한국해양환경·에너지학회지
J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy
Vol. 26, No. 2, 153-161, May 2023

https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2023.26.2.153
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

남해안 어류가두리양식장 휴식에 따른 지화학인자의 변동 특성 및 환경회복 진단

최용현[1] · 심보람[2] · 홍석진[3] · 김형철[4] · 이원찬[5] · 정현우[1] · 오승문[1] · 이대인[3,†]

[1]국립수산과학원 어장환경과 연구원
[2]국립수산과학원 서해수산연구소 자원환경과 연구사
[3]국립수산과학원 어장환경과 연구사
[4]국립수산과학원 남동해수산연구소 연구관
[5]국립수산과학원 어장환경과 과장

Diagnosis of Variation Characteristics of Geochemical Factors and Environmental Recovery according to Fallowing of Marine Fish Cage Farm in Southern Coast, Korea

Yonghyeon Choi[1], Boram Sim[2], Sokjin Hong[3], Hyungchul Kim[4], Wonchan Lee[5], Hyeonwoo Jung[1], Soungmoon Oh[1], and Daein Lee[3,†]

[1]Scientific Researcher, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
[2]Scientific Officer, Fisheries Resources and Environment Division, West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Korea
[3]Scientific Officer, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea
[4]Senior Scientific Officer, Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53085, Korea
[5]Director, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약

장기간 이용된 연안 양식장의 환경개선 측면에서 경제성과 2차 환경영향 가능성 등을 고려했을 때 해양의 자정작용(휴식)을 이용한 회복 기법에 대한 효과 검토가 필요하다. 본 연구에서는 남해안(경남 남해군)에 위치한 어류가두리양식장의 철거 시점부터 표층 퇴적물 및 해수-퇴적물 경계면의 지화학적 인자를 조사하여 어장휴식에 따른 회복지표와 회복 기간 및 변동 특성을 진단하였다. 조사 결과, 양식장 정점의 초기 TOC, AVS는 어장환경기준을 초과하였고, C/N ratio는 5.91~8.92로 표층 퇴적물 내 유기물은 대부분 해양 기원성 유기물로 나타났다. AVS, SOD와 DIN, DIP 용출량은 계절에 따른 증감 변동이 나타났지만, 유기물 농도(TOC, TN)는 저층 산소부족 물덩어리가 나타나지 않는 환경에서 어장휴식 11개월 내에 대조구 수준으로 감소하여 회복 가능성을 보였다. 본 연구결과는 친환경적이고 지속 가능한 양식장 이용을 위한 어장휴식년제의 근거자료로써 활용 가능할 것이다.

Abstract – It is necessary to review the effectiveness of the environmental recovery techniques by marine self-purification, considering its economic cost and the possibility of secondary impact in the aspect of the environmental improvement of the long-term aquacultured coastal farms. In this study, geochemical factors of the environment surrounding surface sediments in fish cage farms in Namhae-gun located on the southern coast, were investigated to diagnose recovery indicators, period and variation characteristics according to fallowing. The initial TOC and AVS of the farms exceeded the environmental standards for aquaculture farm. The C/N ratio ranged from 5.91 to 8.92, and most of the organic matter in the surface sediments was of marine origin. The organic matter concentra-

[†]Corresponding author: dilee70@korea.kr

tion (TOC and TN) decreased to the control level in the environment where hypoxic water mass did not appear within 11 months of the fallowing, which showed the possibility of recovery, while seasonal variation were observed in AVS, SOD, and release DIN, DIP. This case study provides a basis regarding the introduction of fallowing and recovery system for the eco-friendly management and sustainable use of aquaculture farms.

Keywords: Marine fish cage farm(어류가두리양식장), Fallowing(휴식), Recovery indicator(회복지표), Recovery period(회복기간), Aquaculture farm management(양식어장관리)

1. 서 론

우리나라 연안 양식장은 좁은 해안에 밀집된 형태의 분포를 보이며, 장기간 같은 장소에서 해수면을 이용하고 있다. 연안 양식장에서 과도한 밀식 양식 및 인위적 사료 투입 등에 따른 유기물 축적으로 인해 저서생물 등의 환경교란이 유발될 수 있다(Pearson and Black[2001]). 국내의 경우 어업생산량은 2012년 3,183천 ton에서 2021년 3,820천 ton으로 증가하였는데, 그중 천해양식이 1,489천 ton에서 2,398천 ton으로 급격하게 증가하였다(KOSIS[2022]).

어류가두리양식장은 사료 투입과 섭식되지 않은 잉여 사료 및 배설물 등의 침강 유기물이 표층 퇴적물에 과도하게 축적되어, 양식장의 영향이 없는 지역보다 양식이 이루어지고 있는 지역의 퇴적물 내 유기물 농도가 상대적으로 더 높게 나타난다(Hwang *et al*.[2021], Holmer and Kristensen[1992]). 퇴적층에 축적된 유기물 분해 과정에서 산소 대부분이 소모되며, 질산화, 망간-철 환원, 황화수소 산화 등에도 소모가 된다(Lee *et al*.[2008]; Lee *et al*.[2010]). 이러한 과정이 지속되어 산소 고갈이 되면 혐기성 환경으로 전환되고, 혐기성 분해 과정에서 암모니아, 황화수소, 메탄 등이 발생하여 저서생태계 뿐만 아니라 양식생물에도 직접적인 위해를 유발한다(Hargrave[2010]; Yoon[1998]). 이러한 문제점들을 해결하기 위해 어장환경에 대한 개선방안이 적극 추진되고 있다.

어장정화·정비사업에는 해저 퇴적물 준설, 어장개선물질 살포, 해저 경운 및 어장 재배치(휴식)가 있다. 이러한 방법 중 비용 소모, 현장 적용성, 2차 환경오염 가능성을 고려했을 때 자연적 회복을 유도하는 어장휴식이 효율적이라는 연구가 있고(Lee *et al*.[2022]), 어장휴식을 통한 다양한 환경회복 연구들이 이루어지고 있다. 양식어장 철거 또는 이설 후 휴식기간 동안 어장의 회복능력을 파악하기 위한 연구는 크게 화학적, 생물학적 지표로 나누어 연구되고 있다. 안정동위원소를 활용하여 양식 어장휴식 12개월 이후의 유기오염물질 농도변화 연구(McGhie *et al*.[2000]), 양식 어장 철거 이후 2년에 걸쳐 황화물 농도가 대조구 수준으로 감소한 연구 결과도 있었다(Macleod *et al*.[2002]). 이 외에도 장·단기 휴식에 따른 유기물 농도 회복연구 등이 있으며(Macleod *et al*.[2004]; Macleod *et al*.[2006]), 화학적 지표는 주로 퇴적물의 유기물, 황화물 농도를 파악하여 연구가 이루어졌다.

생물학적 지표로는 해조류의 회복에 관한 연구도 있었지만(Kletou[2018]), 주로 저서생물 군집의 재조성을 선택하여 연구하였으며, 2년 이상 또는 수개월에서 수년에 이른다는 연구 결과가 있다(Karakassis *et al*.[1999]; Keeley *et al*.[2014]). 화학적 회복이 생물학적 회복보다 빠르게 회복되는 사례가 많았지만, 양식 어장 운영 중단 15개월 동안 화학적, 생물학적 회복이 나타나지 않은 사례도 있었다(Pereira *et al*.[2004]).

이처럼 국외에는 다양한 선행사례 및 연구들이 진행되어 있고, 국내에는 하동군 어류가두리양식장 어장휴식에 따른 저서생물 군집변화 연구(Park *et al*.[2021]) 등이 있지만, 퇴적물 오염도의 변화를 포함한 지화학인자 변동특성 및 회복 기간 산정에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 다양한 종류의 양식장 중에서 상대적으로 오염영향이 큰 어류가두리양식장을 대상으로 어장 이동 후 해양의 자정작용 효과를 진단하였다. 즉 어장휴식에 따른 표층 퇴적물 유기물 농도와 해수-퇴적물 경계면 침강 입자, 용출 영양염 변화 등을 파악하고 회복지표 탐색 및 회복 기간을 진단하여 어장휴식년제 도입 등 효율적인 어장관리방안 마련을 위한 기초연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역

어장회복능력 파악을 위해 경남 남해 미조군 북미조항과 미조도 사이에 있는 어류(참돔 등) 양식장(St.S)과 인근 해역(St.C)을 대상으로 조사를 수행하였다(Fig. 1). 기존 양식장이 있던 St.S는 1999년부터 약 20년간 어장을 운영하다가 2019년 11월 약 60 m 거리의 인근 해역으로 대체 개발됨에 따라 철거되었다. 대조 정점인

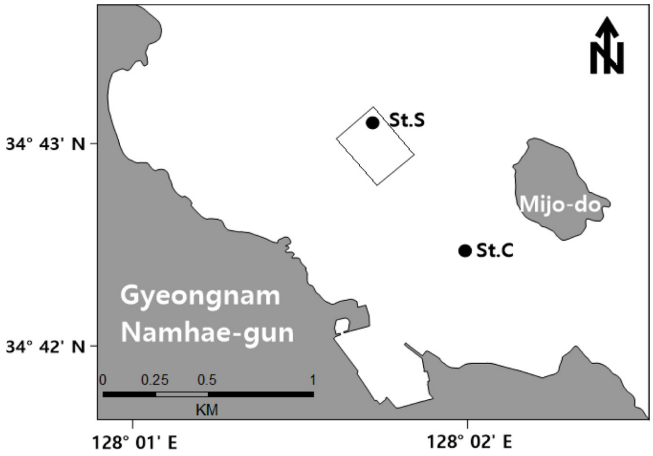

Fig. 1. A map showing the study area and survey sites in Namhae-gun coast of Korea.

St.C는 양식 이력이 없으며, 조사해역의 수심은 14~16 m 범위로 정점별 수심의 차이는 크지 않았다.

2.2 연구방법

해양의 물리적 특성을 파악하고자 St.S에서 2018년 11월 22에서 12월 7일까지 15일 이상의 기간동안 음향도플러유속계(FlowQuest600 ADCP, LinkQuest Inc., San Diego, CA, USA)를 해저에 설치하여 층별 연속조류를 관측하였다. 관측자료는 표층(4 m), 중층(9 m), 저층(14 m)의 자료를 측정하여 해역의 조류특성을 파악하였다.

해역별 조사 시작 시기는 장기간 양식장 운영을 해왔던 어장이 어장환경평가 결과에서 4등급을 받아 인근으로 대체 개발되어 기존 양식장이 철거된 시점부터 시작하였다. 2019년 11월부터 2021년 8월까지 분기별 표층 퇴적물, 수층-퇴적물 경계면 물질 유출입량(flux) 조사를 수행하였다.

퇴적물 시료는 van veen grab sampler를 이용하여 2 cm 이내의 표층 퇴적물을 채취하였고, 채취된 시료는 현장에서 냉동 보관하여 실험실로 가져와 분석하였다. 분석항목은 입도, 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN), 산휘발성황화물(acid volatile sulphide, AVS)로 해양환경공정시험기준(MOF, 2018)에 따라 분석하였다. 입도분석은 과산화수소와 10% 염산을 사용하여 유기물 및 탄산염을 제거하는 전처리 과정 후 4 Φ(0.0625 mm) 표준체를 이용하여 조립질(≧4 Φ)과 세립질(<4 Φ)로 분류하였다. 조립질 퇴적물은 건식 체질하였고, 세립질 퇴적물은 Micromeritics Instrument Corp.(USA)의 자동입도분석기기인 SediGraph 5120을 이용하여 분석하였다. 분석 후 퇴적물 유형 분류는 Folk(1954)의 삼각다이어그램을 이용하였다. TOC와 TN은 채취한 표층 퇴적물 시료를 동결 건조하고 아게이트 모르타르를 이용하여 곱게 빻아 약 10% 염산(HCL)을 이용하여 탄산염 광물을 제거 및 건조 후 원소분석기(Perkin Elmer, US/2400, CHN analyzer)로 정량하였다. AVS는 표층 퇴적물 1 g을 분취하고, 황산을 첨가하여 발생하는 황화수소를 검지관(Gastec, Tokyo, Japan)을 활용하여 측정하였다.

수층-퇴적물 경계면에서의 물질 유출입량(flux)은 국립수산과학원에서 개발한 현장관측 장비(Bel *I*)를 이용하여, 표층 퇴적물 내 산소소모율(sediment oxygen demand, SOD)과 퇴적층에서 수층으로 용출되는 용존무기질소(NH_4+NO_2+NO_3, dissolved inorganic nitrogen, DIN), 용존무기인(PO_4, dissolved inorganic phosphate, DIP)을 조사하였다. 현장관측 장비(Bel *I*)는 잠수사를 통해 해저에 설치하고, 부피와 면적을 알고 있는 배양챔버 내에서 일정 시간동안 물질의 농도변화 기울기를 바탕으로 각각의 플럭스를 추정하였다. 산소소모율은 챔버와 연결되어 있는 용존산소센서를 이용하여 일정 시간마다 측정하였고, 시간에 따른 단위면적당 산소소모율을 산출하였다. 영양염 용출량은 챔버 내 해수를 일정 시간마다 채수하였고, 영양염 자동분석기(BRAN+LUEBBE QUATTRO, Germany, Auto analyzer)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물리적 특성

해수 유동은 산소공급, 퇴적물 분포 및 유기물 축적 등에 영향을 미치는 환경인자로 물리적 특성을 파악하는데 중요한 요소이다 (Black and McDougall[2002]; Choi *et al.*[2011]; Jeon *et al.*[2015]; Yokoyama[2003]).

St.S 정점에서 음향도플러유속계를 이용하여 조사된 표층, 중층, 저층의 유속 및 평균 유속과 잔차류를 Table 1에 나타내었다. 표층(4 m), 중층(9 m), 저층(14 m) 각각 최고유속은 창조 시에 23.6 cm/s, 11.9 cm/s, 11.7 cm/s 낙조 시에 21.9 cm/s, 10.1 cm/s, 11.3 cm/s로 나타났고, 조사기간 동안 조석에 따른 층별 평균유속은 3.7~4.8 cm/s, 3.2~3.8 cm/s, 3.2~3.8 cm/s로 나타났다. 표층은 조사 된 유속의 94.1%가 10 cm/s 이하의 유속을 나타냈고, 창조 시에는 남 방향의 흐름이 낙조 시에는 방향 분산성이 다소 크게 나타났다. 중층은 유속의 99.8%가 10 cm/s 이하의 유속을 나타냈고, 창조 및 낙조시에는 방향 분산성이 다소 크게 나타났다. 저층은 유속의 99.2%가 10 cm/s 이하의 유속을 나타냈고, 창조시에는 동남동 방향의 흐름이 낙조시에는 표·중층과 동일하게 방향 분산성이 다소 크게 나타났다. 잔차류의 유속과 유향은 표층에서 1.4 cm/s, 169.5°, 중층에서 0.8 cm/s, 137.9°, 저층에서 1.1 cm/s, 122.4°로 나타났다.

조사지역 전체 수층의 평균 유속은 3.2~4.8 cm/s로 진해만 내에 위치한 원문만의 유속(5~7 cm/s)보다 느리게 나타났지만, 하계에 산소부족 물덩어리가 발생한 원문만(Sim *et al.*[2020])과 달리 남해군에서는 산소부족 물덩어리가 발생하지 않았다. 따라서 개방형 만의 특성과 다양한 방향의 해수유동으로 원활한 해수순환이 이루어지는 것으로 판단되지만, 다소 느린 유속으로 특히 중층~심층 침

Table 1. Tidal current speed and direction of the Namhae-gun coast of Korea

		Max current speed (cm/s)	Average current speed (cm/s)	Current direction	Residual current speed (cm/s)	Residual current direction
Surface	Flood	23.6	4.8	S	1.4	169.5°
	Ebb	21.9	3.7	-		
Middle	Flood	11.9	3.8	-	0.8	137.9°
	Ebb	10.1	3.2	-		
Bottom	Flood	11.7	3.8	ESE	1.1	122.4°
	Ebb	11.3	3.2	-		

Table 2. Sediment size class and type in Namhae-gun coast of Korea

Survey site		Sand	Silt (%)	Clay	Type
Namhae-gun	St.S	1.96	22.78	75.26	C
	St.C	3.45	24.98	71.57	C

강물질들이 주로 어장 인근에 퇴적되었을 것으로 사료된다.

3.2 퇴적물 특성

퇴적물 입도는 일반적으로 세립할수록 유기물 함량이 높은 특징을 가지고 있다. 본 연구의 조사 정점은 점토함량이 71.57~75.26%로 높게 나타났고, Folk[1954]의 삼각다이어그램을 이용하여 퇴적물 유형 분류한 결과는 C(Clay)로 나타났다(Table 2).

퇴적물의 유기물 함량 및 오염지표로 TOC, TN, AVS 등이 있고 (Choi *et al.*[2013]), 남해군 어류가두리양식장 조사기간 표층 퇴적물 TOC, TN, AVS를 Fig. 2에 나타내었다.

TOC와 TN은 각각 11.28~28.65 mg/g dw(평균 18.57 mg/g dw), 1.46~4.85 mg/g dw(평균 2.67 mg/g dw)로 나타났다. St.S에서 TOC는 어장 철거 시점부터 대조구 수준으로 감소하는 약 9개월 동안 평균 25.58 mg/g dw로 MOF[2017]의 퇴적물 어장환경기준 오염수준인 20 mg/g dw를 초과하는 높은 오염도를 보였지만, 대조구 수준으로 감소한 2020년 6월부터 조사종료 시점까지 평균 17.72 mg/g dw로 St.C와 유사한 농도를 보여 상대적으로 낮은 오염도와 안정화된 경향을 보였다.

TOC와 TN의 평균 유기물 농도는 개방형 만의 특성을 지니고 있어, 사료를 투입하지 않는 특성이 있는 패류 양식장 중 피조개, 새꼬막 등 살포식 양식해역인 여자만(Choi *et al.*[2013])과 진주만(Lee *et al.*[2020])보다 높게 나타났지만, 굴 등 수하식 양식해역인 거제·한산만(MIFAFF[2009]), 고성만(Lee *et al.*[2017]), 자란만(Hwang *et al.*[2018])과 비슷하게 나타났다. 반면 좁은 수로 사이에 위치한 양식장이 있는 통영·거제 연안의 어류가두리 양식장보다 퇴적물 오염 수준이 0.8배 낮게 나타나 지역적 특성 등에 따른 유기물 농도 차이를 보였다(Table 3).

남해군 표층 퇴적물 TOC와 TN은 0.869~0.991($p<0.01$, $p<0.05$)의 높은 상관관계를 보였는데(Table 4), 이는 퇴적물 TOC와 TN이 퇴적된 후에 동일한 속성작용(diagenesis) 또는 재광물화작용(remineralization)이 이루어졌다는 것을 의미하므로(Kim *et al.*[2007]), TOC와 TN의 기원이 동일한 것으로 해석할 수 있다. 일반적으로 C/N ratio는 유기물의 공급 기원을 규명할 수 있는 지시자로 많이 사용되고 있다(Yu *et al.*[2010]). 12 이상일 때 도시하수, 산업

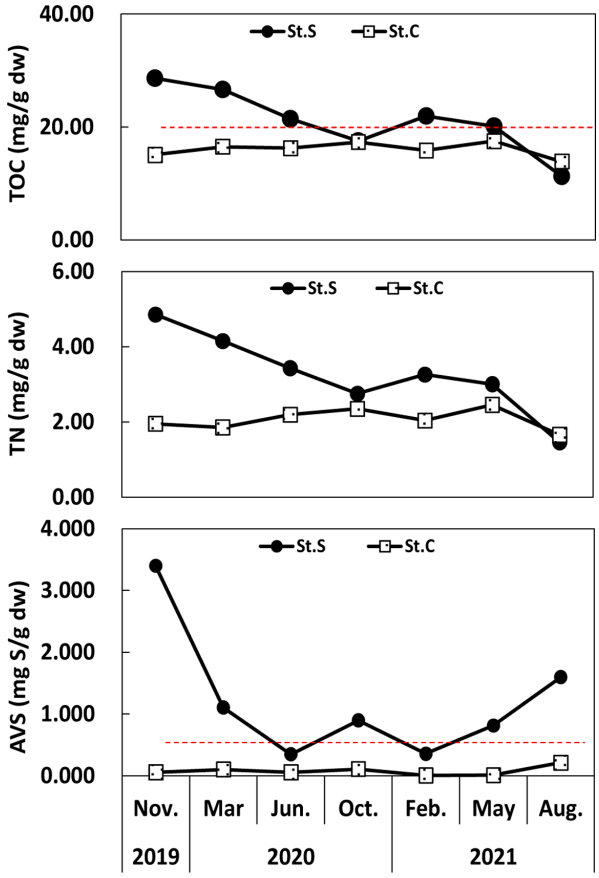

Fig. 2. Temporal changes in concentration geochemical component (total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), acid volatile sulfide (AVS)) the surface sediment in Namhae-gun coast of Korea. The dash line indicate the quality guidelines for TOC and AVS concentration in the sediment of aquaculture farm suggested by MOF[2017].

Table 3. Range and mean of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) concentration in Korean coastal sediment

Study region	TOC (mg/g dw)		TN (mg/g dw)		Reference
	Range	Mean	Range	Mean	
Geoje-Hansan Bay	12.9-27.6	18.7	1.7-3.7	2.4	MIFAFF [2009]
Yeoja Bay	4.3-12.1	8.4	0.5-1.5	1.1	Choi *et al.* [2013]
Goseong Bay	14.5-21.9	18.3	2.0-3.0	2.5	Lee *et al.* [2017]
Jaran Bay	15.1-23.9	17.4	2.0-3.3	2.3	Hwang *et al.* [2018]
Jinju Bay	9.1-15.7	13.3	1.4-2.4	2.0	Lee *et al.* [2020]
Tongyoung-Geoje Coast	11.8-31.8	22.7	1.7-4.7	3.4	Hwang *et al.* [2021]
Namhae-gun	11.3-28.7	18.6	1.5-4.9	2.7	This study
Environmental standard for aquaculture farm	20.0				MOF [2017]

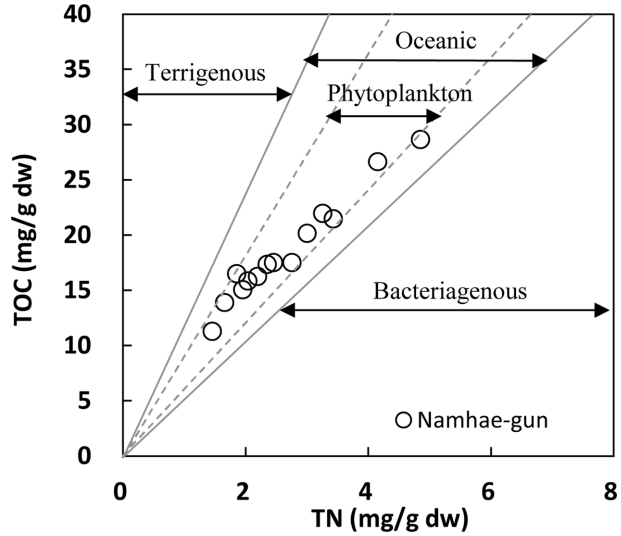

Fig. 3. Plot of total nitrogen (TN) versus total organic carbon (TOC) in surface sediment from Namhae-gun coast of Korea.

폐수 등 인근 육상에서 유입되는 육상 기인 유기물이고(Greaves and Schwartz[1952]), 6~9는 식물플랑크톤을 나타내는 범위이며(Holligan *et al.*[1984]), 식물플랑크톤 범위를 포함한 5~12 사이의 값일 경우 해역에 서식하는 생물체에 의해 생성된 해양 기원성 유기물로 해석할 수 있다(Stein *et al.*[1991]). 5 이하면 퇴적 유기물 중 박테리아 기원에서 유래한 지표로 이용된다(Lee and Fuhrman [1987]). 본 연구에서 C/N ratio는 5.91~8.92(평균 7.21)로 표층 퇴적물 내 유기물은 대부분 해양 기원성 유기물로 판단된다. 특히 어류가두리 양식장의 특성을 고려했을 때 주로 잉여 사료, 어류사체 및 배설물에서 유래한 것으로 사료된다(Fig. 3).

AVS는 0.005~3.396 mg S/g dw(평균 0.724 mg S/g dw)로 나타났다. St.S에서 AVS는 MOF[2017]의 퇴적물 어장환경 기준 오염수준인 0.5 mg/g dw보다 대부분 높게 나타났다. 어류가두리양식장 철거 직후 어장환경 기준 미만 수준으로 급격하게 낮아지는 경향을 보였지만, 하계에 농도가 다시 증가하는 변화를 보였다. McGhie *et al.*[2000]은 12개월 동안 어장휴식기를 가졌지만, 양식장으로부터 기원된 잔존유기물이 남아있다고 하였는데, 본 연구에서도 기존 표층 퇴적물에 침강되어 있는 잔존유기물이 다량 분포하여 하계에 수온이 증가됨에 따라 AVS의 농도가 증가하는 것으로 판단되고, TOC와 TN보다 계절에 따른 수온 변화에 민감한 것으로 보인다.

3.3 해수-퇴적물 경계 특성

양식 활동과 해양 기원성 발생 유기물은 표층 퇴적물에 침강하여 미생물에 의한 분해 과정에서 퇴적물 내의 산소를 소모한다. 유기물 분해에 산소 대부분이 소모되지만, 질산화, 황화수소 산화 등에도 소모되며, 산소소모 현상이 지속해서 이루어지면 혐기성 상태가 되어 생물에게 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Lee *et al.*[2008]; Lee *et al.*[2010]; Park *et al.*[2012]). 퇴적물의 산소변화와 영양염 용출량을 파악하기 위한 SOD, 침강 POC와 DIN, DIP 용출량을 Fig. 4에

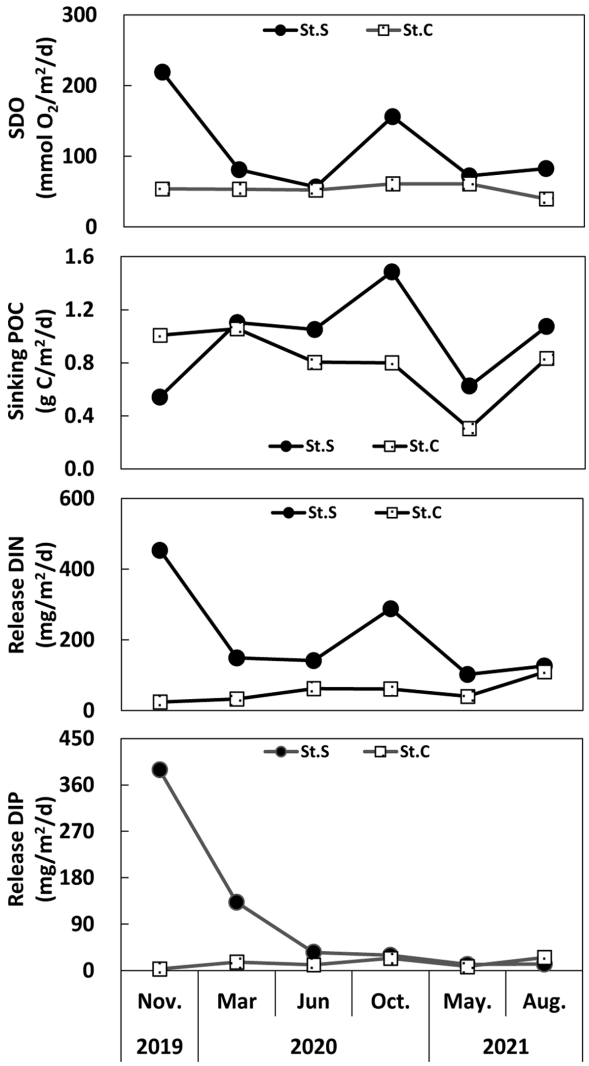

Fig. 4. Temporal changes in concentration (sediment oxygen demand (SOD), sinking particle organic carbon (POC), release disolved inorganic nitrogen (DIN), release disolved inorganic phosphate (DIP)) of the surface sediment-water environment of the Namhae-gun coast of Korea.

나타내었다.

SOD는 40~219 mmol $O_2/m^2/d$(평균 78 mmol $O_2/m^2/d$)로 나타났고, 조사기간 동안 동계보다 하계에 증가하는 경향을 보였다. SOD는 온도에 따른 영향이 가장 크며, 온도가 높고, 저층의 용존산소 농도가 낮을수록 높게 나타나기 때문에 계절적인 영향에 의한 것으로 판단된다(Jung and Cho[2003]; Lee[2015]).

침강 POC는 0.3~1.5 gC/m^2/d(평균 0.9 gC/m^2/d)로 나타났다. 2019년 11월을 제외하고 St.S가 St.C 보다 침강 POC가 더 높게 나타났고, 전체적으로 유사한 경향을 보였다. 2020년 6월에는 어장휴식에 따른 침강 유기물의 감소 뿐만 아니라 수온약층 형성에 따른 저층 수체의 안정화로 상대적으로 빠른 표층 유속에 의해 유기물이 넓게 분포하여 침강량 감소에 영향을 미치는 것으로 보이며, 10월에는 성층이 발달되지 않아 원활한 표·저층 수체의 교환으로 침강

Table 4. Correlation coefficient between major geochemical indicators (acid volatile sulfide (AVS), total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC), sinking particle organic carbon (POC), sediment oxygen demand (SOD), release disolved inorganic nitrogen (DIN), release disolved inorganic phosphate (DIP)) in the surface sediment at Namhae-gun coast of Korea

		AVS	TN	TOC	Sinking POC	SOD	Release DIN	Release DIP
St.S	AVS	1	.412	.346	-.464	.881*	.901*	.970**
	TN		1	.991**	-.627	.483	.567	.918**
	TOC			1	-.665	.350	.418	.840*
	Sinking POC				1	-.188	-.203	-.541
	SOD					1	.979**	.784
	Release DIN						1	.838*
	Release DIP							1
St.C	AVS	1	-.638	-.555	.618	.368	-.361	.211
	TN		1	.869*	-.178	-.395	.898*	.717
	TOC			1	.045	-.352	.793	.988**
	Sinking POC				1	-.391	-.073	.146
	SOD					1	-.702	-.393
	Release DIN						1	.766
	Release DIP							1

*p<0.01, **p<0.05

POC가 증가하는 것으로 사료된다.

DIN과 DIP 용출량은 각각 24~453 mg/m^2/d(평균 133 mg/m^2/d), 3~390 mg/m^2/d(평균 58 mg/m^2/d)로 나타났고, St.S의 어장 철거 시점부터 SOD와 유사하게 감소하는 경향을 보였다. 동계보다 하계에 온도 상승에 따른 퇴적물 중 유기물의 분해가 증가하여 용존산소 감소 및 혐기성 상태로 변화되고(Kim[1996]), 퇴적물이 혐기성 환경일 경우 영양염류의 용출이 증가하고 호기성 환경일 경우 억제된다(Cho *et al.*[2011]).

표층 퇴적물 내 AVS, TN, TOC, SOD, 침강 POC와 DIN, DIP 용출량의 상관관계를 분석하였다(Table 4). 어류가두리양식장이 있던 St.S에서는 AVS와 SOD, DIN, DIP 용출량이 각각 0.881($p<0.01$), 0.901($p<0.01$), 0.970($p<0.05$)의 상관관계를 보였지만, 대조구인 St.C에서는 유의한 상관성이 나타나지 않았다. 이러한 결과는 양식장 아래의 표층 퇴적물에 침강되어있는 잔존유기물에 의한 영향으로 판단된다.

3.4 남해군 어류가두리양식장 회복진단

어장환경 개선 측면에서 원래 상태로 되돌리는 개념인 복원의 관점에서 살펴보면 복원까지 상당한 기간이 소요되는 것이 분명하다. 하지만 이전의 상태와 근접하게 돌아가는 것 또는 과정(복구)의 개념인 회복의 관점으로 접근해 봤을 때(Lee *et al.*[2019]), TOC, TN과 같이 어장휴식 후 어류가두리양식장의 오염 농도가 양식 이력이 없는 대조구 수준으로 감소하여 지속해서 유사하게 나타난다면 특별한 자연적, 인위적 변동이 없을 때 회복 가능성이 높은 것으로 진단할 수 있다.

TOC, TN은 약 11개월내에 St.C에 근접한 수준으로 회복되었고, 이후 회복 전과 대비하여 St.S는 St.C와 유사한 경향 및 평균농도(17.72 mg/g dw, 16.14 mg/g dw)를 보였다. AVS, SOD와 DIN 용출량은 어장 철거 후 회복경향을 보였지만, 대조구 수준으로 회복 이후 대조구와 다른 경향을 보이거나 계절에 따른 변동이 크게 나타나 어장환경회복 관련 지화학 지표로는 적당하지 않다고 판

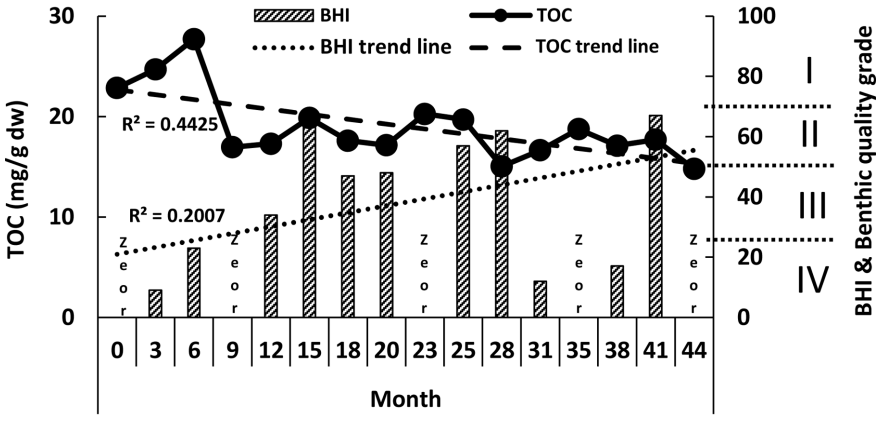

Fig. 5. Temporal changes benthic health index (BHI) and total organic carbon (TOC) in Hadong-gun (Park *et al.*[2021]).

단된다. 반면 DIP 용출량은 지속해서 감소하여 대조구 수준에 도달하였다.

Park *et al.*[2021]의 하동군 어류가두리양식장 휴식에 따른 저서생태계 건강도 평가를 위한 저서동물지수(benthic health index, BHI)와 TOC의 관계를 살펴보면 전체 조사기간(44 month) 중 TOC의 농도는 조금씩 낮아지며 회복하는 경향을 보였고(liner regression, R^2=0.44), BHI도 2~4등급 사이에서 조금씩 회복하는 경향을 보였지만 TOC보다는 더 낮게 나타나(liner regression, R^2=0.20) 다른 연구 결과처럼 생물학적 회복보다 화학적 회복이 빠르게 진행되는 것으로 파악되었다(Fig. 5). Go *et al.*[2022]는 하동군 어류가두리양식장에서 어장휴식 동안 유기물 분해가 진행되지만, 어류 배설물의 농도가 여전히 높은 수준으로 남아있다고 하였다. 남해군의 경우 Park *et al.*[2021]과 Go *et al.*[2022]가 연구한 하동군과 달리 개방성 연안으로 산소부족 물덩어리 발생과 같은 큰 변수가 없기 때문에, 하동군에 비해 빠른 기간 내에 회복이 진행될 것으로 사료된다.

본 연구에서는 TOC와 TN이 어장환경회복 관련 지화학 지표로 적합한 것으로 판단되며, 약 11개월 내에 대조구 수준으로 회복 가능성을 보였다. 어장환경회복에 해당 양식장의 양식기간과 종류, 주변 오염원, 해수유동, 퇴적물 입도, 초기 유기물 농도, 저층 용존산소 등 다양한 요인이 복합적으로 영향을 미칠 수 있으므로 향후 해역별 그리고 양식품종별로 지속 연구가 필요할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 양식 어장휴식에 따른 환경 회복성 및 변화 특성을 진단하기 위하여 경남 남해군에 위치한 어류가두리양식장 이설 직후부터 표층 퇴적물 TOC, TN, AVS, SOD, 침강 POC와 DIN, DIP 용출량 등을 조사·분석하였다.

조사 결과 어장휴식 초기에 TOC는 퇴적물 어장환경기준 오염수준인 20 mg/g dw를 초과하였지만, 약 11개월내에 대조구 수준으로 감소하였다. C/N ratio는 5.91~8.92(평균 7.21)로 나타나 표층 퇴적물 내 유기물은 대부분 해양 기원성 유기물로 판단되었다. 조사 기간동안 AVS, SOD와 DIN, DIP 용출량은 계절적 변동이 지속해서 나타났지만, 유기물 농도변화는 상대적으로 안정화되었다. 따라서 화학적 회복지표로 유기물 농도를 나타내는 TOC와 TN이 적합한 것으로 판단되며, 산소부족 물덩어리가 나타나지 않는 환경에서 어장휴식 후 약 11개월 내에 어류가두리양식장의 유기물 오염 농도가 양식 이력이 없는 대조구 수준에 근접하여 어장환경 회복 가능성을 보였다.

어장휴식에 따른 회복(지표, 기간)은 다양한 복합 영향요인이 있으므로 향후 해조류, 패류 등 품종별, 지역별 추가 연구가 이루어진다면, 과학적이고 체계적인 지속 가능한 양식장 이용을 위한 어장휴식년제 근거자료로써 활용 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2023년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2023015)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

[1] Black, K.D. and McDougall, N., 2002, Hydrography of Four Mediterranean Marine Cage Sites, J. Appl. Ichthyol., 18, 129-133.

[2] Cho, D.C., Lee, E.M., Park, B.G. and Kwon, S.H., 2011, Correlation of Releases of Nutrient Salts in Sediment with Vicinal Oxic Conditions, J. Environ. Int., 20(7), 845-855.

[3] Choi, J.K., Ryu, J.H., Woo, H.J. and Eom, J.A., 2011, A Study on the Flushing Characteristics in Geunso Bay using Hydro-hypsographic Analysis, J. Wetl. Res., 13(1), 45-52.

[4] Choi, M.K, Kim, H.C., Hwang, D.W., Lee, I.S., Kim, Y.S., Kim, Y.J. and Choi, H.G., 2013, Organic Enrichment and Pollution in Surface Sediments from Shellfish Farming in Yeoja Bay and Gangin Bay, Korea, Korean J. Fish. and Aquatic Sciences, Vol. 46, No. 4, pp. 424-436.

[5] Folk, R.L., 1954, The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary - Rock Nomenclature, J, Geology, 62(4), 344-359.

[6] Go, Y.S., Lee, D.I., Kim, C.S. Sim, B.R. Kim, H.C. Lee, W.C. and Lee, D.H. 2022, Origin and Source Appointment of Sedimentary Organic Matter in Marine Fish Cage Farms using Carbon and Nitrogen Stable Isotopes, Korean J. ecol. environ., 55(2), 99-110.

[7] Greaves, C. and Schwartz, H. 1952, The Chemical Utilization of Wood. Department of Resource Development, Forest Branch, Ottawa, 28.

[8] Hargrave B.T., 2010, Empirical Relationships Describing Benthic Impacts of Salmon Aquaculture, Aquac. Environ. Interact. 1, 33-46.

[9] Holligan. P.M., Harris, R.P., Newell, R.C., Harbour, D.S., Head, R.N., Linley, E.A.S., Lucas, M.I., Tranter, P.R.G. and Weekley, C.M., 1984, Vertical Distribution and Partitioning of Organic Carbon in Mixed, frontal and stratified waters of the English Channel. Mar. Ecol. Progress Series, 14(2), 111-127.

[10] Holmer, M. and Kristensen, E., 1992, Impact of Marine Fish Cage Farming on Metabolism and Sulfate Reduction of Underlying Sediments. Mar. Ecol. Progress Series 80, 191-201.

[11] Hwang, H.J., Hwang, D.W., Lee, G.R., Kim, H.C. and Kwon, J.N., 2018, Distributions of Organic Matter and Heavy Metals in the Surface Sediment of Jaran Bay, Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 24(1), 78-91.

[12] Hwang, D.W., Hwang, H.J., Lee, G.R., Kim, S.Y., Park, S.H. and Yoon, S.P., 2021, Organic Matter and Heavy Metals Pollution Assessment of Surface Sediment from a Fish Farming Area

in Tongyoung-Geoje Coast of Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 27(4), 510-520.

[13] Jeon, S.R., Choi, Y.S., Cho, Y.S., Kim, Y.T. and Choi, Y.H. 2015, Suitable Site Assessment using Habitat Suitability Index for *Ruditapes philippinarum* in Gochang (Hajun), J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 21(5), 484-491.

[14] Jung, H.Y. and Cho, K.J., 2003, SOD and Inorganic Nutrient Fluxes from Sediment in the Downstream of the Nagdong River, Korean Soc. of Limnol., 36(3), 322-335.

[15] Karakassis, I., Hatziyanni, E., Tsapakis, M. and Plaiti, W., 1999, Benthic Recovery Following Cessation of Fish Farming: a Series of Successes and Catastrophes, Mar. Ecol. Progress Series, 184, 205-218.

[16] Keeley, N.B., Macleod, C.K., Hopkins, G.A. and Forrest, B.M. 2014, Spatial and Temporal Dynamics in Macrobenthos during Recovery from Salmon farm Induced Organic Enrichment: When is Recovery Complete?, Mar. Pollution Bulletin, 80(1-2), 250-262.

[17] Kim, D.H., 1996, Regional and Seasonal Variations of DIN Fluxes across the Sediment-Water Interface and the Effect of DIN Release on the Primary Production, Korean J. Fisheries and Aquatic Sciences, 29(4), 456-463.

[18] Kim, B.C., Jung, S.M., Jang, C.W. and Kim, J.K., 2007, Comparison of BOD, COD and TOC as the Indicator of Organic Matter Pollution in Streams and Reservoirs of Korea, J. Korean Soc. Environ. Engi., 29(6), 640-643.

[19] Kletou, D., Kleitou, P., Savva, I., Attrill, M.J., Antoniou, C. and Hall-Spencer, J.M., 2018, Seagrass Recovery after Fish Farm Relocation in the Eastern Mediterranean, Mar. Environ. Research, 140, 221-233.

[20] KOSIS, Korean Statistical Infromation Service, https://Kosis.kr/index/index.do, 2022 (accessed 05.16.22).

[21] Lee, S.H. and Fuhrman, J.A., 1987, Relationships between Biovolume and Biomass of Naturally derived Marine Bacterioplankton, Applied and Environ, Microbiol., 53(6), 1298-1303.

[22] Lee, T.H., Hyun, J.H., Mok J.S. and Kim, D.S., 2008, Organic Carbon Accumulation and Sulfate Reduction Rates in Slope and Basin Sediments of the Ulleung Basin, East/Japan Sea, Geo-Marine Letters, 28(2), 153-159.

[23] Lee, T.H., Kim, D.S., Khim, B.K. and Choi, D.L., 2010, Organic Carbon Cycling in the Ulleung Basin Sediments, East Sea, Ocean and Polar Research, 32(2), 145-156.

[24] Lee, T.H., 2015, Sediment Oxygen Consumption Rate and Hydrogen Sulfide Release by Dissolved Oxygen Depletion in Hypoxic Srea of the Gamak Bay, Korea, J. Wet. Research, 17(3), 293-302.

[25] Lee, G.R., Hwang, D.W., Hwang, H.J., Park, J.H., Kim, H.C. and Kwon, J.N., 2017, Distribution and Pollution Status of Organic Matter and Heavy Metals in Surface Sediment around Goseong Bay, a Shellfish Farming Area, Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 23(6), 699-709.

[26] Lee, Y.M., Jun, E.J., Lee D.I. and Kim, G.Y., 2019, The Problems and its Improvement of Sea Area Utilization Consultation and Impact Assessment for Projects related to Marine Envrionment Restoration, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 25(1), 34-44.

[27] Lee, G.R., Hwang., H.J., Kim, J.B. and Hwang, D.W., 2020, Pollution Status of Surface Sediment in Jinju Bay, a Spraying Shellfish Farming Area, Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 26(4), 392-402.

[28] Lee, D.I., Kim, H.C. and Lee, W.C., 2022, Analysis of Environmental Improvement and the Policy Proposal According to mariculture Sediment Purification and Maintenance Projects, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 25(1), 53-62.

[29] Macleod, C.K., Mitchell, I.M., Crawford, C.M. and Connell, R.D., 2002, Evaluation of Sediment Recover after Removal of Finfish Cages from Marine Farm Lease No. 76 (Gunpowder Jetty), North West Bay, Technical report series, 13, 41.

[30] Macleod, C.K., Crawford, C.M. and Moltschaniwskyj, N.A., 2004, Assessment of Long Term Change in Sediment Condition after Organic Enrichment: Defining Recovery, Mar. Pollution Bulletin, 49(1-2), 79-88.

[31] Macleod, C.K., Moltschaniwskyj, N.A. and Crawford, C.M. 2006, Evaluation of Short-term Fallowing as a Strategy for the Management of Recurring Organic Enrichment under Salmon Cages, Mar. Pollution Bulletin, 52(11), 1458-1466.

[32] McGhie, T.K., Crawford, C.M., Mitchell, I.M. and O'Brien, D., 2000, The Degradation of Fish-cage Waste in Sediments during Fallowing, Aquaculture, 187(3-4), 351-366.

[33] MIFAFF, 2009, Status Investigation of Fishery Environment in 2008, Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries.

[34] MOF, 2017, Quality Guidelines for Habitat Environment of Marine Biota in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Notification No. 2017-109, 1.

[35] MOF, 2018, Korean Standard Method of Examination for Marine Environment. MOF report, Sejong, Korea.

[36] Park, J.H., Cho, Y.S., Lee, W.C., Hong, S.J., Kim, H.C. and Kim, J.B., 2012, Comparison of Material Flux at the Sediment-water Interface in Marin Finfish and Abalone Cage Farms, Southern Coast of Korea; In-situ and Laboratory Incubation Examination, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 18(6), 536-544.

[37] Park, S.H., Kim, S.Y., Sim, B.R., Park, S.J., Kim, H.C. and Yoon, S.P., 2021, Changes in Benthic Polychaete Community after Fish Farm Relocation in the South Coast of Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 27(7), 943-953.

[38] Pearson, T.H. and Black, K.D., 2001, The Environmental Impact of Marine Fish Cage Culture, Environmental Impacts of Aquaculture. Sheffield Academic Press, 1-31.

[39] Pereira, P.M.F., Black, K.D., McLusky, D.S. and Nickell, T.D., 2004, Recovery of Sediments After Cessation of Marine Fish Farm Production, Aquaculture, 235(1-4), 315-330.

[40] Sim, B.R., Kim, H.C., Kang, S.C., Lee, D.I., Hong, S.J., Lee, S.H. and Kim, Y.J., 2020, Geochemical Indicators for the Recov-

ery of Sediment Quality after the Abandonment of Oyster *Crassostrea gigas* Farming in South Korea, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 53(5), 773-783.

[41] Stein, R., 1991, Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments : Results from the Deep Sea Drilling Project/Ocean Drilling Program(DSDP/ODP), Springer Verlag, Berlin, 1-217.

[42] Yokoyama, H., 2003, Environmental Quality Criteria for Fish Farms in Japan, Aquaculture, 226(1-4), 45-56.

[43] Yoon, J.S., 1998, A Study on the Upwelling Phenomena of Anoxic Bottom Water (Blue Tide Phenomena) in the Coastal Areas, J. Environ. Science Int., 7(3), 291-299.

[44] Yu, F., Zong, Y., Lloyd, J.M., Huang, G., Leng, M.J., Kendrick, C., Lamb, A.L. and Yim, W.W.S., 2010, Bulk Organic $\delta^{13}C$ and C/N as Indicators for Sediment Sources in the Pearl River Delta and Estuary, Southern China, Estuarine, Coast and Shelf Science, 87(4), 618-630.

Received 9 August 2022
1st Revised 4 October 2022, 2nd Revised 6 March 2023
Accepted 14 March 2023