

고군산군도 해역의 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 및 출현 환경특성

윤양호*

¹전남대학교 해양기술학부

Spatio-temporal Distributions of Phytoplankton Community in the Coastal Waters of Gogunsan Islands(CoWGs), West Sea of Korea

Yang Ho Yoon*

¹Faculty of Marine Technology, Chonnam National University

요약 서해 새만금 방조제에 인접하는 고군산군도 해역에서 2011년 4회 계절별 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포특성 파악을 위한 현장조사를 실시하였다. 출현한 식물플랑크톤은 56속 104종으로 다양하였으나 기존 서해해역의 출현 종수에 비해 낮았다. 분류군별은 규조류가 60.5%, 와편모조류가 34.6%로 규조류 점유율이 높았다. 현존량은 가을 9.6×10^4 cells/L에서 겨울 1.0×10^7 cells/L의 범위로 큰 변동 폭과 값으로 겨울과 여름에 높고, 봄과 가을에 낮았다. 우점종은 겨울 *Skeletonema costatum*-like species, *Thalassiosira nordenskioldii*, *Dactyliosolen fragillissimus*, *Chaetoceros debilis*, 봄 *Guinardia delicatula*, 여름 *Eucampia zodiacus*, *Cylindrotheca closterium*, *Ch. debilis*, *Ch. curvisetus*, 그리고 가을 *S. costatum*-like species, *Ch. debilis*, *Ch. curvisetus*, *G. delicatula*, *Leptocylindrus danicus*로 가을과 겨울을 제외하면 계절적 변화가 분명하였다. 또한 서해의 토착 및 일시성 부유종은 39종으로 1980년에 비해 1/3로 감소하였다. Chl-*a* 농도는 가을 $3.82 \mu\text{g/L}$ 에서 여름 $13.36 \mu\text{g/L}$ 로 변화하였고, 최대는 여름 $44.24 \mu\text{g/L}$ 로 1980년대 서해 최대 $5.0 \mu\text{g/L}$ 에 비하면 9배 가까운 증가를 나타내었다. 다만 Chl-*a* 농도와 세포밀도의 계절변화 사이에 유의적 관련성은 발견되지 않았다. 주성분분석에 의한 고군산군도 해역의 생물해양학적 특성은 고수온기에는 새만금 수괴, 저수온기에는 금강 수괴에 지배되었고, 중심목과 우상목 규조류의 출현 환경은 서로 다르게 나타났다. 즉 고군산군도 해역은 새만금 방조제 완공 이후 급격하게 부영양화가 진행되어, 현재 내만성 환경으로 진행되어 있는 것으로 판단되었다.

Abstract This study examined the spatio-temporal distributions of the phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands (CoWGs), West Sea of Korea, from January to September 2011. A total of 104 species of phytoplankton belonging to 56 genera were identified. This was low compared to the surrounding seas of the West Sea. In particular, diatoms and dinoflagellates comprised 60.5% and 34.6%, respectively, and it was most diverse in autumn. The standing crops fluctuated from 9.6×10^4 cells/L to 1.0×10^7 cells/L.

This was high in winter and summer and low in spring and autumn. The seasonal dominant species were *Skeletonema costatum*-like species, *Thalassiosira nordenskioldii*, *Dactyliosolen fragillissimus*, and *Chaetoceros debilis* in winter, *Guinardia delicatula* in spring, *Eucampia zodiacus*, *Cylindrotheca closterium*, *Ch. debilis*, and *Ch. curvisetus* in summer, and *S. costatum*-like species, *Ch. debilis*, *Ch. curvisetus*, *G. delicatula*, and *Leptocylindrus danicus* in autumn. The total number of autochthonous and tychopelagic species was 39 species. This showed a 1/3 (33.3%) decrease compared to the 1980's. The chlorophyll *a* concentration fluctuated from $3.82 \mu\text{g/L}$ in autumn to $13.36 \mu\text{g/L}$ in summer. The bio-oceanographic characteristics of the CoWGs based on principle component analysis (PCA) showed that it was dominated by the Saemangeum water mass in the high temperature season and by the Geum River water mass in the low temperature season. In other words, there has been a conversion to a closed inner bay followed by the dramatic progress of eutrophication, even in the CoWGs after completion of the Saemangeum embankment.

Key Words : chlorophyll *a*, coastal waters of Gogunsan Islands(CoWGs), PCA, phytoplankton community, spatio-temporal distribution

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2013005394) 결과이다.

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

Tel: +82-10-6644-1229 email: yoonyh@jnu.ac.kr

Received October 28, 2014

Revised December 2, 2014

Accepted March 12, 2015

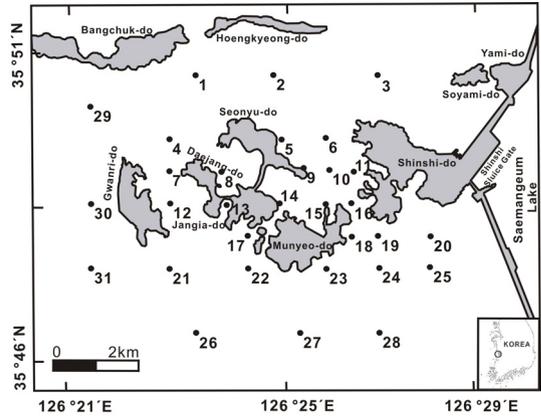
Published March 31, 2015

1. 서론

연안해역의 식물플랑크톤 군집은 기초생산자로 빛 에너지 합성을 통해 해양생태계 물질순환의 기반이 되는 생물군이다. 하지만 인간활동에 의한 생활하수와 산업폐수 등으로 부영양화가 진행된 연안 및 내만해역에서는 다양한 자극과 증식물질에 의해 단시간에 식물플랑크톤을 이상 발생시켜 적조와 같이 심각한 환경문제를 발생시키기도 한다[1]. 즉 식물플랑크톤은 다양한 외부의 해양환경변화에 민감하게 반응하는 인자로서[2] 해양생태계 구조해석과 해양환경의 변화 해석을 파악하는 중요한 수단으로 널리 이용되고 있다[3].

고군산군도는 군산시에서 남서쪽으로 약 50 km 떨어진 해상에 무녀도, 선유도, 신시도 등 63개의 섬으로 구성된 고립된 도서였지만, 1991년 11월 시작하여 19년의 공사 끝에 2010년 4월 군산시와 고군산군도 및 부안시를 연결하는 33.9 km의 새만금 방조제가 완성된 다음에는 일부 섬들은 육지와 연결되는 등 급격한 환경변화가 발생하는 해역이다. 약 20여년의 새만금 간척공사로 인하여 새만금 해역을 대상으로 하는 다양한 해양관련 연구가 수행되었으나 논문으로 발표된 내용은 제한적이다. 주요 내용은 식물플랑크톤 군집과 적조 관련 연구[4-10], 어류플랑크톤[11], 저서성 미세조류 및 저서동물 군집[12-14], 해조류[15] 그리고 어류, 패류 및 갑각류 등의 자원생물[16, 17] 등에 관한 연구들이다. 한편 고군산군도를 포함하는 인근해역에 대해서도 인공위성을 이용한 방조제 건설공사에 따른 갯벌변화[18], 방조제에 의한 내부 및 외해수의 혼합[19], 퇴적물의 규질편모조류 및 와편모조류 시스템 관한 연구[20-22], 해조류 군집 조사[23], 어류, 패류 및 갑각류에 대한 수산자원에 관한 연구[24-26] 및 현생 퇴적물의 분포 및 지화학적 연구[27, 28] 등의 연구결과가 있다. 그러나 고군산군도 해역에 대한 식물플랑크톤 군집과 관련된 연구는 방조제 건설에 따른 내부 저수지와 외부해역의 식물플랑크톤 군집 비교[29], 신시도 배수갑문 주변에 한정된 적조 및 종속편모조류에 관한 연구[5, 6]가 있을 뿐, 고군산군도 전체 해역을 대상으로 한 결과는 아직 없다. 다만 고군산군도 북쪽에 위치하는 금강하구역과 군산 연안을 대상으로 한 식물플랑크톤 군집 관련 연구는 다수 보고된다[30-32].

따라서 이 논문은 새만금방조제 및 연육, 연도교 건설 등 인간활동으로 급격한 변화가 있을 뿐만 아니라, 배수



[Fig. 1] Map show to sampling stations in the CoWGIS of West Sea of Korea.

관문에 의해 새만금 저수지 방류 등으로 해양환경 및 식물플랑크톤 군집에 큰 변화를 보이는 고군산군도 해역을 대상으로 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변화 및 생물해양학적 환경특성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

고군산군도 해역에서 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 및 생물해양학적 환경특성을 파악하기 위하여 2011년 1월(겨울), 4월(봄), 7월(여름) 및 10월(가을) 총 4회에 걸쳐 고군산군도 해역에 31개 정점을 선정하여 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 조사는 현지 사정을 잘 파악하고 있는 소형어선을 용선하여 이용하였다. 그리고 정점은 휴대용 GPS 또는 선박용 플로터에 의해 확인하였다.

식물플랑크톤 군집파악을 위한 표본은 표층해수 500 mL를 플라스틱 표본병에 채수하여 미리 준비한 중성포르마린으로 실제 최종농도가 0.4%가 되도록 고정하였다[33]. 고정된 해수표본은 실험실에서 해수 중 플랑크톤이 충분히 침전할 수 있도록 최소 48시간 이상 정치시키는 과정을 3-4회 반복하여 최종농도가 5.0 mL가 되도록 농축하여 검경시료로 제공하였다. 현미경관찰은 검경시료 0.1 mL를 계수판에 위해 광학현미경(Olympus, BX 50)의 기계대에서 100X-400X 배율을 이용하여 종의 동정과 출현세포수를 계수하였다. 식물 플랑크톤 종 동정은 최근의 분류관련 문헌[34-37] 등을 참고하였고 분류

체계는 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)에 준하여 정리하였다.

해역의 잠재적 생물생산성을 파악하기 위한 엽록소 *a* (Chlorophyll *a*)에 의한 식물플랑크톤 생물량은 각 정점의 표층해수 500 mL를 채수하여 박막여과지(pore size; 0.45 μm , diameter; 47 mm)가 장착된 플라스틱 여과장치를 이용하여 흡인 여과시켜 식물플랑크톤을 포집하였다. 필터에 포집된 생물은 90%의 아세톤을 용매로 색소를 추출하였다. 색소가 추출된 혼합용액은 원심분리기(3,000 rpm, 15 min.)를 이용하여 불순물을 분리시킨 다음 상등액을 이용하여 분광광도계(Mecasys Co. Ltd., Optizen 2120UV)에서 복수의 파장에 대한 흡광도를 측정하였다. 측정된 복수파장의 흡광도는 보정 이후 경험식에 의해 엽록소 *a* 농도를 계산하였다[38].

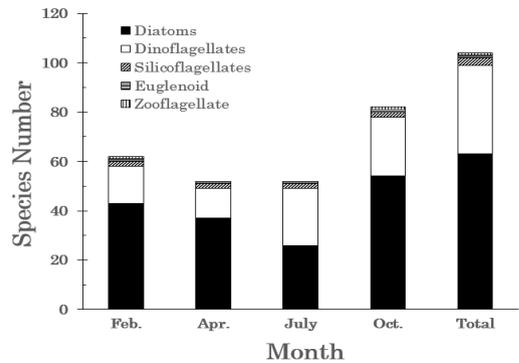
식물플랑크톤 군집과 관련된 현존량과 생물량 자료와 CTD (Sea-Bird Co, SBE 19)에 의해 측정된 수온, 염분 및 시스마 *t*의 자료를 주성분분석(PCA)에 이용하였다. 주성분분석은 SPSS 프로그램에서 상관행렬을 이용하여 계산하였고, 주성분 도출은 누적기여율 70% 또는 고유값 1을 기준으로 하였다[39, 40]. 그리고 주성분분석 결과를 이용하여 고군산군도 해역의 식물플랑크톤 출현특성과 생물해양학적 환경특성을 고찰하였다.

3. 결과

3.1 식물플랑크톤 군집

1) 종조성

2011년 4계절을 통해 고군산군도 해역에서 출현이 확인된 식물플랑크톤 종은 56속 104종이었다. 분류군별로는 규조류가 35속 63종으로 60.5%의 출현 점유율을 차지하였고, 다음으로 와편모조류가 17속 36종으로 34.6%, 규질편모조류가 2속 3종으로 2.9% 그리고 유글레나조류와 동물성 편모조류가 각각 1속 1종으로 각 1.0%의 출현 점유율을 보여, 와편모조류에 의한 점유율이 비교적 높았다. 계절별로는 겨울에 40속 62종이 출현하여, 규조류가 28속 43종으로 69.4%, 와편모조류가 8속 15종으로 24.2%, 규질편모조류가 2속 2종으로 3.2%, 유글레나조류와 동물성 편모조류가 각각 1속 1종으로 각 1.6%를 차지하였다. 봄은 36속 52종으로 규조류가 26속 37종으로 71.2%, 와편모조류가 8속 12종으로 23.1% 규질편모조류가 2속 2종



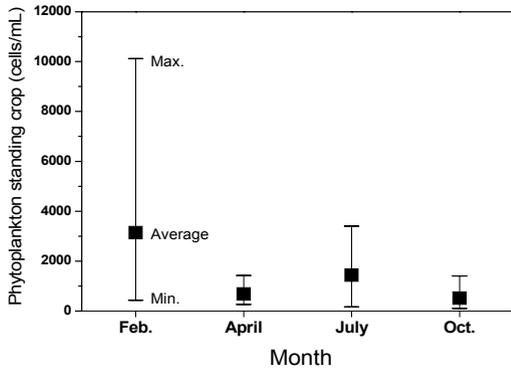
[Fig. 2] Seasonal fluctuation of phytoplankton species number in the CoWGIS.

으로 3.8%, 유글레나조류가 1속 1종으로 1.9%를, 여름은 33속 52종으로 규조류가 21속 26종으로 50.0%, 와편모조류가 10속 23종으로 44.2%, 규질편모조류가 1속 2종으로 3.8%, 그리고 유글레나조류가 1속 1종으로 1.9%를 차지하였다. 그리고 가을은 50속 82종으로 규조류가 31속 54종으로 65.9%, 와편모조류가 15속 24종으로 29.3%, 규질편모조류가 2속 2종으로 2.4%, 유글레나조류와 동물성 편모조류가 각각 1속 1종으로 각 1.2%의 출현 점유율을 차지하여, 가을에 비교적 다양한 종이 출현하였고, 봄과 여름에 종출현이 낮았다(Fig. 2).

2) 현존량

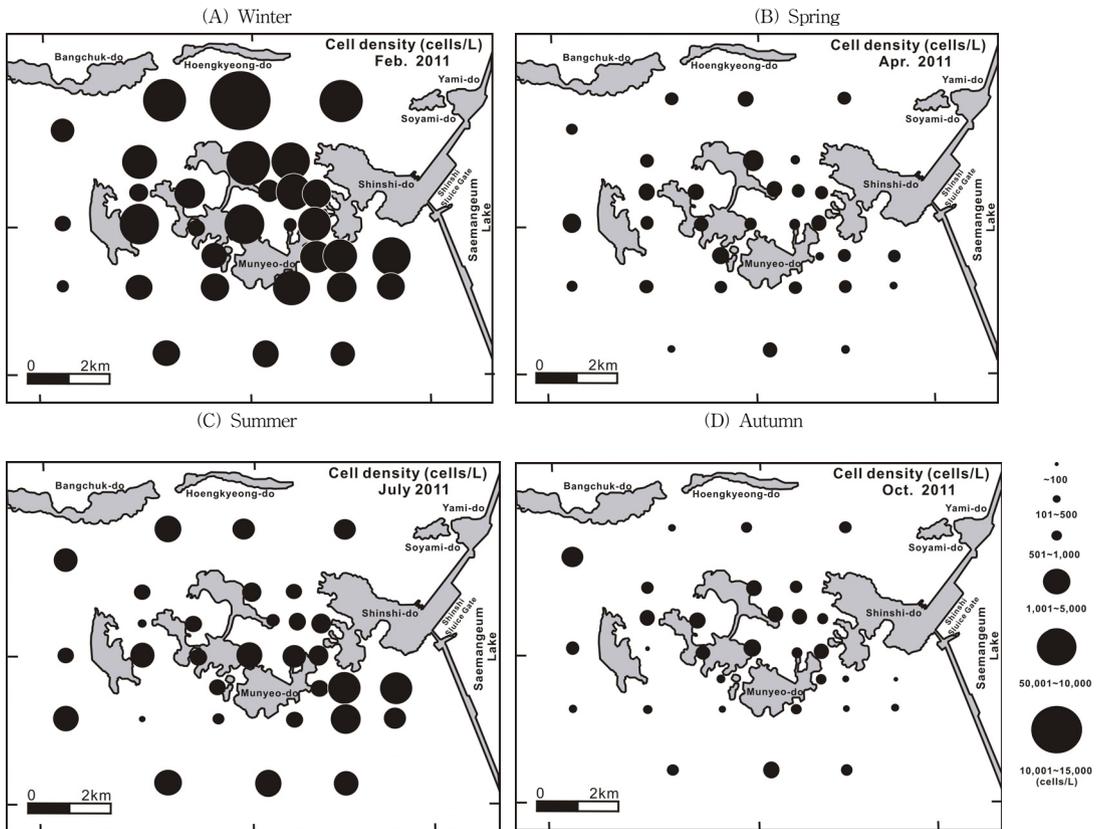
고군산군도 해역의 식물플랑크톤 현존량을 나타내는 세포밀도는 전체 정점 평균으로 가을 9.6×10^4 cells/L에서 겨울 1.0×10^7 cells/L까지 변화하여 매우 큰 계절변화 폭을 나타내었다. 그리고 전체적으로는 식물플랑크톤 세포밀도는 매우 높았지만, 출현종의 계절변화와 유의적 관련성은 관찰되지 않았다. 또한 중위도 개방해역에서 관찰되는 식물플랑크톤의 계절변동과는 반대로 봄과 가을에 낮고 겨울과 여름에 높은 세포밀도를 나타내었다. 정점에 따른 식물플랑크톤 현존량의 공간분포 차이도 상대적 수온변화가 큰 겨울과 여름에 크게 나타났다. 식물플랑크톤 세포밀도의 계절변화는 겨울에 4.3×10^5 cells/L에서 1.0×10^7 cells/L의 범위에서 $3.1 \pm 2.0 \times 10^6$ cells/L(평균 \pm 표준편차로 이하 같음)로 연중 가장 높았다. 봄은 2.6×10^5 cells/L에서 1.4×10^6 cells/L의 범위로 $6.8 \pm 2.6 \times 10^5$ cells/L로 겨울보다 한 단위 낮았다. 여름은 1.7×10^4 cells/L에서 3.4×10^{36} cells/L의 범위로 1.4

$\pm 0.8 \times 10^6$ cells/L로 봄보다 다소 높았다. 가을은 9.6×10^4 cells/L에서 1.4×10^6 cells/L의 범위에서 $5.1 \pm 3.2 \times 10^5$ cells/L로 변동하여 연중 가장 낮은 세포밀도를 나타내었다(Fig. 3).



[Fig. 3] Seasonal fluctuation of phytoplankton standing crops in the CoWGIS.

식물플랑크톤 현존량의 계절 및 공간분포는 겨울에 고군산군도 북쪽인 횡경도, 방축도 해역에서 높은 반면 남쪽해역에서 낮았다. 특히 관리도 서남방 및 남쪽에서 외해로 진행할수록 급격하게 세포밀도가 낮아졌다(Fig. 4A). 봄은 신시도, 선유도 및 무녀도로 둘러 쌓인 내만해역과 방축도 인근해역 등 고군산군도 북서 해역에서 상대적으로 높은 세포밀도를 보인 반면, 무녀도 및 관리도 인근인 남쪽해역에서 낮았다(Fig. 4B). 여름은 겨울 및 봄과는 달리 신시도 남쪽 신시도 갑문 전면에서 외곽해역에 위치하는 정점에서 높은 세포밀도를 보인 반면, 신시도와 선유도 사이의 내만해역과 장자도 남부의 내만해역에서 낮았다(Fig. 4C). 가을은 겨울과 유사하여 신시도, 선유도 및 무녀도로 둘러 쌓인 내만해역과 방축도 인근해역 등 고군산군도 북서해역에서 높은 세포밀도를 보이거나 무녀도 및 관리도 인근인 남부해역에서 상대적으로 낮은 세포밀도를 보였다(Fig. 4D).



[Fig. 4] Seasonal and horizontal distributions of phytoplankton standing crops in the CoWGIS.

[Table 1] Percentage of diatoms and phytoflagellates on the total cell density in the CoWGs.

Seasons	Percentage (%)			
	Total	Diatoms		Phyto-flagellates
		Centrales	Pennales	
Winter	100	90.3	9.6	0.1
Spring	100	95.8	2.1	2.1
Summer	100	73.6	25.4	1.0
Autumn	100	93.6	4.3	2.1

또한 식물플랑크톤 군집에서 분류군별 출현 점유율의 계절변화는 연중 전체 식물플랑크톤에서 규조류가 차지하는 점유율이 97.0% 이상으로 군집 전체가 규조류에 의해 지배되는 양상을 보였다. 규조류에서도 중심목 규조류에 의한 점유율이 여름 73.6%에서 기타 계절은 90.0% 이상으로 대부분을 차지하였다. 우상목 규조류는 여름에 25.4%로 최대를 보인 것을 제외하면 다른 계절에는 10% 이하의 낮은 점유율을 나타내었다. 식물성 편모조류는 0.1-2.1% 점유율로 봄과 가을에 2.1%로 다소 높은 것을 제외하면 겨울과 여름은 1% 이하의 점유율로 매우 낮았다(Table 1).

3) 우점종

고군산군도 해역의 식물플랑크톤 군집에서 전체 정점 평균 5% 이상 우점종을 보이는 우점종의 계절적 천이는 겨울에 규조류 *Skeletonema costatum*-like species, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Dactyliosolen fragillissimus* 및 *Chaetoceros debilis*가 각각 31.4%, 15.7%, 13.2%, 10.7%의 우점률로 함께 71.0%를 나타내었다. 봄은 규조류 *Guinardia delicatula*가 89.4%의 우점률로 극우점 하였다. 여름도 규조류 *Eucampia zodiacus*, *Cylindrotheca closterium*, *Ch. debilis* 및 *Ch. curvisetus*가 각각 43.1%, 24.9%, 13.1%, 7.0%의 우점률로 전체 88.1%를 나타내었다. 그리고 가을 역시 규조류 *S. costatum*-like species, *Ch. debilis*, *Ch. curvisetus*, *G. delicatula*와 *Leptocylindrus danicus*가 각각 39.1%, 17.8%, 15.7%, 6.3%와 6.0%의 우점률로 전체 84.9%를 나타내었다(Table 2). 즉 고군산군도 해역의 식물플랑크톤 군집은 연간 중심목 규조류에 의해 우점, 지배되는 양상을 나타내었고 계절별 우점종의 천이도 비교적 분명하였다. 두 계절 이상 우점종으로 출현한 종은 모두 중심목 규조류로서 *Ch. debilis*, *Ch. curvisetus*, *G. delicatula* 및 *S. costatum* - like species 등 4종이었다.

[Table 2] Seasonal fluctuations of dominant species and dominance in the CoWGs

Dominant species	Dominance (%)			
	Winter	Spring	Summer	Autumn
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	7.5			
<i>Chaetoceros curvisetus</i>			7.0	15.7
<i>Chaetoceros debilis</i>	10.7		13.1	17.8
<i>Chaetoceros tortissimus</i>	7.2			
<i>Cylindrotheca closterium</i>			24.9	
<i>Dactyliosolen fragillissimus</i>	13.2			
<i>Eucampia zodiacus</i>			43.1	
<i>Guinardia delicatula</i>		89.4		6.3
<i>Leptocylindrus danicus</i>				6.0
<i>Skeletonema costatum</i> - like species	31.4			39.1
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	15.7			

4) 출현종의 계절변화

고군산군도 해역의 식물플랑크톤 군집에서 4계절 모두 출현한 종은 외편모조류 *Dinophysis fortii*, *Neoceratium fusus*, *Noctiluca scintillans*, *Proto-peridinium bipes*, *P. conicum*, 규질편모조류 *Dictyocha fibula*, 유글레나조류 *Eutreptiella gymnastica*, 중심목 규조류 *Actinopterychus senarius*, *Chaetoceros affinis*, *Ch. debilis*, *Coscinodiscus gigas*, *Ditylum brightwellii*, *Eucampia zodiacus*, *Paralia sulcata*, *Skeletonema costatum* - like species, *Thalassiosira rotula* 및 우상목 규조류 *Meuniera membraneae*, *Pleurosigma normanii*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Thalassionema nitzschioides*, *Tropidoneis lepidoptera* 등 21종의 다양한 종들이 토속종이나 일시적 부유종으로 출현하였다.

그리고 3계절에 출현한 종은 외편모조류 *D. acuminata*, *Heterocapsa triquetra*, *N. teres*, *Scripsiella trochoidea*, *D. speculum*, 중심목 규조류 *Ch. curvisetus*, *Cyclotella striata*, *Leptocylindrus danicus*, *Odontella aurita*, *Proboscia alata*, *Rhizosolenia setigera*, *Stephanopyxis turris*, *Th. nordenskiöldii* 그리고 우상목 규조류 *Asterionellopsis glacialis*, *Cylindrotheca closterium*, *Diploneis splendida*, *Gyrosigma fasciola*, *Nitzschia sigma* 등 18종으로, 3계절 이상 출현이 확인된 종은 39으로 비교적 다양하였다 (Table 3).

[Table 3] Seasonal variations of phytoplankton species in the CoWGIS

Phytoplankton	Seasons			
	Winter	Spring	Summer	Autumn
PHYTOFLAGELLATES				
DINOFLAGELLATES				
<i>Akashiwo sanguinea</i>				*
<i>Alexandrium</i> sp.	*			*
<i>Dinophysis acuminata</i>	*		*	
<i>D. fortii</i>	*	*	*	*
<i>Gonyaulax polygramma</i>		*	*	
<i>G. scrippsae</i>			*	
<i>Gymnodinium</i> sp.				*
<i>Gyrodinium</i> sp.	*	*	*	*
<i>Heterocapsa triquetra</i>	*	*		*
<i>Katodinium glaucum</i>		*		
<i>Neoceratium furca</i>			*	*
<i>N. fusus</i>	*	*	*	*
<i>N. kofoidii</i>	*			
<i>N. teres</i>	*		*	*
<i>N. trichoceros</i>	*			*
<i>Neoceratium</i> sp.			*	*
<i>Noctiluca scintillans</i>	*	*	*	*
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>			*	*
<i>Prorocentrum dentatum</i>			*	*
<i>P. minimum</i>			*	*
<i>P. triestinum</i>			*	*
<i>Prorocentrum</i> sp.			*	
<i>Protoperdinium bipes</i>	*	*	*	*
<i>P. conicum</i>	*	*	*	*
<i>P. crassipes</i>			*	
<i>P. oceanicum</i>				*
<i>P. pallidum</i>		*	*	
<i>P. pentagonum</i>			*	
<i>P. pellucidum</i>		*		
<i>P. sinusum</i>			*	
<i>Protoperdinium</i> spp.	*	*	*	
<i>Pselodinium vaubanii</i>				*
<i>Pyrophacus steinii</i>				*
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	*		*	*
<i>Torodinium tereto</i>			*	*
SILICOFAGELLATES				
<i>Dictyocha fibula</i>	*	*	*	*
<i>D. speculum</i>		*	*	*
<i>Octactis octonaria</i>	*			*
EUGLENOIDS				
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	*	*	*	*
ZOOFLAGELLATES				
<i>Ebria tripartita</i>	*			
DIATOMS				
Centric diatoms				
<i>Actinocyclus senarius</i>	*	*	*	*
<i>Asteromphalus</i> sp.				*
<i>Bacteriastrum hyalinum</i>				*
<i>Chaetoceros affinis</i>	*	*	*	*
<i>Ch. compressum</i>				*
<i>Ch. curvisetus</i>	***		***	**

to be continued Table 3

Phytoplankton name	Seasons			
	Winter	Spring	Summer	Autumn
<i>Ch. danicus</i>	*			*
<i>Ch. debilis</i>	***	*	***	***
<i>Ch. decipiens</i>	*			*
<i>Ch. didymus</i>	*			*
<i>Ch. messanensis</i>		*		
<i>Ch. peruvianus</i>	*	*		
<i>Ch. socialis</i>	***			*
<i>Ch. tortissimus</i>	***			
<i>Chaetoceros</i> spp.	**	*	**	*
<i>Climacodinium frauerfeldianum</i>				*
<i>Coscinodiscus centralis</i>		*		*
<i>C. gigas</i>	*	*	*	*
<i>Coscinodiscus</i> sp.	*	*	*	*
<i>Cyclotella striata</i>		*	*	*
<i>Dactyliosolen fragilissimus</i>	***			*
<i>D. phuketensis</i>				*
<i>Dictylum brightwellii</i>	**	*	*	*
<i>Eucampia zodiacus</i>	*	*	****	**
<i>Guinardia delicatula</i>			***	**
<i>G. flaccida</i>	*			*
<i>G. striata</i>				*
<i>Helicotheca tamesis</i>			*	*
<i>Leptocylindrus danicus</i>	**	*		*
<i>Neocalyptrella robusta</i>				*
<i>Odontella aurita</i>	*	*	*	
<i>O. sinensis</i>		*		*
<i>Paralia sulcata</i>	**	**	*	*
<i>Planktoniella blanda</i>				*
<i>Proboscia alata</i>	*	*		*
<i>Rhizosolenia carcar-avis</i>				*
<i>Rhizosolenia hebetata</i>	*			*
<i>R. setigera</i>	**	*		*
<i>Rhizosolenia</i> sp.				*
<i>Skeletonema costatum</i>	****	*	*	****
<i>Stephanopyxis turris</i>	*		*	*
<i>Thalassiosira aestivalis</i>				*
<i>Th. leptopus</i>	*	*		
<i>Th. nordenskiöldii</i>	***	*		*
<i>Th. pacifica</i>				*
<i>Th. rotula</i>	**	*	*	*
<i>Thalassiosira</i> spp.	*	*	*	*
Pennate diatoms				
<i>Amphipora alata</i>				*
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	***	**	**	
<i>A. kariana</i>	*	*		
<i>Bacillaria paxillifera</i>	*	*		
<i>Cylindrotheca closterium</i>	*	*		*
<i>Diploneis splendida</i>	*	*	*	
<i>Gyrosigma fasciola</i>	*	*		*

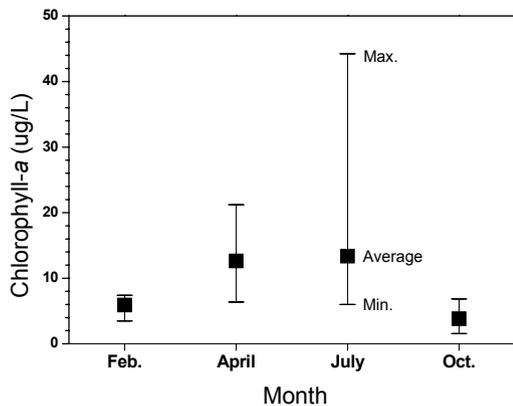
to be continued Table 3

Phytoplankton name	Seasons			
	Winter	Spring	Summer	Autumn
<i>Limnophora lymbgyei</i>	*			*
<i>Meuniera membranaceae</i>	*	*	*	*
<i>Navicula</i> spp.	*	*		*
<i>Nitzschia sigma</i>	*	*	*	
<i>Pleurosigma normanii</i>	*	*	*	*
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>				*
<i>Pn. pungens</i>	**	*	*	**
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>				*
<i>T. nitzschoides</i>	*	*	*	*
<i>Tropidoneis lepidoptera</i>	*	*	*	*

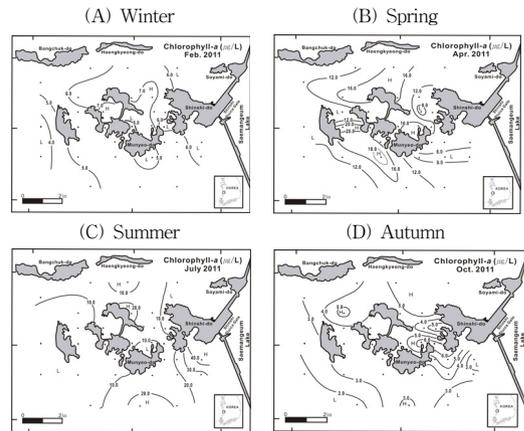
* 10³ cells/L; ** 10⁴ cells/L; *** 10⁵ cells/L; **** 10⁶ cells/L; ***** 107 cells/L

3.2 식물플랑크톤 생물량 (엽록소 a)

2011년 고군산군도 해역에서 엽록소 a 농도로 표현된 식물플랑크톤 생물량은 가을 1.55 µg/L에서 여름 44.24 µg/L 범위로 변화하여 세포밀도와 같이 매우 높은 농도와 계절별로 큰 차이를 나타내었다. 계절변동은 겨울에 3.48-7.39 µg/L의 범위에서 5.91 ± 0.95 µg/L의 변동 폭을, 봄은 6.38 - 21.20 µg/L의 범위에서 12.64 ± 4.14 µg/L, 여름은 6.0 - 44.24 µg/L의 범위에서 13.36 ± 7.67 µg/L, 그리고 가을은 1.55 - 6.85 µg/L의 범위에서 3.82 ± 1.35 µg/L의 변동 폭을 나타내었다. 즉 엽록소 a 농도는 수온 상승기인 봄과 여름에 높고, 수온 하강기인 가을과 겨울에 상대적으로 낮아 세포밀도의 변화와는 다른 경향을 나타내었다. 공간분포도 수온상승기에 크고, 수온 하강기에 낮았다(Fig. 5).



[Fig. 5] Seasonal fluctuations of chlorophyll a concentration in the CoWGIS



[Fig. 6] Seasonal and horizontal distributions of chlorophyll a concentration in the CoWGIS.

엽록소 a 농도의 공간분포는 겨울에 세포밀도와는 달리 신시도, 선유도 및 무녀도에 의해 둘러 쌓인 내만해역에서 7 µg/L 이상으로 높은 반면, 관리도 서방의 개방해역에서 4 µg/L 이하의 낮은 농도를 보였다(Fig. 6A). 봄은 매우 높은 엽록소 농도로 다소 복잡한 분포 경향으로 장도, 선유도 및 관리도 사이의 수로부에서 20 µg/L 전후의 매우 높은 농도를 보였고, 신시도 배수갑문 인근해역에서 10 µg/L 이하의 농도를 보였다. 그리고 고군산군도 북쪽해역에서 남쪽해역보다 높은 16 µg/L 전후의 높은 농도를 나타내었다(Fig. 6B). 여름은 4계절 중 가장 높은 엽록소 a 농도로 보였고, 특히 새만금 수괴 영향을 받는 신시도 배수갑문 인근해역에서 40 µg/L 이상의 적조수준의 농도를 나타내었다. 전체적으로는 봄과는 반대로 남쪽해역에서 20 µg/L 전후의 높은 농도를 보이는 반면 북쪽해역은 10 µg/L 전후의 농도를 나타내었다. 그리고 섬 사이에 위치하는 협수로 및 정체수역에서 10 - 20 µg/L 또는 그 이상의 농도를 보이는 등 규칙적인 분포경향은 관찰되지 않았다(Fig. 6C). 가을은 연중 가장 낮은 생물량으로 선유도, 무녀도 서쪽과 신시도 갑문 인근해역에서 3 µg/L 전후의 엽록소 a 농도를 보였다. 특히 신시도와 선유도 사이의 수로부에서 5 µg/L 전후의 농도를 보였다. 그리고 신시도 북단의 새만금 방조제와 인접하는 광역해역에서 5 µg/L 이상의 농도를 보였다(Fig. 6D).

3.3 식물플랑크톤 군집의 분포 및 출현특성

고군산군도 해역에서 계절별 표층에서 얻어진 수온, 염분 등의 해황인자와 식물플랑크톤 군집의 상위 분류군

[Table 5] Results of principal component analysis (PCA) on the physical and biological parameters in the CoWGIS

seasons	parameter number	Principal Component Analysis (PCA)			
		Principal Component	1st	2nd	3rd
Winter	13	eigenvalue	5.61	3.02	2.75
		proportion(%)	37.4	20.1	18.3
		accumulative proportion(%)	37.4	57.5	75.8
Spring	10	eigenvalue	5.02	2.47	-
		proportion(%)	50.2	24.8	-
		accumulative proportion(%)	50.2	75.0	-
Summer	13	eigenvalue	4.72	3.22	2.70
		proportion(%)	36.3	24.8	20.9
		accumulative proportion(%)	36.3	61.1	81.9
Autumn	13	eigenvalue	5.46	2.45	1.82
		proportion(%)	42.0	18.8	14.0
		accumulative proportion(%)	42.0	60.8	74.8

및 우점종을 대상으로 계절별, 정점별 자료를 이용하여 주성분분석을 실시하였다. 여름을 제외하고는 누적기여율 70%로 제3주성분까지 도출되었으나, 특성값 해석은 전체 정조의 60%를 설명하고 있는 제1 및 제2 주성분만을 대상으로 하였다(Table 5).

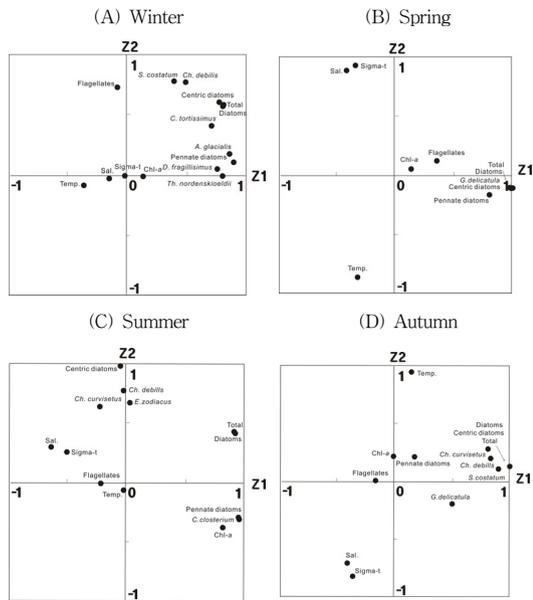
겨울 주성분분석의 인자부하량 분포는 제1주성분의 양의 영역에 우상목 구조류를 중심으로 우점종에 강한 양의 관계를 보이는 반면, 음의 영역은 수온과 염분 등 수괴특성을 결정하는 인자가 위치하고 있으나 상대적으로 수온과 음의 관계가 강하게 나타났다. 제2주성분은 양의 영역에 전체 및 중심목 구조류, 그리고 우점종에 강한 양의 상관을 보이는 반면 음의 영역에는 유의적인 인자가 분포하지 않았다. 이와 같은 인자부하량 분포로부터 제1주성분은 우상목 구조류의 출현을 지배하는 환경, 제2주성분은 중심목 구조류 출현에 관여하는 특성값으로 해석할 수 있었다. 즉, 겨울에 우점하는 구조류는 수온과 염분과 같은 해양인자에 크게 지배되지 않는 특징을 보였고, 중심목과 우상목 구조류의 출현도 다소 상반되는 인자에 의해 지배되고 있음을 알 수 있었다(Fig. 7A).

봄은 한 종의 우점종에 의해 극우점 되고 있어, 비교적 단순한 인자부하량의 분포를 나타내었다. 제1주성분의 양에 강한 관계는 우점종, 구조류 및 전체 식물플랑크톤 세포밀도가 음의 영역은 강하지는 않지만 수온, 염분 등 해양인자가 분포하고 있어 식물플랑크톤 현존량을 결정하는 특성값으로 판단할 수 있었다. 제2주성분은 염분 및 시스마 t에 강한 양의 관계를 보이며, 수온에 강한 음의 상관을 나타내는 것으로부터 수괴특성을 나타내는 지표로 볼 수 있었다. 즉 봄은 수온과 염분 등의 독립된 해양

인자보다 상호보완적인 환경인자의 복합적 작용에 의해 식물플랑크톤 분포가 결정되며, 전체 식물플랑크톤 세포 밀도는 구조류에 의해 지배되지만, 엽록소 a 농도는 구조류보다 식물성 편모구조류에 의해 지배되는 것으로 평가되었다(Fig. 7B).

여름 제1주성분은 우상목 우점종, 구조류, 식물플랑크톤 현존량 및 엽록소 a 농도에 강한 양의 관계를 나타내는 반면, 염분과 밀도에 강한 음의 관계를 나타내고 있어 주로 우상목 구조류를 중심으로 하는 구조류 성장 특성을 나타내는 것으로 판단되었다. 제2주성분은 양의 영역에 중심목 구조류와 중심목 우점종, 음의 영역에는 약하지만 우상목 구조류와 우상목 우점종, 엽록소 a 농도가 분포하여 중심목 구조류 출현을 지배하는 환경특성을 나타내는 것으로 판단되었다. 즉 여름 고군산군도의 우상목 구조류는 담수유입 등 육상기원 물질에 의해 출현과 분포가 지배되고 있는 것에 반해, 중심목 구조류 특히 *Chaetoceros curvisetus* 등은 오히려 염분농도가 높은 외해 개방해역에 출현하는 것으로 판단되었다. 엽록소 a 농도는 식물플랑크톤 현존량에 점유율이 높은 중심목 구조류보다는 우상목 구조류에 지배되는 경향이 컸으며, 편모구조류는 비교적 높은 염분을 나타내는 환경에 지배되는 것으로 나타났다(Fig. 7C).

가을 제1주성분은 중심목 구조류와 중심목 우점종, 구조류 및 식물플랑크톤 현존량에 강한 양의 관련성을 보이는 반면, 약하지만 염분과 밀도에 음의 관계를 나타내고 있어 중심목 구조류의 출현을 지배하는 환경특성을 나타내는 것으로 판단되었다. 제2주성분은 수온에 강한 양의 관계를 보이는 반면, 염분과 밀도에는 강한 음의 관



[Fig. 7] Seasonal changes of loading factors of 1st and 2nd principal component by PCA
 (Parameters: Temp: water temperature, Sal: salinity, Sig.-t: sigma t, Chl-a: chlorophyll-a)

계를 나타내어 수괴 분포에 관련하는 특성값으로 판단되었다. 즉 전체 식물플랑크톤 현존량은 중심목 규조류에 의해, 엽록소 *a* 농도는 우상목 규조류와 식물성 편모조류에 의해 지배되었고, 수온과 염분은 서로 상반되게 위치하는 연안해역의 전형적 특성을 나타내었다. 즉 가을 고군산군도 해역의 식물플랑크톤은 고염해수보다 연안특성을 강하게 받으면서 비교적 고온을 보이는 저염수에서 높은 세포밀도를 보였다(Fig. 7D).

그리고 주성분분석의 득점분포에 따른 정점군을 이용한 해역구분은 실시하였다. 결과 계절에 따라 다소 차이는 있으나 고군산군도가 다수의 도서와 수로로 형성되고 있기에 도서와 수로로 구성된 도서 내만해역과 비교적 개방된 환경특성을 보이는 외곽해역으로 구분되었다. 즉 다도해적 환경특성을 나타내고 있다고 할 수 있었다.

4. 고찰

2011년 고군산군도 해역에서 출현이 확인된 식물플랑크톤 출현종 56속 104종은 조사시점의 차이는 있지만 금강하구의 96종[41]이나 101종[30]보다는 다소 높지만, 군

산연안의 131종[31], 새만금 해역의 191종[8] 및 금강하구의 233종[32]에 비하면 낮았다. 특히 서해의 환경특성을 보이는 한강하구역의 268종[42], 경기만의 228종[43] 및 천수만의 262종[44]에 비하면 매우 낮은 값이다. 이와 같은 결과는 새만금 하류해역에 출현하는 식물플랑크톤 군집의 총 191종에서 담수 녹조류 31종, 담수 남조류 24종과 같이 많은 담수산이 종이 포함되고 있는 점도 있지만 [8], 연구자에 따라 군집해석에서 소수 출현종에 대한 분류기준을 달리하고 있기 때문으로 발생하는 것으로 판단되었다. 즉 출현종 수의 많고 적음이 고군산군도 해역의 환경변화와 해역특성을 직접적으로 반영하고 있다고 보기는 어렵다. 그리고 출현종의 계절변화에서 규조류는 연중 높은 출현 점유율을 보이는 것에 반하여 외편모조류 등 식물성 편모조류가 상대적으로 수온이 높은 고수온기에 높은 출현 점유율을 보이는 것은 우리나라 남해 [45, 46], 서해[32, 43]는 물론 중위도해역에서 쉽게 관찰되는 현상이라 할 수 있다[47].

고군산군도 해역의 최대 식물플랑크톤 현존량인 1.0×10^7 cells/L의 세포밀도는 고수온기 부영양화된 연안 또는 내만해역에서 관찰되는 세포밀도 수준이다[48]. 이와 같이 높은 세포밀도는 서해에서 최고 세포밀도를 나타내는 새만금 내만의 8.5×10^7 cells/L[9], 만경강 및 동진강 하구인 새만금 수역의 2.2×10^7 cells/L[4]와 금강하구의 1.2×10^7 cells/L[32], 인천 도크의 1.3×10^7 cells/L[49]보다는 다소 낮거나 유사한 값이지만, 한강 하구역[50], 경기만[43], 천수만[51], 영광 연안해역[52] 등 서해 각 해역에서 기록된 최고 세포밀도 5.5×10^6 cells/L 이하의 현존량이나 금강하류 및 새만금 연안 등 군산연안에서의 1.0×10^6 cells/L 이하의 현존량보다는 1-2 단위 높은 세포밀도이다[30, 31, 41]. 고군산군도 해역의 식물플랑크톤 세포밀도는 빛, 수온, 포식압 등의 물리적 또는 생물학적인 자보다 부영양화 등 영양염류의 증가에 의한 것이라 할 수 있다. 실제 금강하구의 식물플랑크톤 현존량의 경시적 변화를 영양염류 중에서도 질산염 증가에 의한 것으로 평가하고 있으며[32], 고군산군도 해역은 최근 새만금 방조제공사 종료 이후 새만금호 기수의 방류와 금강 하구역에서 공급되는 영양염류의 영향으로 급격히 세포밀도가 증가하고 있다고 할 수 있다. 그러나 새만금 방조제의 하구역과 내만, 방조제 밖의 정점을 대상으로 2001년에서 2010년까지 세포밀도의 변화양상을 분석한 결과에서 만경강, 동진강 하구 및 내만해역에서는 10^7 cells/L

단위 세포밀도가 계절에 따라 발생하고 있지만, 방조제 내측의 새만금호 외측 및 제방 외측 정점(1개 정점)에서는 5.7×10^6 cells/L 이하의 세포밀도로 2006년 제방 완공 이후에도 식물플랑크톤 세포밀도에 큰 변화가 없음을 설명하고도 있다[9]. 또한 계절변화에서 과거 서해 식물플랑크톤 세포밀도의 대증식은 봄이나 가을에 나타났지만 [43, 47], 최근 부영양화가 진행되면서는 여름[32] 등 계절적으로 매우 불규칙한 양상을 보이고 있다[53]. 즉 고군산군도 해역에서도 중위도 개방해역의 해수혼합과 성층 등의 계절변화에 동반되는 봄과 가을의 규조류 대발생보다 겨울에 최대 세포밀도를 나타내었다. 식물플랑크톤 성장에 영양염류 농도가 문제가 되지 않은 부영양화된 내만과 연안 해역의 최대 식물플랑크톤 세포밀도는 주로 여름에 나타나지만[39, 54-56], 지중해 등 겨울에도 광 조건이 충분하고 해수혼합에 의해 영양염류 공급이 원활한 천해의 내만 및 연안해역은 겨울에 가장 높은 세포밀도를 보이기도 한다[57-60]. 특히 고군산군도 해역과 같이 다도해적 특성을 보이는 해역에서 겨울 최대 식물플랑크톤 세포밀도를 보이는 현상은 우리나라 남서해역에서 어렵지 않게 관찰된다[46, 54, 59].

고군산군도 해역의 식물플랑크톤 군집에서 우점종은 계절적 차이가 비교적 뚜렷하지만 규조류에 의해 우점되었다. 이는 담수 남조류나 녹조류에 우점되는 금강하구 [32]나 새만금호[29]와는 다른 결과이다. 그러나 규조류에 우점되는 천수만[51]과 경기만[43], *Skeletonema costatum*-like species 및 *Chaetoceros debilis*를 제외하면 많은 차이가 있었고 서해에서 일시부유종으로 경기만과 천수만 등에서 가장 우점하는 *Paralia sulcata*는 우점종으로 출현하지 않았다. 특히 봄 규조류 *Guinardia delicatula*에 의해 89.4%의 우점율로 극우점 하는 현상과 여름 *Eucampia zodiacus*에 의한 43.1% 우점율을 나타내는 등 특정 종으로 극단적인 높은 우점율을 나타내는 것은 서해 연안해역에서 매우 이례적인 현상이라 할 수 있었다.

서해의 식물플랑크톤은 토착성 그룹, 저서성 그룹 및 외부에서 유입된 난류성 그룹으로 구분하고 있으며, 연안 식물플랑크톤 군집에서 토착성 그룹과 갯벌에 서식하는 강한 조류, 난류 및 파랑에 의해 일시적으로 부유하는 저서성 그룹이 매우 중요한 것으로 지적하고 있다[53]. 고군산군도 해역에서 3회 이상 출현하여 토착성 식물플랑크톤으로 판단할 수 있는 39종에서 기존에 서해의 토착성 그룹 22종[43, 61] 및 일시 부유성 그룹 16종[43]에

포함되는 종은 13종으로 전체 33.3%에 지나지 않았다. 나머지 26종에는 와편모조류가 8종, 규질편모조류가 1종, 유글레나조류가 1종, 규조류가 16종으로 고군산군도 해역의 환경변화와 함께 식물플랑크톤 군집도 많은 변화를 나타내는 것으로 추정할 수 있었다. 특히 이들 26종은 서해에서 우점 출현하거나 일반적으로 관찰되는 종이다[9, 32, 53]. 그리고 고군산군도 해역에서 겨울과 가을 최우점하는 *Skeletonema costatum*-like species는 우리나라 연안/내만해역은 물론 범지구적으로 부영양화 해역에 극우점하는 종인 *S. costatum*이었다[48]. 이 *S. costatum*은 *Skeletonema* 속에 단일 종만이 있었으나 최근 분자생물학적 연구에서 다른 몇 개의 종으로 분리될 가능성이 제기되었다[62]. 그리고 전자현미경과 분자생물학적 분류가 재정립되어 *Skeletonema* 속은 2005년[63]에서 2011년 [64]까지를 “*Skeletonema* shock wave”라고 할 정도로 세분화 되어[65-67], 지금은 약 20종으로 구분되어 있다 (algaeBASE, <http://www.algaebase.org>). 또한 지금까지 연안 및 내만해역의 대표종으로 알려진 *S. costatum*은 우리나라를 포함한 동북아시아 해역에서는 그다지 많이 출현하지 않은 것으로 보고된다[68]. 때문에 여기서는 기존문헌에서 *S. costatum*으로 분류된 종을 포함하여 금번 동정된 유사종을 모두 합해 *S. costatum*-like species로 정리하였다.

엽록소 *a* 농도는 봄과 여름에 평균 12.64 $\mu\text{g/L}$, 13.36 $\mu\text{g/L}$, 가을과 겨울에 3.82 $\mu\text{g/L}$, 5.91 $\mu\text{g/L}$, 그리고 최대 농도인 44.24 $\mu\text{g/L}$ 은 개방된 해역에서 관찰되기에는 쉽지 않은 이례적인 농도로 부영양화가 진행된 내만해역에서 관찰되는 농도이다[54, 69]. 실제 Choi *et al.*[53]에 의하면 1983 - 1996년까지 서해 연안해역, 황해 중앙부 및 동부해역, 천수만, 경기만, 영광 연안해역 등 8개 해역에서 관찰된 엽록소 *a* 농도는 0.07 - 5.88 $\mu\text{g/L}$ 의 범위이고 1991년 폐쇄역인 인천연안에서 최대 19.35 $\mu\text{g/L}$ 가 기록된 것으로 보고하고 있다. 그러나 여기에서 관찰되는 최고 엽록소 *a* 농도는 이들 내용과 비교하기 어려울 정도의 높은 값으로 식물플랑크톤 현존량의 변화요인과 같이 부영양화 진행에 따른 결과라 할 수 있었다. 즉 고군산군도 해역은 새만금 방조제 건설이후 매우 빠르게 부영양화가 진행되고 있음을 시사하는 내용이라 할 수 있었다.

그러나 고군산군도 해역의 식물플랑크톤 현존량과 엽록소 *a*의 계절변화는 일치하지 않고 서로 다른 경향을 나타내었다. 이런 결과는 우리나라 연안해역에서 어렵지

않게 관찰되는 현상으로 우점 식물플랑크톤의 단위 세포 당 염록소 a 함량의 차이[54, 70]와 세포체적 차이[71] 그리고 고수온기에 주로 출현하는 무각편모조류 및 광학 현미경으로 동정과 계수가 어려운 초미소플랑크톤에 의한 점유율 차이 등[72-77]으로 발생한다. 즉 고수온기 식물플랑크톤 군집에는 현미경관찰이 어려운 초미소식물플랑크톤에 의한 점유율이 높아 염록소 a 농도에는 반영되지만, 세포밀도에는 반영되지 않기 때문에 세포밀도가 과소평가되는 것으로 해석되었다[78].

연안해역의 식물플랑크톤 군집의 분포와 성장은 주로 영양염류의 공급과 계절성 등에 크게 지배된다[39, 40, 46, 79]. 주성분분석으로 고군산군도 해역의 식물플랑크톤 분포와 출현을 해석한 환경인자 특성에서도 크게 다르지는 않았다. 다만 영양염류 자료가 포함되지 않아 정확한 결과 도출은 할 수 없지만, 고군산군도 해역은 금강과 새만금호의 영향을 모두 받으나 계절적으로 고수온기는 새만금호의 배출수의 영향을 직접 받는 것으로, 저수온기에는 금강 수괴의 영향을 강하게 받는 것으로 추정되었다. 그리고 구조류에서 부유성 특성이 강한 중심목과 저서성 특성이 강한 우상목의 출현특성은 서로 상반되는 것으로 판단되었다.

결론적으로 식물플랑크톤 군집에서 도출된 고군산군도 해역의 생물해양학적 특성은 새만금 방조제가 완공된 이후 수년이 지난 지금 매우 빠르게 부영양화가 진행되어 내만성 환경으로 변화되는 것으로 판단되었다.

References

- [1] Y. H. Yoon, Red Tides -Uprising from the Sea. Gimboondang, Seoul, 531pp. 2011.
- [2] V. A. Guinder, C.A. Popovich, J. C. Molinero and J. Marcovecchio, "Phytoplankton summer bloom dynamics in the Bahía Blanca Estuary in relation to changing environmental conditions", *Cont. Shelf Res.*, 52, 150-158, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2012.11.010>
- [3] M. Garmendia, Á. Borja, J. Franco and M. Revilla, "Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives", *Mar. Poll. Bull.*, 66, 7-16, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpollbul.2012.10.005>
- [4] J. H. Shim, Y. K. Shin and W. H. Lee, "Environmental properties and phytoplankton community of the lower Mankyong river", *Korean J. Limnol. Soc.*, 24, 45-54, 1991.
- [5] H. J. Jeong, Y. D. Yoo and J. S. Kim, "Outbreak of red tides in the coastal waters off the southern Seamankeum areas, Jeonbuk, Korea 2. Temporal variations in the heterotrophic dinoflagellates and ciliates in the summer-autumn of 1999", 『The Sea』 *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 7, 140-147, 2002.
- [6] Y. D. Yoo, H. J. Jeong, J. H. Shim, J. Y. Park, K. J. Lee, W. H. Yih, H. K. Kweon, S. J. Pae and J. K. Park, "Outbreak of red tides in the coastal waters off the southern Seamankeum areas, Jeonbuk, Korea 1. Temporal and spatial variations in the phytoplankton community in the summer-autumn of 1999", 『The Sea』 *J. Korean Soc. of Oceanogr.*, 7, 129-139, 2002.
- [7] Kim, Y.G., Park, J.W. Jang, K.G. and Yih, W., 2009, "Cyclic change of phytoplankton community in Mankyong River estuary prior to the completion of the Saemankeum Seawall", *Ocean and Polar Res.*, 31, 63-70.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2009.31.1.063>
- [8] H.-G. Yeo, "Diversity of planktonic micro algae in Saemangeum water regions", *J. Korea Acad.-Indust. Coop. Soc.*, 11, 3610-3614, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.9.3610>
- [9] H.-G. Yeo, "Annual variations(2001-2010) of phytoplankton standing stocks in Saemangeum water region", *J. Korea Acad.-Indust. Coop. Soc.*, 13, 4326-4333, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.4326>
- [10] C. H. Choi, S. W. Jung, S. M. Yun, S. H. Kim and J. K. Park, "Changes in phytoplankton communities and environmental factors in Saemangeum artificial lake, south Korea between 2006 and 2009", *Korean J. Environ. Biol.*, 31, 213-224, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.3.213>
- [11] S.S. Cha, S. J. Chun, J. S. Yang and K. W. Choi, "Species composition and abundance of ichthyo-plankton in the waters of Saemangeum, Korea 2003", *Korean J. Ichthyol.*, 16, 321-330, 2004.
- [12] S. H. Oh and C. H. Koh, "Distribution of diatoms in the surficial sediments of the Mangyung and Dongjin tital flat. west coast of Korea (Eastern Yellow Sea)", *Mar. Biol.*, 122, 487-496, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00350883>
- [13] S.-J. Oh, C.-H. Moon and M. O. Park, "HPLC analysis of biomass and community composition of microphytobenthos in the Saemangeum tital flat, west coast of Korea", *J.*

- Korean Fish. Soc., 37, 215-225, 2004.
- [14] B. J. Koo, S.-H. Shin, H. J. Woo, E.-S., Kim and J. G. Je, "Changes in macrobenthic community structure on Gunsan tidal flat after the closing of the Saemangeum 4th dyke", *Ocean and Polar Res.*, 30, 497-507, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2008.30.4.497>
- [15] J.E Na and H. Y. Lee, "Distribution of benthic algae in tidal flats of Saemangeum Lake, Korea", *Korean J. Environ. Biol.*, 29, 46-51, 2011.
- [16] S. D. Hwang and J.-S. Kim, "Change in community structure of shellfish in the reclaimed Saemangeum area", *J. Korean Fish. Soc.*, 36, 708-715, 2003. (in Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2003.36.6.708>
- [17] H. S. Rho, J. Jung and W. Kim, "Marine decapods of Saemangeum". *Korean J. Environ. Biol.*, 22, 464-471, 2004.
- [18] H.-R. Lee and J.-B. Lee, "Monitoring spatiotemporal changes of tidal flats in Gogusan Islands by environmental factors using satellite images", *J. Korean Ass. Geog. Info. Stud.*, 8, 34-43, 2005.
- [19] S. W. Suh, W. H. Cho and G. S. Yoo, "Simulation of mixing transport on inner reservoir and influence impacts on outer region for the Saemankeum effluents cased by gate operation", *J. Korean Soc. Coas. Ocean Eng.*, 18, 43-52, 2006.
- [20] G.-H. Park, K.-Y. Kim, C.-H. Kim and H. G. Kim, "Spatio-temporal distribution of dinoflagellate resting cysts at the Saemangeum area", *J. Korean Fish. Soc.*, 37, 202-208, 2004.
- [21] Y. K. Koh, C. H. Chung and K. H. Oh, "Silicoflagellates, endoskeletal dinoflagellates and sponge spicules from the surface sediments of the eastern area in Gogusan Islands, West Sea", *J. Paleont. Soc. Korea*, 28, 103-115, 2011.
- [22] Y. K. Koh, "Characteristics of silicoflagellate occurrences from the surface sediments of the western area in Gogusan Islands, West Sea", *J. Paleont. Soc. Korea*, 27, 51-67, 2012.
- [23] J. H. Kim, Y. D. Ko, Y. S. Kim. and K. W. Nam, "Marine algal flora and community structure of Gogusan Islands outside the Saemangeum dike", *Korean J. Environ. Ecol.*, 25, 156-165, 2011.
- [24] I.-S. Kim and W.-O. Lee, "The fish fauna of the Kogusan Islands, Korea", *Korean J. Ichthyol.*, 5, 41-52, 1993.
- [25] S. D. Hwang, "Diel and Seasonal variations of species composition of fishery resources collected by a bag net off Kogusan-gundo", *Korean J. Ichthyol.*, 10, 156-163, 1998.
- [26] H. S. Rho. and W. Kim, "Marine decapods of Gogusan Islands", *Korean J. Environ. Biol.*, 22, 456-463, 2004.
- [27] M.-S. Sheo, Y.-S. Park and J. Kim, "Textural and geochemical characteristics of the recent sediments from Gogusan Islands adjacent to coastal area", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 16, 398-407, 1995.
- [28] H. J. Lee, M. J. Kim and T. K. Kim, "Modern sedimentary environments within the Gogusan archipelago", *Ocean and Polar Res.*, 30, 519-536, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2008.30.4.519>
- [29] H.-G. Yeo. "Phytoplankton community and phytohydrographic characteristics of the inside and outside of Saemangeum reservoir", *J. Korea Acad.-Indust. Coop. Soc.*, 10, 2021-2025, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.8.2021>
- [30] J. H. Shim and J. S. Yang, "The community structure and distribution of phytoplankton of the Keum river estuary", *J. Oceanol. Soc. Korea*, 17, 1-11, 1982.
- [31] J. H. Shim and S. J. Yoo, "Phytoplankton community off the coast of Kunsan, Korea", *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20, 31-42, 1985.
- [32] Y. K. Shin, "A ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary", *KJEE*, 46, 524-540, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2013.46.4.524>
- [33] J. Thronsdon, "Preservation and storage", In, Soumia, A(ed), *Phytoplankton manual*, Unesco, Paris, pp.69-74, 1978.
- [34] E. E. Cupp, *Marine plankton diatoms of the west coast of north America*. Bull. Scripps Inst. Oceanogr., Univ. Calif. 5, 1-237, 1943.
- [35] J. D. Dodge, *Marine dinoflagellates of the British Isles*, Her Majesty's Office, London, 303pp., 1982
- [36] M. Chihara and M. Murano (eds), *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan*. Tokai Univ. Press, Tokyo, 1571pp. 1997.
- [37] C. R. Tomas (ed.), *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates*, Academic Press, Oxford, 858pp.1997
- [38] SCOR-Unesco, "Determination of photosynthetic pigments". In, Unesco(ed), *Determination of photosynthetic pigments in sea water*, Paris, pp. 10-18, 1966.
- [39] 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., 361pp. 1989.
- [40] Y. H. Yoon, "A environmental characteristics on phytoplankton growth in the coastal water of Yosue by multivariate analysis (MVA)", *J. Korea Soc. Water Qual.*, 8, 141-149, 1992.
- [41] Y. H. Jeong, O. M. Lee and K. H. Noh, "Annual

- (1984-1985) dynamic of phytoplankton in Kum river estuary”, Bull. Korean Ass. Conser. Nature Ser., 7, 17-25, 1985.
- [42] Y. H. Chung, “The environmental conditions and phytoplankton of Han River estuary”, J. Nat. Acad. Sci. R.O. Korea, 8, 59-132, 1969.
- [43] J. K. Choi and J. H. Shim, “The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops, tychopelagic plankton”, J. Oceanol. Soc. Korea, 21, 156-170, 1986.
- [44] Y. K. Shin, J. H. Shim and H. G. Yeo, “The effects of environmental characteristics on the distribution and productivity of plankton in the Chonsu Bay, Korea”, J. Environ. Sci., 3, 34-47, 1997.
- [45] 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., 16, 27-42, 1992.
- [46] Y. H. Yoon, “Spatio-temporal distribution of phytoplankton community in the Jangsu Bay and adjoining sea of South Sea, Korea”, Korean J. Environ. Biol., 32, 75-87, 2014
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2014.32.1.075>
- [47] P. Castro and M. E. Huber, Marine Biology (8th eds), McGraw Hill Comp., NY, 461pp. 2010.
- [48] S. Iizuka, “The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan”, Bull. Plankton Soc. Japan, 32, 67-72, 1985a.
- [49] I. H. Lee and J. S. Byun, “Annual dynamics of phytoplankton diatoms in Incheon Dock”, Korean J. Phycol., 6, 69-82, 1991.
- [50] J. H. Shim and J. K. Choi, “Structure and functional changes in planktonic algal communities of the Han river”, J. Oceanol. Soc. Korea, 17, 31-41, 1978.
- [51] J. H. Shim and H. G. Yeo, “Spatial and temporal variations of phytoplankton in Chonsu Bay”, J. Oceanol. Soc. Korea, 23, 130-145, 1988.
- [52] Y. S. Kang and J. K. Choi, “Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori. Wulseong, Uljin and Youngkwang II. Distributions of standing crops and environmental variables(1992-1996)”, 『The Sea』 J. Korean Soc. Oceanogr., 7, 108-128, 2002.
- [53] J. K. Choi, J. H. Noh and Y. S. Kang, “The characteristics of phytoplankton distribution in the West Sea of Korea”. In, Choi, J.K. (ed.), The Plankton Ecology of Korean Coastal Waters, Donghwa Tech. Publ., Seoul, 30-47, 2011.
- [54] Y. H. Yoon, “Marine environment and phytoplankton community in the southwestern sea of Korea”, In, Choi, J.K. (ed.), The Plankton Ecology of Korean Coastal Waters, Donghwa Tech. Publ. Co., Seoul. pp. 68-93.
- [55] Sun, C., Wang, Y., Wu, M., Dong, J., Wang, Y., Sun, F. and Zhang, Y., 2011, “Seasonal variation of water quality and phytoplankton response patterns in Daya bay, China”, Int'l J. Environ. Res. Pub. Health, 8, 2951 - 2966, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph8072951>
- [56] T. C. Prins, X. Desmit and J. G. Baretta-Bekker. “Phytoplankton composition in Dutch coastal waters responds to changes in riverine nutrient loads”, J. Sea Res., 73, 49-63, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2012.06.009>
- [57] M. V. M. Wafer, P. Le Corre and J. L. Birren, “Nutrients and primary production in permanently well mixed temperate coastal waters”, Est. Coast. Shelf. Sci., 17, 431-446, 1983.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0272-7714\(83\)90128-2](http://dx.doi.org/10.1016/0272-7714(83)90128-2)
- [58] Y. H. Yoon, “Seasonal dynamics of phytoplankton community and red tide organisms in the Northern Kamak bay, Southern Korea”, Bull. Mar. Sci. Inst., Yosu Nat'l Fish. Univ., 4, 1-15, 1985.
- [59] Y. H. Yoon, “The characteristics on the spatio-temporal distributions of phytoplankton communities in Deukryang Bay, southwestern Korea”, Korean J. Environ. Biol., 17, 481-492, 1999.
- [60] R. Karthik, K. M. Arun, E. S., Sai, S. R. Siva and G. Padmavati, “Phytoplankton abundance and diversity in the coastal waters of port Blair, South Andaman Island in relation to environmental variables”, J. Mar. Biol. Oceanogr., 1, 2. doi:10.4172/2324-8661.1000102, pp. 6, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2324-8661>
- [61] Y. S. Kang and J. K. Choi, “Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori. Wulseong, Uljin and Youngkwang I. Species composition and distribution(1992-1996)”, Algae, 16, 85-111, 2001.
- [62] L. K. Medlin, H. J. Elwood, S. Stickel and M. L. Sogin, “Morphological and genetic variation within the diatom *Skeletonema costatum* (Bacillariophyta): Evidence for a new species, *Skeletonema pseudocostatum*”, J. Phycol., 27, 514-524, 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.0022-3646.1991.00514.x>
- [63] A. Zingone, I. Percopo, P. A. Sims and D. Sarno, “Diversity in the genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae): I. A reexamination of type material of *S. costatum* with the description of *S. grevillei* sp. nov”, J. Phycol.,

- 41, 140-150, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.04066.x>
- [64] K. Hämström, M. Ellegaard, T. J. Andersen and A. Godhe, "Hundred years of genetic structure in a sediment revived diatom population", Proc. Nat'l Acad. Sci. USA, 108, 4252-4257, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1013528108>
- [65] T. J. Smayda, "Cryptic planktonic diatom challenges phytoplankton ecologists", Proc. Nat'l Acad. Sci. USA, 108, 4269-4270, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1100997108>
- [66] G. F. Chen, G. C. Wang, B. Y. Zhang and X. L. Fan, "Morphological and phylogenetic analysis of *Skeletonema costatum*-like diatoms (Bacillariophyta) from the China Sea", European J. Phycol., 42, 163-175, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09670260601149784>
- [67] D. Sarno, W. H. C. F. Kooistra, S., Balzano, P. E. Hargraves and A. Zingone, "Diversity in the genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae): III. Phylogenetic position and morphological variability of *Skeletonema costatum* and *Skeletonema grevillei*, with the description of *Skeletonema ardens* sp. nov.", J. Phycol., 43, 156-170, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.2006.00305.x>
- [68] M. Yamada, "Recent studies on biodiversity and eco-physiological characteristics of the genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae)", Bull. Plankton Soc. Japan, 60, 18-28, 2013.
- [69] S. Iizuka, "Results of a survey of maximum chlorophyll-*a* concentrations in coastal waters of Japan", Bull. Plankton Soc. Japan, 32, 173-177, 1985b.
- [70] T. Honjo, T. Shimouse. and T. Hanaoka, "A red tide occurred at the hakozaki fishing port, Hakata bay in 1973 - The growth process and the chlorophyll content-", Bull. Plankton Soc. Japan, 25, 7-21, 1978.
- [71] M. Türkoğlu, "Temporal variations of surface phytoplankton, nutrients and chlorophyll a in the Dardanelles (Turkish Straits System): a coastal station sample in weekly time intervals", Turk J. Biol., 34, 319-333, 2010.
- [72] W. K. W. Li, D. V. Subba Rao, W. G., Harrison, J. C. Smith, J. J. Cullen, B. Irwin. and T. Platt, "Autotrophic picoplankton in the tropical ocean", Science, 219, 292-295, 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.219.4582.292>
- [73] Y. K. Shin, J. H. Shim, J. S., Jo. and Y. C. Park, "Relative significance of nanoplankton in Chonsu Bay: Species composition, abundance, chlorophyll and primary productivity", J. Oceanol. Soc. Korea, 25, 217-228, 1990.
- [74] J. H. Shim, H. G. Yeo. and Y. C. Park, "Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea. I. Biomass and Productivity", J. Oceanol. Soc. Korea, 27, 91-100, 1992.
- [75] Y. Maita and T. Odate, "Seasonal change in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funka Bay, Japan", J. Oceanogr. Soc. Japan, 44, 268-279, 1988.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02302569>
- [76] M. Yamaguchi and I. Imai, "Size fractionated phytoplankton biomass and primary productivity in Osaka Bay, Eastern Seto Inland Sea, Japan", Bull. Nansai Nat'l Fish. Res. Inst. 29, 59-73, 1996.
- [77] C. Guo, H. Liu, L. Zheng, S. Song, B. Chen and B. Huang, "Seasonal and spatial patterns of picophytoplankton growth, grazing and distribution in the East China Sea", Biogeo., 11, 1847-1862, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/bg-11-1847-2014>
- [78] U. Larsson and A. Hagstrom, "Fractionated phytoplankton primary production in Baltic eutrophication gradient", Mar. Biol., 67, 57-70, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00397095>
- [79] Y. H. Yoon and J. S. Park, "The analysis of variational characteristics of water quality and phytoplankton by principal component analysis(PCA) in Kogum-sudo, south-western part of Korea", J. Korean Environ. Sci. Soc., 9, 1-11, 2000.

윤 양 호(Yang Ho Yoon)

[정회원]



- 1984년 3월 : Nagasaki대학 대학원 수산학연구과(수산학석사)
- 1989년 3월 : Hiroshima대학 대학원 생물권과학연구과(학술박사)
- 1990년 3월 ~ 2006년 2월 : 여수대학교 교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 교수

<관심분야>

식물플랑크톤 생리·생태, 연안환경생태, 미세조류의 산업이용, 수산자원환경