

태안반도 갯벌 참굴(*Crassostrea gigas*) 양식장 주변 퇴적물의 유기물 및 미량금속 분포

황동운* · 이인석 · 최민규 · 최희구

국립수산과학원 어장환경과

Distributions of Organic Matter and Trace Metals in Sediment around a Tidal-flat Oyster *Crassostrea gigas* Farming Area on the Taean Peninsula, Korea

Dong-Woon Hwang*, In-Seok Lee, Minkyu Choi and Hee-Gu Choi

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-705, Korea

We measured the concentrations of various geochemical parameters [grain size, ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), and trace metals (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr, Mn, As, Zn, and Hg)] in the surface sediments of two intertidal oyster *Crassostrea gigas* farming areas (Iwon and Mongsan tidal flats) on the Taean Peninsula, Korea, to evaluate the pollution level of organic matter and trace metals in sediment. The intertidal sediments in the study region comprise mostly sand with a mean grain size of 2.5-3.5 ϕ . The concentrations of IL, COD, AVS, and trace metals in the sediment of two study regions were either similar or lower in oyster farming areas relative to non-farming areas, apparently due to biological uptake or physical and biological sediment reworking. Based on the results for the pollution evaluation of organic matter and trace metals derived from sediment quality guidelines, enrichment factor, and geoaccumulation index, our results suggest that the sediment in these two intertidal oyster farming regions is not polluted by organic matter and trace metals.

Key words: Intertidal sediment, Organic matter, Trace metal, Pollution, Taean Peninsula

서론

굴(Oyster, *Crassostrea gigas*)은 예로부터 바다의 우유라 불릴 만큼 철분, 요오드, 칼슘 등 각종 비타민과 무기질 성분의 함량이 높아 전 세계적으로 널리 소비되는 대표적인 수산물 중에 하나이며, 우리나라에서도 전체 패류 생산량(약 390,000톤)의 약 72% (약 280,000톤)를 차지할 만큼 매우 중요한 수산생물이다 (<http://www.kosis.kr>). 일반적으로 굴은 암반이나 자갈과 같은 조립질의 퇴적물 기질에 부착하여 자연적으로 채취 가능하지만 대부분은 양식을 통하여 생산되는데, 우리나라의 양식산 굴 중 가장 높은 생산량을 보이는 굴의 종은 참굴(*Crassostrea gigas*)이다(Lim et al., 2012). 이들 참굴은 다른 종류의 굴에 비해 빠른 성장률과 환경에 대한 강한 내성 때문에 우리나라 뿐만 아니라 일본, 중국, 유럽 등 전세계 다양한 곳에서 양식되고 있다

(Shim et al., 2009). 우리나라에서는 주로 서해안과 남해안에서 생산되고 있으며, 해역의 특성을 고려하여 남해안에서는 가막만, 한산-거제만, 진해만 등과 같은 반폐쇄적인 내만해역을 중심으로 약 10 m 수심에서 수하식으로, 서해안에서는 태안, 서천 등과 같은 모래함량이 높은 갯벌에서 바닥식, 말목식, 포장 끈식 등 다양한 양식방법을 통해 굴이 생산되고 있다(Hur et al., 2008; Lim et al., 2012).

굴은 이동성이 거의 없고 여과식자(filter feeder)로서 수중의 세균, 바이러스 및 미량금속 등의 위해물질을 섭취하여 체내에 축적하며, 다른 수산생물에 비해 여과 및 금속농축 능력이 뛰어나 진주담치와 함께 연안 환경오염 및 수산물의 안정성을 평가하는 지표로 이용되는 생물이다(Lee and Kim, 2000; Kimbrough et al., 2008). 따라서, 굴을 양식함에 있어서 생산해역 주변 수질환경 특성 및 오염원과 생물체 내 위해물질의 모

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.1014>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Kor J Fish Aquat Sci 47(6) 1014-1025, December 2014

Received 14 August 2014; Revised 22 October 2014; Accepted 13 November 2014

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2542 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: dwhwang@korea.kr

니터링을 통하여 위생에 대한 안전성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다(Shim et al., 2009). 1960년대 이후 우리나라는 연안을 따라 임해공업단지의 조성 및 인구증가로 인한 신도시 건설 등 급속한 경제성장을 이루었지만, 이러한 산업화와 도시화 과정에서 정화되지 않은 산업폐수 및 도시하수 등이 무분별하게 연안으로 유입되면서 이를 통해 영양염류나 유기물, 미량금속 등과 같은 각종 오염물질들이 함께 유입되었고 직·간접적인 영향을 받아 일부 해역에서는 해역자체의 정화능력을 상실함으로써 부영양화(eutrophication), 적조(red-tide), 빈산소수괴(hypoxia)의 형성 등 많은 연안 환경문제들이 상습적으로 발생하고 있다(Hwang et al., 2006). 특히, 유기물 및 미량금속과 같은 유해물질들은 입자물질에 잘 흡착 제거되는 특성을 가지고 있어, 해수의 흐름이 원활하지 않은 반폐쇄적인 내만 해역이나 육지와 가장 인접해 있는 갯벌에 퇴적되어 오염을 유발하거나 그 해역에 서식하는 수산·양식생물의 위생학적 안전성에 큰 위협으로 작용할 수 있다.

지금까지 남해안의 수하식 굴 양식활동이 활발한 가막만, 강진만, 거제만 등의 반폐쇄적인 내만과 통영연안은 미국, 일본, 유럽연합 등 국외에 안정적인 패류 수출을 목적으로 생산해역에 대한 위생관리를 위해 “패류생산지정해역”으로 지정하여 수질 및 저질환경에 대한 지속적인 관리를 해오고 있으며(Shim et al., 2009), 퇴적 및 저서환경 내 오염 특성을 파악하기 위한 퇴적물의 조성과 유기물 및 금속원소의 함량 등에 대한 많은 연구가 진행되어져 왔다(Yang et al., 1995; Lee and Kim, 2000; Noh et al., 2006; Lee et al., 2008; Kim et al., 2012; Woo et al., 2013). 그러나, 양식면적과 생산량에 있어서 남해안의 수하식 양식에 비해 적지만, 서해안의 여러 갯벌에서 다양한 방법으로 참굴 양식이 이루어지고 있음에도 불구하고 이들 해역에 대한 퇴적물 내 유기물 및 미량금속 함량 특성에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 일반적으로 갯벌에서 양식되는 굴의 경우 파도나 조석에 의해 부유하는 갯벌 표면의 저서미세조류(microphytobenthos)나 유기물을 주요 먹이원으로 하기 때문에 식물플랑크톤을 주 먹이원으로 하는 수하식 양식장의 굴보다 퇴적물 중 유기물 및 미량금속의 영향을 더 많이 받을 가능성이 높다. 최근 연구결과에서도 한반도 연안에서 갯벌 퇴적물과 바지락과 같은 패류의 체내 미량금속 농도 사이에 일부 금속원소에 있어서 관련이 있음이 보고되었다(Hwang et al., 2001; Ahn et al., 2006).

따라서, 이 연구에서는 서해안에서 갯벌 패류 양식이 활발한 해역에서 퇴적물 내 퇴적 및 저서환경 특성을 이해하고 유기물 및 미량금속 오염도를 파악하고자 하였으며, 이를 위해 태안반도내 이원갯벌과 몽산갯벌을 연구해역으로 선정하여 양식장 및 양식장 주변 퇴적물의 입도(grain size), 장열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 미량금속 중 철(Fe), 망간(Mn), 아연(Zn), 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg) 농도를 조사하였다.

재료 및 방법

연구해역개요

연구해역인 이원 갯벌은 태안반도의 북쪽에 위치하고 있으며 1990년 11월부터 2000년 12월까지 진행된 간척사업에 의해 북서-남동방향으로 건설된 이원방조제(총 길이 약 3.0 km)에 의해 남서쪽 직선형의 해안선과 남동쪽 자연상태의 해안선으로 둘러싸여 있는 곳이다(Fig. 1A). 방조제가 축조되기 전에는 반폐쇄성 해안으로 만형 갯벌에 가까웠으나 방조제 축조로 인해 현재는 북쪽으로 외해와 연결된 개방형으로 바뀌었으며, 남동쪽 해안은 갯벌에서부터 육지쪽으로 포켓모양의 해변(beach)이 발달해 있다(Shin et al., 2004). 조석은 일조부등인 반일주조로 평균조차가 약 4.6 m (대조차 6.4 m, 소조차 2.8 m)로 대조차 환경이다. 조류는 시계방향으로 회전하며 낙조류는 서향, 창조류는 동향을 나타내며(Lee et al., 2004), 조류의 유속은 0.2-2.2 m/s 로서 창조류가 우세한 해역이다(Shin et al., 2004). 대부분의 참굴 양식장은 갯벌과 조하대 경계 부근에 위치하고 있어, 연구해역 북서쪽의 방조제 수문개방시 유입되는 일시적으로 유입되는 담수 혹은 연구해역 서쪽에 위치한 태안화력발전소에서 연소과정시 대기로 배출되는 오염물질의 직·간접적인 영향을 받고 있다.

몽산리 갯벌은 태안반도의 남쪽에 위치한 반폐쇄적인 내만인 남해포만의 입구쪽에 위치하고 있다(Fig. 1B). 남서쪽으로 개방된 넓은 만의 입구로 인해 외해로부터 유입되는 강한 조류나, 파랑, 폭풍의 영향을 직접적으로 받아 전체적으로 모래 함량이 우세한 퇴적상을 보인다(Choi et al., 2013). 갯벌 상부 육지쪽에 좁고 빈약한 자연적인 해변이나 암반해안으로 이루어져 있으며, 연구해역과 인접한 남동쪽의 일부 해안은 최근 리조트와 펜션 등과 같은 연안개발에 따른 해안도로의 건설로 인해 인공적인 제방이 만들어져 단조로운 해안선을 이루고 있다. 주변에 공단이나 하천을 통한 담수 유입이 없어 육상으로부터 오염물질의 영향은 거의 없다. 조석은 일조부등인 반일주조로 평균조차가 약 4.0 m 이상인 대조차 환경이며, 조류의 유속은 약 0.4-0.7 m/s의 범위이며 창조류는 북동 방향을, 낙조류는 남서방향의 흐름을 보인다(Lee and Park, 1991).

시료채취 및 분석

태안반도 주변 갯벌 참굴 양식장 퇴적물 내 유기물 및 미량금속의 오염특성을 파악하기 위하여 2012년 3월 21-22일 저조시 도보로 이동하면서 이원만 이원방조제(Iwon dyke) 앞 이원갯벌 내 14개 정점(양식장 12개 정점, 대조지역 2개 정점), 남면 남해포만 남쪽 몽산리갯벌 내 9개 정점(양식장 7개 정점, 대조지역 2개 정점)에서 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 각 정점에서 1회용 스푼으로 0-2 cm 사이의 표층 퇴적물 만을 채취하여 즉시 미리 산세척한 고밀도폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 냉장 및 냉동 상태로 실험실로 운반한 후 입도

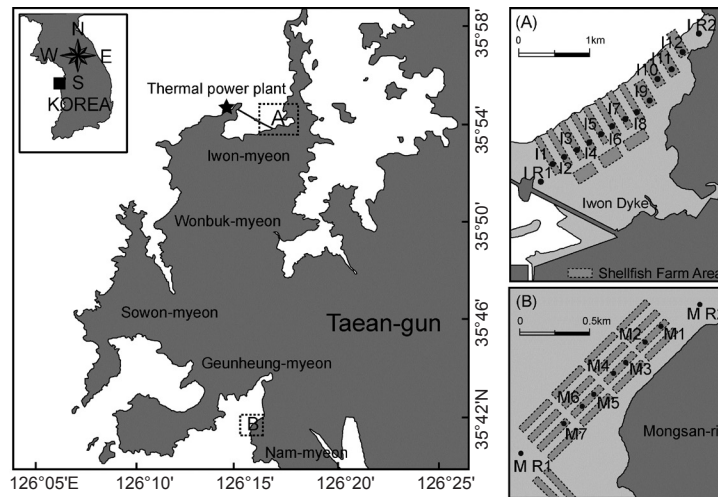


Fig. 1. The map showing the sampling sites of intertidal sediment in the study region (A: Iwon tidal flat, B: Mongsan tidal flat).

(grain size)와 유기물 특성을 나타내는 IL, COD, AVS 및 미량금속(Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, As)을 Hwang et al. (2011)이 이용한 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

입도는 과산화수소(H_2O_2)와 염산(HCl)을 이용하여 유기물과 탄산염($CaCO_3$)을 제거한 퇴적물을 4 ϕ (0.0625 mm) 표준체로 물체질하여 조립질과 세립질 입자로 나눈 다음, 조립질 입자는 건식체질법, 세립질 입자는 피펫팅법으로 크기별로 시료 무게를 구하여 자갈, 모래, 실트, 점토의 함량을 구하였다. 이후, 퇴적물의 특성을 나타내는 평균입도(mean grain size, M_z)는 Folk and Ward (1957)의 계산식에 의해 구하였으며, 퇴적상은 Folk (1968)의 방법에 따라 분류하였다. IL은 퇴적물의 회화 전후의 무게차이를 이용한 무게법으로, COD는 과망간산칼륨($KMnO_4$)법으로, AVS는 검지관법으로 분석하였다. 미량금속의 경우에는 수은(Hg)은 동결건조한 퇴적물을 직접 자동수은분석기(automatic mercury analyzer, Milestone, DMA-80)로 분석하였고, 그 외 미량금속은 혼합산($HNO_3:HF:HClO_4 = 2:2:1$)을 이용한 완전분해법으로 퇴적물을 녹인 후 2% 질산(HNO_3) 상태로 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e)로 측정하였다. 이때, 미량금속 분석 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 15-20개 시료당 캐나다 국가연구위원회(National Research Council Canada, NRCC) 산하 연구소에서 제공하는 인증표준물질(certified reference material)을 함께 분석하였다. 인증표준물질로는 Hg은 MESS-3 (marine sediment, NRCC)를, Hg을 제외한 미량금속은 PACS-2 (marine sediment, NRCC)를 이용하였으며, 각 미량금속의 평균 회수율은 Fe 116%, Cu 97%, Cd 90%, Pb 96%, Cr 98%, Mn 118%, As 110%, Zn 93%, Hg 99%였다. 한편, 본 연구에서 COD, AVS, 미량금속의 농도는 건중량(dry weight)을 기준으로 하며, 농도단위에 따로 표시하지 않았다.

퇴적물의 미량금속 오염평가

퇴적물 내 미량금속의 오염 평가방법은 환경 중 매질의 농도와 연구해역 혹은 오염되지 않은 해역에서의 농도를 이용하여 오염을 평가하는 지화학적 방법, 생물검정법(bioassay)을 이용하여 생물의 유해물질 이용도 및 영향을 평가하는 독성학적 기법, 환경 내 다양한 생물군의 생활사에 대해 오염의 영향 및 물리적 환경변화를 지속적으로 감시하여 오염의 영향을 구명하는 생태학적 기법 등 다양하다(Lee and Lee, 2002). 이 연구에서는 이 중에서 최근까지 국내외 많은 연구자들(Loska et al., 1997; Chen et al., 2007; Hyun et al., 2007; Feng et al., 2011; Hwang et al., 2013a, 2013b)에 의해 퇴적물 오염평가에 널리 사용되고 있는 오염기준(sediment quality guidelines; SQGs), 농축계수(enrichment factor, EF), 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo})인 3개의 지화학적 평가방법을 이용하여 갯벌 퇴적물의 미량금속 오염도를 살펴보았다.

오염기준(SQGs)을 이용한 퇴적물 오염평가는 연구해역의 갯벌 퇴적물 중 미량금속 농도와 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 권고하고 있는 퇴적물 오염기준 중 하위기준인 ERL (effect range low) 값(Buchman, 2008)과 우리나라의 해양수산부에서 최근 설정한 해양환경기준의 퇴적물 미량금속 오염기준 중 주의기준(threshold effects level, TEL) 값(<http://www.mof.go.kr>)을 비교하여 알아보았다. 또한, EF와 I_{geo} 는 암석이나 퇴적물 중 미량금속의 자연적인 배경농도를 이용한 미량금속의 인위적인 오염 특성을 파악하는 평가방법으로, 각각 다음의 방정식 (1), (2)로부터 계산하여 퇴적물의 미량금속 오염현황을 파악하였다. 이때, EF의 경우 일반적으로 지각 중 높은 함량을 보이고 오염의 영향이 적은 알루미늄(Al), Fe 등의 금속원소와의 비값을 이용하여 계산하는데(Hwang et al., 2011; Kim et al., 2012), 이 연

구에서는 퇴적물 중 Al을 분석하지 않아 Fe를 표준화원소로 사용하여 방정식 (1)로부터 EF 값을 계산하였다.

$$EF = \frac{(Me/Fe)_{\text{Observed}}}{(Me/Fe)_{\text{Crust}}} \quad (1)$$

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5} \quad (2)$$

여기서, $(Me/Fe)_{\text{observed}}$ 는 연구해역 퇴적물 중 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비, $(Me/Fe)_{\text{crust}}$ 는 지각물질 중 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비를 나타낸다. C_n 은 연구해역 내 퇴적물 중 미량금속의 농도, B_n 은 미량금속의 배경농도(background concentration)를 나타낸다. 일반적으로 지각물질 중 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비나 미량금속의 배경농도로는 연구해역 주변에 오염되지 않은 곳에서의 퇴적물 중 낮은 미량금속 농도를 이용하는 것이 가장 이상적이지만, 연안의 경우 오염여부를 판단하기가 쉽지 않고 외해의 경우 퇴적물의 조성이 연구해역과 달라 배경농도로 사용하는데 어려움이 있다. 따라서, 이러한 경우 전세계 지각물질 중의 미량금속의 평균농도를 이용하며(Feng et al., 2011), 이 연구에서는 우리나라를 포함한 동북아시아 주변의 퇴적물 오염평가지 국내외 연구자들(Chen et al., 2007; Zhang et al., 2009; Hwang and Kim, 2011; Zhu et al., 2011; Jeon et al., 2012)에 의해 널리 이용되어온 Taylor (1964)와 Taylor and McLennan (1995)이 보고한 전세계 연안 대륙붕 퇴적물 중 미량금속의 평균농도(Fe 3.5%, Mn 600 mg/kg, Zn 71 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Cu 25 mg/kg, As 1.5 mg/kg, Cd 0.098 mg/kg, Hg 0.08 mg/kg)를 지각물질 중 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비 및 배경농도로 사용하여 연구해역 내 퇴적물의 오염도를 평가하였다.

자료의 통계처리

이원갯벌과 몽산갯벌 내 참굴 양식장과 양식장이 아닌 해역과 두 갯벌 사이의 퇴적물 중 유기물 및 미량금속 농도 차이를 파악하기 위하여 연구해역 퇴적물 중 유기물과 미량금속 농도에 대한 통계분석을 실시하였다. 여기서, 성분 사이의 차이는 t 검정을 통해 확인하였고, 통계적 유의성은 유의계수(P) 0.05 이하로 하였으며, 통계분석은 SPSS 12.0 (SPSS Inc., USA)를 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

퇴적물의 조성

입도분석결과를 바탕으로 갯벌 참굴 양식장 주변 퇴적물의 조성을 살펴보면, 자갈, 모래, 실트+점토의 함량이 이원갯벌에서는 각각 0.0-0.4% (평균 $0.02 \pm 0.09\%$), 94.1-97.7% (평균 $96.4 \pm 0.9\%$), 2.3-5.6% (평균 $3.6 \pm 0.9\%$)범위였고, 몽산갯벌

에서는 각각 0.0%, 97.9-99.4% (평균 $98.6 \pm 0.5\%$), 0.3-1.1% (평균 $0.7 \pm 0.2\%$)범위였다(Table 1). 두 갯벌 모두 모래 함량이 90% 이상으로 모래가 우세한 환경이었으며, 양식장과 양식장이 아닌 해역에서의 퇴적물의 조성은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$). 전반적으로 이원갯벌이 몽산갯벌에 비해 약간 낮은 모래함량과 높은 실트+점토의 함량으로 특징지어졌는데($P < 0.05$), 이 같은 결과는 퇴적물의 Mz에서도 유사한 결과를 보인다. 퇴적물의 Mz는 이원갯벌에서는 3.0-3.5Ø (평균 $3.3 \pm 0.1Ø$)범위로 세립사(fine sand)와 극세립사(very fine sand) 사이에 해당하였고, 몽산갯벌에서는 2.5-3.0Ø (평균 $2.8 \pm 0.1Ø$)범위로 중립사(medium sand)와 세립사(fine sand) 사이에 해당하여, 이원갯벌이 몽산갯벌에 비해 상대적으로 약간 세립한 퇴적물로 이루어진 것으로 나타났다. 이는 이원갯벌이 조류나 해수의 흐름에 영향을 적게 받는 만의 안쪽해역에 위치하는 반면 몽산갯벌은 조류나 해수의 흐름의 영향을 직접적으로 받는 입구가 넓은 반폐쇄적인 만의 입구에 위치한다는 사실을 고려할 때, 지형적인 특징을 반영하고 있는 것으로 보인다. 자갈, 모래, 실트+점토 함량을 기초로 Folk (1968) 분류법에 따라 퇴적물 유형(sedimentary type)을 살펴본 결과, 이원갯벌의 경우 방조제 앞쪽의 I1 정점에서만 약역질사[slightly gravelly sand, (g)S]였고, 그외 정점에서는 모두 사(sand, S)였으며, 몽산갯벌에서는 모든 정점에서 사(S)였다.

유기물 함량

이원갯벌 퇴적물 중 IL과 COD는 각각 0.90-1.96% (평균 $1.27 \pm 0.30\%$), 0.33-1.15 mgO₂/g (평균 0.63 ± 0.26 mgO₂/g) 범위였다(Table 1). IL의 경우 방조제 앞쪽의 IR1 정점과 갯벌 중앙부의 I6 정점, COD의 경우 갯벌 중앙부의 I4-I6 정점을 제외하면 대부분 각각 약 1.2%와 약 0.5 mgO₂/g의 비슷한 농도를 나타내었고, 양식장과 양식장이 아닌 해역에서의 IL과 COD는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$, Fig. 2A). 몽산갯벌 퇴적물 중 IL과 COD는 각각 0.87-1.13% (평균 $1.02 \pm 0.09\%$), 0.10-0.70 mgO₂/g (평균 0.33 ± 0.19 mgO₂/g) 범위였다(Table 1). 이원갯벌과 마찬가지로 IL의 경우 갯벌 남서쪽의 MR1 정점, COD의 경우 북동쪽의 MR2 정점이나 중앙의 M5 정점을 제외하면 각각 약 1.0%와 약 0.3 mgO₂/g의 비슷한 농도를 나타내었고, 양식장과 양식장이 아닌 해역에 있어서도 IL과 COD는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$, Fig. 2B).

두 갯벌 사이에 퇴적물 중 IL과 COD 농도는 이원갯벌이 몽산갯벌보다 상대적으로 높았으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다($P < 0.05$, Fig. 3). 이는 이원갯벌이 몽산갯벌에 비해 상대적으로 세립한 퇴적물로 이루어져 있기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로, 생물기원 물질인 유기물은 세립질 퇴적물과 친화력이 크고(Horowitz, 1991), 우리나라 서해 연안 갯벌 퇴적물의 경우 조립질 퇴적물에 비해 세립질 퇴적물에서 높은 유기

Table 1. Results of sediment texture, mean grain size (Mz), and the concentrations of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), and trace metals (Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, and Hg) in intertidal sediments of the study regions.

Sample No	Sediment texture (%)				Mz (Ø)	IL (%)	COD (mgO ₂ /g)	AVS (mgS/g)	Fe (%)	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd (mg/kg)	Cr	As	Hg
	Gravel	Sand	Silt+Clay														
IR1	0.0	95.3	4.7		3.4	1.92	0.78	0.0	2.35	344	5.39	22.6	51.9	0.047	50.2	5.93	0.0044
IR2	0.0	97.4	2.6		3.3	1.20	0.45	0.0	2.50	413	5.05	21.8	61.3	0.027	54.1	6.16	0.0027
I1	0.3	94.1	5.6		3.2	1.21	0.86	0.0	1.63	304	3.69	15.8	36.7	0.045	33.5	4.04	0.0032
I2	0.0	95.7	4.3		3.2	1.26	0.54	0.0	1.55	276	3.39	16.0	34.2	0.032	31.5	3.56	0.0029
I3	0.0	96.2	3.9		3.2	1.13	0.46	0.0	1.58	262	4.17	15.0	34.0	0.036	29.7	4.24	0.0030
I4	0.0	97.6	2.4		3.0	1.20	1.15	0.0	1.73	361	4.12	15.9	42.5	0.044	34.4	4.84	0.0042
I5	0.0	96.1	3.9		3.3	1.25	1.08	0.0	1.44	222	3.36	14.6	29.7	0.019	27.9	3.97	0.0032
I6	0.0	96.4	3.6		3.2	1.96	0.82	0.0	1.63	280	3.36	16.5	34.4	0.049	32.0	4.21	0.0029
I7	0.0	96.3	3.7		3.3	1.20	0.58	0.0	1.75	323	3.63	17.5	40.1	0.028	34.6	4.23	0.0030
I8	0.0	96.9	3.1		3.4	1.16	0.37	0.0	1.54	253	3.23	15.2	34.4	0.033	31.2	3.89	0.0027
I9	0.0	96.2	3.8		3.2	1.12	0.43	0.0	1.77	323	3.55	16.3	40.0	0.036	35.4	3.95	0.0026
I10	0.0	96.3	3.7		3.5	1.16	0.48	0.0	2.12	282	4.44	22.8	48.5	0.028	44.1	4.39	0.0026
I11	0.0	96.9	3.1		3.2	0.90	0.51	0.0	2.43	427	5.06	22.7	65.5	0.033	52.0	5.16	0.0032
I12	0.0	97.7	2.3		3.5	1.12	0.33	0.0	1.19	142	2.37	11.2	25.5	0.015	24.1	1.26	0.0023
MR1	0.0	98.8	1.2		2.9	0.87	0.35	0.0	1.98	430	3.73	13.1	46.0	0.019	34.7	4.84	0.0018
MR2	0.0	98.7	1.3		2.7	1.10	0.70	0.0	1.59	288	3.72	14.2	30.8	0.034	26.4	4.70	0.0020
M1	0.0	98.0	2.0		2.8	1.13	0.36	0.0	1.49	267	3.68	11.8	30.5	0.021	25.2	4.37	0.0023
M2	0.0	98.1	1.9		2.8	1.11	0.21	0.0	1.47	262	3.58	12.6	28.8	0.012	27.1	4.74	0.0021
M3	0.0	98.3	1.7		2.8	1.03	0.15	0.0	1.68	325	4.21	12.6	36.7	0.022	28.2	4.69	0.0022
M4	0.0	99.4	0.6		2.5	0.92	0.22	0.0	1.62	270	3.80	12.4	30.6	0.026	27.3	4.49	0.0019
M5	0.0	99.1	0.9		2.7	0.98	0.10	0.0	1.63	275	3.41	13.1	32.1	0.020	28.9	4.50	0.0016
M6	0.0	98.8	1.2		2.9	1.00	0.49	0.0	1.50	292	3.53	12.4	33.8	0.014	24.8	3.80	0.0017
M7	0.0	98.7	1.3		3.0	1.03	0.42	0.0	1.63	292	3.74	13.2	33.7	0.017	28.5	5.07	0.0019

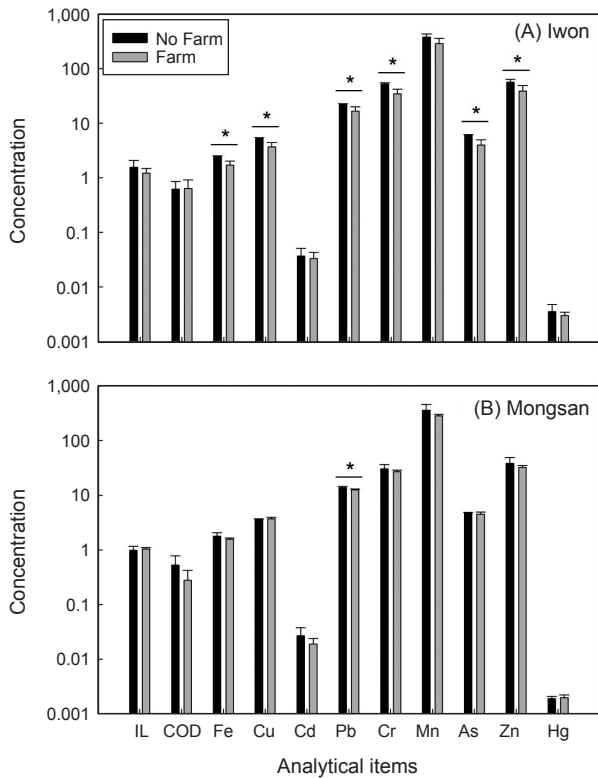


Fig. 2. Comparison of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and trace metals (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr, Mn, As, Zn, and Hg) in oyster farming area (farm) and reference area (no farm) around Iwon (A) and Mongsan (B) tidal flats. The concentration units of IL and Fe, COD, and trace metal are %, mgO₂/g, and mg/kg, respectively. The asterisk mark indicates the significant differences ($P < 0.05$).

물 함량 특성을 보이는 것으로 보고되었다(Hwang et al., 2010; Hwang and Koh, 2012; Hwang and Kim, 2013).

AVS는 이원갯벌과 몽산갯벌의 모든 정점에서 검출되지 않았다. 이러한 연구결과는 이전에 변산반도 갯벌 퇴적물에서도 보고된 바 있으며, Jung et al. (2010)은 연구해역이 투수성이 높은 사질로 이루어져 생분해성 유기물의 함량이 낮고 큰 조석차에 의한 썰물시 노출과 밀물시 재순환하는 해수의 영향으로 표층 퇴적물이 산화환경을 유지하고 있어 황산염 환원세균에 의한 황화물 생성이 이루어지지 않았기 때문이라고 보고하였다. 이 연구의 이원갯벌과 몽산갯벌 또한 변산반도 갯벌 퇴적물과 유사한 평균입도를 가진 사질 퇴적물로 이루어져 있고 개방형의 대조차 환경을 보인다. 따라서, 연구해역인 두 갯벌 퇴적물에서 AVS가 검출되지 않은 것은 높은 투수성을 가진 사질 퇴적물로 인한 낮은 유기물 함량과 조석에 따른 공기와 해수에 의한 퇴적물 내 산화환경의 조성으로 황산염 환원세균에 의해 황화물이 생성되지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 연구해역인 태안반도 참굴 양식장 주변 갯벌 퇴적물 중 IL, COD, AVS 농도를 이전에 서해연안 갯벌 퇴적물에서 보고된 연구결과와 비교해 보면(Table 2), 연구해역과 유사한 평균입도를 가진 개방형의 갯벌인 변산반도(Jung et al., 2010) 퇴적물과는 비슷하였고, 연구해역보다 높은 평균입도를 보이는 남서해의 영광~무안연안(Hwang et al., 2010), 목포~해남연안(Hwang et al., 2013b), 전남 서부 도서해역(Hwang et al., 2011; Hwang and Kim, 2011) 및 함평만(Hwang and Koh, 2012) 등 반폐쇄적인 해역의 갯벌 퇴적물보다는 낮았다. 일반적으로 유기물은 퇴적물의 입도와 밀접한 관련이 있으며 세립질 퇴적물일수록 유기물 함량이 높는데(Hwang et al., 2010), 연구해역의 경우 다른 해역에 비해 투수성이 높은 조립질의 모래 퇴적물로 이루어져 유기물 함량이 낮은 것으로 생각된다.

미량금속 함량

이원갯벌 퇴적물 중 미량금속은 Fe 1.19-2.50% (평균 $1.80 \pm 0.40\%$), Cu 2.37-5.39 mg/kg (평균 3.92 ± 0.84 mg/kg), Cd 0.015-0.049 mg/kg (평균 0.034 ± 0.010 mg/kg), Pb 11.2-22.8 mg/kg (평균 17.4 ± 3.6 mg/kg), Cr 24.1-54.1 mg/kg (평균 36.8 ± 9.4 mg/kg), Mn 142-427 mg/kg (평균 301 ± 74 mg/kg), As 1.26-6.16 mg/kg (평균 4.27 ± 1.16 mg/kg), Zn 25.5-65.5 mg/kg (평균 41.3 ± 11.6 mg/kg), Hg 0.0023-0.0044 mg/kg (평균 0.0031 ± 0.0006 mg/kg) 범위였고(Table 1), 평균농도를 기준으로 Fe > Mn > Zn > Cr > Pb > As > Cu > Cd > Hg 순으로 높은 농도를 나타내었다. 각 정점간에 유사한 평균입도를 가짐에도 불구하고 Hg을 제외한 모든 미량금속들이 정점간에 2-3 배의 농도차이를 보였다. 특히, Fe, Cu, Pb, Cr, As, Zn의 농도는 통계적으로 유의한 차이를 보이며($P < 0.05$, Fig. 2A) 양식장 퇴적물이 양식장이 아닌 주변 퇴적물보다 낮았다. 이는 양식장의 굴이 파도나 조석에 의해 부유된 저서미세조류(microphytobenthos)와 함께 섭취한 퇴적물로부터 체내에서 미량금속을 흡수한 후 배설한 낮은 농도의 퇴적물이 재퇴적(redeposition)되었거나 혹은 양식장 내 저서생물에 의한 교란(bioturbation)으로 낮은 농도의 저층 퇴적물이 재분포되었기 때문인 것으로 생각된다.

몽산갯벌 퇴적물 중 미량금속은 Fe 1.47-1.98% (평균 $1.62 \pm 0.15\%$), Cu 3.41-4.21 mg/kg (평균 3.71 ± 0.22 mg/kg), Cd 0.012-0.034 mg/kg (평균 0.021 ± 0.007 mg/kg), Pb 11.8-14.2 mg/kg (평균 12.8 ± 0.7 mg/kg), Cr 24.8-34.7 mg/kg (평균 27.9 ± 2.9 mg/kg), Mn 262-430 mg/kg (평균 300 ± 52 mg/kg), As 3.80-5.07 mg/kg (평균 4.58 ± 0.36 mg/kg), Zn 28.8-46.0 mg/kg (평균 33.7 ± 5.2 mg/kg), Hg 0.0016-0.0023 mg/kg (평균 0.0020 ± 0.0002 mg/kg) 범위였고(Table 1), 이원갯벌과 마찬가지로 평균농도를 기준으로 Fe > Mn > Zn > Cr > Pb > As > Cu > Cd > Hg 순으로 높은 농도를 나타내었다. 하지만, 이원갯벌과 달리 정점간의 농도차이를 보이지 않았으며, Pb

을 제외한 거의 모든 미량금속이 양식장과 양식장이 아닌 해역 사이에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P>0.05$, Fig. 2B). 이는 이원갯벌에 비해 몽산갯벌은 최근에 형성된 양식해역이고 만의 안쪽에 위치한 이원갯벌보다 개방된 해역에 위치하여 넓은 해역에 걸쳐 강한 조류나 해수의 흐름에 의한 재부유(resuspension) 및 재동(reworking)의 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 생각된다.

두 갯벌 사이에 퇴적물 중 미량금속 농도는 Cd, Pb, Cr, Zn, Hg의 경우 통계적으로 유의한 차이를 보이며($P<0.05$, Fig. 3) 이원갯벌이 몽산갯벌보다 높았다. 일반적으로 연안역에서 퇴적물 중 미량금속 농도는 주로 퇴적물의 입도와 유기물 함량에 크게 의존하며 유기물 함량이 높은 세립질 퇴적물에서 높다(Cho et al., 2001; Shin et al., 2002; Hwang et al., 2010). 앞서 퇴적물의 조성 및 유기물 함량 부분에서 언급하였듯이 비록 두 갯벌 모두 사 퇴적물로 이루어져 있지만 이원갯벌이 몽산갯벌에 비해 상대적으로 높은 유기물 함량을 가진 세립질 퇴적물로 이루어져 있어 이러한 농도 차이는 퇴적물의 조성 및 유기물 농도와 관련이 있을 것으로 생각된다. 하지만, 이원갯벌 서쪽에는 비정기적으로 육상의 담수를 방류하는 이원방조제와 충청남도와 수도권지역의 전기공급을 위한 태안화력발전소가 위치하고 있어 인근 육상으로부터 오염물질의 유입에 의한 영향 또한 배제할 수 없다. 따라서, 추후 방조제 안쪽의 담수를 통한 유입량, 대기를 통한 침적량 등 같이 이원갯벌 주변 미량금속 공급량에 대한 종합적인 조사를 통하여 몽산갯벌에 비해 이원갯벌에서 미량금속 농도가 높은 원인에 대하여 명확하게 밝힐 필요가 있다.

한편, 연구해역의 갯벌 참굴 양식장 주변 퇴적물 중 미량금속 농도를 이전에 보고된 서해안의 갯벌 퇴적물 중 미량금속 평균 농도와 비교해 보면(Table 2), 연구해역과 비슷한 평균입도를

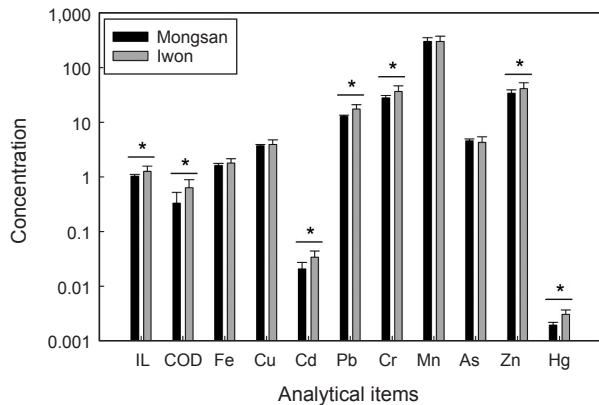


Fig. 3. Comparisons of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and trace metals (Fe, Cu, Cd, Pb, Cr, Mn, As, Zn, and Hg) in surface sediments of Iwon and Mongsan tidal flats. The concentration units of IL and Fe, COD, and trace metal are %, mgO₂/g, and mg/kg, respectively. The asterisk mark indicates the significant differences ($P<0.05$).

Table 2. The mean grain size (Mz) and the average of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), and trace metals (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, As, and Hg) in intertidal sediments from the western coast of Korea

Region	Mz (Ø)	IL (%)	COD (mgO ₂ /g)	AVS (mgS/g)	Metals (mg/kg)							Reference	
					Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn		As
Saemanguem (inner part)	-	2.2	3.5	0.75	2.7	21	26	85	-	47	610	-	Kim et al. (2003)
Byeonsan peninsula	2.8	1.4	3.9	ND ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	Jung et al. (2010)
Julpo bay	7.1	-	-	-	2.8	15	19	84	0.10	52	494	11.3	Kim et al. (2008)
Yeonggwang-Muan coast	5.5	2.9	8.5	ND	2.3	10	25	70	0.05	51	448	5.6	Hwang et al. (2010)
Hampyeong Bay	5.6	4.5	8.1	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	Hwang and Koh (2012)
Aphae island	6.9	3.9	7.4	0.04	2.8	13	22	84	0.06	63	476	7.1	Hwang et al. (2011)
Mokpo-Wando coast	3.2	-	-	-	2.6	22	33	66	-	51	600	-	Shin et al. (2002)
Coastal islands of Shinan	5.3	3.2	5.8	0.05	2.2	11	24	74	0.06	58	416	5.1	Hwang and Kim (2011)
Mokpo-Haenam coast	6.7	5.4	11.9	0.03	3.5	13	24	74	0.06	58	669	5.8	Hwang et al. (2013b)
Taeon coast (Iwon and Mongsan)	3.1	1.2	0.5	ND	1.7	4	16	38	0.03	33	301	4.4	This study

¹ND, Not detected.

가진 목포~완도 연안(Shin et al., 2002) 갯벌 상부 퇴적물 뿐만 아니라 연구해역보다 높은 평균입도를 보이는 서해 중부의 반폐쇄적인 내만인 줄포만(Kim et al., 2008)과 인공적인 방조제에 의해 반폐쇄적인 환경을 보이는 새만금 안쪽(Kim et al., 2003), 그리고 남서해의 영광~무안연안(Hwang et al., 2010), 목포~해남연안(Hwang et al., 2013b), 그리고 전남 서부 도서 해역(Hwang et al., 2011; Hwang and Kim, 2011)의 갯벌 퇴적물보다 약 1/2 이하의 농도로 매우 낮았다. 일반적으로 연안 퇴적물 중 미량금속의 농도는 퇴적물의 입도와 유기물 함량과 밀접한 관련이 있으며, 서해안의 여러 갯벌 퇴적물(Kim et al., 2008; Hwang and Kim, 2011; Hwang et al., 2013b)에서 퇴적물 중 미량금속 농도가 입도나 유기물 함량 사이에 좋은 정의 상관성을 보인다고 보고되었다. 따라서, 연구해역에서 낮은 미량금속 농도는 조립질의 사질 퇴적물로 이루어져 있어 다른 연구해역보다 입도와 유기물 함량이 낮기 때문인 것으로 생각된다.

유기물 및 미량금속 오염현황

일반적으로 연안역에서 퇴적물의 유기물 오염 및 건강도를 평가하는 지표로는 이 연구에서 측정된 IL, COD, AVS를 비롯하여 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN), 총인(total phosphorus, TP) 등 다양한 항목이 있다. 하지만, 현재 우리나라의 해양 퇴적물 오염을 평가하는데 기초가 되는 해양환경 기준에는 이들 항목에 대한 기준이 설정되어 있지 않다. 따라서, 이 연구에서는 이전에 우리나라의 많은 연구자들(Yoon, 2003; Hyun et al., 2003; Noh et al., 2006; Hwang et al., 2010; Hwang and Koh, 2012)이 이용해 왔던 일본의 퇴적물 중 COD와 AVS 기준을 이용하여 연구해역 내 퇴적물의 유기물 오염 및 건강도를 평가하였다.

일본에서는 수산생물의 보호를 위하여 저서생물에 영향을 주는 기준농도로서 COD는 20 mgO₂/g, AVS는 0.2 mgS/g로 설정해 놓고 있다(Yokoyama, 2000). 이 기준농도를 연구해역의 갯벌 퇴적물 중 COD와 AVS농도와 비교하여 유기물 오염현황을 살펴본 결과, 이원갯벌과 몽산갯벌 모두 이들 두 항목에 대하여 일본의 수산환경 퇴적물 오염기준보다 약 20배 정도 낮았다. 따라서, 이원갯벌과 몽산갯벌 참굴 양식장 주변 퇴적물이 유기물에 대하여 오염되지 않았으며, 퇴적물 중 유기물이 저서생물이 서식하는데 나쁜 영향을 주지 않는 것으로 보인다.

퇴적물 중 미량금속의 오염평가는 오염기준(sediment quality guidelines; SQGs), 농축계수(enrichment factor, EF), 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo})를 이용하여 살펴보았다. 먼저, SQGs을 이용한 퇴적물 오염평가는 지금까지 우리나라 연안에서 가장 오염된 것으로 알려져 있는 마산항 퇴적물 중 미량금속 농도가 미국 NOAA와 우리나라의 해양환경 퇴적물 오염기준 중 상위기준인 ERM (effect range median)과 PEL (probable effects level)을 초과하지 않는 사실(Hwang et al., 2006)에 기초하여 하위기준인 ERL과 TEL 값만을 비교하여 알아보았

며, 이들 값을 초과하는 퇴적물 중 미량금속 농도는 저서생물에 어느 정도 부정적인 영향을 줄 수 있음을 의미한다. ERL은 미국 NOAA에서 미국 연안 퇴적물 오염평가에 널리 이용하고 있는 퇴적물 기준으로서, 지각물질 중에 풍부한 Al, Fe 등을 제외한 인체에 유해한 영향을 줄 수 있는 총 9개 원소(Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Ni, Hg, Ag)에 대해 기준이 설정되어져 있다. 이 연구에서 측정하지 않은 니켈(Ni)과 은(Ag)을 제외한 퇴적물에 대한 ERL값은 Cu 34 mg/kg, Pb 46.7 mg/kg, Zn 150 mg/kg, Cd 1.2 mg/kg, Cr 81 mg/kg, As 8.2 mg/kg, Hg 0.15 mg/kg 이다. 이 기준 값들을 연구해역 내 퇴적물 중 미량금속 농도와 비교해 보면, 이원갯벌과 몽산갯벌 모두 모든 정점에서 ERL보다 낮았다(Fig. 4). 이러한 결과는 우리나라의 퇴적물 오염평가 기준과의 비교에서도 유사한 결과를 나타내었다. 최근, 우리나라의 해양수산부(고시 제2013-186호)에서는 NOAA의 퇴적물 오염평가 기준 중 Ag을 제외한 8개 원소에 대하여 기준을 설정하였으며, 이 연구에서 측정하지 않은 Ni을 제외한 각 원소의 TEL 값은 Cu 20.6 mg/kg, Pb 44.0 mg/kg, Zn 68.4 mg/kg, Cd 0.75 mg/kg, Cr 116 mg/kg, As 14.5 mg/kg, Hg 0.11 mg/kg 이다. 이 중 입도에 따라 농도가 달라질 수 있는 Cu와 Zn에 있어서는 퇴적물 중 Li를 측정하여 입도의 영향을 보정한 농도로서 비교할 것을 권고하고 있다. 하지만, 이 연구가 우리나라의 퇴적물 기준을 설정하기 이전에 이루어져 Li의 분석결과가 없기 때문에 현재로서는 Cu와 Zn에 대한 오염평가는 불가능하다. 따라서, 이 연구에서는 이들 미량금속을 제외한 Pb, Cd, Cr, As, Hg에 대해서만 오염평가를 실시하였다. 그 결과 이원갯벌과 몽산갯벌 모두 모든 정점에서 TEL보다 낮았다(Fig. 4)

또 다른 오염평가방법인 EF는 지각물질 중 보존적 성질을 가진 Al, Fe, Li 등과 같은 표준화 원소를 이용하여 지각중의 각 원소 사이의 농도비와 연구해역에서의 미량금속의 농도비로부터 계산된 미량금속의 농축정도에 따라 오염을 평가하는 방법이다. 일반적으로, 1.5 값을 기준으로 이보다 낮으면 오염되지 않은 자연적인 상태를, 이보다 큰 경우에는 외부의 인위적인 요인에 의한 오염으로 평가한다(Zhang and Liu, 2002; Hyun et al., 2007). 하지만, 이 기준은 오염여부만을 판단할 뿐 어느 정도 오염되었는지 보다 자세한 오염평가에는 한계가 있다. 최근, Birth (2003)는 이들 EF 값을 7 단계로 세분화하여 퇴적물 오염을 평가하였으며, 그 세분화된 기준과 함께 방정식 (1)로부터 계산된 연구해역 내 갯벌 퇴적물에 대한 EF 계산 결과를 Table 3에 나타내었다. Cu와 Hg은 이원갯벌과 몽산갯벌의 모든 정점에서 EF 값이 1 보다 낮아 오염이 되지 않은 상태(no enrichment)를 나타내었고, Cd은 이원갯벌의 일부 정점들(I1과 I6)을 제외한 모든 정점에서, 몽산갯벌은 모든 정점에서 EF 값이 1 보다 낮아 오염이 되지 않은 상태(no enrichment)를 나타내었다. Mn은 EF 값이 0.7-1.3 범위로, 이원갯벌은 양식장 내 일부 정점들(I1, I2, I4, I6, I7, I9, I11)을 제외하면 대부분의 정점에서 1 보다 작은 EF 값을 보여 전체적으로 오염되지 않은 상태(no enrichment)

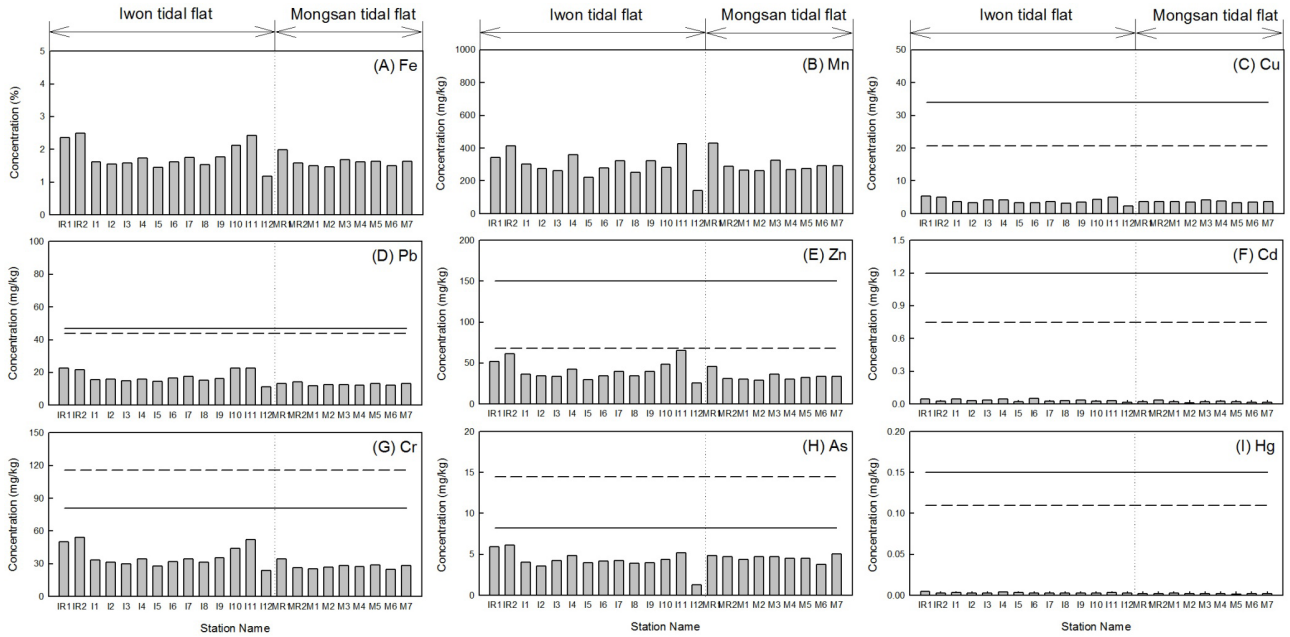


Fig. 4. The concentrations of trace metals (Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, and Hg) with each station in intertidal sediments of the study regions. The solid and dotted lines represent the values of effect range low (ERL) in United States and threshold effects level (TEL) in Korea as the sediment quality guidelines for evaluating the trace metal pollution in sediment, respectively.

를 보였고, 몽산갯벌은 양식장 내 일부 정점들(M4와 M5)을 제외하면 거의 모든 정점에서 EF 값이 1보다 높아 약간 오염된 상태(minor enrichment)를 나타내었다. Zn은 이원갯벌은 모든 정점에서, 몽산갯벌의 일부 정점들(MR2, M2, M4, M5)을 제외한 모든 정점에서 EF값이 1.0-1.5사이를, Pb와 Cr은 이원갯벌과 몽산갯벌의 모든 정점에서 EF 값이 각각 1.1-1.9와 1.6-2.2 사이를 보여 약간 오염된 상태(minor enrichment)를 나타내었다. 그러나, As의 경우 이원갯벌의 경우 갯벌 북동쪽의 일부 정점들(I10-I12)을 제외하면 EF값 5.1-6.6 사이였으며, 몽산갯벌의 경우 모든 정점에서 EF값이 5.6-7.6 사이를 보여 적당히 심한 오염상태(moderately severe enrichment)를 나타내었다.

I_{geo} 는 퇴적물에 함유된 미량금속의 농도를 오염되지 않은 미량금속의 농도로서 정량화하여 평가하는 방법으로, Müller (1979)에 의해 처음 제시되었으며, EF와 마찬가지로 총 7단계로 나누어 오염도를 평가한다(Müller, 1981). 그 세분화된 기준과 함께 방정식 (2)로부터 계산된 연구해역 내 갯벌 퇴적물에 대한 I_{geo} 계산 결과를 Table 4에 나타내었다. Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg은 이원갯벌과 몽산갯벌의 모든 정점에서, Cr은 이원갯벌의 일부 정점들(IR2와 I11)을 제외한 모든 정점과 몽산갯벌의 모든 정점에서 음의 값을 나타내어 I_{geo} class 0에 해당하였고 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)인 것으로 나타났다. 그러나, As는 EF의 결과와 유사하게 이원갯벌은 I12정

Table 3. Classification of enrichment factor (Birth, 2003) and the number of EF for the ratios of trace metals relative to Fe in surface sediment of Iwon and Mongsan tidal flats and in earth crust reported by Taylor (1964) and Taylor and McLennan (1995)

EF range	Designation of sediment quality	Number of EF							
		Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
> 50	Extremely severe enrichment	0	0	0	0	0	0	0	0
25-50	Very severe enrichment	0	0	0	0	0	0	0	0
10-25	Severe enrichment	0	0	0	0	0	0	0	0
5-10	Moderately severe enrichment	0	0	0	0	0	0	20	0
3-5	Moderate enrichment	0	0	0	0	0	0	2	0
1-3	Minor enrichment	14	0	23	19	2	23	1	0
< 1	No enrichment	9	23	0	4	21	0	0	23
Average of EF		1.01	0.31	1.58	1.08	0.60	1.91	5.94	0.07

Table 4. Classification of geoaccumulation index (Müller, 1981) and the number of I_{geo} for the metal concentrations in intertidal sediment of Iwon and Mongsan tidal flats

I_{geo} range	I_{geo} class	Designation of sediment quality	Number of I_{geo}								
			Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
> 5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	2	Moderately polluted	0	0	0	0	0	0	0	13	0
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	0	0	0	0	0	0	2	9	0
< 0	0	Practically unpolluted	23	23	23	23	23	23	19	1	23

점에서는 I_{geo} class 0를, I4, I10, I11을 제외한 모든 양식장 정점에서 0.7-0.9로서 I_{geo} class 1, 그 외 정점들에서는 1.0-1.5 사이를 나타내어 I_{geo} class 2에 해당하였고, 전반적으로 오염되지 않은 수준과 약간 오염된 수준(moderately polluted)의 중간단계인 것으로 나타났으며, 몽산갯벌은 M6 정점을 제외한 모든 정점에서 1.0-1.2 사이를 나타내어 I_{geo} class 2에 해당하였고, 전체적으로 약간 오염된 수준인 것으로 나타났다.

이상의 태안반도 주변 갯벌 참굴 양식장 퇴적물 중 유기물 및 미량금속 오염평가 결과를 종합해 보면, 이원갯벌과 몽산갯벌 퇴적물은 As를 제외한 모든 미량금속(Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Hg)과 유기물에 대하여 오염되지 않은 것으로 나타났다. As에 있어서도 다른 미량금속에 비해 상대적으로 약간 오염된 상태를 보였으나 남해안의 수하식 굴양식이 활발한 가막만과 같은 반폐쇄적인 내만 갯벌(Hwang et al., 2013a)보다는 오염 정도가 낮고 저서생물에 큰 영향을 줄 만큼 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다. 하지만, 이원갯벌의 경우 주변에 방조제 및 화력발전소를 통한 육상으로부터 유기물 및 미량금속의 유입 가능성이 매우 높은 만큼 갯벌 생태계 보전 및 안전한 수산물 공급측면에서 갯벌 참굴 양식장의 어장환경 및 양식생물에 대한 모니터링을 통해 유기물 및 미량금속 오염에 대한 지속적인 관리가 필요하다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료분석에 도움을 준 국립수산과학원 어장환경과 연구원들에게 감사사를 드립니다. 이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업(RP-2014-ME-038)의 지원에 의해 연구되었습니다.

References

Ahn IY, Ji J, Choi H, Pyo SH, Park H and Choi JW. 2006. Spatial variations of heavy metal accumulation in Manila clam *Ruditapes philippinarum* from some selected intertidal flat of Korea. *Ocean Polar Res* 28, 215-224.

Birth G. 2003. A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments using sediments. In: *Proceedings of Coastal GIS 2003*. Woodcoffe CD and Fumess RA, eds. Wollongong University Papers in Center for Maritime Policy, Australia, 14.

Buchman MF. 2008. NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of response and restoration division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 34.

Chen CW, Kao CM, Chen CF and Dong CD. 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere* 66, 1431-1440.

Choi YS, Park KJ, Yoon SP, Chung SO, An KH and Song JH. 2013. The geochemical characteristics and environmental factors on the marine shellfish farm in Namhae-po tidal flat of Taean. *Korean J Malacol* 29, 51-63.

Feng H, Jiang H, Gao W, Weinstein MP, Zhang Q, Zhang W, Yu L, Yuan D and Tao J. 2011. Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China. *J Environ Manage* 92, 1185-1197.

Folk RL. 1968. *Petrology of sedimentary rock*, Hemphill Publishing Co., Austin TX, U.S.A., pp. 170.

Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J Sed Petol* 27, 3-26.

Horowitz AJ. 1991. *A primer on sediment trace element chemistry*. 2nd Ed Lewis Publishers Inc., Chelsea MI, USA, 136.

Hur YB, Min KS, Kim TE, Lee SJ and Hur SB. 2008. Larvae growth and biochemical composition change of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, larvae during artificial seed production. *J Aquacul* 21, 203-212.

Hwang DW, Jin HG, Kim SS, Kim JD, Park JS and Kim SG. 2006. Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan harbor, Korea. *J Kor Fish Soc* 39, 106-117.

Hwang DW and Kim PJ. 2013. Evaluation of organic matter and trace metal contaminations of intertidal sediments from coastal islands in the southern region of Jelloanam Province. *Kor J Fish Aquat Sci* 46, 626-637. <http://dx.doi.org/10.5657/>

- KFAS.2013.0626.
- Hwang DW, Kim PJ, Jeon SB, and Koh BS. 2013a. Geochemical characteristics of intertidal sediment in the semi-enclosed bays of the southern region of Jelloanam Province. *Kor J Fish Aquat Sci* 46, 638-648. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0638>.
- Hwang DW, Kim PJ, JungRH, and Yoon SP. 2013b. Distributions of organic matter and trace metals in intertidal surface sediment from the Mokpo-Haenam coast. *Kor J Fish Aquat Sci* 46, 454-466. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0454>.
- Hwang DW and Kim SG. 2011. Evaluation of heavy metal contamination in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jellanam province using geochemical assessment techniques. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 772-784.
- Hwang DW and Koh BS. 2012. Sedimentary and benthic environment characteristics in macroalgal habitats of the intertidal zone in Hampyeong Bay. *Kor J Fish Aquat Sci* 45, 694-703.
- Hwang DW, Park SE, Kim PJ, Koh BS, and Choi HG. 2011. Assessment of the pollution levels of organic matter and metallic elements in the intertidal surface sediments of Aphae Island. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 759-771.
- Hwang DW, Ryu SO, Kim SG, Choi OI, Kim SS and Koh BS. 2010. Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 146-158.
- Hwang GS, Shin HS, Kim K, Yeo SK and Kim JS. 2001. Concentration and distribution of heavy metals in sediment and bivalves (*Solen Strictus* Gould) from tidal flats along the mid-western coast, Korea. *Kor J Env Hlth Soc* 27, 25-34.
- Hyun S, Lee CH, Lee T and Choi JW. 2007. Anthropogenic contributions to heavy metal distributions in the surface sediments of Masan Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* 54, 1031-1071.
- Hyun S, Lee T, Choi JS, Choi DL and Woo HJ. 2003. Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea. *The Sea-J Kor Soc Oceanogr* 8, 380-391.
- Jeon SB, Kim PJ, Kim SS, Ju JS, Lee YH, Jang DS, Lee JU and Park SY. 2012. Characteristics of spatial distribution of geochemical components in the surface sediments of the Deukryang Bay. *J Kor Soc Environ Anal* 15, 203-214.
- Jung RH, Hwang DW, Kim YG, Koh BS, Song JH and Choi HG. 2010. Temporal variations in the sedimentation rate and benthic environment of intertidal surface sediments around Byeonsan Peninsula, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 723-734.
- Kim JG, You SJ and Ahn WS. 2008. Evaluation of characteristics of particle composition and pollution of heavy metals for tidal flat sediments in the Julpo Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 14, 247-256.
- Kim JG, You SJ, Cho EI and Ahn WS. 2003. Distribution characteristics of heavy metals for tidal flat sediments in the Saemankeum area. *J Kor Fish Soc* 36, 55-61.
- Kim PJ, Shon SG, Park SY, Kim SS, Jang SJ, Jeon SB and Ju JS. 2012. Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak Bay. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 18, 67-83.
- Kimbrough KL, Johnson WE, Lauenstein GG, Christensen JD and Apeti DA. 2008. An assessment of two decades of contaminant monitoring in the nation's coastal zone. Silver Spring, MD. NOAA technical memorandum NOS NCCOS 74, 105.
- Lee BG and Lee JS. 2002. The foreign and domestic trends on the evaluation and regulation of heavy metals in the coastal oceans. In: *Proceedings of the Autumn meeting, 2002 of the Korean Society of Oceanography*. Oh IS and Park GR, eds. Han Yang University, Seoul, Korea, 141-176.
- Lee DS, Kim YS, Jeong SY, Kang CK and Lee WJ. 2008. Environmental characteristics and distributions of marine bacteria in the surface sediments of Kamak Bay in winter and summer. *J Environ Sci* 17, 755-765.
- Lee IS and Kim EJ. 2000. Distribution of heavy metals in sediment, seawater, and oyster (*Crassostrea gigas*) around Jinhae Bay. *Korean J Ecol* 23, 59-64.
- Lee JH, Yu OH, Lee HG and Park JY. 2004. Effect of environmental variables on the inter- and subtidal macrobenthic communities in the Iwon dike area. *J Kor Fish Soc* 37, 295-306.
- Lee SD and Park SC. 1991. Sedimentation pattern in a macrotidal bay (Namhaepo Bay), west coast of Korea. *J Oceanol Soc Kor* 26, 332-339.
- Lim HJ, Back SH, Lim MS, Choi EH and Kim SK. 2012. Regional variations in Pacific Oyster, *Crassostrea gigas*, growth and the number of larvae occurrence and spat settlement along the west coast, Korea. *Korean J Malacol* 28, 259-267.
- Loska K, Cebula J, Pelczar J, Wiechula D and Kwapulinski J. 1997. Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Bybnik water reservoir in Poland. *Water Air Soil Pollut* 93, 347-365.
- Müller G. 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Verderyngen Seit. *Umschau* 24, 778-783.
- Müller G. 1981. Die schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse Eine Bestandasufnahme. *Chemiker Zeitung* 105, 157-164.
- Noh IH, Yoon YH, Kim DI and Park JS. 2006. The Spatio-temporal distribution of organic matter on the surface sediment and its orgin in Gamak Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engin* 9, 1-13.
- Shin DH, Kum BC, Park EY, Lee HI and Oh JK. 2004. Seasonal sedimentary characteristics and depositional environments after the construction of seawall on the Iwon macrotidal flat. *J Korean Earth Sci Soc* 25, 615-628.
- Shin SE, Kang SB, Koh YK, Park BY, Youn ST, Kim JY and

- Oh KH. 2002. Sedimentary facies and geochemical characteristics of upper intertidal zone, southwestern coast, Korea. *J Korean Earth Sci Soc* 23, 722-735.
- Shim KB, Ha KS, Yoo HD, Kim JH and Lee TS. 2009. Evaluation of the bacteriological safety for the shellfish growing area in Jaranman-Saryangdo area, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 42, 442-448.
- Taylor SR. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochem Cosmochim Acta* 28, 1273-1285.
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophys* 33, 241-265.
- Woo HY, Lim JH, Lee JK, Lee JH, Han KS and Lee TY. 2013. Characterization and estimation of heavy metal contents of Tongyong marine products breeding ground sediments. *J Kor Solid Waste Engin Soc* 30, 213-219.
- Yang HS, Kim SS and Kim GB. 1995. Pollution of heavy metals and sedimentation rates in sediment cores from the Chinhae Bay, Korea. *J Korean Environ Sci Soc* 4, 489-500.
- Yokoyama H. 2000. Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal area – a new policy and its potential problems. *Bul Natl Res Inst Aquacult* 29, 123-134.
- Yoon YH. 2003. Spatio-temporal distribution of organic matters in surface sediments and its origin in Deukryang Bay, Korea. *J Environ Sci* 12, 735-744.
- Zhang J and Liu CL. 2002. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar Coast Shelf Sci* 54, 1051-1070.
- Zhang W, Feng H, Chang J, Qu J, Xie H and Yu L. 2009. Heavy metal contamination in surface sediment of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes. *Environ Pollut* 157, 1533-1543.
- Zhu L, Xu J, Wang F and Lee B. 2011. An assessment of selected heavy metal contamination in the surface sediments from the South China Sea before 1998. *J Geochem Explor* 108, 1-14.