

# 통영연안의 패류양식장 중단 이후 다모류 군집구조의 변화

박소현\* · 김선영\*\* · 심보람\*\* · 박세진\*\* · 김형철\*\*\* · 윤상필\*\*\*\*

\*, \*\* 국립수산과학원 어장환경과 연구원, \*\*\* 국립수산과학원 어장환경과 연구사

## Changes in the Community Structure of Benthic Polychaetes after the Shellfish Farm Cessation in Tongyeong Bay of Korea

Sohyun Park\* · Sunyoung Kim\*\* · Bo-Ram Sim\*\* · Se-jin Park\*\* · Hyung Chul Kim\*\*\* · Sang-Pil Yoon\*\*\*\*

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

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

**요약** : 본 연구에서는 장기간 운영된 양식장에 휴지기가 주어졌을 때, 양식장 주변 퇴적 환경에서 나타나는 회복상태를 규명하고자 하였으며, 이를 위해 경남 통영의 수하식 굴양식장 일대에서 대형저서다모류 군집을 조사하였다. 2016년 7월부터 2018년 9월까지 20년간 운영된 후 폐쇄된 양식장(FF), 양식장의 이동으로 새롭게 설치된 양식장(NF), NF와 인접한 비교대상의 굴양식장(CF), 그리고 양식시설이 없는 두 개의 대조지역(Con1, Con2) 등 5개 정점에서 현장조사를 수행하였다. 출현종수와 서식밀도는 여름철에 감소하고 늦가을철부터 증가하는 계절 변동을 보였으며, 양식장 정점들이 비양식장 정점들에 비해 높았다. 출현종의 상위우점종은 비양식장 정점에서는 *Paraprionospio patiens*, 양식장 정점에서는 *Capitella capitata*로 차이를 보였으나, 두 종 모두 유기물이 심한 지역에서 출현하는 잠재적 유기물 오염지시종으로 조사지역 저서환경의 유기물 오염이 상당히 진행되었음을 나타내었다. 다변량분석 결과, FF가 Con1과 군집구조가 유사한 수준으로 변화하였지만 Con1 이상의 상태로 회복을 나타내지 않았다.

**핵심용어** : 다모류 군집, 패류양식장 중단, 저층 퇴적물 회복, 유기물오염, 굴 양식장

**Abstract** : The recovery of the sedimentary environment around a fallowing shellfish farm during its rest period after 20 years of long-running operation, was explored in Tongyeong Bay of Korea. Seasonal survey on macrobenthos community was conducted from July 2016 to September 2018 at five stations, which included the fallowing shellfish farm after 20-year operation (FF), a newly installed shellfish farm (NF), a shellfish farm for comparison around the closed shellfish farm (CF), and control stations with no farming activities (Con1, Con2). The total number of species and the density of macrobenthos were higher at the shellfish farm stations than the non-shellfish farm station, and their seasonal changes were significant. The dominant species at the shellfish farm stations was *Capitella capitata* while *Paraprionospio patiens* was dominant at the non-shellfish farm stations. The two dominant species were potential organic contamination indicators usually inhabiting the areas with dense organic matter. This suggests that the overall survey area was highly polluted with organic matters. Multivariate analysis showed that the macrobenthic community of CF changed to a level similar to that of Con1 immediately after the investigation, but not to a state above the Con1 level. Furthermore, the changes in NF were not significant when compared to those in CF.

**Key Words** : *Polychaeta* community, Shellfish farm cessation, Benthic recovery, Organic enrichment, Oyster farm

\* First Author : [jjing5678@naver.com](mailto:jjing5678@naver.com), 051-720-2551

† Corresponding Author : [spyoon@korea.kr](mailto:spyoon@korea.kr), 051-720-2551

## 1. 서론

연안 양식은 사료 및 배설물 형태의 유기물을 저층에 국지적으로 농축시킨다. 이로 인해 양식장 저층 연질 퇴적물은 다양한 시간, 공간 규모로 생지화학적 변화를 일으켜 교란이 심각하게 발생되며(Jung et al., 2013) 이와 같은 현상은 어류 가두리 양식장에서 가장 뚜렷하게 나타난다(Hall et al., 1990). 그러나 사료의 직접적인 공급이 없는 수하식 패류 양식장의 경우에도 양식생물의 분과 위분, 그리고 시설물에서 탈락한 동물체, 양식장 시설물로 인해 잉여 유기물이 발생되며 이 역시 저층의 오염도를 가중시킨다(Crawford et al., 2003).

장기간의 양식장 운영으로 인해 오염물질이 가중된 양식장 저층의 퇴적물 개선을 위한 방법에는 퇴적물 준설 및 정화처리, 어장에 개선물질을 투입 하는 등의 직접적인 방법이 있다. 이러한 방법은 어업인의 자부담이 크고, 어장 정화선 건조, 개선장비 등의 구입 등에 과다한 비용이 예상된다. 그러나 양식장에 휴지기를 주는 것은 자연적인 정화능력에 의해 어장의 개선을 유도하는 방법으로 퇴적물의 회복을 돕고 어장의 지속가능한 사용을 보장한다(Black et al., 2008; Beveridge, 1987; Pereira et al., 2004). 양식활동으로 인해 오염된 저층 퇴적물의 회복을 위해 양식장에서의 휴지기 설정은 빈번히 사용되고 있으며, 휴지기 설정은 양식장의 장기간 운영을 가능하게 하였다(Black et al., 2008; Carroll et al., 2003; Macleod et al., 2006).

양식 활동이 양식장 주변 퇴적환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 생물 군집의 시공간 변화와 퇴적물 화학적 생태를 조사한 연구가 계속 진행되어져 왔으며, 특히 양식장의 휴지기와 관련된 연구는 스코틀랜드(Gowen et al., 1990), 노르웨이(Johannessen et al., 1994), 캐나다(Pohle et al., 2001) 등에서 수행된 바 있다. 그러나 이러한 연구는 주로 어류 양식장에서 연구가 수행되어, 패류 양식장에서의 휴지기 관련 연구는 여전히 부족하다. 어류 양식장의 연구는 휴지기 이후 저층 퇴적 환경이 회복되는 결과를 보인 연구(Ritz et al., 1989; Johannessen et al., 1994)와 회복이 보이지 않은 연구가 있었다(Gowen and Bradbury, 1987; Karakassis et al., 1999; Pohle et al., 2001).

양식장에서 교란된 퇴적층의 회복은 양식장이 없는 인근 해역의 퇴적물 상태나 양식 활동 이전의 퇴적물 상태로 돌아가는 것을 의미한다(Aguado-gimenez et al., 2012; Keeley et al., 2014). 양식장 저층 퇴적물이 회복되는 속도와 정도는 교란 정도를 결정하는 요소 즉, 유기물의 축적량, 양식장 운영 기간 및 강도, 해역의 물리적 특성, 퇴적물의 특성 등에 따라 달라질 수 있다(Macleod et al., 2006; Brooks et al., 2004; Norkko et al., 2006; Zhulay et al., 2015). 양식장 저층 퇴적물의

회복여부는 퇴적물의 산화환원전위(Eh), pH, 총유기탄소(TOC) 등의 화학변수를 이용하여 모니터링하는 방법과, 대형저서동물 군집변화를 통한 생물학적 모니터링 방법으로 감지할 수 있으며(Macleod et al., 2006; Black et al., 2008), 대형저서동물 군집구조는 유기물 오염에 관한 가장 최적의 지시자중 하나로 회복의 검증에 빈번히 사용되고 있다(Carroll et al., 2003; Pereira et al., 2004). 대형저서동물군집의 회복은 Pearson and Resenberg의 천이 모델을 따르는데, 교란시에는 r-전략의 생활사를 갖는 기회종이 우점하여 다양성이 낮은 군집이 형성되지만 회복이 진행되면서 점차 k-전략의 생활사를 갖는 종들이 우점하는 다양성이 높은 군집으로 천이한다. 여러 연구에서 양식장의 휴지기 이후 대형저서동물 군집의 완전한 회복에는 짧게는 몇 달에서(Ritz et al., 1989; Brooks et al., 2004) 길게는 몇 년이 걸릴 수 있음이 보고되었다(Karakassis et al., 1999).

국내 패류양식장은 대부분 전남과 경남에 집중되어 있고 양식장의 밀집도가 상당히 높은 편이다. 양식장 대부분이 위치 변동 없이 최소 20~30년 이상 장기간 운영되고 있어(KOSIS, 2015), 양식장 저층의 건강도는 매우 악화되어 있다. 연구지역인 통영은 수심이 10m 미만인 해역이 많고, 주변의 많은 섬들로 인해 파랑이 적다. 해수 유통이 원활하고, 영양염류의 공급이 풍부하여 양식업이 상당히 발달되어 있는데(Jang et al., 2015), 어류와 패류 양식이 집중되어 있다(KOSIS, 2015). 그러나 수십년간의 장기적인 양식장 운영으로 인해 대규모 적조가 반복적으로 발생하는 등, 해양 오염이 심각한 것으로 보고된 바 있다(Kang et al., 2003). 특히 양식장 주변은 설치된 양식 시설물로 인해 조류 소통이 원활하지 않은 상태에서 양식생물의 배설물과 폐사한 양식생물의 잔해 등이 저층에 집적되어, 저층의 오염이 심각한 상태로 보고되고 있다(Choi et al., 2017).

연구 대상인 통영 굴 양식장은 생산량의 감소를 이유로 약 700m 정도 떨어진 위치로 이전하였다. 따라서 기존에 양식장이 위치한 해역이 휴식기간이 주어진 경우와 같은 조건일 수 있을 것으로 판단하여 연구 정점으로 선정하였다. 본 연구는 양식시설물 또는 양식활동이 있고 없음에 따라 발생하는 환경의 교란과 회복과정을 저서동물의 변화를 통해 파악하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구 지역

본 연구는 경남 통영시 용남면의 수도와 경남 거제시 사등면의 가조도 사이에 위치한 굴양식장과 그 주변 해역에서 수행되었다. 연구 대상인 굴양식장은 장기간 운영으로 인한

## 통영연안의 패류양식장 중단 이후 다모류 군집구조의 변화

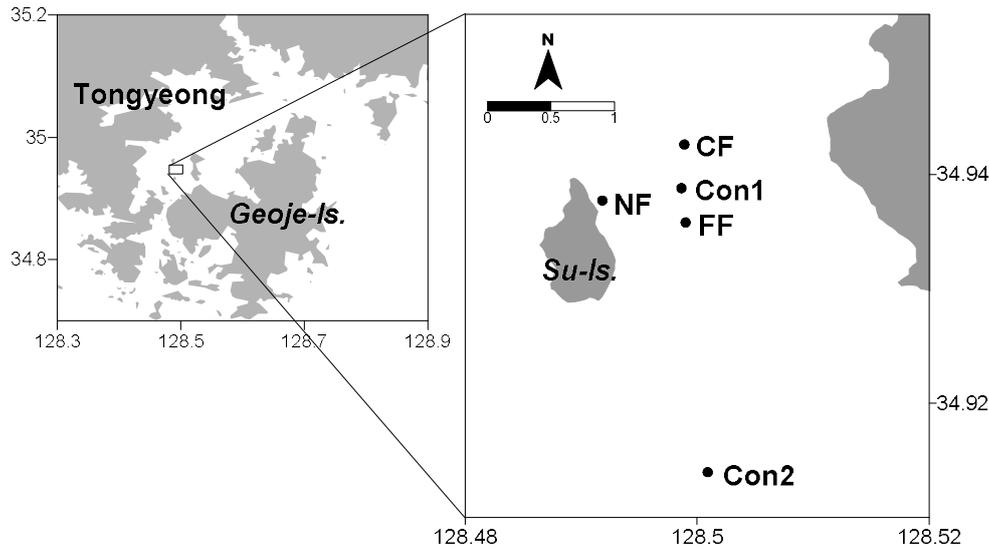


Fig. 1. Sampling station in the shellfish farms and reference sites (FF: fallowing farm, NF: new farm, CF: comparable farm, Con1: control 1, Con2: control 2).

생산량 저하로, 기존 시설물에서 약 700 m 정도 이격된 위치로 이동하였고, 이에 따라 본 연구는 굴양식장 시설물의 철거와 신설 시점을 중심으로 발생하는 저서다모류 군집구조와 저서생태계의 건강도의 변화를 양식장 환경의 회복이라는 측면에서 살펴보고자 하였다. 조사정점은 굴양식장 시설이 철거되어 휴지기가 설정된 정점(FF: fallowing farm)과 새롭게 양식장이 조성된 정점(NF: new farm), NF와 인접한 비교대상의 정점(CF: comparable farm), FF 정점과 CF 정점 사이에 양식시설이 설치되어 있지 않은 정점(Con1: control 1), 그리고 양식시설 밀집해역을 벗어난 정점(Con2: control 2)까지 총 5개 정점으로 구성하였다(Fig. 1). 굴양식장의 철거와 신설은 모두 2016년 6월 중에 이루어졌고, 현장조사는 2016년 7월부터 2018년 9월까지 진행하였으며, 2017년 6월까지 1년간은 매월, 그리고 그 이후에는 계절조사로 진행하였다. 단, Con2는 2016년 11월에 새로 조사 정점에 포함하였다.

연구 정점이 포함된 진해만은 여름철 빈산소수괴가 빈번히 발생하고 있으며, 빈산소수괴의 형성이 굴의 주요 폐사 원인으로 알려져 있다(NFRDI, 2012). 본 연구지역의 조사 정점과 조사시기가 일부 중복되는 Sim et al.(2020)의 연구에서 측정된 용존산소 농도는 평균 1.35~9.57 mg/L 범위였으며, 여름철 빈산소수괴가 관측되었다.

### 2.2 퇴적물 유기물 분석 및 저서동물 분석

퇴적물 시료는 표면적 0.05 m<sup>2</sup>의 van-Veen grab을 사용하여 정점 당 6회 반복 채집하였으며, 1회분은 표층퇴적물의 지화학적 특성 분석용으로, 그리고 5회분은 저서다모류 군집 분

석용으로 사용하였다. 퇴적물의 지화학적 특성과 관련하여 총유기탄소량(TOC, mg/g dry wt.), 총질소량(TN, mg/g dry wt.), 산화발성황화물(AVS, mg/g dry wt.), 강열감량(IL, %), 화학적 산소요구량(COD, mg/g dry wt.) 등 5가지 항목을 측정하였다. 각 변수들에 대한 분석은 해양환경공정시험기준(MOF, 2013)에 준하여 측정하였다. TOC와 TN은 동결 건조시킨 시료에 1N HCl 10 mL를 첨가하여 탄산염을 제거하고, 건조된 시료를 분말하여 CHN 원소 분석기(Perkin Elmer, model 2400)로 측정하였다. AVS는 발생관에 약 1g의 습시료 퇴적물과 황산 1 mL를 넣은 후 검지관에 흡수되는 황화수소(H<sub>2</sub>S)의 양으로 측정하였다. IL은 약 5g의 퇴적물을 110°C에서 24시간 건조한 후, 550°C에서 2시간 강열하여 전과 후의 무게 차이로 계산하였다. COD는 퇴적물 내 유기물을 강산화제인 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>)으로 산화시켜 소모되는 양에 대응하는 산소량을 측정하여 분석하였다. 측정된 환경변수 중 TOC는 어장환경평가기법 적용에 활용하였고, TN을 제외한 4가지 항목은 퇴적물 특성 변화를 파악하는데 사용하였으며, 퇴적환경과 저서다모류 군집 구조의 상관성 분석에 5가지 항목을 모두 활용하였다.

### 2.3 자료분석

동물군의 분류와 종 동정과정을 통해 얻어진 저서다모류 자료에 대해서는 단변량 분석과 다변량 분석을 통해 군집의 구조적 특성을 시·공간적 변화 측면에서 파악하였으며, 저서생태계 건강도 파악을 위해 어장환경평가 기법(국립수산과학원 고시 제 2020-15호)을 적용하여 어장환경의 회복 정도

를 알아보았다. 단변량 분석을 위한 생태지수로서 출현종수, 개체밀도, 다양도지수를 활용하였으며, 상위 10순위 우점종에 대한 시·공간적 분포 변화를 분석하였다. 저서 다모류 군집구조 파악을 위해 로그 변환된 생물 개체수 자료에 대해 Bray-Curtis 유사도 지수를 구하고 그 결과 만들어진 유사도 행렬에 기초하여 다차원척도법(MDS)을 적용하였다. 다차원척도법에서 구분된 군집의 유의성을 검증하기 위해 one-way ANOSIM 평가를 실시하였다. 환경변수와 저서다모류 군집구조와의 상관성을 알아보기 위해 주좌표분석(PCO, Principal Coordinates analysis) 분석을 수행하였으며(Gower, 1966). 모든 통계분석은 Primer 패키지(ver. 6)를 이용하여 수행하였다.

각 정점에서 저서생태계 건강도평가를 위해 어장환경평가등급을 산출하였다. 어장환경평가를 위한 지수에는 국립수산과학원에서 개발한 저서동물지수(Benthic Health Index, BHI)와 총유기탄소량을 활용하였다(국립수산과학원 고시 제 2020-15호). 저서동물지수의 계산식은 다음과 같다.

$$BHI = 25((4 \times N1 + 2.68 \times N2 + 1.36 \times N3 + 0.04 \times N4) / Ntotal)$$

여기서, N은 각각 그룹의 개체수를 나타내며, N1은 낮은 유기물농도에서 높은 밀도로 출현 또는 출현빈도와 밀도가 낮은 종, N2는 유기물 농도와 상관없이 고른 분포를 하는 종, N3은 비교적 높은 유기물농도에서 높은 밀도로 출현하는 종, N4는 계절적으로 무생물역이 발생하는 해역에서 높은 밀도로 출현하거나 높은 유기물 농도에서 출현하는 종이 속한다.

산출된 저서동물지수와 총유기탄소값은 Table 1과 같이 점수화하여 4개의 등급으로 구분하였으며, 1등급은 유기물 오염이 없는 상태, 2등급은 유기물 오염의 초기 상태, 3등급은 유기물 오염이 상당히 진행된 상태, 4등급은 유기물 오염이 심각한 상태를 나타낸다. 어장환경평가와 관련된 구체적인 절차와 방법은 국립수산과학원 고시 제 2020-15호의 방법에 준하였다(NIFS, 2020).

Table 1. Procedure for the determination of benthic quality grade using TOC and BHI

Point Indices	1	2	3	4
TOC	≤ 10.00	10.01-17.00	17.01-25.00	25.01 ≤
BHI	71 ≤	51 ~ 70	26-50	≤ 25
Point sum.	2-3	4-5	6-7	8
Benthic quality grade	1	2	3	4

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 퇴적물 특성의 시간변화

퇴적물에서 유기물 오염과 관련된 4가지 변수인 총유기탄소량(TOC), 산화발성황화물(AVS), 강열감량(IL), 퇴적물산소요구량(COD)의 시공간 변화를 측정하고(Fig. 2, Table 2), 정점과 조사 시기에 따라 이원분산분석을 수행하였다. 먼저 각 변수의 정점간 차이는 유의하였다(p<0.01). 사후분석 결과 TOC는 조사 정점이 세 개의 그룹으로 나뉘었다. 대조 정점인 Con2가 가장 낮은 평균값을 나타내었고, 비양식장 정점인 Con1과 FF가 하나의 그룹으로 묶였으며, 양식장 정점인 NF와 CF가 TOC 평균값이 가장 높은 그룹으로 나타났다. AVS와 IL은 두 개의 그룹을 이루었으며, 비양식장 정점인 Con2, Con1, FF가 유사한 수준으로 평균값이 낮았고, 양식장 정점인 NF와 CF가 평균값이 높았다. COD는 세 개의 그룹으로 구분되었으며 Con2에서 평균값이 가장 낮았고, Con1, FF, CF가 동일 집단으로 Con2보다 평균값이 높았으며, NF가 가장 높은 평균값을 나타내었다. 퇴적물 특성은 비양식장 정점인 FF, Con1, Con2와 양식장 정점인 NF, CF가 구분되어 양식장 유무에 따른 차이를 나타내었다.

퇴적물 특성은 조사시기에 따라서는 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않았다. 시간에 따른 변화를 살펴보면, FF에서 TOC는 휴지기 직후 감소하였지만 이후 초기값 이하의 농도에서 계절변동을 보이며 증가와 반복을 감소하였다(Fig. 2a). AVS와 COD는 휴지기 직후 감소하다가 약 1년 이후 증가하였으며, IL은 약 20개월 이후에 증가하였다(Fig. 2b-d). 양식장 휴지기와 관련된 기존 연구에서 휴지기 이후 양식장에서 유출되는 영양염의 양이 감소하여 인근 해역 퇴적물이 지화학적으로 회복되는 것을 보고하였다(Pereira et al., 2004). 본 연구해역에서도 양식장에 휴지기가 주어진 FF에서 휴지기 직후 유기물 오염 변수가 일시적으로 급감하는 양상을 나타내었다. 그러나 이후 일부 항목이 다시 증가하는 경향을 보였다. Moore and Rodger(1991)는 양식장 중단이후 표층 퇴적물은 회복되는 경향을 보이지만 표층하퇴적물은 장기간 오염된 상태가 지속됨을 확인하였으며, 추가적인 영향이 주어졌을 때 오염되지 않은 퇴적물에 비해 더 큰 교란 반응이 나타날 수 있음을 보고하였다. 본 연구해역에서 여름철 발생한 빈산소수괴(Sim et al., 2020)가 저층에 집적된 유기물의 영향과 더해져 유기물 오염의 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 양식장 정점인 NF와 CF에서는 유기물 오염 항목이 조사 시기에 따라 변화폭이 컸으며, 특히 AVS의 변화가 컸다(Fig. 2c). AVS는 양식장이 설치된 직후 크게 증가하였고 약 2개월 이후부터 감소하는 경향을 보였으나, 12개월 이후에는 매 조사시기마다 큰 폭으로 변화하였다. Hargrave et

통영연안의 패류양식장 중단 이후 다모류 군집구조의 변화

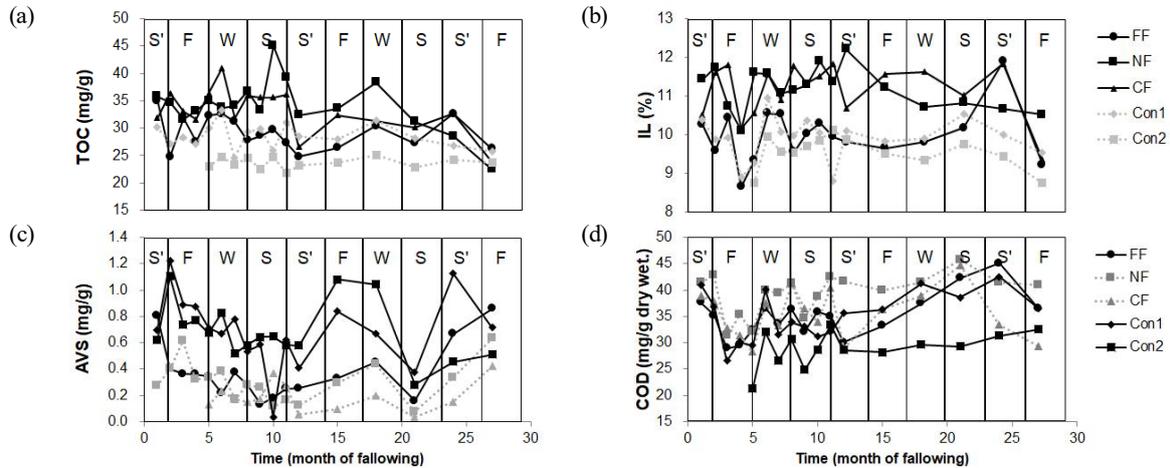


Fig. 2. Comparison of changes in environmental characteristics of surface sediment after shellfish farm relocation. (a) TOC, (b) IL, (c) AVS, (d) COD (S: Spring, S': summer, F: Fall, W: winter).

al.(1993)의 연구에서는 양식장에서 유기물의 영향을 감지하기 위한 화학변수들은 조사하였고, 화학 변수 중에 총황화물, 저층산소와 이산화탄소의 교환, 그리고 산화환원전위가 유기물의 영향을 민감하게 감지하는 것으로 나타났다. 본 연구 정점인 NF의 경우에도 양식장 설치 직후의 유기물 증가의 영향을 AVS가 비교적 잘 나타내고 있었다(Sim et al., 2020).

연구해역에서 측정된 유기물 오염 변수를 기준에 연구된 양식장의 값과 비교하였다. 비양식장 정점인 FF, Con1, Con2의 TOC(21.9~35.0 mg/g)는 여수 가막만의 수하식 패류 양식장의 대조정점(6.0 mg/g) 보다 상당히 높았으며, 고성, 자란만 패류양식장 인근의 대조정점(17.8~18.4 mg/g) 보다도 높았다(Park et al., 2017). 양식장 정점인 NF, CF의 TOC(26.6~45.0 mg/g) 또한 가막만 패류 양식장(6.7~10.55 mg/g)과 고성, 자란만 양식장(16.95~25.05 mg/g)보다 높았다(Park et al., 2017). AVS는 양식장의 유무와 관련 없이 연구지역에서 산출된 농도(0.05~1.22 mg/g)가 가막만이나 고성, 자란만의 AVS 농도(0.00~

0.78 mg/g)보다 높았다. 기존 조사된 값과 연구지역의 값을 비교해 보았을 때, 연구해역의 퇴적환경은 대조정점까지 전반적으로 상당히 오염된 상태였다.

조사 해역의 5개 정점에서 분석된 퇴적물 특성은 양식장 정점과 비양식장 정점으로 구분되어 양식활동의 영향을 확인하였다. 다만, 양식장정점과 비양식장의 정점은 변화의 폭은 다르지만 증가와 감소하는 시기가 유사하였다. 이것은 조사정점이 위치한 진해만 해역의 특성, 즉 여름철 발생하는 빈산소층과, 장기간에 걸친 양식장운영과 높은 양식장 밀집도, 낮은 수심 그리고 여러 섬들로 단한 지형적 구조등이 조사해역의 저층 퇴적환경의 회복과 오염에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

3.2 저서다모류 군집의 생태지수

연구 지역에서 출현한 다모류의 월평균 종수는 FF는 3±1~19±2 종/0.05m<sup>2</sup>, NF는 1±1~22±3 종/0.05m<sup>2</sup>, CF는 2±2~22±5 종/0.05m<sup>2</sup>, Con1은 2±1~18±1 종/0.05m<sup>2</sup>, Con2는 7±1~26±3 종/0.05m<sup>2</sup>

Table 2. Environmental characteristics of surface sediment at each station

Variable		FF	NF	CF	Con1	Con2
TOC	Avg.	29.19	34.04	33.08	28.54	23.69
	Stdev.	3.03	4.74	4.04	2.26	0.94
IL	Avg.	9.99	11.18	11.16	9.91	9.45
	Stdev.	0.71	0.55	0.71	0.55	0.56
AVS	Avg.	0.38	0.68	0.69	0.31	0.19
	Stdev.	0.21	0.22	0.28	0.16	0.11
COD	Avg.	35.16	39.44	35.52	35.09	28.79
	Stdev.	4.23	3.88	4.63	4.64	3.28

범위였다(Fig. 3). 이원분산분석 결과, 다모류의 출현종수는 조사시기별, 정점별 평균값의 차이가 유의하였으며, 조사시기와 정점 간의 상호작용도 유의하였다( $p < 0.01$ ). 사후 다중비교 결과, 조사시기별 출현종수의 분포양상은 2016년 8월에서 10월 사이에 출현종수가 현저히 낮았고, 11월 이후 점차 증가하여 5월에 피크를 이루고 이후 다시 감소하는 양상이었으며, 계절변화를 보이며 증가와 감소를 반복하였다. 이러한 경향은 5개 정점 모두에서 공통적으로 관찰되었다. 출현종수의 정점별 분포 양상은 FF와 Con1이 가장 낮았고, NF와 CF 정점이 유사한 수준을 보였으며, Con2가 가장 높았다.

출현한 다모류의 월평균 개체밀도는 FF는  $356 \pm 168 \sim 3,220 \pm 1,074$  개체/ $m^2$ , NF는  $12 \pm 18 \sim 7,080 \pm 2,856$  개체/ $m^2$ , CF는  $76 \pm 83 \sim 5,340 \pm 2,031$  개체/ $m^2$ , Con1은  $240 \pm 173 \sim 3,956 \pm 893$  개체/ $m^2$ , Con2는  $1,544 \pm 200 \sim 4,652 \pm 741$  개체/ $m^2$ 였다(Fig. 4). 이원분산분석 결과, 다모류의 개체밀도 역시 조사시기별, 정점별 평균값의 차이가 유의하였으며, 조사시기와 정점 간의 상호작용도 유의하였다( $p < 0.01$ ). 전반적으로 여름철 동안 개체밀도가 급격히 감소하였고 늦가을부터 봄철까지 서식밀도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 개체밀도의 사후 다중 비교 결과, 조사시기별 개체밀도는 조사 직후인 2016년 7월부터 10월까지의 여름철 시기동안 가장 낮았고, 2017년과 2018년 여름철이 뒤를 이었으며, 2017년 1월~5월과 2018년 3월이 가장 높았다. 그 외의 집단군은 위의 3개의 그룹과 구분되었다. 개체밀도의 정점별 평균값의 집단군은 2개의 그룹을 이루었으며, FF와 Con1이 유사한 수준이었고, 나머지 세 개 정점이 유사한 수준이었다. 두 개의 집단군 중 평균값은 후자

였다(Fig. 3). 이원분산분석 결과, 다모류의 출현종수는 조사시기별, 정점별 평균값의 차이가 유의하였으며, 조사시기와 정점 간의 상호작용도 유의하였다( $p < 0.01$ ). 사후 다중비교 결과, 조사시기별 출현종수의 분포양상은 2016년 8월에서 10월 사이에 출현종수가 현저히 낮았고, 11월 이후 점차 증가하여 5월에 피크를 이루고 이후 다시 감소하는 양상이었으며, 계절변화를 보이며 증가와 감소를 반복하였다. 이러한 경향은 5개 정점 모두에서 공통적으로 관찰되었다. 출현종수의 정점별 분포 양상은 FF와 Con1이 가장 낮았고, NF와 CF 정점이 유사한 수준을 보였으며, Con2가 가장 높았다.

출현한 다모류의 월평균 개체밀도는 FF는  $356 \pm 168 \sim 3,220 \pm 1,074$  개체/ $m^2$ , NF는  $12 \pm 18 \sim 7,080 \pm 2,856$  개체/ $m^2$ , CF는  $76 \pm 83 \sim 5,340 \pm 2,031$  개체/ $m^2$ , Con1은  $240 \pm 173 \sim 3,956 \pm 893$  개체/ $m^2$ , Con2는  $1,544 \pm 200 \sim 4,652 \pm 741$  개체/ $m^2$ 였다(Fig. 4). 이원분산분석 결과, 다모류의 개체밀도 역시 조사시기별, 정점별 평균값의 차이가 유의하였으며, 조사시기와 정점 간의 상호작용도 유의하였다( $p < 0.01$ ). 전반적으로 여름철 동안 개체밀도가 급격히 감소하였고 늦가을부터 봄철까지 서식밀도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 개체밀도의 사후 다중 비교 결과, 조사시기별 개체밀도는 조사 직후인 2016년 7월부터 10월까지의 여름철 시기동안 가장 낮았고, 2017년과 2018년 여름철이 뒤를 이었으며, 2017년 1월~5월과 2018년 3월이 가장 높았다. 그 외의 집단군은 위의 3개의 그룹과 구분되었다. 개체밀도의 정점별 평균값의 집단군은 2개의 그룹을 이루었으며, FF와 Con1이 유사한 수준이었고, 나머지 세 개 정점이 유사한 수준이었다. 두 개의 집단군 중 평균값은 후자

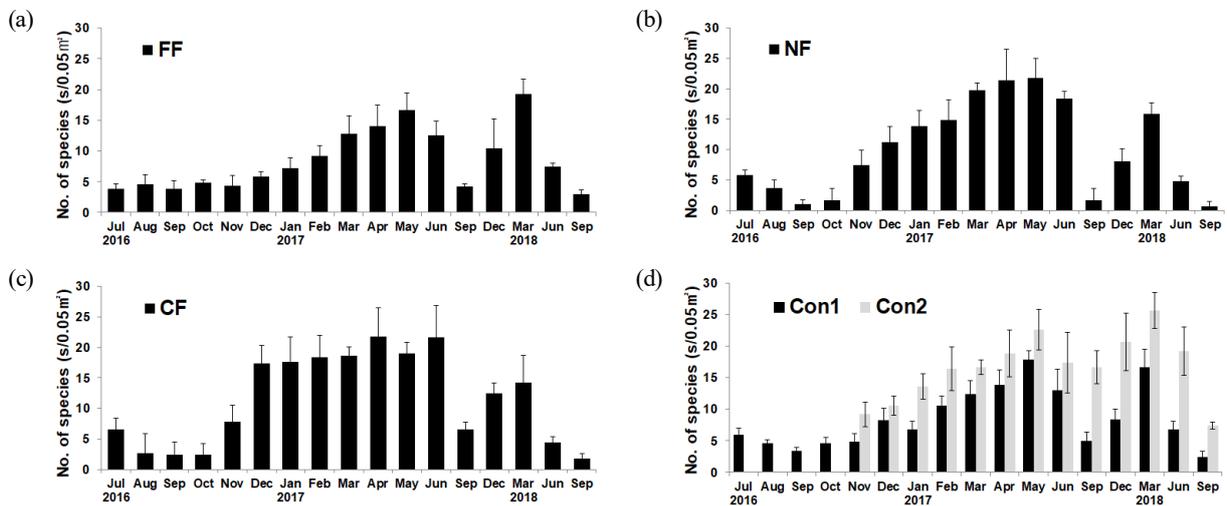


Fig. 3. Number of species in shellfish farm and reference stations. (a) FF, (b) NF, (c) CF, (d) Con1, Con2.

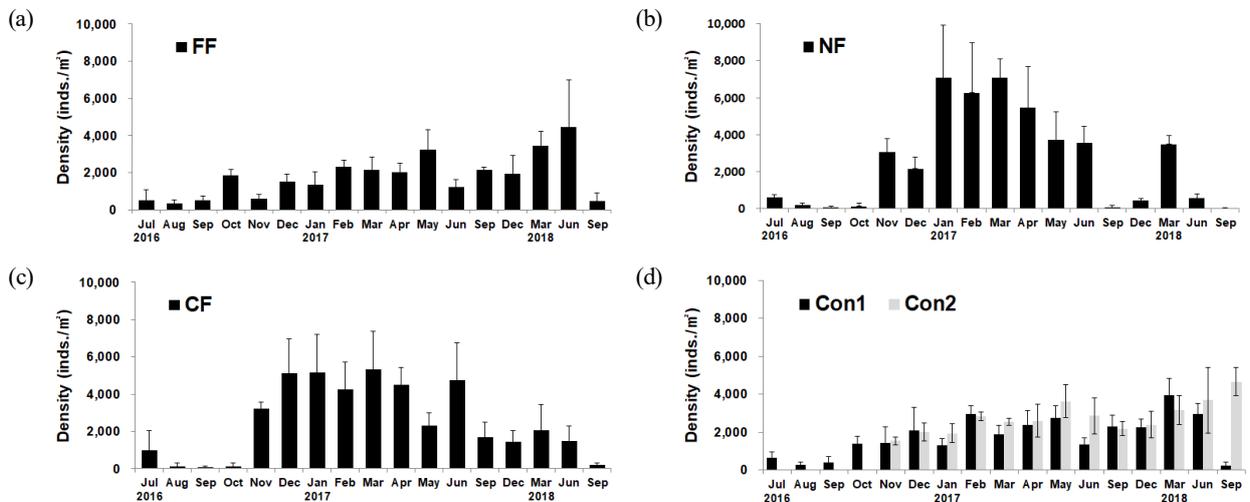


Fig. 4. Density in shellfish farm and reference stations. (a) FF, (b) NF, (c) CF, (d) Con1, Con2.

## 통영연안의 패류양식장 중단 이후 다모류 군집구조의 변화

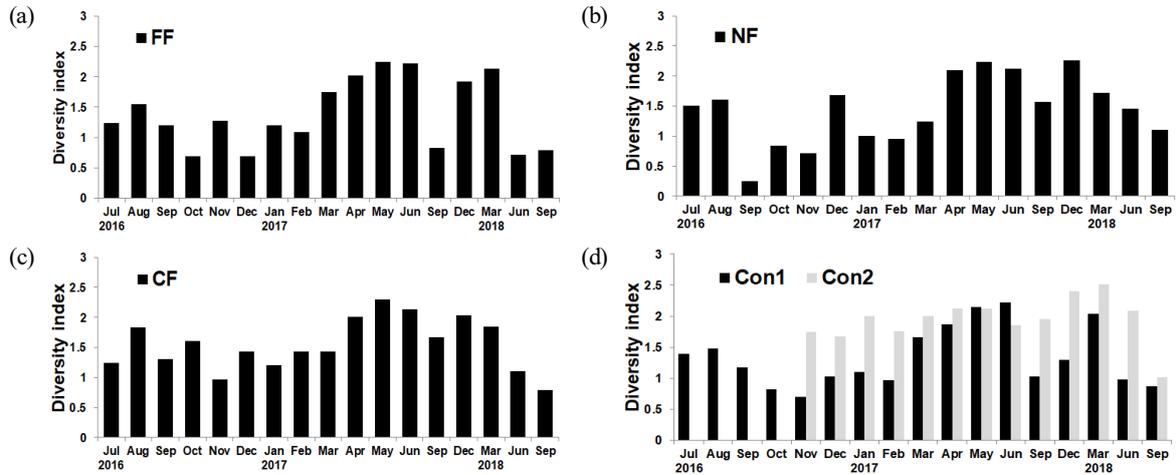


Fig. 5. Diversity index in shellfish farm and reference stations. (a) FF, (b) NF, (c) CF, (d) Con1 and Con2.

가 유의하게 높았다. 개체밀도의 시·공간 분포결과, 비양식장 정점이 시·공간상의 변동폭이 상대적으로 작았으며, 양식장 정점이 조사시기별 평균값의 차이가 크고, 각 시기별 정점의 반복채집표본 간에도 편차가 컸다. 또한, 양식장 정점에서는 2016년 8월부터 2016년 10월 사이에 일부 반복 채집표본 중 다모류가 전혀 채집되지 않는 경우가 있었다. 다만, 굴양식 시설물의 철거와 설치 이후 FF와 NF에서 시간에 따른 개체밀도의 변화는 Con1 또는 CF와 비교하였을 때 특이점이 관찰되지는 않았다. 각 정점에서 다양도는 늦여름부터 가을철까지 감소하고 겨울부터 봄까지 증가하는 계절변동을 보였다. 특이한 점은 NF에서 2016년 9월 가장 낮은 다양도로 양식 시설물 이동 설치 후 일시적으로 크게 낮은 다양도를 보였다(Fig. 5).

### 3.3 저서다모류 우점종의 변화

각 정점에서 개체밀도 상위 10순위 종을 대상으로 한 우점종 변화를 살펴보면, FF는 출현한 다모류 64종 중 상위 10개종이 전체밀도의 92.3%를 차지하였다(Fig. 6a). 1순위 우점종은 *Paraprionospio patiens*로 어장환경평가 시 등급 4에 해당하는 종이다. 유기물 부하가 높은 양식장의 대표 우점종으로, 특히 낮은 산소 농도에 내성이 강해 낮은 산소농도에서는 수층에 유생단계로 머물러 있다가 산소농도가 회복되면 퇴적물에 착저하여 빈산소 환경 직후 서식밀도가 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다(Powers et al., 2001). FF에서 여름철 서식밀도가 감소하였고 가을부터 겨울까지 높은 밀도로 출현하였다. 2순위 우점종은 어장환경평가 시 등급 3에 속하는 *Lumbrineris longifolia*로 니질이 우세한 혼합 퇴적상이나 빈산소수괴에서도 출현하는 잠재적 유기물 지시종이다(Lim and Hong, 1997; Jung et al., 2007). *P. patiens*의 우점도가 감소하는

여름철에 *L. longifolia*의 우점도가 증가하는 경향을 보였으며, 개체밀도의 증가는 2018년 이후 뚜렷하였다. 3순위 우점종은 어장환경평가 시 3등급에 해당하는 *Sigambra tentaculata*로 여름철에 낮고 봄철에 비교적 높았지만 다른 우점종들에 비해서는 비교적 연중 고른 밀도분포를 나타냈다. *S. tentaculata*는 유기물 오염과 직접적인 관련이 적은 종으로 알려져 왔으나, 일부 연구에서는 유기물 함량이 높은 해역에서 높은 개체 밀도로 출현한 바 있다(Lim, 1993; Jung, 1998; Jung et al., 2002). 4순위 우점종은 어장환경평가 시 4등급에 해당하는 *Prionospio pulchra*로 연중 낮은 밀도로 분포하였으나 2017년 5월에 일시적으로 밀도가 크게 증가하였다. 이들 중 이외에 *Aricidea assimilis*만이 연중 출현 빈도가 높았으며, 나머지 종들은 특정 계절에만 출현하였다. FF에서는 유기물 함량이 높은 해역에서 높은 개체밀도를 보이는 오염지표종 및 기회종들이 상위 우점종으로 출현하여, FF의 저층 오염도가 매우 심각한 상태임을 나타내었다.

NF에서는 총 77종이 출현하였으며, 상위 10개종이 전체 밀도의 91.5%를 차지하였다(Fig. 6b). NF의 1순위 우점종은 어장환경평가 시 4등급에 해당하는 *Capitella capitata*였으며, 2016년 11월부터 2017년 4월까지 집중적으로 출현하였고 여름철에는 서식밀도가 크게 감소하거나 출현하지 않았다. 그러나 양식장 설치 약 1년 이후인 2017년 가을과 겨울철에는 2016년에 비해 서식밀도가 크게 감소하였다. 이종은 Pearson and Rogenberg 모델에서 유기물이 급격히 증가하는 시기에 우점하는 종으로, 특히 오염이 매우 심한 해역이나 가두리 양식장 바로 아래에서 매우 높은 밀도로 출현하였다(Pearson and Rogenberg, 1978; Seo et al., 2015). 2순위 우점종은 *L. longifolia*로 양식장 설치 직후인 2016년 7월에 우점종으로 출현하였으나, 양식장 설치 1개월 이후부터 2017년 2월까지

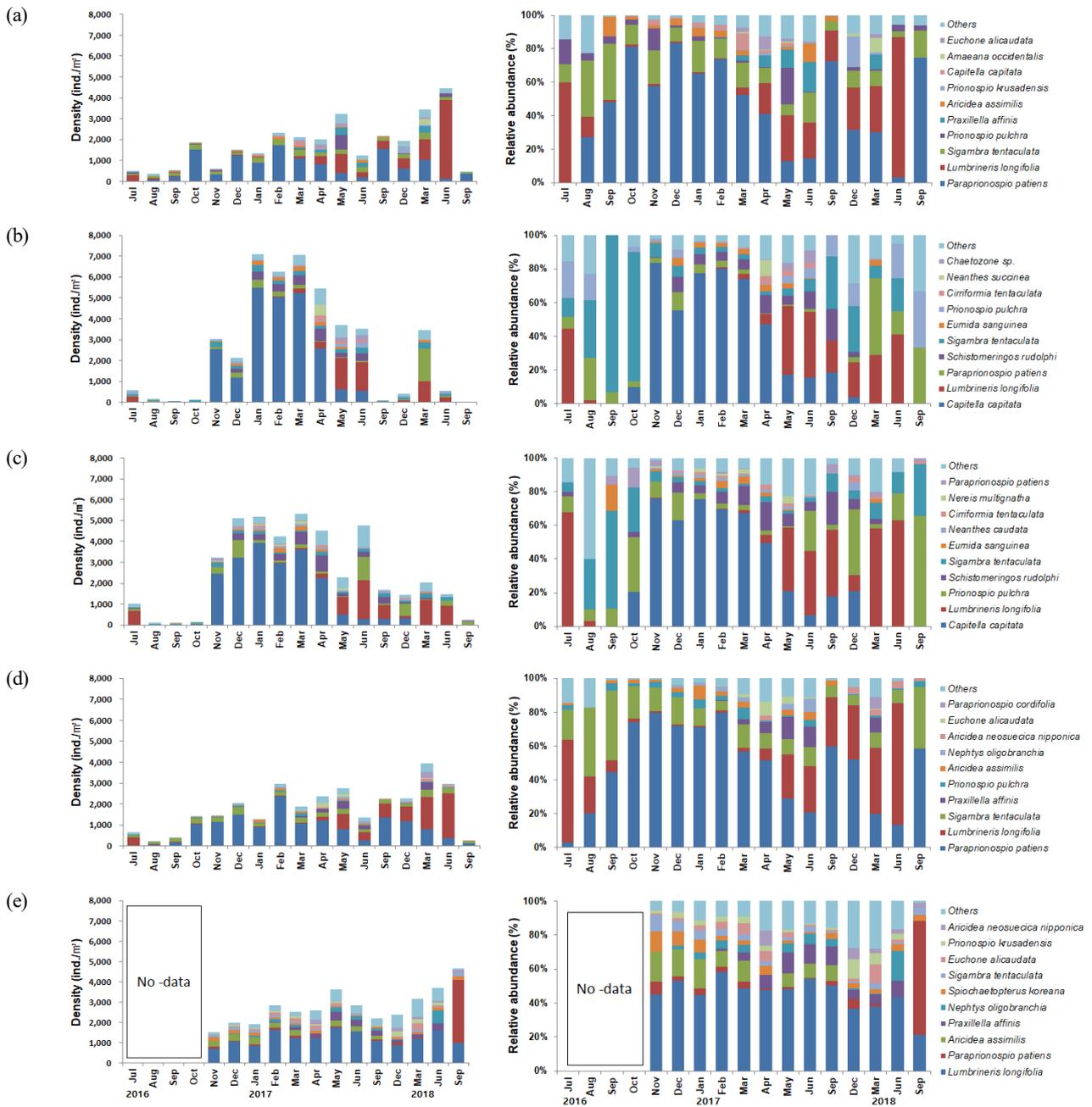


Fig. 6. Density and percentage of high-ranked macrofauna in shellfish farm and reference stations. (A) FF, (B) NF, (C) CF, (D) Con1, (E) Con2.

출현하지 않거나 매우 낮은 밀도로 출현하였고 이후 서식 밀도가 증가하였다. 3순위 우점종은 *P. patiens*로 NF에서 *L. longifolia*의 서식밀도가 감소한 시기에 증가하는 경향을 보였다. 4순위 우점종은 어장환경평가 시 4등급에 해당하는 *Schistomeringos rudolphi*로 2016년 12월 이후 밀도가 증가하여 2017년 4월에 가장 높은 밀도를 보였으며, 여름과 가을에는 출현하지 않거나 밀도가 매우 낮았으며, 2018년 조사에서는

출현하지 않았다.

CF에서는 총 84종이 출현하였으며, 상위 10개종이 전체 밀도의 89.1%를 차지하였다(Fig. 6c). CF의 상위 10순위 우점종의 조성과 종별 순위는 같은 양식장 정점인 NF와 유사하였다. 1순위 우점종은 *C. capitata*였으며, 2016년 11월부터 2017년 4월까지 높은 밀도로 출현하였고, 여름철과 가을철에는 출현하지 않거나 밀도가 매우 낮았다. 2순위 우점종은 *L.*

통영연안의 패류양식장 중단 이후 다모류 군집구조의 변화

*longifolia*로 2017년 6월에 가장 높은 개체밀도로 출현하였으며, 늦여름부터 겨울까지는 밀도가 매우 낮았다. 3순위 우점종은 어장환경평가 시 4등급에 해당하는 *P. pulchra*로 평균밀도는 2016, 2017년 12월과 2016년 6월에 밀도가 높았으며, 그 외의 시기에는 밀도가 낮았다. 4순위 우점종은 *S. rudolphi*로 2016년 12월부터 밀도가 증가하여 2017년 4월에 피크를 이룬 후 다시 감소하여 여름과 가을 사이에는 거의 출현하지 않았다.

Con1에서는 총 58종이 출현하였으며, 상위 10개종이 전체 밀도의 약 93.5%를 차지하였다(Fig. 6d). Con1의 상위 3개 우점종은 FF와 동일하였고 유사한 경향을 나타내었다. *P. patiens*가 최우점종으로 나타났으며, 여름철 밀도가 낮고 겨울철에 높은 밀도를 나타내었다. 2순위 우점종인 *L. longifolia*는 2017년 여름철 이후 증가하였으며, 3순위 우점종인 *S. tentaculata*는 FF와 유사하게 연중 밀도편차가 작았다. 4순위 우점종은 어장환경평가 시 2등급에 해당하는 *Praxillella affinis*로 봄철에 출현하였으며, 그 외 시기에는 출현하지 않았다. 그 외의 우점종들은 봄철에만 일시적으로 출현하는 양상을 보였다.

Con2에서는 총 77종이 출현하였으며, 상위 10개종이 전체 밀도의 86.3%를 차지하였다(Fig. 6e). Con2 정점의 1순위 우점종은 *L. longifolia*였으며, 총 개체수에 대한 점유율은 43.8%로 높은 밀도로 출현하였다. Con2에서는 비양식장 정점인 FF, Con1과 달리 *L. longifolia*가 연중 우점하였다. 2순위 우점종은 *P. patiens*로 조사 초반에는 개체밀도가 높지 않았으나 조사 후반 특히 2018년 9월 밀도가 급격히 증가하였다. 3순위 우점종은 *A. assimilis*로 조사 초기부터 2017년 9월까지 높은 밀

도로 연중 출현하였으나, 2017년 12월 이후에는 출현하지 않았다. 4순위 우점종은 *P. affinis*로 FF, Con1과 유사한 출현 패턴을 보였다. 그 외의 우점종은 밀도의 변화는 있으나 여름에 감소하고 겨울에 증가하기 시작하여 봄철 최대 개체밀도를 보이며 연중 출현하였다.

출현 우점종의 시공간 변화를 살펴보면, 비양식장 정점인 FF와 Con1의 우점종 변화가 유사하였고, 양식장 정점인 NF와 CF의 우점종 변화가 유사하였다. Con2를 제외하고 비양식장 정점과 양식장 정점 모두 어장환경평가 시 4등급에 해당하는 종이 최상위 우점종으로 출현하였는데, 비양식장 정점에서는 *P. patiens*가, 양식장 정점에서는 *C. capitata*가 우점하여 양식장 존재 유무에 따라 최상위 우점종의 차이가 있었다.

3.4 어장환경평가에 따른 어장 건강도 진단

어장환경평가 기법을 적용하여 연구지역의 저서생태계 건강도 평가를 실시하였다(Table 3). 양식장 정점인 NF와 CF에서 저서동물지수(BHI)는 전 조사시기에 50 이하의 값으로 3점 또는 4점의 값을 보였으며, 4점의 값을 보이는 경우가 더 많았다. TOC의 경우에는 두 정점 모두 대부분의 시기에 유기물 오염 4점에 해당하는 25.01 mg/g dry wt.를 상회하는 값을 보였다. 비양식장 정점 중 지리적으로 매우 인접한 FF와 Con1의 경우에도 저서동물지수는 전 시기동안 3점 또는 4점에 해당하는 값을 보였다. 두 정점의 TOC도 조사 시기 동안 거의 전 시기에 4점에 해당하는 값을 나타내었다. 패류양식장 밀집해역에서 다소 떨어진 Con2의 경우는 전 조사시기 동안 저서동물지수 및 총유기탄소량이 3점에 해당하는

Table 3. Benthic ecological quality using BHI and TOC

Station	Index	2016						2017						2018				
		Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Sep	Dec	Mar	Jun	Sep
FF	BHI	27	31	19	7	11	8	16	12	17	25	30	43	11	26	33	32	7
	TOC	35.00	24.80	31.75	27.50	32.25	32.65	31.20	27.75	28.65	29.75	27.35	24.75	26.40	30.40	27.25	32.60	26.20
	Level	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	3	3	3	4
NF	BHI	33	25	26	25	5	13	7	7	10	21	34	28	12	33	23	21	7
	TOC	35.75	34.70	31.60	33.15	35.00	33.75	34.05	36.75	33.25	45.00	39.20	32.35	33.55	38.35	31.15	24.15	23.75
	Level	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	4	3	4	3	3
CF	BHI	42	32	30	12	6	9	10	13	12	17	34	29	20	17	37	28	226
	TOC	31.85	36.35	33.10	31.60	36.35	41.00	31.85	35.95	35.65	35.65	36.10	26.60	32.40	31.25	30.15	28.55	22.50
	Level	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	2
Con1	BHI	37	33	19	9	8	12	13	10	16	22	35	37	16	18	38	29	14
	TOC	30.15	27.20	28.30	27.05	30.00	33.25	24.55	29.35	29.85	25.85	31.00	28.50	28.00	31.40	28.20	26.80	25.80
	Level	3	3	4	4	4	4	3	4	4	4	3	3	4	4	3	3	4
Con2	BHI	-	-	-	0	35	39	41	40	41	40	46	45	42	39	42	44	11
	TOC	-	-	-	24.40	22.95	24.65	23.30	24.55	22.55	24.65	21.90	23.25	23.65	25.10	22.80	32.70	23.75
	Level	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

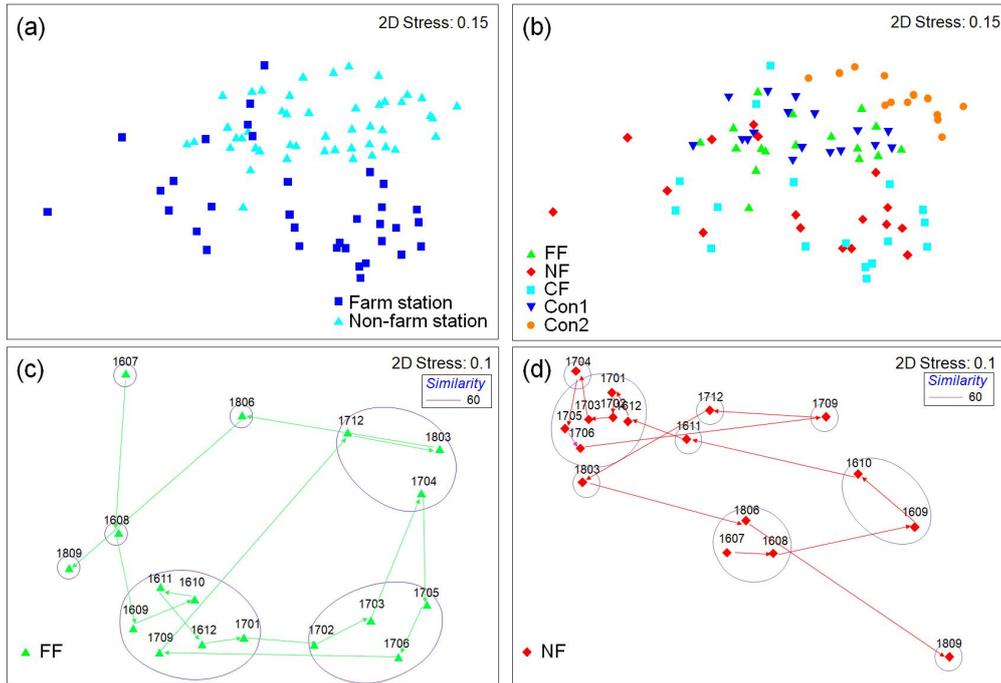


Fig. 7. The non-metric multidimensional scaling (MDS) plot of Bray-curtis similarity matrix based on  $\log(x+1)$  transformed abundance data. (a) presence of shellfish farms, (b) station, (c) temporary change of non-shellfish farm, FF (d) temporary change of shellfish farm, NF.

값을 보였다. 정점별로 어장환경평가가 최종등급을 살펴보면, 연중 3등급을 나타낸 Con2를 제외하면 모두 3등급과 4등급 사이를 오갔으며, 양식장의 유무를 떠나 가을에서 봄 사이에 4등급을 그리고 여름철에 3등급을 나타내었다. 조사기간 평균으로 보았을 때, Con2만 3등급, 나머지 정점들은 모두 4등급에 해당하였다.

### 3.5 저서다모류 군집의 다변량 분석

패류양식장 및 비패류양식장 정점들의 군집구조 비교를 위해 다차원척도법(MDS)을 적용하고 이를 이차원평면에 도식하였다(Fig. 7). 먼저, 양식장 정점과 비양식장 정점은 이차원평면의 중앙 수평축(가상)을 기준으로 위아래로 명확하게 구분되었다(Fig. 7a). 다만, 조사 초기인 2016년 6월부터 2016년 10월까지의 정점들은 넓게 산포하면서 서로 겹치는 부분이 있었지만 나머지 시기의 정점들은 양식장과 비양식장의 구분이 뚜렷하였다. 이러한 차이를 보다 세부적으로 알아보기 위해 정점별로 도식해보았다(Fig. 7b). 그 결과, 비양식장 정점인 FF와 Con1이 유사한 위치에 서로 겹쳐 혼재하는 양상이었으며, 마찬가지로 양식장 정점인 NF와 CF가 같은 양상을 보였다. 5개 정점 중 Con2만이 다른 정점들과 겹치지 않고 명확히 구분되는 양상을 보였다. one-way ANOSIM 분석을 통해 조사 정점 사이의 유의성을 검증한 결과 FF와 Con1,

NF와 CF가 유의한 차이를 나타내지 않았다(Table 4). FF와 Con1은 방향성과 시기별 정점의 위치 등이 매우 유사한 것으로 나타났다. 다만, 통계적으로 유의하지는 않으나 FF의 시기별 군집구조의 변화가 Con1에 비해 조금 더 컸다. 비양식장의 정점을 대표하여 FF 정점에서 시간에 따른 변화를 살펴보면 양식장이 철거된 조사 직후에 변화폭이 컸으며, 여름철은 조사시기마다 군집의 변화가 큰 것으로 나타났다(Fig. 7c). 양식장정점인 NF와 CF에서 시간에 따른 군집구조의 변화양상 역시 시기별로 두 정점의 위치가 유사하였다. 대표로 NF에서의 변화를 살펴보면 여름철 군집의 변화가 크고, 계절변화가 나타났다(Fig. 7d). 전체적으로 양식장과 비양

Table 4. Result of one-way ANOSIM among the 5 stations. one-way ANOSIM is performed of Bray-curtis similarity matrix based on  $\log(x+1)$  transformed abundance database

	FF	NF	CF	Con1	Con2
FF					
NF	0.202				
CF	0.319	-0.019			
Con1	-0.053	0.276	0.414		
Con2	0.469	0.496	0.590	0.530	

식장 모두 겨울에서 초봄까지는 변화의 폭이 작은 반면, 여름과 가을 사이에 변화의 폭이 컸다는 공통점이 있었으며, 이러한 현상은 양식장에서 더 명확하게 관찰되었다.

양식장 및 비양식장 정점의 군집구조 형성에 영향을 미친 환경요인에 대해 알아보기 위해 PCO(Principal coordinates analysis) 분석을 적용하였다(Fig. 8). PCO분석에 사용된 환경자료는 TOC, IL, AVS, COD 이외에 TN을 추가하였다. 1축과 2축의 설명력은 각각 31.83%, 18.51%로 높은 편이었으며, 10개축의 설명력이 90%를 넘어 전반적으로 군집의 구조적 특성은 단순한 것으로 나타났다. 현장 조사를 통해 측정된 5개의 유기물 오염 관련 항목들은 양식장에서 더 유의한 요인으로 나타났으며, 이 중에서 가장 큰 영향을 미치는 변수는 산화발생황화물(AVS)이었다. AVS는 빈산소 환경에서 높은 농도를 보이는 혐기성 분해 산물로서(Sim et al., 2020), 패류양식장 저서동물 군집구조의 편차가 큰 시기(여름부터 가을)에 높은 값을 보였다.

### 3.6 저서동물 분석을 통한 휴식기간에 따른 양식장 환경의 회복성 진단

본 조사에 포함된 패류양식장 및 비패류양식장 정점들은 전반적으로 적은 출현종수, 단순한 종조성, 일부 종에 의한 극우점 등을 특징으로 하는 비교적 단순한 군집구조를 보였다. 또한 어장환경평가의 결과에서 알 수 있듯이 유기물 오염이 상당히 또는 심각하게 진행되어 있는 상태에서 형성되고 유지되는 군집으로 판단되었다. 어장환경평가 등급은 전반적으로 차이가 없었지만 양식장의 유기물 함량이 조금 더 높았으며, 이러한 차이가 종조성에 반영되고 있었다. 즉 양식장의 최우점종은 *C. capitata*였고, 비양식장의 최우점종은 *P. patiens*이었다. 각각의 서식처에서 5순위 이내에서는 유사한 종조성을 보이지만 그 이하의 순위부터는 종조성에서 차이를 보였고, 여름부터 가을까지 저서동물군집이 극히 빈약해지는 특성은 동일하였다. 그러나 연중 변화의 폭은 패류양식장에서 더 크게 나타났다. 양식시설의 철거와 설치에 따른 저서동물군집의 변화는 군집구조의 계절적 변화 폭이 전반적으로 크게 나타나는 해역이었기 때문에 뚜렷하게 가려낼 수 없었다. 다만, 다변량분석의 기초가 되는 유사도지수를 살펴보면, FF에서 시설물이 철거된 2016년 7월에 Con1과의 유사도가 48% 수준으로 낮은 편이었지만 한 달 정도 지난 2016년 8월에는 Con1과의 유사도가 85% 수준으로 급상승하고 이후 유사한 수준을 유지하여 시설물이 철거된 후 군집의 구조가 빠르게 변화하였음을 알 수 있었다. 반면, NF와 CF를 동일한 기준으로 비교했을 때, 새롭게 양식 시설물이 설치된 NF에서는 CF와의 유사도가 설치 시점을 기준으로 급격하게 낮아지거나 높아지는 변화를 관찰할 수 없었다.

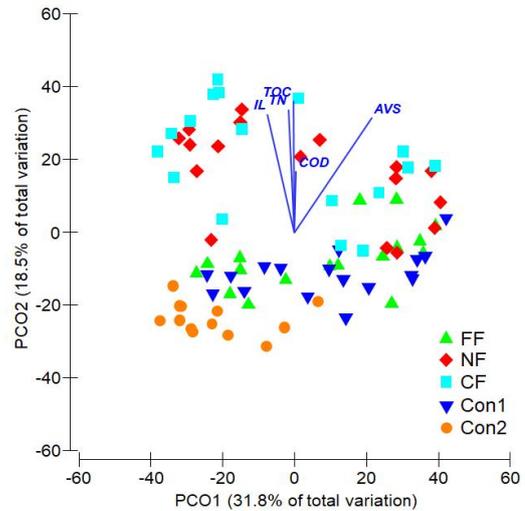


Fig. 8. Principal coordinates analysis (PCO) biplot between macrofauna community and environmental characteristics.

양식장 시설물의 철거 후 환경의 회복이라는 측면에서 봤을 때 본 해역의 문제점 중의 하나는 FF의 군집구조가 Con1에 빠르게 근접하기는 하였지만 본 조사지역 자체가 해류의 순환이 원활하지 않은 양식장 밀집 해역으로 해역 전반이 유기물 오염에 상시 노출되어 있는 상태였기 때문에 시설물을 철거하였다 하더라도 Con1의 상태 이상으로는 호전될 수 없었다는 점이다. 따라서 시설물의 철거 후 FF가 Con1 정점의 상태로 급격히 진행은 되었지만 회복을 관찰할 수 있는 시기는 조사 초기 한 달 정도의 시간이었다.

본 연구에서는 양식장 휴지기 이후의 저층 퇴적환경 변화와 회복의 정도를 시간의 변화에 따라 알아보고자 하였다. 연구해역인 진해만은 유기물이 과다하게 집적되어 있고 지역 특성상 여름철 빈산소수괴가 발생하여 휴지기 이후 회복이라는 측면을 논의하기에는 부족하였다. 추후 다른 양식환경이나, 다양한 품종의 양식장의 비교 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문의 완성도를 높이기 위해 세심하게 검토해 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다. 이 논문은 2021년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2021057)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

[1] Agudo-Gimenez, F., M. A. Piedecausa, J. M. Gutierrez, J. A. Garcia-Charton, A. Belmonte, and B. Garcia-Garcia(2012),

- Benthic recovery after fish farming cessation: a “beyond BACP” approach, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 64, pp. 729-738.
- [2] Beveridge, M. C. M.(1987), *Cage aquaculture*, Fishing News Books.
- [3] Black, K. D., P. K. Hansen, and M. Holmer(2008), *Salmon aquaculture dialogue*, Working group report on benthic impacts and farm siting, pp. 1-54.
- [4] Brooks, K. M., A. R. Stierns, and D. Backman(2004), Seven year remediation study at the Carrie Bay Atlantic salmon (*Salmo salar*) farm in the Broughton Archipelago, British Columbia, Canada. *Aquaculture*, Vol. 239(1-4), pp. 81-123.
- [5] Carroll, M. L., S. Cochrane, R. Fieler, R. Velvin, and P. White(2003), Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture*, Vol. 226(1-4), pp. 165-180.
- [6] 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.
- [7] Crawford, C. M., C. K. A. Macleod, and I. M. Mitchell(2003), Effects of shellfish farming on the benthic environment, *Aquaculture*, vol. 224(1-4), pp. 117-140.
- [8] Gowen, R. J. and N. B. Bradbury(1987), The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review. *Oceanography Marine Biology Annual Review*, Vol. 25, pp. 563-533.
- [9] Gowen, R. J., I. Ezzi, H. Rosenthal, and T. Makinen(1990), *Environmental impact of aquaculture activities*, European Aquaculture Society Special Publication (Belgium).
- [10] Gower, J. C.(1966), Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis, *Biometrika*, Vol. 53(3-4), pp. 325-338.
- [11] Hall, P. O., L. G. Anderson, O. Holby, S. Kollberg, and M. O. Samuelsson(1990), Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm: I. Carbon. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 61, pp. 61-73.
- [12] Hargrave, B. T., D. E. Duplisea, E. Pfiffer, and D. J. Wildish (1993), Seasonal changes in benthic fluxes of dissolved oxygen and ammonium associated with cultured Atlantic salmon, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 96, pp. 249-257.
- [13] Jang, Y. L., H. J. Lee, H. B. Moon, W. C. Lee, H. C. Kim, and G. B. Kim(2015), Marine environmental characteristics in the coastal area surrounding Tongyeong cage-fish farms, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 18(2), pp. 74-80.
- [14] Johannessen, P. J., H. B. Botnen, and Ø. F. Tvedten(1994), *Macrobenthos: before, during and after a fish farm*. *Aquaculture Research*, Vol. 25, pp. 55-66.
- [15] Jung, R. H.(1998), Effects of the coastal zone development on the marine benthic ecosystem with special reference to the benthic polychaete community in Kwangyang Bay, Korea. Ph.D. Thesis pp. 1-306.
- [16] 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 grounds in the southern coast of Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 7, pp. 235-246.
- [17] Jung, R. H., S. P. Yoon, Y. J. Kim, W. C. Lee, S. J. Hong, S. E. Park, and H. T. Oh(2013), Effect of an offshore fish culture system on the benthic polychaete community, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 18(4), pp. 195-205.
- [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, S. J. Hong, and S. E. Park(2007), Impact of fish farming in macrobenthic polychaete communities, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 12(3), pp. 159-169.
- [19] Kang, Y. S., J. N. Kwon, J. K. Shon, S. k. Jeong, S. J. Hong, and J. Y. Kong(2003), Interrelation between water quality and community structure of phytoplankton around the season of red tide outbreak off the coast of Tongyeong Area, *Korean journal of fisheries and aquatic sciences*, Vol. 36(5), pp. 515-521.
- [20] Karakassis, I., E. Hatziyanni, M. Tsapakis, and W. Plaiti(1999), Benthic recovery following cessation of fish farming: a series of successes and catastrophes. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 184, pp. 205-218.
- [21] Keeley, N. B., C. K. Macleod, G. A. Hopkins, and B. M. Forrest(2014), Spatial and temporal dynamics in macrobenthos during recovery from salmon farm induced organic enrichment: When is recovery complete? *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 80(1-2), pp. 250-262.
- [22] KOSIS(Korean Statistical Information Service)(2015), <http://www.kostat.go.kr>.
- [23] Lim, H. S.(1993), Ecology on the macrozoobenthos in Chingae Bay of Korea. Ph.D. Thesis, pp. 1-311.

- [24] Lim, H. S. and J. S. Hong(1997), Ecology of the macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea, *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 30(2), pp. 175-187.
- [25] Macleod, C. K., N. A. Moltshaniwskyj, and C. M. Crawford(2006), Evaluation of short-term fallowing as a strategy for the management of recurring organic enrichment under salmon cages, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 52, pp. 1458-1466.
- [26] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries)(2013), Korean Standard Method of Examination for Marine Environment. Sejong-si, Korea. pp 1-516.
- [27] Moore, D. C. and G. K. Rodger(1991) Recovery of a sewage sludge dumping ground: II. Macrobenthic community, *Marine Ecology Progress Series*, pp. 301-308.
- [28] NFRDI(National Fisheries Research and Development Institute) (2012), Standard manual of pacific oyster hanging culture. NIFS report, Sejong-si, Korea, 205p.
- [29] NIFS(National Institute of Fisheries Science)(2020), <http://www.nifs.go.kr>.
- [30] Norkko, A., R. Rosenberg, S. F. Thrush, and R. B. Whitlatch (2006), Scale-and intensity-dependent disturbance determines the magnitude of opportunistic response, *Journal of Excremental Marine Biology and Ecology*, Vol. 330, pp. 195-207.
- [31] 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(1), pp. 21-34.
- [32] Pearson, T. H. and R. Rosenberg(1978), Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment, *Oceanography Marine Biology Annual Review*, Vol. 16, pp. 229-311.
- [33] 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(1-4), pp. 315-330.
- [34] Pohle, G., B. Frost, and R. Findlay(2001), Assessment of regional benthic impact of salmon mariculture within the Letang Inlet, Bay of Fundy. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 58(2), pp. 417-426.
- [35] Powers, S. P., D. E Harper, and N. N. Rabalais(2001), Effect of hypoxia/anoxia on the supply and settlement of benthic invertebrate larvae, *Costal hypoxia: consequences for living resources and ecosystems*, Vol. 58, pp. 185-210.
- [36] Ritz, D. A., M. E. Lewis, and M. A. Shen(1989), Response to organic enrichment of infaunal macrobenthic communities under salmonid seacages, *Marine Biology*, Vol. 103, pp. 211-214.
- [37] Seo, J. Y., H. S. Lim, and J. W. Choi(2015), Spatio-temporal distribution of macrobenthic communities in Jinhae bay, Korea, *Ocean and polar Research*, Vol. 37(4), pp. 295-315.
- [38] Sim, B. R., H. C. Kim, S. Kang, D. I. Lee, S. Hong, S. H. Lee, and Y. Kim(2020), Geochemical indicators for the recovery of sediment quality after the abandonment of oyster *Crassostrea gigas* farming in South Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic sciences*, Vol. 53(5), pp. 773-783.
- [39] Zhulay, I., K. Reiss, and H. Reiss(2015), Effects of aquaculture fallowing on the recovery of macrogauna communities, *Marine pollution bulletin*, Vol. 97(1-2), pp. 381-390.

---

Received : 2021. 07. 07.

Revised : 2021. 08. 03. (1st)

: 2021. 08. 24. (2nd)

Accepted : 2021. 08. 27.