

어장환경평가에 사용하는 저서생태계 건강도지수(Benthic Health Index)에 대한 소개

정래홍* · 윤상필** · 박소현*** · 홍석진*** · 김연정**** · 김선영*****†

* 국립수산물품질관리원 남해수산물연구소 기후환경자원과 해양수산물연구관, ** 국립수산물품질관리원 해역이용영향평가센터 해양수산물연구사, *** 국립수산물품질관리원 해양환경연구과 해양수산물연구사, **** (주)저서생물연구센터 연구원, ***** 국립수산물품질관리원 해양환경연구과 연구원

Introduction to the Benthic Health Index Used in Fisheries Environment Assessment

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

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

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

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

**** Researcher, Korea Benthos Research Center, Co., LTD, Busan 48313, Korea

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

요약 : 집약적이고 장기적인 양식어업 활동은 많은 양의 유기물을 발생시켜 퇴적환경과 생태계를 악화시켜왔다. 정부에서는 양식어장의 환경 보전과 관리를 위해서 어장관리법을 제정하였고 이를 근거로 2014년부터 어류 가두리 양식장에 대한 어장환경평가가 실시되었다. 따라서 어장환경평가를 위해 국내 환경에 적합한 과학적이고 객관적인 평가방법의 개발이 필요하였다. 이를 위해 저서다모류 군집과 양식장의 주 오염원인 유기물의 관계를 이용한 저서생태계 건강도지수(BHI)를 개발하였고, 본 연구에서는 저서생태계 건강도지수의 개발 과정과 계산방법을 소개하고자 한다. 저서생태계 건강도지수는 국내 연안역과 양식장에서 출현한 225종의 다모류를 대상으로 퇴적물 내 총유기탄소량의 농도 구배와 종별 분포특성을 연관지어 4개의 그룹을 나누고, 각 그룹에 가중치를 부여하는 방식으로 계산된다. 저서생태계 건강도지수를 이용하여 저서동물군집을 4개의 생태등급(Grade 1: Normal, Grade 2: Slightly polluted, Grade 3: Moderately polluted, Grade 4: Heavily polluted)으로 나누었다. 개발된 지수를 현장에 적용한 결과, 기존의 평가방법인 다양도 지수나 국외에서 개발된 AMBI와 비교해 보다 정확하고 계절의 영향을 적게 받아 우리나라 환경을 평가하기에 효과적인 것으로 판단된다. 또한 저서생태계 건강도지수를 사용하면 어장환경을 정량화된 수치에 따라 등급화 할 수 있어 양식장 환경관리에 효율적으로 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 어장환경평가, 저서생태계 건강도지수(BHI), 저서다모류, 총유기탄소량, 평가지수

Abstract : Intensive and long-term aquaculture activities in Korea have generated considerable amounts of organic matter, deteriorating the sedimentary environment and ecosystem. The Korean government enacted the Fishery Management Act to preserve and manage the environment of fish farms. Based on this, a fisheries environment assessment has been conducted on fish cage farms since 2014, necessitating the development of a scientific and objective evaluation method suitable for the domestic environment. Therefore, a benthic health index (BHI) was developed using the relationship between benthic polychaete communities and organic matter, a major source of pollution in fish farms. In this study, the development process and calculation method of the BHI have been introduced. The BHI was calculated by classifying 225 species of polychaetes appearing in domestic coastal and aquaculture areas into four groups by linking the concentration gradient of the total organic carbon in the sediment and the distributional characteristics of each species and assigning differential weights to each group. Using BHI, the benthic fauna communities were assigned to one of the four ecological classes (Grade 1: Normal, Grade 2: Slightly polluted, Grade 3: Moderately polluted, and Grade 4: Heavily polluted). The application of the developed index in the field enabled effective evaluation of the Korean environment, being relatively more accurate and less affected by the season compared with the existing evaluation methods like the diversity index or AZTI's Marine Biotic Index developed overseas. In addition, using BHI will be useful in the environmental management of fish farms, as the environment can be graded in quantified figures.

Key Words : Fisheries environment assessment, Benthic health index, Benthic polychaete, Total organic carbon, Ecological Index

* First Author : rhjung@korea.kr, 061-690-8930

† Corresponding Author : syngk@naver.com, 051-720-2532

1. 서론

국내 양식생산량은 2021년 기준 천해양식어업이 239만 7천 톤, 내수면 양식어업이 4만 2천 톤으로 총 양식생산량 중 98%가 천해양식어업 생산량으로 대부분 해면에서 생산되고 있다. 또한 천해양식 생산량은 2001년 65만 5천톤에 비해 2021년에는 3.6배로 크게 증가하였다(MOF, 2022). 우리나라 천해양식은 내만에 밀집되어 발전하였다. 내만은 개방된 해역에 비해 태풍, 파랑, 파도와 같은 자연재해와 외력에 의한 시설물 피해를 줄일 수 있고, 육지에서 나오는 영양분이 풍부하며, 육지와 가까워 관리가 편리하여 해면 양식의 적지로 이용되어왔다. 그러나 양식산업이 급성장함에 따라 양식면적의 증가와 밀식으로 인한 조류소통 방해, 그리고 동일장소에서 장기간 사용으로 내만 양식장 환경은 양식장에서 발생하는 오염원이 바닥에 지속적으로 퇴적되어 교란이 심각한 수준에 이르게 되었다. 국내에서 양식활동에 의한 환경교란은 유기물 유입과 순환(Shim et al., 1997; Lee et al., 2004b), 저서동물군집에 미치는 영향(Park et al., 2000; Jung et al., 2002; Lee et al., 2004a; Jung et al., 2007; Park et al., 2022) 연구 등으로 입증되었다. 또한 해외의 경우에도 양식활동으로 인한 유기물 오염(Hall et al., 1990; Tomassetti et al., 2016), 유기물 분해로 인한 2차 피해(Holmer et al., 2007), 서식하는 저서동물군집의 영향(Karakassis et al., 2000; Buschmann et al., 2006; Giles, 2008; Srithongouthai and Tada, 2017) 등 다양한 연구 결과들이 제시되었다. 이런 국내의 연구들에서 양식에 의한 유기물 부하는 양식장을 중심으로 범위는 제한적이나 강도는 매우 크다는 공통적인 결과를 보고하였다.

양식활동으로 인한 환경교란을 감소시키고 양식어장의 지속적 이용과 환경관리를 위해서 해상 어류 가두리 양식이 성행하는 북유럽과 북미, 아시아의 여러 나라에서는 해양환경 영향평가를 실시하고 있으며, 그 중 캐나다, 노르웨이, 일본 등에서는 환경 기준을 근거로 양식어장을 조사하고 평가하는 시스템인 어장평가 제도를 운영하고 있다(Ervik et al., 1997; Yokoyama, 2000; FOC, 2018). 캐나다는 어장환경을 평가하는 방법으로 이화학적 항목인 황화물농도(Sulfide)만을 사용하는 반면, 노르웨이는 산화환원전위도, 일본은 산화발성황화물과 함께 생물학적 평가항목인 저서동물을 채택하여 사용하고 있다. 저서동물을 평가항목으로 사용하는 노르웨이와 일본은 저서동물군집의 구성 종들이 유기물 오염 정도에 다른 내성을 보이며, 생활사 또한 스트레스를 반영(Pearson and Rosenberg, 1978; Dauer, 1993; Diaz et al., 2004; Van Hoey et al., 2004; Giangrande et al., 2005; Gray and Elliot, 2009) 한다는 특징을 활용하여 저서동물을 환경평가에 이용하고 있으나 적용하는 방식에선 차이가 있다. 일본의 경우 저서동물의 출현유무와 다양도 지수를, 노르웨이는 출현유

무만을 사용하여 평가하고 있다(Yokoyama, 2000; Hansen et al., 2001). 국내에서도 양식어장의 환경보전과 관리를 위해 어장관리법을 제정하였고, 이를 근거로 2014년부터 어류가두리 양식장에 대해 어장환경평가를 시행하여 어장의 관리의무와 함께 면허 연장에 대한 제재를 시작하였다. 어장환경평가를 위해 해외사례, 과학적 근거, 정확도 확보, 경량성 등에 주안점을 두고 전문가 위원회의 토의를 거쳐 발생하는 직접적 오염원인 유기물을 측정하는 총유기탄소량(TOC)과 생태계의 영향을 대변할 수 있는 저서동물군집을 이용하는 것으로 결정하였으며, 저서동물의 경우 유기물오염의 영향을 정량화시킬 수 있는 지수 사용을 권고하였다.

저서동물군집을 이용한 생태계 평가 방법들 중 숫자로 표현 가능한 지수 방식은 전통적으로 구성 종들의 개체수 분포 특징을 활용한 다양도 지수(H')와 여기에 생체량의 역할을 추가한 ISEP(Inverse function of Shannon-Wiener Evenness Proportion, Yoo et al., 2010) 등이 있으며, 최근에는 유럽을 중심으로 저서생물군집의 기능에 근거한 생태지수들이 제안되었고, 생물의 섭식방법에 따라 산출된 지수인 ITI(Infaunal Trophic Index, Word, 1978), 유기물 오염에 따른 생물의 반응에 따라 산출된 지수인 AMBI(Azti's Marine Biotic Index, Borja et al., 2000) 등의 평가지수가 개발되어 다양한 환경에서 양식에 의한 오염 영향을 평가하는데 폭넓게 사용되고 있다(Cromey et al., 2002; Aguado-Gimenez et al., 2007; Bouchet and Sauriau, 2008; Callier et al., 2008). 저서동물군집의 기능에 근거한 생태지수는 채집면적, 시기, 퇴적상 등에 영향을 적게 받는다는 장점이 있다(Simboura and Zenetos, 2002; Subida et al., 2012). 다만 국외에서 사용되고 있는 지수들을 국내에 직접 적용 시 생태학적 특성과 종 조성의 차이로 인한 오류가 발생할 수 있다. 국내에서도 ITI(Infaunal Trophic Index, Word, 1978)를 국내에 맞게 도입 수정한 BPI(Benthic pollution index, KORDI, 1995)를 개발하여 사용하고 있다. 다만 이 지수의 경우 기능군을 분류하는 부분에서 ITI와 마찬가지로 명확성이 지적되었다(Choi and Seo, 2007; Seo et al., 2014). 따라서 어장관리법상의 어장평가를 위해 양식활동으로 발생한 유기물 영향을 표현할 수 있는 새로운 지수의 개발이 필요하였으며, 이를 위해 국내에서 출현하는 다모류와 양식장의 주 오염원인 유기물과의 관계를 이용하여 저서생태계 건강도지수(Benthic health Index, BHI)를 개발하였고, 총유기탄소량(TOC)과 함께 어장환경평가에 활용하고 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채집 및 분석

지수개발을 위해 1999년부터 2013년까지 일반적인 연안역과 양식장 이용해역, 유기물 오염이 심한 마산만 등에서 조사된

어장환경평가에 사용하는 저서생태계 건강도지수(Benthic Health Index)에 대한 소개

1,166개의 시료를 사용하였다. 퇴적물 시료는 채집면적 0.1 m²의 채니기(van Veen grab)를 이용하여 정점 당 3회 반복 채집하였다. 이 중 2회 채집 분은(0.2 m²) 저서동물군집 분석용으로, 1회분은 표층퇴적물의 지화학적 특성 분석용으로 사용하였다.

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

표층퇴적물 내 유기물량을 알아보기 위해 산화발성황화물(Acid Volatile Sulfide, AVS), 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)를 분석하였다. 이 중 AVS, COD의 분석은 해양환경공정시험기준(국립수산과학원 고시 제2021-6호)을 따랐다. TOC는 동결건조시킨 시료 0.5 g에 1 N 염산용액 10 ml를 첨가하여 탄산염을 제거하고, 70 °C에서 24시간 동안 수분과 잔류염소를 증발시켰다. 이후 105 °C에서 2시간 건조시키고, 실온이 될 때까지 데시케이터에서 보관한 후 3~5 mg의 시료를 주석박막에 싸서 CHN 원소분석기(element analyzer, PerkinElmer, US/2400)로 분석하였다.

2.2 지수개발

지수에 사용되는 식은 0부터 100까지 표현되는 Infaunal Trophic Index(ITI, Word 1978)의 개념을 도입 변형하였으며, 4개의 기능군은 출현한 다모류 각각 종에 대해 총유기탄소량에 따른 종의 출현밀도와 점유율 분포를 비교하여 4개의 그룹으로 나누었다. 4개의 그룹은 총유기탄소량에 따른 다모류 종의 분포를 도식화 한 후 분포패턴에 따라 나누었다. 그룹을 나누는 과정에서 발생하는 주관성을 최소화하기 위해 국내 저서동물 전문가로 구성된 위원회의 검증과 제시된 의견을 반영하였다.

2.3 자료분석

저서동물군집의 구조를 파악하기 위해 종 수, 개체수 그리고 종 다양도 지수(H') (Shannon and Weaver, 1963) 등을 계산하였다. BHI 등급에 따른 저서동물군집의 차이와 차이를 발생

시킨 주된 환경요인을 알아보기 위해 주요좌표분석법(Principal Co-ordinates analysis, PCO)을 사용하였으며, 이때 저서다모류 자료는 출현밀도를 4th-root으로 변형하여, Bray-Curtis similarity를 계산 후 이용하였다(PRIMER-E Ltd., Ver.6.0).

3. 결 과

3.1 평가지수개발

저서생태계 건강도지수(Benthic Health Index, BHI)는 채집된 다모류 각 종들의 개체밀도와 퇴적물 내 총유기탄소량을 비교하여 유기물의 농도 구배에 따른 출현분포를 바탕으로 그룹을 결정하였다. 또한 그룹 결정 시 각 종들의 밀도가 시거나 환경에 따라 변동이 큰 점을 보완하기 위해 밀도와 각 정점에서 종들이 차지하는 점유율을 동시에 비교하였다. 총 출현한 225종을 퇴적물내 유기물량에 따른 분포패턴과 출현빈도에 따라 4개의 그룹으로 나누었다(Table 1)(Fig. 1~4). 그룹 1은 낮은 유기물 농도(10 mg/g 이하)에서 높은 밀도로 출현하거나 출현빈도와 밀도가 낮은 종, 그룹 2는 유기물 농도와 상관없이 고른 분포를 하는 종, 그룹 3은 비교적 높은 유기물 농도(15~30 mg/g)에서 밀도피크를 보이는 종, 그룹 4는 계절적으로 무생물역이 발생하는 해역에서 높은밀도로 출현하거나 높은 유기물 농도(25 mg/g 이상)에서 출현하는 종이다.

각 그룹별 종 목록은 부록 1에 표시하였다(Appendix 1).

BHI의 계산식은 다음과 같다.

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

여기서, N은 각 그룹의 개체수이고 N_{total}은 총 개체수이다. 계산식 분자에 있는 계수는 4개의 그룹에 대해 나쁜 쪽에서 좋은 쪽으로 가면서 일정하게 가중치를 부여하고 최종 결과가 1에서 100이 되게 하기 위하여 25를 곱하였다. 결과적으로 1그룹 만이 출현하면 100이 되며, 4그룹 만이 출현하면 1이 되게 된다. 다만 저서생물이 출현하지 않을 시 분모가 0이 되어 식에 오류가 발생한다. 따라서 저서생물이 출현하지 않을 시 BHI 값은 임의로 0을 부여하였다.

Table 1. Characteristics and representative species in benthic health index groups

| Group | Characteristics | Representative species |
|-------|--|--|
| 1 | Species that occur at low frequencies and densities or occur at high densities in low organic matter concentrations | <i>Paralacydonia paradoxa</i> , <i>Anatides koreana</i> , <i>Notomastus latericeous</i> , <i>Paraprionospio cordifolia</i> |
| 2 | Species with an even distribution regardless of organic matter concentrations | <i>Magelona japonica</i> , <i>Glycera chirori</i> , <i>Glycinde gurjanovae</i> , <i>Praxillella affinis</i> |
| 3 | Species that occur at high densities at relatively high organic matter concentrations | <i>Aphelochaeta monilaris</i> , <i>Lumbrineris longifolia</i> , <i>Euchone alicaudata</i> , <i>Cirriformia tentaculata</i> |
| 4 | Species that occur in high organic matter concentrations or occur at high densities in sea areas where dead zones occur seasonally | <i>Paraprionospio patiens</i> , <i>Capitella capitata</i> , <i>Spiochaetopterus koreana</i> , <i>Minuspio pulchra</i> |

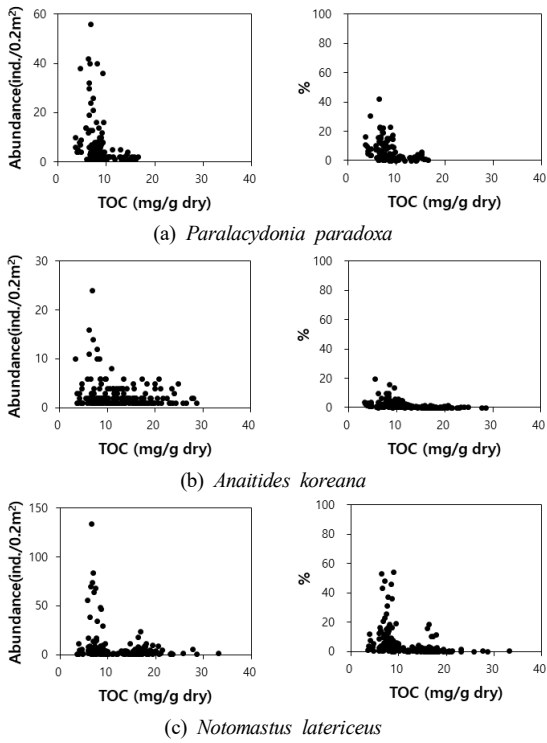


Fig. 1. Relationship between abundance of Group 1 species and TOC concentration.

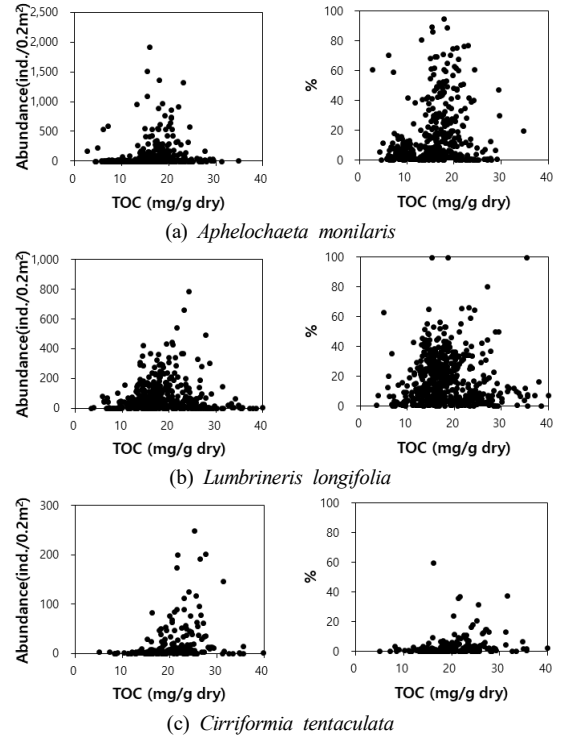


Fig. 3. Relationship between abundance of Group 3 species and TOC concentration.

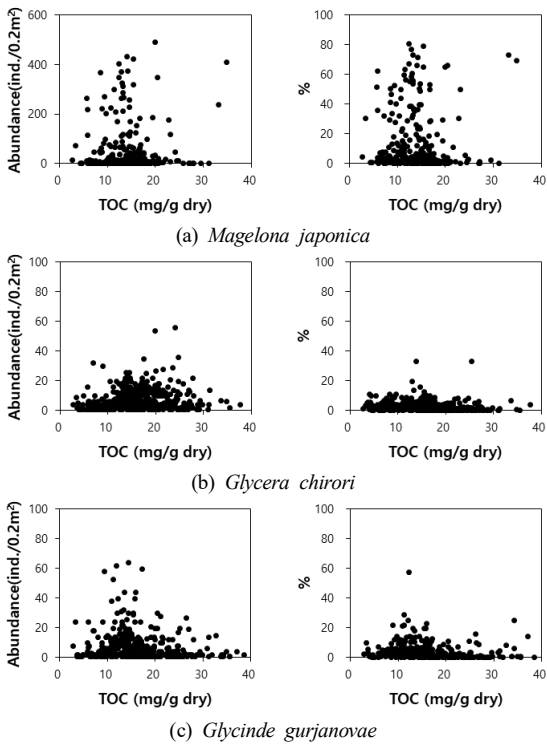


Fig. 2. Relationship between abundance of Group 2 species and TOC concentration.

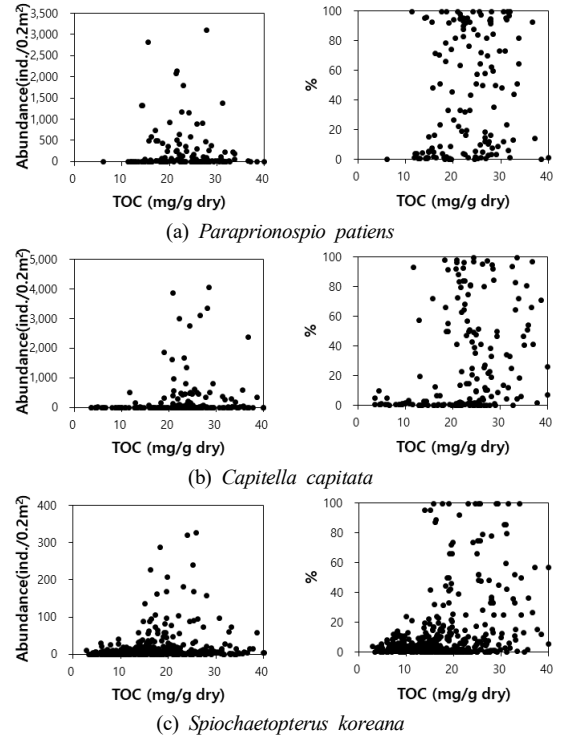


Fig. 4. Relationship between abundance of Group 4 species and TOC concentration.

3.2 BHI 등급 설정

BHI의 등급 설정을 위해 저서다모류 군집과 TOC를 동시에 분석한 국내 양식장 및 양식장 주변 지역의 총 776개 자료를 사용하였다.

TOC에 상응하는 BHI의 변곡점을 찾기 위해 BHI 값을 20개의 구간으로 나눈 후 각 구간에 해당되는 TOC를 도식화하였다(Fig. 5). 구간별 BHI 값에 따른 TOC 값은 정규분포 상 신뢰구간 95% 외의 값을 제거하였으며, 각 구간별 TOC를 4분위 값으로 구분하였다. 이 결과를 바탕으로 BHI를 4개의 등급으로 나누었다.

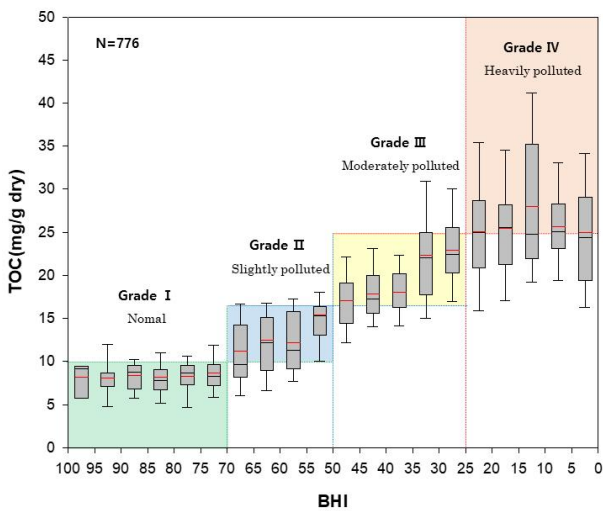


Fig. 5. Grade determined by comparing BHI scores and total organic carbon content in the sediment, on the boxplot (red line: mean, black line: median).

TOC 농도가 높은 4등급은 중앙값을 기준으로 하여 다음 등급의 상위 25%를 훼손하지 않는 범위로 설정하였다. 따라서 4등급은 BHI 25 이하로 설정하였으며 TOC의 범위는 25 mg/g dry 이상이다. 3등급도 동일한 방법으로 변곡점에서 다음 등급의 상위 25%를 훼손하지 않는 구간으로 결정하였으며, 그 결과 BHI의 범위는 26~50이고 TOC의 범위는 17.01~25.00 mg/g dry이다. 같은 기준으로 나눌 때 2등급은 BHI 51~70, TOC 10.01~17.00 mg/g dry이며, 1등급은 BHI 71 이상, TOC 10.00 mg/g dry 이하이다.

3.3 BHI의 등급별 특징

BHI의 등급 설정에 이용한 776개 정점의 표층퇴적물 유기물과 관련된 환경요인(AVS, COD, TOC)과 생물지수(출현 종수, 종 다양도, 균등도)를 등급별로 구분하였다(Fig. 6, Table 2).

표층퇴적물의 AVS 농도는 BHI 1등급에서 0.00~1.49 mg/g dry, 2등급에서 0.00~2.24 mg/g dry였고, 평균은 각각 0.12, 0.13 mg/g dry로 1등급과 2등급이 유사하였다. 3등급에서 AVS 농도 범위는 0.00~4.35 mg/g dry, 평균은 0.32 mg/g dry였고, 4등급에서는 0.03~4.86 mg/g dry의 범위로 평균은 1.01 mg/g dry였다. 3, 4등급은 1, 2등급에 비해 등급 간 차이가 비교적 뚜렷하였다.

COD 농도의 등급별 평균값은 1등급에서 4등급으로 갈수록 증가하여, 등급 간 차이가 뚜렷하였다. 등급별 범위는 1등급 1.33~25.64 mg/g dry, 2등급 0.70~50.35 mg/g dry, 3등급 6.39~55.75 mg/g dry, 4등급 4.81~65.05 mg/g dry로 모두 넓은 범위로 분포하여 일부분이 등급 간 중첩되었다.

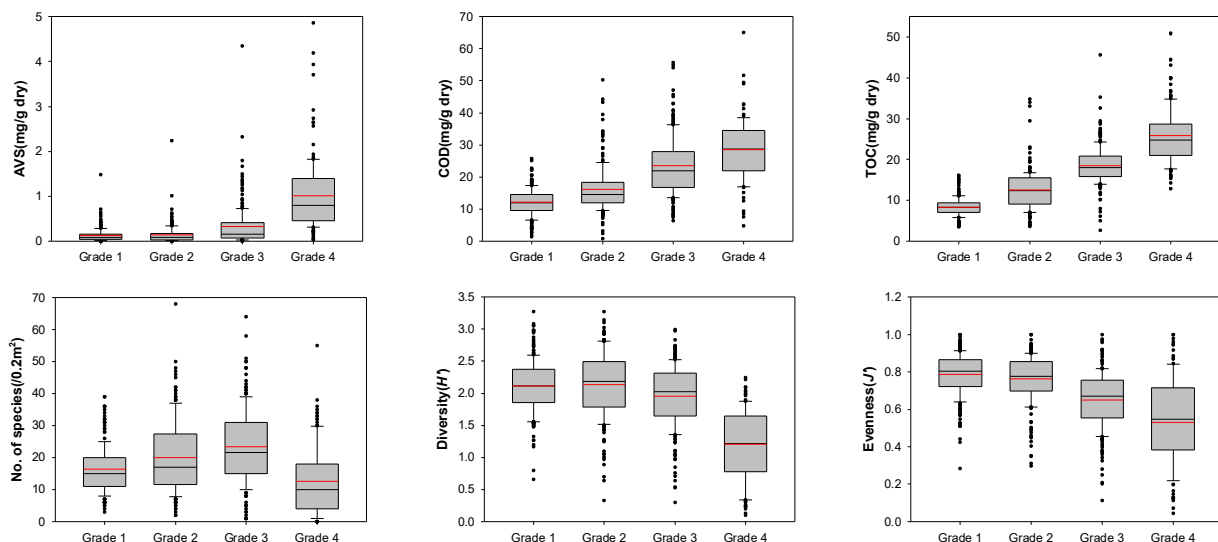


Fig. 6. Variations of environmental variables and ecological indices in each BHI grade (red line: mean, black line: median).

TOC의 농도는 BHI 1등급에서 4등급으로 갈수록 분포범위와 평균값이 점진적으로 증가하였으며, 그룹 간의 분포범위 차이가 AVS나 COD보다 뚜렷하였다.

저서다모류의 BHI 등급별 평균 출현 종 수는 3등급에서 23 종/0.2 m²으로 가장 높았다. 그 다음으로 2등급에서 20 종/0.2 m², 1등급에서 16 종/0.2 m²이 출현하였으며, 4등급에서 13 종/0.2 m²이 출현하여 가장 낮았다. 따라서 출현 종 수는 유기물 농도가 극단적으로 높거나 낮은 해역에 비해 중간 수준의 유기물 농도를 보이는 해역에서 높았다.

등급별 다양도 지수 평균값은 BHI 1등급과 2등급에서 각각 2.11과 2.13으로 높았고, 3등급은 1.92로 1, 2등급 평균값에 비해 낮기는 하나 큰 차이는 없었다. 반면 4등급에서의 평균 다양도는 1.07로 가장 낮았으며, 다른 세 등급에 비해 차이도 컸다.

등급별 균등도 지수 평균값은 BHI 1등급과 2등급에서 각각 0.79와 0.76으로 높으며 두 등급 간 차이가 없었으나, 3등급에서는 0.64, 4등급에서는 0.47로 뚜렷이 감소하였다.

Table 2. Comparison of environmental variables related to organic matter and ecological indices by BHI grade. Measurements are presented by ranges and mean (in parentheses)

| BHI | Grade 1 | Grade 2 | Grade 3 | Grade 4 |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| | ≥ 71 | 51-70 | 26-50 | ≤ 25 |
| AVS (mg/g dry) | 0.00-1.49 (0.12) | 0.00-2.24 (0.13) | 0.00-4.35 (0.32) | 0.03-4.86 (1.01) |
| COD (mg/g dry) | 1.33-25.64 (12.10) | 0.70-50.35 (16.13) | 6.39-55.75 (23.43) | 4.81-65.05 (28.43) |
| TOC (mg/g dry) | 3.50-16.19 (8.35) | 3.60-34.78 (12.46) | 2.68-45.65 (18.54) | 12.85-50.90 (25.78) |
| No. of sp. (0.2 m ²) | 3-39 (16) | 2-68 (20) | 1-64 (23) | 0-55 (13) |
| Diversity (H') | 0.65-3.28 (2.11) | 0.32-3.28 (2.13) | 0.00-2.99 (1.92) | 0.00-2.24 (1.07) |
| Evenness (J) | 0.28-1.00 (0.79) | 0.30-1.00 (0.76) | 0.00-1.00 (0.64) | 0.00-1.00 (0.47) |

BHI 등급 차이에 따라 군집구성에서도 변화가 있는가를 알아보기 위해 PCO 분석을 실시하였다. 분석 결과 1축과 2축으로 각각 전체 변화의 18.7%와 11.8%를 설명할 수 있으며, BHI 등급에 따라 4개의 군집으로 구별됨을 알 수 있다 (Fig. 7). 특히 4등급과 3등급은 다른 등급의 군집과 군집조성에 있어서도 크게 차이가 있었다. 반면 1등급과 2등급은 차이는 있으나 일부에서 혼재된 결과를 보였다. 두 축을 기반으로 군집차이를 발생시킨 항목들을 Spearman 상관계수를 이용하여 백터화하였다. 4등급의 군집에서는 유기물 농도와

관련된 항목들이 유의한 요인이었으며, 이 중에서 TOC와 가장 큰 양의 상관성을 보였다. 3등급의 군집은 유기물 농도 항목과 함께 출현 종 수가 군집을 구분하는데 기여한 것으로 나타났다. 1, 2등급은 생물지수 항목들이 군집의 결정에 유의한 요인이었으며, 1등급은 특히 종 다양도 지수, 균등도 지수와 양의 상관성이 있었다.

ANOSIM 분석을 통해 군집간의 유의성을 검증한 결과 등급에 따른 각각의 군집은 통계적으로 유의한 차이가 있으며 (Table 3), 가장 큰 상이성을 보인 군집은 1등급과 4등급 (Global R=0.799, p value<0.001)이었다.

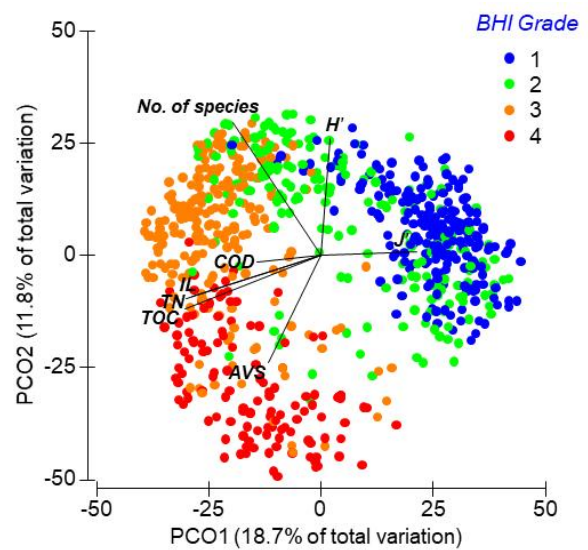


Fig. 7. Principal Co-ordinates analysis (PCO) showing the relationship between BHI grade and environmental/ecological parameters.

Table 3. One-way analysis of similarities showing significant differences in macrobenthic community structure among the groups

| Grade | Global R | p value |
|---------|----------|---------|
| I, II | 0.178 | <0.001 |
| I, III | 0.704 | <0.001 |
| I, IV | 0.799 | <0.001 |
| II, III | 0.293 | <0.001 |
| II, IV | 0.532 | <0.001 |
| III, IV | 0.474 | <0.001 |

3.4 환경요인 및 타 지수와의 비교

BHI의 검증을 위해 퇴적물 내 TOC와 가장 보편적으로 사용되고 있는 종 다양도 지수(H'), AMBI, M-AMBI에 대해 상

어장환경평가에 사용하는 저서생태계 건강도지수(Benthic Health Index)에 대한 소개

관관계를 분석하였다. 분석에 사용된 저서동물 및 퇴적물 자료는 2013년에 조사된 통영, 여수 해역에 위치한 48개 어류 가두리 양식장과 2008년과 2009년에 조사된 수하식 패류 양식장 밀집해역인 한산·거제만과 고성·자란만의 4계절 자료이다.

BHI와 퇴적물 TOC의 상관관계 분석 결과 상관계수 R^2 값은 0.44의 상관관계를 보였다. TOC와 AMBI의 R^2 값은 0.27로 BHI보다 낮았다(Fig. 8).

BHI와 타 지수의 상관관계 분석 결과 다양도 지수의 상관계수 R^2 값은 0.65였고, AMBI, M-AMBI의 R^2 값은 각각 0.62, 0.64로 세 지수 모두 비교적 높은 상관관계를 보였다(Fig. 9). 다양도 지수와 AMBI의 R^2 값은 0.51로 BHI와의 상관계수 값보다 낮았다. M-AMBI와 다양도 지수는 높은 상관관계를 보였는데($R^2=0.84$), 이는 M-AMBI 지수 자체가 AMBI 계산 후 다양도 지수와 출현 종 수로 보정하기 때문이다.

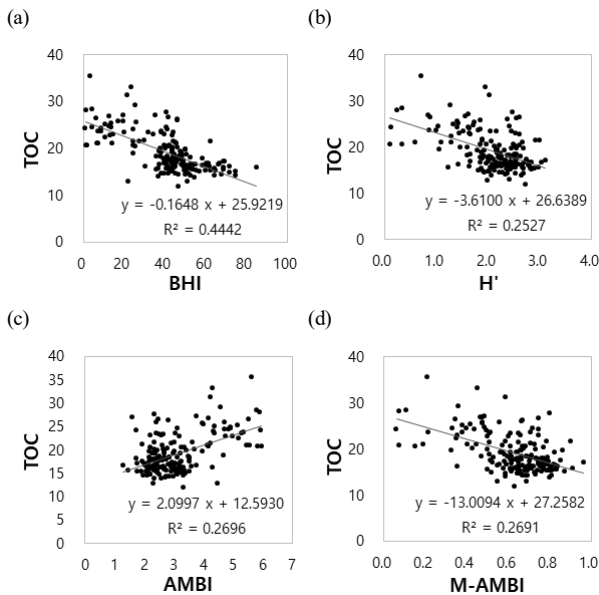


Fig. 8. Correlation between total organic carbon and biotic indices (a) BHI, (b) H' , (c) AMBI and (d) M-AMBI.

3.5 현장적용

우리나라 연안해역 중 유기물 교란이 심한 마산만과 실제 양식활동중인 어류양식장 두 곳에서 BHI를 적용하여 다른 생태계 평가지수들과 비교 분석하였다(Fig. 10). 마산만은 유기물에 의한 환경교란이 심하며, 만 안쪽은 해수교환이 불량하여 늦봄부터 가을까지 저층에서 빈산소수괴가 발생하여 무생물구역이 형성된다. 또한 좁고 긴 지형적 특징으로 인해 만 입구로 가면서 환경변화의 구배가 뚜렷하다. TOC는 만 안쪽의 1번 정점부터 8번 정점까지 높은 수준이었다. 이

구간에서 TOC는 만 입구쪽으로 갈수록 감소하는 경향이 관찰되지는 않았으며, 조사 시기간 편차가 큰 것으로 나타났다. 반면 9번 정점부터는 바깥쪽으로 갈수록 지속적으로 감소하였으며, 조사 시기간 편차도 줄었다.

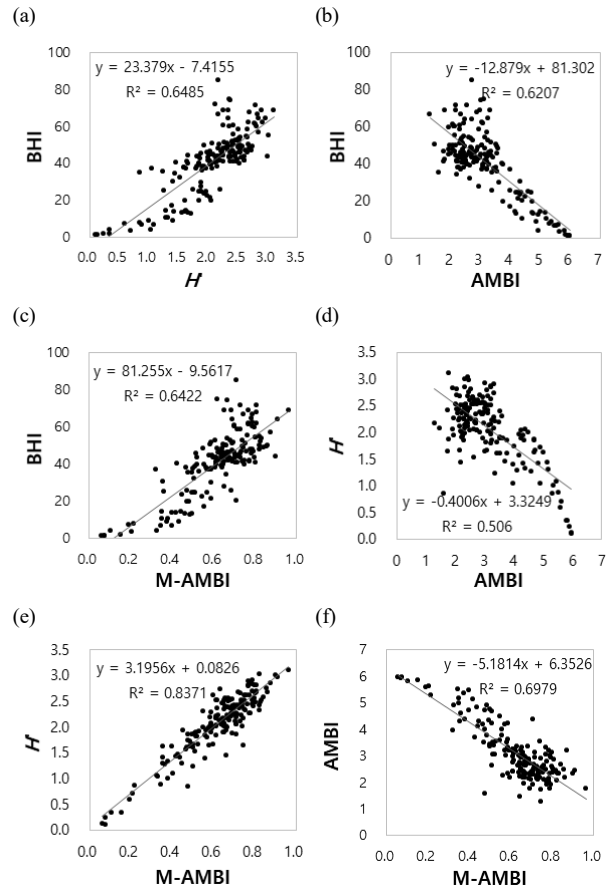


Fig. 9. Correlation between biotic indices (a) BHI vs H' (b) BHI vs AMBI (c) BHI vs M-AMBI (d) H' vs AMBI (e) H' vs M-AMBI (f) AMBI vs M-AMBI.

BHI는 정점 1부터 7까지 구간에서 매우 낮았다. 특히 정점 1~3에서는 계절성없이 연중 낮은 반면, 만 중간해역인 정점 4~8에서는 빈산소가 발생하는 여름에 가장 낮았으며 점차 증가하기 시작하여 봄철에 높은 계절성이 나타났다. 만 입구에 위치한 정점 9번부터는 바깥쪽으로 갈수록 BHI도 크게 증가하였으며, 계절적인 차이도 없었다. 다양도 지수 (H')는 만 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 증가하는 경향이 전반적으로 조사시기 간 변화폭이 매우 컸으며, 앞선 BHI와는 달리 만 입구정점(9~11)에서 바깥쪽으로 갈수록 증가하지 않고 일정하게 유지되었다.

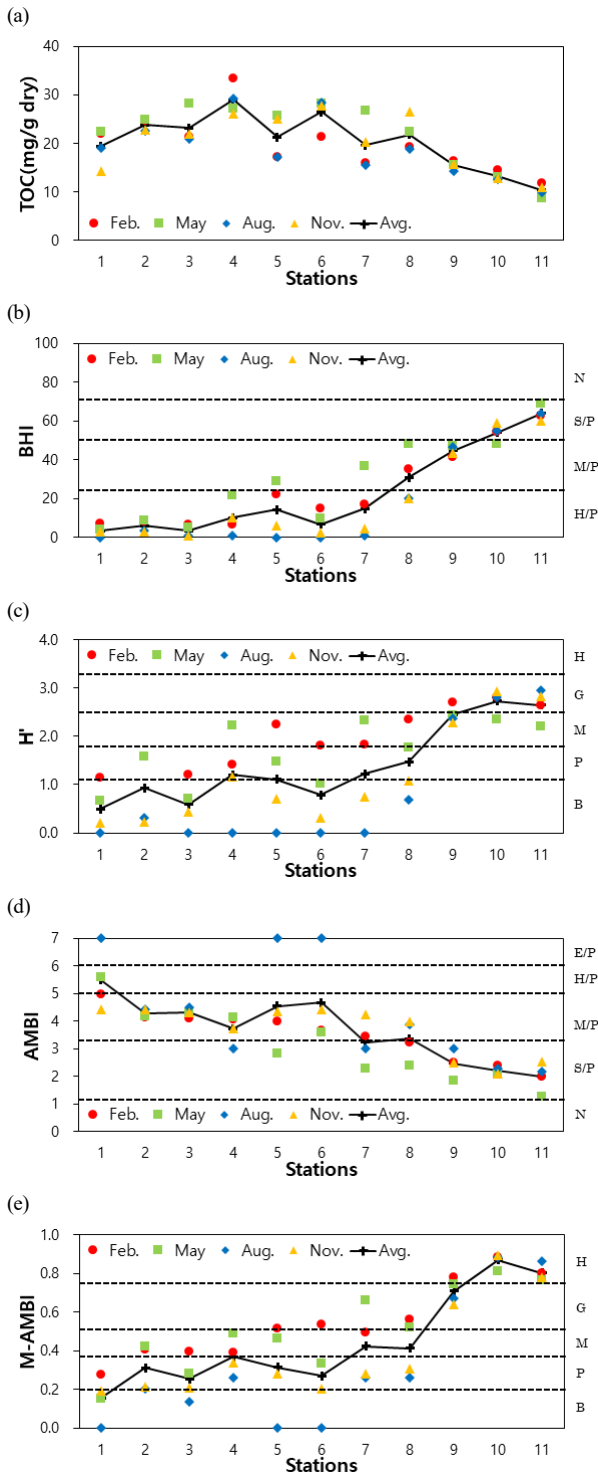


Fig 10. Changes in (a) TOC (b) BHI (c) *H'* (d) AMBI and (e) M-AMBI in Masan bay. (Pollution classification: N, Normal; S/P, Slightly polluted; M/P, Moderately polluted; H/P, Heavily polluted; E/P, Extremely Polluted; Ecological status: H, High; G, Good; M, Moderate; P, poor; B, bad)

AMBI의 경우에도 만 입구로 가면서 지수가 균집이 양호한 방향으로 변화하는 경향은 유사하였다. 그러나 계절적으로 무생물구역이 발생한 시기(6.0<AMBI≤7.0)를 제외하면 AMBI 기준으로 균집이 심하게 교란된 등급(5.0<AMBI≤6.0)에 해당하는 정점이 정점 1밖에 없었다. 이러한 현상은 M-AMBI에서도 동일하게 발생하여 무생물이 출현한 시기 외에 M-AMBI 0.2 이하('bad')인 정점이 거의 없었다. 반면 BHI는 만의 입구인 정점 7까지 오염심화 해역에 속하는 4등급(BHI≤25)에 해당되어 오염역에서의 표현력에 있어서 BHI가 세 지수보다 뛰어난 것으로 나타났다.

하동의 어류양식장 두 곳에서 2019년(Farm A)과 2021년(Farm B)에 각각 가두리로부터 거리별로 조사된 자료에 BHI를 적용하여 TOC와 비교하였다(Fig. 11). TOC는 Farm A와 Farm B 모두 0 m에서 가장 높았고, 나머지 정점들은 거리가 멀어질수록 낮아지는 양상이었지만 30 m에서 120 m 사이에서 값의 차이는 크지 않았다. 특히 Farm A에서는 5 m보다 15 m에서 TOC가 더 높았다. 반면 BHI는 Farm A에서 0 m부터 15 m 정점까지 4등급이었고, 30 m에서 120 m 사이는 3등급이었으며 거리가 멀어질수록 BHI 값이 뚜렷하게 높아지는 경향을 보였다. Farm B에서 BHI는 0 m와 10 m에서 4등급이었고, 나머지 정점은 2등급에 해당했으며 역시 30 m에서 120 m까지는 거리에 따라 BHI의 값이 점진적으로 높아졌다.

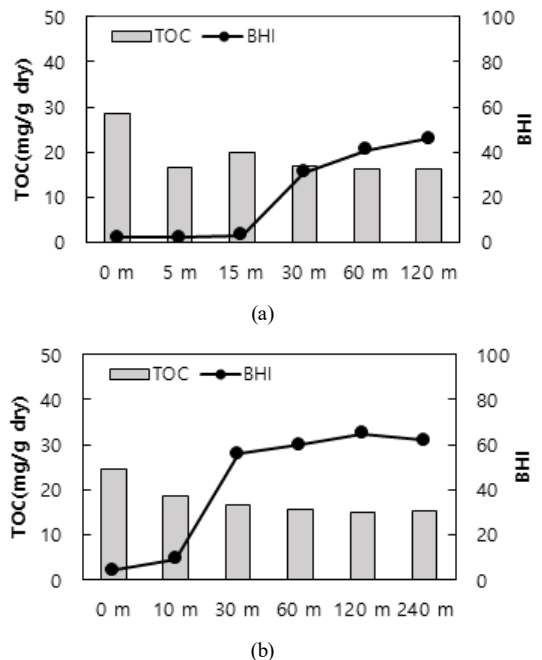


Fig. 11. Changes in BHI and TOC by the distance from the fish cages in Hadong. (a; Farm A, b; Farm B)

4. 고찰

저서동물군집을 이용한 생태계 건강도 평가의 효용성에 대해서는 많은 연구결과들에서 입증되었다(Borja et al., 2000; Diaz et al., 2004; Dauvin et al., 2007; Pinto et al., 2009; Teixeira et al., 2012). 이와 같은 특징으로 인해 어장관리를 위한 환경평가제도를 운영하는 나라들에서 저서동물을 평가항목으로 채택하여 사용하고 있다(Ervik et al., 1997; Yokoyama, 2000). 저서동물을 평가에 사용하는 노르웨이와 일본은 저서동물의 출현유무와 종 수, 다양도 지수를 평가에 이용하고 있다(Hasen et al., 2001; Yokoyama, 2000). 그러나 이런 지표들은 유기물 오염을 반영하는데 큰 경향성에서는 문제가 없으나 정확한 오염정도를 산정할 때 일부 상황에서 오류를 일으킬 가능성이 있다. 예를 들면 종 수나 다양도는 퇴적물 내 유기물 함량에 대해 일차 함수로 변화하지 않고 유기물 함량이 풍부한 부영양화 상태에서 피크가 발생하는 현상이 발생한다(Gray, 2000; Subida et al., 2012). 또한 퇴적상이나 계절적 요인에 따른 변화가 크다(Reiss and Kroncke, 2005; Chainho et al., 2007). 그리고 다양도 지수는 일부 종의 초기 가입 시 높은 개체수로 인해 감소하는 일시적인 자연현상과 오염에 의해 감소하는 현상을 구별할 수 없다(Warwick and Clarke, 1993; Quiroga et al., 2013). 출현 종 수의 경우에도 채집면적과 표본 개수에 영향을 받는다는 단점이 있다(Gray, 2000; Leonard et al., 2006; Hu and Zhang, 2016). 이런 문제점을 해결하기 위해 출현종의 특성을 이용한 다양한 지수들이 개발되어 왔으며(Word, 1978; Weisberg et al., 1997; Borja et al., 2000; Rosenberg et al., 2004; Muxika et al., 2007), 국내에서도 BPI가 개발되어 사용되고 있다(KORDI, 1995). 출현종의 생태특성을 활용한 생태지수는 채집면적과 시기, 퇴적상 등에 의한 영향이 적으며(Simboura and Zenetos, 2002; Subida, 2012) 특히 환경관리의 관점에서 볼 때 현 상태의 오염 정도를 정량화하여 간단한 수치로 표현할 수 있어 환경의 상태를 평가하는데 효율적인 방법으로 판단된다(Muniz et al., 2005; Borja et al., 2014). 이 중 유럽에서 개발된 AMBI는 양식장을 비롯한 인위적인 교란이 발생한 환경 등 다양한 상황에 적용되어 환경의 건강도를 평가하는데 효과적인 수단으로 평가받고 있다. 그러나 대형저서동물 군집은 종조성에 있어 강한 지역성을 보이므로 특정 서식지 내에서 개발된 지수를 다른 해역에 적용할 때에는 주의가 필요하다(Dauvin et al., 2007; Borja and Tunberg, 2011; Gillett et al., 2015). 이번 연구에서도 출현한 저서다모류 군집을 대상으로 AMBI를 계산 시 40% 정도의 종 이 일치하지 않았다. 이런 종의 불일치가 환경의 건강도 평가 시 오차를 일으킬 가능성을 높인다. 그리고 AMBI와 BHI는 개발된 환경에 기인한 종 조성 차이 외에도 계산에 사용

되는 생태적 그룹을 나누는데 있어서 개념은 큰 차이가 없으나, 나누는 방법에서 기술적인 면은 차이가 명확하다. AMBI는 각 생태적 그룹의 종들을 정할 때 문헌과 전문가의 의견을 따른 반면, BHI는 모든 종들을 출현서식지의 퇴적물 내 유기탄소 함량을 근거로 결정하여 유기물로 인한 환경교란을 평가하는 데 보다 높은 객관성을 확보하고 있다. 이처럼 그룹 구별 시의 객관성 확보는 국내 종을 대상으로 개발한 BPI와도 차별성을 갖게 된다. BPI는 생태적 그룹을 나눌 때 섭식유형을 바탕으로 기회종들을 그룹으로 구분하여 사용하고 있다(KORDI, 1995; Lee et al., 1997).

국내 출현하는 다모류 종 사용과 유기물 농도 반응양상에 따른 그룹화의 장점은 BHI를 현장에 적용하였을 때에도 명확하게 나타났다. 유기물 오염원이 뚜렷하고 오염원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 영향이 감소하는 점오염원의 특성을 지닌 해상 어류가두리 양식장에서 BHI는 가두리로부터 거리가 증가함에 따라 변화하여 유기물에 의한 환경교란을 수치화하는데 전혀 문제가 없었으며, 직접적인 지표인 퇴적물 내 유기물 함량의 변화보다도 환경의 변화를 뚜렷하게 반영하고 있다. 그리고 만 내측에서 유기물 오염으로 매년 5월 말부터 10월 말까지 저층에 빈산소수괴가 발생하여 무생물지역이 형성되며(NFRDI, 2010; NFRDI, 2012), 만 내측에서 외측으로 가면서 환경변화의 구배가 뚜렷한 마산만에서 현재 많이 사용되는 생태지수들과 BHI를 비교한 결과에서도 BHI가 다른 지수들에 비해 오염의 정도와 변화를 잘 반영하였다. 또한 마산만은 빈산소로 인한 무생물지역 형성 등 계절에 따른 변동이 큰 해역임에도 불구하고 타 지수에 비해 변화 폭도 적어 사계절의 영향을 받는 우리나라 환경에서 평가지수로 활용하는데 적합한 것으로 판단된다.

BHI는 어장관리법에 따른 어장환경평가를 실시하기 위한 방법으로 개발되었다. 어장환경평가는 평가 결과에 따라 면허기간 제한, 어장청소, 어장 위치이동 등 어민의 생산활동에 제약과 의무를 부과함으로써 어민의 수익에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 이런 이유로 어민들이 수용할 수 있는 과학적인 근거를 바탕으로 한 객관적인 방법의 개발이 필수조건이었다. 저서동물은 앞에서 언급한 이유들로 인해 어민들의 양식 활동 시 발생하는 유기물이 실제 생태계에 미치는 영향을 파악하는데 적합한 항목이다. 저서동물 중 다모류를 이용하여 우리나라 환경과 어장환경평가의 목적에 맞게 개발한 BHI는 다른 저서동물 생태지수들보다 과학적인 근거와 객관성을 확보하였다고 판단된다. 다만 저서동물을 이용한 평가방법들은 반드시 전문가의 정확한 종 동정이 수반되어야만 한다. 그러나 저서동물은 다양한 분류군으로 구성되어 종 동정 시 많은 전문가가 필요하며, 분석에 장시간이 소요된다. 이런 점은 저서동물이 환경오염의 정도와 변화를 잘 반영하는 장점에도

불구하고 정해진 시간에 많은 물량을 정확히 분석해야 하는 법정평가 항목의 관점에서는 단점으로 작용하였다. 이런 점을 해결하기 위해 어장환경평가에서는 전 저서동물군을 분석하는 대신 우리나라 연안 저서동물군집에서 출현 종 수나 개체수 면에서 높은 점유율을 보이는 다모류만을 대상으로 선정하였다. 우리나라 연안의 저서동물군집에서 다모류의 개체수가 차지하는 비율은 50~79%이며, 특히 가두리 양식장 주변 해역에서 91%의 높은 점유율을 보여(Jung et al., 2002; KOEM, 2022) 군집의 대표성을 갖기에 충분하다고 판단된다. 또한 Belan(2003)은 저서동물군집을 이용한 생태계건강도 평가 시 동일한 분류군을 대상으로 평가를 하는것이 보다 정확하고 효과적이며, 다모류가 적합하다고 제시하였다. 저서동물군집 중 다모류만을 대상으로한 생태지수(BHI)를 개발 사용함으로써 처리 시간이 단축되는 경량성의 확보와 전체 종을 다루면서 발생하는 오동정과 부족한 생태특성의 한계가 보완되었고 판단된다. 다만 새로운 종의 추가와 기존 종의 정보에 감증을 통한 지수의 보완은 지속적으로 이루어져야 한다.

Appendix 1. List of species in BHI groups (The species name follows the species list of National Institute of Fisheries Science Notice No. 2020-15, in alphabetical order by groups)

| Group | Family | Species |
|-------|-----------------|--|
| 1 | Amphinomidae | <i>Amphinome rostrata</i> Amphinomidae sp. |
| | Aphroditidae | <i>Aphrodita aculeata</i> <i>Aphrodita japonica</i> |
| | Apistobanchidae | <i>Apistobanchus tubergi</i> |
| | Arabellidae | Arabellidae unid. |
| | Arenicolidae | <i>Arenicola brasiliensis</i> |
| | Capitellidae | <i>Heteromastus filiformis</i> <i>Mediomastus californiensis</i> <i>Notomastus latericeus</i> |
| | Chaetopteridae | <i>Mesochaetopterus minuta</i> |
| | Chrysopetalidae | <i>Bhawania goodei</i> |
| | Cossuridae | Cossuridae sp. |
| | Eunicidae | <i>Eunice antennata</i> <i>Eunice</i> sp. <i>Lysidice collaris</i> <i>Lysidice</i> sp. <i>Marphysa sanguinea</i> |
| | Flabelligeridae | <i>Brada villosa</i> |
| | Glyceridae | <i>Glycera capitata</i> <i>Glycera convoluta</i> <i>Glycera dentribranchia</i> <i>Glycera onomichiensis</i> <i>Hemipodus yenourens</i> |
| | Goniadidae | <i>Goniada japonica</i> <i>Goniada maculata</i> |
| | Hesionidae | <i>Hesiospina similis</i> <i>Podarkeopsis</i> sp. |

| Group | Family | Species |
|-------|------------------|---|
| 1 | Heterospionidae | <i>Heterospio similis</i> <i>Heterospio sinica</i> |
| | Lacydoniidae | <i>Paralacydonia paradoxa</i> |
| | Lumbrineridae | <i>Lumbrineris latreilli</i> <i>Lumbrineris</i> sp. <i>Ninoe palmata</i> |
| | Magelonidae | <i>Magelona koreana</i> <i>Magelona</i> sp. |
| | Maldanidae | <i>Asychis disparidentata</i> <i>Asychis pigmentata</i> <i>Clymenella koellikeri</i> <i>Euclymene oerstedii</i> <i>Euclymene uncinata</i> <i>Maldane cristata</i> Maldanidae sp. <i>Microclymene propecaudata</i> |
| | Nephtyidae | <i>Aglaophamus lobatus</i> <i>Aglaophamus tepens</i> <i>Micronephtys sphaerocirrata orientalis</i> |
| | Nereidae | <i>Ceratonereis mirabilis</i> <i>Leonnates persica</i> <i>Neanthes flava</i> <i>Nectoneanthes oxypoda</i> Nereidae sp. <i>Nereis pelagica</i> <i>Nereis sinensis</i> <i>Perineris caltrifera</i> <i>Tambalagama fauveli</i> |
| | Onuphidae | <i>Nothria shirikishinaiensis</i> |
| | Opheliidae | <i>Polyopthalmus pictus</i> |
| | Orbiniidae | <i>Haploscoloplos elongatus</i> <i>Scoloplos rubra</i> |
| | Paraonidae | <i>Aedicira pacifica</i> <i>Aricidea horokoshii</i> <i>Aricidea jeffreysii</i> <i>Aricidea</i> sp. <i>Cirrophorus branchiatus</i> Paraonidae sp. <i>Cistenides okudai</i> |
| | Pectinariidae | <i>Anaitides chinensis</i> |
| | Phyllodocidae | <i>Anaitides koreana</i> <i>Anaitides</i> sp. <i>Eulalia</i> sp. <i>Mysta ornata</i> <i>Notophyllum splendens</i> |
| | Pilargiidae | <i>Ancistrosyllis groenlandica</i> <i>Cabira pilargiformis japonica</i> <i>Pilargis berkeleyae</i> |
| | Pisionidae | <i>Pisione</i> sp. |
| | Poecilochaetidae | <i>Poecilochaetus</i> sp. |
| | Polynoidae | <i>Halosydropsis pilosa</i> <i>Lepidasthenia maculata</i> <i>Lepidonotinae</i> sp. <i>Lepidonotus dentatus</i> <i>Lepidonotus helotypus</i> <i>Perolepis stylolepis</i> |

어장환경평가에 사용하는 저서생태계 건강도지수(Benthic Health Index)에 대한 소개

Appendix 1. Continued

| Group | Family | Species | |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Polynoidae | <i>Polynoella levisetosa</i> | |
| | Polyodontidae | <i>Polyodontes melanonotus</i> | |
| | Questidae | Questidae sp. | |
| | Sabellariidae | | <i>Idanthyrus armatus</i> |
| | | | <i>Lygdamis giardi</i> |
| | Sabellidae | | <i>Chone</i> sp. |
| | | | <i>Myxicola infundibulum</i> |
| | | | <i>Pseudopotamilla ocellata</i> |
| | Scalibregmidae | | <i>Scalibregma inflaum</i> |
| | | | Scalibregmidae sp. |
| | Sigalionidae | | Sigalionidae sp. |
| | | | <i>Shenelais fusca</i> |
| | Sphaerodoridae | | Sphaerodoridae sp. |
| | | | <i>Sphaerodorum gracile</i> |
| | Spionidae | | <i>Dipolydora socialis</i> |
| | | | <i>Malacoceros indicus</i> |
| | | | <i>Minuspio elongata</i> |
| | | | <i>Paraprionospio cordifolia</i> |
| | | | <i>Prionospio depauperata</i> |
| | | | <i>Prionospio paradisea</i> |
| | | | <i>Pseudopolydora kempii</i> |
| | | | <i>Scolecopsis variegata</i> |
| | | | <i>Spio borealis</i> |
| | | | <i>Spio filicornis</i> |
| | | | <i>Spio martinensis</i> |
| | | <i>Spio</i> sp. | |
| | | <i>Spiophanes</i> sp. | |
| Sternaspidae | <i>Sternaspis scutata</i> | | |
| Syllidae | | <i>Exogone</i> sp. | |
| | | <i>Exogone verugera</i> | |
| Terebellidae | | <i>Amphitrite cirrata</i> | |
| | | <i>Amphitrite edwardsii</i> | |
| | | <i>Pista</i> sp. | |
| | | <i>Terebella punctata</i> | |
| | <i>Terebella</i> sp. | | |
| Trichobranchidae | <i>Trichobranchus glacialis</i> | | |
| Trochochaetidae | Trochochaetidae sp. | | |
| 2 | Ampharetidae | <i>Amage auricula</i> | |
| | | <i>Ampharete arctica</i> | |
| | | <i>Amphicteis gunneri</i> | |
| | | <i>Amphisamytha japonica</i> | |
| | | <i>Isolda pulchella</i> | |
| | | <i>Melinna elisabethae</i> | |
| | Amphitritidae | Amphitritinae spp. | |
| | Arabellidae | <i>Drilonereis filum</i> | |
| | Arenicolidae | <i>Abarenicola pacifica</i> | |
| | Capitellidae | <i>Leiochrides</i> sp. | |
| | Chrysopetalidae | | <i>Chrysopetalum occidentale</i> |
| | | | <i>Chaetozone</i> sp. |
| | Cirratulidae | | <i>Chaetozone spinosa</i> |
| | | | <i>Tharyx</i> spp. |
| | | | <i>Brada villosa capensis</i> |
| | Flabelligeridae | | Flabelligeridae sp. |
| | | | <i>Glycera alba</i> |
| | Glyceridae | | <i>Glycera chirori</i> |
| | | | <i>Glycinde gurjanovae</i> |

Appendix 1. Continued

| Group | Family | Species | |
|----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 2 | Hesionidae | <i>Hesionides</i> sp. | |
| | | <i>Micropodarke dubia</i> | |
| | | | <i>Ophiodromus pugettensis</i> |
| | Lumbrineridae | | <i>Lumbrineris cruzensis</i> |
| | | | <i>Lumbrineris heteropoda</i> |
| | | | <i>Lumbrineris japonica</i> |
| | | | <i>Ninoe japonica</i> |
| | Magelonidae | <i>Magelona japonica</i> | |
| | Maldanidae | | <i>Clymenella koreana</i> |
| | | | <i>Praxillella affinis</i> |
| | Nephtyidae | | <i>Inermonephtys gallardi</i> |
| | | | <i>Nephtys oligobranchia</i> |
| | | | <i>Nephtys polybranchia</i> |
| | Nereidae | | <i>Neanthes japonica</i> |
| | | | <i>Nectoneanthes multignatha</i> |
| | | | <i>Nereis longior</i> |
| | | | <i>Platynereis bicanaliculata</i> |
| | | | <i>Diopatra sugokai</i> |
| | Onuphidae | <i>Ammotrypane aulogaster</i> | |
| | Opheliidae | | <i>Armandia simodaensis</i> |
| | | | <i>Travisia pupa</i> |
| | Orbiniidae | | <i>Naineris lavigata</i> |
| | | | <i>Phylo felix</i> |
| | | | <i>Scoloplos armiger</i> |
| | Oweniidae | <i>Myriochele oculata</i> | |
| | | <i>Owenia gomsoni</i> | |
| | Paraonidae | | <i>Aricidea assimilis</i> |
| | | <i>Cirrophorus furcatus</i> | |
| | | <i>Paraonis glacialis japonica</i> | |
| Pectinariidae | <i>Lagis bocki</i> | | |
| Phyllodocidae | | <i>Anaitides maculata</i> | |
| | | <i>Eteone longa</i> | |
| | | <i>Eumida sanguinea</i> | |
| | | <i>Genetyllis castanea</i> | |
| | | Phyllodocidae sp. | |
| | | <i>Halosydna brevisetosa</i> | |
| | | <i>Harmothoe imbricata</i> | |
| Polynoidae | | <i>Harmothoinae</i> spp. | |
| | | Polynoidae sp. | |
| | | <i>Chone teres</i> | |
| Sabellidae | Sabellidae sp. | | |
| Scalibregmidae | <i>Oncoscolex pacificus borealis</i> | | |
| Sigalionidae | <i>Sthenolepis japonica</i> | | |
| Spionidae | | <i>Aonides oxycephala</i> | |
| | | <i>Laonice cirrata</i> | |
| | | <i>Minuspio japonica</i> | |
| | | <i>Polydora</i> spp. | |
| | | <i>Prionospio membranacea</i> | |
| | | <i>Prionospio saccifera</i> | |
| | | <i>Pseudopolydora paucibranchiata</i> | |
| | | <i>Rhynchospio tuberculata</i> | |
| | | <i>Scolecopsis</i> sp. | |
| | | <i>Spiophanes kroeyeri</i> | |
| | | <i>Syllidae</i> spp. | |
| Syllidae | <i>Syllidae</i> spp. | | |
| Terebellidae | | <i>Amatea occidentalis</i> | |
| | | <i>Loimia medusa</i> | |

Appendix 1. Continued

| Group | Family | Species |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 2 | Terebellidae | <i>Pista cristata</i> |
| | | <i>Pista quadrilobata</i> |
| | | Terebellidae spp. |
| | | <i>Thelepus setosus</i> |
| | | <i>Thelepus</i> sp. |
| | Trichobranchidae | <i>Terebellides japonica</i> |
| 3 | Cirratulidae | <i>Aphelochaeta monilaris</i> |
| | | <i>Chaetozone setosa</i> |
| | | Cirratulidae sp. |
| | | <i>Cirratulus cirratus</i> |
| | | <i>Cirriformia tentaculata</i> |
| | Lumbrineridae | <i>Lumbrineris longifolia</i> |
| | Nereidae | <i>Neanthes caudata</i> |
| | | <i>Neanthes succinea</i> |
| | Opheliidae | <i>Armandia lanceolata</i> |
| | Paraonidae | <i>Aricidea neosuecica nipponica</i> |
| | Pilargiidae | <i>Sigambra tentaculata</i> |
| | Sabellidae | <i>Euchone alicaudata</i> |
| | Spionidae | <i>Aquilaspio krusadensis</i> |
| <i>Minuspio multibranchiata</i> | | |
| <i>Paraprionospio coora</i> | | |
| Terebellidae | <i>Amphitrite oculata</i> | |
| | <i>Thelepus toyamaensis</i> | |
| | | |
| 4 | Capitellidae | <i>Capitella capitata</i> |
| | Chaetopteridae | <i>Spiochaetopterus koreana</i> |
| | Dorvilleidae | <i>Dorvillea rudolphi</i> |
| | Spionidae | <i>Minuspio pulchra</i> |
| | | <i>Paraprionospio patiens</i> |

사 사

이 논문의 완성도를 높이기 위해 세심하게 검토해 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다. 이 논문은 2023년도 국립수산과학원 친환경양식어업육성사업(P2023010)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- [1] Aguado-Gimenez, F., A. Marin, S. Montoya, L. Marin-Guirao, A. Piedecausa, and B. Garcia-Garcia(2007), Comparison between some procedures for monitoring offshore cage culture in western Mediterranean Sea: Sampling methods and impact indicators in soft substrata, *Aquaculture*, Vol. 271, pp. 357-370.
- [2] Belan, T. A.(2003), Benthos abundance pattern and species composition in conditions of pollution in Amursky Bay (the Peter the Great Bay, the Sea of Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 46, pp. 1111-1119.
- [3] Borja, A. and B. G. Tunberg(2011), Assessing benthic health in stressed subtropical estuaries, eastern Florida, USA using AMBI and M-AMBI, *Ecological Indicators*, Vol. 11, No. 2, pp. 295-303.
- [4] Borja, A., J. Franco, and V. Perez(2000), A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environment, *Marine pollution bulletin*, Vol. 40, No. 12, pp. 1100-1114.
- [5] Borja, A., S. Main, R. Nunez, and I. Muxika(2014), Is there a significant relationship between the benthic status of an area, determined by two broadly-used indices, and best professional judgment?, *Ecological indicators*, Vol. 45, pp. 308-312.
- [6] Bouchet, V. M. P. and P. G. Sauriau(2008), Influence of oyster culture practices and environmental conditions on the ecological status of intertidalmudflats in the Pertuis Charentais (SW France): a multi-index approach, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 56, pp. 1898-1912.
- [7] Buschmann, A. H., V. A. Riquelme, M. C. Hernandez-Gonzalez, D. Varela, J. E. Jimenez, L. A. Henriquez, P. A. Vergara, R. Guinez, and L. A. Filun(2006), Review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific, *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 63, pp. 1338-1345.
- [8] Callier, M. D., C. W. McKindsey, and G. Desrosiers(2008), Evaluation of indicators used to detect mussel farm influence on the benthos: two case studies in the Magdalen Islands, Eastern Canada, *Aquaculture*, Vol. 278, pp. 77-88.
- [9] Chainho, P., J. L. Costa, M. L. Chaves, D. M. Dauer, and M. J. Costa(2007), Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 54, No. 10, pp. 1586-1597.
- [10] Choi, J. W. and J. Y. Seo(2007), Application of Biotic Indices to Assess the Health Condition of Benthic Community in Masan Bay, Korea, *Ocean and Polar Research*, Vol. 29(4), pp. 339-348.
- [11] Cromey, C. J., T. D. Nickell, and K. D. Black(2002), DEPOMOD-modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farm, *Aquaculture*, Vol. 214, No. 1-4, pp. 211-239.
- [12] Dauer, D. M.(1993), Biological criteria, environmental health and estuarine macrobenthic community structure, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 26, No. 5, pp. 249-257.
- [13] Dauvin, J. C., T. Ruellet, N. Desroy, and A. L. Janson(2007),

어장환경평가에 사용하는 저서생태계 건강도지수(Benthic Health Index)에 대한 소개

- The ecological quality status of the Bay of Seine and the Seine estuary: use of biotic indices, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 55, No. 1-6, pp. 241-257.
- [14] Diaz, R. J., M. Solan, and R. M. Valente(2004), A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality, *Journal of environmental management*, Vol. 73, No. 3, pp. 165-181.
- [15] Ervik, A., P. K. Hansen, J. Aure, A. Stigebrandt, P. Johannessen, and T. Jahnsen(1997), Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming I. The concept of the MOM system (Modeling-Ongrowing fish farms-Monitoring), *Aquaculture*, Vol. 158, No. 1-2, pp. 85-94.
- [16] FOC(2018), Regulating and monitoring British Columbia's marine finfish aquaculture facilities 2018, Fisheries and Oceans Canada, Canada, p. 23.
- [17] Giangrande, A., M. Licciano, and L. Musco(2005), Polychaetes as environmental indicators revisited, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 50, No. 11, pp. 1153-1162.
- [18] Giles, H.(2008), Using Bayesian networks to examine consistent trends in fish farm benthic impact studies, *Aquaculture*, Vol. 274, pp. 181-195.
- [19] Gillett, D. J., S. B. Weisberg, T. Grayson, A. Hamilton, V. Hansen, E. W. Leppo, ... and K. I. Welch(2015), Effect of ecological group classification schemes on performance of the AMBI benthic index in US coastal waters, *Ecol. Ind.*, Vol. 50, pp. 99-107.
- [20] Gray, J. S. and M. Elliot(2009), *Ecology of Marine Sediments: From Science to Management*, Oxford University Press.
- [21] Gray, J. S.(2000), The measurement of marine species diversity, with an application to the benthic fauna of the Norwegian continental shelf, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 250, pp. 23-49.
- [22] 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.
- [23] Hansen, P. K., A. Ervik, M. Schaanning, P. Johannessen, J. Aure, T. Jahnsen, and A. Stigebrandt(2001), Regulating the local environmental impact of intensive, marine fish farming: II. The monitoring programme of the MOM system (Modelling - Ongrowing fish farms - Monitoring), *Aquaculture*, Vol. 194, pp. 75-92.
- [24] Holmer, M., N. Marba, E. Diaz-Almela, C. M. Duarte, M. Tsapakis, and R. Danovaro(2007), Sedimentation of organic matter from fish farms in oligotrophic Mediterranean assessed through bulk and stable isotope ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$), *Aquaculture*, Vol. 262, pp. 268-280. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.09.033>.
- [25] Hu, G. and Q. Zhang(2016), Seasonal variations in macrobenthic taxonomic diversity and the application of taxonomic distinctness indices in Bohai Bay, northern China, *Ecological Indicators*, Vol. 71, pp. 181-190.
- [26] Jung, R. H., H. S. Lim, S. S. Kim, J. S. Park, K. A. Jeon, Y. S. Lee, J. S. Lee, K. Y. Kim, and W. J. Go(2002), A study of the macrozoobenthos at the intensive fish farming ground in the southern coast of Korea, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 7, No. 4, pp. 235-246.
- [27] Jung, R. H., S. P. Yoon, J. N. Kwon, J. S. Lee, W. C. Lee, J. H. Koo, Y. J. Kim, H. T. Oh, and S. E. Park(2007), Impact of fish farming on Macrobenthic polychaete communities, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 12, No. 3, pp. 151-159.
- [28] 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.
- [29] KOEM(2022), Annual Report of National Marine Ecosystem Monitoring Program, Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul, Korea.
- [30] KORDI(1995), *Marine Environment Assessment Based on the Benthic Faunal Communities*. Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, Korea, p. 49.
- [31] Lee, J. H., B. S. Koh, and H. S. Park(1997), Marine Environmental Assessment based on the Benthic Macroinfaunal Compositions in the Coastal Area of Incheon, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 30, No. 5, pp. 771-781.
- [32] Lee, J. S., R. H. Jung, K. H. Kim, J. N. Kwon, W. C. Lee, P. Y. Lee, J. H. Koo, and W. J. Choi(2004a), An evaluation of the environmental effects of marine cage fish farm: I. Estimation of impact region and organic carbon cycling in sediment using sediment oxygen consumption rate and macrozoobenthos, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 9, No. 1, pp. 30-39.
- [33] Lee, J. S., K. H. Kim, J. Yu, P. Y. Lee, R. H. Jung, W. C. Lee, J. H. Han, and Y. H. Lee(2004b), Environmental impact assessment by marine cage fish farm: II. Estimation of hydrogen sulfide oxidation rate at O₂-H₂S interface and

- sulfate reduction rate in anoxic sediment layer, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 9, No. 2, pp. 64-72.
- [34] Leonard, D. R. P., K. R. Clarke, P. J. Somerfield, and R. M. Warwick(2006), The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments, *Journal of Environmental Management*, Vol. 78, No. 1, pp. 52-62.
- [35] MOF(2022), *Statistical Yearbook of Oceans and Fisheries*, Ministry of Oceans and Fisheries, Republic of Korea, p. 566.
- [36] Muniz, P., N. Venturini, A. M. S. Pires-Vanin, L. R. Tommasi, and A. Borja(2005), Testing the applicability of a marine biotic index (AMBI) to assessing the ecological quality of soft-bottom benthic communities, in the South America Atlantic region, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 50, pp. 624-637.
- [37] 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 Directiv, *Marine pollution bulletin*, vol. 55, No. 1-6, pp. 16-29.
- [38] NFRDI(2010), *Annual Monitoring Report of Korean Marine Environment*, National Fisheries Research and Development Institute, Busan, Korea, Vol. 15, p. 434.
- [39] NFRDI(2012), *Annual Monitoring Report of Marine Environment around Aquaculture Area in Korea*, National Fisheries Research and Development Institute, Busan, Korea, Vol. 2, p. 420.
- [40] Park, H. S., J. W. Choi, and H. G. Lee(2000), Community structure of macrobenthic fauna under marine fish culture cages near the Tongyong, southern coast of Korea. *J. Korean Fish. Soc.*, Vol.33 No. 1, pp. 1-8.
- [41] Park, S., S. Kim, B. R. Sim, W. S. Jung, S. J. Park, S. J. Hong, W. C. Lee, and S. P. Yoon(2022), Environmental Impact Assessment of Fish Cage Farms Using Benthic Polychaete Communities, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 55, No. 5, pp. 598-611.
- [42] Pearson, T. H. and R. Rosenberg(1978), Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment, *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, Vol.16, pp. 229-311.
- [43] Pinto, R., J. Patricio, 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.
- [44] Quiroga, E., P. Ortiz, B. Reid, and D. Gerdes(2013), Classification of the ecological quality of the Aysen and Baker Fjords (Patagonia, Chile) using biotic indices, *Marine pollution bulletin*, Vol. 68 No. 1-2, pp. 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.041>.
- [45] Reiss, H. and I. Kroncke(2005), Seasonal variability of benthic indices: an approach to test the applicability of different indices for ecosystem quality assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 50(12), pp. 1490-1499.
- [46] 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, No. 9-10, pp. 728-739.
- [47] Seo, J. Y., H. S. Lim, and J. W. Choi(2014), Threshold value of Benthic Pollution Index (BPI) for a muddy healthy benthic faunal community and its application to Jinhae Bay in the southern coast of Korea, *Ocean Sci. J.*, Vol. 49, pp. 313-328.
- [48] Shannon, C. E. and W. Weaver(1963), *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, IL, p. 177.
- [49] Shim, J. H., Y. C. Kang, and J. W. Choi(1997), Chemical fluxes at the sediment-water interface below marine fish cages on the coastal waters off Tong-young, south coast of Korea, *The Sea, J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 2, No. 2, pp. 151-159.
- [50] Simboursa, N. and A. Zenetos(2002), Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new biotic index, *Mediterr. Mar. Sci.*, Vol. 3, pp. 77-111.
- [51] Srithongouthai, S. and K. Tada(2017), Impacts of organic waste from a yellowtail cage farm on surface sediment and bottom water in Shido Bay (the Seto Inland Sea, Japan), *Aquaculture*, Vol. 471, pp. 140-145.
- [52] Subida, M. D., P. Drake, E. Jordana, B. Mavric, S. Pinedo, N. Simboursa, ..., and F. Salas(2012), Response of different biotic indices to gradients of organic enrichment in Mediterranean coastal waters: implications of non-monotonic responses of diversity measures, *Ecological Indicators*, Vol. 19, pp. 106-117.
- [53] Teixeira, H., S. B. Weisberg, A. Borja, J. A. Ranasinghe, D. B. Cadien, R. G. Velarde, L. L. Lovell, D. Pasko, C. A. Phillips, D. E. Montagne, K. J. Ritter, F. Salas, and J. C. Marques(2012), Calibration and validation of the AZTI's

Marine Biotic Index (AMBI) for Southern California marine bays, *Ecol. Ind.*, Vol. 12, pp. 84-95.

- [54] Tomassetti, P., P. Gennaro, L. Lattanzi, I. Mercatali, E. Persia, D. Vani, and S. Porrello(2016), Benthic community response to sediment organic enrichment by Mediterranean fish farm: Case studies, *Aquaculture*, Vol. 450, pp. 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.07.019>.
- [55] Van Hoey, G., S. Degraer, and M. Vincx(2004), Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 59, pp. 599-613.
- [56] Warwick, R. M. and K. R. Clarke(1993), Comparing the severity of disturbance. a metaanalysis of marine macrobenthic community data, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 92, pp. 221-231.
- [57] Weisberg, S. B., J. A. Ranasinghe, D. M. Dauer, L. C. Schaffner, R. J. Diaz, and J. B. Frithsen(1997), An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for the Chesapeake Bay, *Estuaries*, Vol. 20, pp. 149-158.
- [58] Word, J. Q.(1978), The infaunal trophic index, in Annual Report 1978 Southern California Coastal Water Research Project, Los Angeles, California, USA, pp. 19-39.
- [59] Yokoyama, H.(2000), Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal areas- a new policy and its potential problems, *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult.*, Vol. 20, pp. 123-134.
- [60] Yoo, J. W., Y. W. Lee, J. L. Ruesink, C. G. Lee, C. S. Kim, M. R. Park, K. T. Yoon, I. S. Hwang, J. H. Maeng, R. Rosenberg, and J. S. Hong(2010), Environmental quality of Korean coasts as determined by modified Shannon-Wiener evenness proportion. *Environ Monit Assess*, Vol. 170, pp. 141-157.

Received : 2023. 11. 09.

Revised : 2023. 12. 04.

Accepted : 2023. 12. 29.