

어장환경평가의 평가지수 및 등급 산정 방법 소개

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

*, ** 국립수산과학원 어장환경과 연구원, *** (주)저서생물연구센터 연구원

**** 국립수산과학원 어장환경과 해양수산연구사, ***** 국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구관

Procedure of the Ecological Index and Rating Calculation Methods for Fishery Environmental Assessment

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

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

*** Resercher, Korea Benthos Research Center, Co., Ltd, Busan 48313, Korea

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

***** Principal Researcher, Oceanic Climate and Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약 : 양식장 환경관리를 위하여 여러 나라에서 양식장 환경관리시스템을 구축하고 있으며, 어장환경평가가 그중 하나이다. 2013년에 개정된 국내 어장관리법에는 어류가두리양식장 면허를 연장할 때 어장환경평가를 받도록 명시되어 있다. 어장환경평가는 과학적 분석을 통한 평가를 바탕으로 양식장 환경 개선 조치를 실행하여, 지속 가능한 어업생산 조성, 어장 생산력 증가, 어업인의 소득 증가를 목적으로 한다. 어장환경평가의 평가지표는 저서다모류 군집을 기초로 한 생물지수인 저서동물지수(BHI)와 총유기탄소량(TOC)이며, 두 항목을 점수화하여 단일등급으로 산출하여 평가에 사용한다. 본 연구는 어장환경평가지표인 BHI와 TOC의 선정 과정과 산출된 평가 등급의 생태학적 의미를 설명한다.

핵심용어 : 어장환경평가, 저서동물지수, 저서다모류, 총유기탄소량, 평가지수

Abstract : Several countries are establishing management systems for aquaculture environment, and fishery environment assessment is one of them. The fishery management law amended in 2013 stipulates that a fishery environment assessment should be performed when a fish cage farm's license is extended. The purpose of the fishery environment assessment is to promote sustainable fishery, increase the fishery production capacity, and increase the fishermen incoming by implementing evaluation and improvement measures through scientific methods. The analysis items of fishery environment assessment include the Benthic Health Index (BHI), which is a biological index based on the macrobenthic polychaetes community, and total organic carbon (TOC), and the two items are scored and used for evaluation as a single grade. This study explains the selection process of BHI and TOC, which are evaluation items for fishing ground, and ecological significance of the calculated evaluation grades.

Key Words : Fishery environment assessment, Benthic health index (BHI), Benthic polychaete, Total organic carbon, Ecological Index

1. 서론

전세계 양식어업의 비율은 증가하는 추세이며(FAO, 2018; Neofitou et al., 2019; Tičina et al., 2020), 국내 양식어업은 전체 양식어업이 일반해면어업에 비해 약 2.5배의 생산량을 차지

한다(KOSIS, 2021). 양식대상 품종 중 어류양식은 전체 생산량의 약 4%를 차지하여 타 품종에 비해 생산량이 적다. 그러나 어류양식은 타 품종과 달리 잉여사료와 배설물로 인해 상당한 양의 유기물이 가두리 바로 아래에 퇴적되기 때문에 패류나 해조류 양식 등 또는 비급이 방식의 양식보다는 퇴적물에 미치는 영향이 크다(Karakassis et al., 2000; Holmer and Frederkinson, 2007; Yokoyama and Ishihi, 2010; Wu, 1995; Ji et

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

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

al., 2021). 특히 어류가두리 바로 아래에서 약 30m까지 양식장 기원 유기물이 직접 영향을 미치며, 퇴적된 유기물 분해로 산소가 고갈되어 무생물 구역이 형성되는 등 심각한 악영향을 주고 있다(Karakassis et al., 2000; Holmer and Frederikson, 2007; Yokoyama and Ishihi, 2010; Wu, 1995; Ji et al., 2021).

양식장 환경관리를 위하여 여러 나라에서 양식장 환경관리시스템을 구축하고 있으며 국내에서는 어장환경평가제도가 이에 해당한다(Ervik et al., 1997; Yokoyama, 2003; FOC, 2018). 어장평가제도는 양식장 환경의 미흡한 관리로 환경이 악화된 양식장에 법적인 행정조치를 수반하기 때문에, 평가의 정확성과 신뢰성은 행정기관과 어민 모두에게 매우 중요하다. 어장환경평가는 노르웨이, 일본, 캐나다 등에서 시행되고 있으며, 분석항목으로 노르웨이와 일본은 이화학적 특성과 생태적 특성을 사용하고, 캐나다는 이화학적 특성만을 사용한다. 이화학적인 특성의 경우 노르웨이는 산화환원전위도, 일본은 산화발생황화물(AVS), 캐나다는 황화물농도(sulfide)로 나라마다 다른 항목을 채택하고 있으며, 생태적인 특성은 노르웨이와 일본 모두 저서동물을 사용한다. 저서동물 항목의 경우에 일본은 종의 출현 유무와 종수를 사용하며, 노르웨이는 종수로 등급을 산정한다. 종의 출현 유무나 출현종수는 유기물량에 일차 함수로 변화하지 않고 퇴적상이나 계절적 요인 등에 따른 변화가 크며, 특히 출현 종수는 채집 면적과 표본 개수와 같은 채집 노력량에 영향을 받는다(Gray, 2000; Yoo et al., 2011). 따라서 평가항목으로 사용하기에 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유럽을 중심으로 생태지수들을 개발하여 사용하고 있으며, 생태지수는 채집면적, 시기, 퇴적상 등에 영향을 적게 받는다는 장점이 있다(Simbouira and Zenetos, 2002; Subida et al., 2012).

국내에서는 어장관리법 제 11조의2 “수산동식물의 안정성과 어장의 생산성을 유지하기 위하여 어장에 대하여 그 어업면허, 어업허가 또는 양식업면허의 유효기간이 끝나는 날의 1년 전까지 어장환경에 관한 평가를 하여야 한다”에 따라 어장환경평가를 시행하고 있다. 또한 어장환경평가 대상 및 평가항목 등은 어장관리법 시행규칙 제 3조의 2의 “어장환경에 관한 평가의 대상은 어류를 양식하는 가두리양식업 어장으로 하고, 평가항목은 다음 각 호와 같다”에 명시되어 있는 것처럼 어류가두리 양식장을 대상으로 진행되고 있으며, 평가항목은 저서동물지수와 총유기탄소량이 사용되고 있다. 2014년부터 2021년까지 총 98개의 어류가두리 양식장에서 평가가 진행되었으며, 양식산업발전법의 면허심사평가제가 시행되는 2025년부터는 다른 양식어업(해조류, 패류, 어류등, 복합, 협동, 외해양식)에서도 어장환경평가가 확대 시행될 예정이다. 본 논문에서는 현재 국내 어장환경평가에

사용되고 있는 평가지표와 평가항목에서 구분한 등급의 생태적 의미 등에 대해 전반적인 소개를 하고자 한다.

2. 어장환경평가 평가항목 결정

어장환경평가 평가항목은 첫 번째, 국외 어장환경평가에서 사용중인 항목을 참조하여, 두 번째, 생태계에 미치는 영향을 평가할 수 있고, 세 번째, 환경변화의 인과성을 유추할 수 있으며, 네 번째, 시료의 보존성을 가지는 항목 중에서, 다섯 번째, 분석의 정확도와 수치의 정량화를 고려하여 선정하였다.

해양생태계 건강성 평가는 수질, 퇴적물 그리고 생물(독성)평가로 크게 구분할 수 있다. 수질 평가는 해수중의 이화학적 성분 분석으로 수행되는데, 해수 유동에 따라 시공간적 변화가 크고, 실제 생물에 미치는 반응을 판단하는 데 어려움이 있다. 퇴적물은 해수와 비교해 유동성이 작아 시공간적 변화가 상대적으로 작다. 또한 양식시설물의 영향이 시설물 아래 퇴적물에 집중되기 때문에 양식의 영향을 평가하기에 적합하다. 국외 어장환경평가에서는 퇴적물평가에 산화환원전위도와 황화물농도를 사용하고 있다. 두 항목은 해저면에 퇴적된 유기물의 분해 과정에서 나타난 산소와 황화물의 농도를 측정하는 방법이다. 측정 방법이 쉽지만 정확도가 낮으며, 공기에 노출되었을 때 변화가 크고 시료의 보관이 어려운 단점이 있다. 총유기탄소(TOC, Total Organic Carbon)는 유기물을 산화시켜 이산화탄소량으로 변환된 탄소량을 측정하는데, 표준물질을 통한 검증이 수반하기에 신뢰도가 높고 측정값 차이가 작다. 타 분석과 비교해 분석 비용 및 시간이 더 소요되지만, 분석 시스템을 갖춘 환경이라면 빠른 시간에 정확한 자료분석이 가능하다.

따라서, 법적인 행정조치가 수반되는 어장환경평가에서는 신속한 시료 분석, 시료 보관의 안정성, 분석 결과의 신뢰성 등을 고려할 때 TOC가 적합한 항목으로 판단되어 어장환경평가항목으로 선정하였다.

저서동물은 오염원이 최종적으로 축적되는 퇴적물 중 수층과 퇴적물의 경계면에 서식하고, 대부분 정착성이거나 이동 능력에 매우 작아서 오염의 영향을 직접 받는다. 환경의 변화를 반영하기에 적당한 생활사를 가지고 있으며, 교란 종류와 정도에 따라 다양한 반응을 보이며, 분류학적으로도 다양한 종들로 구성되어 교란의 정도를 평가하기에 적절하다(Bilyard, 1987; Pearson and Rosenberg, 1978; Sanders, 1958; Warwick, 1993). 서식 양상 및 생활사 측면에서 다양한 해양 오염 연구에 적합한 것으로 알려진 저서동물군집(Bilyard, 1987; Warwick, 1993)은 특히 유기물 오염 정도에 따라 매우 일관성 있는 변화를 보여 생태계의 교란 여부를 판정하는 연구

에 신뢰성 있는 결과를 주는 것으로 알려져 있다(Pearson and Rosenberg, 1978; Samuelson, 2001; Rosenberg and Nilson, 2005). 저서동물체를 이용한 평가는 종별 분포 형태, 서식 형태, 유기물에 대한 반응 정도에 따라 각각의 종을 카테고리 구분하고, 산출식을 사용하여 수치화 한 지수들을 사용하는 추세이다. 유기물 오염 정도에 따른 생물 반응에 따라 산출된 지수에는 AMBI(Borja et al., 2000), M-AMBI(Multivariate Azti's Marine Biotic Index, Muxika et al, 2007), BQI(Benthic Quality Index, Rosenberg et al., 2004) 등이 있다.

국외에서 사용되고 있는 지수들에 포함된 종과 국내에서 서식하는 종이 일치하지 않아 국외 지수들을 바로 적용하는 것은 큰 오류가 발생할 수 있다. 따라서 국립수산과학원에서 국내 출현종을 기반으로 하여 연안 및 해양환경에 적용 가능한 저서동물지수(BHI, Benthic Health Index)를 개발하였고, 이 지수를 어장환경평가 분석 시 생물학적 지표로 선정하였다. BHI 산출을 위해 구분된 4개의 생태그룹에 해당하는 종의 개체수를 기본으로 지수를 계산하며 식은 다음과 같다.

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

$N_i(i=1-4)$ 은 각 그룹에서 출현한 개체수의 합을 나타내며, $Ntotal$ 은 전체 출현개체수이다. 유기물 농도와 관련된 각 그룹중의 생태적 특징은 그룹 1이 낮은 유기물 농도에서 높은 밀도로 출현하거나 출현 빈도와 밀도가 낮은 종, 그룹 2는 유기물의 농도와 상관없이 고른 분포를 하는 종, 그룹 3은 비교적 높은 유기물 농도에서 높은 밀도로 출현하는 종, 그룹 4는 계절적으로 무생물역이 발생하는 해역에서 높은 밀도로 출현하거나 높은 유기물 농도에서 출현하는 종을 의미한다. BHI는 0~100 범위에서 산출된다(국립수산과학원 고시 제2020-15, 어장환경평가의 방법 및 절차 등에 관한 규정).

3. 분석 항목의 등급

분석 항목으로 선정된 BHI와 TOC는 4개의 등급으로 나뉘며, 각 등급의 범위는 Table 1에 나타내었다. 먼저 TOC의 각 등급의 범위를 기존에 보고된 자료를 국내의 문헌자료에서 연구된 수치와 비교하였다.

TOC의 경우, 1등급과 2등급 경계 농도인 10 mg/g dry는 지중해 연안에서 수행된 Magni et al.(2009)의 연구에서 유기물이나 스트레스로 인해 다양성이 감소할 확률이 낮은 TOC 범위(<10 mg/g)와 일치하였다(Table 2). 또한 일본 어류양식장의 환경지표 기준치 설정을 위해 수행된 연구에서 “부영양화 지역”과 “경고 지역”의 경계에 해당하는 TOC 범위(>10.3 mg/g dry)와 유사하였다(Uede, 2008). 한계점(critical point)으로

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

해석할 수 있는 3등급과 4등급 경계 농도인 25 mg/g dry는 일본의 어류양식장에서는 30 mg/g dry 이상(Yokoyama et al., 2004), 일본 동경만의 무생물 발생해역의 18—38 mg/g dry(Kodama et al., 2012), 체사피크만의 무생물 발생해역의 26—30 mg/g dry(Llansò, 1992) 그리고 Hyland et al.(2005)의 연구에서 한계점으로 설정한 35 mg/g dry 이상보다 낮은 농도이다. 그러나 우리나라의 대표적인 빈산소수괴 발생해역인 마산만과 가막만의 빈산소 발생 정점에서의 농도와 유사한 수준이며, Albayrak et al.(2006)의 연구에서 생태학적 상태가 poor인 22 mg/g dry와 유사한 수준이다. 따라서 앞서 구분된 TOC의 범위는 국내 양식장 평가를 위한 어장환경평가 지수에 적용하는 데 문제가 없는 것으로 판단하였다.

BHI와 TOC의 각 등급이 의미하는 생태학적 특징을 Table 3에 나타내었다. 1등급의 BHI는 유기물 오염지표종이 거의 없는 군집의 상태를 나타내고 TOC는 유럽에서 물관리를 위해 만든 생태등급(EQS: Ecological Quality Status)의 High, Good에 해당하는 건강한 어장의 기준을 의미한다. 2등급의 BHI는 수하식 양식장 밀집 해역에서 산출되는 값이 포함되며, 유기물 오염지표종 일부가 출현하는 군집 형태를 나타낸다. TOC는 유럽의 물관리 생태등급의 Moderate에 해당하며, 일본 어류양식장의 주의 수준에 해당하는 농도이다. 3등급의 BHI는 유기물 오염지표종이 연중 높은 밀도로 분포하며 수하식 밀집 지역 중 내만과 항만 등에서 출현하는 군집의 상태이며, TOC는 유럽의 물관리 생태등급의 Poor에 해당한다. 4등급의 BHI는 심각한 오염 지역에서만 출현하는 기회종이 출현하는 군집이며, TOC는 국내 마산만, 일본 동경만, 미국 체사피크만 등의 무생물해역에서 산출되는 값이다.

4. 현장조사 방법

평가 시료를 채집할 때는 샘플의 대표성, 결과의 신뢰성, 채집 및 분석과정에서 경제성 등이 고려되어야 한다. 채집 횟수(채집면적), 채집 시기, 채집 위치 등 조사방법의 적정성에 대해 검토하였다. 먼저, 채집 횟수와 시료 채집 위치를 결정하기 위하여 여수(Sample 1), 한산-거제(Sample 2—4), 고성-자란(Sample 5—7)에 위치한 어류가두리양식장에서 조사

Table 2. The threshold of total organic carbon and the ecological characteristic compared to other studies

Region	Ecological characteristic	Total organic carbon(mg/g)	Reference
Mediterranean coastal lagoons	First threshold	10	Magni et al. (2009)
	Second threshold	28	
Wakayama, Japan (Fish farm)	Peak point (the health area)	< 6.2	Uede (2008)
	Warning point (the eutrophicating area) (the warning area)	6.2–10.3	
	Critical point	10.4–16.3	
		16.4 >	
Kumano—nada, Japan(Fish farm)	Healthy zone	—	Yokoyama et al. (2004)
	Cautionary zone (hypoxic condition)	20–30	
	Critical zone (anoxic condition)	>30	
Sea of Marmara	High (ecological quality status)	1–5.9	Albayrak et al. (2006)
	Good	6–11.9	
	Moderate	12–21.9	
	Poor	>22	
USA, UK, Japan	First threshold	<10	Hyland et al. (2005)
	Second threshold	10.1–35	
	Critical point	>35	
Chesapeake Bay	Defaunation (summer hypoxic event)	26–30 (aver. 28)	Llansò (1992)
Tokyo Bay, Japan	Defaunation	18–38 (aver. 30)	Kodama et al. (2012)
Gamak Bay, Korea	Azoic community	15–27(aver. 20)	NIFS (Field observation data)
Masan Bay, Korea	Azoic community	aver. 26	NIFS (Field observation data)

를 수행하였다. 시료 채집 횟수는 각 양식장에서 5회 반복 채집을 하여 누적 면적에 대한 BHI 등급의 변화를 비교하였으며, van Veen grab을 사용한 1회 채집 면적은 0.05 m²이다. 분석 결과 7개 양식장 중 Sample 1을 제외한 6개 양식장에서 2회 누적(0.1 m²) BHI와 5회 누적(0.25 m²) BHI의 등급에 차이가 없었다(Table 4). 시료 채집 위치는 각 양식장에서 가두리 바로 아래(0 m)와 가두리에서 약 5 m 이격된 위치에서 시료를 채집하여 BHI의 차이를 비교하였는데, 이 때 채집 면적은 2회 누적된 자료(0.1 m²)를 사용하였다. 채집 위치에 따른 분석 결과는 가두리 아래 (0 m)와 가두리에서 5 m 이격된 지점의 BHI가 차이가 있었으며, Sample 1은 BHI 등급이 두 단계가 차이 났고, Sample 2와 7은 BHI 등급이 한 단계가 차이 났다(Fig. 1).

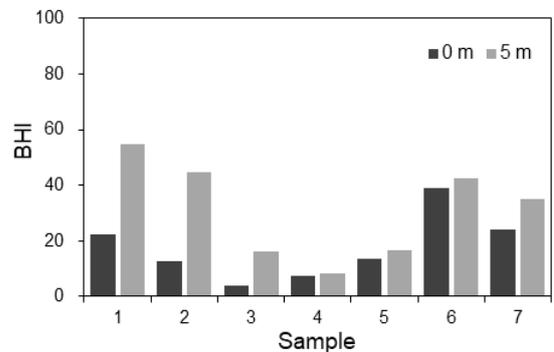


Fig 1. Difference in BHI at just below the fish cage farm (0 m) and 5 m away from the farm (Sample 1: Yeosu, Sample 2–4: Hansan-Geoje, Sample 5–7: Goseung-Jaran).

Table 3. Characteristics by grade of benthic health index and total organic carbon

Grade	BHI	Ecological feature	TOC	Status
1	> 71	No organic pollution indicator species	10.00 <	High or Good status by EQS (Ecological quality status in UK)
2	51–70	Some organic pollution indicator species appeared	10.01–17.00	As organic matter increase, the number of species, density, and diversity index increase Moderate status by EOS
3	26–50	High density of organic pollution indicator species	17.01–25.00	Poor status by EOS
4	25 <	Opportunistic species appearance	> 25.01	Possibility of azoic status when physical conditions deteriorate

어장환경평가의 평가지수 및 등급 산정 방법 소개

Table 4. BHI according to the accumulation of the number of samples (Sample 1: Yeosu, Sample 2-4: Hansan-Geoje, Sample 5-7: Goseung-Jaran; unit: m²)

Sampling area		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
Sample 1	BHI	37	26	25	26	23
	Grade	3	3	4	3	4
Sample 2	BHI	21	14	13	12	9
	Grade	4	4	4	4	4
Sample 3	BHI	5	4	4	4	3
	Grade	4	4	4	4	4
Sample 4	BHI	5	10	7	8	8
	Grade	4	4	4	4	4
Sample 5	BHI	26	15	20	19	19
	Grade	3	4	4	4	4
Sample 6	BHI	2	2	2	2	2
	Grade	4	4	4	4	4
Sample 7	BHI	41	16	20	22	24
	Grade	3	4	4	4	4

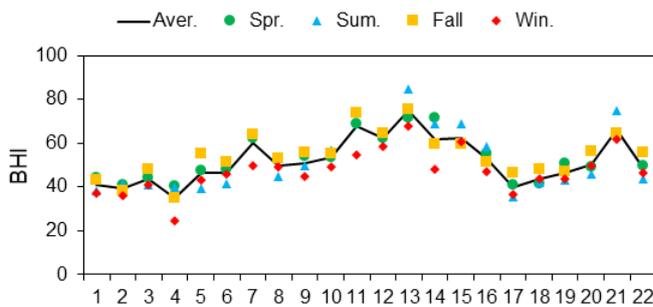
다음으로 채집 시기를 정하기 위해 한산·거제와 고성·자란의 어류가두리양식장에서 BHI와 TOC의 계절 변화를 조사하였다(Fig 2). 한산·거제는 22개의 어류가두리, 고성·자란은 15개의 어류가두리 정점에서 2월, 5월, 8월 11월에 조사를 수행하였으며, 각 정점의 가두리 바로 아래(0 m)에서 2회 반복

채집(채집면적: 0.1 m²)하였다. 분석 결과 BHI는 계절에 따른 편차가 비교적 적어 앞서 구분한 등급의 기준을 훼손할 가능성은 크지 않은 것으로 판단된다. TOC는 고성·자란에서는 설정한 등급을 변화시킬 정도의 차이는 없었으나, 한산·거제의 일부 정점에서는 봄과 여름철의 TOC 변화가 등급을 변화시킬 가능성이 있는 것으로 나타났다. 현장조사 방법에 관한 분석 결과 어장환경평가 시료는 어류가두리 바로 아래에서 가두리 당 2회 반복(0.1m²) 채집 하는 것이 적당하며, 조사 시기는 일정한 시간에 조사하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

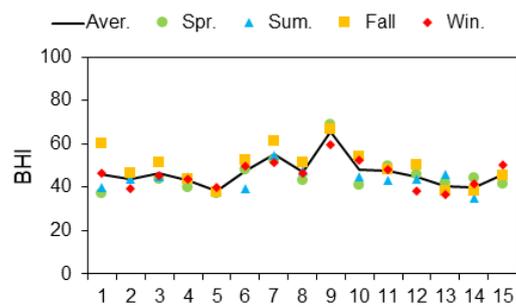
5. 어장환경평가 등급 산정

어장환경평가제도는 정책과정에서 어업면허의 연장과 관련하여 의사결정자의 판단을 위한 정보로 사용된다. 어장환경평가항목의 BHI와 TOC 4개 등급은 현장 조사와 국내의 문헌자료 등 과학적 기반 자료와 전문가의 의견 등을 반영하여 구분한 등급이다. 의사결정자의 정책 결정과정이나 결정을 받아들이는 입장에서는 단일 등급의 사용이 용이하다. 따라서 어장환경평가 등급은 BHI와 TOC의 1-4의 등급을 각각 1-4점으로 점수화하고, BHI와 TOC의 점수를 합하여 2로 나눈 이후 소수점 자리는 절삭하여 사용한다(Table 5). 어장환경평가 1등급은 유기물 오염이 없는 상태를, 2등급은 유

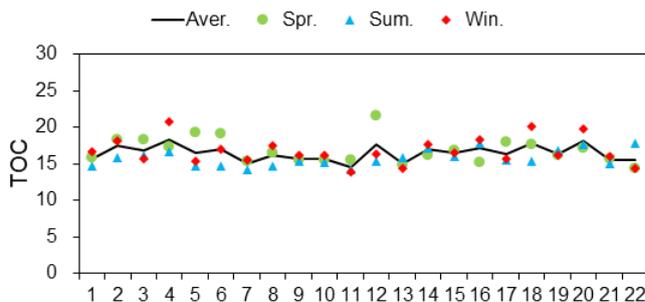
(a) Goseung-Jaran: BHI



(b) Hansan-Geoje: BHI



(c) Goseung-Jaran: TOC



(d) Hansan-Geoje: TOC

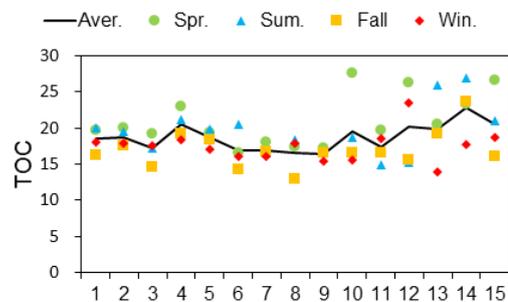


Fig. 2. Seasonal distribution of BHI and TOC (a and c: Goseung-Jaran bay, b and d: Hansan-Geoje bay).

Table 5. Procedure for the determination of benthic quality grade using TOC and BHI

Point Indices	1	2	3	4
TOC range	≤10.00	10.01–17.00	17.01–25.00	25.01≤
BHI range	71≤	51–70	26–50	≤25
Point sum.	2–3	4–5	6–7	8
Grade	1	2	3	4
Benthic quality status	Normal	Slightly polluted	Moderately polluted	Heavily polluted

기물 오염의 초기 상태를, 3등급은 유기물 오염이 상당히 진행된 상태를, 그리고 4등급은 심각한 유기물 오염 상태임을 의미한다.

어장환경평가제도는 과학적인 평가를 통해 보전, 개선 조치를 실행하고 지속 가능한 어업생산 기반을 조성하여 어장의 생산성 향상과 어업인의 소득증대를 목적으로 한다. 어장환경평가는 이러한 정책적 목표 달성을 위하여, 악화된 3, 4등급의 양식장에 어장환경 개선 및 어장 시설물 위치 이동 등의 행정조치 사항을 주어, 1, 2등급 환경으로 개선하고자 한다. 2014년부터 2021년까지 8년 동안 98개의 어류가두리양식장에서 어장환경평가가 수행되었으며, 이 중 3등급 양식장이 39개(39.8%), 4등급 양식장이 9개(9.2%)였다. 3등급과 4등급의 양식장은 면허 연장 시 4–5년의 면허 기간이 부여되었으며, 현재까지 21개의 양식장에서 재평가가 진행되었다. 재평가 결과 4등급이었던 5개 양식장은 모두 3등급으로 평가지표가 호전되었다. 3등급이었던 16개 양식장은 14개 양식장에서 등급의 변화가 없으나 7개 양식장은 같은 등급 내에서 평가등급이 상승하였다. 즉 어장환경평가 수행 이후 재평가가 수행된 양식장의 약 57.1%에서 유기물 오염이 개선된 것으로 나타났다.

어장환경평가 등급은 앞으로 시행될 양식산업발전법의 면허 심사·평가제의 평가 기준 항목 중 하나이다. 어장환경평가의 결과를 토대로 해역의 생태계 건강도를 보다 바르게 이해할 수 있으며, 이러한 이해는 양식장 환경관리제도 확립에 기여할 수 있고 더 나은 정책으로 발전시킬 수 있는 정보로 제공될 수 있을 것이다.

사 사

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

References

- [1] Albayrak S., H. Balkis, A. Zenetos, A. Kurun, and C. Kubanc(2006), Ecological quality status of coastal benthic ecosystems in the Sea of Marmara, Marine Pollution Bulletin, Vol. 52, No. 7, pp. 790-799.
- [2] Bilyard, G. R.(1987), The value of benthic infauna in marine pollution monitoring studies, Marine Pollution Bulletin, Vol. 18, No. 11, pp. 581-585.
- [3] Borja, A., J. Franco, and V. Pérez(2000), A Marine Biotic Index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments, Marine Pollution Bulletin, Vol. 40, No. 12, pp. 1100-1114.
- [4] 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.
- [5] FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)(2018), The state of world fisheries and aquaculture 2018-meeting the sustainable development goals. Rime Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- [6] FOC(Fisheries and Oceans Canada)(2018), Regulating and monitoring British Columbia's marine finfish aquaculture facilities 2018. Fisheries and Oceans Canada, Canada. 23p.
- [7] 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.
- [8] Holmer, M. and M. S. Frederiksen(2007), Stimulation of sulfate reduction rates in Mediterranean fish farm sediments inhabited by the seagrass *Posidonia oceanica*, Biogeochemistry, Vol. 85, No. 2, pp. 169-184.
- [9] Hyland, J., L. Balthis, I. Karakassis, P. Magni, A. Petrov, J. Shine, O. Vestergaard, and R. Warwick(2005), Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos, Marine Ecology Progress Series, Vol. 295, pp. 91-103.
- [10] Ji, W., H. Yokoyama, J. Fu, and J. Zhou(2021), Effects of intensive fish farming on sediments of a temperate bay characterised by polyculture and strong current, Aquaculture reports, Vol. 19, 100579.
- [11] 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.
- [12] Kodama, K., J. H. Lee, M. Oyama, H. Shiraishi, and T. Horiguchi(2012), Distribution of benthic macrofauna in relation to hypoxia and organic enrichment in a eutrophic coastal bay, Marine Environmental Research, Vol. 76, pp. 80-89.
- [13] KOSIS(Korean statistical information service)(2021), Fishery production survey, Source: ministry of agriculture, food and rural affairs.
- [14] Llansò, R. J.(1992), Effects of hypoxia on estuarine benthos: the lower Rappahannock river (Chesapeake Bay), a case study, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 35, No. 5, pp. 491-515.
- [15] Magni, P., D. Tagliapietra, C. Lardicci, L. Balthis, A. Castelli, S. Como, G. Frangipane, G. Giordani, J. Hyland, F. Maltagliati, G. Pessa, A. Rismondo, M. Tataranni, P. Tomasetti, and P. Viaroi(2009), Animal-sediment relationships: Evaluating the 'Pearson-Rosenberg paradigm' in Mediterranean coastal lagoons, Marine Pollution Bulletin, Vol. 58, No. 4, pp. 478-486.
- [16] Muxika, I., A. Borja, and J. Bald(2007), Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive, Marine Pollution Bulletin, Vol. 55, pp. 16-29.
- [17] Neofitou, N., K. Papadimitriou, C. Domenikiotic, L. Tziantziou, and P. Panagiotaki(2019), GIS in environmental monitoring and assessment of fish farming impacts on nutrients of Pagasitikos Gulf, Eastern Mediterranean, Aquaculture, Vol. 501, pp. 62-75.
- [18] Pearson, T. H. and R. Rosenberg(1978), Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment, Oceanography and Marine Biology Annual Review, Vol. 16, pp. 229-311.
- [19] Rosenberg, R. and H. C. Nilsson(2005), Deterioration of soft-bottom benthos along the Swedish Skagerrak coast, Fournal of Sea research, Vol. 54, No. 3, pp. 231-242.
- [20] Rosenberg, R., M. Blomqvist, H. C. Nilsson, H. Cederwall, and A. Dimming(2004), Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive. Marine Pollution Bulletin, Vol. 49, pp. 728-739.
- [21] Samuelson, G. M.(2001), Polychaetes as indicators of environmental disturbance on subarctic tidal flats, Iqaluit, Baffin Island, Nunavut Territory, Marine Pollution Bulletin, Vol. 42, No. 9, pp. 733-741.
- [22] Sanders, H. L.(1958), Benthic Studies in Buzzards Bay. I, Animal-Sediment Relationships, Limnology and oceanography, Vol. 3, No. 3, pp. 245-258.
- [23] Simboura, N. and A. Zenetos(2002), Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystem, including a new biotic index, Mediterranean Marine Science, Vol. 3, No. 2. pp. 77-111.
- [24] Subida, M. D., P. Drake, E. Jordana, B. Mavric, S. Pinedo, N. Simboura, J. Torres, and F. Salas(2012), Response of different biotic indices to gradients of organic enrichment in Mediterranean coastal water, implications of non-monotonic responses of diversity measures, Ecological indicators, Vol. 19, pp. 106-117.
- [25] Tićina, V., I. Katavić, and L. Grubišić(2020), Marine aquaculture impacts on marine biota in oligotrophic environments of the Mediterranean sea-a review, Frontiers in Marine Science, Vol. 7, p. 217.
- [26] Uede, T.(2008), Validity of acid volatile sulfide as environmental index and experiment for fixing its standard value in aquaculture farms along the coast of Wakayama prefecture, Japan, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 74, No. 3, pp. 402-411.
- [27] Warwick, R. M.(1993), Environmental impact studies on marine communities: pragmatcal considerations, Australian Journal of Ecology, Vol. 18, No. 1, pp. 63-80.
- [28] Wu, R. S. S.(1995), The environmental impact of marine fish culture: towards a sustainable future, Marine Pollution Bulletin, Vol. 31, pp. 159-166.
- [29] Yokoyama, H., M. Inoue, and K. Abo(2004), Estimation of the assimilative capacity of fish-farm environments based on the current velocity measured by plaster balls, Aquaculture, Vol. 240, pp. 233-247.
- [30] Yokoyama, H.(2003), Environmental quality criteria for fish farms in Japan, Aquaculture, Vol. 226, pp. 45-56.
- [31] Yokoyama, H. and Y. Ishihi(2010), Bioindicator and biofilter function of *Ulva* spp. (Chlorophyta) for dissolved inorganic nitrogen discharged from a coastal fish farm-potential role in integrated multi-trophic aquaculture, Aquaculture, Vol. 310, No. 1, pp. 74-83.
- [32] Yoo, J. W., D. G. Lee, B. S. Kho, S. W. Lee, D. U. Han, K.

H. Choi, C. S. Kim, and J. S. Hong(2011), Review and proposition of biological indicators for a new ecological grading system of tidal flats in Korea, Ocean and Polar Research, Vol. 33, No. 1, pp. 85-97.

Received : 2022. 07. 19.

Revised : 2022. 08. 16.

Accepted : 2022. 08. 29.