

한산거제만 주변 퇴적물의 유기물과 미량금속 분포 특성

황동운[†] · 이인석 · 최민규 · 심정희

국립수산과학원 어장환경과

Distribution of Organic Matter and Trace Metal Concentrations in Surface Sediments around the Hansan-Geoje Bay

Dong-Woon Hwang[†], In-Seok Lee, Minkyu Choi, and JeongHee Shim

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 46083, Korea

Received August 4, 2015/Revised August 14, 2015/Accepted August 31, 2015

The grain size, the content of ignition loss (IL), and the concentrations of chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), and trace metals (Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, and Hg) in surface sediments around the Hansan-Geoje Bay were measured in order to understand the pollution level and potential ecological risk of organic matter and trace metals in sediments around fish and shellfish farming areas. The combined content of silt and clay in sediments was more than 90% and the sediment types were mainly mud and clay, which implies that organic matter and trace metals were easily accumulated in the sediments of the study region. There was no spatial difference for the IL content in sediments around the Hansan-Geoje Bay. However, the concentrations of Fe, Mn, Cr and Cu were relatively higher in channels around the Hansan Island, whereas the concentrations of As, Cd, Hg, Pb, and Zn were relatively higher in the Geoje Bay. The results of three assessment techniques (sediment quality guidelines [SQGs], pollution load index [PLI] and ecological risk index [ERI]) suggested that the surface sediments in the study region were not polluted with organic matter and trace metals.

Key words: Sediment, Organic matter, Trace metal, Pollution, Hansan-Geoje Bay

1. 서 론

우리나라의 남해안은 마지막 빙하기(the Last Glacial Age) 이후 해수면이 상승하면서 리아스식 해안과 다도해가 형성되었고, 다양한 크기의 갯벌, 하구, 반폐쇄적인 만(bay) 등이 넓은 해역에 걸쳐 발달해 있다.^{1,2)} 이중 반폐쇄적인 내만은 만 주변의 소규모 하천을 통해 육상으로부터 영양염류가 유입되어 먹이생물이 풍부하고 기초생산력이 주변해역에 비해 상대적으로 높으며, 외해로부터 파랑과 폭풍, 조류 등과 같은 수리역학적 에너지의 영향이 적어 수산생물을 키우기에 적합한 환경을 갖추고 있다. 또한, 다른 연안환경과 달리 육상과 매우 인접하여 어장의 설치 및 관리가 용이하기 때문에 1950년대부터 다양한 어패류 양식이 이루어져 왔다.³⁾

1960년대 이후 경제성장에 따른 무분별한 연안개발은 육상으로부터 오염물질의 유입량을 증가시켰고, 이로 인해 지형적인 특성상 해수의 유동이 원활하지 않은 반폐쇄적인 내만은 부영양화되어 식물플랑크톤의 대증식, 빈산소수괴의 발생 등 심각한 연안환경 변화가 발생하면서 양식환경이 점점 악화되고 있다. 또한, 장기적인 연작에 따른 어장의 노후화 및 밀식양식은 반폐쇄적인 만내의 환경오염을 더욱 가중시켜 어장의 지속적인 생산을 어렵게 하고 양식생물의 품질을 저하시키고 있다.^{3,4)} 따라서, 고부가가치 어패류 양식 및 생산량 증대를 위해서 반폐쇄적인 내만에 대한 지속적인 조사와 특별한 연구가 필요하다.

한반도의 남동쪽에 위치하고 있는 한산거제만은 거제시 둔덕면, 거제면, 동부면 해안선으로 둘러싸인 반

[†]To whom correspondence should be addressed.

폐쇄적인 내만인 거제만과 통영시 한산면 소재 한산도와 추봉도 등 다양한 크기의 섬으로 둘러싸여 있는 만이다. 우리나라의 대표적인 굴 생산지로 1971년 수산청 고시 41호에 의해 지정해역(약 470 ha)으로 고시된 이후 1972년 한·미 패류위생협정에 의해 설정된 우리나라 최초의 수출용 패류생산 지정해역(약 2,050 ha)이다.⁵⁾ 굴 외에 어류, 우렁쉥이, 가리비 등 다양한 수산생물이 양식되고 있으며, 현재 총 215건(약 1,000 Ha)의 양식어업권이 허가되어 있고, 이중 굴 수하식 양식 어업권이 전체 어업권의 약 50% (면적 61%)를 차지하고 있다.⁶⁾ 그러나, 한산거제만의 경우 최근 통영시 및 거제도 연안을 따라 소규모 조선소 및 수산가공 공장, 펜션 및 리조트 등 숙박시설이 들어서고, 통영시 및 거제도 내면소재지를 중심으로 인구가 집중되면서 육상의 오염물질들이 주변의 소하천을 통해 유입되고 있다. 또한 내만의 한정된 공간에 집약적인 어패류 양식이 성행하면서 해상양식장에서 오염물질이 발생하면서 이들 오염물질의 직·간접적인 영향을 크게 받고 있으며, 주변에 선박에서 배출되는 인분을 포함한 오염된 배출수로 인하여 양식생물의 생산량 및 안전성이 크게 위협받고 있다.⁵⁾

이러한 한산거제만 주변 해역의 지속적인 양식과 양식환경의 오염현황 및 양식생물의 안정성을 파악하기 위하여 그 동안 해수 중 수질의 공간분포 및 변동 특성,^{6,7)} 굴의 지속적인 생산 및 관리를 위한 환경용량 산정 및 최적적 조사,^{3,8,9)} 저서환경의 시공간적 변동,¹⁰⁾ 양식생물중 유해물질 함량 특성^{11,12)}과 세균 및 질병 등과 관련한 위생학적 연구^{5,13-15)} 등 많은 연구가 진행되어져 왔다. 하지만, 대부분의 연구가 양식생물의 안정성과 관련된 연구이고, 해역내 유해물질의 주된 오염원 중에 하나인 퇴적물에 대한 연구는 거의 없다.

이 연구의 목적은 어패류 양식 밀집해역인 한산거제만 주변 해역의 퇴적물 중 유기물과 미량금속 분포 특성을 이해하고, 다양한 평가기법을 이용하여 유기물 및 미량금속의 오염 현황을 파악하는데 있다. 이를 위하여 연구해역내 퇴적물의 입도(grain size)와 유기물 함량 특성을 나타내는 여러 인자들(강열감량, 화학적산소요구량, 산화발생황화물), 그리고 미량금속 10종(As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Li, Mn, Pb and Zn)에 대하여 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취 및 분석

한산거제만 주변 퇴적물의 유기물과 미량금속의 분

포특성 및 오염 현황을 파악하기 위하여 2013년 4월 23~24일 (2일간) 거제만을 포함한 한산도 주변 해역에서 소형 선박을 타고 이동하면서 채니기(van Veen grab sampler)를 이용하여 26개 지점에서 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 채취한 퇴적물은 선상에서 1회용 스펀으로 표층 3 cm 내의 퇴적물을 산세척한 고밀도폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 냉동상태로 저장하여 실험실로 운반한 후 퇴적물의 입도(grain size)와 강열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산화발생황화물(acid volatile sulfide, AVS), 그리고 미량금속10종(As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Li, Mn, Pb and Zn)을 Hwang et al.¹⁶⁾이 이용한 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

먼저, 입도는 10% 과산화수소(H_2O_2)와 0.1 N 염산(HCl)으로 유기물과 탄산염($CaCO_3$)을 제거한 퇴적물을 4 ϕ (62.5 μ m) 체로 물체질(wet sieving)하여 조립질과 세립질 입자로 분리하였다. 이후 4 ϕ 보다 큰 입자는 110°C에서 24시간 건조한 후 진탕기(Ro-tap sieve shaker)를 이용하여 건식체질을 하여 1 ϕ 간격으로 무게 백분율을 구하였다. 4 ϕ 보다 작은 입자는 약 2g 정도의 퇴적물을 취하여 자동입도분석기(Micromeritics, Sedigraph 5120)로 분석하였다. 측정된 결과를 바탕으로 자갈, 모래, 실트, 점토의 함량을 알아내었으며, Folk and Ward¹⁷⁾이 제시한 식으로부터 퇴적물의 평균

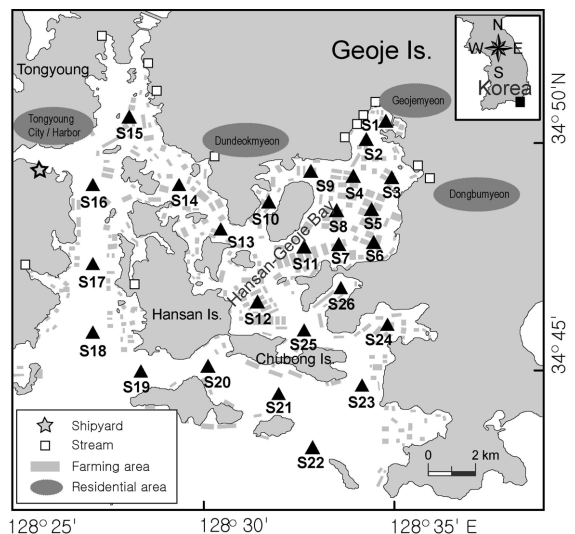


Fig. 1. The map showing the location of the study area and the sampling sites for analyzing organic matter and trace metals in surface sediments around the Hansan-Geoje Bay.

입도(mean grain size, Mz)를 계산하였다. 또한, 퇴적물 유형(sedimentary type)은 Folk¹⁸⁾의 삼각다이아그램을 이용하여 분류하였다. 유기물 특성을 나타내는 IL은 건조한 퇴적물 약 10 g을 회화로에 넣고 550°C에서 4시간 동안 회화시킨 후, 회화 전후의 무게 차이를 이용하여 계산하였다. COD는 습식 퇴적물 약 1~2 g을 삼각플라스크에 옮겨 담은 후 0.1N과망간산칼륨(KMnO₄)과 10% 수산화나트륨(NaOH)을 넣고 혼합하여 끓는 물에 1시간 동안 증탕하였다. 이후 실온으로 냉각하여 10% 요오드화칼륨(KI)과 4% 아지드나트륨(NaN₃)을 넣은 다음 유리섬유여과지로 여과한 용액을 0.1 N 티오황산나트륨(Na₂S₂O₃ · H₂O)으로 적정하여 알아내었다. 또한, AVS는 습식 퇴적물 약 2g을 황화수소 발생관 넣고 황산(H₂SO₄)과의 반응으로 생성된 황화수소를 검지관에 통과시켜 변색된 지점의 눈금을 읽어 그 양을 알아내었다.

미량금속은 습식 퇴적물을 -80°C에서 동결건조한 후 플라스틱 재질의 체(Ø < 63 µm)로 체질하여 통과한 퇴적물만을 사용하였다. 수은(Hg)은 동결건조된 퇴적물을 전처리 없이 바로 자동수은분석기(automatic mercury analyzer, Milestone, DMA-80)로 분석하였다. 그 외 미량금속은 테프론 비커에 동결건조된 퇴적물 약 0.5 g을 넣고 혼합산(HNO₃ : HF : HClO₄ = 2:2:1)을 주입한 후 뚜껑을 닫아 130°C에서 8~9시간 동안 가열하여 퇴적물을 분해하였다. 이후 뚜껑을 열어 130°C에서 7~8시간 동안 산증기를 휘발시켰으며, 퇴적물을 완전분해시키기 위해 이 과정을 2번 반복하였다. 이후 잔사를 2% 질산으로 녹인 다음 여과지(Toyo 5C, Advantec, 110 mm)를 통과시켜 100 mL 플라스크로 정용하여 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e)로 측정하였다. 여기서, 분석결

과의 신뢰성을 확보하기 위해 캐나다 국가연구위원회 산하 연구소(National Research Council Canada, NRCC)에서 제작한 MESS-3 와 PACS-2 (marine sediment)를 수은과 그외 미량금속의 인증표준물질(certified reference material)로 사용하였다. 이들 인증표준물질은 시료와 같은 방법으로 분석하였으며, 인증표준물질에 대한 각 미량금속의 평균 회수율은 83~101%였다(Table 1). 한편, 이 연구에서 표, 그림 및 본문내용에 제시된 IL, AVS, 미량금속의 농도는 퇴적물 건조량(dry weight)을 기준으로 하며, 이후 농도 단위에 별도로 표시하지 않았다.

2.2. 유기물과 미량금속의 오염도 및 위해도 평가방법

환경중 오염이란 매질중의 구성성분의 농도가 자연 상태에 존재하는 농도보다 높거나 잔류농도가 주변에 서식하는 생물에게 악영향을 미치는 상태를 말한다.¹⁹⁾ 오염상태를 평가하기에 가장 쉬운 방법은 국가에서 설정한 환경별 매질에 대한 기준값을 적용하는 방법이다. 그 동안 대부분의 나라에서는 연구인력 및 자료의 부족으로 연안의 수질 및 퇴적환경에 대한 오염을 평가할 때 선진국인 미국이나 유럽의 기준을 적용하여 평가해 왔다. 하지만, 최근에는 그 나라의 자연적인 배경농도 및 생태적인 영향을 고려하여 중국이나 호주, 뉴질랜드 등 여러 나라에서 각 나라별 실정에 맞게 연안 환경오염에 대한 평가기준을 설정하여 활용하고 있다. 최근 우리나라에서도 해양수산부(고시 제2013-186호)에서 우리나라의 해양환경 특성(퇴적물의 배경농도 및 미량금속에 의한 생물영향)을 고려하여 해수와 퇴적물 중 미량금속에 대한 해양환경기준을 설정하였다(<http://www.mof.go.kr>). 따라서, 이 연구에서는 우리나라의 해양 퇴적물 환경기준 중 하위기준인 주의기준(threshold

Table 1. Certified and analytical values and recovery rates of trace metals for the reference materials (PACS-2 and MESS-3*, marine sediments)

Trace metal	Certified value (mg/kg)	Analytical value (mg/kg)	Recovery (%)
As	26.2±1.5	26.4±1.1	101±4
Cd	2.11±0.15	2.00±0.08	95±4
Cr	90.7±4.6	77.2±1.2	85±1
Cu	310±12	284± 9	92±3
Fe	40900±600	35622±950	87±2
Hg*	0.091±0.009	0.090±0.002	99±1
Li	32.2±2.0	26.8±1.8	83±5
Mn	440±19	373± 5	85±1
Pb	183±8	181±16	99±9
Zn	364±23	347±9	95±3

effects level, TEL)을 이용하여 퇴적물의 오염도를 살펴 보았다. 하지만, 해양 퇴적물 환경기준 중 유기물에 대한 기준은 설정되어 있지 않아 유기물 오염도 평가에 있어서는 이전에 국내외 많은 연구자들이 연안 퇴적물 유기물 오염평가에 널리 사용해 온 일본의 퇴적물 기준을 적용하였다.

또한, 이 연구에서는 연구해역내 퇴적물 중 미량금속에 의한 종합적인 오염도와 퇴적물내 미량금속이 서식생물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 최근 국내외 연구자들²⁰⁻²⁵⁾에 의해 널리 이용되고 있는 오염 부하량 지수(Pollution load index, PLI)와 생태계 위험도 지수(Ecological risk index, ERI)를 이용하여 미량금속에 대한 퇴적물의 오염도 및 서식생물의 위해도를 함께 평가하였다. 먼저, PLI는 Tomlinson et al.²⁶⁾에 의해 제시된 오염평가 방법으로 미량금속의 배경농도에 대한 연구해역내 퇴적물중 미량금속의 농도의 비값을 이용하여 측정된 모든 미량금속을 고려한 종합적인 오염평가 방법으로 다음의 방정식 (1)로부터 PLI값을 계산한다.

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

여기서 CF (= $C_{\text{metal}} / B_{\text{metal}}$)는 미량금속의 배경농도(B_{metal})에 대한 연구해역내 퇴적물중 미량금속의 농도(C_{metal}) 비이고, n는 분석된 미량금속의 총 개수를 의미한다. 이 연구에서는 측정된 미량금속 중 지각에 풍부하게 존재하고 보존적 특성을 가지고 있는 Fe과 우리나라의 해양퇴적물 기준을 이용한 오염 평가시 Cu와 Zn의 입도보정을 위해 분석한 보정원소인 Li를 제외한 8개 원소에 대하여 다음의 방정식(2)로부터 PLI를 계산하였다.

$$PLI = \sqrt[8]{(CF_{\text{Cu}} \times CF_{\text{Pb}} \times CF_{\text{Zn}} \times CF_{\text{Cd}} \times CF_{\text{Mn}} \times CF_{\text{Hg}} \times CF_{\text{As}})} \quad (2)$$

ERI는 Hakanson²⁷⁾에 의해 제시된 퇴적물내 각 미량금속에 대하여 생태독성계수를 이용하여 저서 생태계에 미치는 위해도를 평가하는 방법으로 다음의 방정식 (3), (4)으로부터 ERI값을 계산하였다.

$$E_i = T_{\text{metal}} \times \frac{C_{\text{metal}}}{B_{\text{metal}}} \quad (3)$$

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

여기서, C_{metal} 은 연구해역내 퇴적물 중 미량금속 농도,

B_{metal} 은 미량금속의 배경농도, T_{metal} 는 미량금속의 독성계수, n 은 측정된 미량금속종의 개수이다. 이 연구에서는 다른 연구자들에 의해 독성계수가 알려진 7종의 미량금속(Cr = 2, Cu = 5, Zn = 1, Cd = 30, As = 10, Pb = 5, Hg = 40)을 이용하여 ERI를 계산하였다.^{28,29)}

퇴적물 중 미량금속 오염평가 계산에서 필요한 각 미량금속의 배경농도는 일반적으로 연구해역 주변에 오염되지 않은 해양 퇴적물 중 미량금속 농도나 혹은 세 일이나 지각 중 미량금속의 평균농도를 사용한다.^{30,31)} 하지만, 현재 우리나라 지각의 기반암과 연안 대륙붕 해역의 해양 퇴적물 중 미량금속의 배경농도로 사용할 만큼 충분한 연구결과가 없고 연구해역 또한 연안에 너무 가까워 본 연구결과 중 오염되지 않은 해역의 농도를 배경농도로 사용하기에는 어려움이 있다. 따라서 이 연구에서는 전세계의 퇴적물 중 미량금속 오염 시 배경농도로 널리 사용되고 있는 Taylor³²⁾와 Taylor and McLennan³³⁾이 보고한 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, Fe 3.5%, Hg 0.08 mg/kg, Mn 600 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Zn 71 mg/kg)를 미량금속의 배경농도로 이용하였다. 비록 육상의 지질특성의 차이로 인해 지층을 구성하는 기반암이 달라 한반도 연안 퇴적물 중 미량금속의 배경농도와는 다소 차이가 있겠지만, 이들 배경농도는 최근 Lim et al.³⁴⁾이 우리나라 연안 퇴적물 내 중금속 원소의 배경농도 연구에서 제시한 미량금속 배경농도보다 Cu (13.5 mg/kg)는 약 1.9배, Zn (64.3 mg/kg)은 1.1 배 높고, Cr (56.4 mg/kg)은 약 2/3 수준이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물의 조성

퇴적물의 조성 즉 입도는 유기물과 미량금속 농도를 조절하는 중요한 요소이며 일반적으로 입자가 세립할수록 표면적이 커 유기물과 미량금속을 더 많이 흡착하는 것으로 알려져 있다. 연구해역인 한산거제만 주변 퇴적물의 입도분석결과를 토대로 퇴적물의 조성(형태(sedimentary type))를 Fig. 2에 나타내었다. 퇴적물 중 자갈, 모래, 실트, 점토의 함량은 각각 0.0~28.3%(평균 1.9±6.5%), 0.0~52.6%(평균 6.9±13.4%), 6.8~51.5%(평균 26.8±9.0%), 22.3~79.0%(평균 64.4±15.8%)범위였다. 한산도 남쪽 수로부근의 S19과

S21정점은 자갈과 모래 함량의 합이 약 70%이고 Mz가 각각 2.7 Ø, 3.1 Ø 인 중립사(medium sand)와 극세립사(very fine sand) 사이의 퇴적물로 이루어져 있었다. 하지만, 거제만 북서쪽 S1 정점은 실트와 점토 함량의 합이 약 70%이고 Mz가 6.1 Ø인 상대적으로 조립실트(coarse silt)에 가까운 퇴적물로 이루어져 있었고, 그 외 모든 정점들에서는 실트와 점토 함량의 합이 90%, Mz가 7.5 Ø 이상으로 중립실트(medium silt)보다 세립한 퇴적물로 이루어져 있었다.

각 정점별 자갈, 모래, 실트, 점토 함량을 이용하여 Folk¹⁸⁾ 분류법에 따라 퇴적물 유형(sedimentary type)을 살펴본 결과, 연구해역내 퇴적물은 총 5개의 퇴적물 유형으로 구분되었다(Fig. 2). 한산거제만 남쪽 입구쪽에 위치한 S23 정점은 사질점토(sandy clay, sC), 자갈과 모래 함량이 상대적으로 높았던 한산도 남쪽 수로 부근의 S19와 S21정점은 역니질사(gravelly muddy sand, gmS), 거제만 안쪽의 S1, S5 정점과 통영수로 부근의 S18은 약역질니(very slightly gravelly mud, (g)M), 거제만 내 S2, 한산도 남쪽의 S20, 그리고 한산거제만 남동쪽의 S24~26 정점은 니질(mud, M) 퇴적물로 이루어져 있었으며, 그 외 정점들은 점토질(Clay, C) 퇴적물이 분포하였다. 이상의 결과를 보았을 때, 연구해역의 경우 전반적으로 조립실트 이상인 니질 혹은 점토질 퇴적물과 같은 세립질 퇴적물이 우세한 퇴적환경으로 이루어져 있음을 알 수 있으며, 따라서 연구해역은 유기물과 미량금속의 축적 가능성이 매우 높은 퇴적환경을 갖추고 있는 것으로 파악되었다.

3.2. 유기물 분포 및 오염도

연구해역은 다양한 형태의 어패류 양식을 통해 우리

나라 전역으로 수산물을 공급하는 아주 중요한 양식생산지로서 오랫동안 양식활동이 이루어져 왔고, 주변 육상에는 이들 수산물을 가공하는 각종 가공공장들이 위치하고 있어 이들 양식장 및 가공시설로부터 유입되는 유기물에 의한 오염이 우려된다. 연구해역 내 퇴적물 중 유기물 분포 및 오염도를 살펴보기 위하여 유기물 축적 지표인 IL, COD, AVS 농도를 Fig. 3에 나타내었다. IL은 3.1~8.9%(평균 7.8±1.4%) 범위였으며, 다른 정점들에 비해 자갈 및 모래 함량이 상대적으로 높았던 한산도 남쪽의 S19와 S21 정점에서 3.0~4.0 사이의 농도를 보였다. 그 외 정점들은 7.0~9.0 사이로 두 정점에 비해 2배 이상 높은 농도를 나타내었으며 정점간의 큰 농도차이를 보이지는 않았다. 이러한 연구해역 내 퇴적물 중 IL의 평균농도는 키조개 양식이 활발한 득량만(5.6%)이나 피조개 및 새꼬막 양식이 성행하고 있는 남해 강진만(6.6%) 보다 높았다(Table 2). 그러나, 이전에 같은 해역에서 조사된 퇴적물 중 IL 농도(8.0%)와 연구해역과 함께 우리나라의 대표적인 굴양식해역인 가막만(7.1%)과 고성자란만(7.2%)에서 보고된 IL 농도와는 유사하였고, 넓은 조건대가 발달하여 꼬막 양식이 활발한 여자만(10.2%) 보다는 낮은 농도였다(Table 2).

COD는 7.7~27.8 mgO₂/g(평균 18.0±3.9 mgO₂/g) 범위였으며, IL과 마찬가지로 자갈 및 모래 함량이 높았던 한산도 남쪽의 S19와 S21 정점에서 10 mgO₂/g 미만 낮은 농도를 나타내었다. 그 외 한산도 서쪽 통영 수로의 가장 남쪽에 위치한 S18과 한산거제만 남쪽 입구의 S23을 제외한 정점들은 15 mgO₂/g 보다 높은 농도를 보였다. 특히, 정점간에 큰 농도차이를 나타내었는데, 전반적으로 거제만 안쪽 정점들이 한산도 주변

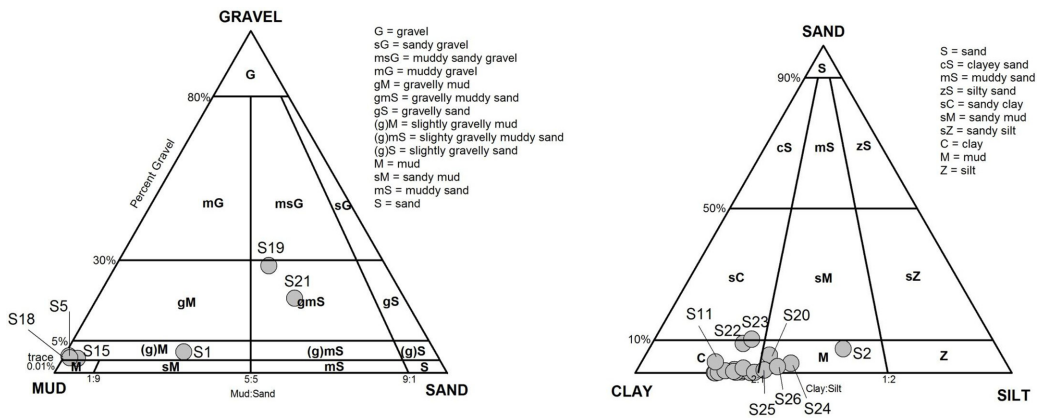


Fig. 2. The ternary diagrams showing the major sediment types in the Hansan-Geoje Bay.

의 수로에 위치한 정점들보다 높은 농도를 보였다. 이러한 연구해역 내 퇴적물 중 COD의 평균농도는 득량만(5.7 mgO₂/g)과 여자만(15.4 mgO₂/g)보다는 높았으나 고성자란만(16.8 mgO₂/g)과 강진만(17.3 mgO₂/g)에서 보고된 농도와 유사하였고, 이전에 같은 해역에서 조사된 퇴적물 중 COD 농도(31.4 mgO₂/g)와 가막만(31.0 mgO₂/g)에서 보고된 농도보다는 상당히 낮았다(Table 2).

AVS 농도는 불검출~0.36 mgS/g(평균 0.11 ± 0.09 mgS/g) 범위였다. 전반적으로 거제만 안쪽 정점들(0.09~0.14 mgS/g)이 한산도 주변의 수로에 위치한 정

점들(0.02~0.07 mgS/g)보다 높은 농도를 보였고, 특히 하게 한산거제만 중앙부의 S10~13 정점에서 0.2 mgS/g 이상으로 다른 정점들에 비해 약 2~10배 정도 높은 AVS 농도를 나타내었다. 이러한 연구해역 내 퇴적물 중 AVS의 평균농도는 여자만(0.06 mgS/g)보다는 높았으나 이전에 같은 해역에서 조사된 퇴적물 중 AVS 농도(0.13 mgS/g)와 고성자란만(0.08 mgS₂/g)에서 보고된 농도와 유사하였고, 득량만(0.36 mgS/g), 가막만(1.0 mgS/g), 남해 강진만(0.25 mgS/g) 해역에서 보고된 농도보다는 상당히 낮았다(Table 2).

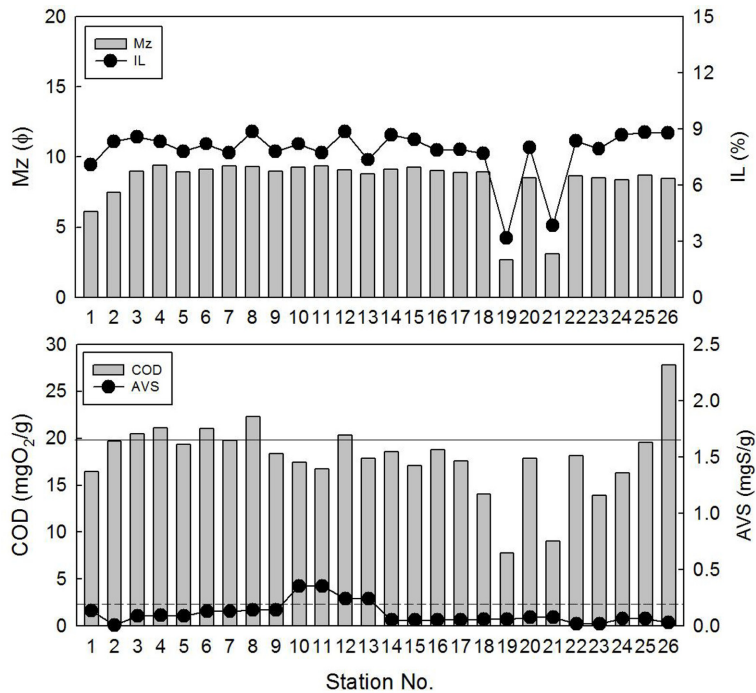


Fig. 3. The mean grain size (Mz), the content of ignition loss (IL), the concentrations of chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) in the sediments of each station around the Hansan-Geoje Bay. The solid and dotted lines represent the sediment quality guidelines of COD and AVS used in Japan, respectively.

Table 2. The content of ignition loss (IL) and the concentrations of chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) in coastal sediments of Korea. The parenthesis represents the average of each parameter in sediments

Study region	IL (%)	COD (mgO ₂ /g)	AVS (mgS/g)	Reference
Deukryang Bay	3.1~21.5 (5.6)	0.4~18.2 (5.7)	ND~3.3 (0.36)	Yoon ⁴³⁾
Yeoja Bay	7.6~12.2 (10.2)	8.3~29.8 (15.4)	0.02~0.11 (0.06)	Hue et al. ⁴⁴⁾
Gamak Bay	4.6~11.6 (7.1)	2.2~100 (31.0)	ND~10.3 (1.0)	Noh et al. ⁴⁵⁾
Gangjin Bay	4.9~7.9 (6.6)	11.5~23.2 (17.3)	0.02~0.66 (0.25)	Choi et al. ⁴⁶⁾
Goseong-Jaran Bay	4.4~8.8 (7.2)	4.8~27.8 (16.8)	ND~0.48 (0.08)	MIFAFF ⁴⁷⁾
Geoje-Hansan Bay	5.7~12.9 (8.0)	17.2~55.8 (31.4)	ND~0.78 (0.13)	MIFAFF ⁴⁸⁾
Geoje Bay and Hansan Island	3.1~8.9 (7.8)	7.7~27.8 (18.0)	ND~0.35 (0.11)	This study

*ND=Not Detected

퇴적물 중 COD와 AVS는 퇴적물의 유기물 오염 및 건강도를 평가하는 항목으로 널리 이용되고 있으나, 앞서 언급하였듯이 현재 우리나라의 해양환경 기준에는 이들 항목들에 대한 기준값이 마련되어 있지 않다. 따라서, 이 연구에서는 우리나라와 수산양식 환경이 비슷한 일본의 퇴적물 중 COD(20 mgO₂/g)와 AVS(0.2 mgS/g) 기준³⁵⁾을 적용하여 유기물에 의한 오염상태를 평가하였다. 그 결과, 연구해역 내 26개 정점 중 COD와 AVS는 각각 6개 정점(거제만 안쪽의 S3, S4, S6, S8, 한산거제만 입구의 S12와 남동쪽의 S26 정점)과 4개 정점(한산거제만 중앙부의 S10~13 정점)에서 일본의 퇴적물 기준을 초과한 것으로 나타났다. 따라서, 연구

해역의 퇴적물 중 유기물의 경우 현재 저서생물에 영향을 줄 만큼 오염상태는 아닌 것으로 보인다. 하지만, COD의 경우 일부 정점(거제만 안쪽의 S2, S5, S7과 한산거제만 남동쪽 입구의 S25)에서 기준값에 상회하는 농도를 보이고 대부분의 정점에서 15 mgO₂/g 보다 높은 농도를 나타내고 있어 유기물 오염 가능성이 높은 만큼 연구해역 주변의 유기물 오염원에 대한 적절한 관리가 필요할 것으로 생각된다.

3.3. 미량금속의 분포특성 및 오염도

한산거제만 주변 퇴적물 중 미량금속 농도를 Fig. 4에 나타내었다. Fe과 친철원소(siderophile element)로

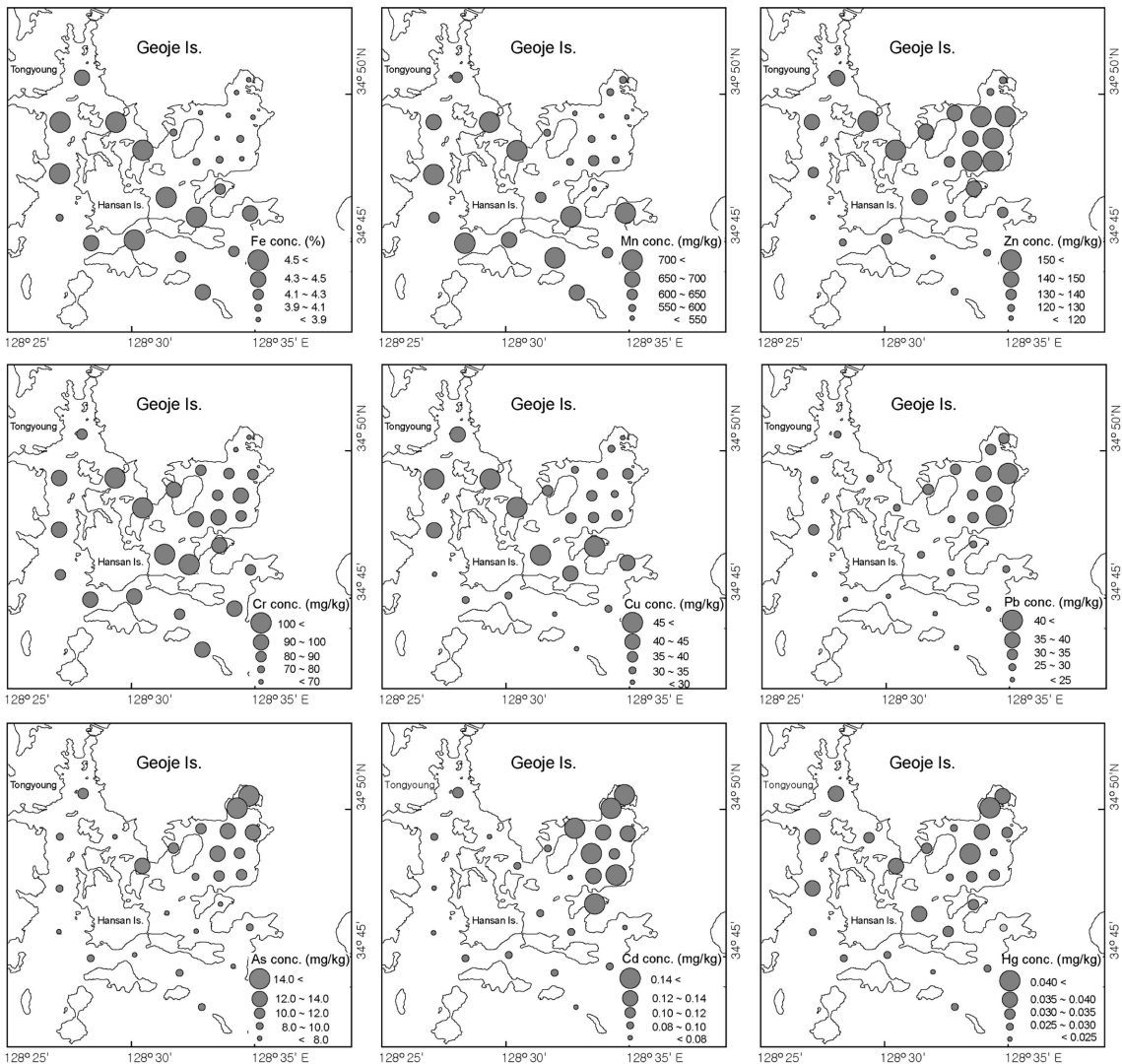


Fig. 4. The horizontal distributions of trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in sediments around the Hansan-Geoje Bay.

알려진 Cr은 각각 3.37~4.89%(평균 4.20±0.41%)와 45~107 mg/kg(평균 89±14 mg/kg)범위였으며, 한산거제만 중앙부의 S13 정점에서 가장 높고 거제만 북동쪽 S1 정점에서 가장 낮았다. 두 금속원소 모두 전반적으로 한산도 주변의 수로부근(특히 거제만과 한산도 사이의 수로)에 위치한 정점들에서 높고 거제만 안쪽 정점들에서 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 농도분포는 Fe과 강한 결합력을 보이는 Mn과 Fe-Mn oxyhydroxide의 함량에 따라 농도가 변하는 Cu도 유사한 농도분포 특성을 보였다. 이들 Mn과 Cu의 농도는 각각 480~1,117 mg/kg(평균 651±142 mg/kg)과 23.1~60.3 mg/kg(평균 38.0±9.0 mg/kg) 범위였다.

생물 필수원소 중에 하나인 Zn은 110~174 mg/kg(평균 140±15 mg/kg) 범위였고, 유해한 독성으로 관리대상 미량금속인 As, Cd, Hg, Pb의 농도는 각각 6.2~16.8 mg/kg(평균 10.3±2.9 mg/kg), 0.07~0.30 mg/kg(평균 0.12±0.05 mg/kg), 0.024~0.049 mg/kg(평균 0.033±0.005 mg/kg), 22.2~47.6 mg/kg(평균 30.5±6.5 mg/kg)범위였다. 이들 금속원소들은 앞서 철을 비롯한 친철원소들과 달리 한산도 주변의 수로에 위치한 정점들에서 낮은 농도를 보인 반면, 거제만 안쪽 정점들에서 높은 농도를 보였다. 일반적으로 연안해역에서 퇴적물 중 미량금속의 농도는 퇴적물의 입도와 생물기원 물질 즉 유기물(예-IL or Total organic carbon) 함량과 밀접한 관련이 있으며, 이전에 연구해역과 같이 반폐쇄적인 내만^{30,36,37)}에서도 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있다. 하

지만, 일부 공단 및 대도시 주변 해역에서는 입도 및 유기물 영향보다는 육상의 인위적인 오염원에 의해서 그 농도가 크게 달라진다.^{38,39)} 이 연구에서도 연구해역 내 퇴적물 중 입도, 유기물 및 미량금속원소들 사이에 어떠한 상관관계가 있는지 상관분석(Pearson's correlation coefficients)을 실시하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 미량금속 중Cu와 Zn은 평균입도 및 IL, COD와 좋은 양의 상관성($r=0.42\sim0.61$, $P<0.05$)을 보이고, Mn은 음의 상관성($r= -0.76\sim-0.72$, $P<0.01$)을 나타내었으며, 이는 이들 금속원소들이 퇴적물의 입도와 유기물 함량의 영향을 크게 받고 있음을 나타낸다. 그러나, Cd, Hg, Pb은 비록 COD와는 좋은 양의 상관성($r=0.50\sim0.67$, $P<0.01$)을 나타내었으나, 평균입도 및 IL과 상관성을 보이지 않았고, As, Cr, Fe의 경우 평균입도, IL, COD중 어느 항목과도 상관성을 보이지 않았다. 이는 이들 금속원소들이 퇴적물의 입도와 유기물 함량의 다른 요인의 영향을 크게 받고 있음을 의미한다. 따라서, 연구해역 내 유해 미량금속(As, Cd, Hg, Pb)이 거제만 안쪽에서 높은 농도를 보이는 것은 주로 연구해역 주변 육상으로부터 하천수나 지하수를 통해 유입된 미량금속이 부유입자와 함께 침강하여 축적되었거나 오랫동안 지속적으로 이루어져 온 거제만 안쪽의 수하식 굴양식 활동으로 발생한 양식 부산물에 의한 인위적인 오염의 영향 때문인 것으로 생각된다.

연구해역의 퇴적물 중 미량금속은 평균농도는 Fe >

Table 3. Pearson's correlation coefficients between the mean grain size (Mz), organic parameters (ignition loss [IL], chemical oxygen demand [COD], acid volatile sulfide [AVS]), and trace metals (As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in the surface sediments of the Hansan-Geoje Bay (n=26)

	Mz	IL	COD	AVS	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn
Mz	1												
IL	0.906**	1											
COD	0.703**	0.800**	1										
AVS	0.225	0.050	0.041	1									
As	-0.053	-0.019	0.127	0.135	1								
Cd	0.084	0.235	0.665**	-0.135	0.381	1							
Cr	0.298	0.100	0.052	0.187	-0.725**	-0.374	1						
Cu	0.427*	0.431*	0.456*	0.179	-0.264	0.075	0.482*	1					
Fe	0.075	0.009	-0.093	-0.086	-0.733**	-0.461*	0.806**	0.610**	1				
Hg	0.321	0.393*	0.501**	-0.023	0.389*	0.363	-0.148	0.387	-0.038	1			
Mn	-0.734**	-0.746**	-0.752**	-0.178	-0.358	-0.527**	0.202	-0.144	0.438*	-0.326	1		
Pb	0.307	0.322	0.500**	0.128	0.667**	0.500**	-0.410*	-0.009	-0.617**	0.368	-0.574**	1	
Zn	0.501**	0.410*	0.605**	0.262	0.192	0.294	0.315	0.560**	0.089	0.365	-0.436*	0.673**	1

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

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

Mn > Zn > Cr > Cu > Pb > As > Cd > Hg의 순으로 높은 농도를 보였다. 이러한 잔류패턴은 최근에 Ra et al.²¹⁾이 한반도 연안 퇴적물에서 측정된 퇴적물 중 미량금속의 잔류패턴과 비슷하지만, 평균농도에 있어서 연구해역내 퇴적물이 한반도 연안 퇴적물에 비해 Zn, Cr, As의 농도는 높고 Cu, Pb, Cd, Hg

Table 4. The average of trace metals (As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in coastal sediments of Korea

Study region	Metals									Reference
	(%)	(mg/kg)								
	Fe	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Mn	Pb	Zn	
Korean Coast	-	9.1	0.3	37	58	0.05	-	35	122	Ra et al. ²¹⁾
Deukryang Bay	3.8	9.6	0.1	15	74	0.01	838	27	90	Jeon et al. ⁴²⁾
Gamak Bay	3.8	9.8	0.1	28	78	0.02	717	28	114	Kim et al. ³⁷⁾
Shihwa Lake	3.4	12.3	0.5	207	101	0.12	399	66	309	Kim et al. ⁴⁰⁾
Masan Harbor	4.5	10.5	1.4	73	79	0.14	716	74	321	Hwang et al. ¹⁶⁾
Ulsan Harbor	3.3	16.1	0.3	81	62	0.11	499	35	189	Hwang et al. ⁴¹⁾
Hansan-Geoje Bay	3.4	10.3	0.1	38	89	0.03	651	30	140	This study

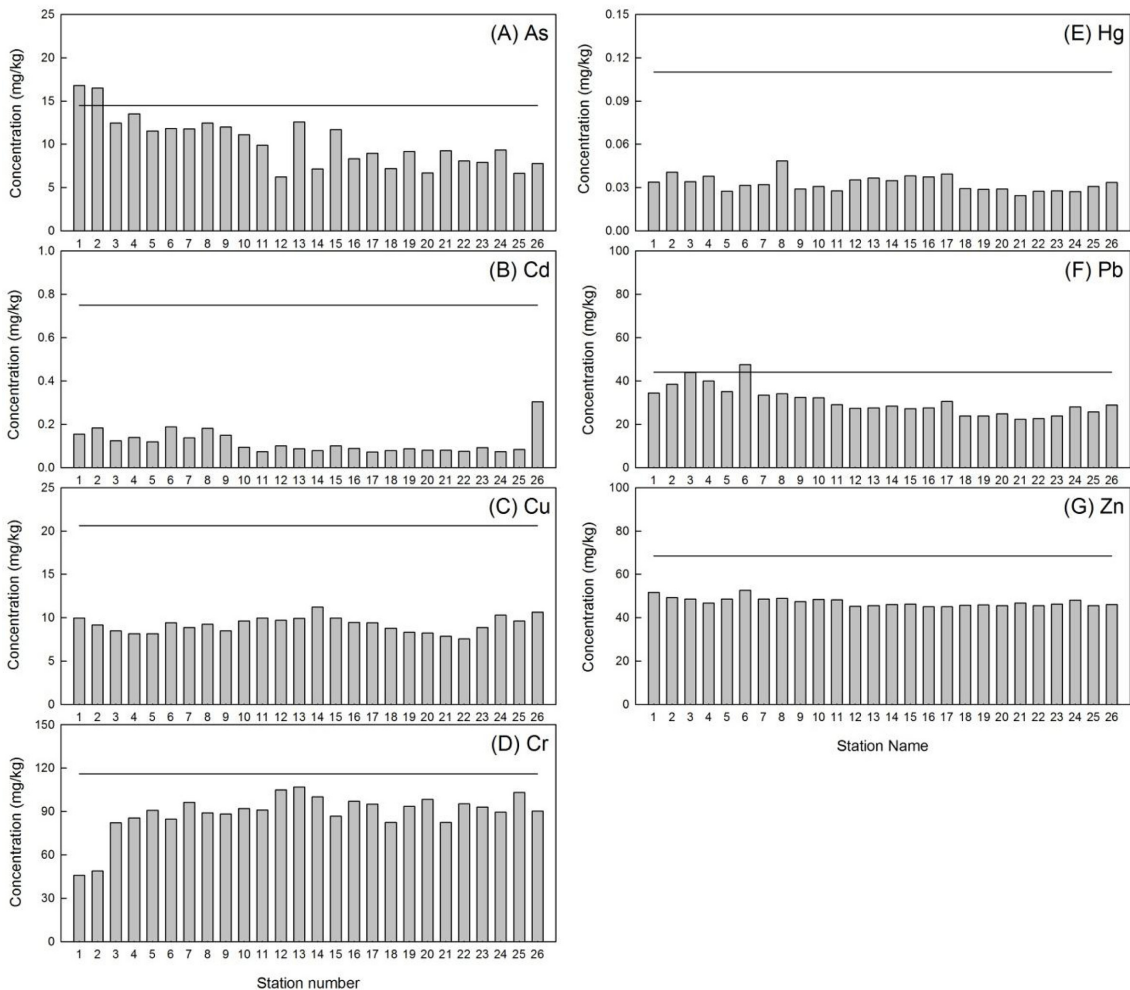


Fig. 5. The concentrations of trace metals (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, and Zn) in the sediments of each station around the study region. The concentrations of Cu and Zn are not actual concentrations but corrected concentrations by the Li concentration in the sediments of each station due to the grain-size effect. The solid lines represent the values of threshold effects level (TEL) used in Korea as the sediment quality guidelines.

은 낮았다(Table 4). 또한, 우리나라의 대표적인 공업단지 및 대도시 주변의 시화호,⁴⁰⁾ 마산항,¹⁶⁾ 울산항⁴¹⁾ 퇴적물에 비해 친철원소인 Cr과 Mn을 제외한 생물 필수원소(Cu 와 Zn)와 유해 미량금속들(As, Cd, Hg, Pb)은 낮았지만, 연구해역과 같이 패류양식시설이 밀집해 있는 득량만⁴²⁾이나 가막만³⁷⁾에 비해서는 Cr과 Mn을 제외한 생물 필수원소(Cu 와 Zn)와 유해 미량금속들(As, Cd, Hg, Pb)은 높았다(Table 4).

비록 연구해역 내 퇴적물 중 생물필수원소 및 유해 미량금속의 농도가 우리나라의 대표적인 오염해역들보다는 낮지만, 다른 패류 양식해역에 비해 높다는 것은 그만큼 다시 해수 중으로 미량금속이 더 많이 용출되어 먹이사슬을 통해 연구해역 내 양식생물에 더 높은 농도로 축적될 가능성이 높다. 그러므로, 퇴적물 중 미량금속의 오염을 평가하는 것은 양식생물의 안전성 및 양식생물을 섭취하는 국민들의 건강을 확보하는데 있어서 매우 중요하다고 하겠다. 지금까지 전 세계적으로 퇴적물 중 미량금속 오염을 평가하기 위해 다양한 방법이 이용되어져 왔고, 이 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 최근에 많은 연구자들이 사용중인 SQGs, PLI, ERI 평가방법을 이용하여 연구해역내 퇴적물의 오염도 및 생물 위해도를 평가하였다.

우리나라의 해양수산부에서는 최근 “해양환경관리법 제 8조”에 의거하여 해수 및 퇴적물에 대한 해양환경 기준을 설정(해양수산부 고시 제 2013-186호)하였고, 이 중 퇴적물중 미량금속 오염을 평가할 수 있도록 8개 미량금속(Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni, As, and Hg)에 대하여 기준을 제시하였다. 이 연구의 분석항목이 아닌 Ni을 제외한 각 미량금속별 TEL값은 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 44.0 mg/kg, Zn 68.4 mg/kg 이다. 여기서, Cu와 Zn은 입도에 따라 농도가 달라질 수 있기 때문에 보정원소로서 Li을 이용하여 입도의 영향을 보정한 농도를 기준값과 비교하여야 한다. 이 연구에서 각 정점별 퇴적물 중 Li함량(85~135 mg/kg, 평균 112 ±12 mg/kg)을 고려한 보정한 Cu와 Zn의 농도는 각각 7.5~11.3 mg/kg(평균 9.2±0.9 mg/kg) 와 45.0~52.7 mg/kg(평균 47.3±2.0 mg/kg) 범위였다. 이러한 사항을 고려하여 각 정점별 미량금속 농도와 우리나라의 퇴적물 기준인TEL 값을 비교해 보면(Fig. 5), 전체 26개 정점 중 As는 2개 정점(거제만 가장 안쪽의 S1, S2), Pb은 1개 정점(거제만 남쪽의 S6)에서 TEL을 초과할 뿐 그 외 정점들은 TEL 미만이었었고, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb은 모든 정점에서 TEL 미만이었다.

연구해역 내 퇴적물 중 미량금속에 의한 종합적인 오염도를 평가하기 위하여 방정식 (2)를 이용하여 계산한 각 정점별 PLI 값과 이들 미량금속의 독성도에 따른 저서생물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 방정식 (3)과 (4)를 이용하여 계산한 각 정점별 ERI 값을 Fig. 6에 도시하였다. 지각을 구성하는 성분으로 퇴적물 중 가장 높은 농도로 존재하는 Fe과 SQGs의 Cu와 Zn 농도를 보정하기 위해 분석한 Li을 제외한 8종의 생물 필수원소 및 유해 미량금속에 대한 각 정점별 PLI는 1.3~1.8 (평균 1.6) 범위였다. 모든 정점에서 1.0을 초과하여 오염된 상태(polluted)였으며, 거제만 안쪽 정점들이 한산도 주변 수로부근의 정점들보다 상대적은 낮은 오염도를 나타내었다(Fig. 6(A)). ERI는 104~204 (평균 142) 범위였으며, 거제만 북동쪽의 S2에서 204

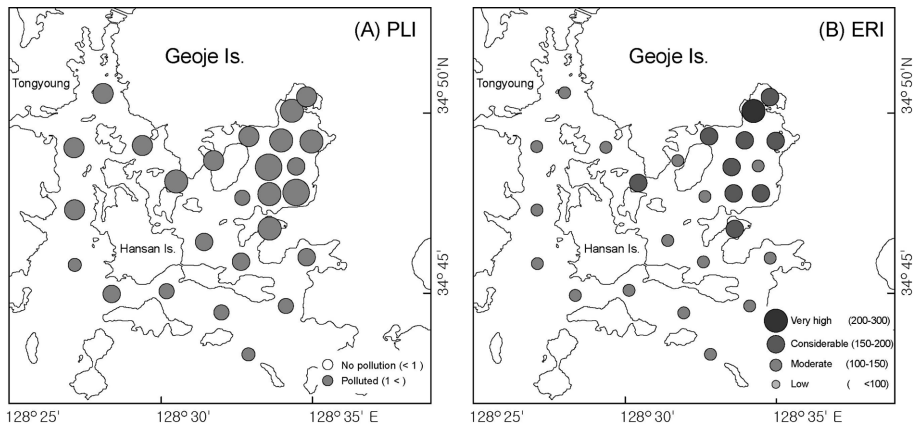


Fig. 6. Maps showing the results of (A) PLI (Pollution load index) and (B) ERI (Ecological risk index) in the study region.

로서 생물에 매우 심한 위해성을 줄 수 있는 상태 (very high risk)였고, 거제만 안쪽의 S1, S3, S4, S6-S9, 거제만 입구쪽의 S13, 그리고 S26 정점에서 153~194 사이로 생물에 상당한 위해성을 줄 수 있는 상태(considerable risk)였다. 그 외 정점들은 103~150 사이로 어느 정도 생물에 위해성을 줄 수 있는 상태(moderate risk)였다.

이상의 3가지 평가방법을 이용한 퇴적물 중 미량금속의 오염도 및 미량금속에 의한 생물 위해성 평가 결과를 종합해 보면, 연구해역인 한산거제만 주변 표층 퇴적물은 생물 필수원소 및 유해 미량금속에 대하여 인위적인 오염의 영향은 보이지만, 일부 정점을 제외하면 우리나라의 퇴적물 기준 중 주의기준(TEL)보다 낮고 미량금속의 독성도를 고려한 생물 위해성 또한 낮아 우려할 만큼의 심각한 오염 상태는 아닌 것으로 생각된다.

4. 결 론

어패류 양식 밀집해역인 한산거제만 주변 해역의 퇴적물 중 유기물과 미량금속의 농도분포 특성 및 오염 현황을 파악하기 위하여 퇴적물 중 입도와 유기물 지표인 IL, COD, AVS 그리고 미량금속(As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Li, Mn, Pb and Zn)에 대하여 조사하였다. 한산거제만 주변 퇴적물은 실트와 점토 함량의 합이 90% 이상으로 Mz가 7.5 ϕ 보다 큰 유기물 및 미량금속이 축적되기에 적합한 세립한 니질(mud)과 점토(clay)질 퇴적물로 이루어져 있었다. 유기물 함량 특성을 나타내는 IL과 COD의 농도는 거제만 안쪽과 한산도 주변 정점들에서 큰 농도차이를 보이지 않았지만, 미량금속의 경우 Fe를 비롯한 친철원소들(Mn, Cr, Cu)은 한산도 주변 수로부근에서 높고, 그 외 미량금속 원소들(As, Cd, Hg, Pb, Zn)은 거제만 안쪽에서 높은 농도를 나타내었다. 퇴적물 오염평가 결과, 연구해역의 퇴적물 중 유기물 및 미량금속은 인위적인 오염의 영향은 있지만 우리나라의 퇴적물 기준보다 낮고 저서생물에 나쁜 영향을 줄 만큼 위해도가 높지 않은 것으로 나타났다. 하지만, 한산거제만 해역의 경우 우리나라 대표적인 수출용 패류생산 지정해역으로서 지속적인 양식장의 이용과 국내의 안전한 수산물 공급을 위해 깨끗한 저질환경을 유지하기 위한 관리가 요구된다. 아울러 양식생물의 안전성을 확보하기 위하여 퇴적물과 양식생물 중 미량금속에 대한 지속적인 모니터링을 통하

여 퇴적물 중 미량금속이 생물에 어떠한 영향을 미치는지 두 매체 사이의 상관관계를 살펴보는 연구가 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

이 연구의 현장조사 및 시료분석에 도움을 준 국립수산물과학원 어장환경과 연구원들에게 감사를 드립니다. 이 논문은 2015년도 국립수산물과학원 수산물과학연구사업(R2015059)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. M. Choi, Y. G. Lee, and H. J. Woo, "Seasonal and spatial variations of tidal flat sediments in Yeolja Bay, south coast of Korea", *Journal of Korean Earth Science Society*, **2005**, 26, 253-267.
2. D. W. Hwang, P. J. Kim, S. B. Jeon, and B. S. Koh, "Geochemical characteristics of intertidal sediment in the semi-enclosed bays of the southern region of Jeollanam Province", *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **2013**, 46, 638-648.
3. W. C. Lee, Y. S. Cho, S. J. Hong, H. C. Kim, J. B. Kim, and S. M. Lee, "Estimation of ecological carrying capacity for oyster culture by ecological indicator in Goeje-Hansan Bay", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **2011**, 17, 315-322.
4. NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute), "Environmental research of aquaculture farm in Korea", NFRDI 1st Report (2008), p. 243.
5. K. S. Ha, K. B. Shim, H. D. Yoo, J. H. Kim, and T. S. Lee, "Evaluation of the bacteriological safety for the shellfish growing area in Hansan-Geojeman, Korea", *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **2009**, 42, 449-455.
6. J. N. Kwon, Y. C. Park, and K. H. Eom, "The characteristic of long term variation of the water quality from Hansan-Geoje bay, Korea", *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, **2013**, 16, 189-201.
7. Y. S. Lee, W. A. Lim, C. S. Jung, and J. Park, "Spatial distributions and monthly variations of water quality in coastal seawater of Tongyeong, Korea", *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **2011**, 14, 154-162.
8. J. S. Park, H. C. Kim, W. J. Choi, W. C. Lee, D. M. Kim, J. H. Koo, and C. K. Park, "Estimating the carrying capacity of a coastal bay for oyster culture II. The car-

- rying capacity of Geoje-Hansan Bay”, *Journal of Korean Fisheries Society*, **2002**, 35, 408-416.
9. Y. S. Cho, S. J. Hong, H. C. Kim, W. J. Choi, W. C. Lee, and S. M. Lee, “Development of bivalve culture management system based on GIS for oyster aquaculture in GeojeHansan Bay”, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **2010**, 16, 11-20.
 10. S. P. Yoon, R. H. Jung, Y. J. Kim, S. J. Hong, H. T. Oh, and W. C. Lee, “Spatio-temporal changes in macrobenthic community structure and benthic environment at an intensive oyster culturing ground in Geoje-Hansan Bay, Korea”, *The Sea - Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2009**, 14, 213-228.
 11. J. D. Choi and I. G. Jeoung, “Trace metal contents in cultured and wild fishes from the coastal area of Tongyeong, Korea and their safety evaluations”, *Journal of Food Hygiene and Safety*, **2005**, 205-210.
 12. S. M. Cho, Y. H. Kim, and W. G. Jeong, “The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea”, *Korean Journal of Malacology*, **2009**, 25, 213-222.
 13. H. S. Choi, B. Y. Jee, M. Y. Cho, and M. A. Park, “Monitoring of pathogens on the cultured Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in the marine cages farms of south sea area from 2006 to 2008”, *Journal of Fish Pathology*, **2010**, 23, 27-35.
 14. Y. K. Shin, H. J. Kim, K. I. Park, M. S. Choi, J. C. Jun, and E. O. Kim, “Occurrence of bi-flagellated protists in the tunics of ascidians *Halocynthia roretzi* with tunic-softness syndrome collected from Tongyeong, south coast of Korea”, *Journal of Fish Pathology*, **2011**, 24, 197-204.
 15. S. B. Shin, E. G. Oh, H. J. Lee, Y. K. Kim, T. S. Lee, and J. H. Kim, “Norovirus quantification in oysters *Crassostrea gigas* collected from Tongyeong, Korea”, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **2014**, 47, 501-507.
 16. D. W. Hwang, H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim, J. S. Park, and S. G. Kim, “Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan harbor, Korea”, *Journal of the Korean Fisheries Society*, **2006**, 39, 106-117.
 17. R. L. Folk and W. C. Ward, “Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters”, *Journal of Sedimentary Petrology*, **1957**, 27, 3-26.
 18. R. L. Folk, “Petrology of sedimentary rock”, **1968**, 0-170, Hemphill Publishing Co., USA.
 19. D. W. Hwang, P. J. Kim, R. H. Jung, and S. P. Yoon, “Distributions of organic matter and trace metals in intertidal surface sediment from the Mokpo-Haenam coast”, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **2013**, 46, 454-466.
 20. G. Li, B. Hu, J. Bi, Q. Leng, C. Xiao, and Z. Yang, “Heavy metals distribution and contamination in surface sediments of the coastal Shangdong Peninsula (Yellow Sea)”, *Marine Pollution Bulletin*, **2013**, 76, 420-426.
 21. K. Ra, E. S. Kim, K. T. Kim, J. K. Kim, J. M. Lee, and J. Y. Choi, “Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea”, *Journal of Coastal Research*, **2013**, 65, 105-110.
 22. K. D. Bastami, H. Bagheri, V. Kheirabadi, G. G. Zafarani, M. B. Teymori, A. Hazmehpoor, F. Soltani, S. Haghparast, S. R. M. Harami, N. F. Ghorghani, and S. Ganji, “Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea”, *Marine Pollution Bulletin*, **2015**, 81, 262-267.
 23. C. I. Sun, Y. J. Lee, J. H. An, and Y. W. Lee, “Speciation and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Masan Bay”, *The Sea - Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2014**, 19, 155-163.
 24. S. A. A. Ghani, “Trace metals in seawater, sediments and some fish species from Marsa Matrouh Beaches in north-western Mediterranean coast, Egypt”, *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **2015**, 41, 145-154.
 25. A. Pejman, G. N. Bidhendi, M. Ardestani, M. Saeedi, and A. Baghvand, “A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study”, *Ecological Indicators*, **2015**, 58, 365-373.
 26. D. L. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris, and D. W. Jeffrey, “Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index”, *Helgolander Meeresuntersuchungen*, **1980**, 33, 566-575.
 27. L. Hakanson, “An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach”, *Water Research*, **1980**, 14, 975-1001.
 28. D. I. Lim, J. W. Choi, H. H. Shin, D. H. Jeong, and H. S. Jung, “Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea”, *Marine Pollution Bulletin*, **2013**, 73, 362-368.
 29. V. Sheykhi and F. Moore, “Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river, southwest Iran”, *Environmental Monitoring and Assessment*, **2013**, 185, 3219-3232.

30. S. Hyun, T. Lee, J. S. Choi, D. L. Choi, and H. J. Woo, "Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **2003**, 8, 380-391.
31. H. Feng, H. Jiang, W. Gao, M. P. Weinstein, Q. Zhang, W. Zhang, L. Yu, D. Yuan, and J. Tao, "Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China", *Journal of Environmental Management*, **2011**, 92, 1185-1197.
32. S. R. Taylor, "Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **1964**, 28, 1273-1285.
33. S. R. Taylor and S. M. McLennan, "The geochemical evolution of the continental crust", *Reviews of Geophysics*, **1995**, 33, 241-265.
34. D. I. Lim, J. Y. Choi, H. S. Jung, H. W. Choi, and Y. O. Kim, "Natural background level analysis of heavy metal concentrations in Korean coastal sediments", *Ocean Polar Research*, **2007**, 29, 379-389.
35. H. Yokoyama, "Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal area - a new policy and its potential problems", *Bulletin of National Research Institute of Aquaculture*, **2000**, 29, 123-134.
36. M. K. Lee, W. Bae, I. K. Um, and H. S. Jung, "Characteristics of heavy metal distribution in sediments of Youngil Bay, Korea", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **2004**, 26, 543-551.
37. P. J. Kim, S. G. Shon, S. Y. Park, S. S. Kim, S. J. Jang, S. B. Jeon, and J. S. Ju, "Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak Bay", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **2012**, 18, 67-83.
38. Y. G. Cho and K. Y. Park, "Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, west coast of Korea", *Journal of Korean Environment Science Society*, **1998**, 7, 549-557.
39. M. S. Choi, J. H. Chun, H. J. Woo, and H. I. Yi, "Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake", *Journal of Korean Environment Science Society*, **1999**, 8, 593-600.
40. K. T. Kim, E. S. Kim, S. R. Cho, K. H. Chung, and J. K. Park, "Distribution and pollution of heavy metals in the environmental samples of the Lake Shihwa", *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **2005**, 8, 148-157.
41. D. W. Hwang, I. S. Lee, M. Choi, and H. G. Choi, "Distribution and pollution assessment of organic matter and trace metals in surface sediment around Ulsan Harbor", *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2014**, 17, 146-160.
42. S. B. Jeon, P. J. Kim, S. S. Kim, J. S. Ju, Y. H. Lee, D. S. Jang, J. U. Lee, and S. Y. Park, "Characteristics of spatial distribution of geochemical components in the surface sediments of the Deukryang Bay", *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2012**, 15, 203-204.
43. Y. H. Yoon, "Spatio-temporal distribution of organic matters in surface sediments and its origin in Deukryang Bay, Korea", *Journal of Korean Environmental Science*, **2003**, 12, 735-744.
44. H. K. Hue, D. H. Kim, S. H. Ahn, and K. W. Park, "Characteristics of the sedimentary environment in Yoja Bay in the summer of 1998", *Korean Journal of Environment Biology*, **2000**, 18, 227-235.
45. I. H. Noh, Y. H. Yoon, D. I. Kim, and J. S. Park, "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*, **2006**, 9, 1-13.
46. M. Choi, H. C. Kim, D. W. Hwang, I. S. Lee, Y. S. Kim, Y. J. Kim, and H. G. Choi, "Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea", *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **2013**, 46, 424-436.
47. MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries), "Report on water quality status in farming areas of Korea in 2009", Busan, Korea, **2009**, 1-443.
48. MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries), "Report on water quality status in farming areas of Korea in 2008", Busan, Korea, **2008**, 1-443.