

전복양식 활동과 저서성 유공충군집의 부영양화 현상 (완도군 보길도)

정다운¹, 위대환¹, 최양호², 이연규¹

¹전남대학교 해양기술학부, ²국립수산과학원 남해수산연구소

Abalone farm activities and eutrophication of benthic foraminiferal assemblage (Bogildo, Wandogun)

Da Un Jeong¹, Dae Hwan Wee¹, Yang Ho Choi² and Yeon Gyu Lee¹

¹Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

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

ABSTRACT

Geochemical as well as trace metal and benthic foraminiferal analyses of surface sediment conducted in an abalone farm to understand the degree to which the farm facilities installed along the channel sea affect the benthic environment and ecology. Surface sediment composed of a fine-grained mud sediments, had a total organic carbon and total nitrogen content of average 1.34% and 0.12%, respectively, which were lower value than the surrounding area. Dissolved oxygen with average 5.06 mg/L and ratio of carbon to sulfur with average 5.28 shown a good condition in the degree of oxygen saturation within sediment. In benthic foraminiferal assemblages, *Pseudoparrella naraensis*-*Eggerella advena*-*Cicides lobatulus* assemblage with very low abundant frequency and *E. advena* which are indicate a bed habitat condition and eutrophication, respectively, is broadly appeared in the centre area with many abalone farm facilities. These may be not related to the geochemical data of surface sediment but the distribution in the centre area of planktonic foraminifera with low abundant frequency indicating the very slow flow of seawater. Therefore, a bed habitat condition and eutrophication appeared in abalone farm between Bogildo and Soando may be caused by the very slow flow of seawater formed by many abalone farm facilities.

keywords: Abalone, Benthic foraminifera, Eutrophication, Wando

서 론

전 세계적으로 해양생태계는 몇 십 년에 걸친 도시팽창 및 산업 발전에 의해 많은 영향을 받아왔다. 이들 영향 중, 어류, 패류 등의 양식활동에서 만들어지는 먹이잔류물, 배설물들은 양식장 해역에 방출, 퇴적물에 집적됨에 따라 해양 부영양화 등 환경 문제뿐만 아니라 저서생태계에도 많은 영향을 미치는

것으로 알려져 있다 (Guo and Li, 2003; Yucel-Gier *et al.*, 2007; Mckindsey *et al.*, 2011; Vidovic *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2016a). 양식활동이 해양환경에 미치는 영향은 방출된 유기물, 영양분의 양 뿐만 아니라 양식장 주변해역의 해수유동, 파도, 잔차류 등 수리역학적 영향 또한 많이 받는 것으로 알려져 있다 (Aure *et al.*, 2007; Durate *et al.*, 2008; Stevens *et al.*, 2008; Strohmeier *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2016b).

1960 년대 이후, 저서성 유공충은 짧은 생존기간, 매우 높은 종다양성 및 환경변화에 대한 민감성 등으로 인해서 인간활동에 의한 해양환경 변화를 모니터링하는데 있어서 유용한 도구로 알려져 있다 (Zalesny, 1959; Resig, 1960; Watkins, 1961). 특히 양식장에서 나타나는 저서성 유공충 군집변화는 양식활동에 의해 유입된 biodeposits가 퇴적층에 축적됨에 발생 하는 것으로서, 이들에 대한 연구는 주로 다양한 어류양식장

Received: February 11, 2019; Revised: March 05, 2019;
Accepted: March 17, 2019

Corresponding author: Yeon Gyu Lee

Tel: +82 (61) 659-7143, e-mail: lyg6342@jnu.ac.kr
1225-3480/24721

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.

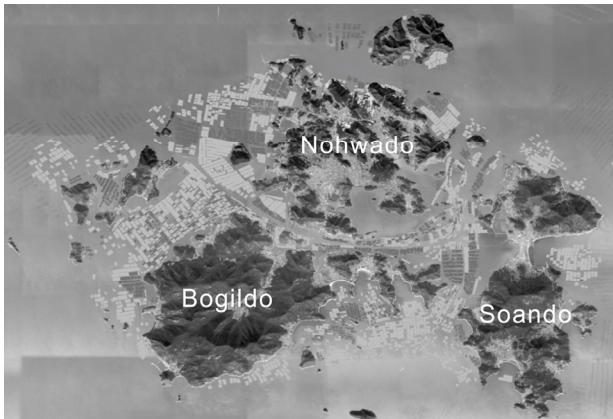


Fig. 1. Distribution map of abalone farm (dark gray color) and seaweed farm (white gray color) between Bogildo and Nohwado, Soando (modified from Choi *et al.*, 2014).

에서 많이 수행되어 왔으며 (Schafer *et al.*, 1995; Scott *et al.*, 1995; Angel *et al.*, 2000; La Rosa *et al.*, 2001; Kalantzi and Karakassis, 2006; Sutherland *et al.*, 2007; Vidovic *et al.*, 2009, 2014; Ellis *et al.*, 2014; Thornberg *et al.*, 2014) 전복, 굴 같은 패류 양식활동에 의한 영향은 많이 알려져 있지 않다.

국내 전복양식은 1960년대 국립수산과학원의 종묘생산 연구부터 시작되었으며, 2000년대에 들어 본격적인 생산이 시작되었다 (Song and Kim, 2013). 수산양식 생산량 중 전복은 2000년 20 톤에서 2011년 6,779 톤으로 10여 년간 급증하였으며, 총생산금액에서도 두 번째로 비중이 높은 13.4%로서 조피볼락, 김, 굴 등을 능가하게 되었다. 특히, 육상 수조식의 전복 양식 방법이 해상 가두리 양식 방법으로 교체되면서 전복양식은 빠르게 성장하기 시작하였으며, 해류의 흐름과 수온, 염분 그리고 퇴적물의 지화학적 성분 같은 기본정보가 매우 중요한 요인으로 인식되기 시작하였다 (Gowen and Bradbury, 1987; Christensen *et al.*, 2000; Pearson and Black, 2001).

완도는 우리나라 전복생산량의 93.1%를 차지하는 곳으로서 1990년 후반 이래로 전복생산지의 메카로 알려져 있다. 완도해역의 대표적 전복 생산지인 노화도, 보길도 및 소안도는 남해안의 대표적 지형이라 할 수 있는 반폐쇄적 내만과는 달리 육상에서 떨어져 있는 섬 지형이므로 육상기인 오염물질의 연안 체류시간 또는 영향이 짧고, 다양한 해류의 영향으로 해수교환이 원활하여 수질상태가 양호하다는 장점이 있기 때문에 이 지역에서 전복의 양식산업이 활발하게 이루어져 왔다. 그러나 완도 주변해역은 전복양식의 대형밀식 및 부적절한 운행으로 인해 조류소통이 원활하지 않고 폐사율 증가와 생산성 저하가 심각한 수준으로 (Fig. 1) (Choi *et al.*, 2014), 부영양화가 발생하며 어장환경 악화가 심화되고 있는 것으로 알려져 있다

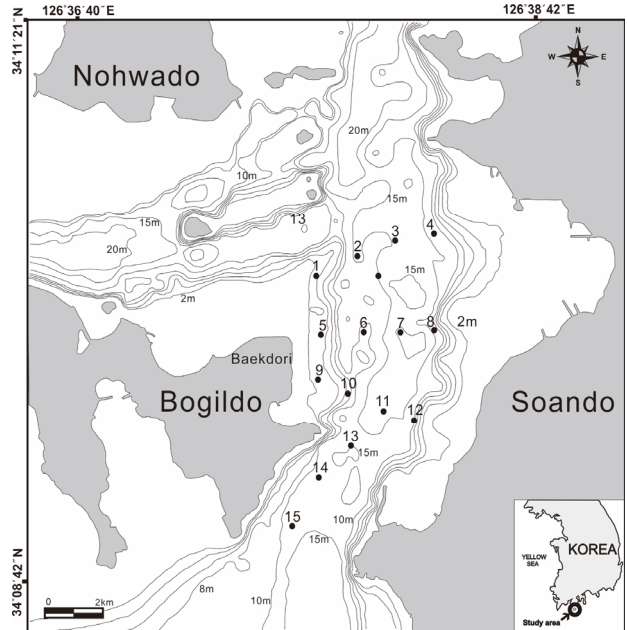


Fig. 2. Sampling station and bathymetry map of channel sea between Bogildo and Soando.

(Kim *et al.*, 2011, Kang *et al.*, 2015). 따라서 과밀된 전복 양식활동이 양식장 주변 해양환경에 미치는 영향에 대해 검토해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 전복양식이 과밀된 보길도 해역에서 저서성 유공충을 대상으로 전복양식 활동이 저서생태계에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이 연구를 위해서 전복 양식장 퇴적물의 지화학, 중금속 분석 및 저서성 유공충 군집 분석을 수행하였다.

연구지역

완도 해역은 우리나라 남서해에 위치하고, 수심은 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/L이며 (Oh *et al.*, 2008), 남해연안수, 대마난류, 황해 저층수 중국연안수 등의 영향으로 계절에 따라 매우 복잡한 해황이 형성된다 (Lie and Cho, 2002). 조석은 반일주조로 대조시 3.4 m, 소조시 2.5 m이며, 조류는 창조시에는 서쪽, 낙조시에는 동쪽 흐름이 우세하게 나타난다. 완도해역에서 전복 양식활동이 가장 활발하고, 우리나라 전복 생산량의 80% 정도를 차지하는 노화도, 보길도 및 소안도 지역은 섬과 섬 사이에 수심 약 20 m에 달하는 수로가 발달하고, 이들 해역에는 전복 및 해조류 양식장들이 매우 많이 복잡하게 분포하고 있다 (Fig. 1, 2). 본 연구지역은 면적이 약 32.98 km²이고 해안선의 길이는 약 41 km에 달하는 보길도 동측해안 지역으로서 소안도 사이에 남북 방향으로 수로가 형성되어 있

며 수심이 조간대 -20 m에 달하고, 많은 전복양식장이 분포하는 보길도와 소안도 사이의 해역이다 (Fig. 2).

재료 및 방법

1. 시료채취

전복양식장 퇴적물의 지화학 조성 및 저서성 유공충 종조성 및 군집특성을 파악하기 위해 보길면 백도리 앞 해역 15개의 정점 (Fig. 2) 에서 5월에 표층퇴적물을 채취하였다. 표층퇴적물은 채니기 (van Veen grab sampler) 를 이용하여 시료를 채취하였다. 표층퇴적물 시료는 채취 후 즉시 채니기 내의 교란 여부를 판단하였고, 갈색의 규조 매트로 최상부를 확인 후 플라스틱 스펀으로 퇴적물 표면에서 2 cm이내의 시료를 채취하여 플라스틱 백에 보관하였다. 표층 및 주상퇴적물 시료에서 입도 및 지화학적 특성과 중금속 함량 그리고 저서성 유공충군집 분석을 실시하였다.

2. 분석방법

1) 퇴적물 입도분석

퇴적물 시료는 Ingram (1971) 의 분석방법에 따라 0.1N 염산 (HCl)을 첨가하여 탄산염을 완전히 제거한 후, 10%의 과산화수소 (H_2O_2) 를 첨가하여 24시간 이상 반응시켜 유기물을 완전히 제거하였다. 탄산염과 유기물이 제거된 퇴적물은 4 ϕ (63 μ m) 체를 사용하여 습식체질 (wet sieving) 에 의해 조립질 퇴적물과 세립질 퇴적물로 분리하였다. 조립질 퇴적물은 건조기에서 건조시킨 후 표준체를 이용하여 건식체질 (dry sieving) 한 후 입도별로 무게를 측정하였다. 세립질 퇴적물은 응집현상 방지를 위하여 0.2% 헥사메타인산나트륨 용액 (sodium hexametaphosphate) 를 첨가한 후, X-ray 자동입도분석기 (Sedigraph[®] 5100) 로 등급별 백분율을 구하였다. 입도의 통계학적 분석은 조립질과 세립질 퇴적물의 입도 등급별 무게 백분율을 이용하여 Folk (1968) 의 방법에 따라 퇴적물의 입도조성, 퇴적상 (sediment facies), 평균입도 (mean grain size), 분급도 (sorting) 등을 분석하였다.

2) 퇴적물 원소분석

퇴적물의 지화학적 특성을 파악하기 위하여 강열감량 (Ignition Loss), pH, 총유기탄소 (TOC: Total Organic Carbon), 총질소 (TN: Total Nitrogen) 그리고 총황 (TS: Total Sulfur) 의 함량을 분석하였다. 원소분석은 동결건조되어 분말화된 퇴적물 시료를 PP Tube에 넣은 뒤 1N 염산 (HCl) 을 첨가하여 무기탄소를 제거하였다. 무기탄소를 제거한 퇴적물 시료는 건조기에서 다시 한 번 수분을 제거한 뒤 Elements analyzer (EA 1100) 를 이용하여 TOC (총유기탄

소), TN (총질소), TS (총황) 를 분석하였다. 그리고 총유기탄소, 총질소, 총황의 함량 분석결과를 이용하여 총질소의 총유기탄소 비율 (C/N) 그리고 총황의 총유기탄소의 비율 (C/S) 을 분석하였다.

강열감량 (Ignition Loss) 은 수분이 제거된 퇴적물을 전기로에서 550 $^{\circ}$ C로 4시간 동안 가열하여 가열 전 무게와 가열 후 무게의 차이를 이용하여 퇴적물 내 유기물 함량 (Organic matter content) 을 분석하였다. pH의 측정은 퇴적물의 상부층에서 pH spear (Eutech instruments) 를 이용하여 직접 측정하였다.

3) 퇴적물 중금속 분석

채취된 퇴적물 시료를 동결건조하여 분말화하여 수은 (Hg) 을 제외한 금속원소 (Al, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni, Cu, Co, As, Cd, Pb) 들은 건조기에서 105 $^{\circ}$ C로 다시 하루 동안 건조시켜 수분을 완전히 제거하였다. 이후 테플론 용기에서 시료 약 0.25 g에 혼합산 (HNO_3 : HF : $HClO_4$ = 3:1:1) 을 첨가 후 마이크로 가수분해장치 (Microwave Digestion System; IT/ETHOS Touch CONTROL) 에서 퇴적물을 분해하였다. 전처리가 끝난 퇴적물 시료는 초순수로 희석하여 유도결합 플라즈마 질량분석기 (ICP-MS, Inductively Coupled Plasma Optical Mass Spectrometry; Perkinelmer CA Nexion 300) 로 측정하였다.

수은 측정을 위해 분말화된 건조시료 약 20 mg을 테플론 용기에 넣고 질산 (HNO_3) 과 염산 (HCl) 을 첨가 후 가열판에서 120 $^{\circ}$ C로 4시간 가열하였다. 이후 가열한 시료를 냉각 및 정치하여 일정량의 시료를 채취하여 자동 수은 증기 발생 장치에서 수은 이온을 $SnCl_2$ 로 금속 수은으로 환원하여 금 포집 장치에 포집한 후 원자형광분광기 (Tekran 2500) 로 측정하였다 (Smith, 1993).

측정된 중금속의 검출한계는 각각 Al = 0.005 μ g/kg, Fe = 0.0003 μ g/kg, Mn = 0.00007 μ g/kg, Zn = 0.0003 μ g/kg, Cr = 0.0002 μ g/kg, Ni = 0.0004 μ g/kg, Cu = 0.0002 μ g/kg, Co = 0.0009 μ g/kg, As = 0.0006 μ g/kg, Cd = 0.00009 μ g/kg, Pb = 0.00004 μ g/kg, Hg = 0.0003 μ g/kg 이다.

절대적인 오염 평가를 위하여 미국 EPA의 퇴적물 내 중금속 가이드라인인 ER-L (Effect Range-Low) 및 ER-M (Effect Range-Median) 의 농도기준과 비교 하였다 (표 III-1). ER-L과 ER-M은 퇴적물 내 오염물질의 농도 증가가 생물에게 영향을 미치는 발생정도를 순서대로 나열하였을 때 각각 하위 10%와 50%에 해당하는 값이다 (Long *et al.*, 1995).

4) 퇴적물 용존산소 측정

퇴적물 내의 용존산소 (DO: Dissolved Oxygen) 는 현장에 서 퇴적물 시료를 채취하여 Picoammeter PA2000 (Oxygen Microsensor, Unisense A/S Company) 을 사용하여 퇴적물 표층 두께 1 mm 내에서 즉시 측정하였다.

5) 저서성 유공충 분석

저서성 유공충을 분석하기 위해 표층퇴적물 시료를 상부 1 cm에서 20 mL를 플라스틱 병에 담은 뒤 고정 및 보관을 위 해 Isoptopyl alcohol을 첨가하였다. 고정을 위한 Isoptopyl alcohol (1 L) 에는 살아있는 개체와 죽은 개체를 구별하기 위 하여 2 g의 로즈벵갈 (Rose bengal) 을 넣어 원형질을 착색하 였다 (Schönfeld *et al.*, 2012). 원형질 착색 후 4 ϕ (63 μ m) 의 표준체를 이용하여 로즈벵갈과 세립질 퇴적물을 제거한 뒤 남은 시료는 60°C 이하의 온도에서 건조시켰다. 건조된 시 료에 유공충이 300 개체 이상일 때는 미량분리기 (Microsplitter) 를 사용하여 시료를 분리한 후, 실체현미경 (SMZ1000, Nikon) 으로 유공충을 추출하였다. 유공충 동정 (classification) 은 도감과 문헌을 통하여 종을 확인하였다.

동정된 저서성 유공충의 특성을 알아보기 위하여 각의 성분 과 구조에 따라 사질 (agglutinated) 유공충과 석회질 유리상 (calcareous-hyaline) 유공충과 석회질 자기상 (calcareous-porcelaneous) 유공충으로 분류하여 각 산출비율을 계산하였 다. 부유성 유공충은 종 분류를 하지 않고, 부유성과 저서성 유 공충을 포함하는 전체 개체수로부터 차지하는 비율을 계산하 였다. 그리고 각 정점에서 산출하는 저서성 유공충의 출현종수 (S) 와 20 mL당 출현개체수를 구하였다. 종다양도 (species diversity) 와 균등도 (evenness) 를 정점별로 계산하였다. 종 다양도 측정공식은 Sahannon-Weaver information function (H') 를 사용하였다 (MacArther and MacArther, 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_i는 총출현개체수에 대한 i번째 종의 출현비율이다. 모든 개체가 같은 종에 속할 경우 최소값 0을 가지며, 모든 개체가 다른 종 으로 구성될 경우 종 다양도 H'는 lnS로 최대가 된다. 그러나 작은 수의 종이 거의 균등하게 배분되는 집단과 많은 종이 불 균등하게 배분되는 집단이 거의 비슷한 H' 값을 가지게 된다. 따라서 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 형태 를 가지는지 파악하기 위하여 군집분석 (cluster analysis) 을 실시하였다. 통계분석은 PRIMER 5.0 (Primer-E Ltd., Plymouth, United Kingdom) 을 이용하였다.

IBM SPSS, 피어슨 (Pearson) 상관계수를 이용하여 환경 요소 (입도조성, 지화학조성) 와 생물군집 (유공충 우점종) 사 이의 상관관계를 파악하기 위하여 다변량분석 (Multivariate analysis) 을 실시하였다. 상관관계를 이용하여 유사한 변수끼 리 묶어주는 주성분 분석 (Principal Component Analysis) 은 요인들의 다중공선성에 의한 문제를 해결 할 수 있는 베리 맥스 (Varimax) 회전을 이용하여 요인원인인 주성분을 구하 였다. 주성분에 대한 정점별 유사도를 알아보기 위해 주성분 분석결과 주성분1과 주성분2에 대한 회귀분석 (Regression Analysis) 을 실시하였다.

결 과

1. 표층퇴적물 원소분석

보길도 전복양식장 15개 정점의 표층퇴적물 입도조성을 보면 (Appendix 1), 자갈 함량은 0.00-1.29%로 정점 1번과 9번에서 만 미비하게 나타나고, 모래는 0.19-31.56% (평균 6.08%), 실 트는 34.12-47.83% (평균 39.86%), 점토는 31.90-63.66% (평 균 53.97%) 로서, 주로 실트와 점토의 세립질 퇴적물로 구성 되어 있다. 평균입도는 8.20 ϕ 이고, 분급은 평균 2.46 ϕ 로 매우 불량하게 나타났다. 퇴적상은 니질, 사니질 및 함력사질 니의 3개 퇴적상으로 구성되며, 사니질 및 함력사니질 퇴적상 은 보길도 인접 해안을 따라 분포하고, 니질퇴적상은 보길도와 소안도 사이해역 중앙부에 넓게 분포한다 (Fig. 3-A).

표층퇴적물의 pH와 DO 그리고 IL은 각각 6.96-7.64 (평균 7.22), 3.95-5.96 mg/L (평균 5.06 mg/L), 5.88-9.29% (평균 8.45%)의 범위를 나타냈다. DO는 전반적으로 연구해역 전역 에 걸쳐 5 mg/L 전후의 함량 분포를 보인다 (Fig. 3-B). TOC, TN, TS는 각각 1.13-1.96% (평균 1.34%), 0.09-0.14% (평균 0.12%), 0.22-0.40% (평균 0.26%) 함량 범위로 나타난다. TN은 연구해역의 북동쪽 (정점 4번: 0.13%) 에서 보길도 북동해안 (정점 5번: 0.09%) 으로 향하여 점진적 으로 낮아지는 경향을 보인다 (Fig. 3-C). C/N과 C/S 비율은 각각 10.63-15.97 (평균 11.65), 3.00-8.85 (평균 5.28)의 분 포 범위를 보이며, C/S는 보길도 북측 인접해안에서 다소 낮게 나타나나 그 외 해역은 전반적으로 5-6이상의 상대적으로 높 은 비율분포를 보인다 (Fig. 3-D).

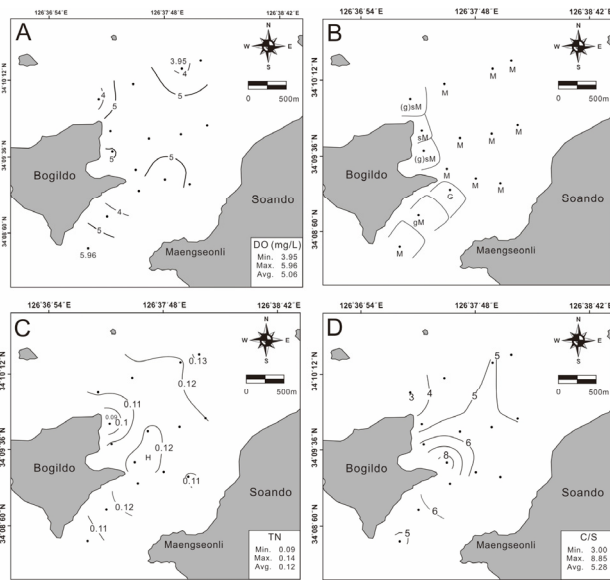


Fig. 3. Distribution map of dissolved oxygen (A: DO), sediment facies (B), total nitrogen (C: TN) and ratio of carbon to sulfur (D: C/S).

2. 표층퇴적물 중금속

보길도 전복양식장의 표층퇴적물 중금속 분석 결과 (Appendix 1), Al과 Fe의 농도범위는 각각 3.17-5.20% (평균 4.16%), 2.86-4.47% (평균 3.75%)이었고, Mn과 Co의 농도범위는 각각 307.36-502.13 mg/kg (평균 380.54 mg/kg), 6.44-9.82 mg/kg (평균 8.37 mg/kg) 으로 나타났다. Zn, Cr, Ni, Cu는 각각 54.95-85.04 mg/kg (평균 74.05 mg/kg), 31.79-48.75 mg/kg (평균 41.23 mg/kg), 16.44-26.01 mg/kg (평균 22.70 mg/kg), 8.60- 13.28 mg/kg (평균 11.52 mg/kg) 의 범위를 보였다. As, Cd, Pb, Hg는 각각 4.18-6.68 mg/kg (평균 5.28 mg/kg), 0.04-0.05 mg/kg (평균 0.04 mg/kg), 6.79-9.29 mg/kg (평균 8.16 mg/kg), 0.02-0.03 mg/kg (평균 0.03 mg/kg) 의 범위를 보였다. Ni는 정점 1번과 9번을 제외한 양식장 전지역에서 ER-L보다 높게 나타났다. Ni를 제외한 나머지 원소들은 모두 ER-L보다 낮았다.

3. 표층퇴적물 저서성 유공충 조성 및 군집

보길도 전복양식장 주변해역 표층퇴적물의 총 14개의 정점 (정점 13번: 암반 노출지) 에서 총 53속 72종 (사질 7종, 석회질-유리질 59종, 석회질-자기질 6종) 이 분류되었다 (Appendix 2). 퇴적물 20 mL 당 출현하는 개체수는 518-20,032개 (평균 5,173개) 로 정점 6 (518개) 과 정점 8 (816개) 에서 가장 낮은 산출빈도를 보였고, 정점 1 (20,032개) 에서 가장 높게 나타났다. 이들 산출빈도 분포를 보면 (Fig. 4-A), 연구해역 중앙부에서 약 1,000-3,000개 이하의 낮은 분포 범위를 보이나 보길도 해안을 향하여 개체수가 급격히 증가하는 형태를 보인다.

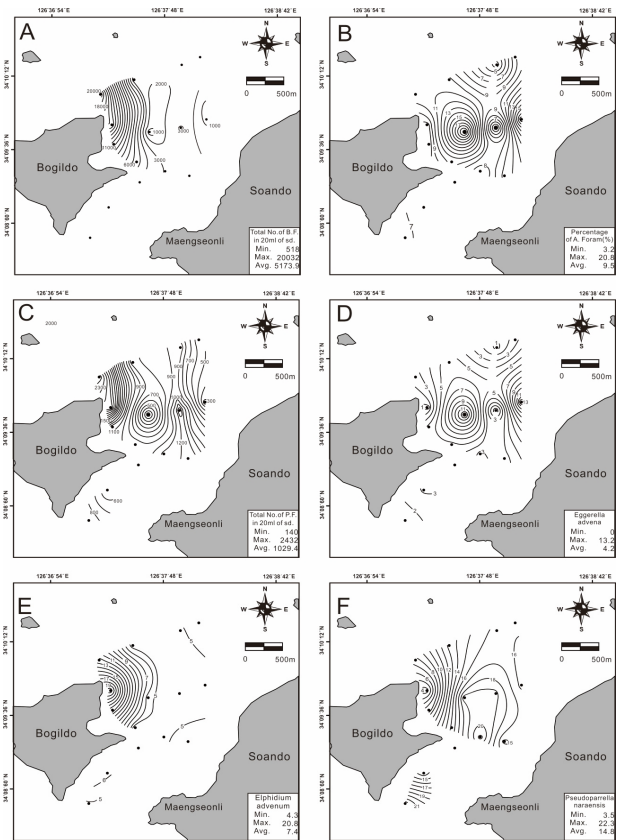


Fig. 4. Distribution map of total number of benthic foraminifera in 20 ml of sediment (A), percentage of agglutinated foraminifera (B), total number of planktonic foraminifera in 20 ml of sediment (C), abundance frequency of *Eggerella advena* (D), abundance frequency of *Elphidium advenum* (E) and abundance frequency of *Pseudoparrella naraensis* (F).

길도 해안을 향하여 개체수가 급격히 증가하는 형태를 보인다. 사질 유공충은 산출빈도 3.2%-20.8% (평균 9.5%) 의 범위를 가지며 정점 6 (20.8%) 과 8 (18.6%) 에서 높게 나타난다. 이들 분포를 보면 (Fig. 4-B), 중앙부 해역에서 높게 나타나는 경향을 보인다. 부유성 유공충 출현 개체수는 14개 정점에서 퇴적물 20 mL 당 140-2,432개 (평균 1029개) 로, 정점 6번 (140개) 과 8번 (272개) 에서 가장 낮고 정점 1번에서 가장 높게 나타나난다. 이들 분포를 보면 (Fig. 4-C), 연구해역 중앙부에서 300개 이하의 낮은 분포 범위를 보이나 보길도 해안을 향하여 개체수가 급격히 증가하는 형태를 보인다.

3.02-3.43의 분포 범위를 갖는 종다양도 지수는 평균 3.21로 연구해역 전역에 걸쳐 높게 나타나고 있다.

각 정점별 저서성유공충 우점종 (최소 1개 정점에서 산출빈도가 10% 이상인 종) 은, 정점 1은 *Elphidium advenum* (12.1%), 정점 2, 3, 4는 *Pseudoparrella naraensis*가 각각

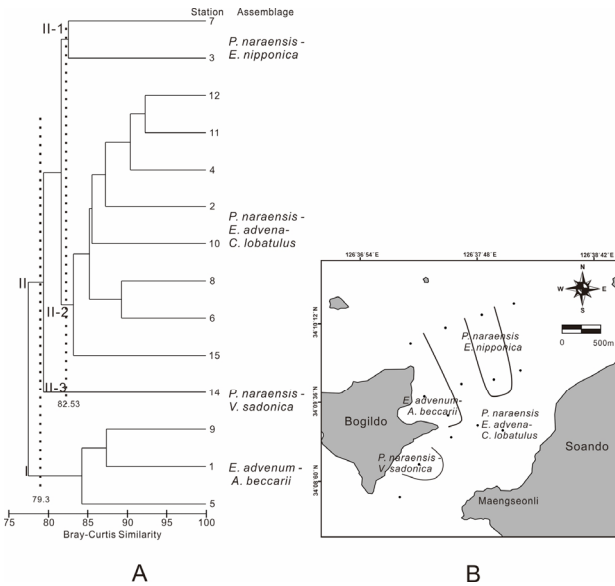


Fig. 5. Cluster analysis using Bray-Curtis similarity (A) and distribution map of benthic foraminiferal assemblage (B) in channel sea between Bogildo and Soando.

13.3%, 16.3%, 16.1%로 우점종으로 산출된다. 정점 5는 *Elphidium advenum* (20.8%), 정점 6은 *P. naraensis* (19.3%) 와 *eggerella advena* (13.1%) 가 우점종으로 산출된다. 정점 7의 우점종은 *P. naraensis* (19.1%), 정점 8은 *P. naraensis* (15.1%) 와 *E. advena* (13.2%) 이다. 정점 10, 11, 12, 14, 15에서는 모두 *P. naraensis* 만이 우점종으로 산출되며 그 비율은 15.2%, 21.1%, 15.8%, 13.3%, 22.3% 이다. 총 14개 정점에서 우점종은 *E. advena*, *E. advenum*, *P. naraensis* 3종이며 이들 분포를 보면 다음과 같다. *E. advena*는 연구해역 중앙부에서 높게 나타나고 (Fig. 4-D), *E. advenum*은 보길도 동측 해안에서 높게 분포하고 있다 (Fig. 4-E). 그리고 *P. naraensis* 는 보길도 동측 해안을 제외한 연구지역 전역에서 높게 나타나고 있다 (Fig. 4-F).

각 정점별 유공충 군집을 파악하기 위하여 각 정점별 1% 이상 산출종을 기준으로 각 정점간 cluster analysis를 실시하였다. 그 결과 유사도 79.3%에서 저서성 유공충 군집은 크게 2개의 그룹으로 구분되었다 (Fig. 5-A). 그룹 I은 정점1, 5, 9로 구성된 *E. advenum-A. beccarii* 군집이다. 그리고 그룹 II는 *P. naraensis*를 대표종으로 하는 그룹으로서, 유사도 82.53%에서 3개의 소군집 (II-1, 2, 3) 으로 세분된다, 그룹 II-1은 정점 3과 7로 구성된 *P. naraensis-E. nipponica* 군집, 그룹 II-2는 정점 2, 4, 6, 8, 10-12, 14, 15 정점으로 구성된 *P. naraensis-E. advena-C. lobatulus* 군집, 그룹 II-3은 정점 14에서 나타나는 *P. naraensis-Valvulineria sadonica* 군집이다. 각 군집들의 분포를 보면 (Fig. 5-B), 보

길도 동측 해안을 따라 *E. advenum-A. beccarii* 군집이 분포하고 중앙해역에는 일부 해역 (정점 3, 7) 에서 나타나는 *P. naraensis-E. nipponica* 군집을 제외하고, 대부분 해역에서 *P. naraensis-E. advena-C. lobatulus* 군집이 분포한다. 그리고 보길도 남서해안 정점 14에서만 *P. naraensis-Valvulineria sadonica* 군집이 분포한다.

고찰

본 연구지역에서 저서성 유공충 군집은 *E. advenum-A. beccarii* 군집, *P. naraensis-E. nipponica* 군집, *P. naraensis-E. advena-C. lobatulus* 군집, *P. naraensis-Valvulineria sadonica* 군집으로 대별된다. 이들 군집 분포를 보면 (Fig. 5-B), *E. advenum-A. beccarii* 군집은 보길도 동측해안 한정된 지역에서만 분포하고 있고, 대부분의 해역은 *P. naraensis*를 대표종으로 구성된 군집들이 분포하고 있다. 보길도 동측해안을 제외한 전 해역에서 높은 산출빈도를 보이는 (Fig. 4-F) *P. naraensis*는 주로 남해 연안, 해수흐름이 양호하고, 외해수의 영향을 받는 해역에 분포하는 종으로서 연구지역의 대표종으로 생각된다. 그러나 *P. naraensis* 구성 군집 중, 전복양식장이 폭넓게 분포하는 중앙부 해역에 주로 분포하는 *P. naraensis-E. advena-C. lobatulus* 군집의 *E. advena*는 *Trochammina hadai*와 함께 가막만 및 일본 오사카만의 부영양화를 지시하는 대표 종으로 알려져 있다 (Lee et al., 2012, 2016a; Tsujimoto et al., 2006, 2008). *E. advena*의 산출빈도는 중앙 해역 정점 6번과 8번에서 각각 13% 이상의 높은 분포를 보인다 (Fig. 4-D). 또한 이 지역은 저서성유공충 산출빈도가 가장 낮게 나타나는 지역이다 (Fig. 4-A). 일반적으로 저서생물의 서식환경을 판단하는데 있어서 군집통계지수 중 종다양도와 산출빈도지수가 유용한 것으로 알려져 있다 (Armynot du Châtelet et al., 2009). 본 연구지역에서 종다양도는 평균 3.21로서 전 해역에서 높게 나타나, 산출빈도 (평균 5,173개) 는 정점 6번과 8번에서만 518개 및 816개로 서 매우 낮게 나타나고 있다. 부영양화 지시종이 우점 분포하는 정점 6번과 8번이 분포하는 연구해역의 중앙부는 저서성 유공충 서식조건으로서 좋지 않은 것으로 생각된다.

연구해역 중앙부는 전복 양식장이 밀집된 지역으로서 표층 퇴적물은 주로 세립질의 니질퇴적물로 구성되어 있고, DO는 5 mg/L 전후이며 양호하게 나타나고 있다. 그리고 유기물의 양적 평가 기준이 되는 TOC, TN의 함량 (Armynot du Châtelet et al., 2009) 은 각각 평균 1.34%, 0.12%로 나타나며, 전복양식활동에 의해 퇴적물 오염이 심각하다고 알려진 노화도 미라리 전복 양식장 표층퇴적물의 TOC, TN 평균 1.35%, 0.25% (Kang et al., 2015), 잘포리 1.44%, 0.3%

(Lee *et al.*, 2016b) 보다 매우 낮게 나타나고 있다. 퇴적물내 유기물의 공급을 추정할 수 있는 C/N 수치는 (Twichell *et al.*, 2002; Tsujimoto *et al.*, 2008) 평균 11.65으로서 해양 기원으로 생각된다. 퇴적물내의 산소포화 정도를 가늠할 수 있는 C/S는 (Bernier and Raiswell, 1984) 중앙해역에서 5 이상의 수치 분포를 보이며 (Fig. 3-D), 양호한 상태를 보인다. 중금속 분석 결과에서 남해안 해양퇴적물에서 다소 높은 함량을 보이는 것으로 알려진 Ni (Lee *et al.*, 2016b) 를 제외한 나머지 원소들은 모두 ER-I보다 낮게 나타난다. 즉, 먹이로 미역 (*Undaria pinnatifida*) 를 공급하고, 습취량의 17.8-22.5%를 배설물로 배출하는 것으로 알려져 있는 (Park, 2005) 본 연구 지역의 전복양식장 퇴적물에 대한 지화학 분석 결과, 연구해역 중앙부에서 *P. naraensis*-*E. advena*-*C. lobatulus* 군집 분포에 의해 추정되는 부영양화 현상 및 저서생태 서식조건의 악화됨에 대한 계연성은 뚜렷이 나타나지 않고 있다. 일반적으로 어류 양식장에서는 퇴적물에 먹이 잔유물 및 배설물 등이 축적됨에 따라 퇴적물 조성이 변하고, 유기물 함량이 증가하며, 이에 따라 빈산소, 무산소가 형성되며 (Smaal, 1991; Grant *et al.*, 1995) 그리고 Zn, Cu 등의 중금속 함량이 증가하며 (Burridge *et al.*, 2010; Brooks and Mahnken, 2003; Dean *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2005), 결국 저서생태계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Kalantzi and Karakassis, 2006; Sutherland *et al.*, 2007; Vidovic *et al.*, 2009, 2014; Ellis *et al.*, 2014; Thornberg *et al.*, 2014).

부유성 유공충 산출빈도 분포를 보면 (Fig. 4-C), 중앙부 해역에서 산출빈도가 낮으며, 특히 정점 6번과 8번에서 뚜렷이 나타나고 있다. 일반적으로 외해수에서 많이 산출하는 부유성 유공충은 상대적인 산출빈도 비교에 따라서 유공충 군집에 대한 외해수의 영향 정도를 판단하는데 사용된다 (Uchio, 1962; Chiji and Lopez, 1968; Lee *et al.*, 2016a). 중앙부 해역은 정점 6번과 8번을 중심으로 외해수의 영향을 적게 받는 것으로 나타나고 있다. 즉, 외해에서 유입되는 해수공급이 원활하지 않음을 지시하는 것으로서 해수흐름이 주변해역에 비해 느리게 일어나고 있다는 것이다. Choi *et al.* (2014) 에 의하면, 수심 1 m, 3 m (cage 깊이) 에서 cage 외측 유속은 11 cm/sec, 19 cm/sec 이나, cage 내측 유속은 0.9 cm/sec, 1.1 cm/sec로서 가두리 양식장의 cage가 해수흐름을 방해하는 것으로 알려져 있다. 즉, 전복양식장이 밀집되어 분포하고 있는 보길도 동측 해역은 많은 전복 양식 활동으로 많은 biodeposits가 발생하나 가두리, cage에 의해 해수 흐름이 약해져 부영양화가 발생할 소지가 매우 높다. 남해안에서 대표적으로 부영양화 현상이 발생하는 것으로 알려진 가막막 북서 내만역에서도 매우 약한 해수흐름이 부영양화 원인의 하나로서 알려져 있다 (Park

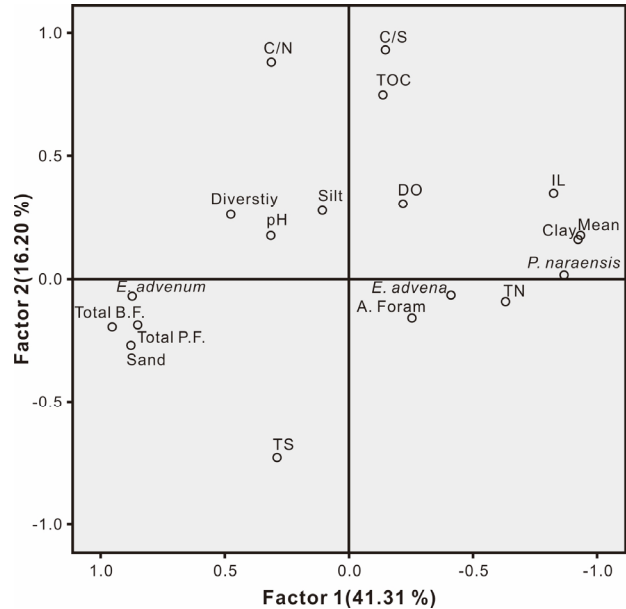


Fig. 6. A principal component analysis (PCA) ordination diagram based on selected geochemical parameters (grain size, dissolved oxygen (DO), total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total sulfur (TS), total organic carbon/total nitrogen (C/N), total organic carbon/total sulfur (C/S), IL (Ignition loss) and benthic foraminifera species (*eggerella advena*, *Elphidium advenum*, *Pseudoparrella naraensis*, total number of benthic foraminifera (Total B.F.), total number of planktonic foraminifera (Total P.F.), Agglutinated foraminifera (A. foram.)).

et al., 2017; Lee *et al.*, 2016a). 따라서 중앙부 해역에 분포하는 *P. naraensis*-*E. advena*-*C. lobatulus* 군집은 전복양식 활동과 매우 밀접한 관련성을 가진 군집으로 생각된다. PCA 분석에 의하면 (Fig. 6-A), *E. advena*는 사질유공충과 TN과는 positive 관계를 가지나 *E. advenum*, Total B.F.와 Total P.F.와는 negative 한 관계를 가진다. *P. naraensis*-*E. advena*-*C. lobatulus* 군집이 분포하는 중앙부해역은 전복양식 활동에 기인한 부영양화가 진행되고 있는 것으로 생각된다.

E. advenum-*A. beccarii* 군집은 보길도 동측해안의 한정된 지역 (정점 1, 5, 9) 에서 분포하고 있다. 이 군집의 *E. advenum*은 한국 연안 주요 서식종으로서 가막막 입구의 해수 유동이 좋은 니질퇴적물에 주로 많이 산출한다 (Lee *et al.*, 2016a). *Ammonia* 속은 태평양 연안 내만, 조간대 또는 기수역 등에 폭 넓게 분포하는 종으로서 (Hayward *et al.*, 2004; Murray, 2006), 특히 *A. beccarii*는 우리나라 경기만 및 아산만 (Chang and Lee, 1984; Woo and Lee, 2006) 및 남해 연안 (Lee *et al.*, 2016a, b) 에 널리 분포하는 것으로 알려져 있다. *E. advenum*-*A. beccarii* 군집은 해수흐름이 양호한 수

심이 낮은 남해연안의 일반적인 저서성 유공충군집이다. Choi *et al.* (2018) 에 의하면, 이 지역은 2015년 전복양식장 가두리 중 일부 이설된 곳으로서, 해수흐름이 좋아짐에 따라 퇴적물 입도조성은 사질의 함량이 증가하며, *E. advenum-P. naraensis* 군집이 분포하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 *E. advenum-A. beccarii* 군집으로 나타나는 것으로 보아, 이설 후 저서생태계가 좀 더 안정화되어 가고 있는 과정으로 보여진다. 양식장 가두리 이설 후 저서생태 환경이 회복하는데는 수년 간 소요될 수 있으므로 (Keeley *et al.*, 2014), 저서성 유공충 군집에 나타나는 양식장 이설 영향은 지속적인 모니터링이 필요할 것이라 생각된다.

결 론

전복 양식장이 밀식으로 분포, 운영되어 주변 해양환경에 변화를 초래하고 있는 완도해역에서 전복 양식 활동이 저서생태계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 보길도 해역 전복 양식장 저서성 유공충 군집을 대상으로 연구가 수행되었다. 그 결과, 보길도 동측 해안 일부를 제외하고 대부분 해역에서 *P. naraensis*를 대표종으로 하는 군집들이 분포하고 있다. 이들 군집 중 전복 양식장이 밀집된 중앙부 해역에 부영양화 지표종으로 알려진 *E. advena*를 우점종으로 하는 *P. naraensis-E. advena-C. lobatulus* 군집이 넓게 분포하고 있다. 그리고 중앙부해역은 저서성 유공충 산출빈도 분포도 매우 낮게 나타나 저서성 유공충 서식조건이 좋지 않은 것으로 생각된다. 전복 양식장 퇴적물에 대한 지화학 분석 결과 뚜렷한 상관성은 보이지 않으나, 외해수 영향을 반영하는 부유성 유공충 산출빈도에서 중앙해역이 상대적으로 매우 낮게 나타나고 있다. 이것은 중앙부 해역의 해수흐름이 느리다는 것을 지지하는 것으로서, 중앙부 해역에 밀집된 가두리에 기인된 것이다. 따라서 보길도와 소안도 사이 해역 저서성 유공충 군집에서 나타나는 부영양화 현상 및 저서생태조건이 나빠지고 있음은 밀식된 전복 가두리에 의한 느려진 해수흐름에 기인될 가능성이 매우 높을 것으로 생각된다. 그리고, 보길도 동측해안 한정된 지역에 분포하는 *E. advenum-A. beccarii* 군집은 남해해안에 분포하는 일반 군집으로서 전복양식장 가두리 이설 후 저서생태환경이 안정되어 가는 과정으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부 (과학기술정보통신부) 의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. NRF-2017R1A2B1006247).

REFERENCES

Armynot du Châtelet, E., Bout-Roumazielles, V., Riboulleau, A. and Trentesaux, A. (2009) Sediment (grain size and clay mineralogy) and organic matter quality control on living benthic foraminifera. *Revue de Micropaléontologie*, **52**: 75-84.

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 Eliat (Aqaba, Red Sea). *Journal of Foraminiferal Research*, **30**: 54-65.

Aure, J., Strohmeier, T. and Strand Ø. (2007) Modelling current speed and carrying capacity in long-line blue mussel (*Mytilus edulis*) farms. *Aquaculture Research*, **38**: 304-312.

Berber, R.A. and Raiswell, R. (1984) C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *Geology*, **12**: 365-368.

Brooks, K.M., Stierns, A.R. and Mahnken, C.V.W. (2003) Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farms. *Aquaculture*, **219**: 355-377.

Burridge, L., Weis, J.S., Cabello, F., Pizarro, J. and Bostick, K. (2010) Chemical use in salmon *Aquaculture*: A review of current practices and possible environmental effects. *Aquaculture*, **306**: 7-23.

Chang, S.K. and Lee, K.S. (1984) A study on the recent benthonic foraminifera of the intertidal flats of Asan Bay, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, **20**: 171-188.

Chiji, M. and Lopez, S.M. (1968) Regional foraminiferal assemblages in Tanabe Bay, Kii Peninsula, central Japan. *Publications of the Seto Marine Biological Laboratory*, **16**: 85-125.

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.

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.

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.

Dean, R.J., Shimmield, T.M. and Black, K.D. (2007) Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: An extensive survey. *Environmental Pollution*, **145**: 84-95.

Duarte, P., Labarta, U. and Fernández-Reiriz, M.J. (2008) Modelling local food depletion effects in mussel rafts of Galician rias. *Aquaculture*, **274**: 300-312.

- 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.
- Grant, J., Hatcher, A., Scott, D.B., Pocklington, P., Schafer, C.T. and Winters, G.V. (1995) A multidisciplinary approach to evaluating impacts of shellfish *Aquaculture* on benthic communities. *Estuaries*, **18**: 124-144.
- Guo, L.G. and Li, Z.J. (2003) Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China. *Aquaculture*, **226**: 202-212.
- Hayward, B.W., Sabaa, A. and Grenfell, H.R. (2004). Benthic foraminifera and the late Quaternary (last 150 ka) paleoceanographic and sedimentary history of the Bounty Trough, east of New Zealand. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **211**: 59-93.
- Ingram, R.L. (1971) Sieve analysis. *In*; *Procedures in Sedimentary Petrology*. (ed. by Carver, R.E.). pp. 49-67. Wiley-Interscience, New York.
- 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.
- Keely, N.B., Macleod, C.K., Hopkins, G.A. and Forrest, B.M. (2014) Spatial and temporal dynamics in macrobenthos during recovery from salmon farm induced organic enrichment: When is recovery complete?. *Marine Pollution Bulletin*, **80**: 250-262.
- 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.
- La Rosa, T., Mirto, S., Mazzola, A. and Danovaro, R. (2001) Differential responses of benthic microbes and meiofauna to fish-farm disturbance in coastal sediments. *Environmental Pollution*, **112**: 427-434.
- Lee, Y.G., Jeong, D.U., Kang, S.R., Kim, Y.W., Kim, S., Jung, E.H. and Lee, J.S. (2012) The Formation of Hypoxia Sediment and Benthic Foraminiferal Change in Gamak Bay, Southern Coast of Korea. *Ocean Polar Research*, **34**: 53-64.
- 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.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L. and Calder, F.D. (1995) Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, **19**: 81-97.
- MacArther, R.H. and MacArther, J.W. (1961) On bird species diversity. *Ecology*, **42**: 544-598.
- McKindsey, C.W., Archambault, P., Callier, M.D. and Olivier, F. (2011) Influence of suspended and off-bottom mussel culture on the sea bottom and benthic habitats: a review. *Canadian Journal of Zoology*, **89**: 622-646.
- Murray, J.W. (2006) *Ecology and Application 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, H.N., Jeong, D.U., Park, C.M., Choi, J.U., Lee, J.S., and Lee, Y.G. (2017) Hypoxia and Benthic Foraminiferal Assemblage of Spring Season in Gamak Bay. *The Korean Journal of Malacology*, **33**: 93-106.
- Park, J.H. (2005) Feces production rate of abalone (*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.
- Pielou, E.C. (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, **13**: 131-144.
- Resig, J.M. (1960) Foraminiferal ecology around ocean outfalls off southern California. *In*; *Proceedings of the First International conference on Waste Disposal*

- in the Marine Environment. (ed. by Pearson, E.A.). pp. 104-121. Pergamon Press, London.
- Schafer, C.T., Winters, G.V., Scott, D.B., Pocklington, P., Cole, F.E. and Honig, C. (1995) Survey of living foraminifera and polychaete population at some Canadian *Aquaculture* sites. *Journal of Foraminiferal Research*, **25**: 236-259.
- Scott, D.B., Schafer, C.T., Honig, C. and Younger, D.C. (1995) Temporal variations of benthic foraminiferal assemblages under or near *Aquaculture* operations: documentation of impact history. *Journal of Foraminiferal Research*, **25**: 224-235.
- 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.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1963) The mathematical theory of communication. pp. 177. University of Illinois Press, Urbana.
- Smaal, A.C. (1991) The ecology and cultivation of mussels: New advances. *Aquaculture*, **94**: 245-261.
- Smith, J.N., Yeats, P.A. and Milligan, T.G. (2005) Sediment geochronologies for fish farm contaminant in Lime Kiln Bay, Bay of Fundy. *In*: Environmental Effects of Marine Finfish *Aquaculture*. (ed. by Hargrave, B.T.). pp. 221-238. Springer, Berlin.
- Smith, R.G. (1993) Determination of mercury in environmental samples by isotope dilution/ICPMS. *Analytical Chemistry*, **65**: 2485-2488.
- 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.
- Stevens, C., Plew, D., Hartstein, N. and Fredriksson, D. (2008) The physics of open-water shellfish *Aquaculture*. *Aquacultural Engineering*, **38**: 145-160.
- Strohmeier, T., Duinker, A., Strand, O. and Aure, J. (2008) Temporal and spatial variation in food availability and meat ratio in a longline mussel farm (*Mytilus edulis*). *Aquaculture*, **276**: 83-90.
- Sutherland, T.F., Levings, C.D., Petersen, S.A., Poon, P. and Piercey, B. (2007). The use of meiofauna as an indicator of benthic organic enrichment associated with salmonid *Aquaculture*. *Marine Pollution Bulletin*, **54**: 1249-1261.
- 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 sediments in the Setiu estuary and lagoon, Terengganu, Malaysia: a temporal investigation. *Journal of Foraminiferal Research*, **44**: 365-389.
- Tsujimoto, A., Nomura, R., Yasuhara, M., Yamazaki, H. and Yoshikawa, S. (2006) Impact of eutrophication on shallow marine benthic foraminifera over the last 150 years in Osaka Bay, Japan. *Marine Micropaleontology*, **60**: 258-268.
- 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 200 years, Osaka Bay, Japan. *Marine Micropaleontology*, **69**: 225-239.
- Twichell, S.C., Meyers, P.A., 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.
- Uchio, T. (1962) Influence of the river Shinano on foraminifera and sediment grain distribution. *Publications of the Seto Marine Biological Laboratory*, **10**: 363-393.
- Vidovic, J., Cosovic, V., Juracic, M. and Petricioli D. (2009) Impact of fish farming on foraminiferal community, Drvenik Veliki island, Adriatic Sea, Croatia. *Marine Pollution Bulletin*, **58**: 1297-1309.
- Vidovic, J., Dolenc, M., Dolenc, T., Karamarko, V., 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.
- Watkins, J.G. (1961) Foraminiferal ecology around the Orange County, California, ocean sewer outfall. *Micropaleontology*, **7**: 199-206.
- Woo, H.J. and Lee, Y.G. (2006) Foraminiferal characteristics in the Ganghwa tidal flat. *Journal of Wetlands Research*, **8**: 51-65.
- Yucel-Gier, G., Kucuksezgin, F. and Kocak, F. (2007) Effects of fish farming on nutrients and benthic community structure in the Eastern Aegean (Turkey). *Aquaculture Research*, **38**: 256-267.
- Zalesny, E.R. (1959) Foraminiferal ecology of Santa Monica bay, California. *Micropaleontology*, **5**: 101-126.

Appendix 1. Numbers, relative abundance (%), and statistic data for benthic foraminifera from surface sediment of channel sea between Bogildo and Soando.

Station	Heavy Metal Content (mg/kg)											
	Al(%)	Fe(%)	Mn	Zn	Cr	Ni	Cu	Co	As	Cd	Pb	Hg
1	3.54	3.12	307.36	61.86	37.19	19.49	8.97	7.16	4.75	0.05	7.78	0.02
2	4.82	4.17	394.92	82.83	46.50	25.22	12.87	9.72	5.57	0.04	9.29	0.03
3	5.20	4.47	501.47	85.04	48.75	25.83	12.91	9.70	6.66	0.04	8.80	0.03
4	4.42	3.87	368.07	81.96	45.82	25.03	13.21	8.66	4.98	0.05	8.24	0.03
5	4.13	3.83	390.71	72.96	41.77	22.12	11.04	8.69	6.05	0.04	8.10	0.03
6	4.08	3.69	352.83	74.15	41.60	23.37	11.11	8.35	5.09	0.04	7.95	0.03
7	4.69	4.21	381.60	82.87	44.85	24.63	12.82	9.20	5.09	0.05	8.55	0.03
8	4.60	4.24	502.13	83.88	47.24	26.01	13.28	9.82	6.68	0.04	9.13	0.03
9	3.17	2.86	325.26	54.95	31.79	16.44	8.60	6.44	4.68	0.04	6.79	0.03
10	3.87	3.46	351.60	65.87	33.99	20.99	10.07	7.26	4.80	0.04	7.32	0.03
11	3.96	3.60	319.88	72.97	39.71	22.28	11.95	7.96	4.18	0.04	8.05	0.03
12	3.81	3.51	331.39	70.21	38.04	21.16	11.34	7.64	4.83	0.04	8.09	0.03
13	Rocky Bottom											
14	3.70	3.57	359.68	69.28	38.07	21.79	10.94	7.95	4.65	0.04	7.72	0.03
15	4.25	3.92	440.72	77.87	41.89	23.39	12.13	8.62	5.86	0.04	8.44	0.03
Min.	3.17	2.86	307.36	54.95	31.79	16.44	8.60	6.44	4.18	0.04	6.79	0.02
Max.	5.20	4.47	502.13	85.04	48.75	26.01	13.28	9.82	6.68	0.05	9.29	0.03
Avg.	4.16	3.75	380.54	74.05	41.23	22.70	11.52	8.37	5.28	0.04	8.16	0.03
ER-L	N/A	N/A	N/A	150.00	81.00	20.90	34.00	N/A	8.20	1.20	46.70	0.15
ER-M	N/A	N/A	N/A	410.00	370.00	51.60	270.00	N/A	70.00	9.60	218.00	0.71

Station	Sediment Composition(%)				Sedi. Type	Sta. Para.	pH	DO (mg/L)	Elementary Analysis (%)						
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mean (φ)			Sorting (φ)	IL	TOC	TN	TS	C/N	C/S
1	0.02	31.56	36.52	31.9	(g)sM	6.41	2.91	6.96	3.98	5.88	1.19	0.11	0.40	10.64	3.00
2	0.00	1.13	38.61	60.25	M	8.60	2.21	7.01	5.95	8.91	1.34	0.12	0.28	11.23	4.84
3	0.00	0.99	37.52	61.49	M	8.65	2.18	7.04	3.95	9.06	1.26	0.12	0.25	10.71	5.06
4	0.00	0.43	40.55	59.02	M	8.56	2.27	7.3	4.83	8.32	1.45	0.14	0.34	10.75	4.23
5	0.00	13.94	40.53	45.53	sM	7.53	2.89	7.64	5.64	7.48	1.13	0.09	0.26	12.95	4.37
6	0.00	4.09	34.12	61.79	M	8.82	2.45	7.26	5.34	8.51	1.30	0.12	0.24	10.63	5.36
7	0.00	1.29	41.3	57.42	M	8.47	2.32	7.09	5.48	8.19	1.29	0.12	0.25	11.13	5.12
8	0.00	0.33	36.01	63.66	M	8.96	2.26	7.5	5.74	8.94	1.30	0.12	0.26	10.82	4.97
9	1.29	24.36	40.35	33.99	(g)sM	6.69	3.18	7.62	4.92	7.37	1.36	0.11	0.22	12.13	6.29
10	0.00	4.3	37.68	58.02	M	8.41	2.40	7.13	5.58	8.42	1.96	0.12	0.22	15.97	8.85
11	0.00	0.46	44.82	54.72	M	8.24	2.19	7.14	4.03	8.89	1.35	0.12	0.25	11.32	5.48
12	0.00	1.56	47.83	50.61	M	8.15	2.50	7.18	5.13	9.07	1.28	0.11	0.23	11.73	5.66
13	Rocky Bottom														
14	0.00	0.45	43.88	55.67	M	8.49	2.32	7.13	4.28	9.21	1.33	0.11	0.23	11.87	5.70
15	0	0.19	38.33	61.48	M	8.85	2.34	7.04	5.96	9.16	1.22	0.11	0.25	11.21	4.95
Min.	0.00	0.19	34.12	31.90		6.41	2.18	6.96	3.95	5.88	1.13	0.09	0.22	10.63	3.00
Max.	1.29	31.56	47.83	63.66		8.96	3.18	7.64	5.96	9.21	1.96	0.14	0.40	15.97	8.85
Avg.	0.09	6.08	39.86	53.97		8.20	2.46	7.22	5.06	8.39	1.34	0.12	0.26	11.65	5.28

Appendix 2. Trace metal, grain-size composition and geochemistry analysis (DO, pH, IL, TOC, TN, TS, C/N and C/S) of surface sediment in channel sea between Bogildo and Soando. Note, dissolved oxygen (DO), total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total sulfur (TS), total organic carbon/total nitrogen (C/N), total organic carbon/total sulfur (C/S), IL (ignition loss).

Species Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15
Agglutinated Foraminifera														
<i>Ammobaculites agglutinans</i>	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Ammobaculites cubensis</i>	2.9	0.7	0.0	0.0	1.2	1.5	0.0	0.5	0.0	0.9	0.5	1.6	0.4	0.0
<i>Eggerella advena</i>	2.6	5.8	0.7	2.6	0.8	13.1	0.0	13.2	4.2	4.6	2.9	3.6	3.1	1.4
<i>Gaudryina</i> sp.	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Textularia mariae</i>	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.3	0.5	0.8	0.4	0.0
<i>Textularia oceanica</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Trochammina hadai</i>	4.5	2.5	2.7	5.9	5.8	6.2	2.1	4.9	2.5	3.4	2.9	4.4	3.5	5.5
C.-H. Foram														
<i>Ammonia beccarii</i>	8.0	2.5	0.0	2.0	8.8	2.3	2.1	1.5	9.6	4.3	1.6	2.2	0.4	1.4
<i>Ammonia ketienziensis</i>	7.7	3.6	6.8	4.3	4.6	3.5	4.8	3.4	6.5	3.4	4.0	4.1	2.0	3.6
<i>Anomalina</i> sp.	0.3	1.1	0.0	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	0.9
<i>Astrononion italicum</i>	4.5	6.5	4.8	7.2	3.8	4.2	5.9	3.4	3.4	4.6	6.4	7.1	2.0	3.2
<i>Bolivina alata</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Bolivina robusta</i>	7.0	5.4	6.8	4.3	3.8	4.2	2.1	6.9	5.6	6.3	5.9	6.0	5.5	5.5
<i>Bolivina seminuda</i>	0.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1.2	0.9
<i>Bolivina spathulata</i>	0.6	3.6	2.7	1.3	0.0	0.0	1.6	0.5	2.5	1.1	1.3	1.6	2.4	0.9
<i>Bolivina striatula</i>	1.0	0.0	2.0	1.0	1.5	1.9	0.0	1.0	1.4	0.9	1.1	1.4	0.0	0.5
<i>Buccella frigida</i>	2.6	1.1	3.4	1.3	2.3	0.4	0.0	1.0	2.8	0.3	0.8	1.4	0.8	2.3
<i>Bulimina marginata</i>	1.3	1.8	0.0	1.0	0.8	0.8	0.0	1.0	1.4	0.6	0.3	1.6	3.5	4.1
<i>Cancris auriculus</i>	0.0	0.7	0.7	0.3	1.5	1.2	0.0	1.5	0.8	0.3	1.1	0.8	1.2	0.5
<i>Cassidulina neocarinata</i>	1.0	2.2	3.4	1.3	1.2	1.2	4.3	1.5	0.6	0.6	4.0	4.1	0.4	5.5
<i>Cibicides lobatulus</i>	6.4	4.0	4.8	4.6	6.2	3.9	4.8	7.8	4.8	5.7	7.8	6.6	3.1	5.5
<i>Eilohedra nipponica</i>	2.2	5.4	8.2	3.6	1.5	5.8	9.0	7.4	3.9	2.6	7.2	8.2	4.7	5.0
<i>Elphidium advenum</i>	12.1	4.3	4.8	5.9	20.8	5.4	4.3	4.9	14.1	4.9	4.8	5.7	6.3	5.0
<i>Elphidium crispum</i>	0.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Elphidium excavatum</i>	5.8	3.2	1.4	1.6	3.8	2.3	2.1	2.5	3.4	2.3	1.9	1.9	2.0	0.9
<i>Elphidium somaense</i>	0.6	2.2	2.7	3.3	1.2	1.9	2.1	1.0	2.3	2.9	2.4	3.0	3.5	1.4
<i>Elphidium subarcticum</i>	2.6	1.1	4.1	2.0	1.9	3.5	1.6	1.0	1.1	4.0	1.9	1.1	2.0	0.9
<i>Elphidium subincertum</i>	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6	0.3	0.0	0.3	0.0	0.5
<i>Eponides cribrorepandus</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Favulina melo</i>	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
<i>Fissurina laevigata</i>	0.6	0.7	0.7	1.3	1.2	0.0	0.5	0.0	0.8	1.7	0.3	0.3	1.6	1.4
<i>Fissurina marginata</i>	0.3	0.4	0.0	1.6	0.4	0.4	1.6	0.0	0.6	0.6	0.8	1.4	2.0	0.5
<i>Fursenkoina</i> sp.	0.6	0.7	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Globocassidulina subglobosa</i>	1.6	1.8	4.1	1.3	0.0	1.9	1.6	2.5	0.3	0.9	0.8	1.4	1.6	0.9
<i>Gyroidinoides cushmani</i>	0.6	1.1	0.0	1.0	0.0	0.0	2.1	1.5	0.8	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5
<i>Gyroidinoides nipponicus</i>	0.0	0.7	0.0	0.7	0.8	1.2	0.5	0.5	0.0	0.3	0.8	0.8	0.8	0.9
<i>Hanzawaia nipponica</i>	0.6	0.4	2.0	0.3	0.8	1.5	0.5	0.5	0.6	0.9	0.3	0.0	0.4	0.9
<i>Hoeglundina elegans</i>	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.3	0.0	0.0
<i>Homalohedra acuticosta</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Hyalinea</i> sp.	0.6	1.8	0.7	2.0	0.4	0.0	1.6	0.5	0.3	0.9	1.3	0.3	0.0	0.9

<i>Islandiella japonica</i>	0.0	0.0	0.7	0.3	0.0	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	1.3	0.0	1.6	0.0
<i>Lagena hispidula</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
<i>Lagena striata</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Lenticulina</i> sp.	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Murreynella</i> sp.	2.2	1.4	0.0	0.0	2.7	0.0	0.5	0.0	1.4	0.3	1.1	0.3	1.2	0.5
<i>Neoeponides</i> sp.	0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0
<i>Nonionella stella</i>	1.3	0.4	0.0	0.7	0.0	1.2	0.5	0.0	0.3	0.6	0.0	0.3	3.5	0.0
<i>Nonion japonicum</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Nonionoides turgida</i>	0.0	0.7	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Paracassidulina sagamiensis</i>	0.3	0.4	1.4	1.0	0.4	0.0	2.1	1.0	0.8	0.6	1.3	1.1	1.2	3.6
<i>Pararotalia nipponica</i>	0.3	0.0	0.7	0.7	0.8	0.4	0.5	0.5	0.0	7.2	1.3	0.0	3.1	0.0
<i>Pararotalia</i> sp.	0.0	0.7	0.0	0.0	0.8	1.2	0.5	0.0	0.6	0.6	1.1	0.3	0.4	0.5
<i>Pseudoeponides japonicus</i>	0.6	0.7	0.7	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.3	1.1	0.8	0.4	0.9
<i>Pseudorotalia gaimardii</i>	1.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.4	0.0	0.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Pseudononion japonicum</i>	0.3	0.0	0.0	0.7	1.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Pseudoparrella naraensis</i>	7.7	13.3	16.3	16.1	3.5	19.3	19.1	15.7	7.9	15.2	21.1	15.8	13.3	22.3
<i>Pullenia quinqueloba</i>	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0
<i>Rectobolivina raphana</i>	1.0	0.4	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0
<i>Rosalina bradyi</i>	0.6	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
<i>Rosalina globularis</i>	1.0	5.4	5.4	7.2	3.1	2.3	8.5	5.4	1.4	4.9	3.5	3.8	2.4	6.8
<i>Rosalina vilardeboana</i>	0.3	1.4	0.7	2.3	1.5	1.9	2.1	2.0	1.1	2.0	0.8	1.4	1.6	2.3
<i>Siphogenerina</i> sp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
<i>Siphovigerina proboscidea</i>	0.0	1.8	0.7	2.3	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.8	0.0
<i>Uvigerinella glabra</i>	0.6	1.1	0.7	0.7	0.8	0.0	0.5	0.0	1.1	0.6	0.3	0.0	3.1	0.9
<i>Uvigerina nitidula</i>	0.0	0.0	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0
<i>Valvulineria sadonica</i>	0.3	1.4	0.7	0.7	1.2	0.0	2.1	0.0	0.6	0.6	0.5	0.5	7.8	0.9
C.-P. Foram														
<i>Miliolinella</i> sp.	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4	0.0	1.1	0.5	0.3	0.3	0.0	0.0	0.4	0.0
<i>Quinqueloculina lamareckiana</i>	0.0	0.7	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
<i>Quinqueloculina seminula</i>	0.0	1.1	0.7	0.3	0.4	1.2	1.1	1.0	1.1	2.0	0.3	0.5	1.6	0.5
<i>Quinqueloculina</i> sp.	0.0	0.0	1.4	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
<i>Sigmoilopsis</i> sp.	1.3	0.0	0.7	0.3	0.8	0.8	2.7	0.5	0.6	0.9	0.3	0.3	0.4	0.0
<i>Spiroloculina</i> sp.	0.3	0.0	0.7	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Total No. of Benthic Foram	313	278	147	304	260	259	188	204	355	348	374	366	255	220
Species Number S	47	49	35	48	48	36	38	37	50	53	45	44	47	38
Percentage of A. Foram	10.9	10.1	3.4	8.9	7.7	20.8	3.2	18.6	7.9	10.1	7.0	10.4	7.5	6.8
Percentage of C.-H. Foram	87.5	87.8	93.2	90.1	89.2	76.4	92.0	79.4	88.7	86.5	92.5	88.3	89.8	92.7
Percentage of C.-P. Foram	1.6	2.2	3.4	1.0	3.1	2.7	4.8	2.0	3.4	3.4	0.5	1.4	2.7	0.5
Total No. of Planktic Foram	38	99	58	131	33	70	82	68	37	61	138	155	127	111
Species Diversity H(s)	3.25	3.43	3.11	3.31	3.23	3.03	3.11	3.02	3.31	3.32	3.13	3.20	3.40	3.05
Equitability E	0.84	0.88	0.88	0.85	0.83	0.84	0.86	0.84	0.85	0.84	0.82	0.84	0.88	0.84
Total No. of B. F. in 20ml of sd.	20032	2224	2352	1216	16640	518	3008	816	11360	5568	2992	2928	1020	1760
Total No. of P. F. in 20ml of sd.	2432	792	928	524	2112	140	1312	272	1184	976	1104	1240	508	888

A. = Agglutinated, C.-H. = Calcareous-Hyaline, C.-P. = Calcareous-Porcelaneous, B. F. = Benthic Foraminifera, P. F. = Planktic Foraminifera, sd. = sediments

