

살포식 패류양식해역인 진주만 표층 퇴적물의 오염도

이가람* · 황현진** · 김정배*** · 황동운****†

*, ** 국립수산과학원 어장환경과 연구원, *** 국립수산과학원 어장환경과 연구관

**** 국립수산과학원 어장환경과 연구사

Pollution Status of Surface Sediment in Jinju Bay, a Spraying Shellfish Farming Area, Korea

Garam Lee* · Hyunjin Hwang** · Jeong Bae Kim*** · Dong-Woon Hwang****†

*, ** Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

*** Principal Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

**** Senior Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

요 약 : 살포식 패류양식해역인 진주만의 퇴적물 중 유기물과 금속의 분포 특성 및 오염상태를 파악하기 위하여 2015년 8월에 산회 발성황화물(AVS), 강열감량(IL), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 금속원소(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn)를 조사하였다. 퇴적물 중 유기물과 금속원소의 농도는 패류양식장이 밀집해 있는 만의 남쪽 해역에서 높고, 우리나라 남해안의 다른 해역과 비슷하거나 낮았다. C/N비(5.7-8.0)를 기초로, 진주만 퇴적물의 유기물은 해역 자체에서 생성된 해양기원성인 것으로 파악되었다. 퇴적물 오염평가 결과, 유기물(AVS, TOC)과 금속원소(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) 농도는 우리나라의 퇴적물 기준보다도 상당히 낮았다. 또한, 금속원소 전체 농도를 고려한 오염부하량지수(PLI)와 생태계위해도지수(ERI) 결과는 패류 양식장이 밀집해 있는 남쪽 해역에서 높은 오염도를 보이지만, 대부분의 해역에서 저서생물에 약간 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 오염 상태였다. 그러므로, 진주만 퇴적물은 현재 유기물에 대해서는 오염되지 않았고, 금속원소에 있어서는 약간 오염된 상태인 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 퇴적물, 유기물, 금속원소, 오염, 진주만

Abstract : We investigated the concentrations of acid volatile sulfide (AVS), ignition loss (IL), total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and metallic elements (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn), in August 2015, to determine the spatial distribution and pollution status of organic matter and metals in the surface sediment of Jinju Bay, a spraying shellfish farming area, Korea. The concentrations of organic matter and metallic elements were significantly higher in the southern part of the bay than in the mouth and center of the bay. The C/N ratio (5.7-8.0) in the sediment represents the dominance of organic matter of oceanic origin in the surface sediment of the study area. The concentrations of AVS, TOC, and metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn) were much lower than the values of the sediment quality guidelines applied in Korea. Based on the results of the pollution load index (PLI) and ecological risk index (ERI), the metal concentrations in the surface sediment of Jinju Bay have a weakly negative ecological effect on benthic organisms although the sediments with high metal pollution status are distributed in the southern parts of the bay, with high dense shellfish farming areas. Thus, the surface sediments in Jinju Bay are not polluted with organic matter and are slightly polluted with metallic elements.

Key Words : Sediment, Organic matter, Metallic element, Pollution, Jinju Bay

* First Author : garam@pusan.ac.kr, 051-720-2542† Corresponding Author : dwhwang@korea.kr, 051-720-2542

1. 서론

최근, UN 식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)에서 제출한 세계 수산양식 현황 보고서(The State of World Fisheries and Aquaculture)에 따르면, 우리나라는 전 세계 대표적인 수산물 소비국 중에 하나이며, 2013~2015년 기준으로 국민 1인당 수산물 소비량이 약 58.4 kg으로 전 세계 수산물 평균 소비량(약 20.2 kg)보다 약 3배 많고, 앞으로 매년 증가하여 2025년에는 약 64.3 kg에 달할 것으로 예측하고 있다(FAO, 2016). 이러한 소비 증대에 맞춰 연근해 수산물 생산량을 증대시킬 필요가 있지만, 우리나라 연안 해면어업(잡는 어업)을 통한 수산물 생산량은 기후변화, 연안 환경오염, 수산자원의 남획 등으로 인해 최근 들어 지속적으로 감소하고 있는 실정이다(NIFS, 2019). 따라서, 미래 수산물 수요증가에 대응하기 위해서는 양식산업의 활성화를 모색하고 연안 양식어업(기르는 어업)을 통한 안정적인 생산체계를 구축할 필요가 있다.

부산에서 목포에 이르는 남해안은 1950년대부터 어류, 패류, 해조류 등 다양한 품종의 양식이 활발하게 이루어져 왔으며, 특히 패류양식은 전체 양식 생산량의 약 20~35%로 해조류 양식 다음으로 그 비중이 매우 높다(Lee et al., 2017; MOF, 2017b). 비록, 우리나라 전체 양식 수산물 생산량은 연안 양식산업의 호조(특히, 해조류 양식)로 매년 지속적으로 증가하고 있지만, 양식 패류의 생산량은 2007년 약 47.9 만톤을 기점으로 점차 감소하여 2013년에는 약 29.1 만톤까지 급감하였고 최근에는 약간 회복되어 약 35.0 만톤 생산되고 있다(MOF, 2017b; NIFS, 2019). 아직 그 감소 원인에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않았지만, 일부 연구에서 육상으로부터 영양염류, 금속과 같은 환경 오염물질의 과도한 유입 뿐만 아니라 장기간에 걸친 어장의 이용, 과밀양식 등으로 양식장에서 발생하는 다량의 양식부산물(배설물, 생물사체 등)로 인한 양식어장 환경의 악화가 양식생물의 성장저하, 잦은 질병 발생, 대량폐사 등을 유발하여 어장 생산성 및 양식생물의 품질을 저해하는 것으로 보고되고 있다(NFRDI, 2008; Kwon, 2010; Lee et al., 2011; Choi et al., 2017; Lee et al., 2017; Hwang et al., 2018). 그러므로, 패류 양식 생산성을 지속적으로 유지하고 수산물의 안정성을 확보하기 위해서는 무엇보다 양식생물이 서식하는 양식어장의 환경특성 및 그 변화를 파악할 필요가 있다.

전 세계적으로 연안에서 유기물과 금속은 주요 해양환경 오염을 유발하는 물질이다. 육상에서 경제발달에 따른 산업화와 도시화, 해상에서 양식산업의 발달 등으로 인간활동이 증가하면서 육상과 해역 자체내에서 생성된 유기물과 금속원소 등이 지속적으로 연안에 유입되고 있다(Hyun et al., 2007; Choi et al., 2017). 연안에 유입된 유기물과 금속원소는

조류와 같은 물의 흐름에 의해 외해로 이동하기도 하지만 대부분 입자물질에 흡착된 후 연안에 침강하여 퇴적물에 축적된다(Fang and Hong, 1999; Ra et al., 2013; Hwang et al., 2018).

일반적으로 연안 퇴적물은 해수와 달리 멀리 이동하지 않고 그 해역에 오랫동안 존재하므로 해역의 급격한 생지화학적 환경변화를 잘 반영하고, 오염의 역사를 장기간 보존하는 특성을 가지고 있어 그 해역의 환경특성 및 오염현황을 파악할 수 있는 좋은 지표로 알려져 있다(Choi et al., 1999; 2015a). 지금까지 남해안에서 패류 양식장 주변 퇴적물 중 유기물 및 금속원소에 대한 연구는 진해만(Choi et al., 2015b; 2017), 거제-한산만(Hwang et al., 2015; Choi et al., 2017), 고성만(Lee et al., 2017), 자란만(Hwang et al., 2018), 가막만(Kim et al., 2012; Koo et al., 2019), 여자만(Choi et al., 2013, 2015a; Koo et al., 2019), 득량만(Jeon et al., 2012; Koo et al., 2019) 등 반폐쇄적인 만을 중심으로 많은 연구가 진행되어져 왔다. 하지만, 대부분의 연구는 굴, 홍합 등을 생산하는 수하식 패류 양식장이 있는 해역에서 이루어졌고, 새꼬막, 피조개, 바지락 등을 생산하는 살포식 패류 양식장에서의 연구는 거의 없다. 특히, 살포식으로 생산하는 패류들은 수하식으로 생산하는 패류들과 다르게 퇴적물 내에 서식하여 퇴적환경의 영향을 직접적으로 받기 때문에 서식지인 퇴적물 내 유기물 및 금속원소에 대한 모니터링이 매우 중요하다.

이 연구의 목적은 살포식 패류 양식장이 밀집해 있는 해역에서 퇴적물 중 유기물과 금속원소의 분포 특성을 이해하고 다양한 평가기법을 이용하여 오염 현황을 파악하는데 있다. 이를 위해 우리나라의 수산자원보호구역 및 수출용 패류생산해역 제7호로 지정되어 있고 피조개, 바지락 등의 살포식 패류 양식이 성행하고 있는 남해안의 진주만을 연구해역으로 선정하여 퇴적물 중 유기물 함량 특성을 나타내는 산취발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 강열감량(ignition loss, IL), 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN), 그리고 금속원소 9종(metallic element, ME; 비소[As], 카드뮴[Cd], 크롬[Cr], 구리[Cu], 철[Fe], 수은[Hg], 망간[Mn], 납[Pb], 아연[Zn])을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구해역

연구해역인 진주만은 남해 중부에 위치하고 있으며 경상남도 하동군과 사천시, 그리고 남해군의 남해도와 창선도로 둘러싸여 있는 반폐쇄적인 내만이다(Fig. 1). 만의 면적은 약 180 km²로 남북길이는 약 19 km, 동서길이는 약 12 km, 해안선 길이는 약 136 km에 이른다(MOF, 2013). 만 주변에 위치한 가화강을 비롯한 사주천, 곤양천 등의 소규모 하천을 통해 만 내 담수의 유입이 있으며, 특히 만의 북쪽해역은 하계 집중

호우시 가화강을 통해 유입되는 남강댐 방류수의 영향을 크게 받는다(Oh et al., 2008). 해수 유동은 만 동쪽에 위치한 대방수로, 서쪽에 위치한 노량수로, 남쪽에 위치한 창선수로를 통해 일어나지만, 폭 1 km 내외의 좁은 입구로 인해 외해수와의 교환은 매우 제한적이다(Kim et al., 2010; MOF, 2013).

만내 수심은 중앙부에서 10 m 내외이고 수로부근에서 30 ~ 40 m로 깊지만, 평균수심은 약 3.6 m로 비교적 얕으며 만 전체적으로는 매우 완만한 해저지형을 이루고 있다(Oh et al., 2008; MOF, 2013). 표층 퇴적물은 역(gravel), 역질니(gravelly mud), 니질사(muddy sand), 니(mud)의 4개의 퇴적상으로 구분되지만, 주로 강한 유속을 보이는 만의 동쪽과 남쪽 입구 주변에 역질니(gravelly mud) 퇴적물이 분포하고 그 외 만내 대부분의 해역은 니(mud) 퇴적물이 우세하게 분포하고 있다(MOF, 2013). 조석은 반일주조석(semi-diurnal tide)으로 일조부등을 보이며 평균조차는 1.72 m(대조차 2.55 m, 소조차 0.88 m)이고 최대조차는 3.11 m로 전반적으로 소조차 환경을 이루고 있다(NGIL, 1990). 한편, 진주만에서는 살포식 양식을 통해 피조개, 새꼬막 등의 패류가 생산되고 있으며, 그 생산량은 2008년 약 230톤, 2010년 약 730톤, 2014년 약 2,410톤으로 매년 증가하고 있다.

2.2 시료 채취 및 분석

진주만 내 표층 퇴적물 중 유기물과 금속원소 함량 특성을 파악하기 위하여 2015년 8월 남해도와 창선도 사이 창선수로에서부터 북쪽의 사천시와 하동군을 연결하는 사천대교 부근까지 소형 선박을 타고 총 21개 정점에서 채니기(van

Veen grab sampler, Area: 0.05 m²)로 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 이후 플라스틱 스푼을 이용하여 표면 3 cm 내 퇴적물만을 채집하여 미리 산 세척한 폴리에틸렌병(polyethylene bottle, volume 250 mL)에 담아 냉장상태로 실험실로 운반하여 AVS, IL, TOC, TN, ME를 분석하였다. 각 항목의 분석은 Hwang et al.(2006)과 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에서 제시한 방법과 유사한 다음의 방법으로 행하였다.

AVS는 습식 퇴적물 약 2 g을 기체발생관에 넣고 황산을 첨가한 후 발생하는 황을 검지관(Gastec No. 201L and 201H)에 흡수시켜 황의 양을 정량하는 황검지관법으로 분석하였다. 그 외 항목은 습식 퇴적물 약 100 g을 - 80℃에서 동결건조기를 이용하여 7~10일간 냉동건조한 후 분쇄하여 균질화한 건조시료를 이용하여 분석하였다. IL은 건조시료 약 10 g을 도가니에 담아 회화시켜 회화 전후의 무게차이를 이용한 무게법으로 측정하였다. TOC와 TN은 건조시료 약 0.5 g을 취하여 25 mL 유리 vial에 넣고 1 N 염산 10 mL를 첨가하여 탄산염을 제거한 다음 가열관에서 약 70℃로 하룻밤 동안 수분과 잔류염소를 제거하였다. 이를 다시 건조기에 넣어 105℃로 2시간 건조하고 상온이 될 때까지 방치한 후 주석박막으로 소량(3~5 mg)의 시료를 말아 CHN 원소분석기(element analyzer, Perkin Elmer, US/2400)로 측정하였다.

금속원소는 건조시료 약 50 g을 플라스틱 체(mesh size 125 μm)로 체질하여 통과한 세립한 퇴적물만을 사용하여 분석하였다. 수은(Hg)은 체질시료 약 0.1 g을 전처리 없이 바로 자동수은분석기(automatic mercury analyzer, Milestone, DMA-80)로 분석하였다. 그 외 금속원소는 체질시료 약 0.5 g을 테프론

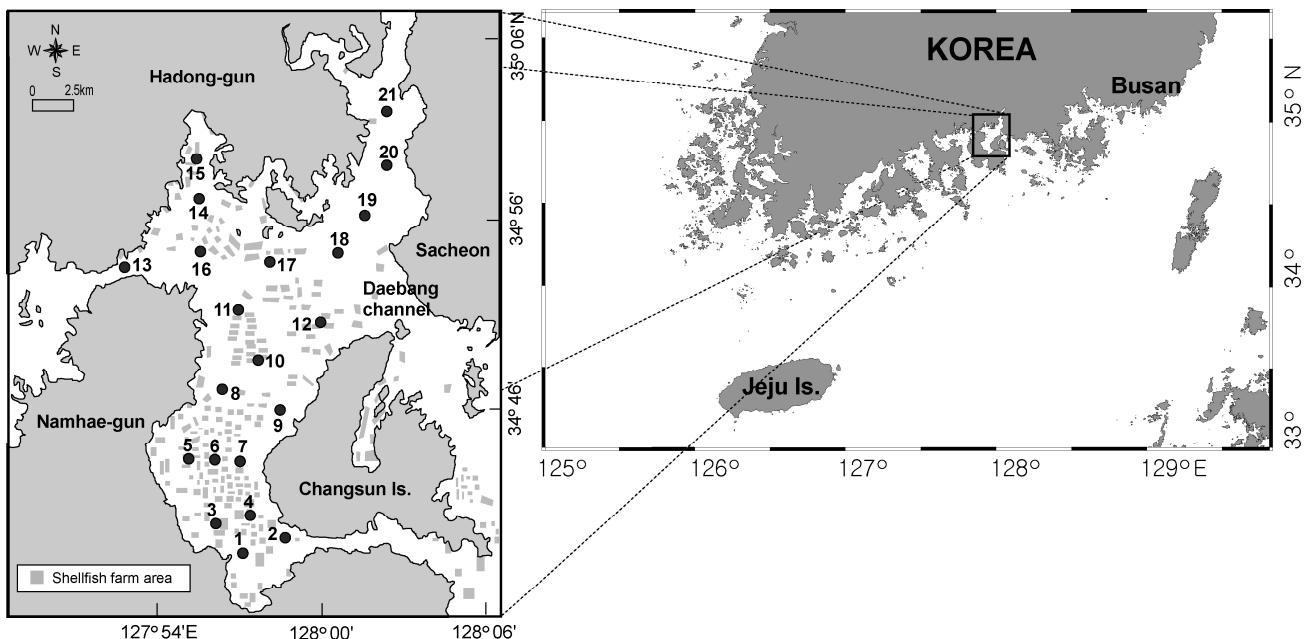


Fig. 1. Study area and location of the sediment sampling sites in Jinju Bay, southern coast of Korea.

용기(teflon vessel, Savillex Corp.)에 넣고 혼합산(HNO₃:HF:HClO₄=2:2:1)을 첨가한 후 130℃에서 8~9시간 동안 가열하여 퇴적물을 분해하였고, 퇴적물의 완전분해를 위해 이 과정을 2번 반복하였다. 그 다음에 2% 질산을 이용해 잔사가 남지 않을 때까지 완전히 녹여 여과지(Toyo 5C, Advantec, 110 mm)로 여과하여 100 mL 플라스틱로 정용한 후 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e)로 측정하였다.

분석자료의 정확성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 인증 표준물질(certified reference material)로서 Hg은 MESS-3(marine sediment, NRC), Hg을 제외한 금속원소는 PACS-2(marine sediment, NRC)를 시료와 함께 3개씩 측정하였다. 각 금속원소의 평균 회수율은 As 100%, Cd 98%, Cr 88%, Cu 90%, Fe 95%, Hg 101%, Mn 100%, Pb 94%, Zn 100%였다. 한편, 이 논문에서 분석된 AVS, IL, TOC, TN, ME의 농도는 건중량(dry)을 기준으로 하며, 농도단위에 별도로 표시하지 않았다.

2.3 유기물 및 금속원소 오염도 평가

진주만 퇴적물 내 유기물과 금속원소의 오염도를 평가하기 위하여 퇴적물 기준(sediment quality guidelines; SQGs)을 사용하여 각 분석항목별 오염도를 살펴보았다. 또한, 금속원소에 대해서는 오염부하량지수(pollution load index, PLI)와 생태계위해도지수(ecological risk index, ERI)를 이용하여 퇴적물 내 전체 금속원소 농도를 고려한 금속의 오염도 및 생태계위해성을 알아보았다.

먼저, 퇴적물 기준(SQGs)을 이용한 평가에서는 유기물의 경우 “어장관리법 제11조”에 따른 수산생물 서식 어장환경기준(MOF, 2017a)을 적용하여 AVS와 TOC 오염도를 평가하였고, 금속원소는 “해양환경 보전 및 활용에 관한 법률(이하 해양환경보전법) 제13조”에 따른 해양환경기준(MOF, 2018)을 적용하여 금속원소 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)의 오염도를 평가하였다.

PLI는 Tomlinson et al.(1980)에 의해 처음 제시되었으며, 퇴적물 중 전체 금속원소 농도를 고려한 금속의 오염도 평가 방법으로 이 연구에서는 진주만 퇴적물 중 지각물질 중에 풍부한 Fe과 퇴적물의 산화·환원 환경에 따라 농도변화가 큰 Mn을 제외한 금속원소 7종의 농도(C_m)와 각 금속원소의 배경농도(B_m)를 이용하여 다음의 식(1)로부터 PLI 값을 계산하여 금속의 오염도를 평가하였다.

$$PLI = \sqrt[7]{CF_{As} \times CF_{Cd} \times CF_{Cr} \times CF_{Cu} \times CF_{Hg} \times CF_{Pb} \times CF_{Zn}} \quad (1)$$

여기서 CF는 금속원소의 배경농도에 대한 진주만 퇴적물 중 금속원소의 농도비(C_m/B_m)를 나타낸다. 일반적으로 PLI 값이 1.0 미만인 경우 금속에 대하여 오염되지 않은 상태(none

polluted)를 의미한다.

ERI는 Hakanson(1980)에 의해 처음 제시되었으며, 퇴적물 중 전체 금속원소 농도가 저서생태계에 미치는 영향을 평가하는 방법으로 이 연구에서는 PLI와 마찬가지로 진주만 퇴적물 중 지각물질 중에 풍부한 Fe과 퇴적물의 산화·환원 환경에 따라 농도변화가 큰 Mn을 제외한 금속원소 7종의 농도, 각 금속원소의 배경농도 그리고 각 금속원소의 생태독성계수를 이용하여 다음의 식(2)와 (3)으로부터 ERI를 계산하여 금속에 의한 저서생태계 위해도를 평가하였다.

$$E_i = T_m \times CF \quad (2)$$

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

여기서, CF는 PLI의 CF와 같은 의미이고, T_m은 각 금속원소의 독성계수(As=10, Cd=30, Cr=2, Cu=5, Hg=40, Pb=5, Zn=1)이다(Lim et al., 2013; Sheykhi and Moore, 2013). 일반적으로 ERI<100는 저서생물에 부정적인 생태 영향을 줄 가능성이 낮은 상태(low risk), 100<ERI<150는 저서생물에 약간 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(moderate risk), 150<ERI<200는 저서생물에 상당한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(considerable risk), 200<ERI<300는 저서생물에 매우 심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(very high risk), 300<ERI는 저서생물에 극심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)를 의미한다.

이 연구에서 퇴적물 중 금속원소의 오염평가에 필요한 각 금속원소의 배경농도는 최근 Woo et al.(2019)이 보고한 우리나라 연안 퇴적물 중 각 금속원소의 평균농도(As 7.4 mg/kg, Cd 0.134 mg/kg, Cr 46.1 mg/kg, Cu 14.7 mg/kg, Hg 0.016 mg/kg, Pb 25.2 mg/kg, Zn 69.8 mg/kg)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표층 퇴적물의 유기물 농도

진주만 표층 퇴적물 중 유기물 함량 특성을 나타내는 AVS, IL, TOC, TN의 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 퇴적물 중 AVS, IL, TOC, TN의 농도는 각각 0.00~0.38 mg/g (평균 0.15±0.12 mg/g), 3.13~8.46% (평균 7.10±1.42%), 9.1~15.7 mg/g (평균 13.3±1.8 mg/g), 1.40~2.40 mg/g (평균 1.98±0.25 mg/g) 범위였다. 공간적으로 만의 입구쪽 정점들(Sts. 2, 12, 13, 17, 18)이 다른 정점들에 비해 낮은 유기물 함량을 보였다. 이는 진주만의 지형적 특성에 의한 퇴적물의 조성 및 밀집한 관련이 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 퇴적물 중 유기물 함량은 입도와 밀집한 관련이 있으며, 진주만의 경우 만의 크기

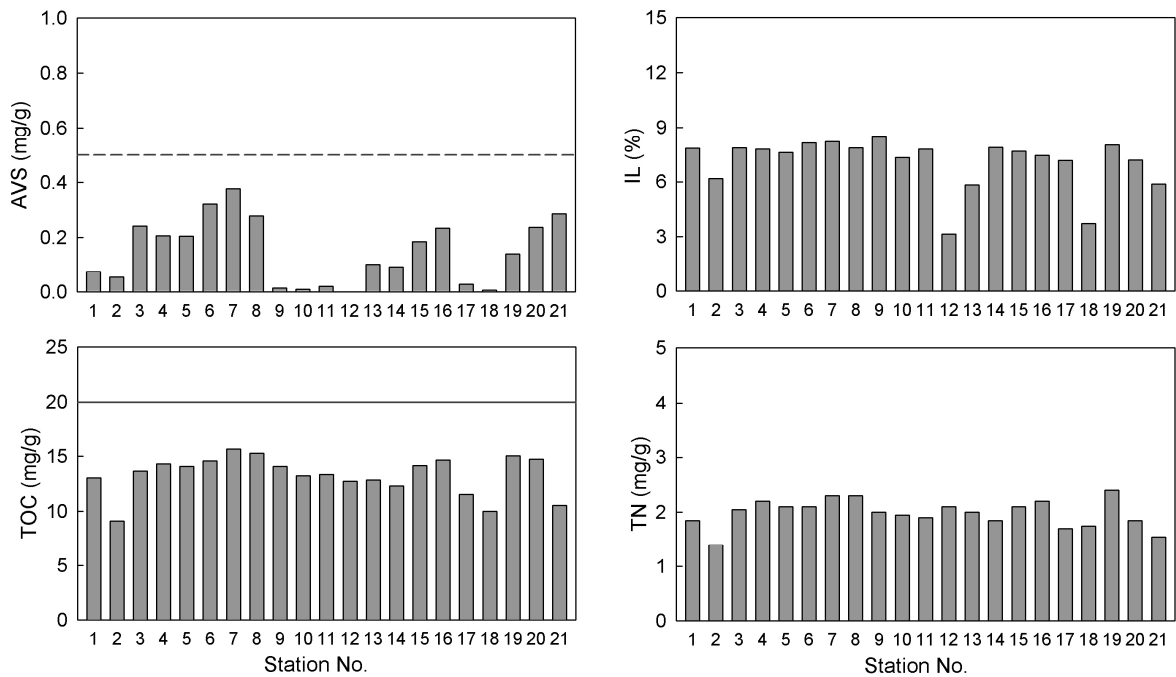


Fig. 2. The content of ignition loss (IL) and the concentrations of acid volatile sulfide (AVS), total organic carbon (TOC), and total nitrogen (TN) with each station in the surface sediment of Jinju Bay. The dotted and solid lines represent the sediment quality guidelines of AVS and TOC applied in farming area of Korea, respectively (MOF, 2017a).

에 비해 상대적으로 입구가 매우 좁고, 입구 쪽에 발생하는 강한 해수의 흐름으로 인해 동쪽과 남쪽 입구 주변에는 만내 다른 해역에 비해 상대적으로 조립한 역질니(gravelly mud) 퇴적물이 우세하게 분포하고 있다(MOF, 2013).

진주만 퇴적물 중 유기물의 기원을 알아보기 위하여 TOC에 대한 TN의 비(C/N ratio)를 Fig. 3에 나타내었다. 퇴적물 중 C/N 비는 모든 정점에서 5.7~8.0(평균 6.7±0.4) 사이를 나타내었다. 일반적으로 C/N 비가 10 이상이면 인근 육상으로부터 유입된 육상기원성 유기물이고, C/N 비가 5~10 사이이면 해역 내 생물체에 의해 생성된 해양기원성 유기물을 의미한다(Stein, 1991; Hyun et al., 2003). 따라서, 진주만 표층 퇴적물의 유기물은 해양 기원성 유기물이며, 이는 진주만내 서식하는 식물플랑크톤의 농도분포와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

한편, 진주만과 우리나라 남해안의 표층 퇴적물 중 유기물 농도를 비교한 결과(Table 1), AVS, IL, TOC는 연구해역과 비슷한 살포식 패류(주로 피조개)양식이 활발한 여자만(Choi et al., 2013)보다는 약간 높고, 수하식 패류(주로 굴)양식이 활발한 한산·거제만(MIFAFF, 2009), 고성·자란만(MIFAFF, 2010), 가막만(MIFAFF, 2010), 한국연안 퇴적물(Kang et al., 1993)과는 비슷하며, 임해공업단지 및 대도시가 밀집해 있는 부산항(Park et al., 1995), 마산항(Hwang et al., 2006), 진해만

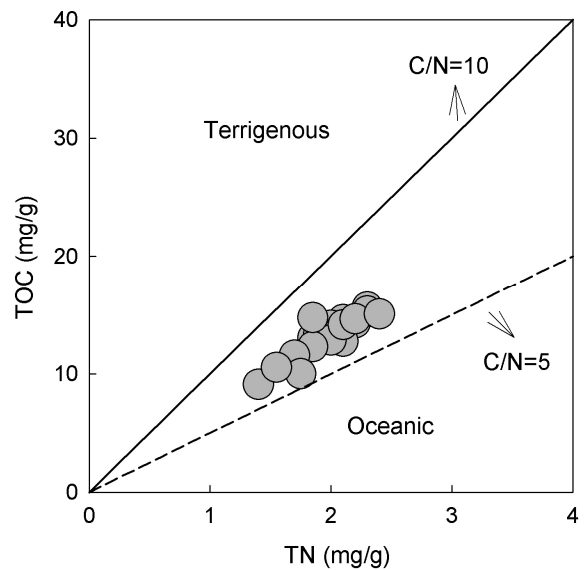


Fig. 3. Plot of total nitrogen (TN) versus total organic carbon (TOC) in the surface sediment of Jinju Bay.

(MIFAFF, 2009) 보다는 상당히 낮았다. 또한, TN은 여자만, 부산항 보다는 약간 높고, 마산항, 한산·거제만, 고성·자란만, 가막만, 한국 연안 퇴적물과는 비슷하며, 진해만 보다는 상당히 낮았다.

살포식 패류양식해역인 진주만 표층 퇴적물의 오염도

Table 1. Comparison of average content of ignition loss (IL) and average concentration for acid volatile sulfide (AVS), total organic carbon (TOC), and total nitrogen (TN) in Korean coastal sediment.

Study region	AVS (mg/g)	IL (%)	TOC (mg/g)	TN (mg/g)	Reference
Korean coast	0.2	6.7	11.0	1.9	Kang et al.(1993)
Busan Harbor	1.2	12.1	24.9	1.3	Park et al.(1995)
Masan Harbor	1.8	11.2	23.0	2.0	Hwang et al.(2006)
Jinhae Bay	0.7	9.7	27.7	3.7	MIFAFF(2009)
Hansan-Geoje Bay	0.1	8.0	18.7	2.4	MIFAFF(2009)
Goseung-Jaran Bay	0.1	7.2	14.5	2.0	MIFAFF(2010)
Gamak Bay	0.3	6.5	13.3	1.6	MIFAFF(2010)
Yeoja Bay	0.1	5.0	8.4	1.1	Choi et al.(2013)
Jinju Bay	0.2	7.1	13.3	2.0	This study
Sediment Guideline, Korea	0.5		20.0		MOF(2017a)

3.2 표층 퇴적물의 금속원소 농도

진주만 표층 퇴적물 중 금속원소 농도를 Fig. 4에 나타내었다. 퇴적물 중 금속원소 농도는 As 10.2~12.4 mg/kg (평균 11.2±0.5 mg/kg), Cd 0.05~0.17 mg/kg (평균 0.10±0.03 mg/kg), Cr 64.0~79.3 mg/kg (평균 72.7±4.3 mg/kg), Cu 19.8~26.2 mg/kg (평균 24.1±2.1 mg/kg), Fe 3.24~4.34% (평균 3.70±0.28%) Hg 0.026~0.037 mg/kg (평균 0.033±0.004 mg/kg), Mn 635~1,301 mg/kg (평균 953±179 mg/kg), Pb 28.0~41.5 mg/kg (평균 33.7±3.4 mg/kg), Zn 110~144 mg/kg(평균 130±10 mg/kg) 범위였다. 공간적으로만의 동쪽 입구인 대방수로 인근의 만 중앙부 정점들(Sts. 10, 11, 12 17, 18)이 다른 정점들에 비해 낮은 금속원소 농도를 보였다. 일반적으로 퇴적물 중 금속원소 농도는 유기물과 함께 퇴적물의 입도와 밀접한 관련이 있는데, 앞서 유기물 분포와 마찬가지로 진주만의 경우 외해와의 해수 교환이 동쪽에 위치한 대방수로를 통해 주로 이루어지고, 이 부근의 퇴적물은 만내 다른 해역과 다른 조립질의 역질니(gM) 퇴적물이 우세하게 분포하고 있다는 사실을 고려할 때(Kim et al., 2010; MOF, 2013), 이러한 진주만 퇴적물의 금속원소 농도 분포는 지형적 특성에 따른 퇴적물 조성과의 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

한편, 진주만과 우리나라 남해안의 표층 퇴적물 중 금속원소 농도를 비교한 결과(Table 2), 진주만의 표층 퇴적물 중 금속원소는 Fe>Mn>Zn>Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg 순으로 높은 농도를 나타내었다. 이러한 금속원소의 잔류패턴은 연구해역과 인접한 자란만(Hwang et al., 2018)과 살포식 패류양식이 활발한 여자만(Choi et al., 2015a)과 득량만(Jeon et al., 2012) 퇴적물 중 금속원소의 잔류패턴과 일치하고, 남해동부에 위치하고 있는 수하식 패류(주로 굴) 양식이 활발한 진해만(Choi et al., 2015b), 한산·거제만(Hwang et al., 2015), 고성

만(Lee et al., 2017), 가막만(Kim et al., 2012) 퇴적물 중 금속원소의 잔류패턴과도 매우 유사하였다. 또한, 진주만 퇴적물의 금속원소 평균농도는 진해만의 Mn, 한산·거제만의 Fe, Mn, 고성만의 Pb, 자란만의 As, Mn, 가막만의 As, Mn, Pb, Zn, 여자만의 Fe, As, Cd, Cu, 득량만의 As, Cu, Pb, Zn 보다는 다소 높았지만 그 외 금속원소는 비슷하거나 상당히 낮았다(Table 2).

3.3 퇴적물 유기물 및 금속원소 오염도

진주만과 같이 수심이 얕고 살포식 패류 양식이 성행하고 있는 해역에서는 퇴적물 중의 유기물 및 금속이 어장환경뿐만 아니라 수중 및 퇴적물 내에 서식하는 양식생물에게 나쁜 영향을 줄 수 있으며, 최종적으로 이를 섭취하는 인간의 건강에도 위협을 줄 수 있다. 따라서, 진주만내 양식생물의 지속적인 생산과 안전성 확보를 위하여 퇴적물 중 유기물과 금속에 대한 현재의 오염상태를 파악할 필요가 있다. 이 연구에서는 앞서 2.3절에서 설명한 바와 같이, 3가지 평가방법(SQGs, PLL, ERI)을 이용하여 진주만 표층 퇴적물의 유기물 및 금속원소의 오염상태를 평가하였다.

2017년 해양수산부에서 제정한 수산생물 서식 어장환경기준 중 퇴적물 기준에는 유기물 오염지표인 AVS(0.5 mg/g)와 TOC(20 mg/g) 기준이 있다(MOF, 2017a). 이 기준에서는 같은 정점에서 채취한 2월과 8월 퇴적물 중 AVS와 TOC의 평균값을 이용하여 기준값과 비교하도록 하고 있으나, 이 연구에서는 2월 조사가 이루어지지 않아 8월 조사결과만을 가지고 진주만의 오염상태를 살펴보았다. 그 결과, 퇴적물 중 AVS와 TOC는 모든 정점에서 어장환경기준 미만을 보였다(Fig. 2), 따라서, 진주만 퇴적물은 유기물에 대해 오염되지 않은 건강한 상태를 유지하고 있는 것으로 파악되었다.

2011년 처음 해양수산부에서 제정한 해양환경기준 중 퇴

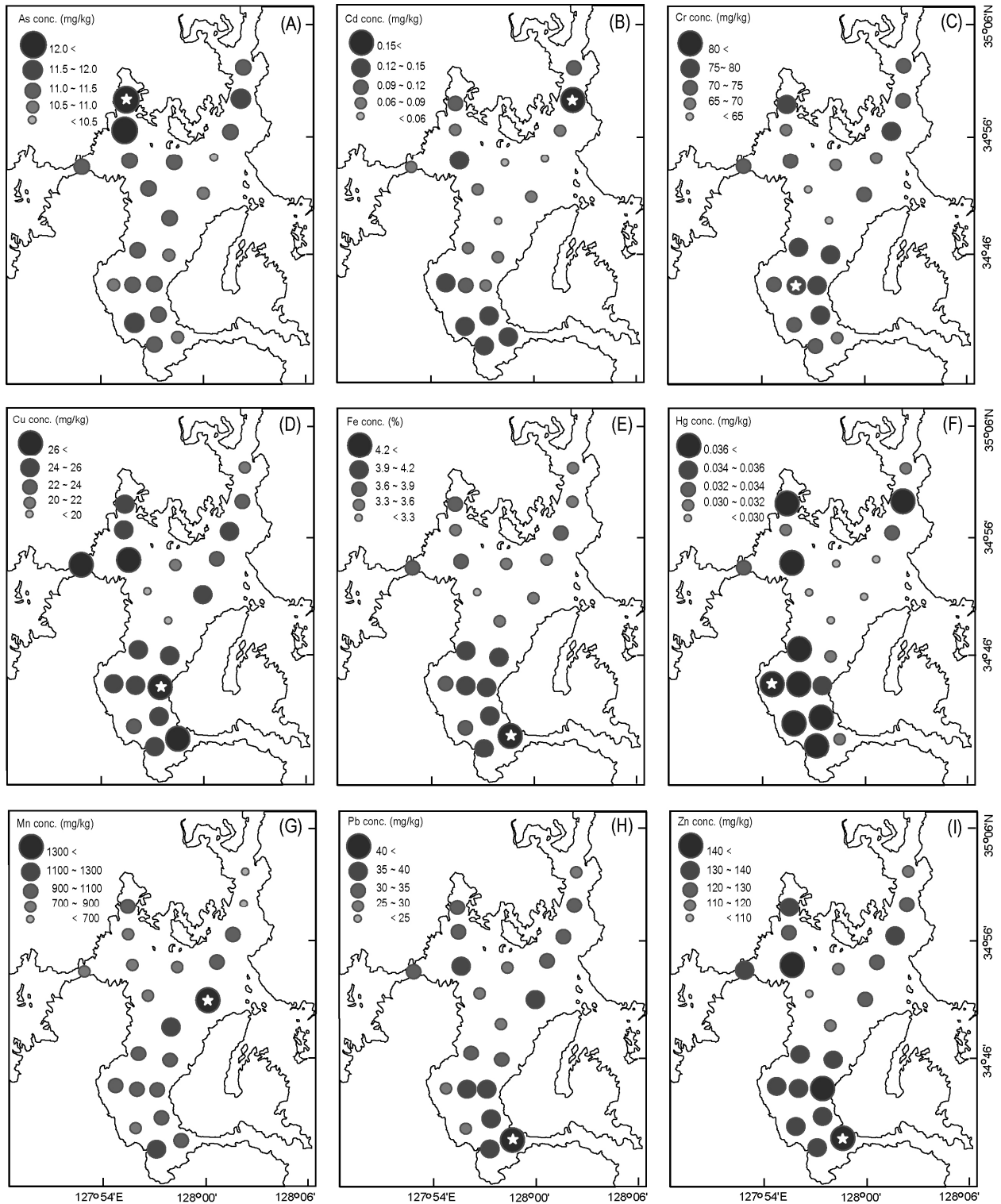


Fig. 4. Spatial distributions of metallic elements (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) concentrations in the surface sediments of Jinju Bay. The star mark represents the station with the maximum concentration of each metal.

살포식 패류양식해역인 진주만 표층 퇴적물의 오염도

Table 2. Comparison of average concentration for metallic elements (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in the surface sediments of the southern coast, Korea. The Cu and Zn concentrations in parenthesis are average of Cu and Zn concentrations corrected by Li concentration in the surface sediment of Jinju Bay.

Study region	Metal (%)	Metal (mg/kg)								Reference
	Fe	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Pb	Zn	
Jinhae Bay	3.7	11.1	0.52	70	57	0.06	600	40	167	Choi et al.(2015b)
Hasan-Geoje Bay	3.4	10.3	0.12	89	38	0.03	651	30	140	Hwang et al.(2015)
Goseong Bay	4.4	11.2	0.15	82	38	0.03	1089	27	159	Lee et al.(2017)
Jaran Bay	4.0	9.8	0.15	78	31	0.03	673	40	146	Hwang et al.(2018)
Gangjin Bay	4.0	10.5	0.11	82	27	0.03	1019	33	157	Choi et al.(2015a)
Gamak Bay	3.8	9.8	0.14	78	28	0.02	717	28	114	Kim et al.(2012)
Yeoja Bay	3.5	7.4	0.05	81	17	0.02	893	29	137	Choi et al.(2015a)
Deukryang Bay	3.8	9.6	0.10	74	15	0.01	838	27	90	Jeon et al.(2012)
Jinju Bay	3.7	11.2	0.10	73	24 (7.3)	0.03	953	34	130 (46.5)	This study
Background, Korea		7.4	0.13	46	15	0.02		25	70	Woo et al.(2019)
Threshold effects levels (TEL)		14.5	0.75	116	20.6	0.11		44	68.4	MOF(2018)

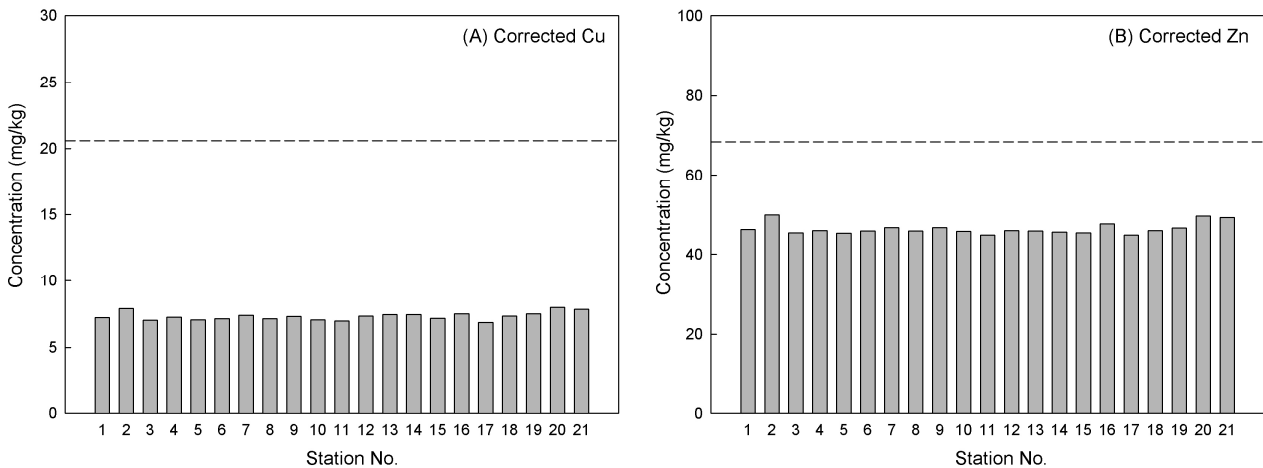


Fig. 5. The concentrations of (A) Cu and (B) Zn corrected by Li concentration with each station in the surface sediment of Jinju Bay. The dotted line represents the quality guidelines of Cu and Zn concentrations in Korean coastal sediment suggested by MOF (2018).

적물 기준은 2018년 기준으로 총 8종의 금속원소(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)에 대한 주의기준(Threshold effects levels, TEL)과 관리기준(Probable effects levels, PEL)이 설정되어져 있으며(MOF, 2018), 금속원소 중 Cu와 Zn은 Li 농도로 보정한 농도를 기준농도와 비교하도록 되어 있다. 이 연구에서는 진주만 퇴적물 중 Ni을 제외한 7종의 금속원소 농도를 TEL(As 14.5 mg/kg, Cd 0.75 mg/kg, Cr 116 mg/kg, Cu 20.6 mg/kg, Hg 0.11 mg/kg, Pb 44 mg/kg, Zn 68.4 mg/kg)값과 비교하여 각 금속원소의 오염상태를 살펴보았다. 그 결과, 진주만 퇴적물 중 As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn은 모든 정점에서 TEL 미만이었다(Figs. 4 and 5).

진주만 퇴적물 중 금속원소 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)의 농도, 각 금속원소의 우리나라 연안 퇴적물 중 배경농도 및 생태독성계수를 방정식(1)~(3)에 대입하여 계산한 각 정점별 PLI와 ERI 값을 Fig. 6에 나타내었다. PLI는 1.21~1.62(평균 1.46) 범위로 금속원소의 농도분포와 유사하게 만의 동쪽 입구인 대방수로 부근의 만내 중앙부에서 다른 해역에 비해 낮았다. 모든 정점에서 1.0을 초과하여 오염된 상태(polluted)를 나타내었으며, 특히 패류양식장이 밀집해 있는 만의 남쪽(Sts. 1~6, 8)과 북서쪽(Sts. 15~16), 북동쪽(St. 20)의 일부 정점에서 1.5 이상으로 다른 정점들에 비해 상대적으로 높은 오염상태를 나타내었다(Fig. 5a). 또한, 진주만은 이전에

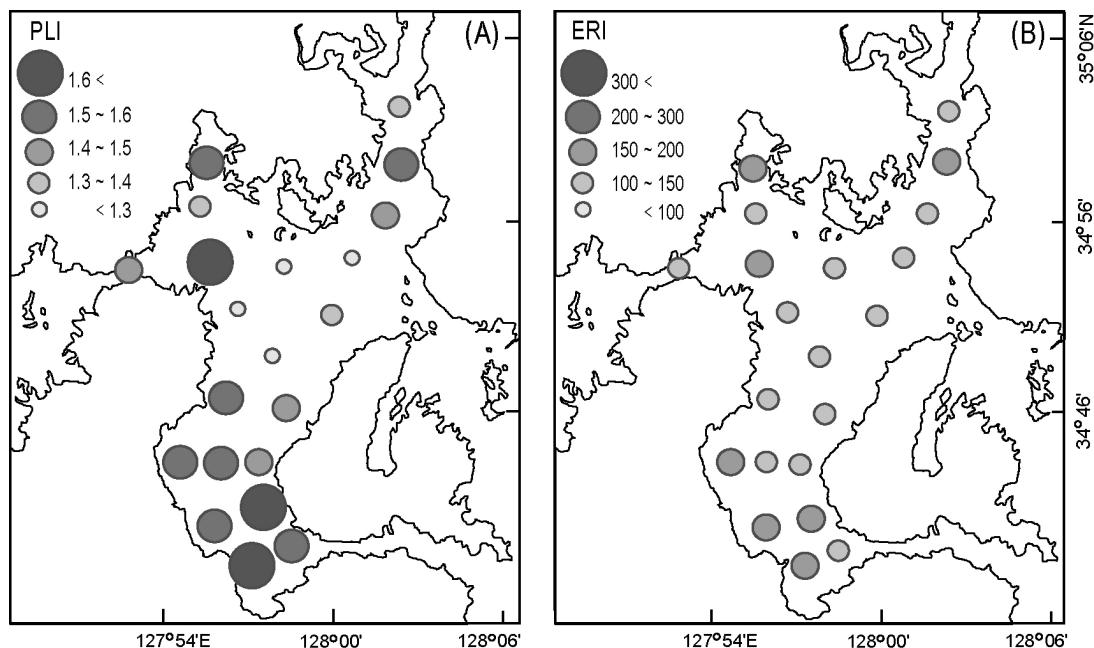


Fig. 6. Spatial distributions of (A) pollution load index (PLI) and (B) ecological risk index (ERI) values in the surface sediment of Jinju Bay.

남해서부 연안의 반폐쇄적인 내만(가막만, 여자만, 득량만, 강진만, 함평만) 퇴적물에서 조사된 PLI 값(0.6~1.3, 평균 1.0; Koo et al., 2019)보다는 높았다. 하지만, 남해동부 연안의 수하식 패류 양식이 활발한 한산·거제만과 자란만 퇴적물에서 조사된 PLI 값(1.3~1.8, 평균 1.6; Hwang et al., 2015; 2018)과는 비슷하였으며, 고성만 퇴적물에서 조사된 PLI 값(1.4~2.1, 평균 1.7; Lee et al., 2017) 보다는 약간 낮았다.

ERI는 109~164 (평균 139) 범위로, 만의 동쪽 입구인 대방수로 부근의 만 중앙부에서 만내 다른 해역에 비해 낮은 ERI 값을 나타내었다. PLI의 분포와 유사하게 만의 남쪽(Sts. 1, 3, 4, 5)과 북서쪽(Sts. 15, 16), 북동쪽(St. 20)의 일부 정점에서 150 이상을 나타내어 저서생물에 상당한 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 상태(considerable risk)였으나, 그 외 대부분의 정점들은 $100 < ERI < 150$ 사이로 저서생물에 약간 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 상태(moderate risk)인 것으로 파악되었다(Fig. 5b). 또한, 진주만은 이전에 남해서부 연안의 반폐쇄적인 내만 퇴적물에서 조사된 ERI 값(61~118, 평균 85; Koo et al., 2019)보다는 높지만, 남해동부 연안의 한산·거제만(104~204, 평균 142; Hwang et al., 2015)과 자란만(101~202, 평균 146; Hwang et al., 2018) 퇴적물에서 조사된 ERI 값과 비슷하고, 고성만 퇴적물에서 조사된 ERI 값(112~239, 평균 157; Lee et al., 2017)보다는 낮았다.

이상의 3가지 퇴적물 오염평가 결과를 기초로 진주만 퇴적물 중 금속원소의 오염상태를 살펴보면, 진주만 퇴적물은 우리나라의 해저퇴적물 기준 중 TEL보다 낮아 각각의 금속

에 대해서 오염되지 않은 상태이다. 또한, 전체 금속원소(7종)의 농도를 고려할 경우, 비록 패류 양식장이 밀집해 있는 남쪽해역을 중심으로 높은 금속의 오염도를 보이지만, 만내 대부분의 해역은 저서생물에 약간 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 오염 상태인 것으로 파악되었다.

4. 결론

남해 중부해역에 위치하고 있는 진주만은 우리나라의 대표적인 살포식 패류양식해역으로 수산자원보호구역 및 수출용 패류생산해역으로 지정될 만큼 수산학적으로 가치가 매우 높은 곳이다. 퇴적물 중 유기물(AVS, IL, TOC, TN)과 금속원소(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Mn, Zn) 농도는 패류 양식장이 밀집해 있는 만의 남쪽해역에서 높았으며, 우리나라 남해안의 다른 해역과 비슷하거나 낮았다. 퇴적물 오염평가 결과, 유기물은 어장환경기준, 금속원소는 해양환경기준 중 주의기준(TEL)보다 상당히 낮은 농도를 나타내었다. 또한, 금속원소의 경우, 전체 농도를 고려한 오염부하량지수(PLI)와 생태계위해도지수(ERI)가 패류 양식장이 밀집되어 있는 만의 남쪽해역에서 높은 금속 오염도를 보이지만, 대부분의 해역은 저서생물에 약간 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 오염 상태인 것으로 나타났다. 그러므로, 진주만 퇴적물은 유기물과 금속에 대해 아직 우려할 만큼 오염되지 않았으며, 패류 양식을 하기에 적합한 퇴적환경을 유지하고 있는 것으로 파악되었다.

사 사

이 논문은 2020년도 국립수산물학원 수산과학연구소에서 어장환경 모니터링(R2020047)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- [1] Choi, M., H. C. Kim, D. W. Hwang, I. S. Lee, Y. S. Kim, Y. J. Kim, and H. G. Choi(2013), Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, pp. 424-436.
- [2] Choi, M., I. S. Lee, D. W. Hwang, H. C. Kim, S. P. Yoon, S. Yun, C. S. Kim, and I. S. Seo(2017), Organic enrichment and pollution in surface sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with dense oyster farms. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 50, pp. 777-787.
- [3] Choi, M., I. S. Lee, H. C. Kim, and D. W. Hwang(2015a), 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*, Vol. 48, pp. 789-797.
- [4] Choi, M. S., J. H. Chun, H. J. Woo, and H. I. Yi(1999), Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake. *Journal of the Korean Environment Science of Society*, Vol. 8, pp. 593-600.
- [5] Choi, T. J., J. N. Kwon, G. Lee, H. Hwang, Y. Kim, and J. H. Lim(2015b), Distribution and pollution assessment of trace metals in the surface sediments around farming area of Jinhae Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 21, pp. 347-360.
- [6] Fang, T. H. and E. Hong(1999), Mechanisms influencing the spatial distribution of trace metals in surficial sediments off the south-western Taiwan, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 38, No. 11, pp. 1026-1037.
- [7] FAO(2016), The state of world fisheries and aquaculture 2016: Contributing to food security and nutrition for all, Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, p. 200.
- [8] Hakanson, L.(1980), An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, Vol. 14, pp. 975-1001.
- [9] Hwang, D. W., H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim, J. S. Park, and S. G. Kim(2006), Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor, Korea. *Journal of the Korean Fisheries Society*, Vol. 39, pp. 106-117.
- [10] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi, and J. H. Shim(2015), Distribution of organic matter and trace metal concentrations in surface sediments around the Hansan-Geoje Bay. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, Vol. 18, pp. 131-143.
- [11] Hwang, H., D. W. Hwang, G. Lee, H. C. Kim, and J. N. Kwon(2018), Distributions of organic matter and heavy metals in the surface sediment of Jaran Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 24, pp. 78-91.
- [12] Hyun, S., C. H. Lee, T. Lee and J. W. Choi(2007), Anthropogenic contributions to heavy metal distributions in the surface sediments of Masan Bay, Korea, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 54, No. 7, pp. 1059-1068.
- [13] Hyun, S., T. Lee, J. S. Choi, D. L. Choi, and H. J. Woo(2003), Geochemical characteristics and heavy metal pollutions the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea. *The Sea-Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 8, pp. 380-391.
- [14] Jeon, S. B., P. J. Kim, S. S. Kim, J. S. Ju, Y. H. Lee, D. S. Jang, J. U. Lee, and S. Y. Park(2012), Characteristics of spatial distribution of geochemical components in the surface sediments of the Deukryang Bay. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, Vol. 15, pp. 203-214.
- [15] Kang, C. K., P. Y. Lee, J. S. Park, and P. J. Kim(1993), On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea. *Journal of the Korean Fisheries Society*, Vol. 26, pp. 557-566.
- [16] Kim, C. K., J. T. Lee, and H. S. Jang(2010), Water circulation structure in the Chinju Bay of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, pp. 215-223.
- [17] Kim, P. J., S. G. Shon, S. Y. Park, S. S. Kim, S. J. Jang, S. B. Jeon, and J. S. Ju(2012), Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 18, pp. 67-83.
- [18] Koo, J. H., G. Lee, H. Hwang, J. B. Kim, S. S. Kim, and D. W. Hwang(2019), Distribution of organic matter and heavy metals in the surface sediments from fishery resources protection areas in the southwestern coast of Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 25,

- pp. 666-677.
- [19] Kwon, J. N.(2010), Characteristic of long term variation of the water quality at the waters of Goseong Bay. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 13, pp. 279-287.
- [20] Lee, G., D. W. Hwang, H. Hwang, J. H. Park, H. C. Kim, and J. N. Kwon(2017), Distribution and pollution status of organic matter and heavy metals in surface sediment around Goseong Bay, a shellfish farming area, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, pp. 699-709.
- [21] Lee, W. C., Y. S. Cho, S. J. Hong, H. C. Kim, J. B. Kim, and S. M. Lee(2011), Estimation of ecological carrying capacity for oyster culture by ecological indicator in Goeje-Hansan Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 17, pp. 315-322.
- [22] Lim, D. I., J. W. Choi, H. H. Shin, D. H. Jeong, and H. S. Jung(2013), Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediment of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 73, pp. 362-368.
- [23] MIFAFF(2009), Status investigation of fishery environment in 2008. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF), Report No 11-1541370-000085-01, p. 243.
- [24] MIFAFF(2010), Status investigation of fishery environment in 2009. Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF), Report No 11-1541000-000538-01, p. 443.
- [25] MLTM(2010), A Guidebook for the seawater, sediment and marine biota analyses in ocean environment. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), Notification No. 2010-491, p. 495.
- [26] MOF(2013), The investigation of coastal wetland in Korea - Precision investigation in 2012 and 2013. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Report No. 11-1192000-000003-10, p. 353.
- [27] MOF(2017a), Quality guidelines for habitat environment of marine biota in Korea.. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Notification No. 2017-109, p. 1.
- [28] MOF(2017b), Statistical yearbook of Oceans & Fisheries in 2017. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Report No. 11-1192000-000071-10, p. 500.
- [29] MOF(2018), Quality guidelines for marine environment in Korea. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Notification No. 2018-10, p. 10.
- [30] NFRDI(2008), Environmental research of aquaculture farm in Korea. National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), NFRDI 1st Report, p. 243.
- [31] NGII(1990), Coastal area base map (1:25,000 scale topographic map). National Geographic Information Institute (NGII), NI 52-6-04-4 South Sea, p. 1.
- [32] NIFS(2019), Construction of management system for fisheries resource protection area in 2018. National Institute of Fisheries Science (NIFS), Report No. TR-2019-ME-006, p. 604.
- [33] Oh, S. J., J. S. Lee, J. S. Park, I. H. Noh, and Y. H. Yoon(2008), Environmental factor on the succession of phytoplankton community in Jinju Bay, Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 11, pp. 98-104.
- [34] Park, Y. C., H. S. Yang, P. Y. Lee, and P. J. Kim(1995), Environmental characteristics of the seawater and surface sediment in the vicinity of Pusan Harbor area in winter. *Journal of the Korean Fisheries Society*, Vol. 28, pp. 577-588.
- [35] Ra, K., E. S. Kim, K. T. Kim, J. K. Kim, J. M. Lee, and J. Y. Choi(2013), Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, 105-110.
- [36] Sheykhi, V. and F. Moore(2013), Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river southwest Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 185, pp. 3219-3232.
- [37] Stein, R.(1991), Accumulation of organic carbon in marine sediments. Springer Verlag, Berlin, pp. 1-217.
- [38] Tomlinson, D. L., J. G. Wilson, C. R. Harris, and D. W. Jeffrey(1980), Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, Vol. 33, pp. 566-575.
- [39] Woo, J. S., H. J. Lee, J. K. Park, K. K. Park, D. J. Cho, D. J. Jang, S. J. Park, M. S. Choi, and J. K. Yoo(2019), Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 24, pp. 64-78.

Received : 2020. 04. 22.

Revised : 2020. 06. 04.

Accepted : 2020. 06. 26.