

저서성 유공충 군집 및 퇴적물 지화학 조성에서 나타나는 전복양식 활동 영향 및 퇴적환경과의 상관성

정다운¹, 최양호², 이연규³

¹전남대학교 수산과학연구소, ²국립수산과학원 남해수산연구소, ³전남대학교 해양융합과학과

Relativity of sedimentary environment and effect on benthic foraminiferal assemblage and geochemistry of sediment in abalone farming

Da Un Jeong¹, Yang Ho Choi² and Yeon Gyu Lee³

¹Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

²South Sea Fisheries Research Institute, NIFS, Yeosu 59780, Korea

³Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

ABSTRACT

Geochemical and benthic foraminiferal analyses of sediments (core and surface) were conducted in an abalone farm located at Pyeongil-do, Wando-gun, to understand the degree to which the abalone farming affect the benthic environment and ecology, and relativity to sedimentary environment. The C/S ratio of surface sediment was 8.24 in average (6.77-13.01), and abundance and species diversity of benthic foraminifera were 10,470 individual in 20 ml of sediments and average 3.4, respectively, in the surface sediment, although OM deposited by farming was about 7-19 cm in thickness. The effect of abalone farming on benthic ecology and geochemistry was not distinct. In the northwestern sea of Pyeongil-do and Cheok-do (Zone A), the sedimentation rate was very low (average, 0.23 cm/year), the C/N ratio was high (St. No. 9: 18.50) and *Elphidium advenum* known to inhabit in the entrance sea area of bay was dominantly distributed. In the adjacent sea area of Pyeongil-do and Cheok-do (Zone A), however, the sedimentation rate was very high (average, 1.73 cm/year), *Epistominella naraensis* known to inhabit in the open sea area was dominantly distributed. It is consequently thought that abalone farms of northwestern sea of Pyeongil-do and Cheok-do are influenced by the fast flow of Deugryang Bay, and abalone farms of adjacent sea area of them are influenced by the open sea. As mentioned above, these coexistence of various sedimentary environment in farm is thought to be caused by topographical characteristics with irregular coastline of Rias type.

keywords: Benthic foraminifera, abalone farming, sedimentary environment

서 론

연안 해양환경은 수십 년간 도시 및 각종 산업 팽창에 수반

되어 발생하는 다양한 문제점에 직면해 있다. 특히 이러한 인간 활동들은 다양한 생물과 물, 퇴적물 등으로 이루어진 생태계에 직, 간접적으로 영향을 미친다 (Vidović *et al.*, 2014).

해양양식 활동은 좁은 연안을 따라 과밀집 상태로 이루어지고 있으며, 해양오염 물질 (양식생물유해, 배설물, 먹이과잉공급, 항생제) 의 공급원 뿐만 아니라 해수 흐름을 방해, 유속 감쇄시키는 요인으로 작용하는 등 (Choi *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2015; Jeong *et al.*, 2020), 여러 가지 다양한 해양환경 문제를 일으킨다 (Cao *et al.*, 2007). 결과적으로, 이렇게 약화된 해수 흐름으로 인해 양식장으로부터 방출된 오염물질은 수층으로 확산되지 않고, 퇴적물에 축적되어 퇴적물의 지화학 조성에 변형을 유발하여, 최종적으로 생물군집 조성 및 시·공간

Received: December 12, 2020; Revised: December 23, 2020;
Accepted: December 31, 2020

Corresponding author: Yeon Gyu Lee

Tel: +82 (61) 659-7143, e-mail: lyg6342@jnu.ac.kr
1225-3480/24775

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

본포에 영향을 미치는 요인으로 작용하게 된다 (Boyra *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2004; Thornberg *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016a, b; Jeong *et al.*, 2020).

대부분의 해양퇴적물에는 퇴적시기, 퇴적환경 및 변화 과정 등을 추정할 수 있는 미화석들이 침적되어 있다. 이들 미화석 중 유공충 각은 해수면 변화, 고해양환경 복원 또는 해양 오염 및 퇴적환경 변화 추적자로서 활용된다 (Scott *et al.*, 2001). 1960년대 이후 저서성 유공충을 이용한 해양환경 변화 연구가 급증하게 되고, 연안에서 양식활동 또한 영양분 및 유기물의 과잉공급으로 인해 저서생태 환경에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (Bouchet *et al.*, 2007; Tarasova and Preobrazhenskaya, 2007; Ellis *et al.*, 2014; Kalantzi and Karakassis, 2006; Lee *et al.*, 2016a, b; Thornberg *et al.*, 2014; Vidović *et al.*, 2014; Jeong *et al.*, 2020). 저서성 유공충은 해양환경에서 매우 높은 다양도, 산출빈도, 짧은 생체주기 및 환경변화에 매우 민감한 종으로서, 특히 해양환경 변화를 연구하는 데 있어서 유용한 도구로 알려져 있다 (Alve 1995; Culver and Buzas, 1995; Sen Gupta, 1999; Murray, 2006; Ellis *et al.*, 2014; Thornberg *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2018; Jeong *et al.*, 2020). 일반적으로 저서성 유공충은 다양한 생태환경 조건 변화에 대해 전멸, 군집변형 (산출빈도, 다양도.. 등), 왜소증 및 형태변형 등으로 반응한다.

양식산업은 아시아를 중심으로 세계적으로 급성장하는 산업이다 (De Silva and Davy, 2010). 우리나라도 1960년대 국립수산물학원의 전복 종묘생산 연구로부터 시작된 국내 전복 양식산업이 2000년대에 들어 본격적인 생산이 시작되어, 2011년 6,779 톤으로 10여 년간 눈부신 발전을 이루었다 (Song and Kim, 2013). 이런 빠른 성장은 육상 수조식 전복 양식이 해상 가두리 양식으로 방법 전환에 기인한 것으로서, 전복 생산에 영향을 미치는 해양환경, 즉 양식장 해역 해류 흐름과 수온, 염분, 퇴적물 지화학적 성분 및 부영양화, 중금속과 같은 환경오염 등에 관심이 높아졌다 (Gowen and Bradbury, 1987; Christensen *et al.*, 2000; Pearson and Black, 2001). 국내에서도 전복 양식장 해역환경에 대한 관리 및 지속적인 모니터링이 수행되고 있다 (Jeong *et al.*, 2019, Choi *et al.*, 2018). 국내 전복의 약 93.1%가 생산되는 완도는, 현재 주변 해역 해수흐름, 수심, 지형 등 양식장 주변해양 환경을 고려하지 않고 다량의 전복양식장 및 해조류 양식장이 무질서하게 배치되어 있다. 이러한 무계획적인 양식장배치, 대형밀식 및 부적절한 운영으로 인해 해수 흐름 감소 (Choi *et al.*, 2014) 및 부영양화가 발생하고 (Kim *et al.*, 2011, Kang *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2016a; Jeong *et al.*, 2019) 있으며, 전복 생산량 감소 원인의 하나로 지목되고 있다. 이를 해소하기 위하여 장기간 운영된 전복양식장에 대한 재배치 및 재배치에 따른 양식

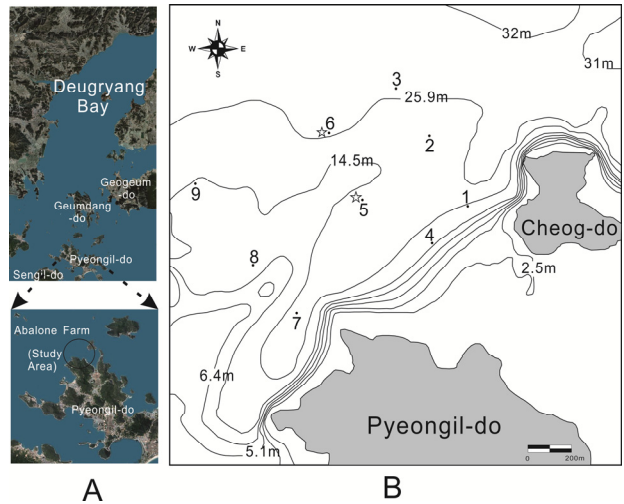


Fig. 1. Sampling station and bathymetry map of abalone farm sea area between Pyeongil-do and Cheog-do, Wando-gun. Star mark: core sample station.

장 해양환경 변화에 대한 연구가 진행되고 있다 (Choi *et al.*, 2018). 따라서 현재 양식장으로부터 유출되는 슬러지의 유동, 집적에 직접적인 영향을 미치는 양식장의 해수유동, 퇴적환경 및 저서생태계 현황을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 약 20년간 전복양식 활동을 한 완도군 평일도 및 척도 해역 양식장을 대상으로 표층 및 주상퇴적물을 채취하고, 저서성 유공충 군집, 지화학 분석 및 퇴적물 변화를 추정하여, 양식활동에 의한 퇴적층 형성, 퇴적물 지화학 조성 및 저서생태계에 미치는 영향 정도를 파악하고, 양식장 해역 퇴적환경과의 상관성을 도출하고자 한다. 이러한 결과는 양식장 재배치를 하는데 있어서 중요한 기초 자료로 활용된다.

연구 해역은 우리나라 남서해에 위치하고 완도 북동해역 평일도와 득량만 입구 금당도 사이에 위치한 평일도 해역이다 (Fig. 1-A). 완도해역은 수심 50 m 내외의 천해로서 평균조차는 3.5 m 이하이며, 하계 평균 수온, 염분 및 용존산소는 각각 15.19-24.97°C, 32.41-34.04 psu 및 7.40-9.14 mg/L 이다 (Oh *et al.*, 2008). 남해연안수, 대마난류, 황해 저층수 중국연안수 등의 영향으로 계절에 따라 매우 복잡한 해황이 형성된다 (Lie and Cho, 2002). 득량만은 만 입구에서 북동쪽으로 길게 만입하며, 남쪽 입구를 통해서 해수교환이 이루어지는 내만 지형 특성을 가지는 해역으로서, 만 입구 수심은 약 20 m, 만 내측은 약 5 m 이하의 얇은 수심이 형성되어 있다 (Kong and Lee, 1994).

평일도 해역은 북동측에 척도가 위치하며, 북서 방향 (득량만 입구 해역) 으로 수심 약 5 m의 골이 형성되어 있고, 득량만 입구로 향하여 점점 깊어져 수심이 약 25 m에 달한다 (Fig. 1-B). 평일도와 척도 사이 해역은 수심이 약 2 m 내외의

얇은 해역이다. 전복양식장은 평일도와 척도를 중심으로 복서 해역에 분포하고 있다.

재료 및 방법

1. 시료채취

평일도 척지리 전복양식장 퇴적환경을 파악하기 위하여 표층퇴적물 및 주상시료를 전복양식장 cage 직하부에서 채취하였다. 표층퇴적물은 반빈그랩 채니기 (van Veen grab sampler) 를 사용하여 9개의 정점에서 채취하였고, 주상퇴적물시료 (PVC pipe, 내경 7.6 cm) 는 전복양식장 (정점 5, 6 번) 에서 중력 코어러 (Gravity corer) 를 이용하여 채취하였다 (Fig. 1-B).

채취한 표층퇴적물은 반빈그랩 채니기 내의 교란 유무를 확인 후, 표면 2 cm 이내에서 퇴적물 시료를 채집하였다. 주상시료는 채취 후 일어날 수 있는 교란 방지를 위해 시료가 채취되었을 당시와 같이 세워진 상태로 상부와 하부를 밀봉하여, 실험실로 운반 후 보관하였다. 표층 퇴적물과 주상퇴적물 시료에서 입도 분석과 지화학적 특성, 저서성 유공충군집 분석을 실시하였다. 주상시료는 깊이별 퇴적물을 산정하기 위해 ^{210}Pb 을 분석하였다.

2. 분석방법

1) 퇴적물 입도

퇴적물 입도분석을 위해 Ingram (1971) 의 표준분석법에 따라 실험하였다. 염산 (HCl) 0.1N 을 사용하여 완전히 탄산염을 제거하였고, 과산화수소 (H_2O_2) 10%를 첨가하여 유기물이 완전히 제거 될 때까지 24시간 이상 반응시켰다. 탄산염과 유기물이 제거된 퇴적물은 4ϕ ($63\ \mu\text{m}$) 표준체를 사용한 습식체질 (wet sieving) 로 조립질과 세립질의 퇴적물로 분리하였다. 조립질 퇴적물은 건조 후 표준체를 사용하여 건식체질 (dry sieving) 하여 입도에 따른 무게를 측정하였다. 세립질 퇴적물은 0.1% 헥사메타인산나트륨 용액 (sodium hexametaphosphate) 를 사용하여 응집을 방지하였고, X-ray 입도분석기 (Sedigraph[®] 5120) 로 등급에 따른 백분율을 분석하였다. 퇴적물 입도의 통계분석은 조립질 퇴적물과 세립질 퇴적물의 입도 등급에 따른 무게 백분율을 사용하여 Folk (1968) 의 분석방법에 따른 퇴적물 입도조성, 평균입도 (mean grain size), 분급 (sorting), 퇴적상 (sediment facies) 등을 분석하였다.

2) 퇴적물 원소

퇴적물 내의 지화학 특성을 알아보기 위해 유기물 함량 분석, pH 측정, 총유기탄소 (TOC: Total Organic Carbon), 총

질소 (TN: Total Nitrogen) 및 총황 (TS: Total Sulfur) 의 함량을 분석하였다. 원소분석을 위해 퇴적물 시료를 동결건조 후 분말화한 후 염산을 넣어 무기탄소를 제거하였다. 무기탄소를 제거한 퇴적물 시료는 건조기에서 수분을 제거한 뒤 Elements analyzer (EA 1100) 를 이용하여 TOC, TN, TS 를 분석하였다. TOC, TN, TS의 분석결과를 사용하여 탄소와 질소의 비율 (C/N ratio) 그리고 탄소와 황의 비율 (C/S ratio) 을 분석하였다.

강열감량 (Ignition Loss) 은 퇴적물의 수분을 제거한 후 전기로를 이용하여 550°C 에서 4시간 동안 가열한 후, 가열 전·후 무게의 차이를 계산하여 퇴적물 내의 유기물 함량 (Organic matter content) 을 분석하였다.

pH의 측정은 퇴적물의 상부층에서 pH spear (Eutech instruments) 를 이용하여 직접 측정하였다.

3) 퇴적물 용존산소

퇴적물 내 용존산소 (DO: Dissolved Oxygen) 측정은 퇴적물 시료를 채취한 현장에서 Picoammeter PA2000 (Oxygen Microsensor, Unisense A/S Company) 을 이용하여 퇴적물의 표층 1 mm 내에서 측각 실시하였다.

4) ^{210}Pb 분석

전복양식장 설치 전후 변화한 퇴적물을 추정하기 위해 양식장 직하부에서 채취된 주상시료에서 2 cm 간격으로 시료를 채취하고 ^{210}Pb 를 분석하였다. ^{210}Pb 분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행되었다. 그리고 ^{210}Pb 결과치에 대해 CRS (Constant Rate of Supply) 모델 (Appleby and Oldfield, 1992; Appleby, 2001) 을 이용하여 연대를 산정하였다.

5) 저서성 유공충

저서성 유공충 분석을 위해 양식장 직하부 표층퇴적물 시료의 상부 1 cm 내에서 정량스폰을 사용하여 20 mL를 채취한 후, 플라스틱 용기에 담은 후 고정과 보관을 위하여 Isoptopyl alcohol을 첨가하였다. 고정을 위한 Isoptopyl alcohol (1 L) 에는 살아있는 개체와 죽은 개체를 구별하기 위하여 2 g의 로즈벵갈 (Rose bengal) 을 넣어 원형질을 착색하였다 (Schönfeld *et al.*, 2012). 원형질 착색 후 4ϕ ($63\ \mu\text{m}$) 체를 사용하여 세립질 퇴적물과 로즈벵갈을 제거한 후 60°C 이하의 온도에서 건조하였다. 건조된 시료는 유공충이 300개체 이상일 경우 미량분리기 (Microsplitter) 를 이용하여 시료를 분리하였다. 분리된 시료는 실체현미경 (SMZ1000, Nikon) 으로 관찰하여 유공충을 추출하였고, 도감과 문헌을 통해 유공충을 동정 (classification) 하였다.

저서성 유공충은 각의 성분에 따라 사질 (agglutinated), 석

Table 1. Grain-size composition and geochemistry analysis of surface sediment in sea area between Pyeongil-do and Cheong-do. Note, dissolved oxygen (DO), total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total sulfur (TS), total organic carbon/total nitrogen ratio (C/N), total organic carbon/total sulfur ratio (C/S), organic matter (OM), mud (M), rocky or gravel bottom (R/G), slightly gravely sandy mud ((g)sM), sandy mud (sM)

Station	Depth (m)	pH	DO (mg/L)	OM (%)	TOC	TN	TS	C/N	C/S	Sediment Composition (%)				Sediment Type	Statistical Parameters	
										Gravel	Sand	Silt	Clay		Mean (ω)	Sorting (ω)
1	17.8	7.43	6.85	7.40	1.57	0.18	0.22	8.58	7.14	0.00	2.87	44.77	52.36	M	8.64	2.66
2	13.8	7.30	6.40	8.15	1.54	0.14	0.21	10.80	7.28	0.00	2.56	45.68	51.77	M	8.50	2.70
3														R/G		
4	14.4	7.41	7.15	7.09	1.54	0.15	0.23	10.18	6.77	0.01	1.07	45.69	53.23	M	8.72	2.56
5	8.4	7.32	6.17	7.70	1.52	0.15	0.20	10.46	7.54	0.00	1.73	45.38	52.89	M	8.74	2.62
6	16.1	7.52	6.85	7.72	1.61	0.15	0.22	10.87	7.31	0.32	9.51	42.79	47.38	(g)sM	8.14	3.02
7	15.4	7.48	6.46	7.13	1.49	0.15	0.18	10.03	8.39	0.00	1.77	44.5	53.74	M	8.64	2.60
8	8.2	7.37	6.86	7.29	1.56	0.15	0.18	10.67	8.47	0.00	5.49	46.22	48.29	M	8.30	2.87
9	16.1	7.42	6.18	12.01	2.50	0.14	0.19	18.50	13.01	0.00	15.77	43.45	40.78	sM	7.69	3.31
Min.	8.20	7.30	6.17	7.09	1.49	0.14	0.18	8.58	6.77	0.00	1.07	42.79	40.78		7.69	2.56
Max.	17.80	7.52	7.15	12.01	2.50	0.18	0.23	18.50	13.01	0.32	15.77	46.22	53.74		8.74	3.31
Avg.	13.78	7.41	6.61	8.06	1.66	0.15	0.20	11.26	8.24	0.04	5.10	44.81	50.06		8.42	2.79

회질 유리상 (calcareous-hyaline), 석회질 자기상 (calcareous-porcelaneous) 유공충으로 분류하여 각각의 산출비율을 계산하였다. 부유성 유공충 종은 분류하지 않고, 부유성과 저서성 유공충 전체 개체수에서 차지하는 상대적인 비율을 계산하였다. 그리고 정점별 산출한 저서성 유공충의 출현하는 종수 (S) 와 20 mL당 출현하는 개체수를 계산하였다. 종다양도 (species diversity) 와 균등도 (evenness) 를 정점별로 계산하였다. 종다양도 측정공식은 Shannon-Weaver information function (H') 를 사용하였다 (MacArthur and MacArthur, 1961).

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (\text{Shannon and Weaver, 1963})$$

위 식에서 H' 는 종 다양성 지수이며, S는 출현종의 수, P_i 는 총출현개체수에 대한 i 번째 종의 출현비율이다. 출현하는 모든 개체가 같은 종일 경우 최소값인 0을 가지며, 모든 출현 개체가 다른 종일 경우 종 다양도 H' 는 최대가 된다. 작은 수의 종이 거의 균등하게 배분되는 집단과 많은 종이 불균등하게 배분되는 집단이 거의 비슷한 H' 값을 가지게 된다. 이러한 이유로 종 다양도를 측정할 경우 종균등도 (evenness, J) 를 함께 측정한다.

$$J = H' / \ln(S) \quad (\text{Pielou, 1966})$$

또한 파악된 유공충 군집이 조사지역 내에서 어떤 분포 형태를 가지는지 파악하기 위하여 군집분석 (cluster analysis) 을 실시하였다. 통계분석은 PRIMER 5.0 (Primer-E Ltd., Plymouth, United Kingdom) 을 이용하였다.

결 과

1. 표층퇴적물 지화학 조성 및 분포

표층퇴적물 입도조성은 모래함량이 1.42-15.77% (평균 5.1%) 로 정점 6과 9번에서 다소 높게 나타나고, 실트와 점토 함량은 각각 42.79-46.22% (평균 44.81%), 40.78-53.74% (평균 50.06%) 으로 전 정점에서 높게 나타나고 있다 (Table 1). 평균입도는 8.42 ϕ 로 세립질 실트이며, 분급은 평균 2.79 ϕ 로 매우 불량한 것으로 나타나고 있다. 퇴적상은 니질, 사질니, 함력사질니 및 암반 또는 역질의 4개 퇴적상으로 구성된다. 척도와 평일도 앞 해역에서는 주로 세립질의 니질퇴적상들이 주로 분포하고, 다소 거리가 먼 해역에서는 조립질의 사질, 역질이 함유된 사질니, 함력사질니 및 암반 또는 역질 퇴적상들이 분포한다 (Fig. 2-A).

표층퇴적물의 pH 평균은 7.41, 분포범위는 7.30-7.52 이며, DO 평균은 6.61 mg/L, 분포범위는 6.17-7.15 mg/L이다 (Table 1). OM 함량은 평균 8.06%이며, 7.09-12.01%의 분포 범위를 보이며, 정점 9번에서 함량이 12.01%로 가장 높게 나타난다 (Table 1). 평일도 앞 해역에서 8.0% 전후의 함량분

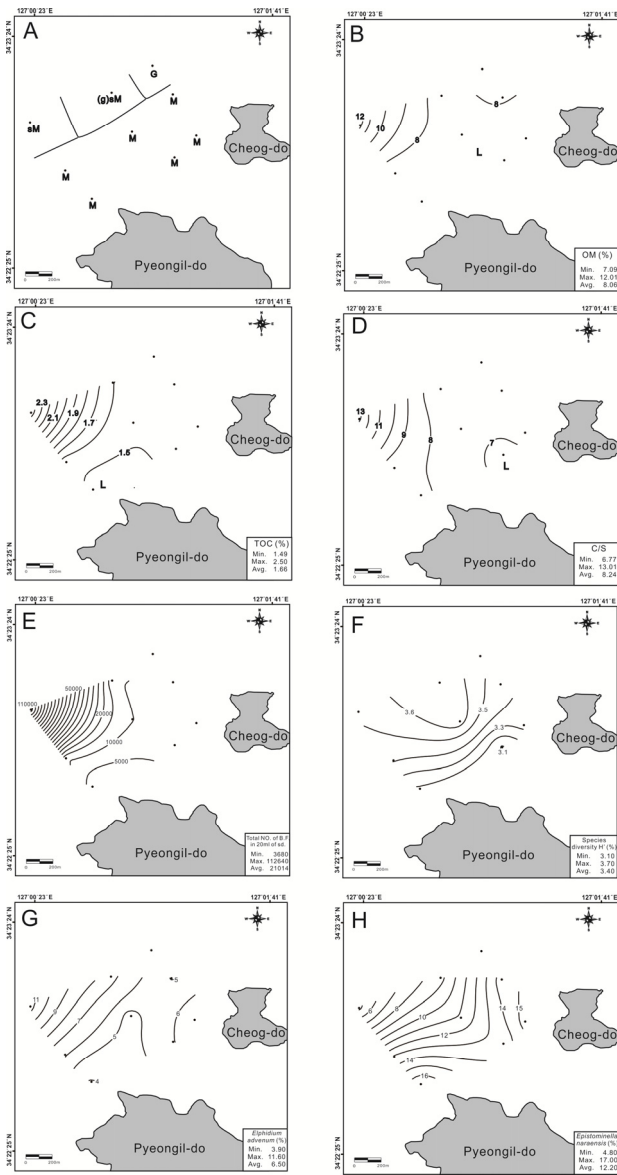


Fig. 2. Distribution map of sediment facies (A), organic matter (B: OM), total organic carbon (C: TOC), ratio of carbon to sulfur (D: C/S), total number of benthic foraminiferal in 20 ml of sediment (E), species diversity (F: H'), abundance frequency of *Elphidium advenum* (G) and abundance frequency of *Epistominella naraensis* (H).

포를 보이고, 평일도로 부터 북서방향으로 멀어짐에 따라 증가하는 양상을 보인다 (Fig. 2-B). TOC, TN, TS의 평균함량은 각각 1.66, 0.15, 0.2%이며, 함량분포는 각각 1.49-2.50, 0.14-0.18 및 0.18-0.23%이다 (Table 1). TOC 분포를 보면 (Fig 2-C), 평일도 앞 해역에서 1.5% 전후 함량분포를 보이나 북서방향으로 멀어짐에 따라 함량이 증가하는 양상을 보인다.

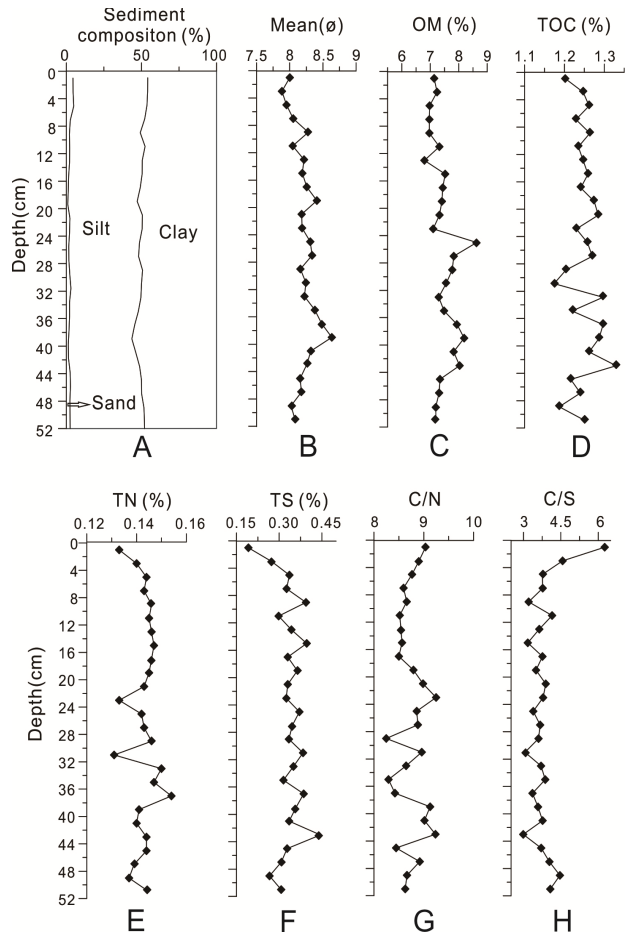


Fig. 3. Depth profiles of grain size (A, B), organic matter (OM, C), total organic carbon (TOC, D), total nitrogen (TN, E), total sulfur (TS, F), total organic carbon/total nitrogen (C/N, G), total organic carbon/total sulfur (C/S, H) in core sediment station number 5.

C/N의 평균 비율은 11.26이고, 8.58-18.50의 분포 범위를 보인다. 정점 9번에서 18.50으로 매우 높은 비율을 보인다 (Table 1). C/S의 평균 비율은 8.24이고 6.77-13.01 비율분포를 보인다. 평일도 앞 해역에서 7.0전후 비율분포를 보이고 북서방향으로 향하여 점진적으로 증가하는 양상을 보인다 (Fig. 2-D).

2. 주상퇴적물 지화학 성분 조성 및 변화

정점 5번 주상퇴적물 (길이 52 cm) 의 입도조성을 보면 (Fig. 3-A), 모래는 평균함량 3.0%로서 (0.96-5.35%) 극히 미비하게 나타나고, 주로 평균 함량이 48.21%인 실트 (42.09-51.31%) 와 평균함량이 48.79%인 점토 (43.58-56.37%) 의 세립질 퇴적물로 구성되며, 하부에서 상부로 향하여 뚜렷한 함량변화는 나타나지 않는다. 평균입도는 평균 8.11 ϕ (7.65-8.63 ϕ) 으로서,

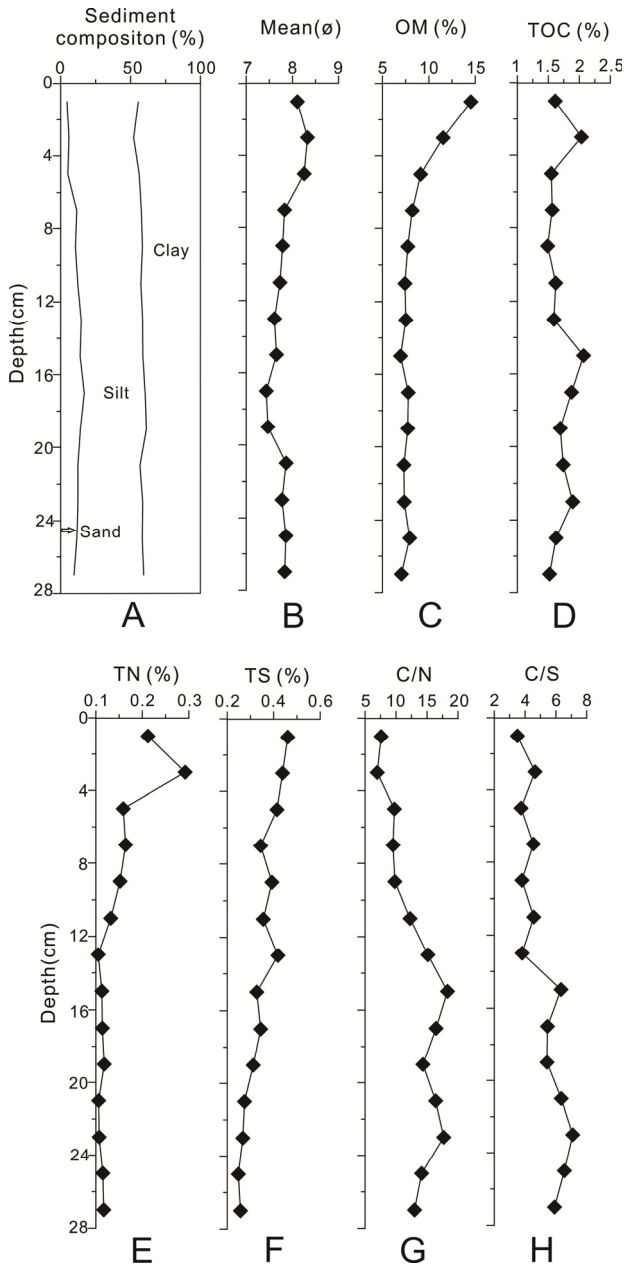


Fig. 4. Depth profiles of grain size (A, B), organic matter (OM, C), total organic carbon (TOC, D), total nitrogen (TN, E), total sulfur (TS, F), total organic carbon/total nitrogen (C/N, G), total organic carbon/total sulfur (C/S, H) in core sediment station number 6.

깊이 약 19 cm에서부터 점진적으로 커지는 양상을 보인다 (Fig. 3-B). OM (평균 7.06%) 은 깊이 약 23 cm 부터 상부로 향하여 뚜렷한 함량변화 뚜렷한 변화 없이 거의 일정하게 나타나고 있다 (Fig. 3-C). TOC (평균 1.24%), TN (평균 0.14%) 그리고 TS (평균 0.32%) 의 함량 변화를 보면, TN은

깊이 약 21 cm부터 하부층에 비해 상부로 향하여 거의 일정하게 나타나고 있다 (Fig. 3-E). TOC도 약 21 cm 부터 다소 변화 폭은 있으나 하부층에 비해 상부로 향하여 다소 안정적으로 나타나고 있다 (Fig. 3-D). C/N 비율은 8.25-9.70 (평균 8.80), C/S 비율은 2.99-6.26 (평균 3.98) 의 분포 범위를 보인다. C/N은 깊이 17 cm부터 상부로 향하여 뚜렷한 변화 없이 거의 일정하게 나타나고 있다 (Fig. 3-G).

정점 6번 주상퇴적물 (길이 26 cm) 은 모래는 평균함량이 11.09%로서 (4.59-16.85%) 다소 낮게 나타나고, 주로 평균함량이 46.70%인 실트 (43.51-51.01%) 와 평균함량이 42.21%인 점토 (38.71-47.82%) 의 세립질 퇴적물로 구성된다 (Fig. 4-A). 평균입도는 8.11 φ이며, 깊이 약 7 cm에서 상부로 향하여 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 4-B). OM 함량은 평균 8.44% (6.95-14.52%) 이며, 깊이 약 7 cm부터 상부로 향하여 증가한다 (Fig. 4-C). TOC 및 TN 평균함량은 각각 1.70% (1.49-2.07%), 0.14% (0.11-0.29%) 이며, 깊이 약 5 cm 이후부터 상부로 향하여 뚜렷한 증가 양상을 보인다 (Fig. 4-D, E). TS는 평균함량이 0.35% (0.25-0.46%) 이며, 깊이 약 7 cm에서 부터 상부로 향하여 증가하는 경향을 갖는다 (Fig. 4-F). C/N 비율은 평균 12.95 (6.97-18.31) 이고, C/S 비율은 평균 5.12 (3.5-7.09) 으로 C/S 비율 변화는 뚜렷이 나타나지 않으나 (Fig. 4-H), C/N은 깊이 약 8 cm에서 상부로 향하여 감소하는 경향이 뚜렷이 나타나고 있다 (Fig. 4-G).

3. 퇴적물

주상퇴적물 정점 5번과 6번에 대한 CRS 분석 결과 (Table 2), 정점 5번의 평균 퇴적률은 1.73 cm/year로서 추정연대는 1952년까지 나타났다. 정점 6번은 평균 퇴적률이 0.23 cm/year 이며, 추정연대는 1864년까지 나타났다. 평균 퇴적률이 정점 5 번이 정점 6번에 비해 약 7.5배 높은 것으로 나타났다.

4. 저서성 유공충 종조성 및 군집

평일도 전복양식장 조사정점 9개 중 자갈 및 암반이 분포하는 정점 3번을 제외한 8개 정점 표층퇴적물에서 저서성 유공충 총 61속 89종 (사질 10속 13종, 석회질-유리질 48속 71종, 석회질-자기질 3속 5종) 이 분류되었다 (Table 3). 퇴적물 20 mL 당 출현하는 저서성 유공충의 총 개체수는 4,192-18,240 개 (평균 10,470개) 로 조사해역 중앙부와 북서해역에서 높게 나타나고 있다 (Fig. 2-E). 종다양도 지수 (Species diversity) 는 3.3-3.6 (평균 3.4) 로 전 조사정점에서 높게 나타나고 있다 (Fig. 2-F). 각 정점에서 10% 이상 산출하는 우점종은 *Epistominella naraensis* 가 정점 1번 (11.2%) 과 정점 4번 (11.8%), 정점 7번 (17.5%) 에서 우점한다. *Ammonia ketienziensis*는 정점 2번 (12.8%) 와 정점 6번 (11.7%) 에서

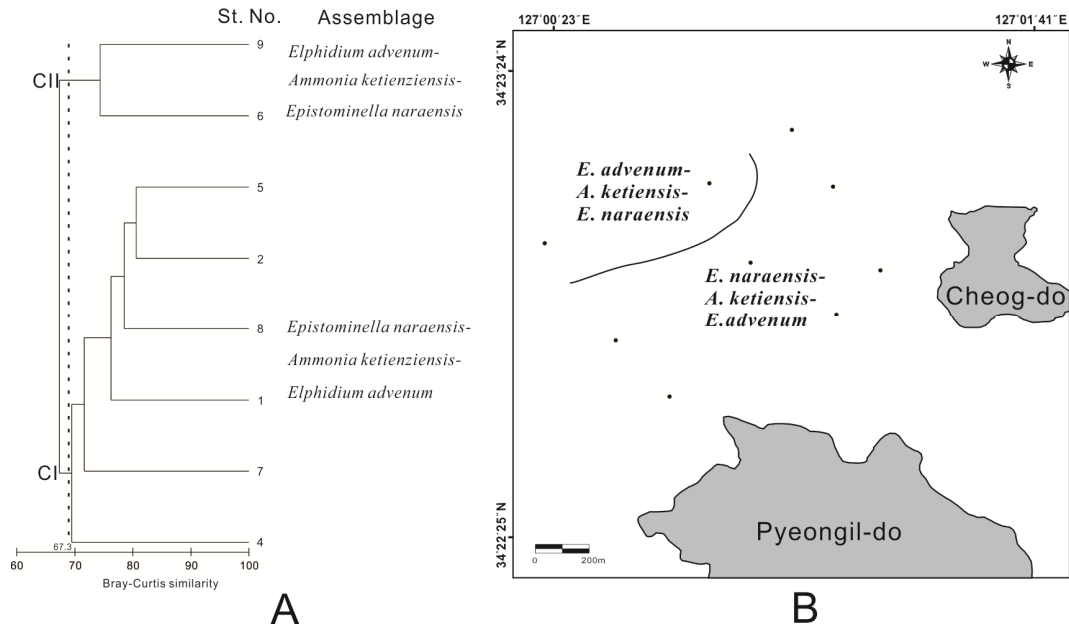


Fig. 5. Cluster analysis using Bray-Curtis similarity (A) and distribution map of benthic foraminiferal assemblage (B) in sea area between Pyeongil-do and Cheog-do.

우점한다. 정점 8번에서는 *E. naraensis* (11.6%), *A. ketienziensis* (10.2%) 가 우점하고, 정점 9번에서는 *Elphidium advenum* (16.0%) 이 우점한다. 정점 5번에서는 우점종은 나타나지 않으나 *E. naraensis*가 산출빈도 9.3%로 높게 나타나고 있다. 모든 정점에서 높은 산출빈도를 보이는 *E. naraensis*와 *E. advenum*의 산출빈도 분포를 보면, *E. advenum*은 육지 인접해역으로부터 북서해역으로 향하여 점진적으로 높아지는 경향을 보인다 (Fig. 2-G). *E. naraensis*는 역으로, 육지 인접해역으로부터 북서해역으로 향하여 점진적으로 산출빈도가 낮아지는 경향을 보인다 (Fig. 2-H).

정점별 유공충 군집을 알아보기 위해 각 정점에서 1% 이상 산출하는 종을 기준으로 하여 정점간 군집분석 (cluster analysis) 를 실시하였다. 그 결과 저서성 유공충 군집은 2개의 그룹 (그룹 I, II) 으로 나타났다 (Fig. 5-A). 그룹 I은 정점 1, 2, 4, 5, 7, 8번으로 구성된 *E. naraensis*-*A. ketienziensis*-*E. advenum* 군집이다.

그룹 II는 정점 6, 9번으로 구성된 *E. advenum*-*A. ketienziensis*-*Pararotalia niopponica* 군집이다. *E. naraensis*-*A. ketienziensis*-*E. advenum* 군집은 육지 가까이 분포하고, *E. advenum*-*A. ketienziensis*-*P. niopponica* 군집은 북서해역 쪽에 분포하고 있다 (Fig. 5-B).

토 론

1. 양식장 퇴적물 지화학 조성과 양식활동

전복양식장 직하에서 채취한 정점 5번의 주상퇴적물은 세립질 퇴적물로 구성되며, 평균입도 (8.11 ϕ) 가 깊이 19 cm부터 상부층으로 향하여 점진적으로 커지는 경향을 보인다 (Fig. 3-B). 일반적으로 퇴적물 입자 분포 및 변화는 환경 또는 환경 변화를 해석하는데 유용한 인자로 활용된다 (Aguado-Giménez *et al.*, 2007). Thornberg *et al.*, (2014) 과 Kang *et al.*, (2015) 에 의하면, 양식활동의 일환으로 수행되는 먹이 공급 등이 퇴적물 입자변화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. OM (평균 7.06%) 은 깊이 24-22 cm을 기준으로 하부층들로 향해서 함량증가에 따른 뚜렷한 변화를 보이는 반면, 상부층으로 향하여 거의 일정하게 나타나고 있다 (Fig. 3-C). 이러한 변화 형태는 TOC (Fig. 3-D), TN (Fig. 3-E) 에서는 깊이 22-20 cm에서, C/N (Fig. 3-G) 18-16 cm에서 뚜렷이 나타나고 있다. OM, TOC, TN 등의 유기물 함량 지수들이 주상시료 상층부에서 큰 변화 없이 거의 일정하게 나타나는 것은 양식활동 (먹이공급: 미역, sludge 등) 에 의한 유기물의 지속적인 공급, 퇴적에 기인한 것이라 알려져 있다 (Jeong *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2016a). 특히, TN 함량은 먹이로 공급되는 해조류의 배설물과 깊은 관련성을 가지며 (Hanisak, 1993), 공급된 먹이 (*Undaria pinnatifida*) 로부터 17.8-22.5%의 배설물이 생성되는 것으로 알려져 있다 (Park, 2005). 이와같은 현상은 주상시료 정점 6번 주상시료 상층부 퇴적층 (두께 8-6 cm부터 최상부) 에서도 동일하게 나타나고 있다.

C/S 비율은 주상시료 정점 5번은 평균 3.98 (2.99-6.26),

정점 6번은 평균 5.12 (3.5-7.09) 을 보인다. 표층퇴적물내의 산소포화 정도를 가늠할 수 있는 C/S는 (Berner and Raiswell, 1984), 황화수소 박테리아에 의한 유기물 분해 비율로서 산소농도가 낮아질 때 C/S 비율이 감소하고, 3.0 이하일 때 환원환경으로 알려져 있다 (Berner and Raiswell, 1984; Tsujimoto *et al.*, 2008). 주상시료 5, 6번 C/S 비율 분포를 보면 (Fig. 3-H, 4-H), 양식장 퇴적물의 지화학 조성에서 양식 활동에 의한 유기물 영향은 뚜렷하게 나타나지 않고 있다.

동일한 양식장 내에서 양식활동 결과로 형성된 유기물 집적이 육지인접 해역 (정점 5번, 두께: 약 21 cm) 과 북서해역 (정점 6번, 두께: 7 cm) 에서 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 두 정점 간 CRS 퇴적률 (정점 5번: 평균 퇴적률 1.73 cm/year, 정점 6번: 평균 퇴적률 0.23 cm/year) 차이 (Table 2) 에 기인하는 것으로 생각된다. 표층퇴적물 입도 분포를 보면 (Fig. 2-A), 평일도와 척도 앞 해역에서는 주로 세립질의 니질퇴적상들이 주로 분포하고, 다소 거리가 먼 북서해역에서는 조립질의 사질, 역질이 함유된 사질니, 함력사질니 및 암반 또는 역질 퇴적상들이 분포한다. 두 해역 사이에서 퇴적물 조성 차이는 해역간의 물리적 환경차이, 즉 해수흐름, 유속차이에

기인하는 것으로 생각된다. 이상과 같이, 척도와 평일도 인접 해역에 위치한 전복양식장은 세립질 퇴적물로 구성되며, 척도와 평일도 북서해역에 위치한 전복양식장 보다 퇴적률이 높아 유기물 집적도 활발하게 나타난다. 그 결과, 주상시료 정점 5 번과 6번에서 퇴적률 차이가 크게 나타나며, 동일 전복양식장에서 나타나는 이러한 퇴적환경 차이는 척도와 평일도 북서해역이 척도와 평일도 인접해역보다 해수흐름이 상대적으로 빠르게 기인하는 것으로 생각된다.

2. 유공충 군집 분포와 퇴적환경

저서성 유공충은 전복양식장 8개 지점에서 총 61속 89종이 분류되었고, 퇴적물 20 mL 당 총 개체수는 평균 10,470개로 조사해역 중앙부와 북서해역에서 높게 나타나고 있으며 (Fig. 2-E), 종 다양도 지수는 평균 3.4로 전 조사정점에서 높게 나타나고 있다 (Fig. 2-F). 해양에서 유기물의 주요 공급원으로 작용하는 양식장에서 유공충의 종 다양도 및 산출빈도 변화는 양식활동에 의해 야기된 환경변화를 파악하는 척도로 알려져 있으며 (Angel *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2016b; Schafer *et al.*, 1995; Vidović *et al.*, 2009), 저서성 유공충 군집의 종

Table 2. Comparison table of sedimentation rate between core sediment station number 5 (C-5) and station number 6 (C-6)

Depth (cm)	Total ²¹⁰ Pb (mBq/g)		Inventory Excess ²¹⁰ Pb		Date		Accumulation rate (g/cm/yr)		Sedimentation rate (cm/yr)	
	C-5	C-6	C-5	C-6	C-5	C-6	C-5	C-6	C-5	C-6
0	97.3		84.0		2017		4.6		5.9	
2		96.0		80.1	2014	2014		0.52		0.60
4	114.0	100.3	162.5	81.7	2014	2008	2.3	0.35	2.8	0.43
6		93.5		77.2		2000		0.27		0.31
8	123.1	92.1	181.7	77.3	2011	1990	1.6	0.22	2.1	0.24
10		78.3		53.4		1976		0.18		0.19
12	112.7	64.3	160.5	27.8	2008	1960	1.4	0.15	1.9	0.16
14		64.2		26.8		1947		0.14		0.15
16	115.1	54.8	158.0	79.0	2006	1926	1.3	0.13	1.7	0.13
18		54.3		8.2		1914		0.12		0.13
20	114.3	54.1	157.9	8.1	2002	1898	1.2	0.12	1.6	0.12
22		52.1		4.4		1864		0.10		0.10
24	114.3		152.3			1999		1.1		1.5
28	110.7		146.7			1996		1.1		1.3
32	106.0		150.8			1991		1.0		1.3
36	112.7		152.9			1986		0.9		1.2
40	105.4		143.5			1981		0.8		1.1
44	102.5		145.7			1974		0.8		0.9
48	98.6		145.0			1965		0.7		0.8
52	106.5		163.3			1952		0.6		0.7

Table 3. Numbers, relative abundance (%), and statistic data for benthic foraminifera from surface sediment of sea area between Pyeongil-do and Cheog-do

Species	Sample No.	GI1	GI2	GI4	GI5	GI6	GI7	GI8	GI9	MIN	MAX	AVG.
Agglutinated Foram												
<i>Ammobaculites agglutinans</i>		1.4	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	1.2	0.2	0.0	1.4	0.4
<i>Ammobaculites cubensis</i>		1.7	0.5	0.4	0.2	0.3	0.0	0.9	1.1	0.0	1.7	0.6
<i>Gaudryina</i> sp.		0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.6	0.1
<i>Portatrochammina pacifica</i>		0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.3	0.1
<i>Reophax</i> sp.		0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
<i>Sahulia conica</i>		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
<i>Sigmoilopsis moyi</i>		0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1
<i>Sigmoilopsis schlumbergeri</i>		0.3	0.3	0.0	1.3	1.4	0.0	0.3	1.6	0.0	1.6	0.6
<i>Spiroglutina asperula</i>		0.0	1.1	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.9	0.0	1.1	0.4
<i>Textularia agglutinans</i>		0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3	0.1
<i>Textularia earlandi</i>		0.0	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1
<i>Textularia mariae</i>		0.0	0.0	0.4	0.5	0.8	0.0	0.3	0.0	0.0	0.8	0.3
<i>Trochammina hadai</i>		0.9	0.8	0.0	2.2	1.4	1.7	1.5	0.7	0.0	2.2	1.1
<i>Verneuilinulla advena</i>		2.0	1.6	6.4	1.1	2.4	5.2	1.2	0.9	0.9	6.4	2.6
C.-H. Foram												
<i>Ammonia beccarii</i>		5.7	5.5	5.1	4.1	6.5	4.3	6.4	5.9	4.1	6.5	5.5
<i>Ammonia faceta</i>		0.0	0.3	8.5	1.0	0.5	0.9	0.9	0.0	0.0	8.5	1.5
<i>Ammonia ketienziensis</i>		8.0	8.0	0.0	7.3	5.4	6.1	9.0	8.4	0.0	9.0	6.5
<i>Ammonia</i> sp.		0.3	0.0	0.0	0.0	0.8	0.4	0.9	0.7	0.0	0.9	0.4
<i>Anomalinoidea</i> sp.		0.0	0.5	0.0	0.3	0.3	0.0	0.9	0.5	0.0	0.9	0.3
<i>Astrononion</i> sp.		1.1	2.7	0.4	1.7	1.1	1.7	2.6	0.7	0.4	2.7	1.5
<i>Bolivina asanoi</i>		0.6	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.6	0.1
<i>Bolivina robusta</i>		2.6	5.2	6.4	4.3	3.8	4.8	8.2	3.4	2.6	8.2	4.8
<i>Bolivina spathulata</i>		0.9	1.6	0.0	1.0	0.0	1.3	1.2	0.5	0.0	1.6	0.8
<i>Bolivina striatula</i>		0.3	0.3	1.3	0.8	0.8	1.7	1.5	0.5	0.3	1.7	0.9
<i>Bolivina</i> sp.		0.6	0.5	0.4	0.6	0.3	0.0	0.3	0.2	0.0	0.6	0.4
<i>Bolivina seminuda</i>		0.3	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0	0.5	0.2
<i>Brizalina subspinescens</i>		0.0	0.3	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1
<i>Buccella frigida</i>		1.1	1.1	0.9	0.8	3.0	0.4	0.3	1.4	0.3	3.0	1.1
<i>Bulimina marginata</i>		1.4	1.1	2.6	1.6	0.3	0.9	1.5	0.2	0.2	2.6	1.2
<i>Bulimina</i> sp.		0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1
<i>Cancris auricula</i>		0.0	0.5	0.4	0.3	0.8	1.7	0.0	0.2	0.0	1.7	0.5
<i>Cassidulina carinata</i>		1.4	0.8	2.1	1.1	1.4	1.7	0.6	1.1	0.6	2.1	1.3
<i>Cibicides refulgens</i>		3.7	3.0	3.8	3.3	3.2	4.3	3.5	2.5	2.5	4.3	3.4
<i>Cibicides</i> sp.		0.0	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1
<i>Cibicidoides lobatulus</i>		3.1	3.6	6.0	2.5	4.9	2.6	4.7	5.7	2.5	6.0	4.1
<i>Cornuspira involvens</i>		0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1
<i>Criboelphidium excavatum</i>		4.6	3.6	6.4	4.8	2.4	0.9	2.9	3.0	0.9	6.4	3.6
<i>Criboelphidium incertum</i>		0.0	0.3	0.4	0.8	0.8	0.0	0.6	0.0	0.0	0.8	0.4
<i>Criboelphidium subarcticum</i>		3.7	0.8	1.3	2.5	2.2	2.2	1.2	2.5	0.8	3.7	2.0
<i>Dentalina</i> sp.		0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1
<i>Discorbis vilardeboanus</i>		2.3	3.0	1.7	2.2	1.9	2.6	1.7	1.8	1.7	3.0	2.2
<i>Eilohedra nipponica</i>		4.0	6.6	6.4	5.1	3.2	7.4	4.4	3.0	3.0	7.4	5.0
<i>Elphidium advenum</i>		6.9	4.9	6.0	4.8	7.8	3.9	6.1	11.6	3.9	11.6	6.5
<i>Elphidium crispum</i>		0.6	0.8	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	2.3	0.0	2.3	0.5
<i>Elphidium limpidum</i>		0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1
<i>Elphidium reticulosum</i>		0.0	0.3	0.0	0.2	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0	0.5	0.2
<i>Elphidium somaense</i>		3.7	3.3	1.7	4.3	0.8	7.8	1.7	1.8	0.8	7.8	3.2
<i>Elphidium subincertum</i>		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1

저서성 유공충 군집 및 퇴적물 지화학 조성에서 나타나는 전복양식 활동 영향 및 퇴적환경과의 상관성

<i>Elphidium</i> sp.	0.9	0.3	0.0	1.7	1.1	0.9	0.3	0.5	0.0	1.7	0.7
<i>Epistominella naraensis</i>	15.4	14.6	13.2	11.1	8.6	17.0	13.1	4.8	4.8	17.0	12.2
<i>Epistominella tamana</i>	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.1
<i>Epondes</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Favulina melo</i>	0.3	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1
<i>Fissurina laevigata</i>	0.9	0.8	0.9	0.8	0.3	1.3	0.0	0.7	0.0	1.3	0.7
<i>Fissurina lucida</i>	0.0	0.0	0.0	0.5	1.4	2.2	0.0	0.2	0.0	2.2	0.5
<i>Fissurina marginata</i>	0.6	0.3	0.0	0.0	1.1	0.4	0.6	0.0	0.0	1.1	0.4
<i>Fursenkoina</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
<i>Globocassidulina subglobosa</i>	0.9	2.5	2.1	1.9	1.4	0.4	1.2	1.6	0.4	2.5	1.5
<i>Guttulina</i> sp.	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
<i>Gyroidina cushmani</i>	0.0	0.5	0.4	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.6	0.2
<i>Gyroidinoides nipponica</i>	0.6	0.8	0.0	0.5	0.5	0.0	0.3	0.2	0.0	0.8	0.4
<i>Hanzawaia</i> sp.	2.3	0.5	0.4	1.1	1.1	1.7	0.6	0.0	0.0	2.3	1.0
<i>Hoeglundina elegans</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Hopkinsinella glabra</i>	0.0	0.3	0.0	0.5	0.5	0.0	0.3	0.2	0.0	0.5	0.2
<i>Hyalinea balthica</i>	0.0	0.5	0.9	1.0	0.0	2.2	0.9	0.0	0.0	2.2	0.7
<i>Islandiella</i> sp.	0.9	1.4	1.3	1.3	1.4	0.4	1.5	1.4	0.4	1.5	1.2
<i>Lagena elongata</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Lagena perlucida</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.0
<i>Lagena spicata</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0	0.5	0.1
<i>Lagena striata</i>	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3	0.1
<i>Lenticulina</i> sp.	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.6	0.1
<i>Melonis</i> sp.	4.3	4.4	6.8	3.7	1.9	3.9	4.4	2.5	1.9	6.8	4.0
<i>Murrayinella</i> sp.	0.3	0.5	0.0	1.3	1.4	0.0	0.3	0.2	0.0	1.4	0.5
<i>Neoeponides</i> sp.	1.4	0.8	0.9	0.6	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	1.4	0.6
<i>Nonion</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9	0.1
<i>Nonionella globosa</i>	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1
<i>Nonionella stella</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Nonionoides turgidus</i>	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
<i>Paracassidulina sagamiensis</i>	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1
<i>Paracassidulina</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
<i>Parafissurina lateralis</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Pararotalia nipponica</i>	0.0	0.8	0.4	0.6	3.8	0.0	0.3	5.7	0.0	5.7	1.5
<i>Pararotalia</i> sp.	0.3	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.9	0.2
<i>Poroepionides cribroconcameratus</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	1.6	0.2
<i>Pseudononion japonicum</i>	0.0	0.8	0.0	0.8	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.8	0.3
<i>Pullenia quinqueloba</i>	0.3	0.0	0.0	1.0	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	1.0	0.3
<i>Rosalina australis</i>	0.0	1.4	0.4	1.0	1.6	0.9	0.9	1.4	0.0	1.6	0.9
<i>Rosalina bradyi</i>	1.7	1.4	0.0	1.4	2.7	0.0	0.6	1.8	0.0	2.7	1.2
<i>Rosalina</i> sp.	1.7	1.1	1.3	0.8	2.7	1.3	1.5	0.7	0.7	2.7	1.4
<i>Rotalinoides gaimardi</i>	1.7	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	0.6	5.2	0.0	5.2	1.1
<i>Siphogenerina raphana</i>	0.3	0.3	0.4	0.2	0.8	0.0	0.6	0.0	0.0	0.8	0.3
<i>Siphouvigerina proboscidea</i>	0.3	0.3	0.0	0.3	0.3	0.4	0.6	0.0	0.0	0.6	0.3
<i>Trifarina bradyi</i>	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
<i>Uvigerina nitidula</i>	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0	0.0	0.5	0.2
<i>Valvulineria sadonica</i>	0.6	0.0	0.0	0.5	0.3	0.4	0.0	0.7	0.0	0.7	0.3
C.-P. Foram											
<i>Cycloforina contorta</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.9	0.1
<i>Quinqueloculina elongata</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1
<i>Quinqueloculina lamareckiana</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.1
<i>Quinqueloculina seminula</i>	0.0	0.0	0.0	0.5	1.4	0.0	0.0	1.6	0.0	1.6	0.4

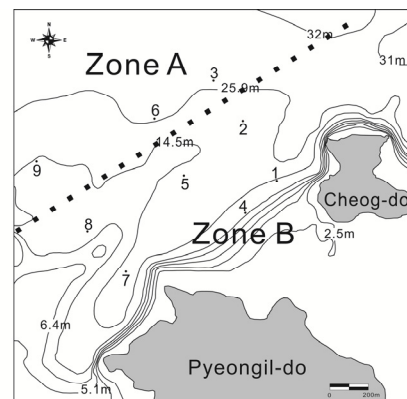
<i>Quinqueloculina</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
<i>Spiroloculina</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
Total No. of Benthic Foram	350	364	234	629	370	230	343	440	230	629	370.0
Total No. of Planktic Foram	134	122	74	292	57	77	109	73	57	292	117.3
Species Number S	51	57	38	73	63	39	58	62	38	73	55.1
Percentage of A. Foram	6.6	4.4	7.7	6.8	7.6	7.0	6.1	7.0	4	8	6.6
Percentage of C.-H. Foram	93.4	95.6	92.3	92.7	90.5	93.0	93.9	89.1	89.1	95.6	92.6
Percentage of C.-P. Foram	0.0	0.0	0.0	0.5	1.9	0.0	0.0	3.9	0.0	3.9	0.8
Species diversity H'	3.36	3.42	3.09	3.68	3.68	3.18	3.41	3.52	3.1	3.7	3.4
Species evenness J'	0.85	0.85	0.85	0.86	0.89	0.87	0.84	0.85	0.8	0.9	0.9
Total No. of B. F. in 20ml of sd.	5600	5824	7488	10064	11840	3680	10976	112640	3680	112640	21014
Total No. of P. F. in 20ml of sd.	2144	1952	2368	4672	1824	1232	3488	18688	1232	18688	4546
No (% of total). of B. F. in 20ml of sd.	72.3	74.9	76.0	68.3	86.7	74.9	75.9	85.8	68.3	86.7	76.8
No (% of total). of P. F. in 20ml of sd.	27.7	25.1	24.0	31.7	13.3	25.1	24.1	14.2	31.7	23.2	23.2

다양도는 3단계로 (나쁨 < 0.9, 불량: 0.9-1.9, 보통: 1.9-3.0) 구분되고, 저서생태계 환경평가 지수로 활용된다 (Dolven *et al.*, 2013). 저서성 유공충 산출빈도 및 종다양도 지수를 보면, 평일도 앞 해역 전복양식장 해역의 저서 생태계 환경은 매우 양호한 것으로 나타나고 있다. 표층퇴적물 C/S의 평균 비율은 8.24이며, 평일도 앞 해역에서 7.0전후 비율분포를 보이고 북서방향으로 향하여 점진적으로 증가하는 양상을 보인다 (Fig. 2-D). 따라서 평일도, 척치리 해역 전복양식장 표층퇴적물에서 양식활동에 의한 퇴적물 지화학 조성 및 저서생태계에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타나고 있다.

저서성 유공충 군집은 척도와 평일도 인접해역에 분포하는 *E. naraensis*-*A. ketienziensis* -*E. advenum* 군집 (정점 1, 2, 4, 5, 7, 8번) 과 북서해역에 분포하는 *E. advenum*-*A. ketienziensis*-*P. niopponica* 군집, 2개의 군집이 분포한다 (Fig. 5). *E. naraensis*는 한반도 남해 외해영향을 받는 종으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 2016a). 그리고 *E. advenum*는 가막만 입구해역에 우점하는 종으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 2016b). C/N 비율 (평균 11.26) 분포를 보면, 북서해역 최외각에 위치한 정점 9번에서 18.50으로 매우 높고, 그 외의 해역에서는 8.58-10.87의 비율분포를 보인다 (Table 1). C/N은 유기물의 공급원을 추정하는 인자로 알려져 있다 (Muller 1977; Sampei and Matsumoto 2001). C/N 비율이 15 이상일 경우는 주로 육지기원, 5-6일 경우는 해양기원을 지시한다 (Twichell *et al.*, 2002). 따라서 *E. advenum*이 우점종으로 분포하는 평일도 북서 외각해역은 육지영향을 많이 받는 곳으로 특량만 입구해역에 해당된다. 그리고 *E. naraensis*가 우점하는 평일도, 척도 인접해역은 외해의 영향을 받는 해역으로 생각된다.

결론

약 20년간 전복양식 활동을 해온 완도군 평일도, 척도 해역에서 양식활동에 의한 유기물 집적은 두께 약 7-19 cm로 나타나나, 저서생태계 및 퇴적물 지화학조성에 대한 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그러나 평일도, 척도 인접해역에서는 퇴적물이 (평균 퇴적률 1.73 cm/year) 높게 나타나며, 외해의 영향을 반영하는 *E. naraensis*가 우점하고 (Fig. 6: Zone B), 평일도, 척도 북서해역에서는 퇴적률이 (평균 퇴적률 0.23 cm/year) 매우 낮으며, 유기물 공급에서 육지영향이 많음을 지시하는 높은 C/N 비율이 (정점 9번, 18.50) 나타나며, 만 입구해역에 우점하는 종으로 알려진 *E. advenum*이 우점, 분포한다 (Fig. 6: Zone A). 따라서 평일도, 척도 인접해역 양식장



Zone	Depth (m)	Sediment facies	Sediment rate (mm)	Foraminiferal assemblage	Habitat Environments	Remarks
A	about 15-30	sM-G	0.23	<i>E. advenum</i> - <i>A. ketienziensis</i> - <i>E. naraensis</i>	Entrance of bay	Abalone Farm: No. 2, 6, 8, 9 (since 2016)
B	about 5-10	M	1.40	<i>E. naraensis</i> - <i>A. ketienziensis</i> - <i>E. advenum</i>	Influence area of open sea	

Fig. 6. Synthesize comparison map based on the geochemical data and benthic foraminiferal assemblage in sea area between Pyeongil-do and Cheog-do.

에는 외해수 흐름 영향을 많이 받고, 북서 해역에서는 상대적으로 해수 흐름이 빠른 득량만 해수 흐름영향을 많이 받는 해역으로 생각된다. 이와 같이 양식장 해양환경이 다양한 퇴적환경의 영향을 받고 있는 것은 해안선이 복잡한 리아스식 해안 지형 특징에 기인하는 것이라고 생각된다. 동일한 양식식장 해역이라 할지라도, 두개 또는 다양한 퇴적환경이 공존할 수 있으므로 양식장 재배치를 수행하고자 할 때는 사전에 양식장 및 인접해역에 대한 퇴적환경 정보를 획득, 철저히 분석하여, 재배치 효과를 극대화 할 필요가 있는 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 국립수산물품질관리원 수산과학연구소 (R2020046) 및 2020년도 정부 (교육부) 의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2020R1I1A1A01071781) 입니다.

REFERENCES

- Alve, E. (1995) Benthic foraminifera response to estuarine pollution. A review. *Journal of Foraminiferal Research*, **25**: 190-203.
- Angel, D.L., Verghese, S., Lee, J.J., Saleh, A.M., Zuber, D., Lindell, D. and Symons, A. (2000) Impact of a net cage fish farm on the distribution of benthic foraminifera in the northern Gulf of Eilat (Aqaba, Red Sea). *Journal of Foraminiferal Research*, **30**: 54-65.
- Aguado-Giménez, F., Marín, A., Montoya, S., Marín-Guirao, L., Piedecausa, and A., García-García, B. (2007) Comparison between some procedures for monitoring offshore cageculture in western Mediterranean Sea: Sampling methods and impact indicators in soft substrata. *Aquaculture*, **271**: 357-370.
- Appleby, P.G. (2001) Chronostratigraphic techniques in recent sediments. *In*; Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Volume 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques. (ed. by Last, W.M., Smol, J.P.) pp. 171-203. Kluwer Academic, Dordrecht
- Appleby, P.G. and Oldfield, F. (1992) Applications of lead-210 to sedimentation studies. *In*; Uranium-Series Disequilibrium: Applications to Earth and Marine, and Environmental Problems. (ed. by Ivanovich, M. and Harmon, R.S.) pp. 731-778. Clarendon Press, Oxford.
- Berner R.A. and Raiswell R. (1984) C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *Geology*, **12**: 365-368
- Boyra, A., Sanchez-Jerez, P., Tuya, F., Espino. and Haroun, R. (2004) Attraction of wild coastal fishes to Atlantic subtropical cage fish farms, Gran Canaria, Canary Islands. *Environmental Biology of Fishes*, **704**: 393-401.
- Bouchet, V.M.P., Debenay, J.P., Sauriau, P.G., Radford-Knoery, J. and Soletchnik, P. (2007) Effects of short-term environmental disturbances on living benthic foraminifera during the Pacific oyster summer mortality in the Marennes-Oléron Bay (France). *Marine Environmental Research*, **64**: 358-383.
- Cao, L., Wang, W., Yang, Y., Yang, C., Yuan, Z. and Xiong, S. (2007) Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research*, **14**: 452-462.
- Choi, J.U., Lee, Y.G., Jeong, D.U., Choi, Y.H. and Woo, H.J. (2018) Effects of Abalone Farming Cage Removal on the Benthic Foraminiferal Assemblages. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, **85**: 321-325.
- Choi, Y.H., Seong, K.T., Ko, W.J., Park, M.W., Ku, J.H., Kim, D.W. and Lee, Y.G. (2014) Environmental characteristics of the abalone mariculture area. *In*; Aquaculture Europe 2014. pp. 254-255. Donostia-San Sebastián, Spain.
- Christensen, P.B., Vedel, A. and Kristensen, E. (2000) Carbon and nitrogen fluxes in sediment inhabited by suspension-feeding (*Nereis diversicolor*) and non-suspension-feeding (*N. virens*) polychaetes. *Marine Ecology Progress Series*, **192**: 203-217.
- Culver, S.J. and Buzas, M.A. (1995) The effects of anthropogenic habitat disturbance, habitat destruction, and global warming on shallow marine benthic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, **25**: 204-211.
- De Silva, S.S. and Davy, F.B. (2010) Success Stories in Asian Aquaculture. pp. 214, Springer, Dordrecht.
- Dolven, J.K., Alve, E., Rygg, B. and Magnusson, J. (2013) Defining past ecological status and in situ reference conditions using benthic foraminifera: A case study from Oslofjord, Norway. *Ecological Indicators*, **29**: 219-233.
- Ellis, A.M., Culver, S.J., Mallinson, D.J., Corbett, D.R., Leorri, E., Buzas, M.A. and Shazili, N.A.M. (2014) The influence of aquaculture on modern foraminifera and sediments in the Setiu estuary and lagoon, Terengganu, Malaysia: A spatial investigation. *Journal of Foraminiferal Research*, **44**: 390-415.
- Folk, R.L. and Ward, W. (1957) Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, **27**: 3-26.
- Gowen, R.J. and Bradbury, N.B. (1987) The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: A review. *In*; Oceanography and Marine Biology: An Annual Review 25 (ed. by Barnes, H.). pp. 563-575. Aberdeen University Press, Aberdeen.
- Hanisak, M.D. (1993) Nitrogen release from decomposing seaweeds: species and temperature effects. *Journal of Applied Phycology*, **5**: 175-181.

- Ingram, R.L. (1971) Sieve analysis. In: Procedures in Sedimentary Petrology. (ed. by Carver, R.E.). pp. 49-67. Wiley-Interscience, New York.
- Jeong, D.U., Wee, D.H., Choi, Y.H. and Lee, Y.G. (2019) Abalone farm activities and eutrophication of benthic foraminiferal assemblage (Bogildo, Wandogun). *Korean Journal Malacological*, **35**: 45-57.
- Jeong, D.U., Lee, Y.G., Kang, J., Woo, H.J. and Choi, Y.H. (2020) Sediment geochemistry and benthic foraminiferal response to fish farming after conversion from a Red Laver (seaweed) farm. *Journal of Coastal Research*, **36**: 559-574.
- Kalantzi, I. and Karakassis, I. (2006) Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine Pollution Bulletin*, **52**: 484-493.
- Kang, J.W., Lee, Y.G., Jeong, D.U., Lee, J.S., Choi, Y.H. and Shin, Y.K. (2015) Effect of abalone farming on sediment geochemistry in the shallow sea near Wando, South Korea. *Ocean Science Journal*, **50**: 669-682.
- Kim, B.M.N., Choi, A., An, S.U., Kim, H.C., Jung, R.H., Lee, W.C. and Hyun, J.H. (2011) Rates of Sulfate Reduction and Iron Reduction in the Sediment Associated with Abalone Aquaculture in the Southern Coastal Waters of Korea. *Ocean Polar Research*, **33**: 435-445.
- Kong, Y.S. and Lee, B.G. (1994) Surface sediment and suspended material in Deukryang Bay. *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, **29**: 269-277.
- Lee, Y.G., Jeong, D.U., Lee, J.S., Choi, Y.H. and Lee, M.K. (2016a) Effects of hypoxia caused by mussel farming on benthic foraminifera in semi-closed Gamak Bay, South Korea. *Marine Pollution Bulletin*, **109**: 566-581.
- Lee, Y.G., Choi, Y.H., Jeong, D.U., Lee, J.S., Kim, Y.W., Park, J.J. and Choi, J.U. (2016b) Effect of abalone farming on seawater movement and benthic foraminiferal assemblage of *Zostera marina* in the inner bay of Wando, South Korea. *Marine Pollution Bulletin*, **109**: 205-220.
- Lie, H.J. and Cho, C.H. (2002) Recent advances in understanding the circulation and hydrography of the East China Sea. *Fisheries Oceanography*, **11**: 318-328.
- MacArther, R.H. and MacArther, J.W. (1961) On bird species diversity. *Ecology*, **42**: 544-598.
- Muller, P.J. (1977) C/N ratios in Pacific deep-sea sediments; effect of organic ammonium and organic nitrogen compounds sorted by clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 756-776.
- Murray, J.W. (2006) Ecology and Applications of Benthic Foraminifera. pp. 426, Cambridge University Press, New York.
- Oh, H.J., Kim, S.H. and Moon, S.Y. (2008) The characteristics of phytoplankton community of cold water in the around sea of Wando in summer, 2005. *Journal of Environmental Science International*, **17**: 949-956.
- Park, J.H. (2005) Feces production rate (*Haliotis discus hannai*) fed *Undaria pinnatifida*. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **38**: 353-358.
- Pearson, T.H. and Black, K.D. (2001) The environmental impacts of marine fish cage culture. In: Environmental Impacts of Aquaculture. (ed. By Black, K.D.). pp. 1-31, Sheffield Academic Press, Sheffield.
- Pereira, P.M.F., Black, K.D., McLusky, D.S. and Nickell, T.D. (2004) Recovery of sediments after cessation of marine fish farm production. *Aquaculture*, **235**: 315-330.
- Pielou, E.C. (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, **13**: 131-144.
- Sampei, Y. and Matsumoto, E. (2001) C/N ratios in a sediment core from Nakaumi lagoon, southwest japan-usefulness as an organic source indicator. *Geochemical Journal*, **35**: 189-205.
- Schafer, C.T., Winters, G.V., Scott, D.B., Pocklington, P., Cole, F.E. and Honig, C. (1995) Survey of living foraminifera and polychaete populations at some Canadian aquaculture sites: potential for impact mapping and monitoring. *Journal of Foraminiferal Research*, **25**: 236-259.
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S. and Spezzaferri, S. (2012) The FOBIMO (FORaminiferal BIO-MONitoring) initiative-Towards a standardized protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, **94-95**: 1-13.
- Scott, D.B., Medioli, F.S. and Schafer, C.T. (2001) Monitoring in coastal environments using foraminifera and thecamoebian indicators. pp. 177, Cambridge University Press, Cambridge.
- Sen Gupta, B.K. (1999) Modern Foraminifera. pp. 371, Springer, Dordrecht.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1963) The mathematical theory of communication. pp. 177. University of Illinois Press, Urbana.
- Song, J.H. and Kim, H.Y. (2013) A Comparative Analysis on Business Performances of Abalone Sea-Cage Aquaculture in Wando Region. *Journal Fisheries and Marine Sciences Education*, **25**: 410-418.
- Tarasova, T.S. and Preobrazhenskaya, T.V. (2007) Benthic foraminifera at a scallop aquaculture site in Minonosok Bay, in Sea of Japan. *Russian Journal of Marine Biology*, **33**: 17-29.
- Thornberg, H.M., Culver, S.J., Corbett, R.C., Mallinson, D.J., Buzas, M.A. and Shazili, N.A.M. (2014) The influence of aquaculture on modern foraminifera and sediment in the Setiu estuary and lagoon, Terengganu, Malaysia: a temporal investigation. *Journal of Foraminiferal Research*, **44**: 365-389.
- Tsujimoto, A., Yasuhara, M., Nomura, R., Yamazaki, H., Sampei, Y., Hirose, K. and Yoshikawa, S. (2008)

- Development of modern benthic ecosystems in eutrophic coastal oceans: the foraminiferal record over the last 200years, Osaka Bay, Japan. *Marine Micropaleontology*, **69**: 225-239
- Twichell, S.C., Meyers, P.A. and Diester-Haass L. (2002) Significance of high C/N ratios in organic-carbon-rich Neogene sediments under the Benguela Current upwelling system. *Organic Geochemistry*, **33**: 715-722.
- Vidović, J., Cosović, V., Juracíc, M. and Petricioli, D. (2009) Impact of fish farming on foraminiferal community, Drvenik Veliki island, Adriatic Sea, Croatia. *Marine Pollution Bulletin*, **58**: 1297-1309.
- Vidović, J., Dolenc, M., Dolenc, T., Karamarko, V. and Zvab Rozic, P. (2014) Benthic foraminifera assemblages as elemental pollution bioindicator in marine sediments around fish farm (Vrgada Island, Central Adriatic, Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, **83**: 198-213.