

# 진해만에서 분리한 중심목 규조류 *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve의 성장에 미치는 광학적 특성

오석진 · 강인석<sup>1</sup> · 윤양호<sup>1,\*</sup> · 양한섭

부경대학교 해양과학공동연구소, <sup>1</sup>전남대학교 대학원 수산과학과

## Optical Characteristic on the Growth of Centric Diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve Isolated from Jinhae Bay in Korea

Seok Jin Oh, In Seok Kang<sup>1</sup>, Yang Ho Yoon<sup>1,\*</sup> and Han-Soeb Yang

Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, Daeyeon-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

<sup>1</sup>Department of Fisheries Science, Graduate School of Chonnam National University, San 96-1, Dundeok-dong, Yeosu 550-749, Korea

**Abstract** – The effects of light quality and irradiance on the growth of centric diatom, *Skeletonema costatum* (Jinhae Bay strain) were investigated in the laboratory. At 20°C and 30 psu, the irradiance-growth curve showed the maximum growth rate of 1.17 day<sup>-1</sup> with half-saturation photon flux density (PFD) (K<sub>s</sub>) of 92.4 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, μ=1.17 (I – 5.28)/(I+81.8), (r=0.98), and a compensation PFD (I<sub>0</sub>) was 5.28 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. The I<sub>0</sub> equated to a depth of 3 ~ 5 m from March to May, 11 m in June and 4 m from July to September in Jinhae Bay. These responses suggested that irradiance at the depth near the surface layer in Jinhae Bay would provide favorable conditions for *S. costatum*. To assess the effects of light (*i.e.* wavelengths) on the growth, nine wavelengths were used ranging from near ultraviolet to near-infrared supplied by light emitting diode. At an irradiance level of 25 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, *S. costatum* grew under wavelengths of 405, 470, 505, 525, 568 and 644 nm, but did not grow at 590 and 623 nm; whereas *S. costatum* grew at all wavelengths at 100 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. This implies that *S. costatum* is likely to grow well in enclosed water bodies where suspended particles absorbs most of the blue wavelengths, and dominated by yellow-orange wavelengths.

**Key words** : Jinhae Bay, centric diatom, *Skeletonema costatum*, irradiance, wavelength

### 서 론

해양에서 일차생산을 결정하는 요인으로 수온, 광, 영

양염류, 미량금속 등이 있다. 이 중에서 가장 큰 변화를 보이는 것은 광으로, 광합성에 피해를 줄 정도의 강한 광 조건에서 광합성이 이루어질 수 없는 약한 광 조건 까지 지역과 수심에 따라 변화하고 광 스펙트럼 분포도 현저히 다르다. 또한 우리나라와 같이 4계절이 뚜렷한 온대해역은 광 조건의 변화 범위가 매우 크다. 더욱이

\* Corresponding author: Yang Ho Yoon. Tel. 061-659-3142. Fax. 061-659-3149. E-mail. yoonyh@chonnam.ac.kr

최근 연안해역에서 수행되는 대형 임해단지조성 및 육상기원의 현탁물 유입으로 인해 다량의 부유물질이 해양으로 투입되고 있어, 하천 하구역과 같은 곳은 소산계수가 2 이상의 매우 높은 값을 나타내며, 부유물질에 따른 광량 제한이 식물플랑크톤의 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(윤 2000; 오 등 2008). 이러한 부유물질이 많은 곳은 파장 또한 변화하게 된다. 광 파장은 식물플랑크톤의 광합성을 조절하는 중요한 요인으로(Sánchez-Saavedra and Voltolina 1994), 식물플랑크톤의 종 천이 및 수직·수평 분포에 크게 영향을 미친다.

*Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve은 우리나라 연안해역에서 광범위하게 출현하는 종이다(문과 최 2003). 지금까지 국내의 *S. costatum*의 생리학적인 연구는 이와심(1995)이 생태적지위 성분의 종내 변이성을 파악하기 위해 국내 9개 장소에 분리한 클론을 이용하여 조사한 결과, 중 수준에서 동일한 분류군에 속하더라도 다른 생리·생태적 특성을 가진다고 보고하여, Gallagher(1982)와 같은 결과를 도출하였다. 함 등(2002)는 triorganotin이 식물성 플랑크톤의 미치는 영향을 알기 위해 *S. costatum*을 이용한 단기 그리고 장기 독성실험을 수행한 결과, 플랑크톤의 성장에 중요하게 영향을 주는 것으로 나타났다. 강과 김(2006)은 인위적인 동물플랑크톤 첨가에 따른 중형 폐쇄생태계 내 플랑크톤 변동을 수행하였으며, *S. costatum*은 초식자인 요각류가 감소하더라도 배양제에서 그들의 현존량을 증가시키지 못한다고 보고하였다. 이는 식물플랑크톤의 빠른 침강, 질소 결핍을 이유로 들었다. 하지만 이들 논문 이외에 생리실험의 자료를 활용하여 자연환경에서 왜 *S. costatum*이 우리나라 연안역에서 우점 하는지 밝힌 보고는 극히 드물다. 특히 식물플랑크톤의 종 천이에 미치는 수온, 염분, 조도, 영양염 그리고 미량금속과 같은 물리·화학적 요인과 포식자의 포식압 등과 같은 생물학적 요인을 알기 위한 우리나라 *S. costatum* 클론을 이용한 생리학적 데이터는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 첫 번째 단계로 우리나라 연안에서 4계절 우점하는 *S. costatum*의 광학적 특성을 진해만에서 분리한 클론을 이용하여 밝히고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. *Skeletonema costatum*의 분리와 배양

*S. costatum*의 세포는 2007년 7월 진해만 서쪽 연안(35°6′9.43″N, 128°47′24.93″E)에서 채수한 해수로부터 pasteur pipette (ca.  $\phi$  50~100  $\mu$ m)를 이용하여 분리 하였

다. 분리된 세포는 여과해수(Sterivex-GS, 0.22  $\mu$ m filter unit with a filling bell; Millipore, Billerica MA US)에 4~5회 세척한 후 배양튜브(TB-2800, Tokyo Japan)에 이식하였다. 사용된 배지는 부산시 기장 앞 해수를 바탕으로 한 f/2-Si (Guillard and Ryther 1962)로 selenium ( $H_2SeO_3$ )을 최종농도가 0.001  $\mu$ M되게 첨가하였다. 배양온도와 염분의 조건은 현장수온과 염분에 상응하는 조건(25°C, 30 psu)으로, 광량은 약 100  $\mu$ mol photons  $m^{-2} s^{-1}$  (12L : 12D; cool-white fluorescent lamp)에서 실시하였다. 분리되어진 *S. costatum*에 대한 무균화 처리는 수행 하지 않았지만, 2차 생물학적 오염을 막기 위해 모든 실험기구는 autoclave (202 kpa, 20 min) 또는 건조멸균 (185°C, 1 hr)하여 사용하였고, 모든 실험은 clean bench에서 수행하였다.

### 2. 광 조건에 따른 *Skeletonema costatum*의 성장 속도 변화

광 조건에 따른 성장속도는 현미경에 이용한 직접 검정이 아닌, *in vivo* chlorophyll 형광값과 세포수의 관계로 평가하였다. 이 방법은 형광광도계에서 직접 측정이 가능한 배양튜브를 이용하기에 세포밀도의 확인을 위한 배양튜브의 개폐가 없어 초기 배양상태를 계속 유지할 수 있으며, 대량의 표본을 신속히 처리 할 수 있다는 장점을 가진다(Brand *et al.* 1981).

*S. costatum*을 수온 20°C, 염분 30 psu 그리고 광량 100  $\mu$ mol  $m^{-2} s^{-1}$  (12L : 12D; cool-white fluorescent lamp; FL400, Kum-Ho, Seoul Korea)의 조건에서 세포밀도 약  $3.0 \times 10^4$  cell  $mL^{-1}$ 까지 성장시킨 후 농축과 희석을 통해 여러 가지 세포밀도의 변화를 주어, 형광광도계 (Model 10-AU-005, Turner Designs, USA)로 *in vivo* chlorophyll

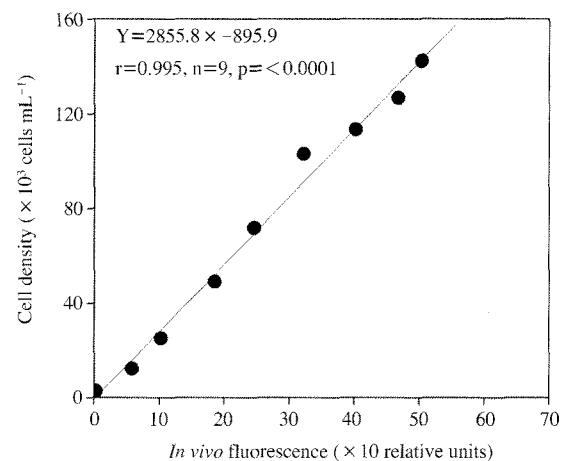


Fig. 1. Relationship between cell density and *in vivo* chlorophyll fluorescence of *Skeletonema costatum*.

형광값을 측정하였다. 측정은 안정한 형광값을 얻기 위해 약 5분 동안 암 조건에서 방치 후 측정하였다 (Brand *et al.* 1981). 그리고 현미경에서 측정한 세포수를 이용하여 세포밀도와 형광값의 관계를 구하였다. 결과 *S. costatum*의 세포밀도와 *in vivo* chlorophyll 형광값 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립되었다 (Fig. 1).

$$(\text{Cell density}) = 2855.8 (\text{Fluorescence}) - 895.9 (r=0.995) \quad (1)$$

수온 20°C, 염분 30 psu 그리고 광량 100 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (12L : 12D; cool-white fluorescent lamp)의 조건에서 유지 배양을 한 *S. costatum*을 9 mL 배양튜브 (10 × 100 mm)에 f/2-Si 배지 5 mL를 주입하여, 최종 세포밀도는 약 1 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup> 되도록 접종하였다. 광 조건은 가시광선 차단필름을 이용하여 10, 25, 50, 75, 100, 150, 300, 400 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (QSL-2100, Biospherical Instrument Inc., San Diego CA USA)의 8 단계로 조절하였다. 매일 1회 오전 10시에 형광광도계로 측정하였다. 성장속도는 대수성장 (exponential growth)을 보이는 기간 동안의 형광 값을 이용하여 다음 (1)식에 의해 계산하였다.

$$\mu = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{N_t}{N_0} \quad (2)$$

N<sub>0</sub>, N<sub>t</sub> : 대수성장기에서 초기와 t시간 (day) 후의 세포수 (cells mL<sup>-1</sup>)

Δt : 대수성장기의 배양시간 (day)

각각의 광조건 실험은 triplicate로 수행하였으며, 성장속도는 이들의 평균값으로 나타냈었다 (단, triplicate 중 명백히 오류로 판명된 값은 평균시 제외함). 성장속도와 광량의 관계는 Lederman and Tett (1981)의 모델을 개량한 다음 (2)식을 이용하여 계산하였다.

$$\mu = \mu_m \frac{I - I_0}{(K_s - I_0) + (I - I_0)} \quad (3)$$

μ : 성장속도 (specific growth rate; day<sup>-1</sup>)

I : 광량 (irradiance; μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

I<sub>0</sub> : 보상광량 (compensation PFD; μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

μ<sub>m</sub> : 최대 성장속도 (maximum specific growth rate; day<sup>-1</sup>)

K<sub>s</sub> : 반포화광량 (half-saturation light intensity; μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

### 3. 파장에 따른 *Skeletonema costatum*의 성장특성

근자외선 영역부터 가시광선 그리고 근적외선영역을

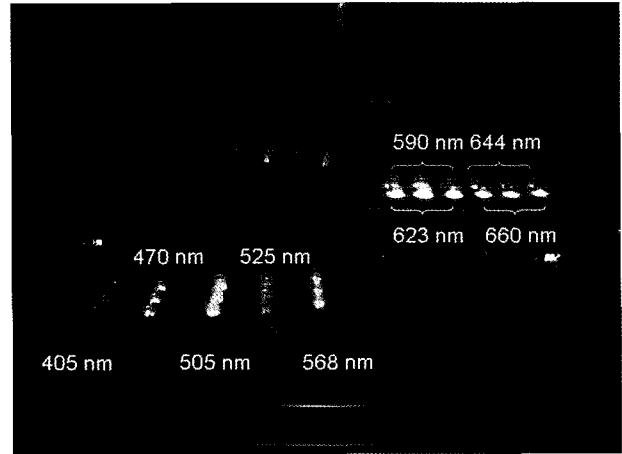


Fig. 2. The light-emitting diodes (LEDs) used in this study. The LEDs and their power supply were placed in the incubator.

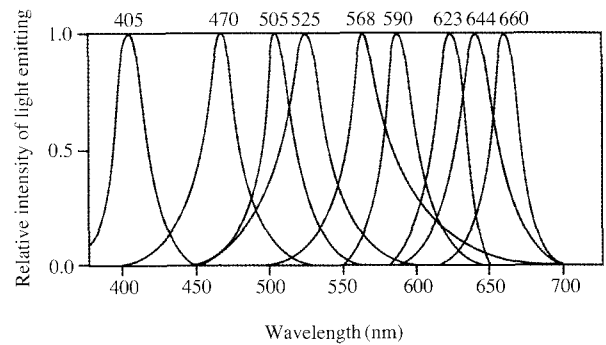


Fig. 3. Relative intensity and colors of light from the light-emitting diodes used in this study. The figure according to Luxeon Star, San Jose, CA USA.

포함하는 9개 파장의 빛을 선택하여 *S. costatum*의 성장 실험을 실시하였다. 이들 파장들은 최근 기술의 발전과 함께 거의 모든 가시광선대 파장을 구현 할 수 있는 발광다이오드 (light emitting diode; Luxeon™ Star, CA USA)를 이용하였으며, 성장특성 실험을 위해 특별히 고안한 주사장치에 부착하여 배양기 안에 설치하였다 (Fig. 2). 실험에 이용된 발광다이오드의 중심파장은 405 nm, 470 nm, 505 nm, 525 nm, 568 nm, 590 nm, 623 nm, 644 nm 그리고 660 nm이며 (Fig. 3), 명암주기는 12L : 12D hr이었다. 광량은 25 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>와 100 μmol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>의 2 단계로 조절하여 수행하였다.

*S. costatum*은 60 mL 배양튜브 (18 × 180 mm, borosilicate glass, Duran®, Germany)에 f/2-Si 배지 20 mL를 주입하여, 최종 세포밀도는 약 100 cells mL<sup>-1</sup> 되도록 접종하였다. 매일 1회 오전 10시에 도립현미경 (Type-210, Nikon, Tokyo, Japan)을 이용하여 세포밀도를 관찰하였

다. 세포밀도의 추이를 식 (1)의 *in vivo* chlorophyll 형광 값을 이용하지 않은 이유는 같은 광량에서도 파장별로 세포내 chlorophyll 함유량이 각각 다르게 나타나기 때문에 (Faust *et al.* 1982) 복합파장 즉 형광등하에서 배양된 세포의 *in vivo* chlorophyll 형광 값을 이용할 경우 세포 밀도가 과소 또는 과대평가 될 우려가 있기 때문이다. 이 실험 또한 triplicate로 수행하였으며, 성장속도는 전술의 (2)식에 따라 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 광 조건에 따른 *Skeletonema costatum*의 성장속도 변화

*S. costatum*의 세포밀도는  $10 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 초기 세포밀도와 거의 유사한 약  $1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 변화가 없었으나,  $25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 은 약  $2 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 까지 증가하였으며  $50 \sim 100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 은 약  $2 \times 10^5 \text{ cells mL}^{-1}$ 까지 증가하였다 (Fig. 4). 하지만  $150 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 은 약  $1 \times 10^5 \text{ cells mL}^{-1}$ , 300과  $400 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 은 각각  $8 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 과  $4 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 감소한 경향을 나타내었다 (Fig. 4).

성장속도는  $10 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  광 조건에서 성장이  $0.05 \text{ day}^{-1}$ 로 미약하게 성장을 하였지만,  $25 \sim 300 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  광 조건은 광량의 증가에 따라 성장속도가 증가하였다 ( $0.23 \sim 1.02 \text{ day}^{-1}$ ; Fig. 5).  $400 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  광 조건은  $300 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 와 유사하였다 ( $0.92 \text{ day}^{-1}$ ; Fig. 5). 광 조건에 의해 유도된 성장식은  $\mu = 1.17 (I - 5.28) / (I + 81.8)$ , ( $r = 0.98$ ) (Fig. 5)로,  $\mu_m$ 은  $1.17 \text{ day}^{-1}$ ,  $I_0$ 는  $5.28 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $K_s$ 는  $92.4 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다.

본 연구에서 *S. costatum*는 배양에 사용된 최대광량인  $400 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 일부 식물플랑크톤에서 보고되는 성장속도에 대한 광 저해현상 (photoinhibition)은 나타나지 않았다 (Fig. 5). 하지만 최대 세포밀도는  $150 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이상의 광량에서 점차 감소하는 경향으로 (Fig. 4), 초기 접종 후 일정기간 동안은 광량의 증가에 따라 성장속도는 증가하나, 높은 광량에서는 최대 세포밀도가 감소하는 광 저해현상이 나타났다. 이것은 이와 심 (1995)의 보고와 일치하였다. 그들은 우리나라 연안해역에서 7개 *S. costatum* 클론을 분리하고 3개의 서로 다른 조도 하에서 성장특이성을 살펴본 결과, 몇몇 클론에서 세포밀도와 성장속도가 저해되는 것을 보고하였다 (9,000 lux; 약  $124 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 해당). 그러

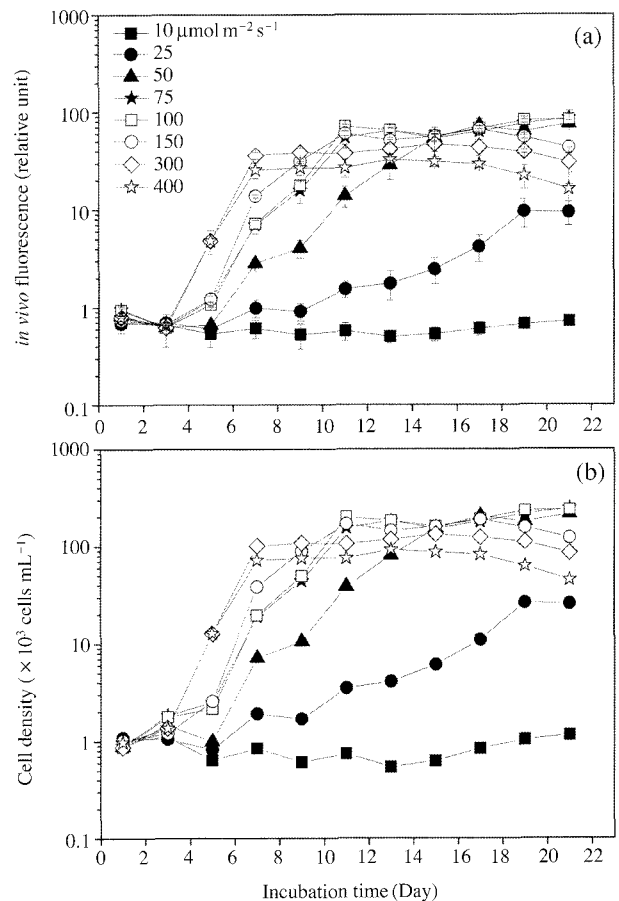


Fig. 4. (a) *in vivo* chlorophyll fluorescence values of *Skeletonema costatum* grown at various light intensities (12L:12D). (b) cell density calculated by regression equation, (Cell density) =  $2855.8 (\text{Fluorescence}) - 895.9$ .

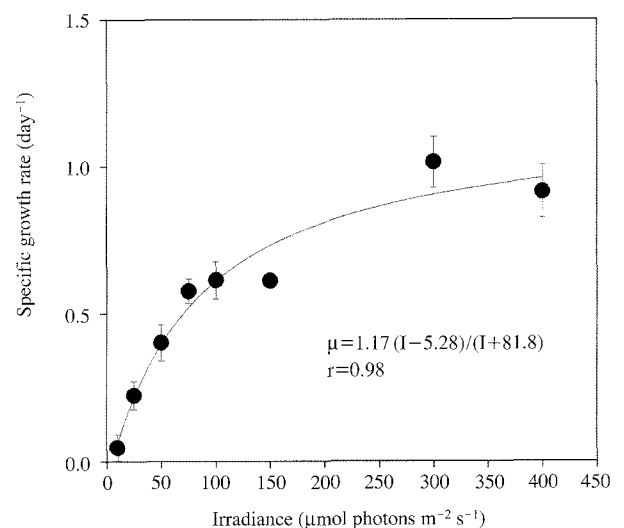


Fig. 5. Specific growth rate of *Skeletonema costatum* as a function of light intensities.

나 진해만에서 분리한 *S. costatum*과 같이 성장속도의 저해현상이 없고, 최대세포밀도에서만 광 저해현상이 있는 클론은 없었다. 식물플랑크톤의 광 저해현상에 대해서는 아직 많은 부분이 불명확하지만 발생기작은 고등식물과 비슷한 것으로 알려져 있다(Kirk 1994). 고등식물의 광 저해현상은 광계 II의 반응을 방해하는 것으로 주로 광합성의 명반응에 영향을 준다. 고등식물과 같은 경우 250~260 nm(UV)에서 피크를 보이는 자외선에서 주로 작용하며, 가시광선 부근에서도 발생하나 이 파장대는 광량자의 포착효율이 낮아 자외선 보다는 크지 않다(Jones and Kok 1966). 외양해역에서 광 저해현상의 50%가 390~430 nm 이하에서 발견되어, 광 저해현상을 일으키는 파장은 자외선과 가시광선이 각각 절반정도 비율을 차지한다(Smith and Baker 1980). 하지만, 연안해역과 같이 부유물질이 많은 경우, UV의 대부분이 부유물질에 흡수되어 광 저해현상은 가시광선에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(Koblents-Mishke 1979). 따라서 진해만의 극표층에서 *S. costatum*은 중 경쟁에서 유리한 위치를 차지하기는 어려울 것으로 판단된다.

진해만에서 분리한 *S. costatum*의  $I_0$ 를 다른 해역에서 분리된 strain과 비교하면, 일본 Fukuoka현 인근해역에서 분리한 *S. costatum*(Oh *et al.* 2008)은  $1.0 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이며, Narragansett만 strain의  $I_0$ 는  $1.1 \sim 2.2 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Yoder 1979, Langdon 1987)로 지금까지 보고된  $I_0$ 보다 약간 높은 값을 나타내었다. 이 값은 진해만 하계에 출현하는 와편모조류 *Karenia mikimotoi*(일본 Hiroshima만에서 분리한 strain)의  $0.7 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Yamaguchi *et al.* 1989)와 침편모조류인 *Heterosigma akashiwo*의  $1.0 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 보다 높은 값이다(Takahashi and Hara 1989). 하지만 진해만에서 마비성 패독을 유발하는 원인 종인 *Alexandrium tamarense* ( $35 \sim 76 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )와 *Gymnodinium catenatum* ( $10.4 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 그리고 매년 남해안에서 적조를 일으키는 *Cochlodinium polykrikoides* ( $10.4 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 보다는 낮았다(Yamamoto *et al.* 1995; 오와 윤 2004; Kim *et al.* 2004). 광에 대한 친화성 지수(affinity index)로 사용되는  $K_s$ 는 Fukuoka만 클론에서  $31 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Oh *et al.* 2008)로 약 3배 높은 값을 나타내었으며, 규조류 *Eucampia zodiacus* ( $62.8 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; Nishikawa and Yamaguchi 2006), *Coscinodiscus wailesii* ( $56.5 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; Nishikawa *et al.* 2002) 보다 높았다. 또한 대표적인 유해 와편모조류인 *A. tamarense* ( $62 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; Yamamoto *et al.* 1995), *K. mikimotoi* ( $53.6 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; Yamaguchi *et al.* 1989), *G. catenatum* ( $16.8 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;

Yamamoto *et al.* 2002), *C. polykrikoides* ( $45 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; Kim *et al.* 2004) 보다도 높았다.

한편, 진해만 *S. costatum*의  $I_0$ 와  $K_s$ 에 해당하는 수심을 Lambert-beer식 ( $I_z = I_0 e^{-kz}$ ;  $I_z$ 은 수심  $z$ 에서의 광량,  $I_0$ 는 해면에서 광량,  $z$ 은 수심,  $k$ 는 빛의 소산계수)에 대입하여 간접적으로 계산할 수 있다. 이때 소산계수는 박등(2001)이 1998년 3월부터 9월까지 매월 1회 씩 측정된 총 수직소산계수를 이용하였으며, 표층광량은 기상청에서 발표한 기상월보 중 진해만과 가장 가까운 진주 지상기상관측지점의 일별 수평면 일사량을 이용하였다(기상청 2006~2007). 수평면 일사량 단위는  $\text{MJ m}^{-2}$ 이기에 본 연구에서 사용한 광량자 단위로 환산할 필요가 있다. 광합성에 이용하는 약 400~700 nm의 파장에서 일사량과 광량자 사이에  $1 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1} = 2 \times 10^{-1} \text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Nishikawa and Yamaguchi 2006)의 관계가 있어 환산이 가능하며, 해수면에 입사광은 반사 등에 따라 15%가 손실하고 나머지 50%가 광합성 유효파장으로 해수면에 입사한다고 가정하였다(Nishikawa 2002). 조도는 전형적인 온대 해역의 계절 분포를 보였으며, 계산에 따른  $I_0$ 에 해당하는 수심은 3월에서 5월까지 6~9 m, 6월은 11 m, 그리고 7~9월은 약 4 m 수준이다(Fig. 6). 10월에서 2월까지의 소산계수 값이 없어 구할 수 없었지만, 부유물질의 농도가 낮아지기 때문에 소산 계수가 낮아져  $I_0$ 수심은 깊어질 것으로 사료된다. 진해만의 중앙부의 평균 수심은 20 m이지만, 연안쪽(부도와 잠도 서편)은 평균 10 m 내외로 저층까지도 다른 성장제한 요소가 없다면 충분히 성장 가능할 것으로 보이나 그 이심은 성장이 제한 될 것으로 생각된다. 그리고  $K_s$ 에 해당

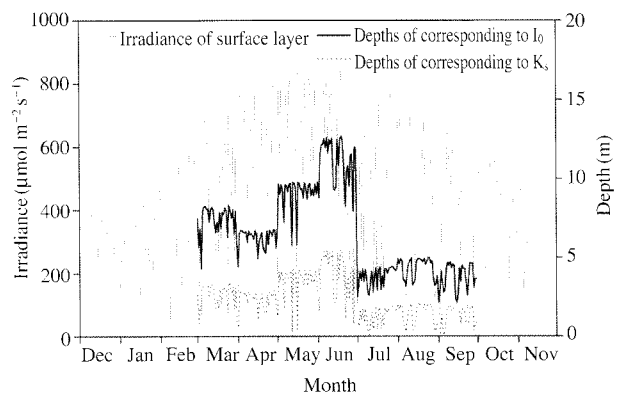


Fig. 6. Change of irradiance and depth of corresponding to  $I_0$  and  $K_s$  of *Skeletonema costatum* from December 2006 to November 2007. The irradiance was calculated using horizontal surface radiation in surface synoptic station of Jinju from December 2006 to October 2007. This data was cited from "Monthly Weather Report" in Korea Meteorological Administration.

되는 수심은 3 m 전후 수심이나,  $150 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이상에서 광저해 현상이 있기 때문에 최대성장을 보일 수 있는 수심 층은 극히 제한되어 있을 것으로 생각된다. 따라서 부영양화 되어 있는 진해만과 같은 해역은 부유물질에 따른 광 투과율이 *S. costatum*의 성장을 크게 지배할 것으로 보인다.

## 2. 파장에 따른 *Skeletonema costatum*의 성장특성

지금까지 *S. costatum*은 다른 규조류와 와편모조류 보다 광에 대하여 낮은  $I_0$ , 높은 성장속도 그리고 낮은  $K_s$ 로 정의되는 생리학적 특징을 가진 종으로 생태계 수치 모델에서 대표적인 r-전략종(r-strategy species)으로 사용되어 왔다(Yamamoto *et al.* 2002; Yamamoto and Seike 2003; 오 등 2007). 하지만, 진해만의 *S. costatum*은 지금까지 보고되어 왔던 생리학적 특성과 차이가 있어, 광 조건만으로 보면 종 경쟁에서 불리한 위치에 있는 것으로 생각되나, 진해만에서 *S. costatum*은 주요 규조류 우

점종 이기에 이러한 생리학적 단점을 극복할 수 있는 다른 장점을 가질 것으로 기대된다.

$25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량 하의 파장별 *S. costatum*의 세포밀도를 보면 590 nm와 623 nm에서 시간과 함께 세포밀도가 급격히 감소하는 경향이나, 다른 파장들은 시간과 함께 세포밀도가 증가하였다(Fig. 7). 최대 세포밀도가 보인 파장은 405 nm였으며(약  $5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ ), 그 다음으로는 660 nm였다(약  $1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ ).  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량 하에서 파장별 *S. costatum*의 세포밀도는 전 파장에서 거의 유사하였다(약  $1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ ; Fig. 7). 성장속도는  $25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량 하에서 405 nm와 470 nm 파장이 약  $0.34 \text{ day}^{-1}$ 와  $0.28 \text{ day}^{-1}$ 로 다른 파장보다 높은 성장을 보였으며, 660 nm 파장도  $0.24 \text{ day}^{-1}$ 로 높았다(Fig. 8).  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량 전 파장 대에서 성장속도가 유사하였다. 하지만 지수함수 성장기에는 파장에 따라 세포밀도가 차이를 보였으며, 대체적으로 황색파장대에서 낮게 나타났다(Fig. 8).

$25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  그리고  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  하의 450 nm 성장속도는 같은 광량의 형광등(복수파장) 하에서 성장한 *S. costatum*보다 성장속도가 빨랐다( $25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 는  $0.23 \text{ day}^{-1}$ ,  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 는  $0.61 \text{ day}^{-1}$ ; Fig. 5). 지금까지 보고되어진 많은 연구는 청색 또는 청보라색 파장대에서 성장이 촉진된다는 연구가 있다. 예를 들면 Chlorophyceae, Pheophy-

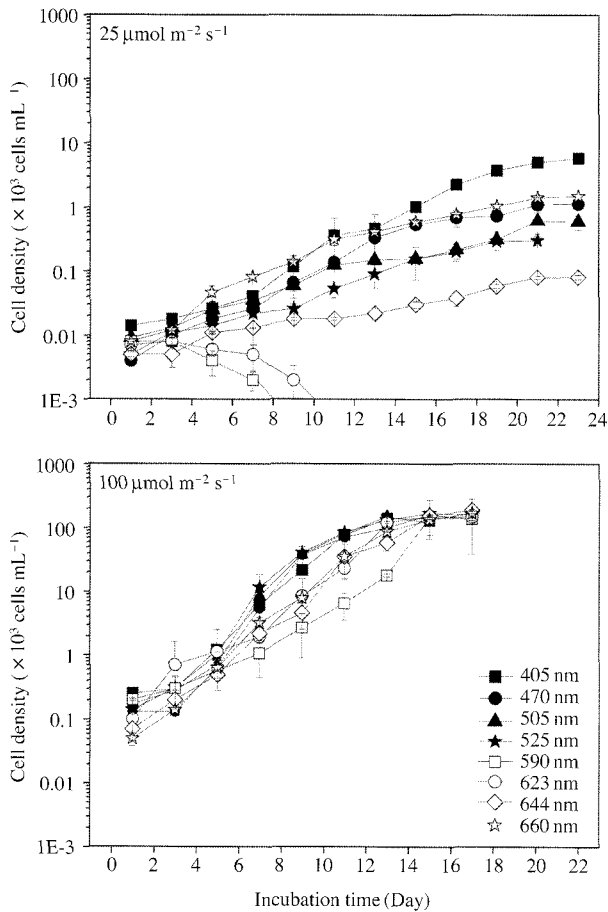


Fig. 7. Growth curves of *Skeletonema costatum* grown at various wavelengths (405, 470, 505, 525, 568, 590, 623, 644 and 660 nm) under  $25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

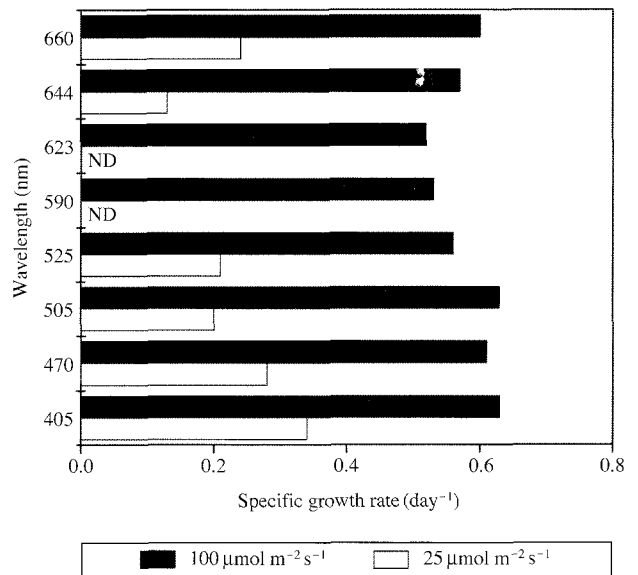


Fig. 8. Specific growth rates of the *Skeletonema costatum* under light-emitting diodes at 405, 470, 505, 525, 568, 590, 623, 644 and 660 nm. Light intensities were  $15 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

ceae와 Rhodophyceae의 성장이 청색 파장에서 증가하는 것을 분명히 하였고(Figueroa *et al.* 1995), 규조류 *Thalassiosira gravida*, *Chaetoceros* sp., *Phaeodactylum tricornutum*와 *Cyclotella caspia* 또한 청색 파장에서 잘 성장한다는 것이 알려져 있다(Jeffrey and Vesk 1977; Holdsworth 1985; Aidar *et al.* 1994; Sánchez-Saavedra and Voltolina 1994). 하지만, 보라색 파장에 성장 촉진 효과는 지금까지 알려져 있지 않았지만, 최근 Oh *et al.* (2008)에 따르면 본 연구와 같이 *S. costatum*에서 복수파장보다 보라색 파장대에서 성장이 촉진된다는 연구결과를 제시하였다. 따라서 이때패류의 먹이 생물 원으로 대량 배양을 수행시 태양광 또는 형광등 보다 보라색 파장대의 발광체를 주사함으로 생산성을 높일 수 있을 것으로 기대하였다. 하지만, 일부 저서성 규조류(Correa-Reyes *et al.* 2001), 와편모조류 *Heterocapsa pygmaea* (Nelson and Prézélin 1990)는 청색 파장에서 성장이 증가되지 않았다. 이와 같이 단일 파장에서도 종에 따라 다른 성장을 보이는 기질 특이성을 나타낸다고 볼 수 있다.

한편, 빛의 파장은 식물플랑크톤의 광합성을 조절하는 중요한 요인이기 때문에(Sánchez-Saavedra and Voltolina 1994), 식물플랑크톤의 종천이 및 수직·수평 분포에 크게 영향을 미친다. 일반적으로 해양은 청녹색 파장(약 480 nm)이 주로 우점하며, 식물플랑크톤은 이 파장에 노출되어 있지만(Wallen and Geen 1971), 부유물질이 많은 연안역과 같은 경우 현탁입자에 청녹색 파장이 흡수되어 황색 파장이 우점한다(Faust *et al.* 1982). 더욱이 적색 파장은 해수 물분자 또는 해염에 의해 극표층에서 흡수된다. 따라서 청녹색 파장을 주로 흡수하고 낮은  $I_0$ 를 가지는 종은 부유물질이 많은 연안해역에서 성장을 유지하기 힘들며, 반대로 황색파장을 주로 이용하는 종은 외양역에서 우점 되기 힘들다. 오 등(2006)과 Oh *et al.* (2008)은 유해 와편모조류 *C. polykrikoides*와 *Heterocapsa circularisquama*는  $70 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  정도의 황색파장대에서 성장이 억제되는 반면 청색 파장대에서 잘 성장하여 이들 식물플랑크톤은 부유물질이 많은 연안역에서 성장하기 어려울 것으로 판단되고, 이들의 대량증식이 연안역이 아닌 외양역에서 보다 광범위하게 발생하는지 의문을 푸는 중요한 단서가 될 것으로 보고 하였다. 본 연구에서 *S. costatum*은 미약한 황색 파장 광량에서 잘 성장하지 않았지만, 광량이 증가함에 따라 진 파장 대에서 고루 성장할 수 있어 조도에 대한 생리학적 단점을 극복하여 중 경쟁에서 유리한 위치를 가질 수 있을 것으로 생각된다.

## 적 요

진해만에서 분리한 중심목 규조류 *S. costatum*의 성장에 영향을 미치는 광량과 파장을 알기 위해 실내 실험을 수행하였다. 수온  $20^\circ\text{C}$ 와 염분 30 psu의 환경조건에서 광량과 성장의 관계식은  $\mu=1.17 (I-5.28)/(I+81.8)$ , ( $r=0.98$ )로 최대 성장속도는  $1.17 \text{ day}^{-1}$ , 반포화광량( $K_s$ )은  $92.4 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  그리고 보상광량( $I_0$ )은  $5.28 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 진해만에서  $I_0$ 에 해당하는 수심을 계산한 결과, 3월에서 5월은 3~5 m, 6월은 11 m, 7월에서 9월은 4 m로 진해만에서 *S. costatum*은 표층에서 잘 성장할 것으로 나타났다. 하지만 광저해현상은  $150 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이상의 광량에서 세포밀도의 감소를 보여, *S. costatum*의 성장을 위한 최적 수심은 상당히 제한되어 있을 것으로 사료된다. 성장에 미치는 파장의 영향을 알기 위해 발광 다이오드를 이용하여 근자외선 영역부터 근적외선영역을 포함하는 9개 파장 빛을 주사하였다.  $25 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 *S. costatum*은 405, 470, 505, 525, 568, 644 nm에서 성장을 하였지만, 590 m와 623 nm에서는 성장하지 못하였다. 하지만  $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 는 모든 파장대에서 잘 성장하였다. 따라서 *S. costatum*은 황색파장대가 우점하는 폐쇄성 연안역에서 충분히 잘 성장할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2007년 교육인적자원부의 국립대학(부경대학교 해양과학공동연구소) 운영비 지원에 따라 수행된 연구로 지원기관에 감사를 표한다.

## 참 고 문 헌

- 강정훈, 김용서. 2006. 인위적인 동물플랑크톤 첨가에 따른 중형 폐쇄생태계내 플랑크톤 변동. 한국해양환경공학회지. 9:109-119.
- 문성기, 최철만. 2003. 국내 해양식물플랑크톤의 주요종과 분포에 대한 조사. 한국환경과학회지. 12:725-733.
- 박종규, 허성희, 정해진. 2001. 진해만의 식물플랑크톤: I. 광 환경에 따른 광합성 특성과 일차생산력. Algae. 16:189-196.
- 오석진, 윤양호. 2004. 여수해만에서 분리한 유독 와편모조

- 류, *Gymnodinium catenatum* (Graham)의 성장에 미치는 수온, 염분과 광 조건. *Algae*. 19:293-301.
- 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. *Algae*. 21:311-316.
- 오석진, 양한섭, 山本民次. 2007. 수치모델을 이용한 외편모조류 *Alexandrium tamarense*, *Gymnodinium catenatum* 및 규조류 *Skeletonema costatum*의 종간 경쟁에 미치는 용존태 유기인의 영향. *한수지*. 40:39-49.
- 오석진, 이종석, 박종식, 노일현, 윤양호. 2008. 진주만 식물플랑크톤 군집 천이에 미치는 환경적인 요인. *한국해양환경공학회지*. 11:98-104.
- 윤양호. 2000. 시아해의 수질환경과 식물플랑크톤 생물량의 시·공간적 분포특성과 기초생물량변동에 영향을 미치는 환경특성. *환경생물*. 18:77-93.
- 이원호, 심재형. 1995. 한국연안산 규조 *Skeletonema costatum*의 조도에 대한 생태적지위 성분의 종내 변이. *한국해양학회지*. 30:436-441.
- 함경훈, 김무상, 이형호. 2002. 미세조류, *Skeletonema costatum*의 성장에 미치는 유기주석 화합물의 급성 및 만성 독성효과. *한수지*. 35:534-541.
- Aidar E, SMF Giancesella-Galvão, TCS Sigaud, CS Asano, TH Liang, KRV Rezende, MK Oishi, FJ Aranha, GM Milani and MAL Sandes. 1994. Effects of light quality on growth biochemical composition and photosynthetic production in *Cyclotella caspia* Grunov and *Tetraselmis gracilis* Kylin Butcher. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 180:175-187.
- Brand LE, RRL Guillard and LS Murphy. 1981. A method for the rapid and precise determination of acclimated phytoplankton reproduction rates. *J. Plankton Res.* 3:193-201.
- Correa-Reyes JG, MP Sánchez-Saavedra, DA Siqueiros-Beltrones and N Flores-Acevedo. 2001. Isolation and growth of eight strains of benthic diatoms, cultured under two light conditions. *J. Shellfish Res.* 20:603-610.
- Faust MA, JC Sager and BW Meeson. 1982. Response of *Prorocentrum mariae-lebouriae* (Dinophyceae) to light of different spectral qualities and irradiances: growth and pigmentation. *J. Phycol.* 18:349-356.
- Gallagher JC. 1982. Physiological variation and electrophoretic banding patterns of genetically different seasonal populations of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). *J. phycol.* 18:148-162.
- Guillard RRL and D Ryther. 1962. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. *Can. J. Microbiol.* 8:229-239.
- Figuerola FL, J Aguilera and FX Niell. 1995. Red and blue light regulation of growth and photosynthetic metabolism in *Porphyra umbilicalis* (Bangiales, Rhodophyta). *Eur. J. Phycol.* 30:11-18.
- Holdsworth ES. 1985. Effect of growth factor and light quality on the growth, pigmentation and photosynthesis of two diatoms, *Thalassiosira gravida* and *Phaeodactylum tricoratum*. *Mar. Biol.* 86:253-262.
- Jones LW and B Kok. 1966. Photoinhibition of chloroplast reactions. *Plant Physiol.*, 41:1037-1043.
- Jeffrey SW and M Vesk. 1977. Effects of blue-green light on photosynthetic pigments and chloroplast structure in the marine diatom *Stephanopyxis turris*. *J. Phycol.* 13:271-279.
- Koblents-Mishke OI. 1979. Photosynthesis of marine phytoplankton as a function of underwater irradiance. *Soviet Plant Physiol.* 26:737-746.
- Kim D-I, Y Matsuyama, S Nagasoe, M Yamaguchi, YH Yoon, Y Oshima, N Imada and T Honjo. 2004. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). *J. Plankton Res.* 26:61-66.
- Kirk JTO. 1994. Light & photosynthesis in Aquatic ecosystems, 2nd edition. Cambridge University Press, London.
- 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.* 9:459-482.
- Lederman TC and P Tett. 1981. Problems in modeling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton. *Bot. Mar.* 24:125-134.
- Nelson NB and BB Prézelin. 1990. Chromatic light effects and physiological modeling of absorption properties of *Heterocapsa pygmaea* (= *Glenodinium* sp.). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 63:37-46.
- Nishikawa T, K Miyahara and S Nagai. 2002. The growth response of *Coscinodiscus wailesii* Gran (Bacillariophyceae) as a function of irradiance isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan. *Bulletin of Plankton Society of Japan* 49:1-8.
- Nishikawa T and M Yamaguchi. 2006. Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg, a causative organism in the discoloration of *Porphyra thalli*. *Harmful Algae* 5:141-147.
- Oh SJ, 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.* 74:137-145.
- Sánchez-saavedra MP and D Voitolina. 1994. The chemical composition of *Chaetoceros* sp. (Bacillariophyceae) under different light conditions. *Comp. Biochem. Physiol.* 107B:



- 39-44.
- Smith RC and KS Baker, 1980. Biologically effective dose transmitted by culture bottles in  $^{14}\text{C}$  productivity measurements. *Limnol. Oceanogr.* 25:364-366.
- Takahashi M and Y Hara. 1989. Control of diel vertical migration and cell division rhythm of *Heterosigma akashiwo* by day and night cycles. pp. 265-268. In *Red Tides* (Okaichi T, DM Anderson and T Nemoto eds.). Elsevier. New York.
- Wallen DG and GH Geen. 1971. Light quality in relation to growth, photosynthetic rates and carbon metabolism in two species of marine plankton algae. *Mar. Biol.* 10:34-43.
- 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.* 55:2029-2036 (in Japanese with English abstracts).
- 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.* 43:91-98 (in Japanese with English abstracts).
- Yamamoto T, T Seike, T Hashimoto and K Tarutani. 2002. Modelling the population dynamics of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in Hiroshima Bay, Japan. *J. Plankton Res.* 24:33-47.
- Yamamoto T, SJ Oh and Y Kataoka. 2002. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* (Dinophyceae) isolated from Hiroshima Bay, Japan. *Fisheries Sci.* 68:356-363.
- Yamamoto T and T Seike. 2003. Modelling the population dynamics of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in Hiroshima Bay, Japan. II. Sensitivity to physical and biological parameters. *J. Plankton Res.* 25:63-81.
- Yoder JA. 1979. Effect of temperature on light-limited growth and chemical composition of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). *J. Phycol.* 15:362-370.

Manuscript Received: March 3, 2008  
Revision Accepted: June 5, 2008  
Responsible Editor: Jae Hoon Noh