

# 사질과 니질 우세 퇴적물 조성에 따른 갯벌 패류어장의 저서환경 특성 비교

전승렬 · 이기희 · 김예림 · 임동훈\* · 황운기

국립수산과학원 갯벌연구센터

## Comparative Analysis of Benthic Environmental Characteristics on Tidal Clam Farms with Sand- and Mud-Dominated Sediments

Seung Ryul Jeon, Kee-Hee Lee, Ye Rim Kim, Dong-Hoon Im\* and Un-Ki Hwang

Tidal Flat Research Center, National Institute Fisheries Science, Gunsan 54042, Republic of Korea

In this study, we aimed to compare the benthic environmental characteristics of major clam farming tidal flats based on sand- and mud- dominated sediments. Hwangdo (HD) and Boryeong (BR) comprised an average of 73.0% sand. Meanwhile, Geunso (GnS) and Gomso (GmS) consisted of 81.1% mud. All sites maintained organic pollution levels below the environmental criteria. However, mud-dominated sediments had higher levels than sand-dominated sediments. Exposure time followed the order of HD>GmS>BR>GnS, influencing sediment temperature dynamics. During summer, HD showed the largest daily peak difference between air and sediment temperatures owing to longer than average exposure. Meanwhile, GnS exhibited the smallest variation. Benthic macrofaunal communities showed 35% similarity between HD and BR, located in the inner and outer bays, respectively. In contrast, GnS and GmS presented distinct regional differences. These findings highlight the importance of understanding the abiotic and biotic factors shaped by dominant sediment types for tidal clam farms sustainable management.

Keywords: Benthic environment, Clam farm management, Mud, Sand, Tidal flat

### 서론

우리나라 서해안은 수심이 얇고 넓은 대륙붕이 발달한 해역으로 주로 하구, 만, 갯벌 등이 형성되어 있으며, 형태에 따라 해수 순환, 저서생태계 및 퇴적물 특성 등이 다르게 나타난다(Woo et al., 2005). 서해안에 넓게 형성되어 있는 갯벌은 육지와 바다 사이의 전이대로서 역할을 하며, 조석 작용에 의한 노출과 침수가 반복되는 특성을 보인다(Davies, 1964; Lee et al., 2005; Chang et al., 2023). 이러한 공간적인 특성에 따라 갯벌 조건대는 오염물질의 정화, 자연재해의 조절, 생물의 성육과 산란 등 다양한 기능을 갖추고 있다(Kemp et al., 1990; You and Kim, 1999; Kim and Yang, 2001; Koh and Khim, 2014). 갯벌의 생태계 서비스 중 생물 서식 및 생산 기능은 인간의 사회·경제적 특성과 결부되어 어장의 형성, 이용, 간섭 등이 활발하게 이루어진다. 또한, 갯벌의 관리는 자연환경 보전과 대체 불가능한 생태적 기능, 생물자원의 상업적 수확을 기반으로 하는 양식

산업 지속 가능성 등 여러 상충되는 목표에 직면해야 하는 매우 복잡한 작업이다(Vincenzi et al., 2006). 특히, 바닥식 양성을 위한 갯벌어장의 퇴적물은 물리·화학적 특성에 따라 가입, 성장, 재생산 등 생물 서식에 영향을 주며, 어장 관리 측면에 있어 중요한 인자로 작용한다. 사질과 니질 퇴적물은 하구와 연안 서식지를 지배하고, 이러한 퇴적물 내에 서식하는 생물은 다양한 환경 및 생물학적 기능, 생지화학적 과정에 관여하고 있다(Thrush et al., 2004). 이처럼 갯벌은 비생물학적, 생물학적 요소가 상호 작용하여 생태계를 이루는 공간으로 주로 수층·퇴적물의 환경, 저서 및 부유 생태계의 특성을 파악하는 연구가 선행되었다. 특히, 서해안 갯벌에 관한 연구 사례로 퇴적환경 및 구조(Woo et al., 2005; Yoon and Chun, 2019; Chang et al., 2023; Kim et al., 2024), 수질 환경 및 영양염 플럭스(Kim et al., 2005; Kim and Kim, 2008; Park et al., 2013; Lee et al., 2016, 2019), 저서생물 군집 구조 및 건강도(Hong and Seo, 2001; Jung et al., 2014), 저서 미세조류 및 식물플랑크톤 군집 구조(Lee et al.,

\*Corresponding author: Tel: +82. 63. 472. 8613 Fax: +82. 63. 467. 2675

E-mail address: kamnt@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0330>

Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 330-340, August 2025

Received 5 June 2025; Revised 7 July 2025; Accepted 18 August 2025

저자 직위: 전승렬(연구사), 이기희(연구원), 김예림(연구원), 임동훈(연구사), 황운기(연구관)

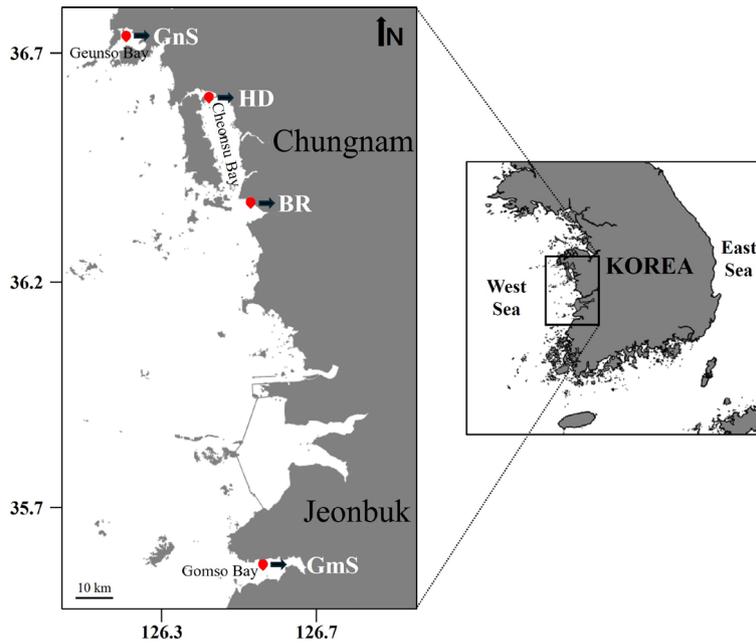


Fig. 1. A map showing the location of the clam farm study area on the west coast of Korea.

2012, 2014) 등이 있다. 또한, 갯벌 바지락 어장에 관련된 연구로 치패발생장 조성을 위한 모래 살포가 저서생물 군집구조에 미치는 영향(Yoon et al., 2014), 어장 주변 퇴적물 내 유기물과 미량금속 분포 특성(Choi et al., 2015), 바지락 양식이 퇴적물 유기탄소 산화 속도와 분배에 미치는 영향(Kim et al., 2020) 등이 진행되어 왔다. 그러나 서해안 바지락 어장의 퇴적물 조성 및 저서환경 특성 간의 관계를 종합적으로 비교한 연구는 드물며, 사질 또는 니질이 우세한 어장 간 생태환경적 차이에 대한 기초 자료는 부족한 실정이다. 갯벌은 조석 현상과 같은 주기적인 요인과 함께 인간 활동의 인위적인 간섭을 포함하는 매우 역동적인 공간이기 때문에 퇴적물 성상에 따른 저서환경 특성을 종합적으로 이해하는 과정은 어장 이용과 관리에 더 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구는 사질 또는 니질 퇴적물이 우세한 서해안 갯벌 바지락 어장 4곳을 대상으로 퇴적물 조성에 따른 이화학적·물리적 특성, 대형저서생물 출현 및 분포, 노출시간과 지온 변동 등 저서환경의 차이를 비교 분석하였다. 이를 통해 비생물학적 요인과 생물학적 요인을 종합적으로 고려하여 어장별 관리 방안의 기초 자료로 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 연구 지역 및 시기

연구 시기는 2023년 동계(2월), 춘계(4월), 하계(7월)이며, 조사 지역은 서해 중부 연안의 근소만과 천수만 황도, 대천천 하구의 보령, 고창의 곱소만 갯벌어장으로 행정구역상 충남 세 지

역, 전북 한 지역을 선정하였다(Fig. 1). 근소만은 부채꼴 모양의 반 폐쇄성만이며, 황도는 안면도 동쪽 천수만 북서쪽에 위치하여 서산 A, B방조제와 약 3-5 km 정도로 가까이 인접해 있다. 보령은 개방형 해안으로 대천천 하구의 서쪽으로 뻗어 있으며, 천수만 남쪽 입구부와 가깝게 위치한다. 곱소만은 갈매기 모양의 반 폐쇄성만이며, 연구 지역 모두 바지락 어장이 형성되어 있다(Table 1).

### 퇴적물 유기물, 입도 분석

퇴적물의 강열감량(ignition loss, IL)은 건조 후 함수율(water content, WC)을 구한 다음 건조된 시료를 550°C 조건으로 2시간 회화 후 전후 무게 차로 구하였다. 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD)은 알카리성 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>)법으로 티오황산나트륨(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)적정을 통해 분석하였다. 총유기탄소(total organic carbon, TOC)는 시료를 동결건조 후 탄산염을 제거하고 전처리 과정을 거쳐 CHN 원소

Table 1. Coordinates of the sampling sites and shape of the bay

	Longitude	Latitude	Shape
GnS	126°10'22"E	36°43'37"N	semi-enclosed
HD	126°23'38"E	36°35'24"N	semi-enclosed
BR	126°30'47"E	36°21'49"N	open coast
GmS	126°32'43"E	35°33'49"N	semi-enclosed

GnS, Tidal flat of Geunso Bay; HD, Hwangdo tidal flat of Cheonsu Bay; BR, Boryeong tidal flat of Daecheoncheon estuary; GmS, Tidal flat of Gomso Bay.

분석기(Model 2400; Perkin Elmer, Shelton, CT, USA)로 분석하였다. 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS)은 황화수소 가스검지관(colorimetric gas detector)을 이용하여 현장에서 즉시 처리하였으며, 해양공정시험기준에 준하여 분석하였다(MOF, 2018).

퇴적물 입도 조성 및 성상을 파악하기 위해 채취된 표층 퇴적물 시료의 유기물을  $H_2O_2$ 로 제거한 후, 0.0625 mm 표준체로 습식 체질(wet sieving)하여 세립질과 조립질을 구분하였다. 구분된 세립질 시료는 자동 입도분석기(SediGraph III 5120; Micromeritics Inc. Co., Norcross, GA, USA)를 이용하여 분석하고, 조립질 시료는 건조 후 진동식체가름기(Analysette 3 Pro; Fritsch Co., Idar-Oberstein, Germany)를 이용하여 분석하였다. 분석된 시료의 무게 비율을 통해 통계 처리 후 조성을 파악하고, 퇴적물 성상을 결정하였다(Folk, 1968).

### 지온 및 압력 관측

퇴적물 표층 온도(sediment surface temperature, 지온)와 압력(tidal pressure)을 측정하기 위해 40 cm 길이의 단조팩을 활용하였다. 10분 간격으로 측정 시간이 설정된 센서를 장착 및 고정된 뒤, 정점마다 최대한 고인물(standing water) 형성을 최소화하여 갯벌 퇴적물 표층 가까이 설치하였다. 퇴적물 표층 온도와 압력 센서는 HOBO사의 데이터 로거(data logger, U20L-01)를 사용하였다. 센서의 온도 측정 범위는  $-20\sim 50^\circ\text{C}$ 이며, 정확도는  $0\sim 50^\circ\text{C}$  범위에서  $\pm 0.44^\circ\text{C}$ 이다. 압력 측정 범위는  $0\sim 207$  kPa이며, 최대 오차는 0.62 kPa이다.

또한, 어장별 기온 영향에 따른 지온 변화를 알아보기 위해 기상청의 자동기상관측시스템(automatic weather system, AWS) 자료를 활용하였다(KMA, 2024). AWS의 기온 최대값은 황도, 보령, 근소만, 곰소만 어장별로 가장 가까운 지점의 관측소인 흥성죽도, 대전항, 근흥, 심원의 데이터를 각각 이용하였다.

### 대형저서생물 생태지수 및 군집 유사도

대형저서생물은 사각형 코어를 이용하여 갯벌어장 각 정점의  $0.1\text{ m}^2$  면적을 채취하였다. 채취된 퇴적물은 1 mm 망목의 스테인리스 사각 체를 이용하여 분리하였고, 채집된 생물은 10% 중성 포르말린으로 즉시 고정하였다. 현장에서 채집된 저서생물은 실험실로 옮겨 분류군에 따라 선별하여 최대한 종(species) 수준까지 동정하였고, 개체수를 계수하였다. 정점별로 출현한 개체수는 단위면적( $\text{m}^2$ )으로 환산하여 생태지수 및 군집 유사도 분석에 사용하였다.

연구 지역별 춘계(4월)와 하계(7월) 저서생물 출현 종수 및 개체수를 기반으로 하여 생태 지수인 다양도( $H'$ ), 풍부도( $R$ ), 균등도( $J$ ), 우점도( $D$ )를 산정하였다. 또한, 저서생물 군집의 집괴분석은 Bray and Curtis(1957)의 유사도 지수를 이용하였다. 유사도 행렬을 통해 그룹 평균(group average)하여 출현 종과 시기별 정점을 연결하였으며, 수지도(dendrogram)와 다차원배열법(nMDS ordination)으로 나타내었다. 모든 생태지수 및 군집 유

사도 분석은 PRIMER (version 6.1.15; PRIMER-E Ltd., PL, UK)를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 퇴적물 조성 및 성상

갯벌어장의 퇴적물 조성은 크게 사질(sand) 우세와 니질(silt)과 점토로 구성된 퇴적물, mud) 우세로 구분되었다. 사질 우세 지역은 황도와 보령 갯벌로 사질 함량의 범위가 59.9–83.8%, 니질 우세 지역은 근소만과 곰소만 갯벌로 니질 함량이 71.6–85.3%였다. 사질 우세 갯벌인 황도의 퇴적물 평균입도는  $3.2\pm 0.7$   $\Phi$  로 성상은 니질사(muddy sand, mS) 또는 역니질사(gravelly muddy sand, gmS)였으며, 보령의 평균입도는  $2.9\pm 1.1$   $\Phi$  로 성상은 mS 또는 역질사(gravelly sand, gS)로 나타났다. 니질 우세 갯벌인 근소만의 평균입도는  $6.0\pm 0.4$   $\Phi$  로 성상은 사질니(sandy mud, sM) 또는 역질니(gravelly mud, gM)였으며, 곰소만의 평균입도는  $5.8\pm 0.2$   $\Phi$  로 성상은 sM로 한가지 성상으로 구분되었다(Fig. 2). 이에 따라, 연구 지역 중 퇴적물이 가장 조립한 어장은 사질 함량이 평균 75.5%로 평균 입도가 2.9  $\Phi$  인 보령이었으며, 가장 세립한 어장은 점토(clay) 함량이 평균 32.0%로 평균 입도가 6.0  $\Phi$  인 근소만으로 나타났다(Table 2). 또한, 사질 우세인 황도 어장의 동계-춘계-하계 시기 퇴적물 조성 및 성상변화는 mS-gmS-gmS로 하계에 사질 함량이 80.8%로 가장 조립하였으며, 보령은 mS-gS-mS로 춘계에 역질과 사질 함량이 각각 10.2%, 83.8%로 가장 조립하였다. 사질 우세 지역인 황도와 보령의 퇴적상은 전반적으로 mS이며, 역질과 사질, 니질의 비율이 각각 1:7:2로 사질 함량이 가장 높음(59.9–83.8%)을 알 수 있다. 니질 우세 어장인 근소만은 퇴적상이 sM-sM-gM로 동계에서 하계로 갈수록 사질함량이 12.9%에서 22.9%로 높아지는 경향을 보였으며, 이에 따라 분

Table 2. Compositions of sand- and mud-dominant sediments in clam farms of tidal flat

Dominant sediment	Site	Composition				
		Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mz ( $\Phi$ )
Sand	HD	4.8 $\pm 1.3$	70.4 $\pm 10.5$	11.3 $\pm 4.1$	13.5 $\pm 5.8$	3.2 $\pm 0.7$
	BR	4.2 $\pm 5.3$	75.5 $\pm 8.8$	11.9 $\pm 7.5$	8.4 $\pm 6.0$	2.9 $\pm 1.1$
Mud	GnS	3.4 $\pm 1.9$	18.6 $\pm 5.1$	46.0 $\pm 5.2$	32.0 $\pm 3.6$	6.0 $\pm 0.4$
	GmS	0.1 $\pm 0.1$	15.8 $\pm 0.6$	65.0 $\pm 5.4$	19.1 $\pm 5.1$	5.8 $\pm 0.2$

GnS, Tidal flat of Geunso Bay; HD, Hwangdo tidal flat of Cheonsu Bay; BR, Boryeong tidal flat of Daecheonchon estuary; GmS, Tidal flat of Gomsu Bay.

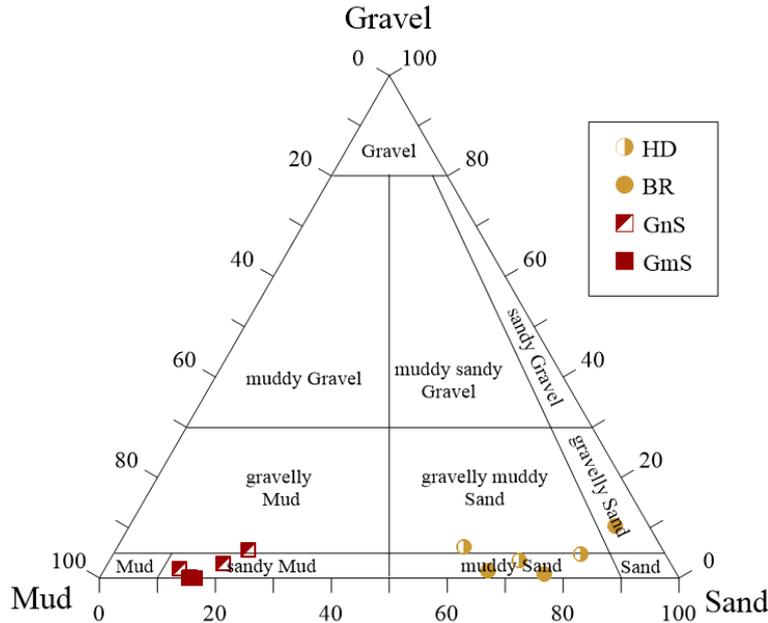


Fig. 2. Ternary diagram of the facies classification of surface sediments in clam farms of tidal flat. The half-circle and circle symbols are the sand-dominant sediment in Hwangdo (HD) and Boryeong (BR) tidal flat, respectively. The half-square and square symbols are the mud-dominant sediments in Geunso (GnS) and Gomso (GmS) Bays, respectively.

급도(sorting coefficient)는 2.83  $\Phi$  에서 3.25  $\Phi$  로 높아져 매우 불량한 분급을 나타냈다. 일반적으로 분급은 2  $\Phi$  이상을 모두 매우불량한 분급으로 나타내는데 퇴적환경이 급변하거나 다양한 퇴적 기작이 혼합될 때 값이 커지게 된다(Woo et al., 2005). 이러한 변화는 자연적인 것보다 인위적인 영향에 의한 것으로 보이며, 현재 근소만은 청정어장 재생사업의 일환으로 어장환경 개선을 위한 모래살포가 주기적으로 이루어지기 때문인 것으로 보인다(personal communication). 곶소만은 동계-춘계-하계 모두 sM로 성상의 변동이 가장 낮은 경향을 보였다. 니질 우세 지역인 근소만과 곶소만은 퇴적상이 대부분 sM이며 역질이 2% 미만으로 낮다. 이 두지역의 사질과 니질의 비율은 2:8로 실트와 점토가 섞인 니질 중에서도 실트가 평균 55.5% 로 가장 높은 조성 비율을 차지하였다(Table 2).

### 유기물 오염도

퇴적물의 오염 수준을 파악할 수 있는 유기물 지표는 전반적으로 기준치 이하로 나타났다(Table 3). AVS는 국내 수산생물 서식 어장환경기준(0.5 mg S/g dry) 또는 일본의 퇴적물 오염 기준(0.2 mg S/g dry) 이하의 N.D (no detection)-0.126 mg S/g dry 범위로 양호한 수준이었다. 사질 우세 환경인 황도에서 춘계에 정상범위이긴 하지만 국내 AVS 기준치의 26.6% (0.133 mg S/g dry)에 해당하는 상대적으로 다른 어장에 비해 높은 수치를 보였다. COD는 모든 어장에서 일본의 기준치인 20 mg O<sub>2</sub>/g (JFRCA, 1983)의 11.5-48.9% (2.29-9.77 mg O<sub>2</sub>/g)에

해당하는 수준으로 확인되었다. IL은 모든 조사지역에서 국내 수산생물 서식 어장환경기준인 5%의 이하에 해당하는 0.62-3.7% 범위로 나타났으며, 하계 근소만에서 3.7%로 가장 높은 수치를 보였다. TOC는 국내 수산생물 서식 어장환경기준(20 mg/g dry)의 3.1-35% 범위였으며, 근소만의 하계에 상대적으로 가장 높은 수치(7.00 mg/g dry)를 나타냈다. 또한, TOC와 IL은 R값이 0.841 (Pearson correlation, P<0.01, n=12)로 상관성이 높은 것으로 파악되었다. 갯벌은 주기적으로 대기에 노출되는 특성으로 다른 연안 환경에 비해 유기물 분해가 매우 활발히 일어나는 공간이기 때문에(Alongi et al., 1999; Kim and Kim, 2008) 연구지역의 조사항목 모두에서 유기물 오염도가 기준 이하의 수치를 보이는 것으로 판단된다.

### 유기물 함량과 퇴적물 조성의 상관관계

사질 우세 환경인 황도와 보령에서는 WC이 21.64-29.09% 범위로 니질 우세 환경인 근소만과 곶소만의 27.64-38.43% 범위보다 낮게 나타났다. 이에 따라, 퇴적물의 니질 함량이 높은 근소만과 곶소만 어장은 WC이 상대적으로 높은 경향을 보이며, 반대로 사질 함량이 높은 황도와 보령 어장은 WC이 낮은 것을 알 수 있다(R=0.739, P<0.01, n=12). 또한, 퇴적물의 유기물 함량은 입도 조성과 밀접한 연관이 있으며(Choi et al., 2015), 니질에 가까운 세립한 퇴적물일수록 유기물 함량이 높게 나타나는 경향을 보인다. 본 연구에서도 유기물 함량이 높게 나타나는 근소만과 곶소만 어장에서 사질 함량과 역의 상관성

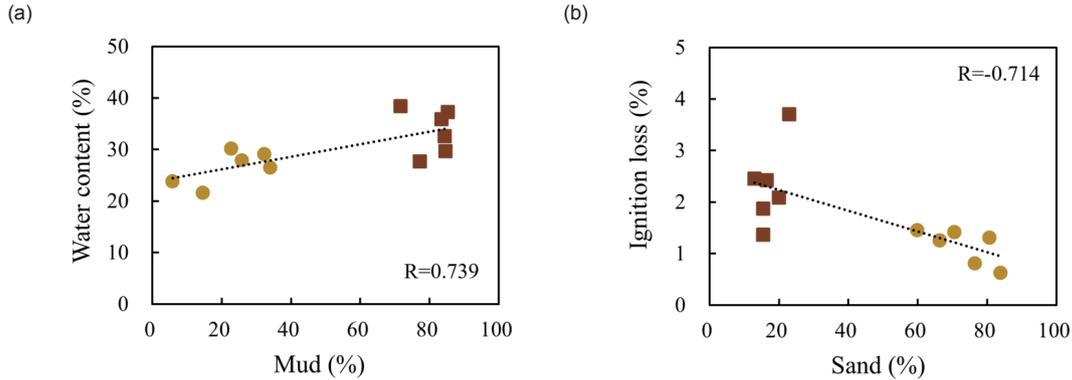


Fig. 3. Mud- or sand-dominant sediment characteristics in clam farms show correlations between mud and water content (a), sand content and ignition loss (b).

(R=-0.714, P<0.01, n=12)을 보였다. 결과적으로 니질 우세 환경인 근소만과 곰소만 어장에서는 사질 우세 환경인 어장에 비해 상대적으로 WC와 유기물 함량이 높은 환경임을 알 수 있다 (Fig. 3). 한편, 황도 어장은 사질 우세 환경임에도 전반적으로 AVS 농도(0.027-0.133 mg S/g)가 다른 어장 평균(0.014 mg S/g)에 비해 5배 높아(Table 3) 유기물 분해에 의한 산소 결핍과 황화물 생성에 의한 생물 영향이 발생할 수 있어 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다. 퇴적물에서 유기물 분해가 활발하면 산소가 결핍될 가능성이 높아지고, 황화물은 유기물 분해 과정에서 황산염 환원세균의 증식 또는 황화수소와 퇴적물 중 금속산화물 등이 결합하는 과정에서 발생하기 때문이다(Noh et al., 2006).

갯벌 조간대는 부유물질과 용존성 물질들이 조석에 의한 해수의 유입과 유출이 반복되는 과정에서 침전, 여과되며, 오염물질들이 자연적으로 정화되는 환경이다(Kim and Yang, 2001). 일반적으로 니질 퇴적물은 입자 크기가 작고, 공극률이 높은 독특한 구조를 가지고 있다. 니질 퇴적물 중 점토는 주로 얇은 판

상(plate-like) 형태를 띠고 있으며, 카드하우스 구조(cardhouse structure)를 이루는데 판상형 입자들이 서로 직각 또는 비대칭으로 연결되어 edge-to-face 방식으로 결합함으로써 벌집 모양의 미세 공극을 형성하게 된다(Hamilton and Bachman, 1982). 또한, 퇴적물의 유기물 함량 증가는 물질의 흡착을 위해 더 넓은 표면적을 제공하는 세립한 퇴적물 입자의 비율이 증가함으로써 나타날 수 있다(Thompson and Lowe, 2004). 따라서 본 연구지역 중 근소만, 곰소만과 같이 퇴적물 내 실트와 점토가 많은 곳에서는 오염물질이 더 잘 흡착되고, 반대로 황도, 보령과 같이 투수율이 높은 조립한 퇴적물에서는 산소가 쉽게 침투할 수 있어(Elskens et al., 1991) 환원 환경이 조성되는 비율이 낮아지게 될 것으로 판단된다.

어장별 노출시간

어장별 노출시간은 압력 센서가 103 kPa 이하일 때 노출된 것으로 간주하여 필터링하고, 값 차이를 확인하였다. 황도 어장은 월별 노출시간이 4.0-4.5시간 범위로 가장 긴 노출시간을 보였고, 근소만 어장은 0.9-1.4시간 범위로 가장 짧은 노출시간을 나타냈다(Table 4). 보령과 곰소만 어장은 황도와 근소만 어장의 중간범위인 평균 2.1시간으로 나타났으나 보령은 5월에서 7월 사이 센서 고장으로 값을 확인할 수 없었다. 그러나 보령 송화항을 기준으로 조위 값에 의한 비교 결과, 5-7월 노출시간은 1.9시간으로 확인되어 총 평균 2.0시간으로 곰소만과 비슷하거나 약간 더 짧을 것으로 예측되었다. 따라서, 갯벌 어장별 노출시간은 황도>곰소만>보령>근소만 순으로 파악되었고, 노출 차이에 따라 외부 환경의 영향 정도가 다르게 나타날 것으로 생각된다.

갯벌 어장별 하계 지온 변화

조위에 따른 어장별 노출시간 차이의 지온 변화를 살펴보면 노출시간이 가장 긴 황도의 하계(7-8월) 지온 평균은 27.3°C로 노출시간이 가장 짧은 근소만에 비해 3.8°C 높았다. 근소만은 해수의 침수 시간이 다른 어장에 비해 길기 때문에 지온 평균이

Table 3. Organic content and pollution level for sediments in clam farms of tidal flat

Site	Sediment			
	AVS (mg/g)	IL (%)	COD (mg/g)	TOC (%)
	0.5	5	20	2
HD	0.071±0.055	1.39±0.08	4.26±2.20	0.11±0.02
BR	N. D	0.89±0.33	3.29±0.75	0.11±0.04
GnS	0.037±0.021	2.74±0.85	8.23±1.16	0.43±0.24
GmS	0.003±0.005	1.88±0.53	7.23±2.23	0.14±0.05

GnS, Tidal flat of Geunso Bay; HD, Hwangdo tidal flat of Cheonsu Bay; BR, Boryeong tidal flat of Daecheoncheon estuary; GmS, Tidal flat of Gomso Bay; AVS, Acid volatile sulfide; IL, Ignition loss; COD, Chemical oxygen demand; TOC, Total organic carbon.

Table 4. Exposure time (semi-diurnal) and average difference for each clam farm using sensor pressure

Year	Month	Semidiurnal (12 h)			
		Exposure time			
		HD	BR	GnS	GmS
2023	Mar	4.0	1.8	1.4	1.7
	Apr	4.5	2.1	1.3	2.2
	May	4.5	-	1.2	2.1
	Jun	4.5	-	1.0	2.2
	Jul	4.3	-	0.9	2.1
	Aug	4.2	1.9	1.3	2.1
	Sept	4.1	2.4	1.4	2.0
	Total average	4.3	2.1	1.2	2.1

GnS, Tidal flat of Geunso Bay; HD, Hwangdo tidal flat of Cheonsu Bay; BR, Boryeong tidal flat of Daecheoncheon estuary; GmS, Tidal flat of Gomso Bay.

23.5°C로 가장 낮았으며, 지온 최소값의 평균은 21.2°C로 가장 낮게 유지되는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 또한, 보령의 7월에 수집되지 못한 지온 데이터는 본 정점과 약 400 m 떨어진 근접한 정점의 데이터를 활용하여 대체하였다. 이에 따라, 황도와 근소만 사이의 노출시간을 갖는 보령과 곱소만은 하계 지온 평균이 각각 26.3°C, 26.7°C로 유사하였다. 이와 같은 사실은 지온 변화가 노출시간에 크게 지배된다는 것을 의미하며(Lee et al., 2005), 어장별 온도 범위 차이에 의한 서식 생물의 영향 정도를 짐작할 수 있을 것으로 생각된다.

어장별 기온(air-temperature) AWS의 일 최대값의 평균을 비교한 결과, 위도상 가장 남쪽에 위치한 곱소만이 30.3°C로 가장 높았으며, 다음으로 황도(30.0°C), 보령(29.0°C), 근소만(27.5°C) 순으로 나타났다. 또한, 어장별 일최고기온-일최고기온 값의 차는 황도>보령>곱소만>근소만 순으로 황도 어장에서 평균 3.9°C로 지온의 온도 변화폭이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 황도가 다른 어장들에 비해 대기에 노출되는 시간이 커 일사량(insolation)의 영향을 더 많이 받을 것으로 예상된다. Thomson (2010)에 따르면 Skagit과 Willapa 갯벌에서 사질과 니질 퇴적물을 구분하여 공극률(porosity) 차이에 의한 열 확산 속도를 산정한 결과, 사질 퇴적물이 열 확산 속도가 더 빠르며, 더 깊은 퇴적층으로의 열 흡수가 커진다고 보고하였다. 따라서, 황도 어장의 긴 노출시간과 함께 열 확산율이 빠른 사질 퇴적물 위주로 구성된 환경 특성에 따라 지온의 변동 폭이 커지게 된 원인임을 알 수 있다. 반대로, 니질 우세 환경인 근소만과 곱소만은 일최고기온-일최고기온 값의 차가 각각 평균 1.1°C, 1.2°C로 유사하였으며, 사질 우세 환경인 황도와 보령에 비해 1.1–2.8°C 낮아 변화폭이 가장 작았다(Fig. 4). 특히, 근소만은 다른 어장에 비해 1.2시간의 짧은 노출시간으로 일 최고-최저 지온의 평균이 21.2–28.6°C의 범위로 나타나 일사량에 의한 영

향이 가장 낮았음을 확인할 수 있었다(Fig. 4).

### 대형저서생물의 출현종수, 서식밀도, 생태지수

사질 또는 니질 우세 갯벌어장에서 춘계와 하계에 출현한 대형저서동물의 총 종수는 67종이었으며, 다모류(Polychaeta) 49.0%, 연체동물(Mollusca) 45.8%, 갑각류(Crustacea) 4.3%, 기타(other) 0.9%로 점유하였다. 출현 종수는 근소만이 춘계(4월)에 14종에서 하계(7월) 36종으로 2.5배 이상 증가하였으며, 전체 어장 중 가장 많은 종이 출현해 풍부도도 4.04 (하계)로 높게 나타났다(Table 5). 근소만의 출현 개체수는 춘계에 820 ind./m<sup>2</sup>, 하계에 4,500 ind./m<sup>2</sup>로 약 5.5배 증가하였고, 이 중 바지락(*Ruditapes philippinarum*)이 전체 출현 개체수의 28–39.1%로 가장 높은 점유율을 차지하였다. 전반적으로 사질 우세 어장에서는 개체수가 춘계에서 하계로 감소하는 경향을 보였으며, 니질 우세 어장에서는 증가하는 경향을 보였다. 종다양도(H')는 곱소만의 춘계에 2.61로 높았으며, 균등도(J) 또한 0.94로 연구 기간 중 가장 높았다. 그러나 곱소만에서 다른 어장에 비해 바지락 출현은 10 ind./m<sup>2</sup>로 적었으며, 하계에는 출현하지 않았다.

Table 5. Ecological indices and number of species according to the composition of sediments in the study area

	Sand		Mud		
	HD	BR	GnS	GmS	
	Apr/Jul	Apr/Jul	Apr/Jul	Apr/Jul	
No. of species	P	15/13	4/12	11/24	12/12
	M	3/3	2/2	2/4	3/0
	C	3/3	1/1	0/6	0/3
	O	0/0	1/1	1/2	1/0
	Total	21/19	8/16	14-36	16-15
Abundance (ind./m <sup>2</sup> )		1,420/550	2,070/950	820/4,500	300/350
Ecological indices					
	Diversity (H')	1.72/2.57	0.84/1.93	1.74/2.02	2.61/2.04
	Richness (R)	2.76/2.85	0.92/2.19	1.94/4.04	2.63/2.05
	Evenness (J)	0.57/0.87	0.40/0.70	0.66/0.57	0.94/0.80
	Dominance (D)	0.35/0.10	0.49/0.27	0.28/0.22	0.08/0.17
Rank		Species (Taxa)			
1		<i>Ruditapes philippinarum</i> (MBi)			
2		<i>Armandia lanceolata</i> (APol)			
3		<i>Scoletoma longifolia</i> (APol)			
4		<i>Ampharete finmarchica</i> (APol)			
5		<i>Heteromastus filiformis</i> (APol)			

GnS, Tidal flat of Geunso Bay; HD, Hwangdo tidal flat of Cheonsu Bay; BR, Boryeong tidal flat of Daecheoncheon estuary; GmS, Tidal flat of Gomso Bay. The dominant species ranking is for the overall of the four sites: P, Polychaeta; M, Mollusca; C, Crustacea; O, Others.

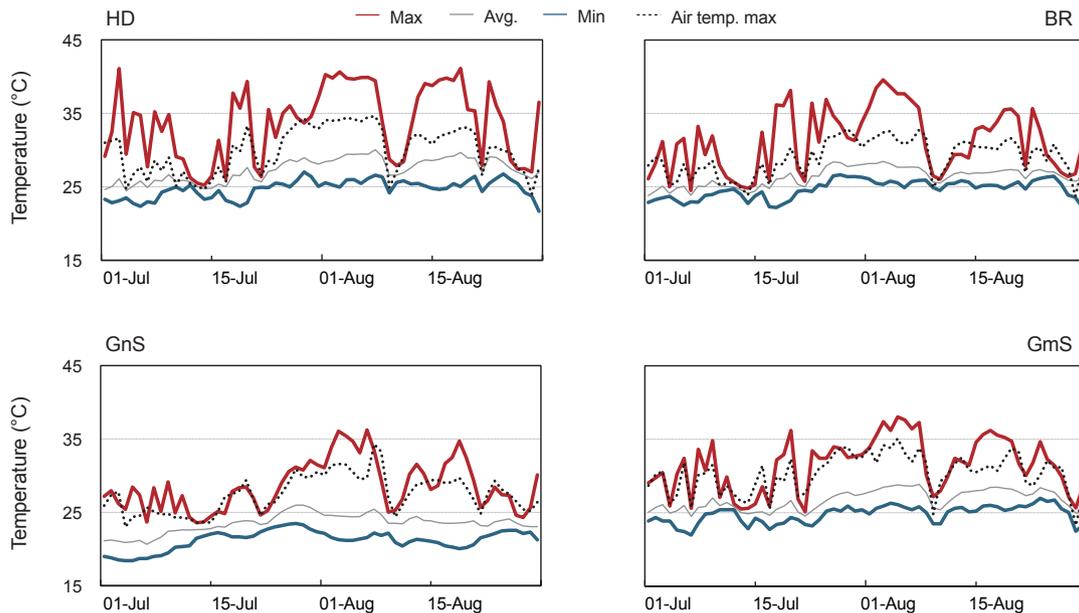


Fig. 4. Plot of the daily maximum-average-minimum sediment temperatures and maximum air-temperature during summer season in 2023. Black dotted-line is air-temperature adapted from the AWS data (KMA, 2024).

연구 기간 중 출현 개체수에 따른 상위 5종 중 바지락은 41.7%의 점유율로 가장 높았으며, 5위의 고리버들갯지렁이(*Heteromastus filiformis*)와 함께 모든 어장에서 출현하였다. 두 번째로 높은 점유율을 보인 침보석요정갯지렁이(*Armandia lanceolata*)는 모래해안이나 사질 함량이 높은 갯벌에서 주로 서식한다고 알려져 있는데(Koo et al., 2005), 본 연구에서도 사질이 우세한 퇴적환경인 황도와 보령에서만 출현하는 특징을 보였으며, 하계(평균 40 ind./m<sup>2</sup>)보다 춘계(평균 525 ind./m<sup>2</sup>)에 상대적으로 더 높은 밀도를 보였다. 네번째로 높은 점유율을 보인 작은사슴갯지렁이(*Ampharete finmarchica*)는 근소만에서만 출현하였으며, 춘계에 낮은 밀도(20 ind./m<sup>2</sup>)를 보이다 하계에 870 ind./m<sup>2</sup>로 높게 나타났다. 작은사슴갯지렁이는 표층 퇴적물 식자이며, 실트나 점토로 구성된 부드러운 퇴적물에 주로 출현한다고 알려져 있다(Parapar et al., 2012). 일반적으로 대형저서생물은 퇴적물이 동일한 입자에 따른 동질성이 강할 때 낮은 생물 다양성과 개체수를 나타내며, 다양한 입자가 혼합되어 이질성이 증가할 경우 개체수가 높아지게 된다(Jung et al., 2014). 근소만은 본 연구의 퇴적물 조성 및 성상 분석 결과에서도 확인할 수 있듯이 동계에서 하계로 갈수록 사질 함량이 높아지고 이에 따라 분급도가 매우 불량한데 이러한 변화가 작은사슴갯지렁이의 하계 높은 출현량 증가에 영향을 준 것으로 생각된다. 긴자락송곳지렁이(*Scoletoma longifolia*)는 천수만 내 연중 우점하는 종으로 알려져 있었으나(Jung et al., 2014) 본 연구에서는 천수만 안쪽에 위치한 황도 어장에서 춘계에만 10 ind./m<sup>2</sup>의 낮은 밀도로 출현하였고, 근소만 어장에서는 가장 높은 밀

도로 특히 춘계와 하계에 각각 360 ind./m<sup>2</sup>, 730 ind./m<sup>2</sup>로 밀도가 약 2배 증가한 것으로 나타났다. 긴자락송곳지렁이는 수괴의 흐름이 약하여 니질 퇴적상을 나타내는 반폐쇄성 만에서 우점하며, 2차적 기회종으로 교란환경에서 일시적으로 개체수가 크게 증가하는 종으로 알려져 있다(Borja et al., 2000; Jang and Shin, 2016). 본 연구에서도 니질이 우세한 반폐쇄성만인 근소만의 IL이 춘계에 2.08%에서 하계에 3.70%로 약 1.8배 증가함에 따라 긴자락송곳지렁이의 개체수도 약 2배 증가하는 등 비슷한 경향을 확인할 수 있었다. 본 연구의 근소만 어장은 Jang and Shin (2016)의 연구대상지인 가막만(7.2–10.3%)에 비해 IL이 낮은 범위에 속하지만, 갯벌 특성상 침수-노출 반복의 산화 환경 조성으로 인해 유기물 분해가 활발히 이루어진다는 점과 퇴적물 분급 변화와 관련하여 모래살포에 따른 저서생태계 교란 가능성을 추측해 볼 수 있다. 특히 이 좋은 필이 많이 함유된 혼합질의 퇴적물에서 높은 밀도를 나타내며, 생태적 지위가 매우 넓은 것으로 알려져 있다(Jung et al., 2002). 또한, 긴자락송곳지렁이는 유기물 오염에 내성이 강하며, 퇴적물 내 유기물 함량과 그 출현량이 양의 상관성을(Paik et al., 2005) 보이는 것으로 알려져 있는데 이는 본 연구에서 평균 TOC농도가 근소만에서 가장 높게 나타난 것과 일치한다(Table 3). 이외에도 근소만은 하계에 바지락을 포함한 상위 3개의 분류군 다음으로 출현량은 종뿔(*Musculista senhousia*) 330 ind./m<sup>2</sup>, 고리버들갯지렁이 190 ind./m<sup>2</sup>, 버들갯지렁이류(*Mediomastus californiensis*) 80 ind./m<sup>2</sup> 등의 순으로 춘계에 비해 증가했다. 이러한 결과는 인위적인 모래 살포에 의한 일시적인 저서 생물

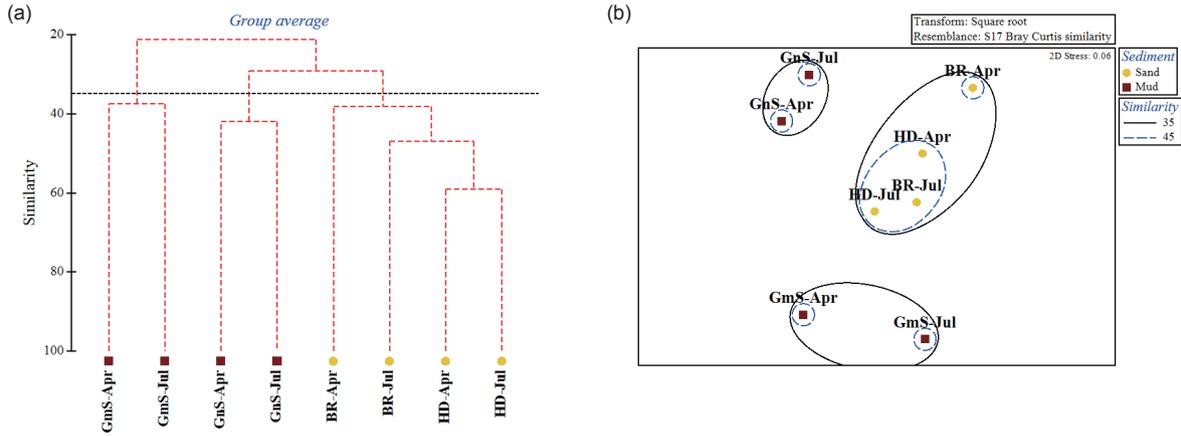


Fig. 5. Comparison of similarity of benthic macrofauna communities according to the sand- and mud-dominant sediments.

의 밀도 감소보다, 이질적인 퇴적물 증가에 따라 기회종인 종 및 버들갯지렁이류의 급속한 개체수 증가가 나타난 것으로 보인다(Yoon et al., 2014).

대형저서생물 군집 유사도

조사 기간 출현한 대형저서생물의 개체수 기반 군집 유사도는 니질 우세 퇴적물 환경의 근소만과 곱소만이 35% 이하로 나타나 사질 우세 퇴적물 환경의 황도와 보령에 비해 낮게 나타났다. 근소만에서는 긴자락송곳갯지렁이와 작은사슴갯지렁이가 중요한 비중을 차지한 반면 곱소만에서는 고리버들갯지렁이와 남방백금갯지렁이(*Nephtys polybranchia*)가 중요한 비중을 차지하여 각기 다른 결과를 보였다. 모든 지역에서 출현한 고리버들갯지렁이는 곱소만에서 가장 높은 점유율을 차지하였지만 근소만에서는 다섯번째로 높은 점유율을 보였으며, 곱소만은 이외에도 두갈래별난가시갯지렁이(*Cirrophorus furcatus*), 솜털별난가시갯지렁이(*Aricidea assimilis*) 등이 출현하여 근소만과 다른 양상을 보였다. 이는 같은 니질 우세 환경이라고 할지라도 지역적인 저서환경 차이와 지리적 거리에 따라 근소만과 곱소만이 서로 다른 생물 분포를 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 전체 조사지역에서도 니질과 사질 우세 퇴적물 환경에 따라 분명한 저서생물 군집 구조의 차이를 보였다(Fig. 5). 황도와 보령은 각각 천수만 내측과 외측에 위치해 있어 지리적으로 인접해 있기에 상대적으로 거리가 먼 다른 두 조사 지역에 비해 대형저서생물 군집 유사도가 더 높게 나타난 것으로 생각된다. 황도는 같은 사질 우세 환경인 보령에 비해 춘계와 하계 사이의 계절 변동이 더 낮은 것으로 나타났으며, 대형저서생물 군집 구조가 59%의 가장 높은 유사도를 보였다. 이는 황도가 춘계에서 하계로의 퇴적상 변화가 gmS-gmS로 작았고, 보령은 gS-mS로 평균입도가 1.66 Φ에서 3.67 Φ로 니질(mud)이 약 5.5배 높아져 변동이 컸다는 점을 알 수 있다. 보령 춘계에는 사질 퇴적물에서 우점하는 침보석요정갯지렁이가 830 ind./m<sup>2</sup>로 높은 서식밀도를

보였으나, 하계에 니질 퇴적물의 증가로 50 ind./m<sup>2</sup>의 서식밀도 감소를 보였다. 니질 퇴적물 증가의 계절 변화에 따라 다모류 중 남방백금갯지렁이가 가장 우점하고 차우점종은 고리버들갯지렁이로 변경되었다. 본 조사에서 보령 어장은 계절 변화에 따른 니질 퇴적물 증가로 종수, 다양도, 풍부도가 2배 이상 증가한 결과를 가져왔다(Table 5). 특히, 보령의 바지락 서식밀도는 춘계에 1,180 ind./m<sup>2</sup>로 침보석요정갯지렁이와 함께 극우점하는 현상을 보였고, 퇴적물 변화에 따라 군집 유사도는 황도에 비해 낮은 것을 확인할 수 있었다.

어장별 바지락 출현량과 저서환경 특성

각 어장별 바지락의 서식밀도와 생체량을 파악한 결과, 춘계와 하계 서식밀도는 근소만에서 230–1,760 ind./m<sup>2</sup> (평균 995 ind./m<sup>2</sup>)로 가장 높았으며, 다음으로 보령에서 1,180–470 ind./m<sup>2</sup> (평균 825 ind./m<sup>2</sup>), 황도에서 810–110 ind./m<sup>2</sup> (평균 460 ind./m<sup>2</sup>) 순으로 나타났다. 생체량 역시 서식밀도와 같은 경향인 근소만(평균 2,321.8 gWWt/m<sup>2</sup>), 보령(평균 1,547.9 gWWt/m<sup>2</sup>), 황도(평균 525.5 gWWt/m<sup>2</sup>), 곱소만(평균 5 gWWt/m<sup>2</sup>) 순으로 나타났으며, 곱소만은 춘계에 바지락이 0.2 gWWt/m<sup>2</sup> (10 ind./m<sup>2</sup>), 하계에는 채집되지 않았다(Fig. 6a). 또한, 근소만에서 바지락의 평균 서식밀도가 가장 높게 나타나긴 하였지만 춘계에서 하계로 계절 변화에 따른 서식밀도 증가 현상을 나타낸 보령과 황도와는 다른 경향을 보였다. 이는 계절에 따른 바지락 성장의 생체량 증가보다 새로운 치패 가입에 의한 영향이 큰 것으로 보이는데 바지락의 생체량/서식밀도 비율이 춘계에 7.8에서 하계에 1.6으로 감소했기 때문이다(Fig. 6b). 근소만은 바지락 서식밀도가 춘계에 230 ind./m<sup>2</sup>를 보이다 하계에 7.7배(1,760 ind./m<sup>2</sup>) 증가한 반면 생체량은 1.6배 증가하여 작은 개체의 비율이 높아졌음을 알 수 있다. 이는 모래살포에 의한 퇴적물의 분급 변화와 거칠고 굵은 입자 증가가 주된 원인으로 생각된다. 그리고 바지락이 채집되지 않은 곱소만을 제외하고 사질 우세 환

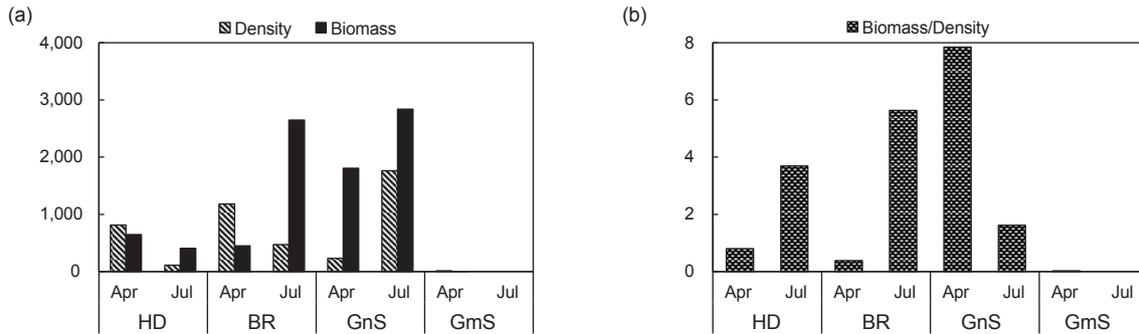


Fig. 6. Manila clams at each study site show density, biomass (a) and ratio of biomass/density (b) with seasonal variations.

경인 황도와 보령 모두 생체량/서식밀도의 비율이 계절변화에 따라 증가하였으며, 특히 보령은 14.8배 증가한 것으로 나타났다. 보령 어장의 춘계에는 치패 크기의 개체가 많이 가입되고 하계에 성패 크기의 개체가 많이 출현하여 바지락이 안정적으로 성장한 것으로 판단된다.

사질과 니질 우세 퇴적물 조성에 따른 저서 환경의 특성에 따라 니질 우세 갯벌어장인 근소만과 곰소만은 사질 갯벌어장인 황도와 보령에 비해 WC과 유기물 함량이 상대적으로 높은 특징을 보였다(Fig. 3). 니질 우세 환경인 근소만은 가장 짧은 노출시간을 나타내어(Table 4) 지온 변화가 타 어장에 비해 안정적이었다(Fig. 4). 또한, 근소만 어장의 저서생물 서식밀도는 계절 변화에 따라 5배 이상 증가하였다(Table 5). 이러한 변화는 인위적인 모래살포에 의한 거친 퇴적물 입자 투입과 유기물 함량 변화에 의해 기회종을 포함한 저서생물 가입이 증가한 결과로 판단된다. 그러나 전반적인 저서생물의 서식밀도가 증가하는 경향과 바지락 치패의 가입량 증가는 또 다른 측면에서 볼 때 동종 또는 타종간 먹이경쟁이 불가피하기에 바지락의 성장 저하에 유의해야 할 것으로 생각된다.

곰소만 어장은 근소만과 같은 니질 우세환경으로 퇴적물 조성 과 성상이 비슷하나, 퇴적물의 조성 중 실트질(평균 65.0%)이 가장 우세하였으며 계절 변동이 가장 낮은 편에 속하였다(Table 2). 이러한 퇴적환경의 특성으로 인해 다모류 뿐만 아니라 총 출현 종수의 변동이 낮았으며, 특히 종 다양도와 균등도가 상대적으로 타 어장에 비해 높은 특징을 보였다(Table 5). 그러나 바지락을 포함한 저서동물의 서식밀도 면에서 곰소만은 타 어장들과 비교해 가장 낮은 것으로 파악되었으며, 같은 니질 환경이지만 인위적인 모래 살포가 주기적으로 이뤄진 근소만과 상반되는 저서생물 군집구조를 보였다(Fig. 5). 또한, 곰소만은 위도상 가장 남쪽에 위치하여 기온이 가장 높은 편에 속하였기 때문에(Fig. 4) 향후 기온의 영향에 민감하게 반응하는 지온 변화에 대한 지속적인 관측이 필요할 것으로 보인다.

사질 우세 환경인 보령은 가장 조립한 퇴적물 조성(평균입도 2.9  $\Phi$ )을 보였으며, 조사지역 중 사질 함량이(평균 75.5%) 가장 높은 어장에 속했다(Table 2). 사질 함량이 가장 높은 퇴적물

특성에 따라 유기물 함량이 가장 낮았으며, AVS가 전혀 검출되지 않은 어장으로 확인되었다(Table 3). 저서생물의 서식밀도는 계절변화에 따라 하계에 절반가량 감소되는 것으로 나타났지만 종 다양도는 2배 이상 증가하였는데, 이는 춘계에 작은 크기의 바지락과 침보석요정갯지렁이가 높은 우점도(0.49)에 크게 기여한 반면 하계에 바지락의 생체량/서식밀도 비율과 다모류의 종 수가 크게 증가한 결과로 보인다(Table 5). 특히, 보령은 과거에 비해 속 출현도 상당히 감소되었으며(unpublished data), 본 연구에서 춘계에 바지락 치패가 착저하여 하계에 안정적으로 성장하는 특징을 보였기 때문에 향후 양질의 바지락 어장으로 유지되기 위해 모패 확보와 치패 생산에 있어 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

황도 어장에서는 퇴적물의 사질함량이 59.9–80.8% 범위로 산화 환경이 조성되기 쉬운 공간임에도 AVS가 일본의 오염 기준인 0.2 mgS/g의 약 66.5% 수준(0.133 mgS/g)으로 춘계에 다소 높은 농도를 확인할 수 있었다(Table 3). 이와 관련해 황도는 간월호와 부남호의 A, B지구 방조제 배수갑문을 통한 담수유입 영향으로 유기물 유입이 타 어장보다 더 높을 것으로 예상되는데(Yoon, 2021), 긴 노출시간에 의해 분해가 빠르게 일어나는 환경조건일 수 있어 유기물 분해에 따른 산소 소모의 영향을 정량적으로 파악하기 위한 추가 조사가 수행되어야 할 것으로 생각된다. 어장별 입도 조성 과 노출시간 비교를 통해서도 알 수 있듯이 황도는 하계 지온이 최대 40°C까지 도달하여(Fig. 4) 지온 변동폭이 가장 큰 어장으로 파악되었기에, 향후 이상기온 및 고수온에 따른 바지락 및 저서생물 피해에 대한 대응책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 2025년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2025015)의 일환으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 본 논문을 세심히 검토하시어 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원분들께 감사의 말씀 전합니다.

## References

- Alongi DM, Tirendi F, Dixon P, Trott LA and Brunskill GJ. 1999. Mineralization of organic matter in intertidal sediments of a tropical semi-closed delta. *Estuar Coast Shelf Sci* 48, 451-467. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0465>.
- Bray JR and Curtis JT. 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol Monogr* 27, 325-349. <https://doi.org/10.2307/1942268>.
- Borja A, Franco J and Perez V. 2000. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Mar Pollut Bull* 40, 1100-1114. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00061-8).
- Chang JH, Kim YG and Lee MS. 2023. Bathymetric and topographic changes of the Gomso-Bay tidal flat, west coast of the Korean peninsula. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 29, 552-561. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2023.29.6.552>.
- Choi MK, Lee IS, Kim CS, Kim HC and Hwang DW. 2015. Distributions of organic matter and trace metals in surface sediments around a manila clam *Ruditapes philippinarum* farming area in Gomso Bay, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 48, 555-563. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0555>.
- Davies JL. 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Z Geomorphol* 8, 127-142. <https://doi.org/10.1127/zfg/mortensen/8/1964/127>.
- Elskens M, Leermakers M, Panutrakul S, Monteny F and Baeyens W. 1991. Microbial activity in sandy and muddy estuarine sediments. *Geo Mar Lett* 11, 194-198. <https://doi.org/10.1007/BF02431012>.
- Folk RL. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Co., Austin, TX, U.S.A., 184.
- Hamilton EL and Bachman RT. 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J Acoust Soc Am* 72, 1891-1904. <https://doi.org/10.1121/1.388539>.
- Hong JS and Seo IS. 2001. The community ecology of benthic macrofauna on the Cheokjeon tidal flat, Incheon, Korea 1. Community structure. *J Korean Soc Oceanogr* 6, 190-200.
- Jang SY and Shin HC. 2016. Differences in the community structures of macrobenthic polychaetes from farming grounds and natural habitats in Gamak Bay. *J Kor Soc Mar Environ Eng* 19, 297-309. <https://doi.org/10.7846/JKOS-MEE.2016.19.4.297>.
- JFRCA (Japan Fisheries Resources Conservation Association). 1983. *Water Quality Criteria for Protection of Aquatic Living Resources*. JFRCA, Tokyo, Japan, 29.
- Jung RH, Lim HS, Kim SS, Park JS, Jeon KA, Lee YS, Lee JS, Kim KY and Go WJ. 2002. A study of the macrozoobenthos at the intensive fish farming grounds in the southern coast of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 7, 235-246.
- Jung RH, Seo IS, Lee WC, Kim HC, Park SR, Kim JB, Oh CW and Choi BM. 2014. Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages at spring summer in Cheonsu Bay, west coast of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 19, 272-286. <https://doi.org/10.7850/jkso.2014.19.4.272>.
- Kemp WM, Sampou P, Caffrey J, Mayer M, Henriksen K and Boynton WR. 1990. Ammonium recycling versus denitrification in Chesapeake Bay sediments. *Limnol Oceanogr* 35, 1545-1563. <https://doi.org/10.4319/lo.1990.35.7.1545>.
- Kim DH and Yang JS. 2001. Denitrification and COD, TN and SS fluxes in Komso Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Energy* 4, 32-41.
- Kim KH and Kim DS. 2008. Seasonal and spatial variations of nutrient fluxes in the intertidal flat of Keunso Bay, the Yellow Sea. *Ocean Polar Res* 30, 225-238. <https://doi.org/10.4217/OPR.2008.30.3.225>.
- Kim DS, Lim DI, Jeon SK and Jung HS. 2005. Chemical characteristics and eutrophication in Cheonsu Bay, west coast of Korea. *Ocean Polar Res* 27, 45-58. <https://doi.org/10.4217/OPR.2005.27.1.045>.
- Kim MJ, Baek WK, Jung HS and Ryu JH. 2024. Analysis of micro-sedimentary structure characteristics using ultra-high resolution UAV imagery: Hwangdo tidal flat, South Korea. *Korean J Remote Sens* 40, 295-305. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2024.40.3.6>.
- Kim SH, An SU, Lee WC, Lee JS and Hyun JH. 2020. Influence of Manila clam aquaculture on rates and partitioning of organic carbon oxidation in sediment of Keunso Bay, Yellow Sea. *Aquac Environ Interact* 12, 91-103. <https://doi.org/10.3354/aei>.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2024. Automatic Weather System. Retrieved from <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAwsRltnList.do> on Aug 18, 2024.
- Koh CH and Khim JS. 2014. The Korean tidal flat of the Yellow Sea: Physical setting, ecosystem and management. *Ocean Coast Manage* 102, 398-414. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.07.008>.
- Koo BJ, Shin SH and Woo HJ. 2005. Distribution of benthic macrofauna in subtidal area and on sand flat of Sinduri coast, Korea. *J Korean Wetlands Soc* 7, 69-88.
- Lee DK, Kim KH and Lee JS. 2016. Hypoxia and characteristics of nutrient distribution at the bottom water of Cheonsu Bay due to the discharge of eutrophicated artificial lake water. *J Kor Soc Mar Environ Saf* 22, 854-862. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2016.22.7.854>.
- Lee JY, Choi MS and Song YH. 2019. Effect of freshwater discharge on the seawater quality (nutrients, organic materials and trace metals) in Cheonsu Bay. *J Korean Soc Oceanogr* 24, 519-534. <https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.4.519>.
- Lee SH, Cho YK, You KW, Kim YG and Choi HY. 2005. Structure and variation of tidal flat temperature in Gomso bay, west coast of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 10, 100-112.
- Lee SW, Park C, Lee DB and Lee JG. 2014. Effects of freshwater discharge on plankton in Cheonsu Bay, Korea during the

- rainy season. J Korean Soc Oceanogr 19, 41-52. <https://doi.org/10.7850/jkso.2014.19.1.41>.
- Lee YW, Park MO, Yoon JH and Hur SB. 2012. Temporal and spatial variation of microalgal biomass and community structure in seawater and surface sediment of the Gomso Bay as determined by chemotaxonomic analysis. J Korean Soc Oceanogr 17, 87-94. <https://doi.org/10.7850/jkso.2012.17.2.087>.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2018. Korean Standard Method of Examination for Marine Environment. MOF, Sejong, Korea.
- Noh IH, Yoon YH, Kim DI and Park JS. 2006. The spatio-temporal distribution of organic matter on the surface sediment and its origin in Gamak Bay, Korea. J Kor Soc Mar Environ Eng 9, 1-13.
- Paik SG, Park HS, Yun SG and Je JG. 2005. Assessment of ecological grade based on polychaete fauna in the Western and Southern Coast of Korea. J Wet Res 7, 89-104.
- Parapar J, Helgason GV, Jirkov I and Moreira J. 2012. Polychaetes of the genus *Ampharete* (Polychaeta: Ampharetidae) collected in Icelandic waters during the BIOICE project. Helgol Mar Res 66, 331-344. <https://doi.org/10.1007/s10152-011-0274-z>.
- Park SY, Heo S, Yu J, Hwang UK, Park JS, Lee SM and Kim CM. 2013. Temporal and spatial variations of water quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea. J Kor Soc Mar Environ Saf 19, 439-458. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.5.439>.
- Thomson B and Lowe S. 2004. Assessment of macrobenthos response to sediment contamination in the San Francisco Estuary, California, USA. Environ Toxicol Chem 23, 2178-2187. <https://doi.org/10.1897/03-233>.
- Thomson J. 2010. Observations of thermal diffusivity and a relation to the porosity of tidal flat sediments. J Geophys Res 115, C05016. <https://doi.org/10.1029/2009JC005968>.
- Thrush SF, Hewitt JE, Cummings VJ, Ellis JI, Hatton C, Lohrer A and Norkko A. 2004. Muddy waters: Elevating sediment input to coastal and estuarine habitats. Front Ecol Environ 2, 299-306. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0299:MWESIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0299:MWESIT]2.0.CO;2).
- Vincenzi S, Caramori G, Rossi R and De Leo GA. 2006. A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy). Ecol Model 193, 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.039>.
- Woo HJ, Choi JU, Ryu JH, Choi SH and Kim SR. 2005. Sedimentary environments in the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay. J Wetlands Res 7, 63-67.
- Yoon HH and Chun SS. 2019. Rapid shift of surface sedimentary facies and its depositional mechanism in the macrotidal wave-dominated Sinduri Bay, west coast of Korea. J Geol Soc Kor 55, 257-276. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2019.55.3.257>.
- Yoon JJ. 2021. Evaluation of the tidal-flat ecosystem restoration effect on the construction of Hwangdo bridge in Taean. J Coast Disaster Prev 8, 79-88. <https://doi.org/10.20481/kscdp.2021.8.2.79>.
- Yoon SP, Song JH, Choi YS, Park KJ, Chung SO and Han HK. 2014. The impact of sand addition to an intertidal area for the development of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum* habitat on benthic community (the case of Ojjeom tidal flat in Gonam-myeon, Taean-gun). Korean J Malacol 30, 259-271. <https://doi.org/10.9710/kjm.2014.30.3.259>.
- You SJ and Kim JG. 1999. Evaluation on the purification capacity of pollutants in the tidal flat. J Korean Fish Soc 32, 409-415.