

북부 가막만의 식물플랑크톤 군집 변동 해석

오석진* · 박종식** · 윤양호** · 양한섭***

*, *** 부경대 해양과학공동연구소, ** 전남대학교 수산과학과

Variation Analysis of Phytoplankton Communities in Northern Gamak Bay, Korea

Seok-Jin Oh* · Jong-Sik Park** · Yang-Ho Yoon** · Han-Soeb Yang***

*, *** Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

** Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea

요약 : 북부 가막만에서 해양환경의 변화에 따라 식물플랑크톤의 군집이 어떻게 변화하는지 기존에 발표된 식물플랑크톤 생리학적 자료를 이용하여 해석하였다. 해양환경 및 식물플랑크톤 조사는 2007년 11월부터 2008년 9월까지 2개 정점에서 관측하였다. 조사 동안 10%이상 점유율을 나타내는 우점종은 와편모조류 1종, 규조류 11종 등 총 12종이었다. 우점종의 출현 시기를 보면 규조류 *Skeletonema costatum*이 하계(7월과 8월)를 제외하고 우점하였으며, 특히 12월은 90% 이상의 매우 높은 우점율을 보였다. 그리고 나머지 기간은 규조류 *Eucampia zodiacus*와 *Chaetoceros*속이 우점하였다. 따라서 2008년 7월과 8월에 *S. costatum*이 우점하지 않는 이유를 생리학적 측면에서 살펴보면 1) *S. costatum*과 *E. zodiacus*는 모두 광온·광염성 종이지만, 하계의 수온에서는 *E. zodiacus*가 *S. costatum*보다 높은 성장속도를 보였고, 2) 7월에 낮은 부유물질의 농도는 높은 광량이 수중에 도달할 수 있어 *E. zodiacus*와 같이 광에 대한 친화성이 낮은 종도 우점할 수 있다. 또한 3) 인산염이 비교적 낮은 시기에는 성장전략을 보이는 *S. costatum*이, 높은 인산염 농도일 때 저장전략을 보이는 *E. zodiacus*종이 우점할 수 있기 때문으로 생각된다. 앞으로 더 구체적인 식물플랑크톤의 군집 변화를 알아보기 위해서는 계절별로 우점하는 대표 식물플랑크톤에 대한 생리실험이 필요할 것으로 보인다.

핵심용어 : 식물플랑크톤, 우점종, *Skeletonema costatum*, *Eucampia zodiacus*, 생리학

Abstract : Using physiological data which had been already published, we investigated variation of phytoplankton communities due to changes of marine environmental factor at 2 stations of northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008. Dominant species (occupied species above 10%) were dinoflagellates 1 species and diatom 11 species. Diatom *Skeletonema costatum* was observed as dominant species during the periods except in summer (i.e. July and August), especially, which occupied above 90% in December. On the other hand, dominant species during summer were diatom *Eucampia zodiacus* and *Chaetoceros* spp., Considering the results of other physiological studies, *S. costatum* might be non-dominant species during summer by following reasons 1) growth rate of *E. zodiacus* might be faster than that of *S. costatum* under the temperature during summer although both *S. costatum* and *E. zodiacus* are eurythermal and euryhaline species. 2) Species as *E. zodiacus* characterized by low affinity with light might have a chance to be dominant with increasing optical transparency due to low suspended solids in July. 3) In aspect of nutrition, species of growth strategist as *S. costatum* could be dominant in relatively low concentration of phosphate and species of storage strategist as *E. zodiacus* could be dominant in relatively high concentration of phosphate during summer in this study area. In order to understand the phytoplankton dynamics in detail, the physiological informations about strains isolated from this study area are necessary because physiological conditions are different depending on isolated area.

Key Words : Phytoplankton, Dominant species, *Skeletonema costatum*, *Eucampia zodiacus*, Physiology

1. 서론

가막만은 전국 굴 생산의 약 30%를 점유하고 있으며, 전체

해역의 9.9%에 해당하는 수역에서 양식업이 활발히 이루어지고 있다(이와 조, 1990). 하지만 양식장의 시설밀집에 따라 해역의 자가오염 그리고 주변 임해공업단지과 인접 도시로부터 유입되는 산업폐수와 도시하수가 다량으로 유입되고 있어 생산량은 점차 감소하고 있다(이와 권, 2007). 특히 가막만은 중앙부로부터 갈수록 수심이 낮고, 내만 측인 북쪽과 입구 쪽인 남쪽은 비교

* 대표저자 : sjoh1972@pknu.ac.kr 051-629-7377

*** 교신저자 : hsyang@pknu.ac.kr 051-629-6572

적 수심이 깊어지는 해저지형을 가지고 있어, 분지지형 형태의 북부 가막만은 해수교환이 차단되어 저층의 부영양화 및 빈산소수괴 등과 같은 환경문제가 심각하게 발생하고 있다.

한편, 연안역의 생태계에서 식물플랑크톤의 역할은 크게 2가지로 요약할 수 있다. 첫 번째 해양의 생물생산을 지지하는 1차 생산자로서의 역할, 두 번째는 지구규모의 물질순환에서 영양염을 공급 및 제거하는 역할을 들 수 있다. 이와 같이 생태계에서 중요한 위치를 차지하는 식물플랑크톤의 군집에 영향을 주는 대표적인 환경요인은 수온, 염분, 조도, 영양염 그리고 미량금속과 같은 물리·화학적 요인과 포식자의 포식압 등과 같은 생물학적 요인을 들 수 있다. 수온은 식물플랑크톤의 효소활성에 영향을 주기 때문에 그들의 성장에 밀접한 관련 있다 (Epply, 1972; Goldman and Carpenter, 1974). 염분은 세포의 삼투압과 관련이 있어 급격한 염분 변화는 원형질 분리나 세포자체를 파괴시킨다(Boney, 1979). 더욱이 이러한 염분변화는 식물플랑크톤의 공간적인 Patch형성에도 밀접한 관련이 있다 (Okubo, 1982). 연안환경에서 염분의 급격한 감소는 대부분 담수 유입에 기인한 것으로 이러한 환경에서는 높은 이류(Advection)·확산(Diffusion)을 보여 성장속도가 이류·확산보다 낮을 경우 개체군 확대가 불가능하게 된다. 하지만 보다 높은 분열 속도를 가지는 개체군은 성장할 수 있기 때문에 우점될 가능성이 높다(Yamamoto and Okai, 2000).

영양염은 생존에 필요한 물질이나 조건들이 충족되지 않은 원소에 따라 성장이 제한되는 리비히의 최소량의 법칙(Liebig's law of minimum; Lehman et al., 1975)에 따라 식물플랑크톤 종경쟁(Species competition) 및 종천이(Species succession)에 영향을 준다. 또한 Sommer(1989)는 영양염 단계 및 섭취 전략을 가지고 2가지 전략을 제시하였다. 흡수한 영양염을 재빨리 성장에 이용하는 성장전략(Growth strategist), 바로 성장하지 않고 공급된 영양염을 일단 저장하는 저장전략(Storage strategist)으로 나눈다. 영양염에 대한 반포화상수(Ks)가 낮은 종은 성장전략이 해당되며, 세포내 영양염 함유량이 높은 종은 저장전략에 따라 생존을 하게 된다. 또한 외양역과 같이 저장영양염 농도의 환경은 반포화상수가 낮은 종들이 생존하게 되며, 고영양염 농도의 환경은 성장속도가 빠른 종들이 생존하게 되지만, 이들 2가지 환경 모두 종의 다양성 측면에서 보면 낮은 결과를 가져온다.

본 연구는 북부 가막만의 해양환경의 변화에 따라 식물플랑크톤의 군집변화가 어떻게 달라지는지 기존에 발표되어진 식물플랑크톤 생리학적 자료를 이용하여 해석하는 새로운 접근을 시도해보고자 한다.

2. 재료 및 방법

북부 가막만의 식물플랑크톤의 군집에 미치는 환경특성을 파악하기 위하여 2007년 11월부터 2008년 9월까지 월 1회 조사(2008년 1월과 4월은 제외)를 원칙으로 분지형태의 해저지형에

위치하는 홍합 양식장 주변 정점(정점 1; 34° 43' 54.9"N, 127° 40' 19.3"E)과 양식장의 영향을 받지 않으며, 분지형태의 밖에 위치하는 정점(정점 2; 34° 42' 00.2"N, 127° 40' 44.1"E)을 설정하여 조사하였다(Fig. 1).

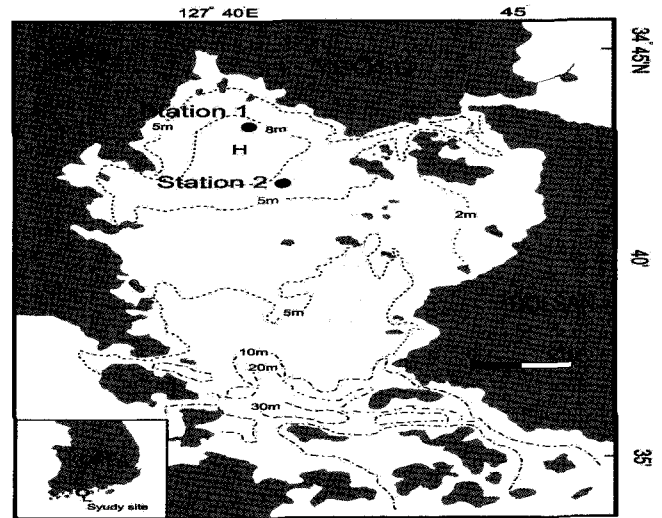


Fig. 1. Location of study area and sites in Gamak Bay, Korea.

해양환경분석을 위한 시료의 채취는 소형선박을 이용하여 0 m, 2 m, 5 m와 표층 퇴적물 위 1 m 수층(b-1 m)을 대상으로 반돈채수기를 사용하여 채수하였다. 측정항목은 수온, 염분, 부유물질, 인산염(PO_4-P) 그리고 질산염(NO_3-N)이었다. 수온과 염분은 T-S meter(YSI Co, model 85)를 이용하였으며, 나머지 분석항목은 해양환경공정시험법에 의거하여 분석하였다.

한편 식물플랑크톤 검정 및 계수는 바켓스를 사용하여 채수한 표층해수 300 mL를 중성포르말린으로 최종농도가 0.4%가 되게 고정된 후(Thronsdon, 1978), 실험실로 운반하였다. 농축은 고정해수 250 mL를 Membrane filter(Pore size: 5 μ m, Diameter: 47 mm)가 장착된 플라스틱 여과기를 이용하여 자연낙하 방법으로 최종농도가 5 ml 되도록 농축하였다. 검정은 농축된 시료 0.1 mL를 Micropipette로 계수관에 취해 광학현미경(Nikon, Japan)하에서 종의 동정과 계수를 실시하였다. 종 동정은 Chihara and Murano(1997)와 Tomas(1997)를 참조하였으며, 분류체계는 상기 동정문헌을 참조하여 정리하였다.

3. 결과

조사기간 동안 양식장 인근해역인 정점 1의 수온은 4.4~30.0°C(17.7±8.1°C)이며, 정점 2는 4.8~29.2°C(17.3±7.5°C)의 변동범위로, 정점 1이 지리적으로 내만해역에 위치하기에 정점 2보다는 변화폭이 다소 컸다. 두 정점 모두 2월에 가장 낮은 수온을(정점 1: 4.4°C, 정점 2: 4.8°C), 8월에는 가장 높은 수온

을 나타내어(정점 1: 30.0°C, 정점 2: 29.2°C), 전형적인 온대역의 수온 분포를 보였다. 그리고 표층과 저층의 수온 차이는 7월과 8월에 가장 뚜렷하게 나타났으나, 다른 시기는 그 차이가 크지 않았다(Fig. 2).

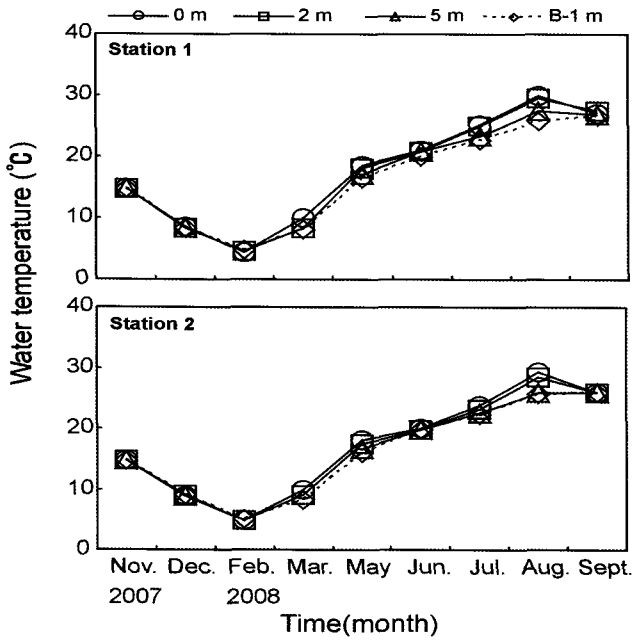


Fig. 2. Monthly variations of water temperature(°C) at study area in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

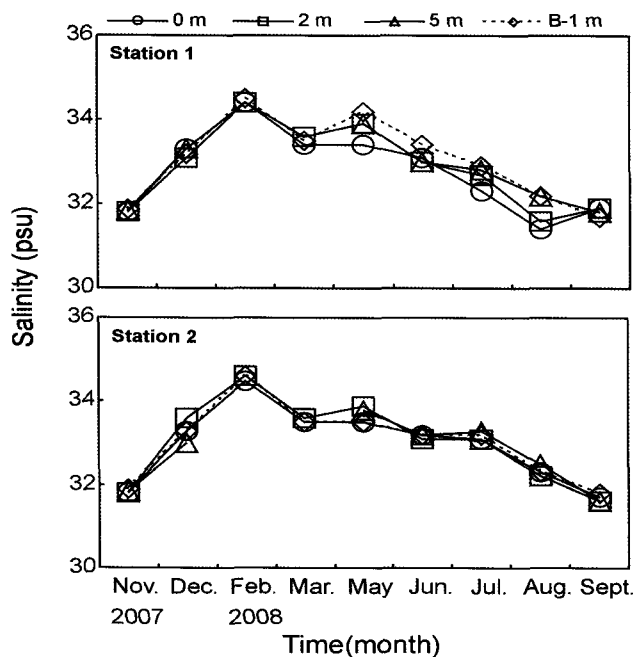


Fig. 3. Monthly variations of salinity(psu) at study area in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

염분은 정점 1에서 31.4~34.5 psu(32.9±0.9 psu), 정점 2에서 31.7~34.5 psu(33.0±0.9 psu)의 변동 범위를 나타내었다. 염분은 수온과 역상의 형태로 수온이 낮았던 2월에 가장 높은 염분농도를 보였으며(정점 1: 34.5 psu, 정점 2: 34.6 psu), 하계로 갈수록 낮아졌다. 또한 정점 1은 2007년 11월에서 2009년 3월까지 표층과 그 하부층간의 염분 농도차이가 크지 않았으나, 5월부터 수층별로 염분 농도차이가 보였고, 8월에 그 차이가 현저하게 나타났다(표층 31.4 psu 저층은 32.2 psu). 하지만 정점 2는 하계에도 상층과 하층의 염분차이가 뚜렷하지 않았다(Fig. 3).

부유물질은 정점 1에서 2.55~49.73 mg/L(15.8±11.3 mg/L)이며, 정점 2는 3.79~53.47 mg/L(19.4±12.7 mg/L)의 변동 범위를 나타내었다. 동계에는 비교적 낮은 농도였으며, 춘계로 갈수록 높은 농도를 보이다가 하계에 다시 낮아지는 분포양상으로 0, 2, 5m 층은 동계에 약 10 mg L⁻¹ 내외의 낮은 농도였으나 3, 5, 6월에 약 20 mg/L 이상의 높은 농도를 보였다. 한편 정점 1과 2의 b-1 m층에서는 다른 층에 비해 높은 부유물질 농도를 나타내는 특징을 보였으며, 특히 정점 2에서 뚜렷하였다(Fig. 4).

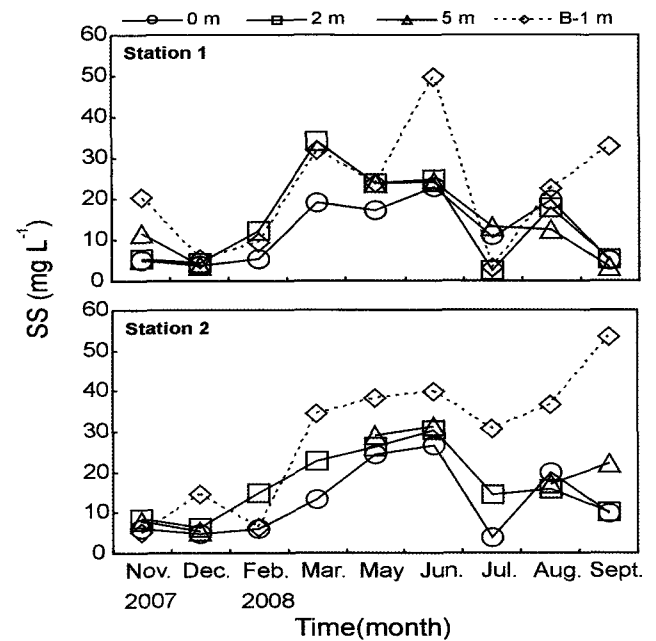


Fig. 4. Monthly variations of suspended solid(SS; mg L⁻¹) at study area in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

인산염은 정점 1에서 0.05~5.32 μM(0.51±0.88 μM)이며, 정점 2는 0.05~1.15 μM(0.42±0.29 μM)의 변동 범위를 나타내었다. 정점 1과 정점 2는 2007년 11월보다 12월에 낮은 농도를 보였으며, 2008년 2월에 다시 증가하고 6월까지 점차 감소하는 경향을 보였다. 그리고 7월부터 증가하여 9월에는 2007년 11월과 유사한 농도를 보였다. 2008년 7월에 정점 1의 b-1 m과 8월에 정점 2의 b-1 m 수층에서 각각 5.32 μM과 1.15 μM

로 아주 높은 농도를 나타내었다. 이는 강한 빈산소의 형성에 따른 혐기성 환경의 지배로 저질의 인산염 용출의 증가로 유도된 것으로 보이며, 빈산소수피가 강하게 형성되며 분지 지형에 위치하는 정점 1에서 뚜렷하였다(Fig. 5).

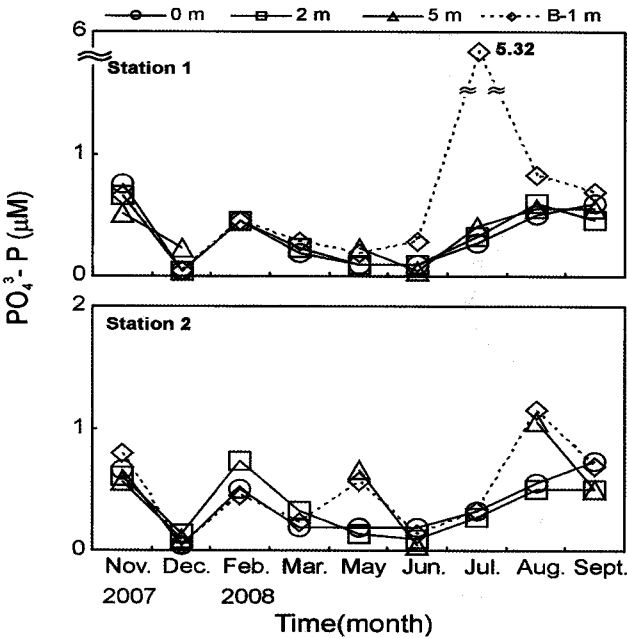


Fig. 5. Monthly variations of phosphate(μM) at study area in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

질산염은 정점 1에서 $0.49\sim 12.74\ \mu\text{M}$ ($3.87\pm 3.56\ \mu\text{M}$)이며, 정점 2에서 $0.38\sim 13.39\ \mu\text{M}$ ($4.45\pm 4.74\ \mu\text{M}$)의 변동 범위를 보였다. 인산염과 유사하게 2007년 11월보다 12월에 낮은 농도였으며, 2009년 3월까지 농도가 증가하다가, 6월까지의 일정하였다. 그 후 7월에 급격히 낮아졌으며, 정점 1은 수층별, 정점 2는 표층이 다른 수층보다 비교적 낮은 농도였다. 하지만, 빈산소수피가 강하게 형성된 시기에 인산염과 같은 농도의 증가는 보이지 않았으며, 9월까지 유사한 농도를 보였다(Fig. 6).

식물플랑크톤 현존량은 정점 1의 경우 2007년 11월에 ($1,060\times 10^3\ \text{cells L}^{-1}$), 정점 2는 2008년 12월에 가장 높았으며 ($3,081\times 10^3\ \text{cells L}^{-1}$), 그 후 점차 감소하여 2008년 3월에 정점 1에서 $30.8\times 10^3\ \text{cells L}^{-1}$, 정점 2에서 $59.6\times 10^3\ \text{cells L}^{-1}$ 로 가장 낮은 현존량을 보였다. 하지만 5월에 다시 증가하였으며(정점 1에서 $332.9\times 10^3\ \text{cells L}^{-1}$, 정점 2에서 $996.5\times 10^3\ \text{cells L}^{-1}$), 6월에 감소하였다. 그 후 정점 1에서는 8월까지 유사한 현존량을 보이다 9월에 다시 증가하였지만, 정점 1은 9월까지 계속 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 모든 시기에 정점 1보다 정점 2에서 현존량이 높았으며, 그 차이는 높은 현존량일 때 현저하였다(Fig. 7). 이는 정점 1에 위치하는 혼합 양식장의 양식생물에 따른 섭이행위가 중요한 원인으로 생각된다.

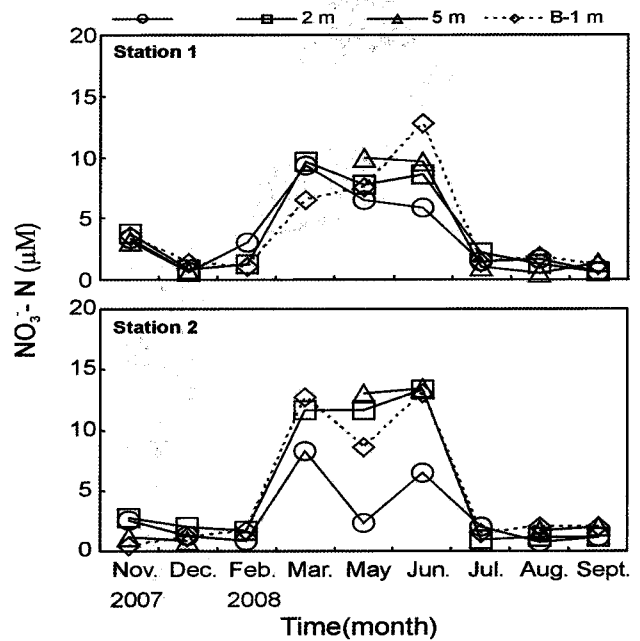


Fig. 6. Monthly variations of nitrate(μM) at study area in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

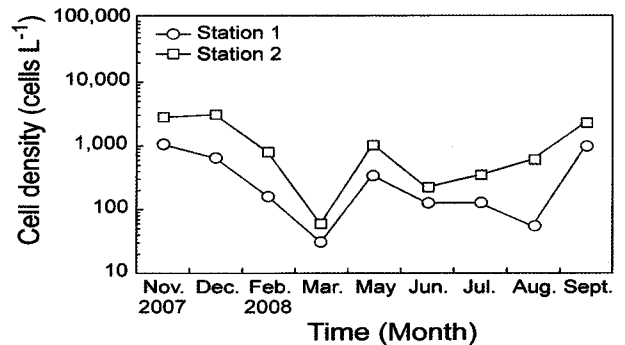


Fig. 7. Monthly variations of cell density(cells L^{-1}) at study area in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

북부 가막만에서 연간 출현하는 식물플랑크톤은 규조류가 29속 60종으로 중심목 규조류가 전체 89.82%, 우상목 규조류가 9.59%로 대부분이 규조류였다. 와편모조류는 13속 22종으로 전체 0.18% 그리고 동물성 편모조류가 3속 3속으로 0.03%였다(Fig. 8). 계절별로 가장 높은 출현 종수는 정점 2의 9월이며(30속 41종) 가장 낮은 출현 종수는 정점 1의 12월에 나타났다(10속 11종). 하지만 다른 시기는 대체적으로 유사한 종수를 나타내었으며(평균 18속 20종), 정점 1과 2사이에도 출현 종수의 차이는 거의 없었다. 이와 같은 북부 가막만 식물플랑크톤 출현종을 남해 내만해역과 비교해 보면, 가막만에서 54속 98종(윤, 1995), 여자만 34속 87종(이와 윤, 2000), 득량만

Table 1. Monthly variations of occupying rate (%) for dominant species in Gamak Bay from November 2007 to September 2008

Month	Station 1		Station 2	
	Dominant species	(%)	Dominant species	(%)
Nov.	<i>Skeletonema costatum</i>	63.8	<i>Skeletonema costatum</i>	81.4
	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	21.7	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	14.2
	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	11.8		
Dec.	<i>Skeletonema costatum</i>	94.4	<i>Skeletonema costatum</i>	98.3
Feb.	<i>Eucampia zodiacus</i>	50.8	<i>Eucampia zodiacus</i>	52.1
	<i>Skeletonema costatum</i>	34.0	<i>Skeletonema costatum</i>	21.2
Mar.	<i>Eucampia zodiacus</i>	29.9	<i>Chaetoceros curviseifus</i>	69.4
	<i>Skeletonema costatum</i>	25.3	<i>Eucampia zodiacus</i>	14.9
	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	10.4	<i>Skeletonema costatum</i>	10.2
May	<i>Chaetoceros curviseifus</i>	60.8	<i>Chaetoceros curviseifus</i>	68.2
	<i>Skeletonema costatum</i>	11.1	<i>Chaetoceros debilis</i>	14.6
			<i>Skeletonema costatum</i>	10.3
Jun.	<i>Prorocentrum triestinum</i>	17.1	<i>Chaetoceros affinis</i>	52.9
	<i>Chaetoceros affinis</i>	46.6	<i>Skeletonema costatum</i>	16.2
	<i>Skeletonema costatum</i>	11.5		
Jul.	<i>Eucampia zodiacus</i>	61.6	<i>Eucampia zodiacus</i>	32.2
			<i>Guinardia delicatissima</i>	27.2
Aug.	<i>Eucampia zodiacus</i>	13.2	<i>Chaetoceros compressus</i>	13.4
			<i>Chaetoceros radicans</i>	12.6
Sept.	<i>Chaetoceros affinis</i>	17.4	<i>Eucampia zodiacus</i>	18.3
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	44.2	<i>Skeletonema costatum</i>	12.0
	<i>Skeletonema costatum</i>	13.1		

50속 111종(이와 이, 1999), 완도연안 33속 56종(윤, 1998a)보다는 대체적으로 낮은 출현종을 나타내었으나, 목포연안(시아해) 27속 36종(윤, 1998b)과는 유사한 출현종수를 보였다. 또한 대부분 남해 내만해역에 7월에 높은 와편모조류 출현을 보이는 것에 반하여(윤, 2003), 북부 가막만은 모든 시기에 낮은 식물성 편모조류 출현양상이었다.

조류 *Skeletonema costatum*이 하계(7월과 8월)를 제외하고 우점 하였으며, 특히 12월은 정점 1과 2에서 90%이상의 매우 높은 우점율을 보였다. 그리고 6월에 와편모조류 *Prorocentrum triestinum*이 정점 1에서 우점 하였으나, 정점 2에서는 규조류 *Chaetoceros*속이 우점 하였고, 하계에는 대부분이 규조류 *Eucampia zodiacus*와 *Chaetoceros*속이 우점 하였다.

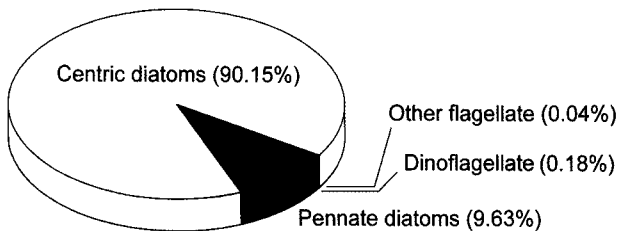


Fig. 8. Species composition of phytoplankton species in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008.

조사시기별 10%이상 점유율을 나타내는 우점종을 Table 1에 나타내었다. 전체기간동안 와편모조류 1종, 규조류가 11종 등 총 12종이 출현하였다. 우점종의 종별 출현시기를 보면 규

4. 고찰

남해안의 연안역은 하계에는 와편모조류 등의 식물성 편모조류가 우점 하는 것으로 보고되어 있지만(윤과 고, 1995; 이와 윤, 2000; 박 등, 2009), 본 해역은 모든 시기에 규조류가 우점하였다. 또한 규조류 우점종 중 *S. costatum*은 우리나라에서 계절에 관계없이 높은 우점을 보이는 종으로 알려져 있으나(문과 최, 2003), 본 해역은 하계에 *Chaetoceros*속 및 *E. zodiacus*가, 나머지 계절에는 대표적으로 *S. costatum*이 우점하였다. 따라서 현재 생리실험이 활발히 진행되고 있는 *S. costatum*과 *E. zodiacus*의 기존 보고를 이용하여 해양환경의 변화에 따라 왜 이러한 군집 천이가 일어나는지 알아보기로 한다(*Chaetoceros* 속은 생리실험이 활발히 진행되어 있지 않아 비교를 위한 자료 부족으로 제외하도록 함).

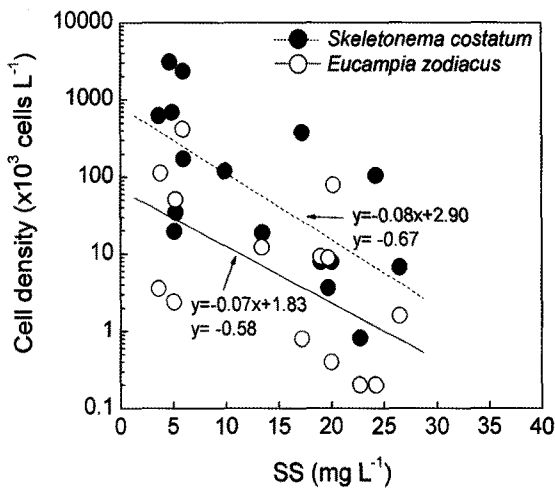


Fig. 9. Relationship between suspended solid and cell density of *Skeletonema costatum* and *Eucampia zodiacus*.

오 등(2008)에 따르면 진주만에서 *S. costatum*은 계절별 수온의 변화와 여름철 염분의 변동에서도 우점하기 때문에, 광온·광염성 종으로 보고하였다. 또한 실내실험에서 이 종이 성장 가능한 수온 범위가 2.0~30°C(Curl and McLeod, 1961; Hitchcock, 1980), 염분이 5.0~45 psu(Brand, 1984; Rijstenbil, 1989)로 넓은 범위에서 성장할 수 있어 현장의 자료와 일치하였다. Yan et al. (2002)는 중국연안수에 분리한 클론으로 최대 성장속도가 25°C 그리고 염분은 18~35 psu로 비교적 높은 수온에서 높은 분열속도를 나타내며, 염분에 대해서는 하구연에서 외양역까지 분포가 가능한 생리적 조건을 가지고 있다고 밝혔다. 하지만 Yoder(1979)는 Narragansett 만의 클론의 경우 22°C 이상에서 성장에 대한 최대임계온도(Maximum tolerable temperature)에 도달하기 때문에 성장속도의 감소를 보였으며, Hiroshima 만의 클론의 경우 15°C에서 최대성장속도를 보고하였다(Tarutani and Yamamoto, 1994). 북부 가막만의 연간 수온은 7월과 8월의 경우 20°C를 상회하였으며(Fig. 2), 염분은 유입되는 큰 강이 없어 다른 내만역에 비하여 변화가 크지 않다(Fig. 3). 만약 Narragansett 만과 Hiroshima 만의 클론과 같은 수온에 대한 생리적인 특징을 가진다면, 7월과 8월에 수온이 성장제한 요인으로 작용할 가능성이 있다. 하지만, 22°C 이상의 수온에서 Narragansett 만과 Hiroshima 만의 클론 모두 성장속도에 있어서 3.00 divisions day⁻¹ 이상으로 최대 성장속도에 70%에 해당하기 때문에 주변 경쟁 종보다 성장속도가 빠르다면 충분히 우점할 가능성이 있다.

*E. zodiacus*는 최근 해조류 백색화(Bleaching of seaweed)의 주요 원인종으로 연구 활발히 진행되고 있다. Harima-Nada에서 분리한 *E. zodiacus* 클론은 성장 가능한 수온이 7~30°C 그리고 염분은 10~35 psu로 *S. costatum*과 같이 광온·광염성 종이지만(Nishikawa, 2002), 최대성장은 25°C와 25 psu로 Narragansett 만과 Hiroshima 만의 *S. costatum* 클론보다도

높았으며, 최대성장속도는 4.29 divisions day⁻¹(원문 3.00 day⁻¹)로 같은 온도일 때 *E. zodiacus*가 *S. costatum*보다 높은 성장속도를 보여, 북부 가막만의 하계에 충분히 *E. zodiacus*가 우점할 가능성 있다.

최근 연안 해역에서 수행되는 대형 임해단지조성 및 육상기원의 현탁물 유입으로 인해 다량의 부유물질이 해양으로 투입되고 있어, 하천 하구역과 같은 곳은 소광계수가 2이상의 매우 높은 값을 나타내며, 부유물질에 따른 광량 제한이 식물플랑크톤의 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(윤, 2000, 오 등, 2008; 오 등, 2009). 본 연구에도 *S. costatum*과 *E. zodiacus*의 현존량을 부유물질과 상관관계를 조사한 결과, *S. costatum*의 상관계수는 -0.67(n=16; p<0.001)이며, *E. zodiacus*는 -0.58(n=16; p<0.01)로 비교적 양호한 음의 상관관계로 *S. costatum*이 *E. zodiacus*보다 높은 상관성을 보였다(Fig. 9). *S. costatum*는 Lederman and Tett의 모델식($\mu = \mu_m \cdot (I - I_0) / (K_I - I_0) + (I - I_0)$; μ : 성장속도, I : 광량, I_0 : 보상광량, μ_m : 최대 성장속도, K_I : 반포화광량; Lederman and Tett (1981))에 최소자승법으로 근사하여 유도된 K_I 는 Fukuoka만 클론의 경우 31.0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, I_0 는 1.0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Oh et al., 2008), Narragansett만 클론의 I_0 는 1.1-2.2 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Yoder, 1979, Langdon, 1987)로 보고되어 있다. *E. zodiacus*의 경우 Harima-Nada 클론은 K_I 가 62.8 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, I_0 가 3.08 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Nishikawa, 2002)로 *S. costatum*이 *E. zodiacus*보다 빛에 대하여 높은 친화성이 있어 *E. zodiacus*보다 낮은 광량에서 성장이 가능하고 광량의 증가에 따라 급속히 성장하는 것으로 보인다. 반면에 *E. zodiacus*는 성장을 위해서 *S. costatum*보다 높은 광량이 필요하며, 빛에 대한 성장반응이 높지 않다. 7월에 표층에 낮은 부유물질의 농도는 보다 높은 광량이 수중에 도달이 가능하기에 *E. zodiacus*가 온도적응력과 함께 하계에 우점하기 위한 호조건임을 알 수 있다.

편모조류의 조도에 대한 기존 생리실험은 대부분이 *S. costatum*보다 높은 I_0 와 K_I 를 요구하고 있으며, *E. zodiacus*보다도 I_0 가 상대적으로 높다(Table 2). 이는 같은 광 조건이라도 본 해역에서 우점하는 규조류들이 다른 외편모조류 보다 빨리 조도에 반응하여 성장할 수 있다는 것을 의미하며, 이는 높은 소광계수를 나타낼 것으로 보이는 북부 가막만에서 외편모조류가 우점할 수 없는 중요한 이유 중 하나로 생각된다. 더욱이 표층보다 더 높은 저층의 부유물질은 빛의 투과성을 현저히 저하시키기 때문에 편모조류의 저층의 이동이 어려워, 결국 편모조류의 특유의 행동양식인 일주야 운동 또한 불가능하게 될 것이다.

폐쇄성 연안역은 해수교환이 낮기 때문에 인간 활동에 따라 육지로부터 유입되는 과잉영양염이 식물플랑크톤을 과대 성장시키고, 생산되어진 입자성 유기물은 저층에 침강하여 축적된다. 박테리아의 활동은 침강된 유기물을 분해하고 산화환경을 환원환경으로 변화시켜 빈산소 수괴가 출현하게 된다. 또한 환원상태는 저질 입자에 흡착되어 있는 무기인 및 질소

Table 2. Summary of compensation photon flux density(I_0) and half-saturation light intensity(K_L) reported for dinoflagellates and raphidophytes

species (strain)	I_0	K_L	references
	$\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$		
<i>Alexandrium tamarens</i> (Mikawa Bay strain)	45.0	62.0	Yamamoto et al. (1995)
<i>Akashiwo sanguinea</i> (Hakata Bay strain)	14.4	92.5	Matsubara et al. (2007)
<i>Cochlodinium polykrikoides</i> (Inokushi Bay strain)	9.76	32.0	Oh et al. (2006)
<i>Karenia mikimotoi</i> (Hiroshima Bay strain)	0.7	53.6	Yamaguchi et al (1989)
<i>Gymnodinium catenatum</i> (Yeasuhae Bay strain)	10.4	42.6	Oh and Yoon (2004)
<i>Gyrodinium instriatum</i> (Hakata Bay strain)	10.6	46.8	Nagasoe et al. (2006)
<i>Heterocapsa circularisquama</i> (Nishiura strain)	17.1	52.8	Oh et al. (2008)
<i>Chattonella antiqua</i> (Osaka Bay strain)	10.3	42.4	Yamaguchi et al. (1991)
<i>Chattonella marina</i> (Gamak Bay strain)	11.4	56.9	Noh et al. (2006)

를 용출 시킨다. 특히 북부 가막만의 경우 그 정도가 심각하여, 하계에 빈산수괴가 빈번히 출현이 보고되고 있으며(김 등, 2006), 본 조사에서도 빈산수괴의 출현한 7월에 저층의 영양염이 다른 계절보다 3-5배 이상의 고농도를 보였다. Tarutani and Yamamoto(1994)는 *S. costatum*(Hiroshima 만 클론)의 인산염 흡수 동력학 실험을 수행한 결과, 반포화상수(K_p)는 $0.68 \mu\text{M}$, 최대흡수속도(ρ_{max})는 $38.4 \text{ fmol cell}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 그리고 인산염 성장 동력학 실험을 통한 최소 세포내 인 함유량(Q_{p0})은 $2.80 \text{ fmol cell}^{-1}$ 로 보고하였다. 인산염 흡수 동력학 실험은 정상상태의 조건하에서 Surge uptake(=Luxury uptake) 기간 내에서 평가되기에 현장의 생리적 조건과 차이가 있을 수 있으나, 최대 흡수 능력을 알기 위해서 잘 이용되고 있다(Harrison et al., 1989). 본 해역의 인산염의 농도를 *S. costatum*의 K_p 와 비교하였을 경우 *S. costatum*의 현존량이 낮았던 7월과 8월과 유사하였다. 더욱이 이 시기의 저층의 높은 영양염 농도는 상층부에도 영향을 줄 것으로 보여, 다른 시기보다 성장에 있어서 유리한 조건일 것으로 생각된다. 이를 보다 정량화하기 위해서 인산염의 농도를 이류와 확산에 따라 상·하층으로 교환된다고 가정하여 수층을 평균화하고, Tarutani and Yamamoto(1994)에 의해 얻어진 상기의 변수를 Michaelis-Menten 식($\rho = \rho_{\text{max}} \cdot S / K_p + S$; ρ : 흡수속도, S : 영양염 농도; Dugdale(1967))에 대입하여 ρ 를 구하였다. 이를 다시 Q_{p0} 으로 나누어 비흡수속도(V)를 구하고, 최대 비 흡수속도(specific uptake rate; $\rho_{\text{max}} / Q_{p0} = V_{\text{max}}$; 329 day^{-1})에 대한 비율을 구하였다(Fig. 10). 2008년 7월과 8월은 다른 시기에 비하여 V_{max} 의 50% 이상에 도달 할 수 있는 인산염 농도가 해수 중에 존재하였으며, 오히려 *S. costatum*이 90% 이상 우점 하

었던 2007년 12월은 V_{max} 의 약 10%정도에 도달할 수 있는 인산염 농도만이 해수 중에 존재하였다. 오와 윤(2004)에 의하면 이 종의 친화성지수(Affinity index; $\alpha = V_{\text{max}} / K_p$)가 411로 다른 식물플랑크톤보다 높아, 낮은 영양염의 환경에서도 빨리 흡수하여 성장할 수 있기 때문에 Sommer(1989)의 성장전략 종으로 생각된다.

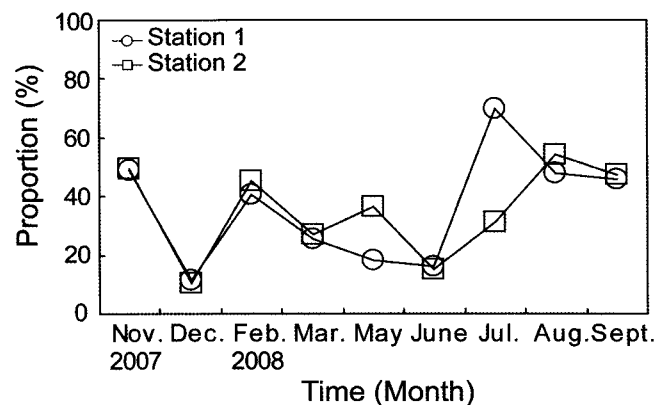


Fig. 10. Monthly variations of proportion between specific uptake rate(V) calculated from average phosphate concentration in the northern Gamak Bay from November 2007 to September 2008 and specific maximum uptake rate(V_{max}) calculated by physiological data cited by Tarutani and Yamamoto (1994). 100% means that ambient DIP concentration is theoretically sufficient condition to reach the V_{max} .

*E. zodiacus*는 인산염 흡수 동력학 실험이 수행되어 있지 않아 상기의 *S. costatum*과 비교하기 어렵지만 Nishikawa and Hori(2004)가 수행된 Monod 식($\mu = \mu_{max} \cdot S / (K_{mp} + S)$; μ : 성장속도, S: 영양염 농도, K_{mp} : 반포화상수; Monod, 1949)에 따라 도출된 인산염 K_{mp} 는 0.31 μM 로 강(2009)이 *S. costatum*의 진해만 클론을 이용하여 같은 방법을 계산 한 K_{mp} (0.56 μM)와 유사하였으며, 규조류 *Coscinodiscus wailesii*의 K_{mp} (2.1-5.1 μM)보다 낮아(Eppley et al., 1969), *E. zodiacus*는 대형규조류 중에서도 낮은 K_{mp} 농도를 보였다. 더욱이, Q_{P0} 는 0.16 pmol cell^{-1} 로 *S. costatum*보다 약 10^2 정도 높았으며(Nishikawa and Hori, 2004), Morel(1987)이 제시한 $Q_{max} = Q_{min} \cdot \mu'_{max} / (\mu'_{max} - \mu_{max})$ 로 세포내 최대 영양염 함유량을 계산하여도 4.16 pmol cell^{-1} 로 와편모조류 *Gymnodinium catenatum*과 유사한 함유량(6.19 pmol cell^{-1})을 보였다(오 등, 2007). 이 종은 다른 규조류보다 높은 세포내 영양염 함유량을 보이기에 저장전략에 해당하는 것으로 생각된다. 따라서 본 종은 비교적 높은 영양염 농도에 필요량 이상의 영양염을 흡수하여 영양염의 공급이 없을 경우 세포내에 축적된 영양염을 이용하여 성장할 수 있을 것이다. 따라서 본 해역의 낮은 농도의 시기에는 *S. costatum*과 같은 성장전략종이 우점하며, 2월, 3월, 6월, 8월과 같이 비교적 타 시기보다 높은 인산염 농도일 때 *E. zodiacus*과 같은 축적전략종이 우점할 것이다.

*S. costatum*의 질산염 흡수 동력학 실험에서 유도된 반포화상수(K_n)와 Monod 식에 따른 질소 성장 동력학 실험으로 유도된 반포화상수(K_m)는 각각 1.5 μM 과 1.81 μM 로 보고되어 있다(강, 2009). 본 연구해역에서 질산염 농도는 모든 기간에 높은 농도를 보였으며, 특히 2008년 3월부터 6월까지의 전 층에서 K_n 과 K_m 보다 3-4배 정도 높았고, 7월과 8월도 K_n 과 K_m 과 유사한 농도였다. 따라서 질산염도 *S. costatum*의 성장을 제한하는 영양염이 아닌 것으로 생각된다. *E. zodiacus*는 Monod 식에 따른 성장 동력학 실험으로 유도된 K_m 이 0.86 μM 으로 *S. costatum*보다 약 2배 낮은 농도를 보여(Nishikawa and Hori, 2004), 인산염보다 높은 친화성이 있는 것으로 생각된다. 따라서 본 해역의 질산염 농도는 인산염 보다 *E. zodiacus*에 필요한 농도가 존재하기 때문에 *S. costatum*과 같이 종의 천이에 영향을 주는 요인으로 생각되지 않는다. 또한 질산염에 대한 구체적인 생리학적 자료가 부족하여 인산염과 같은 영양염 단계 및 섭취 전략을 도출하기는 어렵지만, 세포내 질소 함유량도 세포내 인 함유량에 대하여 대체적으로 Redfield 비(N:P=16:1)의 관계가 있기 때문에 인산염에 도출된 생존전략과 크게 다르지 않을 것으로 보인다.

따라서 2008년 7월과 8월에 *S. costatum*이 다른 시기와 달리 우점하지 않는 이유는 1) *S. costatum*과 *E. zodiacus*는 모두 광온·광염성 종이지만, 하계의 수온에서는 *E. zodiacus*가 *S. costatum*보다 높은 성장속도를 보이며, 2) 7월에 낮은 부유물질의 농도는 보다 높은 광량이 수중에 도달이 가능하여 *E. zodiacus*와 같이 광에 대한 친화성이 낮은 종도 우점이 가능할 것으로 보이고, 3) 인산염이 비교적 낮은 시기에는 성장전

략을 보이는 *S. costatum*종이, 높은 인산염 농도일 때 저장전략을 보이는 *E. zodiacus*종이 우점 할 가능성이 높기 때문으로 생각된다. 앞으로 더 구체적인 식물플랑크톤의 군집 변화를 알아보기 위해서는 Gallagher(1982) 그리고 이와 심(1995)의 보고와 같이 해역별로 분리된 클론의 생리적인 조건이 다르기 때문에 계절별로 우점 하는 식물플랑크톤을 대상으로 생리실험을 통한 데이터의 축적이 필요할 것으로 보인다. 더욱이 이들 자료들을 바탕으로 수치모델을 이용한 재현실험 그리고 감도해석(Sensitive analyse)과 같은 환경변수의 변화에 따른 개체군의 변화도 고려하여야 한다. 또한 북부 가막만의 경우 이매패류의 양식이 활발하기에 이들 양식생물들에 따른 식물플랑크톤의 포식율이 얼마나 군집 변화에 영향을 미치는지 평가도 있어야 할 것이다.

사 사

본 연구의 수행에 있어 도움을 준 부경대학교 해양지구화학 연구실 및 전남대학교 연안환경생태학 연구실의 실원들에게 고마움을 표한다. 이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-353-C00060)로 지원기관에 감사를 표한다.

참 고 문 헌

- [1] 강인석(2009), 부유성규조류 *Skeletonema costatum*과 저서성 규조류 *Nitzschia* sp.의 성장에 미치는 광학적 특성과 그에 따른 영양염 성장 동력학, 전남대학교 석사학위논문, p. 84.
- [2] 김정배, 이상용, 유준, 최양호, 정창수, 이필용(2006), 가막만의 빈산소 수괴의 특성, 한국해양환경공학회지, 제9권, pp. 216-224.
- [3] 노일현, 윤양호, 김대일, 오석진(2006), 가막만에서 분리한 유해성 침편모조류 *Chattonella marina* (Subrahmanyn) Hara et Chihara (Raphidophyceae)의 성장에 미치는 수온, 염분 및 빛의 영향, 한국수산학회지, 제39권, pp. 487-494.
- [4] 문성기, 최철만(2003), 국내 해양식물플랑크톤의 주요종과 분포에 대한 조사, 한국환경과학지, 제12권, pp 725-733.
- [5] 박종식, 윤양호, 오석진(2009), 한국 남해 가막만 입구해역의 식물플랑크톤 군집 변동 특성, 한국환경생물학회지, 제27권, pp. 202-215.
- [6] 오석진, 윤양호(2004), 여수해만에서 분리한 유독 와편모조류 *Gymnodinium catenatum* (Graham)의 성장에 미치는 수온, 염분과 광조건, 한국조류학회지, 제19권, pp. 293-301.
- [7] 오석진, 윤양호, 김대일, 島崎洋平, 大島雄治, 本城凡夫(2006), 유해성 적조생물, *Cochlodinium polykrikoides*

- Margalef (Dinophyceae) 성장에 영향을 미치는 광량과 파장, 한국조류학회지, 제21권, pp. 311-316.
- [8] 오석진, 윤양호, 양한섭(2007), 여수해만산 유독 와편모조류 *Gymnodinium catenatum* (Graham)의 용존태 무기인에 대한 성장 및 흡수, 한국수산학회지, 제40권, pp. 95-101.
- [9] 오석진, 강인석, 윤양호, 양한섭(2008), 진해만에서 분리한 중심목 규조류 *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve의 성장에 미치는 광학적 특성, 한국환경생물학회지, 제26권, pp. 57-65.
- [10] 오석진, 강인석, 윤양호, 양한섭, 박종식(2009). 생물학적 환경정화를 위한 부착미세조류 *Nitzschia* sp.의 성장에 미치는 광학적 특성과 그에 따른 인산염 성장 동력학, 바다, 제14권, pp. 205-212.
- [11] 윤양호(1995), 가막만 북부해역의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 변동특성 2. 식물플랑크톤 군집의 계절동태와 적조원인생물, 여수수산대학교 수산과학연구소 연구보고지, 제4권, pp. 1-15.
- [12] 윤양호, 고남표(1995), 거금수도내 양식어장의 해양환경 특성 I. 식물플랑크톤 군집의 계절변동, 한국양식학회지, 제8권, pp. 47-58.
- [13] 윤양호(1998a), 완도 신지연안해역 식물플랑크톤 군집구조 특성, 여수대 논문집, 여수수산대학교 수산과학연구소 연구보고지, 제12권, pp. 651-664.
- [14] 윤양호(1998b), 시아해 식물플랑크톤 군집의 계절변동특성, 한국환경생물학회지, 제16권, pp. 403-409.
- [15] 윤양호(2000), 가막만 북부해역의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 변동특성 2. 수질환경과 엽록소 *a*량의 변동 특성, 한국환경과학회지, 제9권, pp. 429-436.
- [16] 윤양호(2003), 한국 남서해역의 식물플랑크톤 군집 출현 및 분포 특성, 여수수산대학교 수산과학연구소 연구보고지, 제12권, pp. 1-17.
- [17] 이규형, 조규대(1990), 가막만의 수온과 염분의 분포, 한국수산학회지, 제23권, pp. 25-39.
- [18] 이원호, 심재형(1995). 한국연안 산 구조 *Skeletonema costatum*의 조도에 대한 생태적지위 성분의 종내 변이, 한국해양학회지, 제30권, pp. 436-441.
- [16] 이진환, 이은호(1999), 득량만의 수질과 식물플랑크톤 적조, 한국환경생물학회지, 제17권, pp. 271-278.
- [17] 이문옥, 권영아(2007), 해양환경이 굴 양식에 미치는 영향 II, 2007년도 추계 한국해양환경공학회 학술대회 논문집, 인천, pp. 77-81.
- [18] 이진환, 윤수미(2000) 여자만의 수질과 식물플랑크톤 군집, 한국조류학회지, 제15권, pp. 89-98.
- [19] Boney, A. D.(1979), Phytoplankton. Camelot Press, Southampton, p. 116.
- [20] Brand, L. E.(1984), The salinity tolerance of forty-six marine phytoplankton isolates, Estuaries Coastal Shelf Sci., Vol. 18, pp. 543-556.
- [21] Chihara, M. and M. Murano.(1997), An illustrated guide to marine plankton in Japan, Tokai Univ. Press, Tokyo, p. 1574.
- [22] Curl, H. and G. C. McLeod.(1961), The physiological ecology of a marine diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.), J. Mar. Res., Vol. 19, pp. 70-88.
- [23] Dugdale, R.C.(1967) Nutrient limitation in the sea: dynamic, identification, and significance. Limnol. Oceanogr., Vol. 12, pp.685-695.
- [24] Eppley, R. W., J. N. Rogers and J. J. McCarthy.(1969), Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton, Limnol. Oceanogr., Vol. 14, pp. 912-920.
- [25] Epply, R. W.(1972), Temperature and phytoplankton growth in the sea, Fish. Bull. Nat. Ocean. Atmos. Adm., Vol. 70, pp. 1063-1085.
- [26] Gallagher, J. C.(1982), Physiological variation and eletrophoretic banding patterns of genetically different seasonal population of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae), J. Phycol., Vol. 18, pp. 148-162.
- [27] Goldman, J. C. and E. J. Carpenter.(1974), A Kinetic approach to the effect of temperature on algal growth, Limnol. Oceanogr., Vol. 19, pp. 756-766.
- [28] Harrison, P. J., J. S. Parslow and H. L. Conway. (1989), Determination of nutrient uptake kinetic parameters: a comparison of methods, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 52, pp. 301-312.
- [29] Hitchcock, G. L.(1980), Influence of temperature on the growth rate of *Skeletonema costatum* in response to variations in daily light intensity, Mar. Biol., Vol. 57, pp. 261-269.
- [30] Langdon, C.(1987), On the causes of inter specific differences in the growth-irradiance relationship for phytoplankton. Part I. A comparative study of the growth-irradiance relationship of three marine phytoplankton species: *Skeletonema costatum*, *Olisthodiscus luteus* and *Gonyaulax tamarensis*, J. Plankton Res., Vol. 9, pp. 459-482.
- [31] Lederman, T. C. and P. Tett.(1981), Problems in modeling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton, Bot. Mar., Vol. 24, pp. 125-134.
- [32] Lehman, J. T., D. B. Botkin and G. E. Likens.(1975), The assumptions and rationales of computer model of phytoplankton population dynamics, Limnol. Oceanogr., Vol. 20, pp. 343-363.
- [33] Matsubara, T., S. Nagasoe, Y. Yamasaki, T. Shikata, Y. Shimasaki, Y. Oshima and T. Honjo.(2007), Effects

- of temperature, salinity and irradiance on the growth of the dinoflagellate *Akashiwo sanguinea*, J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol. 342, pp. 226-230.
- [34] Monod, J.(1949), The growth of bacterial cultures, Ann. Rev. Microbiol., Vol. 3, pp. 371-394.
- [35] Morel, F. M. M.(1987), Kinetics of nutrient uptake and growth in phytoplankton, J. Phycol., Vol. 23, pp. 137-150.
- [36] Nagasoe, S., D. I. Kim, Y. Shimasaki, Y. Oshima, M. Yamaguchi and T. Honjo.(2006), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the red tide dinoflagellate *Gyrodinium instriatum* Freudenthal et Lee, Harmful Algae, Vol. 5, pp. 20-25.
- [37] Nishikawa, T.(2002), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the diatom *Eucampia zodiacus* caused bleaching of seaweed *Porphyra* isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 68, pp. 356-361.
- [38] Nishikawa, T. and Y. Hori.(2004), Effects of nitrogen, phosphorus and silicon on the growth of the diatom *Eucampia zodiacus* caused bleaching of seaweed *Porphyra* isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 70, pp. 31-38.
- [39] Okubo, A.(1982), Horizontal dispersion and critical scales for phytoplankton patches. In: Spatial Pattern in Plankton Communities, Ser. IV, 3. Steele, J. H. ed. Plenum Press, New York and London, pp. 21-42.
- [40] Oh, S. J., D. -I. Kim, T. Sajima, Y. Shimasaki, Y. Matsuyama, Y. Oshima, T. Honjo and H. -S. Yang.(2008), Effects of irradiance of various wavelengths from light-emitting diodes on the growth of the harmful dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* and the diatom *Skeletonema costatum*, Fisheries Sci., Vol. 74, pp. 137-145.
- [41] Rijstenbil, J. W.(1989), Competitive interaction between *Ditylum brightwelli* and *Skeletonema costatum* by toxic metabolites, Neth. J. Sea Res., Vol. 23, pp. 23-27.
- [42] Sommer, U.(1989), The role of competition for resources in phytoplankton succession, In: Plankton communities, Springer-Verlag, Paris, pp. 57-106.
- [43] Tarutani, K. and T. Yamamoto.(1994), Phosphate uptake and growth kinetics of *Skeletonema costatum* isolated from Hiroshima Bay, J. Fac. Appl. Biol. Sci., Vol. 33, pp. 59-64.
- [44] Throndsen, J.(1978), Preservation and storage. In: Phytoplankton manual, Sournia, A., ed., Unesco, Paris, pp. 69-74.
- [45] Tomas, C. R.(1997), Identifying marine phytoplankton, Academic Press, London, p. 858.
- [46] Yamaguchi, M. and T. Honjo.(1989), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the noxious red tide flagellate *Gymnodinium nagasakiense* (Dinophyceae), Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 55, pp. 2029-2036.
- [47] Yamaguchi, M., I. Imai and T. Honjo.(1991), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the noxious red tide flagellate *Chattonella antiqua* and *C. marina* (Raphidophyceae), Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 57, pp. 1277-1284.
- [48] Yamamoto, T., Y. Yoshizu and K. Tarutani.(1995), Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* isolated from Mikawa Bay, Japan, Jpn. J. Phycol., Vol. 43, pp. 91-98.
- [49] Yamamoto, T. and M. Okai.(2000), Effects of diffusion and upwelling on the formation of red tides, J. Plankton Res., Vol. 22, pp. 363-380.
- [50] Yan, T., M. Zhou and P. Qian.(2002), Combined effects of temperature, irradiance and salinity on growth of diatom *Skeletonema costatum*, Chinese Journal of Oceanology and Limnology, Vol. 20, pp. 237-243.
- [51] Yoder, J. A.(1979), Effect of temperature on light-limited growth and chemical composition of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae), J. Phycol., Vol. 15, pp. 362-370.

원고접수일 : 2009년 10월 12일

원고수정일 : 2009년 11월 09일 (1차)

: 2009년 12월 04일 (2차)

게재확정일 : 2009년 12월 24일