

곰소만 바지락(*Ruditapes philippinarum*) 양식장 주변 퇴적물 내 유기물과 미량금속 분포특성

최민규 · 이인석 · 김청숙 · 김형철 · 황동운*

국립수산과학원 기반연구부 어장환경과

Distributions of Organic Matter and Trace Metals in Surface Sediments around a Manila Clam *Ruditapes philippinarum* Farming Area in Gomso Bay, Korea

Minkyu Choi, In-Seok Lee, Chung-Sook Kim, Hyung-Chul Kim and Dong-Woon Hwang*

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

Organic matter and trace metals were investigated in surface sediments of Gomso Bay, where there is dense Manila clam *Ruditapes philippinarum* farming activity, to evaluate contamination of sediments in intertidal shellfish farming area. We measured mean grain size (Mz), chemical oxygen demand (COD), ignition loss (IL), acid volatile sulfide (AVS), total organic carbon (TOC), and total nitrogen (TN), and trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) in intertidal and sublittoral sediments. The intertidal sediments were mainly composed of coarser sediments (sand, silty sand, and sandy silt), with Mz values ranging from 2.61 to 4.79 ϕ . Mz and the content of organic matter in sediments were lower in the intertidal zone than in the sublittoral zone. The mean metal concentrations in surface sediments decreased in the order Fe > Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg. The metal concentrations in surface sediments showed a significant positive correlation with Mz and organic matter content, indicating that metal concentrations in the surface sediments of Gomso Bay are controlled by Mz and organic matter. The concentrations of organic matter and trace metals in the study region were lower than or similar to those in other intertidal zones in western coast and much lower than those reported in other shellfish farming areas in Korea. Our results suggest that intertidal Manila clam farming sediments from Gomso Bay are not contaminated by organic matter and trace metals.

Key words: Manila clam, Sediment, Trace metals, Organic matter, Gomso Bay

서 론

패류양식은 어류양식과 달리 종묘확보 후 수하연에 부착하거나 해저에 살포한 이후 최소한의 관리만 할 뿐 양식장 주변의 해양생태계에 전적으로 의존한다. 따라서 수산생물 생산을 위한 생태계의 부양능력 즉 환경수용능력이 생물 생산에 중요한 제한요인으로 작용한다. 굴, 바지락 등 패류는 여과섭자(filter feeder 또는 deposit feeder)로서 수층에 존재하는 입자태 유기물(plankton 등)을 섭이하여 수질정화도 하지만, 많은 양의 배설물(faeces)과 의분(pseudo-faeces)을 배출하기 때문에 저서 환경 오염과 밀접한 관계가 있다 (Danovaro et al., 2004). 특

히, 연안에서 패류양식이 과도하게 이루어질 경우 먹이생물 부족(phytoplankton depletion), 생물학적 침적물(biodeposition) 증가, 해양생태계의 변화 등과 같은 어장환경의 잠재적인 위해도를 높여왔다(Ogilvie et al., 2000; Jie et al., 2001; Beadman et al., 2004; Zhou et al., 2006). 국내에서도 굴, 진주담치 등 수하식 패류양식장의 장기간에 걸친 과도한 밀식으로 양식생물의 성장 지연 및 질병 발생 등으로 인해 생산성이 저하되었음이 보고된 바 있다(MIFAFF, 2009; GNDI, 2012).

바지락(*Ruditapes philippinarum*)은 한국, 일본, 중국을 포함한 아시아뿐만 아니라 미국과 유럽국가들의 조간대에 널리 분포하는 생물종으로, 우리나라 서해안 갯벌의 패류 생산량을 좌

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0555>



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.

Korean J Fish Aquat Sci 48(4) 555-563, August 2015

Received 24 April 2015; Revised 13 August 2015; Accepted 17 August 2015

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

E-mail address: dwhwang@korea.kr

우하는 중요한 어업자원이다. 서해안 갯벌에서 가장 중요한 양식 품종인 바지락 양식 생산량은 1992년에 약 53,600 톤으로 최고치를 기록했고, 그 후 1997년 약 7,700 톤으로 급격히 감소하였다가 2010년에 약 23,400 톤으로 안정세를 유지하고 있다(MIFAFF, 2010). 바지락 생산량 감소는 주로 양식어장 환경의 변화 때문으로 특히, 대규모 간척과 매립사업으로 인한 패류 서식장의 감소, 양식어장의 오염, 기생충 감염, 기후변화로 인한 대량폐사가 주요 원인으로 알려져 있다(Park et al., 2011). 따라서 지속적인 바지락 양식 생산성 유지를 위해서는 양식어장 환경변화를 파악하여 효율적으로 관리할 수 있는 방향 제시가 필요하다.

곰소만은 전라북도 고창군과 부안군 사이에 위치하는 반폐쇄적인 만이다. 만 입구는 약 8 km로서 넓고, 입구로부터 내만까지는 약 20 km로 총 면적은 약 100 km²이며 이중 약 75 km²이 조간대로 형성되어 있다(Fig. 1). 곰소만 조간대는 광양만 조간대와 함께 우리나라 바지락의 주요 산지로서 그 명성을 유지해왔으나, 최근에는 생산량이 크게 감소할 뿐만 아니라 바지락 대신 굴이 우점하는 곳이 생기는 등 생물학적 천이 현상이 곳곳에 관찰되고 있어 어장환경의 변화가 예상되고 있다(Chang et al., 2007).

지금까지 우리나라 패류 양식어장 주변의 환경오염 및 양식 활동에 의한 영향에 대해서 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 연구가 굴과 진주담치 양식을 중심으로 진행한, 거제연안, 가막만에서 수행되어져 왔고(Park and Yi, 2002; Hyun et al., 2003; Noh et al., 2006; Yoon et al., 2007; Lee et al., 2008; Lee et al., 2011), 새고막, 바지락과 같은 퇴적층에 서식하는 패류 양식어장 주변의 저서환경에 대한 연구는 미흡한 실정이다(Choi et al., 2013). 곰소만 또한, 퇴적물의 퇴적학적 특성(주로 입도분포)에 대해서 몇몇 보고가 있었지만(Cho et al., 2001; Chang et al., 2007), 어장환경의 오염현황을 파악할 수 있는 유기물 및 미량금속에 대한 연구결과는 거의 없다. 따라서, 본 연구에서는 서해안 대표적인 바지락 양식어장인 곰소만 조간대에서 유기물 및 미량금속의 오염도를 파악하기 위해 퇴

적물 내 입도(grain size), 강열감량(ignition loss, IL), 화학적 산소요구량(chemical oxygen demands, COD), 총유기탄소(total organic carbon; TOC), 총질소(total nitrogen; TN), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 미량금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn)을 조사하였다.

재료 및 방법

시료채취 및 분석

본 연구는 곰소만에서 2012년 7월과 10월에 조사를 실시하였고, 표층퇴적물 시료는 7월과 10월에 조간대 바지락 양식장 주변 18개 정점을 선정하여 채취하였고, 대조구로서 7월에 조하대 10개 정점에서 시료를 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물 시료는 can core sampler (조간대)와 van Veen grab sampler (조하대)를 이용하여 표층(< 4 cm) 퇴적물만을 채취하였다. 저서환경 특성을 파악하기 위해 퇴적물 중 입도와 유기물 함량 특성을 나타내는 COD, IL, AVS, TOC, TN, 그리고 미량금속을 분석하였다. 여기서, 입도와 IL, COD, AVS는 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에 따라 수행하였으며, TOC와 TN, 미량금속은 Hwang et al. (2014a)의 분석과정에 따라 행하였다.

입도 및 IL, COD, AVS 분석

입도는 과산화수소(H₂O₂)와 염산(HCl)으로 유기물 및 탄산염(CaCO₃)을 제거한 다음 퇴적물을 4 Ø (0.0625 mm) 표준체를 이용하여 체질(wet sieving)한 후 조립질과 세립질 퇴적물로 분리한 다음, 4 Ø보다 큰 퇴적물은 진탕기를 이용한 건식체질법으로, 4 Ø보다 작은 퇴적물은 입자의 침강속도를 고려한 피펫법으로 1 Ø 간격으로 무게 백분율을 구하여 자갈, 모래, 실트, 점토의 함량을 계산하였다. 이후, 퇴적물의 평균입도(mean grain size, Mz)는 Folk and Ward (1957)이 제시한 계산식에 의해 구하였으며, 퇴적물 유형(sedimentary type)은 Folk (1968)의 방법에 따라 구분하였다. IL은 건식 퇴적물을 회화로에 넣고 550°C에서 4시간 동안 회화시킨 후 회화 전후의 무게차이를 이용한 무게법으로, COD는 티오황산나트륨(Na₂S₂O₃·H₂O) 적정을 통한 알카리성 과망간산칼륨(KMnO₄)법으로, AVS는 황화수소 발생관을 이용한 검지관법으로 분석하였다.

TOC 및 TN 분석

TOC 및 TN는 동결건조된 퇴적물 시료 0.5 g을 20-30 mL 유리 vial에 넣고 1 N HCl 10 mL를 첨가하여 탄산염을 제거한 후, 70°C에서 24시간 동안 수분과 잔류염소를 날려 보냈다. 이후 시료를 105°C에서 2시간 동안 건조한 후 상온이 될 때까지 방냉시켜 3-5 mg의 시료를 주석박막에 싸 CHN 원소분석기(Perkin Elmer, Model 2400, USA)로 분석하였다.

미량금속 분석

퇴적물 중 미량금속은 동결건조된 퇴적물 약 1 g을 테프론 비

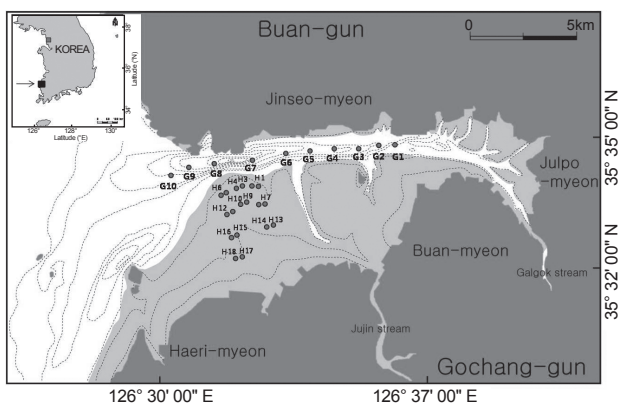


Fig. 1. Sampling locations of sediments from Gomso Bay, Korea.

커에 넣고 혼합산(HNO₃:HF:HClO₄)을 이용하여 digestion하였으며, 이후 산을 완전히 휘발시킨 후 2% 질산(HNO₃)을 사용하여 100 mL로 정용한 다음 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e, USA)로 측정하였으며, 수은의 경우에는 자동수은분석기(Milestone, DMA 80, Italy)로 측정하였다. 미량금속에 대한 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 인증표준물질(certified reference material)로서 Hg을 제외한 미량금속은 PACS-2을, Hg은 MESS-3을 시료와 동일한 방법으로 3개씩 분석하였으며, 이때 각 미량금속의 평균 회수율은 Cd 89%, Hg 98%, Fe 83%, Mn 80%, Zn 82%, Cr 80%, Cu 86%, As 94% 이었다. 본 연구에서 미량금속의 농도는 퇴적물 건중량(dry weight)을 기준하여 나타내었다.

미량금속의 오염도 평가

퇴적물 내 미량금속의 오염에 대한 평가는 분석된 미량금속의 농도를 오염되지 않은 지역의 자연적인 농도와 비교하는 방법을 주로 이용하고 있으며, 그 방법으로는 농집지수(geoaccumulation index, I_{geo}), 농축계수(enrichment factor), 농축비(concentration enrichment ratio), 오염지수(metal pollution index) 등 다양한 방법이 있다. 최근에는 퇴적물 내 미량금속의 농도에 따른 생물의 영향을 고려하여 각 국가별로 설정해 놓은 미량금속의 오염기준(sediment quality guidelines: SQGs)을 적용하기도 한다. 이 연구에서는 I_{geo}를 계산하여 금속원소의 오염정도를 파악하였고, I_{geo} 계산식은 아래와 같다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5}$$

여기서 C_n은 연구지역의 퇴적물 내 금속원소의 농도, B_n은 금속원소의 자연적인 배경농도로 일반적으로 지각 중의 금속원소의 평균농도가 널리 사용되고 있다. 이 연구에서는 퇴적물의 오염평가에 널리 이용되어오고 있는 Taylor (1964)와 Taylor and McLennan (1995)이 보고한 전세계 대륙붕 지각 중 금속원소의 평균농도를 이용하였다. 계산된 I_{geo}는 총 7단계(class 0-6)로 나누어져 있는 오염기준을 적용하여 평가하며, class 0 (I_{geo} ≤ 0; unpolluted), class 1 (I_{geo} 0-1; from unpolluted to moderately polluted), class 2 (I_{geo} 1-2; moderately polluted), class 3 (I_{geo} 2-3; from moderately to strongly polluted), class 4 (I_{geo} 3-4; strongly polluted), class 5 (I_{geo} 4-5; from strongly to extremely polluted), class 6 (I_{geo} > 5, extremely polluted)로 구분된다 (Müller, 1981). 또한, 이 연구에서는 연구해역 내 퇴적물 중 미량금속 농도와 최근 우리나라의 해양수산부에서 설정한 해양환경기준 중에서 퇴적물 내 미량금속 기준인 주의기준(threshold effects level, TEL) 값(MOF, 2013)과 전세계 해양 퇴적물의 오염평가에 널리 이용되고 있는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 적용하는

ERL (effect range low)값(Buchman, 2008)과 함께 비교하여 오염현황을 살펴보았다.

통계분석

조사자료의 정규분포 검정은 Kolmogorov-Smirnov와 Shapiro-Wilk test를 이용하여 추정하였고, 조사자료에 대한 평균값의 차이는 Mann-Whitney U test를 이용하여 추정하였다. 조사항목들간의 상관성은 데이터의 로그변환 후 Pearson correlation coefficient로 계산하였다. 통계적 유의수준은 P-value<0.05로 하였다. 통계분석은 윈도우용 SPSS software (SPSS 2000)를 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

입도분포

곰소만 퇴적물은 주로 모래와 점토가 혼합된 다양한 입도를 가진 퇴적물로 이루어져 있었으며, 모래, 자갈, 점토 등의 함량을 기초로 Folk (1968)의 삼각다이아그램에 도시한 결과를, 모래, 실트질 모래(silty sand), 모래질 실트(sandy silt)인 3개의 퇴적상으로 구분되었다(Fig. 2).

7월 곰소만 퇴적물의 경우, 니질함량(silt+clay)은 바지락 양식장에서 32.2-58.5% (평균 46.8%), 대조구에서 16.7-87.6% (평균 55.0%)이었고, 평균입도는 바지락 양식장에서 4.07-4.76 Ø (평균 4.41 Ø), 대조구에서 3.58-7.70 Ø (4.95 Ø)였다. 니질함량과 평균입도는 모두 대조구보다 바지락 양식장에서 유의하게 낮았다(P<0.05, Fig. 3). 10월 바지락 양식장 퇴적물의 특성을 보면, 니질함량은 2.26-74.6% (평균 32.3%)이었고, 평균입도는 2.61-4.79 Ø (평균 3.86 Ø)이었다. 이는 7월에 비해 니질함량은 감소하였고(P<0.05), 평균입도 또한 낮아져 상대적으로 조립화된 것으로 나타났다(P<0.05, Fig. 3). 이와 같이 단기

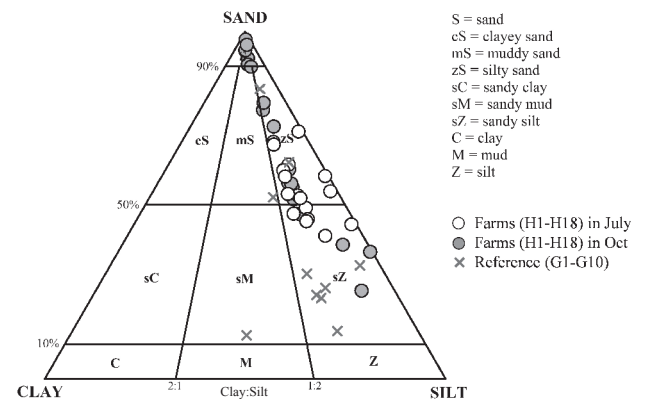


Fig. 2. The ternary diagrams showing the textures and the major sediment types of intertidal surface sediments in Gomsu Bay, Korea.

간에 걸친 퇴적양상의 변화는 폭풍 또는 태풍과 같은 기상의 영향으로 설명될 수 있다. 연구기간인 2012년 8월과 9월에는 한반도에 영향을 준 태풍 덴빈과 산바의 영향으로 상대적으로 4 Ø보다 조립한 미세사질(fine sand) 퇴적물의 유입이 증가한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 이 연구와 같은 해역에서 겨울에 비해 여름에 미세사질 퇴적물의 함량이 증가 경향을 보인다고 보고한 Cho et al. (2001)의 연구결과와 잘 일치한다. 또한, 연구기간 동안 곰소만 바지락 양식장의 퇴적물 중 니질 함량은 2.2-74.6% (평균 38.8%), 평균입도는 2.61-4.79 Ø (평균 4.11 Ø)로서, 이전에 이 연구와 같은 해역에서 Cho et al. (2001)이 보고한 평균입도(2.90-5.10 Ø)와 Chang et al. (2007)이 보고한 조간대 퇴적물 중 평균입도(1.3-6.6 Ø, 평균 4.1 Ø)와 유사하였다. 최근 NFRDI (2010)에서 조사한 바지락 양식을 위한 적합한 입도는 사니질 또는 사니패각질로 이루어진 조립질 퇴적물이라고 보고한 바 있다. 따라서 곰소만 바지락 양식장 주변 퇴적물은 모래-실트질이 우세한 퇴적환경(sandy silt and silty sand)으로 바지락 양식에 적합한 조립질 퇴적물을 지속적으로 유지하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 곰소만 바지락 양식장 주변 퇴적물 중 평균입도는 고막류 양식어장이 형성되어 있는 여자만과 남해 강진만(평균 8.8 Ø와 8.7 Ø; Choi et al., 2013), 굴, 진주담치의 양식어장이 형성되

어 있는 가막만과 고성-자란만(평균 8.3 Ø와 9.3 Ø; MIFAFF, 2009)에서 조사된 결과에 비해 매우 조립하였고, 서해안 조간대인 영광-무안(평균 5.5 Ø; Hwang et al., 2010), 압해도(평균 6.9 Ø; Hwang et al., 2011), 신안(평균 5.3; Hwang and Kim, 2011)보다도 조립하였으며, 반면 제주도(평균 1.7 Ø; Hwang et al., 2012) 연안 조간대 보다는 세립하였다(Table 1). 이와 같은 결과는 곰소만이 세립한 퇴적물을 공급할 수 있는 하천이 발달되지 않았고, 만 입구가 만 규모에 비해 상대적으로 매우 넓어 강한 조류의 영향으로 세립한 퇴적물이 외해로 빠져 나가기 쉽기 때문으로 판단된다(MIFAFF, 2012).

유기물 농도분포

저서환경에서 퇴적물에 유기물 축적을 나타내는 지표인 COD, IL, AVS, TOC, TN를 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. 곰소만 바지락 양식장 주변 퇴적물에서 COD 농도는 0.68-3.95 mg O₂/g dry (평균 2.30 mg O₂/g dry)로 일본의 퇴적물 오염기준 20 mg O₂/g dry (Lee and Yu, 2000)를 초과하는 정점은 조사되지 않았다. 시기별로 7월 바지락 양식장 퇴적물에서 COD농도는 0.68-3.18 mg O₂/g dry (평균 2.13 mg O₂/g dry)로 대조구(0.50-6.94 mg O₂/g dry, 평균 3.05 mg O₂/g dry)보다 유의하게 낮은 농도를 보였고($P < 0.05$), 반면 10월에 바지락 양식장에서 COD농도는 1.40-3.95 mg O₂/g dry (평균 2.48 mg O₂/g dry)로 7월에 비해 10월에 약간 증가하였지만 유의한 수준은 아니었다($P > 0.05$, Fig. 3). 또한, 곰소만 바지락 양식장에서 퇴적물 중 COD 농도는 굴, 진주담치 등 수하식 양식어장이 밀집한 남해안의 가막만, 고성-자란만, 거제-한산만, 진해만, 마산만보다 최대 1/15의 낮은 수준이었고, 고막류 양식장이 밀집한 여자만과 강진만의 1/5-1/11 수준이었으며, 서해안의 다른 연안 조간대 보다는 약간 낮고 제주도와는 유사하였다(Table 1).

AVS 농도는 바지락 양식장 주변 퇴적물에서 불검출-0.07 mg S/g dry (평균 0.02 mg S/g dry)범위로 일본의 퇴적물 오염기준 0.2 mg S/g dry (Lee and Yu, 2000)와 우리나라의 수산생물 서식 어장환경기준 0.5 mg S/g dry (MOF, 2014)를 초과한 정점은 조사되지 않았다. 7월에 AVS 농도의 경우, 바지락 양식장에서 불검출-0.07 mg S/g dry (평균 0.03 mg S/g dry)로 대조구(불검출-0.19 mg S/g dry, 평균 0.05 mg S/g dry)보다 약간 낮았고, 10월에는 바지락 양식장에서 불검출-0.04 mg S/g dry (평균 0.01 mg S/g dry)범위로 7월에 비해 약간 감소하였지만, 유의한 수준은 아니었다($P > 0.05$, Fig. 3). 곰소만 바지락 양식장에서 AVS 농도는 수하식 패류양식어장이 밀집한 진해만, 마산만의 1/25-1/30 수준으로 매우 낮은 수준이었고, 고막류 패류양식장이 밀집한 남해 강진만과 여자만의 1/5-1/10 수준이었다. 반면, 서해안의 다른 연안 조간대에서 AVS 평균농도(불검출-0.05 mg S/g dry)와는 유사하였다(Table 1).

퇴적물 중 IL 농도는 바지락 양식장 주변 퇴적물에서 0.73-2.03% (평균 1.35%) 범위였다. 7월에 IL은 바지락 양식장 퇴

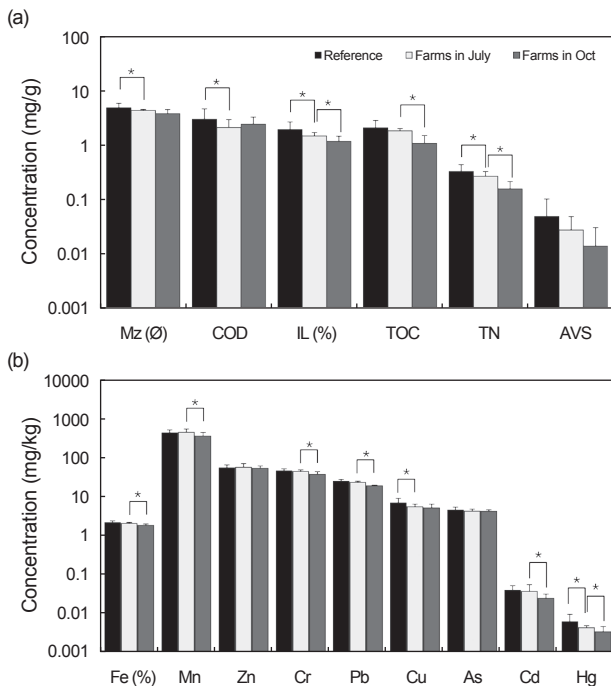


Fig. 3. Comparison of (a) Mean grain size (Mz), chemical oxygen demand (COD), ignition loss (IL), acid volatile sulfide (AVS), total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN), and (b) trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) in sediments from Gomso Bay of Korea. * indicates P -value < 0.05 .

적물에서 0.97-1.79% (평균 1.50%)로 대조구(1.45-4.30%, 평균 1.97%)보다 유의하게 낮았고, 10월에 바지락 양식장에서 IL 함량은 0.73-2.03% (평균 1.19%)로 7월에 비해 10월에 유의하게 감소하였다($P<0.05$, Fig. 3). 곰소만에서 IL의 농도수준은 진해만, 마산만, 거제-한산만, 고성-자란만의 1/6-1/7 수준이었고, 여자만과 남해 강진만의 1/4-1/5 수준, 서해안 조건대 해역의 1/2-1/3 수준이었다.

TOC 농도는 바지락 양식장 주변 퇴적물에서 0.65-2.30 mg/g dry (평균 1.48 mg/g dry)였다. 퇴적물 중 TOC에 대한 오염기준으로는 우리나라의 수산생물 서식 여장환경기준 (20 mg/g dry, MOF, 2014)을 비롯하여 일본의 Yokoyama et al. (2004)가 제안한 어류양식장 주의구역(warning zone) 농도인 20 mg/g dry, Hyland et al. (2005)가 제안한 대형저서동물군집에 영향을 줄 수 있는 농도 35 mg/g dry, 캐나다 온타리오 주의 표층퇴적물 중 TOC의 악영향 최소농도 10 mg/g dry (Lee and Yu, 2000)가 있으며, 이 연구에서는 이들 기준을 초과하는 정점은 없었다. 7월에 바지락 양식장 퇴적물 내 TOC 농도는 1.65-2.30 mg/g dry (평균 1.86 mg/g dry)로 대조구(1.00-4.65 mg/g dry, 평균 2.12 mg/g dry)보다 낮았지만 유의한 수준은 아니었다($P>0.05$). 반면 10월에 바지락 양식장에서 농도는 0.65-2.25 mg/g dry (평균 1.10 mg/g dry)로, 7월에 비해 10월에 유의하게 감소하였다($P<0.05$, Fig. 3). 곰소만에서 TOC 농도는 진해만, 마산만, 거제-한산만의 1/10-1/20 수준이었고, 여자만과 남해 강진만, 가막만의 1/6-1/8 수준으로 매우 낮았다(Table 1).

TN 농도는 바지락 양식장 주변 퇴적물에서 0.10-0.35 mg S/g dry (평균 0.22 mg S/g dry)범위였다. 7월에 TN 농도는 바지락

양식장 퇴적물에서 0.20-0.35 mg/g dry (평균 0.28 mg/g dry)로 대조구(0.25-0.65 mg/g dry, 평균 0.32 mg/g dry)보다 바지락 양식장이 유의하게 낮았고, 10월 바지락 양식장 퇴적물에서 0.10-0.30 mg/g dry (평균 0.16 mg/g dry)으로 7월에 비해 10월에 유의하게 감소하였다($P<0.05$, Fig. 3). 곰소만에서 TN 농도는 진해만, 마산만, 거제-한산만의 1/10-1/17 수준이었고, 남해 강진만, 가막만, 여자만의 1/5-1/8 수준이었다(Table 2).

한편, 일반적으로 퇴적물 중 유기물 함량은 입도와 밀접한 관련이 있으며 조립할수록 농도가 낮은 것으로 알려져 있다. 곰소만 또한, 바지락 양식장 주변 퇴적물 중 유기물 농도는 유의한 차이를 보이며 입도가 조립할수록 COD, IL, TOC, TN, AVS의 농도는 낮아졌다($r=0.404-0.615$, $P<0.05$). 따라서 곰소만에서 유기물 농도는 입도에 의해 상당부분 그 농도가 조절되는 것으로 판단된다.

이상의 결과들을 종합해 보면, 곰소만 바지락 양식장 주변 퇴적물의 입도는 다른 패류양식장에 비해 상대적으로 조립하고, 유기물 함량은 매우 낮은 것으로 나타났다. 이것은 곰소만 바지락 양식장의 지형적인 특성에 따른 조류의 영향으로 세립질 퇴적물이 외해로 용이하게 빠져나갈 뿐만 아니라 조석작용에 따른 밀물과 썰물에 의한 퇴적층 내 원활한 산소공급으로 미생물의 분해활동이 활발하게 진행되어 유기물 함량이 낮아졌기 때문으로 판단된다. 또한, 바지락 양식장 퇴적물 중 AVS, TOC, TN, IL 농도는 대조구보다 낮았으며, 7월보다 입도가 조립해지는 10월에 감소하였다. 곰소만 바지락 양식장의 유기물 함량은 수하식 패류양식시설 밀집 해역인 진해만, 마산만, 거제-한산만, 고성-자란만, 가막만과 살포식 패류양식장인 강진만과 여

Table 1. Comparison of concentrations of mean grain size (Mz), chemical oxygen demand (COD), ignition loss (IL), acid volatile sulfide (AVS), total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in sediments from Korean coastal waters

Sampling area	Sampling period	Mz (Ø)	COD (mg O ₂ /g dry)	IL (%)	AVS (mg S/g dry)	TOC (mg/g dry)	TN (mg/g dry)	Reference
Gomso Bay	2012	2.6-4.8 (4.1)	0.68-3.95 (2.30)	0.7-2.0 (1.3)	ND-0.07 (0.02)	0.7-2.3 (1.5)	0.10-0.35 (0.22)	This study
Yeonggwang-Muan	2008	2.1-8.3 (5.5)	3.9-13.8 (8.5)	0.8-5.5 (2.9)	ND			Hwang et al. (2010)
Aphae Island	2010	3.9-7.8 (6.9)	4.6-9.9 (7.4)	2.4-5.7 (3.9)	ND-0.53 (0.04)			Hwang et al. (2011)
Shinan	2008	1.3-8.2 (5.3)	0.4-12.6 (5.8)	0.6-5.3 (3.2)	ND-0.41 (0.05)			Hwang and Kim (2011)
Jeju Island	2009-2010	0.7-2.3 (1.7)	0.3-5.7 (2.1)	1.3-7.3 (3.9)	ND			Hwang et al. (2012)
Gamak Bay	2009	6.4-9.9 (8.3)	0.5-45.6 (18.7)	2.3-10.5 (6.5)	ND-2.20 (0.30)	4.9-77.5 (13.3)	0.72-3.61 (1.64)	MIFAFF (2009)
Goseung-Jaran Bay	2009	8.3-10.6 (9.3)	4.8-27.8 (16.8)	4.4-8.8 (7.2)	ND-0.48 (0.08)	7.2-21.5 (14.5)	1.20-2.83 (2.03)	MIFAFF (2009)
Geoje-Hansan Bay	2008		17.2-55.8 (31.4)	5.7-12.9 (8.0)	ND-0.78 (0.13)	12.9-27.6 (18.7)	1.70-3.70 (2.43)	MIFAFF (2008)
Jinhae Bay	2008		10.6-51.9 (29.3)	7.1-13.3 (9.7)	0.08-3.0 (0.66)	14.7-49.4 (27.7)	1.71-7.74 (3.69)	MIFAFF (2008)
Masan Bay	2009		7.5-32.5 (21.1)	6.8-9.1 (8.0)	0.15-1.17 (0.49)	15.7-18.4 (17.0)	2.11-3.44 (2.54)	MIFAFF (2009)
Yeoja Bay	2012	7.6-10.1 (8.8)	3.7-22.4 (10.4)	3.1-6.3 (5.0)	ND-0.55 (0.13)	4.3-12.1 (8.4)	0.55-1.45 (1.09)	Choi et al. (2013)
Gangjin Bay	2012	7.5-9.1 (8.7)	11.5-23.2 (17.3)	4.9-7.9 (6.6)	0.02-0.66 (0.25)	9.0-16.3 (12.6)	1.35-2.20 (1.72)	Choi et al. (2013)

자만에 비해 매우 낮은 수준이었고, 서해안의 다른 연안 조건대보다도 낮거나 유사한 수준이었다.

미량금속 농도분포

바지락 양식장 주변 퇴적물 중 미량금속 농도는 Fe 1.74-2.46% (평균 2.12%), Mn 274-712 mg/kg (평균 447 mg/kg), Zn 45.8-102 mg/kg (평균 60.0 mg/kg), Cr 31.6-57.4 mg/kg (평균 44.8 mg/kg), Pb 18.6-30.7 mg/kg (평균 23.2 mg/kg), Cu 3.54-7.88 mg/kg (평균 5.74 mg/kg), As 3.43-5.58 mg/kg (평균 4.64 mg/kg), Cd 0.013-0.091 mg/kg (평균 0.032 mg/kg), Hg 0.002-0.006 mg/kg (평균 0.004 mg/kg)이었다. 평균농도를 기준으로 Fe > Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg 순으로 농도가 낮아졌으며, 이러한 분포패턴은 이전에 서해안의 다른 연안 조건대인 영광-무안 연안(Hwang et al., 2010), 목포-해남 연안(Hwang et al., 2013), 태안반도 연안(Hwang et al., 2014b)

에서 보고된 결과와 일치하였다. 또한, 국내연안 퇴적물 내 미량금속 모니터링(2000-2010)결과에서도 인위적인 발생원에 의한 오염된 해역을 제외하면 한반도주변의 퇴적물 중 미량금속은 Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg 패턴을 보이는 것으로 보고되었다(NFRDI, 2013).

퇴적물 내 Zn과 As는 7월 바지락 양식장과 대조구, 7월과 10월 바지락 양식장을 비교해 보았을 때 유의한 차이가 없었다 ($P > 0.05$, Fig. 3). Fe, Mn, Cr, Pb, Cd은 7월 바지락 양식장과 대조구 간에 유의한 차이가 없었지만, 7월과 10월 바지락 양식장 비교에서는 유의한 차이를 보였다($P < 0.05$, Fig. 3). Cu는 7월 바지락 양식장과 대조구간 유의한 차이가 있었고, 반면 7월과 10월 바지락 양식장 비교에서는 유의한 차이가 없었다. 반면, Hg은 7월 바지락 양식장과 대조구, 7월과 10월 바지락 양식장 비교에서 모두 유의한 차이가 나타났다($P < 0.05$, Fig. 3). 전반적으로 퇴적물 중 입도와 AVS를 제외한 유기물 지표성분들

Table 2. The average concentrations of trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) in surface sediments from Korean Coastal Areas

	Mz (Ø)	Mz (%)	Trace Metals (mg/kg)								Reference
			Fe	Mn	Zn	Cr	Pb	Cu	As	Cd	
Gomso Bay	4.1	2.1	447	60	44	23	5.7	4.6	0.03	0.004	This study
Taeon coast	3.1	1.7	301	38	33	16	3.8	4.4	0.03	0.003	Hwang et al. (2014b)
Yeonggwang-Muan coast	5.5	2.3	448	70	51	25	10	5.6	0.05	0.012	Hwang et al. (2010)
Mokpo-Haenam coast	6.7	3.5	669	74	58	24	13	5.8	0.06	0.013	Hwang et al. (2013)
Yeoja Bay	8.8	3.5	893	137	81	29	17	7.4	0.05	0.016	Choi et al. (2015)
Gamak Bay		-	717	114	78	28	28	9.8	0.1	0.02	Kim et al. (2012)
Gangjin Bay	8.7	4.0	1019	157	82	33	27	10.5	0.12	0.031	Choi et al. (2015)
Shihwa Lake		3.4	399	309	101	66	207	12.3	0.5	0.12	Kim et al. (2005)
Ulsan Bay	7.2	3.3	499	189	62	35	81	16.1	0.3	0.11	Hwang et al. (2014a)
Background value (continental shelf)		3.5	600	71	35	20	25	1.5	0.098	0.08	Taylor and McLennan (1995) Taylor (1964)

Table 3. Pearson's correlation coefficients between mean grain size (Mz), mud (silt+clay), organic parameters (ignition loss [IL], chemical oxygen demand [COD], acid volatile sulfide [AVS], total organic carbon [TOC] and total nitrogen [TN]) and trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) in the sediment of Gomso Bay (n=46)

Item	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn
Mz	-0.077	0.457**	0.536**	0.806**	0.303*	0.884**	0.185	0.290	0.277
Silt+Clay	-0.117	0.437**	0.573**	0.713**	0.259	0.728**	0.263	0.213	0.293*
COD	0.127	0.460**	0.508**	0.847**	0.412**	0.914**	0.144	0.475**	0.239
IL	-0.059	0.196	0.224	0.622**	0.092	0.751**	0.038	0.032	0.128
AVS	0.080	0.478**	0.472**	0.779**	0.403**	0.763**	-0.072	0.414**	0.236
TOC	0.045	0.390**	0.525**	0.722**	0.397**	0.845**	0.262	0.449**	0.197
TN	0.098	0.536**	0.559**	0.722**	0.470**	0.831**	0.291*	0.534**	0.186

*Correlation is significant at the 0.05 level (two-tailed), **Correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed).

의 경우 바지락 양식장과 대조구 사이에 유의한 농도 차이를 보임에도 불구하고 Cu와 Hg 을 제외한 모든 미량금속들은 유의한 농도차이를 보이지 않는다. 이러한 분포 특성은 연구해역의 큰 조차에 의한 강한 조류와 지형적인 해수 유동의 차이로 인해 주변 육상의 오염원으로부터 유입된 미량금속들이 연구해역에 광범위하게 확산되어 영향을 주고 있거나 혹은 퇴적물의 재부유(resuspension) 및 재동(reworking)의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 생각된다(Hwang et al., 2014b).

한편, 연안역에서 퇴적물 중 금속원소의 농도는 퇴적물의 입도에 따라 크게 달라지며, 환경에 따라서는 세립질 퇴적물과 친화력이 매우 크고 표면적이 넓어 금속원소와의 흡착능력이 뛰어난 것으로 알려져 있는 생물기원물질, 즉 유기물의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다(Horowitz, 1991; Cho et al., 2001; Hwang et al., 2010). 이 연구에서도 연구해역내 퇴적물 중 입도 및 유기물 항목과 미량금속 사이에 어떠한 관계가 있는지 상관분석(Pearson's correlation coefficients)을 실시하였다(Table 3). 그 결과, 곰소만 바지락 양식장에서 미량금속(Fe, Cr, Cu, Cd, Hg) 농도는 퇴적물의 입도가 세립할수록 높아졌고($r=0.303-0.884, P<0.05$), 유기물(TOC, IL, AVS) 농도가 높을수록 높아졌다($r=0.390-0.914, P<0.05$). 따라서, 곰소만에서 미량금속은 입도와 유기물 농도와 밀접한 관련이 있으며 이들에 의해 그 농도가 조절되는 것으로 판단된다.

이 연구에서 밝혀진 곰소만 바지락 양식장 주변 퇴적물 중 미량금속 농도를 다른 해역에서 조사된 미량금속 평균농도와 비교한 결과(Table 2), 곰소만 퇴적물은 태안연안(Hwang et al., 2014b), 영광-무안(Hwang et al., 2010), 목포-해남연안(Hwang et al., 2013) 조건대 퇴적물과 매우 유사한 수준이었고, 가막만(Kim et al., 2012), 여자만과 강진만(Choi et al., 2015) 패류 양식장 주변 퇴적물보다는 약 1/2 수준이었다. 또한, 곰소만은 인위적인 발생원을 갖는 시화호(Kim et al., 2005)와 울산만(Hwang et al., 2014a)보다 크게 낮은 수준이었다. 따라서 곰소만 조건대 퇴적물 중 미량금속은 산업화된 해역보다 크게 낮은 수준이었고, 조하대 패류 양식어장 보다 낮거나 유사한 수준이었다.

미량금속 오염도 평가

연구해역 내 분석된 미량금속에 대한 농집지수 계산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 곰소만의 모든 정점에서 class 0인 성분은 Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Hg 이었고, Class 0과 Class 1이 함께 존재하는 성분은 Cr, Pb이었으며, class 1과 class 2가 함께 존재하는 성분은 As이었다. 곰소만에서 As는 중간오염수준(class 1-2)이었고, 그 외 모든 미량금속은 비오염수준(class 0-1)으로 조사되었다.

NOAA의 ERL은 미국연안 퇴적물 오염평가에 널리 이용하고 있는 기준값으로 총 9개 미량금속(Zn, Cr, Pb, Cu, As, Cd, Hg, Ni, Ag)에 대해 설정되어 있으며, 우리나라의 해양수산부

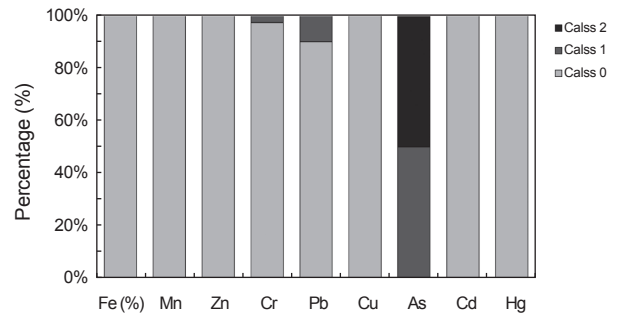


Fig. 4. Percentage of samples in Müller's classes for trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) by using Geoaccumulation Index.

에서 제정한 해양환경기준(MOF, 2013)에는 총 8개의 미량금속(Zn, Cr, Pb, Cu, As, Cd, Hg, Ni)에 대한 기준(주의기준인 TEL과 관리기준인 PEL)이 설정되어 있다. 만약, ERL과 TEL 값을 초과하는 미량금속 농도를 가진 퇴적물은 저서생물에 어느 정도 부정적인 영향을 줄 수 있는 수준을 의미하며, 이들 값들이 이 연구에서 조사된 퇴적물 중 미량금속 농도와 비교해 보았다. 여기서, 우리나라의 TEL의 경우, Cu와 Zn에 대해서는 퇴적물 중 Li을 이용하여 입도의 영향을 보정한 농도로서 비교할 것을 권고하고 있으나, 본 연구는 우리나라의 퇴적물 기준이 설정된 2013년 이전에 연구가 수행되었기 때문에 Li 분석결과가 없어 Cu와 Zn에 대한 평가가 불가능하다. 따라서, 우리나라 퇴적물 오염기준은 Cu와 Zn을 제외한 5종의 미량금속(Pb, Cd, Cr, As, Hg)에 대해서만 적용하여 오염을 평가하였다. 그 결과, 곰소만 바지락 양식장의 모든 정점에서 퇴적물 중 미량금속 농도는 모든 미량금속에 대하여 ERL과 TEL을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

이상의 곰소만 바지락 양식장 주변 퇴적물 중 미량금속 오염 평가 결과를 종합해 보면, 비록 농집지수에서 As가 중간정도 오염상태를 나타내었으나 우리나라 남해안의 패류양식이 활발한 반폐쇄적인 내만인 가막만이나 강진만보다도 상당히 농도가 낮다. 특히 모든 미량금속들이 국내의 퇴적물 오염기준보다 낮은 농도를 보이고 있어 여 연구해역 내 퇴적물은 미량금속에 대하여 저서생물에 부정적인 영향을 줄 만큼 오염되지 않았으며, 양식생물인 바지락이 서식하기에 적합한 퇴적환경을 유지하고 있는 것으로 판단된다. 앞으로 곰소만 주변 연안 생태계 보전 및 안전한 수산물 공급을 위하여 미량금속에 대한 어장환경 및 양식생물 모니터링을 지속적으로 전개할 필요가 있다.

사 사

이 연구의 현장조사 및 시료분석에 도움을 준 국립수산물품질관리원 어장환경과 연구원들에게 감사사를 드립니다. 이 논문은 2015년

국립수산과학원 수산과학연구사업(R2015057)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- Beadman HA, Kaiser MJ, Galanidi M, Shucksmith R and Wil-lows RI. 2004. Changes in species richness with stocking density of marine bivalves. *J Applied Ecol* 41, 464-475.
- Buchman MF. 2008. NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle, U.S.A., 34.
- Chang JH, Ryu SO and Jo YJ. 2007. Long-term variation of tidal-flat sediments in Gomso Bay, West Coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 28, 357-366.
- Cho YG, Ryu SO, Khu YK and Kim JY. 2001. Geochemical composition of surface sediments from the Saemangeum tidal flat, west coast of Korea. *J Kor Soc Oceanogr* 6, 27-34.
- Choi M, Kim HC, Hwang DW, Lee IS, Kim YS and Kim YJ. 2013. Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming areas of Korea: Yeoja Bay and Gangjin Bay. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 424-436. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0424>.
- Choi M, Lee IS, Kim HC and Hwang DW. 2015. Distribution of trace metals in surface sediments of Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* (in review).
- Cho TC, Lee SB and Kim SY. 2001. Sedimentological and hydro-mechanical characteristics of bed deposits for the cultivation of Manila clam, *Ruditapes philippinarum* in Gomso Tidal Flat. *J Kor Fish Soc* 34, 245-253.
- Danovaro R, Gambi C, Luna GM and Mirto S. 2004. Sustainable impact of mussel farming in the Adriatic Sea (Mediterranean Sea): evidence from biochemical, microbial and meiofaunal indicators. *Mar Pollut Bull* 49, 325-333.
- Folk RL. 1968. Petrology of Sedimentary Rock, Hemphill Publishing Co., Austin TX, USA, 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.
- GNDI (Gyung Nam Development Institute). 2012. Strategy for Enhancement of Shellfish Farming in Gyungnam Province. GNDI, Changwon, Korea, 1-8.
- Horowitz AJ. 1991. A Primer on Sediment Trace Element Chemistry. 2nd Ed Lewis Publishers Inc., Chelsea MI, USA, 136.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M and Choi HG. 2014a. Distribution and pollution assessment of organic matter and trace metals in surface sediment around Ulsan Harbor. *J Kor Soc Environ Anal* 17, 146-160.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M and Choi HG. 2014b. Distribution of organic matter and trace metals in sediment around Tidal-flat oyster *Crassostrea gigas* farming area on the Taean Peninsula, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 47, 1014-1025. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.1014>.
- Hwang DW, Kim PJ, JungRH and Yoon SP. 2013. Distributions of organic matter and trace metals in intertidal surface sediment from the Mokpo-Haenam coast. *Korean 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 Jeollanam province using geochemical assessment techniques. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 772-784. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0772>.
- 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. *Korean 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. *Korean J Fish Aquat Sci* 43, 146-158. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2010.0146>.
- Hwang DW, Kim HC, Park J and Lee WC. 2012. Temporal and spatial variation of nutrient concentrations in shallow pore water in intertidal sandflats of Jeju Island. *Korean J Fish Aquat Sci* 45, 704-715. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0704>.
- Hyland J, Balthis L, Karakassis I, Magni P, Petrov A, Shine J, Vestergaard O and Warwick R. 2005. Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos. *Mar Ecol Prog Ser* 295, 91-103.
- Hyun S, Choi JW, Choi JS and Lee T. 2003. Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea. *J Kor Fish Soc* 36, 700-707.
- Jie H, Zhinan Z, Zishan Y and Widdows J. 2001. Differences in the benthic-pelagic particle flux (boideposition and sediment erosion) at intertidal sites with and without clam (*Ruditapes philippinarum*) cultivation in eastern China. *J Experim Mar Biol Ecol* 261, 245-261.
- 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 Saf* 18, 67-83.
- Kim KT, Kim ES, Cho SR, Chung KH and Park JK. 2005. Distribution and pollution of heavy metals in the environmental samples of the Lake Shihwa. *J Kor Soc Mar Environ Enginer* 8, 148-157.
- Lee CH and Yu HJ. 2000. Establishment of environmental quality guidelines for surface sediments. Korea Environment Institute. 150.
- 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 WC, Cho YS, Hong SJ, Kim HC, Kim JB and Lee SM. 2011. Estimation of ecological carrying capacity for oyster

- culture by ecological indicator in Geoje-Hansan Bay. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 17, 315-322.
- MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2008. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2008. Busan, Korea, 243.
- MIFAFF. 2009. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2009. Busan, Korea, 443.
- MIFAFF. 2010. Annual statistics of agriculture, forestry and fisheries in Korea. Seoul, Korea, 590.
- MIFAFF. 2012. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2011. Busan, Korea, 243.
- MLTM (Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs). 2010. Standard method for the analyses of marine pollutants, Busan, Korea, 495.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2013. Notification No. 2013-186 of the Ministry of Oceans and Fisheries.
- MOF. 2014. Notification No. 2014-96 of the Ministry of Oceans and Fisheries.
- Müller G. 1981. Die Schwermetallbelastung der sediment des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemical Zeitung* 105, 157-164.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2008. Guidelines of suitable site selection for aquaculture. Busan, Korea, 1-18.
- NFRDI. 2010. Report on detailed investigation and restoration of coastal fisheries of Taejeon, Korea in 2010.
- NFRDI. 2013. Nationwide monitoring for metals in sediments from Korean coastal waters (2000-2010). Busan, Korea, 121.
- Noh IH, Yoon YH, Kim DI and Park JS. 2006. The spatio-temporal distribution of organic matter on the surface sediment and its origin in Gamak Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engineer* 9, 1-13.
- Ogilvile SC, Ross AH and Schiel DR. 2000. Phytoplankton biomass associated with mussel farms in Beatrix Bay, New Zealand. *Aquaculture* 181, 71-80.
- Park HS and Yi SK. 2002. Assessment of benthic environment conditions of oyster and mussel farms based on macrobenthos in Jinhae Bay. *J Kor Soc Mar Environ Engineer* 5, 68-75.
- Park KJ, Yoon SP, Song JH, Han HS and O HC. 2011. Improvement of manila clam (*Ruditapes philippinarum*) habitat condition by adding crushed oyster (*Crassostrea gigas*) shells to the substratum. *Kor J Malcol* 27, 291-297.
- 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.
- Yokoyama H, Inoue M and Abo K. 2004. Estimation of the assimilative capacity of fish-farm environments based on the current velocity measured by plaster balls. *Aquaculture* 240, 233-247.
- Yoon SP, Jung RH, Kim YJ, Kim SS, Lee JS, Park JS, Lee WC and Choi WJ. 2007. Characteristics of benthic environment and polychaete communities of Gamak Bay, Korea. *J Kor Soc Oceanogr -The Sea* 12, 287-304.
- Zhou Y, Yang H, Zhang T, Qin P, Xu X and Zhang F. 2006. Density-dependent effects on seston dynamics and rates of filtering and biodeposition of the suspension-cultured scallop *Chlamys farreri* in a eutrophic bay (northern China): an experimental study in semi-in situ flow-through systems. *J Mar Systems* 59, 143-158.