

# 수평망식 굴양식장 유입에 의한 양식장 환경 변화

강주현<sup>1</sup>, 조상만<sup>2</sup>

<sup>1</sup>㈜코리아오션리서치, <sup>2</sup>군산대학교 해양생명과학과

## Effects of Oyster Rack Culture on the Seawater Quality in the Intertidal Waters

Ju-Hyun Kang<sup>1</sup> and Sang-Man Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Ocean Research, 7 Dosanilju-ro, Tongyeong 53004, Republic of Korea.

<sup>2</sup>Dept. Aquatic Sciences and Aquaculture, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Gunsan 54150, Republic of Korea

### ABSTRACT

In order to investigate the changes in nutrient availability after the introduction of oyster farms in 2015, an investigation of seawater analysis was carried out from March 2011 to December 2012 for the before and from September 2015 to April 2018 for the after. Although there was a significant increase in nitrite, dissolved inorganic nitrogen was significantly decreased to half of what it had been before. The spatial discrimination of each nitrogenous nutrient was observed in CV% for ammonia, nitrite, and nitrate twice as much as before but not for DIN. No significant difference was observed in dissolved inorganic phosphate but not in CV%, which rose from 12.67% to 36.62%. Consequently, the chlorophyll-a concentration significantly decreased from 2.242 µg/L to 1.244 µg/L, negatively correlated with salinity while positively with nitrate and DIN. The grazing pressure from the introduced oyster farm has significantly decreased the phytoplankton stocks and successively increased metabolite sedimentation. The metabolite has been remineralized by oxidation-reduction reaction rather than bioturbation in hyperoxic sediment of a shallow tidal zone. As well as food availability, nutrient availability from top-down control should be considered for maximum sustainable yield when introducing oyster farms in closed waters.

**Key words:** Pacific oyster, Nutrient, Tidal flat, Wando Island, Top-down control

### 서론

굴은 여과섭식성 이매패류로 해수로부터 식물플랑크톤을 여과섭식함으로써 수중 환경을 정화하는 기능을 지님과 동시에 대사산물을 배설함으로써 환경변화를 초래하게 되는 등 긍정적 영향과 부정적 영향을 동시에 주고 받는다 (Carrillo *et al.*, 1995). 식물플랑크톤 조성은 섭식압에 의해 조절되는 top-down control과 환경에 분포하는 영양상태 등으로 제약

받는 bottom-up control에 의해 조절되는 것으로 알려지고 있다 (Rodríguez-Gálvez *et al.*, 2023). 어느 해역에 구조물을 선택적으로 섭식하는 굴을 대단위로 양식한다는 것은 높은 섭식압을 동반하고, 이는 top-down control에 의한 연안생태계의 변화와 이로 인한 환경적 변화가 발생하는 것은 필연적이라 할 수 있다. 그러나 굴양식장 도입 이후 장기간의 모니터링에 의한 이러한 환경변화에 대한 연구는 거의 없고, 특히 도입 전후의 환경변화에 대한 연구는 굴 양식장을 도입하는데 있어 적정 규모를 산정하는데 매우 중요한 연구가 될 수 있다.

이 연구는 전라남도 완도군 군외면 영흥리 지선 조간대에 수평망식 굴 양식장을 도입하는 과정 중 도입 전후의 환경변화를 분석하고자 하였다. 특히 연안의 생산성을 주관하는 영양염의 변화에 집중하여 안정적 생산성을 유지할 수 있는 기술개발을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

### 재료 및 방법

Received: December 11, 2023; Revised: December 18, 2023;  
Accepted: December 29, 2023

Corresponding author: Sang-Man Cho

Tel: +82 (63) 469-1839, e-mail: gigas@kunsan.ac.kr  
1225-3480/24851

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1. Map of sampling sites for environmental survey around oyster farm in the northwestern tidal flat zone at Wando Island.

수평망식 굴 양식장 도입 전후의 환경변화를 조사하기 위하여 전남 완도군 군외면 영흥리 지선 해역에 총 5개 정점에서 (Fig. 1) 월별 조사를 진행하였다. 도입 전 조사기간은 2011년

3월부터 2012년 12월까지이며, 도입 이후 조사기간은 2015년 9월부터 2018년 4월까지이다. 해수분석 항목은 수온, 염분, pH, 용존산소 (DO), 암모니아성 질소 (NH<sub>4</sub>-N), 아질산성 질소 (NO<sub>2</sub>-N), 질산성 질소 (NO<sub>3</sub>-N), 용존무기인 (DIN), Chlorophyll-a를 측정하였다. 채집은 만조시간 기준 2시간 전후로 실시하였으며, 수온, 염분, pH 및 용존산소는 다항목수질 측정기를 사용하였다 (YSI, Ohio, USA). 그 외 분석항목은 채수하여 실험실로 옮겨 해양공정시험기준에 따라 즉시 분석하였다 (MOF, 2013).

양식장 설치 전후의 데이터의 평균과 변량의 변동성을 비교하고자 변동계수를 (CV%, coefficient of variation) 산정하였고, 두 평균의 유의차는 t-test를 실시하였다. 각 수질 변수들과 클로로필-a와의 상관성을 분석하기 위하여 Pearson 상관관계분석을 실시하였고, 한편 측정값의 경향성을 비교하고자 시계열분석을 통해 경향성 분석을 실시하였다, 각 통계처리는 통계패키지를 이용하였다 (SPSS version 27).

### 결과 및 고찰

굴양식장 도입 전후의 수온, 염분, pH 및 용존산소 농도의 변화는 Fig. 2와 같다. 도입전 조사기간의 평균 수온은 16.7 ±

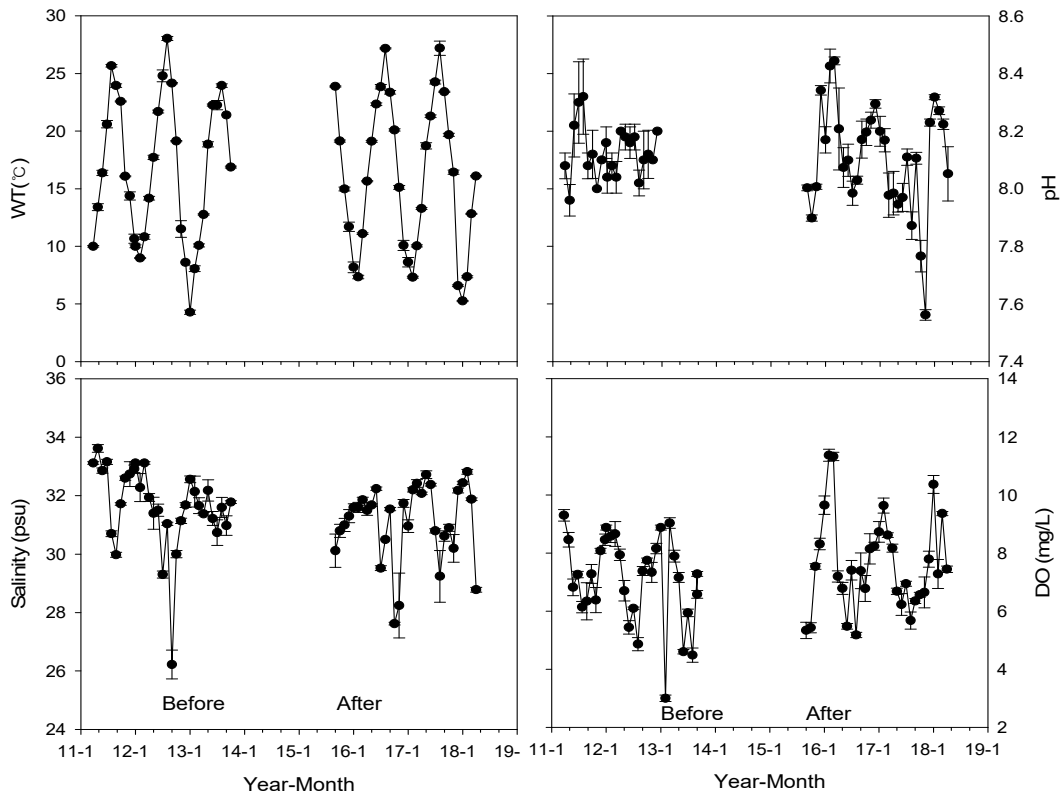
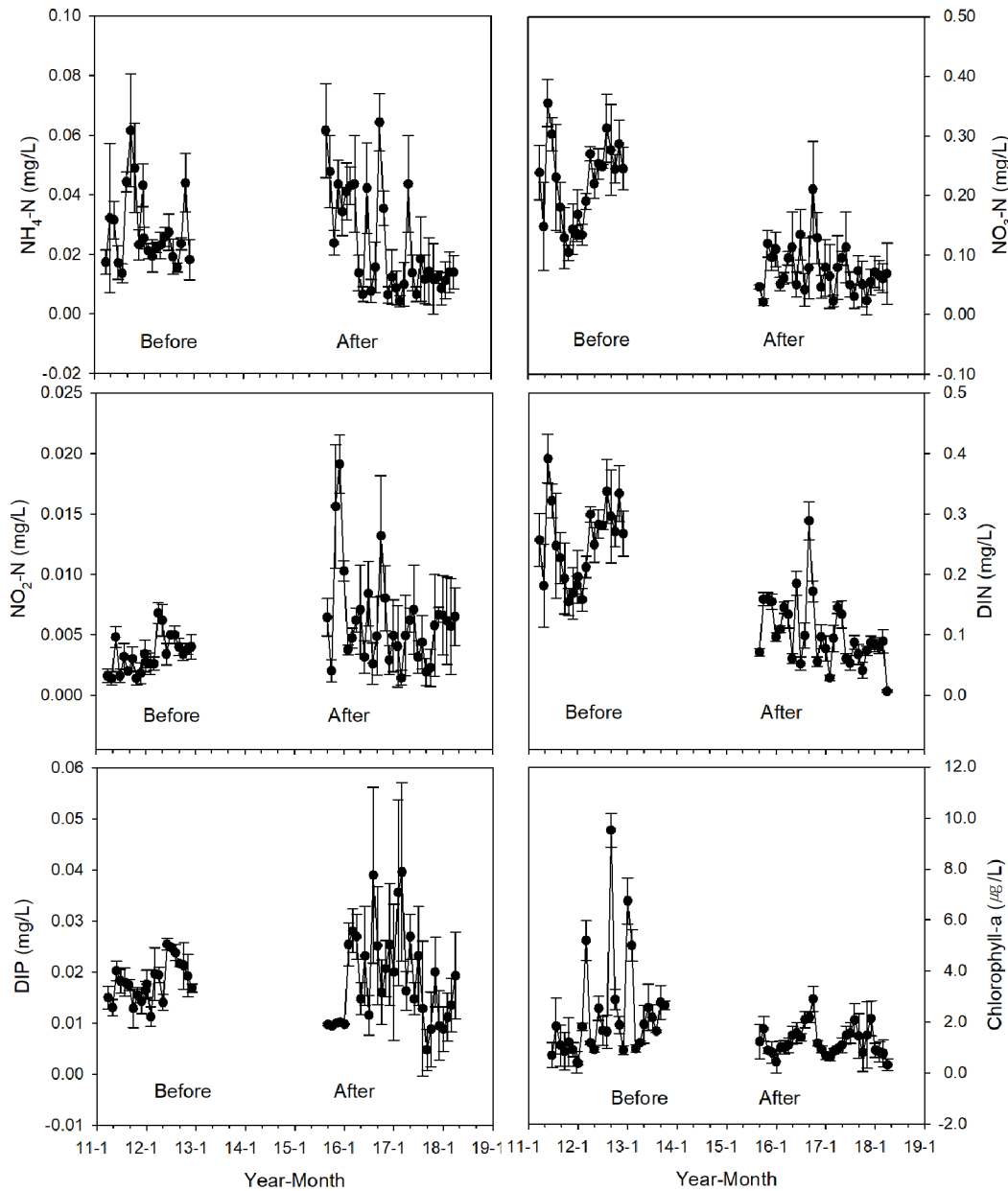


Fig. 2. Monthly variation of water temperature, pH, salinity and dissolved oxygen at the studied waters before and after introduction of oyster rack culture.



**Fig. 3.** Monthly variation of nitrogenous nutrients (ammonia, nitrate, nitrite, and dissolved inorganic nitrogen), dissolved inorganic phosphate and chlorophyll-a concentrations at the studied waters before and after introduction of oyster rack culture.

6.3°C 였고, 도입 이후의 평균 수온은 16.0 ± 6.6°C 였다. 그러나 조사월이 서로 일치하지 않으므로, 이를 도입 전 조사월인 3월부터 10월까지로 한정하면 2016년 3월부터 2017년 10월까지의 평균 수온은 18.1 ± 6.3°C로 도입 전보다 2°C이상 높은 평균 수온을 나타내고 있다. 한편 각 월별 수온 변동계수를 분석한 결과 주로 고수온기 보다는 저수온기에 변동계수가

높게 나타났고, 특히 1월에는 33.1%로 가장 높았고, 12월이 20.9%로 높았다. 일반적으로 수온 상승은 연안해역에서 식물 플랑크톤 번성을 일으키는 중요한 요소로 알려지고 있지만 (Trombetta *et al.*, 2019), 겨울철 수온 상승은 초식성 동물의 대사를 증가에 따른 섭식압의 증가로 플랑크톤의 현존량을 낮출 수도 있는 것으로 보고되고 있다 (Keller *et al.*, 1999).

실제 우리 연구결과에서도 도입 전에 비해 Chlorophyll-a 농도의 변화폭이 현저하게 줄어들며 하향 평준화 되는 경향을 나타내고 있다.

굴 양식장 도입 이후 pH는 변동폭이 더 커지는 경향을 보였지만, 변동계수는 0.9-2.3%의 범위로 통계적 유의성은 없었다 ( $P = 0.337$ ). pH 변동에는 육수의 유입, 광합성 등의 다양한 요인이 작용하지만, 조사해역은 비교적 육수의 유입에서 자유롭고 주변 유역으로부터의 영양염의 유입이 적은 해역이므로 (Jeong and Cho, 2018), 양식장의 도입이 가장 큰 변화 유발 요인이라고 할 수 있다. 폐쇄된 해역에 높은 식물플랑크톤 섭식압을 유지하는 것은 식물플랑크톤 현존량의 변화를 유발하고, 이는 결과적으로 수질 변화를 촉발하는 결과를 초래할 것이다.

양식장 도입 전후 질소화합물의 변화는 Fig. 3과 같다. 암모니아 농도는 입식 전 0.0281 mg/L에서 입식 이후 0.0236 mg/L로 감소하는 경향이었으나 통계적 유의성은 없었다 ( $P = 0.315$ ). 입식 초기에는 다소 높은 값이었으나, 2017년 이후는 0.014 mg/L로 낮아지는 경향을 보였다. 입식 후 CV%가 2배 이상 증가하며 굴 양식장의 도입으로 정점 간 농도 차이가 증가하였다 ( $P < 0.001$ ). 질산은 양식장 도입 전 평균 0.219 mg/L였으나, 도입 이후에는 0.075 mg/L로 유의하게 감소하였으며 ( $P < 0.001$ ), CV%도 12.44%에서 43.88%로 유의하게 증가하였다 ( $P < 0.001$ ). 아질산은 0.003 mg/L에서 0.006 mg/L로 2배 증가하였고 ( $P = 0.003$ ), CV%도 24.6%에서 43.1%로 증가하였다 ( $P < 0.001$ ). 용존무기질소는 도입 전 0.250 mg/L에서 0.101 mg/L로 감소하였고 ( $P < 0.001$ ), CV%는 16.1%에서 15.5%로 유의적인 변화는 없었다 ( $P = 0.803$ ). 양식장 도입 전후 질소화합물은 아질산은 증가하였으나 질산이 감소함에 따라 용존무기질소는 감소하는 경향을 보였다. 비록 암모니아의 농도변화는 관찰되지 않았지만, 정점 간의 농도 차이가 크게 증가하는 것은 양식장 지역에서는 암모니아의 발생량이 증가하고 있다는 것을 의미하고, 이는 분해 중간산물인 아질산의 증가로 확인할 수 있었다. 그러나 굴양식장의 도입으로 높아진 식물플랑크톤 섭식압은 전반적으로 용존무기질소의 감소를 유발하였고, 이는 해역의 생산성에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 연구가 진행된 완도군 군외면 지선 해역은 비교적 청정해역으로 외부로부터 유입되는 하천의 영향을 적게 받는 해역으로 (Jeong *et al.*, 2018), 연구기간 동안 유역내 유의미한 수준의 환경변화는 없었다. 따라서 굴 양식장의 도입은 식물플랑크톤 섭식압을 높임으로써 top-down control에 의한 해역의 영양염 가용성에 영향을 미친 것으로 생각된다. 통상 이러한 굴양식장에 의한 수질에 대한 영향성은 양식방법보다는 굴의 입식밀도 또는 입식량 등의 입식 규모에 비례하고 파랑이나 퇴적환경 (유속의 영향성이 반

영원) 등에 의해 많은 영향을 받는 것으로 보고되고 있다 (Turner *et al.*, 2019). 양식장 도입 전에는 정점 간 차이보다는 계절적 변화가 크게 나타났지만, 양식장 도입 이후에는 계절적 변동성은 감소하고 정점 간 변동계수가 크게 증가하는 경향을 보이는 것은 굴양식장이 직접적 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 해역의 생산성은 영양염의 가용성에 의해 지배받고 (Platt *et al.*, 1991; Verity *et al.*, 2002), 굴 양식장 도입 이전의 조사해역은 생산성도 강우나 저질 재부유 등에 의한 영양염의 공급에 의한 bottom-up control이 지배적이었다 (Jeong *et al.*, 2018). 그러나 굴양식장의 도입이후는 높아진 굴의 섭식압이 식물플랑크톤 생산성을 압도함으로써 Top-down control에 의해 수질환경 변화가 야기되는 경향을 보였다 (Rodríguez-Gálvez *et al.*, 2023).

용존무기인의 농도는 도입 전 0.0180 mg/L에서 도입 이후 0.0184 mg/L로 유의한 변화가 없었다 ( $P = 0.832$ ). 그러나 변동계수는 12.67%에서 36.62%로 크게 증가하였다 ( $P < 0.001$ ). 이는 2015년 도입 초기에는  $\leq 0.001$  mg/L의 일정한 값을 유지하다가 굴 입식 이후 수온상승과 함께 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 굴 양식장의 도입은 저질로 불안정한 유기물을 다량 공급한다. 공급된 유기물은 저서생물의 생물 교반과 황-철의 산화-환원 작용에 의해 용출된다. 황-철의 산화 작용으로 인의 방출을 유발하고, 반대로 혐기성 환경에서는 인의 방출을 저감시키는 것으로 보고하고 있다 (Andrieux-Loyer *et al.*, 2014). 조사해역의 저질은 황화물의 함량이 매우 낮고, 주기적으로 노출되는 조간대 해역에 위치하고 있으며 만조 시에도 수심이 낮아 파도 등에 의해 저질이 지속적으로 재부유하는 등 표층 저질의 산소포화도가 높은 해역이므로 (Han and Cho, 2013). 황화철이 형성되는 혐기성 조건보다는 활발하게 인을 방출하는 호기성 조건이 우세한 것으로 판단된다. 수중에서 공급받은 유기물입자가 분해되는 과정에 수중으로 다량의 인이 용출되는 환경이 조성되는 것으로 생각된다. 그러나 낮은 수심으로 양식장 퇴적물의 축적은 양식장 지역으로 국한되므로 정점간 차이가 크게 나타난 것으로 생각된다. 한편 이러한 황화물-철 반응은 계절성을 띄므로 여름철 고수온기에는 이러한 경향은 더 커질 것으로 생각된다.

클로로필의 농도는 도입 전 2.242  $\mu\text{g/L}$ 에서 1.244  $\mu\text{g/L}$ 로 유의적으로 감소하였고 ( $P = 0.0098$ ), 변동계수는 30.6%에서 34.8%로 유의한 변화는 없었다 ( $P = 0.536$ ). 한편 클로로필 a 농도에 대한 상관관계를 분석한 결과, 해역의 클로로필 a의 농도는 염분과는 강한 역상관관계를 ( $P < 0.01$ ). 질산과 ( $P < 0.01$ ) 용존무기질소에는 ( $P < 0.05$ ) 정상관계를 지니는 것으로 나타났다. 지속적인 육수의 유입을 기대하기는 어려운 유역 특성으로 강우에 의한 영양의 공급은 군외면 해역의 생산력의 원천으로 보고하고 있다 (Han *et al.*, 2013; Jeong

**Table 1.** Pearson correlation analysis of the seawater parameters against chlorophyll-a content of the studied waters

	WT	DO	pH	Sal	Ammonia	Nitrite	Nitrate	DIN	DIP
Co	0.104	-0.208	-0.087	-0.319**	-0.067	-0.095	0.340**	0.309*	0.099
p	0.212	0.054	0.272	0.006	0.320	0.253	0.007	0.014	0.244

\*\* and \* indicate significant differences in  $p < 0.01$  and  $p < 0.05$ , respectively.

et al., 2018). 질산과 용존무기질소와의 높은 정상관관계는 조사해역으로 도입된 굴 양식장의 높은 섭식압과 높아진 침강력에 의해 수중 입자성 영양이 빠르게 제거됨으로써 영양염 가용성을 저하시키는 것으로 판단된다. Fukuhara and Sakamoto (1987) 는 실지렁이에 (*Limnodrilus* spp.) 의한 인의 용출속도는 배설물의 ( $0.316 \times 10^{-2} \mu\text{g P mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) 12-94%에 불과한 반면, 질소의 용출속도는 배설물의 ( $7.10 \times 10^{-2} \mu\text{g N mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) 76-625%에 달하는 것으로 보고하였다. 즉, 생물교란에 의한 영양염의 용출은 인보다는 질소가 더 빠른 것으로 보고하고 있다. 즉 인의 용출은 황-철의 산화-환원 반응에 의해 지배되고, 질소용출은 저서생물의 생물교란에 의해 주로 용출되는 것으로 볼 수 있다. 한편 우리 연구해역에서 굴 양식장의 도입에 의해 저질로의 유기물 오염이 가중되었음에도 인의 유의미한 증가는 없었고 오히려 무기용존질소가 감소하였다. 이는 침전된 유기물 중 인의 용출은 원활한 데 비해 질소의 재광물화반응은 다소 더딘 것으로 생각되며, 조사해역에 퇴적된 유기물의 재광물화 반응은 생물교란보다는 주로 황-철의 산화-환원 반응에 의해 이뤄지는 것으로 추정할 수 있다. 즉 수심이 낮고 파랑에 의한 표층퇴적물의 재부유가 많은 해역의 특성상 양식장 기원 퇴적물에 충분한 산소가 공급되고 있기 때문이라 판단된다. 그러나, 우리 연구기간은 양식장 도입 이후 불과 3년에 불과하여 저질생태계의 큰 변화를 기대하기는 어려운 상황이므로 오랜 기간 양식이 이뤄지고 저질생태계의 천이가 이뤄진다면 - 저질내 유기물의 증가로 인하여 갯지렁이와 같은 내재성 저서생물이 증가하고 세립질의 퇴적층이 두터워져 산화환원전위가 달라진다면 - 다소간 다른 양상을 보일 가능성도 배제할 수 없다.

연구 개시 전 완도군 군외면 해역에는 수평망식 굴양식장으로 약 5 ha의 면허를 취득하였다. 그러나 적정양식기술 개발을 위해 최적화 연구의 일환으로 1 ha의 굴양식 시설을 도입하였음에도 해역의 용존무기질소가 감소하여 식물플랑크톤 현존량이 감소하는 것을 구명할 수 있었다. 따라서 어느 해역, 특히 폐쇄해역으로 굴 양식장이 도입되는 경우, 보다 지속적인 생산을 위해서는 해역의 먹이 가용성뿐만 아니라 영양염 가용성에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

### 결론

2015년 완도군 군외면 지선 갯벌에 수평망식 굴양식장을 도

입하면서 폐쇄된 해역에 굴양식장이 도입되면서 야기되는 환경변화를 모니터링하고자 하였다. 양식장 도입 이후 암모니아에서 아질산으로 산화되는 과정이 활성화되는 경향을 보였지만, 질산의 농도는 감소함으로써 전체적으로 용존무기질소가 감소하였다. 용존무기인의 함량이 다소간 증가하였음에도 불구하고 클로로필의 농도가 현저하게 감소하였다. 우리의 연구결과는 폐쇄된 해역에 초식성동물인 굴이 다량 입식됨으로서 식물플랑크톤의 섭식압이 높아짐으로 인하여 발생하는 Top-down control의 전형적인 사례로 판단되고, 이는 해역에 양식장을 도입할 경우 먹이가용성뿐만 아니라 영양가용성까지 고려할 필요가 있음을 의미한다.

### 사사

이 논문은 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### REFERENCES

Andrieux-Loyer, F., Azandegbé, A., Caradec, F., Philippon, X., Kérouel, R., Youenou, A., and Nicolas, J.-L. (2014) Impact of Oyster Farming on Diagenetic Processes and the Phosphorus Cycle in Two Estuaries (Brittany, France). *Aquatic Geochemistry*, **20**: 573-611.

Carrillo, P., Reche, I., Sanchez-Castillo, P., and Cruz-Pizarro, L. (1995) Direct and indirect effects of grazing on the phytoplankton seasonal succession in an oligotrophic lake. *Journal of Plankton Research*, **17**: 1363-1379.

Fukuhara, H., and Sakamoto, M. (1987) Enhancement of Inorganic Nitrogen and Phosphate Release from Lake Sediment by Tubificid Worms and Chironomid Larvae. *Oikos*, **48**: 312-320.

Han, H.S., and Cho, S.-M. (2013) Study on optimal condition for oyster rack culture in terms of tidal exposure and rack height in Wando coast, Korea. *The Korean Journal of Malacology*, **29**: 43-50.

Jeong, W.-G., and Cho, S.-M. (2018) Estimation of primary production of the waters around rack oyster farm at Wando, Korea. *Fisheries and Aquatic Sciences*, **21**: 9.

Keller, A.A., Oviatt, C.A., Walker, H.A., and Hawk, J.D. (1999) Predicted impacts of elevated temperature on the magnitude of the winter-spring phytoplankton

- bloom in temperate coastal waters: A mesocosm study. *Limnology and Oceanography*, **44**: 344-356.
- MOF (2013) Korean Standard Methods for Marine Environment. Ministry of Oceans and Fisheries, Pusan, pp 461
- Platt, T.C., Bird, D.F., and Sathyendranath, S. (1991) Critical depth and marine primary production. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, **246**: 205-217.
- Rodríguez-Gálvez, S., Macías, D., Prieto, L., and Ruiz, J. (2023) Top-down and bottom-up control of phytoplankton in a mid-latitude continental shelf ecosystem. *Progress in Oceanography*, **217**: 103083.
- Trombetta, T., Vidussi, F., Mas, S., Parin, D., Simier, M., and Mostajir, B. (2019) Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. *PLOS ONE*, **14**: e0214933.
- Turner, J.S., Kellogg, M.L., Massey, G.M., and Friedrichs, C.T. (2019) Minimal effects of oyster aquaculture on local water quality: Examples from southern Chesapeake Bay. *PLOS ONE*, **14**: e0224768.
- Verity, P.G., Smetacek, V., and Smayda, T.J. (2002) Status, trends and the future of the marine pelagic ecosystem. *Environmental Conservation*, **29**: 207-237.