

Original Article

진해만 해역의 기후요인에 따른 서식지 적합도 및 수질 지수 변화 장기 분석

나수진¹ · 김관우² · 탁대호^{2,†}

¹국립수산과학원 해양환경연구과 석사후연구원

²국립수산과학원 해양환경연구과 해양수산연구사

Long-Term Changes in Habitat Suitability and Water Quality Indices Driven by Climatic Factors in Jinhae Bay, Korea

Sujin Na¹, Kwanwoo Kim², and Daeho Tac^{2,†}

¹Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
²Scientific Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약

본 연구는 1997년부터 2024년까지 해양환경공단의 해양환경측정망(33개 정점) 자료와 기상청의 기후 관측자료(기온, 강우량)를 활용하여, 진해만 해역의 서식지 적합도 지수(Habitat Suitability Index, HSI)와 수질지수(Water Quality Index, WQI)의 장기 변화를 분석하였다. 회귀분석 결과, 연평균 수온은 0.0094°C/yr의 속도로 상승하였으며, HSI는 연평균 0.0023/yr 감소, WQI는 연평균 0.0010/yr 증가하는 경향을 보였다. 히트맵 분석을 통해 외측-내측-중간 정점 간의 공간적 이질성이 확인되었고, 사계절 box plot에서는 봄-가을에 HSI는 높고 WQI는 낮았으며, 여름에는 두 지표 모두 낮았고, 겨울에는 HSI는 낮고 WQI는 높은 양상이 나타났다. 이러한 결과는 성층화 강화, 영양염 유입 관리, 계절별 생물활동 변화가 HSI와 WQI에 상이한 영향을 미친다는 점을 시사하며, 반폐쇄성 연안 시스템의 지속가능한 관리를 위해 공간별·계절별 맞춤형 전략의 필요성을 강조한다.

Abstract – This study investigated long-term trends in the Habitat Suitability Index (HSI) and Water Quality Index (WQI) in Jinhae Bay, Korea, using marine environmental monitoring data (33 stations) and meteorological records (air temperature and rainfall) collected from 1997 to 2024. Regression analysis revealed that the annual mean air temperature increased at a rate of 0.0094°C/yr, while HSI declined by 0.0023/yr and WQI increased by 0.0010/yr. Heatmap analysis identified clear spatial heterogeneity among outer, inner, and midbay stations. Seasonal box plots showed high HSI but low WQI in spring and autumn, both indices declined concurrently in summer, and low HSI but high WQI in winter. These findings indicate that intensified stratification, changes in nutrient input management, and seasonal biological activity exert differential influences on HSI and WQI. The results highlight the importance of spatially and seasonally adaptive management strategies for sustaining ecosystem health in semi-enclosed coastal systems.

Keywords: Jinhae bay(진해만), Habitat suitability index(서식지 적합도 지수), Water quality index(수질지수), Climate change(기후 변화), Long-term trend(장기 추세)

1. 서 론

진해만은 우리나라 남해안 동부에 위치한 대표적인 반폐쇄성 내만으로, 굴과 멍게 등 주요 패류 및 피낭류 양식장이 밀집하고 있는

해역이다. 그러나 지난 수십 년간 이 해역에서는 고수온, 빈산소, 부영양화, 적조, 유해 남조류(Harmful Algal Blooms; HABs) 등이 빈번하게 발생하여 양식 생산성과 해양 생태계 안정성에 심각한 위협이 되고 있다(Lee *et al.*[2008]; Lim *et al.*[2021]). 최근 연구에서는 EI(Eutrophication Index)와 TRIx(Trophic Index) 분석을 통해, 진해만 내측 해역이 여전히 높은 부영양 상태에 머물러 있음을 보고하

†Corresponding author: jjang73815@gmail.com

였다(Kim *et al.*[2024]).

여름철에는 저층 용존산소(dissolved oxygen, DO) 종종 2 mg/L 이하로 급감하며 빈산소 수괴가 반복적으로 형성되고(Rabalais *et al.*[2001]; Kim *et al.*[2012]; Kim *et al.*[2024]), 가을철에는 pH가 6.6~8.2 범위로 변동하면서 DO와 강한 상관관계를 보였다(Lee *et al.*[2008]). 또한, 엽록소-*a*(Chl-*a*) 농도는 계절 변동성이 크며, 여름철 고농도 플랑크톤 bloom 이후 급격히 감소하는 양상이 관측되어 연안 생태계의 기능적 안정성을 저해하는 주요 요인으로 작용한다(Na *et al.*[2021]). 특히, Na *et al.* (2021)은 수온, 염분, 영양염 등의 변동이 식물플랑크톤 색소 및 군집 구조에 유의한 영향을 미쳐, 내측 해역의 기초생산력 저하와 HSI 감소에 기여한다고 보고하였다.

기후변화에 따른 남해 연안 해수면 온도의 장기 상승(약 0.21°C/decade)과 집중호우·이상고온 일수 증가는 수괴 성층화를 강화하고 저층 DO를 급격히 저하시켰다(Lee *et al.*[2018]; Fennel and Testa[2019]). 진해만은 국내 연안 중 대표적인 빈산소 수괴 발생 해역으로, 여름철 성층화와 유기물 부하가 복합적으로 작용해 극심한 DO 저하가 반복 보고되고 있으며(Lee *et al.*[2008]), 이는 양식 대상종의 생존 한계를 넘어서는 DO 저감으로 집단 폐사를 유발하는 주요 원인이 된다(Levin *et al.*[2009]).

그럼에도 불구하고 진해만 관련 선행 연구는 주로 수온, DO 등 개별 수질 항목의 단기·계절별 변동에 집중되어 있으며, 장기 시계열 기반의 서식처 적합성 지수(Habitat Suitability Index; HSI)와 수질 지수(Water Quality Index; WQI)를 통합적으로 평가한 연구는 드물다(Kim *et al.*[2024]). 반면, 해외에서는 MaxEnt, GARP 등 서식지 분포 모델을 활용해 기후변화 시나리오(RCP 4.5, 8.5 등) 하의

중 분포와 HSI 변화를 예측하는 연구가 활발히 이루어지고 있으나(Elith *et al.* [2011]), 국내에서는 진해만과 같은 내만형 해역을 대상으로 HSI-WQI의 장기 변동을 종합적으로 분석한 연구가 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 해양환경공단(KOEM) 해양환경측정망 자료(1997~2024년)와 기상청 기후관측자료(기온·강우량)를 연계하여, 기후요인 변화가 진해만 해역의 서식처 적합도(HSI)와 수질지수(WQI)에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다음의 두 가지 연구 질문을 설정하였다.

- (1) 진해만의 HSI는 기온 상승, 성층 강화 등 기후요인에 따라 어떤 장기적 변동 특성을 보이는가?
- (2) WQI는 강수량 및 수질 관리정책 변화에 따라 어떻게 변화하였으며, HSI와 어떤 상호 관계를 나타내는가?

본 연구는 기후요인, 수질, 서식환경 지표를 결합하여 진해만의 해양환경 변화를 종합적으로 평가함으로써, 기후변화 대응형 양식장 관리 및 서식환경 복원 전략 수립을 위한 과학적 근거를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구해역 및 데이터

본 연구에서는 해양환경정보포털(KOEM, <https://www.meis.go.kr>)에서 제공하는 33개 환경측정망 정점(BK1301~BK1333)의 1997~2024년 표층 수온, 염분, DO, pH, Chl-*a* 자료와 기상청(거제·통영·창원 관측소)의 동일 기간 강우량 및 기온 자료를 분석하였다(Fig. 1). 자료는 연 4회(2, 5, 8, 11월) 수집되었으며, 이를 기반으로 정점별 및

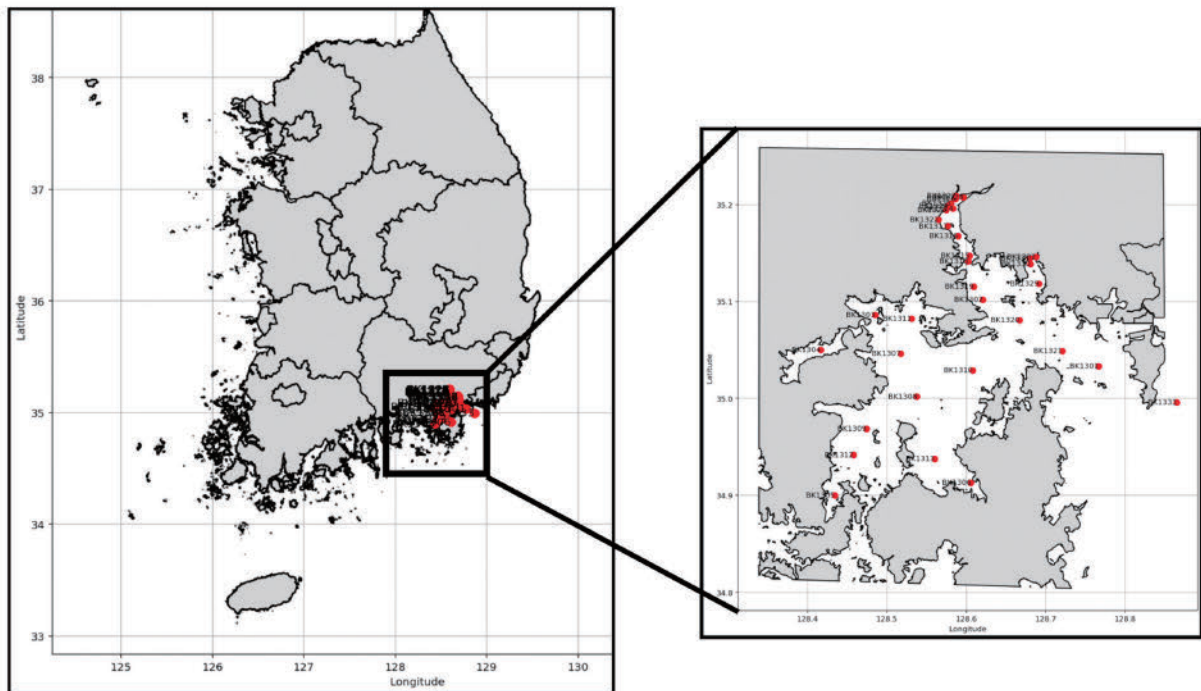


Fig. 1. Jinhae Bay Marine Environmental Monitoring Station Map.

Table 1. Optimal and Tolerable Ranges of Environmental Variables for HSI Calculation

Parameter	xmin	xopt1 ~ xopt2	xmax	Reference
Temperature, °C	5	12.0 ~ 22.0	30	Lee <i>et al.</i> [2018]
Salinity, PSU	20	28.0 ~ 34.0	36	Kim <i>et al.</i> [2015]
DO (mg/L)	2	5.0 ~ 9.0	12	Kim <i>et al.</i> [2024]
pH	6.5	7.8 ~ 8.3	8.6	Na <i>et al.</i> [2021]; Kim <i>et al.</i> [2024]
Chl- <i>a</i> (µg/L)	0.1	1.5 ~ 5.0	20	Na <i>et al.</i> [2021]

전체 평균의 연평균 시계열을 구축하였다. 환경측정망 자료는 정점·항목별로 관측 시작 연도와 결측 기간이 상이하며, 일부 항목(DO, pH, Chl-*a*)은 2000년대 이후부터 정규 관측이 시작된 경우가 있다. 이러한 시계열 가용성의 차이를 고려하여 장기 추세 분석을 수행하였다.

2.2 HSI와 WQI 산정 방법

각 환경 항목별 서식처 적합성 지수(Habitat Suitability Index; HSI)는 선행 연구들에서 제안된 선형 조각 함수(piecewise linear function) 기반 산정 방식을 적용하였다(Boveef[1986]; Cho *et al.*[2012]). 생존 허용 범위(x_{min} , x_{max}) 및 최적 범위(x_{opt1} , x_{opt2})는 진해만 주요 양식 대상종인 굴과 멧게의 생리생태 특성과 국내 선행 연구 결과(Kim *et al.*[2024])를 참고하여 설정하였다(Table 1). 본 연구는 HSI 항목 간 상대적 영향 평가가 아닌, 장기 변동 추세 비교를 목적으로 하였으므로, 각 인자에는 동일 가중치를 적용하였다.

$$HSI_i = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \in [x_{opt1}, x_{opt2}] \\ \frac{x_i - x_{min}}{x_{opt1} - x_{min}} & \text{if } x_i < x_{opt1} \\ \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{opt2}} & \text{if } x_i > x_{opt2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

통합 HSI는 각 항목별 HSI의 산술 평균으로 산정한다.

$$HSI_{total} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HSI_i \quad (2)$$

한편, 수질지수(WQI)는 해양환경공단(KOEM)의 해양환경측정망을 통해 산정된 공식 데이터를 활용하였다. 이 지수는 국내 연안 수질 평가에 있어 신뢰성 있는 지표로 활용되어 왔으며(Kim *et al.*[2024]), 본 연구에서는 HSI와의 비교를 통해 진해만 해역의 서식 적합성과 수질의 상관관계를 평가하였다.

2.3 통계 분석 방법

진해만 해역의 HSI와 WQI의 장기 변동성과 주요 기후 요인(기온, 강수량) 간의 관계를 분석하기 위해 시계열 및 통계 분석 기법을 적용하였다. 먼저, 각 정점 및 해역 전체에 대해 연평균 시계열을 구축하고, 선형 회귀분석(linear regression)을 통해 장기 변화 추세를 정량적으로 산출하였다. 시계열 자료의 계절성과 추세를 분리하기 위해 Seasonal-Trend Decomposition by Loess(STL) 기법(Cleveland

et al., [1990])을 적용하였으며, 추세의 통계적 유의성은 비모수 검정법인 Mann-Kendall 추세 검정(Hirsch *et al.*, [1982])을 이용하여 평가하였다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다. 기후 요인과 해양환경 지수(HSI, WQI) 간의 선형적 상관성을 파악하기 위해 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)을 수행하여 상관 계수(r)와 유의확률(p)을 산출하였다. 또한, 기후 인자(기온, 강수량)가 두 지표(HSI, WQI)에 미치는 상대적 영향을 비교하기 위해 다중 선형 회귀분석(multiple linear regression)을 실시하였다. 이 과정에서 설명변수 간 다중공선성(multicollinearity)은 분산팽창계수(Variance Inflation Factor, VIF) 분석으로 검토하였으며, 모든 변수에서 $VIF < 5$ 기준을 만족하여 다중공선성의 영향은 미미한 것으로 판단하였다(O'Brien, [2007]).

3. 결과 및 고찰

3.1 HSI 입력 인자 시계열 분석

1997~2024년 동안 수집된 HSI 입력 인자인 수온, 염분, 용존산소(DO), pH, 엽록소-*a*(Chl-*a*) 등 주요 HSI 입력 인자의 시계열 변화를 분석하였다(Fig. 2).

수온은 뚜렷한 계절 변동성을 보였으며, 선형 회귀 분석 결과 연평균 약 +0.0094°C/yr의 완만한 상승 추세가 나타났다. 염분은 계절 변동 패턴이 수온과 유사하나 진폭은 상대적으로 작았다. DO는 하절기(6~8월)에 급격히 감소하는 현상이 반복적으로 관찰되었으며, 이는 여름철 성층화에 따른 저산소 환경 발생을 시사한다. pH는 대부분 8.0 이상을 유지하였으나, 미세한 단기 변동이 있었고 장기 추세는 뚜렷하지 않았다. Chl-*a*는 2000년대 초반, 2008년, 2012년에 뚜렷한 증가 피크가 나타났으며, 전반적으로 변동성이 큰 경향을 보였다.

3.2 기후요인과 HSI·WQI 장기 추세 분석

기후 요인(강수량, 기온)과 해양환경 지표(HSI, WQI)의 장기 시계열을 분석하였다(Fig. 3). 강수량은 뚜렷한 계절 변동성을 보였으나, 연평균 기준에서는 유의한 증가나 감소 경향이 나타나지 않았다. 반면, 기온은 분석 기간(1997~2024년) 동안 연평균 약 +0.26°C/yr 상승하여, 남해안 지역의 해수면 온난화 추세와 일치하였다. HSI는 1990년대 후반부터 2000년대 초반까지 일시적 상승세를 보였으나, 이후 완만한 감소세로 전환되면서 전체 기간(1997~2024년)에 대해 -0.0023/yr의 유의한 감소 추세($p < 0.05$)를 나타냈다. 반면, WQI는

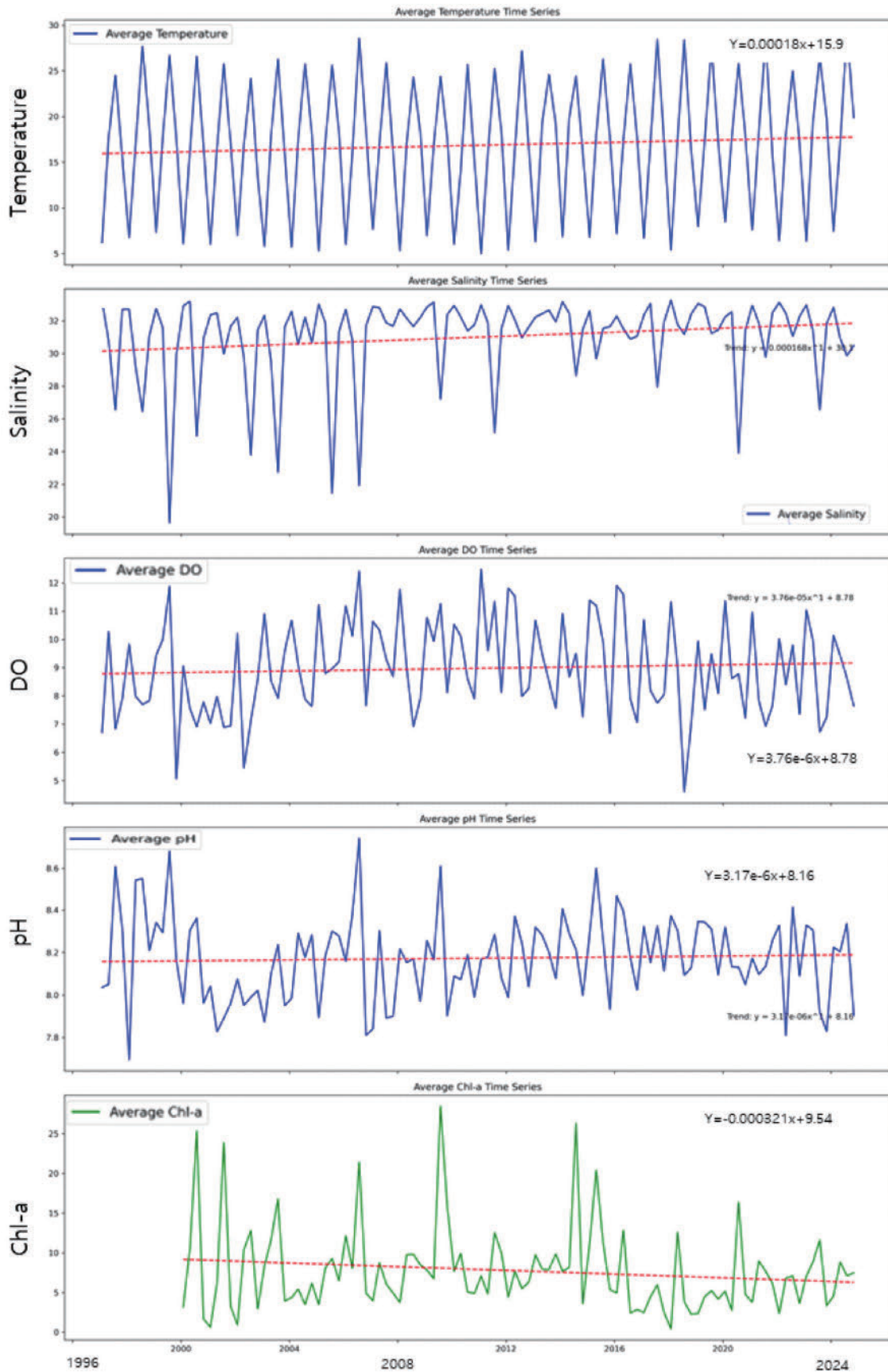


Fig. 2. Overall Average HSI Input Environmental Parameters Time Series and Long-term Trends (1997–2024).

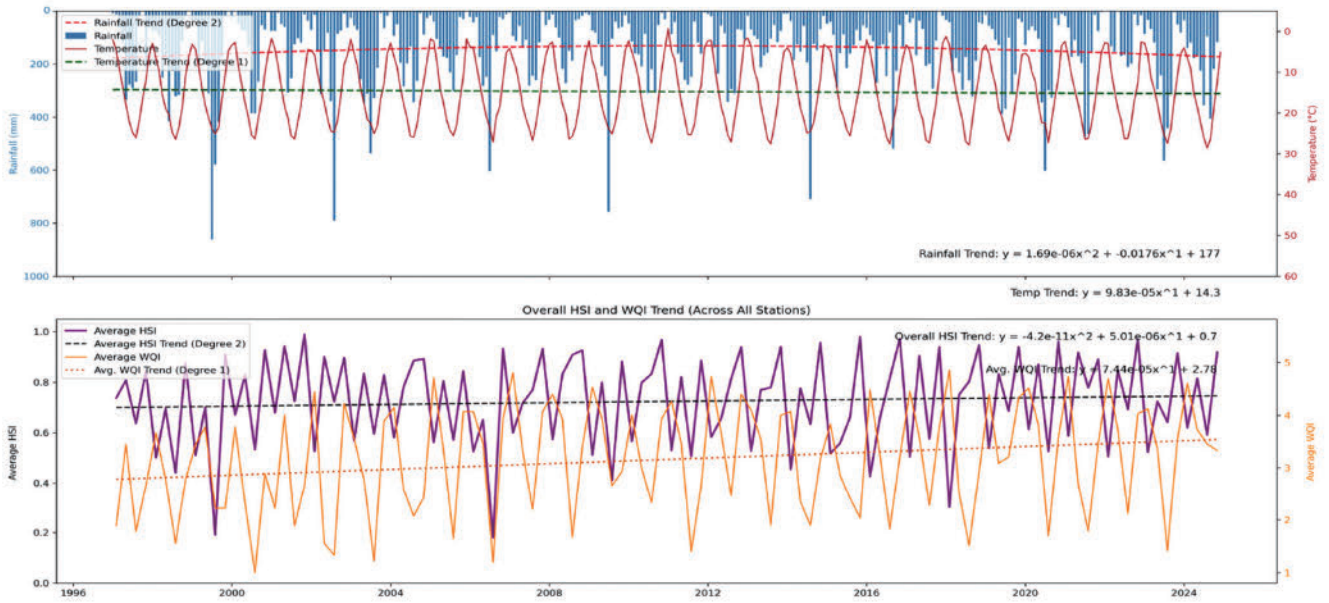


Fig. 3. Overall Trends of Climate Variables (Rainfall and Temperature), HSI, and WQI (1997–2024).

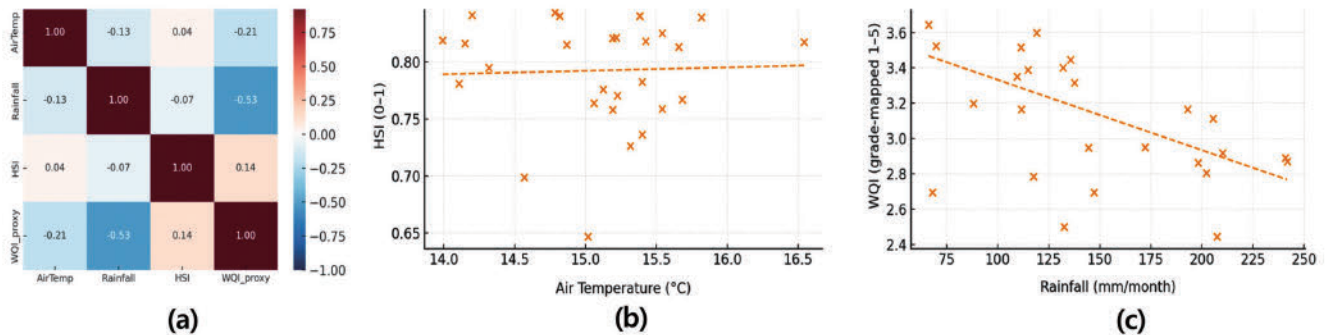


Fig. 4. Pearson correlation analysis between climatic factors and environmental indices in Jinhae Bay (1997–2024). (A) Correlation matrix, (B) Air temperature vs HSI, (C) Rainfall vs WQI.

+0.0010/yr의 완만한 증가 추세를($p < 0.05$)를 보여, 서식환경의 악화와 수질 개선이 동시에 진행되고 있음을 시사한다. 이러한 상반된 경향은 서식처 적합도와 수질지수의 반응 메커니즘이 서로 다름을 의미한다.

추가적으로, 기후요인과 환경지표 간의 선형적 관계를 정량적으로 평가하기 위해 수행한 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis) 결과, 기온과 HSI는 유의한 음의 상관관계($r = -0.61, p < 0.05$), 강수량과 WQI는 양의 상관관계($r = +0.53, p < 0.05$)를 나타냈다(Fig. 4). 이는 기온 상승이 수온 성층 강화를 유도하여 저층의 용존산소(DO) 공급을 제한함으로써 서식지 적합도(HSI)를 저하시키는 반면, 강수량의 증가는 육상 오염물질의 희석 및 부영양화 완화 효과를 통해 수질지수(WQI) 향상에 기여함을 보여준다.

3.3 계절별 HSI 및 WQI 변동성 분석

계절별 HSI 및 WQI의 평균 변화를 분석하였다(Fig. 5). 봄철 HSI는 0.75–0.95 범위에서 완만한 상승 추세를 보였으며, 가을철에는 연

중 가장 높은 값(0.85–1.00)을 기록하였다. 여름철 HSI는 0.40–0.80 수준으로 낮고 변동성이 컸으며, 겨울철에는 가장 낮은 수준(0.30–0.65)을 유지하였다.

WQI는 겨울철에 뚜렷한 상승 추세를 나타내어, 초기 약 2.0에서 2024년에는 약 4.5까지 증가하였다. 여름철 WQI는 전반적으로 낮았으나, 2010년대 이후 완만한 개선 경향이 관찰되었다. 이러한 패턴은 육상오염원 관리 강화, 하천 유입량 조절 등 연안 수질 관리 정책의 효과가 해양환경에 반영된 결과로 판단된다.

3.4 정점별 시계열 패턴 분석

정점별 공간적 패턴을 파악하기 위해 33개 정점의 연도별 HSI 및 WQI를 히트맵으로 시각화하였다(Fig. 6). 분석 결과, 외측 정점(BK1302, BK1314, BK1333 등)은 전 기간 동안 높은 HSI와 WQI를 유지하였다. 반면, 내측 정점(BK1310, BK1324 등)은 낮은 WQI와 함께 HSI 감소가 반복적으로 나타났다. 특히 2013년 이후에는 다수 정점에서 HSI 저하 현상이 확산되었으며, WQI는 2010년대 중

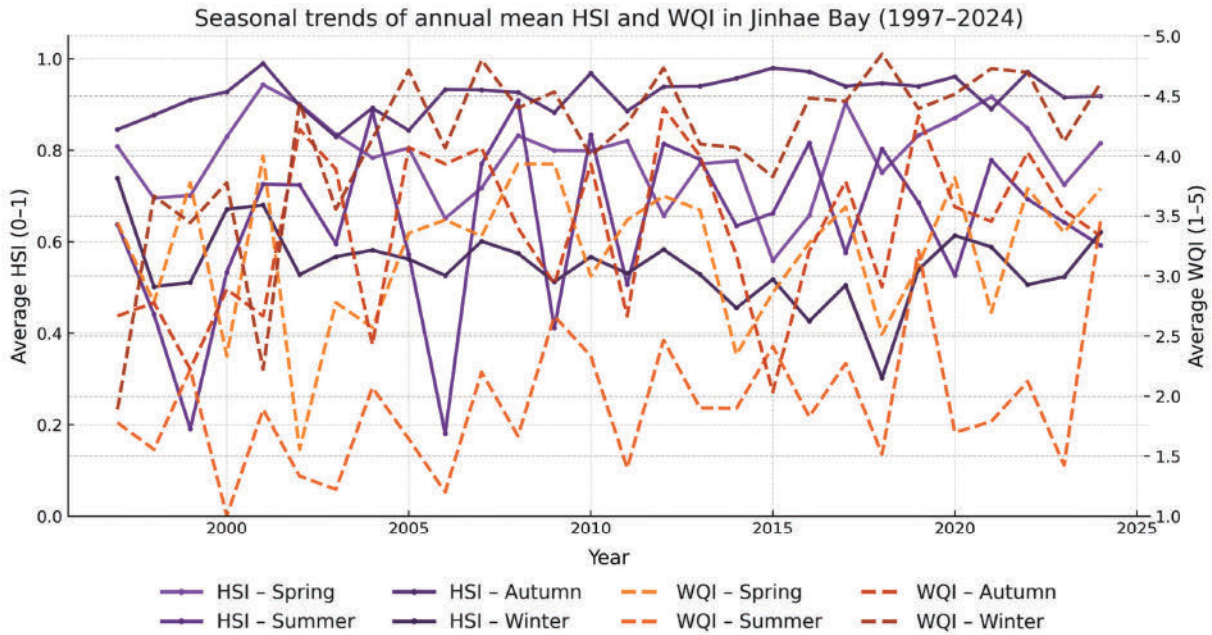


Fig. 5. Annual variations of average habitat suitability index (HSI) and water quality index (WQI) by season (spring, summer, autumn, and winter) in Jinhae Bay during 1997-2024.

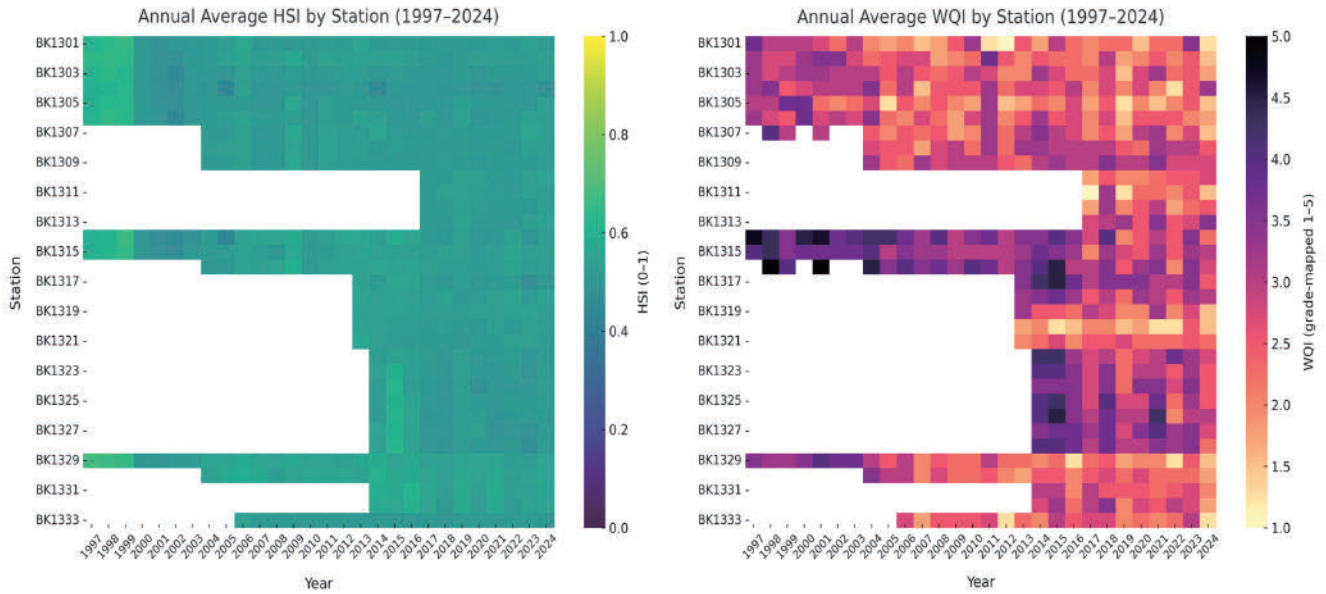


Fig. 6. Heatmap of Annual Average HSI and WQI by station in Jinhae Bay (1997-2024).

반 이후 대부분 정점에서 개선 경향이 뚜렷하게 나타났다.

3.5 기후요인, 수질, 서식처 특성 간 계절 분포

계절별 강우량, 기온, HSI, WQI의 분포를 box plot으로 제시하였다(Fig. 7).

분석 결과, 봄(Spring)과 가을(Autumn)에는 HSI가 상대적으로 높고 WQI는 낮은 경향을 보였으며, 여름(Summer)에는 두 지수 모두 낮아 서식환경이 가장 취약한 상태를 나타냈다. 겨울(Winter)에는

WQI가 가장 높게 나타난 반면, HSI는 낮은 수준을 유지하여, 두 지표가 계절에 따라 상이한 변동 양상(opposite seasonal variation)을 보였다. 이러한 계절적 차이는 서식처 적합도(HSI)와 수질지수(WQI)가 서로 다른 환경요인에 민감하게 반응함을 의미하며, 이는 단일 지표로는 포착할 수 없는 생태학적 비동기성(ecological asynchrony)을 반영한다.

봄과 가을철에 HSI가 높고 WQI가 낮게 나타난 현상은, 관측된 해양환경 인자(수온, 염분, DO, pH, Chl-a)의 계절 변동에서 기인

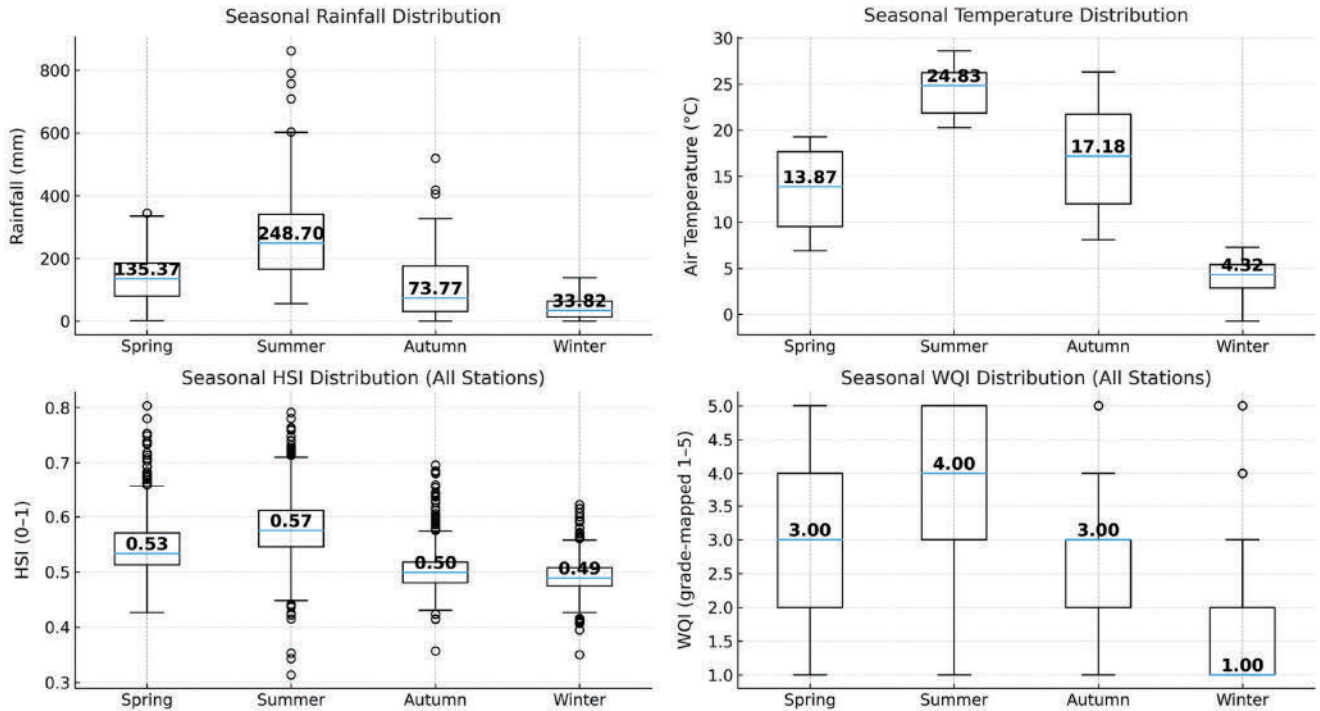


Fig. 7. Seasonal Distribution of Rainfall, Temperature, Mean HSI, and Mean WQI in Jinhae Bay (1997–2024).

한 것으로 판단된다.

봄·가을에는 수온이 완화되고 DO가 안정적으로 유지되어 서식 환경의 물리·화학적 적합성이 향상되는 반면, 강수량과 하천유입이 상대적으로 감소하여 외부 영양염 공급이 제한되며, 이에 따라 Chl-a 농도와 WQI가 낮게 산정되는 경향이 확인된다.

여름철에는 고수온과 강수 집중으로 인한 성층 강화 및 DO 저하가 두 지표의 동시 저하로 이어지며, 겨울철에는 표층 냉각과 혼합 심화로 수질이 개선되어 WQI는 회복되지만, 수온 저하로 인한 생물활동 감소로 HSI는 낮게 유지되는 양상을 보였다. 이러한 해석은 진해만 및 유사 내만 해역에서 보고된 계절적 부영양화 및 빈 산소 경향과 정성적으로 부합한다(Lee et al., [2018]; Na et al., [2021]; Kim et al., [2024]). 다만, 본 연구는 하천유량 및 영양염 농도를 직접 포함하지 않으므로, 상기 해석은 자료 기반 추정(proxy-based inference)으로 제한되며, 향후 유량 및 영양염 자료를 결합한 기작 검증이 필요하다.

3.6 정점 시계열 분석

Fig. 8은 1997–2024년 동안 진해만 해역 33개 정점의 연평균 HSI 및 WQI 시계열 변화를 나타낸다. 전체적으로 HSI와 WQI는 정점 별로 상이한 시계열 특성과 장기 추세를 보였으며, 정점의 공간적 위치(외측, 내측, 중앙)에 따라 뚜렷한 패턴 차이가 확인되었다.

외측 정점(BK1301, BK1333 등)은 전 기간 동안 HSI가 0.8 이상, WQI가 4.0 이상을 유지하였고, 장기적으로 상승하거나 안정적인 경향을 보였다. 이러한 정점은 해수 교환이 원활하고 육상 오염원의 영향이 제한된 환경 조건을 갖추고 있어 서식 환경의 안정성이 유

지된 것으로 판단된다.

내측 정점(BK1310, BK1324, BK1307 등)은 HSI가 0.5–0.7, WQI가 2.5–3.5 범위에서 변동하였으며, 연도별 변화 폭이 컸다. 2010년대 이후 다수의 내측 정점에서 HSI가 지속적으로 감소하거나 정체되었는데, 이는 여름철 수괴 성층화로 인한 저층 DO 감소, Chl-a 농도의 장기 저하, 정체 수역의 유기물 축적 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

내측 해역의 낮은 해수 교환률과 긴 체류시간은 외측보다 성층화가 쉽게 발생하고, 저층 산소 소모가 누적될 가능성을 높인다(Lee et al., [2018]). 이러한 물리적 환경 특성은 HSI 변동성을 크게 만들며, 공간적 이질성의 주요 원인으로 작용하는 것으로 판단된다.

WQI는 대부분의 정점에서 시간에 따른 개선 경향을 보였고, 2015년 이후 다수의 정점에서 4.0 이상으로 상승하여 ‘우수’수질 범주를 유지하였다. 이러한 개선은 하수도 정비, 유입 하천 오염원 관리 강화, 점오염원 저감 등 수질 관리 정책이 해양환경에 반영된 결과로 판단된다. 이 경향은 오염총량관리제(TPLMS) 시행, 하수처리장 고도처리 도입, 비점오염원 저감사업 등의 정책 효과를 보고한 선행 연구(Na et al., [2021]; Kim et al., [2024])와도 일치한다. 그러나 WQI의 개선에도 불구하고, HSI는 다수의 정점에서 0.6–0.8 범위에 머물렀으며 일부 내측 정점에서는 감소 경향이 나타났다. 이는 수질 개선이 반드시 생태학적 서식처 회복으로 이어지지 않을 수 있음을 시사한다.

HSI는 수온, DO, pH, Chl-a 등 복합적인 환경 요인을 통합적으로 반영하므로, 단일 요인의 개선만으로는 생태계 전반의 회복에 한계가 있음을 보여준다.

이는 전 지구적 해양 온난화 추세와 일치한다(Lee *et al.*, [2018]; Kim *et al.*, [2024]). 기온 상승은 해수의 밀도 성층화를 강화하여 수직 혼합을 억제하고, 저층 산소 재순환을 저해함으로써 여름철 빈산소(hypoxia) 발생의 주요 원인으로 작용한다(Fennel and Testa, [2019]).

실제로 HSI와 WQI는 하절기에 모두 낮아지는 경향을 보였으며, 이는 고수온·성층 강화로 인한 저층 DO 저하 및 서식환경 악화와 관련된다. 그러나 두 지표는 장기 추세에서 서로 다른 변동성을 나타냈다. HSI는 $-0.0023/\text{yr}$ 로 감소한 반면, WQI는 $+0.0010/\text{yr}$ 로 완만한 증가를 보였다. 이러한 차이는 두 지표의 구조적 정의와 반응 범위의 차이에서 기인한다.

WQI는 DO, pH, 영양염 등 화학적 수질 상태의 개선 정도를 반영하는 지표로, 하수처리 고도화와 오염원 저감 등 정책 개입의 효과가 직접적으로 반영된다.

반면 HSI는 수온, DO, Chl-*a*, pH 등 생물 서식에 영향을 주는 물리·화학·생리적 요인을 종합적으로 고려하기 때문에, 수질이 개선되더라도 고수온, 성층 강화, 유기물 축적과 같은 생태학적 스트레스 요인이 남아 있을 경우 회복이 지연될 수 있다. 즉, HSI는 수질지수보다 생물학적 반응과 생태계 복원도의 지표적 민감성이 높다는 점에서 차이가 있다. 이러한 구조적 차이는 WQI가 개선되더라도 HSI가 동반 상승하지 않는 이유를 설명한다.

HSI의 회복 지연은 기후변화 요인 외에도 인위적 압력(anthropogenic pressure)과 밀접히 연관된다. 특히, 과밀 양식으로 인한 퇴적물 유기물 축적, 연안 개발에 따른 물리적 서식처 훼손, 하천 유입 오염원 및 점오염원의 지속적 유입 등은 저층 산소 고갈과 먹이망 교란을 유발하여 생물서식 환경을 악화시킨다(Kim *et al.*, [2024]). 따라서 진해만의 서식환경 회복을 위해서는 단순한 수질 관리뿐 아니라,

- (1) 저층 DO 완화(기계적 혼합·산소공급 시스템 도입),
- (2) 퇴적물 유기물 축적 저감(퇴적층 준설, 저서퇴적물 산화제 처리 등),
- (3) 양식밀도 조절 및 사료 관리 개선을 통한 부하 저감,
- (4) 육상 오염원 및 비점오염원 유입 차단,
- (5) 내측 정점 중심의 정밀 모니터링 확대와 같은 다층적 관리 전략이 필요하다. 이러한 관리방안은 기후요인에 의한 구조적 변화(수온 상승, 성층 강화)와 병행하여 고려될 때, HSI와 WQI의 동반 향상을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 장기 시계열 자료를 이용해 기후요인과 해양환경지표 간의 상호작용을 정량화하였으나, 생물학적 요인(종 구성, 생산성)과 수리학적 요인(유동, 체류시간)은 직접 포함되지 않았다. 따라서 제시된 해석은 자료 기반 추정(proxy-based inference)으로 한정되며, 향후에는 생물군집·퇴적물 자료 및 수용력 수치모델링을 결합한 종합적 접근이 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 1997–2024년 장기 해양환경공단 관측자료와 기상청 기후자료를 이용하여, 진해만 해역의 서식처 적합도(HSI)와 수질 지수(WQI) 변동 특성을 분석하고 기후요인(기온, 강수량)과의 관

계를 정량적으로 평가하였다. 장기적으로 HSI는 완만한 감소($-0.0023/\text{yr}$), WQI는 완만한 증가($+0.0010/\text{yr}$)를 보였으며, 이는 수질 관리 정책의 성과에도 불구하고, 생물학적 서식 반응의 회복이 더디다는 점을 시사한다.

WQI는 화학적 수질 개선(DO, pH, 영양염 등)을 반영하는 반면, HSI는 수온, 성층, DO, Chl-*a* 등 생물서식에 직접 영향을 미치는 물리·화학·생리적 요인을 종합적으로 반영하기 때문에, 생물학적 복원은 수질 개선보다 더 많은 시간과 환경적 안정성이 필요로 함을 보여준다.

계절적으로는 여름철 고수온·성층 강화로 두 지표가 모두 저하되었고, 봄·가을에는 HSI가 높고 WQI가 낮은 비동기적 반응을 나타냈다. 공간적으로는 외측 정점에서 해수교환이 원활하여 지표가 안정적으로 유지된 반면, 내측 정점은 체류시간이 길고 유기물 축적이 심해 HSI의 변동폭이 크게 나타났다. 이러한 결과는 진해만의 환경관리에 있어 화학적 수질 개선과 생태학적 서식환경 복원의 분리된 접근이 아니라, 두 과정을 통합적으로 관리해야 함을 의미한다. 즉, 수질 개선정책만으로는 HSI 회복이 보장되지 않으며, 저층 DO 회복, 퇴적물 유기물 저감, 양식 밀도 조절, 오염원 차단 등 수용력(carrying capacity)을 고려한 맞춤형 관리 전략이 병행되어야 한다. 특히, 내측 정점은 체류시간이 길고 저층 산소 소모가 심하므로 퇴적물 준설, 저서퇴적물 산화제 처리, 저층 산소공급 등 직접적 물리·화학적 관리가 필요하며, 외측 정점은 해수 교환 유지와 하천 유입수의 비점오염 저감이 핵심이다. 진해만의 장기적 서식환경 개선을 위해서는 (1) 기후변화 요인(고수온·성층화)에 대한 적응형 관리, (2) 수용력 기반의 지역 맞춤형 양식 및 개발계획 수립, (3) 유입 오염원 관리와 퇴적물 개선을 병행한 내만형 복원 전략이 필요하다. 이러한 통합 관리체계는 HSI와 WQI의 동반 향상을 유도하고, 기후변화 시대의 지속가능한 연안 양식환경 관리로 이어질 것이다.

마지막으로, 본 연구는 장기 시계열 기반의 통계 분석을 통해 기후요인과 해양환경 지표 간의 상호작용을 정량적으로 평가한 기초 연구로서, 향후에는 수용력 평가, 생물군집 변화, 퇴적물·유동 모델링을 결합한 통합 연구를 통해 진해만 해역의 생태·기후 복합 대응형 관리체계 확립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2025년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2025015)의 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Bovee, K.D., 1986, Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology, U.S. Fish and Wildlife Service, Biological Report 86(7), 235.

- [2] Cho, Y., Lee, W.-C., Hong, S., Kim, H.-C., Kim, J.-B., 2012, GIS-based suitable site selection using habitat suitability index for oyster farms in Geoje–Hansan Bay, Korea, *Ocean & Coastal Management*, 56, 10-16.
- [3] Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., Terpenning, I., 1990, STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess, *Journal of Official Statistics*, 6(1), 3-33.
- [4] Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011, A statistical explanation of MaxEnt for ecologists, *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57.
- [5] Fennel, K., Testa, J.M., 2019, Biogeochemical controls on coastal hypoxia. *Annual Review of Marine Science*, 11, 105-130.
- [6] Hirsch, R.M., Slack, J.R., Smith, R.A., 1982, Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18(1), 107-121.
- [7] Kim, J.H., Lee, H.J., Kim, H.G., Park, J.H., 2015, Summer hypoxia dynamics and its impact on coastal benthic environment in Jinhae Bay, *Ocean Science Journal*, 50(3), 523-533.
- [8] Kim, Y.O., Choi, J.K., Lee, K.S., 2012, Analysis of the trend of dissolved oxygen and stratification in Jinhae Bay, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45(6), 720-729.
- [9] Kim, Y.O., Lim, W.A., Kim, D., 2024, Long-term trends in dissolved oxygen and environmental parameters in Jinhae Bay, Korea, *Ocean & Coastal Management*, 257, 107-347.
- [10] Lee, M.O. and Kim, J.K., 2008, Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea, *Mar Environ Res* 65, 128-147.
- [11] Lee, J.H., Kim, S.Y., Kim, H.C., Shin, K.H., Jang, P.G., Jeong, H.J., 2018, Effects of freshwater input on the distribution of dissolved oxygen and formation of hypoxic water in Jinhae Bay, Korea, *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1188-1197.
- [12] Levin, L.A., Ekau, W., Gooday, A.J., Jorissen, F., Middelburg, J.J., Naqvi, S.W.A., Neira, C., Rabalais, N.N., Zhang, J., 2009, Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos, *Biogeosciences*, 6, 2063-2098.
- [13] Lim, W.A., Kim, Y.O., Kim, D., 2021, Climate change impact on shellfish aquaculture in semi-enclosed coastal systems of Korea, *Aquaculture Environment Interactions*, 13, 135-151.
- [14] Na, G.H., Yoon, S.J., Kim, D.S., Kang, J.J., Park, H.J., Kim, J.H., Kim, Y.J., 2021, Application of habitat suitability index (HSI) for marine spatial planning in coastal aquaculture: Case study in Jinhae Bay, Korea. *Journal of Korean Society of Marine Environment and Safety*, 27(5), 580-592.
- [15] O'Brien, R.M., 2007, A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors, *Quality & Quantity*, 41, 673-690.
- [16] Rabalais, N.N., Turner, R.E., Wiseman Jr, W.J., 2001, Hypoxia in the Gulf of Mexico, *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 320-329.

Received 1 September 2025

1st Revised 13 October 2025, 2nd Revised 27 October 2025

Accepted 30 October 2025