

거제만 패류양식해역의 퇴적물 특성

김재훈¹, 조상만², 정우건³

¹한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터, ²군산대학교 해양생명응용과학부,
³경상대학교 해양식품생명의학과

Characteristics of Sediment Environment in Geojeman Bay Shellfish Farms

Jae-Hoon KIM¹, Sang-Man CHO² and Woo-Geon JEONG³

¹Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea,

²Department of Aquaculture and Aquatic Science, Kunsan National University, Deahak-ro 558, Gunsan 54150, Korea

³Department of Seafood and Aquaculture Science, Gyeongsang National University, Chonchideaguk-gil 38 Tongyeong 53064, Korea

ABSTRACT

The Organic matter and trace metal contents and trace metal contents of sediments and their pollution levels at 9 stations were investigated in order to characterize sediment environment characteristics in the Geojeman Bay shellfish farming waters. The grain size of the surrounding sediments of the Geojeman Bay shellfish farm was in the order of mud in all samples. Clay contents ranged from 20.75-28.14% (24.15%), and the silt content 71.87-79.24% (75.85%). Ignition loss (IL) was in the range of 7.7-9.9% ($9.2 \pm 0.64\%$). Chemical oxygen demand (COD) was in the range of 17.9-26.6 mgO₂/g (21.6 ± 2.52 mgO₂/g). There is a possibility of contamination of organic matter. The concentrations of trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) in sediments of Geojeman Bay were analyzed. The contamination level of trace metals was evaluated by the concentration of each element. Cu exceeded the marine environment standard of threshold effects level. As, Cd, Cr, Ni, and Pb were below marine environment standard of threshold effects level in all study area. The pollution load index (PLI) for evaluating the total pollution level of trace metals was 1.1-1.4 (1.3), all study area and showed relatively high pollution at the entrance of the bay. The ecosystem risk index (ERI), was 98.8-131.14 (114.7), which was a moderate risk to some extent at most study area. Cr, Pb, and Zn were unpolluted, Cu and Cd were moderately polluted from nonpolished, and As was a medium pollution level. Moderately polluted.

Key Words : Geojeman, sellfish, sedimnet pollution, sediment environment, trace metal, organic matter, contamination pollution

서론

우리나라의 반폐쇄적인 내만은 만 주변의 소규모 하천을 통해 육상으로부터 염양염류가 유입되어 먹이생물이 풍부하고

기초 생산력이 주변해역에 비해 상대적으로 높으며, 파랑과 폭풍, 조류 등과 같은 수리역학적 에너지의 영향이 적어 수산생물을 키우기에 적합한 환경을 갖추고 있다 (Lee *et al.*, 1923). 1960년대 이후 경제성장에 따른 무분별한 연안 개발은 육상으로부터 오염물질의 유입량을 증가시켰고, 이로 인해 지형적 특성상 해수의 유동이 원활하지 않은 반폐쇄적인 내만은 심각한 연안환경 변화가 발생하면서 양식 환경이 점점 악화되고 있다. 또한 장기적인 연작에 따른 양식장의 노후화 및 밀식양식은 반폐쇄적인 만내의 환경오염을 더욱 가중시켜 양식장의 지속적인 생산을 어렵게 하고 양식생물의 품질을 저하시키고 있다 (Lee *et al.*, 1923; NFRDI, 2008). 집약적인 양식어장 배치는 양식장 주변의 유기물부하를 증대시키고, 육상에서 배출되는 도시폐수와 동등한 영향을 퇴적물의 저서동물상에 주는 것

Received: March 06, 2019; Revised: March 18, 2019;
Accepted: March 27, 2019

Corresponding author: Woo-Geon JEONG

Tel: +82 (10) 3865-6677, e-mail: jwg@gnu.ac.kr
1225-3480/24719

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.

으로 밝혀 지고 있다 (Takashi, 2008). 이를 통하여 야기되는 양식환경의 악화는 부영양화, 적조 혹은 어병발생 등으로 이어 지고 결과적으로 양식의 생산성을 저하 시킨다 (NFRDI, 2009).

미국 환경청 (EPA) 에서는 연안해역 평가를 위해 수질지표 (Water quality index), 퇴적환경지표 (Sediment quality index), 저서지표 (Benthic index), 서식지지표 (Coastal habitat index) 그리고 어류오염지표 (Fish tissue contamination index) 를 규정하였다. 퇴적환경지표는 다시 퇴적물 독성 (Sediment toxicity), 퇴적물 오염 (Sediment contaminants), 퇴적물 총유기탄소 (Sediment TOC) 등으로 세분화하여 통합 평가하고 있다 (EPA, 2012). 일본은 ‘지속적 양식생산보호법’에 의거한 수질, 퇴적물, 저서생물을 지표로 어장환경기준을 정하고 있으며, ‘지속가능한 양식생산 확보를 위한 기본방침’과 ‘수산용수기준’을 참고로 어장주변의 환경특성, 양식대상생물의 종류 등을 고려한 어장환경기준에 따라 양식 어장이 운영되고 있다 (JFRCA, 2006). 국내의 경우, 해양수질기준은 최근 해역별 특성 (동·서·남해) 에 맞는 수질기준은 제정되었으나 (Rho *et al.*, 2012), 품종별, 양식방법에 따른 어장환경기준은 별도로 마련되지 않고 있다. 과학적 방법에 의거한 어장환경 평가는 연안이용당사자간의 활용방안을 모색하고, 어장환경기준 설정을 통하여 어장환경 관리, 어장휴식년제 및 어장재배치 등에 관한 정책적 관리방안 수립에 활용될 수 있다 (Cho *et al.*, 2013).

연구해역인 거제만은 한반도의 남동쪽에 위치하며, 조류의 세기가 약하고 만내는 수심이 10-20 m이며, 수면적은 25.5 km²에 달한다. 거제만의 패류양식장은 총 3.55 km²이며, 수면적의 14%의 비율을 차지한다. 해수유동은 창조시에 만의 남단에서 유입되어 주류는 곧장 북서 방향으로 유출하고 일부는 만의 내측으로 유입하며, 낙조시는 반대 방향이다 (KHOA, Online Available). 거제만은 수출용 패류생산지정해역 제 1호로 선정된 주요 수출용 패류 생산해역이다. 굴 (*Crassostrea gigas*), 바지락 (*Ruditapes philippinarum*), 가무락 (*Cyclina sinensis*) 등의 패류양식이 성행하는 해역이지만, 양식장의 배치는 굴 (*Crassostrea gigas*) 양식이 주류를 이룬다. 하지만 굴수하식양식장은 한정된 공간에 집약적인 양식이 성행하고 있고, 40-50년이 경과한 노후화된 양식장이 많으며, 이로 인해 양식시설물, 양식생물의 배설물, 폐사한 양식생물의 잔해가 양식장 바닥에 퇴적되어 양식장의 생산성을 크게 저해하는 원인으로 작용하고 있다 (GNDI, 2012). 또한, 지형적으로 둔덕면, 거제면, 동부면 해안선으로 둘러싸여 연안을 따라 소규모 조천소 및 수산 가공 공장, 펜션 및 리조트 등 숙박시설이 들어서면서 육상의 오염물질들이 주변의 소하천을 통한 유입으로 인하여 양식생물의 생산량 및 식품안전성이 위협받고

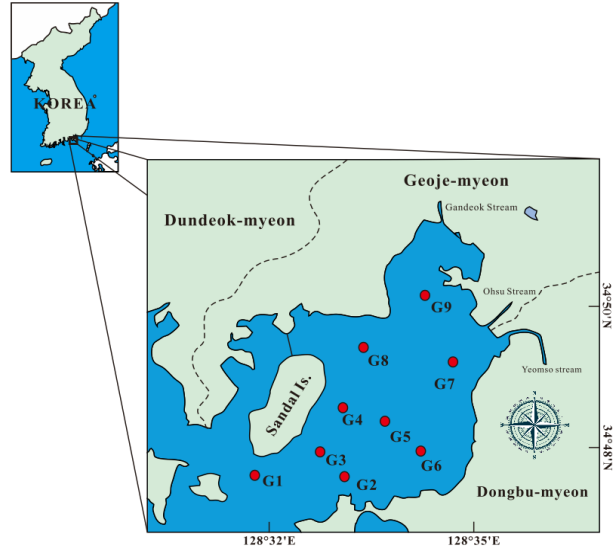


Fig. 1. Location of the Geojeman Bay and sampling stations.

있다. 수하식양식은 종패를 수하연에 설치한 후 최소한의 관리만 할 뿐 양식장 해역의 자연생태계에 전적으로 의존하기 때문에 수하식양식장의 환경 관리는 더욱 중요하다 (Choi *et al.*, 2017). 거제만을 대상으로 한 연구는 거제만 굴양식장의 미세환경연구 (Cho and Kim, 1977), 거제만 굴 양식밀도 연구 (Cho, 1980), 패류양식장의 환경평가 기준설정 (Cho *et al.*, 2013), 한산거제만 주변 퇴적물의 유기물과 미량금속 분포특성 (Hwang *et al.*, 2015), 거제-한산만의 퇴적물 내 유기물 분포특성 (Choi *et al.*, 2017) 등이 있지만, 거제만 패류양식장 주변해역 내 퇴적물에 대한 연구는 미비한 실정이다.

이 연구는 남해안에서 패류 양식장이 밀집되어 있는 거제만에 대하여 퇴적물의 입도분석, 유기물 함량을 분석하는 강열감량 (IL), 화학적 산소요구량 (COD), 미량금속분석을 하였으며, 양식장 환경평가와 양식장 해역관리에 관한 기초자료를 제공하는데 있다.

재료 및 방법

1. 시료채취

거제만의 패류양식해역 퇴적물의 유기물과 미량금속을 분석하기 위해 2017년 8월 17일에 경상대학교 실습선 ‘참바다호’를 이용하여 거제만의 굴 양식해역에서 9개의 조사정점에서 시료를 채취 하였다 (Fig. 1).

수질은 현장에서 DO meter (YSI pro2030) 로 수온 (°C), 염분 (psu), 용존산소 (mg/l) 를 측정하였고, 표준 채수기로 채수한 해수시료로 실내에서 pH를 측정 (Orion 3-star) 하였다. 퇴적물은 채니기 (Gravity core Sampler) 를 이용하여 채취

한 후, 경상대학교 해양생물교육연구센터 해양생물환경연구실로 옮겨 분석하였다.

2. 퇴적물 분석

퇴적물을 멸균된 폴리에틸렌병에 담아 저온상태로 보관하여 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 Deep Freezer로 급속 냉동하여 보관하였다. 보관된 시료로 퇴적물의 입도 (Grain size) 와 강열감량 (Ignition Loss, IL), 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD), 미량금속 7종 (Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, As) 을 분석하였다. 퇴적물실험은 해양수산부고시 제2013-230호 해양환경공정시험기준 퇴적물공정시험기준에 따랐다.

1) 강열감량 (IL)

퇴적물 중 유기물량을 측정하는데 있어서는 유기물질 중 가장 많은 양을 차지하며 비교적 그 측정이 간편한 탄소를 이용하는 것이 간편하면서도 정밀한 값을 얻을 수 있다. 퇴적물을 고온으로 가열한 후 그 무게 차이를 알아내는 강열감량법은 건조한 퇴적물 약 10 g을 회화로에 넣고 550℃에서 4시간 동안 회화시킨 후, 회화 전후의 무게 차이를 이용하여 계산하였다 (MOF, 2013a).

$$\text{강열감량 (\%)} = \frac{(\text{가열 전 시료 무게} - \text{가열 후 시료 무게})}{\text{가열 전 시료 무게}} \times 100$$

2) 화학적 산소요구량 (COD)

유기물이 산화될 때 환경에 미치는 영향을 알아내기 위해, 유기물이 산화될 때 소비되는 산소량을 측정하는 방법인 화학적 산소요구량 (COD) 은 습식 퇴적물 약 1-2 g을 삼각플라스크에 옮겨 담은 후 0.1N 과망간산칼륨 (KMnO₄) 과 10% 수산화나트륨 (NaOH) 을 넣고 혼합하여 끓는 물에 1시간 동안 중탕하였다. 이후 실온으로 냉각하여 10% 요오드화칼륨 (KI) 과 4% 아지드나트륨 (NaN₃) 를 넣은 다음 유리섬유여과지로 여과한 용액을 0.1N 티오황산나트륨 (Na₂S₂O₃ · 5H₂O) 으로 적정하였다 (MOF, 2013b).

해양퇴적물 환경기준 중 유기물에 대한 기준은 설정되어 있지 않아, 유기물 오염도 평가는 널리 사용해 온 일본의 퇴적물 기준 (20 mgO₂/g) 을 적용하였다.

3) 입도분석

입도는 습식 퇴적물을 입도 및 형상 분석기 (Particle Size & Shape Analyzer CILAS 1090LD Shape Analyzer) 로 분석하였다. 분석한 데이터는 입도등급 기준 (MOF, 2013c) 으로 입도 크기별 입자량을 계산하였다.

4) 미량금속

미량금속은 습식 퇴적물을 진한 질산과 진한 과염소산, 진한 불소산을 첨가하여 가열한 후, 퇴적물을 완전히 녹여 원소들을 분해시키는 완전분해법으로 전처리하고 (MOF, 2013d), 유도 결합플라즈마분광기 (ICP spectrometer OPTIMA 5300DV) 로 미량금속 원소인 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 총 7개 원소를 퇴적물 내 함량 농도를 분석하였다.

오염상태를 평가하기 위해 국가에서 설정한 해양수산부 (고시 제2018-10호) 해저퇴적물 해양환경 기준을 적용하였다. 부정적인 생태영향이 일부 발현될 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도인 주의기준 (Threshold Effect Level, TEL) 과 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도인 관리기준 (Probable Effects Level, PEL) 으로 퇴적물의 오염도를 살펴보았다 (MOF, 2018). 퇴적물 중 미량금속에 의한 종합적인 오염도와 퇴적물내 미량금속이 서식생물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 오염 부하량지수 (Pollution Load Index, PLI) 와 생태계위해도지수 (Ecological Risk Index, ERI) 를 이용하여 미량금속에대한 퇴적물의 오염도 및 서식생물의 위해도를 함께 평가하였다.

PLI는 미량금속의 배경농도에 대한 연구해역내 퇴적물중 미량금속의 농도의 비값을 이용하여 측정한 모든 미량금속을 고려한 종합적인 오염평가 방법이다 (Tomlinson *et al.*, 1980).

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)}$$

$$CF = (C_{metal} / B_{metal})$$

B_{metal} = 미량금속의 배경농도

C_{metal} = 연구해역내 퇴적물 중 미량금속의 농도

n = 분석된 미량금속의 총 개수

미량금속의 배경농도는 Talor (1964), Taylor and McLennan (1995) 의 연구에서 전세계 연안 대륙붕 해역의 퇴적물 중 미량금속의 평균농도 (As 1.5 mg/kg, Cd 0.098 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Cu 25 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Zn 71 mg/kg) 를 배경농도로 이용하였다.

ERI는 퇴적물 내 각 미량금속에 대하여 생태독성계수를 이용하여 저서 생태계에 미치는 위해도를 평가하는 방법이다 (Hakanson, 1980).

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_i$$

Table 1. Classment of index of geoaccumulation

Class	I_{geo}	Designation
0	≤ 0	Unpolluted
1	0-1	From unpolluted
2	1-2	Moderately polluted
3	2-3	From moderately to strongly polluted
4	3-4	Strongly polluted
5	4-5	From Strongly to extremely polluted
6	> 5	Extremely polluted

Table 2. Shellfish culture status in the Geoje Island and Geojeman Bay

Year	Geoje		Geojeman Bay	
	Shellfish fishing grounds (place)	Shellfish fishing area (ha)	Shellfish fishing grounds (place)	Shellfish fishing area (ha)
1996	103	949.38	-	-
2008	213	1,105.77	70	365.00
2018	251	1,071.00	83	355.00

$$E_i = T_{metal} \times \frac{C_{metal}}{B_{metal}}$$

B_{metal} = 미량금속의 배경농도

C_{metal} = 연구해역내 퇴적물 중 미량금속의 농도

T_{metal} = 미량금속의 독성계수

n = 분석된 미량금속의 총 개수

미량금속의 독성계수는 As = 10, Cr = 2, Cu = 5, Zn = 1, Cd = 30, Pb = 5 (Lim *et al.*, 2013; Sheykhi and Moore, 2013) 으로 계산하였다. 또한 국내외 연구자들에 의해 퇴적물 오염평가에 널리 이용되고 있는 농집지수 (Geoaccumulation index, I_{geo}) 를 이용하여 평가하였다. 농집지수는 연구해역의 퇴적물 중 미량금속 농도와 오염되지 않은 해역의 퇴적물 중 미량금속의 자연적인 농도를 수치화한 후 그 값에 따라 오염도를 평가하는 방법이다 (Müller, 1979).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5}$$

C_n = 연구해역의 퇴적물 내 미량금속 농도

B_n = 오염되지 않은 해역의 퇴적물 내 미량금속의 자연적인 농도

I_{geo} 값은 Muller (1981) 에서 제시한 총 7단계 (Class 0-6) 로 오염 상태를 세분화하여 평가하였다 (Table 1).

4) 유기물과 미량금속의 상관관계

거제만의 퇴적물내 유기물과 미량금속원소들 사이의 상관분석 (Pearson's correlation coefficients) 을 IBM SPSS Statistics v20 프로그램으로 분석하였다. 상관계수를 통하여 상관성의 존재 유무와 상관관계의 방향을 파악하였고, 두 변수의 상관관계의 유무를 판단하기 위해 t값으로 가설검증을 하였다.

결과 및 고찰

1. 거제시의 패류양식 현황

거제만의 패류양식 현황을 Table 2에 나타내었다. 거제시 해역에 설치된 패류양식장은 1996년도에 총 103개소, 총면적 949.38 ha였고, 2008년도엔 213개소, 1,105.77 ha였으며, 2018년도에 251개소, 1,071.00 ha로 나타났다. 양식장 수는 꾸준히 늘었지만 2018년과 10년 전인 2008년과 비교했을 때, 양식장 면적은 줄어든 것으로 나타났다. 거제만의 패류양식장은 2008년에 70개소, 365.00 ha였고, 2018년에 83개소 355.00 ha로 나타났다. 거제시 해역 패류양식장의 추이와 마찬가지로 양식장 수는 늘었지만 면적은 줄어든 것으로 나타났다.

2. 해수의 일반적 성상

거제만 패류양식 해역 해수의 일반적 성상은 Table 3에 나타내었다. 수온은 26.6-27.9℃ 였으며, 평균수온은 27.0 ± 0.5

Table 3. Environmental parameter of seawater in Geojeman Bay

Station	Temp. (°C)	Salinity (psu)	pH	DO (mg/l)
G1	26.6	32.4	8.22	6.64
G2	26.6	32.4	8.20	6.23
G3	26.6	32.4	8.23	6.51
G4	26.6	32.5	8.13	6.04
G5	26.7	32.5	8.23	7.02
G6	26.9	32.5	8.23	7.11
G7	27.3	32.6	8.21	7.83
G8	27.5	32.3	8.21	7.34
G9	27.9	32.6	8.23	9.65
Mean	27.0 ± 0.5	32.5 ± 0.1	8.21 ± 0.03	7.15 ± 1.09

었다. 염분농도 범위는 32.3-32.6 psu였으며 평균염분은 32.5 ± 0.1 psu를 나타내었다. pH는 8.13-8.23 범위와 8.21 ± 0.03 평균값을 나타냈다. 용존산소량의 범위는 6.04-9.65 mg/l로 조사정점 G4에서 최소값을 나타내었고 G9에서 최대 값을 나타내었다. 평균용존산소량은 7.15 ± 1.09 mg/l를 나타내었다.

3. 퇴적물의 입도특성 및 유기화학적 특성

1) 입도특성

퇴적물의 입도는 유기물과 미량금속 농도를 조절하는 중요한 요소이며 일반적으로 입자가 세립일수록 표면적이 커 유기물과 미량금속을 더 많이 흡착하는 것으로 알려져 있다 (Hwang *et al.*, 2015). 연구해역인 거제만 주변 퇴적물의 입도분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 조사정점에서 펄 (mud) 상태로 나타났고 그 중 점토 (Clay) 함량이 20.75-28.14% (평균 24.15%) 범위 값을 나타냈고, 실트 (Silt) 함량이 71.87-79.24% (평균 75.85%) 범위 였다. 이상의 결과를 보았을 때, 거제만은 전반적으로 실트, 점토질 퇴적물과 같은 세립질 퇴적물이 우세한 퇴적환경으로 이루어져 있음을 알 수 있으며, 유기물과 미량금속의 축적 가능성이 매우 높은 퇴적환경을 갖추고 있는 것으로 파악되었다.

2) 유기물 분포 및 오염도 평가

해양 퇴적물중의 유기물은 해역 자체에서 생성되는 자생기원 (Autochthonous) 과 육상으로부터 유입되는 외래성기원 (Allochthonous) 으로 구분된다. 이러한 유기물질은 해저로 침강, 퇴적, 분해되는 과정을 거치면서 여러 무기물질로 재생되며, 퇴적물내 간극수의 확산을 통해 환원된 무기 영양염은

해양에서 일차생산자에 의해 다시 유기물로 고정된다. 따라서 퇴적환경은 해양환경의 누적적인 결과를 나타내는 곳으로, 해역의 장기적인 변화과정 등의 추적에 매우 효과적이기에 해역의 환경변화나 생지화화적인 변화의 지표로 이용되고 있다 (Bernier, 1980).

연구해역 내 퇴적물 중 유기물 분포 및 오염도를 평가하기 위하여 유기물 축적 지표인 IL, COD 농도를 측정하였다 (Fig. 3).

IL은 7.7-9.9% (평균 9.2 ± 0.64%) 범위였으며, 조사정점 간의 큰 농도차이를 보이지는 않았다. COD는 17.9-26.6 mgO₂/g (평균 21.6 ± 2.52 mgO₂/g) 범위 였으며, IL과 마찬가지로 조사정점 G3에서 가장 높은 값을 나타내었는데, 이는 산달도의 실리마을의 생활하수와 해역과 바로 연결되는 수산

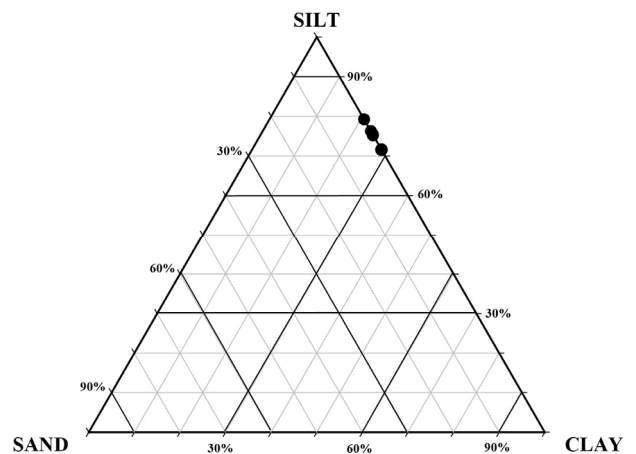


Fig. 2. Major sediment types in the Geojeman Bay.

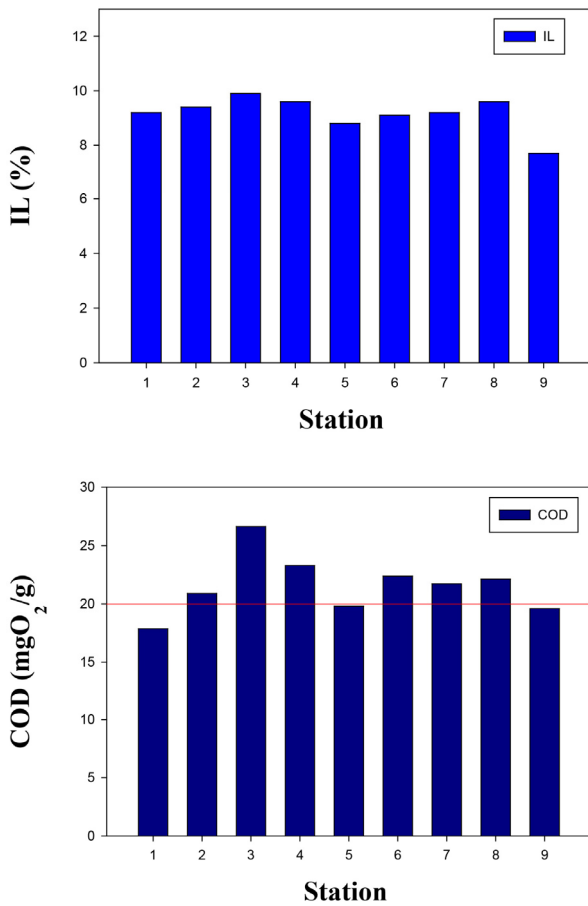


Fig. 3. The content of ignition loss (IL), the concentrations of chemical oxygen demand (COD) in the sediments of each station around Geojeman Bay. The solid line is the Japanese pollution reference value (20 mgO₂/g).

가공 공장의 폐수의 영향인 것으로 추정하였다.

거제만 해역의 유기물 오염수준 파악을 위해 지형적으로 반 폐쇄적인 해역에서 패류양식장이 성행하고 있는 우리나라의 여러 해역에서 동일한 조사방법을 적용한 연구결과와 비교하였다 (Table 4). 만 내측에 여러 섬들이 산재되어 있는 전통적인 굴양식 해역인 안정만에서, Jeong *et al.*, (2014) 의 연구결과에 따르면 IL은 6.41-11.68% (9.52%), COD은 17.99-43.84 mgO₂/g (27.53 mgO₂/g) 으로 거제만과 비슷하지만 약간 높은 수치를 나타냈다. 참굴과 피조개 양식으로 패류 생산이 매우 높은 해역인 진해만의 IL 은 2.75-10.2% (7.91%), COD값은 7.90-48.8 mgO₂/g (32.9 mgO₂/g) 을 나타냈다 (NFRDI, 2002; Choi *et al.*, 2017). 거제만과 비교하여 진해만에서 IL값이 더 낮은 반면, COD값은 높은 평균값을 나타내었다. 담치양식과 살포식 피조개양식, 굴양식, 가두리 어류양식이 이루어지고 있는 생물생산성이 높은 해역인 가막만의 IL은 4.6-11.6% (평균 7.1%), COD은 12.25-99.26 mgO₂/g (평균 30.98 mgO₂/g) 값을 나타내었다 (Jung *et al.*, 1995; Noh *et al.*, 2006). 진해만과 마찬가지로 IL값은 거제만보다 낮지만 COD값은 높은 평균값을 나타내었다. 백합, 바지락 등 바닥식 패류양식 활동이 조간대 및 조하대에서 활발히 이루어지고 있는 해역인 곰소만 (MLTM, 2011) 에서 Kim *et al.* (2017) 의 연구결과에 따르면 IL은 1.9-7.6% (3.7%), COD은 2.2-13.1 mgO₂/g (6.3 mgO₂/g) 으로 거제만보다 낮은 값을 나타내었다. 굴양식으로 패류생산이 높은 자란만도 MIFAFF (2009) 의 보고서에 따라 IL이 4.4-8.8% (7.2%), COD값이 4.8-27.8 mgO₂/g (16.8 mgO₂/g) 으로 거제만보다 낮은 값을 나타내었다.

우리나라와 수산양식 환경이 비슷한 일본의 COD 기준 (20 mgO₂/g) 을 적용하여 유기물에 의한 오염상태를 평가 하였다.

Table 4. The range and average of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD) in sediments from Korean coast.

Study region	IL (%)	COD (mgO ₂ /g)	Reference
Goeje Bay	7.7-9.9 (9.2)	17.9-26.6 (21.6)	This study
Anjung Bay	6.41-11.68 (9.52)	17.99-43.84 (27.53)	Jeong <i>et al.</i> (2014)
Jinhae Bay	2.75-10.2 (7.91)	7.90-48.8 (32.9)	Choi <i>et al.</i> (2017)
Gamak Bay	4.6-11.6 (7.1)	2.3-99.3 (30.98)	Noh <i>et al.</i> (2006)
Gomso Bay	1.9-7.6 (3.7)	2.2-13.1 (6.3)	Kim <i>et al.</i> (2017)
Jaran Bay	4.4-8.8 (7.2)	4.8-27.8 (16.8)	MIFAFF (2009)

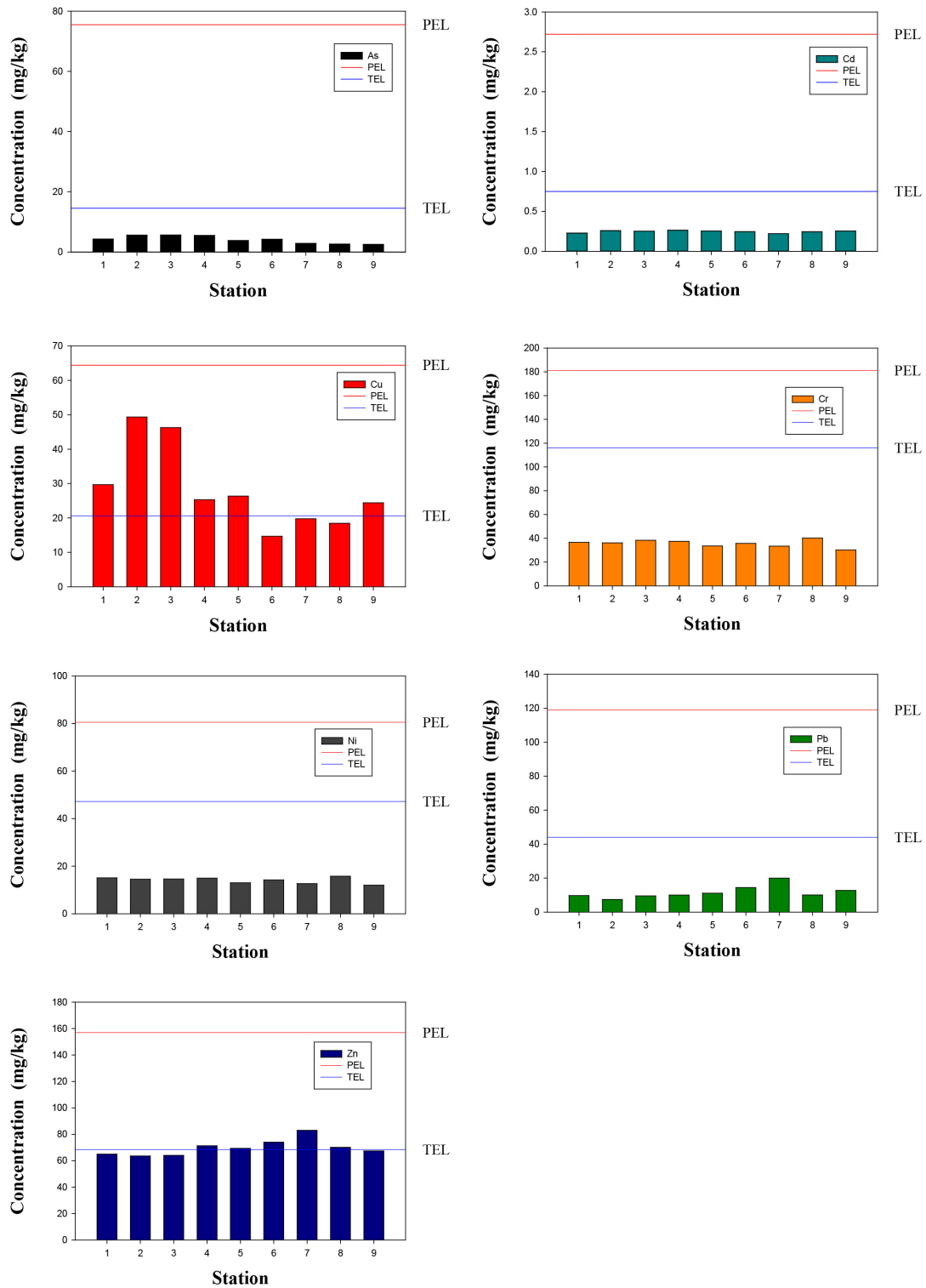


Fig. 4. Concentration of As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn in sediments of each station around the study area. Solid lines represent marine environmental standard - Threshold Effects Level (TEL), Probable Effects Level (PEL).

그 결과 9개의 조사정점 중 6개의 조사정점 (G2, G3, G4, G6, G7, G8) 에서 기준을 초과 하였으며, 나머지 조사정점 (G1, G5, G9) 은 기준보다 크게 낮지 않았다. 대부분의 조사정점에서 기준을 초과한 것과 기준에 미치지 못하는 조사정점도 큰 차이로 낮은 것이 아님을 보여 주기에 거제만은 유기물 오염 가능성이 높다고 볼 수 있다.

4. 퇴적물의 지화학적 특성

1) 미량금속 원소 농도 및 특성

해양에서 미량금속은 인위적인 발생원을 통해 하구와 연안으로 유입되어 해수, 퇴적물에서 잔류하거나 해양생물에 축적된다 (Cantillo, 1998; Kimbrough *et al.*, 2008). 미량금속은 잘 분해되지 않기 때문에 생태계 먹이사슬을 통해 상위 영양단계의 생물에 고농도로 축적된다. 따라서 수산생물 중 미량금속은 해수보다 수십-수백 배까지도 높은 농도로 축적되어있다 (Casas *et al.*, 2008). 해양생물의 체내 미량금속의 흡수 및 축적은 해양생태계뿐만 아니라 수산생물을 섭취하는 국민들에게 장기간 동안 잠재적인 영향을 주면서 건강을 위협할 수 있다 (Dalman *et al.*, 2006; Dean *et al.*, 2007). 퇴적물 내 미량금속은 연안해역의 생지화학적 환경변화를 잘 반영하고, 오염의 역사를 장기간 보존하는 특성을 가지고 있어서 그 해역의 오염현황을 파악할 수 있는 좋은 지표로 사용될 수 있다 (Lee *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2015).

거제만 주변 퇴적물 중 미량금속 (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 농도를 Fig. 4에 나타내었다.

As, Cd, Pb, Cr은 독성금속으로서 미량이라도 장기간 노출될 경우 해롭기 때문에 유해한 미량금속 (Toxic trace metals) 로 분류된다 (Cantillo, 1998). 이 연구에서 As, Cd, Pb, Cr의 농도는 각각 2.55-5.65 mg/kg (평균 4.114 ± 1.26), 0.22-0.26 mg/kg (평균 0.25 ± 0.01 mg/kg), 7.40-19.97 mg/kg (평균 11.68 ± 3.71 mg/kg), 30.22-40.28 mg/kg (평균 35.77 ± 3.00 mg/kg) 로 나타났다.

Cu와 Zn은 생물의 체내 구조적 기능적 역할 때문에 생물필수금속 (Essential trace metals) 으로 분류되지만 고농도에 노출될 경우 금속이 가지는 독성작용 때문에 생물에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Cantillo, 1998). 이 연구에서 Cu는 14.67-49.34 mg/kg (평균 28.25 ± 11.99) 로 나타났다. 조사정점 G6, G7, G8을 제외하고 높은 농도로 측정되었다. 특히 G2와 G3는 다른 조사정점들에 비해 상대적으로 높은 농도값을 나타내었다. 이러한 결과로 산달도와 가베리 연안에 위치한 선착장과 수산가공공장, 육상양식장에서 배출되는 폐수의 영향, 그리고 밀식되어 있는 수하식 양식장의 영향이라 판단된다. Zn은 63.57-83.06 mg/kg (평균 69.79 ± 22.14 mg/kg) 로 대체적으로 높게 측정 되었다. 인구가 밀집되어 있고 연안에 위치한 공장이 많은 거제면과 여러 마을, 논과 밭이 있는 동부면으로부터 육상으로 유입되는 양과 영향범위가 큰 간덕천, 오수천, 염소천에 의해 만 내 전체적으로 분포 되었을 것으로 예상하였다.

Ni은 12.04-15.82 mg/kg (평균 14.12 ± 1.26 mg/kg) 로 모든 조사정점에서 낮은 수준을 보였다.

2) 우리나라 패류생산해역과 비교분석

우리나라의 전체 연안의 평균값 (Ra *et al.*, 2013), 마산만 (Hwang *et al.*, 2006), 여자만 (Choi *et al.*, 2015), 강진만 (Choi *et al.* 2015), 가막만 (Kim *et al.*, 2012) 의 As, Cd, Cu, Cr, Pb, Zn의 평균값을 이 연구 해역인 거제만과 비교하였다 (Table 5). 우리나라 연안의 미량금속 농도 값에 비해 비교원소 (As, Cd, Cu, Cr, Pb, Zn) 모두 낮은 값을 나타내었다. 거제만과 가까우면서 우리나라의 대표적인 공업단지인 마산만에 비해 모든 원소에서 훨씬 낮은 값을 나타내었다. 우리나라의 대표적인 살포식 패류양식해역인 여자만과 강진만과 비교하여 거제만의 Cu값이 더 높게 나타났고, 그 외 모든 원소에선 낮은 값으로 나타났다. 수하식, 살포식 패류양식 해역인 가막만과 비교하여 거제만의 Cd과 Cu값이 비슷하지만 약

Table 5. The average of trace metals (As, Cd, Cu, Cr, Fe, Pb, Zn) in coastal sediments of Korea

Study region	Metals (mg/kg)						Reference
	As	Cd	Cu	Cr	Pb	Zn	
Goeje Bay	4.1	0.2	28.3	35.8	11.7	69.8	This study
Korean Coast	9.1	0.3	37	58	35	122	Ra <i>et al.</i> (2013)
Masan Bay	10.5	1.4	73	79	74	321	Hwang <i>et al.</i> (2006)
Yeoja Bay	7.4	0.05	17	81	29	137	Choi <i>et al.</i> (2015)
Gangjin Bay	10.5	0.12	27	82	33	157	Choi <i>et al.</i> (2015)
Gamak Bay	9.8	0.1	28	78	28	114	Kim <i>et al.</i> (2012)

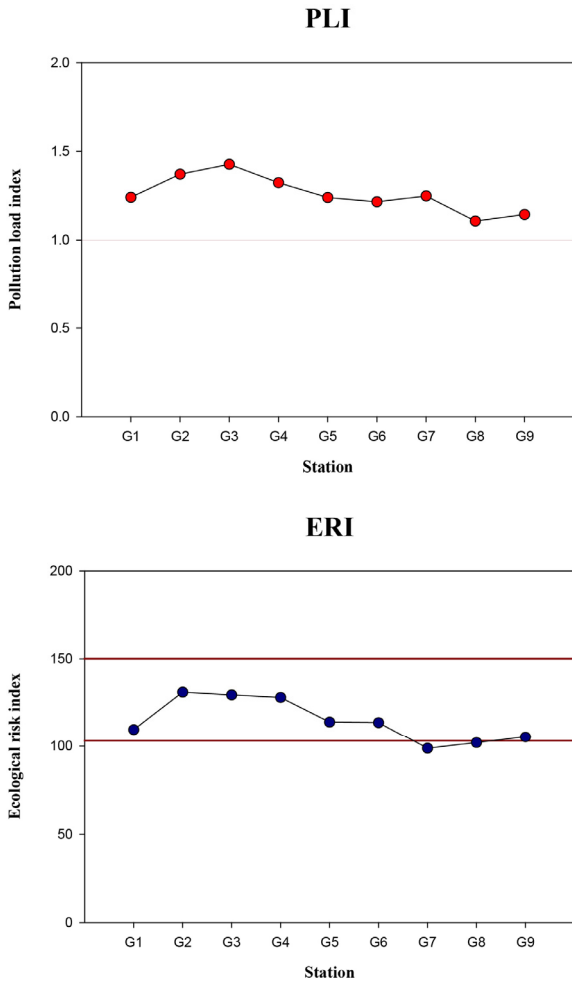


Fig. 5. Results of PLI (Pollution load index) and ERI (Ecological risk index) in the study region (PLI - solid line represents the contamination standard, ERI - 'Medium Risk' level range is 100-150).

간 높은 값을 나타내었고 그 외 모든 원소에서는 낮은 값을 나타냈다. 비슷한 환경인 패류양식해역에서 Cd과 Cu가 약간 높은 것을 제외하고는 다른 원소에선 큰 차이로 낮은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

3) 미량금속의 오염도 평가

해양수산부에서 제시한 해양환경기준 (해양수산부 고시 제

Table 6. Marine environmental standard-subsea sediment

	(Unit : mg/kg)						
Marine environment standard	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Threshold Effects Level (TEL)	14.5	0.75	116	20.6	47.2	44.0	68.4
Probable Effects Level (PEL)	75.5	2.72	181	64.4	80.5	119	157

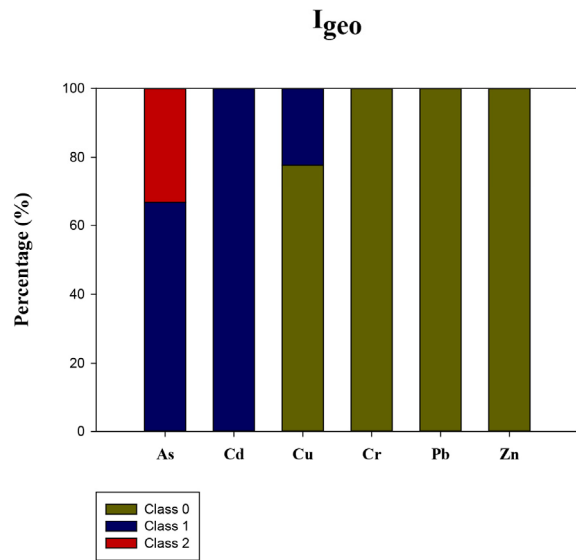


Fig. 6. Percentage of samples in Muller's Classes for trace metals (As, Cd, Cu, Cr, Pb, Zn) by using Geoaccumulation index.

2018-10호) 으로 퇴적물 중 미량금속 오염을 평가하였다 (Table 6). Cu는 조사정점 G6, G7, G8을 제외하고 주의기준 TEL값을 초과 하였다. 특히 G2와 G3는 주의기준을 훨씬 넘어 관리기준에 가까운 수준을 나타내었다. Zn은 조사정점 G2, G3, G9이 TEL 미만으로 나타났고 이외의 조사정점은 모두 TEL을 초과하였다. As, Cd, Cr, Ni, Pb은 모든 조사정점에서 TEL 미만이었다 (Fig. 4).

연구해역 내 퇴적물 중 미량금속에 의한 종합적인 오염도를 평가하기 위한 PLI값과 미량금속의 독성도에 따른 저서생물에 미치는 영향을 평가하기 위한 ERI값을 나타내었다 (Fig. 5). PLI는 1.1-1.4 (평균 1.3) 으로 모든 정점에서 1.0을 초과하여 오염된 상태 (Polluted)였으며, 만의 입구에서 비교적 높은 오염도를 나타내었다. ERI는 98.8-131.1 (평균 114.7)로 조사정점 G7와 G8를 제외한 모든 정점에서 어느 정도 생물에 위해성을 줄 수 있는 상태 (Moderate risk)였다.

연구해역 내 정점별 퇴적물 중 미량금속 농도를 기초로 계산한 농집지수 (I_{geo}) 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Cr, Pb, Zn은 모든 정점에서 Class 0 (100%) 으로 나타냈다. Cu는 Class 0이 78%, Class 1이 22% 였다. Cd는 Class 1이

Table 7. Pearson's correlation coefficients between the organic parameters (IL, COD) and trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) in the surface sediments of the Geojeman Bay (n = 9)

	IL	COD	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn	As
IL	1								
COD	0.590*	1							
Cu	0.322	0.247	1						
Cd	0.054	0.303	0.321	1					
Cr	0.889**	0.489	0.186	0.237	1				
Ni	0.795**	0.282	0.174	0.271	0.956**	1			
Pb	-0.288	-0.024	-0.626*	-0.682*	-0.487	-0.591*	1		
Zn	-0.052	0.055	-0.701*	-0.542	-0.239	-0.349	0.913**	1	
As	0.583*	0.435	0.703*	0.469	0.412	0.438	-0.567	-0.478	1

*Correlation is significant at the 0.05 level (two-tailed)

**Correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed)

100% 였다. As는 Class 1이 67%, Class 2가 33% 였다. 따라서 Cr, Pb, Zn은 비오염수준 (Unpolluted) 이었고, Cu와 Cd은 비오염에서 중간 오염수준 (From unpolluted to moderately polluted) 이었으며, As는 중간 오염수준 (Moderately polluted)으로 나타났다.

5. 퇴적물의 유기물과 미량금속간의 상관관계

거제만 패류양식장 주변퇴적물 내 유기물 및 미량금속에서 상관관계를 나타내기 위해 상관분석 (Pearson's correlation coefficients) 을 하였다 (Table 7). IL을 기준으로 Cd, Pb, Zn과는 약한 관계이고, Cu, As와는 보통의 관계, Cr, Ni과는 강한 관계로 나타났다. COD를 기준으로 Cu, Ni, Pb, Zn과는 약한 관계로, Cd, Cr, As와는 보통관계로 나타났다. 신뢰수준을 파악하기 위한 t검증을 한 결과, IL과 As에서 유의수준이 나타났고 Cr과 Ni에서 높은 유의수준을 나타냈다. COD는 미량금속들과는 유의한 상관관계가 없었다. 이는 Cr과 Ni이 IL 과의 큰 유의성 외엔 금속원소들이 퇴적물의 유기물함량 외 다른 요인의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 연안 퇴적물 중 미량금속의 농도는 지각성분에서 기원하여 퇴적물 입도나 유기물 함량에 의해 조절되기도 하지만, 퇴적물 내 산화환원 환경에 따른 속성작용, 선박 등의 방오도료나 농약과 같은 인위적인 요인 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 조사해역에 따라 그 농도가 달라지는 것으로 알려져 있다 (Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2005; Hwang *et al.*, 2010). 거제만에서 이와 같은 미량금속의 농도를 보이는 것은 육상으로부터 유입되는 오염원에 의해 축적되었거나 연작, 노후된 굴양식 활동으로 침강되는 입자의 영향 때문인 것으로 판단된다.

종합결론

거제만은 전반적으로 실트, 점토질 퇴적물과 같은 세립질 퇴적물이 우세한 퇴적환경으로 이루어져 있고, 유기물과 미량금속의 축적 가능성이 매우 높은 퇴적환경을 갖추고 있다.

거제만 패류양식장 주변 퇴적물 내 유기물 특성을 파악하기 위해 IL과 COD 실험을 하였다. IL은 7.7-9.9% (평균 9.2 ± 0.64%) 였으며, 조사정점간의 큰 농도차이를 보이지는 않았다. COD는 17.9-26.6 mgO₂/g (평균 21.6 ± 2.52 mgO₂/g) 이었으며, IL과 마찬가지로 조사정점 G3에서 가장 높은 값을 나타내었다. 조사정점 G3와 가까운 산달도의 실리마을 생활하수와 해역과 바로 연결되는 수산가공공장의 폐수의 영향으로 높은 값을 나타낸 것으로 추정하였다. 우리나라와 수산양식 환경이 비슷한 일본의 COD 기준 (20 mgO₂/g) 을 적용하여 유기물에 의한 오염상태를 평가한 결과 9개의 조사정점 중 6개의 조사정점 (G2, G3, G4, G6, G7, G8) 에서 기준을 초과 하였으며, 나머지 조사정점 (G1, G5, G9) 은 기준보다 크게 낮지 않아, 거제만은 유기물 오염 가능성이 있다고 볼 수 있다. 우리나라에서 거제만과 비슷한 환경을 이루는 여러 해역과 비교를 하였을 때, 진해만과 가막만의 높은 COD값에 비해 거제만이 유기물 오염수준이 낮았고, 안정만과 비슷한 수준이었으며, 자란만과 곰소만에 비해 높은 수준을 나타내었다.

미량금속 특성을 파악하기 위해 거제만 패류양식장 주변 퇴적물 내 미량금속 (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 농도를 분석하였다. As, Cd, Pb, Cr의 농도는 각각 2.55-5.65 mg/kg (평균 4.114 ± 1.26), 0.22-0.26 mg/kg (평균 0.25 ± 0.01 mg/kg), 7.40-19.97 mg/kg (평균 11.68 ± 3.71 mg/kg), 30.22-40.28 mg/kg (평균 35.77 ± 3.00 mg/kg) 로 나타났다.

다. Cu는 14.67-49.34 mg/kg (평균 28.25 ± 11.99)로 나타났다. Zn은 63.57-83.06 mg/kg (평균 69.79 ± 22.14 mg/kg)으로 나타났다. Ni은 12.04-15.82 mg/kg (평균 14.12 ± 1.26 mg/kg)으로 나타났다. 우리나라의 전체 연안의 평균 값, 마산만, 여자만, 강진만, 가막만의 As, Cd, Cu, Cr, Pb, Zn의 평균값을 거제만과 비교한 결과, 여자만과 강진만의 Cu 값과 가막만의 Cd, Cu값을 제외하곤 모든 원소, 해역에서 거제만 해역이 낮은 값을 나타내었다. 각 원소의 농도로 미량금속의 오염도를 평가하였다. Cu는 조사정점 G6, G7, G8을 제외하곤 주의기준 (TEL) 값을 초과 하였다. 특히 G2와 G3는 주의기준을 훨씬 넘어 관리기준에 가까운 수준을 나타내었다. Zn은 조사정점 G2, G3, G9이 TEL 미만으로 나타났고 이외의 조사정점은 모두 TEL을 초과하였다. As, Cd, Cr, Ni, Pb은 모든 조사정점에서 TEL 미만이였다. 미량금속의 종합적인 오염도를 평가하는 PLI는 1.1-1.4 (평균 1.3)로 모든 정점에서 1.0을 초과하여 오염된 상태 (Polluted) 였으며, 만의 입구에서 비교적 높은 오염도를 나타내었다. 생태계 위해도 지수인 ERI는 98.8-131.1 (평균 114.7)로 조사정점 G7, G8를 제외한 모든 정점에서 어느 정도 생물에 위해성을 줄 수 있는 상태 (Moderate risk) 였다. 미량금속의 농집지수인 I_{geo} 의 결과값으로 Cr, Pb, Zn은 비오염수준 (Unpolluted) 이었고, Cu, Cd은 비오염에서 중간오염수준 (From unpolluted to moderately polluted) 이었으며, As은 중간 오염수준 (Moderately polluted) 으로 나타났다.

거제만은 유기물 오염 가능성이 높지만, 우리나라 주요 패류 생산 해역들과 비교하면 오염수준이 비슷하거나 더 낮은 수준으로 나타났다. 미량금속은 우리나라 주요 패류생산 해역들과 비교하면 거제만의 미량금속 농도 값이 다른 해역에 비해 매우 낮은 값을 나타냈다. 세 가지 오염평가법으로 Cu와 Zn 외, 모든 원소에선 해양환경기준 보다 훨씬 낮은 농도값을 나타냈고, 만 자체에선 미량금속으로부터 어느 정도 오염이 되어 있는 상태인 것으로 나타났으며, 만 내의 생태계에 약간의 위해를 줄 수 있는 수준으로 평가되었다. 농집지수 또한 낮은 수준인 비오염에서 중간 오염수준으로 평가되었다. 즉, 거제만 패류양식장 주변 퇴적물은 오염된 상태지만, 오염수준은 낮은 것으로 평가 되었다.

단순히, 퇴적물의 오염수준 만큼 해당 해역에서 양식된 패류의 서식 환경이나 성장과 품질에 대해 판단하기보다는, 패류양식장이 밀집한 해역의 퇴적물 오염수준에 따라 양식되고 있는 패류의 성장이나 생존율, 폐사율 등의 평가로 퇴적물 환경이 패류양식산업에 미치는 구체적인 영향 분석이 필요하다.

거제만에서 생산되는 패류의 높은 생산량과 품질을 유지하고 해역을 지속적으로 이용하기 위해선 육해상 오염원에 대한 주기적 모니터링 같은 지속적인 관리가 필요하며, 이러한 패류

양식이 성행하는 해역의 저서 환경 관리를 위해서는 어장수용력산정을 통해 적정 양식밀도 유지가 중요하고, 저서환경 개선을 위한 어장정화 기술개발, 어장회복능력을 고려한 어장휴식년제 운영 등이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Berner, R. A. (1980) Early diagenesis: a theoretical approach. Princeton, NJ: Princeton University Press : 241.
- Cantillo, AY. (1998) Comparison of results of mussel watch programs of the United States and France with worldwide mussel watch studies. *Mar. Pollut. Bull.*, **36**: 712-717.
- Casas, S., Gonzalez, J. L., Andral, B. and Cossa, D. (2008) Relation between metal concentration in water and metal content of marine mussels (*Mytilus galloprovincialis*): impact of physiology. *Environ. Toxicol. Chem.*, **27**: 1543-1552.
- Cho, C. H. (1980) FARMING DENSITY OF OYSTER IN HANSAN - GEOJE BAY. *Korean Fish. Soc.*, **13**(1): 45-56.
- Cho, C. H. and Y. S. Kim. (1977) MICROENVIRONMENT IN OYSTER FARM AREA 1. On the Eutrophication and Raft Density in Geoje Bay, *Korean Fish. Soc.*, **10**(4): 259-265.
- Cho, Y. S., Lee, W. C., Kim, J. B., Hong, S. J., Kim, H. C. and Kim, C. S. (2013) Establishment of Environmental Assessment using Sediment Total Organic Carbon and Macrobenthic Polychaete Community in Shellfish Farms, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **19**(5): 430-438.
- Choi, M. K., Lee, I. S., Hwang, D. W., Kim, H. C., Yoon, S. P., Yun, S. R., Kim, C. S. and Seo, I. S. (2017) Organic Enrichment and Pollution in Surface Sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with Dense Oyster Farms. *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, **50**(6): 777-787.
- Choi, M. K., Lee, I. S., Kim H. C. and Hwang, D. W. (2015) Distribution and Contamination Status of Trace Metals in Surface Sediments of Shellfish Farming Areas in Yeoja and Gangjin Bay. *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, **48**(5): 789-797.
- Choi, M., Lee, I. S. Kim, H. C. and Hwang, D. W. (2015) Distribution and contamination status of trace metals in surface sediments of shellfish farming areas in Yeoja and Gangjin Bays, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **48**(5): 789-797.
- Dalman, Ö., Demirak, A. and Balci, A. (2006) Determination of heavy metals (Cd, Pb) and trace elements (Cu, Zn) in sediments and fish of the Southeastern Aegean Sea (Turkey) by atomic absorption spectrometry. *Food Chem.*, **95**: 157-162.
- Dean, R. J., Shimmield, T. M. and Black, K. D. (2007)

- Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: an extensive survey. *Environ. Pollut.*, **145**: 84-95.
- EPA. (2012) National coastal condition report IV, United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development/Office of Water, Washington, DC. 20460: 368.
- GNDI. (2012) Strategy for enhancement of shellfish farming in Gyeongnam province. GNDI: 1-8.
- Hakanson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, **14**: 975-1001.
- Hwang, D. W., Jin, H. G., Kim, S. S., Kim, J. D., Park, J. S. and Kim, S. G. (2006) Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan harbor, Korea. *Journal of the Korean Fisheries Society*, **39**: 106-117.
- Hwang, D. W., Lee, I. S., Choi, M. K. and Shim, J. H. (2015) Distribution of Organic Matter and Trace Metal Concentrations in Surface Sediments around the Hansan-Geoje Bay. *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, **18**(3): 131-143.
- Hwang, D. W., Ryu, S. O., Kim, S. G., Choi, O. I., Kim, S. S. and Koh, B. S. (2010) Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, **43**: 146-158.
- Jeong, W. G., Cho, S. M. and Lee, S. J. (2014) Physiochemical Characteristics and Heavy Metal in the Surface Sediments of Marine Shellfish Farming Waters in Anjung Bay, Korea. *Korean J. Malacol.*, **30**(4): 421-428.
- JFRCA. (2006) A Guide Book for the Improvement Plan in Aquaculture (instructor), Japan Fisheries Resource Conservation Association. : 79.
- Jung, K. K., Lee, Y. G. and Hwang, J. Y. (1995) Surface Sediment Characteristics and Clay Minerals in Kamag Bay. *JKESS*, **16**(6): 477-488.
- KHOA. Online Available. <http://www.khoa.go.kr/tdnet/>
- Kim, C. S., Kim, H. C., Lee, W. C., Hong, S. J., Hwang, D. W., Cho, Y. S., Kim, J. H. and Kim, S. Y. (2017) Geochemical Characteristics of Surface Sediments and an Evaluation of Trace Metal Pollution in Gomsu Bay, Korea, 2011. *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, **50**(5): 567-575.
- Kim, K. T., Kim, E. S., Cho, S. R., Chung, K. H. and Park, J. K. (2005) Distribution and pollution of heavy metals in the environmental samples of the Lake Shihwa. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Engineer*, **8**: 148-157.
- Kim, P. J., Shon, S. G., Park, S. Y., Kim, S. S., Jang, S. J., Jeon, S. B. and Ju, J. S. (2012) Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak Bay. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, **18**: 67-83.
- Kimbrough, K. L., Johnson, W. E., Lauenstein, G. G., Christensen, J. D. and Apeti, D. A. (2008) An assessment of two decades of contaminant monitoring in the nation's coastal zone. *NOAA*, Report no. NOS NCCOS **74** : 105.
- Lee, M. K., Bae, W., Um, I. K. and Jung, H. S. (2004) Characteristics of heavy metal distribution in sediments of Youngil Bay, Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **26**(5): 543-551.
- Lee, W. C., Cho, Y. S., Hong, S. J., Kim, H. C., Kim, J. B. and Lee, S. M. (2011) Estimation of Ecological Carrying Capacity for Oyster Culture by Ecological Indicator in Geoje-Hansan Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **17**(4): 315-322.
- Lim, D. I., Choi, J. W., Shin, H. H., Jeong, D. H. and Jung, H. S. (2013) Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, **73**: 362-368.
- MIFAFF. (2009) Report on water quality status in farming areas of Korea in 2009. MIFAFF. Busan. Korea : 1-443.
- MLTM. (2011) Basic Survey of Coastal Wetland (2010), MLTM. Busan. Korea : 278.
- MOF. (2013a) Marine environment standard methods, Sediment standard method : 21-22.
- MOF. (2013b) Marine environment standard methods, Sediment standard method : 32-35.
- MOF. (2013c) Marine environment standard methods, Sediment standard method : 9-10.
- MOF. (2013d) Marine environment standard methods, Sediment standard method : 42.
- MOF. (2018) Marine Environment Management Act, Marine environment standard : 9-10.
- Müller, G. (1981) Die Schwermetallbelastung der sediment des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemical Zeitung*, **105**: 157-164.
- Müller, G. (1979) Schwermetalle in den Sediment des Rheins. *Veränderungen Sei.*, **79**: 778-783.
- NFRDI, (2008) Environmental research of aquaculture farm in Korea, NFRDI 1st Report : 243.
- NFRDI. (2002) Environmental Research of Aquaculture Farm 2002. NFRDI report : 1-192.
- NFRDI. (2009) Environmental Research of Aquaculture Farm in Korea, 1st Report: 243
- Noh, I. H., Yoon, Y. H., Kim, D. I. and Park, J. S. (2006) The Spatio-temporal Distribution of Organic Matter on the Surface Sediment and Its Origin in Gamak Bay, Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **9**(1): 1-13.
- Ra, K., Kim, E. S., Kim, K. T., Kim, J. K., Lee, J. M. and Choi, J. Y. (2013) Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, **65**: 105-110.
- Rho, T. K., Lee, T. S., Lee, S. R., Choi, M. S., Park, C., Lee, J. H., Lee, J. Y. and Kim, S. S. (2012) Reference values and water quality assessment based on the regional environmental characteristics, 「The

- Sea] *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **17**: 45-58.
- Sheykhi, V. and Moore, F. (2013) Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river, southwest Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, **185**: 3219-3232.
- Takashi, U. (2008) Validity of acid volatile sulfide as environmental index and experiment for fixing its standard value in aquaculture farms along the coast of Wakayama prefecture, Japan. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI*, **74**(Issue 3): 402-411.
- Taylor, S. R. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **28**: 1273-1285.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, **33**: 241-265.
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R. and Jeffrey, D. W. (1980) Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, **33**: 566-575.

