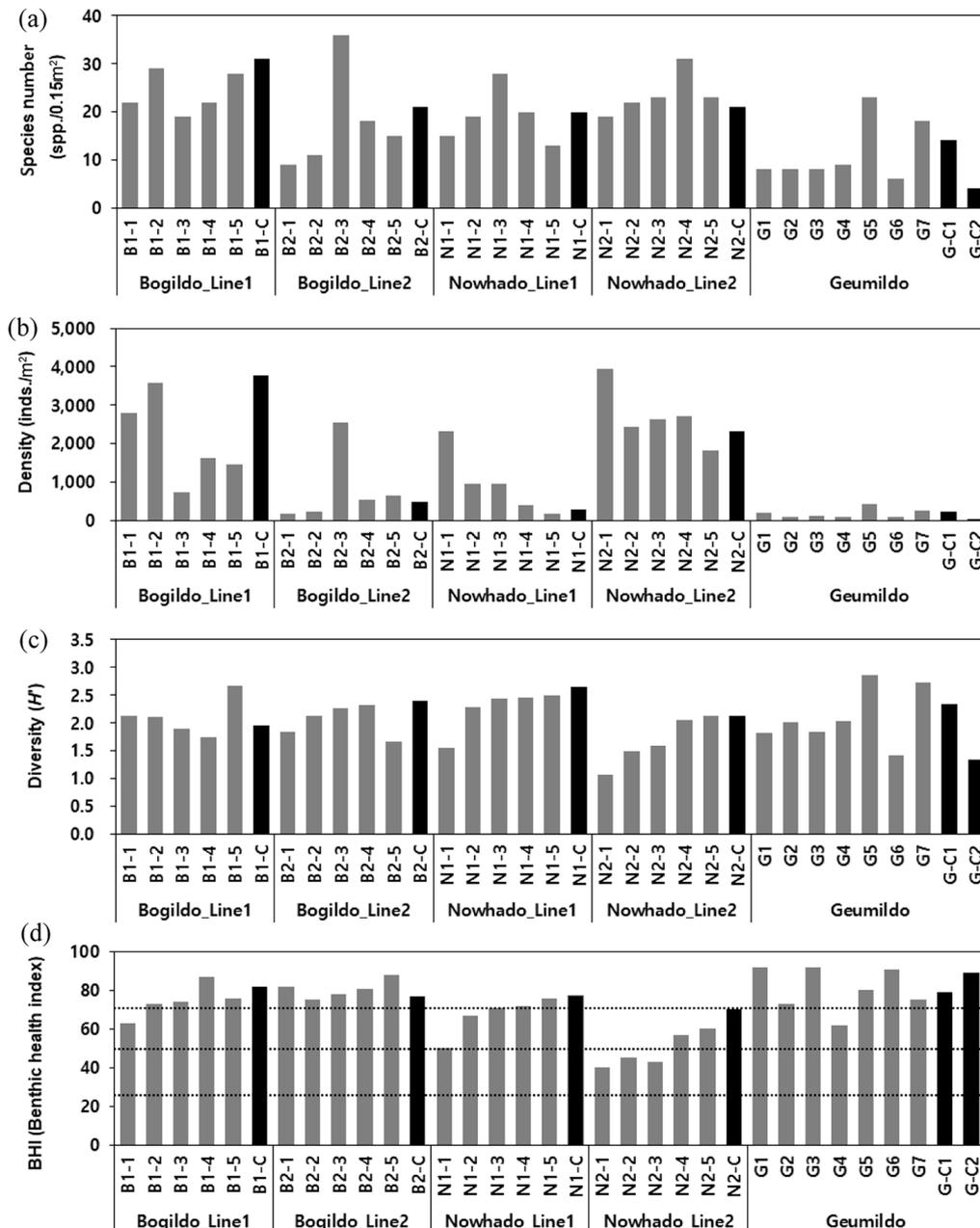


Fig. 2. Biological parameters obtained on the sampling stations. (a) Species number; (b) Density; (c) Diversity; (d) BHI.

금일도 해역에서 낮아 금일도 해역이 다른 해역과 차이가 있는 것으로 나타났다.

다모류군집의 다양도(H')는 보길도 조사선 1의 양식장 정점에서 1.7~2.7(평균 2.1), 대조구 정점은 2.0이었다. 조사선 2의 양식장 정점은 1.7~2.3(평균 2.0), 대조구 정점은 2.4였다. 노화도 조사선 1의 다양도(H')는 양식장 정점에서 1.5~2.5(평균 2.2), 대조구 정점에서 2.7이었다. 조사선 2의 양식장 정점에서는 1.1~2.1(평균 1.7)의 범위였으며, 대조구 정점에서는 2.1이었다. 금일도 해역의 양식장 정점은 1.4~2.7(평균 2.0) 범위였고, 대조구 정점은 각각 2.3과 1.3이었다(Fig. 2c). 다모류군집의 다양도(H')는 전반적으로 값 자체가 낮았으며, 노화도 해역의 경우에만 해안선으로부터 멀어질수록 다양도가 증가하였고 대조구의 다양도가 양식장 정점들에 비해 높은 경향을 보였다.

저서생태계 건강도지수(BHI)는 보길도 조사선 1의 양식장 정점에서 63~87(평균 75), 대조구 정점은 82이었다. 조사선 2의 양식장 정점은 75~88(평균 81), 대조구 정점에서는 77이었다. 노화도 조사선 1의 BHI는 양식장 정점에서 50~76(평균 67), 대조구 정점은 77이었다. 조사선 2의 양식장 정점은 40~60(평균 49)의 범위였으며, 대조구 정점은 70이었다. 금일도 해역 양식장 정점은 62~92(평균 81) 범위였고, 대조구 정점은 각각 79와 81이었다(Fig. 2d). 저서생태계 건강도지수(BHI)로 볼 때 전반적으로 군집의 건강도는 양호한 상태이고, 노화도 해역의 경우에만 섬 인근 양식장 군집의 건강도가 떨어지며 대조구의 건강도는 양식장 정점들에 비해 양호한 것으로 나타났다.

3.3 우점종

보길도 전복가두리 양식장과 주변해역에서는 *Sternaspis scutata*, *Notomastus latericeus*, *Thelepus* sp., *Terebellides* sp. 등이 전체의 10% 이상을 점유하는 우점종이었다(Table 2). 특히 *S. scutata*는 보길도 해역의 모든 정점에서 높은 밀도로 고르게 출현하였다. 그 외 나머지 세 종은 조사선 1에서 높은 밀도를 보였다.

노화도 해역의 우점종은 *Scoletoma longifolia*, *Thelepus* sp., *Flabelligeridae* sp., *Praxillella affinis* 등이다. 최우점종인 *S. longifolia*는 평균밀도 728 ind./m²의 매우 높은 밀도로 노화도 주변 다모류군집의 41.8%를 차지하였다. 이 종은 해안쪽 양식장 주변에서 특히 높은 밀도로 출현하였으며, 바깥쪽으로 나오면서 밀도가 감소하였고, 대조구 정점에서는 출현하지 않거나 낮은 밀도를 기록하였다(Table 2).

금일도 해역은 *Paralacydonia paradoxa*, *Sternaspis scutata*, *Mediomastus* sp., *Flabelligeridae* sp., *Cirrophorus branchiatus*가 우점하였으며, 이들 우점종들은 평균밀도 20 ind./m², 점유율 10~13%로 낮은 밀도와 고른 점유율로 출현하였다(Table 2).

3.4 저서다모류군집분석

양식장 정점과 대조정점간, 그리고 해역간 저서다모류군집의 차이와 차이를 발생시킨 주된 환경요인과 군집특성을 알아보기 위해 주요좌표분석법(Principal Co-ordinates analysis, PCO)을 실시하였다. 분석 결과 첫 번째 축은 전체 변화의 27.1%, 두 번째 축은 12.9%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 3).

Table 2. Dominant species of Bogildo, Nohwado and Geumildo. Species are listed from the 1st to the 10th based on their numerical abundance. In parenthesis, showing ecological groups in BHI, density (ind./m²) and proportion (%)

Rank	Bogildo	Nohwado	Geumildo
1	<i>Sternaspis scutata</i> (G1) (296, 19.1)	<i>Scoletoma longifolia</i> (G3) (728, 41.8)	<i>Paralacydonia paradoxa</i> (G1) (21, 12.7)
2	<i>Notomastus latericeus</i> (G1) (263, 17.0)	<i>Thelepus</i> sp. (G2) (164, 9.5)	<i>Sternaspis scutata</i> (G1) (17, 10.5)
3	<i>Thelepus</i> sp. (G2) (199, 12.6)	Flabelligeridae sp. (G2) (155, 8.9)	<i>Mediomastus</i> sp. (G1) (16, 9.5)
4	<i>Terebellides</i> sp. (G2) (176, 11.3)	<i>Praxillella affinis</i> (G2) (124, 7.1)	Flabelligeridae sp. (G2) (11, 6.8)
5	<i>Scoletoma longifolia</i> (G3) (134, 8.7)	<i>Notomastus latericeus</i> (G1) (72, 4.1)	<i>Cirrophorus branchiatus</i> (G1) (10, 6.4)
6	<i>Euchone alicaudata</i> (G3) (53, 3.4)	<i>Aphelochaeta monilaris</i> (G3) (70, 4.0)	<i>Amaeana occidentalis</i> (G2) (8, 5.0)
7	<i>Mediomastus</i> sp. (G1) (48, 3.1)	<i>Terebellides</i> sp. (G2) (56, 3.2)	<i>Heteromastus</i> sp. (G1) (7, 4.5)
8	Flabelligeridae sp. (G2) (46, 2.9)	<i>Amaeana occidentalis</i> (G2) (37, 2.1)	<i>Lumbrineris cruzensis</i> (G2) (7, 4.5)
9	<i>Praxillella affinis</i> (G2) (43, 2.8)	<i>Phylo felix</i> (G2) (34, 2.0)	<i>Terebellides</i> sp. (G2) (5, 3.2)
10	<i>Cirrophorus branchiatus</i> (G1) (36, 2.3)	<i>Sternaspis scutata</i> (G1) (32, 1.8)	<i>Glycera chirori</i> (G2) (5, 3.2)

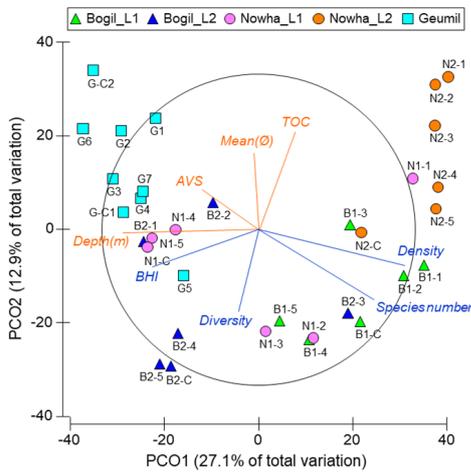


Fig. 3. Principal Co-ordinates analysis (PCO) for sampling stations based on Bray-Curtis similarity from square root transformed species abundance. Vector overlay on the PCO, showing the relationship between benthic community and environmental/ecological parameters.

군집조성으로 인한 해역간 정점간의 차이는 노화도 해역 조사선 1에 속하는 정점들이 비교적 넓게 분산된 것을 제외하면 해역별 조사선별로 군집의 차이가 뚜렷한 것으로 드러났다 (Fig. 3). 다만 조사선별, 해역별로 설정한 대조구 정점과 양식장 정점간의 차이는 크지 않았다.

해역간의 군집 차이를 발생시킨 주된 환경요인으로는 수심이 크게 작용하였으며, 그 다음으로는 총유기탄소량, 퇴적물의 입도 등이 영향을 준 것으로 나타났다. 수심이 낮고 총유기탄소량이 높은 노화도 조사선 2와 보길도 조사선 1의 정점군집들은 밀도와 종 수가 높고 저서생태계 건강도지수는 낮은 생태특징을 보였다.

3.5 어장환경평가등급

전복가두리 양식장 저서환경에 대한 평가를 위해 어장관리법상의 어장환경평가등급을 산정하였다(Table 3). 등급산정 결과 노화도 조사선 1의 가장 안쪽 양식장 정점 그리고 노화도 조사선 2의 양식장 정점 1~4가 2등급으로 나왔으며, 나머지 해역의 양식장 정점과 대조구 정점들은 모두 1등급이었다. 따라서 노화도 주변의 양식장 정점들을 제외하고는 모든 해역이 유기물에 의한 교란이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 또한 노화도 해역의 양식장 정점들도 유기물에 의한 교란 정도가 심하지 않은 상태이다.

4. 고 찰

사료 공급을 필요로 하는 어류가두리 양식 활동으로 인해 퇴적물과 저서생태계에 유발된 오염의 영향은 많은 연구 결과에서 명확히 밝혀졌다(Hall *et al.*[1990]; Gowen *et al.*[1991]; Pearson

and Black[2001]; Tsutsumi *et al.*[2006]; Park *et al.*[2000]; Jung *et al.*[2002]; Lee *et al.*[2004a]; Jung *et al.*[2007]; Jung *et al.*[2013]; Park *et al.*[2022]). 사료 공급을 필요로 하지 않는 수하식 패류양식장에서도 양식생물과 부착생물의 섭식활동으로 인한 분과 위분의 집적 그리고 탈락 생물로 인해 해저면으로 부가적인 유기물 유입이 발생하며(Crawford *et al.*[2003]), 이로 인한 유기물 오염에 대한 결과들이 보고되었다(Hartstein and Rowden[2004]; Giles *et al.*[2006]; Metzger *et al.*[2007]). 전복 가두리 양식장의 경우 수하식과는 달리 미역과 다시마와 같은 해조류를 사료로 공급하고 미섭식된 해조류와 전복의 분이 바닥으로 퇴적된다. 이처럼 해저면으로 부가적인 유기물의 공급이 있음에도 불구하고 조사된 전복 가두리 양식장 아래 퇴적물의 총유기탄소량은 노화도 해역의 일부 양식장 아래를 제외하고는 상당히 낮은 수준이다. 퇴적물의 총유기탄소량이 낮은 이유는 다양한 양식장

Table 3. Grade of fisheries environment assessment using TOC and BHI in sampling stations

Station	TOC (mg/g)	TOC point	BHI	BHI point	Point sum	Benthic ecological quality
B1-1	7.6	1	63	2	3	1
B1-2	4.4	1	73	1	2	1
B1-3	10.3	2	74	1	3	1
B1-4	11.2	2	87	1	3	1
B1-5	5.8	1	76	1	2	1
B1-C	2.0	1	82	1	2	1
B2-1	5.5	1	82	1	2	1
B2-2	3.5	1	75	1	2	1
B2-3	2.8	1	78	1	2	1
B2-4	2.0	1	81	1	2	1
B2-5	5.0	1	88	1	2	1
B2-C	1.6	1	77	1	2	1
N1-1	11.9	2	50	3	5	2
N1-2	9.9	1	67	2	3	1
N1-3	3.3	1	71	1	2	1
N1-4	5.4	1	72	1	2	1
N1-5	5.7	1	76	1	2	1
N1-C	4.5	1	77	1	2	1
N2-1	15.1	2	40	3	5	2
N2-2	11.8	2	45	3	5	2
N2-3	12.5	2	43	3	5	2
N2-4	11.0	2	57	2	4	2
N2-5	9.1	1	60	2	3	1
N2-C	2.3	1	70	2	3	1
G1	10.3	2	92	1	3	1
G2	10.0	1	73	1	2	1
G3	5.5	1	92	1	2	1
G4	9.9	1	62	2	3	1
G5	3.4	1	80	1	2	1
G6	8.3	1	91	1	2	1
G7	7.0	1	75	1	2	1
G-C1	9.4	1	79	1	2	1
G-C2	7.9	1	89	1	2	1

으로 활용되는 연안의 반폐쇄적인 만에 비해 육지와 떨어진 섬에 위치하여 양식장이 밀집되어 있으나 해수의 소통이 원활하며, 연안에 비해 육상으로부터의 유기물 공급이 적은 것이 주원인일 것으로 판단된다. 그러나 표층 퇴적물의 총유기탄소량이 전반적으로 낮음에도 불구하고 노화도와 보길도 해역의 경우 양식장 아래에 비해 대조구 정점의 총유기탄소량이 현저하게 낮음을 알 수 있다. 이런 결과는 조사해역이 유기물에 의해 심하게 교란된 상태는 아니나 대조구 해역과 비교하였을 때 양식활동으로 인한 추가적인 유기물의 유입이 존재함을 보여주고 있다.

저서생태계 건강도지수(BHI)로 본 전복 가두리 양식장 및 주변의 해역은 노화도 양식장의 일부를 제외하고는 전반적으로 매우 양호한 상태였다. 이런 결과는 총유기탄소량의 분포와도 일치하는 결과이다. 다만 보길도 해역의 경우 총유기탄소량이 전체적으로 낮은 수준이지만 양식장 아래와 대조구간에 총유기탄소량의 차이가 있음에도 BHI에서는 뚜렷한 차이가 없었다. 이런 현상은 퇴적물 내의 총유기탄소량이 일정 수준을 넘어야 저서동물군집에 영향을 주는 임계값이 존재함을 보여주는 증거이다. 이런 결과는 퇴적물의 총유기탄소량이 저서생태계에 영향을 주는 임계값으로 첫 번째 임계값을 10 mg/g 으로 제시한(Hyland *et al.*[2005]; Magni *et al.*[2009]) 결과와도 일치하고 있다. 또한 임계값으로 제시한 10 mg/g 이상인 노화도 양식장들에서는 총유기탄소량에 따라 저서다모류군집의 건강도가 변화하는 현상을 보여 이를 뒷받침하고 있다.

어장관리법에서 시행하고 있는 어장환경평가를 전복 가두리 양식장에 적용한 결과에서도 대부분의 양식장 환경이 1등급이며, 일부 노화도 양식장들이 2등급으로 어장관리법상의 제재나 관리대상에 속하지는 않았다. 이는 이 해역의 해저 퇴적층이 배경농도가 낮은 매우 깨끗한 상태이며 해수 소통이 원활한 상태이기 때문이다. 물론 전복 가두리 양식이 어류 가두리 양식에 비해 오염부하가 적고 일반 연안과 큰 차이가 없다는 결과(Shim *et al.*[1997]; Park *et al.*[2012]; Jeon *et al.*[2017])도 있으나, 이번에 나타난 결과들을 종합해보면 완도 인근의 전복 가두리 양식 밀집해역의 환경상태는 양식활동으로 인한 환경교란이 심각한 상태는 아니었지만 양식으로 인한 영향은 분명히 존재하였다.

후 기

본 연구는 2024년도 국립수산물품질관리원 수산과학연구소사업(R2024015)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

[1] Crawford, C.M., Macleod, C.K.A. and Mitchell, I.M., 2003,

Effects of shellfish farming on the benthic environment, *Aquaculture*, 224, 117-140.

[2] Giles, H., Pilditch, C.A. and Bell, D.G., 2006, Sedimentation from mussel (*Perna canaliculus*) culture in the Firth of Thames, New Zealand: impacts on sediment oxygen and nutrient fluxes, *Aquaculture*, 261, 125-140.

[3] Gowen, R.J., Weston, D.P. and Ervik, A., 1991, (Aquaculture and the benthic environment: a review), In: Cowey, C.B. and Cho, C.Y. (Eds.), *Nutritional Strategies and Aquaculture Waste*, University of Guelph, Canada, 187-205.

[4] Hall, P.O., Anderson, L.G., Holby, O., Kollberg, S. and Samuelsson, M.O., 1990, Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm: I. Carbon, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61, 61-73.

[5] Hartstein, N.D. and Rowden, A.A., 2004, Effect of biodeposits from mussel culture on macroinvertebrate assemblages at sites of different hydrodynamic regime, *Mar. Environ. Res.*, 57(5), 339-357.

[6] Hyland, J., Balthis, L., Karakassis, I., Magni, P., Petrov, A., Shine, J., Vestergaard, O. and Warwick, R., 2005, Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 295, 91-103.

[7] Jeon, S.R., Cho, Y.S., Choi, Y.S., Kim, K.T. and Choi, Y.H., 2017, Estimating Benthic Nutrient Fluxes at the Sediment-Water Interface for the Management of Tidal Flats in Gomso and Geunso Bays, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 23(7), 878-884.

[8] Jung, R.H., Lim, H.S., Kim, S.S., Park, J.S., Jeon, K.A., Lee, Y.S., Lee, J.S., Kim, K.Y. and Go, W.J., 2002, A study of the macrozoobenthos at the intensive fish farming ground in the southern coast of Korea, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 7(4), 235-246.

[9] Jung, R.H., Yoon, S.P., Kwon, J.N., Lee, J.S., Lee, W.C., Koo, J.H., Kim, Y.J., Oh, H.T. and Park, S.E., 2007, Impact of fish farming on Macro-benthic polychaete communities, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 12(3), 151-159.

[10] Jung, R.H., Yoon, S.P., Kim, Y.J., Lee, W.C., Hong, S.J., Park, S.E. and Oh, H.T., 2013, Effect of an offshore fish culture system on the benthic polychaete community, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 18(4), 195-205.

[11] Jung, R.H., Yoon, S.P., Park, S., Hong, S.J., Kim, Y.J. and Kim, S., 2023, Introduction to the Benthic Health Index Used in Fisheries Environment Assessment, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 29(7), 779-793.

[12] Kim, B., Choi, A., An, S., Kim, H.C., Jung, R.H., Lee, W.C. and Hyun, J.H., 2011, Rates of sulfate reduction and iron reduction in the sediment associated with abalone aquaculture in the southern coastal waters of Korea, *Ocean Polar Res.*, 33(4), 435-445.

[13] KOSIS, Korean Statistical Information Service, Fishery Production Survey, <https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?or->

- gld=101&tb1id=DT_1EW0001&conn_path=I2, 2023 (accessed 2024.01.05)
- [14] Lee, J.S., Jung, R.H., Kim, K.H., Kwon, J.N., Lee, W.C., Lee, P.Y., Koo, J.H. and Choi, W.J., 2004a, An evaluation of the environmental effects of marine cage fish farm: I. Estimation of impact region and organic carbon cycling in sediment using sediment oxygen consumption rate and macrozoobenthos, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 9(1), 30-39.
- [15] Lee, J.S., Kim, K.H., Yu, J., Lee, P.Y., Jung, R.H., Lee, W.C., Han, J.H. and Lee, Y.H., 2004b. Environmental impact assessment by marine cage fish farm: II. Estimation of hydrogen sulfide oxidation rate at O₂-H₂S interface and sulfate reduction rate in anoxic sediment layer, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 9(2), 64-72.
- [16] Magni, P., Tagliapietra, D., Lardicci, C., Balthis, L., Castelli, A., Como, S., Frangipane, G., Giordani, G., Hyland, J., Maltagliati, F., Pessa, G. Rismondo, A., Tataranni, M., Tomassetti, P. and Viaroi, P., 2009, Animal-sediment relationships: Evaluating the 'Pearson-Rosenberg paradigm' in Mediterranean coastal lagoons, *Mar. Pollut. Bull.*, 58(4), 478-486.
- [17] Metzger, E., Simonucci, C., Viollier, E., Sarazin, G., Prevot, F. and Jezequel, D., 2007, Benthic response to shellfish farming in Thau lagoon: pore water signature, *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 72, 406-419.
- [18] NIFS, 2019, Management manual on artificial breeding of abalone, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea.
- [19] NIFS, 2023, Standard Method of Examination for Marine Environment, Notice no. 2023-5, National Institute Of Fisheries Science, Busan, Korea.
- [20] Park, H.S., Choi, J.W. and Lee, H.G., 2000, Community structure of macrobenthic fauna under marine fish culture cages near the Tongyong, southern coast of Korea, *J. Korean Fish. Soc.*, 33(1), 1-8.
- [21] Park, J.H., Cho, Y.S., Lee, W.C., Hong, S.J., Kim H.C. and Kim J.B., 2012, Comparison of Material Flux at the Sediment-Water Interface in Marine Finfish and Abalone Cage Farms, Southern Coast of Korea; In-situ and Laboratory Incubation Examination, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 18(6), 536-544.
- [22] Park, S., Kim, S. Yoon, S.P., Jung, R.H. and Lee, W.C., 2017, Effect of longline shellfish culture on benthic community structure, *Korean J. Malacol.*, 33(1), 21-34.
- [23] Park, S., Kim, S., Sim, B.R. Park, S.J. Kim, H.C. and Yoon, S.P., 2021, Changes in the community structure of benthic polychaetes after the shellfish farm cessation in Tongyeong bay of Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 27(5), 605-617.
- [24] Park, S., Kim, S., Sim, B.R., Jung, W.S., Park, S.J., Hong, S.J., Lee, W.C. and Yoon, S.P., 2022, Environmental Impact Assessment of Fish Cage Farms Using Benthic Polychaete Communities, *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, 55(5), 598-611.
- [25] Pearson, T.H. and Black, K.D., 2001, The environmental impacts of marine fish cage culture. In: Black, K.D. (Eds.), *Environmental Impacts of Aquaculture*, Sheffield Academic Press, Sheffield, 1-31.
- [26] Shannon, C.E. and Weaver, W.W., 1963, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana.
- [27] Shim, J.H., Kang, Y.C. and Choi, J.W., 1997, Chemical fluxes at the sediment-water interface below marine fish cages on the coastal waters off Tong-young, south coast of Korea, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 2(2), 151-159.
- [28] Tsutsumi, H., Srithongouthai, S., Inoue, A., Sato, A. and Hara, D., 2006, Seasonal fluctuations in the flux of particulate organic matter discharged from net pens for fish farming, *Fish. Sci.*, 72, 119-127.
- [29] Yoon, S.P., Jung, R.H., Kim, Y.J., Hong, S.J., Oh, H.T. and Lee, W.C., 2009, Spatio-temporal changes in macrobenthic community structure and benthic environment at an intensive oyster culturing ground in Geoje-Hansan bay, Korea, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 14(4), 213-228.

Received 15 January 2024

1st Revised 5 February 2024, 2nd Revised 15 February 2024

Accepted 16 February 2024