

자란만 패류양식어장의 기초생산력 및 환경인자 변동 특성

이대인^{*†} · 최용현^{**} · 홍석진^{***} · 김형철^{****} · 이원찬^{*****}

^{*}, ^{***} 국립수산물과학원 어장환경과 해양수산연구사, ^{**} 국립수산물과학원 어장환경과 연구원,
^{****} 국립수산물과학원 서해수산연구소 자원환경과 환경연구관, ^{*****} 국립수산물과학원 어장환경과 과장

Spatio-Temporal Variation Characteristics of Primary Productivity and Environmental Factors of Shellfish Mariculture in Jaran Bay, Korea

Dae In Lee^{*†} · Yong-Hyeon Choi^{**} · SokJin Hong^{***} · Hyung Chul Kim^{****} · Won-Chan Lee^{*****}

^{*}, ^{***} Scientific Officer, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

^{**} Scientific Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

^{****} Senior Scientific Officer, West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Korea

^{*****} Director, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약 : 본 논문은 남해안 자란만 패류양식어장에서 약 2년 동안 월별로 기초생산력, Chl. a, 영양염류, 입자유기물질과 퇴적물의 유기오염 정도 및 생화학 조성 등 주요 양식생물의 서식환경인자의 변동특성과 상관성 등을 분석하였다. 또한, 다른 연안 어장과 기초생산력을 비교하고 어장환경관리와 관련된 정책방안을 제시하였다. 월별 평균 기초생산력은 6.43~115.43 mgC m⁻² hr⁻¹ 범위로 여름과 가을에 높았는데, 가막만과 마산만 보다는 낮았고, 가로림만과 서해보다는 높았으며, 대체적으로 양식장이 많이 분포한 내만은 그 변동 폭이 상대적으로 컸다. Chl. a를 구성하는 식물플랑크톤의 크기별 점유율이 시기별로 다소 차이가 있었고, 영양염의 고갈로 인한 식물플랑크톤의 생산력 제한은 거의 없었으나, 대부분 시기에 N/P비가 16 이하로 질소가 상대적으로 부족한 것으로 판단되었다. 수층 입자유기물질의 생화학적 조성은 탄수화물이 가장 높았으나, 반면 표층 퇴적물에서는 지질과 단백질 함량이 높았다. 퇴적물의 TOC와 AVS 농도는 만 안쪽에서 높았고 일부 시기에는 어장환경기준을 초과한 상태였으며, C:N 비는 평균 8.1~10.4 범위로 나타났다. 기초생산력은 Chl. a와의 상관성이 가장 높았고, 입자물질성분 중에서는 탄소보다는 질소 및 단백질과의 상관성이 높았다. 최근 5년 동안의 수층에서의 Chl. a, DIN, DIP 농도는 감소하는 경향이였지만, 반대로 퇴적물의 오염도는 증가하는 추세였다. 자란만의 연간 기초생산력 125.9 gC m⁻² yr⁻¹, 굴 양식장 면적 4.97 km²를 고려하면 연간 식물플랑크톤으로부터 생산되는 탄소량이 약 625 ton이며, 연간 굴 생산 습중량은 약 6,250 ton으로 추정되었다.

핵심용어 : 시-공간 변동, 환경인자, 기초생산력, 패류양식어장, 자란만

Abstract : This study analyzed the spatio-temporal variation characteristics of major environmental factors such as primary productivity (PP), chlorophyll a, nutrients, sinking particle matters, and organic contamination and biochemical composition of surface sediment on a monthly basis for approximately 2 years around shellfish mariculture in Jaran Bay, Korea. In addition, PP in Jaran Bay was compared with that in other coastal areas and related policy plans were proposed. The average PP of the study area was high in summer and autumn with 6.43~115.43 mgC m⁻² hr⁻¹ range. This was lower than that in Gamak Bay and Masan Bay, whereas higher than that in Garorim Bay and the West Sea. The PP in coastal waters, where many aquaculture farms were distributed, significantly fluctuated. The different size compositions of phytoplanktons constituting chlorophyll a slightly varied by month, and little restriction existed on the productivity of phytoplanktons owing to the depletion of nutrients. Typically, the Redfield ratio was less than 16, indicating that nitrogen was the limiting factor for the growth of phytoplanktons. The biochemical composition of particulate organic matters in the water column showed the highest carbohydrates, but lipids and protein contents were high in surface sediments. The concentration of TOC and AVS of the surface sediments was high at inside of bay, and sometimes, exceeded the environmental criteria of fishing grounds. The organic C:N ratio of sediments ranged from 8.1 to 10.4 on average. PP had the highest correlation with chlorophyll a, nitrogen and protein of particle organic materials. Recently, chlorophyll a, DIN, and DIP of water column trends tended to decrease, however, the contamination of sediments increased. Considering the annual PP of 125.9 gC m⁻² yr⁻¹ and mariculture area (oyster) of 4.97 km², the annual carbon production from phytoplanktons was estimated to be about 625 tons, and the annual total wet weight of shellfish (oyster) was estimated to be about 6,250 tons.

Key Words : Spatio-temporal variation, Environmental factor, Primary productivity, Shellfish mariculture, Jaran Bay

† Corresponding Author : dilee70@korea.kr, 051-720-2523

1. 서론

최근 우리나라 일부 연안 어장에서는 기후변화, 육상 하천 등 물질 유입원의 부하량 변동 및 양식생물의 가용 먹이량을 초과한 시설량 증대 등으로 양식생물의 성장률 또는 생산성이 저하되거나, 빈산소수괴 발생 등 환경악화 문제가 나타나고 있어 어장생태계 기반의 환경관리를 위한 다양한 대책과 현장형 연구가 추진되고 있다(Lee et al., 2016b; Lee et al., 2022; NIFS, 2022). 이러한 환경과 생산성의 현안 문제를 포함하고 있는 어장관리 분야는 수온·염분과 영양염류 등 기초 수질환경인자의 변동, 장기간 해면이용과 관련된 자가 오염에 따른 퇴적물의 누적적인 유기오염도의 변화, 밀식 양식에 따른 생물 종 간의 먹이경쟁과 먹이의 질적 변화 등 수층-퇴적층-생물 간의 물질순환과 밀접한 관련성이 있으므로 각 영향 요소 파악 및 상관성에 대한 진단·평가(Cho et al., 2013; Choi et al., 2013; Tover et al., 2000)와 함께 보다 체계적인 데이터 구축이 더욱 중요해 지고 있는 상황이다. 특히, 양식생물의 생산성 또는 저차 생태계 구성요소의 변동과 관련될 수 있는 기초생산력과 주요 환경인자의 상관성에 대한 보다 정밀한 해석이 필요한 시점이다(Ferreira et al., 2007; Joo et al., 2002; Kang et al., 2012; Lee et al., 2020a).

어장환경에서 기초생산력(Primary productivity)은 단위시간당 식물플랑크톤의 일차적인 생산력(유기물 및 산소 발생)으로 생태계의 유지와 물질순환 및 양식생물의 성장에 중요한 역할을 한다(Kwon et al., 2015; Lee et al., 1991). 기초생산은 광, 질소와 인 등의 영양염류, 성층형성 등의 수층 안정성, 해수 유동장과 같은 물리화학적 요인과 식물플랑크톤의 군집구조, 동물플랑크톤과 양식생물 등의 포식압 같은 생물학적 요인의 상호작용에 의해 조절된다(Eppley, 1972; Joo et al., 2002). 대부분의 해양생물이 이용하는 먹이원은 식물플랑크톤과 같은 기초생산자의 광합성으로부터 시작되는데, 식물플랑크톤은 해양환경변화에 민감하게 반응하며, 이들을 주요 먹이원으로 하는 동물플랑크톤 및 여과섭식자인 패류 등의 양식생물들에게 직접적인 영향을 미치고, 나아가 식물플랑크톤의 군집구조 변동은 먹이망을 구성하는 해양생물들의 군집조성과 현존량을 변화시켜 먹이망구조에 영향을 미칠 수 있다(Chung and Park, 1988; Lorenzen, 1963). 이와 같이 광합성에 의해 합성된 유기물(내부생산 유기물)은 해양생물이 이용하는 중요한 먹이원이 되므로 양식장 수역의 기초생산력 조사는 어장생산성 및 어장수용력 산정 연구 측면에서 중요한 고려 요소이다(Carver and Mallet, 1990; Duarte et al., 2003; Kang et al., 2009; NFRDI, 2012; NFRDI, 2013; NFRDI, 2014). 특히 굴 양식장 수역에 있어서 기초생산력의 크기는 굴의 먹이공급원 및 굴의 성육에 관계되므로 기초생산력에

대한 파악이 매우 중요하다(Lee et al., 1991).

이러한 어장의 기초생태계를 이루는 주요 구성요소의 변동, 즉 영양염류와 식물플랑크톤 감소, 용존산소의 부족 등으로 최근 현장 어장환경에서는 다양한 변화들이 나타나고 있는데, 가막만의 굴 비만도 저조, 고성만의 가리비 폐사, 비인만과 완도해역에서의 김 황백화와 같은 현상들이다. 특히, 영양염(용존무기질소)의 감소는 식물플랑크톤의 양(Chl. a)의 감소를 유발하고, 이는 먹이 질의 변화(크기가 소형에서 초소형화)를 일으켜서 기초생산력 변동과 연관될 수 있다는 보고도 있다(Lee et al., 2020c; Widdows et al., 1979). 식물플랑크톤 현존량과 영양염류 등은 해양환경 및 생태계조사의 기본 항목으로서 조사가 많이 이루어져서 데이터도 축적되어 왔고(Lee et al., 2018; Park and Park, 1997), 단기간 조사에 따른 기초생산력과 주요 환경인자와의 상관성도 보고되었다(Joo et al., 2002; Kwon et al., 2015). 그러나 어장 생산성 또는 수용력 산정과 관련된 기초생산력에 대한 중장기적인 조사, 그리고 이와 관련된 생지화학적 구성요소의 변화, 나아가서 양식생물의 성장과 관련된 종합적이고 체계적인 조사는 거의 이루어지지 않았다. 즉, 환경을 진단하는 일반적인 모니터링은 이루어져 왔지만, 원인과 현상을 규명하고 생산성과 관련된 주요 인자들의 상관성을 파악하는 종합적인 조사는 시·공간적 및 비용적 측면에서 한계가 있는 상황이다.

기초생산력의 변동성 파악 및 다른 환경인자와의 상관성 해석은 어장의 생산성 및 적정 수용력 산정 등 어장관리 영역에서 중요한 사항이나, 현재까지 우리나라 연안 양식어장에서 기초생산력에 대한 관측 자료가 매우 부족하고, 어장관리 영역에서 활용성 증가를 위해 장기 시계열 자료축적이 필요한 실정이다. 또한, 양식장의 수용력 산정 및 기초생산력 예측과 관련된 국내외 사례는 많이 있지만(Park et al., 2002), 대부분 식물플랑크톤을 중심으로 하는 저차 생태계 모델링을 통해 현존량을 계산해서 단위시간당 생산력으로 환산하고 있는데(부영양화, 에너지동역학, 딥러닝 생산력 추정 등), 모델링 과정에서의 검·보정 자료의 부족, 기초생산력 변동성의 재현, 식물플랑크톤의 군집별·크기별 광합성 효율과 관련된 연구 사례의 미흡 등 중장기 예측 기법은 개발 초기 상태로 판단된다. 이러한 측면에서, 어장 생산성 및 관리를 위한 체계(모니터링-진단·평가-예측-개선 등)에서 상대적으로 기초생산력의 주기적이고 지속적인 조사가 이루어지지 않은 점은 아쉬운 점으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 패류양식이 활발한 우리나라 남해 연안에 위치한 자란만 양식어장에서 어장수용력 산정 및 체계적 환경관리를 위한 기초 연구의 일환으로 약 2년 동안 월별로 굴 등 패류의 주요 먹이원과 관련된 식물플랑크톤의 기초생산력과 Chl. a 크기의 변화를 파악함과 동시에, 수층

자란만 패류양식어장의 기초생산력 및 환경인자 변동 특성

에서의 영양염류 변동과 물질순환 특성과의 상관성을 분석하였다. 또한, 퇴적물의 유기오염 정도와 생화학조성의 변동 특성 및 기초생산력을 통한 굴의 생산 정도를 간접적으로 고찰하였다. 나아가서 다른 주요 해역의 기초생산력과 비교하여 어장환경관리와 관련된 정책방안을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사 지역 및 조사 시기

패류양식장의 기초생산력 변동 특성 등을 파악하기 위한 조사 지역은 우리나라 남해안에 위치한 경상남도 고성군의 자란만 어장으로 굴과 가리비 등이 활발하게 양식되고 있는 곳이다(Fig. 1). 만내 양식장 분포를 고려하여 7개 정점을 선정하여 굴의 주 양식순기(5~6월 수하, 11월~2월 수확)를 고려하여 2015년 9월부터 2017년 6월까지 약 2년 동안 매월 주요 수질과 퇴적물 환경인자, 생물인자 등의 변동특성을 분석하였다.

2.2 조사항목 및 분석방법

해수 시료는 식물플랑크톤의 기초생산력, Chl. a, 입자물질, 영양염류 등을 분석하였다. 양식생물의 먹이량을 나타내는 Chl. a 및 부유물질을 분석하기 위해 각 정점의 유광층(100%, 30%, 1%) 내 3개의 수심에서 해수를 Niskin sampler를 사용하여 채수하였고, GF/F 필터지에 여과한 후 드라이아이스에 냉동 보관하여 실험실로 운반하였다. Chl. a는 아세톤으로 추출한 후 10-AU fluorometer를 이용하여 흡광도를 측정하여 계산하였다. 먹이질을 평가하기 위한 해수의 입자물질 중 단백질은 Lowry et al.(1951)의 방법으로 분석하였으며, 탄수화물은 Dubois et al.(1956)의 방법, 지질은 Marsh and Weinstein(1966)의 방법에 의거하여 분광광도계를 이용하여 측정하였다. 입자성 유기물(POM; Particulate organic matter)의 탄소 함량은 시료를 미리 태운(450°C, 4시간) GF/F 여과지로 여과한 후 진한 염산 증기로 무기탄소를 제거하여 원소-질량분석기(Finnigan Delta+XL mass spectrometer)로 분석하였고, 질소 함량 측정 시료는 동일한 방법으로 여과한 후 염산처리하지 않고 바로 원소-질량분석기로 분석하였다.

Chl. a 농도 및 색소조성은 고성능 액체 크로마토그래피(HPLC; Agilent 1200s, Agilent technologies, United States)를 이용하여 분석하였다. 분석시료는 미리 태운 47 mm GF/F 여과지로 여과하여 100% 아세톤 및 내부표준물질(apo-8-carotenol)을 넣고 초음파파쇄기로 추출한 후 냉암소에서 24시간 보관 후 측정하였다. 분석 전 모든 시료 및 용매는 0.2 µm 필터로 여과하였으며, water packing을 한 후 측정하였다. 기초 생산력 측정 관련 배양실험은 조사정점의 해수를 상대적인 광량에

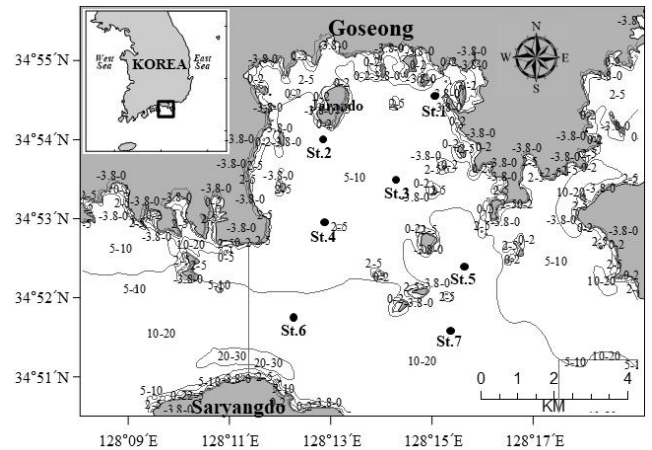


Fig. 1. Study area and sampling stations in shellfish mariculture of Jaran Bay, Korea.

따라 100%, 50%, 30%, 12%, 5%, 1%의 수심에서 채수한 후 대형 동물플랑크톤을 제거하기 위해 333 µm sieve로 거르고, 시료에 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ (98%)를 첨가하였다. 일정 시간동안 현장에서 광량에 맞추어 배양을 실시한 후, 배양이 끝난 시료는 미리 태운(450°C, 4시간) 25 mm GF/F 여과지로 여과하였다. 여과된 여과지는 동결 건조 후에 진한 염산 증기로 무기탄소를 제거하여 원소-질량분석기(Finnigan Delta+XL mass spectrometer)로 분석한 후 Hama et al.(1983)의 계산식에 따라 기초 생산력을 계산하였다. 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소, 인산인, 규산규소는 해양환경공정시험기준(MOF, 2013)에 따라 영양염 자동분석기(BRAN+LUEBBE QUAATRO/Germany, Auto analyzer)를 사용하여 측정하였다. 용존무기질소(DIN, Dissolved inorganic nitrogen)는 암모니아질소, 아질산질소 및 질산질소의 합으로 표시하고, 용존무기인(DIP, Dissolved inorganic phosphorus)은 인산인 값으로 고려하였다.

퇴적물의 유기물 등을 파악하기 위해 grab sampler로 표층 퇴적물을 채취하였으며, 채취 시료는 냉동 보관 후 실험실로 운반하여 산화발성황화물(Acid volatile sulfide; AVS), 총유기탄소(Total organic carbon; TOC), 총질소(Total nitrogen; TN), 탄수화물(Carbohydrates), 단백질(Proteins) 및 지질(Lipids)을 분석하였다. AVS는 해양환경공정시험기준에 의거하여 황검지관법으로 분석하였다. TOC와 TN는 퇴적물 시료를 동결건조하여 연마한 후, 진한 염산으로 약 30초 동안 훈증하여 탄산염을 제거하고 분쇄하였다. 전처리된 시료는 105°C에서 2시간 건조시키고, 상온에서 2시간 방치 후 주석박막으로 3~5 mg의 시료를 말아 CHN 원소분석기(Flash EA-1112, Thermo Finnigan)로 측정하였다. 퇴적물의 탄수화물, 단백질 그리고 지질을 분석하기 위해 건조시킨 퇴적물을 잘게 분쇄하여 0.5 g의 무게를 취하여 15 mL falcon tube에 넣어 각각의 항목을

분석하였다. 탄수화물은 Phenol-sulphuric acid 방법(Dubois et al., 1956), 단백질은 Lowry et al.(1951)의 방법, 그리고 지질은 chloroform과 methanol로 추출하는 Marsh and Weinstein(1966)의 방법에 의거하여 분석하였다.

3. 결과

3.1 자란만의 기초생산력과 Chl. a의 시·공간적 분포 특성

2015년 9월부터 2017년 6월까지 월별 및 정점별로 식물플랑크톤의 기초생산력을 측정된 결과(Fig. 2), 평균값은 6.43~115.43 mgC m⁻² hr⁻¹ 범위로 최대는 2016년 7월, 최소는 2015년 11월에 나타났다. 계절 평균값은 각각 봄 21.14, 여름 49.44, 가을 47.93 그리고 겨울 27.52 mgC m⁻² hr⁻¹로 나타나서 대체적으로 여름과 가을이 상대적으로 높았다. 정점별로는 5번과 3번이 높았고, 4번이 낮았는데, 만 내부 정점(St.1~S.2) 보다는 외부 정점에서(St.5~St.7) 상대적으로 높은 평균값을 보였다. 이러한 기초생산력은 남해안 강진만과 광양만의 결과보

다(Joo et al., 2002) 매우 높은 특성을 보였다.

식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 간접지표인 Chl. a의 정점별 월별 변동 및 크기에 따른 농도 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 총 Chl. a의 평균 농도는 0.29~4.89 μg L⁻¹ 범위로 2016년 10월에 최대, 2017년 3월에 최소를 보였다. 정점별로는 3번에서 최대, 7번에서 최소를 나타내었다. 크기별 Chl. a 농도의 평균은 20 μm 이상이 0.10~3.75 μg L⁻¹, 2~20 μm 사이가 0.08~1.72 μg L⁻¹, 0.7~2 μm 사이가 0.11~0.80 μg L⁻¹ 범위를 나타내었다. Chl. a의 평균 농도를 고려한 크기별 점유 비율을 살펴보면, 20 μm 이상이 2015년 9~10월에 60~80%, 2015년 12월~2016년 2월에 40~65%, 2016년 10월~2017년 2월에 48~77%를 차지하여 대부분 시기에 우점하였다. 다만, 2016년 5월~7월에는 2~20 μm 사이가 42~54%로 가장 높았고, 2017년 3월~5월에는 소형인 0.7~2 μm 사이가 36~48% 범위로 최대를 나타내었다. 즉, 시기별로 Chl. a를 구성하는 식물플랑크톤의 크기별 점유율이 다소 차이가 나타나는 것으로 판단되었다. 극미소 식물플랑크톤은 영양염 농도가 낮은 외양에

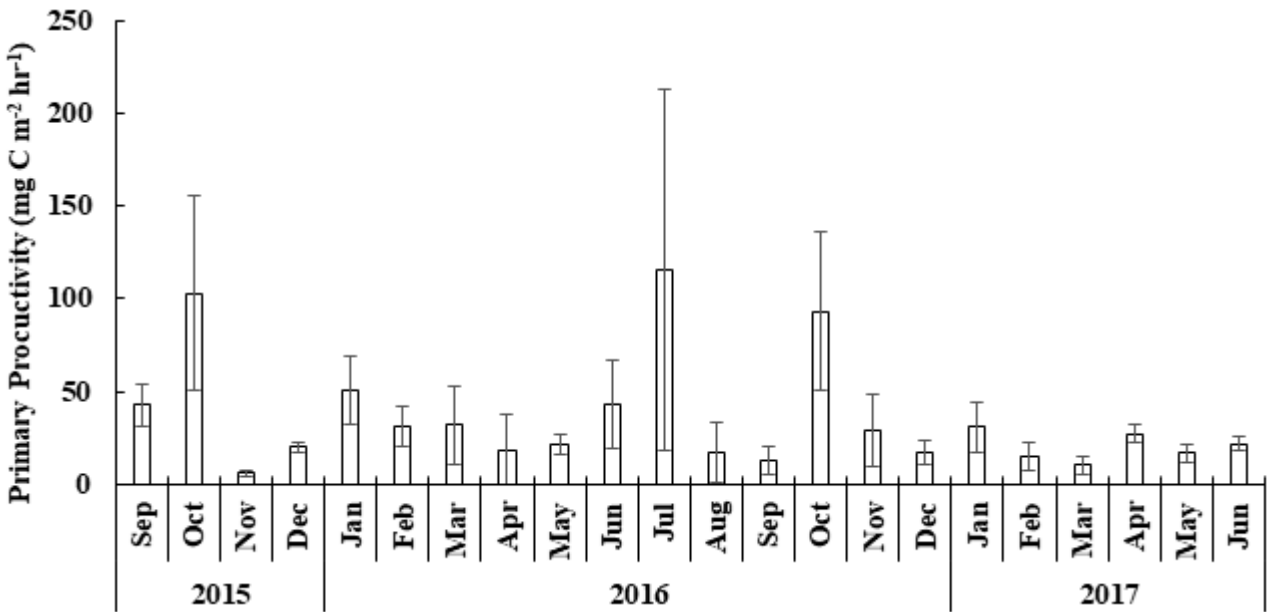


Fig. 2. Spatio-temporal variations of primary productivity in Jaran Bay during 2015~2017.

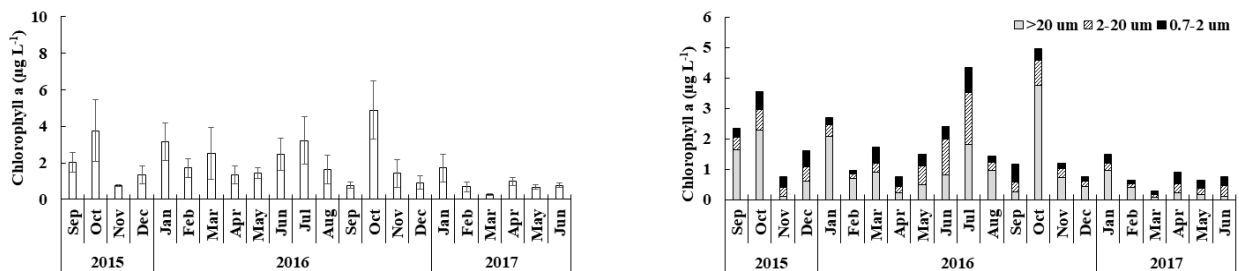


Fig. 3. Monthly variations of total and different size compositions of chlorophyll a concentrations in Jaran Bay during 2015~2017.

서 적응력이 높아서 영양염 농도가 높은 내만에서 상대적인 기여가 작다는 결과와 유사하였다(Lee et al., 2016a).

3.2 영양염류의 시·공간적 분포 특성

수층 내 주요 영양염 농도 분포를 분석한 결과(Fig. 4), 용존무기질소(DIN)의 평균 농도는 1.18~11.90 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 범위로 2015년 12월에 최대, 2016년 3월에 최소를 나타내었다. 용존무기인(DIP)의 평균 농도는 0.06~1.02 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 범위로 2015년 12월에 최대, 2016년 5월에 최소를 나타내었다. 시기별 농도 변화는 춘계에 상대적으로 저농도를, 하계에 점차 농도 증가를 보이다가 추계 또는 동계에 농도가 최대가 되는 경향이 나타났다. 수중환경에서 영양염류의 화학양론(stoichiometry)은 식물플랑크톤 성장의 잠재적인 제한 요소를 판단하는데 사용되며, 인(P)의 잠재적인 결핍은 $N/P > 22$ 환경에서, 질소(N)는 $N/P < 10$ 환경에서 나타난다. Justic et al.(1995)는 다양한 영양염 이용속도에 관한 연구결과를 기준으로 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염류의 농도 기준을 규산염은 2 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 용존무기질소는 1 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 인산염 인은 0.1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 로 사용한 바 있다.

용존무기질소는 모든 시기에 기준 값보다 높았으며 용존무기인은 2016년 6월과 2018년 7월에 각각 0.06 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 0.09

$\mu\text{mol L}^{-1}$ 값을 제외하고는 기준 값보다 높았으며, 영양염류 고갈로 인한 식물플랑크톤의 생산력 제한은 거의 없음을 의미한다고 볼 수 있다. N/P는 5.7~25.9 범위로 2016년 5~7월이 17 이상으로 최대분포를, 2015년 9~10월에 7 이하로 최소분포를 나타내었다. 대부분 시기에 Redfield ratio인 16 이하로 질소가 상대적으로 부족함을 의미하였다. 정점별 수층별 용존무기질소가 1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 이하가 나타난 곳은 만 내부 정점 1에서 2016년 1월~3월 사이였다.

3.3 입자유기물질의 생화학 조성 변화

수층 입자유기물질의 생화학적 조성은 탄수화물, 단백질, 지질로 구성되며, 탄수화물은 136.1~336.3 $\mu\text{g L}^{-1}$, 단백질은 21.7~202.3 $\mu\text{g L}^{-1}$, 지질은 70.4~158.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 범위로 전체 평균 측면에서 탄수화물이 약 52%, 지질이 약 28%, 단백질이 약 20%를 차지하였다(Fig. 5). 시기적으로는 2016년 7월에 최대, 2016년 12월에 최소를 보였다. 탄수화물은 2015년 10월에서 2016년 1월까지 동안 거의 일정하였고, 2016년 2월을 기점으로 증가하여 4월까지 상대적으로 높은 수준을 유지하였다가 하계는 다소 비율이 감소한 후, 그리고 추계와 동계에 다시 비율이 증가하는 양상을 보였다. 지질은 춘계에 비율이 감소하였고, 단백질은 하계에 농도의 비율이 증가하는 양상을

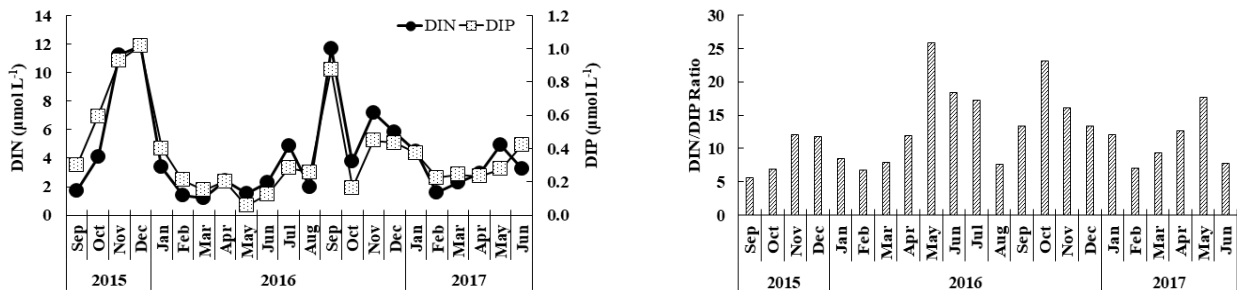


Fig. 4. Monthly variations of DIN, DIP and DIN:DIP ratio at water column in Jaran Bay during 2015~2017.

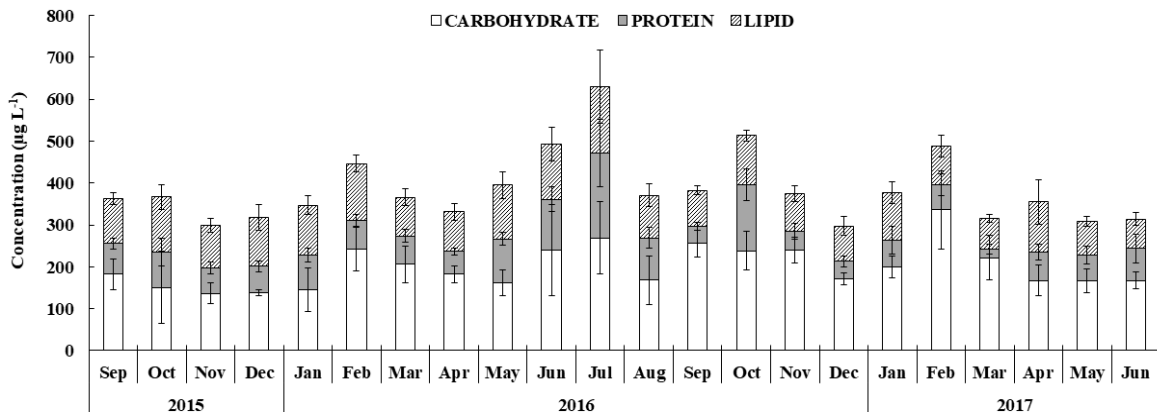


Fig. 5. Monthly variations of biochemical compositions of particle organics at water column in Jaran Bay during 2015~2017.

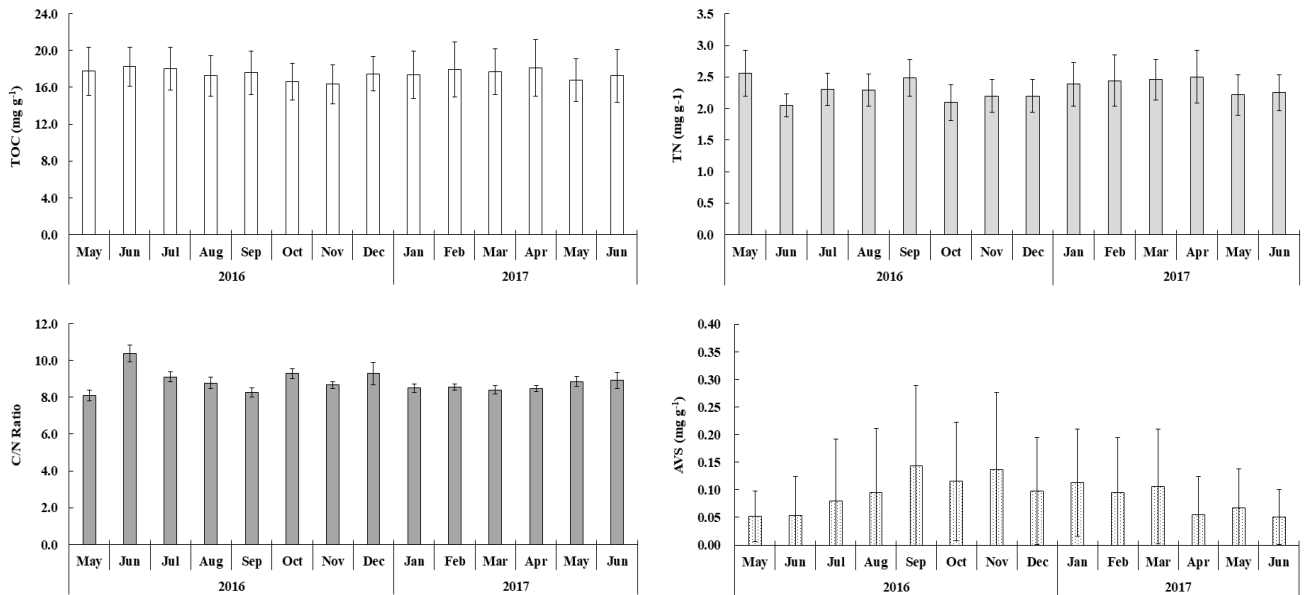


Fig. 6. Monthly variations of TOC, TN, C:N ratio and AVS concentrations at surface sediment in Jaran Bay.

나타내었다. 지질은 다른 생화학 성분과 연관성이 없는 변화를 보였으나 탄수화물과 단백질의 경우 거울상을 보이며 변동하였다.

3.4 표층 퇴적물의 유기물 농도 변화

표층 퇴적물의 유기물 등 주요 환경지표의 변화를 Fig. 6에 제시하였다. TOC 농도는 16.4~18.3 mg g⁻¹-dry 범위로 시기적으로 큰 차이는 없었으나 하계에 다소 높았다. 공간적으

로는 만 내부의 정점인 2, 3, 1번이 상대적으로 높았는데, 어장환경기준인 20 mg g⁻¹-dry 이하를 초과하는 경우도 나타났다. Cho et al.(2013)은 TOC와 저서 다모류(다양도)간의 상관성에 의한 어장환경평가 기준 농도를 Peak Point 15 mg g⁻¹-dry, Warning Point 26 mg g⁻¹-dry 그리고 Contaminated Point 31 mg g⁻¹-dry로 설정하였고, 이 기준에 따르면 자란만 표층 퇴적물은 대체적으로 유기오염정도가 양호한 환경을 보이는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 Yokoyama et al.(2004)이 제시한 어

Table 1. Comparison of AVS, TOC and TN concentrations between this and previous studies from various regions. N.D. means no data

| Region | AVS | TOC | TN | Reference |
|------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| | | (mg g ⁻¹ -dry) | | |
| Gomso Bay | N.D.~0.07 (0.02) | 0.7~2.3 (1.5) | 0.10~0.35 (0.22) | Choi et al. (2015) |
| Gamak Bay | N.D.~2.20 (0.30) | 4.9~77.5 (13.3) | 0.72~3.61 (1.64) | NFRDI (2010) |
| Hansan-Geoje Bay | N.D.~0.78 (0.13) | 12.9~27.6 (18.7) | 1.70~3.70 (2.43) | NFRDI (2009) |
| Jinhae Bay | 0.08~3.0 (0.66) | 14.7~49.4 (27.7) | 1.71~7.74 (3.69) | NFRDI (2009) |
| Masan Bay | 0.15~1.17 (0.49) | 15.7~18.4 (17.0) | 2.11~3.44 (2.54) | NFRDI (2010) |
| Yeoja Bay | N.D.~0.55 (0.13) | 4.3~12.1 (8.4) | 0.55~1.45 (1.09) | Choi et al. (2013) |
| Gangjin Bay | 0.02~0.66 (0.25) | 9.0~16.3 (12.6) | 1.35~2.20 (1.72) | Choi et al. (2013) |
| Jaran Bay | 0.05~0.14 (0.09) | 16.4~18.3 (17.5) | 2.1~2.6 (2.3) | This study |

자란만 패류양식어장의 기초생산력 및 환경인자 변동 특성

류양식장 주의구역(warning zone) 농도인 20 mg g^{-1} , Hyland et al.(2005)의 대형저서동물군집에 영향을 줄 수 있는 농도 35 mg g^{-1} 이하의 분포를 보였다. 자란만의 TOC 농도는 가막만, 한산·거제만, 진해만 및 마산만 보다는 낮았고, 강진만과는 유사하였으며, 곰소만과 여자만 보다는 다소 높은 농도를 보였다(Choi et al., 2013; Choi et al., 2015; NFRDI, 2009; NFRDI, 2010)(Table 1).

TN 농도는 $2.1 \sim 2.6 \text{ mg g}^{-1}$ -dry 범위로 시기적으로 큰 차이는 없었으며, 공간적으로는 만 내부의 정점인 2, 3, 1번이 상대적으로 다소 높았다. 이러한 TN 농도는 거제·한산만, 진해만, 마산만 보다는 낮았고, 강진만과 가막만과는 유사하였으며, 곰소만과 여자만 보다는 높았다.

C:N 비는 평균적으로 $8.1 \sim 10.4$ 범위로 나타났으며, 시·공간적으로 유사하게 나타났다. 표층 퇴적물 중 C:N 비는 해양 퇴적물 내로 유입되는 유기물질의 기원을 밝히는 추적자로서 이용되고 있으며, C:N 비가 10 이상일 경우는 육상기원 유기물질 유입의 영향을 크게 받고 있음을 의미하며, 그 비가 8 이하일 경우는 수역 자체에서 생성된 생물기원 유기물질의 퇴적이 큰 것으로 이해할 수 있다(Muller, 1977; Pocklington and Leonard, 1979). 조사기간 동안 본 연구지역 표층 퇴적물의 C:N 비는 대부분 8 이상에서 10 이하로 퇴적물 중 유기물은 외부 유입과 내부 생성에 의한 생물기원이 혼합된 것으로 생각된다.

AVS 농도는 $0.05 \sim 0.14 \text{ mg g}^{-1}$ -dry 범위로 9월~11월 사이가 최대를 나타내었고, 공간적으로 내만 정점(1~3)이 만 외부 정점(5~7) 보다 뚜렷하게 농도가 큰 양상을 보였다. 퇴적물 중에 포함된 황화물 함량은 퇴적물의 건강도를 평가하는 기준으로 자주 이용되고 있으며, 천해지역이나 어장환경에서는 퇴적물 중 황화물 함량이 높으면 퇴적물 내 산소의 고갈 및 결핍이 발생하여 저서생물이나 어장환경에 큰 영향을 미

치기 때문에 중요한 지화학적 지시자로 간주된다(Kang et al., 2012). 어장환경기준에 관한 고시(MOF, 2017)의 「수산생물 서식 어장환경기준」에 따르면 AVS는 0.5 mg g^{-1} -dry 이하로 설정되어 있고, Cho et al.(2013)은 대형저서동물과의 상관성 분석을 통해 양식장 환경을 4가지 유형으로 분류하였다. 생물량이 최고치에 달하는 AVS 0.25 mg g^{-1} -dry은 'Peak Point', 생물량이 급격하게 저하한 AVS 0.48 mg g^{-1} -dry은 'Warning Point', 무생물 구간에 도달한 AVS 0.87 mg g^{-1} -dry은 'Critical Point'로 기준값을 설정하였다. 이러한 기준에 따르면 본 연구지역 표층 퇴적물은 황화물에 대한 오염정도가 양호한 것으로 생각된다. 자란만에서 AVS 농도는 부양양화 해역으로 알려진 진해만, 마산만 그리고 가막만 보다는 낮은 수준이었고, 인근지역인 한산·거제만 및 여자만과는 유사하였으며, 서해의 곰소만 보다는 높은 농도를 보였다.

자란만의 표층 퇴적물 중 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 함량은 각각 22.8%, 34.7%, 42.5%로 나타나서 지질의 기여도가 컸고, 단백질 또한 상대적으로 높았다(Fig. 7). 특히, 조사기간 동안에 퇴적물의 생화학적 조성 중 단백질이 차지하는 함량이 높게 나타났다. 퇴적물의 생화학적 조성은 유기물의 기원을 알 수 있는 접근 방법일 뿐만 아니라, 저서 생물들에서 이용 가능한 먹이질을 평가하기 위한 유용한 수단으로 활용될 수 있다(Rossi and Lardcci, 2002). Cho et al.(2013)은 남해안에서 기준에 측정된 퇴적물 자료(입도, 색소, TOC, TN, 단백질, 탄수화물, 지질, biopolymeric carbon)를 활용하여 지역 특성을 구분을 하였고, 이를 바탕으로 탄수화물, 단백질 및 지질의 함량비를 제시하였다. 진해만, 광양만, 부산연안, 도암만, 진도연안 등의 경우 탄수화물의 함량이 가장 높게 나타났으며, 본 연구해역인 자란만과 거제만의 경우 탄수화물의 함량이 상대적으로 낮았다(Table 2). 자란만과 거제만의 경우는 굴 양식장 면적이 매우 넓은 우리나라의 대표

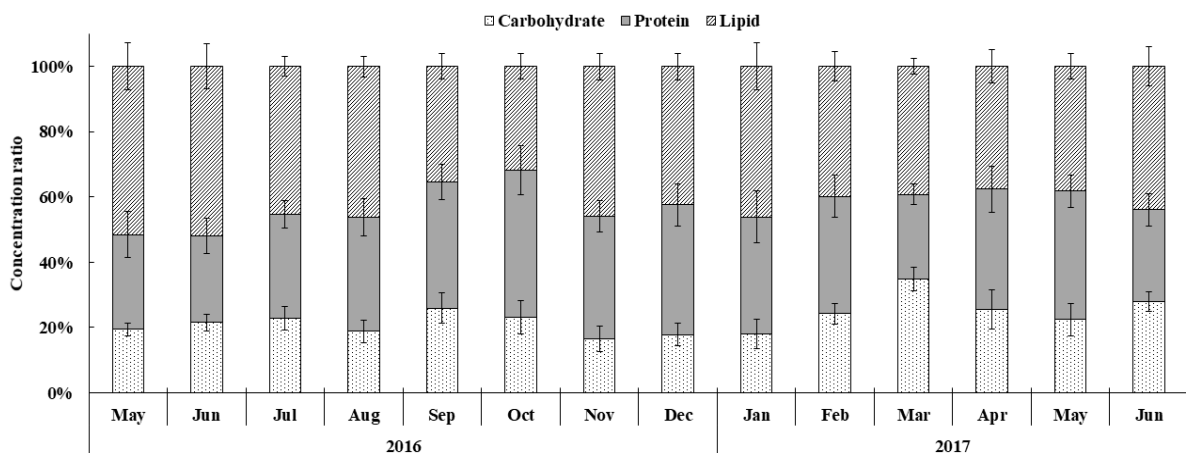


Fig. 7. Monthly variations of biochemical compositions of surface sediment in Jaran Bay.

Table 2. Comparison of biochemical compositions ratio of surface sediment between this and previous studies from various regions

| Region | Protein | Carbohydrate | Lipid | Reference |
|---|---------|--------------|-------|-------------------|
| | % | | | |
| Masan Bay, Jihac Bay | 35.0 | 57.3 | 7.7 | Cho et al. (2013) |
| Jinju Bay, Kwangyang Bay, Busan and Ulsan coast | 31.2 | 57.9 | 10.9 | |
| Doam Bay, Deukryang Bay, Gamak Bay, Haenam Bay | 29.9 | 52.5 | 17.6 | |
| Shinan, Jindo and Muan coast | 18.4 | 56.1 | 25.5 | |
| Geoje Bay | 55 | 21 | 24 | NFRDI (2014) |
| Jaran Bay | 34.7 | 22.8 | 42.5 | This study |

적인 굴 양식 해역이며, 굴 체내 성분의 60~70%가 단백질로 구성되어 있기 때문에(NFRDI, 2014), 이러한 요인에 의해서 자란만과 거제만의 표층퇴적물 중 단백질의 성분이 탄수화물보다 다소 높은 것으로 생각된다.

4. 고찰

4.1 기초생산력 및 주요 환경요인의 변동 해석과 상관성 평가

자란만 패류양식장의 기초생산력에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위해 계절별로 선형회귀식을 이용하여 상관성을 분석하였다(Fig. 8). 전 기간동안 전체 조사정점을 평균한 항목의 상관성 분석결과, 기초생산력과 Chl. a와의 상관성이 가장 높게 나타났고($R^2=0.77$), 수층 영양염류와의 상관성은 거의 나타나지 않았다. 특히, 기초생산력은 입자물질에서 질소와 상관성이 탄소보다 높았고(Lee et al., 2020b), 생화학 물질 중 탄수화물과는 거의 상관성이 없지만, 단백질($R^2=0.59$)과 지질($R^2=0.46$)과의 상관성은 어느 정도 있는 것으로 보였다. Chl. a와 영양염류와의 시기별 그리고 공간별 상관성은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 기초생산력과 다른 환경요인과의 상관성에 대한 연구가 많이 이루어졌는데, 기초생산력은 Chl. a와 양의 상관성이 높고 영양염류와는 상관계수가 떨어진 연구(Kwon et al., 2015; Lee et al., 1991)는 본 연구결과와 유사하였다. 한편, 기초생산력은 수중광도, Chl. a, pH에 의존하며(Joo et al., 2002), Chl. a와 질산염과 상관성이 높다는(Lohrenz et al., 1988) 보고도 있다.

일반적으로 주요 연안어장의 기초생산력은 평균 200~900 mg C m² d⁻¹ 범위로 봄, 가을에 높고 동계에 감소하는 경향을 가지며, 여름에는 일부 광저해 현상이 일어나는 것으로 보고되고 있는데, 본 자란만에서는 계절적으로 평균값을 볼 때 여름이 가장 높았고, 가을, 겨울, 봄 순이었다. 이러한 계절별 변동특성은 강진만과 유사하였고(Joo et al., 2002), 여름에 최대와 동계 또는 가을에 최소를 보인 한산-거제만과 가막만과는 다소 다른 변동특성을 보였다(Lee et al., 1991).

본 연구결과에 따른 자란만의 수질 및 퇴적물 환경특성을 추가 검증하기 위해 자란만에서 실시된 최근 어장환경모니터링 결과를 활용해 변동특성을 분석한 결과(Fig. 9), 영양염류에서 질소와 인은 거의 유사한 계절별 변화를 보였는데, 대체로 12월에 최대, 8월에 최소경향이 나타났다. Chl. a의 peak는 대체로 10월 또는 4월에 최대, 6월 또는 8월에 최소를 나타내었다. 최근 5년 동안의 추세는 Chl. a, DIN, DIP 모두 감소경향이었다. 한편, 퇴적물의 유기물 함량을 나타내는 지표인 COD는 20~25 mg g⁻¹-dry, AVS는 0.15~0.30 mg g⁻¹-dry 범위였는데(어장환경기준 만족), 수질환경특성과는 달리 시계열적으로 농도가 점점 증가하는 경향이 있었다. 즉, 수질환경은 다소 영양염류와 식물플랑크톤의 현존량이 다소 낮아지는 경향이었지만, 퇴적물의 오염도는 증가하는 특성이 나타났다. 또한, 이 지역에서 저층 용존산소가 3 mg L⁻¹ 이하가 되는 빈산소수괴 발생 정도를 파악한 결과, 2012년까지는 발생기록이 없다가 2013년부터는 2014년, 2016년을 제외하고 만안쪽에 매년 발생하고 있는 것으로 나타났다.

상기에서 산정된 기초생산력을 바탕으로 패류생산량을 간접적으로 파악해 보기 위해 연간 기초생산력에서 수면적을 곱해서 연간 탄소량을 계산하고, 이 탄소량의 10배를 습중량으로 추정된 연구(Lee et al., 1991)를 적용해 보았다. 자란만의 연간 기초생산력 125.93 gC m² yr⁻¹, 굴 양식장 면적 4.97 km²를 고려하면 연간 식물플랑크톤으로부터 생산되는 탄소량이 약 625.87 ton이며, 굴 생산 습중량은 약 6,258.70 ton으로 추정할 수 있다. 실제 자란만에서 연간 생산되는 굴의 양이 전수조사 기준 약 6,022.38 ton으로(PNU, 2017) 기초생산력과 탄소 추정에 의한 값과 유사하였다. 물론 이러한 값은 연간 평균 기초생산력과 실제 양식기간동안의 기초생산력의 차이, 굴 양식장의 면적 변화 및 굴 생산량 계산 방식(전수조사, 목측조사 등) 등에 따라 가변적일 수 있다. 다만, 기존 연구를 통한 전체적인 값을 추정한다는 점에서 의미가 있을 것이다. 향후, 이러한 기초생산력과 연간 탄소량 수치, 그리고 패류생산량과의 보다 정밀한 관계식을 양식순기 또는 패류 성장시기별로 도출할 필요가 있을 것이다.

자란만 패류양식어장의 기초생산력 및 환경인자 변동 특성

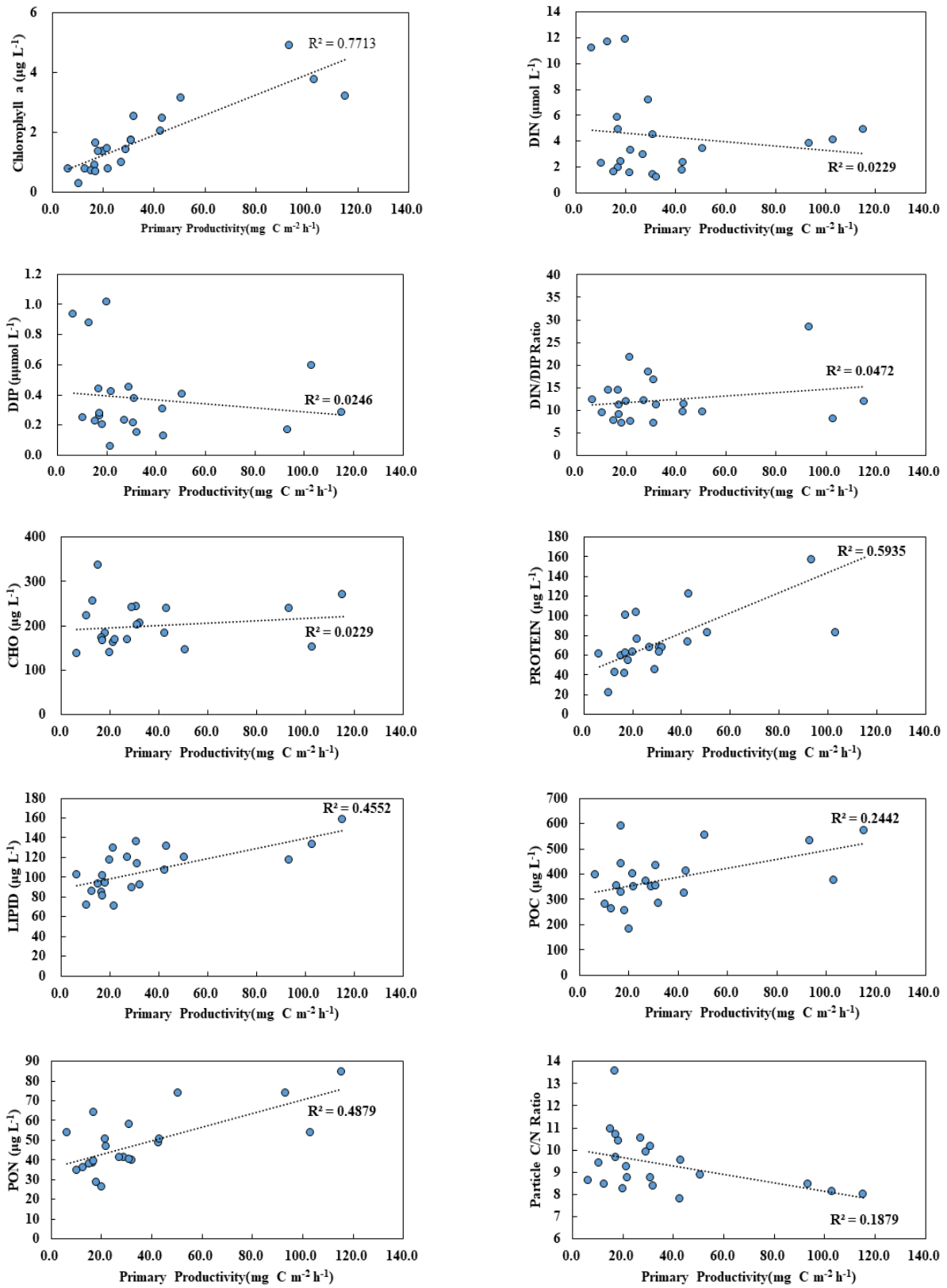


Fig. 8. Relationship between the primary productivity and various environmental factors of water column in Jaran Bay.

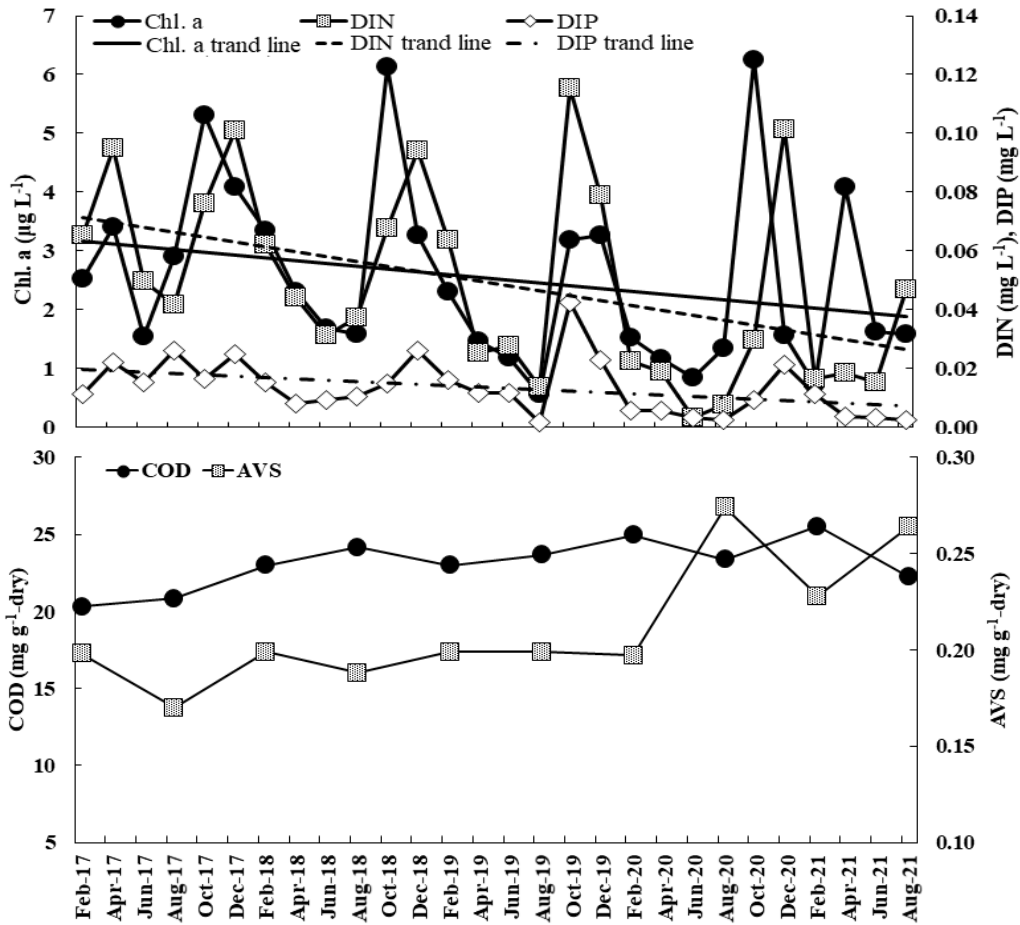


Fig. 9. Temporal variations of the major water and sediment factors in Jaran Bay by analyzing environmental monitoring data of fishing grounds during the recent 5 years.

4.2 우리나라 주요 연안 어장과외의 기초생산력 비교

본 연구대상인 자란만과 우리나라 주요 연안의 기초생산력을 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 평균값을 볼 때, 가막만과 마산만 및 한산-거제만이 약 500~700 mgC m² d⁻¹ 범위로 상대적으로 높고, 자란만과 비인만은 유사한 범위를 보였고, 상대적으로 가로림만과 서해가 낮았다. 또한, 본 지역의 기초생산력은 경기만의 237 mgC m² d⁻¹ 보다 높게 나타났다. 한편, 서해와 같이 외양성 지역은 그 변동 폭이 작게 나타났지만, 양식어장이 많이 분포한 내만은 그 변동 폭이 컸고 그 중에서 자란만이 상대적으로 큰 변동 폭을 보여주었다(Jang et al., 2018; Lee et al., 1991; Lee et al., 2020a; Lee et al., 2020b; NFRDI, 2009; NIFS, 2022).

4.3 정책제언 및 향후 연구 방향

어장환경에서 양식생물의 먹이원으로 역할을 하는 영양염류 및 식물플랑크톤과 밀접한 관련이 있는 기초생산력의 중요성을 고려하고, 어장생산성 향상 및 적정 수용력 산정

등 어장관리를 보다 과학적으로 지원하기 위해 기초생산력에 대한 조사를 강화할 필요가 있다고 판단된다. 이러한 측면에서, 현재 이루어지고 있는 어장환경측정망에 따른 모니터링에 기초생산력 항목을 추가해서 1년에 최소 1회 이상 관측을 제안하고자 한다. 모든 정점을 대상으로 하기보다는 우선적으로 해역별로 어류, 패류, 해조류 등 품종별 양식장과 양식장이 아닌(대조구) 대표 지점을 고려하고, 향후 점진적으로 확대할 필요가 있을 것이다.

또한, 고정된 정점에서 주기적인 조사 외에 중장기적으로는 실시간 관측정보를 확보할 필요가 있다. 기초생산력은 현장 조사를 통해 결과를 얻기 전까지 상당한 비용과 시간이 소요됨에 따라 실시간 정보를 얻기는 어려울 것이나, 이러한 문제를 개선하는 방안으로 현재 실시간 수온 및 빈산소 관측시스템을 활용할 필요가 있다. 즉, 광합성에 의한 기초생산력 측정값과 수온, 용존산소 등 현장 관측값과의 관계를 미리 파악해 두고, 해당 어장의 실시간 빈산소 관측시 각종 센서를 통한 수온, 용존산소 등의 데이터를 활용해서

자란만 패류양식어장의 기초생산력 및 환경인자 변동 특성

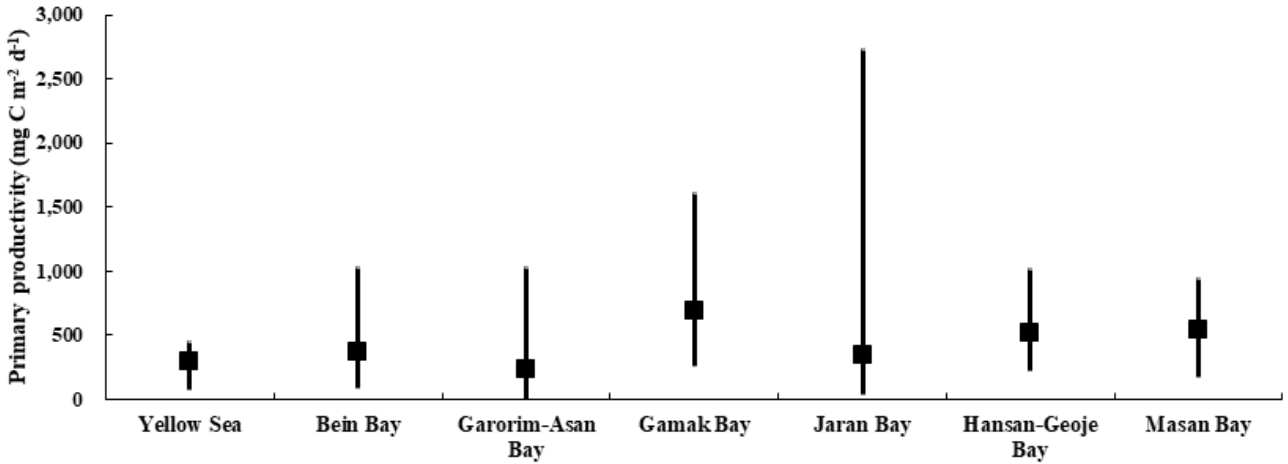


Fig. 10. Comparison of primary productivity with other areas of Korea.

기초생산력을 추정하는 방안을 구축할 필요가 있다.

연구조사 영역에서, 지속가능한 생산성 향상 및 최적 수용력 산정 분야를 확대·강화해야 할 것이다. 이를 위해서는 양식생물의 생산성에 기여하는 인자 등에 대한 다년간(최소 3년)의 지속적이고 단계적인 조사가 필요한데, 서식환경조사, 생물·생리·생태조사, 시설량과 생산량 등의 조사가 연계되어 종합적으로 접근해야 할 것이다. 이를 통해 생산성 향상 인자 파악 및 적정 수용력을 산정하고, 그 이후 수용력의 실증사업 일환으로 양식시설량을 조정할 곳과 그렇지 않은 일반적인 어장의 환경변화와 생산량 등을 비교할 필요가 있다. 이와 관련하여 기초생산력과 탄소량의 변동 수치, 그리고 생물 생산량과의 관계를 양식 전·중·후로 구분해서 도출하면 보다 효율적이고 과학적인 어장관리정보가 될 수 있을 것이다.

어장관리 정책적 측면에서는 어장관리법의 실효성을 위해서 관리수단과 내용을 정비·강화할 필요가 있을 것이다. 우선, 밀식어장 분포에 따른 양식생물의 효율적 먹이 이용(기초생산력 포함)과 양식장 자가오염의 영향을 최소화할 수 있는 어장환경수용력 산정 연구를 강화해야 할 것이다. 이러한 어장수용력은 양식어장의 생산성과 환경성 관리, 어장재배치 등과 관련될 수 있는데, 현재 이에 대한 법적 근거가 없는 상황이므로 어장관리법령에 그 근거를 마련해야 할 것이다. 이는 향후 어장관리법에 해양공간 또는 공유수면관리 일환으로 총허용양식량 제도를 도입하고, 해역별로 품종별로 적정 면적이나 시설량을 할당해서 어장을 관리하는 방안이다. 이러한 제도적 장치가 뒷받침되면서 현장에서의 기술적 모니터링 및 평가의 고도화가 이루어지면 현재보다 진보된 어장환경관리 연구가 수행될 것으로 판단된다.

5. 결 론

남해안 패류양식장인 자란만에서 2015년 9월부터 2017년 6월까지 월별로 식물플랑크톤의 기초생산력을 측정된 결과, 평균값은 6.43~115.43 mgC m⁻² hr⁻¹ 범위로 대체적으로 여름과 가을에 높게 나타났고, 가막만과 마산만에 비해 낮았으며, 가로림만과 서해에 비해 높았다. 양식어장이 많이 분포한 내만은 외양성 지역에 비해 그 변동 폭이 컸다. 총 Chl. a의 평균 농도는 0.29~4.89 μg L⁻¹ 범위로 시기별로 식물플랑크톤의 크기별 점유율이 다소 차이가 나타났다. 수층 내 주요 영양염의 고갈로 인한 식물플랑크톤의 생산력 제한은 거의 없는 것으로 판단되었고, N/P 비는 대부분 시기에 16이하로 질소가 상대적 제한인자였다. 수층 입자유기물질의 생화학적 조성은 전체 평균 측면에서 탄수화물이 약 52%, 지질이 약 28%, 단백질이 약 20%를 차지하였고, 탄수화물과 단백질의 경우 거울상을 보이며 변동하였다.

표층 퇴적물의 TOC 농도는 16.4~18.3 mg g⁻¹-dry 범위로 시기적으로 큰 차이는 없었으나 하계에 다소 높았고, 만 내부의 정점에서 상대적으로 높았는데, 어장환경기준인 20 mg g⁻¹-dry 이하를 초과하는 경우도 나타났다. 자란만의 TOC와 AVS 농도는 가막만, 진해만 및 마산만 보다는 낮았고, 곰소만과 여자만 보다는 다소 높은 농도를 보였다. C:N 비는 평균적으로 8.1~10.4 범위로 퇴적물 중 유기물은 외부 유입과 내부 생성에 의한 생물기원이 혼합된 것으로 판단되었다. 표층 퇴적물 중 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 함량은 각각 22.8%, 34.7%, 42.5%로 나타나서 지질의 기여도가 컸고, 단백질 또한 상대적으로 높았는데 굴 등 패류양식장의 특성으로 판단되었다.

기초생산력과 Chl. a와의 상관성이 가장 높게 나타났고, 수층 영양염과의 상관성은 거의 나타나지 않았다. 특히, 기초생산력은 입자물질에서 질소와 상관성이 탄소보다 높았고, 생화학 물질 중 탄수화물과는 거의 상관성이 없지만, 단백질과의 상관성이 어느 정도 있는 것으로 보였다. 최근 5년 동안의 수층에서 Chl. a, DIN, DIP 추세는 감소하는 경향이었지만, 퇴적물의 오염도는 증가하는 특성이 나타났다. 자란만의 연간 기초생산력 $125.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 굴 양식장 면적 4.97 km^2 를 고려하면 연간 식물플랑크톤으로부터 생산되는 탄소량이 약 625 ton이며, 연간 굴 생산 습중량은 약 6,250 ton으로 추정되었다.

어장생산성 향상 및 적정 수용력 산정 등 효과적인 어장관리연구를 위해 어장환경측정망에 기초생산력 항목을 양식장 품종별로 추가해서 점진적으로 확대·강화할 필요가 있고, 중장기적으로는 실시간 빈산소 관측시 수온 등 각종 센서를 통한 데이터 해석으로 기초생산력을 실시간으로 측정하는 방안을 구축할 필요가 있다. 또한, 기초생산력과 연간 탄소량 수치, 그리고 패류생산량과의 보다 정밀한 관계를 양식순기 또는 생물 성장시기별로 도출할 필요가 있을 것이다.

사 사

이 연구는 2022년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2022054)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- [1] Carver, C. E. A. and A. L. Mallet(1990), Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture, *Aquaculture*, Vol. 88, No. 1, pp. 39-53.
- [2] Cho, Y. S., W. C. Lee, J. B. Kim, S. J. Hong, H. C. Kim, and C. S. Kim(2013), Establishment of environmental assessment using sediment total organic carbon and macrobenthic polychaete community in shellfish farms, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 19, No. 5, pp. 430-438.
- [3] Choi, M. K., H. C. Kim, D. W. Hwang, I. S. Lee, Y. S. Kim, Y. J. Kim, and H. G. Choi(2013), Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeolja Bay and Gangjin Bay, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, No. 4, pp. 424-436.
- [4] Choi, M. K., I. S. Lee, C. S. Kim, H. C. Kim, and D. W. Hwang(2015), Distributions of organic matter and trace metals in surface sediments around a Manila Clam *Ruditapes philippinarum* farming area in Gomso Bay, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 48, No. 4, pp. 555-563.
- [5] Chung, K. H. and Y. C. Park(1988), Primary production and nitrogen regeneration by macrozooplankton in the Kyunggi Bay, Yellow Sea, *The Korean Society of Oceanography*, Vol. 23, No. 4, pp. 194-206.
- [6] Duarte, P., R. Meneses, A. J. S. Hawkins, M. Zhu, J. Fang, and J. Grant(2003), Mathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters, *Ecological Modelling*, Vol. 168, No. 1-2, pp. 109-143.
- [7] Dubois, M., K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith(1956), Colorimetric method for the determination of sugars and related substances, *Analytical Chemistry*, Vol. 28, No. 3, pp. 350-356.
- [8] Eppley, R. W.(1972), Temperature and phytoplankton growth in the sea, *Fishery Bulletin*, Vol. 70, No. 4, pp. 1063-1085.
- [9] Ferreira, J. G., A. J. S. Hawkins, and S. B. Bricker(2007), Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture - the Farm Aquaculture Resource Management (FARM) model, *Aquaculture*, Vol. 264, No. 1-4, pp. 160-174.
- [10] Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki, and S. Ichimura(1983), Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope, *Marine Biology*, Vol. 73, pp. 31-36.
- [11] Hyland, J., L. Balthis, I. Karakassis, P. Magni, A. Petrov, J. Shine, O. Vestergaard, and R. Warwick(2005), Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 295, pp. 91-103.
- [12] Jang, H. K., J. J. Kang, J. H. Lee, M. J. Kim, S. H. Ahn, J. Y. Jeong, M. S. Yun, I. S. Han, and S. H. Lee(2018), Recent primary production and small phytoplankton contribution in the Yellow Sea during the summer in 2016, *Ocean Science Journal*, Vol. 53, No. 3, pp. 509-519.
- [13] Joo, H. S., S. H. Kim, and W. B. Lee(2002), Seasonal variation of primary productivity in Gangjin Bay, *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 20, No. 2, pp. 146-151.
- [14] Justic, D., N. N. Rabalais, R. E. Turner, and Q. Dortch(1995), Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences,

- Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 40, No. 3, pp. 339-356.
- [15] Kang, C. K., E. J. Choy, Y. B. Hur, and J. I. Myeong(2009), Isotopic evidence of particle-size dependent food partitioning in cocultured the sea squirt *Halocynthia roretzi* and Pacific oyster *Crassostrea gigas*, Aquatic Biology, Vol. 6, pp. 289-302.
- [16] Kang, J. H., S. J. Lee, W. G. Jeong and S. M. Cho(2012), Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of oyster farms in Goseong Bay, Korea, The Korean Journal of Malacology, Vol. 28, No. 3, pp. 233-244.
- [17] Kwon, H. K., H. S. Yang, Y. H. Yoon, O. I. Choi, I. H. Choi, and S. J. Oh(2015), Characteristics of marine environment and primary productivity of phytoplankton in the seaweed bed of northwestern coast of Jeju island during autumn 2014, The Sea: Journal of the Korean society of oceanography, Vol. 20, No. 4, pp. 180-191.
- [18] Lee, B. D., H. K. Kang, and Y. J. Kang(1991), Primary production in the oyster farming bay, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 24, No. 1, pp. 39-51.
- [19] Lee, D. I., H. C. Kim, and W. C. Lee(2022), Analysis of environmental improvement and policy proposal according to mariculture sediment purification and maintenance projects, Journal of Korean Society Marine Environment Energy, Vol. 25, No. 1, pp. 53-62.
- [20] Lee, J. H., J. J. Kang, H. K. Jang, N. E. Jo, D. B. Lee, M. S. Yun, and S. H. Lee(2020a) Major controlling factors for spatio-temporal variations in the macromolecular composition and primary production by phytoplankton in Garolim and Asan bays in the Yellow Sea, Regional Studies in Marine Science, Vol. 36.
- [21] Lee, J. H., H. C. Kim, T. H. Lee, W. C. Lee, J. J. Kang, N. E. Jo, D. B. Lee, K. W. Kim, J. O. Min, S. C. Kang, and S. H. Lee(2018), Monthly variations in the intracellular nutrient pools of phytoplankton in Jaran Bay, Korea, Journal of Coastal Research, Vol, No. 85, pp. 331-335.
- [22] Lee, J. H., W. C. Lee, H. C. Kim, N. E. Jo, H. K. Jang, J. J. Kang, D. B. Lee, K. W. Kim, and S. H. Lee(2020b), Transparent Exopolymer Particle (TEPs) Dynamics and Contribution to Particulate Organic Carbon (POC) in Jaran Bay, Korea, Water, Vol. 12, No. 4, pp. 1057.
- [23] Lee, J. H., W. C. Lee, H. C. Kim, N. E. Jo, K. W. Kim, D. B. Lee, J. J. Kang, B. R. Sim, J. I. Kwon, and S. H. Lee(2020c), Temporal and spatial variations of the biochemical composition of phytoplankton and potential food material (FM) in Jaran Bay, South Korea, Water, Vol. 12, No. 11, 3093.
- [24] Lee, M. J., D. S. Kim, Y. O. Kim, M. H. Sohn, C. H. Moon, and S. H. Baek(2016a), Seasonal phytoplankton growth and distribution pattern by environmental factor changes in inner and outer bay of Ulsan, Korea, The Sea: Journal of the Korean society of oceanography, Vol. 21, No. 1, pp. 24-35.
- [25] Lee, S. J., W. G. Jeong, S. M. Cho, and J. N. Kwon(2016b), Estimation of carrying capacity by food availability for farming oysters in Goseong Bay, Korea, The Korean Journal of Malacology, Vol. 32, No. 2, pp. 83-93.
- [26] Lohrenz, S. E., D. A. Wiesenburg, I. P. DePalma, K. S. Johnson and D. E. Gustafson Jr.(1988), Interrelationships among primary production, chlorophyll and environmental conditions in frontal regions of the western Mediterranean Sea, Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Paper, Vol. 35, No. 5, pp. 793-810.
- [27] Lorenzen, C. J.(1963), Diurnal variation in photosynthetic activity of natural phytoplankton populations, Limnology and Oceanography, Vol. 8, No. 1, pp. 56-62.
- [28] Lowry, O. M., N. I. Rosebrough, A. L. Farrand, and R. J. Randall(1951), Protein measurement with the folin phenol reagent, Journal of Biological Chemistry, Vol. 193, No. 1, pp. 265-275.
- [29] Marsh, J. B. and D. B. Weinstein(1966), Simple charring method for determination of lipids, Journal of Lipid, Vol. 7, pp. 574-576.
- [30] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries)(2013), Marine environment standard methods, Ministry of Oceans and Fisheries, p. 525.
- [31] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries)(2017), Fisheries environmental criteria, Notification No. 2017-109 of the Ministry of Oceans and Fisheries.
- [32] Muller, P. J.(1977), CN ratios in Pacific deep-sea sediments: Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 41, No. 6, pp. 765-776.
- [33] NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute) (2009), The first survey report of marine culture grounds, p. 245.

- [34] NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute) (2010), The 2nd survey report of marine culture grounds, p. 443.
- [35] NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute) (2012), The 4th survey report of marine culture grounds, p. 377.
- [36] NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute) (2013), The 5th survey report of marine culture grounds, p. 365.
- [37] NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute) (2014), The estimating carrying capacity of marine culture grounds, p. 373.
- [38] NIFS(National Institute of Fisheries Science)(2022), The final report of environmental management project for aquaculture farm, p. 284.
- [39] Park, J. S., H. C. Kim, W. J. Choi, W. C. Lee, and C. K. Park(2002), Estimating the carrying capacity of a coastal bay for oyster culture - Estimating a food supply to oysters using and eco-hydrodynamic model in Geoje-Hansan Bay, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 35, No. 4, pp. 395-407.
- [40] Park, M. O. and J. S. Park(1997), HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. Journal of the Korean society of Oceanography, Vol. 32, No. 1, pp. 46-55.
- [41] PNU(Pusan National University)(2017), The survey of modelling factors for estimation of mariculture carrying capacity in Jaran Bay(II), p. 161.
- [42] Poklington, R. and J. D. Leonard(1979), Terrigenous organic matter in sediments of the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord, Journal of the Fisheries Research Board of Canada, Vol. 36, No. 10, pp. 1250-1255.
- [43] Rossi, F. and C. Lardicci(2002), Role of the nutritive value of sediment in regulating population dynamics of the deposit-feeding polychaete *Streblospio shrubsolii*, Marine Biology, Vol. 140, No. 6, pp. 1129-1138.
- [44] Tover, A., C. Moreno, M. P. Manuel-Vez, and M. Garcia-Vargas(2000), Environmental implications of intensive marine aquaculture in earthen ponds, Marine Pollution Bulletin, Vol. 40, No. 11, pp. 981-988.
- [45] Yokoyama, H., M. Inoue, and K. Abo(2004), Estimation of the assimilative capacity of fish-farm environments based on the current velocity measured by plaster balls, Aquaculture, Vol. 240, No. 1-4, pp. 233-247.
- [46] Widdows, J., P. Fieth, and C. M. Worrall(1979), Relationships between seston, available food and feeding activity in the common mussel *Mytilus edulis*, Marine Biology, Vol. 50, pp. 195-207.

Received : 2022. 06. 14.

Revised : 2022. 07. 05.

Accepted : 2022. 08. 29.