

남서해연안 수산자원보호구역 표층 퇴적물 중 유기물 및 중금속 농도분포

구준호* · 이가람** · 황현진** · 김정배** · 김상수*** · 황동운**†

*, ** 국립수산과학원 어장환경과, *** 국립수산과학원 남해수산연구소

Distribution of Organic Matter and Heavy Metals in the Surface Sediments from Fishery Resources Protection Areas in the Southwestern Coast of Korea

Jun-Ho Koo* · Garam Lee** · Hyunjin Hwang** · Jeong-Bae Kim** · Sang-Su Kim*** · Dong-Woon Hwang**†

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

*** South Sea Fisheries Research Institute, Yeosu 59780, Republic of Korea

요약 : 수산자원보호구역의 유기물과 중금속 분포특성을 파악하기 위하여 2017년 2월 남서해연안 5개 수산자원보호구역(가막만, 여자만, 득량만, 완도연안, 영광연안) 54개 정점에서 표층 퇴적물을 채취하여 입도, 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산취발성황화물(AVS) 및 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn)을 분석하였다. 평균입도(Mz)는 평균 7.4±0.10였으며, 주로 세립한 니(mud) 퇴적물로 구성되어 있었다. IL, COD와 AVS의 평균농도는 각각 4.63±0.96 %, 13.0±3.1 mgO₂/g-dry, 0.092±0.124 mgS/g-dry였으며, 영광연안이 다른 보호구역에 비해 낮았다. 중금속의 평균농도는 각각 As 7.5±0.9 mg/kg, Cd 0.04±0.02 mg/kg, Cr 70.2±9.7 mg/kg, Cu 15.3±2.8 mg/kg, Fe 3.3±0.5 %, Hg 0.014±0.003 mg/kg, Pb 25.0±6.0 mg/kg, Zn 99±14 mg/kg였으며, 보호구역내 대부분 만 안쪽에서 높고 만 외측 및 외측연안에서 낮은 특성을 보였다. 퇴적물기준(sediment quality guidelines, SQGs), 오염부하량지수(pollution load index, PLI), 생태계위해도지수(ecological risk index, ERI)를 사용하여 퇴적물 중금속 오염도를 평가한 결과, 남서해연안 수산자원보호구역 퇴적물은 수산생물 및 저서생물에 영향을 주지 않는 안전한 중금속 농도를 유지하고 있었다.

핵심용어 : 퇴적물, 유기물, 중금속, 오염, 수산자원보호구역

Abstract : In order to understand the distribution of organic matter and heavy metal concentrations in the surface sediments of fishery resources protection areas (FRPAs), we measured the grain size, ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), and concentrations of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, and Zn) in the surface sediments collected at 54 stations of 5 FRPAs (Gamak Bay, Yeoja Bay, Deukryang Bay, Wando coast, and Youngkwang coast) in the southwestern coast of Korea in February 2017. The surface sediments consisted of fine sediment such as mud, with 2.9–8.8 ϕ (7.4±0.10) of mean grain size. The average concentrations of IL, COD, and AVS in the sediments were 4.63±0.96 %, 13.0±3.1 mgO₂/g-dry, and 0.092±0.124 mgS/g-dry, respectively, and were lower for sediments from the Youngkwang coast than those from other FRPAs. The average concentrations of heavy metals in the sediment were 7.5±0.9 mg/kg for As, 0.04±0.02 mg/kg for Cd, 70.2±9.7 mg/kg for Cr, 15.3±2.8 mg/kg for Cu, 3.3±0.5 % for Fe, 0.014±0.003 mg/kg for Hg, 25.0±6.0 mg/kg for Pb, and 99±14 mg/kg for Zn, respectively, and were relatively higher for sediments in the inner bays than those from the outer bays and coasts. Based on the assessment of sediment samples using the sediment quality guidelines (SQGs), the pollutant load index (PLI), and the ecological risk index (ERI), the surface sediments of FRPAs in the southwestern coast of Korea do not appear to be polluted by heavy metals, suggesting that the heavy metal concentrations in the sediments would not adversely impact aquatic and benthic organisms.

Key Words : Sediment, Organic matter, Heavy metal, Pollution, Fishery resources protection area

* First Author : junhokoo@korea.kr, 051-720-2543

† Corresponding Author : dwhwang@korea.kr, 051-720-2542

1. 서론

중금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn)은 쉽게 분해되지 않고 오랫동안 환경에 남아 순환하는 난분해성, 잔류성 물질로 일부 중금속의 경우 자체적으로 가지는 강한 독성으로 인해 생물에 나쁜 영향을 줄 수 있어 최근 전 세계적으로 주목 받고 있는 유해 환경오염물질 중에 하나이다(Yu et al., 2008; Billah et al., 2017). 이들 중금속은 주로 지각의 풍화와 침식작용을 통해 환경 중에 자연적으로 배출되었으나, 산업 발달과 더불어 금속을 생산하는 제철소 및 제련소, 금속 제품을 생산하는 각종 공장들의 매연이나 폐수, 금속광산의 폐수, 도시하수 등 인위적인 오염원들로부터 배출되어 대기나 하천, 강과 같은 지표수, 땅속의 지하수 등을 통해 이동하여 최종적으로 해양에 유입된다(Hwang et al., 2014; Jeong et al., 2017).

일반적으로, 중금속은 입자물질에 잘 흡착하는 성질이 있어 해수 중에 용존상태로 존재하기 보다는 동·식물플랑크톤에 흡수되거나 이들의 사체, 수산생물의 배설물 등 수중에 부유하는 유기물 및 입자와 결합하여 해저퇴적물에 침강하여 축적된다. 이로 인해 해저퇴적물 내 중금속 농도는 해수보다도 $10^3 \sim 10^5$ 배 정도 높아 퇴적물은 해양환경에서 중금속의 가장 큰 저장고로 알려져 있다(Sin et al., 2001; Zabetoglou et al., 2002; Santos et al., 2005). 따라서, 해저퇴적물은 연안환경에서 중금속의 농도변화 및 오염현황을 파악하는데 가장 유용한 매체로서 지금까지 국내외 많은 연구자들에 의해 지속적으로 조사가 이루어지고 있다(Caccia et al., 2003; Morillo et al., 2004; Yuan et al., 2012; Ra et al., 2013; Hwang et al., 2016; 2019). 우리나라의 국민 1인당 수산물 소비량은 약 58.4 kg (2013-2015년 평균)으로 전세계 수산물 평균 소비량(약 20.2 kg)보다 상당히 높고, 앞으로 그 양은 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다(FAO, 2016). 그 동안 이러한 소비량 증대에 맞춰 연안의 천해 양식을 통한 수산물 생산량은 양식업의 발달과 호조로 매년 증가하여 왔으나, 해면어업(잡는어업)을 통한 수산물 생산량은 기후변화, 연안 환경오염, 수산자원의 남획 등으로 인해 지속적으로 감소해 왔다(NIFS, 2019). 그러므로, 수산물 수요량 증가에 대응하기 위한 해면어업의 안정적인 생산체계를 구축할 필요가 있으며, 이러한 시기에 수산자원 보호구역(fisheries resource protection area, FRPA)의 역할이 매우 중요하다고 할 수 있다.

수산자원보호구역은 1970년대 경제개발에 따른 도시화와 산업화의 영향으로 육상에서 유입되는 오염물질로부터 해수면과 내수면의 수산자원을 보호·육성하기 위하여 “국토의 계획 및 이용에 관한 법률 제40조”에 의거 지정된 용도구역 중에 하나이다. 해수면의 경우, 1975년 진동만과 한산만이

보호구역으로 처음 지정된 이후 1982년까지 총 10개의 보호구역(진동만, 한산만, 남해·통영 I, 남해·통영 II, 가막만, 여자만, 득량만, 완도연안, 영광연안, 천수만)이 지정되었으며, 그 면적은 2017년 말 기준으로 약 2,860 km²에 달한다(NIFS, 2019). 이들 보호구역은 대부분 남해안의 반폐쇄적인 내만을 끼고 있어 많은 어류들의 산란장, 성육장으로써 생태적 가치가 매우 높고 어류, 패류, 해조류 등 수많은 양식장이 산재해 있어 국내 수산물 생산에 있어서 매우 중요한 해역이다.

그러나, 1990년대 이후 지역 산업 및 관광 활성화를 위한 간척과 매립, 산업단지 및 관광단지의 조성, 연육교의 건설, 해상케이블카 설치 등 다양한 연안 개발사업이 추진되었고, 양식산업의 발달에 따른 무분별한 어업면허의 허가, 가용먹이량을 초과하는 양식시설의 설치 등 연안이용 증가로 인해 수산생물의 서식처는 감소하였다. 더욱이, 육상으로부터 유입되는 각종 유기물 및 중금속 등 오염물질 부하량이 증가하면서 적조, 빈산소수괴 발생 등 연안 재해가 빈번히 발생하고 오염물질에 의한 수산생물의 질병 발생, 성장저하, 높은 폐사율과 이를 해결하기 위한 무분별한 항생제의 사용 등으로 인해 안전하고 건강한 수산물 생산해역으로서 그 기능을 위협받고 있다.

지금까지 수산자원보호구역 내 수질 및 퇴적환경 특성, 수산자원 현황, 양식생물 안전성 등에 관한 많은 연구가 진행되어져 왔으며, 퇴적물 중금속에 대한 연구 또한 가막만(Kim et al., 2012), 여자만(Choi et al., 2015a), 득량만(Jeon et al., 2012), 진해만(Choi et al., 2015b), 한산만(Hwang et al., 2015b; Lee et al., 2017), 자란만(Hwang et al., 2018) 보호구역에 대해 개별적인 연구가 꾸준히 진행되어져 왔다. 하지만, 이들 연구는 양식어장 주변 혹은 보호구역 내 일부 해역에서 퇴적물 중금속 분포 특성을 파악하고 있을 뿐 보호구역 전체 해역에 대한 퇴적물 내 중금속 분포 특성을 파악한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서, 이 연구에서는 수산생물의 산란장과 성육장 및 양식생물의 생산해역으로서 가치가 높은 수산자원보호구역의 퇴적물 내 중금속 분포 특성을 살펴보고, 다양한 지화학적 오염평가방법을 이용하여 중금속 오염현황을 파악하고자 하였다. 이를 위해 연구해역으로서 서로 다른 해양환경 특성을 가진 남서해연안 5개 보호구역(가막만, 여자만, 득량만, 완도연안, 영광연안)을 연구해역으로 선정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채취 및 분석방법

남서해연안 수산자원보호구역의 표층 퇴적물 중 유기물

및 중금속 분포특성을 파악하기 위해 2017년 2월 국립수산과학원 탐구 11호와 주변의 어선을 이용하여 가막만 8개 정점, 여자만 14개 정점, 득량만 13개 정점, 완도연안 13개 정점, 영광연안 6개 정점에서 채니기(van Veen grab sampler)로 표층(0~2 cm) 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물은 일회용 스포를 사용하여 미리 산세척한 고밀도폴리에틸렌병(HDPE bottle)에 옮겨 담아 냉동 상태로 실험실로 운반한 후 입도 (grain size), 강열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량 (chemical oxygen demand, COD), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn)을 Hwang et al.(2015a)에 제시된 방법에 따라 분석하였다. 각 항목별 분석방법을 간단히 소개하면, 입도는 유기물과 탄산염을 제거한 퇴적물을 40 표준체로 조립질과 세립질 퇴적물로 분리하여 각각 진탕기(sieve shaker, CISA, RP 200N)를 이용한 건식 체질과 피펫팅법으로 입자크기별 무게를 측정하여 퇴적물 조성을 알아내었다. 이후, Folk and Ward(1957)의 계산식으로 평균입도(mean grain size, Mz)를 구하였으며, Folk(1968)의 삼각좌표에 도시하여 퇴적형태(sedimentary type)를 구분하였다. 또한, IL은 회화 전후의 무게차이를 이용한 무게법, COD는 NaOH를 이용한 알칼리성 과망간산칼륨(KMnO₄)법, AVS는 황산을 이용한 황화수소검지관법으로 분석하였고, 중금속은 혼합산을 이용한 완전분해법으로 퇴적물을 분해한 후 유도 결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, Elan DRC-e)와 수은자동분석기(mercury analyzer, Milestone, DMA 80)로 측정하였다. 중금속 분석 결과의 정확성을 검증하기 위하여 캐나다 국가연구위원회의 산하연구소(national research council Canada, NRCC)에서 제작한 인증표준물질(certified reference material, CRM)인 MESS-3와 PACS-2(marine sediment)를 시료와 같은 방법으로 분석하여 측정하였고, 각 원소별 평균 회수율은 As 99%, Cd 94%, Cr 89%, Cu 89%, Fe 116%, Hg 100%, Pb 100%, Zn 95%였다.

2.2 중금속의 오염 평가

퇴적물 내 중금속 오염을 평가하기 위하여 다양한 평가방법이 활용되고 있다. 그중 가장 간편하게 중금속 오염을 파악할 수 있는 방법은 퇴적물 기준(sediment quality guidelines, SQGs)을 적용하는 방법이다. 이 방법은 각 중금속 원소별 분석결과와 기준농도를 비교함으로써 신속하게 오염정도를 평가할 수 있는 장점이 있다. 한편, 퇴적물 내에서는 다양한 중금속이 혼재하고 있으며 이들 중금속들의 농도가 복합적으로 작용하여 생물 중에 영향을 줄 수 있기 때문에 퇴적물 내 존재하는 모든 중금속들을 고려한 전체적인 오염도를 평가할 필요가 있다. 이러한 평가를 위한 대표적인 방법으로 오염부하량지수(pollution load index, PLI)가 있으며, 이외에

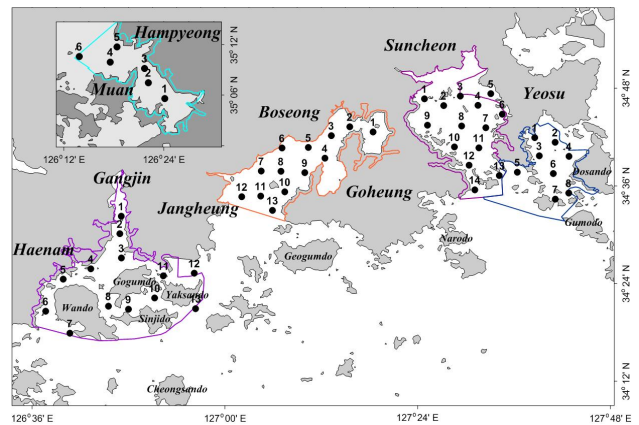


Fig. 1. A map showing the study area and the sampling sites for analyzing the organic matter and heavy metals in surface sediments of fisheries resource protection areas in the southwestern coast of Korea.

각각의 중금속은 독성의 정도가 달라 생물에 미치는 영향 또한 다르기 때문에 이러한 생물 영향을 평가하기 위한 방법으로 생태계 위해도 지수(ecological risk index, ERI)를 활용할 수 있다(Sun et al., 2014; Hwang et al., 2015a).

본 연구에서는 국내외 연구자들에 의해 주로 사용되는 위의 3가지 평가방법을 이용하여 수산자원보호구역의 표층 퇴적물 내 중금속 오염도를 평가하였다. 우선, 퇴적물 기준을 활용한 방법에 있어서, 선진 외국 및 우리나라에서는 각국의 환경특성 및 중금속 농도에 따른 생물영향을 고려한 SQGs를 설정해 관리하고 있다. 본 연구에서는 해양수산부에서 제정한 해양환경기준의 퇴적물 오염 기준 중 주의기준(threshold effects level, TEL) 농도(MOF, 2018)와 비교하였다.

퇴적물 내 모든 중금속에 대한 전체적인 오염도를 평가하는 PLI 방법은 다음의 식(1)으로부터 계산하였다(Tomlinson et al., 1980).

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)} \quad (1)$$

여기서 CF(=C_{metal}/B_{metal})는 각 중금속의 배경농도(B_{metal})에 대한 연구해역 내 퇴적물 중 중금속의 농도(C_{metal})비, n은 분석된 중금속의 총 개수이며, 이 연구에서는 지각에 풍부하게 존재하며 보존적 성질을 지니는 Fe을 제외한 7개 중금속에 대하여 오염도를 평가하였다.

퇴적물 내 각 중금속에 대한 독성계수(toxic coefficient of heavy metal)를 이용하여 퇴적물 내 모든 중금속 농도에 따른 저서생물의 위해도를 평가하는 ERI 방법은 다음의 식(2), (3)를 이용하여 계산하였다(Hakanson, 1980).

$$E_i = T_{\text{metal}} \times CF \quad (2)$$

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

여기서 CF는 식(1)의 CF와 동일하며, T_{metal} 은 각 중금속의 독성계수, n은 분석된 중금속의 개수이다. 이 연구에서는 분석된 중금속 중 생태독성계수가 알려져 있는 7종의 중금속(As = 10, Cd = 30, Cr = 2, Cu = 5, Hg = 40, Pb = 5, Zn = 1; Lim et al., 2013; Sheykhi and Moore, 2013)을 이용하여 ERI를 계산하였다.

한편, 이 연구에서 PLI, ERI 방법을 이용한 남서해연안 수산자원보호구역 표층 퇴적물 내 중금속 오염평가 시 필요한 각 중금속의 배경농도(B_{metal})는 지금까지 국내외의 많은 연구자들(Zhang et al., 2009; Gao and Chen, 2012; Lee et al., 2017; Hwang et al., 2019)이 사용해 온 Taylor(1964)와 Taylor and McLennan(1995)의 전 세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 내 중금속의 평균농도(As 1.5 mg/kg, Cd 0.098 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Cu 25 mg/kg, Hg 0.08 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Zn 71 mg/kg)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 퇴적물의 입도조성

퇴적물 내 중금속 농도는 유기물이나 입자크기와 밀접한 관련이 있으며, 유기물 농도가 높고 입자의 크기가 작을수록 높은 농도를 보인다(Thornton, 1983; Horowitz, 1991). 남서해연안 수산자원보호구역 표층 퇴적물의 입도분석 결과, 점토의 함량이 16.0~78.8%(평균 49.2%)로 가장 높았으며, 그 다음에 실트와 모래가 각각 8.8~66.8%(평균 42.4%), 0.1~43.9%(평균 7.6%)의 함량을 나타내었고, 자갈은 0.0~17.2%(평균 0.8%)로 가장 낮았다(Table 1). 자갈은 완도연안 외측정점과 영광연안 중앙수로부의 일부 정점에서 나타났다. 모래는 완도연안과 영광연안의 협수로 정점에서 30% 이상의 높은 함량을 보였으며, 그 외 대부분의 정점에서는 실트와 점토로 구성된 세립질의 퇴적물로 구성되어 있었다.

입도분석 결과를 이용하여 Folk(1968)의 분류법에 따른 퇴적물의 유형을 살펴보았다(Fig. 2). 본 연구해역 내의 퇴적물 유형은 실트(silt, Z), 니(mud, M), 점토(clay, C), 사질실트(sandy silt, sZ), 사질니(sandy mud, sM), 약역사질니(slightly gravelly sand mud, (g)sM), 약역니질사(slightly gravelly muddy sand, (g)mS), 약역질니(slightly gravelly mud, (g)M)로 총 8개의 유형으로 분류되었으며, 주 퇴적상은 니(M) 퇴적물이었다. 니(M) 퇴적물은 전체 퇴적물 유형의 70.4%를 차지하고 있으며, 가막만, 여자만, 득량만의 만 내측 해역에서 주로 분포하

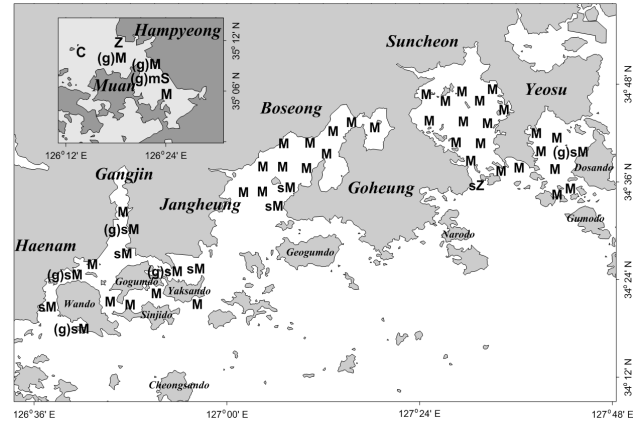


Fig. 2. The sedimentary types of surface sediment in fisheries resource protection areas in the southwestern coast of Korea (Abbreviations: Z - silt; M - mud; C - clay; sZ - sandy silt; sM - sandy mud; (g)sM - slightly gravelly sandy mud; (g)mS - slightly gravelly muddy sand; (g)M - slightly gravelly mud).

고 있었다. 이 외 사질니(sM)와 약역사질니((g)sM)가 10% 내외로 득량만 동측 입구부와 완도연안의 중앙부를 제외한 대부분의 정점에 분포하였으며, 영광연안에서는 실트(Z), 점토(C), 니(M), 약역질니((g)M), 약역니질사((g)mS)로 정점별로 다양한 퇴적물 유형을 보였다.

이러한 퇴적물 분포는 남서해연안 수산자원보호구역이 대부분 반폐쇄적인 만이고 만의 입구쪽에 크고 작은 섬들이 산재해 있어 지형적인 특성에 따른 조류 및 파랑 등 수리역학적 에너지의 차이에 기인한 것으로 판단된다(Hwang et al., 2013). 또한, 퇴적물의 입도조성으로부터 계산된 퇴적물의 평균입도(mean grain size, M_z)는 2.9~8.8 ϕ (평균 7.4 \pm 0.1 ϕ) 범위였으며, 가막만, 여자만, 득량만, 완도연안은 중립실트(medium silt)와 세립실트(fine silt)사이의 세립한 퇴적물로 이루어져 있었고, 영광연안은 조립실트(coarse silt)의 세립질 퇴적물로 구성되어 있었다(Table 1). 따라서, 본 연구해역의 표층 퇴적물은 세립질 퇴적물이 넓게 분포하고 있어 유기물 및 중금속 축적이 용이한 퇴적환경으로 판단된다.

3.2 유기물 함량 특성

남서해연안 수산자원보호구역의 경우, 가막만, 여자만, 득량만은 굴, 꼬막과 같은 수하식 및 살포식 패류 양식이 활발하고, 영광연안 및 완도연안은 김, 미역, 전복 등 해조류와 패류가 혼합된 복합 양식이 이루어지고 있는 해역이다. 이들 해역에서는 양식생물의 부산물들이 제거되지 않고 해역에 남아 유기물 오염을 야기할 가능성이 있다.

본 연구에서는 일반적으로 퇴적물 내 유기물 함량 및 오염

Table 1. Textural parameters and organic matters (acid volatile sulfide, AVS; chemical oxygen demand, COD; ignition loss, IL) in surface sediments of fisheries resource protection areas in the southwestern coast of Korea

Study region	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean grain size (Ø)	AVS (mgS/g·dry)	COD (mgO ₂ /g·dry)	IL (%)
Gamak Bay (GM)	0.0~1.8 (0.2±0.6)	0.4~3.2 (1.6±1.0)	43.4~54.4 (47.6±3.5)	45.2~54.4 (50.6±3.3)	7.6~8.1 (7.8±0.2)	0.002~0.520 (0.113±0.177)	12.4~18.9 (14.3±2.1)	4.67~5.74 (5.20±0.37)
Yeoja Bay (YJ)	-	0.2~20.2 (2.2±5.2)	41.4~56.4 (46.6±5.2)	23.4~58.1 (51.3±9.2)	6.0~8.3 (7.8±0.6)	0.004~0.243 (0.070±0.068)	6.7~16.8 (13.6±2.4)	2.18~5.86 (4.78±0.84)
Deukryang Bay (DR)	-	0.3~16.6 (5.0±4.7)	33.2~51.7 (44.0±6.3)	43.9~59.2 (51.0±4.9)	7.2~8.1 (7.7±0.3)	0.015~0.558 (0.175±0.168)	11.8~16.7 (13.6±1.5)	4.21~5.36 (4.82±0.37)
Wando coast (WD)	0.0~3.8 (0.5±1.1)	0.6~39.8 (16.5±14.4)	25.6~48.5 (34.5±6.4)	30.4~64.3 (48.5±11.6)	5.1~8.4 (7.0±1.2)	0.002~0.096 (0.034±0.034)	5.8~17.7 (13.0±3.6)	2.70~6.12 (4.74±0.98)
Youngkwang coast (YK)	0.0~17.2 (6.2±7.7)	0.1~43.9 (14.2±20.8)	8.8~66.8 (39.7±23.9)	16.0~78.8 (39.9±20.8)	2.9~8.8 (6.3±2.5)	0.003~0.182 (0.060~0.073)	5.3~11.0 (8.0±2.1)	1.91~4.04 (2.87±0.82)

의 지표로 활용되는 IL, COD, AVS 항목을 분석하여 연구해역내 퇴적물의 유기물 함량 및 분포특성을 살펴보았다. 표층 퇴적물 중 IL과 COD 농도는 각각 1.91~6.12%(평균 4.63 ± 0.96%), 5.3~18.9 mgO₂/g·dry(평균 13.0 ± 3.1 mgO₂/g·dry)의 범위였다(Table 1). 전반적으로 조립질의 퇴적물이 분포하는 완도연안의 외해측 정점과 영광연안의 수로 부분 정점에서 낮은 농도를 보이고 가막만, 여자만, 득량만 내측과 같이 세립질 퇴적물이 분포한 정점에서 높았다(Fig. 3). 특히, IL과 Mz, COD와 Mz 사이에는 유의미한 양의 상관성(R²=0.67~0.73)을 보였다. 이는 퇴적물의 유기물 함량과 입도와는 관련성이 있음을 의미한다. 한편, 퇴적물 중 COD 농도는 일본에서 수산생물 보호를 위해 설정한 COD 기준 농도(20 mgO₂/g·dry; Yokoyama, 2000)와 비교했을 때, 전 연구해역에서 기준을 초과하는 정점은 없었다. 표층 퇴적물 중 AVS는 0.002~0.558 mgS/g·dry(평균 0.092 ± 0.124 mgS/g·dry) 범위로 가막만의 선소 입구, 여자만의 여자도 동쪽, 득량만의 득량도 상부에서 0.15 mgS/g·dry 이상의 높은 농도를 보이고 조립질 퇴적물로 구

성되어 있는 정점에서는 0.02 mgS/g·dry 이하의 낮은 농도였다(Fig. 3). 또한, 퇴적물 중 AVS 농도는 일본에서 수산생물 보호를 위해 설정한 AVS 기준 농도(0.2 mgS/g·dry; Yokoyama, 2000)와 비교했을 때, 전체의 11.1%인 가막만 선소 입구, 여자만 여자도 동측, 득량만 내측정점에서 기준을 초과하여 오염된 상태를 보였다(Fig. 3).

3.3 중금속 농도분포

남서해연안 수산자원보호구역의 표층 퇴적물 중 중금속 원소별 농도를 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다. As는 가막만 6.7~8.3 mg/kg(평균 7.4 ± 0.5 mg/kg), 여자만 6.2~9.0 mg/kg(평균 7.7 ± 0.9 mg/kg), 득량만 6.3~9.1 mg/kg(평균 7.4 ± 0.8 mg/kg), 완도연안 6.8~9.6 mg/kg(평균 8.0 ± 0.9 mg/kg), 영광연안 6.0~8.7 mg/kg(평균 6.6 ± 1.0 mg/kg) 범위였고, 완도연안 > 여자만 > 득량만 > 가막만 > 영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 As 농도와 비교해 보면, 서해연안과는 비슷하고 전국 연안 평균 및 남동해연안 보다는 다소 낮

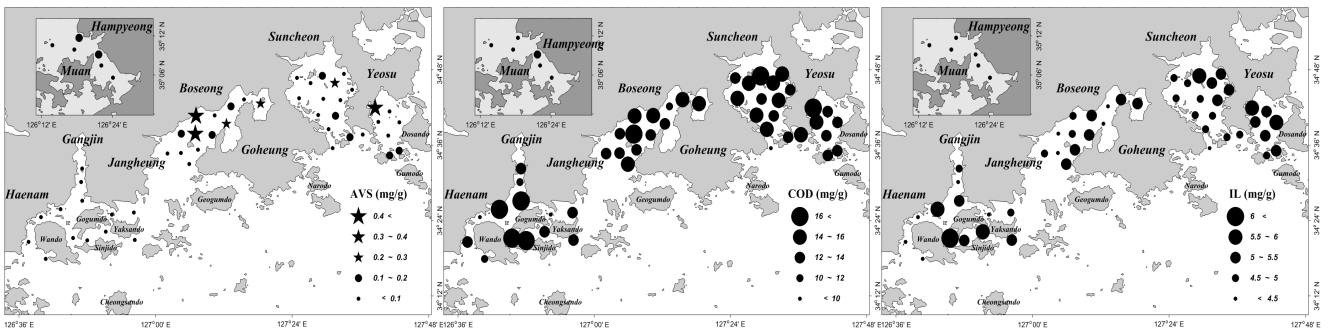


Fig. 3. The horizontal distributions of acid volatile sulfide (AVS), chemical oxygen demand (COD), and ignition loss (IL) in surface sediments of fisheries resource protection areas in the southwestern coast of Korea. The star marks represent the exceeded concentration compared to the sediment quality guideline of AVS applied in Japan.

남서해연안 수산자원보호구역 표층 퇴적물 중 유기물 및 중금속 농도분포

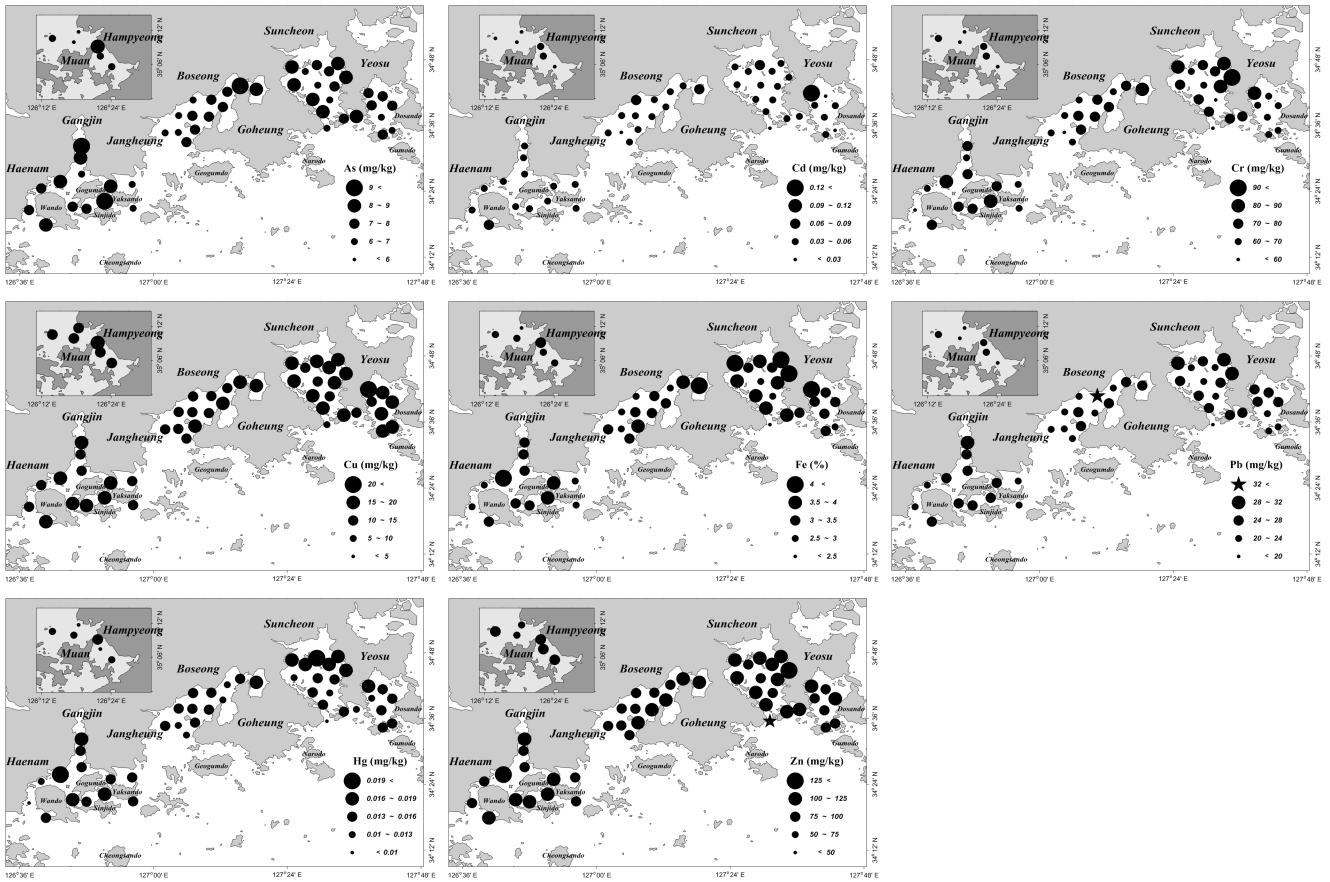


Fig. 4. The horizontal distributions of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, and Zn) in surface sediments of fisheries resource protection areas in the southwestern coast of Korea. The star marks represent the exceeded concentrations compared to the values of threshold effects level (TEL) proposed by Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) in Korea.

은 수준이었다(Table 2).

Cd는 가막만 0.01 ~ 0.13 mg/kg(평균 0.05 ± 0.03 mg/kg), 여자만 0.02 ~ 0.06 mg/kg(평균 0.04 ± 0.01 mg/kg), 득량만 0.03 ~ 0.06 mg/kg(평균 0.04 ± 0.01 mg/kg), 완도연안 0.03 ~ 0.07 mg/kg(평균 0.04 ± 0.01 mg/kg), 영광연안 0.02 ~ 0.04 mg/kg(평균 0.03 ± 0.01 mg/kg) 범위였고, 가막만 > 득량만, 완도연안, 여자만 > 영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Cd 농도와 비교해 보면, 전국 연안 평균 및 남동해연안, 서해연안 보다는 낮은 수준이었다(Table 2).

Cr은 가막만 64.7 ~ 83.6 mg/kg(평균 70.0 ± 6.0 mg/kg), 여자만 40.9 ~ 91.0 mg/kg(평균 74.1 ± 13.0 mg/kg), 득량만 57.6 ~ 83.1 mg/kg(평균 69.6 ± 7.2 mg/kg), 완도연안 59.0 ~ 86.1 mg/kg(평균 71.6 ± 8.2 mg/kg), 영광연안 51.9 ~ 69.1 mg/kg(평균 59.5 ± 6.7 mg/kg) 범위였고, 여자만 > 완도연안 > 가막만 > 득량만 > 영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Cr 농도와 비교해 보면, 전국 연안 평균 및 서해연안 보다는 다소 높지만, 남동해연안과는 비슷하거나 다소 낮은 수준이었다

(Table 2).

Cu는 가막만 14.5 ~ 21.5 mg/kg(평균 16.9 ± 2.4 mg/kg), 여자만 6.4 ~ 19.5 mg/kg(평균 15.4 ± 3.3 mg/kg), 득량만 12.0 ~ 18.0 mg/kg(평균 14.7 ± 1.8 mg/kg), 완도연안 11.3 ~ 19.5 mg/kg(평균 16.1 ± 2.7 mg/kg), 영광연안 10.3 ~ 16.6 mg/kg(평균 12.6 ± 2.1 mg/kg) 범위였고, 가막만 > 완도연안 > 여자만 > 득량만 > 영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Cu 농도와 비교해 보면, 서해연안 보다는 다소 높고, 전국 연안 평균 및 남동해연안 보다는 낮은 수준이었다(Table 2).

Fe는 가막만 3.0 ~ 4.0%(평균 3.2 ± 0.3 %), 여자만 2.1 ~ 4.3%(평균 3.5 ± 0.6 %), 득량만 2.6 ~ 4.1%(평균 3.3 ± 0.4 %), 완도연안 2.7 ~ 4.1%(평균 3.3 ± 0.4 %), 영광연안 2.4 ~ 3.3%(평균 2.8 ± 0.3 %) 범위였고, 여자만 > 완도연안 > 득량만 > 가막만 > 영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Fe 농도와 비교해 보면, 서해연안 보다는 다소 높고, 남해연안과는 비슷하거나 다소 낮은 수준이었다(Hwang et al., 2013; Lee et al., 2017).

Hg는 가막만 0.012~0.018 mg/kg(평균 0.014±0.002 mg/kg), 여자만 0.005~0.021 mg/kg(평균 0.015±0.004 mg/kg), 득량만 0.012~0.016 mg/kg(평균 0.014±0.001 mg/kg), 완도연안 0.008~0.026 mg/kg(평균 0.015±0.004 mg/kg), 영광연안 0.009~0.016 mg/kg(평균 0.011±0.002 mg/kg) 범위였고, 완도연안>여자만>가막만>득량만>영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Hg 농도와 비교해 보면, 서해연안과는 비슷하고 전국 연안 평균 및 남동해연안 보다는 다소 낮은 수준이었다.

Pb는 가막만 21.9~27.7 mg/kg(평균 24.2±1.7 mg/kg), 여자만 19.2~29.5 mg/kg(평균 25.2±3.0 mg/kg), 득량만 20.8~64.3 mg/kg(평균 27.1±11.3 mg/kg), 완도연안 21.0~28.6 mg/kg(평균 25.3±2.2 mg/kg), 영광연안 18.5~23.4 mg/kg(평균 20.3±1.8 mg/kg)으로 득량만>완도연안>가막만>여자만>영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Pb 농도와 비교해 보면, 서해연안과는 비슷하거나 높고, 전국 연안 평균 및 남동해연안 보다는 다소 낮은 수준이었다.

Zn은 가막만 93~124 mg/kg(평균 101±10 mg/kg), 여자만 58~126 mg/kg(평균 104±18 mg/kg), 득량만 83~118 mg/kg(평균 97±10 mg/kg), 완도연안 80~125 mg/kg(평균 103±12 mg/kg), 영광연안 71~94 mg/kg(평균 81±8 mg/kg) 범위였고, 여자만>완도연안>가막만>득량만>영광연안 순으로 높은 농도를 보였다. 이전의 국내 연안 퇴적물의 Zn 농도와 비교해 보면, 서해연안 보다는 다소 높고 전국 연안 평균 및 남동해연안 보다는 다소 낮은 수준이었다.

각 수산자원보호구역별 중금속의 공간분포를 살펴보면, 가막만은 만의 북서쪽, 여자만은 만내 해안선 주변부, 득량만은 만의 북동쪽 가장 안쪽, 완도연안은 도암만 안쪽과 완도, 신지도, 고금도, 약산도 사이의 내측, 영광연안은 함평만 입구부에서 높은 특징을 보였다(Fig. 4). 원소별로는 Cd, Cu는 가막만, Cr, Fe, Zn은 여자만, Pb은 득량만, As, Hg은 완도연안에서 다른 보호구역보다 상대적으로 높은 중금속 농도를 나타내었다.

Table 2. Comparison of the average of organic matters (acid volatile sulfide, AVS; chemical oxygen demand, COD; ignition loss, IL) and heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn) concentrations between Korean coastal sediments and sediment in study region

Study region	Organic matter			Heavy metal (mg/kg)							Reference
	AVS (mg/g·dry)	COD	IL (%)	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	
Korean coast											
Korean coast	-	-	-	9.1	0.25	58	37	0.05	35	122	Ra et al. (2013)
Geum River Estuary	0.01	4.4	1.9	7.3	0.12	45	10	0.01	27	49	Hwang et al. (2013)
Gomso Bay	0.07	6.3	3.7	6.6	0.04	52	11	0.01	16	63	Kim et al. (2017)
Deukryang Bay	0.11	9.6	4.4	-	0.10	74	15	0.01	27	90	Jeon et al. (2012)
Gamak Bay	1.02	31.0	7.1	9.8	0.14	78	28	0.02	28	114	Noh et al. (2006), Kim et al. (2012)
Yeoja Bay	0.13	10.4	5.0	7.4	0.05	81	17	0.02	29	137	Choi et al. (2013; 2015a)
Gangjin Bay (Jinju Bay)	0.25	17.3	6.6	10.5	0.12	82	27	0.03	33	157	Choi et al. (2013; 2015a)
Jaran Bay	0.08	16.8	7.2	9.8	0.15	78	31	0.03	40	146	Cho et al. (2013), Hwang et al. (2018)
Goseong Bay	-	-	-	11.2	0.15	82	38	0.03	27	159	Lee et al. (2017)
Hansan-Geoje Bay	0.13	31.4	8.7	10.3	0.10	89	38	0.03	30	140	Cho et al. (2013), Hwang et al. (2015b)
Jinhae Bay	0.66	33.1	9.7	11.1	0.50	70	57	0.06	40	167	Cho et al. (2013), Choi et al. (2015b)
Ulsan Harbor	0.33	9.7	7.0	16.1	0.30	62	81	0.11	35	189	Hwang et al. (2014)
Southwestern FRPA*	0.09	13.0	4.6	7.5	0.04	70	15	0.01	25	99	This study
Gamak Bay	0.11	14.4	5.2	7.4	0.05	70	17	0.01	24	101	This study
Yeoja Bay	0.07	13.7	4.8	7.7	0.04	74	15	0.02	25	104	This study
Deukryang Bay	0.18	13.9	4.8	7.4	0.04	70	15	0.01	27	97	This study
Wando Coast	0.03	13.0	4.7	8.0	0.04	71	16	0.02	25	103	This study
Youngkwang Coast	0.06	8.0	2.9	6.6	0.03	60	13	0.01	20	81	This study
TEL**				14.5	0.75	116	20.6	0.11	44	68.4	MOF (2018)

*FRPA : Fisheries Resource Protection Area, **TEL : Threshold Effects Level

남서해연안 수산자원보호구역 표층 퇴적물 중 유기물 및 중금속 농도분포

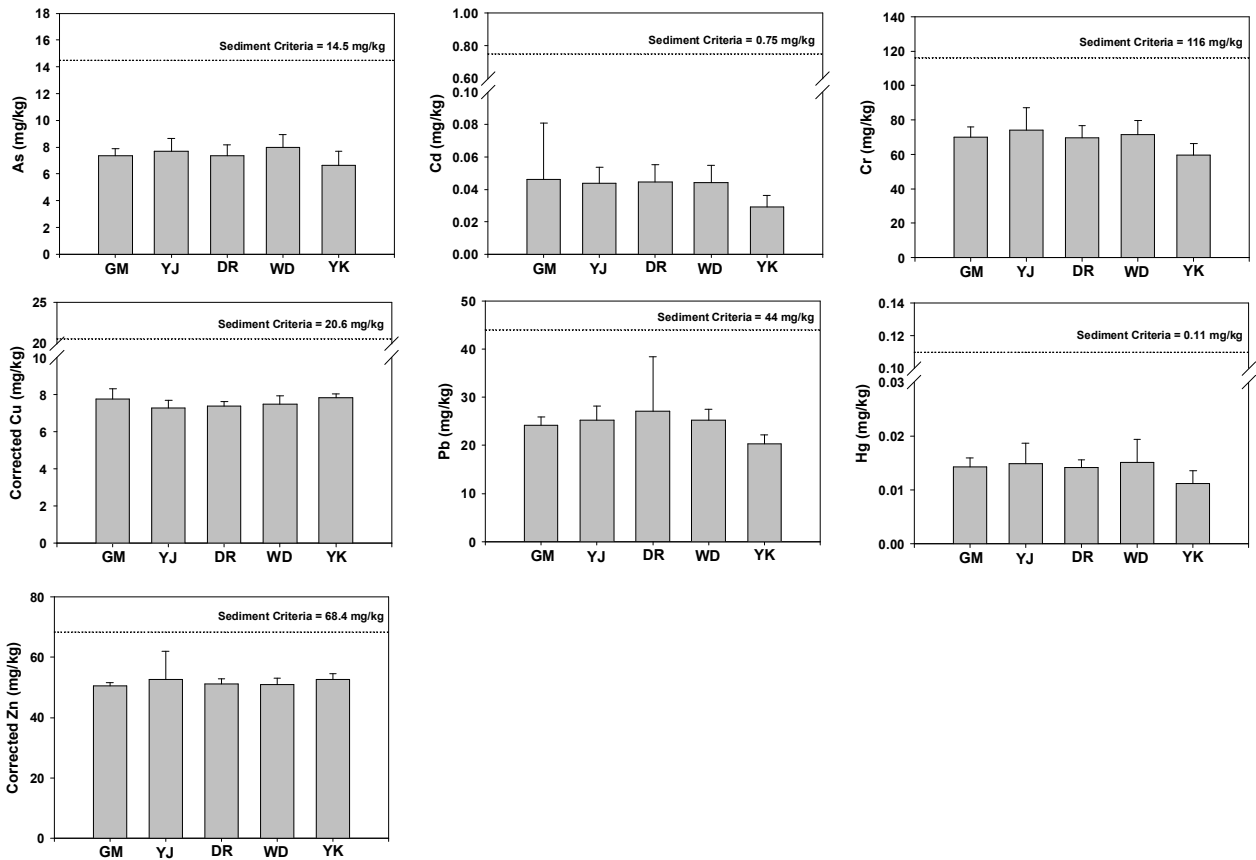


Fig. 5. Concentrations of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn) in surface sediments of fisheries resource protection areas in the southwestern coast of Korea. The concentrations of Cu and Zn were corrected by Li concentration in surface sediment. The dotted lines indicate the threshold effects level (TEL) proposed by Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) in Korea as sediment quality guideline (Abbreviations: GM - Gamak Bay, YJ - Yeoja Bay, DR - Deukryang Bay, WD - Wando coast, YK - Youngkwang coast).

3.4 중금속 오염도 평가

퇴적물 내 중금속은 저서생물에 나쁜 영향을 줄 수 있고, 먹이사슬을 통하여 유용 수산생물에 전이됨으로서 이를 섭취하는 인간의 건강까지 위협할 수 있기에 퇴적물 중 중금속의 오염도를 평가하는 것은 매우 중요하다(Yuan et al., 2012; Ra et al., 2013; Hwang et al., 2013; 2015a). 앞서 설명하였듯이, 이 연구에서는 SQGs, PLI, ERI 3개의 평가방법을 이용하여 남서해연안 수산자원보호구역 표층 퇴적물 중 중금속의 오염도를 살펴보았다.

해양수산부에서 제정한 해양환경기준 중 퇴적물에 대한 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) 오염기준인 TEL과 남서해연안 각 수산자원보호구역별 퇴적물 중 중금속 평균농도를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, TEL을 초과하는 중금속 농도는 금속에 의한 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 높음을 의미한다(MOF, 2018). 또한, Cu와 Zn은 입도에 따라 농도가

달라질 수 있어 보정원소인 Li을 이용하여 보정한 농도와 기준값과 비교하도록 권고하고 있다.

남서해연안 5개 수산자원보호구역 내 표층 퇴적물 중 중금속 농도는 As 6.0~9.6 mg/kg(평균 7.5±0.9 mg/kg), Cd 0.01~0.13 mg/kg(평균 0.04±0.02 mg/kg), Cr 40.9~91.0 mg/kg(평균 70.2±9.7 mg/kg), Cu 6.4~21.5 mg/kg(평균 15.3±2.8 mg/kg), Hg 0.005~0.026 mg/kg(평균 0.014±0.003 mg/kg), Pb 18.5~64.3 mg/kg(평균 25.0±6.0 mg/kg), Zn 58~126 mg/kg(평균 99±14 mg/kg)의 범위였으며, 이 중 Li으로 보정한 Cu와 Zn 농도는 각각 6.4~8.8 mg/kg(평균 7.5±0.4 mg/kg)와 44.7~85.1 mg/kg(평균 51.5±5.0 mg/kg)였다. TEL과 비교해 보면, 중금속 중 Pb은 득량만 중앙부, 보정한 Zn은 여자만 입구의 일부 정점에서 TEL 기준을 초과하였으나, 이외 모든 정점에서 TEL 미만이었다. As, Cd, 보정한 Cu, Cr, Hg은 모든 정점에서 TEL 미만이었다. 전반적으로 5개 수산자원보호구역 모두 모든 중금속에 대해

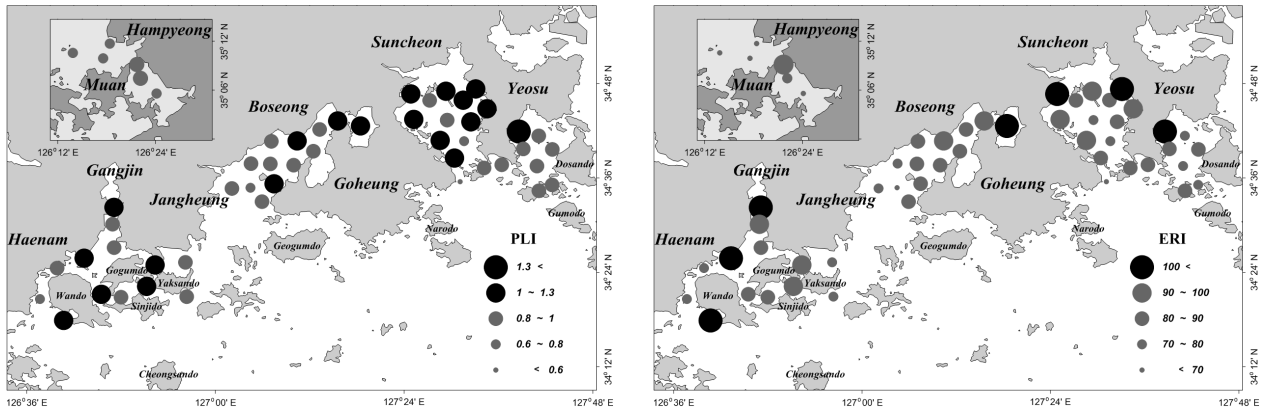


Fig. 6. The horizontal distributions of pollution load index (PLI) and ecological risk index (ERI) calculated by using background concentrations and toxic coefficient of each heavy metal concentrations in surface sediment of fisheries resource protection area in the southwestern coast of Korea.

여 TEL 값보다 낮아, 퇴적물 중금속에 의한 부정적인 생태 영향이 발현될 가능성이 낮은 것으로 파악되었다(Fig. 5).

퇴적물 내 7개 중금속의 농도를 고려한 전체적인 오염도 및 저서생물의 위해도를 평가하기 위한 PLI와 ERI 계산 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 PLI와 ERI는 그 값에 따라 각기 다른 오염도를 나타내는데, PLI는 1.0을 기준으로 이보다 작으면 비오염(no pollution), 이보다 크면 오염된(polluted) 상태를 나타낸다(Tomlinson et al., 1980). ERI는 값의 범위에 따라 총 5개의 오염도로 평가되는데, $ERI < 100$ 인 경우 저서생물에 위해성을 줄 가능성이 낮은 상태(low risk), $100 < ERI < 150$ 인 경우 저서생물에 어느 정도 위해성을 줄 수 있는 상태(moderate risk), $150 < ERI < 200$ 인 경우 저서생물에 상당한 위해성을 줄 수 있는 상태(considerable risk), $200 < ERI < 300$ 인 경우 저서생물에 매우 심한 위해성을 줄 수 있는 상태(very high risk), $300 < ERI$ 인 경우 저서생물에 극심한 위해성을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)임을 나타낸다(Hakanson, 1980).

먼저, Fe를 제외한 7종의 중금속을 고려하여 계산한 PLI는 $0.6 \sim 1.3$ (평균 1.0)의 범위로 오염상태와 비오염상태가 혼재되어 있는 것으로 나타났다. 지역적으로 여자만의 경우 만 중앙부를 제외한 해안선 주변부, 득량만 및 완도연안에서는 내측에서 오염된 상태를 보였으며, 영광연안에서는 전 정점에서 1.0 이하의 비오염상태로 나타났다.

ERI는 $61 \sim 118$ (평균 85)의 범위였으며, 가막만, 여자만, 득량만, 완도연안의 가장 안쪽 정점에서 $100 \sim 118$ 사이로 저서생물에 어느 정도 위해성을 줄 수 있는 상태(moderate risk)였고 이는 비교적 높은 PLI 값을 보였던 정점들과 유사하였다. 하지만 그 외 정점들은 ERI값이 100 미만으로 저서생물에 위해성을 줄 가능성이 낮은 상태(low risk)였다.

이상의 3가지 방법을 이용한 중금속의 오염도 평가 결과를 종합해 보면, 연구해역인 남서해연안 수산자원보호구역의 표층 퇴적물은 전반적으로 일부 정점을 제외하면 수산생물 및 저서생물에 영향을 주지 않는 안전한 중금속 농도를 유지하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

남서해연안 수산자원보호구역의 표층 퇴적물은 실트와 점토의 함량이 90% 이상이고 평균입도가 $2.9 \sim 8.8\phi$ 사이인 세립질의 니(mud) 퇴적물로 구성되어 있었다. 유기물의 경우, IL, COD, AVS는 영광연안이 다른 보호구역보다 상대적으로 낮았다. 특히, AVS는 일부 정점에서 수산생물에 영향을 주는 기준 농도 이상의 농도가 나타났다. 중금속은 만내 가장 안쪽 해역에서 높고 만의 입구쪽에서 낮았다. SQGs, PLI, ERI 3가지 평가방법을 이용하여 표층 퇴적물의 오염도를 평가한 결과, 남서해 수산자원보호구역 표층 퇴적물은 대부분의 정점에서 TEL 기준 이하로 금속에 의한 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 낮은 상태였고, 모든 중금속에 대한 전체적인 오염도 및 저서생물의 위해도를 평가한 결과는 수산생물과 저서생물에 나쁜 영향을 주지 않는 것으로 파악되었다. 따라서, 남서해연안 수산자원보호구역 퇴적물은 중금속에 대해 오염되지 않은 건강한 상태를 유지하고 있는 것으로 보인다. 하지만 도시화와 산업화에 의한 중금속 오염 영향으로부터 현재 수산자원보호구역의 건강한 퇴적환경을 유지하기 위해서는 주변 중금속 오염원에 대한 지속적인 조사를 통한 오염원 관리 및 퇴적환경 보전을 위한 노력이 요구된다.

사 사

이 논문은 2019년도 국립수산과학원 수산과학연구사업 어장환경모니터링(R2019045)의 지원으로 수행된 연구입니다. 본 논문의 완성을 위하여 심사해 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

- [1] Billah, M. M., A. H. Mustafa Kamal, M. H. Idris, and J. Ismail(2017), Mangrove macroalgae as biomonitors of heavy metal contamination in a tropical estuary, Malaysia. *Water Air Soil Pollution*, Vol. 228, pp. 347-360.
- [2] Caccia, V. G., F. J. Millero, and A. Palanques(2003), The distribution of trace metals in Florida Bay sediments, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 46, pp. 1,420-1,433.
- [3] Cho, Y. S., W. C. Lee, J. B. Kim, S. Hong, H. C. Kim, and C. S. Kim(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*, Vol. 19, No. 5, pp. 430-438.
- [4] Choi, M., H. C. Kim, D. W. Hwang, I. S. Lee, Y. S. Kim, Y. J. Kim, and H. C. Choi(2013), Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeosu Bay and Gangjin Bay, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 45, No. 5, pp. 789-797.
- [5] 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 Yeosu and Gangjin Bays, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 48, No. 5, pp. 789-797.
- [6] Choi, T. J., J. N. Kwon, G. Lee, H. Hwang, Y. Kim, and J. H. Lee(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, No. 4, pp. 347-360.
- [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] Folk, R. L.(1968), Petrology of sedimentary rock, Hemphill's, Drawer M. University Station, p. 170.
- [9] Folk, R. L. and W. C. Ward(1957), Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 27, pp. 3-26.
- [10] Gao, X. and C. A. Chen(2012), Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay, *Water Research*, Vol. 46, pp. 1,901-1,911.
- [11] Hakanson, L.(1980), An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach, *Water Research*, Vol. 14, No. 8, pp. 975-1001.
- [12] Horowitz, A. J.(1991), A primer on sediment-trace element chemistry, 2nd ed. Lewis Publishers Inc., Michigan, p. 136.
- [13] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi, C. S. Kim, and H. C. Kim(2015a), Evaluation of pollution level for organic matter and trace metals in sediments around Taehwa River estuary, Ulsan, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 48, No. 4, pp. 542-554.
- [14] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi, and H. G. Choi(2014), Distribution and pollution assessment of organic matter and trace metals in surface sediment around Ulsan Harbor, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, Vol. 17, No. 3, pp. 146-160.
- [15] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi, and J. H. Shim(2015b), Distribution of organic matter and trace metal concentrations in surface sediments around the Hasan-Geoje Bay, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, Vol. 18, No. 3, pp. 131-143.
- [16] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi, S. Y. Kim, and H. G. Choi(2013), Evaluation of organic matter and trace metal contamination in surface sediments around the Geum River estuary using sediment quality guidelines, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, No. 6, pp. 930-940.
- [17] Hwang, D. W., P. J. Kim, S. G. Kim, C. I. Sun, B. S. Koh, S. O. Ryu, and T. H. Kim(2019), Spatial distribution and pollution assessment of metals in intertidal sediments, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, No. 19, pp. 19,379-19,388.
- [18] Hwang, D. W., S. G. Kim, M. K. Choi, I. S. Lee, S. S. Kim, and H. G. Choi(2016), Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula, *Marine pollution bulletin*, Vol. 102, pp. 230-239.
- [19] Hwang, H., D. W. Hwang, G. Lee, H. C. Kim, and J. N. Kwon(2018), Distribution 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, No. 1, pp. 78-91.
- [20] Jeon, S. B., P. J. Kim, S. S. Kim, J. S. Ju, Y. H. Lee, D. S.

- Chang, 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, No. 3, pp. 203-214.
- [21] Jeong, H. H., D. W. Kim, N. H. Lam, T. B. Choi, and H. S. Cho(2017), Heavy metal pollution in the surface sediments of the Korean south-west environmental preservation sea areas, Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, Vol. 20, No. 2, pp. 93-99.
- [22] Kim, C. S., H. C. Kim, W. C. Lee, S. Hong, D. W. Hwang, Y. S. Cho, J. H. Kim, and S. Kim(2017), Geochemical characteristics of surface sediments and an evaluation of trace metal pollution in Gomso Bay, Korea, 2011, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 50, No. 5, pp. 567-575.
- [23] 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, Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 18, No. 2, pp. 67-83.
- [24] Lee, G. R., D. W. Hwang, H. J. 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. 18, No. 2, pp. 699-709.
- [25] 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 sediments of Korea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 73, No. 1, pp. 362-368.
- [26] MOF(2018), Quality Guidelines for marine environment in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Notification No. 2018-10, p. 10.
- [27] Morillo, J., J. Usero, and I. Gracia(2004) Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain, Chemosphere, Vol. 55, pp. 431-442.
- [28] 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.
- [29] Noh, I. H., Y. H. Yoon, D. I. Kim, and J. S. Park(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, Vol. 9, No. 1, pp. 1-13.
- [30] Ra, K., E. S. Kim, K. T. Kim, J. M. Lee, and E. Y. Kim(2013), Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea, Journal of Coastal Research, Vol. 65, pp. 105-110.
- [31] Santos, I. R., E. V. Silva, C. E. G. R. Schaefer, M. R. Albuquerque, and L. S. Campos(2005), Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic station, King George Island. Marine Pollution Bulletin, Vol. 50, pp. 185-194.
- [32] 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, No. 4, pp. 3219-3232.
- [33] Sin, S. N., H. Chua, W. Lo, and L. M. Ng(2001). Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River Hong Kong. Environment International, Vol. 26, pp. 297-301.
- [34] Sun, C. I., Y. J. Lee, J. H. An, and Y. W. Lee(2014), Speciation and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Masan Bay, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 19, No. 2, pp. 155-163.
- [35] Taylor, S. R.(1964), Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 28, No. 8, pp. 1273-1285.
- [36] Taylor, S. R. and S. M. McLennan(1995), The geochemical evolution of the continental crust, Reviews of Geophysics, Vol. 33, No. 2, pp. 241-265.
- [37] Thornton, I.(1983), Applied environmental geochemistry, Academic Press, p. 501.
- [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, Helgoländer Meeresuntersuchungen, Vol. 33, pp. 566-575.
- [39] Yokoyama, H.(2000), Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal area: A new policy and its potential problems, Bulletin of National Research Institute of Aquaculture, Vol. 29, pp. 123-134
- [40] Yu, R., X. Yuan, Y. Zhao, G. Hu, and X. Tu(2008), Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China, Journal of environmental sciences, Vol. 20, No. 6, pp. 664-669.
- [41] Yuan, H., J. Song, X. Li, N. Li, and L. Duan(2012),

Distribution and contamination of heavy metals in surface sediments of the South Yellow Sea, Marine Pollution Bulletin, Vol. 64, No. 10, pp. 2,151-2,159.

- [42] Zabetoglou, K., D. Voutsas, and C. Samara(2002). Toxicity and heavy metal contamination of surficial sediments from Bay of Thessaloniki (Northwestern Aegean Sea) Greece. Chemosphere, Vol. 49, pp. 17-26.
- [43] Zhang, W., H. Feng, J. Chang, J. Qu, H. Xie, and L. Yu(2009). Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes. Environmental Pollution, Vol. 157, pp. 1,533-1,543.

Received : 2019. 09. 10.

Revised : 2019. 10. 21. (1st)

: 2019. 10. 24. (2nd)

Accepted : 2019. 10. 28.