

함평만의 해양환경 특성 및 생태계 위협 요인에 관한 종합적 고찰(1997-2024)

이문옥¹ · 김종규^{2,†} · 김병국³¹전남대학교 조선해양공학과 명예교수²전남대학교 조선해양공학과 교수³한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장

A Synoptic Review of Marine Environmental Characteristics and Ecosystem Threats in Hampyeong Bay, Korea (1997-2024)

Moon Ock Lee¹, Jong Kyu Kim^{2,†}, and Byeongkuk Kim³¹*Emeritus Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Chonnam National University, Yeosu 56926, Korea*²*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Chonnam National University, Yeosu 56926, Korea*³*Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong 53007, Korea*

요 약

본 연구는 1997년부터 2024년까지 발표된 학술 문헌과 국가 해양환경 관측망 자료를 바탕으로 함평만의 물리, 화학, 생물학적 환경 특성을 종합적으로 분석하였다. 함평만은 반폐쇄성 내만으로 광활한 조간대와 높은 생물 다양성을 보유하여 람사르 습지로 지정 관리되고 있으나, 최근 기후 변화와 신종 오염원으로 인한 환경 변화가 관측되고 있다. 장기 관측 데이터의 통계 분석 결과, 표층 수온은 연간 0.981°C의 속도로 서해안 타 지역보다 빠르게 상승하고 있으며, 염분은 점진적으로 하강하는 '고온-저염화' 추세가 뚜렷하다. 수질 측면에서는 영양염 농도가 증가하고 있으나 갯벌의 정화 기능으로 인해 수질지수(WQI)는 양호한 수준을 유지하고 있다. 특히 해저지하수(SGD)는 만 내 수은(Hg) 유입량의 65%를 차지하는 등 물질 순환의 핵심 경로임이 확인되었다. 그러나 최근 퇴적물 내 미세플라스틱(MPs) 농도가 1970년대 이후 급격히 증가하고 있으며, 해안선 침식 및 기후 변화에 따른 식생 구조의 재편(갯잔디 급증 등)이 가속화되고 있다. 본 연구는 함평만의 천혜적 가치를 보전하기 위해 탄소 흡수원(Blue Carbon)으로서의 경제적 가치를 재조명하고, 향후 신종 오염원 관리 및 기후 위기 대응을 위한 통합적 관리 전략 수립의 기초 자료를 제공하고자 한다.

Abstract – This study presents a comprehensive analysis of the physical, chemical, and biological characteristics of Hampyeong Bay, based on academic literature and national monitoring data from 1997 to 2024. As a semi-enclosed inner bay with vast tidal flats, Hampyeong Bay is recognized as a Ramsar site for its high biodiversity. However, recent data reveal significant environmental shifts driven by climate change and emerging pollutants. Long-term statistical analysis shows a rapid increase in sea surface temperature (0.981 °C·y⁻¹) and a gradual decline in salinity, indicating a distinct "warming and freshening" trend. While nutrient concentrations are rising, the Water Quality Index (WQI) remains stable due to the ecosystem's self-purification capacity. Notably, Submarine Groundwater Discharge (SGD) has been identified as a major pathway for material cycling, contributing 65% of the total mercury (Hg) input. Despite its pristine image, the bay faces escalating threats: microplastic (MP) concentrations in sediments have surged since the 1970s, and coastal erosion along with vegetation shifts—such as the rapid expansion of *Sporobolus maritimus*—are accelerating. This study highlights the bay's economic value as a blue carbon sink and provides essential baseline data for establishing integrated management strategies to mitigate climate risks and emerging environmental threats.

Keywords: Hampyeong Bay(함평만), Climate change(기후 변화), Microplastics(미세플라스틱), Submarine groundwater discharge(SGD; 해저지하수), Blue carbon(블루카본), Synoptic review(종합적 고찰)

[†]Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

1. 서론

함평만은 전남 함평군, 신안군 지도, 무안군 해제반도에 의해 형성된 만구 폭 1.8 km, 길이 17 km, 해역 면적 약 85 km²을 가진 반폐쇄형 내만으로(Fig. 1), 남부 연안 생태계의 핵심적 위치를 점하고 있다. 갯벌을 포함한 총면적은 140.73 km²이며, 이 중 조간대가 약 49.6 km²를 차지하여 전체 면적의 절반 이상이 광활한 갯벌로 이루어져 있다(Park and Park[2008], [2017]). 본 해역은 대규모 하천의 유입이 없고 좁은 수로를 통해 외해와 연결되어 있어 아산만

이나 곰소만 등과 비교해 상대적으로 폐쇄적인 물리 구조를 지닌다(Kim *et al.*[2023]). 또한 인근에 대규모 산업시설이나 인구 밀집 지역이 존재하지 않아 인위적인 오염 부하가 적은 비교적 청정한 해역으로 알려져 왔다(Lim and Choi[2001]). 함평만의 수심은 만입구에서 약 23 m로 가장 깊고, 중앙부 수로를 따라 약 16 m의 골을 형성하며 내측으로 갈수록 10 m 이내로 얕아지는 지형적 특성을 보인다(Ryu *et al.*[1999]). 해수 유동은 주로 반일주조의 조석과 바람에 의해 지배되며, 만내 평균 조차는 315.45 cm(대조차 425.3 cm)에 이른다(NGII[1981]; <https://www.ngii.go.kr>). 최대 유속은 만

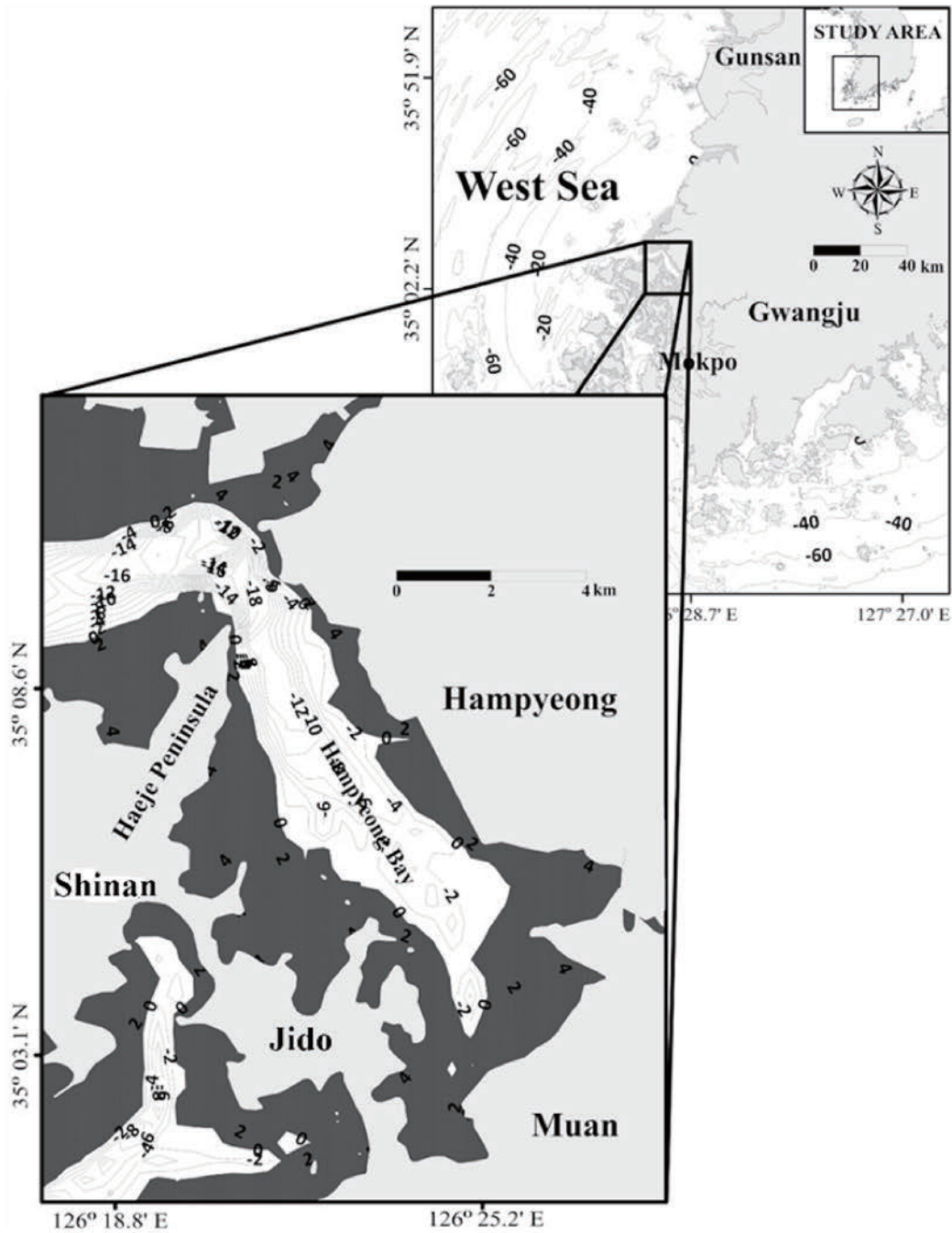


Fig. 1. Location of the study area (where shadow area denotes tidal flats).

입구 기준 창조시 $125 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 낙조 시 $138 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 낙조류가 우세하며, 이러한 조류의 주 방향을 따라 사주(sand bar), 조류 수로(tidal channel) 등 복잡하고 다양한 미지형이 발달해 있다(Lee and Jun[2009]). 이러한 지형적·물리적 토대 위에 형성된 무안 갯벌은 생물 다양성의 가치를 인정받아 국내 최초의 갯벌 도립공원이자 람사르 습지로 지정되어 관리되고 있다(So *et al.*[2019]). 이곳에는 갯잔디, 칠면초 등 염생식물을 비롯하여 저서성 돌말류와 대형 저서동물 등이 풍부하게 서식하며, 세립한 니질 퇴적물(fine muddy facies)을 중심으로 건강한 연안 생태계를 유지하고 있다(Kim *et al.*[2012]). 그러나, 최근 함평만은 인근 지표 오염원의 부재에도 불구하고 다양한 환경적 위협에 직면하고 있다. 자연적으로는 몬순 계절풍에 의한 지형 변화와 해안 절벽 침식에 따른 해안선 후퇴 문제가 대두되었으며(Cho *et al.*[2001]; Ryu[2003]), 외부적으로는 중국 황해 유래의 잔류성 독성물질(PTSs)에 의한 퇴적물 오염 및 양쯔강 등을 통해 유입되는 미세플라스틱(MPs)의 생태계 교란 위협이 가중되고 있다(Hwang *et al.*[2021]; Park *et al.*[2023]). 따라서, 본 연구에서는 함평만이 보유한 천혜의 생태적 가치를 지속 가능하게 보전하기 위하여, 기존의 연구 결과들을 종관적(synoptic) 관점에서 종합하고 현재 직면한 환경적 특성과 잠재적 위협 요인을 고찰하고자 한다. 이를 바탕으로 향후 함평만의 건전한 해양 생태계 관리를 위해 우선적으로 다루어야 앞으로의 과제에 대해 논의하고자 한다. 특히, 본 연구는 함평만의 지속가능한 관리 및 기후위기 대응 전략 수립을 위한 통합적 기초 자료를 제공하는 데 그 의의가 있다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 함평만의 해양환경 특성을 체계적으로 고찰하기 위해 1997년부터 2024년까지 학계에 발표된 학술 논문 및 공공기관의

관측 자료를 수집·분석하였다.

문헌 조사는 국내외 주요 학술 데이터베이스를 활용하였다. 국내 문헌은 한국학술지인용색인(KCI) 등재 논문을 대상으로 학술검색 포털인 KISS(Korean Studies Information Service System)에서 키워드 “함평만”을 사용하여 검색하였다. 국외 문헌은 과학인용지수(SCI)급 논문을 포함하여 Science Direct에서 “Hampyeong Bay”를 검색어로 설정하여 자료를 수집하였다. 조사 기간의 기점을 1997년으로 설정한 것은 해당 키워드로 KCI 또는 SCI급 학술지에 연구 결과가 최초로 등재된 시점을 반영한 것이다. 이를 통해 최종적으로 선정된 총 63편의 문헌을 분석 대상으로 삼았다.

또한, 정량적인 해양환경 변화를 파악하기 위해 해양환경공단(KOEM)의 해양정보포털(<https://www.meis.go.kr>)에서 제공하는 함평만 일대의 국가 해양환경 측정망 자료를 병행하여 검토하였다. 본 연구에서는 함평만의 장기 SST 변화 추세를 객관적으로 입증하기 위해 비모수 통계 검정법인 Mann-Kendall trend test를 수행하여 경향성의 유의성을 파악하였으며, Sen's slope estimator를 통해 연간 변화율의 정량적 크기를 산출하였다. 분석 결과, $p < 0.001$ 수준에서 통계적으로 매우 유의한 상승 경향이 확인되어 이를 본문 결과 및 고찰 부분에 반영하였다. 본 연구에서는 수집된 문헌 데이터와 공공 관측 자료를 종합하여 함평만의 물리적 지형 변화, 수질 및 퇴적물 특성, 생태계 오염 실태를 종관적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지금까지 수행된 함평만 연구 개요

함평만의 해양환경에 관련하여 1997년에 최초의 연구가 이루어진 이래 지금까지 수행된 연구 주제를 Table 1에 나타내었다. 이 결과에 따르면, 갯벌과 해안의 퇴적 환경에 관한 연구가 가장 많았고, 다

Table 1. Categorization of reviewed literature regarding the marine environment of Hampyeong Bay(1997-2024)

Category	Sub-category	Key research topics	Number of references	Keywords
Physical Environment	·Seawater behaviors ·Water temperature·Salinity	·Tidal residual current ·Rising water temperature trend ·Analysis of high-temperature and low-salinity (HTLS) phenomena	8	Tidal front, SST trend, Circulation
Water quality and Biogeochemistry	·Nutrient budgets ·SGD	·Mass balance (LOICZ) ·SGD discharge calculation ·Radioactive tracers	12	SGD, nutrient budget, Ra/Rn tracer
Sediment and Geomorphology	·Sedimentary facies ·Coastal erosion	·Grain size variation of intertidal sediments ·Shoreline recession ·Stratigraphic analysis	18	Tidal flat facies, Coastal erosion, Stratigraphy
Ecology and Biota	·Benthos ·Vegetation	·Microphytobenthos(MPB) ·Benthic macroinvertebrate community ·Halophytes (<i>Zoysia sinica</i>) succession	14	Benthos, Halophytes, species diversity
Marine pollution	·Hazardous substances ·Microplastics (MPs)	·Distribution of MPs ·Heavy metal contamination ·Ecological risk assessment (ERA)	7	Microplastics, PTSs, Ecotoxicology
Miscellaneous and Management	·Carbon sink ·Remote sensing	·Blue carbon ·Satellite-based sedimentary facies classification	4	Blue carbon, Remote sensing, GIS
Total			63	

음으로 미세플라스틱(microplastics; MPs), 저서미세조류(microphytobenthos; MPBs), 수질 환경, 물리 환경, 식생(vegetation)과 관련한 연구가 많은 것으로 나타났다. 또한 최근 연안역에 있어서 영양염의 주요 공급원으로서 해저지하수 유량(submarine groundwater discharge; SGD)과 관련한 연구가 다수 이루어지고 있는 점이 주목된다. 또한, Table 1에서 알 수 있듯이, 초창기(1990년대 후반)에는 퇴적 지질학적 연구가 주를 이루었으나, 2010년 이후 SGD 및 미세플라스틱과 같은 신종 오염원 연구로 그 외연이 확장되고 있다. 한편, 천수만이나 가막만, 또는 여자만이나 진해만, 영일만 등의 다른 연안역과는 달리 동·식물플랑크톤과 어류, 패류 등 수산생물(또는 양식생물)과 관련한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이는 함평만의 지형적 특성이 광활한 조간대와 갯벌 중심으로 형성되어 있어, 수산생물 연구보다는 퇴적 환경 및 미세 생태계 연구에 비중이 편중되었음을 반영한다. 이하에서는 함평만 해양환경과 관련하여 지금까지 수행된 연구 주제를 구체적으로 분석·고찰하였다.

3.2 함평만의 해양 환경

3.2.1 물리 환경

함평만 주변 해역의 조류 패턴에 관한 수치모의 결과(Chu[2020]), 창조 시 입자도-낙월도에서 북동진한 흐름은 해제반도(Haeje Peninsula) 북단의 도리포를 거쳐 함평만으로 유입되며, 낙조 시에는 역방향으로 유출되어 외해의 남동향 흐름과 합류하는 양상을 보인다. 이러한 흐름은 함평만을 포함한 해제반도 주변에서 창조시 시계방향, 낙조시 반시계방향의 순환 구조를 형성한다. 함평만은

만구(입구)가 좁고 수심이 깊은 반면, 만 내부는 얕은 수심과 넓은 조간대가 발달하여 유속이 정체되는 특성을 보이며, 특히 각시도를 중심으로 $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 이하의 미약한 반시계방향 조석잔차류 환류가 관찰된다.

한편, 수온과 염분의 변동 특성을 살펴보면, 함평만 입구에서는 창조시 저온·고염의 외해수가 유입되고 낙조시 고온·저염의 연안수가 유출되는 주기적 변동이 뚜렷하다(Chu *et al.*[2000]). 계절적으로는 하계에 고온·저염의 저밀도수가, 동계에 저온·고염의 고밀도수가 출현하며, 특히 하계 소조기에는 주 수로를 따라 조석전선(tidal front, $SH=2.4-3.5$)이 형성되었다(Lee and Jun[2009]). 단, 여기서, $SH(=\log_{10}(H\cdot U^3))$ 으로 정의되며, H는 수심, U는 M_2 조류의 진폭을 나타낸다. 이 값은 Simpson and Hunter[1974] 또는 Kasai *et al.*[1999] 등이 정의한 결과에 따르면, 조석전선은 SH값이 2.7-3.7 또는 2.7인 곳에 존재하는 것으로 보고하였다. 이러한 조석전선은 지형적 특성과 조류 세기의 공간적 차이에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 만내의 수온 변동은 하계에는 저열 효과로 인해 외해보다 높고, 동계에는 냉각 효과로 인해 외해보다 낮게 나타나는 전형적인 반폐쇄성 내만의 특성을 보인다(Kang *et al.*[2009]).

또한, 함평만의 장기 수온(특히, 8월의 SST) 변동성을 파악하기 위해 1997년부터 2024년까지의 장기 모니터링 자료(KOEM, 1997-2024)를 대상으로 Mann-Kendall trend test를 수행한 결과, 통계적으로 매우 유의한 상승 경향이 확인되었다($Z=14.45$, $p<0.001$). 또한, Sen's slope estimator를 통해 산출된 연간 수온 상승률(Q)은 $0.981^\circ\text{C}\cdot\text{y}^{-1}$ 로 나타나, 조사 기간 동안 함평만의 고온화 현상이 가

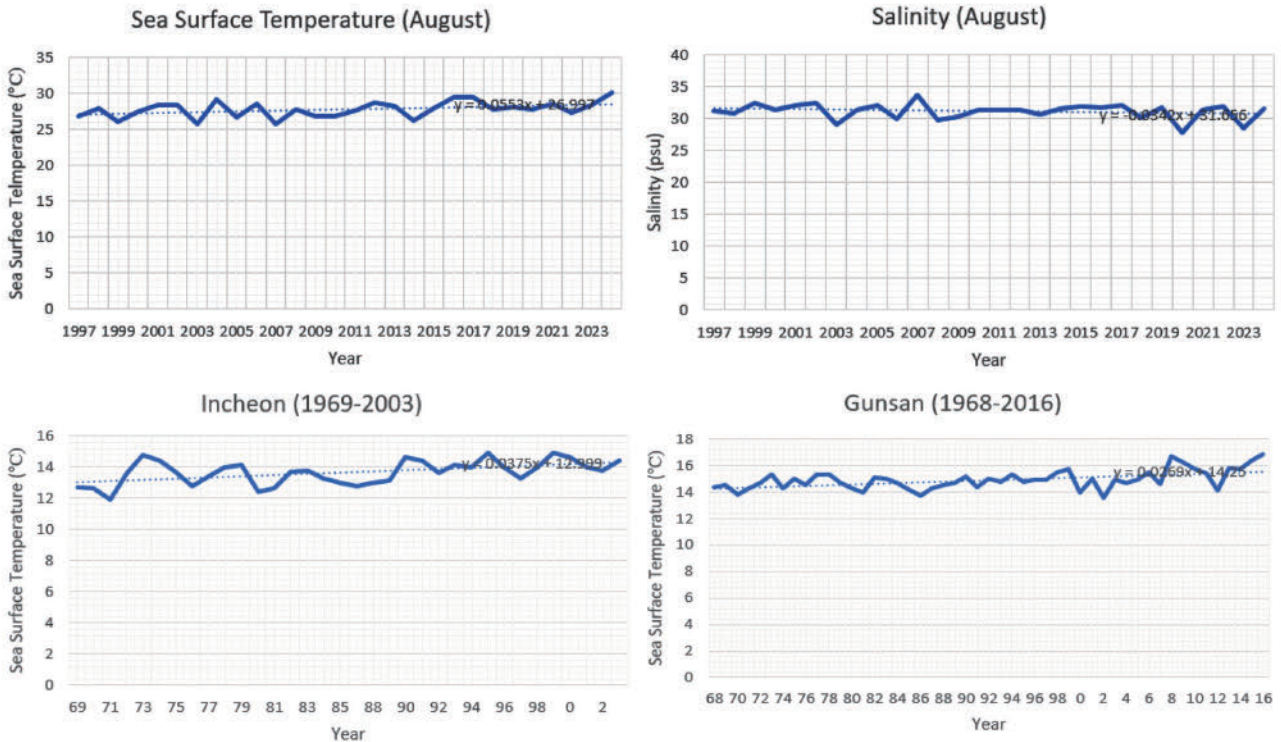


Fig. 2. Interannual variations of sea surface temperature (SST) and salinity in Hampyeong Bay (1997–2024).

속화되었음을 입증하였다. 또한, 이는 Lee *et al.*[2024]이 조사한 인천(0.0375°C·y⁻¹)이나 군산(0.0269°C·y⁻¹) 등 서해안 타 지역에 비해 함평만의 고온화 현상이 가속화되고 있음을 시사하였다(Fig. 2).

반면, 염분은 대조적으로 점진적인 하강 추세를 나타내었다. 이러한 장기 관측 데이터에서 나타난 ‘고온-저염화’ 추세는 일반적인 증발량 증가 이론으로 설명되지 않는 독특한 열역학적 변이이다. 이는 기후 변화에 따른 집중호우 빈도 증가 및 외해 저염분수(양쯔강 유출수 등)의 유입 경로 변화가 복합적으로 작용했을 가능성을 강력히 시사하며, 이에 대한 정밀한 메커니즘 규명이 요구된다.

3.2.2 수질 환경

함평만의 수질은 만 내로 유입되는 하천수와 갯벌의 정화 및 물질순환 기능에 의해 복합적으로 결정된다. Lee *et al.*[2006]은 갈대 서식 갯벌이 SS, COD, 영양염류를 여과하는 기능을 수행함을 확인하였으며, Kang *et al.*[2009]은 조석 주기에 따른 영양염 변동을 근거로 함평만 갯벌이 하계에는 영양염의 공급원(source)으로, 동계에는 제거원(sink)으로 작용한다는 기작을 제시하였다. 한편, LOICZ(Land and Ocean Interaction in Coastal Zone) box model을 이용하여 Kim and Jang[2016]이 행한 물질수지 산정 결과에서는, 함평만의 담수 체류시간이 약 52.4일로 나타나 해수 교환이 매우 불량한 반폐쇄성 해역을 입증하였다. 뿐만 아니라, 영양염 수치 측면에서 질소(DIN)는 탈질화 및 생물 소비에 의해 유출되는 경향을 보이나, 인(DIP)은 유기물 분해 및 퇴적물 용출을 통해 공급되는 양이 더 많은 것으로 분석되었다. 또한, 최근 SOM(Self-Organizing Map)-k-means 기법을 활용한 군집 분석을 통해 함평만 갯벌 내 부유물질(Total Suspended Matter; TSM)의 확산 및 퇴적 양상이 재확인된 바 있다(Noh *et al.*[2021]).

한편, KOEM의 해양정보포털에 공개된 자료를 바탕으로 장기 수질 변동(1997-2024)을 분석한 결과(Table 2, Fig. 3), DO, DIN, DIP 및 SS 농도는 장기적으로 증가 추세를 보인 반면, Chl_a 농도는 미세하게 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 함평만의 수질지수(WQI)는 연도별 변동성이 크지만, 전반적으로 2등급(양호) 수준을 꾸준히 유지하고 있는 것으로 평가된다. 다만, 장기적인 영양염 농도 증가와 수온 상승이 맞물려 향후 생태계 구조 변화를 초래할 가능성이 있으므로 지속적인 모니터링이 요구된다.

3.2.3 퇴적·저서 환경

1) 퇴적물의 분포 특성 및 동역학: 함평만 조간대 퇴적물은 입도 분포의 공간적·계절적 변동성이 뚜렷하다. 만 입구(Anak 조간대)보다 만 내부(Simok 조간대)에서 입도 변화가 더 크게 나타나는데, 하계에는 세립질 퇴적물이 집적되어 입자가 가늘어지는 반면, 동계에는 조립화되는 경향을 보였다(Ryu *et al.*[1999]). 이러한 양상은 만의 형태와 몬순 계절풍에 의한 파랑 발달 및 조간대 지형의 상호 작용에 기인한다(Ryu[2003]). 특히 갯벌의 퇴적상은 위성영상(Landsat TM/ETM+) 분석을 통해 진흙(mud), 혼합(mixed), 모래(sand)의 세 가지 유형으로 분류 가능하며, 이는 현장 관측값과 80% 이상의 높은 일치도를 보였다(Jeong[2002]; Ryu *et al.*[2014]).

2) 해안 침식 및 지형 변화: 함평만은 반폐쇄적 지형임에도 불구하고 해안절벽의 후퇴와 조간대 침식이 활발히 진행되고 있다. 해운리 일대의 해안절벽은 연약한 풍화암과 토양층으로 구성되어 있어 태풍 및 폭풍 시 이상 고조에 의해 연간 1-2 m의 속도로 후퇴하고 있었다(Cho *et al.*[2001]). 이러한 침식 과정은 절벽 기저부 침식, 사태(landslide), 테일러스(talus) 형성 및 소멸의 순차적 과정으로 반복되며, 하계의 계절적 해수면 상승과 동계 폭풍파가 주요 요인으로 작용한다(Lim *et al.*[2002]). 특히 함평만은 인근 곰소만과 달리 하계에 약 5.0 cm의 지형 침하가 발생하는 침식 우세형 갯벌의 특성을 나타내었다(Xu *et al.*[2016]).

3) 지질 층서 및 고환경 복원: 함평만 조간대의 층서는 기반암(중생대 화강암) 위로 육성 퇴적층(Unit III), 플라이스토세 니질 조간대층(Unit II), 현세 해침 퇴적층(Unit I)이 부정합적으로 쌓여 있었다(Park *et al.*[1997]). 중생대 함평 분지는 과거 하천과 호수가 발달했던 활동적인 분지였으며, 당시 흑색 셰일의 분포는 혐기성 퇴적 환경이었음을 시사한다(You *et al.*[2000]). 또한 퇴적물 내 규편모류(Dictyocha 속) 및 규조류(*Paralia sulcata* 등) 분석 결과는 함평만이 과거부터 현재까지 온난수괴의 강한 영향하에 있었음을 뒷받침하였다(Koh[2020]; Ryu *et al.*[2008]).

4) 해양 오염 및 생태 독성학적 특성: 함평만의 화학적 오염 수준은 유기 오염물질과 중금속 측면에서 복합적인 양상을 띤다. PCBs와 DDTs 등 유기염소계 화합물은 육상 기원 오염원의 영향을 받고 있으며(Kim *et al.*[2002]), 퇴적물 내 중금속(As, Cd, Cu 등) 농도는 타 산업단지 인근 해역보다는 낮으나 일부 지점에서는 중간 정도의 비

Table 2. Seasonal variations of water quality parameters (DO, DIN, DIP, SS, and Chl-a) in Hampyeong Bay

Season Parameter	February	May	August	November
DO (mg·L ⁻¹)	9.4-13.9 (mean: 11.3)	3.7-10.3 (mean: 8.1)	5.3-10.6 (mean: 6.9)	5.0-10.9 (mean: 8.2)
SS (mg·L ⁻¹)	2.4-97.5 (mean: 49.1)	9.2-316.8 (mean: 49.8)	1.7-88.1 (mean: 26.9)	0.6-47.3 (mean: 23.6)
DIN (µg·L ⁻¹)	19.6-378.0 (mean: 147.3)	34.6-278.5 (mean: 135.8)	16.3-358.2 (mean: 162.6)	70.4-365.9 (mean: 195.5)
DIP (µg·L ⁻¹)	1.43-38.4 (mean: 14.5)	4.7-31.9 (mean: 16.1)	1.0-45.6 (mean: 21.6)	0.6-47.3 (mean: 23.6)
Chl_a (µg·L ⁻¹)	0.24-8.73 (mean: 2.39)	0.59-4.34 (mean: 2.0)	0.43-13.7 (mean: 3.4)	0.39-4.57 (mean: 1.76)

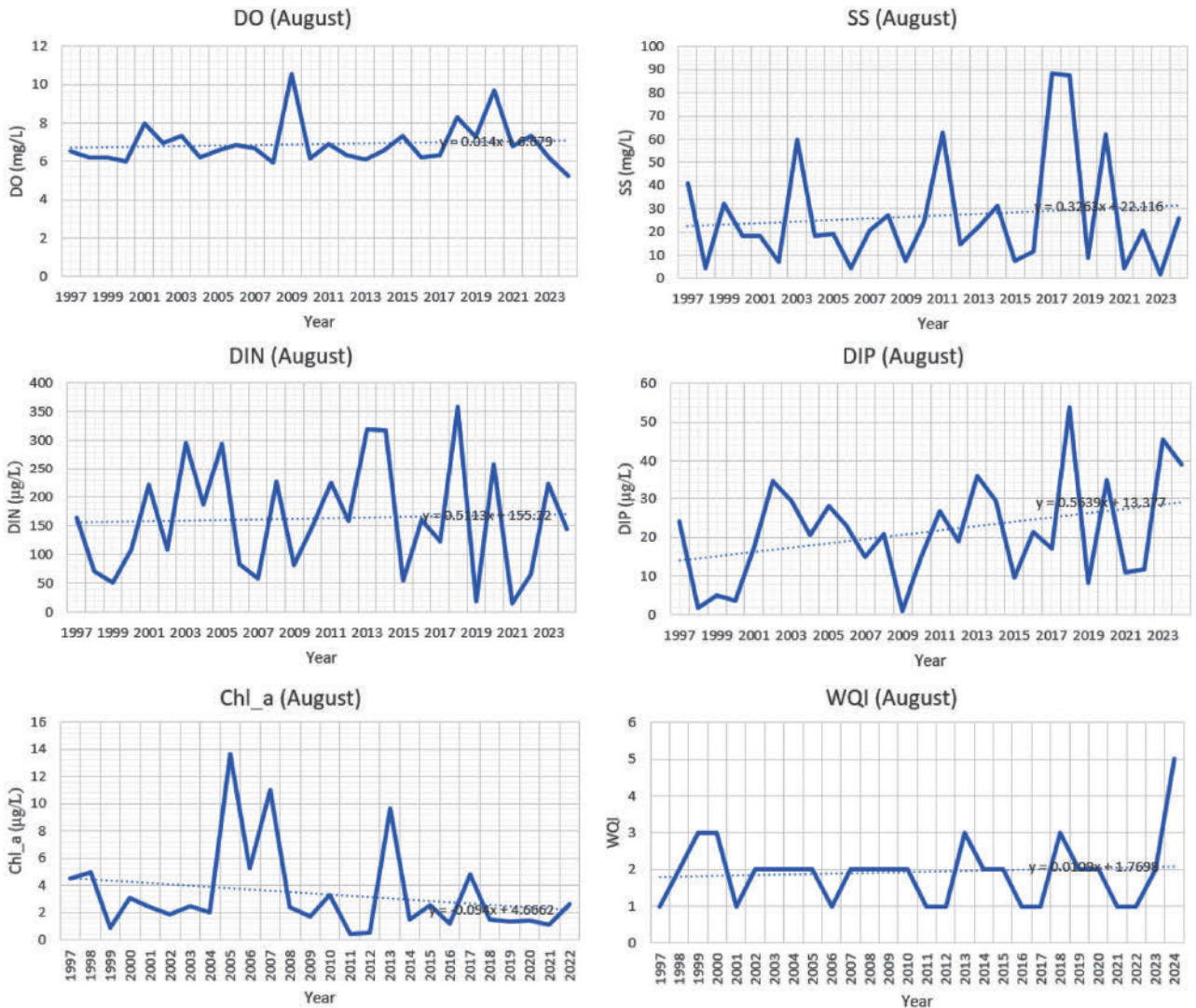


Fig. 3. Long-term yearly variations of water quality parameters and Water Quality Index (WQI) from 1997 to 2024.

소(As) 오염이 관찰되었다(Hwang *et al.*[2016]). 특히 함평만에 서식하는 갯벌게(*Macrophthalmus japonicus*)의 체내 중금속 농축은 키틴 분해효소의 유전자 발현 및 외골격의 거칠기 변화에 영향을 미치는 것으로 분석되어 생태독성학적 주의가 요구된다(Park *et al.*[2019]).

5) 탄소 및 질소 저장고로서의 가치 (blue carbon): 최근 함평만 갯벌은 기후위기 대응을 위한 탄소 흡수원으로서 주목받고 있다. 함평만 비식생 갯벌의 유기탄소 저장량과 블루카본 축적량은 퇴적물의 펄(mud) 함량과 정비례하며, 수심이 깊어질수록 저장량이 감소하는 특성을 보였다(Park *et al.*[2023b]). 또한 갯벌의 질소 저장량 역시 점토 함량에 의해 결정되는데, 함평만을 포함한 한국 갯벌의 연간 질소 제거 능력은 경제적으로 약 2억 3,300만 달러의 가치를 지니는 것으로 평가되었다(Kwon *et al.*[2022]). 이는 함평만 갯벌이 단순한 지형적 존재를 넘어 거대한 생태계 서비스 기능을 수행하고 있음을 의미한다. 특히, 니질 퇴적물이 우세한 함평만의 지형적 특성은 탄소를 장기간 안정적으로 가두어 두는 격리(sequestration)

기능에 최적화되어 있는 것으로 판단된다. 기존 연구에서는 염생식물에 있는 습지만 주목을 받았으나, 함평만의 광활한 비식생 조간대 역시 미세저서조류(MPBs)와 저서동물의 활동을 통해 막대한 양의 탄소를 퇴적층 깊숙이 저장하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 함평만이 탄소 중립 달성을 위한 국가적 자산으로서의 경제적 가치가 매우 높음을 시사한다. 탄소 뿐만 아니라, 탈질화 작용을 통한 연간 질소 제거 능력 또한 연안의 수질 정화 비용을 획기적으로 절감하는 경제적 가치(연간 수억 달러 규모)를 지니며, 이는 해역의 건강성을 유지하는 핵심 기작으로 생각된다.

3.2.4 해저지하수(Submarine Groundwater Discharge; SGD)를 통한 물질 수지

함평만이 위치한 한국 서남해안은 최대 10m에 이르는 대조차(spring range)와 약 2,850 km²의 광활한 조간대 지형을 보유하고 있다(Koh[2002]). 이러한 지형적 특성에서 발생하는 강한 조석 주기(Tidal cycle)는 육상 지하수 대수층(aquifer)과 해수 사이의 수리

학적 경사(hydraulic gradient)를 변동시켜, 퇴적물 하부로부터의 해저지하수 배출(SGD) 및 재순환된 해수(recirculated seawater)의 유출입을 촉진한다(Charette *et al.*[2008]). SGD는 지표 유출에 비해 농축된 영양염 및 미량 원소를 포함하고 있어, 연안의 영양염 수지(nutrient budget)와 기초 생산력(primary productivity)을 제어하는 핵심 동역학으로 작용한다. 특히, SGD를 통한 영양염 공급은 전술한 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 함평만의 Chl_a의 감소 추세에도 불구하고 생태계 생산성을 유지시키는 기작으로서 중요한 역할을 담당하고 있다. 뿐만 아니라, 함평만은 만구가 협소하고 대규모 지표 하천의 유입이 제한된 반폐쇄성 해역으로서, 라듐(Ra) 및 라돈(Rn)과 같은 천연 방사성 추적자(natural radioactive tracers)를 이용한 질량 수지 모델(mass balance model) 적용의 최적지로 평가받고 있기도 하다. 관련 연구에 따르면, 함평만내 총 수은(Hg) 유입량의 약 65%($18 \pm 12 \text{ mol} \cdot \text{y}^{-1}$)가 SGD를 통해 공급되며, 이는 대기 침적(31%)에 비해 현저히 높은 기여도를 나타낸다(Rahman *et al.*[2013]). 또한, ^{226}Ra 모델링 결과, SGD 규모는 계절에 따라 $0.14 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (5월)에서 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (9월)의 범위를 보였으며, 이때 유출되는 용존 규산염(DSi)이 미세조류의 탄소 고정 효율을 결정하는 주요 제한 인자임이 입증되었다(Waska and Kim[2011]). 미량 원소 및 희토류 원소(REEs)의 거동 측면에서도 SGD의 영향력은 지표수 대비 3차수(order) 이상 높은 플럭스를 기록하며 압도적인 기여도를 보였다(Kim and Kim[2014a]). 특히 SGD 내 존재하는 콜로이드(colloidal phase) 성분은 철(Fe) 및 용존 유기물(DOM)과의 지구화학적 상호작용(Geochemical interaction)을 통해 연안으로 유출되는 미량 원소의 생지화학적 거동을 조절하는 핵심 매개체로 확인되었다(Kim and Kim[2015]).

3.2.5 생물상(Biota)

1) 저서생물 (benthos): 함평만 갯벌의 저서 규조류는 약 45-77종이 출현하며, 광온성 종인 *Paralia sulcata*가 압도적인 우점종을 형성하고 있다(Lee and Jung[2011]; Lee[2013]). 최근에는 신종 규조류인 *Halampyrea hampeyongensis*가 보고되는 등 생물 다양성 측면에서도 그 가치가 높다(An *et al.*[2024]). 대형저서동물 군집은 만의 폐쇄도와 오염 정도에 따라 뚜렷한 공간적 구조를 보이는데, 함평만은 득량만이나 가막만에 비해 상대적으로 정상 해역의 군집 특성을 잘 유지하고 있다(Choi *et al.*[2016]). 또한, 기회주의적 녹조류인 *Ulva prolifera*의 대량 번성 시에는 저서동물의 영양 구조가 미세저서식물(micro phyto benthos; MPBs)에서 녹조류 기반으로 전이되는 등 섭식 전략의 유연한 변화가 관찰되었다(Park *et al.*[2016]).

2) 해초류 및 염생식물(vegetation): 함평만 연안 식생은 지형 특성에 따라 총 12과 35종이 분포하며, 최근 기후 및 지형 변화에 따라 식생 구성이 재편되고 있다(Kim *et al.*[2023]). 특히 2016년 대비 2022년 조사 결과, 대표적 염생식물인 해홍나물 군락은 74% 급감한 반면, 갯잔디 군락은 75% 급증하는 상반된 변화를 보였다(Hong *et al.*[2022]). 갯잔디는 높은 밀도의 지하경을 통해 퇴적물을 고정

함으로써 사구 환경 조성 및 지형 안정화에 기여하고 있는 것으로 판단된다.

3) 갑각류(crustaceans): 함평만 내 십각 갑각류는 총 19과 38종이 출현하며, 이는 광양만이나 일본 Miho Bay보다는 적으나 동해 남부나 사천 해역보다는 풍부한 수준이다(Kim *et al.*[2005]). 이러한 높은 종 다양성은 육상 기원 오염원의 직접 유입이 적고 갯벌 생태계가 양호하게 보존되어 있음을 시사한다. 함평만 갑각류 군집은 주거종과 계절종으로 구분되며, 이들의 종조성과 생체량 변동은 주로 우점 새우류의 산란 습성 및 시기에 따라 결정되는 동태를 보인다.

3.2.6 미세플라스틱(Microplastics; MPs)

전 세계적인 플라스틱 생산량 증가와 낮은 재활용률로 인해 막대한 양의 플라스틱 폐기물이 해양으로 유입되고 있다(Geyer *et al.*[2017]). 이들은 풍화 및 분해 과정을 거쳐 5mm 미만의 미세플라스틱(MPs)으로 변모하며, 해양 생물의 섭식을 통해 물리적 손상 및 독성 물질의 먹이사슬 전이를 유발한다(Law and Thompson[2014]; Teuten *et al.*[2009]). 특히 한국 서해안 갯벌은 자연 정화와 탄소 축적의 핵심지임에도 불구하고, 인근 하천과 연안 개발의 영향으로 MPs 오염 위험에 노출되어 있으나 관련 연구는 아직 미비한 실정이다. Park *et al.*[2023]의 조사 결과에 따르면, 함평만 갯벌 퇴적물 내 MPs 농도는 1970년대 이후 급격히 증가해 왔으며, 주로 폴리프로필렌(51%)과 폴리에틸렌(36%)이 과편 형태로 잔류하고 있는 것으로 나타났다. 또한, Kwon *et al.*[2020]은 함평만을 포함한 8개 한국 연안(도시지역(5개): 인천연안, 광양항, 부산연안, 울산만, 영일만, 농촌 지역(3개): 천수만, 함평만, 득량만)에서 MPs의 공간 분포를 조사하였다. 그 결과, 함평만의 미세플라스틱(MPs)의 평균 풍부도(abundance)는 $1.70 \text{ particles} \cdot \text{m}^{-3}$ 로서, 다른 농촌지역인 천수만의 2.79보다는 낮았으나, 득량만의 1.12보다는 다소 높았다. 반면, 도시지역인 인천의 1.96, 영일만의 4.54, 울산만의 4.73보다는 낮았으나, 광양만의 1.65, 부산 연안의 1.35보다는 다소 높았다. 결과적으로, 도시지역에서의 MPs의 평균 풍부도는 $2.85 \text{ particles} \cdot \text{m}^{-3}$ 로, 농촌지역의 평균 풍부도 $1.86 \text{ particles} \cdot \text{m}^{-3}$ 에 비해 더 높았다. 그러나, 농촌지역인 함평만에서의 MPs의 풍부도가 도시지역인 부산 연안이나 광양만에 비해 오히려 더 높은 것은 인근 영산강 유출수나 양쯔강 유래 외해수의 장거리 수송 가능성을 시사한다. 뿐만 아니라, 이것은 함평만의 MPs 오염이 외부 유입과 내부 발생이 복합적으로 작용하고 있음을 나타낸다. 한편, MPs의 재료는 발포 폴리스티렌(EPS)과 섬유 및 페인트 입자가 주요 성분으로 확인되었는데, 이들은 어구, 부표, 포장재 등 연안 어업 활동과 육상 폐기물에서 기인한 것으로 생각된다. 특히 파편(fragment) 형태의 높은 잔류비는 오랜 시간 환경 노출에 따른 풍화가 진행되었음을 의미한다.

또한, 생물 지표인 이매패류(굴, 바지락 등)를 이용한 모니터링에서는 함평만의 MPs 농도가 전국 평균보다 다소 높게 나타나, 주변 해수의 오염 특성을 민감하게 반영하고 있음을 입증하였다(Cho *et al.*[2021]). 이것은 함평만의 광활한 조간대에 서식하는 이매패류(굴, 바지락)와 십각류(갯벌게)는 여과 섭식 및 퇴적물 섭식 특성

상 MPs 노출에 매우 취약하기 때문으로 생각된다. 또한, 생체 지표(bio-indicator)인 조개류 체내 MPs 농도가 주변 해수보다 높게 나타나는 것은 MPs가 생물체 내에 일시적으로 체류하며 생물 농축(bio-accumulation)을 일으키고 있음을 입증한다. 결과적으로, MPs는 저서동물의 소화관 내에 물리적 폐쇄를 유발하여 영양 섭취 효율을 저하시키며, 이는 상위 포식자로 이어지는 에너지 전달 효율을 감소시켜 만내 전체 먹이망의 건전성을 악화시킬 수 있다.

특히, MPs는 단순히 물리적 자극에 그치지 않고, 화학적 오염물질의 운반체 역할을 수행하게 된다. 그 결과, MPs의 높은 비표면적은 주변 해수내 잔류성 독성물질(PTSs)이나 중금속을 흡착하여 농축시킨다. 반면, 위해성 평가 측면에서 현재의 오염 수준은 예측 무영향 농도(predicted no-effect concentration; PNEC; PNEC)를 초과하지 않아 생태계에 즉각적인 위협은 낮은 것으로 분석되었다. 그러나, 결코 안심할 단계는 아니며, 1970년대 이후 퇴적물내 MPs 농도가 기하급수적으로 증가하는 추세에 있으므로 향후 수십 년 내에 생태계 수용 한계치를 초과할 것으로 예측되기 때문이다. 즉, 현재의 플라스틱 소비 및 관리 체계가 유지될 경우, 2100년경 함평만은 만성적 독성 발현 임계점에 도달하여 갯벌의 정화 기능과 생물 생산력이 회복 불가능한 수준으로 저하될 위험이 클 것으로 생각된다 (Jung *et al.*[2021]).

3.2.7 기타 환경적 특성

1) 연안 관리 및 지형 변화: 함평만은 생태계 서비스 가치가 높은 해역으로서 효율적인 관리를 위한 수문단위 코드(hydrologic unit code) 도입이 제안된 바 있다(Kim *et al.*[2000]). 한편, 기후변화에 따른 지형 변화 예측 모델(SLAMM) 적용 결과, 함평만의 염생습지는 2050년까지 확장되나 그 이후에는 해수면 상승으로 인해 갯벌이 부분적으로 침수될 가능성이 큰 것으로 분석되었다(Kim and Lee[2010]).

2) 미기상 및 탄소 순환 (heat flux and CO²): 함평만 갯벌의 열수지는 일주기성을 뚜렷하게 나타내며, 순복사(net radiation)와 토양열 플럭스 간의 선형 회귀 관계는 계절별로 차이를 보였다(Park *et al.*[2017]). 한편, 이산화탄소(CO²) 플럭스 조사에서는 식생 유무에 따른 차이가 관찰되었는데, 갈대 식생 지역은 춘·하계에 CO²를 방출하는 공급원으로 작용하다가 동계에는 흡수원으로 전환되는 양상을 보였다(So *et al.*[2019]).

3) 기상해일 및 대기 화학 (meteotsunami and chloride): 2008년 함평만을 포함한 서해안에서 관측된 기상해일(meteotsunami)은 스콜 라인(squall line) 통과시 대기압 교란이 만내의 지형적 공명(Proudman resonance) 및 항만 공명과 결합하여 증폭된 현상으로 분석되었다(Kim and Woo[2021]). 또한, 대기 환경 측면에서는 베이저안 정규화(Bayesian Regularization, BR)를 결합한 인공신경망(BRANN) 모델을 통해 함평만 등 서해안의 대기 중 염화물 농도를 합리적으로 추정할 수 있음이 확인되었으며, 이는 연안 지역의 대기 부식성 및 환경 모니터링에 유용한 기초 자료를 제공하였다(Kim *et al.*[2023]).

이상에서 살펴본 물리 환경, 수질 환경 및 저서·퇴적 환경의 분석 결과를 종합해 볼 때, 과거에는 함평만을 청정 해역으로만 간주하였으나, 지금의 함평만은 기후 변화와 신종 오염원(MPs)에 의한 생태적 전환점에서 있음이 확인되었다.

4. 결 론

본 연구는 지난 27년간의 연구 성과와 관측 데이터를 집대성하여 함평만의 환경 변화 양상을 종합적으로 고찰하였다. 연구의 주요 결론과 향후 과제는 다음과 같다.

첫째, 함평만은 기후 변화의 최전선에 위치해 있다. 타 해역 대비 가파른 수온 상승과 저염화 경향은 물리적 구조뿐만 아니라 생물상의 서식 환경을 근본적으로 변화시키고 있다. 특히 해안선 후퇴와 식생의 우점종 교체는 만 내 지형 동역학이 새로운 평형 상태로 이행하고 있음을 시사한다.

둘째, 함평만 갯벌은 막대한 생태계 서비스 가치를 보유하고 있다. 비식생 조건대를 포함한 광활한 갯벌은 탄소 및 질소의 거대 저장고(blue carbon)로서 기후 위기 시대에 국가적 자산으로서의 가치가 매우 높다. 따라서 단순한 보전을 넘어 경제적·생태적 가치를 정량화하는 연구가 지속되어야 한다.

셋째, 신종 오염원 및 물질 순환 경로에 대한 정밀한 관리가 시급하다. 지표 오염원이 적음에도 불구하고 미세플라스틱 오염도가 전국 평균을 상회하고, 해저지하수(SGD)를 통한 중금속 및 영양염 유입 비중이 높다는 점은 기존의 육상 중심 오염 관리 체계의 한계를 보여준다.

결론적으로, 함평만의 건강성을 유지하기 위해서는 물리적 지형 변화, 해저지하수 유입, 신종 오염원 확산을 통합적으로 아우르는 '시스템 단위'의 모니터링 체계가 구축되어야 한다. 본 연구에서 제시된 기초 자료는 향후 함평만의 지속 가능한 이용과 보전을 위한 정책 수립의 핵심 근거로 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] An, S.M., Kim, J., Cho, K., Hwang, H., 2024, "*Halamphora hampyeongensis* sp. nov. (Amphipleuraceae, Bacillariophyceae), a new marine benthic diatom from a tidal mudflat in Hampyeong Bay, South Korea", *PhytoKeys*, 248, 59-71.
- [2] Charette, M.A., Moore, W.S., Burnett, W.C., 2008, "Uranium- and thorium-series nuclides as tracers of submarine groundwater discharge", In: *Submarine Groundwater Discharge* (Burnett, W.C. et al., eds.), Chapter 5, 95-118.
- [3] Cho, J., Lim, D., Kim, B., 2001, "Observation of shoreline change using an aerial photograph in Hampyeong Bay, southwestern coast of Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 22(4), 317-326 (in Korean).
- [4] Choi, B., Yun, J.S., Kim, S.G., Kim, S., Choi, O.I., Son, M.H., Seo, I., 2016, "Macrobenthic community structure during spring and summer season in the environmental conservation area, Korea",

- J. Mar. Life Sci., 1(2), 95-108 (in Korean).
- [5] Cho, Y., Shim, W.J., Jang, M., Han, G.M., Hong, S.H., 2021, "Nationwide monitoring of microplastics in bivalves from the coastal environment of Korea", *Environ. Pollut.*, 270, 116175.
- [6] Chu, H., 2020, "Tidal and tide-induced residual currents around Hampyeong Bay and Hajae peninsula by numerical simulation", *J. Korean Soc. Fish. Ocean Technol.*, 56(2), 114-125 (in Korean).
- [7] Chu, Y.S., Lee, H.J., Park, E.S., Lee, Y.G., Jeong, K., 2000, "Summer-time behavior and flux of suspended sediments at the entrance to semi-closed Hampyeong Bay, southwestern coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 5(2), 105-118 (in Korean).
- [8] Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017, "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Sci. Adv.* 3(7), 25-29.
- [9] Hong, M., Lee, J., Park, J., Lee, H., 2022, "Spatial variations of salt marsh plants induced by sandy sediment in Hampyeong tidal flat. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 9(4), 247-258 (in Korean).
- [10] Hwang, D., Kim, S., Choi, M., Lee, I., Kim, S., Choi, H., 2016, "Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula", *Mar. Pollut. Bull.*, 102, 230-239.
- [11] Hwang, K., Lee, J., Kwon, I., Park, S.Y., Yoon, S.J., Lee, J., Kim, B., Kim, T., Kwon, B., Hong, S., Lee, M.J., Hu, W., Wnag, T., Choi, K., Ryu, J., Khim, J.S., 2021, "Large-scale sediment toxicity assessment over the 15,000 km of coastline in the Yellow and Bohai seas, East Asia", *Sci. Total Environ.*, 792, 148371.
- [12] Jeong, J., 2002, "Particulate distribution map of tidal flat using unsupervised classification of multi-temporary satellite data", *Korean J. Remote Sensing*, 18(2), 71-79.
- [13] Kang, M., Lim, D., Jang, P., Kim, G., Kang, Y., 2009, "Tidal variations of nutrient concentration in Hampyeong Bay, west coast of Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 12(3), 202-208 (in Korean).
- [14] Kasai, A., Rippeth, T.P., Simpson, J.H., 1999, "Density and flow structure in the Clyde sea front", *Continental Shelf Res.*, 19, 1833-1848.
- [15] Kim, I.R., Mun, S., Kim, N.S., 2023, "A Study on the landform classification of tidal flat and vegetation distribution in Hampyeong Bay", *Landscape and Geography*, 33(4), 1-12 (in Korean).
- [16] Kim, J., Jang, H., 2016, "A study on the inflowing pollution load and material budgets in Hampyeong Bay", *J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety*, 22(1), 1-10 (in Korean).
- [17] Kim, J.N., Choi, J.H., Im, Y.J., Choi, K.H., Ma, C.W., 2005, "Species composition and seasonal variation of Decapod Crustacean assemblage in Hampyeong Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 38(1), 20-28 (in Korean).
- [18] Kim, K., Cho, D., Jung, S., Shin, J., 2000, "A study on the methodology of bioregional approach for coastal area management -Focus on the case of bioregional classification in the Bay of Hampyeong-", *J. Korean Environ. Res. & Reveg. Tech.*, 3(3), 20-28 (in Korean).
- [19] Kim, M., Woo, S., 2021, "Propagation and amplification of meteotsunamis in multiple harbors along the eastern Yellow Sea coast", *Continental Shelf Res.*, 225, 104474.
- [20] Kim, N., Lee, C., 2010, "A study on the eco-environmental change of coastal area by the sea level rise", *Korean Assoc. Geographic Info. Studies*, 13(3), 53-63 (in Korean).
- [21] Kim, R., Min, J., Lee, J., Jin, S., 2023, "Development of bayesian regularized artificial neural network chlorides estimation", *Construction and Building Materials*, 383, 131361.
- [22] Kim, S., Oh, J., Shim, W., Lee, D., Yim, U., Hong, S., Shin, Y., Lee, D., 2002, "Geographical distribution and accumulation features of organochlorine residues in bivalves from coastal areas of South Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 45, 268-279.
- [23] Kim, T.H., Waska, H., Kwon, E.H., Suryaputra, I.G.N., Kim, G., 2012, "Production, degradation, and flux of dissolved organic matter in the subterranean estuary of a large tidal flat", *Mar. Chem.*, 142, 1-10.
- [24] Koh, Y., 2020, "Siliceous organic remains including sponge spicules from the coastal surface sediments of Hamhae Bay, Jeonnam", *J. Korean Island*, 32(2), 133-151 (in Korean).
- [25] Kwon, I., Lee, C., Lee, J., Kim, B., Park, S.Y., Kim, J., Lee, J., Noh, J., Kwon, B., Son, S., Yoon, H.J., Nam, J., Choi, K., Khim, J.S., 2022, "The first national scale evaluation of total nitrogen stocks and burial rates of intertidal sediments along the entire coast of South Korea", *Sci. Total Environ.*, 827, 154320.
- [26] Kwon, O.Y., Kang, J., Hong, S.H., Shim, W.J., 2020, "Spatial distribution of microplastic in the surface waters along the coast of Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 155, 110729.
- [27] Law, K.L., Thompson, R.C., 2014, "Microplastics in the seas", *Science*, 345(6193), 144-145.
- [28] Lee, H.Y., 2013, "Diversity and biomass of benthic diatoms in Hampyeong Bay tidal flats", *Korean J. Environ. Biol.*, 31(4), 295-301 (in Korean).
- [29] Lee, H.Y., Jung, M., 2011, "Distribution of benthic diatoms in tidal flats of Hampyeong Bay, Korea", *Korean J. Environ. Biol.*, 29(1), 17-22 (in Korean).
- [30] Lee, J., Song, J., Hong, S., 2006, "Analysis of the water pollution circumstance in Hampyeong coast", *J. Korean Soc. Environ. Tech.*, 165-170 (in Korean).
- [31] Lee, K.S., Jun, S.K., 2009, "Characteristics of hydrography and tidal current in Hampyeong Bay, the western coast of Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 30(2), 247-256 (in Korean).
- [32] Lee, M.O., Kim, J.K., Kim, B.K., 2024, "Characteristics of sea surface temperature (SST) and Sea Level Rise (SLR) in the Korean coastal waters", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 27(3), 167-177 (in Korean).
- [33] Lim, D., Jung, H., Chu, Y., Park, K., Kang, S., Yang, S., 2002, "A study on shoreline change in Hampyeong Bay, southwestern coast of Korea. I. Sea-cliff erosion and retreat", *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 7(3), 148-156 (in Korean).
- [34] Lim, H.S., Choi, J.W., 2001, "Community structure of subtidal macro-benthos in Hampyeong Bay during autumn in 1997, southwest coast of Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 34, 327-339 (in Korean).

- [35] National Geographic Information Institute (NGII), 1981, "Report on fundamental investigation in the coastal waters (Beobseongpo region)", 1-60 (in Korean).
- [36] National Geographic Information Institute (NGII), <https://www.ngii.go.kr> (accessed: 2025. 12. 5.)
- [37] Noh, H., Park, Y.S., Lee, M., 2021, "Regional classification of total suspended matter in coastal areas of South Korea", *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, 254, 107339.
- [38] Park, H.J., Han, E., Lee, Y., Kang, C., 2016, "Trophic linkage of a temperate intertidal macrobenthic food web under opportunistic macroalgal blooms: A stable isotope approach", *Mar. Pollut. Bull.*, 111, 86-94.
- [39] Park, H.O., Kwon, B.H., Kim, Il., So, Y.H., Oh, S.B., Kang, D., 2017, "Analysis of variations in soil heat flux and air temperature by net radiation at a mud flat in Hampyeong Bay", *J. Environ. Sci. International*, 26(9), 1101-1110 (in Korean).
- [40] Park, J., Hong, S., Shim, W.J., Khim, J.S., Park, J., 2023, "Distribution, compositional characteristics, and historical pollution records of microplastics in tidal flats of south Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 189, 114741.
- [41] Park, K., Kang, D., So, Y.H., Jo, W.G., Kim, W.G., 2023b, "Characteristics of blue carbon stock by particle size of sediments in unvegetated tidal flats: Hampyeong Bay and Dongdae Bay", *J. Environ. Sci. International*, 32(3), 181-189 (in Korean).
- [42] Park, K., Kwak, T., Kim, W., Kwak, I., 2019, "Changes in exoskeleton surface roughness and expression of chitinase genes in mud crab *Macrophthalmus japonicus* following heavy metal differences of estuary", *Mar. Pollut. Bull.*, 138, 11-18.
- [43] Park, M. H., Park, J. I., 2008, "A relationship analysis among land surface temperature and NDVI in Hampyeong bay using landsat TM/ETM+ satellite images", *J. KCIA Conf.*, 71-82.
- [44] Park, Y.A., Lim, D.I., Choi, J.Y., Lee, Y.G., 1997, "Late quaternary stratigraphy of the tidal deposits in the Hampyeong Bay, southwest coast of Korea", *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 2(2), 138-150 (in Korean).
- [45] Rahman, M.D., Moklesur, Lee, Y., Kim, G., Lee, K., Han, S., 2013, "Significance of submarine groundwater discharge in the coastal fluxes of mercury in Hampyeong Bay, Yellow Sea", *Chemosphere*, 91, 320-327.
- [46] Ryu, E., Lee, S., Yoon, D., Kim, J., 2008, "Paleoenvironmental studies of the Korean peninsula inferred from diatom assemblages", *Quaternary International*, 176-177, 36-45.
- [47] Ryu, J., Choi, J., Lee, Y., 2014, "Potential of remote sensing in management of tidal flats: A case study of thematic mapping in the Korean tidal flats", *Ocean & Coastal Management*, 102, 458-470.
- [48] Ryu, S., 2003, "Seasonal variation patterns of tidal flats sediments in semi-enclosed Hampyeong and Kwangyang Bays, west and south coasts of Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 24(6), 578-591 (in Korean).
- [49] Ryu, S.O., You, H.S., Lee, J.D., 1999, "Seasonal variation of surface sediments and accumulation rate on the intertidal flats in Hampyeong Bay, southwestern coast of Korea", *The Sea (J. Korean Soc. Oceanogr.)*, 4, 127-135 (in Korean).
- [50] Simpson, J.H., Hunter, J.R., 1974, "Fronts in the Irish Sea", *Nature*, 250, 404-406.
- [51] So, Y.H., Kang, D., Kwon, H.K., Kim, P.S., 2019, "Seasonal variations of CO₂ concentration and flux in vegetation and non-vegetation environments on the tidal flat of Hampyeong Bay", *J. Wetlands Res.*, 21(4), 257-266 (in Korean).
- [52] Teuten, E.L., Saquing, J.M., Knappe, D.R.U., Barlaz, M.A., Jonsson, S., Björn, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C., Galloway, T.S., Yamashita, R., Ochi, D., Watanuki, Y., Moore, C., Viet, P.H., Tana, T.S., Prudente, M., Boonyatumanond, R., Zakaria, M.P., Akkhavong, K., Takada, H., 2009, "Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife", *Philos. Trans. R. Soc., B Biol. Sci.*, 364(1526), 2027-2045.
- [53] Waska, H., Kim, G., 2011, "Submarine groundwater discharge (SGD) as a main nutrient source for benthic and water-column primary production in a large intertidal environment of the Yellow Sea", *J. Sea Res.*, 65, 103-113.
- [54] Xu, Z., Kim, D., Kim, S.H., Cho, Y., Lee, S., 2016, "Estimation of seasonal topographic variation in tidal flats using waterline method: A case study in Gomso and Hampyeong Bay, South Korea", *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, 183, 213-220.
- [55] You, H., Paul, K., Koh, Y., Kim, J., Yun, S., Kim, H., Chung, C., Ryu, S., 2000, "Palaeodepositional environment of the cretaceous Hampyeong Basin, southwestern Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 21(6), 683-694.

Received 22 September 2025

1st Revised 14 November 2025, 2nd Revised 24 February 2026

Accepted 3 March 2026