

## 패류양식어장 밀집해역의 퇴적환경내 유기물 분포특성 -여자만과 남해 강진만-

최민규\* · 김형철 · 황동운 · 이인석 · 김영숙 · 김예정 · 최희구

국립수산과학원 어장환경과

### Organic Enrichment and Pollution in Surface Sediments from Shellfish Farming in Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea

Minkyu Choi\*, Hyung Chul Kim, Dong-Woon Hwang, In-Seok Lee,  
Young-Sook Kim, Ye-Jung Kim, and Hee-Gu Choi

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

Organic enrichment was investigated in surface sediments from the Yeoja and Gangjin Bays of Korea, which contain dense shellfish farms, in order to evaluate the contamination status and temporal changes in shellfish farming along these coasts. The degree of organic enrichment was determined using geochemical indicators (chemical oxygen demand, ignition loss, acid volatile sulfide, total organic carbon in sediments, and total nitrogen in sediments, ammonium and nitrate in pore water, and bioluminescence inhabitation for sediments). Temporal changes in organic enrichment conditions were detected by comparing our 2012 data to those previously reported from a survey conducted in 1999/2000. Organic enrichment was significantly higher in September than in May and July, in Gangjin Bay than in Yeoja Bay, and significantly higher in shellfish farms than in reference sites not used to culture shellfish. Ammonium concentrations in pore water were two orders of magnitude greater than nitrate concentrations, suggesting that these bays represent nitrogen-reducing environments.

Key words; Sediment, Porewater, AVS, Ammonium, Bioluminescent inhabitation

### 서 론

우리나라에서 패류양식은 전체 해면 양식 생산량의 약 45%를 차지할 정도로 그 비중이 매우 높다. 천해 패류 양식은 경상남도 와 전라남도 일원 해역을 중심으로 발달하였으며, 2009년 해면 양식 면적은 전수면적은 각각 5,637건과 49,538 ha에 달하고, 패류의 양식생산량은 2007년 478,646톤으로 최고치를 보였으나 이후 점차 감소하여 2009년에는 326,544톤으로 감소한 실정이다(MIFAFF, 2010).

최근 들어 양식패류 생산량이 급격한 감소추세를 보이는 원인은 명확하게 밝혀지지 않고 있지만, 일부 연구들은 환경오염으로 인한 양식어장환경의 악화, 모패 자원의 열성화, 양식용 종패의 채묘 부진, 대량폐사 발생 등을 원인으로 보고하였다(MIFAFF, 2009). 우리나라 연안의 패류양식어장은 양식시설물 설치 및 관리의 용이성 그리고 먹이생물의 풍부에 따른 양식기간

의 단축 등으로 주로 내만과 간석지를 중심으로 발달되어 왔다. 그 결과, 우리나라 연안해역의 산업화에 의한 부영양화가 증가하고, 과도하게 시설되어 장기간에 걸쳐 양식하여 왔기 때문에 성장이 지연되고 질병이 쉽게 전염되어 생산성이 낮아지고 있는 것으로 보고된다(GNDI, 2012). 따라서 지속적인 패류양식 생산성 유지를 위해서는 양식어장 환경변화를 파악하여 효율적으로 관리할 수 있는 방향 제시가 필요하다.

패류양식은 어류양식과 달리 종묘확보 후 수하연에 시설하거나 해저에 살포한 이후 최소한의 관리만 할 뿐 양식장 해역의 자연생태계에 전적으로 의존한다. 그러므로 생태계의 생물생산을 위한 부양능력 즉 환경수용능력이 생산의 중요한 제한요인이다. 패류는 여과식자(filter feeder 또는 deposit feeder)로서 수층에 존재하는 입자유기태(유기물, 클로로필 등)를 섭이하여 수질정화도 하지만, 많은 양의 배설물(faeces)와 의분(pseudo-faeces)이 양식장 퇴적물로 퇴적되면서 표층퇴적물내 분해되기

#### Article history;

Received 13 March 2013; Revised 13 June 2013; Accepted 16 July 2013

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2531 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: mkchoi3@korea.kr

Kor J Fish Aquat Sci 46(4) 424-436, August 2013

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0424>

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

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

쉬운 유기물(labile organic matter)의 유입이 증가해 저서환경의 물리화학적 특성을 변화시킨다(Danovaro et al., 2004). 과도한 패류양식은 먹이생물 부족(phytoplankton depletion), 생물학적 침적물(biodeposition) 증가, 생태계 변화와 같은 어장 환경의 잠재적인 위해도를 높여왔다(Ogilvie et al, 2000; Jie et al., 2001; Beadman et al., 2004; Giles et al., 2006; Zhou et al., 2006). 지금까지 국내 패류양식에 대한 연구들은 패류양식어장의 환경오염 및 영향에 대해서 조사해 왔지만 대부분 굴, 진주담치 등을 생산하는 수하식 양식을 중심으로 진해만, 거제연안, 가막만에서 비교적 많은 연구가 수행되었다(Park and Yi, 2002; Hyun et al., 2003; Noh et al., 2006; Yoon et al., 2007; Lee et al., 2008; Cho et al., 2009; Lee et al., 2011). 반면, 바지락, 고막류 등 퇴적층내 서식하는 패류의 양식어장환경에 대한 연구는 미흡한 실정이다(Choi et al., 2005, 2007). 본 연구는 남해안 대표적인 고막류(ark shell) 양식어장인 여자만과 남해 강진만에서 패류양식해역과 비양식해역을 구분하여 유기물 축적에 따른 저서환경의 오염현황을 비교하였다. 또한 과거 조사자료(1999/2000년)와 비교하여 여자만과 강진만에서 시간적 저서환경의 변화를 평가하였다. 이를 위해 퇴적물내 유기물축적지표(화학적 산소요구량, 강열감량, 산취발성황화합물, 총유기탄소, 총질소)와 공극수중 암모니아와 질산 질소를 조사하였고, 퇴적물의 독성도를 파악하기 위해 발광미생물의 발광저해도도

함께 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 조사해역

여자만(Fig. 1)은 남해안 중앙에 위치하고 있으며, 고흥반도, 여수반도로 둘러 싸여 있는 반 폐쇄성 내만으로 평균수심은 약 5.4 m, 남북길이는 30 km, 동서길이는 22 km에 달한다. 여자만은 남해안의 다른 만들에 비해 면적이 넓은 반면 외해수와의 교환은 남쪽만 입구의 좁은 수로를 통해서 이루어진다. 여자만에 허가된 양식면적은 465건, 7,056 ha이며, 주요 생산품종은 피조개, 고막과 새고막이고, 고막류의 면적은 351건, 4,712 ha로 전체 양식면적의 67%를 차지한다(Lee, 2012).

강진만(Fig. 1)은 경상남도의 남서부에 남해군, 사천시, 하동군에 의해 둘러싸여 있는 반폐쇄성 내만으로 평균수심은 약 3.6 m, 남북길이 약 18 km, 동서길이 약 15 km에 달한다. 강진만은 총 168건에 1,028 ha의 어업권이 허가되어 있고, 양식어업은 피조개 양식(109건, 623 ha)이 가장 많고, 바지락 (27건, 202 ha), 굴(25건, 147 ha), 새고막(7건, 55ha)순이었다. 강진만 해면중 5,290 ha는 수출용 패류생산해역(7호 해역)으로 지정되어 관리되고 있다(Park et al., 2010).

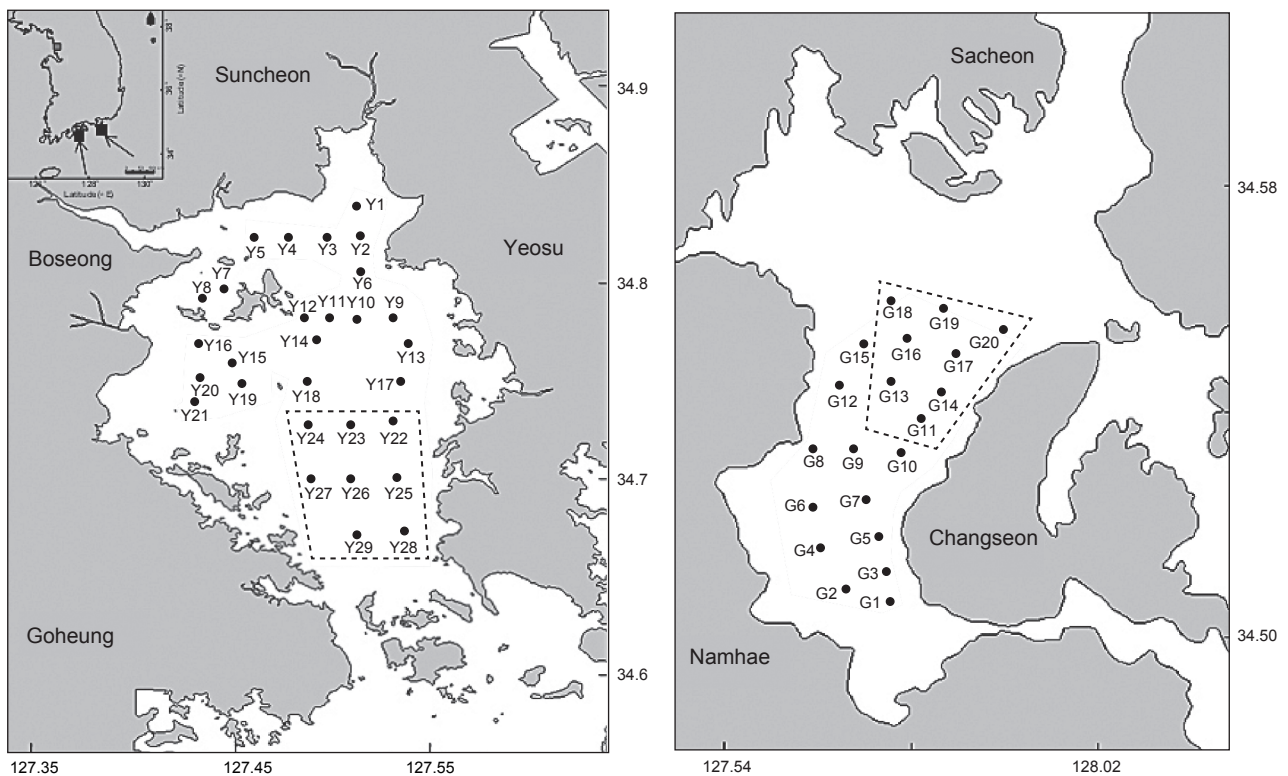


Fig. 1. Sampling locations of sediments and porewater from Yeoja Bay (left) and Gangjin Bay (right), Korea. The rectangles indicate reference sites without farming activities.

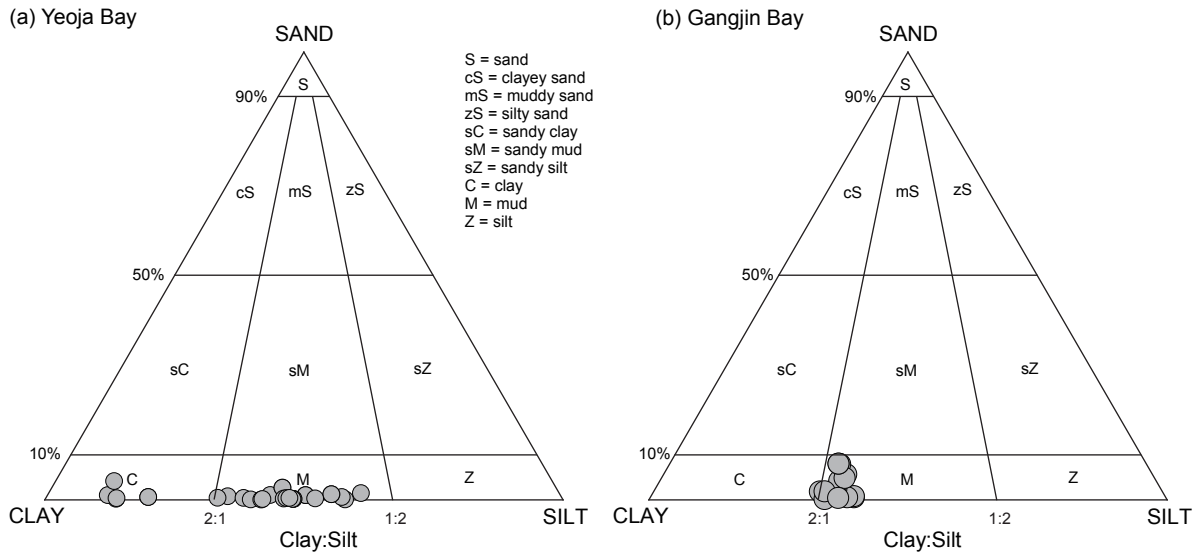


Fig. 2. Grain size of sediments from (a) Yeolja Bay and (b) Gangjin Bay of Korea

## 시료채취 및 분석

여자만은 2012년 5월과 9월에 각각 29개 정점에서, 강진만은 7월과 9월에 각각 20개 정점에서 표층퇴적물(~4 cm)을 채취하였다. 패류양식어장(farm)과 양식활동이 없는 해역(reference)을 구분하여 시료를 채취하였고, 여자만은 고막류 양식해역(Y1-Y21)과 비양식해역(Y22-29), 강진만은 고막류 양식해역(G1-G11), 굴 양식해역(G12, G15), 비양식해역(G13, G14, G16-G20)으로 구분하였다. 퇴적물 시료는 표면적 0.05 m<sup>2</sup>의 van Veen grab을 사용하여 채집한 후 polyethylene병에 넣은 후 냉동보관하였다. 저서환경 특성을 파악하기 위해 표층퇴적물에 대해 입도(grain size), 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand; COD), 강열감량(ignition loss; IL), 산화발성황화합물(acid volatile sulfide; AVS), 총유기탄소(total organic carbon; TOC), 총질소(total nitrogen; TN)를 분석하였고, 공극수중 암모니아 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)와 질산 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)도 분석하였다. 퇴적물의 독성도를 파악하기 위해 퇴적물의 유기용매 추출액에 대해 발광미생물의 발광저해도를 조사하였다. 입도, COD, IL, AVS, 발광미생물의 발광저해도의 분석은 해양환경 공정시험기준(MLTM, 2010)에 따라 수행하였다.

퇴적물내TOC 및 TN는 냉동 건조시킨 퇴적물 시료 0.5 g을 유리 vial에 넣고 1 N HCl 10 mL를 첨가하여 탄산염을 제거하고, 70°C에서 24시간 동안 수분과 잔류염소를 날려 보냈다. 전처리된 시료는 105°C에서 2시간 건조시키고, 상온에서 2시간 방치한 후 주석박막으로 3-5 mg의 시료를 CHN 원소분석기(Perkin Elmer, model 2400)로 분석하였다(Yoon et al., 2009a; Jung et al., 2011, 2012).

공극수시료는 표층퇴적물 채취와 동시에 현장에서 Rhizon sampler를 이용하여 퇴적물내 공극수를 추출하고 분석전까지

냉동보관하였다(Hwang et al., 2012). 공극수는 증류수로 희석한 다음 영양염 자동측정기(Seal Analytical GmbH, Model Quatro)를 사용하여 질소계 영양염류인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N를 측정하였다.

## 통계분석

여자만과 강진만의 조사자료의 정규분포 검정은 Kolmogorov-Smirnov와 Shapiro-Wilk test를 이용하여 추정하였고, 조사자료에 대한 농도값의 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

2012년 5월에 여자만 29개 정점에서 채취한 표층퇴적물의 퇴적상은 Fig. 2에 나타내었다. 여자만에서 니질(clay+silt)함량은 95.8-100%(평균 99.2%)이었으며, 평균입도는 7.61-10.1 Ø(평균 8.75 Ø)를 보였다. 여자만의 서부해역(Y15, Y16, Y19-Y21)에서 8.00 Ø이하의 평균입도(7.61-7.99 Ø)를 나타내었고, 만입구인 남부해역(Y25-Y29)에서 10.0 Ø 정도 평균입도(9.93-10.1 Ø)로 극 세립질 퇴적물이 우세하였다.

2012년 7월 강진만 20개 정점에서 채취한 표층퇴적물의 니질함량은 82.7-99.9%(평균 95.8%)이었으며, 평균입도는 7.54-9.12 Ø(평균 8.70 Ø) 보였다. 강진만의 서부해역(G6, 7.54 Ø)과 만내측(G1, 9.12 Ø)을 제외하고, 평균입도는 8.00-9.00 Ø 범



위로 균일하였다 (Fig. 2). 두 해역은 비교적 세립질 퇴적물이 우세하게 분포하는 저에너지 환경으로 생각할 수 있다. 고막류에 대한 해수양식장 적지조사의 입도 기준은 니질함량 80% 이상으로 고막류는 세립질 퇴적물을 선호하며(NFRDI, 2008), 여자만과 강진만의 퇴적물 입도는 적지조사기준을 모두 만족하는 수준이었다.

Table 1은 패류양식어장을 포함한 우리나라 연안에서 퇴적물의 평균입도를 나타내었다. 여자만과 강진만은 굴, 진주담치 등 수하식 패류양식어장이 형성되어 있는 가막만과 고성-자란만(MIFAFF, 2009)에서 조사된 결과와 유사한 수준이었다. 반면, 서해안 조간대인 영광-무안(Hwang et al., 2010), 압해도(Hwang et al., 2011), 신안(Hwang and Kim, 2011)과 제주도(Hwang et al., 2012)에 비해 여자만과 강진만은 세립질이었으며, 산업적으로 발달되어 산업폐수와 생활하수의 유입이 많은 시화호(Choi et al., 2010a), 울산만(Yoon et al., 2009a), 부산항(Jung et al., 2011)보다도 세립질 퇴적물로 이루어져 있었다. 이와 같은 결과는 여자만과 강진만이 세립한 퇴적물을 공급할 수 있는 하천이 발달되어 있고, 반폐쇄성 내만의 특성을 가지고 있어 세립한 퇴적물이 외해로 빠져 나가지 않기 때문으로 판단된다(Choi et al., 2007; Kim et al., 2011).

## 유기물오염

저서환경에서 퇴적물에 유기물 축적을 나타내는 지표인 COD, IL, AVS, TOC, TN를 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. 표층퇴적물내 COD농도는 여자만에서 3.67-22.4 mg/g-dry (평균 10.4 mg/g-dry), 강진만에서 11.5-23.2 mg/g-dry (평균 17.0 mg/g-dry)이었다. 일본의 퇴적물 오염기준 20 mg/g-dry (Lee and Yu, 2000)를 초과하는 농도는 여자만 Y24 정점과 강진만 G4, G5, G7, G9로 대부분 만 중앙해역에서 조사되었다. 여자만에서 COD는 5월(평균 9.30 mg/g-dry)에 비해 9월(평균 11.6 mg/g-dry)에 크게 증가한 반면( $P<0.05$ , Fig. 3), 강진만에서 COD 농도는 7월(평균 16.5 mg/g-dry)과 9월(평균 18.1 mg/g-dry)에 유의한 차이를 보이지 않았다. 9월 COD 농도는 여자만보다 강진만에서 두 배 정도 높은 오염도를 보였다( $P<0.05$ ). Table 1에서 보듯이, 여자만의 COD(평균 10.4 mg/g-dry)는 패류양식시설(굴, 담치 등 대부분 수하식 양식어장)이 밀집한 해역인 남해안의 고성-자란만(평균 16.8 mg/g-dry), 가막만(평균 18.7 mg/g-dry), 마산만(평균 21.1 mg/g-dry), 진해만(평균 29.3 mg/g-dry), 거제-한산만(평균 31.4 mg/g-dry)의 결과보다 낮은 수준이었다. 강진만의 COD(평균 17.3 mg/g-dry)는 패류양식시설 밀집 해역중 가막만 및 고성-자란만의 결과와 유사한 수준이었으나, 거제-한산만, 진해만, 마산만보다 낮은 수준이었다.

표층퇴적물내 AVS 농도는 여자만에서 불검출-0.55 mg/g-dry (평균 0.13 mg/g-dry), 강진만에서 0.02-0.66 mg/g-dry (평균 0.22 mg/g-dry)이었다. 일본의 퇴적물 오염기준 0.2 mg/g-dry

(Lee and Yu, 2000)를 초과한 농도는 여자만 58개 시료중 12개, 강진만은 40개 시료중 21개에서 조사되었고, 2회 조사에서 모두 초과한 정점은 여자만 Y1, Y2, Y3, Y10, 강진만 G1, G2, G3, G4, G5, G7, G9, G10 정점으로 만 내측에서 조사되었다. 여자만의 표층퇴적물에서 AVS는 5월(평균 0.13 mg/g-dry)과 9월(평균 0.12 mg/g-dry)에 유사한 수준이었고, 강진만에서 AVS도 7월(평균 0.21 mg/g-dry)과 9월(평균 0.29 mg/g-dry)에 유사한 수준이었다(Fig. 3). 9월 퇴적물내 AVS의 평균농도는 여자만(0.12 mg/g-dry)보다 강진만(0.29 mg/g-dry)에서 두 배나 높았다( $P<0.05$ ). AVS의 농도는 두 해역에서 모두 월별 차이가 없었지만, 두 해역간 농도차이는 존재하였다. 여자만과 강진만내 AVS 평균 농도(0.13과 0.25 mg/g-dry)는 패류양식어장을 포함한 해역중 고성-자란만(0.08 mg/g-dry), 거제-한산만(0.13 mg/g-dry), 가막만(0.30 mg/g-dry)과 유사한 수준이었지만, 마산만(0.49 mg/g-dry), 진해만(0.66 mg/g-dry)보다는 매우 낮은 수준이었다(Table 1). 반면, 서해안 조간대에서 대부분의 정점에서 검출되지 않는 것과 비교해 여자만과 강진만은 높은 수준이었다.

표층퇴적물내 IL함량은 여자만에서 3.10-6.34% (평균 5.00%), 강진만에서 4.93-7.94% (평균 6.67%)이었다. IL 평균값 이상을 보인 정점은 여자만에서 Y1-Y5, Y10, Y13, Y22, Y23, Y26이었고, 9월 강진만에서 거의 모든 조사정점 20개중 19개에서 IL 평균값이상을 초과하였다. 여자만의 표층퇴적물에서 IL은 5월(평균 5.15%)과 9월(평균 4.84%)에 유사한 수준이었지만, 강진만에서 IL은 7월(평균 5.82%)에 비해 9월(평균 7.37%)에 크게 증가하였다( $P<0.05$ ). 9월 퇴적물내 IL은 여자만보다 강진만에서 크게 높았다( $P<0.05$ ). IL 함량은 강진만에서 월별 차이가 있었고, 두 해역간 농도차이도 존재하였다. 여자만과 강진만에서 IL의 평균농도(5.0과 6.6%)는 패류양식어장을 포함한 해역중 가막만(6.5%)과 고성-자란만(7.2%)과 유사하였고, 거제-한산만(8.0%), 마산만(8.0%), 진해만(9.7%)보다 낮은 수준이었다.

표층퇴적물내 TOC 농도는 여자만에서 4.25-12.1 mg/g-dry (평균 8.38 mg/g-dry), 강진만에서 8.95-16.3 mg/g-dry (평균 13.0 mg/g-dry)이었다. Hyland et al. (2005)가 제안한 대형저서동물군집에 영향을 줄 수 있는 TOC 35 mg/g-dry와 Yokoyama et al. (2004)가 제안한 어류양식장 주의구역(warning zone) 농도 20 mg/g-dry를 초과하는 정점은 본 연구에서 조사되지 않았다. 반면, 캐나다 온타리오주의 표층퇴적물중 TOC의 악영향 최소농도 10 mg/g-dry (Lee and Yu, 2000)을 초과한 시료는 여자만 내측(Y1, Y2, Y3)에서, 강진만은 거의 모든 정점(40개 시료중 34개)에서 조사되었다. 여자만의 표층퇴적물에서 TOC는 5월(평균 8.56 mg/g-dry)과 9월(평균 8.19 mg/g-dry)에 유사한 반면, 강진만에서 TOC는 7월(평균 10.8 mg/g-dry)에 비해 9월(평균 14.4 mg/g-dry)에 크게 증가하였다( $P<0.05$ ). 9월 퇴적물내 TOC 평균농도는 여자만(8.19 mg/g-dry)보다 강진만(14.4 mg/

Table 1. Comparison of concentrations of mean grain size (Mz), COD, IL, AVS, TOC, and TN in sediments from Korean coastal waters

Sampling area	Type	Sampling period	Mz ( $\phi$ )	COD (mg/g-dry)	IL (%)	AVS (mg/g-dry)	TOC (mg/g-dry)	TN (mg/g-dry)	Reference
Yeonggwang-Muan Coast	Intertidal flat		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	Intertidal flat		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 Coast	Intertidal flat		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	Intertidal flat	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)
Shihwa Lake	Industrial and urbanized bay	2008		3.9-25.8 (11.5)	1.7-7.8 (4.5)	0.01-2.72 (0.44)	2.2-22.6 (8.7)	0.21-2.96 (1.04)	Jung et al. (2012)
Ulsan Bay	Industrial and urbanized bay	2006	4.6-7.2 (6.5)			0.03-0.15 (0.09)	12.0-26.0 (17.0)		Yoon et al. (2009)
Busan Bay	Industrial and urbanized bay	2007	6.0-7.4 (7.1)			ND-4.86 (0.51)	3.0-35.0 (16.0)		Jung et al. (2011)
Gamak Bay	Shellfish farming area	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	Shellfish farming area	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	Shellfish farming area	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	Shellfish farming area	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	Shellfish farming area	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	Shellfish farming area	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)	This study
Gangjin Bay	Shellfish farming area	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)	This study

g-dry)에서 약 두 배 높은 수준을 보였다( $P<0.05$ ). TOC 농도는 IL 함량과 같이 강진만에서 월별 차이가 있었고, 두 해역간 농도차이도 존재하였다. TOC 농도의 경우, 여자만과 강진만(8.4와 12.6 mg/g-dry)은 가막만(13.3 mg/g-dry), 고성-자란만(14.5 mg/g-dry)과 유사한 수준이었지만, 마산만(17.0 mg/g-dry), 진해만(27.7 mg/g-dry)보다 크게 낮은 수준이었다(Table 1).

표층퇴적물내 TN 농도는 여자만에서 0.55-1.45 mg/g-dry (평균 1.09 mg/g-dry), 강진만에서 1.35-2.20 mg/g-dry (평균 1.73 mg/g-dry)이었다. 여자만의 표층퇴적물에서 TN은 5월(평균 1.07 mg/g-dry)과 9월(평균 1.10 mg/g-dry)에 유사한 수준이었지만, 강진만에서 TN은 7월(평균 1.58 mg/g-dry)에 비해 9월(평균 1.86 mg/g-dry)에 증가하였다( $P<0.05$ ). 9월 퇴적물내 TN 평균농도는 여자만(1.10 mg/g-dry)보다 강진만(1.86 mg/g-dry)에서 약 두 배 높은 수준이었고, 유의한 수준의 차이를 보였다( $P<0.05$ ). TN 농도는 TOC와 IL 함량과 함께 강진만에서 월별 차이가 있었고, 두 해역간 농도차이도 존재하였다. 여자만과 강진만에서 TN 농도(1.09와 1.72 mg/g-dry)도 가막

만(1.64 mg/g-dry)과 유사한 수준이었지만, 거제-한산만(2.43 mg/g-dry), 마산만(2.54 mg/g-dry), 진해만(3.69 mg/g-dry)보다 매우 낮은 수준이었다.

퇴적물에서 높은 COD, IL, TOC, TN 농도값을 보인 정점들은 높은 AVS 값을 나타내었다( $r=0.605-0.946$ ,  $P<0.05$ ). 이것은 유기물함량이 높은 퇴적환경에서는 유기물이 황산염의 환원을 촉진하여 AVS의 농도가 높아지는 것을 촉진하였기 때문이다(Como et al., 2007). 또한 이러한 환경이 해수소통의 제한을 받았을 경우 빈산소 환경이 형성되어 저서성 패류를 포함한 저서 생태계에 치명적인 영향을 줄 수 있기 때문에 저서환경 개선을 위한 노력이 필요하다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때, 여자만과 강진만 퇴적물에서 유기물 축적은 5월, 7월보다 9월에 크게 증가하고, 만 외측보다 내측에 그리고 여자만보다 강진만에 높은 경향을 보였다. 여자만과 강진만의 유기물 축적도는 서해안 조간대 해역보다 높은 수준이었고, 패류양식시설 밀집 해역중 가막만, 고성-자란만과 유사하였고, 거제-한산만, 진해만, 마산만보다는 낮은 수준이었

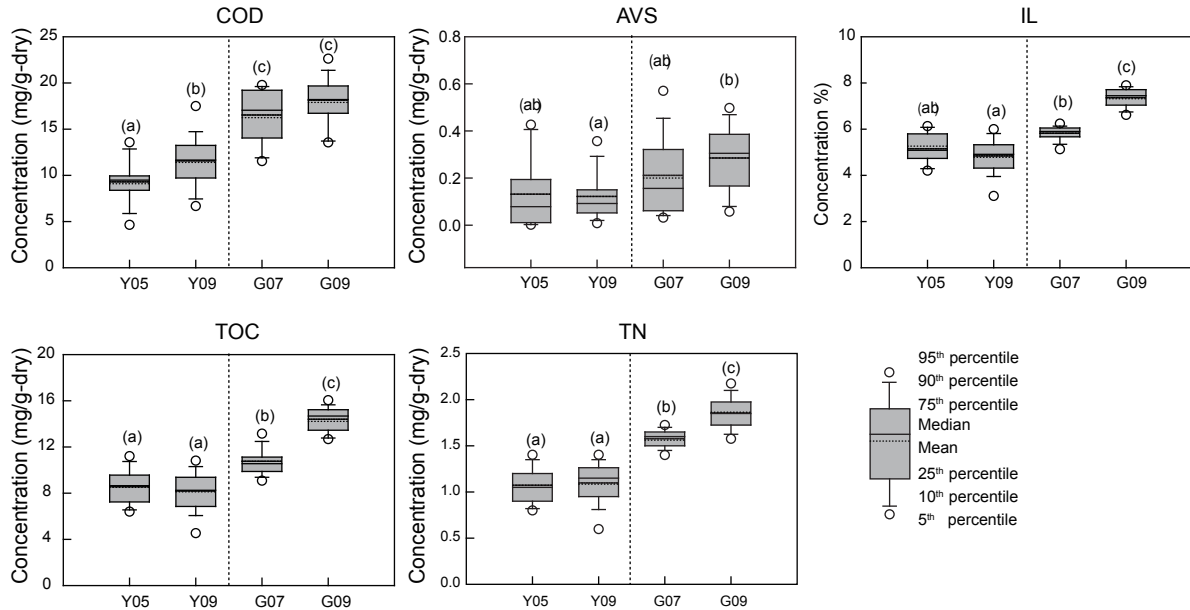


Fig. 3. Boxplots of geochemical indicators (COD, IL, AVS, TOC, and TN) in sediments from Yeolja Bay and Gangjin Bay of Korea. Y05 and Y09 indicate May and September surveys in Yeolja Bay, respectively. G07 and G09 indicate July and September surveys in Gangjin Bay, respectively.

다. 유기물 축적의 계절변화는 전복양식장에서 입자상유기물과 암모니아, 황화수소의 농도변화를 보인 Kim et al. (2011)의 연구와도 일치하는 것으로, 수온이 증가하여 양식생물의 배설량이 증가함에 따라 배설물의 퇴적(biodeposition)이 증가하여 혐기성 유기물 분해가 활발해진 것을 의미한다(Callier et al., 2006). 여자만에 비해 강진만의 퇴적물내 유기물 축적이 더 높은 경향은 1999/2000년 국립수산과학원의 조사결과와도 일치한다(NFRDI, 2002). 여자만에 비해 강진만 퇴적물내 유기물의 높은 축적은 높은 유기물 유입량, 조류 소통 등의 차이로 사료된다. 특히, 강진만은 풍수기에 남강댐의 영향으로 만 전체가 저염분 현상이 나타날 정도로 담수 유입량이 많고, 수심이 비교적 낮은 해역에서 발생하는 퇴적물의 재부유 등에 의해 높은 부영양상태가 나타난다(NFRDI, 2001).

### 공극수내 질소성 영양염류 분포

퇴적물내 박테리아는 공급된 유기물을 공극수에 들어있는 산화제(용존산소, 질산염, 황산염, 철-망간 산화물)를 이용하여 분해하고 이산화탄소, 암모니아, 황화수소, 인산염, 메탄 등을 만들어낸다. 이렇게 생성된 물질은 공극수에 남아 있어 퇴적물내에서 용존하는 화학성분의 분포와 퇴적물내 서식하는 저서미세조류나 저서동물의 분포에 매우 중요하게 작용한다(Kelderman, 1984; Hwang et al., 2008; Waska and Kim, 2011). 본 연구에서는 공극수내 질소성 영양염류의 분포를 조사하여 Fig. 4에 나타내었다.

공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 여자만에서 24.1-631  $\mu\text{M}$  (평균 176

$\mu\text{M}$ ), 강진만에서 64.3-1101  $\mu\text{M}$  (평균 278  $\mu\text{M}$ )이었다. 여자만의 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 5월(평균 111  $\mu\text{M}$ )에 비해 9월(평균 242  $\mu\text{M}$ )에 농도가 두 배 정도 증가하였고( $P<0.05$ ), 강진만에서도 7월(평균 188  $\mu\text{M}$ )에 비해 9월(평균 368  $\mu\text{M}$ )에 역시 농도가 두 배정도 증가하였다( $P<0.05$ ). 9월 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 평균농도는 여자만(242  $\mu\text{M}$ )보다 강진만(368  $\mu\text{M}$ )에서 약 1.5 배 높은 수준이었지만, 유의한 수준의 차이는 보이지 않았다( $P>0.05$ ). 표층퇴적물 공극수내  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 여자만에서 0.28-7.85  $\mu\text{M}$  (평균 1.59  $\mu\text{M}$ ), 강진만에서 0.43-7.21  $\mu\text{M}$  (평균 4.00  $\mu\text{M}$ )이었다. 여자만의 공극수내  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 5월(평균 2.36  $\mu\text{M}$ )에 비해 9월(평균 0.81  $\mu\text{M}$ )에 크게 감소하였다( $P<0.05$ ). 반면, 강진만에서  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 7월(평균 1.06  $\mu\text{M}$ )에 비해 9월(평균 6.14  $\mu\text{M}$ )에 농도가 약 6 배 증가하였다( $P<0.05$ ). 9월 공극수내  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 평균농도는 여자만(0.81  $\mu\text{M}$ )보다 강진만(6.14  $\mu\text{M}$ )에서 약 7 배 높은 수준이었다( $P<0.05$ ). 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도는 월별 해역별 차이가 뚜렷하게 나타났다.

공극수중  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도보다 크게 높았으며, 여자만에서 24-781배(평균 246), 강진만에서 10-178배 (평균 153) 높은 수준을 보였다.  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 환원환경에서 유기물 분해과정에서 산소대신 산화제로 소비되어 감소하고 탈질산화에 의해  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도를 증가시킨다. 반면, 퇴적물내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 산화환경에서 산소를 소비하면서 질산화과정을 통해 감소하고  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  농도를 증가시킨다(Slomp and Cappellen, 2004; Giles et al., 2006). 따라서, 여자만과 강진만에서  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 높은 농도는 환원퇴적환경으로  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 소비되어  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 크게 증가한 결과로 판단된다. 여자만과 강진만은 이미 언급한 것과 같



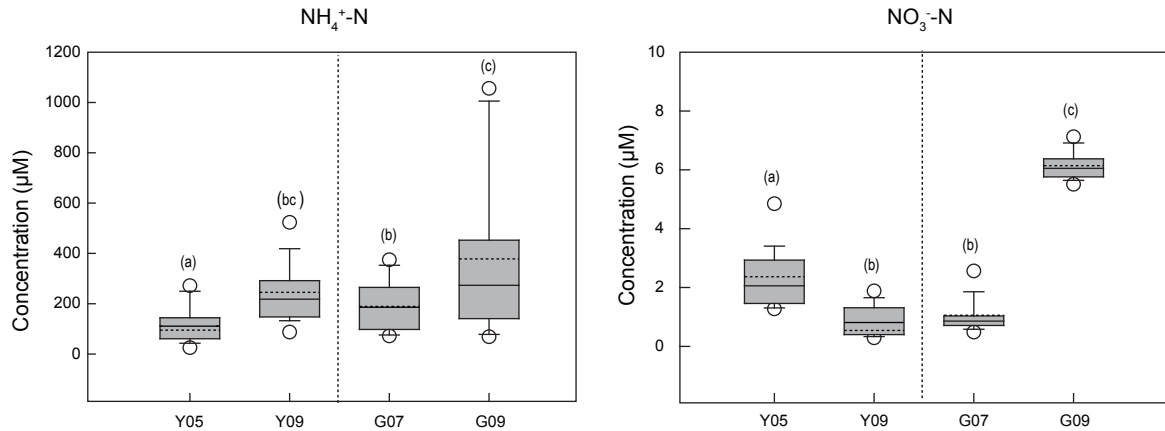


Fig. 4. Boxplots of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in porewater from Yeolja Bay and Gangjin Bay of Korea. Y05 and Y09 indicate May and September surveys in Yeolja Bay, respectively. G07 and G09 indicate July and September surveys in Gangjin Bay, respectively.

이 매우 세립한 퇴적물을 가지고 있으며, 이것은 또한 표층퇴적물내 탈질산화율을 증가시키는 것으로 알려진다. Na and Lee (2005)는 강화도 갯벌에서 퇴적물의 입도가 세립할수록 퇴적물내 산소투과율이 낮아져 탈질산화율의 증가를 보고하였다. 본 연구에서 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 퇴적물중 유기물 축적 지표(COD, AVS, IL, TOC, TN)와 양의 상관성을 보이고( $r=0.255-0.833$ ), 그 중에서 AVS와 가장 높은 상관성(여자만,  $r=0.563$ ; 강진만,  $r=0.833$ ,  $P<0.05$ )을 보여서 두 해역에서 환원퇴적환경을 잘 반영한다. 최근에는 현장에서 benthic chamber를 이용하여 퇴적물-수층 경계면의 물질순환에 관한 연구(Lee et al., 2010; 2012)가 진행되고 있으며, 또한 퇴적물내 황산염 환원과 철 환원에 의한 유기물분해 특성 연구(Kim et al., 2011)가 활발히 이루어지고 있어 향후 여자만과 강진만의 양식어장 퇴적물내 산화환원 환경내에서 유기물 분해 및 영양염 변화 등에 대한 보다 심도 있는 생지화학적 연구의 진행이 필요하다.

### 퇴적물 독성도

표층퇴적물내 유기물 축적이 생물에 미치는 영향을 평가하기 위해 퇴적물의 유기용매 추출액에 대한 발광미생물의 발광저해도를 조사하였다. 발광미생물에 대한 50% 영향농도 (effective concentration 50; EC50)는 여자만 10-85 mg/mL (평균 29 mg/mL), 강진만 0.7-70 mg/mL (평균 26 mg/mL)로 두 해역에서 유사한 수준의 독성도를 보였고, 월별로도 유사한 수준이었다( $P<0.05$ ). EC50은 만내측에서 평균보다 낮은 값들을 보였고, 외측에 비해 내측에서 높은 독성도를 나타내었다. Long et al. (2002)은 발광미생물 발광저해도 EC50의 임계값으로 0.51 mg/mL와 0.06 mg/mL를 제안하였다. 이 값들은 각각 미해양기상청(National oceanic atmospheric administration)의 Microtox database ( $n=1013$ )의 80%, 90%의 하위값으로 퇴적물 독성도 수준을 파악하는데 도움을 준다. 여자만과 강진만에서 조사된 EC50은 0.51과 0.06 mg/mL에 비해 높은 값으로 비교

적 낮은 독성도를 보였다. 반면 9월 강진만 G8정점에서 EC50이 0.7로 NOAA의 80%의 하위값 0.51에 근접한 값을 보였다. 국내 해양퇴적물에 대해 보고된 발광미생물의 EC50 결과와 비교할 때, 여자만과 강진만은 산업화된 연안인 마산만(0.01-0.09 mg/mL; Choi et al., 2010a)과 시화호(0.02-0.06 mg/mL; Choi et al., 2010a), 하수처리장 해양배출구 인근 퇴적물(0.01-0.15 mg/mL; Choi et al. 2010b)에 비해 1/1000 수준의 비교적 낮은 독성도를 보였고, 군산연안의 결과(0.4-24 mg/mL; Lee et al., 2012)와 유사한 수준인 것으로 나타났다.

퇴적물 독성도와 퇴적물내 유기물 축적 지표(COD, AVS, IL, TOC, TN), 공극수중  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 과의 상관계수를 Table 2에 나타내었다. 퇴적물 독성도(EC50)는 모든 성분들과 음의 상관성( $r=-0.223\sim-0.518$ )을 보였고 통계적으로 유의한 수준이었다( $P<0.05$ ). 이것은 퇴적물의 유기물 축적, 환원환경이 증가할수록 퇴적물의 독성도가 높아진다는 것을 의미한다. EC50과 높은 상관계수를 보인 성분은 퇴적물내 AVS ( $r=-0.518$ ), 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  ( $r=-0.430$ ) 이었으며, COD, IL, TN, TOC 순이었다. 퇴적물내 황화합물(sulfide)과 공극수의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 부영양화 환경에서 유기물 분해과정에서 주로 발생하며, 특히 황화합물은 황환원의 최종산물로 황화합물을 이용하지 않는 생물에게 맹독성을 띄게 되므로 퇴적물 독성도에 매우 큰 영향을 줄 수 있다(Wang and Champan, 1999; Como et al., 2007). Choi et al. (2010a)도 퇴적물의 독성도와 퇴적물내 오염물질중 AVS와 가장 좋은 상관성( $r=-0.713$ ,  $P<0.01$ )을 보고하였다. 우리나라 남해연안 전복양식장 퇴적물에서 유기물 분해 특성을 조사한 결과에서도 양식생물의 배설물이 증가하여 저층퇴적물로 유입되는 유기물의 양이 증가하며 황산염 환원 과정에서 생산된 황화수소와 암모니아의 독성으로 인한 영향에 대해 보고되었다(Kim et al., 2011). 따라서 저서환경 모니터링시 퇴적물내 AVS와 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 저서환경의 유기물 축적뿐만 아니라 퇴적물의 독성도에 대한 정보를 제공하는 좋은 오염지표로 활용

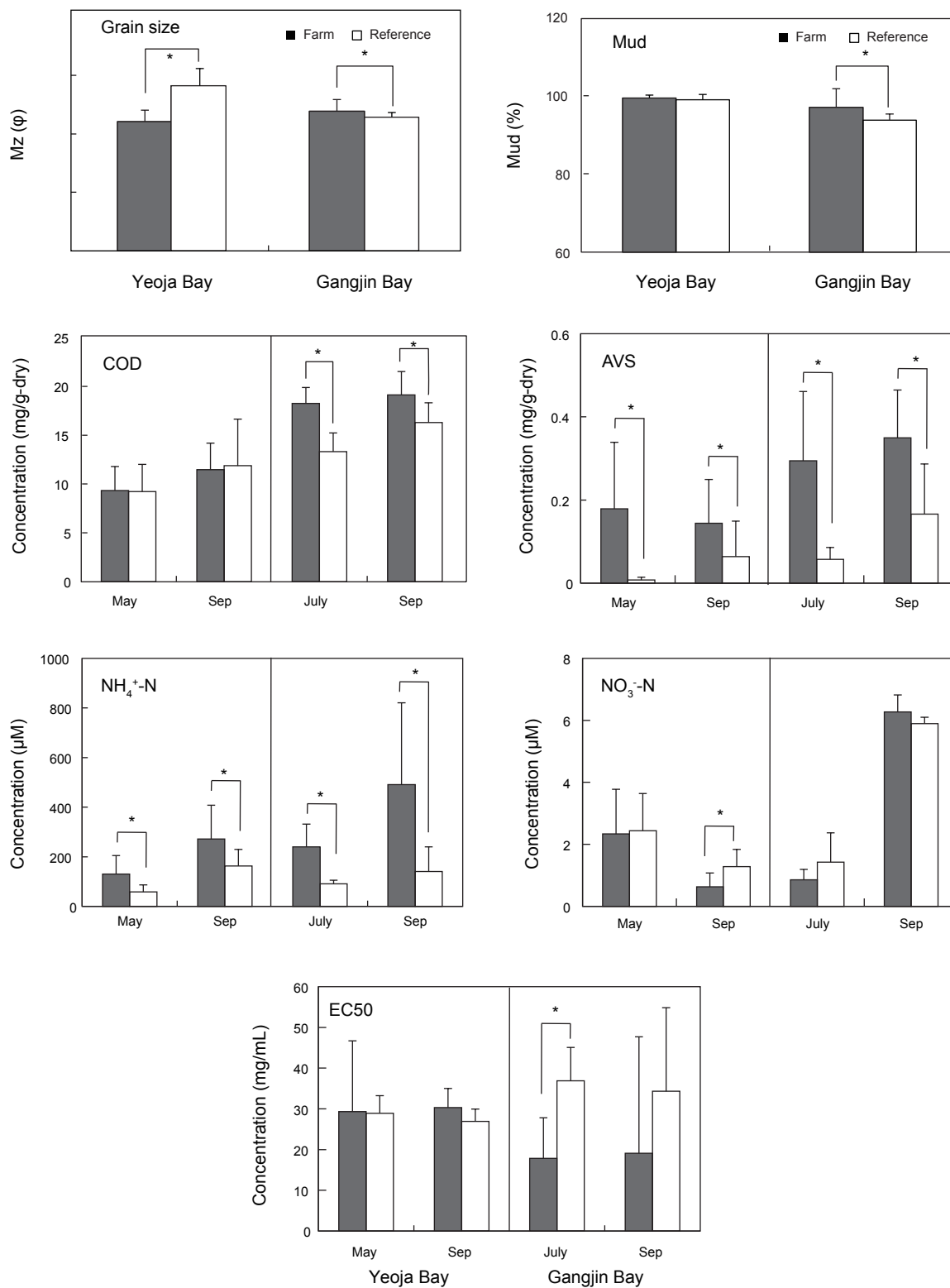


Fig. 5. Mean ( $\pm$  standard deviation) of grain size and mud, geochemical indicators (COD, and AVS in sediments, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in pore waters, and bioluminescence inhibition test for sediments) in shellfish farm and reference site of Yeoja Bay and Gangjin Bay of Korea. \* indicates *P*-value < 0.05.



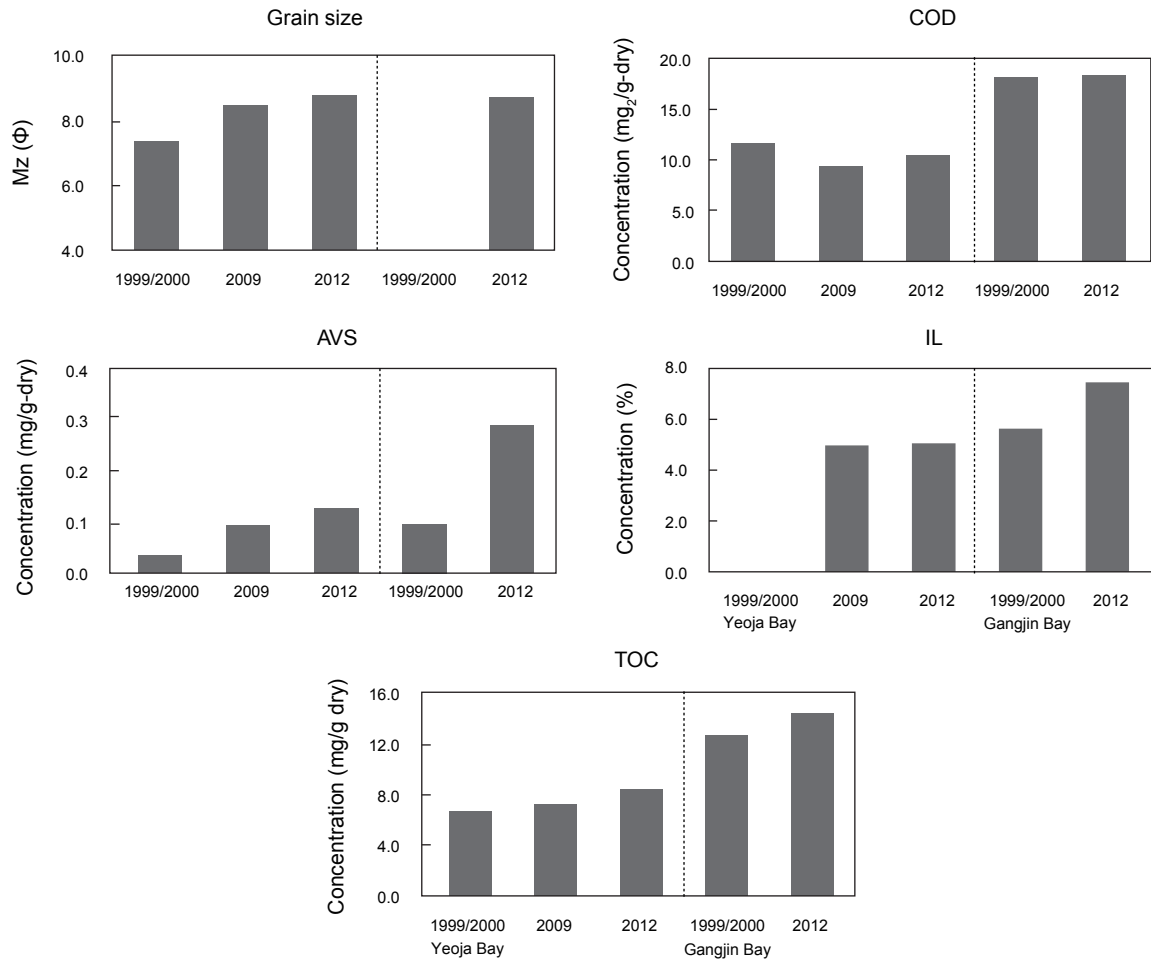


Fig. 6. Temporal variations of grain size, COD, AVS, IL, and TOC in sediments from Yeoja Bay and Gangjin Bay of Korea, and temporal trends of Ark shell production in Korean coasts. Data for 1999/2000 and for 2009 were from NFRDI (2002) and MIFAFF (2009), respectively.

될 수 있을 것으로 생각된다.

패류양식해역과 비양식해역 저서환경 비교

여자만과 강진만내 패류양식해역과 비양식해역간 저서환경의 비교결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여자만의 패류양식해역(Y1-Y21)과 비양식해역(Y22-Y29)에서 평균입도는 각각 8.42 Ø와 9.64 Ø로 비양식해역이 패류양식해역에 비해 더 세립한 퇴적물이었고( $P<0.05$ ), 강진만의 패류양식해역(G1-G12,

G15)과 비양식해역(G13, G14, G16-G20)에서 평균입도는 각각 8.77 Ø와 8.56 Ø로 패류양식해역이 더 세립한 퇴적물이었다( $P<0.05$ ). 여자만의 니질함량은 패류양식해역과 비양식해역에서 각각 99.3%와 98.9%로 유의한 차이가 없었지만( $P>0.05$ ), 강진만에서 니질함량은 각각 97.0%와 93.7%로 양식해역에서 니질함량이 더 높게 나타났다( $P<0.05$ ). 퇴적물내 COD의 경우, 여자만에서 5월과 9월에 패류양식해역과 비양식해역간 농도 차이가 없었지만, 강진만에서 7월과 9월에 패류양식해역

Table 2. Correlation of EC50 with COD, IL, AVS, TOC, and TN in sediments, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in pore water from Yeoja Bay and Gangjin Bay

		COD	AVS	IL	TOC	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
EC50	Correlation Coefficient	-0.414	-0.518	-0.364	-0.293	-0.340	-0.430	-0.223
	P-value	<0.001	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.001	0.030
	N	98	98	98	98	98	98	98

이 비양식해역에 비해 더 높게 나타났다( $P<0.05$ ). 여자만과 강진만에서 퇴적물내 AVS와 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 5월, 7월, 9월에 모두 패류양식해역이 비양식해역보다 높은 농도를 보였다( $P<0.05$ ). 반면, 퇴적물내 IL, TOC, TN은 패류양식해역과 비양식해역간에 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서 여자만은 패류양식해역과 비양식해역간에 퇴적물의 평균입도, AVS, 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도차이가 조사되었고, 강진만은 퇴적물의 평균입도 및 니질함량, AVS, COD, 공극수내  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 퇴적물 독성도에 대한 차이가 조사되었다. 외국의 경우, 어류양식장과 패류양식장에 대해 사료 또는 배설물이 양식장 아래로 퇴적되면서 퇴적속도가 빠르고, 산화-환원전위가 낮으며, 유기물함량과 저층플럭스가 높고, 저서동물의 출현 종수나 다양성이 낮아지는 것이 보고되었다(Smith and Shackley, 2004; Buschmann et al., 2006; Giles et al., 2006; Kalanntzi and Karakassis, 2006; Callier et al., 2007; Hargrave et al., 2008; Cranford et al., 2009). 국내에서도 어류, 굴, 전복양식에 따라 황화수소와 암모니아농도 증가와 황산염 환원을 감소, 저서동물의 종수와 다양성 감소가 보고된 바 있다(Jung et al., 2007; Yoon et al., 2009b; Kim et al., 2011).

#### 저서환경의 시간적 변화

여자만과 강진만의 퇴적물 특성의 시간적 경향변화를 파악하기 위해 본 연구와 과거 조사자료(NFRDI, 2002; MIFAFF, 2009)와 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여자만에서 평균 입도는 7.34  $\phi$  (1999/2000년), 8.45  $\phi$  (2009년), 8.75  $\phi$  (2012년)로 증가하고 있었으며, 이는 여자만 퇴적물이 점점 세립화되고 있음을 의미한다. 여자만에서 퇴적물내 AVS도 0.04 mg/g-dry (1999/2000년), 0.09 mg/g-dry (2009년), 0.13 mg/g-dry (2012년)로 지속적으로 증가하였고, IL과 TOC도 유사한 경향을 보였다. 강진만의 경우, 1999/2000년 조사결과에 비해 2012년의 AVS, IL, TOC의 농도는 각각 200%, 32%, 14% 증가하였다. 따라서 2012년 여자만과 강진만 퇴적물내 유기물 함량이 점점 증가하고 있는 것으로 보인다. 이러한 결과는 연간 17,000톤의 담치(*Mytilus edulis*)를 생산하는 캐나다 Prince Edward Island의 퇴적물에서 TOC, 산화-환원 전위, 황화합물의 농도가 1997년에 비해 2001년에 크게 증가를 보고한 연구결과와도 일치하는 것이다(Cranford et al., 2009). 이는 유속이 약하거나 수심이 상대적으로 얇은 연안어장에서 생물학적 침적물은 쉽게 퇴적되어 퇴적물 혐기화를 가속시키고, 결과적으로 저서생물의 군집까지 영향을 주게 되어 어장환경의 잠재적인 위해도를 증가시키고 어장의 생산력에도 영향을 주게 된다(Smith and Shackley, 2004; Callier et al., 2007; Hargrave et al., 2008). 많은 패류양식장들이 환경에 내성이 강한 양식품종으로 바뀌고 있으며, 강진만도 내성이 상대적으로 약한 피조개 대신 새고막의 입식량을 증가시키고 있다. 어업생산통계(MIFAFF, 2013)에 따르면, 전국연안에 피조개 생산량은 2000년 10,618

톤, 2001년 7,359톤, 2002년 4,745톤으로 점차 감소하여 2008년부터 2,000톤이하로 감소한 상황이다. 따라서 패류양식 생산량을 유지 및 증가시킬 수 있는 저질환경개선 노력이 필요하며, 아울러 퇴적물내 유기물 자가오염을 줄일 수 있는 적절한 양식관리방안도 요구된다.

## 사 사

본 연구는 국립수산과학원(RP-2013-ME-33)의 연구지원에 의해 수행되었습니다. 시료채취와 분석에 도움을 준 이재환, 박환희, 김청숙, 예미주 연구원에게 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- Beadman HA, Kaiser MJ, Galanidi M, Shucksmith R and Willocks RI. 2004. Changes in species richness with stocking density of marine bivalves. *J Applied Ecol* 41, 464-475. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0021-8901.2004.00906.x>.
- Buschmann AH, Riquelme VA, Hernandez-Gonzalez MC, Varela D, Jimenez JE, Henriquez LA, Vergara PA, Guinez R and Filun L. 2006. A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. *ICES J Mar Sci* 63, 1338-1345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.04.021>.
- Callier MD, Weise AM, McKindsey CW and Desrosiers G. 2006. Sedimentation rates in a suspended mussel farm (Great-Entry Lagoon, Canada): biodeposit production and dispersion. *Mar Ecol Prog Ser* 322, 129-141. <http://dx.doi.org/10.3354/meps322129>.
- Callier MD, McKindsey CW and Desrosiers G. 2007. Multi-scale spatial variations in benthic sediment geochemistry and macrofaunal communities under a suspended mussel culture. *Mar Ecol Prog Ser* 348, 105-115. <http://dx.doi.org/10.3354/meps07034>.
- Choi JM, Lee YG and Han JW. 2005. Seasonal and spatial variations of tidal flat sediments in Yeolja Bay, South Coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 26, 253-267.
- Choi JM, Woo HJ and Lee YG. 2007. Suspended sediments influx and variation of surface sediments composition in semi-enclosed bay – Spring season in Yeolja Bay, South Coast of Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engineer* 10, 1-12.
- Choi M., Kim SG, Yoon SP, Jung RH, Moon HB, Yu J and Choi HG. 2010a. Sediment toxicity of industrialized coastal areas of Korea using bioluminescent marine bacteria. *Fish Aqua Sci* 13, 244-253. <http://dx.doi.org/10.5657/fas.2010.13.3.244>.
- Choi M, Park Y, Moon HB, Yoon SP, Jung RH, Yu J and Choi HG. 2010b. Bioluminescence Inhibition Test (*Vibrio fischeri*) for Surface Sediments from Wastewater Treatment Plant Effluent Outfall Area. *J Kor Soc Environ Anal* 13, 92-98.
- Cho YS, Hong SJ, Park SE, Jung RH, Lee WC and Lee SM.

2010. Application of Ecological indicator to sustainable use of oyster culture grounds in Geoje-Hansan Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 16, 21-29.
- Como S, Magni P, Casu D, Floris A, Giordani G, Natale S, Fenzi GA, Signa G and Falco GD. 2007. Sediment characteristics and macrofauna distribution along a human-modified inlet in the Gulf of Oristano (Sardinia, Italy). *Mar Pollut Bull* 54, 733-744. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.01.007>.
- Cranford PJ, Hargrave BT and Doucette LI. 2009. Benthic organic enrichment from suspended mussel (*Mytilus edulis*) culture in Prince Edward Island, Canada. *Aquaculture* 292, 189-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.04.039>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.02.038>.
- Giles H, Pilditch CA and Bell DG. 2006. Sedimentation from mussel (*Perna canaliculus*) culture in the Firth of Thames, New Zealand: Impacts on sediment oxygen and nutrient fluxes. *Aquaculture* 261, 125-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.04.039>.
- GNDI (Gyung Nam Development Institute). 2012. Strategy for enhancement of shellfish farming in Gyungnam province. GNDI, Changwon. Korea. 1-8.
- Hargrave BT, Doucette LI, Cranford PJ, Law BA and Milligan TG. 2008. Influence of mussel aquaculture on benthic organic enrichment in a nutrient-rich coastal embayment. *Mar Ecol Prog Ser*, 365, 137-149. <http://dx.doi.org/10.3354/meps07636>.
- Hwang DW, Kim G and Yang HS. 2008. Active exchange of water and nutrients between seawater and shallow pore water in intertidal sandflats. *Ocean Sci J* 43, 223-232. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03029926>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2010.43.2.146>.
- 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, 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, 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. *Kor 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. <http://dx.doi.org/10.3354/meps295091>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2003.36.6>.
- 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. [http://dx.doi.org/10.3354/S0022-0981\(01\)00278-7](http://dx.doi.org/10.3354/S0022-0981(01)00278-7).
- Jung RH, Yoon SP, Kwon JN, Lee JS, Lee WC, Koo JH, Kim YJ, Oh HT, Hong SJ and Park SE. 2007. Impact of fish farming on macrobenthic polychaete communities. *J Kor Soc Oceanogr -The Sea* 12, 159-169.
- Jung RH, Yoon SP, Kim YJ, Choi M and Lee WC. 2011. Spatio-temporal distributions of polychaete communities and benthic environmental characteristics of the harbor area of Busan Port, Korea. *J Kor Soc Oceanogr -The Sea* 16, 125-138.
- Jung RH, Choi M, Yoon SP, Lee WC and Choi HG. 2012. Polychaete community structure from Inshore and offshore of Lake Shihwa (Korea) in March, 2008. *Kor J Fish Aquat Sci* 45, 56-65. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2012.0056>.
- Kalantzi I and Karakassis I. 2006. Benthic impacts of fish farming: meta-analysis of community and geochemical data. *Mar Pollut Bull* 52, 484-493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.034>.
- Kelderman P. 1984. Nutrient concentration in the interstitial water of lake Grevelingen redistribution and benthic primary production processes. *Neth J Sea Res* 18, 312-336. [http://dx.doi.org/10.1016/0077-7579\(84\)90008-5](http://dx.doi.org/10.1016/0077-7579(84)90008-5).
- Kim B, Choi A, An S, Kim HC, Jung RH, Lee WC and Hyun JH. 2011. Rates of sulfate reduction and iron reduction in the sediment associated with abalone aquaculture in the Southern coastal waters of Korea. *Ocean Pol Res* 30, 435-445. <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2011.33.4.435>.
- Kim HC, Lee WC, Kim JG, Hong SJ, Kim KM, Cho YS, Park SE and Kim JH. 2011. Assessment of permissible inflow load for water quality management in Yeolja Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 17, 345-356. <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.4.345>.
- Lee CH and Yu HJ. 2000. Establishment of environmental quality guidelines for surface sediments. Korea Environment Institute. Seoul, Korea. 1-150.

- 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. <http://dx.doi.org/10.5332/JES.2008.17.7.755>.
- Lee J. 2012. Bacteriological characteristics of ark shells from Yeoja Bay, Korea. Master's thesis. Chonnam National University. Yeosu, Korea. 1-59.
- Lee JS, Bahk KS, Khang BJ, Kim YT, Bae JH, Kim SS, Park JJ and Choi OI. 2010. The development of a benthic chamber (Belc J) for benthic boundary layer studies. *J Kor Soc Oceanogr -The Sea* 15, 41-50.
- Lee JS, Kim KH, Shim JH, Han JH, Choi YH and Khang BJ. 2012. Massive sedimentation of fine sediment with organic matter and enhanced benthic-pelagic coupling by an artificial dyke in semi-enclosed Chonsu Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* 64, 153-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.033>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.4.315>.
- Lee WS, Choi M, Hwang DW, Lee IS and Kim SY. 2012. Chemical contamination and toxicity of sediments from the Gunsan Coast, Korea. *Fish Aquat Sci* 15, 1-10. <http://dx.doi.org/10.5657/fas.2010.13.3.236>.
- Long ER, Dutch M, Aasen S, Welch K, Hameedi J, Magoon S, Carr RS, Johnson T, Biedenbach J, Scott KJ, Mueller C and Anderson JW. 2002. Sediment Quality in Puget Sound - Year 3 Southern Puget Sound. NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS CCMA No. 153, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD. USA.
- MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2008. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2008. Busan. Korea. 1-243.
- MIFAFF. 2009. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2009. Busan. Korea. 1-443.
- MIFAFF. 2010. Annual statistics of agriculture, forestry and fisheries in Korea. Seoul. Korea. 1-590.
- MIFAFF. 2013. Fishery production survey. Available from Fishery Information Service website (<http://fips.go.kr>).
- MLTM (Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs). 2010. Standard method for the analyses of marine pollutants, Gwacheon, Korea. 1-495.
- Na TH and Lee TS. 2005. Estimation of denitrification in the Ganghwa tidal flat by a pore water model. *J Kor Soc Oceanogr -The Sea* 10, 56-68.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2001. Development of optical technology for sustaining production in shellfish farm. Busan, Korea. 1-359.
- NFRDI. 2008. Guidelines of suitable site selection for aquaculture. Busan, Korea. 1-18.
- NFRDI. 2002. Report on environmental assessments of Korean coastal farming areas. Busan, Korea. 1-401.
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00219-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00219-7).
- 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 K, Jo MF, Kwon JY, Son KT, Lee DS and Lee TS. 2010. Evaluation of the bacteriological safety of the shellfish-growing area in Gangjinman, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 614-622. <http://dx.doi.org/10.5657/fas.2010.43.6.614>.
- Park K, Jo MF, Lee HJ, Kwon JY, Son KT and Lee TS. 2011. Evaluation of the effect of the discharged water from Bong Stream after rainfall events on the bacteriological water quality in Gangjinman, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 622-629. <http://dx.doi.org/10.5657/fas.2011.0622>.
- Slomp CP and Cappellen PV. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: Controls and potential impact. *J Hydrol* 295, 64-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.018>.
- Smith J and Shackley SE. 2004. Effects of a commercial mussel *Mytilus edulis* lay on a sublittoral, soft sediment benthic community. *Mar Ecol Prog Ser* 282, 185-191. <http://dx.doi.org/10.3354/meps282185>.
- Wang F and Chapman PM. 1999. Biological implications of sulfide in sediment - A review focusing on sediment toxicity. *Environ Toxicol Chem* 18, 2526-2532. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.5620181120>.
- Waska H and Kim G. 2011. Submarine groundwater discharge (SGD) as a main nutrient source for benthic and water-column primary production in a large intertidal environment of the Yellow Sea. *J Sea Res* 65, 103-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2010.08.001>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.06.018>.
- 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.
- Yoon SP, Jung RH, Kim YJ, Kim SG, Choi M, Lee WC, Oh HT and Hong SJ. 2009a. Macrobenthic community structure



- along the environmental gradients of Ulsan Bay, Korea. J Kor Soc Oceanogr -The Sea 14, 102-117.
- Yoon SP, Jung RH, Kim YJ, Hong SJ, Oh HT and Lee WC. 2009b. Spatio-temporal changes in macrobenthic community structure and benthic environment at an intensive oyster culturing ground in Geoje-Hansan Bay, Korea. J Kor Soc Oceanogr -The Sea 14, 213-228.
- 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 *Chalmyx farreri* in a eutrophic bay (northern China): an experimental study in semi-in situ flow-through systems. J Mar Systems 59, 143-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.002>.