

어류양식장 이전 후 저서다모류 군집 변화

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

*, ** 국립수산과학원 어장환경과 연구원, *** 국립수산과학원 자원환경과 연구사

**** 국립수산과학원 연구기획과 연구사, ***** 국립수산과학원 어장환경과 연구사

Changes in Benthic Polychaete Community after Fish Farm Relocation
in the South Coast 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, Korea

*** Senior Researcher, Fisheries Resources and Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Incheon, Korea

**** Senior Researcher, Research and Development Planning Division, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea

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

요약 : 본 연구에서는 어류가두리양식장 시설의 재배치 이후 기존 양식장 아래 퇴적물의 회복상태를 규명하고자 하였으며, 이를 위하여 양식장 아래 퇴적물과 저서다모류 군집 조사를 수행하였다. 양식장 철거 이전인 2017년 10월에 사전 조사를 수행하였으며, 양식장 철거 이후인 2017년 11월부터 2018년 10월까지는 매달, 이후 2020년 10월까지는 2~3달 간격으로 조사하였다. 조사 정점은 철거된 양식장 위치에 3개 정점(Farm1~3)과 양식시설물이 없는 주변 해역에 3개의 대조 정점(Con1~3)으로 선정하였다. 사전 조사에서 기존 양식장의 총유기탄소(평균 22.67 mg · g⁻¹ dry weight)는 대조 정점(평균 13.68 mg · g⁻¹ dry weight)보다 높았으나, 양식장 철거 이후 점차 감소하여 약 1년 이후에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(p<0.05). 저서다모류 군집은 여름철 기존 정점에서 무생물 군집이 출현하였으며, 무생물 시기 이후 오염지시종인 *Capitella capitata* 단일종이 극우점하는 낮은 다양도의 군집으로 천이하였다. 다음해 여름철 무생물 시기 이전까지 종다양도가 증가하고 오염지시종의 비율이 감소하여 저서다모류 군집이 회복되는 경향을 나타내었으며, 이러한 변화는 매년 반복되었다. 연구 지역은 양식장 아래의 지형학적인 특성으로 인하여 매년 무생물 군집이 출현하고 있으나, 조사가 진행될수록 무생물 발생 기간은 짧아지고, 군집이 회복되는 과정은 빠르게 진행되었다. 어류 양식장의 이전 후 기존 양식장 정점의 퇴적물은 생물학적인 회복이 여전히 진행 중이며, 추가적인 모니터링을 통해 회복의 경향을 연구할 필요가 있다.

핵심어 : 저서다모류 군집, 어류양식장 이전, 저층 퇴적물 회복, 유기물오염, 저서동물지수

Abstract : The purpose of this study is to investigate sediment recovery after the relocation of fish cage farms, by examining the changes in sediments and the benthic polychaete community. A preliminary survey was carried out in October 2017, before the relocation of the farms, and monthly surveys were conducted from November 2017 to October 2018 after the farms were moved. Subsequently, it was conducted every 2-3 months until October 2020. The survey was carried out at three stations (Farm1-3) at the location of the removed fish farms and at three control stations (Con1-3) without farms. The overall organic carbon content of the farm stations was higher than the control stations, but it gradually decreased after the farm was demolished, and there was no statistically significant difference about one year after the relocation of the farms (p<0.05). In the benthic polychaete community, abiotic community appeared at the farm stations in the summer, and consequently, the community transitioned to a low-diversity region with the predominant species *Capitella capitata*, which is an indicator of pollution. Until the abiotic period in the summer of the next year, the species diversity increased and the proportion of indicator species decreased, showing a tendency of recovering the benthic polychaete community, and these changes were repeated every year. In this study, the abiotic community appeared every year owing to the topographical characteristics, but as the survey progressed, the period of abiotic occurrence became shorter and the process of community recovery progressed expeditiously. Biological recovery of sediments after the relocation of the fish farms is still in progress, and it is imperative to study recovery trends through continuous monitoring.

Key Words : Benthic polychaete community, Fish farm relocation, Benthic recovery, Organic enrichment, Benthic health index

* First Author : jing5678@naver.com, 051-720-2551

† Corresponding Author : spyoon@korea.kr, 051-720-2551

1. 서론

어류가두리양식장에서 배출된 어류 배설물과 잉여 사료 등의 양식 부산물은 양식장 바로 아래 퇴적물에 높은 유기물 농축을 일으킨다(Black, 2001; Gowen and Bradbury, 1987; Hall et al., 1990; Macleod et al., 2006). 양식장 아래에 서식하는 대형저서동물군집은 환경에 민감성, 정착 습성, 약한 이동성으로 인해 유기물 농축의 영향을 직접 받으며(Pearson and Rosenberg, 1978), 생체량과 다양성의 감소, 기회종의 우점, 군집 구조의 변화 등의 결과를 나타낸다(Karakassis et al., 2000; Gao et al., 2005; Tomassetti et al., 2009).

양식 활동으로 인한 부정적인 영향을 줄이고 양식장 아래 퇴적물의 회복을 돕기 위하여 일정기간 동안 양식 활동을 중단하는 방법을 사용하며, 이것은 퇴적물의 점진적인 악화를 줄이고 장기간의 양식 활동을 가능하게 한다(Black et al., 2008; Beveridge, 1987; Pereira et al., 2004). 온대 해양의 주요 양식어종인 연어의 경우, 전적으로 가두리에서 양식하며 양식장 아래에 유기물을 대량 방출하였다(Beveridge, 1987; Pereira et al., 2004; Lee et al., 2006; Kutti et al., 2007; Huang et al., 2012). 이에 양식이 종료되면 일정 기간의 휴지기를 주는 양식 방법을 택하고 있다(Aguado-Gimenez et al., 2012; Black et al., 2008; Macleod et al., 2006). 국내 어류가두리양식장은 어장관리법 제11조의2에 따라 어업면허 또는 허가의 유효기간이 끝나기 1년 전까지 어장환경평가를 실시하며, 어장환경평가 결과는 어장관리법 시행규칙 제3조의3에 따라 환경개선 행정조치를 받는다. 어장환경평가 결과 3등급과 4등급의 어장은 면허 연장 시 면허의 유효기간이 감소하며, 어장환경 개선 및 어장시설물 위치 이동 지시를 받는다. 국내에서는 양식장 휴지와 관련된 법은 없으나, 어장 시설물 이동을 통해 양식장 바로 아래 퇴적물은 양식장에 휴지를 설정한 상태와 유사한 결과를 얻을 수 있다.

가두리양식장에서 휴지기 설정이나 양식시설물 제거 이후 시공간적인 변화에 대한 연구는 국외에서 많이 진행되어 왔으며(Liao et al., 2022; Macleod et al., 2006), 양식장 저층 환경이 회복되는 속도와 영향범위는 양식 품종, 양식장의 위치, 양식 주기, 양식장의 운영기간 및 강도, 퇴적물 특성 등에 영향을 받았다(Brooks et al., 2004; Macleod et al., 2006; Norkko et al., 2006; Zhulay et al., 2015). 양식장 휴지기 이후 회복은 생물학적인 회복 속도와 화학적인 회복 속도에 차이가 있었으며 생물학적인 회복속도가 상대적으로 오래 걸렸다. 그러나 일단 양식이 중단되면 퇴적물이 회복되는 것은 분명하였다(Brooks et al., 2004; Johannessen et al., 1994; Karakassis et al., 1999; Pereira et al., 2004; Pohle et al., 2001). 국내 가두리 양식장에서는 양식장 휴지와 관련된 연구가

부족하다. 패류양식장에서 휴지기동안 퇴적환경의 회복에 관한 연구가 수행된 바 있으나(Park et al., 2021; Sim et al., 2020) 패류양식장에 비해 교란이 더욱 심한 것으로 알려져 있는 어류양식장의 연구는 없었다.

본 연구에서는 양식장 이동 이후에 저서다모류 군집의 모니터링을 수행하였으며, 다모류 군집을 이용하여 어장환경 평가 등급을 산정하였다. 이를 통해 양식장 이동 이후 퇴적환경의 생물학적인 회복을 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 지역

본 연구지역은 경상남도 하동군 금남면 중평항 근처에 위치한 어류가두리양식장으로 2006년에 양식을 시작하였고, 2015년 국립수산과학원에서 수행하는 어장환경평가에서 3등급을 받은 후 어장환경 개선 및 시설물 위치 이동 지시의 행정조치를 받았다. 2017년 10월~11월 사이에 기존 양식장에서 약 150 m 이격된 위치로 모든 시설물을 이동하였다(Fig. 1). 양식장 철거로 휴지기가 주어진 기존 정점에 3개 정점(Farm1~3)을 선정하였으며, 새롭게 설치된 양식장과 가까운 정점을 Farm1, 중간 거리 정점을 Farm2, 먼 정점을 Farm3으로 하였다. Farm1과 양식장과의 거리는 약 80 m 정도였으며, Farm3과 양식장과는 약 150 m 이격되어 있다. 기존 정점들과의 비교를 위하여 양식시설물이 없는 3개 정점(Con1~3)을 대조 정점으로 선정하였다. 양식장 이동 이전인 2017년 10월 사전 조사로 첫 조사를 수행하였고, 이후 2018년 10월까지는 매달, 그 이후에는 2~3개월 간격으로 현장조사를 수행하였다.

2.2 퇴적물 유기물 분석 및 저서동물 분석

퇴적물 시료는 표면적 0.05 m²의 van Veen grab을 이용하여 정점 당 3회씩 반복 채집하였으며, 1회분은 표층퇴적물의 화학적 특성 분석용으로, 2회분은 저서다모류 군집 분석용으로 사용하였다. 퇴적물 특성과 관련하여 총유기탄소량(TOC), 총질소량(TN), 산화발성황화물(AVS), 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산화환원전위(ORP)를 측정하였으며, 각 변수들에 대한 분석은 해양환경공정시험기준(MOF, 2013)에 준하여 측정하였다. 퇴적물과 인접한 저층에서 CTD(SBE19, Seabird, USA)를 이용하여 수온(Temp), 염분(Sal)을 측정하였고, 다목적 수질측정기(YSI6000, YSI, USA)를 이용하여 용존산소(DO),수소이온농도(pH)를 측정하였다. 분석된 항목 중 TOC는 저서동물자료와 함께 저서생태계 건강도 평가기법에 적용하였고, TOC를 포함한 모든 측정 항목은 저서다모류 군집구조와의 상관성 분석에 활용하였다.

어류양식장 이전 후 저서다모류 군집 변화

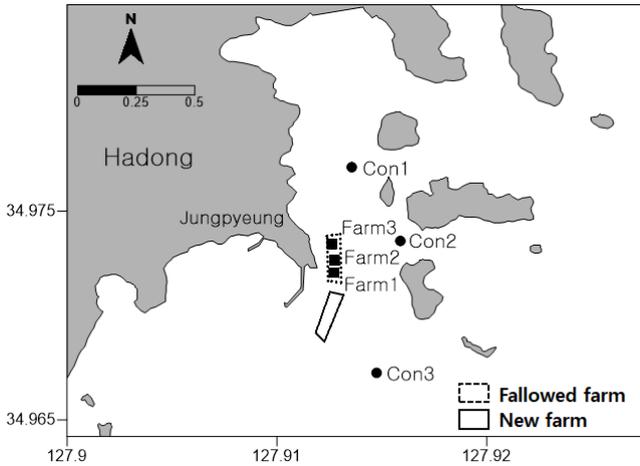


Fig. 1. Sampling stations in the relocated fish farms and control sites (■: fallowed stations, ●: control stations).

2.3 자료 분석

각 해역에서 분류와 종 동정 과정을 통해 얻어진 다모류 자료는 군집 특성을 파악하기 위하여 단변량 분석과 다변량 분석을 수행하였고, 저서생태계 건강도 등급을 산출하였다. 단변량 분석을 위한 생태지수로서 출현종수, 개체밀도, 그리고 다양도(Shannon and Weaver, 1963)를 활용하였다. 저서다모류 군집구조 파악을 위해 출현종의 현존량 자료를 로그 변환 후 Bray-Curtis 유사도 지수를 구하고, 유사도 행렬에 기초하여 시·공간 변화에 따른 저서동물군집의 구조적 차이를 살펴보았다. 환경변수와 저서다모류 군집구조와의 상관성을 알아보기 위해 주좌표분석(Principal Coordinates analysis, PCO)을 수행하였으며(Gower, 1966), 모든 통계 분석은 Primer 패키지(ver. 6)를 이용하였다.

저서생태계 건강도 평가는 국립수산과학원에서 개발한 저서동물지수(Benthic Health Index, BHI)와 총유기탄소량을 활용한 어장환경평가기법(국립수산과학원 고시 제 2020-15호)을 사용하였다. 저서동물지수의 계산식은 아래와 같다.

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

여기서, N은 각 그룹의 개체수를 나타내며, N1은 낮은 유기물 농도에서 높은 밀도로 출현하거나 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.

어장환경평가 등급의 점수화 과정은 Table 1과 같으며, 1등급은 유기물 오염이 없는 상태, 2등급은 유기물 오염의 초

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

Indices	Point			
	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

기 상태, 3등급은 유기물 오염이 상당히 진행된 상태, 4등급은 유기물 오염이 심각한 상태를 나타낸다. 어장환경평가와 관련된 구체적인 절차와 방법은 국립수산과학원 고시 제 2020-15의 방법에 준하였다(NIFS, 2020).

3. 결과 및 고찰

3.1 총유기탄소량 변화

조사 기간 동안 총유기탄소농도(TOC)는 10.80~28.28 mg·g⁻¹ dry weight였고, 정점별로 살펴보면 기존 정점은 16.18~28.28 mg·g⁻¹ dry weight, 대조 정점은 10.80~17.80 mg·g⁻¹ 범위였다(Fig. 2). 전체 조사 기간 동안 대조 정점은 총유기탄소량의 큰 변화가 없으나, 기존 정점은 양식장 철거 이후 0.7 mg/month(R²=0.54)로 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 양식장 철거 다음 해인 2018년 4월 조사에서 기존 정점의 총유기탄소농도가 일시적으로 증가하는 경향을 보였으나 다시 감소하였으며, 어장 철거 약 1년 이후에는 대조정점과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(p<0.05).

3.2 저서다모류 군집의 생태지수 변화

조사 기간 동안 기존 3개 정점에서 총 76 종, 월평균 8 종/0.1m²의 다모류가 출현하였고, 대조 3개 정점에서는 총 137 종, 월평균 24 종/0.1m²이 출현하여 기존과 대조 정점 간 차이를 보였다(Fig 3a). 기존 정점의 출현종수는 Farm1은 0~18 종/0.1m², 평균 6 종/0.1m², Farm2는 0~20 종/0.1m², 평균 6 종/0.1m², Farm3은 0~22 종/0.1m², 평균 11 종/0.1m²이 출현하여, 양식장과 떨어진 정점에서 출현종수가 많았다. 기존 정점에서 월평균 출현종수는 2018년 여름까지 증가하였으나, 여름부터 가을까지 급격히 감소하여 무생물 군집을 나타내었고, 이러한 양상은 2019년, 2020년에도 반복되었다(Fig. 3a). 대조 3개 정점의 출현종수는 Con1은 8~41 종/0.1m², 평균 23 종/0.1m², Con2는 4~36 종/0.1m², 평균 23 종/0.1m², Con3은 10~45 종/0.1m², 평균 25 종/0.1m² 이었으며, 월평균 출현 종수는 세부적인 증가와 감소의 차는 있지만 봄철에 증가하고 여름

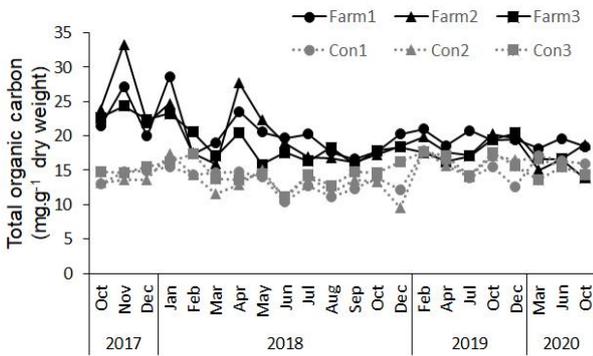


Fig. 2. Temporal and spatial changes of total organic carbon content.

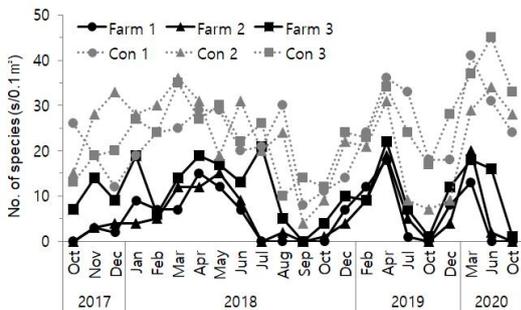
철 이후에 낮아지는 경향은 기존 정점들과 동일하였고 무생물 출현 시기는 없었다.

기존 정점에서 출현 다모류의 개체밀도는 Farm1은 0~8,450 개체/m², 평균 1,040 개체/m², Farm2는 0~8,350 개체/m², 평균 1,081 개체/m², Farm3은 0~2,740 개체/m², 평균 752 개체/m²로 출현종수와 달리 양식장에서 거리가 먼 정점인 Farm3에서 개체밀도가 낮았다(Fig. 3b). 개체 밀도의 시간에 따른 변화는 양식시설물과의 거리에 따라 차이를 보였는데, 양식 시설과 상대적으로 가까운 Farm1, Farm2에서는 2017년 10월

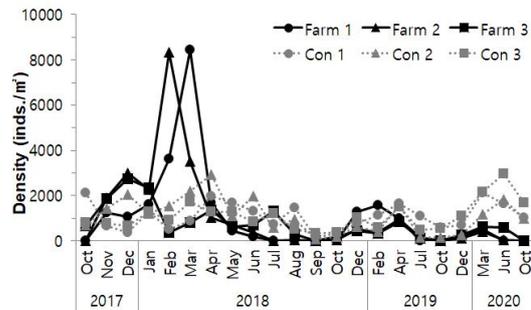
무생물 상태 이후 11월 개체밀도가 급격히 증가하여 대조정점 이상 밀도를 보였으며, 2018년 2월과 3월에는 약 3배 가까이 증가하였다. Farm3에서는 조사초기 개체수가 증가하였으나 Farm1, Farm2와 같은 폭발적인 증가는 없었다. Farm1, Farm2에서 개체밀도의 증가는 어장환경평가 시 4그룹에 속하는 *Capitella capitata* 단일 종에 의해 이루어 졌으며, 개체 밀도는 폭발적인 증가 이후 불과 한 달 만에 급격히 감소하였다. 이후 기존 정점의 개체밀도는 점진적으로 감소하였고, 무생물 상태가 나타났다. 2018년 여름철 무생물 시기의 발생과 유지 기간 역시 차이를 보여 Farm1은 7월부터 10월까지였으나 Farm3은 9월에만 무생물 상태였다. 기존 3개 정점에서 무생물 상태 이후에 나타난 개체밀도의 증가는 2017년과 다르게 완만하였으며, *C. capitata* 개체밀도의 증가는 Farm1에서만 나타났다. 대조 정점의 개체밀도는 3개 정점 간 차이가 적었으며, 공통적으로 봄철에 높고 여름철에 낮은 특성을 보였다.

기존 정점의 정점별 다양도는 양식장에서 멀리 떨어진 Farm3에서 가장 높았으며, Farm1 ≤ Farm2 < Farm3으로 차이를 보였다(Fig. 3c). 오염종이 급격히 증가한 시기와 무생물 발생 시기에 다양도가 낮았으며, 4월 전·후에 높았다. 대조 정점의 다양도는 가장 외해에 있는 Con3에서 다소 높았고, 봄철에 높고 여름철에 낮은 특성을 보였다.

(a) Number of species



(b) Density



(c) Diversity

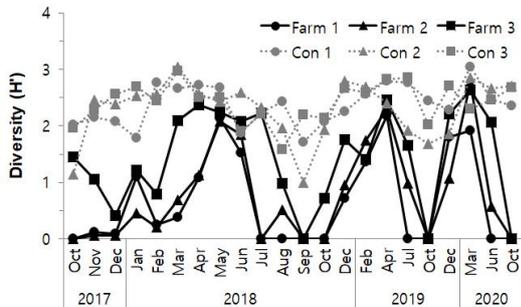


Fig. 3. Temporal and spatial changes in the ecological index of polychaete community (a)Number of species, (b)Density, (c) Diversity.

어류양식장 이전 후 저서다모류 군집 변화

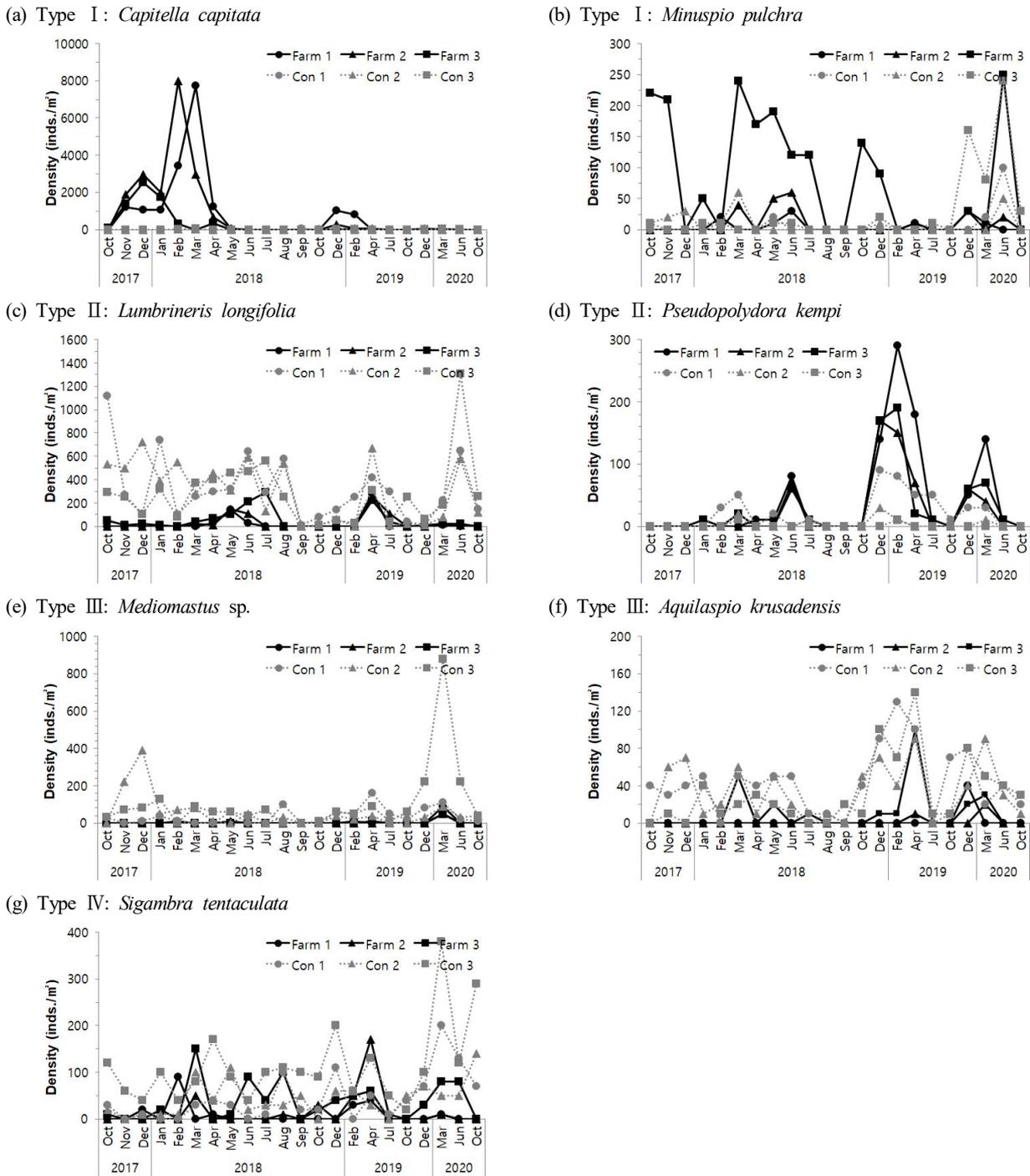


Fig. 4. Temporal and spatial changes by types of dominant species (a: *Capitella capitata*, b: *Eteone longa*, c: *Lumbrineris longifolia*, d: *Pseudopolydora kempii*, e: *Mediomastus* sp., f: *Aquilaspio krusadensis*, g: *Sigambra tentaculata*).

3.3 저서다모류 우점종의 변화

기준과 대조 정점에서 출현한 다모류의 우점종을 조사하고 이들 종의 시-공간 분포 특성을 살펴본 결과 크게 4개 유형(Type1~IV)로 구분되었다. 먼저 Type I은 양식장 철거 직후

인 조사 초기에 밀도가 급격히 증가하고 조사후기에 밀도가 감소한 유형으로 *C. capitata*, *Minuspio pulchra* 가 해당하였다 (Fig. 4a, 4b). *C. capitata*는 어장환경평가 시 4그룹에 속하는 종으로 극심한 오염역이나 가두리 양식장 바로 아래에서 고

밀도로 출현하는 기회종이다(Pearson and Rogenberg 1978; Seo et al., 2015). 조사 초기에 양식장과 가까운 정점인 Farm1, Farm2에서 밀도가 급증하였는데, 2017년 10월 무생물 군집 이후인 2017년 11월부터 출현하기 시작하여 2020년 4월까지 680~7,980 개체/m², 평균 2,859 개체/m²의 높은 밀도를 나타내었다. 무생물 시기 이후 2020년 12월에 재가입하여 우점하였으나 조사 초기보다 개체밀도가 낮았다. 양식장 철거 약 2년이 경과한 2020년에는 대조 정점과 유사한 개체밀도로 출현하였다. 어장환경평가 시 4그룹 중인 *M. pulchra*는 기존 정점들 중에서 Farm3에서 우점 하였으며, 시간이 경과하면서 무생물 상태 이후의 개체밀도 증가는 점차 감소하였다.

Type II는 양식장 철거 이후 개체밀도가 증가하는 유형으로 *Lumbrineris longifolia*와 *Pseudopolydora kempii*가 해당하였다. *L. longifolia*는 우리나라 연안의 유기물이 풍부한 해역에서 우점적으로 출현하는 지표종이다(Lim and Hong 1997; Jung et al., 2007). 기존 정점에서는 평균 35 개체/m², 대조 정점에서는 평균 297 개체/m²가 출현하여 대조 정점에서 높은 개체밀도를 나타내었으나, 대조 정점에서는 시·공간 분포의 뚜렷한 경향 없이 연중 출현하였고, 기존 정점에서는 양식장 철거 직후 보다 양식장 휴지가 진행 중인 조사 후기, 봄철에 개체밀도가 증가하였다. *C. capitata*의 분포와 유사하게 양식장에서 떨어진 거리에 따라 개체밀도의 차이가 있었으나, 양식장에서 먼 Farm3에서 개체밀도가 높았다(Fig. 4c). *P. kempii*는 어장환경평가 시 그룹 1에 속하는 종으로, 주로 건강해역에 출현한다. 대조와 기존 정점에서 시간에 따른 경향은 큰 차이가 없었으며, 밀도의 증가 정도는 기존 정점이 더 뚜렷하였다(Fig. 4d).

Type III에 해당하는 종은 대조 정점에서만 우점하여 출현하는 유형으로 *Mediomastus* sp.와 *Aquilaspio krusadensis*가 해당하였다(Fig. 4e, 4f). *Mediomastus* sp.는 어장환경평가 시 1그룹에 속하는 종으로 기존 정점들에서는 평균 3 개체/m²가 출현하였으나, 대조 정점에서는 평균 65 개체/m², 최대 880 개체/m²가 출현하였다. *A. krusadensis*는 그룹 3에 속하는 종으로 대조 정점에서 평균 36 개체/m², 최대 140 개체/m²의 밀도로 연중 출현하였다. 이들 중 이외에 *Notomastus latericeus*, *Praxillella affinis* 등과 같이 1, 2 그룹에 속하는 종들이 Type III에 해당하였다.

Type IV는 특정 시기나 정점에 선호도를 보이지 않는 유형으로, 환경에 대한 내성이 강한 종이 포함되었으며 3그룹에 속하는 *Sigambra tentaculata*가 이에 해당하였다. *S. tentaculata*는 Farm1과 Farm2에서는 봄철에만 출현하였으나 Farm3과 Con 정점에서는 연중 출현하였다(Fig. 4g)

기존정점에서 Type I과 Type II를 대표하는 두 종인 *C. capitata*와 *L. longifolia*의 시·공간적 분포 변화를 살펴보면, 양식장 철거 직후인 조사초기에 우점한 *C. capitata*의 개체밀도는 휴지 기간이 지속될수록 감소하고, 조사초기에 낮은 개체밀도로 출현한 *L. longifolia*가 증가하는 경향을 보여, 유기물이 극심히 오염된 상태에서 일반적인 유기물 오염상태로 점진적으로 변화해 가는 과정임을 나타내었다. 또한 이러한 현상이 이전된 양식장에서 멀수록 명확하였다.

3.4 어장환경평가 적용

어장환경평가에서 사용하는 다모류 4개 그룹을 양호한 그룹에서 서식하는 1, 2 그룹과 유기물 오염이 진행된 환경에서 서식하는 3, 4 그룹의 종으로 구분하고, 정점별로 시간에 따라 상대적인 밀도가 어떻게 변화하는지 살펴보았다(Fig. 5). 먼저 기존 정점에서 무생물 시기는 Farm1이 총 8회, Farm2가 총 5회, Farm3이 총 3회로 양식장과 가까운 정점일수록 많았다(Fig. 5a, 5c, 5e). Farm1, Farm2는 양식장 철거 이전인 2017년 10월 조사에서 무생물 군집이었으며, 다모류가 출현한 이후 11월부터 12월까지는 거의 3, 4그룹 종이 우세하다가 2018년 5월 이후에 1, 2 그룹종이 50%를 넘었다. 2018년 하계의 무생물 시기 이후에는 2019년 2월 조사에서 1, 2그룹이 50%를 넘었으며, 2019년에는 하계 무생물 시기 이후에는 2019년 12월에 50%를 넘었다(Fig. 5a, 5c). Farm3은 조사 초기에 기존의 두 정점보다 3, 4그룹의 우세가 상대적으로 낮았으며 무생물 발생 이후 유지되는 기간도 짧고, 1, 2그룹의 상대비도 상대적으로 우세하였다(Fig. 5e).

기존 정점들은 하계의 무생물시기, 3, 4 그룹에 우세한 시기, 1, 2그룹이 우세한 시기로 순환되는 양상을 보였다. 다만 시간이 경과함에 따라 1, 2그룹이 우세하는 시기와 1, 2그룹의 상대적인 비율은 점차 증가하였고, 양식장에 가까운 정점에서 변화폭이 상대적으로 컸다. 대조 정점은 여름철에 3, 4그룹의 비율이 상승하였으며, 그 외 시기에는 1, 2그룹의 비율이 우세하였다(Fig. 5b, 5d, 5f).

저서동물지수와 총유기탄소의 시·공간 변화를 살펴보고 어장환경평가 등급을 통해 저층 환경의 건강도 변화를 평가하였다. 먼저 대조 정점은 저서동물지수와 총유기탄소량이 일부시기를 제외하고 전 조사 기간 동안 2등급을 유지하였으며, 어장환경평가 등급도 2018년 12월 Con2의 1등급을 제외하면 전 조사 기간 동안 2등급으로 큰 변화가 없었다(Fig. 6, Table 2).

기존 정점은 시기별 정점별 변화가 뚜렷하였는데, 특히 저서동물지수는 여름철 발생한 무생물 시기가 지수에 반영되어 지수의 변화가 컸다(Fig. 6a). Farm1, Farm2 정점은 조사

어류양식장 이전 후 저서다모류 군집 변화

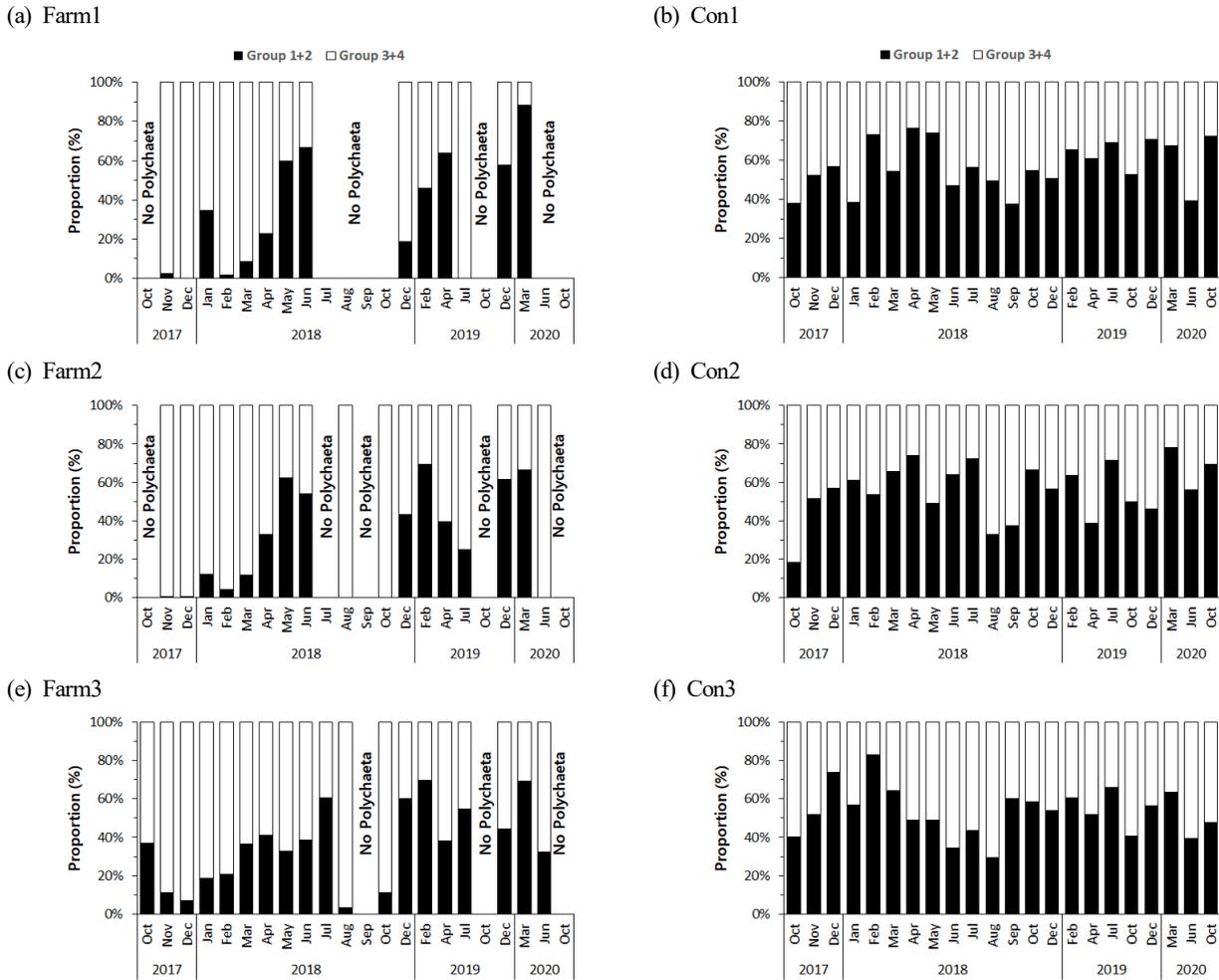


Fig. 5. Changes in relative density proportion according to the four polychaete groups used in the BHI index.

초기부터 2018년 4월까지 Farm3은 2월까지 저서동물지수가 4등급이었고, 4등급 내에서도 지수가 조금씩 상승하였다. 이후 기존 정점 모두 2등급까지 상승하였다가 무생물 시기가 되며 다시 4등급으로 하락하였다. 무생물 시기 이후 다시 저서동물지수가 상승하였는데, 이때는 조사 초기와 달리 급격

하게 상승하여 기존 3개 정점 모두 2등급까지 상승한 시기가 2019년 2월이었다. 저서동물지수와 총유기탄소량을 합산한 어장환경평가 등급은 Farm1과 Farm2는 2018년 4월까지 3~4등급을, Farm3은 3등급이었고, 2018년 5월부터는 기존 3개 정점 모두 2~3등급을 나타내었다.

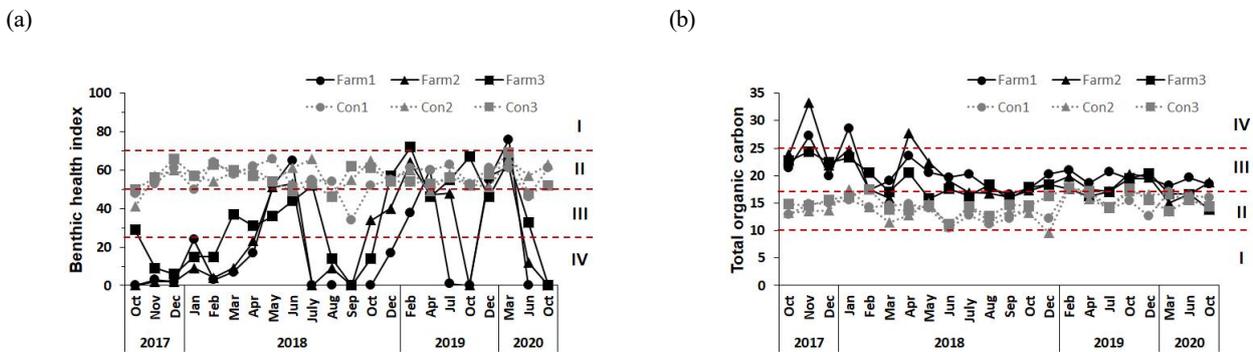


Fig. 6. Temporal and spatial changes (a)BHI and (b)TOC.

Table 2. Benthic ecological quality using BHI and TOC

Station Index	2017			2018										2019					2020			
	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Dec	Feb	Apr	Jul	Oct	Dec	Mar	Jun	Oct
BHI	0	3	2	24	3	7	17	52	65	0	0	0	0	17	38	60	1	0	55	76	0	0
Farm1 TOC	21.45	27.20	20.00	28.65	17.40	19.05	23.55	20.55	19.70	20.25	17.65	16.60	17.75	20.25	21.00	18.60	20.75	19.4	19.5	18.15	19.65	18.45
Level	3	4	3	4	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	2	3	3
BHI	0	2	2	9	4	9	23	51	53	0	9	0	34	40	64	47	48	0	57	62	12	0
Farm2 TOC	22.85	33.30	21.85	24.70	17.50	15.90	27.70	22.30	19.00	16.95	16.75	16.15	17.30	18.45	19.85	17.6	17.15	20.25	19.7	15.05	16.65	18.75
Level	3	4	3	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	2	3	3	3	2	2	3	3
BHI	29	9	6	15	15	37	31	36	44	52	14	0	14	57	72	46	55	0	46	65	33	0
Farm3 TOC	22.70	24.35	22.40	23.25	20.60	17.05	20.50	15.85	17.55	16.35	18.30	15.80	17.85	18.40	17.60	16.25	17.05	19.45	20.45	16.65	16.6	13.85
Level	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	3
BHI	48	53	61	50	64	58	62	66	52	55	54	34	52	55	61	60	63	53	61	61	46	61
Con1 TOC	13.00	14.80	14.95	15.55	14.30	14.60	14.80	14.10	10.45	12.75	11.15	12.25	13.95	12.15	17.90	16.55	13.95	15.45	12.6	17.05	16.45	16
Level	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
BHI	41	57	60	57	54	59	61	54	61	66	47	55	65	55	60	49	58	53	51	66	57	63
Con2 TOC	13.25	13.55	13.65	17.40	14.30	11.55	12.85	15.00	10.80	14.25	11.75	13.55	13.30	9.55	17.80	15.65	14.10	17.15	16.55	16.6	15.5	14.45
Level	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
BHI	50	56	66	57	63	60	57	54	49	53	46	62	61	54	54	53	56	52	58	69	48	52
Con3 TOC	14.80	14.60	15.50	16.25	17.45	13.80	13.65	14.50	11.15	14.35	12.70	14.75	14.60	16.30	17.70	17.15	14.20	17.6	15.6	13.55	15.5	14.35
Level	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

3.5 저서다모류 군집구조의 시·공간 변화

연구 지역의 6개 정점, 22회 조사에서 수집한 132개의 케이스를 대상으로 주좌표분석(Principal coordinates analysis)을 수행하여 유사 특성에 따라 소수 그룹으로 구분하고, 각 그룹이 생물적, 화학적 요인과 어떠한 상관성을 갖는지 알아보았다(Fig. 7). 먼저, 이차원 평면상에서 대조 정점의 케이스들은 거의 모여 있었으나 기존 정점의 케이스들은 평면상에 산포하여 분포하였다. 이들을 유사 특성에 따라 분류해보면, Control Group, Group I, II, III으로 구분되었다.

Control Group은 2차원 평면상에서 유기물 오염과 관련된 환경 변수와는 역방향, 어장환경평가 시 1~3그룹에 속하는 종들과는 정방향의 관계를 보였다. 그러나 Control Group에서 *L. longifolia*과의 상관성이 상대적으로 컸다는 점에서 유기물 함량이 낮은 편은 아니었다. Group I은 유기물 관련 환경 변수에 정방향, 용존산소와 염분도에 역방향, 수온에 정방향의 관계를 보였으며, 2차원 평면상에서 가장 넓게 산포하여 교란 상태에 있음을 암시하였다. 높은 유기물함량과 낮은 용존산소량으로 인해 생물이 거의 출현하지 않은 하계와 추계

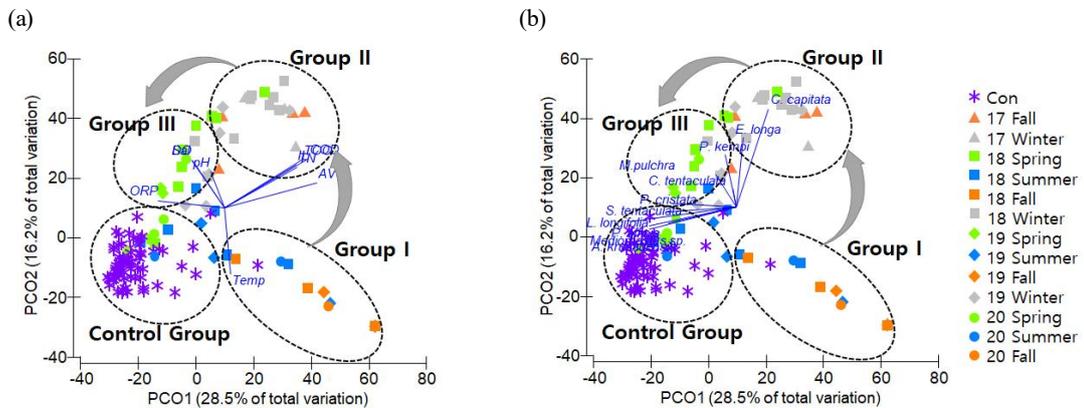


Fig. 7. Group classification by Principal coordinates analysis(PCO) biplot and correlation with environment and biological variables (a) chemical variable (b) dominant species.

의 기존 정점들이 포함되었다. Group II는 유기물 변수와 용존산소는 정방향, 수온은 역방향의 관계를 보여 심각하게 교란되었던 군집이 1차적으로 천이하는 단계였다. 기회주의적 특성이 강한 *C. capitata*가 강한 상관성을 보였으며, 늦가을부터 초봄의 조사시기가 해당하였다. Group III은 유기물 변수들과 수온은 역방향, 용존산소는 정방향에 위치하며 봄철이 해당하였다. 어장환경평가 시 그룹 1~3에 해당하는 종들과 높은 상관성을 보였으며, 무생물 시기 이후 나타난 기회종 우점의 1단계 군집 천이 이후의 다음 단계로의 천이 과정을 포함하였다. 기존 정점은 시간의 경과에 따라 Group I, Group II, Group III의 특성으로 변화하며 평면상에서 대조점과 가까운 거리로 이동하였으나, 다시 Group I로 돌아간 이후 매년 순환이 반복되었다. 다만, Group I은 조사가 진행될수록 중심과 멀리 떨어져 있던 케이스들이 2차원 평면상의 중심으로 이동하는 경향을 보였다.

3.6 저서동물 분석을 통한 양식장 환경의 회복성 진단

양식장 휴지는 퇴적물의 완전한 회복을 기대하는 것이 아니라, 지속가능한 양식장 이용을 보장하기 위한 것이다 (Pereira et al., 2004; Black et al., 2008). 퇴적물의 회복은 크게 화학적 회복과 생물학적 회복의 두 가지 유형을 포함하고 있으며 (Brooks et al., 2003, 2004), 여러 연구에서 생물학적 회복이 화학적 회복에 비해 더디게 진행된다고 보고하였다 (Pereira et al., 2004). 또한 어류양식장 유기물 방출에 영향을 받는 연질의 퇴적물에서는 생물학적 회복이 일어나려면 화학적 회복이 먼저 필요하다고 보고하였다 (Aguado-Gimenez et al., 2012; Brooks et al., 2004, 2003; Pearson and Rosenberg, 1978).

양식시설물 제거 이후 퇴적물 회복의 측면으로 모니터링한 결과, 총유기탄소는 양식장 제거 약 1년 이후에 대조점과 유사한 농도로 감소하여 화학적 회복은 어느 정도 나타난 것으로 판단된다. 그러나 저서동물 군집의 생태지수, 우점종, 건강도 평가 등을 바탕으로 한 생물학적 요인들은 회복과 교란이 반복되는 결과를 보여주고 있어, 생물학적 회복을 논의하기에는 부족한 상태이다.

본 연구가 진행된 하동 어류양식장의 저층 지형은 동서로 약 250 m, 남북으로 약 800 m의 골짜기가 형성되어 있으며, 기존의 양식장과 이전된 양식장 모두 이 골짜기 내에 위치하였다. 골짜기 내, 외측의 수심차이는 약 4~5 m로, 하계에 수온약층이 형성되면 저층은 빈산소층이 발생하고 퇴적층은 무생물 상태가 된다. 이러한 계절적 현상이 다변량 분석에서 보여주듯이 저서동물 군집의 회복과 악화의 반복에 영향을 준 것으로 판단된다 (Fig. 7b).

하동 양식장 조사결과에서 긍정적인 결과는 조사 후반기에는 무생물 발생 기간이 짧아지고, 회복되는 속도가 빨라

졌다는 점이다. 이러한 변화는 양식장에서부터 멀리 떨어져 있을수록 명확하였다. 따라서 연구지역은 회복에는 유리하지 않은 지역이나, 추가적으로 유기물이 공급되지 않는다면 회복이 지속적으로 진행될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 지속적인 모니터링으로 기존 정점의 회복상태를 확인할 필요가 있을 것으로 보인다.

사 사

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

References

- [1] Agudo-Gimenez, F., M. A. Piedecausa, J. M. Gutierrez, J. A. Garcia-Chariton, A. Belmonte, and B. Garcia-Garcia(2012), Benthic recovery after fish farming cessation: a “beyond BACI” 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] Black, K. D.(2001), *Environmental Impacts of Aquaculture*. Sheffield Academic Press Ltd., UK.
- [5] 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.
- [6] Brooks, K. M., A. R. Stierns, C. V. W. Mahnken, and D. B. Blackburn(2003), Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farms, *Aquaculture* Vol. 219, pp. 355-377.
- [7] Gao, Q. F., K. K. Cheung, S. G. Cheung, and P. K. S. Shin(2005), Effects of nutrient enrichment derived from fish farming activities on macroinvertebrate assemblages in a subtropical region of Hong Kong. *Mar. Pollut. Bull.* Vol. 51, pp. 994-1002.
- [8] Gowen, R. J. and N. B. Bradbury(1987), *The ecological*

- impact of salmonid farming in coastal waters: a review. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, Vol. 25, pp. 563-575.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Huang, Y. C. A., S. C. Huang, H. J. Hsieh, P. J. Meng, and C. A. Chen(2012), Changes in sedimentation, sediment characteristics, and benthic macrofaunal assemblages around marine cage culture under seasonal monsoon scales in a shallow-water bay in Taiwan, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 422, pp. 55-63.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 J. Mar. Sci.* Vol. 57, pp. 1462-1471.
- [16] Kutti, T., P. K. Hansen, A. Ervik, T. Hoisæter, and P. Johannessen(2007), Effects of organic effluents from a salmon farm on a fjord system. II. Temporal and spatia patterns in infauna community composition, *Aquaculture* Vol. 262, pp. 355-366.
- [17] Lee, H. W., J. H. Bailey-Brock, and M. M. McGurr(2006), Temporal changes in the polychaete infaunal community surrounding a Hawaiian mariculture operation, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 307, pp. 175-185.
- [18] Liao Y., Q. Liu, L. Shou, Y. Tang, Q. Liu, J. Zeng, Q. Chen and X. Yan(2022), The impact of suspended oyster farming on macrobenthic community in a eutrophic, semi-closed bay: Implications for recovery potential, *Aquaculture*, Vol. 548.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] NIFS(National Institute of Fisheries Science)(2020), [Http://www.nifs.go.kr](http://www.nifs.go.kr).
- [22] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries)(2013), Korean Standard Method of Examination for Marine Environment. Sejong-si, Korea, pp. 1-516.
- [23] 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.
- [24] Park, S., S. Kim, B. R. Sim, S. J. Park, H. C. Kim and, S. P. Yoon(2021), 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(5), pp. 605-617.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Shannon, C. E. and W. Weaver(1963), *The mathematical theory of communications*, University of Illinois Press, Urbana, pp. 1-125.
- [30] 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.

- [31] 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, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 58, pp. 533-541.
- [32] Zhulay, I., K. Reiss and H. Reiss(2015), Effects of aquaculture fallowing on the recovery of macrofauna communities, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 97(1-2), pp. 381-390.

Received : 2021. 11. 23.

Revised : 2021. 12. 20.

Accepted : 2021. 12. 28.