

여자만 북서부 꼬막어장의 해양환경 특성. 2. 수질환경 및 식물플랑크톤 군집

윤양호^{1*}, 이현지²

¹전남대학교 해양융합학과, ²전남대학교 대학원 환경해양학과

A Charecteristics of Marine Environments in a Blood Cockle Farms of the Northwestern Yeoja Bay, Korea 2. Spatio-temporal Distribution of Water Quality and Phytoplankton Community

Yang Ho Yoon^{1*}, Hyun Ji Lee²

¹Dept. of Ocean Covergence Science, Chonnam National University

²Dept. of Environmental Oceanography, Graduate School of Chonnam National University

요 약 여자만 북서해역 꼬막 어장의 수괴(수형), 영양염 등 수질환경과 식물플랑크톤 군집의 변동 특성을 파악하기 위해 2017년 봄(5월), 여름(8월) 및 가을(11월) 7개 정점을 조사하였다. 분석 결과, 꼬막어장의 수형은 수온과 염분 변화에 따른 계절특성이 명확하였다. 영양염 중 규산염은 연중 풍부였지만, 봄과 여름은 인산염이 결핍되었고, 가을은 질소원이 결핍되는 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 군집에서 출현종은 매우 단순하였으며, 현존량도 매우 낮았다. 우점종은 연중 규조류에 우점 되어, 봄은 *Skeletonema costatum*-ls, *Nitzschia longissima*, 여름은 *Pleurosigma normanii*, *Coscinodiscus gigas*, 가을은 *N. longissima*, *Pseudonitzschia pungens*, *Chaetoceros curvisetus*, *Eucampia zodiacus*가 우점 출현하여, 여름에 편모조류 출현이 낮은 특성을 보였다. 상관분석과 주성분 분석의 결과 여자만 북서해역 꼬막어장의 생물 해양학 특성은 계절에 따라 수질 환경 및 식물플랑크톤 군집에 많은 차이가 있으나, 전체적으로는 육상에서 공급되는 무기 및 유기물질 및 낮은 수심으로 해수혼합에 따른 표층퇴적물의 재부유에 의한 영양염 공급, 그리고 해역 자체의 생물생산과 무기화 과정의 균형에 의해 해양환경 특성 및 식물플랑크톤 생산이 결정되는 것으로 판단되었다.

Abstract This study was designed to assess the water quality and phytoplankton community including chlorophyll a in blood cockle (*Tegillarca granosa*) farms in May, August and November of 2017 in the northwestern Yeoja Bay, Korea. As a result, the seasonal characteristics of water types by water temperature and salinity were clear. Nutrients were abundant in silicate throughout the season, but phosphate was scarce in spring and summer, and nitrogen sources were scarce in autumn. The species composition of phytoplankton community was a very simple distribution, and the standing crop was also very low. The annual dominant species is dominated by the diatoms, with *Skeletonema costatum*-ls, *Nitzschia longissima* in spring, *Pleurosigma normanii*, *Coscinodiscus gigas* in summer, and *N. longissima*, *Pseudonitzschia pungens*, *Chaetoceros curvisetus*, *Eucampia zodiacus* in autumn. In summer the results were different from other coastal waters of Korea. The principal component analysis(PCA) and correlation analysis showed that the characteristics of water quality and biological environments differed according to the season. Furthermore, it was determined by the supply of materials through fresh water on land, seawater congestion caused by the refueling of surface sediments with lower depth, and the balance of biological production and mineralization of organic matters in blood cockle farms.

Keywords : Blood Clocke Farm, Water Quality, Phytoplankton Community, Phosphate, Nitrate, PCA, Northwestern Yeoja Bay

*Corresponding Author : Yang Ho Yoon(Chonnam National Univ.)

email: yoonyh@jnu.ac.kr

Received May 11, 2020

Accepted August 7, 2020

Revised July 9, 2020

Published August 31, 2020

1. 서론

연안해역은 육상에서 다양한 유기 및 무기물질이 유입되어 높은 생물생산을 나타내어[1], 어장으로서 가치가 높을 뿐만 아니라 적조 등 다양한 해양환경문제를 발생시켜, 생물해양학 분야는 물론 환경해양학 분야에도 관심이 높다[2,3]. 특히 하구역을 포함한 연안해역은 담수 유입량에 따른 염분 성층의 다양한 구조를 보여, 물리·화학·생물학적 환경인자는 물론 생물학 인자의 농도 경도가 심한 특징을 나타낸다[4,5]. 또한, 하천을 통해 공급되는 풍부한 영양염으로 식물플랑크톤 군집은 상대적 대형 종에 의해 구성되며, 환경변화에 대한 적응능력이 탁월한 종이 우점한다[6,7]. 이러한 연안해역은 해양 표면적의 10% 이하이지만, 전체 해양의 어류 생산의 절반 이상이 이곳에서 이루어진다[1]. 연안해역에서 육상으로 둘러싸여 평온한 환경 특성을 보이는 내만 해역은 다양한 어류, 이매패류 등 수산자원생물의 산란, 서식장 이외에도 다양한 자원생물의 양식장으로 이용되어, 인류의 식량자원 공급처로서 산업적으로 매우 중요하다[8].

여자만 북서해역의 중요한 자원생물인 꼬막(*Tegillarca granosa* Linnaeus)은 연체동물문(Mollusca), 이매패강(Bivalvia), 돌조개목(Arcoida), 돌조개과(Arcidae)에 속한다. 돌조개과는 4개 아과 71속이 속하는 거대 그룹이다. 이 중 *Tegillarca* 속에 8종, *Anadara* 속에 92종이 보고된다(WoRMS: World Register of Marine Species (<http://www.marinespecies.org>)) 국내에서는 돌조개과에 꼬막 이외에 새꼬막(*Anadara subcrenata* Lischke), 피조개(*Anadara broughtonii* Schrenck), 큰이랑피조개(*Anadara satowi* Dunker) 및 어긋물린새꼬막(*Anadara inaequalis* Bruguière) 등이 서식이 보고되며, 이 5종의 꼬막류는 “생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률”에 따라 국외반출시 승인을 얻어야 하는 생물자원으로 지정되어 있다(환경부고시 제 2013-126호).

여자만은 남해 중앙부에 위치하여 여수반도 및 고흥산반도(여수시), 순천시, 보성군 및 고흥반도(고흥군)로 둘러싸인 폐쇄성의 강한 내만해역으로 만입구의 협수로를 통해 붓돌바다 및 남해로 연결된다. 여자만 북동부의 순천만과 북서부의 보성만은 각각 별도의 습지보전지구로 지정되어 있으나, 2003년에 이 두 습지보전지구를 합해 국내 최초로 람사르협약에 등록된 습지이다. 뿐만 아니라 여자만은 국내 최대 꼬막과 새꼬막 산지이기도 하다. 그러나 최근 알 수 없는 원인으로 여자만 꼬막이 대량 폐사하였다. 원인으로 환경오염, 빈산소, 먹이 부족이 추정되

지만[8], 아직 명확하지 않다. 그리고 동남아시아를 중심으로 환경변화에 따른 꼬막의 대량폐사가 보고된다[9-11]. 2012년 말레이시아 Selangor해역의 꼬막 양식장에서 30% 이상 대량 폐사한 원인으로 먹이 부족이 지적되었다[12].

여자만은 이러한 수산자원 및 해양환경 보전에 매우 중요한 해역이나, 현재까지 해양과학의 연구는 부족하여, 일부 수질 및 퇴적물에 관련한 보고[13-15], 식물플랑크톤, 와편모조 시스트 관련된 연구[16-20], 먹이생물 평가(Yoon, 2019), 자원생물인 짱둥어의 생태[21,22]와 꼬막, 새꼬막의 생리에 관련한 보고[23-25]가 있지만, 효율적인 해역이용 및 관리를 위한 전체적인 해양학적 자료는 매우 한정적이다[26]. 또한, 여자만 북부해역의 람사르습지 및 습지보전지구의 효율적 관리는 물론 이매패류 등 수산생물의 양식 어장에 대한 효율적 이용과 관리 및 해양환경 보전을 위해서도 체계적이고 지속적인 해양학적 연구자료 축적이 요구된다.

그렇기에 이 연구는 이러한 여자만 북서해역 꼬막양식장의 해양환경 특성 중 기초생산자의 변동에 직접 영향을 미치는 수질 환경 등의 물리·화학적 환경인자 및 식물플랑크톤 군집의 분포 특성을 해석하는 것과 동시에 꼬막의 폐사 원인에 대해서도 고찰하여 보았다.

2. 재료 및 방법

여자만 북서해역의 수질환경 및 식물플랑크톤 군집의 분포 특성을 파악하기 위한 현장조사는 2017년 5월, 8월, 11월 등 3회에 걸쳐, 천해해역의 7개의 꼬막 양식장에서 실시하였으며, 어장은 모두 수심 2m 이하인 천해해역이다(Fig. 1). 조사는 소형어선을 이용하여 반톤채수기(3L)로 표층해수를 채수하였다. 정점은 휴대용 GPS(Gelmean, Germany)로 확인하였다. 채수한 해수는 해양환경인자 분석 및 식물플랑크톤 군집 해석에 사용하였고, 측정 및 분석의 세부 항목은 다음과 같다.

수온, 염분, Sigma t, 용존산소(DO), 산소포화도, 탁도 및 Chlorophyll *a* (Chl-*a*)는 현장측정용 잠수형광도계(JFE Advantech Co., ASTD 102)에 부착된 센서를 이용하였다. pH는 pH meter (Hanna HI 991003), 그리고 용존산소는 DO meter (YSI, ProDSS or YSI 30)로 현장에서 직접 측정하였다. 그리고 영양염 항목인 암모니아염, 아질산염, 질산염, 인산염(DIP), 규산염은 해수 500mL를 유리섬유 여과지(GF/C, ϕ 47 mm)로 여과한

해수를 비색법에 의한 분광광도법에 준하여 분석하였다 [27]. 그리고 총인, 용존총인, 입자성 및 용존유기 인은 현장해수와 여과해수를 산화제를 투입하여 멸균기로 분해하여, TP 및 DTP를 분석하였다. 분석된 값에서 PP=TP-DTP, DOP=DTP-DIP의 계산식으로 산출하였다 [28]. 또한, 해수 중 부유물질량인 Seston Weight(SW)는 해수 500 mL를 유리섬유 여과지(GF/C, φ 47 mm)를 이용하여 여과지에 포집된 부유물의 무게로서 계산하였다[28].

식물플랑크톤 군집은 표층과 저층 해수 500 mL를 폴리에틸렌 표본병에 채수하여, Lugol 용액으로 최종농도가 2.0%가 되도록 고정한 다음 광분해를 방지하기 위해 알루미늄 포일로 차광하였다. 고정한 표본은 실험실에서 박막여과지(pore size; 5.0μm, φ; 47 mm)가 장착된 플라스틱 여과기(Sartorius, Germany)로 자연 낙하에 의해 최종 농도 10 mL로 농축하여 검경시료로 제공하였다 [28]. 검경은 농축표본 0.1 mL를 1.0 mm 간격의 가로 및 세로 선이 들어 있는 계수판(Rigosha, No. 5608-C)에서 커버글라스를 한 다음 미분간섭장치(DIC)가 장착된 광학 현미경(Nikon, Eclipse 80i)을 사용하여 100X~400X 배율에서 종의 동정과 계수를 실시하여, 단위 체적당의 세포수로 현존량을 산출하였다. 종 동정은 도감[29-33] 및 논문을 참고하였고, 종명은 WoRMS (www.marinespecies.org)에 준하여 정리하였다.

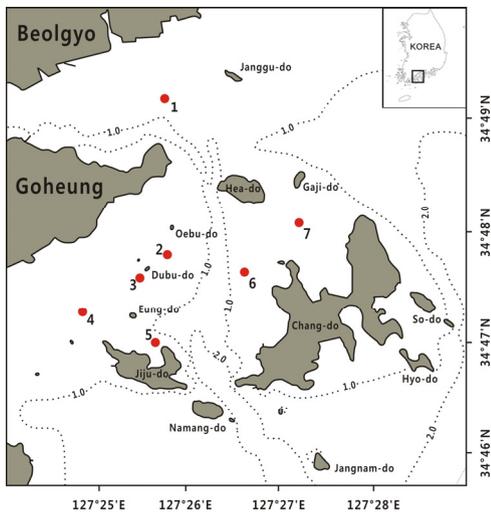


Fig. 1. Map show to the bathymetry and sampling stations at the blood cockle farms in the northwestern Yeosu bay.

측정 및 분석된 해양환경인자와 식물플랑크톤 분류군별(규조류와 편모조류) 세포 밀도, 우점종 세포 밀도 등을 이용하여 주성분 분석을 실시하였다. 분석은 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 계절별로 상관분석과 주성분을 도출하였으며, 주성분은 누적기여율 70%까지를 기준으로 계산하였다[34]. 분석 결과로 여자만 북서해역의 해양환경특성 및 식물플랑크톤 출현특성을 해석하였다.

본문에서 해역을 편의상 정점 1을 북부어장, 고흥반도에 인접한 정점 2와 3을 서부어장, 지도 북부의 정점 4와 5를 남부어장, 그리고 장도 북서부의 정점 6과 7를 동부어장으로 표현하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양환경인자

여자만 북서해역 꼬막어장에서 3계절 동안 측정 및 분석된 환경인자의 최솟값, 최댓값 및 평균±표준편차로서 변동 폭을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

3.1.1 수온, 염분 및 T-S diagram

여자만 꼬막어장의 수온은 가을 13.9℃에서 여름 30.2℃로 변화하여 최댓값은 일반 해역에서 관찰되기 쉽지 않게 높았다(Table 1). 그러나 겨울 수온은 자료가 누락 되어, 연간 변동을 정확히 알 수는 없지만, 순천 무인 관측소 기상청 자료(<http://www.kma.go.kr>)를 참고하여 추정하여 보았다. 즉 2017년 기온은 최저 -9.4℃ (1월 평균 0.2℃)에서 최고 30.3℃(8월 평균 26.9℃)로 연교차가 39.7℃을 보였고, 5월과 6월 평균은 18.4℃ 및 22.2℃, 8월 평균은 26.9℃, 그리고 10월과 11월 평균이 15.8℃와 7.6℃를 나타내었다. 이러한 결과는 여자만 꼬막어장은 수심이 매우 낮아 수온도 기온과 같이 일사량과 대기냉각의 영향을 직접 받고 있어, 수온의 연교차도 30℃에 가까울 것으로 추정되었다. 시·공간 분포는 수온 상승기인 봄과 여름에 북부어장은 22.0℃ 및 30.0℃ 이상으로 높았으나, 남부어장은 21.0℃ 및 29.5℃ 이하로, 일사량의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다. 그러나 수온 하강기인 가을에 동부어장은 15.0℃ 이상의 수온을 보인 반면, 남부어장에서 14.0℃ 이하로 낮았다.

염분은 30.97~34.19 psu 범위로 별교천 등에서 담수 유입이 있는 것을 고려하면, 변동 폭이 작았다. 봄은 33.94±0.24 psu 변동 폭을, 여름은 32.86±0.13 psu,

Table 1. Seasonal variations of marine environmental factors in fishing grounds for blood cockle

Parameters	Seasons Units	Spring (May 28, 2017)			Summer (August 10, 2017)			Autumn (November 4, 2017)		
		Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
WT	℃	21.9	22.6	22.2 ± 0.26	29.4	30.2	29.7 ± 0.26	13.9	15.2	14.6 ± 0.41
Salinity	psu	33.45	34.19	33.94 ± 0.24	32.58	32.98	32.86 ± 0.13	30.97	31.23	31.06 ± 0.09
Sigma-t		22.99	23.63	23.37 ± 0.22	19.84	20.37	20.22 ± 0.17	20.03	23.08	22.56 ± 1.13
pH		8.20	8.32	8.27 ± 0.04	8.08	8.18	8.12 ± 0.04	7.82	8.15	8.01 ± 0.14
DO	mgL ⁻¹	6.44	7.46	7.09 ± 0.32	6.00	7.30	6.54 ± 0.45	7.70	7.99	7.84 ± 0.13
DO Saturation	%	90.1	104.5	99.1 ± 4.51	90.6	110.6	99.5 ± 6.86	91.9	95.0	93.3 ± 1.13
Ammonia-N	μML ⁻¹	0.03	1.01	0.63 ± 0.32	0.44	1.98	0.94 ± 0.47	0.98	1.87	1.20 ± 0.28
Nitrite-N		0.30	0.83	0.44 ± 0.17	0.19	0.62	0.33 ± 0.14	0.13	0.30	0.21 ± 0.05
Nitrate-N		2.18	6.18	4.23 ± 1.76	0.99	3.88	2.33 ± 1.02	1.67	3.55	2.64 ± 0.64
DIN		2.86	7.04	5.30 ± 1.73	2.10	6.48	3.61 ± 1.46	3.11	4.97	4.05 ± 0.57
Phosphate-P		0.14	0.39	0.26 ± 0.07	0.03	1.00	0.39 ± 0.30	0.49	0.95	0.61 ± 0.15
Silicate-Si		24.70	38.71	29.5 ± 4.27	20.37	32.18	25.6 ± 3.74	11.60	19.12	16.1 ± 2.65
N/P ratio		12.08	43.47	22.2 ± 10.5	3.28	63.12	18.8 ± 18.9	5.25	9.11	6.88 ± 1.15
Si/P ratio		93.46	198.3	121.7 ± 34.2	29.02	687.8	165.2 ± 215	20.21	32.33	27.0 ± 3.66
TP		0.64	1.45	1.04 ± 0.30	0.74	1.30	0.93 ± 0.16	0.62	1.30	0.86 ± 0.21
DTP		0.39	0.69	0.48 ± 0.10	0.64	1.15	0.84 ± 0.15	0.57	1.25	0.81 ± 0.21
DOP		0.15	0.30	0.22 ± 0.05	0.10	0.71	0.45 ± 0.22	0.03	0.30	0.21 ± 0.08
PP		0.10	0.91	0.56 ± 0.29	0.01	0.15	0.09 ± 0.05	0.02	0.10	0.05 ± 0.02
SW		mgL ⁻¹	18.8	52.4	35.5 ± 14.2	10.8	22.8	17.1 ± 4.58	24.4	113.6
Turbidity	FTU	18.4	31.9	24.4 ± 4.18	10.3	34.2	18.5 ± 8.2	9.2	39.6	19.2 ± 12.4
Chl- <i>a</i>	μgL ⁻¹	3.12	6.67	4.23 ± 1.33	2.85	7.27	4.05 ± 1.61	1.69	2.76	2.18 ± 0.35

Min : Minimum, Max : Maximum, SD : Standard Deviation, WT : Water Temperature, DO : Dissolved Oxygen, N : Nitrogen, DIN : Dissolved Inorganic Nitrogen, P : Phosphorus, Si : Silicon, TP : Total Phosphorus(P), DTP : Dissolved Total P, DOP : Dissolved Organic P, PP : Particulate P, SW : Seston Weight, Chl-*a* : Chlorophyll *a*

그리고 가을은 31.06±0.09 psu 변동 폭을 보여, 가을과 여름에 농도가 낮고 봄에 34.0 psu 로 높았다(Table 1). 시·공간 분포는 수온과 같이 봄과 여름은 남부어장에서 34.0 psu 및 32.8 psu 이상으로 높았으며, 북부어장에서 33.5 psu 및 32.6 psu 이하로 낮았다. 가을은 해안선에 인접한 남부어장에서 31.0 psu 이하의 염분을, 상대적으로 외부어장인 동부어장에서 31.2 psu 이상의 염분을 나타내었다.

수온, 염분, sigma t (σ_t)에 의한 T-S diagram 분석으로 여자만 북부해역의 수괴분석 결과, 봄은 20℃ 전후의 수온에 34 psu 전후의 염분으로 해석하면, σ_t 가 23.0 이상인 고밀도수가 형성되었으나, 여름은 30℃ 전후의 높은 수온에 33 psu 전후의 염분으로 σ_t 가 20.0 이하의 저밀도수가 형성되었다. 그리고 가을은 14℃ 전후의 수온에 31 psu 전후의 상대적으로 낮은 염분에 의해 σ_t 가 23.0 전후의 고밀도수를 형성하여, 3계절의 변화가 명확한 수형을 나타내었다(Fig. 2).

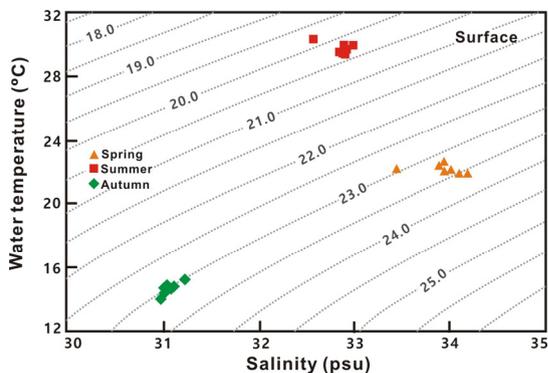


Fig. 2. The variations of T-S diagrams at surface in the fishing grounds for blood cockle.

수온과 염분은 생물의 서식환경은 물론 계절 변화 및 수평분포에 크게 영향을 미친다. 꼬막의 서식 및 적정 수온 범위는 분명하지 않지만, 주생산지인 아열대해역인 말레시아 및 태국 등에서 29~32℃가 적정 수온 범위로 알

려진다. 새꼬막(*Anadara subcrenata*)은 겨울 2~5°C, 여름 28~30°C에서 서식 가능하며, 40°C에 노출된 갯벌에도 꼬막이 적응하는 것으로 보고된다[11]. 그러나 아열대해역의 결과를 여자만 북서해역에 직접 적용하는 것은 어렵기에, 꼬막의 생식주기에 따른 수온 변화의 세부적 검토가 요구된다. 그러나 꼬막의 서식 수온 및 서식 장소를 고려하면, 여자만 북서 꼬막어장의 폐사에 수온을 대입하는 것은 어렵다[24]. 염분은 2000년 12월부터 2001년 11월까지 월변화가 26.9~31.8 psu의 범위로 보고한 결과보다[24]는 높지만, 공간적으로 균일하였다. 꼬막어장에 미치는 염분 영향은 1977년 폐낭에서 심한 강우로 표층과 저층에서 각 2 psu 및 4psu 이하 염분 조건에서 어장의 20~50%의 꼬막이 대량 폐사된 것이 보고되며 [9], 실내 실험에서도 4~14 psu 염분에서 폐사가 되지만, 14.0 psu 이하의 염분에서는 폐사되지 않은 것으로 알려진다[10]. 또한, 실내에서 염분에 따른 꼬막의 대사 및 생존을 실험한 결과[25], 성숙한 꼬막은 동계 및 하계 수온에 순응된 실험구에서 3.4 psu 이하 염분에 100% 사망하였다. 그러나 동계의 6.7 psu에 44일 노출한 표본에서는 25%의 생존율을 보였고, 하계의 13.4 psu에서 성패와 치패가 각 14.0%와 11.0%가 생존하였으나, 26.8 psu 염분에서 각각 100%와 60.1%로 염분 내성에 대한 차이를 보였다[25]. 또한, 수온이 높고, 염분이 낮은 실험구가 수온과 염분이 모두 낮은 실험구 보다도 꼬막 폐사가 높은 것으로 보고하여[25], 꼬막의 폐사는 독립된 하나의 환경인자보다 다양한 환경인자가 복합적인 작용으로 발생할 가능성을 시사하였다. 그러나 여자만 북서해역으로 유출되는 벌교천 등의 하천수 용량을 고려하면, 염분 변화에 따른 꼬막의 폐사 가능성은 크지 않다.

3.1.2. 수소이온 농도(pH) 및 용존산소량

해수의 수소이온 농도(pH)는 안정되어, 외적 환경변화가 없으며, 약알칼리성인 8.0±0.5를 보인다. 여자만 꼬막어장의 pH 농도도 7.82~8.32의 범위로 봄에 높고, 가을에 낮지만, 특이 현상은 관찰되지 않았다(Table 1). 즉 꼬막의 폐사 원인으로 제기되는 공장폐수의 유입에 의한 영향은 없는 것으로 판단되었다.

용존산소는 수온과 염분의 함수로 용존량이 결정되기에, 이들 인자를 고려한 용존산소 포화도의 계절 변화를 보면 88.7~116.6%의 범위로 여름 저밀도 해수에서 높았고, 가을 고밀도 해수에서 낮았다. 즉 봄은 99.1±4.51%의 변동 폭을, 여름은 99.5±6.86%, 그리고 가을은 93.3±1.13%의 변동 폭으로 SW와 반대 경향을 보였다(Table 1). 시

· 공간 분포는 봄 북부어장에서 100% 이하의 불포화를, 남부어장에서 100% 이상의 과포화를 보였으며, 여름은 동부어장에서 불포화를, 서부어장에서 과포화를 보였다. 그리고 가을은 전체적으로 95%의 불포화 상태를 나타내었다.

용존산소는 퇴적층에 서식하는 이매패류의 서식 및 성장에 미치는 영향이 크다. 꼬막은 서식지의 조건에 따라 산소 내성을 달리한다[35]. 용존산소에 따른 꼬막의 생존율은 여름 25±5°C 및 DO 0.4 mgL⁻¹ 조건에서 대형은 5일 후 5% 생존, 소형은 모두 사멸하였다. 반치사농도는 대형에서 1.24 mgL⁻¹, 소형에서 0.4 mgL⁻¹로 용존산소의 내성은 수온에 크게 영향을 받는다[23]. 또한, 일본 최대 이매패류 생산지인 규슈 Ariakekai의 해양환경은 최근 꼬막 등 이매패류 생산이 어려운 환경으로 변화되었고 [36,37], 해저의 무산소가 새꼬막을 대량폐사 시키는 것으로 알려진다[38,39]. 여자만 북서해역 꼬막어장도 여름 해수 중의 용존산소는 대기에서 어렵지 않게 공급되지만, 낮은 수심이지만, 표층퇴적층은 거의 산소가 없는 상태에서 꼬막 폐사에 밀접히 연관되는 것으로 추정하고 있다 (Yoon, unpublished data).

3.1.3. 영양염

용존무기질소(DIN)는 여름 2.10 μML⁻¹에서 봄 7.04 μML⁻¹의 범위로, 봄 5.30±1.73 μML⁻¹, 여름 3.61±1.46 μML⁻¹, 그리고 가을 4.05±0.57 μML⁻¹ 변동 폭으로 봄에 높고, 여름에 낮지만, 전체적으로 낮은 농도를 보였다(Table 1). 또한, DIN을 구성하는 암모니아염, 아질산염 및 질산염의 조성비는 3계절 평균으로 질산염이 69.8%로 높았으나, 여름과 가을은 암모니아염이 26.0% 및 29.6%의 조성비로 해역 자체에서 분해 재생산되거나, 외부에서 유입된 유기물 분해로 공급되는 비율이 높게 나타났다(Fig. 3).

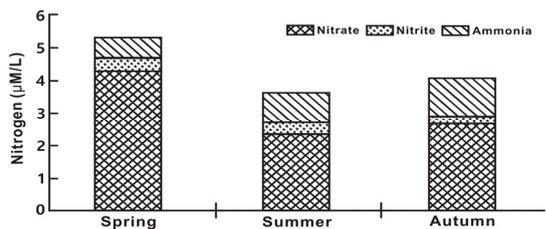


Fig. 3. Seasonal variation of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and the component ratio of ammonia-N (nitrogen), nitrite-N and nitrate-N.

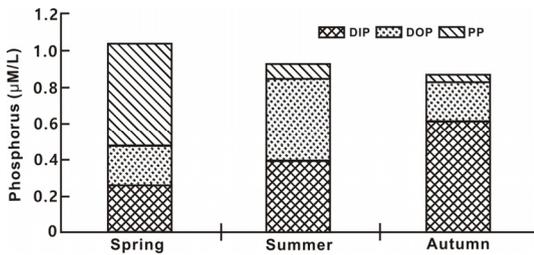


Fig. 4. Seasonal variation of dissolved total phosphorus (TPN) and the component ratio of particulate phosphorus (PP), dissolved organic phosphorus (DOP) and phosphate-P (DIP).

용존무기인(DIP)은 여름 최솟값 0.03 $\mu\text{M L}^{-1}$ 및 최댓값 1.00 $\mu\text{M L}^{-1}$ 의 범위로 평균 농도는 가을에 높고, 봄에 낮았지만, 전체적인 농도는 낮았다. 전인(TP)은 가을 0.62 $\mu\text{M L}^{-1}$ 에서 봄 1.45 $\mu\text{M L}^{-1}$ 의 범위로 3계절 평균 0.94 $\mu\text{M L}^{-1}$ 로 봄에 농도가 높고, 여름에 낮았다(Table 1). TP를 구성하는 입자성 인(PP), 용존유기인(DOP) 및 DIP의 조성비는 3계절 평균으로 각 23.0%, 31.2% 및 45.8%를 나타내어, DIP에 의한 구성비율이 높았다. 다만 봄은 PP가 53.8%로 높았고, 여름은 DOP가 48.3%로 높아, 계절에 따른 조성비의 변동 폭이 매우 큰 특징을 나타내었다(Fig. 4).

규산염은 가을 11.60 $\mu\text{M L}^{-1}$ 에서 봄 38.71 $\mu\text{M L}^{-1}$ 의 범위에서 3계절 평균 23.73 $\mu\text{M L}^{-1}$ 농도로 봄과 여름에 높고, 가을에 상대적으로 낮았으나, 전체적인 농도는 질소와 인과는 다르게 높았다(Table 1). 기초생산자인 식물플랑크톤 성장에 영향을 미치는 제한 영양염을 파악하는 지표로 N/P ratio 및 Si/P ratio가 사용된다. 여자만 꼬막어장에서 N/P ratio는 봄 22.2±10.5, 여름 18.8±18.9, 그리고 가을 6.88 ± 1.15 변동 폭으로 계절 및 어장에 따라 큰 차이를 보이거나(Table 1), 전체적으로는 봄과 가을은 질소원에 비해 인이 결핍된 상태이며, 가을은 질소가 결핍된 상태를 나타내었다. 그리고 Si/P ratio는 3계절 평균 104.6으로 인에 비해 규산염이 매우 풍부하였다(Fig. 5).

여자만 꼬막어장의 영양염 농도에서 규산염은 매우 높은 농도를 보이지만, 용존무기질소 및 인산염은 식물플랑크톤 성장을 제한할 정도의 낮은 농도는 아니다[40]. 그러나 영양염은 각각의 성분별 농도보다 최소율 법칙에 따라 요구되는 성분에서 가장 낮게 존재하는 원소에 의해 생물 성장은 지배된다[41]. 특히 식물플랑크톤 성장에 필요한 기본영양원인 질소, 규소 및 인 사이에는 N:Si:P = 16:15:1이라는 화학량론 비인 레드필드비가 성립하는

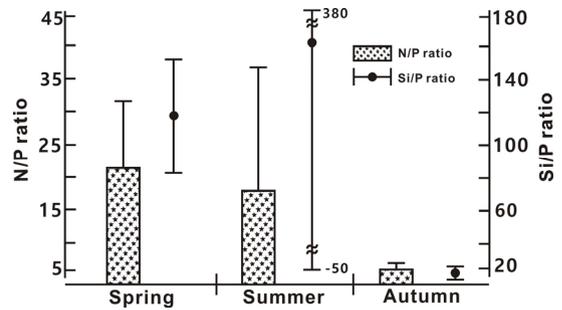


Fig. 5. Seasonal variations of N/P ratio and Si/P ratio.

것은 오래전부터 알려져 왔다[42]. 이들 화학량론 비는 해역에 따라 생물조성에 따라 차이를 보이며[43], 이후 여러 연구자에 의해 일부 수정되었으나[44], 큰 변화 없이 현재에도 유용한 지표로 사용된다. 여자만 꼬막어장의 N/P ratio 및 Si/P ratio에서 규산염은 전계절 식물플랑크톤 성장에 충분하게 존재하지만, 수온 상승기이면서 상대적으로 담수 유입이 많은 봄과 여름에는 인산염이, 수온하강기인 가을은 용존무기질소가 부족하여 이들 원소가 꼬막어장의 주요 먹이생물인 식물플랑크톤 성장을 제한하는 것으로 평가되었다.

3.1.4 부유물질과 Chlorophyll *a* (Chl-*a*)

부유물질(SW: Seston weight)은 여름 10.8 mg L^{-1} 에서 가을 113.6 mg L^{-1} 의 범위에서, 봄 35.5 ± 14.2 mg L^{-1} 의 변동 폭을 보였고, 여름 17.1 ± 4.58 mg L^{-1} , 그리고 가을 59.9 ± 32.6 mg L^{-1} 의 변동 폭으로 가을에 많고, 여름에 낮았지만(Table 1), 낮은 수심과 조석혼합 등으로 전체적으로는 매우 높은 농도를 나타내었다(Fig. 6). 시·공간 분포는 봄에 북부 및 동부어장에서 50 mg L^{-1} 이상으로 높았으며, 서부어장에서 20 mg L^{-1} 이하를 보였다. 여름은 남부어장에서 20 mg L^{-1} 이상으로 높았고, 서부어장에서 15 mg L^{-1} 이하를 나타내었다. 가을은 동부어장에서 30 mg L^{-1} 이하를, 북부어장에서 80 mg L^{-1} 이상으로 높았다.

식물플랑크톤 생물량인 Chl-*a* 농도의 변동은 1.69~7.68 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동으로 봄은 4.23 ± 1.33 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을, 여름 4.05 ± 1.61 $\mu\text{g L}^{-1}$, 그리고 가을 2.18 ± 0.35 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭으로 가을에 낮았고, 봄과 여름에 높았다(Table 1 & Fig. 6). 시·공간 분포는 봄 동부어장에서 5.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 농도를, 서부해역에서 6.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높지만, 북부어장에서 5.0~6.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 범위를 나타내었다. 여름은 남부어장에서 7.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이상을, 동부어장에서 3.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이하를 보였다. 가을은 동부 및 서부해역에서 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았고, 남부어장에

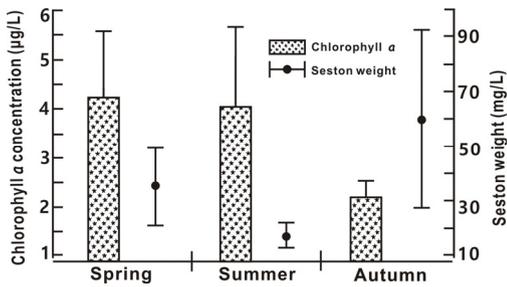


Fig. 6. Seasonal variations of chlorophyll *a* concentration and seston weight (SW).

서 2.0 μgL^{-1} 이상을, 그리고 북부해역에서 6.0 μgL^{-1} 이상으로 높았다.

이때때인 꼬막은 해수의 현탁물을 여과하여 먹이를 섭취하는 여과식자로서, 부유하는 동·식물플랑크톤, 입자성 유기물 및 유기물에 부착된 세균 및 미세먹이망의 출발점인 용존유기물을 분해하는 free-living bacteria까지의 모든 입자 유기물을 먹이로 이용한다[45]. 때문에, 꼬막의 먹이 해석은 Chl-*a* 농도는 물론 동·식물플랑크톤 생물량 및 다양한 유기물질의 정량적 분석이 필요하다[46]. 그러나 이러한 분석은 어렵기에 식물플랑크톤 생물량을 나타내는 Chl-*a* 농도 및 입자 및 용물유기물을 나타내는 PP, DOP를 이용하여 추정한다. 여자만 북서해역의 꼬막어장은 수심이 낮고, 내만의 육상에 소형하천이지만 별교천 등을 통해 공급되는 영양염 등으로 높은 Chl-*a* 농도를 나타내어[40], 꼬막의 먹이량이 부족을 초래할 수준이 아니다. 그러나 동일 해역에서 입자유기탄소와 질소(POC, PON)을 분석한 결과에 의하면, 여자만 북서해역의 탄소원은 식물플랑크톤 생산에 의한 것보다, 퇴적층에서의 재부유되는 유기성 유기물 등 기타 원인에 의한 부분이 매우 큰 것으로 해석하였다[8]. 또한, 현미경 관찰에서도 여자만 북서해역은 침전유기물이 매우 높은 농도로 관찰되어 먹이자원에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

3.2 식물플랑크톤 군집

3.2.1 종조성

여자만 북서해역 꼬막어장에 출현한 식물플랑크톤 종은 30속 36종으로 단순하였다. 분류군별로는 규조류가 22속 26종으로 72.2%, 와편모조류가 6속 8종으로 22.2%, 유글레나조류 및 규질편모조류가 각 1속 1종으로 각 2.8%의 점유율을 나타내었다(Fig. 7). 그리고 이들 중에서 3 계절 모두 출현이 관찰된 종은 중심구조 *Skeletonema*

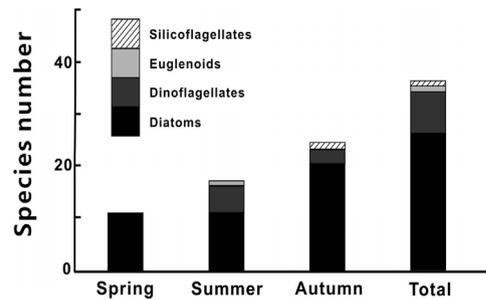


Fig. 7. Seasonal variation of phytoplankton species number and species composition.

coastatum-ls, 및 우상구조 *Nitzschia longissima*, *Pleurosigma normanii* 등 3종뿐이었다.

계절로는 봄에 10속 11종으로 100% 규조류가 점유하였고, 여름은 14속 17종으로 다소 다양하여, 규조류 10속 11종으로 67.7%의 점유율을, 와편모조류 3속 5종으로 27.4%, 그리고 유글레나조류 1속 1종으로 5.9%의 점유율을 나타내어, 편모조류가 일부 출현하였다. 그리고 가을은 20속 24종으로 가장 다양하여, 규조류가 17속 20종으로 83.3%, 와편모조류가 2속 3종으로 12.5%, 그리고 규질편모조류가 1속 1종으로 4.2%의 점유율을 보였다. 즉 여름을 제외하면 규조류에 의한 점유율이 매우 높았다[43](Fig. 7).

여자만 북서해역에 출현한 종은 우리나라 연안해역에 쉽게 관찰되는 종들로서, 연중 규조류가 다양하게 출현하면서 높은 점유율을 보이는 현상은 다른 연안해역과 유사하였다[40,47,48]. 그러나 출현종이 매우 단조로운 현상이나[49], 고수온기의 짧은 기간에 집중적인 출현을 보이는 와편모조류 출현이 관찰되지 않은 것은 다소 이례적라 할 수 있다[40,50,51]. 또한, 낮은 수심으로 표층 퇴적물이 재부유 등에 의해 부착성 규조가 다양하게 출현하는 특성도 보였다.

3.2.3. 현존량

세포 밀도로 표현된 식물플랑크톤 현존량은 가을 2.0 cells mL^{-1} 에서 봄 81.8 cells mL^{-1} 로 변화하여 봄에 높았고, 가을로 갈수록 감소하였다. 계절에 따른 현존량의 변화는 봄 3.0~45.2 cells mL^{-1} 범위에서 23.96 ± 15.5 cells mL^{-1} 변동 폭을, 여름은 9.6~34.6 cells mL^{-1} 범위에서 17.8 ± 8.85 cells mL^{-1} , 그리고 가을은 3.2~12.8 cells mL^{-1} 범위에서 8.2 ± 3.27 cells mL^{-1} 변동 폭을 나타내었다(Fig. 8).

식물플랑크톤 현존량의 시·공간분포는 봄에 북부 및

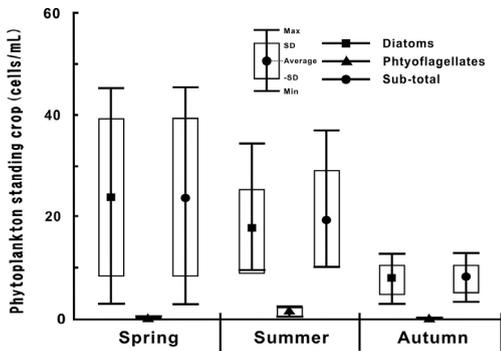


Fig. 8. Seasonal variations of phytoplankton cell density in the fishing grounds for blood cockle.

서부어장에서 10 cells mL⁻¹ 이하로 낮았으나, 동부 및 남부어장에서 30~40 cells mL⁻¹ 이상으로 높았다(Fig. 9A). 여름 서부어장에서 30 cells mL⁻¹ 이상으로 높았고, 남부어장 일부에서 20 cells mL⁻¹ 이상, 그리고 북부 및 동부어장은 20 cells mL⁻¹ 이하로 상대적 낮았다(Fig. 9B). 가을은 3계절에서 가장 낮은 현존량으로 북부 및 남부어장이 10 cells mL⁻¹ 이상으로 높았고, 동부어장이 5.0 cells mL⁻¹ 이하로 낮았지만, 서부어장은 5~10 cells mL⁻¹를 나타내었다(Fig. 9C). 여자만 북서해역의 식물플랑크톤 현존량은 매우 낮았으며[40,52], 계절 변화도 국내 내만해역에서 담수유입이 많은 여름에 높은 현존량을 보이는 것이나, 중위도 해역에서 봄과 가을에 규조류에 의한 대발생[53]도 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 낮은 수심으로 조석이나 바람 등 외력으로 표층퇴적물이 쉽게 재부유되어, 해수에 투과되는 광량이 제한되기 때문이다[54,55].

3.2.4 우점종

식물플랑크톤 군집에서 7개의 어장을 산술 평균하여 5% 이상 우점율을 나타내는 종을 우점종으로 정리하였다(Table 2). 해수혼합으로 영양염 공급을 받는 중위도 해역에서 식물플랑크톤 군집의 우점종은 빛, 수괴의 연직 안정도와 같은 물리적 인자와 영양염 농도와 경쟁에 의해 연직 혼합이 활발한 겨울은 규조류에 의해 우점되나, 영양염이 고갈되는 여름에는 와편모조류 등 식물성 편모조류로 우점종이 천이되는 것이 일반적이다[51,56]. 그러나 육상에서 영양염을 공급받거나, 부영양화가 진행된 연안해역은 규조류가 연중 우점하거나, 여름 등 고수온기에 일시적으로 와편모조류를 주로 하는 식물성 편모조류가 극우점한다[40]. 여자만 북서해역의 꼬막어장에서도 소형하천에서 영양염을 공급받고 있어, 연중 규조류가 우점하였다. 즉 봄은 *Skeletonema costatum*-ls가 우점율 60.6%로 극우점, *Nitzschia longissima*가 11.1%의 우점율로 차우점하였다. 여름은 우상규조 *Pleurosigma normanii*가 우점율 53.7%로 극우점하였고, 대형종 *Coscinodiscus gigas*가 7.7%로 차우점하였다. 그리고 가을은 *N. longissima* 및 *Pseudo-nitzschia pungens*가 각 33.2%와 25.1%의 우점율로 최우점 및 차우점하였고, 이외 *Chaetoceros curvisetus* 및 *Eucampia zodiacus*가 각 8.5% 및 5.4%의 우점율을 나타내었다(Table 2).

우점종에서 봄 우점한 *S. costatum*-ls는 비교적 부영양화된 연안 및 내만해역에서 어렵지 않게 관찰되는 부영양화 지표종이며[52], 가을 우점한 *N. longissima*와 *Pn. pungens* 역시 보편적이지는 않지만, 국내 연안/내만해역의 우점종으로 관찰된다. 다만 여름에 우점 출현한

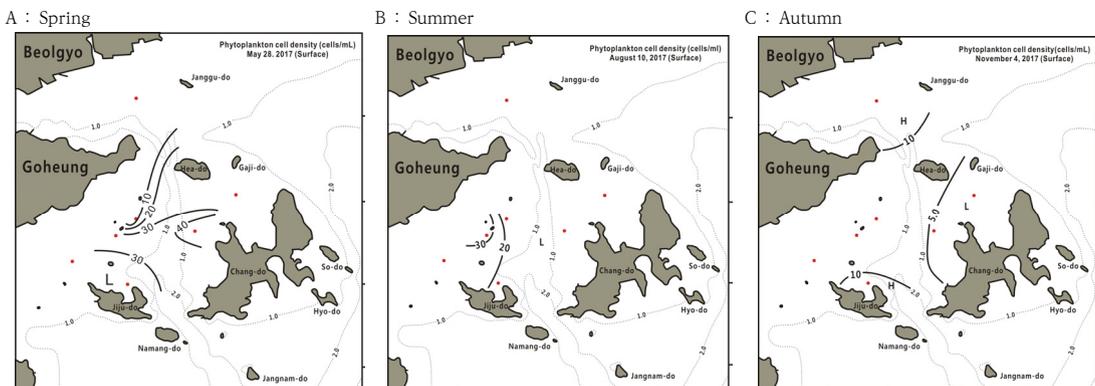


Fig. 9. Seasonal variations of spatio-temporal distributions of phytoplankton cell density in the fishing grounds for blood cockle.

Table 2. Seasonal variation of dominant species and dominance

Dominant species	Dominance (%)		
	Spring	Summer	Autumn
<i>Chaetoceros curvisetus</i>			8.5
<i>Coscinodiscus gigas</i>		7.7	
<i>Eucampia zodiacus</i>			5.4
<i>Nitzschi longissima</i>	11.1		33.2
<i>Pleurosigma normanii</i>		53.7	
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>			25.1
<i>Skeletonema costatum</i> -ls	60.6		

*P. normanii*는 대형의 저서성 구조로서 표영 환경에 우점하는 것은 매우 이례적이라 할 수 있다.

3.3 꼬막양식장의 식물플랑크톤 출현 특성

여자만 북서해역의 꼬막어장에서 계절별로 측정된 환경 인자를 이용하여 상관분석을 실시하였다. 봄 DOs는 수온보다 염분에 강한 양의 상관으로 염분에 지배되었으며[57], DIN, 인산염, 규산염 등 무기영양염은 염분에 강한 음의 상관을 보여, 육상으로부터 공급되는 것을 나타내었다[58,59]. DOP 및 SW는 수온과 강한 양의 상관을 보이나, 염분과 음의 상관을 보여, 해역에서 생산되는 부분보다 육상에서 유입되는 양에 지배되었다. 그리고 Chl-*a*, 우점종 *S. costatum*-ls 및 *N. longissima* 등 생물 인자는 공통적으로 수온, 염분, DOs 및 암모니아염에 양의 상관을 보였지만, Chl-*a*, *S. costatum*-ls 및 *N. longissima*는 규산염, 인산염 및 TP에 상반되는 경향으로 Chl-*a*는 양의 상관을, 두 우점종은 음의 상관을 보였

다. 특히 두 우점종과 Chl-*a* 사이에는 음의 상관을 보였다. 이러한 관계에서 두 우점종은 여자만 북서해역 꼬막어장의 식물플랑크톤 생물량에 기여 하는 부분은 약한 것으로 판단되었으며, 두 우점종은 DIN보다 인산염과 규산염 흡수가 활발할 뿐만 아니라 상대적으로 광합성 활성도 활발한 것[60]으로 판단되었다(Table 3).

여름은 수온과 염분, sigma t가 음의 상관을 보여, 담수 및 해수 혼합해역이 구분되었고[57], 봄과 같이 암모니아염, 질산염, DIN, 인산염, TP 등 대부분 영양염이 염분과 강한 음의 상관을 보이는 것에서 담수 유입에 기인함을 나타내었지만, DOP는 수온과 음의 상관으로 염분, Chl-*a*, 그리고 부착성 구조류인 *P. normanii*와 양의 상관을 보이는 것에서 식물플랑크톤 활성에 따른 생산이 큰 것으로 나타났다[59]. 또한 TP, PP 등은 수온 및 무기영양염과 양의 상관을 염분과 음의 상관을 나타내어, 육상에 기인하는 부분이 크며, SW는 무기영양염은 물론 Chl-*a* 및 우점종 *P. normanii*와 양의 상관을 PP 및 부유성 구조 *C. gigas*와 음의 관계를 나타내어 표층퇴적물의 재부유 영향이 크게 나타났다[58]. Chl-*a* 및 최우점종 *P. normanii*는 수온, 암모니아염, 인산염 및 PP와는 음의 상관을, DOP, SW와 양의 상관을 보여, 영양염 흡수에 의한 성장과 함께 표층퇴적물의 재부유 영향도 상대적으로 크며, 두 우점종 *P. normanii*와 *C. gigas*는 서로 음의 상관을 보였고, Chl-*a*에 대해서도 최우점종은 *P. normanii*는 양의 상관을, 최우점종 *C. gigas*는 음의 상관을 보여, 서식특성은 물론 Chl-*a*에 기여 하는 부분에도 차이를 보였다(Table 4 upper).

Table 3. Correlation matrix between marine environmental parameters and biological parameters in spring

	WT	Sal	σ_t	DOs	NH ₄	NO ₃	DIN	DIP	N/P	Si	Si/P	TP	PP	DOP	SW	Chl- <i>a</i>	SK	NL
WT	1																	
Sal		1																
σ_t			1															
DOs				1														
NH ₄					1													
NO ₃						1												
DIN							1											
DIP								1										
N/P									1									
Si										1								
Si/P											1							
TP												1						
PP													1					
DOP														1				
SW															1			
Chl- <i>a</i>																1		
SK																	1	
NL																		1

WT: water temperature, Sal: salinity, σ_t : sigma t, DOs: Saturation of Dissolved Oxygen, NH₄: Ammonia-Nitrogen(N), NO₃: Nitrate-N, DIN: Dissolved Inorganic N, DIP: Dissolved Inorganic Phosphorus(P), N/P: N/P atom ratio, Si: Silicate-Silicon, Si/P: Si/P atom ratio, TP: Total P, PP: Particulate P, DOP: Dissolved Organic P, SW: Seston Weight, Chl-*a*: Chlorophyll *a*, SK: *Skeletonema costatum*-ls, NL: *Nitzschia longissima*, PN: *Pleurosigma normanii*, CG: *Coscinodiscus gigas*, PP: *Pseudo-nitzschia pungens*, EZ: *Eucampia zodiacus* / The block represents p<0.005

Table 4. Correlation matrix between marine environmental parameters and biological parameters in summer (upper) and autumn (lower)

	WT	Sal	σ_t	DOs	NH ₄	NO ₃	DIN	DIP	N/P	Si	Si/P	TP	PP	DOP	SW	Chl- <i>a</i>	PN	CG		
WT	1	-.680	-.910	.153	.826	.115	.391	.825	-.377	-.016	-.312	.756	.819	-.770	-.245	-.708	-.698	.192		
Sal	.884	1	.921	-.403	-.827	-.741	-.868	-.739	.172	-.318	.201	-.868	-.408	.472	-.186	.094	.123	.431		
σ_t	-.669	-.870	1	-.334	-.915	-.479	-.699	-.859	.316	-.158	.301	-.886	-.656	.682	.008	.433	.413	.160		
DOs	-.166	.025	.192	1	.339	.333	.346	-.013	.292	-.183	.215	.226	-.049	.198	.192	-.173	.434	-.148		
NH ₄	.338	.351	.058	.558	1	.510	.747	.897	-.546	.363	-.526	.927	.428	-.652	.277	-.286	-.242	-.268		
NO ₃	-.035	-.091	-.241	-.896	-.514	1	.952	.338	-.190	.537	-.300	.542	-.265	-.003	.712	.495	.417	-.734		
DIN	.135	.097	-.304	-.765	-.137	.918	1	.587	-.345	.554	-.420	.752	-.041	-.243	.638	.280	.209	-.649		
DIP	-.026	-.342	.299	-.617	-.040	.643	.685	1	-.649	.308	-.595	.864	.609	-.884	.061	-.303	-.429	-.294		
N/P	.247	.623	-.775	.097	-.072	.026	.058	-.679	1	-.236	.985	-.344	-.113	.607	-.438	.066	.134	.330		
Si	-.304	-.416	.345	-.449	-.085	.503	.487	.708	-.565	1	-.216	.565	-.393	.086	.601	.637	.148	-.369		
Si/P	-.252	.073	-.095	.382	-.013	-.340	-.403	-.600	.327	.134	1	-.304	-.026	.604	-.536	-.007	.010	.427		
TP	-.035	-.378	.255	-.791	-.355	.725	.636	.933	-.642	.671	-.560	1	.402	-.545	.198	-.121	-.287	-.257		
PP	.231	-.104	.355	.121	-.021	-.486	-.603	.002	-.575	-.114	-.131	.134	1	-.778	-.711	-.820	-.808	.326		
DOP	-.109	-.309	.006	-.914	-.800	.814	.553	.563	-.236	.459	-.299	.806	.033	1	.229	.522	.569	.139		
SW	-.004	-.250	.126	-.917	-.470	.764	.641	.619	-.249	.422	-.455	.774	-.034	.845	1	.653	.661	-.632		
Chl- <i>a</i>	.308	-.102	.128	-.730	-.208	.521	.486	.722	-.465	.186	-.829	.808	.310	.647	.798	1	.698	-.626		
PN/NL	-.216	-.512	.393	-.378	-.153	.477	.456	.867	-.679	.429	-.721	.807	.070	.463	.391	.629	1	-.640		
CG/PP	-.355	-.020	.050	.640	.369	-.406	-.302	-.391	.170	.201	.807	-.556	-.325	-.595	-.695	-.903	-.417	1		
CC	-.257	-.225	.230	.382	-.018	-.345	-.376	-.378	.192	-.746	-.361	-.383	.010	-.291	-.163	-.015	-.008	-.268	1	
EZ	-.252	-.20	.233	.392	-.001	-.355	-.379	-.380	.191	-.747	-.360	-.390	.009	-.305	-.171	-.020	-.012	-.260	1.000	1
	WT	Sal	σ_t	DOs	NH ₄	NO ₃	DIN	DIP	N/P	Si	Si/P	TP	PP	DOP	SW	Chl- <i>a</i>	NL	PP	CC	EZ

가을은 무기영양염이 염분과 양의 상관 또는 매우 약한 음의 상관을 보이지만, SW, Chl-*a*와 양의 상관을 보였고[58], DOs도 무기영양염 및 SW, Chl-*a* 등과 음의 상관을 보이는 것에서 외부 유입보다, 해양자체의 유기물 분해에 의한 재생산을 나타내었다[60]. 우점종과 무기영양염 및 Chl-*a* 사이에도 최우점종인 *N. longissima*는 양의 상관을, 기타 우점종인 *Ph. pungens*, *Ch. curvisetus*, *E. zodiacus*는 음의 관계를 보이는 것에서 최우점종 *N. longissima*는 Chl-*a*에 밀접하게 관련되지만, 성장곡선에서 쇠퇴기에 접어든 것으로 보였다. 기타 우점종은 전체 식물플랑크톤 생물량에 기여하는 부분은 작지만, 성장곡선에서 성정 초기에 위치하는 것[59]으로 해석되었다 (Table 4 lower).

봄 무생물환경 인자와 생물환경 인자를 이용하여 누적 기여율 70%를 기준으로 계산된 주성분분석 결과[34,48]는 $Z = 9.755Z_1 + 6.266Z_2 + 3.159Z_3$ 으로 제3 주성분까지의 누적 기여율은 83.3%를 나타내었다(Table 5). 그러나 제2 주성분까지 누적 기여율이 69.6%를 보이기에 해석은 제2 주성분까지 실시하였다.

Table 5. Eigen value, eigen vector and proportion by principal component analysis

Seasons	PC	Eigenvalue	Proportion (%)	Accumulative proportion(%)
Spring	1st	9.755	42.4	42.4
	2nd	6.266	27.2	69.6
	3rd	3.159	13.7	83.3
Summer	1st	9.541	41.5	41.5
	2nd	6.694	29.1	70.6
	3rd	3.193	13.9	84.5
Autumn	1st	10.88	43.5	43.5
	2nd	4.941	19.8	63.3
	3rd	3.463	13.9	77.2

PC: principal component

인자부하량에서 제1 주성분은 질산염, 아질산염, DIN, SW, DTP, DOP, 규산염, 수온 등에 강한 양의 관계를, 염분, sigma t, 암모니아염 등에 강한 음의 관계를 보여, 수온상승기 육상에서 담수 유입 및 혼합 정도를 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 우점종 *S. costatum*-ls, *N. longissima*, DO, DOs, 염분, sigma t, 암모니아염 등에 강한 양의 관계를, 그리고 탁도 및 인산 관련 항목에 약한 음의 관계를 보이고 있어 비교적 해

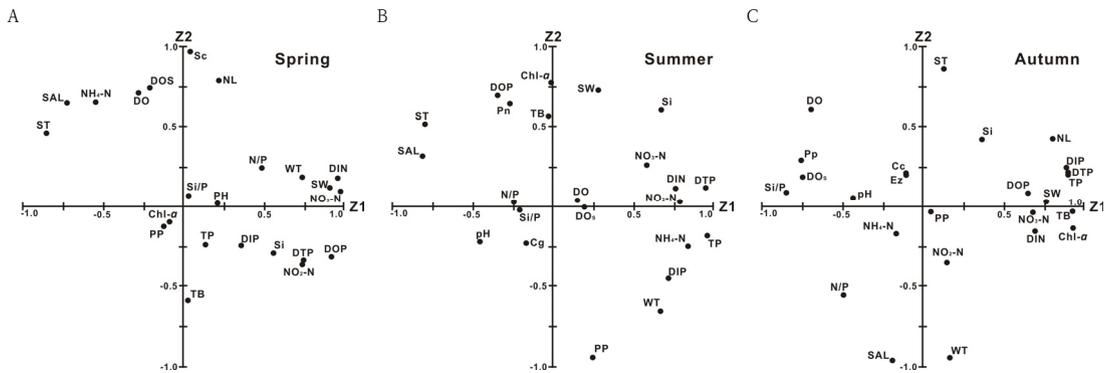


Fig. 10. Seasonal variations of loading factor by PCA(principal component analysis).

수 영향이 강한 해역의 식물플랑크톤 활성도를 나타내는 지표로 해석되었다(Fig. 10A). 즉 봄 여자만 꼬막어장은 담수 유입 및 혼합의 영향이 강하고, 식물플랑크톤은 상대적으로 해수혼합이 강한 해역에서 인산염을 이용하여 광합성 활성을 활발하게 진행하는 것으로 판단되었다.

즉, 봄 여자만 꼬막 양식장에서 암모니아를 제외한 영양염은 육상에서 공급되고 있으며, 암모니아염은 해역에서 유기물 분해로 재생산되는 것으로 나타났다.

여름은 $Z = 9.541Z_1 + 6.694Z_2$ 로 제2 성분까지 누적 기여율은 70.6%를 나타내었다[34](Table 5). 인자부하량 분포에서 제1 주성분은 봄과 유사하여 TP, DTP, DIN, DIP, 암모니아염, 아질산염, 질산염 및 규산염 등에 강한 양의 관계를 보였고, 염분 및 sigma t에 강한 음의 관계를 보이는 것으로 육상에서 담수 유입 및 혼합 정도를 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 Chl-a, DOP, SW, 규산염, 탁도, sigma t, 우점종 *P. normanii* 등에 강한 양의 관계를 보였고, PP, 수온에 강한 음의 관계를, 그리고 인산염과 약한 음의 관계를 보이고 있어, 표층퇴적물의 재부유 정도를 나타내는 지표로 해석되었다(Fig. 10B). 즉 여름은 봄과 같이 담수 유입 및 혼합에 의해 대부분 영양염이 공급되고 있으며, 담수 유입해역은 낮은 수심으로 일사량에 의해 높은 수온을 보이지만, 해수혼합이 상대적으로 강한 해역에서 바람이나 조석에 의해 표층퇴적물의 재부유하여, 높은 식물플랑크톤 생물량 및 부착 규조류 현존량을 나타내는 것으로 해석되었다.

가을은 $Z = 10.88Z_1 + 4.941Z_2 + 3.463Z_3$ 으로 제3 주 성분까지의 누적기여율이 77.2%를 나타내었다(Table 5).

그러나 제2 주성분까지 누적기여율이 63.3%를 보여, 해역의 설명은 제2 주성분까지로 하였다[34]. 인자부하량 분포에서 제1 주성분은 TP, DTP, DIP, SW, DOP,

Chl-a, 탁도, DIN, 질산염, 최우점종, *N. longissima* 등에 강한 양의 관계를 보였고, Si/P ratio, DO, DOs, N/P ratio, 차우점종 *Pn. pungens* 등에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 유기물 분해에 의한 무기화 과정을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 우점종 sigma t, DO 등에 강한 양의 관계를 보이며, 수온, 염분 등에 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 낮은 수온 및 염분에 의한 고밀도수인 해수 혼합 특성을 나타내는 지표로 해석되었다(Fig. 10C). 즉 가을은 유기물 분해에 의한 무기화 과정 및 유입되는 해수에 의해 여자만 북서해역의 환경이 결정되는 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 여자만 북서해역 꼬막어장의 수질 및 생물해양학 특성은 계절에 따라 다소 차이는 있지만, 육상의 담수에 의한 물질공급, 낮은 수심으로 표층퇴적물의 재부유, 그리고 해역 자체의 재생산과 무기화 과정의 균형 등에 의해 결정되는 것으로 판단되었다. 따라서 꼬막어장의 대량폐사 규명 등 효율적인 어장이용 및 관리, 그리고 해역의 이용 및 환경보전을 위해서는 이러한 수질 및 해양생태계의 저차영양단계의 생산 특성을 기반으로 하는 관리 및 보전대책이 수립되어야만 할 것으로 판단되었다.

References

- [1] J. H. Ryther, "Photosynthesis and fish production in the sea," Science, vol. 166, no. 3901, pp. 72-76. Oct. 1969. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.166.3901.72>
- [2] C. J. Hopkinson and E. M. Smith, Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic and whole system respiration, In: "P.A. del Giorgio and P.J.

- le B. Williams (eds), *Respiration in Aquatic Ecosystems.*, Oxford Univ. Press, New York," pp. 122-146, 2005.
- [3] J. E. Cloern, S. Q. Foster¹ and A. E. Kleckne, "Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems," *Biogeosci.*, vol. 11, pp. 2477-2501, May 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-11-2477-2014>
- [4] T. Hoshiai, "Synecological study on the intertidal zonation of the Asamushi coastal area with special reference to its reformation," *Bul. Mar. Biol. Stn Asamushi, Tohoku Univ.*, vol. 12, pp. 93-126, 1964.
- [5] D. S. McLusky, "Marine and estuarine gradients -An overview-", *Netherlands J. Aquat. Ecol.*, vol. 27, no. 2-4, pp. 489-493, June 1993.
- [6] J. E. Cloern, "Why large cells dominate estuarine phytoplankton," *Limnol. Oceanogr.*, vol. 63, no. S1, pp. S392-S409, Nov. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.10749>
- [7] Y. H. Yoon, "Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the estuarine of Seomjin River and Sueo Stream(ESRaSS)," *Sci. Fish. Oceanogr.*, vol. 28, no. 1, pp. 58-69, Feb. 2019.
- [8] Y. H. Yoon, "A characteristics of marine environments in a blood cockle farm of the northwestern Yeolja Bay, Korea. 1. Spatio-temporal distributions of chlorophyll *a* concentration, particulate organic carbon & nitrogen," *J. Korea Aca.-Indus. coop. Soc.*, vol. 20, no. 7 pp. 299-309, July 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.7.299>
- [9] P. C. Liang, "Large scale mortality of cockle in Province Wellesley, Malays," *Agric. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 51-57, 1979.
- [10] M. J. Broom, "Mortality and production in natural, artificially seeded and experimental populations of *Anadara granosa* (L.) (Bivalvia: Arcidae)," *Oecologia* (Berlin), vol. 58, no. 3, pp. 389-397, 1983.
- [11] M. J. Broom, "The Biology and Culture of Marine Bivalve Molluscs of Genus *Anadara*," *ICLARM Studies and Reviews 12*, ICLARM (International Center for Living Aquatic Resources Management), Manila, pp. 1-37, 1985.
- [12] T. Yurimoto, F. M. Kassim, R. Fuseya and A. Man, "Mass mortality event of the blood cockle, *Anadara granosa*, in aquaculture ground along Selangor coast, Peninsular Malaysia," *Int'l Aquat. Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 1-10, Sept. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40071-014-0077-3>
- [13] H. C. Kim, W. C Lee, J. G. Kim, S. J., Hong, K. M. Kim, Y. S. Cho, S. E. Park and J. H Kim, "Assessment of permissible inflow load for water quality management in Yeolja Bay, Korea," *J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety*, vol. 17, no. 4, pp. 345-356, Dec. 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.4.345>
- [14] S. Y. Park, S. S. Kim, P. J., Kim, E. S. Cho, M. B. Kim, S. B. Jeon and S. J. Jang, "Long-term variation and characteristics of water quality in the Yeolja Bay of South Sea, Korea," *J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety*, vol. 17, no. 3, pp. 203-218, Sept. 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.3.203>
- [15] M. Choi, L. S. Lee, H. C. Kim and D. W. Hwang, "Distribution and contamination status of trace metals in surface sediments of shellfish farming areas in Yeolja and Gangjin Bays, Korea," *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 48, no. 5, pp. 789-797, Oct. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0789>
- [16] J. H. Shim, "Biological oceanography of Gamagyang Bay-the Yeolja Bay water system (1)," *J. Oceanol. Soc. Korea*, vol. 15, no. 2, pp. 89-99, June 1980.
- [17] J. H. Lee and S.M. Yoon, "Water quality and phytoplankton communities in Yeolja Bay of Korea," *Algae*, vol. 15, no. 2, pp. 89-98, Jan. 2000.
- [18] H. H. Shin, K. Mizushima, S. J. Oh, J. S. Park, I. H. Noh, M. Iwataki, K. Matsuoka and Y. H. Yoon, "Reconstruction of historical nutrient levels in Korean and Japanese coastal areas based on dinoflagellate cyst assemblages," *Mar. Poll. Bull.*, vol. 60, no. 8, pp. 1243-1258, Aug. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.019>
- [19] H. H. Shin, K. Matsuoka, Y. H. Yoon and Y. O. Kim, "Response of dinoflagellate cyst assemblages to salinity changes in Yeolja Bay, Korea," *Mar. Micropaleon.*, vol. 77, no. 1-2, pp. 15-24, Oct. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2010.07.001>
- [20] D. Lim, S. W. Jung, J. K. Park and D. H. Jeong, "Seasonal changes in water masses and phytoplankton communities in the western part of south coastal waters, Korea," *Korean J. Environ. Biol.*, vol. 30, no. 4, pp. 328-338, Dec. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2012.30.4.328>
- [21] G. W. Baeck, T. Takita and Y. H. Yoon, "Lifestyle of Korean mudskipper *Periophthalmus magnuspinnatus* with reference to a congeneric species, *Periophthalmus modestus*," *Ichth. Res.*, vol. 54, no. 1, pp. 43-52, Feb. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10228-007-0009-y>
- [22] J. W. Kim, Y. H. Yoon, H. C. Shin, T. Takita, J. H. Kim, S. C. Park, C. I. Park and G. W. Baeck, "Reproduction of the goby fish *Periophthalmus magnuspinnatus* in mud flat of Suncheon Bay, Korea," *J. Korean Fish. Soc.*, vol. 41, no. 4, pp. 289-293, Aug. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2008.41.4.289>
- [23] Y. K. Shin, T. S. Moon and C. H. Wi, "Effects of the dissolved oxygen concentration on the physiology of the Manila clam, *Tegillarca granosa* (Linnaeus)," *J. Korean Fish. Soc.*, vol. 35, no. 5, pp. 485-489, Sept. 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2002.35.5.485>
- [24] T.-S. Moon, M.-M. Jung, M.-H. Yang, C. Wi¹, J.-H. Lee, Y.-S. Shin, Y.-K. Shin and Y.-J. Chang, "Spats appearance and distribution of blood cockle, *Tegillarca granosa* in each tidal time and line," *J.*

- Aquacul.. vol. 19, no. 2, pp. 119-124, June 2006.
- [25] T.-S. Moon and Y.-K. Shin, "Effect of salinity on survival and metabolism of ark shell, *Tegillarca granosa*". Korean J. Malacol. vol. 26, no. 3, pp. 171-177, Sept. 2010.
- [26] Y. H. Yoon. The marine environments and its activation plan in Yeosu Bay. In: "Y.H. Yoon, W.J Cho, H.J. Kim and J. Kim (eds). The Marine Environments, Ecosystem Services Value, and Its Utilization and Coservations in Yeosu Bay. Bummin Cultur Foundation, Yeosu". pp. 7-57, 2019.
- [27] Ministry of Ocean and Fisheries. Official Testing Method with Respect to Sea Water Process In "Official Testing Method with Respect to Marine Environments Process", pp. 1-247, Dec. 2018.
- [28] The Oceanographic. Society of Japan, "A Manual for Coastal Environmental Survey (Sediments and Biology)," Kouseisha- kouseikaku, Tokyo. pp.1-280, 2008.
- [29] E. E. Cupp, "Marine plankton diatoms of the west coast of north America," Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. of California, vol. 5, pp. 1-237. 1943.
- [30] M. Chihara and M. Murano, "An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan," Tokai Univ. Press, Tokyo. pp. 1-1547, 1997.
- [31] C. R. Tomas, "Identifying marine diatoms and dinoflagellates," Academic Press. Oxford, pp. 1-858, 1997.
- [32] G. M. Hallegraeff, C. J. S. Bolch, D. R. A. Hill, I. Jameson, J. M. LeRoi, A. McMinn, S., Murray, M. F. de Salas and K. Saunders, "Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters," CSIRO Publ., Cambella, pp. 1-432. 2010.
- [33] T. Omura, M. Iwataki, V .M. Borja, H. Takayama and Y. Fukuyo, "Marine Phytoplankton of the Western Pacific," Kouseisha Kouseikaku. Tokyo. pp. 1-160, 2012
- [34] Y. H. Yoon. "Environmental Analysis of Phytoplankton growth in the Inland Sea of Japan with special reference to the occurrence of red tide," Ph.D Thesis, Hiroshima Univ., Japan, Hiroshima, pp. 1-361, 1989.
- [35] B. Bayn, "The responses of three species of bivalve mollusc to declining oxygen tension at reduced salinity," Comp. Biochem. Physiol. Part A, vol. 45, no. 3, pp. 793-806, July 1973.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(73\)90082-0](https://doi.org/10.1016/0300-9629(73)90082-0)
- [36] M. Sato, " Richness of Ariake Sea in Kyushu, Japan and its crisis bu human impacts," Saga Nat. Study, vol. 10, pp. 129-149. 2004.
- [37] M. Kawase, "Threatttened marine and brackish shells of the estuary of the Yahagi river," Bull. Yahagi Riv. Res., vol. 10, no. 101, pp. 75-84. Oct. 2006.
- [38] K. Okamura, K. Tanaka, K. Kimoto, T. Fujita, Y. Mori and Y. Kiyomoto, "Effects of oxygen deficient water and properties of surface sediments on the mass mortalities of the ark shell (*Scapharca kagoshimensis*) in the northwestern part of Ariake Bay," Bull. Japanese Soc. Fish. Oceanogr., vol. 74, no. 4, pp. 197-207, Nov. 2010.
DOI: <https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/3020133699>
- [39] H. Nakamuta, H. Fujisaki and K. Yoshida, "Abnormal mortality of the ark shell, *Scapharca kagoshimensis* occurred from the autumn to winter in 2011," Bull. Saga Pref. Ariake Fish. Res. Dev. Cent., vol. 26, pp. 33-48, Jan. 2013.
- [40] Y. H. Yoon, Marine environments and phytoplankton in the South-western Sea of Korea. In: "C. K. Choi (ed)., The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters. Donghwa Publ.. Seoul". pp. 68-93, 2011.
- [41] V.H. Smith, G.D. Tilman, J.C. Nekola, "Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems," Environmental Pollution, vol. 100, no. 1-3, pp. 179-196, 1999
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
- [42] A. C. Redfield, B. H. Ketchum and F. A. Richards. The influence of organisms on the composition of seawater, In "M. N. Hill(ed), The Sea Vol. 2," Interscience, New York," pp. 26-77, 1963
- [43] E. V. Dafner, R. Boscolo and H. L. Bryden, "The N:Si:P molar ratio in the Strait of Gibraltar," Geophysical Res. Lett., vol. 30, no. 10, pp. 1-4, May 2003
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2002GL016274>
- [44] L. A. Anderson and J. L. Sarmiento, "Redfield ratios of remineralization determined by nutrient data analysis," Global Biogeochem. Cycles, vol. 8, no. 1, pp. 65-80, Mar. 1994
DOI: <https://doi.org/10.1029/93GB03318>
- [45] P. J. Cranford, J. E. Ward and S. E. Shumway, Bivalve filter feeding: variability and limits of the aquaculture biofilter. In: "S. Shumway (ed.) Shellfish Aquaculture and the Environment,. Wiley-Blackwell, New Jersey," pp. 81-124, 2011.
- [46] J. A. Berg and R. I .E. Newell. "Temporal and spatial variations in the composition of seston available to the suspension feeder *Crassostrea virginica*," Est. Coast. Mar. Sci., vol. 23, no. 3, pp. 375-386, Sept. 1986.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(86\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0272-7714(86)90034-X)
- [47] Y. H. Yoon, "Spatio-temporal Variability of Phytoplankton Community in the Jeju Marine Ranching Area (JMRA)," J. Korea Aca.-Indus. coop. Soc., vol. 16, no. 11, pp. 7761-7772, Nov. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7761>
- [48] Y. H. Yoon, "Bio-environmental characteristics of the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community," J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, vol. 19, no. 1, pp. 37-46, Feb. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2016.19.1.37>

[49] Y. H. Yoon, "Spatio-temporal distribution of phytoplankton community in the Jangsu bay and adjoining sea of South Sea, Korea," *Korean J. Environ. Biol.*, vol. 32, no. 1, pp. 75-87, Mar. 2014.
DOI : <https://doi.org/10.11626/KJEB.2014.32.1.075>

[50] Y. H. Yoon, "Seasonal dynamics of phytoplankton community and red tide organisms in the northern Kamak bay, Southern Korea," *Bull. Mar. Sci. Inst., Yeosu Nat'l Fish. Univ.*, vol. 4, pp. 1-15, Dec. 1995.

[51] Y. H. Yoon, H. G. Rho and Y. K. Kim, "Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamdok port, Northern Cheju Island," *Bull. Mar. Sci. Inst., Cheju Nat'l Univ.*, vol. 16, pp. 27-42, Dec. 1992

[52] S. Iizuka, "The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan," *Bull. Plankton Soc. Japan*, vol. 32, no. 1, pp. 67-72, July. 1985.

[53] O. Muñiz, J. G. Rodríguez, M. Revilla, A. Laza-Martínez, S. Seoane and J. Franco, "Seasonal variations of phytoplankton community in relation to environmental factors in an oligotrophic area of the European Atlantic coast (southeastern Bay of Biscay)," *Reg. Studies Mar. Sci.*, vol. 17, pp. 59-72, Jan. 2018.
DOI: <https://10.1016/j.rsma.2017.11.011>

[54] K. F. Edwards, M. K. Thomas, C. A. Klausmeier and E. Litchman, "Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: A synthesis at the species and community level," *Limnol. Oceanogr.* vol. 61, no. 4, pp. 1232-1244, July 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/lno.10282>

[55] R. J. Geider, H. L. MacIntyre and T. M. Kana, "Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a:carbon ratio to light, nutrient-limitation and temperature," *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 148, no. 1, pp. 187-200, Mar. 1997.
<https://www.jstor.org/stable/24857483>

[56] T. R. Parsons, M. Takahashi and B. Hargrave, "Biological oceanographic processes (3rd ed.)," Pergamon Press, Oxford, pp. 1-330. 1984.

[57] H. U. Sverdrup, M. W. Johnson and R. H. Fleming, "The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology," Prentice-Hall, Inc., New York, pp. 1-1087, 1942.
<http://ark.cdlib.org/ark:/13030/kt167nb66r/>

[58] K.R. Arrigo, "Marine microorganisms and global nutrient cycles," *Nature*, vol. 437, no. 7057, pp. 349-355, Sept. 2005,
DOI <http://dx.doi.org/10.1038/nature04158>

[59] Z. Shi, J. Xu, X. Huang, X. Zhang, Z. Jiang, F. Ye, X. Liang, "Relationship between nutrients and plankton biomass in the turbidity maximum zone of the Pearl River Estuary," *J. Environ. Sci.*, vol. 57, pp. 72-84, July 2017,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.11.013>

[60] J. E. G. Raymont, Factors limiting primary production: nutrients. In "Plankton and Productivity in the Oceans. Vol. 1. Phytoplankton (2nd eds)," Elsevier, Oxford, pp. 297-345, 1980.

윤 양 호(Yang Ho Yoon)

[정회원]



- 1986년 3월 : Nagasaki Univ. 대학원 수산학연구과 (수산학석사)
- 1989년 3월 : Hiroshima Univ. 대학원 생물권과학연구과 (학술박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 해양융합과학과 교수

<관심분야>

연안환경생태, 적조생태, 해양환경복원, 어장환경

이 현 지(Hyeon Ji Lee)

[준회원]



- 2019년 2월 : 전남대학교 해양기술학부 (이학사)
- 2019년 3월 : 전남대학교 대학원 환경해양학과 석사과정

<관심분야>

해양환경, 식물플랑크톤 생태