

굴양식어장 밀집해역인 진해만과 거제-한산만의 퇴적물 내 유기물 분포특성

최민규* · 이인석 · 황동운 · 김형철 · 윤상필 · 윤세라 · 김청숙 · 서인수¹

국립수산과학원 어장환경과, ¹저서서생물연구센터

Organic Enrichment and Pollution in Surface Sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with Dense Oyster Farms

Minkyu Choi*, In-Seok Lee, Dong-Woon Hwang, Hyung Chul Kim, Sang-Pil Yoon, Sera Yun, Chung-Sook Kim and In-Soo Seo¹

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

¹Korea Benthos Research Center, Busan 48510, Korea

Organic enrichment and pollution was investigated in surface sediments from Jinhae Bay and Geoje-Hansan Bay of Korea, which contain the largest oyster farms in Korean coastal areas. Geochemical indicators (chemical oxygen demand, total organic carbon, ignition loss, and acid volatile sulfide) in sediments, ammonium and nitrate in pore water, and bioluminescence inhibition test for sediment extracts were analyzed. Temporal changes of organic enrichment were also investigated using sediment core samples from Geoje-Hansan Bay. The level of organic pollution in sediments from Jinhae Bay was significantly greater than that of sediments from Geoje-Hansan Bay. Compared with other sites, Jinhae Bay was one of the most polluted coastal areas of Korea. The levels of geochemical indicators in May were comparable to, or higher than, in August. Ammonium concentrations in pore water were two orders of magnitudes greater than the nitrate concentrations, suggesting that the bays are reducing environments. The concentrations of total organic carbon in core sediment samples from shellfish-farming areas increased significantly from 2000 to the present year, and it seems to be associated with increases in anthropogenic activities.

Key words: Organic matters, Oyster farm, Sediment, Pore water, Bioluminescence

서론

국내의 패류 양식은 지형적으로 경상남도과 전라남도 일원 해역을 중심으로 발달하였으며, 특히, 경상남도에서 패류 양식생산량은 2013-2015년 연평균 275천톤이고, 경상남도는 전국 생산량의 84%를 기여하였다(MOF, 2017). 경상남도 패류 어종별 양식생산량은 2013-2015년 평균 굴 237천톤, 홍합 36천톤, 그 외 기타 패류 생산량 3천톤으로 나타나 경상남도의 대표적인 패류 양식어종은 굴이다. 굴은 1990년대 초반부터 2003년까지는 연간 155천톤 내외의 일정한 생산량을 유지했으나, 2004년부터 급격히 증가하여 2007년 역대 최대 생산량인 275천톤을 기록하였고, 이후 소폭 감소하여 2010년 이후 245천톤 수준을 생산하고 있다(GNDI, 2012).

경상남도 해역은 지리적으로 패류의 안정적 성장조건을 보장

하는 내만형 어장이 형성되고 있고 먹이생물의 양이 풍부하여 영양학적인 측면에서도 상품성을 확보할 수 있는 조건을 갖춘 패류양식의 적지로 인식되었다. 하지만, 수하식 굴양식장의 경우, 40-50년이 경과한 노후화된 어장이 많고, 이로 인해 양식시설물, 양식생물의 배설물, 폐사한 양식생물의 잔해가 양식장 바닥에 퇴적되어 어장의 생산성을 크게 저해하는 원인으로 작용하고 있다(GNDI, 2012). 양식생물과 부착생물에서 배출된 분(faeces)과 의분(pseudofaeces)이 저층 퇴적물의 화학적 조성뿐만 아니라 대형저서동물의 군집변화에 영향을 주는 것으로 보고되고(Cranford et al., 2009), 수하식 양식활동이 활발한 진해만에서 양식생물과 부착생물에서 유래한 유기물이 저서환경 오염의 중요한 원인으로 보고된 바 있다(Cho, 1991; Jung et al., 2014). 굴과 홍합 양식은 수하연에 설치한 후 최소한의 관리만 할 뿐 양식장 해역의 자연생태계에 전적으로 의존하기 때문에

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0777>



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 50(6) 777-787, December 2017

Received 21 September 2017; Revised 11 October 2017; Accepted 26 October 2017

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

E-mail address: mkchoi3@korea.kr

수하식 양식어장의 환경 관리는 더욱 중요하다.

진해만과 거제-한산만은 경상남도의 굴양식 규모(3,553 ha) 중 약 60% (통영, 1,326 ha; 거제, 930 ha) 차지하는 국내 최대 규모의 굴 산지로 알려져 있다(GNDI, 2012). 굴양식장 주변에는 대단위 도시나 산업시설물이 없는 해역이긴 하나 반폐쇄성 내만에 집약적으로 양식이 이루어지고 있기 때문에 유기물 축적에 의한 환경오염이 발생할 수 있는 해역이다. 그러나, 이들 해역의 환경오염에 대한 최근 연구는 수질변동(Kwon et al., 2013, 2014)이 주를 이루고, 퇴적물 오염에 대한 연구는 임해공단이 위치한 마산만과 진해만 중심으로 수행되거나 유기물보다는 중금속 오염에 대해 주로 수행되었다(Cho and Lee, 2012; Choi et al., 2015; Hwang et al., 2015). 따라서 진해만과 거제도 주변의 굴양식장을 중심으로 퇴적물의 유기물오염도를 조사한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 진해만과 거제-한산만의 굴양식장 퇴적물 내 유기물 분포 및 오염도를 파악하기 위해 유기물 오염의 지표성분을 조사하였고, 아울러 국내 최초로 굴양식장 퇴적물에 유기물 축적에 따른 산화-환원특성 및 발광미생물을 이용한 생물영향까지 조사하였다. 유기물오염의 역사 파악을 위해 거제-한산만의 굴양식장 주상퇴적물 내 깊이 별 총유기탄소도 조사하였다.

재료 및 방법

조사해역

진해만(Fig. 1)은 참굴과 피조개 양식어장의 운영으로 패류 생산이 매우 높은 해역으로, 진해만 내 물리적으로 유속은 빠르지 않고, 유입된 오염물질이 만 입구쪽으로 이동하여 침강한 후 최종적으로 저층에서 안쪽으로 이동하여 안쪽 해역의 오염도가 축적되는 형태를 보이는 해역이다(NFRDI, 2002). 원문만은 진해만의 남서부에 위치해 있고, 원문만 일원은 수하식 패류양식이 가장 활발한 해역이다(Jung et al., 2014). 원문만을 포함한 진해만 서부해역은 복잡한 해안선을 가지는 반폐쇄적인 형태를 보이고 있고, 낮은 수심과 원활하지 못한 해수유통, 양식어장 밀집으로 인한 오염물질 증가 등으로 진해만 내에서도 오염이 매우 심각한 해역으로 분류된다(Lee et al., 2003).

거제-한산만(Fig. 1)은 경상남도의 남동부에 거제시와 통영시 부근에 위치해 있고, 남동쪽과 북서쪽에 만입구가 위치하는 반폐쇄적인 지형특성을 보이고, 수심은 화도-추봉도를 연결하는 주수로에서 약 20-40 m 내외로 깊은 편이나, 산달도 주변해역은 10 m 이내로 상대적으로 얇은 편이다. 이 해역은 1974년 수산청 고시 제15호에 의거해 참굴, 지중해담치 및 명게 등이 집약적으로 대규모 양식이 이루어지고 있다(Jung et al., 2016).

시료채취 및 분석

진해만과 거제-한산만의 표층퇴적물(-4 cm)과 공극수 시료는 2013년 5월과 8월에 패류양식 면허어장을 중심으로 각각 24

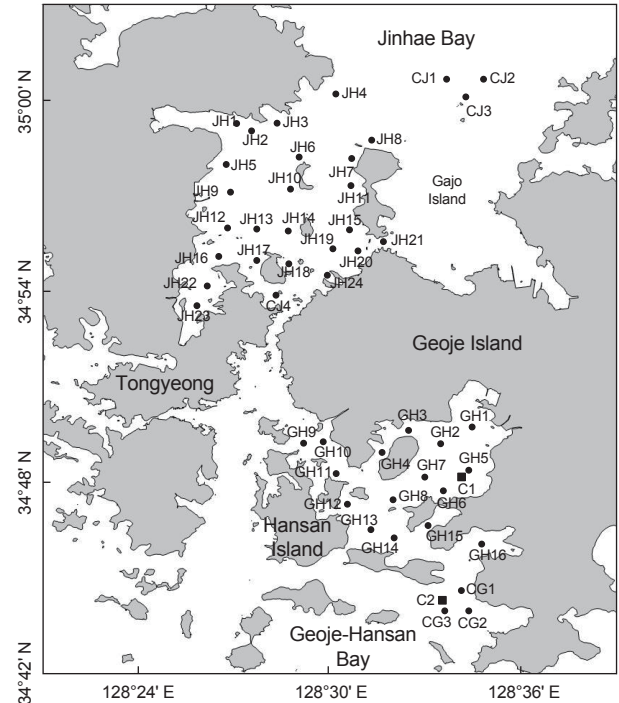


Fig. 1. Sampling locations of surface sediments and porewater from Jinhae Bay and Geoje-Hansan Bay, Korea. Core sediments were collected from C1 (shellfish farms) and C2 (control area).

개 정점(JH1-JH24)과 16개 정점(GH1-GH16)에서 채취되었다(Fig. 1). 이때 주변에 양식어장이 없는 해역을 선정하여 진해만 4개 정점(CJ1-CJ4)과 거제-한산만 3개 정점(CG1-CG3)에서 대조구(control)시료를 채취하였다. 주상퇴적물 시료는 거제-한산만에서 대규모 굴양식장(C1)과 주변에 양식장이 없는 대조구(C2)에서 채취하였다. 퇴적물 시료는 표면적 0.05 m²의 van Veen grab을 사용하여 채집한 후 polyethylene병에 넣은 후 냉동보관하였다. 주상퇴적물은 아크릴파이프를 이용하여 60-70 cm의 깊이로 잠수부가 채취하였고, 실험실로 이동 후 표층에서 20 cm까지는 1 cm간격으로, 이후에는 2 cm간격으로 분할하였고, 냉동 건조시켰다.

진해만과 거제-한산만의 표층퇴적물 내 유기물 오염의 지표[화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 강열감량(ignition loss, IL), 산휘발성황화합물(acid volatile sulfide, AVS)]를 분석하였다. 퇴적물 내 유기물 축적에 따른 산화-환원특성 및 유기물 축적에 따른 생물영향정도를 파악하기 위해 공극수 중 질소계 영양염류 및 발광미생물을 이용한 퇴적물의 독성도를 분석하였다. 부가적으로 이들 해역에서 저층 용존산소(dissolved oxygen, DO)를 조사하여 분석성분들과의 상관관계도 조사하였다. 저층DO는 현장에서 다항목수질측정기(YSI-6600)를 이용하여 해수 저층 1-2m에서 측정하였다. 주상퇴적물에 대해서는 퇴적

속도 및 유기물 오염역사 추정을 위해 깊이별 ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, TOC 를 분석하였다.

퇴적물 내 COD, IL, AVS의 분석은 해양환경공정시험기준 (MLTM, 2010)에 따라 수행하였다. 퇴적물 내 TOC 분석을 위해 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)에 주입후 분석하였다(Jung et al., 2012). 공극수 시료는 표층퇴적물 채취와 동시에 현장에서 Rhizon sampler를 이용하여 퇴적물에서 추출하였고 분석 전까지 냉동으로 보관되었다(Hwang et al., 2012). 공극수는 증류수로 희석한 다음 영양염 자동측정기(Seal Analytical GmbH, Model Quatro)를 이용하여 질소계 영양염류 NH₄⁺-N와 NO₃⁻-N가 측정되었다.

퇴적물의 독성도를 파악하기 위해 퇴적물의 유기용매추출액에 대해 발광미생물의 발광도를 조사하였다. 발광미생물의 발광도 분석은 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에 따라 수행하였다.

주상퇴적물의 시료 중 ²¹⁰Pb 및 ²²⁶Ra 분석은 한국기초과학지원연구원에서 우물형 고순도 게르마늄 감마선 검색기(well-type HPGe gamma detector; GCW3523, Canberra INC, USA)를 이용하였다(Han and Choi, 2007).

퇴적속도(Sedimentation rate)의 계산

본 연구에서 퇴적속도는 퇴적물의 깊이에 따른 excess ²¹⁰Pb

농도(퇴적물 중 ²¹⁰Pb농도에서 ²²⁶Ra의 농도를 뺀 값)를 이용하였으며, 퇴적물로 유입되는 excess ²¹⁰Pb의 양과 퇴적입자의 퇴적속도는 항상 일정하고, 퇴적물 중 ²¹⁰Pb은 퇴적후 이동이 없다는 가정하에 다음 식에 의해 추정되었다(Yang et al., 1995; Han and Choi., 2007).

$$A = A_0 e^{-\frac{\lambda z}{S}}$$

여기서, A는 퇴적층의 각 두께에서의 과잉 ²¹⁰Pb농도, A₀는 표층에서의 과잉²¹⁰Pb농도를 의미하며, λ는 ²¹⁰Pb의 붕괴상수로 0.0311 yr⁻¹이고, S는 퇴적속도이며, z는 퇴적층 표층에서부터 각 층의 깊이를 나타낸다. 퇴적속도는 양변에 자연로그를 취하고, ln A와 깊이 z와의 회귀식에서 기울기 m=-λ/S로부터 계산할 수 있다.

통계분석

진해만과 거제-한산만의 조사자료에 대한 정규분포 검정은 Kolmogorov-Smirnov와 Shapiro-Wilk test를 이용하여 추정하였고, 조사자료에 대한 농도값의 차이는 Mann-Whitney U test를 이용하여 추정하였다. 조사항목들간의 상관분석과 다변량통계분석은 데이터의 로그변환 후 Pearson correlation analysis과 주성분분석(Principal component analysis; PCA)을 수행하였다. 통계적 유의수준은 P-value<0.05로 하였고, 통계 분석은 윈도우용 SPSS software (SPSS 2000)를 이용하여 수행하였다.

Table 1. Summary in concentrations of COD, IL, AVS and TOC in sediments, DO in bottom water, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in pore water, bioluminescence inhibition for sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bay

			COD (mg/g-dry)	TOC (mg/g-dry)	IL (%)	AVS (mg/g-dry)	DO (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (μM)	NO ₃ ⁻ -N (μM)	Biolumin. Inhibition (%)
Jinhae	Total	Range	6.51-49.3	8.35-51.0	2.75-13.6	N.D.-1.40	0.24-8.14	66.7-559	0.06-16.0	2.0-60
		mean±SD	32.7±9.14	29.5±7.41	8.99±2.11	0.48±0.32	3.59±2.32	222±121	3.55±3.15	15±11
	May	Range	6.51-49.3	8.35-51.0	3.40-13.6	N.D.-1.40	3.38-8.14	66.7-493	3.58-16.0	4.0-60
		mean±SD	32.5±10.1	29.8±8.35	10.1±2.24*	0.48±0.35	5.62±1.08*	189±103	6.02±2.53*	16±11
	August	Range	7.90-48.8	18.6-45.2	2.75-10.2	0.05-1.26	0.24-5.07	83.0-559	0.06-4.42	2.0-41
		mean±SD	32.9±8.27	29.1±6.54	7.91±1.30*	0.49±0.29	1.55±1.07*	254±131	1.07±1.04*	15±10
Geoje-Hansan	Total	Range	13.3-35.4	12.7-26.7	6.67-10.5	ND-0.74	3.94-11.1	30.9-323	0.10-7.13	15-78
		mean±SD	23.6±5.76	18.6±3.11	7.80±0.87	0.15±0.18	6.65±2.00	107±90.1	2.05±1.98	41±21
	May	Range	16.1-35.4	13.0-26.7	6.67-10.5	N.D.-0.43	3.94-11.1	31.8-323	2.21-7.13	15-75
		mean±SD	26.5±5.51*	19.1±3.57	8.32±0.87*	0.11±0.13	7.50±2.54*	102±102	3.80±1.24*	31±19*
	August	Range	13.3-29.2	12.7-25.0	6.69-8.87	N.D.-0.74	4.13-6.35	30.9-300	0.10-0.93	15-78
		mean±SD	20.6±4.42*	18.2±2.69	7.27±0.48*	0.18±0.21	5.79±0.51*	111±79.0	0.29±0.19*	50±19*

COD, chemical oxygen demand; TOC, total organic carbon; IL, Ignition loss; AVS, acid volatile sulfide; DO, dissolved oxygen. *Significant seasonal difference (P<0.05).

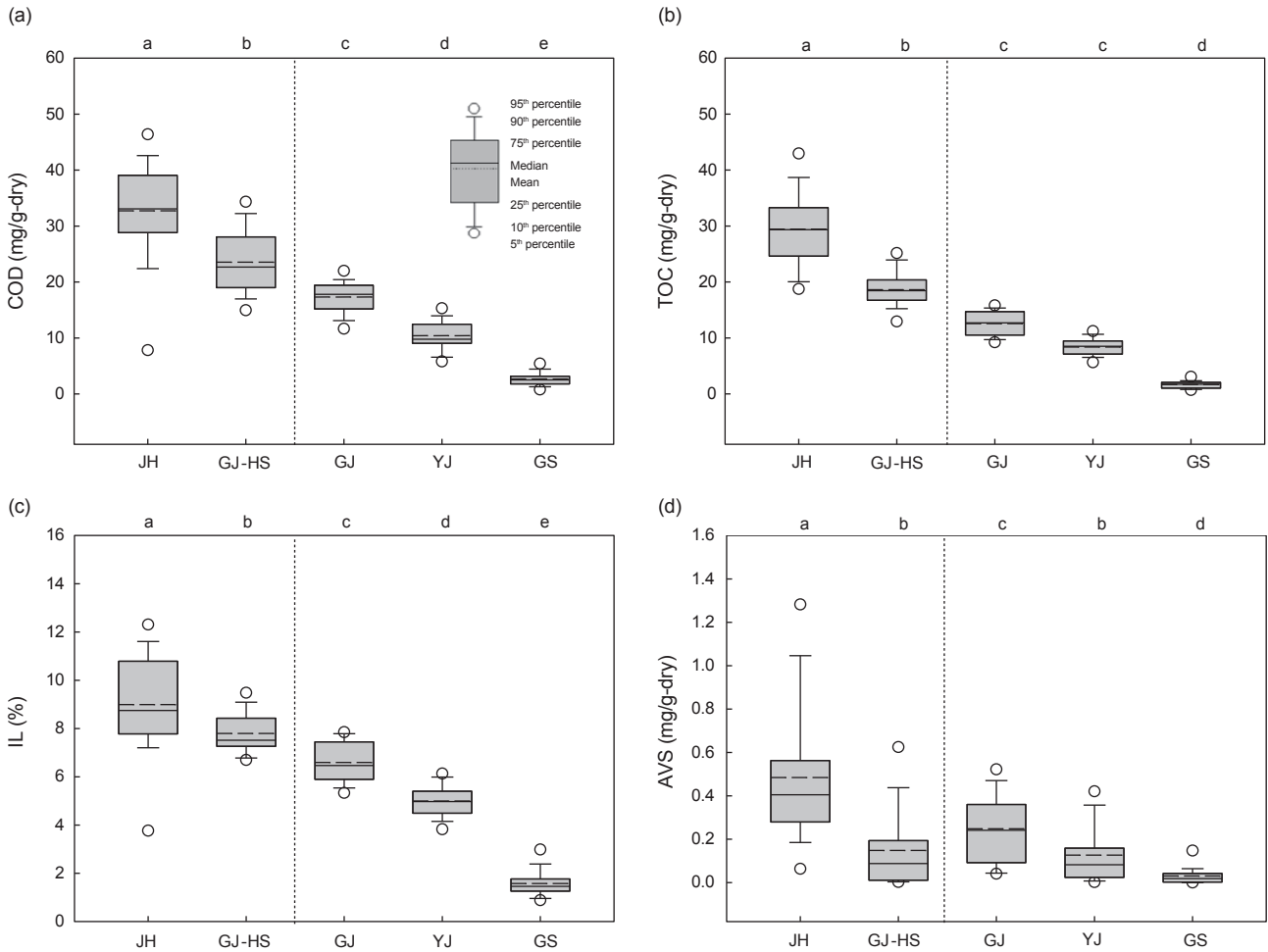


Fig. 2. Concentrations of geochemical indicators, (a) COD, (b) TOC, (c) IL and (d) AVS in surface sediments from Jinhae (JH) and Geoje-Hansan (GJ-HS) Bays, compared to Gangjin (GJ), Yeoja (YJ) and Gomso (GS) Bays of Korea (Choi et al., 2013, 2015b). The alphabets indicate significance of mean comparison. COD, chemical oxygen demand; TOC, total organic carbon; IL, Ignition loss; AVS, acid volatile sulfide.

결과 및 고찰

유기물 오염분포

저서환경에서 퇴적물에 유기물 축적을 나타내는 지표인 COD, TOC, IL, AVS의 조사결과를 Table 1에 나타내었다. 표층퇴적물 내 COD농도는 진해만 5.10-49.3 mg/g-dry (평균 32.7 mg/g-dry), 거제-한산만 13.3-35.4 mg/g-dry (평균 23.6 mg/g-dry) 이었으며, 진해만에서 거제-한산만보다 1.4배 높은 농도를 보였다($P < 0.05$). 이들 해역의 오염수준 파악을 위해 본 연구와 동일한 패류양식장 오염현황 파악을 목적으로 동일한 조사방법을 적용한 여자만과 남해 강진만(Choi et al., 2013), 곶소만(Choi et al., 2015b)의 연구결과와 비교하였다(Fig. 2). 진해만은 살포식 패류양식어장이 밀집한 해역인 여자만 3.7-22.4 mg/g-dry (평균 10.4 mg/g-dry)과 남해 강진만 11.5-23.2 mg/g-

dry (평균 17.3 mg/g-dry)보다 2-3배나 높은 수준이었고, 거제-한산만도 여자만과 남해 강진만보다 높은 수준이었다($P < 0.05$). 한편, 패류양식어장 중 가장 낮은 COD농도는 국내 최대 규모로 바지락양식을 하고 있지만, 조건대로 해수의 유통이 비교적 잘 되는 곶소만(0.68-3.95 mg/g-dry, 평균 2.30 mg/g-dry)에서 보고되었다. 퇴적물 COD는 국내 패류양식어장 적지조사기준 및 일본의 퇴적물 오염기준으로 20 mg/g-dry (Lee and Yu, 2000)가 설정되어 있다. 이에 대한 COD 농도의 초과율은 진해만 93% (56개 정점 중 52개 정점), 거제-한산만 61% (38개 정점 중 23개 정점)로, 대부분의 정점에서 퇴적물 오염기준을 초과하였다. 진해만에서 COD의 최고농도는 정점 JH5 (49.3 mg/g-dry)에서 조사되었고, 40 mg/g-dry이상의 고농도는 정점 JH2, JH6, JH7, JH10, JH12, JH22에서 조사되었다(Fig. 3a). 거제-한산만에서 최고농도는 정점 GH6 (35.4 mg/g-dry)에서

조사되었고, 30 mg/g-dry이상의 고농도는 GH1, GH5, GH10, GH13, GH15에서 조사되었다.

표층퇴적물 내 TOC 농도는 진해만 8.35-51.0 mg/g-dry (평균 29.5 mg/g-dry), 거제-한산만 12.7-26.7 mg/g-dry (평균 18.6 mg/g-dry)이었으며, 진해만에서 거제-한산만보다 1.6배 높았다($P < 0.05$). 기존 연구의 패류양식어장에서 TOC농도(Choi et al., 2013, 2015b)는 곰소만 0.7-2.3 mg/g-dry(평균 1.5 mg/g-dry) 여자만 4.3-12.1 mg/g-dry (평균 8.4 mg/g-dry)과 남해 강진만 9.0-16.3 mg/g-dry (평균 12.6 mg/g-dry)보다 진해만과 거제-한산만이 1.5-20배나 높았다(Fig. 2b, $P < 0.05$). 국내 여장환경기준 TOC 20 mg/g-dry에 대한 초과율은 진해만 91% (56개 정점 중 51개 정점), 거제-한산만 26% (38개 정점 중 10개 정점)으로 진해만 대부분 조사정점에서 초과하였다. Hyland et al. (2005)이 제안한 대형저서동물군집에 영향을 줄 수 있는 TOC농도 35 mg/g dry와 비교시, 진해만 7개 정점에서 초과하였다. 진해만에서 가장 높은 TOC농도는 JH22에서 조사되었고, 35 mg/g이상의 TOC 농도는 정점 JH2, JH5, JH7, JH9, JH10, JH20에서 조사되었다(Fig. 3b). 거제-한산만에서 가장 높은 TOC농도는 정점 GH6에서 조사되었고, 25 mg/g-dry 이상의 농도는 정점 GH15에서 조사되었다.

표층퇴적물 내 IL 농도는 진해만 2.75-13.6% (평균 8.99%), 거제-한산만 6.67-10.5% (평균 7.80%)으로, 진해만에서 거제-한산만보다 1.2배 높았다($P < 0.05$). 기존 연구의 패류양식어장에서 IL 농도(Choi et al. 2013, 2015b)는 곰소만 0.7-2.0% (평균 1.3%), 여자만 3.1-6.3% (평균 5.0%)과 남해 강진만 4.9-7.9% (평균 6.6%)보다 진해만과 거제-한산만에서 3-7배 높았다(Fig. 2c, $P < 0.05$). 진해만에서 가장 높은 IL은 정점 JH22에서 조사되었으며, 12%이상의 IL은 정점 JH2와 JH7에서 조사되었다(Fig. 3c). 거제-한산만에서 가장 높은 IL은 정점 GH12에서 조사되었고, 9.0%이상의 IL은 정점 GH1, GH4, GH8에서 조사되었다.

표층퇴적물 내 AVS 농도는 진해만 불검출-1.40 mg/g-dry (평균 0.48 mg/g-dry), 거제-한산만 불검출-0.74 mg/g-dry (평균 0.15 mg/g-dry)으로, 진해만에서 3배나 높았다($P < 0.05$). 본 연구의 진해만은 곰소만 불검출-0.07 mg/g-dry (평균 0.02 mg/g-dry), 여자만 불검출-0.55 mg/g-dry (평균 0.13 mg/g-dry)과 남해 강진만 0.02-0.66 mg/g-dry (평균 0.25 mg/g-dry)보다 2-40배나 모두 높았다(Fig. 2d, $P < 0.05$). 하지만, 거제-한산만은 남해 강진만보다 낮고, 여자만과 유사한 수준이었다. 국내 여장환경기준 AVS 0.5 mg/g-dry에 대한 초과율은 진해만 39% (22개 정점 초과), 거제-한산만 5% (2개 정점 초과)이었다. 진해만에서 가장 높은 AVS 농도는 정점 JH17에서 조사되었으며, 1.0 mg/g-dry이상의 AVS는 정점 JH2와 JH22에서 조사되었다(Fig. 3d). 거제-한산만에서 가장 높은 AVS는 정점 GH3에서 조사되었고, 0.5 mg/g-dry이상의 농도는 정점 GH15에서 조사되었다. 유기물 축적지표(COD, TOC, IL, AVS)의 농도결과에 따

르면, 진해만은 국내에서 양식어장으로 이용되는 해역 가운데 가장 오염된 해역 중 하나인 것으로 판단된다.

진해만에서 월별(5월, 8월)에 유기물 축적지표의 농도변화를 살펴보면(Table 1), IL은 5월(평균 10.1%)에 비해 8월(7.91%)에 감소하였다($P < 0.05$). 반면, COD는 5월(평균 32.5 mg/g-dry)과 8월(평균 32.9 mg/g-dry), TOC는 5월(평균 29.8 mg/g-dry)과 8월(평균 29.1 mg/g-dry), AVS는 5월(평균 0.48 mg/g-dry)과 8월(평균 0.49 mg/g-dry)간에 농도차이는 통계적으로 유의하지 않았다($P > 0.05$). 진해만에서는 IL을 제외하고 COD, TOC, AVS는 월별 뚜렷한 차이가 보이지 않았다.

거제-한산만(Table 1)에서 COD는 5월(평균 26.5 mg/g-dry)에 비해 8월(평균 20.6 mg/g-dry)에 감소하는 패턴을 보였고($P < 0.05$), IL도 5월(평균 8.32%)에 비해 8월(7.27%)에 감소하는 패턴을 보였다($P < 0.05$). 반면, TOC는 5월(평균 19.1 mg/g-dry)과 8월(평균 18.2 mg/g-dry), AVS는 5월(평균 0.11 mg/g-dry)과 8월(평균 0.18 mg/g-dry)에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 거제-한산만에서는 IL과 COD는 월별 차이가 있었지만, TOC와 AVS는 월별 차이가 없는 것으로 조사되었다. 따라서 진해만과 거제-한산만 퇴적물 내 유기물 축적은 전체적으로 월별 차이가 보이지 않는 것으로 조사되었다

퇴적물 내 COD, TOC, IL, AVS 농도간 상관성 분석을 실시하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 모든 성분들은 통계적으로 매우 유의한 상관성을 보였다($r = 0.530-0.895$, $P < 0.05$). COD와 TOC 간에 가장 높은 상관성을 보였으며($r = 0.895$), 0.7 이상의 높은 상관성을 보인 성분은 AVS와 TOC, AVS와 COD, IL과 COD, IL과 TOC이었다. 퇴적물에서 유기물 축적지표인 TOC, COD, IL, AVS간의 높은 상관성은 강진만, 여자만, 곰소만에서도 보고되었다(Choi et al., 2013, 2015b). 특히, 본 연구에서 AVS는 TOC, COD와 높은 상관성을 보였으며, 이는 유기물함량이 높은 퇴적환경에서는 유기물이 황산염의 환원을 촉진하여 AVS의 농도가 높아지는 것을 촉진하였기 때문인 것으로 판단된다(Como et al., 2007). 이러한 퇴적환경이 해수소통까지 제한을 받을 경우는 빈산소 환경이 형성되어 저서성 패류를 포함한 저서생태계에 악영향을 줄 수도 있다. 국내의 어류 또는 패류양식장에 대한 연구결과에서도 사료 또는 배설물이 양식장 아래로 퇴적되면서 저층플럭스의 증가, 유기물함량의 증가, 황화수소와 암모니아 농도의 증가, 산화-환원전위의 감소 등 저서환경을 악화시키고, 이로 인한 저서동물의 출현 종수나 다양성 감소에까지 영향이 보고된 바 있다(Callier et al., 2007; Hargrave et al., 2008; Cranford et al., 2009; Yoon et al., 2009; Kim et al., 2011).

저층 용존산소 분포

본 연구에서 조사한 저층 DO는 진해만 0.24-8.14 mg/L (평균 3.59 mg/L), 거제-한산만 3.94-11.1 mg/L (평균 6.65 mg/g-dry)이었으며, 거제-한산만에 비해 진해만에서 크게 낮은 수준을 보

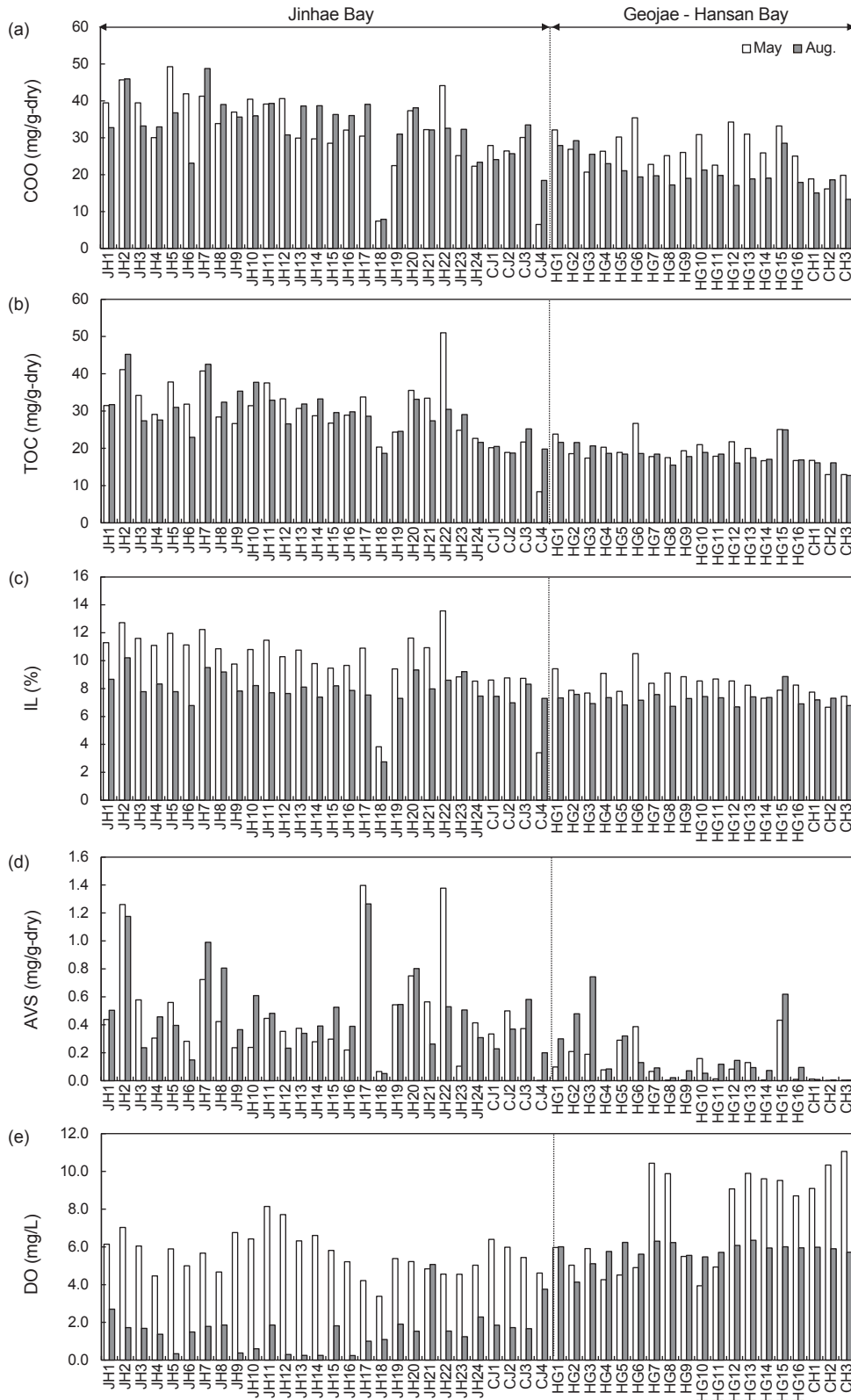


Fig. 3. Spatial distributions of (a) COD, (b) TOC, (c) IL, (d) AVS in sediments, and (e) DO in bottom water from Jinhae and Geojae-Hansan Bay, Korea. COD, chemical oxygen demand; TOC, total organic carbon; IL, Ignition loss; AVS, acid volatile sulfide; DO, dissolved oxygen.

였다($P<0.05$; Table 1과 Fig. 3e). 진해만에서 DO 평균농도는 5월 5.62 mg/L, 8월 1.55 mg/L으로, 8월 DO는 5월의 30% 수준까지 크게 감소하였다($P<0.05$). 반면, 거제-한산만에서 5월 7.50 mg/L, 8월 5.79 mg/L이었고, 8월 농도는 5월의 80% 수준으로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 저층 DO에 대한 기준치는 국내 어장환경기준과 국립수산물품질관리원 빈산소수과 기준의 저층 DO 3.0 mg/L(하계)으로 설정되어 있다. 국내 어장환경기준치보다 낮은 정점 비율(하계)은 진해만 93% (28개 정점 중 26개 정점 초과), 거제-한산만 0%로 조사되었다(Fig. 3e). 진해만에서 저층 DO는 5월에 비해 8월에 크게 감소하고, 하계에 대부분 해역에서 빈산소수과가 출현하였다. 연구해역에서 빈산소수과의 출현은 패류어장의 운영에 큰 영향을 미치는 요소로 낮은 용존산소량이 수산생물의 질병에 대한 민감도를 증감시키고, 양식패류의 질식에 의한 대량폐사를 유발하는 원인이 되기도 한다(OECD, 2012). Jung et al. (2014)은 진해만에서 대형저서동물의 출현 종수와 개체수는 저층DO에 큰 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다.

저층 DO는 퇴적물 COD, TOC, AVS와 음의 상관성($r=-0.265\sim-0.407$, $P<0.05$)을 보였고, 유기물 축적이 높은 정점에서 저층 DO는 낮은 값을 보였다. 국내의 어장환경기준 TOC (20 mg/g-dry), AVS (0.5 mg/g-dry), 하계 저층 DO (3.0 mg/L) 모두 적합하지 않는 정점은 진해만의 10개 정점(JH1, JH2, JH7, JH8, JH10, JH15, JH17, JH22, JH23, CJ3)에서 조사되었고, CJ3을 제외한 모든 정점은 굴 양식장이 위치하고 있었다(Fig. 3a-3e). 이들 정점에서 오염은 Jung et al. (2014)의 대형저서동물을 이용한 건강도평가(M-AMBI)의 결과와 잘 일치하였고, 심한 오염(poor)과 매우 심한 오염(bad) 상태로 구분된 정점에는 본 연구의 JH5, JH10, JH15, JH17, JH22, JH23이 포함되어 있었다.

공극수내 질소성 영양염류 분포

퇴적물에 서식하는 박테리아는 퇴적물 내 산화제(용존산소, 질산염, 황산염, 철-망간 산화물)를 이용하여 공급된 유기물을

분해하고, 암모니아, 황화수소, 메탄 등을 생성한다. 이들 생성 물질은 퇴적물 내 용존하는 화학성분의 분포뿐만 아니라 퇴적물 내 서식하는 저서미세조류나 저서동물의 분포에까지 큰 영향을 주게 된다(Hwang et al., 2008; Waska and Kim, 2011).

진해만의 공극수 내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 각각 66.7-559 μM (평균 222 μM), 0.06-16.0 μM (평균 3.55 μM)이었고, 공극수 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도보다 360배나 높았다(Table 1). 거제-한산만 공극수 내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 각각 30.9-323 μM (평균 107 μM), 0.10-7.13 μM (평균 2.05 μM)이었고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도보다 320배나 높았다.

월별 진해만의 공극수 내 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도에 대한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 5월(평균 34배)에 비해 8월(평균 690배)에 크게 증가하였고, 거제-한산만에서도 5월(평균 33배)에 비해 8월(평균 610배)에 크게 증가하였다($P<0.05$). 이들 해역에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 높은 농도는 환원퇴적환경(탈질산화율의 증가)으로 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 소비되어 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 크게 증가한 결과로 판단된다(Slomp and Cappellen, 2004; Giles et al., 2006). 본 연구에서 공극수 내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 퇴적물 중 유기물 축적 지표(COD, AVS, IL, TOC)와 양의 상관성을 보이고($r=0.256\sim0.607$; Table 2), 그 중에서 TOC 및 AVS와 높은 상관성($r=0.595\sim0.607$, $P<0.05$)을 보여서 두 해역에서 유기물 축적에 따른 환원퇴적환경을 잘 반영한다. 본 연구와 유사한 결과는 강진만과 여자만에서도 보고되었다(Choi et al., 2013). 강진만과 여자만의 공극수 내 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 각각 64.3-1101 μM (평균 278 μM), 24.1-631 μM (평균 176 μM)이었고, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도에 대한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도는 각각 153배, 246배나 높았다. 패류양식어장이 위치하고 있는 남해안의 여러 해역에서 내만의 저서환경은 환원퇴적환경으로 판단된다.

퇴적물의 독성도 평가

표층 퇴적물 내 유기물 축적에 따른 생물 영향을 평가하기 위해 퇴적물의 유기용매 추출액에 대한 발광미생물의 발광도(bioluminescence)를 조사하였다. 퇴적물의 독성도가 높을수록 발광미생물의 발광도는 감소하는 결과를 보인다(Choi et al.

Table 2 Correlation of COD, IL, AVS, and TOC in sediments, DO in bottom water, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in pore water, bioluminescence inhibition from Jinhae and Geoje-Hansan Bay (n=94)

	COD	TOC	IL	AVS	DO	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
TOC	0.895**						
IL	0.715**	0.710**					
AVS	0.730**	0.814**	0.530**				
DO	-0.265**	-0.407**	0.082	-0.405**			
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.516**	0.606**	0.256*	0.595**	-0.533**		
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.195	0.188	0.541**	-0.010	0.313**	-0.080	
BIOLUMIN	-0.677**	-0.743**	-0.537**	-0.649**	0.367**	-0.593**	-0.242*

COD, chemical oxygen demand; TOC, total organic carbon; IL, Ignition loss; AVS, acid volatile sulfide; DO, dissolved oxygen. * $P<0.05$, ** $P<0.01$.

2010a,b). 본 연구에서 발광미생물의 발광도는 진해만에서 2.0-60% (평균 15%), 거제-한산만에서 15-78% (평균 41%)였으며, 이 해역 퇴적물은 발광미생물의 발광도에 크게 영향을 주는 수준이었다. 또한, 진해만에서 발광도가 거제-한산만보다 크게 낮았고($P < 0.05$), 이는 진해만 퇴적물의 독성도가 거제-한산만보다 높다는 것을 의미한다. 발광도 5%이하는 정점 JH1, JH2, JH4, JH7, JH8, JH12, JH16에서 조사되었다.

월별 결과를 비교해 보면, 진해만에서 발광도의 평균값은 5월 16%, 8월 13%, 8월으로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$). 반면, 거제-한산만에서 5월 31%, 8월 50%이었고, 5월에 비해 8월에 발광도는 호전되었다($P < 0.05$).

발광미생물의 발광도와 퇴적물내 유기물 축적 지표(COD, AVS, IL, TOC), 저층 DO, 공극수 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 과의 상관성 분석을 실시하였다(Table 2). 발광도는 모든 성분들과 음의 상관계수($r = -0.242 \sim -0.743$), 저층 DO와는 양의 상관계수($r = 0.551$)를 보였고, 통계적으로 유의한 수준이었다($P < 0.05$). 이것은 퇴적물의 유기물 축적, 환원퇴적환경이 증가할수록 퇴적물의 독성도가 높아진다는 것을 의미한다. 퇴적물의 독성도는 TOC와 가장 높은 상관성을 보였고, COD와 AVS도 0.6이상의 상관계수를 보였다. 이는 퇴적물 내 부영양화 환경에서 유기물 분해과정을 통해 황화합물과 암모니아 등이 발생하고 이들은 저서환경에 서식하는 미생물뿐만 아니라 생물에 악영향을 줄 수 있음을 의미한다.

다변량통계분석을 이용한 유기오염축적 특성

퇴적물의 유기물 축적 지표뿐만 아니라 미량금속 등 오염물질들의 공간분포, 오염원 등을 파악하기 위해 통계분석이 많이 사용되어왔다. 특히 PCA와 같은 다변량 통계분석은 퇴적물과 같은 환경매체에서 화학적 조성에 따른 공간적 분포를 파악하는데 많이 이용되었다(Buccolieri et al., 2006; Ip et al., 2007; Choi et al., 2015a). 본 연구에서는 두 해역에서의 유기오염축적 특성을 파악하기 위해, 유기물 축적지표, 공극수 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 저층 DO, 발광미생물의 발광도에 대해 PCA를 실시하였다(Fig. 4). PCA 결과, 두 개의 주성분 PC 1과 PC 2이 선정되었고, 이때 전체분산에 대한 PC 1과 PC 2의 설명률은 각각 51.9%와 21.0%으로 총 72.9%이었다. PC 1에서 양의 값(positive)을 주도하는 인자들은 TOC, COD, AVS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, IL이었고, 음의 값(negative)을 주도하는 인자들은 저층 DO, 발광도이었다(Fig. 4). PC 1에서 양의 값이 증가할수록 유기물 축적 증가, 환원퇴적환경과 밀접한 관련이 있었고, 반면, 음의 값이 증가할수록 퇴적환경의 낮은 오염도와 미생물 등 생물에 대한 비교적 양호한 서식환경(저층 DO 증가 및 퇴적물 독성 감소)과 관련성이 있었다. PC 2에 양의 값을 주도하는 인자는 IL, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 저층 DO이었고, 음의 값을 주도하는 인자는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이었다. IL, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, DO는 8월에 비해 5월에 높은 농도를 보였던 인자들이었고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 5월에 비해 8월에 높은 농도를 보였던 인

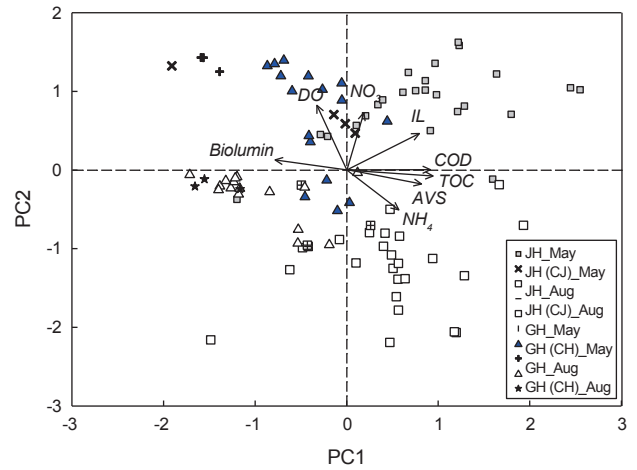


Fig. 4. Principal component analysis plots for loadings and scores according to composition and concentration of COD, IL, AVS and TOC in sediments, DO in bottom water, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in pore water, bioluminescence inhibition for sediments from Jinhae Bay (JH) and Geoje-Hansan Bay (GH). CJ and CH indicate control sites in Jinhae and Geoje-Hansan Bays. COD, chemical oxygen demand; TOC, total organic carbon; IL, Ignition loss; AVS, acid volatile sulfide; DO, dissolved oxygen; PC1, principal component 1; PC2, principal component 2.

자들이었다. 반면, TOC, COD, AVS, 발광도는 월별변화가 없거나 약간 있는 인자들이었다. PC 2는 월/계절변화의 주요요인인 수온변화와 관련성이 있는 것으로 판단된다. 진해만의 대부분 조사정점은 PC 1의 양의 값에서 분포하였고, 유기물의 높은 축적과 환원퇴적환경으로 의미하였다. 또한 진해만의 5월 조사정점은 PC 2의 양의 값, 8월 조사정점은 PC 2의 음의 값에 분포하였고, 이것은 8월에는 저층 DO와 공극수 중 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 낮아짐에 따라 공극수 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 증가하는 특성을 보이는 것으로 판단된다. 거제-한산만의 대부분 조사정점은 PC 1의 음의 값에서 분포하였고, 진해만보다 유기물 축적이 낮았고, 퇴적물 독성도도 낮았다. 거제-한산만도 5월과 8월에 저층 DO, 공극수 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 에 따른 월별변화의 특성이 나타났다.

거제-한산만의 주상퇴적물 중 TOC 분포

거제-한산만에서 패류양식장 주변 주상퇴적물(C1)을 채취하여 오염연대기와 TOC농도를 분석하였고, 대조구로 외곽해역에서도 추가적으로 주상퇴적물(C2)을 채취하였다. 이 해역에서 퇴적물 혼합작용의 영향을 무시하고 추정된 퇴적속도는 0.41 cm/yr (C1)로 조사되었다(Fig. 5a). 일반적으로 퇴적물 공급원으로부터 거리가 멀어질수록 퇴적속도는 낮아지며, 연안이나 강하구에 가까울수록 높은 퇴적속도는 보인다. 또한 연안에서 멀어질수록 수심이 깊어지므로 수심이 깊어짐에 따라 퇴적속도도 감소하는 경향을 보인다(Han and Choi, 2007).

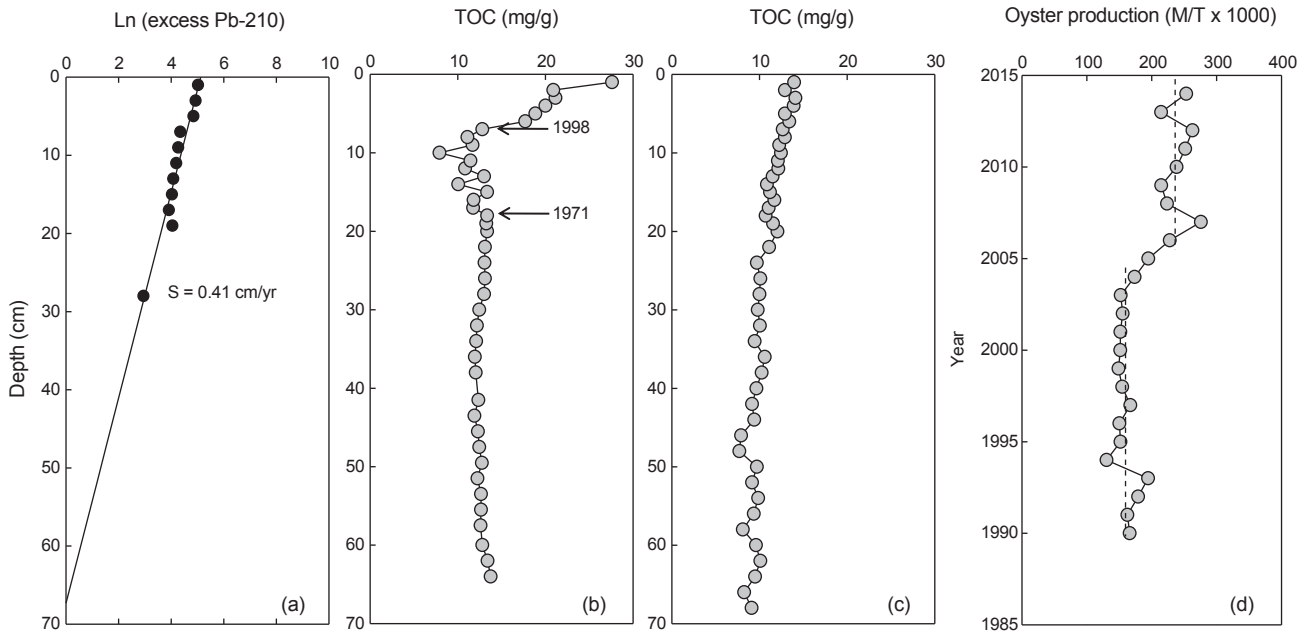


Fig. 5. (a) Sedimentation rate and excess ²¹⁰Pb activity depth profile, and (b) TOC profile in core sediment C1, (c) TOC profile in core sediment C2 of Geoje-Hansan Bay and (d) oyster production in Gyeongnam Province (MOF, 2017). TOC, total organic carbon.

거제-한산만의 퇴적속도는 동해 남서부 해역의 수심 50m 이하에서 퇴적속도 0.30-0.60 cm/yr (Han and Choi, 2007), 진해만의 퇴적속도 0.31-0.48 cm/yr (Yang et al., 1995)와 유사하였고, Kang (1994)이 보고한 광양만, 마산만 및 울산만에서 0.55-0.68 cm/yr보다는 느렸다.

내만 굴양식장의 주상퇴적물(C1) 중 TOC 농도는 7.90-27.6 mg/g-dry (평균 13.6 ± 3.5 mg/g-dry)이었으며, 대조구(C2)에서 7.70-14.1 mg/g-dry (평균 10.8 ± 1.7 mg/g-dry)로 조사되었다(Fig. 5b, 5c). 내만의 주상퇴적물 중 TOC의 최고농도는 표층에서 조사되었으며, 이는 거제-한산만에 유기물이 최근에 지속적으로 유입하고 있음을 의미한다. TOC 농도는 주상퇴적물의 18 cm (-1971년) 아래에는 배경농도수준으로 일정하게 유지되었다. 하지만, 이후부터 7 cm (-1998년)까지 변화가 감지되었고, 6 cm (-2000년)부터 표층(-2013년)까지 크게 증가하는 패턴을 보였다. 거제-한산만에서는 1974년 수산청 고시 제15호에 의거해 참굴, 지중해담치 및 멍게 등이 집약적으로 대규모 양식을 해오고 있는 것으로 보고된다(Jung et al., 2016). 경상남도의 굴류 양식생산량은 1990년 166천톤에서 2003년 152천톤으로 유사한 수준을 유지하다가 이후 증가하여 2006년부터 200천톤 이상을 유지하고 있다(Fig. 5d; MOF, 2017). Cho (1980)이 보고한 거제-한산만 굴양식장 퇴적물에서 COD 농도 16.4 ± 4.02 mg/kg-dry (n=14)보다 본 연구의 COD 농도(23.6 ± 5.76 mg/kg-dry)는 약 40%나 증가하였다. 따라서, 이 해역은 굴양식 등 인위적인 활동의 증가로 인해 유기물의 유입이 꾸준히 증가

해 왔음을 알 수 있다.

종합하면, 진해만과 거제-한산만 굴양식장 해역은 마산만과 같이 육상기인 유기물 유입이 높지 않음에도 불구하고, 퇴적물 내 유기물 축적, 퇴적물 공극수 내 영양염류 및 퇴적물 독성도도 매우 높았다. 이것은 조류 소동이 원활하지 않은 상태에서 굴 등 여러 생물들에 의한 배설물과 유기물이 저층으로 침강하면서 퇴적물 내 영양염류가 증가하고 황화물, 암모늄, 유기물 함량을 높여서 오염이 증가하는 것으로 추정된다. 이러한 해역의 저서환경 관리를 위해서는 어장수용력 산정을 통해 적정양식밀도 유지가 중요하고, 저서환경 개선을 위한 어장정화 기술개발, 품종별 어장청소 주기, 어장회복능력을 고려한 어장휴식년제 운영이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원(R2017060)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Buccolieri A, Buccolieri G, Cardellicchio N, Dell'Atti A, Di Leo A and Maci A. 2006. Heavy metals in marine sediments of Tarranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy). *Mar Chem* 99, 227-215.
- 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/meps322129>.
- Cho CH. 1980. Farming density of oyster in Hansan-Geoje Bay. *Bull Kor Fish Soc* 13, 45-56.
- Choi M, Kim HC, Hwang DW, Lee IS, Kim YS, Kim YJ and Choi HG. 2013. Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea. *Kor J Fish Aqua Sci* 46, 424-436. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0424>.
- Choi M, Lee IS, Kim HC and Hwang DW. 2015a. Distributions and contamination status of trace metals in surface sediments of shellfish farming areas in Yeoja and Gangjin Bays, Korea. *Kor J Fish Aqua Sci* 48, 789-797. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0789>.
- Choi M, Lee IS, Kim CS, Kim HC and Hwang DW. 2015b. Distributions of organic matter and trace metals in surface sediments around a Manila Clam *Ruditapes philippinarum* farming area in Gomso Bay, Korea. *Kor J Fish Aqua Sci* 48, 555-563. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0555>.
- 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. *Korean 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.
- Choi TJ, Kwon JN, Lee G, Hwang H, Kim Y and Lim JH. 2015. Distribution and pollution assessment of trace metals in the surface sediments and farming area of Jinhae Bay. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 31, 347-360. <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.4.347>.
- Cho YG and Lee CB. 2012. Heavy metal contamination in surface sediments from Masan and Jinhae Bay, Southeast Coast of Korea. *J Kor Soc Mar Environ Engineering* 15, 302-313. <http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2012.15.4.302>.
- 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>.
- 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, 1-8. Retrieved from <http://gndi.re.kr/gndi2016/report/sub01.html?moed=view&cate=8&subcate=8&number=770&keyfield=keyfield=&key=&area=&page=18> On Aug 28, 2017.
- 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>.
- Han JH and Choi MS. 2007. Estimation of ²¹⁰Pb-derived sedimentation rates in the Southwestern East Sea. *J Kor Soc Oceanogr* 12, 273-279.
- 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/101007/BF03029926>.
- 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>.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M and Shim JH. 2015. Distribution of organic matter and trace metal concentrations in surface sediments around the Hansan-Geoje Bay. *J Korean Soc Environ Anal* 18, 131-143.
- 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>.
- Ip CCM, Li XD, Zhang G, Wai OWH and Lee YS. 2007. Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China. *Environ Pollut* 147, 311-323.
- 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. *Korean J Fish Aquat Sci* 45, 56-65. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2012.0056>.
- Jung RH, Seo IS, Choi M, Park SR, Choi BM, Kim MH, Kim YJ and Yun JS. 2014. Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages during spring and summer in the shellfish farming ground of Wonmun Bay, on the southern coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 47, 908-926. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.0908>.
- Jung RH, Seo IS, Choi BM, Choi M, Yoon SP, Park SR, Na JH and Yun JS. 2016. Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages at spring and summer in Geoje-Hansan Bay, Southern coast of Korea. *J Kor Soc Mar Environ Safety* 22, 27-41. <http://dx.doi.org/10.7837>

- kosomes.2016.22.1.027.
- Kang HS, 1994. A study on pollution history of metals in marine sediments from industrial complexes of the Southwest coastal areas. M.S. Thesis, Hanyang University, Anyang, Korea.
- 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>.
- Kwon JN, Lee J, Kim Y, Lim JH, Choi TJ, Ye MJ, Jun JW and Kim S. 2014. Long-term variations of water quality in Jinhae Bay. *J Kor Soc Mar Environ Energy* 17, 324-332. <http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.4.324>.
- Kwon JN, Park YC and Eom KH. 2013. The Characteristic of long term variation of the water quality from Hansan-Geoje Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Energy* 16, 189-201. <http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2013.16.3.189>.
- Lee CH and Yu HJ. 2000. Establishment of environmental quality guidelines for surface sediments. Korea Environment Institute, Seoul, Korea. 1-150.
- Lee DI, Cho HS and Lee MO. 2003. A study on the environmental characteristics of the western Chinhae Bay in summer - spatial variation of water quality in water column and sediment environment. *J Kor Soc Wat Qual* 19, 723-730.
- MOF (Ministry of Ocean and Fisheries). 2017. Fishery production survey. Retrieved from http://fips.go.kr/jsp/sf/ss/ss_fishery_kind_list.jsp?menuDepth=070103 On Aug 28, 2017.
- MLTM (Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs). 2010. Standard method for the analyses of marine pollutants. MLTM report, 1-495.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2002. Environmental Research of Aquaculture Farm 2002. NFRDI report, 1-192.
- OECD (The Organisation for Economic Co-operation and Development). 2012. Aquaculture's impact on Aquaculture: Hypoxia and Eutrophication in Marine Waters. 1-45.
- 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>.
- 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>.
- Yang HS, Kim SS and Kim GB. 1995. Pollution of heavy metals and sedimentation rates in sediment cores from the Chinhae Bay, Korea. *J Kor Environ Sci Soc* 4, 489-500.
- Yoon SP, Jung RH, Kim YJ, Hong SJ, Oh HT and Lee WC. 2009. 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.