

남해 장목만 식물플랑크톤 군집 변동 특성과 환경요인과의 상관성

현봉길, 강준수, 배미경
한국해양과학기술원 선박평형수연구센터
e-mail: bghyun@kiost.ac.kr

Relationship between environmental factors and variations characteristics of phytoplankton communities in Jangmok Bay, Southern Coast of Korea

Bonggil Hyun, Junsu Kang, Mi-Kyung Bae
Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

요 약

장목만 식물플랑크톤 군집 변동 특성과 그 조절 인자를 파악하기 위해 2019년 1월부터 2020년 12월까지 총 101회 장목만 주간 관측을 실시하였다. 조사 기간 동안 수온은 평균 17.1 ± 6.5 °C이며, 염분은 평균 31.5 ± 2.8 psu 값을 보였다. 아질산과 질산성 질소는 4.07 ± 5.85 μ M, 암모니아성 질소 2.58 ± 2.10 μ M, 규산염 10.53 ± 9.87 μ M, 인산염 0.63 ± 0.35 μ M이며, 강우로 인해 염분이 30 psu 이하로 감소한 시기에는 아질산과 질산성 질소와 규산염 농도가 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 조사 기간 동안 전반적으로 규조류와 크기가 작은 은편모조류가 해역 내 환경 변화에 따라 교차 우점하는 경향을 보였으며, 규조류 중에서는 *Chaetoceros* spp., *Eucampia zodiacus*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema* spp. 등이 우점 출현하였다. 주요 분류군과 주요종들의 단주기적 변동과 환경요인과의 상관성을 분석을 위해 군집 분석 CCA 분석을 수행한 결과, 조사기간 내내 높은 현존량 분포를 보였던 *Chaetoceros* spp. 와 *Skeletonema* spp. 는 영양염 농도 (규산염, 아질산과 질산성 질소)와 높은 상관성을 보였고, 와편모조류 및 크기가 작은 편모조류들은 2019년도 조사에서는 인산염 농도 증감에 의해 영향을 받는 것으로 나타났으나, 2020년도 조사에서는 환경인자들과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 광량 및 일조 시간등에 대한 추가적인 정밀 분석이 필요하지만, 장목만 식물플랑크톤 군집은 강우에 의한 만내 영양염 농도 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 확인되었다.

1. 서 론

식물플랑크톤은 해양 생태계 내에서 생물생산과정의 기초생산자로 연안생태계 먹이그물망에서 중요한 차지하며, 해수의 유동과 환경요인의 변화등에 따라 시·공간적 분포 특성이 변화한다[1]. 일반적으로 용승이 빈번하게 발생하는 해역에서는 규조류가 우점하는 경향이 강하며, 성층이 형성되는 빈영양수와 유광층에서는 크기가 작은 미소플랑크톤이 우점한다. 그리고 해수의 유동의 원활치 않은 반폐쇄성 내만인 경우 육상으로부터 공급되는 영양염 농도 그리고 태풍과 장마와 같은 이벤트성 기후변화에 의해서도 식물플랑크톤 군집 구조가 변화한다고 보고되고 있으며, 연근해 내만에 빈번하게 발생하는 적조에 대한 육상 기인 영양염의 직·간접적인 영향에 대한 연구도 보고되고 있다[2]. 따라서, 연안역 해양 생태계 변화에 대

한 정확한 평가와 예측을 위해서는 생물 및 수질환경인자들의 장·단기 변화와 그 조절 원인을 파악하고, 이들에 대한 다양한 자료의 구축이 필요하다.

조사해역인 장목만은 남해안에 위치한 반 폐쇄성 내만으로 외해수와의 교환이 원활하지 못해서, 태풍과 장마가 발생하는 여름철 우기에는 염분이 20 psu 근처로 내려간 회복되는데 1달 이상이 소요되며, 주변에 뚜렷한 육상 오염원을 가지고 있지 않아서 생활 주거 구역으로부터 유입되는 생활하수가 주요 영양염 공급원일 것으로 예상된다. 또한 수심도 10m 내외로 깊지 않아서 강한 바람을 동반한 태풍이 영향을 받는 시기에는 퇴적층으로부터의 영양염 재공급등 많은 변화가 매우 급격하게 진행되며, 이는 태풍이 지나가고 난 이후 해당 해역 내 특정 식물플랑크톤 그룹이 대발생의 원인으로도 제시 된다[2]. 해당 해역에

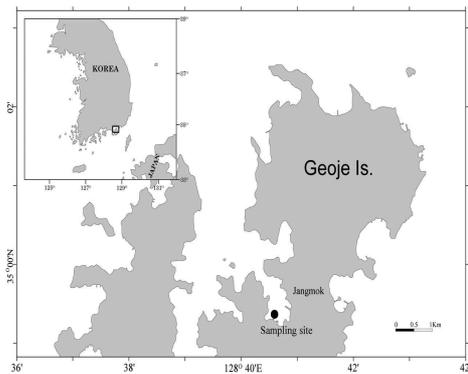
서 현재까지 장 등(2010)이 여름철 태풍과 집중 강우에 따른 영양염 특성 변화가 장목만 식물플랑크톤 군집구조에 미치는 영향 연구[3]와 한 등(2019)이 와편모조류 (*Akashiwo sanguinea*)의 온도와 염분에 따른 성장 특성 연구[4] 그리고 최근에 Kang et al. (2021)에 의해 장목만 *Akashiwo sanguinea* 대발생에 박테리아나 바이러스와 같은 아주 작은 크기의 생물 기여 정도를 밝히는 연구[5] 등이 수행되어져 왔다. 하지만 현재까지 해당 해역을 대상으로 많은 연구가 진행되지 않았으며, 특히 주간 관측을 통한 장목만 식물플랑크톤 군집 분포 특성 파악 및 예측 연구는 거의 보고되지 않았다.

본 연구에서는 장기(2년) 단주기 주간 관측을 통해 장목만 표층수의 물리·화학적 변동 특성을 파악 하고 식물플랑크톤 군집 분포 조절 요인을 확인하고자 하였다. 본 연구 결과는 향후 장목만 식물플랑크톤 군집 분포 특성을 이해하고, 예측하는데 중요한 기초 자료로 활용 될 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지역

조사는 남해 진해만에 귀속된 거제도 장목만 한국해양과학기술원 남해연구소(에서 2019년 1월부터 2020년 12월까지 주 1회 조사를 만조 시를 기준으로 총 94회 진행하였다(Fig. 1). 조사 정점의 평균 수심은 9 m이며 최대조차는 2.2 m 이다 (Lee et al., 2005).



[그림 1] 장목만 장기 주간 관측 정점

2.2. 환경요인 및 중형동물플랑크톤

수온, 염분 등 수질환경 인자는 현장에서 다항목 수질 측정기(YSI 6600)를 이용해서 측정하였다. 영양염은 현장에서 니스킨 채수기로 채수한 다음 Whatman GF/F 여과지로 여과한 여과액 45mL를 50mL conical tube 에 넣고 냉동보관 하였다. 영양염류는 냉동 보관된 시료를 해동하여 규산염(SiO_2), 암모니아성 질소(NH_4), 아질산과 질산성 질소($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$), 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$)을 Parsons

et al. (1984)의 분석법[6]에 따라서 Auto Analyzer(Bran Luebbe)로 분석하였다.

식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500mL 채수 병(PE bottle)에 표층수를 넣고 루골용액을 넣어서 최종 농도 1%로 고정하였다. 고정된 시료는 침전법에 의해 50mL 로 농축시킨 후 100–300 μL 분주하여 $\times 20$ 또는 $\times 40$ 배율에서 계수 및 동정하였다. 광학 현미경하에서 동정이 어려운 종은 속 수준에서 동정하였다[7].

2.3. 자료 분석

식물플랑크톤 군집 분포 특성을 파악하기 위해서 주간 관측 결과의 월 평균값을 이용해서 자료 분석을 수행하였다. 조사 시기에 따른 출현양상의 유사도를 파악하기 위해 Bary–Curtis의 유사도 지수를 근거로 집괴분석(CA, cluster analysis)을 하였고, 집괴분석에 이용된 출현종의 개체수 자료는 정규분포를 위해 $\log_e(x+1)$ 로 변환하여 분석하였다. 또한 집괴분석의 결과는 70%의 유사도 수준에서 nMDS(non-metric multidimensional scaling) 배열법으로 나타냈다. Venn diagram 통해 각 그룹 별 공통적으로 출현하는 종수 및 특이종 출현 여부를 확인하였다. 자료 분석은 PRIMER(version 6.1.6) 프로그램을 이용하여 수행하였다. 주요분류군 및 주요종들의 단주기적 변동과 환경요인간의 상호 연관성을 파악하기 위해 CCA (Canonical Correspondence Analysis)도 수행하였다. 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

조사정점의 표층 수온 및 염분은 그림 2에 나타내었다. 조사기간 동안 수온은 28.4~6.7 $^{\circ}\text{C}$ (17.1 ± 6.5 $^{\circ}\text{C}$) 값을 보였고, 여름철에 높고 겨울철로 갈수록 낮아지는 온대 기후권 해역이 특성을 보였다. 염분은 34.1~16.4 psu(31.5 ± 2.8 psu) 값을 보였고, 반 폐쇄성만 특성으로 인해 강우가 집중되는 6~8월에는 대다수 조사 시기에 염분이 30 psu 이하로 감소했다. 특히 2020년 8월 13일 염분이 16.4 psu 까지 감소하고 난 후 다시 염분이 30 psu 이상으로 회복되는데 8주 정도의 긴 시간이 소요되는 것을 확인할 수 있었다 (그림 2).

영양염 농도 분포를 보면, 아질산과 질산성 질소는 31.6~0.1 μM (4.07 ± 5.85 μM), 암모니아성 질소 13.39~0.45 μM (2.58 ± 2.10 μM), 규산염 47.35~0.63 μM (10.53 ± 9.87 μM), 인산염 2.55~0.00 μM (0.63 ± 0.35 μM)로 조사 시기에 따라서 영양염 변화 폭이 크게 나타났는데, 이는 집중 호우에 의한 육상으로부터 영양염의 공급되었기 때문으로 판단된다(그림 3).

조사 결과에서도 집중 강우로 인해 염분이 30 psu 이하로 감소한 시기에는 아질산과 질산성 질소와 규산염 농도가 급격하게 상승한 후 식물플랑크톤의 개체수 대증식이 이후에는 감소하는 경향을 보였다.

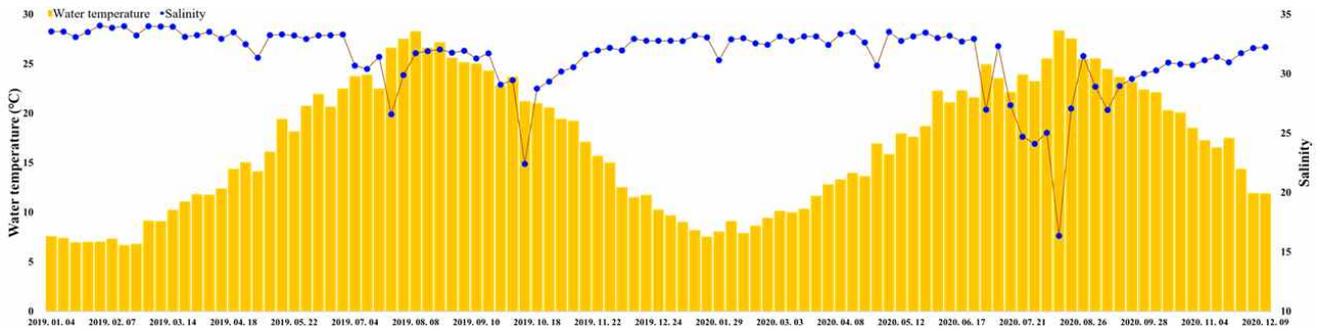
조사 기간 동안 표층 식물플랑크톤 평균 개체수는 12×10^5 cells/L, 2019년 7월 23일에 185×10^5 cells/L로 가장 높았다(그림 4). 전반적으로 규조류와 크기가 작은 은편모조류가 해역 내 환경 변화에 따라 교차 우점하는 경향을 보였으며, 규조류 중에서는 *Chaetoceros* spp., *Eucampia zodiacus*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema* spp. 등이 우점 출현하였다. 조사 기간 중 총 4번의 급격한 식물플랑크톤 현존량 증가 현상이 관찰되었는데, 가장 높은 개체수 밀도를 보였던 2019년 7월 23일 peak는 침편모조류인 *Heterosigma akashiwo*의 대증식에 의한 결과이며, 나머지 3번(2019년 10월 11일, 2020년 8월 13일, 2020년 9월 24일) peak는 모두 *Skeletonema* spp. 와 *Pseudo-nitzschia* spp. 개체수 증식에 의한 결과로 확인되었다. 그리고 2020년 7월 16일에는 와편모조류인 *Ceratium furca*에 대증식에 의한 적조 현상도 관찰되었다.

조사 기간 동안 출현한 식물플랑크톤 개체수에 근거하여 Bary-Curtis 유사도 지수 자료를 이용하여 MDS 배열법으로 군집 분석을 실시한 결과 2019년도에는 겨울철인 Group I, 3월과 4월을 포함하는 봄철인 Group II, 여름철인 Group III, 늦봄 혹은 초여름과 가을철 시기를 포함하는 Group IV로 구분되었다(그림 5). Group I 시기에는 은편모조류와 규조류가 우점출현한 시기이며, Group II 시기에는 은편모조류가 우점한 것은 동일하지만, 상대적으로 규조류 우점율이 낮아지고 와편모조류 기여율이 증가한 시기입니다. Group III 시기에는 규조류 우점하에 침편모조류와 은편모조류 기여율이 높았으며, Group IV 시기에는 규조류와 은편모조류 우점하에 와편모조류 또한 높은 기여율을 보인 시기로 확인되었다. 2020년도에는 총 5개의 그룹으로 구분되어 졌으며, 은편모조류가 극 우점한 Group I을 제외하면, 규조류 우점하에 은편모조류와 와편모조류의 기여율 증감에 따라 구분되었다. 2020년 Venn diagram을 보면, Group I, III, V 시기에서는 특이적인 종이 출현하지 않았으며, Group V 시기에는 *Ceratium furca*에 의한 와편모조류 적조가 발생해서 종 다양성이 낮게 나타났다(그림 5). 주요 분류군과 주요종들의 단주기적 변동과 환경요인과 상관성을 분석을 위해 군집 분석 CCA 분석을 수행한 결과, 조사기간 내내 높은 현존량 분포를 보였던 *Chaetoceros* spp. 와 *Skeletonema* spp. 는 영양염 농도(규산염, 아질산과 질산성 질소)와 높은 상관성을 보였고,

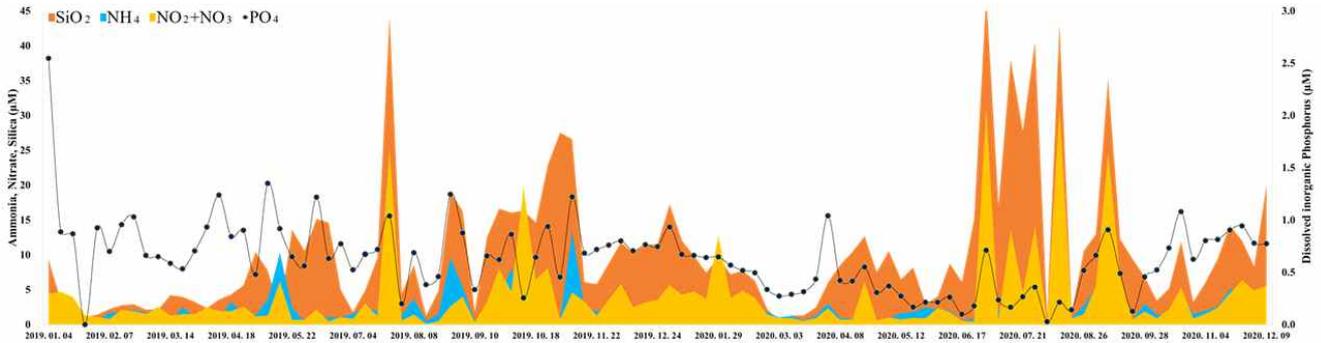
와편모조류 및 크기가 작은 편모조류들은 2019년도 조사에서는 인산염 농도 증감에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 2020년도 조사에서는 환경인자들과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 장목만 식물플랑크톤 변동 양상을 요약하면, 수온이 증가하고 강우에 의한 영양염 농도가 증가하는 여름철에는 규조류가 우점하는 경향을 보였으며, 상대적으로 영양염 농도 및 수온이 낮은 겨울철에는 은편모조류가 우점하는 경향을 보였다. 광량 및 일조 시간등에 대한 추가적인 정밀 분석이 필요하지만, 장목만 식물플랑크톤 군집은 강우에 의한 만내 영양염 농도 증가에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 확인되었다.

References

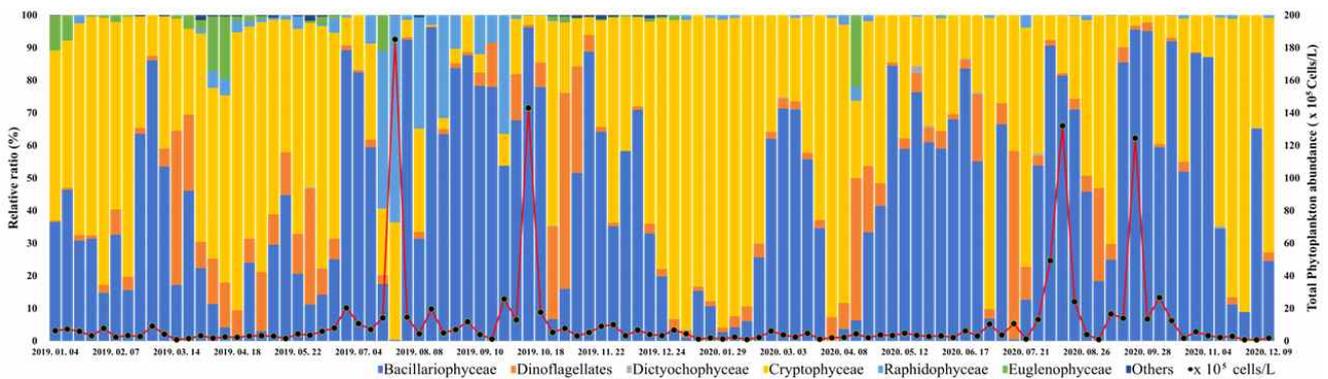
- [1] 이준백, 고유봉, 좌종현, “제주도 해안선 주변 식물플랑크톤 군집의 구조와 생태”, *Algae*, Vol. 5, pp. 159–171, 1990.
- [2] 임동일, 김영옥, 강미란, 장풍국, 신경순, 장만, “한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한인자”, *Ocean and Polar Research*. Vol. 29, No.4, pp. 349–366, 2007.
- [3] 장풍국, 장민철, 이우진, 신경순, “장목만에서 여름철 영양염 특성 변화가 식물플랑크톤 군집구조에 미치는 영향”, *Ocean and Polar Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 97–111, 2010.
- [4] 한경하, Li Zhun, 윤주연, 강병준, 김현정, 서민호, 서호영, 신현호, “거제도 장목항에서 적조원인생물 *Akashiwo sanguinea* (Dinophyceae): 형태, 분자계통학적 특성 및 온도와 염분에 따른 성장 특성”, Vol. 37, No. 2, pp. 119–128, 2019.
- [5] Kang, J., Park, J. S., Jung, S. W., Kim, H. J., Joo, H. M., Kang, D., ... & Lee, T. K. “Zooming on dynamics of marine microbial communities in the phycosphere of *Akashiwo sanguinea* (Dinophyta) blooms”, *Molecular ecology*, Vol. 30, No. 1, pp. 207–221, 2020.
- [6] Parson, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli, “A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis”, Pergamon Press, New York. pp. 173, 1984.
- [7] Tomas, C. R., “Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates”, Academic Press, pp. 387–584, 1996.



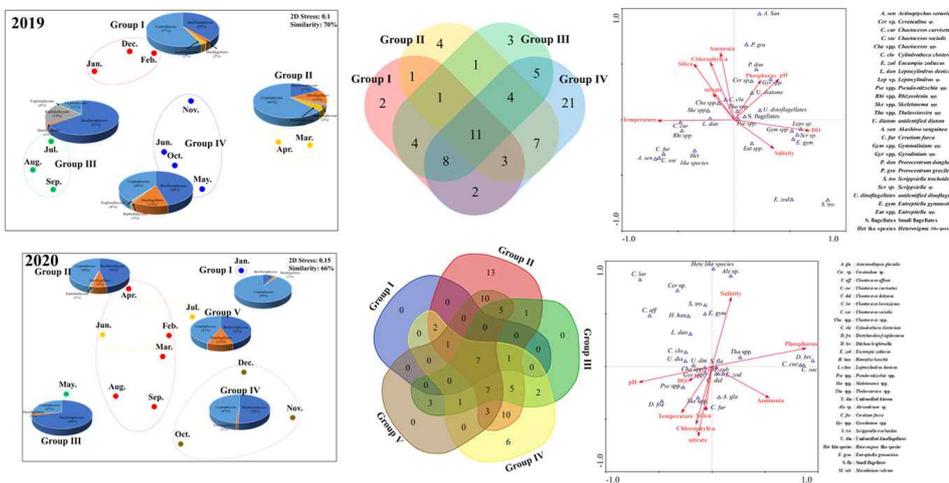
[그림 2] 장목만 표층 수온 및 염분 변화



[그림 3] 장목만 표층 영양염 농도 변화



[그림 4] 장목만 표층 식물플랑크톤 군집 현존량 및 기여율 변화



[그림 5] 장목만 표층 식물플랑크톤 군집 변동 특성 및 환경요인과의 상관성 통계 분석 결과