목포-해남 연안 조간대 퇴적물중 유기물 및 미량금속 분포 특성

황동운* · 김평중¹ · 정래홍 · 윤상필²

국립수산과학원 어장환경과, ¹남서해수산연구소, ²갯벌연구소

Distributions of Organic Matter and Trace Metals in Intertidal Surface Sediment from the Mokpo-Haenam Coast

Dong-Woon Hwang*, Pyoung-Joong Kim¹, Rae-Hong Jung and Sang-Pil Yoon²

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

¹ Southwest Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Yeosu 556-823, Korea

² Coastal Wetland Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Gusan 573-882, Korea

To evaluate the organic matter and trace metal pollution in intertidal sediment of the coastal zone, various geochemical parameters (grain size, ignition loss [IL], chemical oxygen demand [COD], acid volatile sulfide [AVS], and metals [Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, and As]) were measured for the intertidal surface sediment of the mainland and islands between Mokpo and Haenam in the southwestern coast of Korea. The surface sediments consist mainly of finer sediments, such as mud and silt. The concentrations of IL, COD, and trace metals in intertidal sediment were relatively high in the shoreline of the mainland than in that of islands and those in some stations exceeded the sediment quality guidelines (SQGs). Moreover, the concentrations of IL, COD, and trace metals (except As) in sediment showed relatively good positive correlations with mean grain size, indicating that the concentrations of organic matter and trace metals in intertidal sediment of the study region are dependent on grain size of sediment. Pollution evaluation for trace metals using geochemical assessment techniques, such as enrichment factor, geoaccumulation index, and SQGs, suggested that the intertidal sediments in the study region show light pollution with Cr and moderate pollution with As. More extensive interdisciplinary studies are required to determine the potential causes of As pollution in intertidal sediment.

Key words: Intertidal sediment, Organic matter, Trace metal, Pollution, Mokpo, Haenam

서론

전세계적으로 연안해역은 1960년대 이후 임해 공업단지 및 도시의 조성, 해안도로 및 유원지 등 각종 편의시설의 확충 등으로 인간활동이 증가하면서 인위적인 오염이 가중되고 있다. 이러한 산업화와 도시화 과정에서 발생하는 미량금속(trace metal)은 대기나 강물, 하천, 지하수 등을 통해 해양으로 유입되어 해양환경을 오염시킬 뿐만 아니라 생태계 먹이사슬을 통해 유용수생물에 축적되어 이를 섭취하는 인간의 건강을 위협하기 때문에 해양환경 평가에 주요 감시 대상물질로 알려져 있다.

연안해역에서 조간대(intertidal zone or tidal flat)는 조석에 따른 주기적인 밀물과 썰물에 의해 노출과 침수를 반복하면서 자갈, 모래, 펄 등이 혼재하며 다양한 퇴적환경을 이루고 있다. 조

간대는 일반적으로 육지로부터 부유물의 공급이 많고 조차가 크며, 해저경사가 완만하고, 강한 파도나 조류와 같은 수리적 에너지의 영향을 적게 받는 지역에 크게 발달한다(Yang, 2006; Chang, 2008). 따라서, 이들 조간대는 하구역과 함께 육상으로부터 유입되는 오염물질의 영향을 직접적으로 받는 지역이다.

최근 국토해양부에서 조사한 한반도 연안 조간대 면적을 살펴보면, 전체 조간대 면적은 약 2,490 km²이며 이중 약 42% (1,037 km²)가 전라남도에 분포하고 있는 것으로 나타났다(<http://www.tidflat.go.kr>). 전라남도의 남서해안에도 하원반도를 중심으로 평균 4 m 이상의 큰 조차와 굴곡이 심한 리아스식 해안, 장산도, 신의도, 진도 등 많은 섬으로 인해 주변의 영산강과 탐진강, 그리고 소규모 하천 등을 통해 육상으로부터 공급된 부유물들이 주변 연안지역에 퇴적되어 다양한 크기의 조간

Article history;

Received 9 May 2013; Revised 26 June 2013; Accepted 16 July 2013

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2532 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: dwhwang@nfrdi.go.kr

Kor J Fish Aquat Sci 46(4) 454-466, August 2013

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0454>

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

© The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science. All rights reserved

대가 형성되어 있다(Cho and Park, 1998; Jeon and Cho, 2002; Shin et al., 2002; Choi et al., 2010).

그러나, 지난 1970년대부터 영산강 유역개발 및 공유수면매립 계획에 따라 목포항 내측의 무안반도와 영암반도를 잇는 영산강 하구둑의 건설, 해남군 화원반도 주변의 영암반도와 화원반도를 잇는 영암방조제와 금호방조제의 건설되면서 영산강 및 해남강 등 큰 강물을 통해 유입되던 부유물 유입량도 크게 감소하고 조위의 상승 및 조류 흐름의 변화로 인해 퇴적물의 운반양상이 바뀌면서 갯벌이 크게 손실되고, 그 면적이 크게 감소하였다(Cho and Park, 1998). 또한, 주변에 대불 국가산업단지 및 영암 농공단지의 조성, 목포항 주변 신도시 조성 및 신항 개발 등과 같은 각종 연안개발로 인해 해안가를 중심으로 산업화 및 도시화가 진행되면서 육상으로부터 미량금속과 같은 오염물질의 지속적인 유입으로 해양오염 가능성이 높아졌다.

일반적으로 미량금속은 반응성으로서 입자물질에 잘 흡착·제거되는 성질이 있어 해양으로 유입될 경우 해수중에 잔존하기도 하지만 대부분은 부유물질과 함께 해저로 이동하여 퇴적물 내 금속오염을 일으킨다. 특히, 육지와 가장 인접해 있는 지역인 조간대내에 육상으로부터 유입된 미량금속을 함유한 부유물이 집적될 경우 퇴적물중 미량금속의 농도변화를 일으키고 서식하는 생물의 분포 및 성장에도 큰 영향을 줄 수 있다(Hyun et al., 2003; Hwang et al., 2010). 그 동안 하구둑 및 방조제 건설 이후 남서해안의 조하대 및 조간대 퇴적물의 지화학적 특성 및 오염에 대한 연구가 영산강 하구(Cho and Park, 1998), 남서해안 연안(Jeon and Cho, 2002; Shin et al., 2002), 청계만(Choi et al., 2010), 영광-무안연안(Hwang et al., 2010), 압해도(Hwang et al., 2011) 등 여러 지역에서 꾸준히 이루어져 왔다. 하지만, 대부분의 연구는 영산강 하구역 주변 및 전남 북서부 지역의 반폐쇄적인 내만에 집중되어 있어 남서해 연안 조간대 지역의 미량금속 오염 특성을 파악하는데 어려움이 있다.

따라서, 이 연구에서는 영산강 유역개발 및 임해공업단지 조성 이후 육상으로부터 인위적인 오염의 영향이 예상되는 전남 남서해안 육지 및 도서 조간대 퇴적물중 유기물 및 미량금속 오염도를 평가하고자 하였으며, 이를 위해 목포와 해남사이의 화원반도와 해남연안 그리고 인근 5개 도서(진도, 장산도, 신의도, 상조도, 하조도)를 연구지역으로 선정하여 퇴적물의 입도, 강열감량, 화학적산소요구량, 산휘발성황화물 및 미량금속 농도를 조사하였다.

재료 및 방법

연구지역

연구지역은 한반도 남서쪽의 북위 $34^{\circ} 10' - 34^{\circ} 50'$, 동경 $126^{\circ} 00' - 126^{\circ} 40'$ 사이에 위치하고 있다(Fig. 1). 화원반도를 중심으로 서쪽으로 장산도와 신의도, 남서쪽으로 진도와 상조도, 하조도 등 크고 작은 많은 섬이 산재하고, 화원반도와 그 남동쪽 연

안은 굴곡이 매우 심한 리아스식 해안을 이루고 있다(Shin et al., 2002). 연구지역내 담수의 유입은 북쪽의 영산강과 동쪽의 도암만 안쪽 탐진강, 그리고 북쪽의 영암-금호 방조제 및 연구지역내 고천암 방조제를 통하여 이루어지지만 매우 제한적이며, 조석과 해류 등에 따른 해수의 유동에 따라 연구지역내 직간접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

해수의 유동은 다양한 해저지형과 조류의 영향을 크게 받으며 조류의 방향은 창조시 북동방향, 낙조시 남서 혹은 남쪽방향의 흐름을 나타낸다. 조류의 유속은 화원반도와 진도 사이에서 13 knots (= 6.2 m/sec)로 가장 빠르고 그 외 지역은 보통 1.0-3.3 knots (= 0.5-1.7 m/sec)로서 공간적인 차이가 크다(Jeon and Cho, 2002). 또한, 장산-신의도와 진도 북쪽해역은 방조제 및 하구둑 건설로 인해 수류변형과 조류속도의 감소, 조위상승 등의 변화가 일어나 외해와의 물질교환이 비교적 낮은 반폐쇄적인 특성을 보이고 해남 남부연안은 외해와 접해있어 개방형의 해안특성을 보인다(An and Jung, 1993; Na, 2002). 조석은 일조부등(diurnal inequality)이 심한 반일주조석(semidiurnal tide)이며, 평균조차는 2-4 m로서 Davies (1964)의 분류기준에 의해 중조차환경(mesotide)에 해당된다(Ryu et al., 2001; Shin et al., 2002).

연구해역 인근 육상 지질은 선캄브리아기의 화강편마암과 반상변정질 화강편마암으로 구성된 변성암 복합체(metamorphic complex)를 기반암으로 고생대 후기의 변성퇴적암류, 이들을 관입하는 중생대 유라기 화강암류 및 그 위에 덮고 있는 중생대 백악기 화산암류와 퇴적암류, 그리고 이들을 관입하는 화강암류 등이 혼재해 있으며 이중 백악기 화산암류가 연구지역 주변에 광범위하게 분포하고 있다(Ryu et al., 1999; Shin et al., 2002; Youn and Na, 2008).

조사항목 및 분석방법

목포-해남연안 조간대 퇴적물의 유기물과 미량금속 분포특성 및 오염도를 평가하기 위하여 2009년 10월 만조시 소형어선(선외기)을 타고 화원반도와 해남연안 및 인근 5개 섬 주변의 저조선 부근 조간대 하부의 총 50개 정점에서 채취기(van Veen grab sampler)를 이용하여 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 채취한 퇴적물 시료는 표면 0-2 cm 내의 퇴적물만을 미리 산세척한 고밀도 폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 냉장 및 냉동상태로 보관하여 실험실로 운반한 후 입도(grain size)와 강열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS) 및 미량금속(Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, Hg, As)을 Hwang et al. (2011)이 실시한 방법으로 분석하였으며 실험방법에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다.

먼저, 입도는 퇴적물 습시료 약 50 g을 비이커에 넣고 이온교환수를 이용하여 염분을 제거한 다음 10% 과산화수소(H_2O_2)

Fig. 1. A map showing the location of study area and the sampling sites for analyzing the trace metals in intertidal sediment from Mokpo-Haenam coast in October 2009.

와 0.1 N 염산(HCl)을 넣어 유기물 및 탄산염(CaCO_3)을 제거하였다. 이후 40 (0.0625 mm) 표준체를 이용하여 물체질(wet sieving)을 실시하였으며, 40 보다 큰 조립질 입자는 110℃에서 24시간 동안 건조한 후 진탕기(Ro-tap sieve shaker, Fritsch, Anaiyette 3)로 약 20분간 건식체질(dry sieving)을 한 다음 10 간격으로 무게를 구하였다. 40 보다 작은 세립질 입자는 일정 시간에 피펫팅으로 미리 무게를 달아놓은 비이커에 옮겨 담은 후 완전히 건조하여 시료무게를 구하였다. 이 무게값을 그래픽 방법에 따라 자료를 처리하였고, 퇴적물 특성을 나타내는 평균 입도(mean grain size, M_z)는 Folk and Ward (1957)의 계산식을 이용하여 구하였다.

IL은 퇴적물 습시료 약 20 g을 비이커에 담아 건조기에 넣고 110℃에서 24시간 건조한 후, 시료를 곱게 분쇄하여 도가니에 담아 무게를 측정하고, 이후 전기로에 넣어 550℃에서 2시간 회화시킨 후 다시 도가니 무게를 측정하여 회화 전후의 무게차이로부터 계산하였다. COD는 습시료 약 1-2 g을 삼각플라스크에 담아 0.1 N 과망간산칼륨(KMnO_4)과 10% 수산화나트륨(NaOH)을 넣고 혼합한 후 중탕기에 넣고 1시간 동안 중탕하였다. 이후 실온으로 냉각시켜 10% 요오드화칼륨(KI)과 4% 아지드화나트륨(NaN_3)을 넣은 다음, 여기에 증류수를 가해 500 mL로 만든 후 유리섬유 여과지로 여과하였다. 이때, 여과한 용액 100 mL를 분취하여 30% 황산(H_2SO_4)을 넣고 이를 0.1 N 티오황산나트륨($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 용액으로 적정한 후 계산하였다. AVS는 습시료 약 2-3 g을 황화수소(H_2S) 발생관에 넣고 약간의 증류수를 가한 다음, 뚜껑을 덮고 황산 2 mL를 넣어 이때 발생하는 황화수소 가스를 검지관에 통과시켜 그 변색값으로부터 산출하였다.

수은을 제외한 미량금속은 습시료 약 100 g을 -80℃에서 동결 건조한 후 플라스틱 재질의 채($\phi < 63 \mu\text{m}$)로 채질하여 통과된 퇴적물을 사용하였다. 채를 통과한 건시료 약 1 g을 테프론 재질의 비이커에 넣고 혼합산($\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HClO}_4 = 2:2:1$)을 이용하여 digestion하였으며, 이후 산을 완전히 휘발시킨 후 2% 질산(HNO_3)을 사용하여 100 mL로 정용한 다음 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN 9000)로 측정하였다. 수은은 건시료 약 0.1 g을 샘플용기(boat)에 담아 자동수은분석기(Milestone, DMA 80)로 직접 측정하였다. 금속원소에 대한 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 시료분석과 동일한 방법으로 10-15개의 시료당 3개의 인증표준물질(certified reference material)을 함께 분석하였다. 인증표준물질로는 캐나다 국가연구위원회(National Research Council Canada) 산하 연구소에서 제공하는 MESS-3 (marine sediment)를 이용하였으며, 이때 각 미량금속의 평균 회수율은 Al 107%, Fe 109%, Mn 106%, Zn 94%, Cr 96%, Cu 98%, As 98%, Pb 97%, Cd 103%, Hg 91%로 90-110% 범위였다.

유기물 및 미량금속의 오염평가

일반적으로 오염(pollution)은 환경 내 매질 중 구성성분의 농도가 자연상태에 존재하는 농도보다 높아져 있거나 생물에 악영향을 미치는 상태를 말한다. 이 연구에서는 유기물 및 미량금속의 오염을 평가하기 위하여 지금까지 다른 연구자들(Yoon, 2003; Hwang et al., 2010, 2011)에 의해 널리 이용되어온 오염기준(sediment quality guidelines; SQGs)을 적용하였다. 또한, 미량금속의 경우 추가적으로 최근 국내외 연구자들(Loska et al., 1997; Hwang et al., 2006, 2010, 2011; Chen et al., 2007;

Hyun et al., 2007; Lee et al., 2008; Feng et al., 2011)에 의해 널리 사용되어온 농축계수(enrichment factor, EF) 및 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo})를 이용하여 오염을 평가하였다.

먼저, 유기물과 미량금속의 SQGs을 이용한 평가는 유기물의 경우 연구지역 내 퇴적물 중 유기물 함량 특성을 나타내는 지표 중 COD와 AVS 성분을 일본의 퇴적물 오염기준(Yokoyama, 2000)과 비교하였으며, 미량금속의 경우에는 연구지역내 퇴적물중 미량금속의 농도와 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 권고하고 있는 ERL (effect range low)-ERM (effect range median) 값(Buchman, 2008)과 최근 국토해양부에서 제정한 퇴적물 미량금속 오염기준중 주의기준(threshold effects level, TEL) 및 관리기준(probable effects level, PEL) 값(http://www.law.go.kr)을 비교함으로써 이루어졌다. 또한, EF와 I_{geo} 를 이용한 퇴적물중 미량금속의 오염평가는 다음의 방정식 1과 2로부터 그 값을 계산 한 후 미량금속 오염도를 파악하였다.

$$EF = \frac{(Me / Al)_{\text{observed}}}{(Me / Al)_{\text{crust}}} \quad (1)$$

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

여기서, $(Me/Al)_{\text{observed}}$ 는 연구지역 내 퇴적물 중 Al에 대한 각 미량금속의 농도비를 말하고, $(Me/Al)_{\text{crust}}$ 는 지각내 Al에 대한 각 미량금속의 농도비, C_n 은 연구지역 내 퇴적물 중 미량금속의 농도, B_n 은 미량금속의 바탕농도(background)로서 지각내 각 원소의 평균농도를 의미한다. 이 연구에서는 지각내 각 원소의 평균농도로서 Taylor (1964)와 Taylor and McLennan (1995)이 보고한 전세계 연안 대륙붕지역의 퇴적물 내 미량금속의 농도(Al 8.0%, 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 이용하였다.

자료의 통계처리

연구지역내 퇴적물의 분석결과 사이의 상관성 및 차이를 알아보기 위해 통계분석을 실시하였다. 이때, 성분 사이의 차이는 t-검정을 실시하였고, 상관관계 분석은 Pearson coefficient 값을 이용하였다. 통계적 유의성은 유의계수(P) 0.05 이하로 하였으며, 통계분석을 수행하기 위하여 SPSS 12.0 (SPSS Inc., USA)를 이용하였다.

결과 및 고찰

퇴적물의 조성 및 입도

연구지역내 표층 퇴적물의 입도분석 결과, 자갈은 0-19.3% (평균 $1.0 \pm 3.8\%$), 모래는 0.04-100% (평균 $15.4 \pm 28.1\%$), 실

트는 0.0-81.6% (평균 $53.6 \pm 20.4\%$), 점토는 0.0-53.3% (평균 $30.0 \pm 12.6\%$) 범위였다. 자갈은 화원반도의 St. 1, 해남 서쪽연안의 St. 10, 하조도 서쪽의 St. 47에서 5% 이상의 함량을 보일 뿐 대부분의 정점에서 미약하거나 나타나지 않았다. 해남 남서쪽의 St. 14, 진도 남쪽의 St. 24, 상조도 북쪽의 St. 40과 하조도 북쪽의 St. 44, 남쪽의 St. 47, 48, 50에서 다른 정점과 달리 모래 함량이 50% 이상으로 매우 높게 나타났다. 하지만 그의 지역에서는 세립질인 실트와 점토가 우세하였고 특히 대부분의 지역에서 실트가 우세하였다. 최근 Lim et al. (2013)에 연구에 의하면, 연구지역과 인접한 한반도 남서해 연안 퇴적물의 경우 한반도 및 중국연안의 강물을 통해 유입된 퇴적물의 영향을 크게 받으며, 특히 실트는 한반도 주변 강물을 통해 주로 공급되고 상대적으로 세립한 점토의 경우에는 중국의 양쯔강과 황하강 퇴적물로부터 기원한다고 보고한 바 있다. 따라서, 연구지역내 퇴적물은 인근의 영산강과 탐진강, 그리고 영암-금호 방조제 및 고천암 방조제의 담수와 함께 유입되는 퇴적물의 영향을 크게 받

Fig. 2. The ternary diagrams showing the major sedimentary types of intertidal sediment from the Mokpo-Haenam coast.

Fig. 3. The horizontal distribution of sedimentary type in intertidal zone between Mokpo and Haenam (Abbreviations: Z - silt; sZ - sandy silt, M - mud; gM - gravelly mud, (g)M - slightly gravelly mud; sM - sandy mud; S - sand; mS - muddy sand; (g)mS - slightly gravelly muddy sand; (g)S - slightly gravelly sand; gS - gravelly sand).

고 있는 것으로 생각된다. 한편, 퇴적물중 자갈의 함량은 육지와 섬지역 사이에 유의한 차이를 보이지 않았으나($P>0.05$), 실트와 점토의 함량은 유의한 차이를 보였으며($P<0.05$) 대체로 육지쪽이 섬지역보다 실트와 점토의 함량이 우세하였다.

각 점정별 자갈, 모래, 실트, 점토 함량을 바탕으로 Folk (1968)가 제시한 삼각좌표에 도시하였다(Fig. 2). 그 결과, 연구지역내 퇴적물은 실트(silt, Z), 사질실트(sandy silt, sZ), 니(mud, M), 역질니(gravelly mud, gM), 약역질니(slightly gravelly mud, (g)M), 사질니(sandy mud, sM), 사(sand, S), 니질사(muddy sand, mS), 역질사(gravelly sand, gS), 약역질사(slightly gravelly sand, (g)S), 약역니질사(slightly gravelly muddy sand, (g)mS)의 총 11개 퇴적물 유형(sedimentary type)으로 분류되었고, 니(M)와 실트(Z)가 전체 퇴적물의 약 70%를 차지하였다. 또한, 퇴적물의 조직특성에 따라 크게 니(M), 실트(Z), 약역질니((g)M), 사(S)인 4개의 퇴적상(sedimentary facies)으로 구분되었다. 니(M)와 실트(Z) 퇴적물은 주로 화원반도와 해남 서쪽연안, 그리고 장산도와 신의도 동쪽에 집중적으로 분포하였고, 외해와 인접하여 직접적인 영향을 받는 하조도와 상조도 주변에서는 약역질니((g)M)와 사(S) 퇴적물이 우세하게 분포하였다(Fig. 3).

퇴적물의 Mz 는 0.9-8.8 ϕ (평균 $6.7 \pm 1.7\phi$) 범위로 극조립사(very coarse sand)부터 극세립실트(very fine silt)까지 다양하였으나, 하조도와 상조도 주변의 모래 함량이 높은 일부 정점들을 제외하면 대부분이 조립실트(coarse silt, 6.0 ϕ)와 극세립실트(very fine silt, 9.0 ϕ) 사이였다(Fig. 4). 또한, 육지쪽과 섬지

역의 조간대 퇴적물의 Mz 는 각각 4.4-8.8 ϕ (평균 $7.3 \pm 1.1\phi$)와 0.9-8.4 ϕ (평균 $6.4 \pm 1.9\phi$) 범위였으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.05$). 특히, 두 지역의 평균 Mz 를 비교해보면 육지쪽이 섬지역보다 약 1.0 ϕ 이상 높아 상대적으로 세립질 퇴적물이 더 많이 분포하고 있는 것으로 생각된다. 또한, 퇴적물내 함수율은 18.3-57.9% (평균 $46.4 \pm 5.1\%$) 범위로 세립질 퇴적물에서 조립질 퇴적물보다 높았으며(Fig. 4), 평균입도와 좋은 정의 상관성($r=0.86$, $P<0.05$)을 나타내었다.

이상의 결과를 종합해 보면, 연구지역내 퇴적물은 전반적으로 연구지역 인근의 영산강이나 탐진강, 영암-금호 방조제 및 고천암 방조제로부터 유입된 퇴적물의 영향을 크게 받아 니(M)와 실트(Z) 같은 세립질 퇴적물이 우세한 것으로 보인다. 특히, 육지 연안 조간대 퇴적물이 섬지역의 조간대 퇴적물 보다 상대적으로 세립한 것으로 나타났는데 이는 섬지역의 조간대 퇴적물의 경우 육지쪽에 비해 외해로부터 조류 및 파랑 등 수리역학적 에너지의 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

퇴적물의 유기물 함량 및 분포특성

해양에서의 유기물은 그 기원에 따라 외부 유입에 의한 외래성 기원과 해양내 자체적으로 발생하는 자생성 기원으로 구분할 수 있다(Yoon, 2003). 앞서 언급하였듯이, 연구지역의 경우 인근에 위치한 영산강과 탐진강, 영암-금호 방조제 및 고천암 방조제를 통해 제한적으로 담수 유입의 영향을 받고 있고, 해남 서쪽연안과 진도 사이에는 미역, 굴 등을 생산하는 수많은 양식장이 산재해 있어 이들 강물 및 방조제, 양식장을 통한 외래성 기원의 유기물 유입 가능성이 매우 높다. 따라서, 본 연구에서는 연구지역내 조간대 퇴적물내 유기물 분포 특성을 파악하고 자 유기물 함량 및 특성을 나타내는 지표인 IL과 COD 그리고 AVS농도를 살펴보았다.

퇴적물 중 IL과 COD는 각각 1.1-8.6% (평균 $5.4 \pm 1.8\%$)와 1.8-28.3 mg O_2 /g-dry (평균 5.4 ± 1.8 mg O_2 /g-dry) 범위로 공간적으로 큰 차이를 보였다(Fig. 4). 전반적으로 조립질인 사 퇴적물의 함량이 높았던 정점들에서 낮고 세립질인 실트 퇴적물의 함량이 높았던 정점들에서 높은 농도를 보였다. 또한, 육지쪽과 섬지역의 조간대 퇴적물 사이에 IL과 COD 농도가 유의한 차이를 보였으며($P<0.05$), 육지쪽 조간대 퇴적물중 IL과 COD 농도는 각각 3.7-8.6% (평균 $6.3 \pm 1.4\%$)와 4.8-28.3 mg O_2 /g-dry (평균 17.0 ± 8.1 mg O_2 /g-dry)로서 섬지역의 조간대 퇴적물중 IL과 COD 농도인 1.1-7.9% (평균 $4.9 \pm 1.9\%$)와 1.8-15.8 mg O_2 /g-dry (평균 9.2 ± 3.6 mg O_2 /g-dry)보다 상대적으로 높은 농도를 나타내었다. 또한, IL과 COD 두 성분 사이에도 서로 정의 상관성($r=0.58$, $P<0.05$)을 나타내었다.

퇴적물의 조성과 유기물 함량 사이에 관계를 파악하기 위하여 각 점정별 IL값과 Mz 사이의 상관성을 살펴 본 결과, 퇴적물중 IL은 Mz 와 좋은 정의 상관성($r=0.85$, $P<0.05$)을 보였다(Fig. 5). 이는 연구지역내 퇴적물중 유기물 함량이 입도와 밀접한 관

Fig. 4. The results of (A) mean grain size, (B) water content (WC), (C) ignition loss (IL), (D) chemical oxygen demand (COD) and (E) acid volatile sulfide (AVS) in intertidal sediment with each station from the Mokpo-Haenam coast. The solid lines represent the sediment quality guidelines for COD and AVS in Japan.

Table 1. The mean grain size (Mz) and the average of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and acid volatile sulfide (AVS), and trace metals (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Mn, As, and Hg) in intertidal sediment from the western coast of Korea

Study region	Mz (ϕ)	IL (%)	COD (mg O ₂ /g)	AVS (mg S/g)	Metals (%)			Metals (mg/kg)							Reference
					Al	Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As	Hg	
Byeonsan peninsula	2.8	1.4	3.9	ND ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Jung et al. (2010)
Saemangeum (inner part)	-	2.2	3.5	0.75	7.1	2.7	21	26	85	-	47	610	-	-	Kim et al. (2003)
Julpo bay	7.1	-	-	-	7.6	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	5.2	2.3	10	25	70	0.05	51	448	5.6	0.012	Hwang et al. (2010)
Aphae island	6.9	3.9	7.4	0.04	-	2.8	13	22	84	0.06	63	476	7.1	0.009	Hwang et al. (2011)
Mokpo-Wando coast	3.2	-	-	-	6.3	2.6	22	33	66	-	51	600	-	-	Shin et al. (2002)
Coastal Islands of Shinan	5.3	3.2	5.8	0.05	-	2.8	11	24	74	0.06	58	416	5.1	0.007	Hwang and Kim (2011)
Mokpo-Haenam coast	6.7	5.4	11.9	0.03	8.7	3.5	13	24	73	0.06	58	669	5.8	0.013	This study
(Land)	7.3	6.3	17.0	0.02	9.3	4.0	15	27	88	0.08	72	736	7.4	0.016	
(Island)	6.4	4.9	9.2	0.03	8.4	3.3	12	23	65	0.05	51	634	5.1	0.011	

¹ND : Not detected

련이 있으며, 퇴적물이 세립할수록 유기물 함량이 높다는 것을 의미하며, 연구지역 인근의 영광-무안연안과 신안의 도서갯벌 조간대 퇴적물에서 조사된 연구결과와 비슷하다(Hwang et al., 2010; Hwang and Kim, 2011). 지금까지 한반도 서해안에서 조사된 조간대 퇴적물중 IL 및 COD값을 본 연구결과와 비교하였을 때, 연구지역의 퇴적물내 IL과 COD 농도는 서해중부의 새만금 안쪽(Kim et al., 2003)과 변산반도(Jung et al., 2010)에서 조사된 결과보다 2배 이상 높았으며, 연구지역 북쪽의 영광-무안 연안(Hwang et al., 2010)과 압해도(Hwang et al., 2011)와 신안의 도서지역(Hwang and Kim, 2011) 보다도 다소 높은 농도였다(Table 1).

퇴적물 중 AVS 농도는 불검출-0.25 mg S/g-dry (평균 0.03 ± 0.05 mg S/g-dry) 범위로 진도 동쪽의 St. 2에서 가장 높고, 대부분의 정점에서 0.05 mg S/g-dry 이하의 낮은 농도를 보였다(Fig. 4). 육지쪽과 섬지역의 조간대 퇴적물중 AVS 농도는 각각 0.001-0.082 mg S/g-dry (평균 0.02 ± 0.02 mg S/g-dry)와 불검출-0.25 mg S/g-dry (평균 0.03 ± 0.06 mg S/g-dry) 범위로서 다른 유기물 지표와는 달리 육지쪽과 섬지역의 조간대 퇴적물중 AVS농도의 유의한 차이는 보이지 않았다($P>0.05$). 또한, 지금까지 한반도 서해안에서 조사된 조간대 퇴적물중 AVS값과 비교하였을 때, 새만금 안쪽(Kim et al., 2003) 보다는 상당히 낮았으며, 연구지역보다 조립질 퇴적물로 이루어진 변산반도(Jung et al., 2010)보다는 다소 높았다. 하지만, 연구지역 인근의 압해도(Hwang et al., 2011)와 신안의 도서 지역(Hwang and Kim, 2011)과는 비슷한 농도였다(Table 1).

한편, COD와 AVS는 퇴적물내 유기물 오염 및 퇴적물의 건강도를 평가하는 기준으로 널리 이용되어 왔으며, 저서생물에 영향을 주는 기준값으로서 일본에서는 퇴적물중 COD와 AVS 농도를 각각 20 mg O₂/g-dry 와 0.2 mg S/g-dry로 설정하고 있다(Yokoyama, 2000). 이 기준을 적용하여 연구지역내 유기물 오염도를 평가한 결과, 연구지역내 50개의 정점중 COD는 6개 정점(화원반도의 St. 2, 3, 5, 6, 7 그리고 해남 남쪽의 St. 13)에

서, AVS는 2개 정점(진도 동쪽의 St. 21, 상조도 남쪽의 St. 43)에서 일본의 퇴적물 기준값을 초과하는 것으로 나타났으나 그 외 정점에서는 약 1/2 이하의 낮은 농도를 보였다(Fig. 4). 따라서, 화원반도 주변 조간대 지역을 제외한 대부분의 연구지역이 저서생물에 영향을 줄 만큼 유기물 오염이 심각하지 않은 것으로 생각된다.

퇴적물의 미량금속 함량 및 분포특성

연구지역 내 표층 퇴적물 중 각 정점별 미량금속 농도분포를 Fig. 6에 도시하였다. 퇴적물중 알루미늄(Al)은 4.2-11.6% (평균 8.7 ± 1.6%), 철(Fe)은 0.8-5.4% (평균 3.5 ± 1.0%), 망간(Mn)은 182-1253 mg/kg (평균 669 ± 210 mg/kg), 아연(Zn)은 17-114 mg/kg (평균 74 ± 18 mg/kg), 크롬(Cr)은 6.6-89.1 mg/kg (평균 58.1 ± 19.7 mg/kg), 납(Pb)은 11.9-40.8 mg/kg (평균 24.3 ± 5.3 mg/kg), 구리(Cu)는 1.7-19.6 mg/kg (평균 12.9 ± 4.4 mg/kg), 비소(As)는 1.5-10.9 mg/kg (평균 5.8 ± 2.2 mg/kg), 카드뮴(Cd)은 0.014-0.114 mg/kg (평균 0.062 ± 0.025 mg/kg), 수은(Hg)은 0.003-0.022 mg/kg (평균 0.013 ± 0.004 mg/kg) 범위로 공간적으로 정점간에 큰 농도차이를 보였다. Cd의 경우 화원반도 북쪽연안에서 높은 농도를 보였으나 대부분의 미량금속은 외해와 연결되어 있어 개방형의 특성을 가진 진도 동쪽과 해남 서쪽 사이의 조간대 지역에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었다. 이러한 퇴적물중 미량금속의 공간적 분포는 앞서 설명한 입도 분포와 매우 유사하였다. 또한, 유기물 지표성분인 IL과 COD와 유사하게 육지와 섬지역의 조간대 퇴적물 사이에 Mn을 제외한 모든 미량금속들이 유의한 차이를 보였으며($P<0.05$), 상대적으로 세립질 퇴적물이 분포하는 육지쪽 조간대에서 섬지역 조간대 보다 미량금속 농도가 다소 높았다(Table 1).

연구지역내 퇴적물중 미량금속의 공간적 분포를 조절하는 요인을 알아보기 위하여 각 정점별 Mz에 따른 미량금속 농도를 Fig. 5에 도시하였다. 일반적으로 연안해역에서 퇴적물중 미량

Fig. 5. Plots of mean grain size versus ignition loss (IL) and trace metals in intertidal sediment from the Mokpo-Haenam coast.

금속 농도는 기원 암석의 광물적 조성, 입도, 퇴적물내 숙성작용, 자생광물 혹은 생물기원 광물, 인위적인 유입 등 여러가지 요인에 의해 큰 영향을 받지만, 이전의 연구결과에 의하면 연구지역과 인접한 연안 조건대 및 조하대 퇴적물중 미량금속 농도는 퇴적물의 조성 즉, 입도와 유기물 함량과 밀접한 관련이 있다고 보고된 바 있다(Cho and Park, 1998; Hwang et al., 2010; Hwang and Kim, 2011; Lim et al., 2013). 연구지역내 퇴적물중 Mz와 미량금속 농도 사이의 관계를 살펴 본 결과, As를 제외한 모든 미량금속이 Mz와 좋은 정의 상관성($r=0.53-0.82$, $P<0.05$)을 보였으며, 앞서 설명하였듯이 Mz는 IL과 COD와도 좋은 상관성을 보였다. 따라서, 연구지역 또한 미량금속 농도가 퇴적물의 조성 즉 입도와 유기물 함량의 영향을 크게 받고 있는 것으로 생각된다.

한편, 연구지역내 퇴적물중 미량금속 농도를 서해안의 다른 조건대 퇴적물에서 조사된 결과와 비교했을 때(Table 1), Cu, Pb, Zn, Cd, As는 새만금 안쪽(Kim et al., 2003), 줄포만(Kim et al., 2008), 영광-무안 연안(Hwang et al., 2010), 압해도 주변(Hwang et al., 2011), 목포-완도 연안(Shin et al., 2002), 신안의 도서지역(Hwang and Kim, 2011)과 비슷하거나 낮은 반면, Al, Fe, Mn, Hg은 다소 높았다. 또한, 연구지역내 도서 조건대 퇴적물의 경우 인접한 신안의 도서 조건대 퇴적물중 미량금속 농도와 상당히 유사하였다.

퇴적물의 미량금속 오염도

앞서 언급하였듯이, SQGs와 EF, I_{geo} 를 이용하여 연구지역내 퇴적물중 미량금속의 오염도를 살펴보았다. 먼저, SQGs의 경우 미국 NOAA에서 권고하는 ERL과 ERM 값을 적용하여 비교하였는데, 이는 미국 연안 퇴적물중 미량금속 자료를 바탕으로 지각물질의 주요 원소인 Al과 Fe를 제외한 총 9개의 원소(Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Ni, Hg, Ag)에 대하여 퇴적물내 미량금속에 의한 생물영향을 고려한 기준이다. 즉, ERL 농도를 기준으로 이 값을 초과하는 퇴적물은 서식생물에 악영향을 줄 가능성이 있고, 특히 ERM을 초과하는 농도는 서식생물의 악영향이 자주 관찰됨을 의미한다. 미국 NOAA에서 권고하는 각 원소별 ERL과 ERM 값은 각각 Cu 34 mg/kg과 270 mg/kg, Pb 46.7 mg/kg과 218 mg/kg, Zn 150 mg/kg과 410 mg/kg, Cd 1.2 mg/kg과 9.6 mg/kg, Cr 81 mg/kg과 370 mg/kg, As 8.2 mg/kg과 70 mg/kg, Ni 20.9 mg/kg과 51.6 mg/kg, Hg 0.15 mg/kg과 0.71 mg/kg, Ag 1.0 mg/kg과 3.7 mg/kg 이다(Buchman, 2008). 이들 기준값을 연구지역내 퇴적물중 미량금속의 농도와 비교해 보면, Mn, Zn, Pb, Cu, Cd, Hg은 모든 정점에서 ERL 값보다 낮았다(Fig. 6). 그러나, 전체 50개 정점중 Cr은 3개 정점(화원반도의 St. 4, 7, 해남 남쪽의 St. 13)에서, As는 7개 정점(화원반도의 St. 4, 6, 7, 해남 남쪽의 St. 10, 13, 14, 하조도 남쪽의

Fig. 6. The horizontal distributions of trace metals in intertidal sediment from the Mokpo-Haenam coast. The black circles represent the high concentrations rather than the values of effect range low (ERL) proposed by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) as the sediment quality guidelines in the United States.

St. 48)에서 ERL 값을 초과하였다.

한편, 2011년 국토해양부에서는 총 6개의 미량금속(Cu, Pb, Zn, As, Cd, Hg)에 대하여 우리나라 연안 퇴적물의 배경농도 및 생물영향 등을 고려하여 퇴적물 오염기준인 주의기준(TEL)과 관리기준(PEL)을 설정하였다(http://www.law.go.kr). TEL 농도를 기준으로 이 값을 초과하는 퇴적물은 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 있음을 의미하고 특히 PEL 을 초과하는 농도는 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높음을 의미한다. 여기서 기준으로 설정된 미량금속중 Pb, As, Cd, Hg은 분석결과와 기준농도 사이에 직접적인 비교가 가능한 반면, Cu와 Zn의 경우 연구지역의 입도의 영향을 고려하여 Li과 Cs을 이용한 입도보정을 한 값을 계산하여 기준과 비교하도록 권고하고 있다. 하지만, 본 연구의 경우 이 기준을 설정하기 전에 분석이 이루어져 Li과 Cs의 분석결과 값이 없기 때문에 Cu와 Zn의 농도 보정을 통한 비교가 불가능하다 따라서, 여기서는 이들 두 미량금속을 제외한 Pb, As, Cd, Hg에 대하여 기준농도와 비교해 보았다. 각 원소별 TEL과 PEL 값은 각각 Cu 50.5 mg/kg과 126 mg/kg, Pb 44.0 mg/kg과 119 mg/kg, Zn 179 mg/kg과 421 mg/kg, Cd 0.75 mg/kg과 2.72 mg/kg, As 14.5 mg/kg과 75.5 mg/kg, Hg 0.11 mg/kg과 0.62 mg/kg이다. 이들 기준값을 연구지역 내 퇴적물중 미량금속의 농도와 비교한 결과, Pb, As, Cd, Hg 모두 모든 정점에서 TEL 값보다 낮았다.

연구지역내 퇴적물의 미량금속 오염을 평가하기 위하여 EF와 I_{geo} 값을 계산하였으며 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 먼저, EF는 지각물질 중에 풍부하고 보존적 성질을 가진 원소인 Al 혹은 Fe을 표준화 성분으로 사용하여 점토광물의 구성비율과 연구지역내 미량금속의 구성비율을 이용하여 각 미량금속의 농축정도를 평가하는 방법이다(Choi et al., 2010; Hwang and Kim, 2011). 일반적으로 EF 값이 0.5-1.5 범위일 경우 오염되지 않은 자연적인 농도임을 의미하고 1.5보다 클 경우에는 다른

오염원에 의한 오염이 있음을 의미한다. 최근에 Birth (2003)와 Chen et al. (2007)은 이들 EF 값을 7단계로 좀더 세분화 하여 미량금속 오염을 평가하였으며, 본 연구에서도 이를 이용하여 연구지역 내 미량금속 오염도를 살펴보았다. 그 결과, 각 미량금속에 대한 EF는 Mn 0.41-1.62 (평균 1.01), Cu 0.11-0.64 (평균 0.45), Pb 0.90-2.08 (평균 1.12), Zn 0.42-1.25 (평균 0.93), Cd 0.19-1.11 (평균 0.67), Cr 0.32-2.31 (평균 1.48), As 1.08-8.34 (평균 3.50), Hg 0.05-0.24 (평균 0.10) 범위였다. Cu와 Hg은 모든 정점에서, Cd은 해남반도의 일부 정점(St. 1, 4)을 제외한 모든 정점에서 EF값이 1 보다 낮아 오염되지 않은 상태(no enrichment)인 것으로 나타났다. Zn은 화원반도(St. 2)와 해남 남쪽(St. 12, 15, 17)의 일부 정점을 제외한 육지쪽 모든 정점과 진도(St. 19, 23, 26, 27), 상조도(St. 43)와 하조도(St. 45, 46)의 일부 정점에서 EF값이 1.0-1.3 범위였으나 대부분의 정점에서 1 보다는 낮아 전반적으로 오염되지 않은 상태인 것으로 나타났다. Mn은 화원반도와 해남 남쪽 사이의 St. 6-11, St. 13, St. 14와 진도의 St. 21과 St. 24을 제외한 모든 정점 그리고 장산도(St. 29, 32), 신의도(St. 34, 37, 38), 하조도(St. 44, 46, 48, 49)의 일부 정점에서 EF값이 1.0-1.7 범위로 약간 오염된 상태(minor enrichment)에 해당하였다. 또한, Pb은 화원반도의 St. 2과 장산도(St. 28, 30, 31, 33)와 신의도(St. 35, 36, 38, 39)의 일부 정점을 제외한 모든 정점에서 EF값이 1.0-2.1 범위로, Cr 은 진도(St. 22, 24)와 상조도(St. 40), 하조도(St. 47)의 일부 정점을 제외한 모든 정점에서 EF값이 1.1-2.4 범위로 약간 오염된 상태에 해당하였다. 하지만, As는 대부분의 정점에서 EF 값이 3.0 이상으로 적당한 오염상태(moderate enrichment)에 해당하였다. 특히, 화원반도와 상조도의 대부분의 정점에서 EF값이 5.0-8.0 범위로 다른 정점들에 비해 상대적으로 높은 EF값을 나타내었다. 따라서, 전반적으로 Zn, Cu, Cd, Hg은 오염이 되지 않은 상태, Mn, Pb, Cr은 약간 오염된 상태, As는 적당한 오염상태인

Table 2. Classification of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (I_{geo}) and the number of EF and I_{geo} range for the concentration of trace metals in intertidal sediment from the Mokpo-Haenam coast, Korea

EF Range	I_{geo}		Designation of sediment quality	Number of site							
	Range	Class		Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
> 50	> 5	6	Extremely severe enrichment	0	0	0	0	0	0	0	0
			Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0
25-50	4-5	5	Very severe enrichment	0	0	0	0	0	0	0	0
			Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0
10-25	3-4	4	Severe enrichment	0	0	0	0	0	0	0	0
			Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0
5-10	2-3	3	Moderately severe enrichment	0	0	0	0	0	0	11	0
			Moderately/strongly polluted	0	0	0	0	0	0	5	0
3-5	1-2	2	Moderate enrichment	0	0	0	0	0	0	20	0
			Moderately polluted	0	0	0	0	0	0	29	0
1-3	0-1	1	Minor enrichment	25	0	41	22	2	45	19	0
			Practically unpolluted/moderately polluted	3	0	4	2	0	38	15	0
< 1	0	0	No enrichment	25	50	9	28	48	5	0	50
			Practically unpolluted	47	50	46	48	50	12	1	50

것으로 보인다. 또한, 모든 미량금속들이 육지쪽과 섬지역 조간대 퇴적물에서 평균 EF값이 각각 Mn 1.06과 0.99, Cu 0.53과 0.43, Pb 1.20과 1.09, Zn 1.08과 0.86, Cr 1.79와 1.34, As 4.24와 3.44, Cd 0.74와 0.49, Hg 0.17과 0.14로서 전반적으로 육지쪽이 섬지역 비해 상대적으로 높았다.

각 원소별 I_{geo} 값을 이용한 연구지역 내 퇴적물의 미량금속 오염도를 살펴보면(Table 2), 퇴적물 중 Cu, Cd와 Hg은 모든 정점에서 I_{geo} class가 0를 보여 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)에 해당하였다. Fe은 해남 남쪽의 St. 13, Zn은 화원반도의 St. 6과 해남 남쪽의 St. 13, Mn은 화원반도의 St. 6과 해남 남쪽의 St. 10, 진도 동쪽의 St. 19, Pb은 해남 남쪽의 St. 10, 11, 13, 14의 정점을 제외한 모든 정점에서 I_{geo} class가 0를 나타내어 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)에 해당하였다. 반면 Cr은 섬지역의 일부 정점(St. 22, 24, 28, 36, 38, 40, 41, 42, 44, 47, 48, 50)을 제외한 대부분의 정점들에서 I_{geo} class가 1로써 오염되지 않은 수준과 약간 오염된 수준(moderately polluted)의 중간단계에 해당하였다. As의 경우에는 화원반도(St. 4, 6, 7) 해남 남쪽(St. 10) 그리고 하조도(St. 48)의 일부 정점에서 I_{geo} class가 3으로 약간 오염된 수준과 강한 오염된 수준(strongly polluted)의 중간단계인 것으로 나타났으나, 대부분의 정점에서 I_{geo} class가 2 집중되어 전반적으로 약간 오염된 수준에 해당하였다.

이상의 3가지 평가 방법을 이용한 연구지역내 퇴적물의 미량금속 오염도 평가 결과를 종합해 보면, 연구지역의 조간대 퇴적물 내 미량금속중 Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg은 오염되지 않았고, Cr은 약간 오염된 것으로 나타났다. 그리고 As는 상대적으로 적당히 오염된 것으로 나타났으나 저서생물을 비롯한 다른 해양생물에게 큰 영향을 줄 만큼 오염된 수준은 아닌 것으로 보인다. 그리고 이러한 결과는 이전에 연구지역 북쪽의 영광-무안 연안(Hwang et al., 2010)과 목포 부근의 압해도 연안(Hwang et al., 2011), 그리고 연구지역 북서쪽의 신안의 연안 도서(Hwang and Kim, 2011) 조간대 퇴적물내 미량금속 오염도 평가결과와 일치한다.

한편, As의 경우 비록 우려할 만큼 오염된 수준은 아니지만 연구지역을 포함한 한반도 남서해 연안 조간대 퇴적물에서 다른 미량금속에 비해 상대적으로 오염된 특성을 보인다. 이러한 원인으로 최근, Hwang and Kim (2011)은 연구지역 주변의 높은 As를 함유한 지질 특성과 연구지역 주변의 농사를 위해 As가 함유된 살충제나 제초제 사용 등으로 오염된 지하수의 해양 유입에 따른 자연적 혹은 인위적 요인에 의한 As오염 가능성을 제시하였다. 하지만, 본 연구지역의 경우 주변에 대규모의 해조류 양식장이 산재해 있고 최근 함평만을 포함한 전남 남서해 조간대 퇴적물에 가시파래와 같은 해조류가 번성하여 연중 분포하는 것으로 보고되고 있다(Hwang and Koh, 2012). 이들 해조류는 해수나 퇴적물로부터 As를 효율적으로 농축하는 능력을 가지고 있어 다른 수산생물에 비해 높은 As 농도를 함유한

다(Norman et al., 1987; Vasconcelos and Lean, 2001; Rose et al., 2007). 특히, 최근 Na (2004)는 연구지역 인근의 목포연안 해조류의 체내 미량금속 농도와 조간대 퇴적물중 미량금속 농도가 좋은 정의 상관성을 보인다고 보고하였다. 따라서 해조류의 사체 및 부산물이 조간대 퇴적물에 집적될 경우 퇴적물내 As오염을 일으킬 가능성 또한 배제할 수 없다. 그러므로, 전남 서부 및 남서해 조간대 퇴적물 중 높은 As농도에 대한 보다 명확한 원인 구명과 해양생태계 내에서 매질(해수, 퇴적물, 수산생물)에 따른 As의 농축 및 물질순환에 대한 보다 종합적인 연구가 요구된다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준 국립수산물과학원 남서해수산연구소 연구원들에게 감사를 드립니다. 이 논문은 국립수산물과학원 수산시험연구사업(RP-2013-ME-60)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- An HS and Jung JY. 1993. Ocean circulation due to tidal residual current around the Myongnang Strait. *J Kor Earth Sci Soc* 14, 100-108.
- 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, New South Wales, Australia, 14.
- Buchman MF. 2008. NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1, Office of response and restoration division, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, WA, U.S.A., 34.
- Chang JH. 2008. Criteria and evaluation of local tidal flats for designation conservation sites in the southwestern coast of Korea. *J Environ Sci* 17, 1391-1402.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>.
- Cho YG and Park KY. 1998. Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, west coast of Korea. *J Kor Environ Sci Soc* 7, 549-557.
- Choi SW, Oh KH, Youn ST, Kim HG and Koh YK. 2010. Sedimentary environments and geochemistry characteristics of tidal flat sediments in semi-enclosed Cheonggye Bay, Korea. *J Kor Island* 22, 175-187.
- Davies JS. 1964. A morphogenic approach toward sholines. *Z Geomorph* 8, 127-142.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.020>.
- Folk RL. 1968. Petrology of sedimentary rock, Hemphill Publishing Co., Austin, TX, U.S.A., 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.
- 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 SG. 2011. Evaluation of heavy metal contamination in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam province using geochemical assessment techniques. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 772-784. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0772>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0414>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0759>.
- 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.
- 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. *J Kor Soc Oceanogr* 8, 380-391.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.013>.
- Jeon SG and Cho YG. 2002. Some heavy metal concentration of surface sediments from the southwestern coast of Korea. *J Environ Sci* 11, 1299-1305.
- 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.
- Lee MK, Bae W, Chung J, Jung HS and Shim H. 2008. Seasonal and spatial characteristics of seawater and sediment at Youngil Bay, southeast coast of Korea. *Mar Pollut Bull* 57, 325-334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.04.038>.
- Lim D, Choi JY, Shin HH, Rho KC and Jung HS. 2013. Multielement geochemistry of offshore sediments in the southeastern Yellow Sea and implications for sediment origin and dispersal. *Quat Internat* 298, 196-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.01.004>.
- Loska K, Cebula J, Pelczar J, Wiechula D and Kwapiulinski 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.
- Na BS. 2002. Distribution and geochemical characteristics of surface sediment in Doam Bay. MS Thesis, Chonnam National University, Kwangju, Korea.
- Na CK. 2004. Heavy metals in sediments and organisms from tidal flats along the Mokpo coastal area. *Econ Environ Geol* 37, 335-345.
- Norman JA, Pickford CJ, Sanders TW and Waller M. 1987. Human intake of arsenic and iodine from seaweed-based food supplements and health foods available in the UK. *Food Add Cont* 5, 103-109.
- Rose M, Lewis J, Langford N, Baxter M, Origgi S, Barber M, Macbain H and Thomas K. 2007. Arsenic in seaweed - Forms, concentration and dietary exposure. *Food Chem Toxicol* 45, 1263-1267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2007.01.007>.
- Ryu SO, Kim JY and Chang JH. 2001. Distribution of surface sediments and sedimentation rates on the tidal flat of Muan Bay, southwestern coast, Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 22, 30-39.
- Ryu SO, You HS, Kim JY, Lee IG and Kim MJ. 1999. Distribution of the surface sediments and transport pattern of suspended matters during winter season in Tando Bay, the southwestern coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 20, 486-496.
- 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 Kor Earth Sci Soc* 23, 722-735.
- 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.
- Vasconcelos MTSD and Leal MFC. 2001. Seasonal variability in the kinetics of Cu, Pb, Cd and Hg accumulation by macroalgae. *Mar Chem* 74, 65-85.

- Yang WH. 2006. Understanding of the Korean adjacent seas:
4. Tidal flat and sedimentation of the Yellow Sea. J Sci Edu
31, 1-8.
- Yokoyama H. 2000. Environmental quality criteria for aquacul-
ture 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, Ko-
rea. J Environ Sci 12, 735-744.
- Youn ST and Na BS. 2008. Soil environmental assessment by
the risk and artificial enrichment of Hampyeong district
soils. J Kor Soc Environ Impact Assess 6, 321-333.