

어장건강도 평가지수를 이용한 진해만 내 굴 양식장 건강도 변동 평가

고영신¹ · 이동현^{2,†}

¹한양대학교 해양융합과학과 대학원생
²부경대학교 지구환경시스템과학부 해양학전공 교수

Evaluation of Health Variability in Shellfish Aquaculture (oyster farms, Jinhae Bay) Using Aquaculture Health Index

Young-Shin Go¹ and Dong-Hun Lee^{2,†}

¹Graduate Student, Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan 15566, Korea
²Professor, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

우리나라의 양식어장환경은 지속적인 수질관리 대책의 시행으로 수질이 점차 개선되는 추세이다. 그럼에도 불구하고, 2010년 이후 연간 수하식 패류(굴) 생산량은 감소하고 있는 실정이다. 따라서 지속적인 양식생물 생산성 향상을 위해서 어장건강도 관점에서 어장진단 및 평가가 필요하다. 본 연구에서 수하식 패류양식장에서 어장건강도 지수를 효과적으로 구축하기 위해, 굴양식장(진해만) 내 수질(영양염류, Chl-a, 기초생산력, 용존산소)/퇴적질(총유기탄소, 총황, 산화발성황화물, 중금속, 다환방향족 탄화수소), 이상재해(유해조류 대변성, 빈산소수괴 발생, 고/저온 발생, 저염분 발생), 식품안전(대장균, 중금속, 다환방향족 탄화수소) 자료를 확보하였다. 더욱이, 최근 5년간 수하식 패류어장 모니터링 자료를 기반으로 기존의 어장건강도 평가 지표 기준을 재설정 하였다. 특히, 주성분분석 결과를 토대로 수하식 양식장 내 직, 간접적으로 영향을 미치는 핵심지표의 가중치 설정을 통해 기존 어장건강도 평가 방법보다 발전된 결과를 도출하였다. 마지막으로, 빈산소수괴 및 부영양화 발생을 차별적으로 설정하여 어장건강도 지수간의 합리적인 상호작용을 입증하였다. 따라서, 본 연구의 결과는 양식 환경의 체계적인 관리와 양식 운영의 지속 가능한 성장에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract – In Korean aquaculture environments, the patterns of water quality were gradually improved by continuous management approaches. Nevertheless, the one of aquaculture systems (e.g., shellfish) reported their decreased production after 2010. As aspect of the improvement of shellfish productivity, suitable strategy can require systematical diagnosis/evaluation involved in the aquaculture health. In the shellfish aquacultures (Jinhae Bay), we investigated the water quality (nutrients, Chl-a, primary production, dissolved oxygen), sediment quality (total organic carbon, total sulfur, acid volatile sulfide, heavy metal, polycyclic aromatic hydrocarbon), abnormal disaster (harmful algae bloom, hypoxia, high/low temperature, low salinity), food safety (Escherichia coli, heavy metal, polycyclic aromatic hydrocarbon) to effectively establish the evaluation index of aquaculture health. In addition, we intended to re-establish the evaluation criteria of aquaculture health by using aquaculture monitoring data (hanging shellfish data during 5 years). Especially, based on principal component analysis, our results provided more developed strategies of aquaculture health index by adding the weighed values of key components within shellfish aquacultures. Finally, these approaches were simulated along the expected scenarios such as hypoxia and eutrophication, demonstrating reasonable interaction among aquaculture health parameters. Thus, our approaches may provide valuable insights for systematic management of aquaculture environmental and sustainable growth of aquaculture operation.

Keywords: Aquaculture health index(양식어장건강도), Aquaculture evaluation criteria(양식어장평가기준), Shellfish farming(패류양식), Organic matter(유기물질)

[†]Corresponding author: thomaslee0118@gmail.com

1. 서 론

전 세계적인 양식산업의 발전과 함께 국내 양식생산량은 총 233만톤을 기록하며(2021년 기준), 최근 5년간 약 4.6% 증가했다(KOSIS[2021]). 이와 관련하여 경상남도 양식어업의 총생산량(약 34만톤, 2010년)은 대부분 패류양식(29만톤, 약 85%)이 차지하고 있으며, 특히 통영-거제해역(3,553ha)을 중심으로 굴양식이 많은 비중(82.3%)을 차지하고 있다(Choi *et al.*[2017]). 하지만, 남해안(진해만)의 경우, 1990년대 이후 무분별한 면허발급과 적조/빈산소 수괴와 같은 자연재해의 빈번한 발생으로 굴의 대량폐사가 지속적으로 일어나는 실정이다(Jin *et al.*[2019]). 이로 인해 한국연안 내 효과적인 양식어장 관리의 필요성(해수-퇴적물 및 양식생물)이 대두되며, 양식패류의 지속적인 생산성 확보가 요구되는 실정이다. 따라서 연안생태계의 건강성을 향상시키고 높은 생산성과 회복력을 유지시키기 위해 국내를 중심으로 서식지 환경 기반 어장건강도에 대한 체계적인 평가기법 및 전략에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다(Go *et al.*[2023]).

어장건강도 개념은 해양생태계의 하위 개념으로 인식하여 생태계 등급을 어장건강도 등급으로 판단하는 것이 아닌 양식생물의 서식처, 성장에 영향을 미치는 인자뿐만 아니라 직, 간접적으로 어장건강도에 영향을 미치는 자연재해, 위생안전까지 고려된 어장환경 평가 기준이다. 어장건강도 지표를 활용하여 살포식 패류 양식어장을(여자만, 강진만)을 대상으로 환경조건(봄, 여름 해양환경)을 토대로 발생하는 어장건강도 통합

평가방법을 제시한 바 있다(Go *et al.*[2023]). 하지만, 기존의 연구는 저층(퇴적층)에 서식하는 살포식 패류에 대한 어장건강도 평가로 기존 연구에서 설정되었던 어장건강도 평가항목 기준을 양식생물의 성장에 영향미치는 먹이조성과 물리적 서식환경이 다른 수하식 패류(굴)양식장에 적용하는데 다소 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 남해 수하식 패류 양식장이 밀집되어 있는 진해만에서 수하식 패류어장의 모니터링 자료(수층환경, 퇴적환경) 및 사회-안전매개변수(이상해황, 양식생물 위생안전)를 기반으로 건강도 평가지표 기준치 재검토 및 환경변화에 따른 기준치 변동 모의실험을 진행하고자 하였다. 또한, 수하식 양식생물에 직, 간접적으로 영향을 미치는 핵심지표의 가중치 설정을 통해 기존 어장건강도 평가 방법보다 고도화된 결과를 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역

진해만은 경상남도 남동부에 위치한 만으로 남북 방향 약 35 km, 동서 방향 약 5 km의 크기로 평균 수심이 10~20 m 정도되는 폐쇄성 내만이다. 진해만에서 해수교환은 외해와 연결된 가덕수로와 견내량수를 통하여 교환되고 대부분은 가덕수를 통하여 이루어지고 있다(Moon[2009]). 바람과 해류의 영향이 적고 하천으로부터 다량의 영양염 공급이 이루어지는 진해만의 지형적 특성으로 만 내부에 굴, 홍합, 피조개 등의 양식장으로 널리 이용되고 있다(Jin *et al.*[2019]).

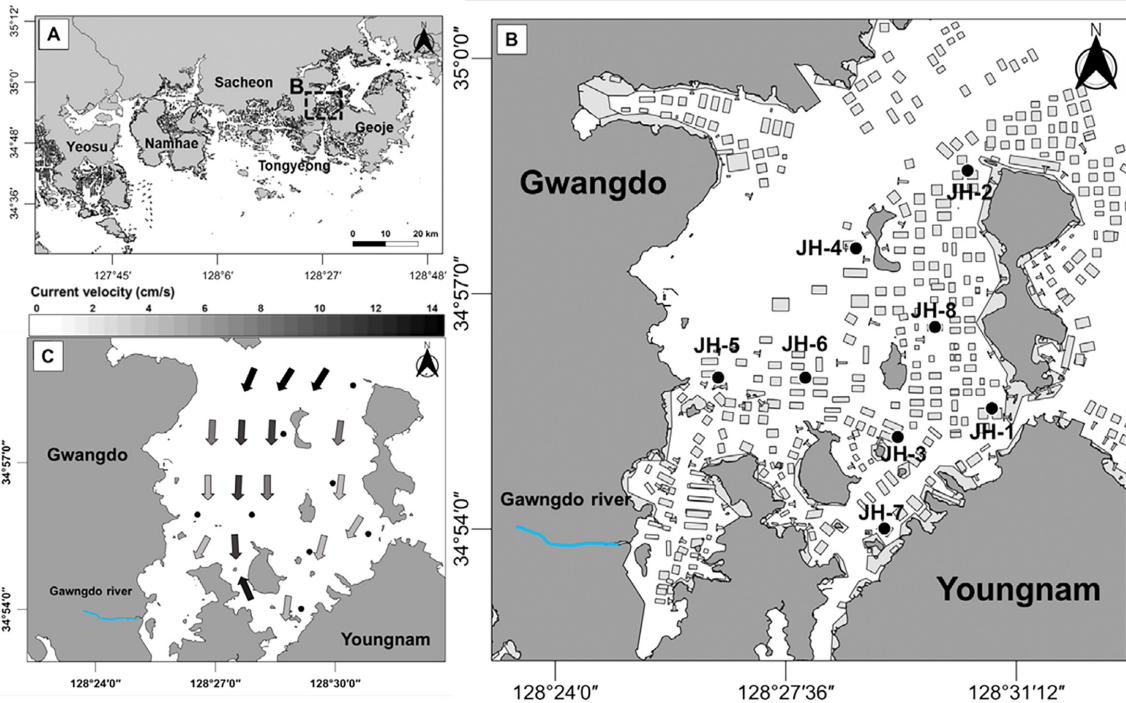


Fig. 1. Sampling locations of seawater and sediment from study site (oyster farming (n=8)), Jinhae-bay, Tongyeong, South Korea.

2.2 시료채집 및 분석방법

패류양식장 내 수질 및 퇴적환경의 특성을 파악하고 건강도를 평가하기 위해 2022년 3월에 진해만(JH, 8정점; JH1-8)에서 표층 해수와 표층 퇴적물 시료 및 양식생물(5정점; JH1-5)를 채취하였다(Fig. 1). 수층 내 물리적 특성은 다항목수질측정기(YSI 6600; Xylen Analytics, USA)를 이용하여 표층부터 저층까지 수온, 염분 및 용존산소를 측정하였다. 니스킨 채수기를 이용하여 채수된 해수 시료는 영양염류 분석을 위해 미리 태운(450°C, 4시간) Φ 25 mm 유리섬유여과지(GF/F; pore size, 0.7 μ m)로 여과한 뒤 영양염 자동분석기(QUATRO, BRAN+LUEBBE, Germany)를 사용하여 암모니아(NH_4^+), 아질산염(NO_2^-), 질산염(NO_3^-), 인산염(PO_4^{3-}), 규산염(SiO_2)를 분석하였다.

수층 내 Chl-a 분석을 위해 미리 태운(450°C, 4시간) Φ 25 mm 유리섬유여과지(GF/F; pore size, 0.7 μ m)로 500 ml 여과하여 90% 아세톤으로 추출한 후 흡광광도계(Fluorometer; 10-AU fluorometer)를 이용하여 흡광도 측정을 통해 계산하였다. 기초 생산력 측정을 위해 각 조사정점에서 상대적인 광량(100%, 50%, 12%, 1%)에 따라 해수를 채수한 후 동물플랑크톤을 제거하기 위해 200 μ m sieve로 거르고, 시료 내에 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (98%)를 첨가시켜 자연상태(약 1.1%)에서 존재하는 ^{13}C 의 존재비를 약 10%로 높여준 후 현장에서 3시간 동안 배양하였다. 배양이 끝난 시료는 미리 태운(450°C, 4시간) Φ 25 mm 유리섬유여과지(GF/F; pore size, 0.7 μ m)에 300 ml 여과하였다. 여과된 여과지는 동결 건조(-80°C) 후에 1N 염산증기로 무기탄소를 제거하여 원소-질량분석기(elemental analyzer-mass spectrometer; Elemental)로 분석한 후 Hama *et al.*[1983]의 계산식에 따라 기초생산력을 계산하였다.

퇴적물 시료는 van Veen grab(ChemLab Co.Ltd, Korea)를 이용하여 표층 2cm 이내를 채취하였다. 채취된 시료는 현장에서 냉동보관(-20°C) 한 후 실험실로 이동하여 동결건조(-70°C) 하였다. 건조된 시료는 아게이트 모르타르를 이용하여 균질화한 뒤 1N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거하고 원소분석기(elemental analyzer; Elementar)를 이용하여 총유기탄소, 질소 및 황을 분석하였다. 분석 간 기기오차를 확인하기 위해 표준물질(sulfanilamide; C: 41.9 \pm 0.3%, N: 16.2 \pm 0.1%, S: 18.6 \pm 0.0%; Elemental Microanalysis)를 사용하였으며, 시료 분석 정밀도는 \pm 0.2% 이하로 측정되었다.

퇴적물 시료 내 중금속(카드뮴[Cd], 납[Pb], 구리[Cu]) 분석을 위해 건조된 시료 약 50g을 플라스틱 체(mesh size 125 μ m)로 체질하여 체를 통과한 퇴적물만을 사용하여 분석하였다. 체질한 퇴적물 약 0.5g을 테프론 용기(Teflon vessel, Savillex Corp.)에 넣고 산용매(HNO_3 : HF : HClO_4 =2:2:1)을 첨가한 후 약 130°C로 8~9시간 가열하여 퇴적물을 분해하였다. 이후 2% 질산(HNO_3)을 첨가하고 시료가 남지 않을 때까지 녹인 후 1 μ m 여과지(Toyo 5C, Advantec, 110 mm)로 여과한 다음 100 mL 플라스크로 정

용하여 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e)로 측정하였다. 분석 간 기기 오차를 확인하기 위해 표준물질(PACS-2, marine sediment, NRC)를 사용하였으며, 회수율은 Cd 99%, Pb 84%, Cu 98%였다. Cu 농도는 Li으로 보정한 후 기준농도(20.6 ppm)과 비교하여 계산 한 값을 사용하였다.

퇴적물 시료 내 다환방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs) 분석을 위해 내부표준물질(internal standard; deuterated Mix9, 0.5 ng/ μ l) 100 μ l를 주입 후 가속용매추출기(Thermo Scientific, ASE350)을 이용하여 추출하였다. 추출된 시료는 가스크로마토그램/질량분석기(GC/MS, agilent 6890/5973N)로 분석하였다. 분석간 기기 오차를 확인하기 위해 표준물질(SRM 1944, NIST)를 사용하였으며, 회수율은 평균 93%였다.

생물 시료 내 중금속((카드뮴[Cd], 납[Pb], 구리[Cu]) 분석을 위해 건조된 시료 약 10g을 아게이트 모르타르에서 곱게 간 다음 분석 전까지 냉동보관(-20°C)하였다. 전처리가 완료된 생물 시료 약 0.1g이 사용되었으며, 이후 전처리 및 분석과정은 퇴적물 시료 과정과 동일하게 수행되었다. 분석 회수율은 Cd 98%, Pb 90%, Cu 98%였다. Cu 농도는 Li으로 보정한 후 기준농도(20.6ppm)과 비교하여 계산 한 값을 사용하였다. 생물 시료 내 PAHs 분석을 위해 시료 약 2g이 사용되었으며, 내부표준물질(deuterated Mix9, 0.5 ng/ μ l)를 100 μ l 주입 후 가속용매추출기를 이용하여 추출하였다. 이후 전처리 및 분석과정은 퇴적물 시료 과정과 동일하게 수행되었다. 분석 회수율은 평균 94%였다.

수하식 패류양식장(진해만) 내 수질-퇴적환경 간의 유의성 검증 및 양식장 환경특성 파악을 위해 통계프로그램 R을 이용하여 분산분석(One-way ANOVA) 및 주성분분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 진해만 수층 특성

본 연구에서 진해만 내 수질환경 특성을 비교하였다(Fig. 2). 진해만 내 물리적 특성(수온, 염분 및 용존산소)은 각각 6.0 \pm 0.1°C, 33.8 \pm 0.6 psu 및 10.4 \pm 0.9 mg/L의 범위를 보였다(Fig. 2). 진해만 내 분석된 물리적 특성(수온, 염분 및 용존산소)은 일부정점(JH-4)를 제외하고 유의한 차이를 보이지 않았다(ANOVA, p >0.05). 영양염류(용존무기질소, 용존무기인 및 규산염)의 농도는 대부분 0.2 mg/L이하의 농도 범위를 보였으며, Chl-a의 농도는 각각 1.4 \pm 0.3 mg/L의 범위를 보였다(Fig. 2). 진해만 내 차별적으로 나타난 물리화학적 특성과 관련하여, 진해만 북서부에서 유입되는 육상 하천(진전천)에 영향을 받는 JH-4에서 가장 낮은 염분 값(30.5 psu)이 측정되었으며, 이는 육상 담수 유입 영향이 일부 분 반영된 것이라 판단된다. 이를 토대로, 본 연구지역 내 측정된 영양염류는 전국 수하식 양식장(마산만, 고성만, 가막만)에서 분석된 영양염 범위(DIN, 0.2 \pm 0.1 mg/L; DIP, 0.1 \pm 0.1 mg/L)보

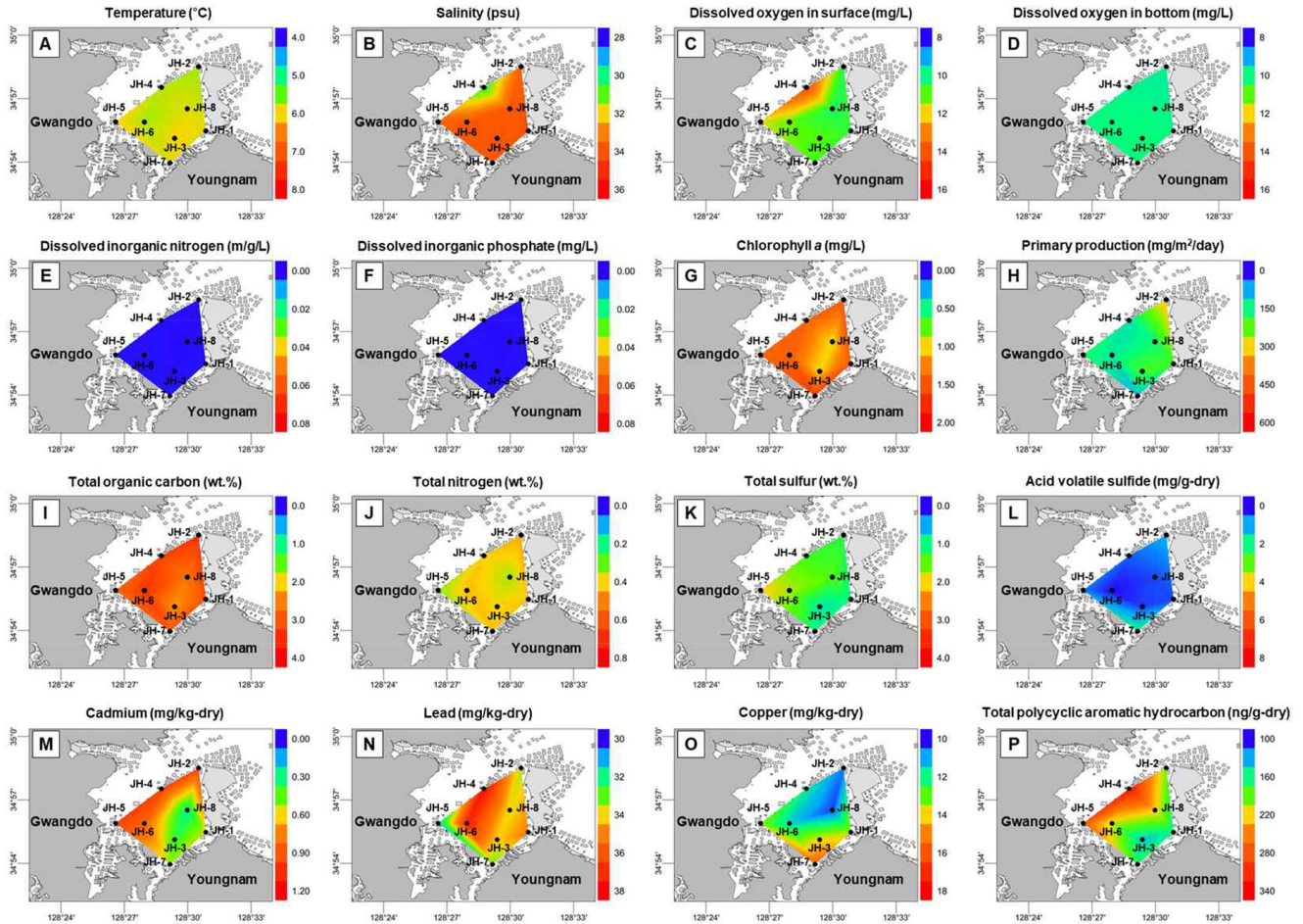


Fig. 2. Spatial distribution of hydrological and sedimentary feature (temperature, salinity, dissolved oxygen in surface, dissolved oxygen in bottom; A-D, dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphate, chlorophyll a, primary production; E-H, total organic carbon, total nitrogen, total sulfur, acid volatile sulfide; I-L, cadmium, lead, copper, total polycyclic aromatic hydrocarbon; M-P) in Jinhae-bay.

다 전반적으로 낮은 범위를 확인하였다(Lee *et al.*[2000], Jung *et al.*[2011], Kim *et al.*[2020]). 특히 이들 전국 수하식 양식장(마산만, 고성만, 가막만)은 육상기인 영양염(DIN, 0.2 ± 0.1 mg/L; DIP, 0.1 ± 0.1 mg/L) 유입의 우점적 영향을 받는 반면(Lee *et al.*[2000], Jung *et al.*[2011], Kim *et al.*[2020]), 수층 내 탄소고정을 통해 영양염이 소비되어(Wafar *et al.*[1983], Park *et al.*[2011]) 본 연구지역(진해만) 내 낮은 영양염 농도범위를 보이는 것으로 판단된다. 이와 관련하여 N/P는 16이하(4.4 ± 3.9)로 분석되었으며, 겨울철 남해 연안에서 측정된 범위(13.8 ± 3.7)보다 낮은 값을 나타냈다(Jung *et al.*[2013], Kim *et al.*[2020]). 이는 담수가 영양염의 주요 공급원임을 나타내는 한편, 갈수기인 겨울철은 담수유입 감소와 더불어 표층 내 고갈된 영양염으로 인한 겨울철 낮은 N/P비(<16)가 나타난 것으로 판단된다. 더욱이, 겨울철 짧은 일조시간으로 인한 광 제한과 표층 수온 저하로 인한 성층화 약화와 함께, 수층의 낮은 영양염 비율은 식물플랑크톤의 군집구조 변동과 생물량(biomass)을 감소시킴에 따라(Redfield *et al.*[1963], Lee *et al.*[2020]), 조사지역 내 낮은 Chl-a 농도(1.4 ± 0.3

µg/L)와 밀접한 연관성을 가질 수 있을 것이라 판단된다. 특히 진해만 수하식 패류양식장의 경우, 입식밀도가 상대적으로 높다고 알려져 있으며(Kim *et al.*[2019]), 강한 포식압이 수층 내 식물플랑크톤 성장 제한 요인으로 작용함에 따라 수층 내 일차생산자의 생물량 감소를 유발할 수 있을 것이라 판단된다. 한편 진해만 내 기초생산력은 177 ± 73.3 mg/m²/day의 범위를 보였다(Fig. 2). 만 외부 정점(JH-2)에서 가장 높은 생산력(327.6 mg/m²/day)의 범위를 보였으며, 만 내부 정점(JH-7)에서 가장 낮은 기초생산력(88.6 mg/m²/day) 범위를 보였다. 이와 관련하여 전국 수하식 양식장(고성만, 가막만)에서 분석된 기초생산력(440 mg/m²/day, 334 mg/m²/day)보다 낮은 범위를 확인하였다(Lee *et al.*[2016], Lim and Baek[2017]). 진해만 내 낮은 기초생산력은 굴 양식장이 극히 밀집되어 있어 양식생물의 강한 포식압으로 인해 일차생산력이 낮은 것으로 판단할 수 있다(Lee *et al.*[2016]). 또한, 진해만 외부 정점(JH-2)의 빠른 유속(14 cm/s)으로 양식생물의 여과효율이 낮아져 상대적으로 만 내부의 높은 기초생산력을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 기초생

산력은 양식생물의 양식 밀도와 먹이 가용성을 간접적으로 확인할 수 있으며, 어장건강도 관점에서 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다.

3.2 진해만 퇴적 특성

진해만(JH1-8)에서 채집된 퇴적물 내 총유기탄소, 총질소(3.0±0.4 wt.%, 0.4±0.1 wt.%)는 정점간 유의한 차이를 보였다(Fig. 2). 이를 토대로, 진해만 내 표층 퇴적물에 축적된 총유기탄소 및 총질소 범위는 전국 수하식 양식장(마산만, 고성만, 가막만)에서 분석된 총유기탄소 범위(1.5±0.2 wt.%, 0.2±0.1 wt.%)보다 높은 것을 확인하였다(Cho *et al.*[2013]). 일반적으로, 해역 내 물리적 특성 차이(입도, 조류소통, 저층지형)에 따라 퇴적물 내 유기원소 분포는 유의한 변동성을 보일 수 있다(Gao and Collins[1992], Fan *et al.*[2009], Liu *et al.*[2016]). 진해만 표층 퇴적물 내 세립한 입도분포(8.0Φ 이하, Cho and Lee[2012])와 더불어 상대적으로 느린 조류소통은 수층 내 생성된 유기물 퇴적이 주된 요인이라 판단된다. 이와 관련하여, 차별적인 C/N비(해양기원; 5-10, 육상기원; >10)는 유기물기원(식물플랑크톤, 육상기원식물, 양식장)에 따른 유입 증가 및 유기물의 분해과정과 밀접한 관련이 있으며, 이를 활용하여 퇴적 유기물 기원 파악에 적용할 수 있다(Redfield, [1958], Prahl *et al.* [1994]). 본 연구지역 내 측정된 C/N비(7.4±0.7)는 퇴적물 내 자생기원 유기물(식물플랑크톤)의 지속적인 축적이 반영된 결과라 판단된다.

진해만 퇴적물 내 총황(1.5±0.2 wt.%) 및 산화발성황화합물(0.7±0.6 mg/g)의 농도는 정점간 통계적 유의한 차이($p<0.05$)를 보였다(Fig. 2). 이들의 농도는 전국 수하식 양식장 내 측정범위(총황, 0.6±0.4 wt.%; 산화발성황화합물, 0.3±0.2 mg/g)보다 높은 수준이며(Choi *et al.*[2013], Kim *et al.*[2012]), 퇴적물 내 유기물 축적에 따른 분해과정과 밀접한 연관성이 있을 것이라 판단된다. 특히, 본 연구지역 내 계산된 C/S비(2.4±0.6)는 연구기간 유의한 차이($p<0.05$)를 보였으며, 퇴적물 내 황산염 환원과정에 의한 유기물의 분해로 증가된 황의 생성과 연관성이 있을 것이라 판단된다(Crowe *et al.*[2014]). 이와 관련하여, 퇴적물 내 산화적 특성(oxic)을 보이는 경우 유기물 중 C/S비는 양의 상관계를 나타낸다(약 5.0 이상) (Berner and Raiswell[1983], Bottrell *et al.*[1998]). 그러나 C/S비가 5.0이하, 1.5이상인 경우는 환원상태(suboxic)로 인해 선택적으로 총유기탄소가 황에 비해 빨리 분해될 수 있다(Leventhal[1983], Berner[1984]). 더욱이 일부 환경(C/S<1.5)에서는 무산소 환경(anoxic) 내 활발한 황산염 환원으로 생성되는 황화수소 증가를 간접적으로 반영할 수 있다(Leventhal[1983], Berner[1985]). 이를 토대로 진해만 퇴적물 내 C/S비의 범위는 수층 자생기원 유기물의 퇴적 후 환원 상태(suboxic)에서 분해과정을 거치는 것으로 판단된다. 더욱이, 유속이 느리고 수심이 상대적으로 얇은 본 연구지역 내 자생기원 유기물의 지속적인 생성-퇴적은 퇴적물 내 산소소모율 증가로

인한 퇴적 혐기성화를 가속시킬 수 있으며(Kim and An[2022]), 이로 인해 황화수소의 증가된 발생은 양식생물의 생리활동에 잠재적 저해요소가 될 수 있을 것이라 판단된다.

퇴적물 중 중금속(Cd 0.7±0.3 mg/kg, Pb 34.5±2.1 mg/kg, Cu 12.6±1.8 mg/kg) 및 PAHs(211.9±62.2 ng/g)의 농도는 정점간 유의한 차이($p<0.05$)를 보였다(Fig. 2). 이들의 농도는 수하식 패류(굴)양식장이 밀집해 있는 고성만(Cd, 0.2±0.1 mg/kg; Pb, 27.0±7.1 mg/kg; Cu, 38.6±10.1 mg/kg), 자란만(Cd, 0.2±0.1 mg/kg; Pb, 40.0±7.4 mg/kg; Cu, 9.0±1.8 mg/kg)에 비해 Cd와 Cu는 높은 농도를 보였다. Pb와 Cu는 만 내부에서 높은 농도를 보였으며, Cd는 만 외부에서 높은 농도를 보였다. 일반적으로 연안 퇴적물 내 중금속의 농도는 퇴적물(입도, 유기물함량)에 따라 달라지며 유기물 함량이 높은 세립한 퇴적물 내 높은 중금속 농도를 보인다(Hyun *et al.*[2003], Lee *et al.*[2017]). 하지만 진해만 내 세립한 입도분포(8.0Φ 이하, Cho *et al.*[2012]) 및 유기물 함량과 모든 중금속 농도 사이에 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다($R^2<0.5$). 이는 만 내 장기간 이루어진 수하식 굴 양식장에서 발생한 양식 부산물 및 시설물에서 기인한 인위적인 오염원(anthropogenic sources)의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다(Hwang *et al.*[2012], Lee *et al.*[2017]). 진해만 퇴적물의 중금속 오염상태를 파악하기 위해 해양환경기준에서 제시된 평가방법(TEL, Cd: 0.75 mg/kg, Pb: 44 mg/kg, Cu: 20.6 mg/kg)을 활용하여 오염도를 평가하였다. 진해만 내 8개 정점 중 Pb와 Cu는 모든 정점에서 TEL 기준 보다 낮은 값을 보였다(Fig. 2). 하지만, Cd의 경우 정점 2(0.9 mg/kg), 4(0.9 mg/kg), 5(0.9 mg/kg), 6(0.8 mg/kg)에서 기준값을 초과한 값을 보이며 다른 중금속에 비해 Cd 오염도가 높은 것으로 파악되었다. 중금속의 분포 특성은 연구해역의 큰 조차에 의한 강한 조류와 해수 유동의 차이로 인해 인근 육상에서 유입된 오염원으로부터 연구해역에 광범위하게 확산되어 영향을 주고 있거나(Hwang *et al.* [2012]), 빠른 유속으로 인한 퇴적물의 재부유(resuspension)의 영향을 받을 수 있을 것이라 판단된다(Choi *et al.*[2015]). 추후 동위원소 결과값 확보를 통해 중금속 오염도 분포에 관한 구체적인 기원을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

퇴적물 내 총 PAHs (\sum_{16} PAH) 농도는 211.9±62.2 ng/g의 범위로 나타났다(Fig. 2). 총 PAHs 중 Pyr이 가장 높은 기여율(15.4%)을 보였고 BbF(14.2%), InP(11.7%) 순이었다. 퇴적물 내 잠재적 발암성 PAHs(\sum_6 PAH, BaA, BbF, BkF, BaP, InP, DbA)의 농도는 101.3±20.8 ng/g의 농도범위를 보이며 총 PAHs 중 49.3%의 기여율을 보였다. 총 PAHs의 농도 분포는 중금속 Cd와 유사한 경향을 보였으며 만 외측보다 내측에서 낮은 경향을 보였다(Fig. 2). 국내 연안 퇴적물에서 총 PAHs 농도의 평균적인 범위는 8.80~18,500 ng/g으로 보고되고 있으며(Yim *et al.*[2007]), 산업화 또는 도시화된 연안에서 높은 농도로 나타나는 것으로 알려져 있다. 진해만 내 퇴적물의 총 PAHs 농도는 국내 연안(가

막만; 130~2,100 ng/g, 목포 연안; 4.79 511 ng/g) 보다 낮은 수준이었다(Moon *et al.*[2007], Kim *et al.*[2010]). 국립해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)에서 제시한 총 PAHs의 퇴적물 가이드라인(ERL; Effects Range Low)의 농도(4,022 ng/g)와 비교하였을 때 진해만 내 PAHs 농도가 초과하는 정점은 나타나지 않았다. 더욱이 PAHs의 기원 평가를 위해 PhA/AnT와 FluA/Pry의 비율을 확인하였다. 특정PAHs 비(PhA/AnT > 10 FluA/Pry < 1)는 유류 기원을 의미하며, 이와 반대되는 비율은 연소기원을 의미한다(Moon *et al.*[2007], Yim *et al.*[2007]). 진해만 내 연구 정점에서 PhA/AnT의 비율이 모두 10 이하로 나타났으며 FluA/Pry의 비율은 일부 정점(JH-4)을 제외하고 1이상으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 진해만 퇴적물 내 PAHs는 석유 기원보다 연소기원이 우세하며, 육상에서 발생된 화석연료 연소가 양식장 환경 내 일부 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단된다.

3.3 진해만 내 수질-퇴적환경 주성분 분석

진해만 내 수질-퇴적환경 특성을 파악하기 위해 주성분분석(principal component analysis, PCA)를 실시하였다(Fig. 3). 제1주성분(PC1)과 제2주성분(PC2)의 누적 기여율은 57.8%로 나타났다. 일반적으로 주성분의 고유값(Eigen value)이 1 이상일때 유의미한 결과를 보이는데(Janmohammadi *et al.*[2014]), 본 연구 결과 제1주성분(2.5)과 제2주성분(1.9)의 고유값은 모두 1 이상으로 나타남으로써 각 인자간 유의미한 상관성을 보였다. 제1주성분은 전체 분산에 대해 36.9%의 기여율을 보였으며, 본 연구정점 내 물리적 수층(표-저 용존산소, 염분, 수온)/생물학적 특성(chl-a, 일차생산력)과 수층(DIN, 조류속도)/퇴적특성(TOC,

TN, TS, AVS, 중금속, PAHs) 간의 차별적인 상관관계를 보였다(Fig. 3). 제2주성분은 전체분산에 대해 20.9%의 기여율을 보였으며, 연구정점 내 수층(DIN, DIP)/퇴적층(TOC, TN, TS, AVS)/생물학적특성(chl-a, 일차생산력)과 물리적 수층(표-저 용존산소, 염분, 수온)/퇴적오염(중금속, PAHs)특성 간의 차별적인 상관관계를 보였다(Fig. 3). 연구지역간 내 수층 및 퇴적환경은 차별적 물리화학적 특성을 보였으며, 정점간 생지화학적 환경특성(유기물 생성 및 분해) 차이가 잠재적으로 반영된 결과라 판단된다. 더욱이 연구지역이 수하식 패류양식장이라는 점을 고려할 때, 정점간 수심(11-21 m)과 유속(4-13 cm/s)의 영향은 수층 및 퇴적환경 내 차별적인 물질순환 특성(예; 유기물질 체류 시간 및 수송범위)을 반영할 것으로 사료된다(Fig. 1) 따라서, 본 연구지역 정점 간 차별적인 물질순환 특성은 양식패류의 성장 및 건강성 유지에 있어 복합적 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단된다.

진해만 내 양식되는 굴의 생리 대사작용은 생식주기와 서식환경 변화(수온, 염분, 먹이원, 먹이질)에 크게 영향을 받을 수 있다(Kobayashi[1997] Oh *et al.*[2002]). 특히, 물리특성(수온, 염분)은 굴의 생리 및 성장에 영향을 미치며, 생물의 서식처 적합도를 결정짓는 중요한 환경적 요인으로 작용한다(Newell and Bayne[1980]). 이들의 성장에 적합한 수온은 8-18℃ Shin *et al.*[2011]), 염분내성 범위(24-35 psu)를 고려할 때(Shin *et al.*[2009]), 본 연구 정점 내 물리 요소(수온, 6.0±0.1℃; 염분, 33.8±0.6 psu)는 전형적인 겨울철 해양환경 분포를 보이며, 위 시기동안 굴 양식은 적합할 것으로 판단된다. 더욱이, 만 동쪽 정점(JH-1,3,7,8)의 경우 수층 화학인자(Chl-a, 일차생산력, 수온, 염분, DO)와 높은 상관성을 보였으며(Fig. 3), 이는 굴의 먹이원(부유성유기물질, 저서 미세조류)을 고려했을 때(Sornin *et al.*[1988], Kang *et al.*[2009]), 양식생물의 섭식활동을 위한 적합한 서식지 환경이 될 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 정점 2(JH-2)는 퇴적특성(TOC, TN, TS, AVS)와 조류 유속과 높은 상관관계를 나타냈다(Fig. 3). 이와 관련하여 수하식 패류양식장 표층 퇴적물 내 유기물의 재부유 및 재광물화 과정 영향에 따라 우점하는 식물플랑크톤의 출현특성이 차별적으로 나타날 수 있다(Yoon and Lee[2020]). 특히, 해수의 유속은 Chl-a와 부유물질의 이동 및 분산과 더불어 용존산소 및 영양염 공급에 영향을 미친다(Malouf and Breese[1977], Vincenzi *et al.*[2006]). 또한 해수 유속은 어장환경 내 원활한 해수 교환을 토대로 먹이 공급뿐만 아니라 양식생물의 배설물 분산에 기여하여 저층 환경 내 건강한 생태계 조성뿐만 아니라 양식생물의 성장에 영향일 미칠 수 있다(Choi *et al.*[2011], Kim *et al.*[2019]). 본 연구 정점인 진해만 서부해역은 가덕수로를 통해 해수가 유입되며(Moon[2009]) 만 내부로 진입할 수록 유속이 느려지는 경향(4-13 cm/s)을 보였다. 만 외부 정점(JH-2)의 경우 중앙수로를 따라 교환되는 해수유동으로 인해 가장 빠른 유속(13 cm/s)을 보

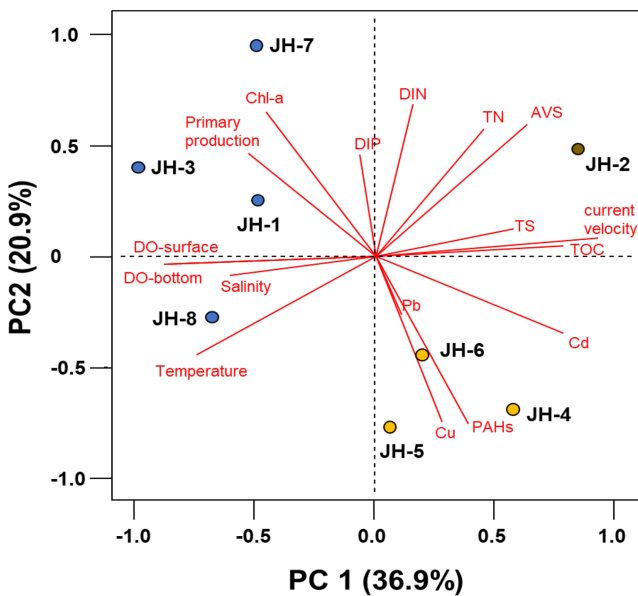


Fig. 3. Principal component analysis for hydrological and sedimentary factors in Jinhae-bay.

였으며, 만 내부는 양식시설로 인해 약 38-70% 감소된 유속을 보였다. 이러한 점점 고려할 때, 정점 내 상대적으로 빠른 해수 유속(13 cm/s)은 양식생물의 먹이 흡입속도에 영향을 미쳐 양식생물의 성장에 제한요소로 작용할 수 있을 것이라 판단된다(Vincenzi *et al.*[2006], Longdill *et al.*[2008]). 이와 더불어 진해만 내부 정점의 느린 해수교환은 해수의 체류시간을 증가시키며, 높은 침강 퇴적물에 따른 퇴적물 내 유기물 분해산물(황화수소)의 증가로 인해 양식생물 성장에 제한요소로 일부 작용할 수 있을 것으로 판단된다(Choi and Jung[2016], Kim *et al.*[2016]). 결론적으로 진해만 수하식 양식장 내 다양한 요인(수질, 퇴적물, 양식생물)의 상호 관련성 파악을 통해, 현장기반 어장 건강도 평가 체계 내 적절한 서식지 환경 평가 인자를 설정할 수 있을 것이라 판단된다.

3.4 수하식패류 양식장 어장건강도 평가

어장환경(수서환경, 퇴적환경) 내 야기되는 다양한 환경문제(부영양화, 적조, 퇴적오염, 유해물질 유입)에 대한 체계적인 진단 및 관리방안을 구축하기 위해 체계적인 양식어장 평가 기준 구축은 중요하다. 이와 관련하여 국외의 경우에 미국의 CBP(Chesapeake Bay Program), SCECAP(South Carolina estuarine and coastal assessment program)과 유럽의 HELCOM(Helsinki commission) 등을 통해 각 해역의 연안 해양생태계 질과 특성을 평가하기 위해 물리, 화학, 유·무기 오염물질 등의 해양환경요

인과 생물학적 요인 등이 포함된 해양환경 평가항목 및 지수를 선택하여 어장환경 평가 및 해역관리에 활용하고 있다(Mallin *et al.*[2000], EC[2008], Hood *et al.*[2021]). 한편, 국내의 경우 어장관리법 제11조 2에 의거하여 퇴적물 내 총유기탄소와 저서동물지수(benthic health index; BHI)를 바탕으로 어류가두리 양식장을 대상으로 어장환경평가가 시행되고 있다. 이와 더불어 어장관리법(제6조)에 따라 어장의 효율적인 보전을 위해 어장환경조사를 실시하고 있으며, 수질환경에 대한 일부 평가기준(WQI)을 구축하고 있다. 현재 적용되는 BHI는 퇴적환경 내 유기물 부하에 대한 높은 상관성만을 대변할 수 있고, 더욱이 연안 어장 내 적용된 WQI의 경우 해수 유동에 따라 시공간적인 변화가 크고, 실제 생물에 미치는 영향을 직접적으로 판단하는데 다소 제한점이 있을 것이라 판단된다. 이러한 평가 한계점을 보완하기 위해 최근 어장건강도에 영향을 미칠 수 있는 직·간접적 요인(서식지 환경, 성장, 자연재해, 위생안전)을 반영한 복합인자를 활용하여 살포식 패류 양식어장(여자만, 강진만)내 건강도 통합평가방법을 처음으로 제시한 바 있다(Go *et al.*[2023]). 기존의 평가결과는 저층(퇴적층)에 서식하는 살포식 패류어장 모니터링 자료를 기반으로 어장건강도 지표를 설정하였으며, 퇴적물 내 축적작용 차이에 따른 양식생물 성장 영향을 뚜렷히 파악할 수 있었다(Go *et al.*[2023]). 그러나 수하식 패류(굴)양식장의 경우 복잡한 수층-퇴적층 내 물질순환 과정 및 차별적 생물 성장반응에 따른 건강도 기준치 변동 가능성을

Table 1. Evaluation criteria range within aquaculture health index

Evaluation category	Poor (score = 1)	Fair (score = 2)	Good (score = 3)	Fair (score = 2)	Poor (score = 1)
Aquatic environment					
DIN (mg/L)	LOD	< 0.01	0.01 ~ 0.10	~ 0.30	0.30 <
DIP (mg/L)	LOD	< 0.01	0.01 ~ 0.02	~ 0.06	0.06 <
Chl-a (µg/L)	< 0.43	0.43 ~	1.01 ~ 5.65	~ 13.35	13.35 <
DO (mg/L)	< 6.0	6.0 ~ 8.0	8.0 <	-	-
Primary production (mg C m ⁻² h ⁻¹)	< 13.0	13.0 ~	50.0 <	-	-
Sedimentary environment					
TOC (mg/g dry)	-	-	< 10.0	~ 20.0	20.0 <
TS (mg/g dry)	-	-	< 2.0	~ 10.0	10.0 <
AVS (mg/g)	-	-	< 0.03	~ 0.30	0.3 <
Metals (mg/kg dry)	-	-	< TEL	TEL <	PEL <
PAH (ng/g dry)	-	-	< ERL	ERL <	ERM <
Evaluation category	Poor (score = 1)	Fair (score = 2)	Good (score = 3)	Fair (score = 2)	Poor (score = 1)
Abnormal hazard					
Damage	-	-	None	~ 20,000,000 won	20,000,000 won <
Aquaculture biota					
			Good (score = 3)	One out all out (score = 0)	
E. coli			230 MPN/100g	230 MPN/100g <	
Pb (mg/kg)			< 2.0	2.0 <	
Cd (mg/kg)			< 2.0	2.0 <	
Hg (mg/kg)			< 0.5	0.5 <	
PAH (µg/Kg)			< 10.0	10.0 <	

제할 수 없다. 따라서 본 연구에서 최근 5년간 남해 수하식 패류어장 모니터링 자료를 기반으로 건강도 평가지표 기준치 재검토 및 환경변화에 따른 기준치 변동 모의실험을 수행하였다 (Table 1).

본 연구에서 설정된 어장건강도 평가기준(최근 5년 남해 수하식 패류어장 모니터링 자료 기준)을 토대로 수하식 패류 양식어장(진해만)에서 시범적용 하여 양식어장 건강도를 평가하였다(Fig. 4). 기존의 살포식 패류의 어장건강도 평가의 경우 패류 성장에 직접 연관된 평가항목(Chl-a, 일차생산력(primary productivity, PP)과 먹이환경 조성에 간접적 요인(DIN, DIP) 및 서식지환경(DO)에 영향을 미치는 인자로 구성되어 있다(Fig. 4B). 특히, 퇴적지표의 경우 양식생물 서식처에 악영향을 미치는 유기오염(TOC, TS, AVS)과 양식생물 성장에 유해한 영향을 미치는 중금속, PAHs를 추가적으로 구성하였다. 뿐만 아니라 연안환경에 빈번하게 발생하고 양식어장에 직간접적으로 피해를 주는 자연재해 지표 (유해조류 대번성, 빈산소수괴 발생, 고/저수온, 저염분) 및 양식생물 안전성을 검증할 수 있는 생물체 내 유해물질(중금속 및 PAHs)의 항목을 통해 어장 건강도를 평가하였다 (Go *et al.*[2023]). 기존의 어장건강도 평가 방안은 각 지표별 가중치를 동일하게 설정하여 평가점수를 계산한 후 어장환경 내 미생물-생물학적 요인에 의해 발생하는 어장 건강도

저하 문제를 효과적으로 진단하였다. 이를 토대로 본 연구에서 각 인자별 동일한 가중치를 적용하여 진해만 내 빈번히 발생하는 빈산소수괴 발생 및 부영양화로 인한 유해조류 대번성을 차별적으로 설정 및 어장건강도 등급변화를 비교하였다(Fig. 4D). 우선적으로 본 연구자료를 통해 평가된 결과 진해만의 어장건강도는 보통 등급(평균, 2.6; 수서, 2.4; 퇴적, 1.8; 자연재해, 3.0; 양식생물, 3.0)으로 나타났다. 빈산소수괴 발생 시 진해만은 퇴적 환경의 악화 및 양식어장 피해로 인해 나쁜 등급(평균, 1.9; 수서, 2.0; 퇴적, 1.6; 자연재해, 1.0; 양식생물, 3.0)을 나타냈다 (Fig. 4D). 진해만 내 부영양화가 발생할 경우 악화된 수서지표 점수(2.4→1.8)와 유해조류 대번성 발생으로 인한 양식어장의 피해(3.0→1.0)가 반영되어 나쁜 등급의 어장등급(평균, 2.0; 수서, 1.8; 퇴적, 2.0; 자연재해, 1.0; 양식생물, 3.0)을 보이는 것으로 판단된다(Fig. 4D).

추가적으로 본 연구에서는 수하식 양식생물에 직, 간접적으로 영향을 미치는 핵심지표의 가중치 설정을 통해 기존 어장건강도 평가 방법보다 고도화된 결과를 도출하고자 하였다. 이와 관련하여, 진해만 굴 양식장 내 수질환경인자(DO, COD, DIN, DIP, Chl-a)와 주성분 분석을 통한 가중치 설정을 통해 굴양식장의 생산량과의 상관성이 연구된 바 있다(Jin *et al.*[2019]). 이를 바탕으로, 수질환경 내 패류 성장에 직접 연관된 평가항목

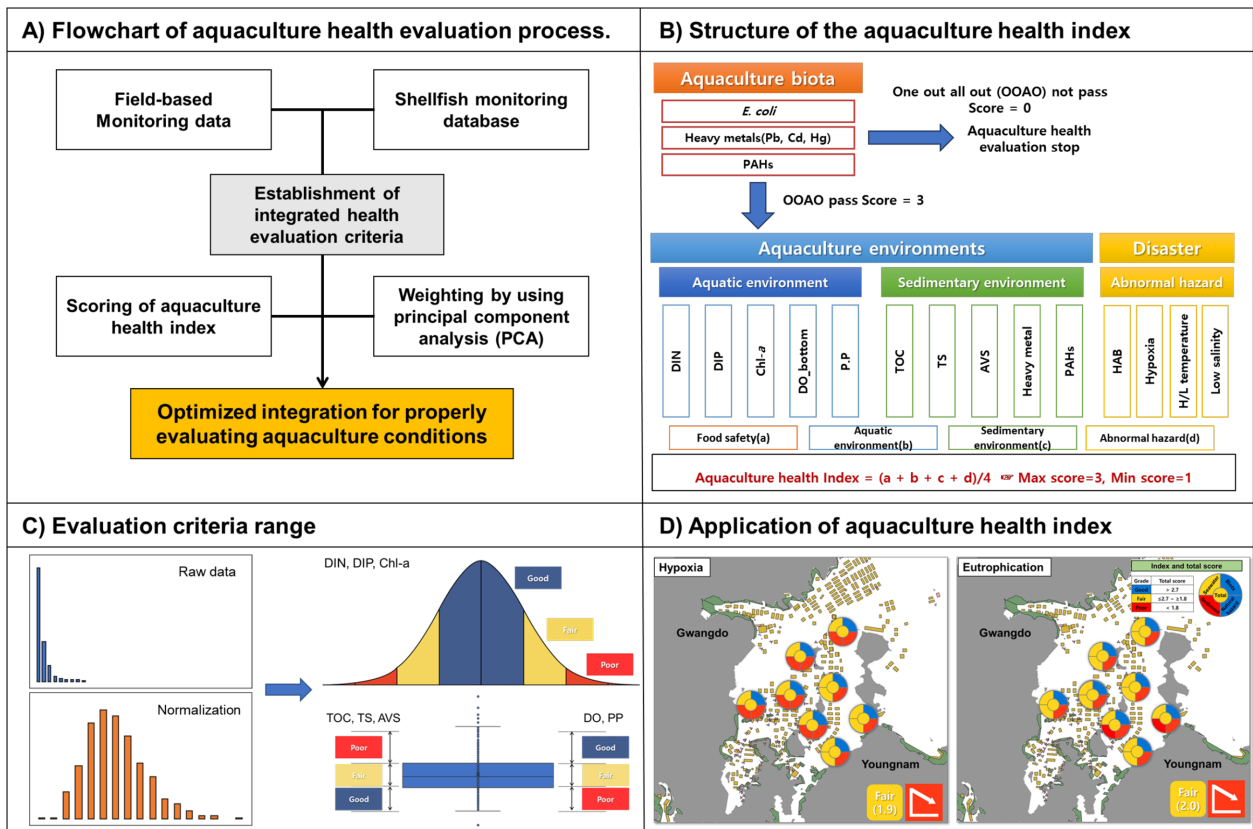


Fig. 4. Flowchart of aquaculture health evaluation process, structure, evaluation criteria range and application of aquaculture health index in shellfish farming system (A-D).

(Chl-a, 일차생산력(primary productivity, PP))과 먹이환경 조성에 간접적 요인(DIN, DIP) 뿐만 아니라 서식지환경에 악영향을 미치는 인자(DO, TOC, TS, AVS, 중금속, PAHs)의 주성분 분석 결과를 바탕으로 어장건강도 평가 지표들이 차지하는 비중을 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$P_i = \frac{L_f^2}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 P_i 는 평가지표의 비중, L_f^2 는 평가지표의 부하량, λ 는 주요요인의 고유값을 나타내며, 각각의 평가지표 비중을 반영하여 최종적인 가중치를 식 (2)와 같이 설정하였다.

$$w_i = \frac{P_i \times PV_i}{\sum (P_i \times PV_i)} \quad (2)$$

여기서 w_i 는 평가지표의 가중치, PV_i 는 주성분의 설명력으로 설정하였다. 그 후 어장건강도 평가 점수와 가중치를 다음 식 (3) (Q_i =평가지표 점수)과 같이 계산한 후 평가하였다.

$$\text{Aquaculture health index} = \sum Q_i W_i \quad (3)$$

주성분분석을 통한 어장건강도 평가지표 인자의 비중(L_f), 부하량(P_i) 및 가중치(W_i)의 산정결과는 Table 2에 나타냈다. 또한, 어장건강도 평가지표 인자의 가중치가 고려된 어장건강도 등급은 차별적인 결과를 나타냈다(Fig. 5A-C). 가중치 설정 전 후 각 지표별 어장건강도 점수는 감소하였으며(평균: 0.08 ± 0.03), 특히 빈산소수괴 발생 상황에서 수서환경의 어장건강도 등급은 각각 보통 등급(2.0)에서 나쁨 등급(1.8)로 급격히 감소하였다. 이와 관련하여 빈산소 수괴 발생 하에서 저층의 활발한 유기물 분해가 영양염(DIN, DIP) 증가에 기여하는 것으로 알려져 있다(Lehtoranta and Heiskanen[2003], Kwon *et al.*[2014]). 더욱이, 부영양화 발생 상황에서 수서환경(1.8→1.7)과 저서환경(2.0→1.9)의 어장건강도 등급이 낮아지는 경향을 보였다. 마산만을 통해 유입되는 높은 오염물 부하량은 진해만 전 해역에 걸쳐 식물플랑크톤 군집구성 변동 및 대변성을 야기하는 것으

Table 2. Factor loadings and weighting of aquaculture health parameter in Jinhae bay

Index	Factor loadings	Proportion	Weighting
	L_f	P_i	w_i
Temp	-0.3	0.036	0.09
Salinity	-0.245	0.024	0.06
DO (surface)	-0.352	0.05	0.124
DO (bottom)	-0.352	0.05	0.124
current velocity	0.37	0.055	0.137
DIN	0.252	0.025	0.064
DIP	-0.027	0	0.001
Chl.a	-0.182	0.013	0.033
PP	-0.23	0.021	0.053
TOC	0.314	0.039	0.098
TN	0.179	0.013	0.032
TS	0.11	0.005	0.012
AVS	0.06	0.001	0.004
Cd	0.312	0.039	0.097
Pb	0.044	0.001	0.002
Cu	0.213	0.018	0.045
PAHs	0.153	0.009	0.024

로 알려져 있다(Lim *et al.*[2017]). 이러한 조건에서 본 연구지역인 진해만 서남부에서 우점적으로 발현하는 *Pseudo-nitzschia spp.*의 대부분의 종은 기억상실성 패독(domoic acid)를 생성하는 것으로 잘 알려져 있어, 이매패류의 생물독성 농축에 관한 주의가 필요한 것으로 알려져 있다(Son *et al.*[2015]). 더욱이 수층에서 부영양화로 인해 증가된 DIP는 부유물질, 칼슘 등과 쉽게 결합하여 저질층에 쉽게 침적되어, 저질층의 부영양화로 인한 해역의 적조 발생과 상관성이 높은 것으로 알려져 있다(Kim[2001]). 비록 본 연구에서는 봄철 자료를 활용하여 어장건강도를 평가하였으나, 건강도 등급화 평가체계의 기준치는 최근 5년간 수하식 패류어장 모니터링 자료를 활용하여 기준을 설정하였다(국립수산과학원[2022]). 이를 토대로 시나리오 분석결과 패류양식장 내 여름철 빈번히 발생하는 자연재해(빈산소수괴 형성, 부영양화)영향에 따른 어장 건강도 등급 변동을 구체화할 수 있었으며, 각 항목들에 대한 상호작용(양식생물 성장, 먹

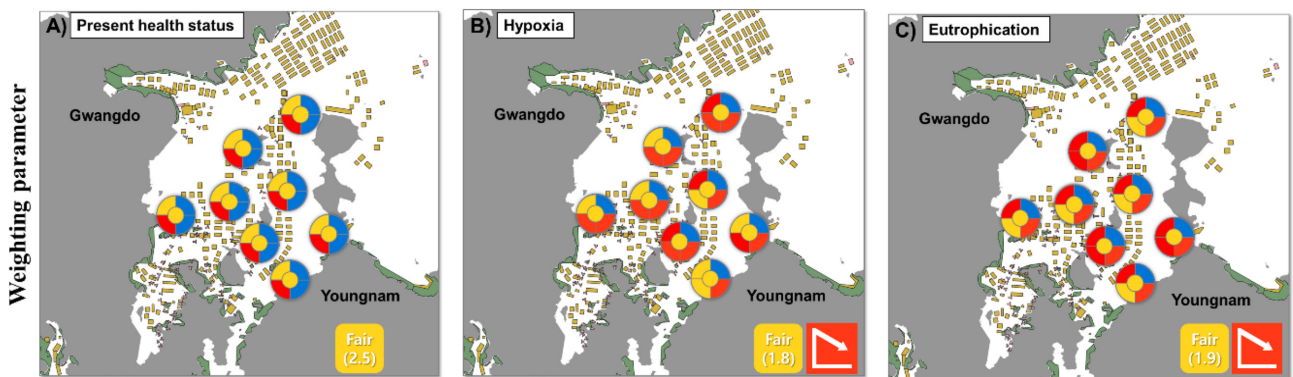


Fig. 5. Application of aquaculture health index in shellfish farming system (A-C; weighting parameter).

이환경조성)에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다. 더욱이 본 연구에서 수행된 가중치 적용 방식을 통해 수하식 패류의 먹이질과 연관된 항목(Chl-a, PP), 먹이 조성과 연관된 항목(DIN, DIP) 뿐만 아니라 수질/퇴적질 환경에 부정적 영향을 미치는 인자(DO, TOC, TS, AVS, 중금속, PAHs)들이 어장건강도에 미치는 영향을 더욱 구체화할 수 있었으며, 이를 토대로 다양한 품종별 양식장 내 건강도 평가지수 추가 적용이 가능할 것이라 판단된다.

본 연구 결과를 통해 다양한 환경차이(계절적 해양환경특성 변동, 이상해황)발생에 따라 어장 건강도를 진단하고, 어장환경 건강도를 평가할 수 있는 평가지표(수서환경, 퇴적환경, 자연재해, 양식생물)간에 연관성을 체계적으로 검증하였으며, 수하식 패류 양식어장에 시범적으로 적용하여 어장환경 내 비생물-생물학적요인에 의해 발생하는 어장 건강도 저하 문제를 효과적으로 진단하였다고 판단된다. 더욱이, 양식생물의 성장 및 서식처 환경에 직, 간접적으로 영향을 미치는 핵심지표의 가중치 설정을 통해 기존 어장건강도 평가 방법보다 고도화된 결과를 도출하였다고 판단된다. 향후 2025년 시행될 양식산업발전법 제25조의 면허 심사평가제의 환경평가에 따른 체제조치사항(어장이전, 정화조치)이 발생됨에 따라 본 연구에서 설정한 어장건강도 평가기준은 체계적인 양식장 환경관리제도 확립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 국내 수하식 패류양식장(진해만)에서 어장 건강도 평가를 위한 지표를 재설정하고 시범 적용하였다. 수하식 패류양식어장의 통합평가에 적용 가능한 평가지표 기준(수서환경, 퇴적환경, 자연재해, 양식생물)을 재설정하였으며, 체계적인 검증(양식어장환경-양식생물)을 통해 양식어장 건강도를 지수화 함으로써 과학적인 평가할 수 있었다. 추가적으로 수하식 양식생물의 성장 및 서식처 환경에 직, 간접적으로 영향을 미치는 핵심지표 가중치 설정을 통해 기존 어장건강도 평가 방안보다 고도화된 결과를 도출하였으며, 차별적인 환경 변화에 따른 어장건강도를 체계적으로 진단할 수 있음을 확인하였다. 추후 추가 연구(계절별, 양식품종별 양식특성)를 통하여 체계적인 어장환경관리와 지속적인 생산성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(202307690001)에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Berner, R.A. and Raiswell, R., 1983, Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over phanerozoic time: A new theory, *Geochim Cosmochim Acta* 47, 855-862.
- [2] Berner, R.A., 1984, Sedimentary pyrite formation: An update, *Geochim Cosmochim Acta* 48, 605-615.
- [3] Berner, R.A., 1985, Sulphate reduction, organic matter decomposition and pyrite formation, *Philos Trans Royal Soc A Math Phys Sci* 315, 25-38.
- [4] Bottrell, S.H., Hannam, J.A., Andrews, J.E. and Maher, B.A., 1998, Diagenesis and remobilization of carbon and sulfur in mid- Pleistocene organic-rich freshwater sediment. *J Sediment Res* 68, 37-42.
- [5] Cho, Y.G. and Lee, C.B., 2012, Heavy Metal Contamination in Surface Sediments from Masan and Jinhae Bay, Southeast Coast of Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 15(4), 302-313.
- [6] Cho, Y.S., Lee, W.C., Kim, J.B., Hong, S.J., Kim, H.C. and Kim, C.S., 2013, Establishment of environmental assessment using sediment total organic carbon and microbenthic polychaete community in shellfish farms. *Korean Soc Mar Environ Saf* 19, 430-438.
- [7] Choi, T. J., J. N. Kwon, G. Lee, H. Hwang, Y. Kim and J. H. Lim, 2015, Distribution and pollution assessment of trace metals in the surface sediments around farming area of Jinhae Bay, *Korean Soc Mar Environ Saf* 21, 347-360.
- [8] Choi, Y.S. and Jung, C.G., 2016, The effect of geochemical characteristics and environmental factors on the growth of cultured arkshell *Scapharca broughtonii* at several shellfish-farming bays on the South coast of Korea. *Korean J Malacol* 32, 149-155.
- [9] Choi, M., Lee, I.S., Hwang, D.W., Kim, H.C., Yoon, S.P., Yun, S., Kim, C.S. and Seo, I.S., 2017, Organic Enrichment and Pollution in Surface Sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with Dense Oyster Farms, *Korean J Fish Aquat Sci* 50(6), 777-787.
- [10] Crowe, S.A., Paris, G., Katesev, S., Jones, C., Kim, S.T., Zerkle, A.L., Nomosatryo, S., Fowle, D.A., Adkins, J.F., Sessions, A.L., Farquhar, J. and Canfield, D.E., 2014, Sulfate was a trace constituent of Archean seawater. *Science* 346, 735-739.
- [11] EC, 2008, Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. *Official Journal of the European Communities*, L309.
- [12] Fan, J., Yuan, T., Comstock, J.M., Ghan, S., Khain, A., Leung, L.R., Li, Z., Martins, B.J. and Ovchinnikov, M., 2009, Dominant role by vertical wind shear in regulating aerosol effects on deep convective clouds, *J Geophys Res Atmos* 114, D22206.
- [13] Gao, S. and Collins, M., 1992, Modelling exchange of natural trace sediments between an estuary and adjacent continental shelf, *J Sediment Res* 62, 35-40.
- [14] Go, Y.S., Lee, D.H., Lee, Y.J., Lee, W.C. and Hwang, U.K., 2023, Establishment of Integrated Health Evaluation Criteria

- for Coastal Aquaculture System, Korean J Fish Aquat Sci 56(4),462-472.
- [15] Hood, R.R., Shenk G.W., Dixon, R.L, Smith, S.M.C., Ball, W.P., Bash, J.O., Batiuk, R., Boomer, K., Brady, D.C., Cerco, C., Claggett, P., Mutser, K., Easton, Z.M., Elmore, A.J, Friedrichs, M.A.M., Harris, L.A, Ihde, T.F., Lacher, L., Li, L., Linker, L.C., Miller, A., Moriarty, J., Noe, G.B., Onyullo, G.E., Rose, K., Skalak, K., Tian, R., Veith, T.L., Wainger, L., Weller, D., Zhang, Y.J., 2021, The Chesapeake Bay program modeling system: Overview and recommendations for future development, *Eco Modell* 456.
- [16] Hwang, D.W., Kim, H.C., Park, J. and Lee, W.C., 2012, Temporal and spatial variation of nutrient concentrations in shallow pore water in intertidal sandflats of Jeju Island. *Korean J Fish Aquat Sci* 45, 704-715.
- [17] Hyun, J.H., Lee, H.K. and Kwon, K.K., 2003, Sulfate reduction in the marine environments: Its controlling factors and relative significance in mineralization of organic matter, *The Sea* 8, 210-224.
- [18] Jin, S., Ryu, S., Lee, I. and Kim, K., 2019, Estimation of Oyster farming Water quality index (OWQI) in Jinhae Bay, Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 22(4), 246-252.
- [19] Jung, S.W., Lim, D., Shin, H.H., Jeong, D.H. and Roh, Y.H., 2011, Relationship between Physico-Chemical Factors and Chlorophyll-a Concentration in Surface Water of Masan Bay: Bi-Daily Monitoring Data.2011, *Korean J. Environ. Biol* 29(2), 98-106.
- [20] Jung, D.H., Shin, H.H., Jung, S.W. and Lim, D.I., 2013, Variations and Characters of Water Quality during Flood and Dry Seasons in the Eastern Coast of South Sea, Korea, *Korean J. Environ. Biol.* 31(1), 19-36.
- [21] Kang, C.K., Choy, E.J., Hur, Y.B. and Myeong, J.I., 2009, Isotopic Evidence of Particle Size-Dependent Food Partitioning in Cocultured Sea squirt *Halocynthia roretzi* and Pacific Oyster *Crassostrea gigas*, *Aquatic Biology* 6, 289-302.
- [22] Kim, S.J., 2001, Eutrophication in the Namhae Coastal Sea 2. The Aspects of Eutrophication of Bottom Mud and Surface Seawater in the Namhae Coastal Seas, *Journal of Wetlands Research* 3, 107-118.
- [23] Kim, P.J., Park, S.Y., Jang, S.J., Jeon, S.B. and Ju, J.S., 2012, Biogeochemistry of alkaline and alkaline earth elements in the surface sediment of the Gamak bay, *Korean Soc Mar Environ Saf* 18, 1-13.
- [24] Kim, D., Lee, Y.J., Kang, H.Y., Kwon, K.Y., Lee, W.C. and Kwak, J.H., 2019, Seasonal variations in primary productivity and biomass of phytoplankton in Geoje-Hansan bay on the southern coast of Korea. *Ocean Sci J* 54, 213-227.
- [25] Kim, J.H., Hong, S.J, Lee, W.C., Kim, H.C., Eom, K.H., Jung, W.S. and Kim, D.M, 2019, Estimation of the Effect of Flushing Time on Oyster Aquaculture Potential in Jaran Bay, *Ocean Science Journal* 54(4), 559-571.
- [26] Kim, S.S., Hwang, S.J., Cho, A.Y., Lee, J.H. and Kim, P.J., 2020, Assessment of locational suitability of aquaculture grounds in Jeonnam coastal area using the regular monitoring data. *The J Fish Mar Sci Edu* 32, 652-664.
- [27] Kim, S. and An, S, 2022, A Study on the Effect of the Development of Anaerobic Respiration Processes in the Sediment with the Water-column Stratification and Hypoxia and Its Influence on Methane at Dangdong Bay in Jinhae, Korea. *Ocean Polar Res* 44(1), 1-11.
- [28] Kobayashi, M., Hofmann, E.E., Powell, E.N., Klinckand, J.M. and Kusaka, K., 1997, A population dynamics model for the Japanese oyster *Crassostrea gigas*, *Aquaculture* 149, 285-321.
- [29] KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2021, Korean Statistical Information Services. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ZB7008 on Jan 16, 2023.
- [30] Kwon, J.N., Lee, J., Kim, Y., Lim, J.H., Choi, T.J., Ye, M.J., Jun, J.W., K, S., 2014, Long-Term Variations of Water Quality in Jinhae Bay, *J Korean Soc Mar Environ Eng* 17, 324-332.
- [31] Lee, C.W., Kwon, Y.T., Kwon, H.B., Boo, M.H. and Yang, K.S., 2000, Eutrophication characteristics in the shellfish farms, the southern coastal sea of Korea. *J Korean Soc Mar Environ Eng* 3, 24-33.
- [32] Lee, Y.S., Lim, W.A., Jung, C.S. and Park, J.S., 2011, Spatial distributions and monthly variations of water quality in coastal seawater of Tongyeong, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engin* 14, 154-162.
- [33] Lee, S.J., Jeong, W.G., Cho, S.M. and Kwon, J.N, 2016, Estimation of Carrying Capacity by Food Availability for Farming Oysters in Goseong Bay, Korea, *Korean J. Malacol.* 32(2), 83-93.
- [34] Lee, G., D.W. Hwang, H. Hwang, J.H. Park, H.C. Kim, and J. N. Kwon, 2017, Distribution and pollution status of organic matter and heavy metals in surface sediment around Goseong Bay, a shellfish farming area, Korea, *Korean Soc Mar Environ Saf* 23, 699-709.
- [35] Lee, J.H., Kang, J.J., Jang, H.K., Jo, N., Lee, D., Yun, M.I. and Lee, S.H., 2020, Major controlling factors for spatio-temporal variations in the macromolecular composition and primary production by phytoplankton in Garolim and Asan bays in the Yellow Sea. *Reg Stud Mar Sci* 36, 101269.
- [36] Lehtoranta, J., Heiskanen, A.S., 2003, Dissolved iron:phosphate ratio as and indicator of phosphate release to oxic water of the inner and outer coastal Baltic Sea. *Hydrobiologia* 492, 69-84.
- [37] Leventhal, J.S., 1983, An interpretation of carbon and sulfur relationships in Black Sea sediments as indicators of environments of deposition *Geochim Cosmochim Acta* 47, 133-137.
- [38] Lim, Y.K. and Baek, S.H., 2017, Seasonal Variation of Primary Producer Phytoplankton Community in the Vicinity of the Oyster Farming Area between Tongyeong-Saryang Island, *Korean J. Environ. Biol.* 35(4), 492-500.

- [39] Liu, Y., Hung, H., Yan, L., Liu, X. and Zhang, Z., 2016, Influence of suspended kelp culture on seabed sediment composition in Heini Bay, China. *Estuar Coast Shelf Sci* 181, 39-50.
- [40] Longdill, P.C., Healy, T.R. and Black, K.P., 2008, An Integrated GIS Approach for Sustainable Aquaculture Management Area Site Selection, *Ocean Coast Manage* 51, 612-624.
- [41] Mallin, M.A., Burkholder, J.M., Cahoon, L.B. and Posey, M.H., 2000, North and South Carolina Coasts, *Mar Pollut Bull* 41, 56-75.
- [42] Malouf, R.E. and Breese, W.P., 1977, Seasonal Changes in the Effects of Temperature and Water Flow Rate on the Growth of Juvenile Pacific Oysters, *Crassostrea gigas* Thunberg, *Aquaculture* 12, 1-13.
- [43] Moon, H.B., Kang, S.K., Kim, H.S., Choi, M., Yu, J., Choi, H.G. and Park, J.S., 2007, Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and marine sediments from Mokpo coast in Korea, *JEAHT* 10, 83-90.
- [44] Moon, J.H., 2009, A study of factors on algal bloom outbreaks in Jinhae Bay by numerical and PCA methods, Department of Ocean Engineering Graduate School Chonnam National Univ., 1-167.
- [45] Newell, R.I.E., and Bayne, B.L., 1980, Seasonal changes in the physiology, reproductive condition and carbohydrate content of the cockle *Cardium (=Cerastoderma) edule* (Bivalvia: Cardiidae). *Marine Biology* 56, 11-19.
- [46] Oh, K.H., Pang, I.C., Hoffman, E.E., Kim, Y., Kim, S.Y., Park, Y.J. and Choi, K.S., 2002, Modeling oyster populations dynamics-I. Effect of available food on growth of the pacific oyster *Crassostrea gigas* in Goseong Bay, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 35, 327-335.
- [47] Park, S.Y., Kim, S.S., Kim, P.J., Cho, E.S., Kim, B.M., Jeon, S.B. and Jang, S.J., 2011, Long-term variation and characteristics of water quality in the Yeosu Bay of South Sea, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engin* 17, 203-218.
- [48] Prahel, F.G., Ertel, J.R., Goni, M.A., Sparrow, M.A. and Eversmeyer, B., 1994, Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin, *Geochim Cosmochim Acta* 58, 3035-3048.
- [49] Redfield, A.C., 1958, The biological control of chemical factors in the environment. *Am Sci* 46, 205-221.
- [50] Redfield, A.C., Ketchum, B.H. and Richards, F.A., 1963, The influence of organisms on the composition of seawater. In: *The Sea Vol. 2*. Hill MN, ed. Interscience Press, New York, NY, U.S.A., 26-77.
- [51] Shin, H.C., Lee, J.H., Jeong, H.J., Lee, J.S., Park, J.J. and Kim, B.H., 2009, The influence of water temperature and salinity on filtration rates of the hard clam, *Gomphina veneriformis* (Bivalvia). *Korean J Malacol* 25, 161-171.
- [52] Shin, Y.K., Lee, W.C., Kim, S.Y., Jun, J.C. and Kim, E.O., 2011, Variation in physiological energetics of blood cockle *Scapharca subcrenata* (Bivalvia: Arcidae) from Yeosu bay, South coast of Korea. *Korean J Malacol* 27, 205-211.
- [53] Son, M., Baek, S.G., 2015, The distinct characteristics of phytoplankton growth response and their community structure following seven different nutrients addition in spring season of Jinhae Bay. *J Kor Academia-Industrial coop Sco* 16, 6567-6574.
- [54] Sornin, J.M., Deslous-Paoli, J.M. and Hesse, O., 1988, Experimental Study of the Filtration of Clays by the Oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg): Adjustment of Particle Size for Best Retention, *Aquaculture* 69, 355-366.
- [55] Vincenzi, S., Caramori, G., Rossi, R. and De Leo, G.A., 2006, A GIS based Habitat Suitability Model for Commercial Yield Estimation of *Tapes Philippinarum* in a Mediterranean Coastal Lagoon (Sacca di Goro, Italy), *Ecological Modelling* 193, 90-104.
- [56] Wafar, M.B.M., Corre, P.L. and Birrien, J.L., 1983, Nutrients and primary production in permanently well-mixed temperate coastal waters. *Estuar Coast Shelf Sci* 17, 431-446.
- [57] Yim, U.H., Hong, S.H. and Shim, W.J., 2007, Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea, *Chemosphere* 68, 85-92.
- [58] Yoon, Y.H. and Lee, H.Y., 2020, A characteristics of marine environments in a blood cockle farms of the Northwestern Yeosu Bay, Korea 2. Spatio-temporal distribution of water quality and phytoplankton community. *JKAIS* 21, 579-592.

Received 10 October 2023

1st Revised 22 January 2024, 2nd Revised 12 March 2024

3rd Revised 29 March 2024, 4th Revised 16 May 2024

Accepted 20 May 2024