

저서동물지수를 활용한 어류가두리 양식장의 건강도 평가

박소현* · 김선영** · 박세진** · 정래홍*** · 윤상필****

*, ** 국립수산과학원 어장환경과 연구원, *** 국립수산과학원 기후변화연구과 연구관,

**** 국립수산과학원 어장환경과 연구사

Health Assessment of the Fish-cage Farms using BHI(Benthic Health Index)

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

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

*** Principal Researcher, Oceanic Climate of Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan, Republic of Korea

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

요약 : 본 연구에서는 어장환경평가가 수행된 어류가두리 양식장의 조사 결과 중 일부를 대상으로 저서동물지수(Benthic Health Index, BHI)를 이용하여 양식장의 건강도를 평가하였으며, 평가 결과로 산출된 각 등급의 양식장 환경 특성을 파악하였다. 평가대상 어류가두리 양식장은 동해, 서해, 남해에 위치한 43개 양식장으로, BHI 1등급은 8개 양식장, 2등급은 4개 양식장, 3등급은 12개 양식장, 4등급은 19개 양식장이 포함되었다. 1등급 어류가두리양식장은 사질 퇴적상, 양식강도가 낮은 양식장이 포함되었으며, 2등급 어류가두리양식장은 해수 유통이 원활한 해역에 위치한 양식장이 속하였다. 3, 4등급이 속한 어류가두리양식장은 높은 강도로 양식 활동이 진행되고 있는 대다수의 양식장이 포함되었다. 3등급과 4등급의 양식장은 총유기탄소는 큰 차이가 없었으나, 다모류 군집분석의 결과는 4등급의 양식장에서의 유기물 농축이 더 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 어류가두리양식장, 건강도 평가, 저서동물지수, 다모류 군집, 총유기탄소

Abstract : In this study, a health assessment was conducted using the Benthic Health Index (BHI) to assess fish cage farms, where a fishery environment assessment was also performed. A total of 43 farms were evaluated located in the East Sea, West Sea, and South Sea in Korea. The results of the BHI health evaluation included 8 grade 1 farms, 4 grade 2, 12 grade 3, and 19 grade 4. The grade 1 farms included sandy sediment farms and those with low intensity aquaculture, while the grade 2 farms included those located in areas with active seawater circulation. The fish cage farms belonging to grade 3 and 4 included the majority of farms with high-intensity aquaculture activities. There was no significant difference in total organic carbon between grade 3 and 4 farms, but the results of polychaete community analysis show that organic matter concentration was significantly higher in grade 4 farms.

Key Words : Fish-farm, Health assessment, Benthic Health Index, Polychaete community, Total organic carbon

1. 서론

어류가두리양식장 아래 퇴적물은 잉여 사료, 어류 배설물, 시설물에서 탈락한 부착 생물의 사체 등으로 인하여 상당한 양의 유기물질이 유입되며, 이러한 유기물 축적은 어류가두리양식장 저층의 퇴적 환경을 악화시키는 주요 요인이 된다 (Gowen and Bradbury, 1987; Karakassis et al., 2000; Gao et al., 2005). 퇴적물 표층의 유기물은 저서동물의 주요한 먹이원이

지만, 과잉 축적되면 저서동물의 생체량과 다양성 감소, 기회종의 우점 등 저서동물 군집 구조의 변화를 발생시킨다 (Karakassis et al., 2000; Gao et al., 2005; Tomassetti et al., 2009). 또한 한번 교란된 군집은 회복되기까지 여러 단계의 천이과정을 거쳐야하기 때문에 긴 시간이 걸린다(Pereira et al., 2004, Pearson and Rosenberg, 1978).

퇴적층의 급격한 유기물 증가는 서식지의 지화학적 성질을 변화시킴으로써 저서동물 군집 구조에 영향을 미치는데, 이때 군집의 종 구성은 민감종의 비율이 감소하고 내성이 강한 종 또는 오염지표종의 비율이 증가하는 것이 일반적이

* First Author : jing5678@naver.com, 051-720-2531

† Corresponding Author : spyoon@korea.kr, 051-720-2531

다(Pearson and Rosenberg, 1978; Hargrave, 2008). 이러한 개념에 기초하여 생태계의 건강도를 측정하고자 하는 다수의 생태지수들이 개발되어 왔으며, 유럽과 미국 등에서 사용 중인 AMBI(Azti's Marine Biotic Index), M-AMBI(Multivariate Azti's Marine Biotic Index), BENTHIX, BQI(Benthic Quality Index) 등이 대표적 사례이다(Borja et al., 2000; Muxika et al., 2007; Rosenberg et al., 2004).

생태지수는 출현종의 생태학적 특성을 기반으로 만들어졌기 때문에, 다양한 환경, 그리고 다양한 교란 반응에 사용될 수 있다. 생태지수를 활용한 건강도 평가는 단일의 숫자나 등급으로 건강도를 나타내기 복잡한 과학적 연구 자료의 정보를 보다 직관적인 방식으로 표현할 수 있다(Borja et al., 2008; Pinto et al., 2009). 따라서 모니터링, 건강도 평가 등에서 정책결정자나 비과학자들이 이해하고 비교하기에 편리하다는 장점이 있다. 그러나 지수 산출에 앞서 출현종의 생태학적 특성을 파악하는 과정이 요구되며, 이미 개발된 국외의 생태지수를 국내에 그대로 적용할 시에는 서식종의 차이가 있어서 건강도 평가에 활용하기에 적합하지 않다.

우리나라에서는 우리 상황에 맞추어 저서동물지수(BHI)를 개발하였으며(국립수산과학원 고시 2020 - 15, 어장환경평가의 방법 및 절차 등에 관한 규정), 이를 어류가두리양식장을 대상으로 하는 어장환경평가에 활용하고 있다.

본 연구에서는 어장환경평가를 통해 조사된 어류가두리양식장을 대상으로 저서다모류 군집 구조를 파악하고, 저서동물지수를 활용하여 저서생태계의 건강도를 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채집 및 분석

본 연구에서는 2015년부터 2021년까지 어장환경평가가 이루어진 어류가두리양식장에 대한 조사 결과 중 일부를 포함하였다. 각 정점이 위치한 지역 및 수심, 그리고 현장에서 기록한 표층 퇴적물의 특징을 Table 1에 정리하였다. 또한 현장에서 양식장 운영 기간, 양식 어종 등을 기록하여 분석에 참고하였다.

저서다모류 군집과 총유기탄소(TOC: Total organic carbon) 분석을 위해 0.05 m²의 van Veen grab을 사용하여 퇴적물을 채집하였다. 다수의 가두리가 설치된 정점에서는 하나의 가두리에서 2회씩 채집하여 1회분은 저서다모류 분석을 위한 시료로, 1회분은 표층 총유기탄소 분석을 위한 시료로 사용하였다. 단일 가두리가 설치된 정점에서는 4회 채집하여 2회는 저서다모류 분석, 2회는 총유기탄소 분석 시료로 사용하였다. 저서다모류 분석 시료는 선상에서 1 mm 체에 걸러 퇴

Table 1. Location of study station, water depth and sedimentary facies

Station	Region	Water depth	Sedimentary facies
st.01	Yangyang	17–19 m	sand
st.02	Yeongdeok	15 m	muddy sand
st.03	Pohang	25–30 m	muddy sand
st.04	Gijang	-	
st.05		9.3 m	mud
st.06		12.4–13.3 m	mud
st.07		12.6 m	muddy sand
st.08		20 m	sandy mud
st.09		7.8 m	-
st.10	Geoje	8 m	sandy mud
st.11		34 m	-
st.12		10.8	-
st.13		8 m	sandy mud
st.14		11 m	-
st.15		10.6 m	mud
st.16		-	-
st.17		5.8 m	-
st.18		9.1 m	-
st.19	Tongyeong	25.4 m	-
st.20		11.6 m	mud
st.21		8.4 m	mud
st.22		15 m	mud
st.23		30 m	-
st.24	Namhae	17.2 m	mud
st.25		16.2 m	mud
st.26		14 m	-
st.27	Sacheon	12 m	-
st.28		13.2 m	-
st.29	Hadong	17 m	-
st.30		25 m	sandy mud
st.31		6.5–16.7 m	mud
st.32	Yeosu	12 m	mud
st.33		20 m	-
st.34		20 m	mud
st.35	Wando	12 m	mud
st.36		10 m	mud
st.37	Shinan	6–8 m	muddy sand
st.38	Boryeong	7 m	muddy sand
st.39		13–15 m	muddy gravel
st.40	Seosan	15 m	-
st.41		16 m	-
st.42	Taean	18 m	-
st.43		17 m	mud

적물을 최대한 제거한 후에 10%의 중성 포르말린으로 고정하였으며, 총유기탄소 분석 시료는 채집과 동시에 드라이아이스에 넣어 냉동하였다.

현장에서 채집한 시료 중 저서동물 시료는 실험실에서 분류군별로 선별한 이후 다모류를 대상으로 중 수준까지 동정하였다. 총유기탄소 시료는 실험실에서 동결건조 후 1 N의 HCl을 첨가해 탄산염을 제거하였다. 70°C에서 24시간 동안 수분과 잔류 염소를 날린 이후 105°C에서 2시간 건조과정을 거친 다음 곱게 간 시료를 주석 박막으로 말아 CHN 원소분석기(Perkin Elmer, model 2400)로 측정하였다.

2.2 자료 분석

정점 별 개체수 자료는 단위면적으로 환산하였으며, 개별 군집의 기본구조 파악을 위한 단변량 변수로 종수, 개체밀도, 종다양도지수(H')를 산출하였다. 전체 군집의 구조 파악을 위한 다변량 분석으로 다차원척도법(non-metric multidimensional scaling: MDS)을 적용하였으며, 유사 정점군 간의 그룹화에 임의성을 배제하기 위하여 집괴분석(Cluster analysis)의 결과를 반영하였다(Clarke and Warwick, 2001; Anderson et al., 2008). 다변량 분석에 앞서 생물자료는 로그 변환하였으며, Bray-Curtis 유사도를 적용하였다. 다변량 분석으로 구분된 각 그룹의 특징종을 찾아내기 위하여 SIMPER 분석을 수행하였고, 주좌표분석(Principal Coordinates analysis, PCO)을 통해 특징종과 군집구조와의 상관성을 알아보았다. 모든 통계분석은 PRIMER 패키지 프로그램(ver. 6)을 이용하였다.

어류가두리양식장 건강도 평가는 국립수산과학원에서 개발한 저서동물지수(Benthic Health Index: BHI)를 사용하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$BHI = 25((4 \times N_1 + 2.68 \times N_2 + 1.36 \times N_3 + 0.04 \times N_4) / N_{total})$$

$N_i(i=1-4)$ 는 각 그룹에서 출현한 개체수의 총합을 나타내며, N_{total} 은 전체 출현개체수이다. 유기물 농도와 관련된 각 그룹의 생태적 특징은 그룹 1이 낮은 유기물 농도에서 높은 밀도로 출현하거나 출현 빈도와 밀도가 낮은 종(이하 1그룹종), 그룹 2는 유기물의 농도와 상관없이 고른 분포를 하는 종(2그룹종), 그룹 3은 비교적 높은 유기물 농도에서 높은 밀도로 출현하는 종(3그룹종), 그룹 4는 계절적으로 무생물 역이 발생하는 해역에서 높은 밀도로 출현하거나 높은 유기물 농도에서 출현하는 종(4그룹종)을 의미한다. 각 종에 대한 분류는 국립수산과학원 고지에서 제공하는 종을 참고하였다. BHI는 0-100 범위에서 산출되며, 0-25는 4등급으로 오염심화 해역(Heavily polluted, H/P), 26-50는 3등급으로 오염 해역(Moderately polluted, M/P), 51-70은 2등급으로 오염초기 해역(Slightly polluted, S/P), 71-100은 1등급으로 정상 해역(Normal, N)을 의미한다(국립수산과학원 고지 2020-15, 어장환경평가의 방법 및 절차 등에 관한 규정).

3. 결 과

3.1 어류가두리 양식장의 총유기탄소량

국내 어류가두리양식장의 총유기탄소량은 0.80-34.92 mg/g의 범위였다(Fig. 1a). 총유기탄소량이 10.00 mg/g 이하인 양식장은 st.01-03, st.32, st.35-39로, 강원도와 경북, 전남 완도와 신안 그리고 충남 보령의 정점이었다. 어장환경평가에서 유기물 오염이 심각한 퇴적 상태를 나타내는 총유기탄소량 25.01 mg/g 이상인 가두리는 st.12-13, st.20-21, st. 24-26, st.28-29로 경상남도의 정점들이었다. 국내 어류가두리양식장 표층퇴적물의 총유기탄소량은 남해안의 가두리에서 상대적으로 농도가 높았고, 동해와 서해 일부 가두리에서 낮았다.

3.2 다모류 군집조성

국내 연안 어류가두리에서 출현한 다모류는 총 224종이었으며 개체밀도는 평균 8,300 inds./m²였다. 각 정점당 출현 종수는 6-35 spp./0.05 m² 범위였으며, st.42에서 가장 적었고, st.17에서 가장 많았다(Fig 1b). 출현한 다모류가 10종 미만인 정점은 st.01-03, st.25, st.29, st.34, st.42-43이었다. 개체밀도는 590-21,735 inds./m²의 범위였으며, st.01-04, st.08, st.11, st.32, st.36, st.39 정점에서 2,000 inds./m² 이하로 출현하여 상대적으로 밀도가 낮고, st.24, st.26, st.28-29에서 15,000 inds./m²로 밀도가 높았다(Fig 1c). 종다양성지수(H')는 0.2-3.0 범위였으며, st.03, st.07, st.25-26, st.28-29, st.31, st.33-34, st.40, st.42-43에서 1.0 이하로 낮은 값을 나타내었다(Fig 1d).

43개 정점에서 유사한 군집 특성을 가지는 정점군(Group)을 구분하여 출현한 어류가두리양식장의 다모류 우점종의 경향을 분석하였다. Group의 구분은 개체밀도를 대상으로 집괴분석을 수행하였으며, 분석 결과 크게 5개 그룹(Group A-E)으로 구분되었고, 그룹 E는 다시 2개의 소그룹(Group E1, E2)로 구분되어 총 6개 그룹으로 구분하였다(Fig. 2).

그룹 A에서는 저서동물지수 계산 시 1그룹종인 *Spiophanes bombyx*(863 inds./m², 77.5%)가 높은 밀도로 출현하였고, 2그룹종인 *Chone teres*와 *Glycinde gurjanovae*가 우점종으로 출현하였다(Table 2). 그룹 B는 2그룹종인 *Magelona japonica*(385 inds./m², 29.6%)가 최우점하였으며, 1그룹종인 *Mediomastus* sp.와 *Heteromastus* sp.가 우점하였다. 그룹 C에서는 1그룹종인 *Cirrophorus armatus*(433 inds./m², 19.6%), *Euchymene oerstedii*(400 inds./m², 18.1%), *Mediomastus* sp.(390 inds./m², 17.6%)가 유사한 비율로 우점하였다. 4번째 우점종은 3그룹종인 *Scoletoma longifolia*로 300 inds./m²(13.7%)가 출현하였다. Group D, E1, E2에서는 상위 출현종이 유사하였으며, 이들종의 우점순위와 비율에 차이가 있었다. 최우점종은 4그룹종인 *Capitella capitata*로 동일하였으며, Group D에서는 627 inds./m²(39.7%), Group E1에

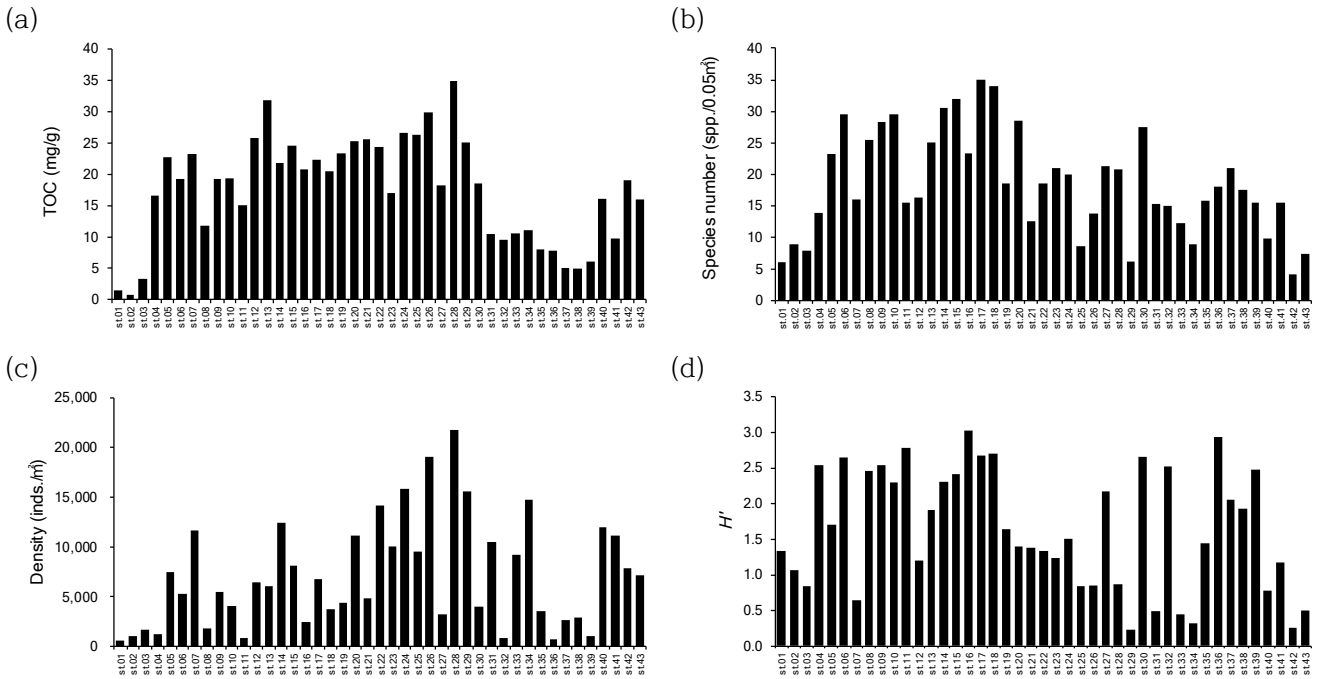


Fig. 1. Total organic carbon content in surface sediments of fish-cage farm. Spatial variation of total organic carbon content and polychaete community index in fish-cage farm (a: total organic carbon, b: species number, c: density, d: diversity (H')).

서는 1,598 inds./m²(25.0 %), Group E2에서는 9,074 inds./m²(78.5 %)가 출현하였다. 차순위 우점종은 Group D에서는 *S. longifolia*, *Sigambra tentaculata*가 우점하였고 Group E1에서는 *Schistomeringos rudolphi*, *S. longifolia*, Group E2에서는 *S. rudolphi*, *S. tentaculata*였다.

3.3 어류가두리 건강도 평가 (BHI, AMBI 비교)

연구지역의 저서동물지수(BHI)는 2-97 범위로 국내 어류

가두리양식장의 건강도는 정상상태(Normal)에서 오염심화해역(Heavily polluted) 이었다(Fig. 3a). 어류건강도가 정상상태인 1등급 정점은 st.01-03, st.08, st.11, st.37-39 등 8개였으며, 2등급인 오염초기해역의 상태(Slightly polluted)인 정점은 st.04, st.16, st.32, st.36로 4개 정점이었다. 3등급인 오염해역(Moderately polluted)의 건강도를 나타내는 정점은 st.05-06, st.09-10, st.14-15, st.17-18, st.22, st.27, st.30, st.35의 12개 정점이었으며, 나머지 19개 정점은 오염심화해역이었다.

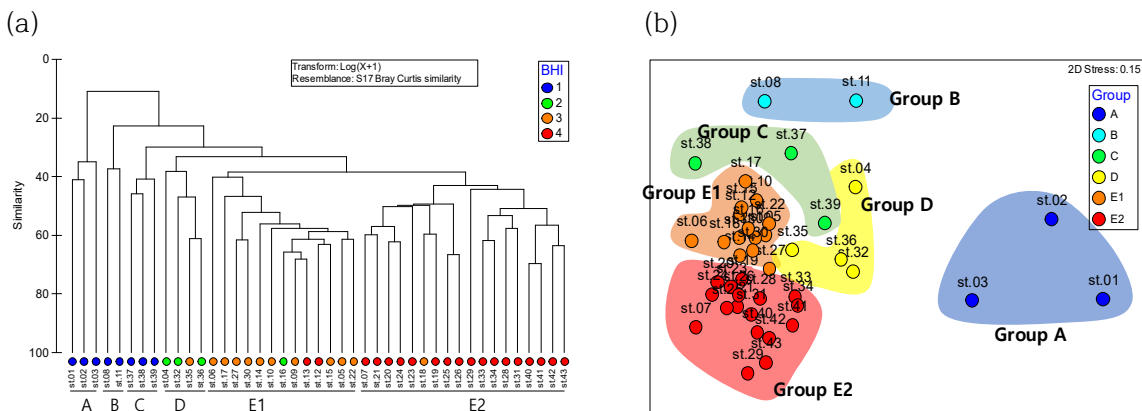


Fig. 2. Grouping based on abundance of polychaetes that appeared in fish-cage farm (a) cluster analysis, (b) non-metric multidimensional scaling (MDS) plot.

저서동물지수를 활용한 어류가두리 양식장의 건강도 평가

Table 2. Density and appearance ratio of dominant species of polychaetes for each group classified based on cluster analysis

Group	Dominant species	inds./m ²	%
A	<i>Spiophanes bombyx</i>	863	77.5
	<i>Chone teres</i>	40	3.6
	<i>Glycinde gurjanovae</i>	23	2.1
	<i>Mediomastus</i> sp.	23	2.1
	<i>Nephtys californiensis</i>	23	2.1
B	<i>Magelona japonica</i>	385	29.6
	<i>Mediomastus</i> sp.	110	8.5
	<i>Heteromastus</i> sp.	65	5.0
	<i>Prionospio saccifera</i>	65	5.0
C	<i>Trichobranthus glacialis</i>	60	4.6
	<i>Cirrophorus armatus</i>	433	19.6
	<i>Euclymene oerstedii</i>	400	18.1
	<i>Mediomastus</i> sp.	390	17.6
	<i>Scoletoma longifolia</i>	303	13.7
D	<i>Harmothoe imbricata</i>	80	3.6
	<i>Capitella capitata</i>	627	39.7
	<i>Scoletoma longifolia</i>	156	9.9
	<i>Sigambra tentaculata</i>	81	5.1
	<i>Scoloplos armiger</i>	73	4.6
E1	<i>Sternaspis scutata</i>	66	4.2
	<i>Capitella capitata</i>	1,598	25.0
	<i>Schistomeringos rudolphi</i>	1,299	20.3
	<i>Scoletoma longifolia</i>	1,007	15.7
	<i>Aphelochaeta monilaris</i>	293	4.6
E2	<i>Cirriformia tentaculata</i>	191	3.0
	<i>Capitella capitata</i>	9,074	78.5
	<i>Schistomeringos rudolphi</i>	857	7.4
	<i>Sigambra tentaculata</i>	360	3.1
	<i>Scoletoma longifolia</i>	198	1.7
	<i>Eumida sanguinea</i>	167	1.4

어류양식장에서 BHI를 활용한 건강도의 비교를 위해, AMBI를 산출하여 비교하였다(Fig. 3b). AMBI는 0.9-5.9의 범위로 정상상태에서 오염심화해역의 건강도를 나타내었다. BHI와 비교하여 23개 정점은 같은 등급의 건강도를 나타내

었고, 13개 정점에서 BHI의 건강도가 높게 나타났고, 7개 정점에서 AMBI의 건강도가 높게 나타났다. AMBI의 건강도가 낮게 나타난 정점은 st.01-03, st.08, st.11, st.38-39로 모두 BHI는 정상상태를 보였고, AMBI는 약간오염된 상태를 나타내었다.

3.4 저서다모류 군집 구조

집괴분석으로 구분한 6개 Group을 MDS 분석을 통해 2차원 평면상에 구현하고 각 그룹의 상대적 위치와 그룹별 특징을 비교해 보았다. 먼저 Group A로 묶인 정점군은 평면도의 가장 우측 하단에 위치하였으며, 다른 정점군과 평면상 좌우로 크게 구분되었다. 6개 그룹 중 출현 종수, 개체밀도 그리고 총유기탄소량이 가장 낮았으며, 종다양도 또한 낮았다(Table 3, Fig. 4a-c). 출현종은 낮은 유기물 농도에서 서식하는 종(1그룹중, 2그룹중)이 대부분을 차지하였다(Fig. 4d). Group B는 평면상의 좌측 상단 위치하였으며, 다른 그룹에 비해 개체밀도 대비 출현 종수는 많아 다양도가 높은 것이 특징이었으며, 총유기탄소량도 2등급 수준으로 높은 편이었다. 종조성은 1, 2그룹종이 출현종의 대부분을 차지하였으나 Group A와 비교하여 2그룹종의 비율이 상대적으로 높았다. Group C와 Group D는 평면상의 좌측 중앙에 위치하였다. 두 그룹의 출현 종수와 개체밀도는 6개 그룹 중 중간 정도 수준으로 상대적으로 높은 다양도를 보였지만, 총유기탄소량에서는 차이가 있었다. 앞선 두 Group과 비교하였을 때 3, 4 그룹종의 다모류 비율이 높아졌으며, Group D는 3, 4그룹종의 비율이 50% 이상을 넘었다. 다른 그룹에 비해 많은 정점을 포함하는 Group E1과 Group E2는 평면상에서 좌측 하단에 위치하였다. 두 그룹은 6개 그룹 중 가장 높은 총유기탄소량을 보이는 공통점이 있었지만 Group E1는 가장 많은 출현종수를, Group E2는 가장 높은 개체밀도를 보여 다양도에 큰 차이를 보이는 점이 특징적이었다. 출현종은 3, 4종의 비율이 높았으며, Group E2의 경우에는 4등급종이 86.6%로 높은 비율을 차지하였다.

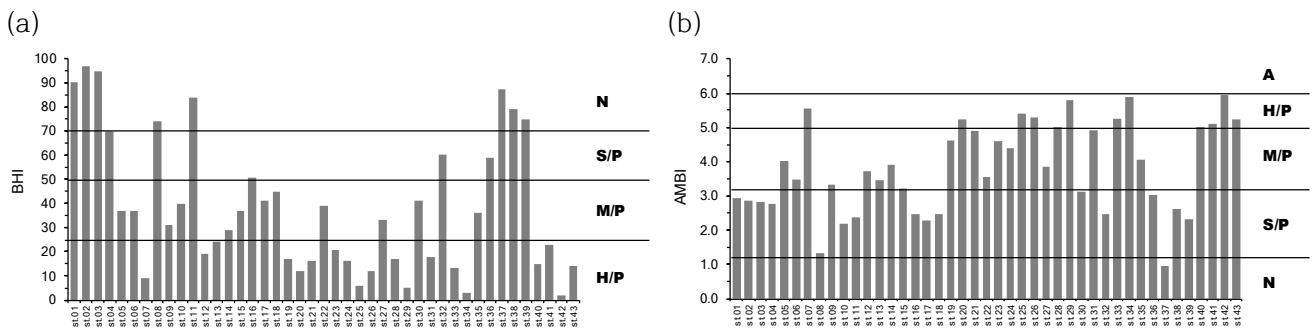


Fig. 3. Comparison of benthic community health of fish cage farms using BHI (Benthic health index) and AMBI (AZTI's marine biotic index). (N: Normal, S/P: Slightly polluted, M/P: Moderately polluted, HP: Heavily polluted, A: Azoic benthic community health).

Table 3. Community structure, range of total organic carbon high ranked dominant species by group

	A	B	C	D	E1	E2
No. of station	3	2	3	4	14	17
Average no. of species (spp./0.05m ²)	8±2	16±7	18±3	16±2	27±6	14±6
Density (inds./m ²)	1,113	1,300	2,213	1,577	6,404	11,553
Diversity (aver.)	1.1±0.2	2.6±0.2	2.2±0.2	2.4±0.6	2.3±0.5	0.9±0.4
TOC (mg/g)	1.8±1.3	16.0±2.3	5.4±0.6	10.5±4.2	22.1±3.7	21.3±7.2
BHI	94±4	79±7	80±6	56±14	36±8	13±6

각 Group의 BHI 점수의 범위를 살펴보면, Group A-C는 건강도가 1등급의 정상상태였으며, Group D는 건강도가 2-3등급이었고, Group E1은 건강도가 3-4등급, Group E2는 4등급으로, Group E1, E2의 건강도가 악화된 상태였다(Fig. 5). 각 그룹이 대별되는 특징을 종조성 관점에서 알아보기 위해 SIMPER 분석을 수행하였다. 종조성의 차이를 단순 우점종 기준으로 비교할 경우 그룹 간 겹치는 종들의 상대적 중요도 파악이 어렵기 때문에 그룹 내 그리고 그룹 간의 차이에 있어 상대적 중요도를 개별종 차원에서 제시하는 SIMPER를 적용하였다(Table 4). 먼저, Group A의 경우 대표종은 그룹 내 유사도와 그룹 간 유사도에 모두 기여한 *Spiophanes bombyx*였으며, 특히, 그룹 내 기여율이 90.96으로 매우 높았다. Group B는 그룹 내 기여종인 *Prionospio saccifera*, *Ampharete arctica*와 그룹간 유사사도 기여종인 *Magelona japonica*가 대표종이었다. Group C의 대표종은 그룹 내 기여종인 *Mediomastus sp.*, *Prionospio*

*multibranchiata*와, 그룹 간 유사사도 기여종인 *Cirrophorus armatus*, *Euchymene oerstedii*였다. Group D는 그룹 내 유사도 기여종인 *Nephtys oligobranchia*와 *Heteromastus sp.*가 대표종이었다. 그룹 간 유사사도 기여율에서 대별되는 종은 없었으며, 최우점종인 *Capitella capitata*도 Group E2에서 밀도가 더 높아 Group D의 대표종에서 제외하였다. Group E1의 대표종은 그룹 내, 그룹 간 구분에 모두 기여한 *S. longifolia*, *Schistomeringos rudolphi*와 그룹 간 유사사도에 기여한 *Aphelochaeta monilaris*이었다. Group E2에서는 그룹 내 기여종인 *C. capitata*와 그룹간 유사사도 기여종인 *Sigambra tentaculata*가 대표종이었다.

각 그룹의 군집 특성을 나타내는 대표종들을 알아보기 위한 또 하나의 방법으로 주좌표분석(PCO)을 수행하였다(Fig. 6). 그룹의 형성은 다차원척도법과 거의 일치하였으며, 각 그룹의 배치와 각 그룹 형성에 영향을 미친 대표종 또한 SIMPER 분석 결과와 일치하였다.

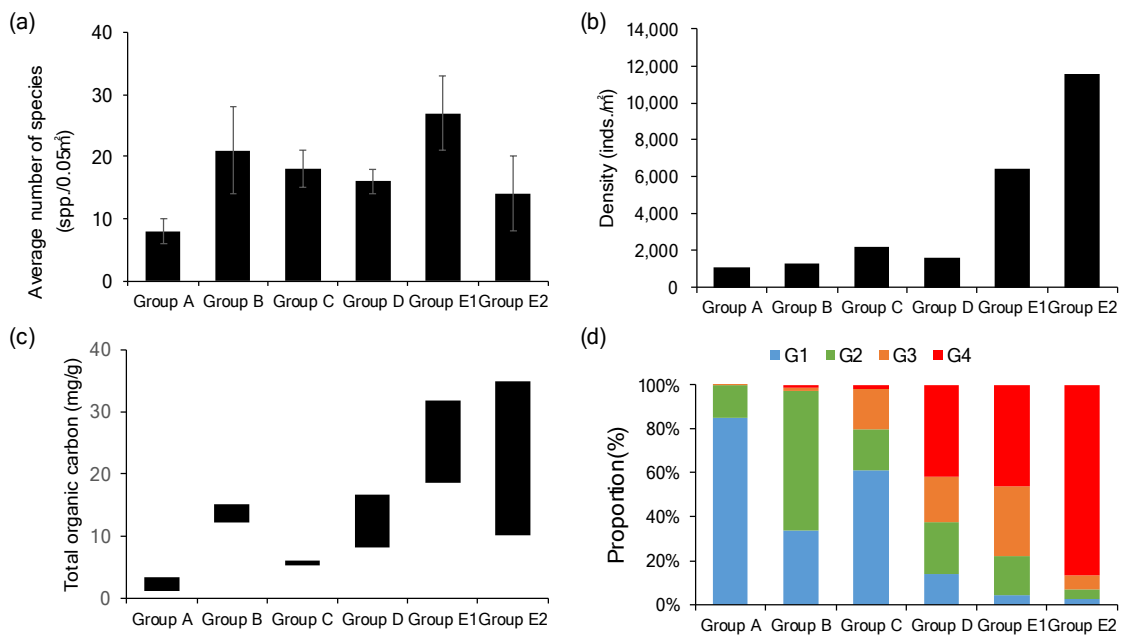


Fig. 4. Comparison of community structure by group. (a) average number of species, (b) density, (c) Total organic carbon range, (d) proportion of the four groups in the calculation of the BHI.

저서동물지수를 활용한 어류가두리 양식장의 건강도 평가

Table 4. Species contributing to similarity within each groups and dissimilarity between groups as revealed by the SIMPER procedure. Numerics in parentheses are percentages of contribution to the (dis)similarity and letters indicate the station group where species in question are more abundant as a result of pairwise comparison

	Group A	Group B	Group C	Group D	Group E1	Group E2
Group A	<i>Spiophanes bombyx</i> (90.96)					
Group B	<i>S. bombyx</i> (36.56, A)	<i>Mediomastus</i> sp. (31.25)				
	<i>Magelona japonica</i> (14.01, B)	<i>P. saccifera</i> (18.75)				
	<i>Mediomastus</i> sp. (4.02, B)	<i>Ampharete arctica</i> (9.38)				
	<i>Heteromastus</i> sp. (3.65, B)	<i>Glycera chirori</i> (9.38)				
	<i>Prionospio saccifera</i> (3.12, B)	<i>Lumbrineris cruzensis</i> (9.38)				
Group C	<i>Cirrophorus armatus</i> (27.69, C)	<i>C. armatus</i> (11.96, C)	<i>Mediomastus</i> sp. (51.77)			
	<i>S. bombyx</i> (12.24, A)	<i>E. oerstedii</i> (11.71, C)	<i>S. longifolia</i> (9.16)			
	<i>Mediomastus</i> sp. (11.36, C)	<i>M. japonica</i> (11.52, B)	<i>Prionospio multibranchiata</i> (8.74)			
	<i>Euclymene oerstedii</i> (11.16, C)	<i>Mediomastus</i> sp. (9.60, C)	<i>A. arctica</i> (7.05)			
	<i>Scoletoma longifolia</i> (8.29, C)	<i>S. longifolia</i> (8.70, C)	<i>Harmothoe imbricata</i> (5.56)			
Group D	<i>S. bombyx</i> (36.53, A)	<i>C. capitata</i> (16.28, D)	<i>C. capitata</i> (13.05, D)	<i>Nephtys oligobranchia</i> (14.53)		
	<i>Capitella capitata</i> (15.02, D)	<i>M. japonica</i> (15.36, B)	<i>C. armatus</i> (11.71, C)	<i>S. longifolia</i> (14.24)		
	<i>S. longifolia</i> (6.05, D)	<i>S. longifolia</i> (6.36, D)	<i>E. oerstedii</i> (11.48, C)	<i>Mediomastus</i> sp. (13.61)		
	<i>Scoloplos armiger</i> (3.74, D)	<i>Cirriformia tentaculata</i> (3.72, D)	<i>Mediomastus</i> sp. (11.37, C)	<i>S. tentaculata</i> (12.88)		
	<i>S. tentaculata</i> (3.73, D)	<i>S. armiger</i> (3.60, D)	<i>S. longifolia</i> (8.60, C)	<i>Heteromastus filiformis</i> (8.77)		
Group E1	<i>Schistomeringos nudolphi</i> (17.64, E1)	<i>S. rudolphi</i> (18.07, E1)	<i>S. rudolphi</i> (17.6, E1)	<i>C. capitata</i> (21.88, E1)	<i>S. longifolia</i> (28.38)	
	<i>C. capitata</i> (16.48, E1)	<i>C. capitata</i> (17.01, E1)	<i>C. capitata</i> (16.84, E1)	<i>S. rudolphi</i> (19.38, E1)	<i>S. rudolphi</i> (25.62)	
	<i>S. longifolia</i> (14.84, E1)	<i>S. longifolia</i> (15.21, E1)	<i>S. longifolia</i> (11.92, E1)	<i>S. longifolia</i> (14.34, E1)	<i>C. capitata</i> (11.05)	
	<i>S. bombyx</i> (13.25, A)	<i>M. japonica</i> (5.75, B)	<i>C. armatus</i> (6.04, C)	<i>A. monilaris</i> (3.31, E1)	<i>C. tentaculata</i> (3.60)	
	<i>Aphelochæta monilaris</i> (297, E1)	<i>A. monilaris</i> (3.07, E1)	<i>E. oerstedii</i> (5.76, C)	<i>P. multibranchiata</i> (3.15, E1)	<i>Mediomastus</i> sp. (3.31)	
Group E2	<i>C. capitata</i> (70.96, E2)	<i>C. capitata</i> (70.65, E2)	<i>C. capitata</i> (67.40, E2)	<i>C. capitata</i> (73.36, E2)	<i>C. capitata</i> (58.11, E2)	<i>C. capitata</i> (92.30)
	<i>S. bombyx</i> (7.71, A)	<i>S. rudolphi</i> (6.62, E2)	<i>S. rudolphi</i> (6.21, E2)	<i>S. rudolphi</i> (7.34, E2)	<i>S. rudolphi</i> (11.04, E1)	
	<i>S. rudolphi</i> (6.69, E2)	<i>M. japonica</i> (3.31, B)	<i>C. armatus</i> (3.47, C)	<i>S. tentaculata</i> (2.97, E2)	<i>S. longifolia</i> (6.48, E1)	
	<i>S. tentaculata</i> (2.78, E2)	<i>S. tentaculata</i> (2.76, E2)	<i>E. oerstedii</i> (3.27, C)	<i>S. longifolia</i> (1.93, E2)	<i>S. tentaculata</i> (2.55, E2)	
	<i>S. longifolia</i> (1.99, E2)	<i>S. longifolia</i> (1.97, E2)	<i>Mediomastus</i> sp. (2.99, C)	<i>Eumida sanguinea</i> (1.35, E2)	<i>A. monilaris</i> (1.87, E1)	

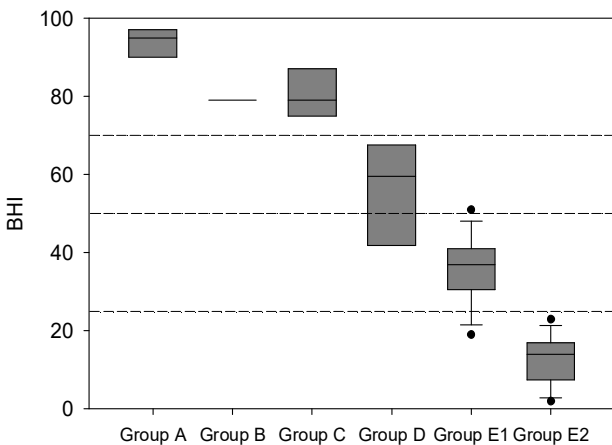


Fig. 5. The box-plot chart showing the range of Benthic Health Index (BHI) by group.

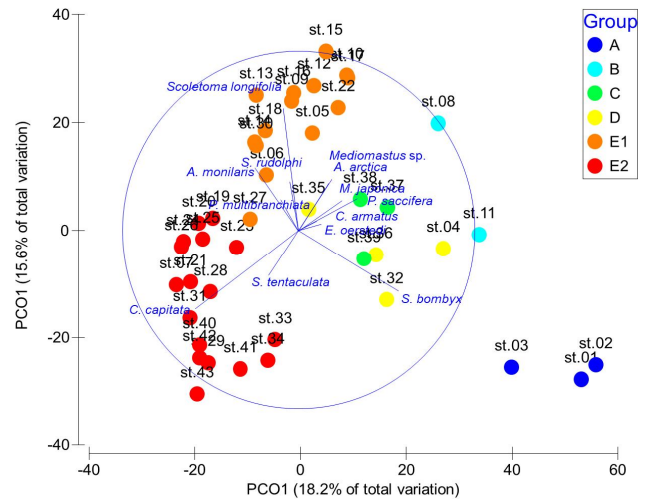


Fig. 6. Principal Co-Ordinates for 7 Groups based on Bray-Curtis similarity from log(X+1) transformed species abundance. Vector overlay on the PCO, showing macrobenthos with vector longer than 0.6 or high contributing species to distinguish macrobenthic community group.

Table 5. Comparison of BHI grade in various research areas in other Korean studies

Reference	Study site	BHI grade
Park et al., 2017	Shellfish farm in Southern coast of Korea	Gamak: 1–2 grade / Goseong: 3–4 grade
Park et al., 2021a	Shellfish farm in Tongyoung	fish farm: 3–4 grade reference site: 3 grade
Han et al., 2020	subtidal target coast of all over Korea (Environmental Impact Assessment, EIA)	generally: 3–4 grade West Sea area: 22.4 ± 9.4 South Sea area: 27.4 ± 4.7 East Sea area: 22.2 ± 8.3
Lee and Kim, 2021	dumping sited of dredged sediment	relatively good Benthic Health Index 4 grade at some stations
Park et al., 2021b	fish cage farm in Hadong	stations of the removed fish farms: 3–4 grade reference site: 2 grade
Ong et al., 2021	tidal flats in Saemangeum	generally: 1 grade
Youn et al., 2021	subtidal area of the Nakdong estuary (Brackish and marine)	generally: 1–2 grade

4. 고찰

연구 지역의 43개 어류가두리양식장을 대상으로 양식장의 건강도를 평가한 결과 1등급 양식장은 8개, 2등급 양식장은 4개, 3등급 양식장은 12개, 4등급 양식장은 19개로 전반적으로 3, 4등급이 우세하였다. 종조성의 유사도를 기준으로 군집구조를 분석해보면 6개의 그룹으로 구분되었으며, Group A–C의 건강도는 1등급이었고, Group D는 2등급이 우세하였고, Group E1은 3등급이 우세하였으며, Group E2는 4등급의 건강도였다.

1등급의 건강도를 나타내는 Group A–C의 양식장은 사질 퇴적상(Group A), 사질함량이 높고 분급도가 불량한 퇴적상(Group C) 그리고 양식 강도가 낮은(Group B) 양식장이 속하였다.

퇴적물 입도는 종 분포를 결정하는 요인 중 하나이며, 일부 좋은 퇴적물 유형과 상관성이 적으나 일부 좋은 특정 퇴적상을 선호한다(Dauvin et al., 2004). Group A의 최우점종이자 기여종인 *Spiophanes bombyx*는 사질 퇴적상을 선호하는 동해안의 대표종이며(Choi and Koh, 1988; Paik et al., 2007), Group C의 우점종인 *Cirrophorus armatus*, *Euclymene oerstedii* 역시 국내 펄, 자갈이 혼합된 양식장이나 분급이 불량하고 사질 함량이 높은 퇴적상에서 우점하는 종이다(Koo et al., 2005; An et al., 2006; Jung et al., 2014). 일반적으로 유기물은 세립질 퇴적물과 친화력이 크기 때문에 입도가 세립할수록 유기물 함량이 증가하는 경향이 있다(Horowitz, 1991). 다른 Group과 비교해서 Group A와 C의 낮은 TOC는 사질 특성의 퇴적상의 영향으로 판단되며, 낮은 유기물 농도에서 1그룹 종과 2그룹종이 우점하여 정상해역(Normal)의 건강도를 나타내었다. Group A와 C를 비교하면, 퇴적물의 이질성이 증가할

수록 생물 다양성이나 개체수가 높다는 연구 결과(Seo, 2003)와 유사하게 분급도가 불량한 Group C에서 군집의 출현 종수, 개체밀도, 종다양도가 상대적으로 높았다. Group B는 현장조사 당시 전년도에 어류를 출하하고 입식을 하지 않은 양식장과 1년간 휴식중인 양식장을 포함하여 다른 그룹과 대별되었다. 이러한 이유로 동일 해역에 위치한 다른 어류가두리(Group E1, E2)와 비교하여 유기물 농도가 낮고 건강도가 높았다.

건강도가 2등급인 Group D의 양식장은 육지에서 멀리 이격된 해역, 양식장 옆으로 수로가 위치한 해역, 만의 입구에 위치한 해역 등 해류의 흐름이 매우 좋은 해역에 위치하였다. 양식 활동의 영향범위와 강도는 양식장이 설치된 지역의 수력학적인 조건에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며(Aure and Stigerbrant, 1989; Hevia et al., 1996; Villnäs et al., 2011), 조류나 해류가 강한 해역에서는 양식장 아래에 미치는 영향이 감소되는 것으로 보고되었다(Frid and Mercer, 1989; Kutti et al., 2008). Group D는 Group E1, E2와 비교하여 유사한 양식강도를 갖지만 어장 주변의 빠른 유속의 영향으로 유기물이 분산됨으로써 가두리 바로 밑의 유기물 농도는 Group E1, Group E2보다는 많이 낮았다. 그러나 종조성 측면에서는 유사한 유기물 농도의 Group B보다는 Group E1과 E2에 가까웠다.

Group E1과 E2는 평면상에서 가까운 거리에 위치하여 유사도가 높았고, 높은 TOC를 나타내어, 유기물 오염이 진행된 상태였으나, 건강도는 Group E1은 3등급, E2는 4등급으로 차이가 있었다. Pearson and Rosenberg(1978)은 유기물 농도에 따른 대형저서동물 군집의 친이모델을 제시하였는데, 이 연구에서는 유기물이 증가함에 따라 종수와 개체밀도가 증가하는 Transition region, 종수가 감소하고 개체밀도가 급격히

증가하는 Ecotone point, 상대적으로 작은 신체크기를 가지는 소수의 기회주의종이 극우점하여 개체밀도가 최고점인 Peak of opportunists의 상태, 그리고 종수와 개체밀도 모두가 감소하는 빈약한 군집상태로 천이된다고 제시하였다. Group E1과 E2는 높은 유기물의 농축으로 Transition region은 이미 넘어섰으며, Group E1은 Ecotone point 도달하기 이전의 군집 상태였으며, Group E2는 Peak of opportunists의 상태의 군집으로 판단된다.

Group E와 E2의 최우점종은 *Capitella capitata*였고, 차순위 우점종은 *Schistomeringos rudolphi*로 동일하였으나, Group E1에서는 *C. capitata*와 *S. rudolphi*의 밀도 차이가 크지 않았고, Group E2에서 *C. capitata*가 극우점하는 양상을 나타내었다. *C. capitata*와 *S. rudolphi*는 4그룹종이지만, *C. capitata*는 유기물에 내성이 있어 높은 유기물 농도에서 고밀도로 출현하지만 중간 경쟁이 다소 약하며, *S. rudolphi*는 *C. capitata*에 비해 오염에 대한 내성은 상대적으로 낮으나 중간 경쟁에서 초기 가입하여 번식하는 차이가 있다(Pearson and Rosenberg, 1978; Dean, 2008). 따라서 두 종의 분포특성에 따르면 *C. capitata*가 극우점한 Group E2의 유기물 오염이 더 심각한 상태로 판단된다. 유기물 농도가 일정 농도 이상에서는 TOC만으로 두 Group의 건강도 차이가 구별하기는 어려웠으며, 두 Group의 다모류 군집 구성과 우점종의 경향을 참고하면 Group E2의 유기물 오염이 더 심각한 상태로 판단된다.

BHI와 AMBI의 건강도는 전체 43개의 어류가두리에서 23개가 같은 등급으로 나타나 53.5%가 일치함을 보여주었다. 두 지수의 건강도 차이는 지수 계산시 할당된 종그룹이 다르기 때문이다. AMBI와 비교하여 BHI의 건강도가 높은 정점은 Group A와 C였는데, 이들 Group의 우점종인 *Spiophanes bombyx*와 *Cirrophorus armatus*가 BHI에서는 1등급종에, AMBI에서는 3등급종에 할당되어 BHI의 건강도가 높게 나타났다. AMBI의 건강도가 높은 정점은 Group E1과 E2의 일부 정점이었으며 Group E1과 E2의 상위 우점종인 *Scoletoma longifolia*가 BHI에서는 3등급종에, AMBI에서는 2등급종에 해당하여 두 지수의 등급차이에 기여하였다. 연구지역에서 두 건강도 지수의 등급과 TOC 등급을 상호비교해보면, 유기물 농도가 낮은 곳에서는 BHI가 TOC와 등급의 차이가 적어 적합한 것으로 판단되며, 유기물 농도가 높은 곳에서는 AMBI, BHI와 TOC간의 직접적인 비교는 어려웠다. 다만 BHI가 국내종을 대상으로 유기물농도와와의 상관성에 기초하여 만들어진 지수이기 때문에, 국내의 양식장에 더 적합한 지수로 판단된다.

국내 어류가두리 양식장의 건강도 평가 결과, 1등급 양식장은 저층 퇴적상의 영향으로 유기물 축적이 적은 지역과 특정 상황에 의해 양식장도가 낮은 지역이 속하였으며, 2등

급은 해수유통이 원활한 지역이 포함되었다. 그러나 어장환경평가로 조사된 대부분의 어류가두리양식장의 건강도는 3, 4등급으로 나타나 교란된 상태였다. 국내 연안 및 다른 품종의 양식장에서 BHI를 활용한 연구 결과와 비교해보면(Table 5), 어류가두리양식장의 건강도는 조건대와 양식장이 없는 해역에 비해 건강도가 낮았으며(Ong et al., 2021; Youn et al., 2021), 패류양식장과 비교하여 유사하거나 낮았다(Park et al. 2017, 2021a). Han et al.(2020)의 연구에서는 국내 환경영향평가 해역에서 유기물 오염 및 건강도를 평가하였는데, 남해안이 동해안과 서해안에 비해 상대적으로 건강도가 낮았다. 이는 남해안의 복잡한 해저지형으로 인한 해수유통의 방해로 상대적으로 유기물 체류가 길어졌기 때문으로 보았다. 본 연구에서도 남해안의 어류양식장 건강도가 상대적으로 낮은 경향이었으나, 양식장의 대부분이 남해안에 위치하여 직접적인 공간 비교는 어려웠으며, 같은 해역에 위치하여도 저층 퇴적상, 양식의 강도, 해수의 수리학적인 요인 등 여러 요인이 어류가두리양식장의 건강도에 영향을 주는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문의 완성도를 높이기 위해 세심하게 검토해 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다. 이 논문은 2022년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2022062)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

Reference

- [1] An, S., J. H. Lee, H. J. Woo, B. J. Koo, H. G. Lee, J. W. Yoo, and J. G. Je(2006), Benthic environmental and macrofaunal community changes during the dike construction in Saemangeum subtidal area, Korea, Ocean and Polar Research, Vol. 28, No. 4, pp. 369-383.
- [2] Anderson, M., R. N. Gorley, and R. K. Clarke(2008), Permanova+ for primer: Guide to software and statistical methods, Primer-E Limited.
- [3] Aure, J. and A. Stigebrandt(1989), On the influence of topographic factors upon the oxygen consumption rate in sill basins of fjords, Estuarine Coastal Shelf Science, Vol. 28, pp. 59-69.
- [4] Borja, A., D. M. Dauer, R. Di'az, R. J. Llanso', I. Muxika, J. G. Rodríguez, and L. Schaffner(2008), Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: a comparison of three indices, Ecological Indicator, Vol. 8, pp. 395-403.

- [5] Borja, A., J. Franco, and V. Pérez(2000), A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, No. 12, pp. 1100-1114.
- [6] Choi, J. W. and C. H. Koh(1988), The polychaete assemblages on the continental shelf off the southeastern coast of Korea, *The Sea Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 23, pp. 169-183.
- [7] Clarke, K. R. and R. M. Warwick(2001), Change in marine communities. An approach to statistical analysis and interpretation (2nd edition), PRIMER-E Ltd., pp. 1-68.
- [8] Dauvin, J. C., E. Thiebaut, J. L. G. Gesteira, K. Ghertsos, F. Gentil, M. Ropert, and B. Sylvand(2004), Spatial structure of a subtidal macrobenthic community in the bay of Veys (Western bay of Seine, English Channel), *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 307, No. 2, pp. 217-235.
- [9] Dean, H. K.(2008), The use of polychaetes (Annelida) as indicator species of marine pollution: a review. *Revista de Biologia Tropical*, Vol. 56, No. 4, pp. 11-38.
- [10] Frid, C. L. J. and T. S. Mercer(1989), Environmental monitoring of caged fish farming in macrotidal environments. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 20, No. 8, pp. 379-383.
- [11] Gao, Q. F., K. L. Cheung, S. G. Cheung, and P. K. Shin (2005), Effects of nutrient enrichment derived from fish farming activities on macroinvertebrate assemblages in a subtropical region of Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 51, pp. 994-1002.
- [12] Gowen, R. J. and N. B. Bradbury(1987), The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review. *Oceanography and Marine Biology*, Vol. 25, pp. 563-575.
- [13] Han, H. S., S. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Son, and C. W. Ma(2020), Distribution patterns of the organic pollution indicators at subtidal on coast developments in Korea, *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 29, No. 2, pp. 112-121.
- [14] Hargrave, B. T., M. Holmer, and C. P. Newcombe(2008), Towards a classification of organic enrichment in marine sediments based on biogeochemical indicators, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 56, No. 5, pp. 810-824.
- [15] Hevia, M., H. Rosenthal, and R. J. Gowen(1996), Modelling benthic deposition under fish cages. *Journal of Applied Ichthyology*, Vol. 12, No. 2, pp. 71-74.
- [16] Horowitz, A. J.(1991), A primer on sediment-trace element chemistry, 2nd edition. Chelsea, Lewis publishers.
- [17] Jung, R. H., I. S. Seo, W. C. Lee, H. C. Kim, J. B. Kim, B. M. Choi, S. S. Yun, and J. H. Na(2014), Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages at spring and summer in Garirun Bay, west coast of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 25, No. 5, pp. 491-503.
- [18] Karakassis, I., M. Tsapakis, E. Hatziyanni, K. N. Papadopoulou and W. Plaiti(2000), Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas, *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 57, No. 5, pp. 1462-1471.
- [19] Koo, B. J., S. H. Shin, and H. J. Woo(2005), Distribution of benthic macrofauna in subtidal area and on sand flat of Sindu-ri coast, Korea, *Journal of Wetlands Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 69-88.
- [20] Kutti, T., A. Ervik, and T. Høisaeter(2008), Effects of organic effluents from a salmon farm on a fjord system. III. Linking deposition rates of organic matter and benthic productivity, *Aquaculture*, Vol. 282, pp. 47-53.
- [21] Lee, E. and T. Kim(2021), Improvement of the Environmental impact assessment and post-environment impact survey reports using marine environment assessment indices, *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 30, No. 2, pp. 61-74.
- [22] Muxika, I., A. Borja, and J. Bald(2007), Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 55, pp. 16-29.
- [23] Ong, G., S. R. Jeon, J. H. Koo, J. W. Park, H. D. Jeung, J. H. Kang, and Y. S. Cho(2021), Community structure and health assessment of macrobenthos in tidal flats along the west cast of Korea in spring and summer, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 27, No. 4, pp. 500-509.
- [24] Paik, S. G., R. S. Kang, J. O. Jeon, J. H. Lee, and S. G. Yun(2007), Distribution patterns of sandy bottom macrobenthic community in the Hupo coastal area, in the East Sea of Korea, *Ocean and Polar Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 123-134.
- [25] 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.
- [26] Park, S., S. Kim, B. R. Sim, S. J. Park, H. C. Kim, and S. P. Yoon(2021a), Changes in benthic community after fish farm relocation in the south coast of Korea, *Journal of the Korean*

Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 7, pp. 943-953.

- [27] 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 & Safety*, Vol. 27, No. 5, pp. 605-617.
- [28] Pearson, T. H. and R. Rosenberg(1978), Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment, *Oceanography and Marine Biology Annual Review*, Vol. 16, pp. 229-311.
- [29] Pereira, P. M., K. D. Black, D. S. McLusky, and T. D. Nickell (2004), Recovery of sediments after cessation of marine fish farm production. *Aquaculture*, Vol. 235, pp. 315-330.
- [30] Pinto, R., J. Patrício, A. Baeta, B. D. Fath., J. M. Neto, and J. C. Marques(2009), Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition, *Ecological indicators*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-25.
- [31] Rosenberg, R., M. Blomqvist, H. C. Nilsson, H. Cederwall, and A. Dimming(2004), Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 49, pp. 728-739.
- [32] Seo, I. S.(2003), Community structure and trophic relationships of macro- and megabenthic assemblages on Incheon macrotidal flat of the Yellow Sea, Department of Oceanography, Graduate School Inha University, Korea, pp. 273.
- [33] Tomassetti, P., E. Persia, I. Mercatali, D. Vani, V. Marusso, and S. Porrello(2009), Effects of mariculture on macrobenthic assemblages in a western Mediterranean site. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 58, No. 4, pp. 533-541.
- [34] Villnäs, A., J. Perus, and E. Bonsdorff(2011), Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment - Implications for community recovery potential, *Journal of Sea Research*, Vol. 65, No. 1, pp. 8-18.
- [35] Youn, S. H., J. W. Lee, C. W. Oh, B. M. Choi, K. T. Yoon, J. H. Na, and I. S. Seo(2021), Community structure and health status of macrobenthic animals in the Nakdong river estuary, Busan, Korea, *Ocean and Polar Research*, Vol. 43, No. 2, pp. 73-88.

Received : 2022. 07. 27.

Revised : 2022. 08. 26.

Accepted : 2022. 08. 29.