# 천수만 갯벌, 쏙(Upogebia major) 유입 및 정착 밀도에 따른 해수-퇴적물 환경과 서식지 특성 비교

전승렬 · 옹기호 · 구준호\* · 박종우 · 김유철 · 정희도 · 조재권

국립수산과학원 서해수산연구소 갯벌연구센터

# **Comparison of the Seawater-Sediment Environment and Habitat** Properties with Variable Mud Shrimp Upogebia major Burrow Hole Density and Its Influence on Recruitment and Settlement in the Cheonsu **Bay Tidal Flats**

Seung Ryul Jeon, Giho Ong, Jun-Ho Koo\*, Jong-Woo Park, Yu Cheol Kim, Hee-Do Jeung and Jae-Kwon Cho

Tidal Flat Research Center, West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gunsan 54001, Republic of Korea

The habitat degradation caused by large-scale reclamation leads to devastating impacts, such as fine sediment and mud shrimp Upogebia major settlement on Manila clam Ruditapes philippinarum aquaculture in the eastern Cheonsu Bay tidal flats, Republic of Korea. Despite these impacts, there is a lack of studies on the influence of fine sediments on tidal flats that constitute key mud shrimp habitats. This study provides information on the seawater-sediment environment and the influence of dissolved inorganic nitrogen (DIN) fluctuations depending on mud shrimp burrow hole density. Additionally, it discusses countermeasures for Manila clam habitat management. The results show that mean DIN effluxes in areas with a high-density of burrow holes were up to 4 times (0.12 mmol  $m^{-2} d^{-1}$ ) higher than those in sites of low-density (0.03 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) within the Saho and Songhak-ri tidal flats. To manage interference within the competition zone of Songhak-ri tidal flat, it is important to utilize the settlements of spawning season in all three dimensions. Consequently, additional studies in other tidal flats are essential and research in zones where mud shrimps and juvenile clams coexist will help to determine the priorities in the efficient management of clam aquaculture.

Keywords: Burrow hole density, Cheonsu Bay, Manila clam, Mud shrimp, Seawater-sediment environment

#### 서 론

천수만은 과거 대규모 간척으로 인해 해양환경 변동이 심한 지역으로 알려져 있다. 과거 1980년대 서산 A, B 방조제, 2000 년대 홍성, 보령 방조제와 같은 대규모 간척·매립사업들은 천수 만의 면적 감소(So et al., 1998; Ryu et al., 2005), 퇴적물의 세 립화(Woo et al., 2005; Song et al., 2011), 담수 유입에 의한 부 영양화(Kim et al., 2005; Jung et al., 2015) 등을 일으켜 환경 변화의 주요 원인이 되었다. 또한, 만 간척에 의한 물리적인 변

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

E-mail address: junhokoo@korea.kr

• 🕏 (cc) BY NC

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.

동은 조류 세기의 변화로 갯벌 서식지에 많은 영향을 미치게 된 다(Lee and Park, 1998; Kim et al., 2006). 특히, 세립한 퇴적 물에 의한 갯벌 니질(mud)화는 쏙 발생과 바지락 어장의 감소 등 저서환경 및 생물구조상의 변화를 일으켰으나(NIFS, 2012) 이에 대한 논의는 현재 부족한 실정이다. 식물플랑크톤의 군집 변화(Lee at al., 2012; Lee et al., 2019b), 부영양화 및 빈산소 수괴 발생(Kim et al., 2005; Lee et al., 2016), 수온 및 수질 변 동(Park et al., 2006; Park et al., 2013; Choo, 2021), 대형저서 동물 군집 변화(Jung et al., 2014) 등 천수만 연안 환경에 관련

### https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0171 Korean J Fish Aquat Sci 55(2), 171-182, April 2022 Received 7 March 2022; Revised 24 March 2022; Accepted 20 April 2022 저자 직위: 전승렬(연구원), 옹기호(연구원), 구준호(연구사), 박종우(연구사), 김유철(연구사), 정희도(연구사), 조재권(연구관)

된 다양한 연구들이 수행되었음에도 불구하고, 갯벌 니질화에 따른 생태 역학 측면의 고찰, 종간 경쟁구조 현상 파악의 시급 성과 연계성에 관한 연구는 찾아보기 힘들다. 한편, 일본의 아 리아케 해협(Ariake Sound)의 시라카와 강(Shirakawa River) 하구역의 사질 갯벌에 서식하는 쏙(Upogebia major)과 바지락 (Ruditapes philippinarum) 등의 서식 분포 차이와 주변 환경변 화에 관한 연구는 종간 경쟁구조의 현상 파악에 좋은 예가 되 었으며(Tamaki et al., 2008), 생태학적 관점의 이해를 높였다. 또한, 갑각류와 패류 종에 대한 공간분포와 환경용량을 결정하 고, 장기적인 모니터링을 통해 밝혀낸 일련의 특이적인 현상들 은 종간 이용 가능한 공간과 자원을 두고 간섭경쟁(interference competition)이 작용한다는 것을 암시하였다. 바지락과 쏙 모두 현탁물식자(suspension-feeder)로서 해수-퇴적물 경계면을 연 결 짓는 중요한 내생동물(infauna)이기는 하나 먹이원을 공통 으로 이용하고, 갯벌 내 같은 공간을 공유한다는 점으로 미루어 볼 때 이들의 생태적 충돌이 예상된다(Tamaki et al., 2008). 저 서 환경에 따라 달라지는 갯벌 양식생물과 유입생물의 분포는 특히 니질 퇴적물의 증가로 인한 주변 환경변화에 영향을 받게 된다. 따라서, 갯벌의 퇴적물 니질화에 따른 특정 생물 유입 및 정착에 대한 전반적인 기초자료와 함께 쏙과 바지락의 경쟁구 조에 따른 현상 파악은 중요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 쏙 유입 초기 및 공존 지역과 정착 지역의 갯벌 환경에 대한 전반적인 현상을 파악하고자 쏙 서식 특성에 따라 해수-퇴적물 환경과 생물 분포 양상이 각기 다르게 나타나는 세 지역을 선정하였다. 또한, 퇴적물 내 공극수의 영양염 용출 플럭 스 추정을 통해 쏙 서식 굴에 따른 수직적인 변동 경향을 파악하 고, 생물 서식지의 특성이 어떠한 영향으로 변화하는지에 대해 알아보고자 하였다. 이에 따라, 쏙과 바지락의 지역적 환경특성 차이를 비교, 분석하여 종간 경쟁구조의 전략적인 대응과 방안 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

# 재료 및 방법

#### 연구지역 및 개황

천수만은 태안군 안면도와 행정구역상 서산시, 홍성군, 보령 시에 걸쳐 둘러싸여 있으며, 남-북 길이 약 25 km, 만 중앙부 최 대폭 약 10 km의 반 폐쇄성 만으로 내만과 하구역의 성질을 동 시에 갖는 혼합 특성 지역이다(Lee et al., 2019a). 만 북쪽에는 인공 담수호인 간월호와 부남호가 위치하여 하계 집중 호우 기 간에 배수문을 통해 담수가 간헐적으로 대량 배출되기도 한다 (Jung et al., 2015). 조사지역은 천수만 동쪽 서해 지선을 따라 형성된 갯벌로 행정구역상 보령시에 속한 송학리(Songhak-ri, SHa)와 사호리(Saho-ri, SHo), 그리고 홍성군의 상황리(Sanghwang-ri, SHw) 총 세 지역이다. 조사지역 주변으로 서산 A, B 방조제를 포함한 홍성, 보령 방조제 등이(Fig. 1) 과거 간척 및 매립이 집중되었던 1980년대부터 2000년까지 추가로 완공되



Fig. 1. Study areas in the eastern tidal flats of Cheonsu Bay. Sampling sites are located along the west coast tidal flats in Sanghwang-ri (SHw), Hongseong-gun, Saho-ri (SHo) and Songhak-ri (SHa), Boryeong city. The red dotted lines are the main tide embankment around Cheonsu Bay.

어 만 면적 감소의 직접적인 원인이 되었다(KORDI, 1994). 천 수만은 앞서 언급한 담수 방류와 같은 인위적인 영향과 함께 저 서 및 수서 생태계의 변동이 심한 특성을 갖추고 있다(Jung et al., 2014; Lee et al., 2019a).

### 연구지역별 특징 및 실험 설정

쏙 밀도와 깊이에 따른 해수-퇴적물의 실험 구성은 D'Andrea and DeWitt (2009)이 Yaquina Bay에서 퓨젯쏙(*Upogebia pugettensis*)을 대상으로 한 쏙 서식 굴 밀도(burrow hole-density) 및 깊이에 따른 퇴적물의 연구 설정을 바탕으로 천수만 주변 갯벌 내 쏙 서식 특성에 맞게 구성하였다. 쏙 서식 굴 깊 이는 Y-형태의 굴에서 U-형태 부분 중 해수와 맞닿는 표층을 surface (0–10 cm)로 설정하였고, U-part와 I-part가 맞닿는 부 분인 중층 shallow (10–30 cm)와 그 이하의 깊이를 저층 deep (30–50 cm)으로 설정하였다. 쏙 서식 굴의 내벽(inner burrow wall)은 10 cm 깊이 U-part 부근의 주변 퇴적물과 색깔이 대비 되는 약 0.5 cm 두께의 적갈색 퇴적물 부분으로 구분하여 채집 하였다(Fig. 2).

세 연구지역은 쏙의 유입 및 정착 특성이 다르게 나타나는데



Fig. 2. The description on depth layers and surface sediment types of the mud shrimp *Upogebia major* burrow-dwelling by research setting. The thickness of the diffusion layer was assumed to be 15 cm.

홍성 상황리는 쏙(U. major)이 고밀도로 우점하고, 가시이마쏙 (Austinogebia wuhsieneweni), 가재붙이(Laomedia astacina) 도 출현하여 조사지역 주변을 포함해 쏙 서식 굴 밀도가 가장 높은(mean burrow hole density, 856.3±282.4 holes m<sup>-2</sup>; n=59) 특징을 지닌다. 보령 사호리는 가파른 해안 절벽 가까이 바지 락 어장이 좁게 형성되어 있으나 최근 쏙이 유입된 것으로 보인 다. 쏙 유입 초기 지역(mean burrow hole density, 162.7±116.3 holes m<sup>-2</sup>; n=36)인 사호리는 간조 시 노출 선의 길이가 약 100-150m 정도로 다른 조사지역보다 상대적으로 짧은 특징을 갖는 다. 보령 주교면에 속해 있는 송학리는 우리나라 바지락 최대 산 지로 잘 알려져 있으나 2000년대부터 쏙 발생으로 인해 바지락 어장이 조간대 중-하부에서 하부로 점차 축소되었고, 2009년에 바지락 생산량은 1,784 M/T이였으나 2011년에는 89 M/T으로 2년 내 약 95%가 급격히 감소되기도 하였다(NIFS, 2012). 보령 송학리는 쏙과 바지락의 서식 공간이 분획 또는 공존하는 지역 (mean burrow hole density, 269.8±140.9 holes m<sup>-2</sup>; n=22)으로 두 종간의 공간 및 먹이경쟁이 이루어지고 있는 특징을 갖는다.

# 현장 조사 및 수질 분석

연구지역의 현장 조사는 바지락 주 산란기에 맞춰 쏙에 의한 영향을 알아보기 위해 2021년 5월, 7월, 9월에 갯벌이 대기에 노출되는 간조 시 실시하였으며, 총 3회 조사하였다. 기본적으 로 정점별 갯벌 고인 해수(standing water)의 온도, 염분, 용존 산소, 수소이온농도는 다항목수질측정기(YSI-556 Multiprobe System; YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)를 사용하여 현

장에서 측정하였다. 고인 해수는 조사 시 퇴적물 재부유와 같 은 인위적인 영향에 의한 간섭을 최대한 줄이기 위해 안정된 상태에서 소량 반복 채수하여 확보하였다. 해수 2 L를 멸균 채 수병에 확보한 후 미리 무게가 측정된 유리섬유여과지(GF/C, Glass Microfiber Filter Papers, 1.2 um; Whatman, Clifton, NJ, USA)를 이용하여 현장에서 즉시 500 mL 여과하였다. 유리섬 유여과지는 실험실로 옮긴 뒤 건조 전과 후의 무게 차를 이용 하여 총부유물질(total suspended solids, TSS)을 계산하였으 며, 이어 전기로에 20분간 550°C에 강열 후 무게 차로 휘발성부 유물질(volatile suspended solids, VSS)을 구하였고, 잔류성부 유물질(fixed suspended solids, FSS)은 TSS에서 VSS를 뺀 값 을 취하였다. 또한, chlorophyll-a는 현장에서 멤브레인여과지 (Membrane filter, 0.45 um; Advantec, Tokyo, Japan)로 여과 하여 냉동상태로 실험실로 즉시 운반하였고, 90% 아세톤으로 24시간 암소에서 추출한 후 분광광도계(Cary 100; Varian Inc., Palo Alto, CA, USA)를 이용하여 750 nm, 665 nm, 645 nm, 630 nm 파장으로 측정하고 농도를 계산하였다(MOF, 2013).

#### 현장 조사 및 깊이별 퇴적물 분석

퇴적물의 깊이별 성상 및 입도 조성과 각 층의 공극수 영양염 분석을 위해 1 m 원통형 can core를 사용하여 갯벌 주상 퇴적물 시료를 확보하였다. 깊이별(표-중-저층; surface-shallow-deep) 에 따라 절단하여 각각 시료병에 옮겨 담은 후 Rhizon sampler (Rhizosphere, Wageningen, Netherland)를 이용하여 현장에 서 즉시 퇴적물 내 공극수(porewater)를 추출하였다. 이후 공 극수는 영양염자동분석기(QuAAtro39 AutoAnalyzer; Seal Analytical Inc., Mequon, WI, USA)를 이용하여 용존무기질소 (dissolved inorganic nitrogen, DIN=NH<sub>4</sub><sup>++</sup>NO<sub>3</sub><sup>-+</sup>NO<sub>2</sub>)를 5월 (춘계), 7월(하계), 9월(추계)에 걸쳐 총 3회 분석하였다.

퇴적물의 강열감량(ignition loss, IL)과 함수율(water content, WC)은 채취한 퇴적물을 실험실로 옮긴 뒤 분석하였으며, 산 휘 발성 황화물(acid volatile sulfide)의 경우 대기 중 산소와 접촉 하면 빠르게 산화되기 때문에 검지관을 활용하여 신속히 현장 에서 측정하였다(MOF, 2013). 깊이별 퇴적물과 쏙 서식 굴 내 벽의 입도는 전처리 후 습식 체질하여 세립질(>4 Φ)과 조립 질(<4 Φ)로 나누고, 자동입도분석기(SediGraph III 5120; Micromeritics Inc. Co., Norcross, GA, USA)와 진동식 체가름기 (Analysette 3 Pro; Fritsch, Idar-Oberstein, Germany)를 활용 하여 입도 조성과 성상을 결정하였다(Folk, 1968).

#### 퇴적물 공극수의 영양염 확산 플럭스

깊이별 퇴적물 내 공극수의 영양염 플럭스는 Fick's first law 의 확산 방정식(1)을 활용하여 산정하였다(Iversen and Jørgensen, 1993; Boudreau, 1997). 퇴적물의 확산계수(*D*<sub>y</sub>)는 고 인 해수 온도에 따라 보정된 확산계수를 사용하였고(Lerman, 1979), 곡률도는 공극률(φ; Berner, 1980)과 전기저항형성계수 (McDuff and Ellis, 1979)를 이용하여 계산하였다. 여기서 공극 률은 본 연구 설정에 따라 표-중층(surface-shallow) 두 층에 대 한 평균값을 적용하였으며, 퇴적물의 WC를 이용하여 구하였 다. 확산이 일어나는 퇴적물의 깊이에 따른 차이는 추출된 공 극수의 농도( $\partial C$ )와 퇴적물의 두께( $\partial x$ )를 적용하였다. 퇴적물 의 두께는 U-part에 해당하는 표(0–10 cm)-중(10–30 cm)층의 각 중간 값 -5 cm에서 -20 cm의 사이 간격인 15 cm로 가정하 여 계산하였다.

#### 결 과

#### 현장 조사지역의 수질 환경

고인 해수의 염분은 전 조사지역 평균 29.2로 나타났으나, 9 월 상황리의 쏙이 출현하지 않는 정점(SHw; no-density)에서 는 강우의 영향에 의해 일시적으로 낮은 값(16.1)을 보였다. 지역별 고인 해수의 수온 분포는 송학리 19.8–31.8℃, 사호리 18.4–34.5℃, 상황리 18.8–34.7℃로 나타났으나, 7월 하계 사 호리 주변에서 높은 일사량에 의해 일시적으로 가열된 고인 해 수는 39.1℃로 상당히 높은 값을 나타내는 곳도 발견되었다.

TSS의 지역별 농도는 사호리 109.0-511.0 mg/L (mean value, 294.7 mg/L), 상황리 132.0-467.0 mg/L (mean value, 258.3 mg/L), 송학리 49.3-360.5 mg/L (mean value, 132.5 mg/L) 순으로 사호리가 가장 높은 변동과 평균 값을 보였다 (Table 1). 특히, 송학리의 바지락 치패와 쏙이 공존하여 서식하는 정점(SHa; low-density)에서 TSS 농도는 49.3-132.3 mg/L (mean value, 89.9 mg/L) 범위로 가장 낮았으며, 쏙이 중밀도 로 출현하는 정점(SHa; middle-density)이 97.3-360.5 mg/L (mean value, 212.9 mg/L) 범위로 가장 높은 값을 보였다. 그러 나 FSS/TSS의 값은 바지락이 주로 서식하며 쏙이 출현하지 않은 정점(SHa; no-density)에서 86%로 나머지 정점에 비해 상대



Fig. 3. Ternary diagram by depth layers (surface-shallow-deep) depending on the burrow hole-density in the Cheonsu Bay tidal flats. The triangles, circles, and squares symbols represent each study area, and the color of symbols represent the burrow hole densities (no-low-middle-high), respectively. SHa, Songhak; SHo, Saho; SHw, Sanghwang; N, No; L, Low; M, Middle; H, High.

적으로 낮게 측정되었다(Table 1).

Study area	Inhabitation properties (Mud shrimp)				Ambient standing water				
(abbreviation)	Density plot (range)	Burrow hole density (holes m <sup>-2</sup> )	Mud shrimp density (ind. m <sup>-2</sup> )	Chl. a (µg/L)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	FSS (mg/L)	FSS/TSS (%)	
Songhak (SHa)	No (0-100)	-	-	7.8	94.6	13.4	81.1	86	
	Low (100-200)	132.0±62.2	50.6±23.9	1.9	89.9	8.8	81.1	90	
	Medium (200-500)	314.0±8.5	120±3.3	8.1	212.9	20.4	192.6	90	
Saho (SHo)	Low (100-200)	112.1±63.6	97.7±43.0	3.0	294.7	21.9	272.7	93	
Sanghwang (SHw)	No (0-100)	-	-	1.0	254.3	16.9	237.4	92	
	High (>500)	952.0±75.4	365.6±29.0	4.4	262.2	17.7	244.4	93	

Table 1. The characteristics of ambient standing water and mud shrimp Upogebia major density plot in the study sites

The mud shrimp density was determined according to the method calculated based on the number of burrow holes *Upogebia pugettensis* applied from D'Andrea and DeWitt (2009). Chl. a, Chlorophyll-a; TSS, Total suspended solids; VSS, Volatile suspended solids; FSS, fixed suspended solids.

#### 쏙 서식 굴 밀도에 따른 퇴적물의 성상 및 입도 분포

연구지역의 쏙 밀도에 따른 깊이별 입도 구성은 자갈(gravel) 이 모두 28% 이하로 나타났으며, 역니질사(grevelly muddy sand, gmS), 니질사(muddy sand), 역질니(gravelly mud, gM), 사질니(sandy mud), 니(mud, M) 총 5가지 성상으로 나뉘었다 (Fig. 3). 사호리(SHo; low-density)에서는 표층 퇴적물의 왜도 (skewness) 값 범위가 -0.56-0.29 (mean value, -0.08)로 조립 한 입자와 세립한 입자가 모두 분포하고 있어 분산정도가 컸 으며, 하계에는 -0.56으로 음의 왜도 값을 보여 세립한 퇴적물 의 유입이 이루어진 것으로 보인다. 또한, 사호리 표층 퇴적물 성상의 월변화는 gmS-gM-M로 변동이 심했으며(Table 2), 사 질(Sand; 47.1%-16.6%-4.17%) 함량은 줄어들고, 실트(Silt; 25.5%-49.3%-79.7%) 함량은 늘어나는 결과를 보였다. 퇴적물 의 세립한 입자는 조립한 입자에 비해 표면적이 크기 때문에 유 기물 흡착이 더 잘 이루어질 수 있는데(Lee et al., 2016), 사호리 표층 퇴적물 IL의 월 변화는 2.46%-2.99%-3.46%로 점점 유기 물이 증가하는 경향을 보였다.

쏙이 고밀도로 출현하는 상황리(SHw; high-density)에서는

퇴적물 성상의 변동 폭이 가장 작았으며, 저층에서는 변동이 거 의 없었다(Fig. 3). 또한, 표층 퇴적물의 왜도 값은 -0.59--0.80 (mean value, -0.69)의 범위로 모두 음의 왜도 값을 나타내어 상대적으로 세립한 퇴적물이 분포하고, 첨도 값은 3.17-4.12 (mean value, 3.53)로 상당히 돌출(very leptokurtic)한 것으 로 나타나 비슷한 입경을 갖는 입자에 의한 영향력이 큰 것으 로 나타났다. 깊이별 니질 함량은 표층, 중층, 저층 모두 월평균 82.4%, 85.9%, 90.4% 로 80% 이상의 세립한 퇴적물 조성이며, 평균입도(mean grain size, Mz)는 5.8 Φ, 6.3 Φ, 6.7 Φ로 표 층에서 저층으로 깊어질수록 세립해지는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 특히, 쏙이 출현하지 않은 정점들(SHa, SHw; no-density) 에서는 표-중층에 대한 평균이 각각 4.2 0, 4.7 0로 쏙이 출 현한 정점들에 비해 상대적으로 조립한 퇴적물 조성을 보였으 며, 5 Φ를 기준으로 쏙이 출현한 정점들(>5 Φ)과 출현하지 않 은 정점들(<5 Φ)로 구분되었다. 천수만 내측에 위치한 사호리 와 상황리는 니질 함량이 각각 73.3%와 80.2%로 우세하였으 며, 자갈 함량(4.8%, 7.5%)도 송학리(2.4%)보다 높게 분포하 였다. 천수만 외측에 위치한 송학리는 상대적으로 사질(32.0%) 이 우세한 특징을 보였다. 바지락 어장이 형성된 송학리(SHa;

	Experimental setup		Sediment composition				Sediment type	Sediment	
Study area	Density plot	Dominent species (Habitat properties)	Sediment layer	Gravel (%)	Sand (%)	Mud (%)	Monthly variation (May-Jul-Sep)	IL (%)	Porosity (Φ)
Songhak (SHa)			Surface	2.2	48.1	49.7	mS-sM-sM	1.33	0.42
	No-density	Ruditapes philippinarum	Shallow	7.9	42.2	49.9	mS-gM-sM	1.39	0.42
			Deep	1.4	25.4	73.2	sM-sM-sM	1.50	0.37
	Low-density	R. philippinarum	Surface	1.2	36.8	62.0	sM-sM-sM	1.74	0.49
		Upogebia major	Shallow	1.7	28.0	70.3	sM-sM-sM	1.91	0.40
		(Competition)	Deep	2.8	26.0	71.2	sM-sM-sM	1.64	0.39
		U. major	Surface	0.9	26.6	72.5	sM-sM-sM	1.59	0.42
	Middensity		Shallow	3.1	28.3	68.6	gM-sM-sM	1.70	0.41
			Deep	0.7	26.9	72.4	sM-sM-sM	1.82	0.40
Saho (SHo)		R. philippinarum	Surface	9.7	22.6	67.7	gmS-gM-M	2.97	0.53
	Low-density	U. major	Shallow	1.6	23.4	75.0	sM-sM-sM	3.22	0.45
		(Initial recruitment)	Deep	3.0	19.8	77.2	gM-sM-M	3.54	0.46
Sanghwang (SHw)			Surface	13.7	9.5	76.8	M-gM-gM	1.53	0.40
	No-density	No species	Shallow	17.8	14.9	67.3	gM-gM-gM	1.48	0.39
			Deep	7.3	14.6	78.1	gM-gM-M	1.69	0.42
			Surface	3.7	13.9	82.4	sM-sM-M	2.03	0.42
	High-density	U. major	Shallow	2.0	12.2	85.8	sM-sM-M	1.90	0.43
			Deep	0.7	8.9	90.4	M-sM-M	2.04	0.42

Table 2. The characteristics of sediment and inhabitation in the Cheonsu Bay tidal flats

Porosity represents the May-July-September mean value of each sediment layers. Saho-ri is an initial region of mud shrimp *Upogebia major* recruitment. The low-density site at Songhak-ri is a competition zone of mud shrimp and manila clam *Ruditapes philippinarum*. The sediment depth ranges of surface, shallow, and deep layers represent 0–10 cm, 10–30 cm, and 30–50 cm, respectively. IL, Ignition loss; mS, Muddy sand; sM, Sandy mud; gM, Gravelly mud; gmS, Gravelly muddy sand; M, Mud.



Fig. 4. The monthly variations of composition and mean grain size (Mz) in depths of sediments depending on burrow hole densities in the study areas. The y-axis simultaneously represents the mud shrimp *Upogebia major* densities and depths of sediments. SHa, Songhak; SHo, Saho; SHw, Sanghwang.

no-density) 정점에서는 표층 퇴적물의 사질 함량(mean value, 48.1%)과 평균입도(4.24 ⊕)가 쏙이 출현하는 정점에 비해 상 대적으로 조립하였다. 송학리에서는 쏙의 서식 굴 밀도에 따라 (SHa; no<low<middle-density) 표-중층의 니질 함량이 49.8%, 66.1%, 70.6%로 증가하였으며, 상황리(SHw; no<high-density) 역시 쏙이 출현하지 않은 정점과 고밀도로 출현하는 정점이 각각 72.0%, 84.1% 로 쏙 서식 굴 밀도가 높은 정점이 니질 함량 도 높은 특성을 보였다. 사호리의 경우(SHo; low-density), 표-중층 니질 함량이 평균 71.4%로 송학리의 중밀도 정점(SHa; middle-density)보다 약 0.8% 높아 비슷하였으나, 쏙 서식 굴의 밀도가 다르게 나타나는 지역적인 생물분포의 차이를 보였다. 쏙의 존재로 인해 직·간접적으로 영향을 받는 모든 연구지역 의 깊이별 퇴적물 니질 함량과 평균입도의 상관관계(r=0.863, P<0.01)는 유의적으로 상당히 높아 기존의 서해안 갯벌어장에 서의 연구 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다(Jeon et al., 2019).

#### 쏙 서식 굴 밀도에 따른 영양염 확산 플럭스의 변화

퇴적물 깊이별 층간 공극수의 영양염 농도에 따라 송학리의 바지락 어장 정점과 쏙 서식 굴의 저밀도 정점(SHa; no, lowdensity)을 제외한 나머지 정점에서 5월에 비해 7월이 더 높은 DIN 용출 플럭스를 보였으며, 이후 9월에는 다시 낮아지는 계

절적인 변화를 보였다. 특히, 송학리에서는 바지락 어장이 위치 한 정점(SHa; no-density)에서 5월 추계에 DIN의 용출 플럭스 가 0.13 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 쏙 서식 굴이 중밀도인 정 점(SHa; middle-density)에서는 7월 하계에 0.15 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 로 용출률이 가장 높게 나타났다(Fig. 5a). 전반적으로 바지락 어장과 쏙이 공존하는 정점(SHa; no-density, low-density)을 제외하고 7월 하계에 용출률이 높았으며, 특히 쏙이 고밀도로 정착한 정점(SHw; high-density)에서는 0.27 mmol m<sup>2</sup> d<sup>1</sup>로 가장 높은 용출률을 보였다. 이와 같은 현상은 쏙 서식 굴 밀도 의 차이로 인해 표-중층 간 물질 및 산소 교환 차이가 발생한 것 으로 판단된다. 쏙 서식 굴 밀도와 비례하여 사호리(SHo; lowdensity)와 상황리(SHw; no-density) 정점에서는 확산 플럭스 의 범위가 각각 0.002-0.04 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 0.03-0.08 mmol m<sup>-2</sup> d'로 낮게 나타났다. 이에 비해 송학리 중밀도(SHa; middledensity) 정점의 범위는 -0.05-0.15 mmol m<sup>2</sup> d<sup>1</sup>로 나타났으며, 상황리 고밀도(SHw; high-density) 정점은 0.01-0.27 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 로 나타나 쏙 서식 굴 밀도에 따라 수직적인 변동 폭이 커 지는 결과를 보였다. 영양염 용출에 의한 확산 크기와 비례해 고 인 해수의 chlorophyll-a 농도 값 분포는 바지락 어장 정점(SHa; no-density)을 제외한 나머지 정점에서 유의한 상관성(r=0.553, P<0.05)을 보였다(Fig. 5b).



Fig. 5. a, The seasonal variation of DIN effluxes and chlorophyll-a concentrations depending on burrow hole density in the study areas. b, The correlation between Chl-a and DIN effluxes excluding SHa-No-density site. SHa, Songhak; SHo, Saho; SHw, Sanghwang; Chl-a., Chlorophyll-a; DIN, Dissolved inorganic nitrogen; *r*, Correlation; P, Statistical P value.

# 고 찰

# 쏙 서식 굴 밀도의 의존적 현상과 이해

쏙에 의한 생물관개(bioirrigation)나 생물혼탁작용(bioturbation)은 퇴적물 내 산소의 원활한 공급을 통해 영양염 재순환을 담당하는 미생물 군집의 활성을 자극한다(Welsh, 2003; Kristensen and Kostka, 2005). 서식 굴 주거지(burrow-dwelling) 와 관(tube)을 만드는 이러한 현상은 퇴적물 내 유기물 분해 과 정에 의하여 영양염의 농도와 재무기화(remineralization)에 영 향을 미치게 되는데(Kristensen and Kostka, 2005), 본 연구 결 과에서 상황리(SHw; high-density)의 영양염 확산 플럭스는 하 계에 가장 높은 용출률(0.27 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)을 보였다(Fig. 5a). 상황리는 쏙의 서식 굴이 952.0±75.4 holes m<sup>-2</sup>로 다른 지역에 비해 현저히 높았으며(Table 1), 이러한 현상은 서식 굴 밀도 차 이와 하계 온도 상승에 따른 미생물 활성 증가의 영향으로 보인 다. 송학리의 바지락 어장 정점(SHa; no-density)과 바지락과 쏙이 공존하는 정점(SHa; low-density)을 제외하고, DIN 용출 률이 모두 춘계(5월)와 추계(9월) 보다 하계(7월)에 더 높은 값 을 나타낸 것이 이를 뒷받침해주는 결과이다. 상황리에 나타난 서식 굴 밀도의 의존적인 현상은 쏙의 생체량(biomass) 또는 서

식밀도(density)에 비해 더 높은 상관성을 갖는다는 연구 결과 (D'Andrea and DeWitt, 2009)와 부합됨에 따라 서식 굴 밀도 (burrow hole-density)가 퇴적물 내 공극수의 영양염 농도에 영 향을 미치는 것으로 해석된다. 또한, 쏙과 같은 갑각류 종의 서 식지에 대한 타 연구 사례의 DIN 용출 플럭스 값을 비교해본 결 과 측정 방식에 따른 차이를 보이는 것으로 파악되었다. 본 연구 의 측정 방식과 같은 코어 측정법이 가장 유사한 값(0.43 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)을 보였고, 퓨젯쏙의 벤틱 챔버를 이용한 결과 값(23.14 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)은 가장 큰 차이를 나타냈다(Table 3). 그러나, 생 물 종의 서식밀도(Dunn et al., 2009; Jordan et al., 2009)나 생 체량 또는 서식 굴 밀도(D'Andrea and DeWitt, 2009)가 높은 정점에서 더 높은 용출률을 보이는 생물관개의 의존적인 경향 은 본 연구와 일치하는 것으로 보인다. 특히, 쏙이 서식하는 정 점(SHa; low-middle-, SHo; low-, SHw; high-density)에 대해 서 서식 굴 밀도와 DIN 용출률은 매우 높은 상관성(r=0.997, P<0.01)을 갖는 것으로 파악되어(Fig. 6) 서식 굴 밀도에 따른 의존적인 현상은 퇴적물 내 수직적인 물질 이동에 영향을 미치 는 것으로 확인 되었다. 물론, 조사 시 쏙 이외에 다른 유사 종인 가시이마쏙(Austinogebia wuhsieneweni)과 가재붙이(Laomedia astacina)가 소수 출현하여 서식 굴 형성과 밀도에 약간의 영

Table 3. Comparison of DIN	effluxes measurement	methods and v	values in	estuarine s	sediments by	crustaceans
----------------------------	----------------------	---------------	-----------	-------------	--------------	-------------

Other days a main	Oracia	N A a the a st	DIN efflux	- Reference	
Study area	Species	Method	(mmol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		
Cheonsu Bay	Upogebia major	Core	0.27	This study	
Moreton Bay	Victoriopisa australiensis	Core	0.43	Dunn et al. (2009)	
Geunso Bay	Laomedia astacina	Direct measurement	2.62	Koo (2018)	
Gold Coast	Trypaea australiensis	Mesocosm incubation	5.90	Jordan et al. (2009)	
Yaquina Bay	Upogebia pugettensis	Benthic chamber	23.14	D'Andrea and DeWitt (2009)	
DDID: 1 1'					

DIN, Dissolved inorganic nitrogen.



Fig. 6. The correlation of mean DIN effluxes and burrow hole density in mud shrimp *Upogebia major* habitat sites. The ranges of mud shrimp burrow hole density can be found in Table 1. DIN, Dissolved inorganic nitrogen; *r*, Correlation; P, Statistical P value.

향을 미쳤을 것으로 추측되지만, 생태적 기능이 매우 흡사하다 는 점과 서식 공간을 함께 공유한다는 점으로 미루어 볼 때 무시 해도 될 수준인 것으로 판단된다. 쏙이 고밀도로 점유한 상황리 에서는 바지락이 출현하지 않았으며, 표층 퇴적물의 사질 함량 이 평균 48.1% 수준인 바지락 어장(SHa; no-density)과 비교해 보았을 때 바지락이 서식하기에 부적합한 환경인 것으로 생각 된다. 갯벌에 서식하는 다른 생물들과는 달리 개체 크기에 비해 불균형적으로 저서환경의 물리적 변화를 일으키는(Jones et al., 1997) 쏙의 존재 여부에 따라 서식 굴과 같은 구조적인 형태는 패류 종의 서식을 제한할 것으로 보인다.

일차생산력에 영향을 미치는 DIN 용출 플럭스는 바지락 어장 (SHa; no-density)을 제외한 나머지 정점들에서 chlorophyll-a 와의 상관성이 r=0.553, P<0.05로 유의하게 나타나(Fig. 5b) DIN 용출 플럭스의 계절적인 변동에 따라 고인 해수의 chlorophyll-a 값도 변화하는 양상을 보였다(Fig. 5a). 그러나 송학리 의 바지락 어장 정점(SHa; no-density)과 쏙이 공존하는 정점 (SHa; low-density)에서는 춘계(5월)와 추계(9월) chlorophylla 값이 높은 반면, 나머지 정점들은 모두 하계(7월)에 높은 값을 보여 쏙 서식 굴의 영향을 받는 공간과 받지 않는 공간 간의 수 직적 변동 차이를 보였다. 이러한 차이는 바지락 어장이 형성 되 어있는 정점과 쏙의 서식 굴의 영향을 받는 정점 간의 서식지 특 성 차이에 따른 결과라 생각되며, 생물 분포가 각기 다른 양상으 로 나타나는 공간의 계절적인 변화에 대한 관리의 필요성을 대 변하는 것으로 판단된다.

서식 생태계의 기능적인 과정에 대한 기여도는 서식하는 생물 종마다 다르나 저서동물 군집 구조의 대대적인 변화를 초래하 고, 물리적인 특성에 큰 영향을 미치는 종들은 대게 생태계 공학 종(ecosystem engineering species, EES)으로 분류된다(Jones et al., 1997). 쏙은 생태계 공학 종으로서 퇴적물 속에 굴을 뚫 고 복잡한 구조의 관을 만드는데 이러한 과정과 서식 굴 형성 은 생지화학적 물질 순환에 영향을 미치며(Lohrer et al., 2004;



Fig. 7. The comparison of organic content (IL) and composition between burrow IW and DS (mean value of surface-shallow layers) in mud shrimp *Upogebia major* habitat sites. IL, Ignition loss; IW, Inner wall; DS, Depth sediments.

Solan et al., 2004), 해수-퇴적물 경계면의 표면적을 증가시킨 다(Davey, 1994). 퇴적물 내 공극률의 증가와 투과성의 저하와 같은 물리적인 변화는 쏙의 존재 여부에 따라서 영향을 주기는 하나(Waldbusser and Marinelli, 2006), 특히 굴 내벽은 확산 투과성(Hannides et al., 2005), 유기물 함량(Papaspyrou et al., 2005) 등 물리·화학적 특성이 다르고, 주변의 이용할 수 있는 퇴 적물에 따라 변화할 수 있다. D'Andrea and DeWitt (2009)에 따르면 굴 내벽은 쏙이 분비하는 점액성 물질로 인해 단단한 구 조를 형성하고 있으며(Swinbanks and Murray, 1981), 이것이 단순히 주변 퇴적물을 이용한 것인지 해수 내 입자성 물질을 걸 러내 이용한 것인지는 불분명하다고 보고되었다. 그러나, 본 연 구 결과에 따르면 해수 내 TSS의 VSS 비율(Table 2)과 주변 퇴 적물의 유기물 함량, 입도 조성 등을 종합적으로 분석해본 결과, 주변 퇴적물의 이용 가능성이 보다 높을 것으로 판단된다. 굴 내 벽의 입도 조성은 표-중층 퇴적물의 입도 조성과 비례적으로 유 사하였고, 특히 IL은 퇴적물 표-중층의 평균에 비해 약 3-11% 범위로 굴 내벽이 일정하게 더 높은 값을 유지하였다(Fig. 7). 쏙 의 굴 내벽은 점액 물질로 인해 형태가 유지되는 동안 유기물량 이 더 높다는 연구 결과(Aller, 1982)와 유사한 경향을 나타냄에 따라 퇴적물 내 공극수의 수직적인 물질 이동과 쏙 서식 굴 내 관을 통한 물질 이동은 차이가 있을 것이며, 서식 굴의 존재로 이해 수평적인 물질 이동은 제한적일 것으로 생각된다.

상황리의 쏙 서식 굴의 퇴적물 성상과 입도 조성 결과에 따르 면 상황리가 조사 기간 중 가장 낮은 변동성을 보였으나 7월 및 9월의 표층 퇴적물 실트 함량은 56.3%에서 66.6%로 증가하였 으며, 사질 함량은 15.7%에서 8.4%로 감소되었다(Fig. 4). 이러 한 표층 퇴적물의 입도 변화는 현장조사 시 강우(8.5 mm day<sup>-1</sup>) 와 풍속(8.1 m/s)의 영향에 의해(KMA, 2022) 서식 굴 구조의 뼈대와 같은 형태가 드러나게 된 현상(Fig. 8)과 7월 표층 퇴적



Fig. 8. The photographs of surface sediment by rainfall effects or tide changes in high-density mud shrimp *Upogebia major* habitat (SHw; Sanghwang-ri).

물 자료를 비교하여 파악할 수 있었다. 일반적으로 외부의 물리 적인 영향에 의한 퇴적물의 이동은 상대적으로 가벼운 입자에 서 나타나게 되는데, 이와는 반대로 무거운 입자(sand)는 쓸려 나가고 가벼운 입자(silt)는 유지됨에 따라 실트는 이동이 제한 되었다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 쏙의 서식 굴 밀도가 증가 함에 따라 실트가 증가하는 현상은 쏙 서식지에 많은 양의 실트 가 유입되는 것보다 유지되는 동안 누적된 양에 따른 퇴적물 조 성 비율 변화인 것으로 생각된다. 따라서, 서식 굴을 지탱하는 뼈대와 같은 굴 내벽을 포함하는 주변 퇴적물은 보통 니질이 우 세하며 주요 구성성분은 실트인 것으로 판단된다. 갯벌 저서생 물의 서식 굴 생성 및 보수, 생물혼탁작용을 포함하는 퇴적물 재 배치(sediment reworking) 현상은 대부분 산화층에서 발생하 며, 퇴적층의 생지화학적 변화에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다(Seo and Koo, 2019). 쏙과 같은 서식 굴을 형성하는 갑각류 종들은 대체로 조수의 변동에 따라 서식 공간을 유지, 보 수하기 때문에 이러한 현상에 의한 영향도 고려해 볼 수 있을 것 이다. 또한, 쏙 서식 굴 내벽의 니질의 함량이 68.9-81.2%, 평균 입도는 5.5-6.0 Ф의 범위(Fig. 6)로 나타나 Jeon et al. (2019)이 제시한 쏙의 퇴적환경 범위(mud content, >60%; Mz, >5 ⊕)에 포함되는 것으로 파악되었으며, 쏙의 서식 굴 형성과 같은 물리 적인 현상은 주변 환경의 영향이 크다는 것을 시사한다.

### 쏙과 바지락의 경쟁구조 개선 방안

천수만은 과거 대규모 방조제 건설과 매립 및 간척으로 인해 조류 속도의 감소에 따른 퇴적물의 세립화와 함께(Woo et al., 2005; Song et al., 2011) 여름철 수온이 상승하는 시기에는 해 안선이 후퇴하여 퇴적되는 경향이 두드러진다(Ryu and Chang, 2005). 본 조사 정점 중 사호리는 TSS의 값이 평균 294.7 mg/ L로 가장 높았으며, 특히 7월에 상당히 높은 값(511.0 mg/L)을 보인 결과, 고농도 부유입자물질의 영향은 사호리의 표층 퇴적 물의 성상 변동과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 퇴적상 이 점점 니질 성상으로(gmS-gM-M) 바뀌게 됨에 따라 표층 퇴 적물의 투수율이 감소하고, 고인 해수의 발생 빈도가 높아질 것 으로 판단된다. 사호리는 표층 퇴적물의 공극률이 0.53 Φ로 다 른 조사지역에 비해 높았으며(Table 2), 7월 하계 조사 시 고인 해수 온도가 약 39.1℃도 측정된 곳도 나타났다. 좁은 면적에 생 성된 고인 해수는 강한 일사량에 의해 짧은 시간 내 빠르게 가 열되어 생물에 악영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되며, 이에 대 한 지온 변화 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된 다. 또한, IL이 퇴적물의 전 깊이 평균 3.24%로 송학리(1.63%) 와 상황리(1.78%)에 비해 약 2배 정도 높았으며, 표층 퇴적물의 IL도 월변화에 따라 점점 늘어나는 추세를 보여 유기물 축적에 대한 감시가 필요할 것으로 생각된다(Table 2).

조사된 연구지역들의 퇴적물 평균입도는 보령 송학리가 5.25 ●로 가장 조립하였으며, 쏙의 밀도가 높아짐에 따라 니질 함량 이 높아지는 경향을 보였다. D'Andrea and DeWitt, (2009)의 보고에 의하면, 퓨젯쏙이 출현하는 Yaquina Bay의 퇴적물은 실 트에 가까운 미세한 사질(silty fine sand)이 주로 구성되어 있으 며, 쏙이 고밀도로 출현하는 곳에서는 실트의 함량이 높아진다 는 일련의 상관성을 보인 것으로 알려져 있다. 사질 함량이 다 른 지역에 비해 상대적으로 높은 보령 송학리의 경우도 쏙 서식 굴 밀도에 따라(no<low<middle-density) 실트 함량의 점유율 이 37.3%<41.2%<45.5%로 점점 늘어나는 것으로 파악되었다. 하지만, 사호리(SHo; low-density; 52.4%)와 상황리(SHw; no, high-density; 57.8%, 57.1%)에 비해 낮은 실트 함량 점유율을 보였으며(Fig. 4), 이러한 퇴적물 조성의 차이는 지리적인 특성 에 기인한다. 천수만 중앙부의 하계 조류(tidal current)와 비조 류(sub-tidal current)의 특성에 관한 보고에 의하면(Jung et al., 2013; Jung et al., 2015), 입구부에서 내측으로 북향하는 잔차류 (residual current)는 중앙부의 수층별 비조류 성분의 다양한 분 석 결과에 따라 점점 감소하여 장시간 체류하는 것으로 보고되 었다. 이러한 현상은 만 내로 유입된 물질들이 쉽게 외해로 빠져 나가지 못하고, 체류시간을 증가시킬 가능성을 시사하였다. 천 수만 내측에 위치한 사호리와 상황리는 TSS가 평균 200 mg/L 이상으로 높게 나타났지만 송학리의 쏙이 우점하는 중밀도 정 점(SHa; middle-density; 212.9 mg/L)을 제외한 나머지 정점에 서 모두 100 mg/L 이하로 나타나 입자성 물질의 유입 양상에 차 이를 보였다(Table 1). 따라서, 지리적 차이로 인해 천수만 내측 과 외측의 해수 유동 영향이 다를 것으로 판단되며 퇴적물의 분 포 양상은 달라질 것으로 예상된다.

천수만 외측에 위치한 송학리는 외해와 직접적으로 맞닿는 개 방형 갯벌(Jeon et al., 2019)로 바지락 어장이 형성된 가운데 쏙의 자연적인 확산과 확산 방지를 위한 인위적인 노력의 순 환이 지속되고 있다(NIFS, 2016). 일례로 일본 시라카와 갯벌 (Shirakawa flat)에서는 쏙과 바지락의 간섭경쟁(interference competition) 현상이 본 연구지역 중 송학리의 종간 경쟁구조 와 비슷하게 전개된 것으로 보인다. 이는 송학리의 쏙과 바지락 경쟁구조와 흡사하고, 조간대 하부로 밀려난 바지락 어장의 분 포와 유사하기 때문이다. 시라카와 갯벌의 바지락은 조간대 하 부의 좁은 공간에서만 양식되고, 상부와 중부에는 쏙과 쏙붙이 가 대량 서식하고 있는 특징을 보인다(Tamaki et al., 2008). 따 라서, 종간 경쟁 현상은 서식종의 분포에 영향을 미치며, 생태 학적으로 같은 먹이원과 공간을 이용함에 따라 나타나는 종간 간섭경쟁의 생태적인 충돌로 설명될 수 있을 것이다. 또한, 바 지락의 인위적인 채취로 인해 수확기가 지난 후 빈 공간이 발생 하게 되는데, 이러한 빈 공간에 같은 먹이원을 이용하는 다른 종 이 서식지 공간을 포함한 새로운 가용 자원을 기회적으로 점유 한다는 예측도 보고되어(Reise et al., 1989; Dame, 2005), 바지 락 채취의 강도와 어장관리에 대한 세심한 주의가 필요할 것으 로 보인다.

본 조사 중 송학리에서 쏙 서식 굴이 중밀도로 나타난 정점 을 제외한 나머지 정점들에 대해 20×20 cm 방형구를 이용하 여 치패 발생량을 간략히 파악한 결과, 5월, 7월, 9월에 걸쳐 바 지락 어장과 가까운 정점(SHa; no-density)에서는 각장(shell length, SL) 25 mm 이하의 바지락 치패가 1,575 ind. m<sup>-2</sup> (SL, 9.9±2.0 mm), 5,175 ind. m<sup>-2</sup> (SL, 14.8±2.5 mm), 4,525 ind. m<sup>-2</sup> (SL, 15.8±2.7 mm)로 치패 발생량이 증가 또는 유지되는 결과를 나타냈다. 그러나 쏙과 바지락이 공존하는 정점(SHa; low-density)에서는 5월과 7월 각각 1.625 ind. m<sup>-2</sup>(SL, 9.5±1.3 mm), 2,600 ind. m<sup>-2</sup> (SL, 14.0±2.6 mm) 출현하였으나, 9월에 는 300 ind. m<sup>-2</sup>(SL, 15.0±3.7 mm)로 현저히 줄어든 것으로 확 인되어 바지락 치패의 자원 관리가 요구될 것으로 판단된다. 쏙 의 생물혼탁작용이나 생물관개 현상은 퇴적물의 미세화 또는 해수의 탁도를 높여 주변에 서식하는 올림피아 굴(Ostrea lurida)과 기타 고착성 이매패류들에게 질식이나 폐사를 유발한 것으로 보고되었으며(Feldman et al., 2000; Dumbauld et al. 2006), 특히 치패 착저 이후에 더 부정적인 영향을 미치는 것으 로 알려져 있어 이에 대한 조치가 필요할 것으로 보인다. 치패 가 발생하는 춘계와 하계 사이에 쏙 서식 굴 입구부에 입체적 으로 활용 가능한 부착 기질을 설치하여 자원 관리가 이행되어 야 할 것이며, 치패 중간육성에 필요한 공간 이전을 위해 적합 한 서식지의 탐색과 단계적인 조치가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과에서 chlorophyll-a의 계절적 변화가 바지락 어 장가까이 위치한 공간(SHa; no, low-density)과 쏙이 점유한 공 간(SHa; middle-density)의 차이가 발생하였기 때문에(Fig. 5a) 이점을 참고하여 추후에 효율적인 서식지 관리가 요구될 것으 로 보인다. 결론적으로, 전략적인 자원 관리와 이용을 위해서는 특정 종의 생리·생태와 종간 상호작용에 관련된 더 다양한 연구 가 지속되어야 할 것으로 생각되며, 특정 현상 파악에 대한 세심 한 관찰이 우선적으로 이루어져야 할 것이다. 종간 상호작용이 연쇄적으로 일어나는 현장속에서 쏙과 바지락 경쟁구조의 주요 현상이 무엇인지 그리고 현재 어떠한 요인이 가장 큰 영향을 미 치는지에 대한 다양한 사례와 분석을 통해 좀 더 명확한 방안과 대책 수립이 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 논문은 2022년도 국립수산과학원의 수산과학 연구사업 ' 갯벌어장환경모니터링(R2022063)'의 지원으로 수행된 연구이 며, 익명의 심사위원분들께 감사의 말씀을 전합니다.

#### References

- Aller RC. 1982. The effects of macrobenthos on chemical properties of marine sediment and overlying water. In: Animal-sediment relations. McCall PL and Tevesz MJS, eds. Springer, Boston, MA, U.S.A., 53-104. https://doi. org/10.1007/978-1-4757-1317-6 2.
- Berner RA. 1980. Early diagenesis: A theoretical approach. Princeton University Press, Princeton, NJ, U.S.A., 241.
- Boudreau BP. 1997. Diagenetic models and their implementation: modelling transport and reactions in aquatic sediments, Springer, Berlin, Germany, 414.
- Choo HS. 2021. Spatiotemporal fluctuation of water temperature in Cheonsu Bay, Yellow Sea. Korean J Fish Aquat Sci 54, 90-100. https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0090.
- D'Andrea AF and DeWitt TH. 2009. Geochemical ecosystem engineering by the mud shrimp Upogebia pugettensis (Crustacea; Thalassinidae) in Yaquina Bay, Oregon: Density-dependent effects on organic matter remineralization and nutrient cycling. Limnol Oceanogr 54, 1911-1932. https:// doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.1911.
- Dame R. 2005. Oyster reefs as complex ecological systems. In: The comparative roles of suspension-feeders in ecosystems. Dame RF and Olenin S, eds. Springer, Dordrecht, Netherlands, 331-343.
- Davey JT. 1994. The architecture of the burrow of *Nereis diversicolor* and its quantification in relation to sediment-water exchange. J Exp Mar Biol Ecol 179, 115-129. https://doi.org/10.1016/0022-0981(94)90020-5.
- Dumbauld BR, Booth S, Cheney D, Suhrbier A and Beltran H. 2006. An integrated pest management program for burrowing shrimp control in oyster aquaculture. Aquaculture 261, 976-992. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.08.030.
- Dunn RJK, Welsh DT, Jordan MA, Teasdale PR and Lemckert CJ. 2009. Influence of natural amphipod (*Victoriopisa australiensis*) (Chilton, 1923) population densities on benthic metabolism, nutrient fluxes, denitrification and DNRA in sub-tropical estuarine sediment. Hydrobiologia 628, 95-109. https://doi.org/10.1007/s10750-009-9748-2.
- Feldman KL, Armstrong DA, Dumbauld BR, DeWitt TH and Doty DC. 2000. Oysters, crabs, and burrowing shrimp: Review of an environmental conflict over aquatic resources and pesticide use in Washington State's (USA) coastal estuaries. Estuaries 23, 141-176. https://doi.org/10.2307/1352824.
- Folk RL. 1968. A review of grain size parameters. Sedimentology 6, 73-93. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1966.

tb01572.x.

- Hannides AK, Dunn SM and Aller RC. 2005. Diffusion of organic and inorganic solutes through macrofaunal mucussecretions and tube linings in marine sediments. J Mar Res 63, 957-981. https://doi.org/10.1357/002224005774464193.
- Iversen N and Jørgensen BB. 1993. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: Influence of porosity. Geochim Cosmochim Acta 57, 571-578. https://doi. org/10.1016/0016-7037(93)90368-7.
- Jeon SR, Hong SJ, Choi Y, Cho YS and Song JH. 2019. Comparison of sedimentary environmental characteristic of tidal flats on the west coast of Korea depending on the habitation of mud shrimp *Upogebia major*. Korean J Fish Aquat Sci 52, 656-665. https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0656.
- Jones CG, Lawton JH and Shachak M. 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. Ecology 78, 1946-1957. https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[1946:PANEOO]2.0.CO;2.
- Jordan MA, Welsh DT, Dunn RJ and Teasdale PR. 2009. Influence of *Trypaea australiensis* population density on benthic metabolism and nitrogen dynamics in sandy estuarine sediment: a mesocosm simulation. J Sea Res 61, 144-152. https://doi.org/10.1016/j.seares.2008.11.003.
- Jung KY, Ro YJ and Kim BJ. 2013. Tidal and sub-tidal current characteristics in the central part of Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea during the summer season. J Korean Soc Oceanogr 18, 53-64. https://doi.org/10.7850/jkso.2013.18.2.53.
- Jung KY, Ro YJ, Choi YH and Kim BJ. 2015. Hypoxia in a transient estuary caused by summer lake-water discharge from artificial dykes into Chunsu Bay, Korea. Mar Pollut Bull 95, 47-62. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.043.
- 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 and 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.
- 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 TI, Choi BH and Lee SW. 2006. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea. Estuar Coast Shelf Sci 68, 515-528. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.03.003.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2022. Automatic weather system. Retrieved from https://www.weather.go.kr/ plus/land/current/aws\_table\_popup.jsp on Apr 5, 2022.
- Koo BJ. 2018. Diurnal variations of nutrients in burrows of the mud shrimp *Laomedia astacina* (Crustacea, Laomediidae). J Korean Soc Mar Environ Energy 21, 281-292. https://doi. org/10.7846/JKOSMEE.2018.21.4.281.
- KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute).

1994. A study of the marine ecosystem on the effects of coastal zone development. BSPN 00239-737-3, 306.

- Kristensen, E. 1984. Effect of natural concentrations on nutrient exchange between a polychaete burrow in estuarine sedimentand the overlying water. J Exp Mar Biol Ecol 75, 171-190. https://doi.org/10.1016/0022-0981(84)90179-5.
- 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 Korean Soc Mar Environ Saf 22, 854-862. https://doi. org/10.7837/kosomes.2016.22.7.854.
- Lee JH and Park HS. 1998. Community structures of macrobenthos in Chonsu Bay, Korea. J Oceanol Soc Korea 33, 18-27.
- Lee JK, Park C, Lee DB and Lee SW. 2012. Variations in plankton assemblage in a semi-closed Chunsu Bay, Korea. J Korean Soc Oceanogr 17, 95-111. https://doi.org/10.7850/ jkso.2012.17.2.095.
- Lee JY, Choi MS and Song YH. 2019a. 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 SM, Chang SJ and Heo S. 2019b. Changes in phytoplankton community structure by freshwater input in the Cheonsu Bay, Korea. J Environ Sci Int 28, 1005-1017. https://doi. org/10.5322/JESI.2019.28.11.1005.
- Lerman A. 1979. Geochemical processes water and sediment environment. Wiley Inc, New York, NY, U.S.A., 481.
- Lohrer AM, Thrush SF and Gibbs MM. 2004. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions. Nature 431, 1092-1095. https://doi. org/10.1038/nature03042.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2012. 2/2 Technical report of national institute of fisheries science. NIFS, Busan, Korea, 1295.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2016. 1/2 Technical report of national institute of fisheries science. NIFS, Busan, Korea, 725.
- McDuff RE and Ellis RA. 1979. Determining diffusion coefficients in marine sediments: A laboratory study of the validity of resistivity techniques. Am J Sci 279, 666-675. https://doi.org/10.2475/ajs.279.6.666.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2013. Marine environment standard methods. MOF, Sejong, Korea, 1-525.
- Papaspyrou S, Gregersen T, Cox RP, Thessalou-Legaki M and Kristensen E. 2005. Sediment properties and bacterial community in burrows of the ghost shrimp *Pestarella tyrrhena* (Decapoda: Thalassinidea). Aquat Microb Ecol 38, 181-190. https://doi.org/10.3354/ame038181.
- Park SY, Park GS, Kim HC, Kim PJ, Kim JP, Park JH and Kin SY. 2006. Long-term changes and variational characteristics of water quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea. J Environ Sci Int 15, 447-459. https://doi.org/10.5322/

JES.2006.15.5.447.

- 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 Korean Soc Mar Environ Saf 19, 439-458. https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.5.439.
- Reise K, Herre E and Sturm M. 1989. Historical changes in the benthos of the Wadden Sea around the island of Sylt in the North Sea. Helgol Meeresunters 43, 417-433. https://doi. org/10.1007/BF02365901.
- Ryu SO and Chang JH. 2005. Characteristics of tidal beach and shoreline changes in Chunsu Bay, West Coast of Korea. J Korean Earth Sci Soc 26, 584-596.
- Seo JH and Koo BJ. 2019. Spring-neap variation on sediment reworking with organic matter contents by a polychaete, *Perinereis aibuhitensis*, in the intertidal sediments of the Gomso Bay, Korea. Mar Biol 166, 124. https://doi.org/10.1007/ s00227-019-3572-7.
- So JK, Jung KT and Chae JW. 1998. Numerical modeling of changes in tides and tidal currents caused by embankment at Chonsu Bay. J Ocean Eng Technol 10, 151-164.
- Solan M, Cardinale BJ, Downing AL, Engelhardt KAM, Ruesink JL and Srivastava DS. 2004. Extinction and ecosystem function in the marine benthos. Science 306, 1177-1180. https://doi.org/10.1126/science.1103960.
- Song YH, Choi MS and Ahn YW. 2011. Trace metals in Chunsu Bay sediments. J Korean Soc Oceanogr 16, 169-179. https://doi.org/10.7850/jkso.2011.16.4.169.
- Swinbanks DD and Murray JW. 1981. Biosedimentological zonation of Boundary Bay tidal flats, Fraser River Delta, British Columbia. Sedimentology 28, 201-237. https://doi. org/10.1111/j.1365-3091.1981.tb01677.x.
- Tamaki A, Nakaoka A, Maekawa H and Yamada F. 2008. Spatial partitioning between species of the phytoplankton-feeding guild on an estuarine intertidal sand flat and its implication on habitat carrying capacity. Estuar Coast Shelf Sci 78, 727-738. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.02.009.
- Waldbusser, GG and Marinelli RL. 2006. Macrofaunal modification of porewater advection: role of species function, species interaction, and kinetics. Mar Ecol Prog Ser 311, 217-231. https://doi.org/10.3354/meps311217.
- Welsh DT. 2003. It's a dirty job but someone has to do it: The role of marine benthic macrofauna in organic matter turnover and nutrient recycling to the water column. Chem Ecol 19, 321-342. https://doi.org/10.1080/027575403100015547 4.
- Woo HJ, Choi JU, Ryu JH, Choi SH and Kim SR. 2005. Sedimentary environments in the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay. J Korean Wetlands Soc 7, 53-67.