

[Note]

유해성 적조생물, *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae) 성장에 영향을 미치는 광량과 파장

오석진¹ · 윤양호^{2*} · 김대일³ · 島崎洋平⁴ · 大嶋雄治⁴ · 本城凡夫⁴

(¹일본 미에현 산업지원센터(MIESC), ²전남대학교 해양기술학부, ³해양경찰청 해양오염관리국, ⁴일본 큐슈대학 농학연구원)

Effects of Light Quantity and Quality on the Growth of the Harmful Dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae)

Seok Jin Oh¹, Yang Ho Yoon^{2*}, Dae-Il Kim³, Yohei Shimasaki⁴,
Yuji Oshima⁴ and Tsuneo Honjo⁴

¹Mie Industrial Enterprise Support Center (MIESC), Sakaecho, Tsu 514-0004, Japan

²Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

³Marine Pollution Control Bureau, Korea Coast Guard, Incheon 406-741, Korea

⁴Laboratory of Marine Environmental Science, Faculty of Aquaculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

The effects of light quality and irradiance on the growth of *Cochlodinium polykrikoides* were investigated in the laboratory. At 25°C and 30 psu the irradiance-growth curve was described as $\mu = 0.34 (I-9.76)/(I+12.5)$, ($r=0.98$). This suggests half-saturation photon flux density (PFD) (K_s) of 32.0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and a compensation PFD (I_c) of 9.76 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Because the I_c equates to a depth of ca. 15.4 m, these responses suggest that irradiance at the depth around and below the thermocline in Yeosuhae Bay would provide favorable conditions for *C. polykrikoides*. Photoinhibition did not occur at 300 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, which was the maximum irradiance used in this study. Blue (450 nm), yellow (590 nm) and red (650 nm) light had different effects on the growth of *C. polykrikoides*: it grew well under blue light, but not under yellow light. This implies that *C. polykrikoides* is more likely to cause an outbreak of red tide in the open sea where blue-green wavelengths predominate, rather than in enclosed water bodies where suspended particles absorb most of the blue wavelengths, and yellow-orange wavelengths predominate.

Key Words: *Cochlodinium polykrikoides*, growth, harmful dinoflagellate, irradiance, light quality

서 론

해양의 기초생산자인 식물플랑크톤은 태양에너지를 이용하여 무기물로부터 유기물을 합성한다. 식물플랑크톤의 광합성과 성장은 빛의 성질에 따라 크게 영향을 받게 되며, 특히 빛의 파장과 조성은 광합성 생물 및 비광합성 생물의 신진대사에까지 영향을 미친다(Sánchez-Saavedra and Voltolina 1994). 특히, 외편모조류를 포함하는 식물성 편모조류는 미약하지만 운동능력을 보유하고 있어, 광학적으로 성장할 수 있는 심도까지 내려가 저층에 풍부한 영양염을 섭

취하여 성장할 수 있다(Honjo *et al.* 1989). 따라서 보다 낮은 광 조건에서도 성장할 수 있는 종은 유영심도가 더욱 깊어져 다른 종보다 유리한 생존 전략을 가진다. 또한, 수심에 따라 빛의 파장은 크게 다르기 때문에 여러 파장대 빛을 이용할 수 있는 종이 보다 효율적으로 성장할 수 있다.

한편 1995년 이후 매년 남해안과 동해안에서 대규모로 적조를 발생시켜 막대한 경제적 손실과 해양생태계의 황폐화를 초래하고 있는 유해성 외편모조류(NFRDI 1999, 2000), *Cochlodinium polykrikoides* Margalef는 Caribbean Sea에 위치하는 Puerto Rico에서 처음으로 명명되었다(Margalef 1961). 더욱이 *C. polykrikoides*에 의한 적조는 우리나라에만 국한되지 않고, 2005년에는 일본 Tottori현(동해에 위치한 현)에서 이 종에 따른 적조로 대량의 어패류 폐사가 있었다. 이곳의

*Corresponding author (yoonyh@chonnam.ac.kr)

적조발생에 대하여 일본의 일부 연구자들은 한국 남해에서 발생한 적조 일부가 Tsushima 난류를 타고 동해로 유입되어 발생하였다고 주장하고 있다(山口新聞, 2005. 09. 17). 반면 Matsuo and Iwataki(2004)은 Tottori현 적조는 Kyushu 지방의 Yatsushiro해 적조가 Tsushima 난류를 타고 운반되었을 가능성에 대해서도 보고하고 있어, 동해에 위치하는 일본 연안해역 적조원인을 명확히 하기 위해서는 이들 적조의 발생기작을 분명하게 하여야 할 것이다.

본 연구는 이러한 발생기작을 알기 위한 시도로서 *C. polykrikoides*의 성장에 미치는 광조건 및 파장을 실내실험을 통하여 살펴보았다.

재료 및 방법

*Cochlodinium polykrikoides*의 분리와 배양

*Cochlodinium polykrikoides*의 세포는 2005년 3월 일본 Kyushu에 있는 Inokushi 만 입구에서 채수한 해수로부터 pasteur pipette(ca. ϕ 50–100 μ m)를 이용하여 분리 하였다. 분리된 세포는 여과해수(Sterivex-GS, 0.22 μ 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 Kuroshio 해수를 바탕으로 한 f/2(Guillard and Ryther 1962)로 selenium(H_2SeO_3)을 최종농도가 0.001 μ M 되게 첨가하였다. 배양온도와 염분의 조건은 현상수온과 염분에 상응하는 조건(17°C, 30 psu)으로, 광량은 약 100 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$ (12L:12D; cool-white fluorescent lamp)에서 실시하였다. 분리되어진 *C. polykrikoides*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.

광 조건에 따른 성장속도 변화

수온 17°C, 염분 30 psu 그리고 광량 100 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$ (12L:12D; cool-white fluorescent lamp)의 조건에서 유지 배양을 한 *Cochlodinium polykrikoides*를 Kim et al.(2004a)에 언급되어진 최적 수온과 염분 조건하(수온 25°C와 염분 30 psu)에서 실험을 하기 위해서 하루에 1°C씩 상승시켜 8일 후 25°C에 도달하도록 한 다음, 신선배지에 이식하여 전배양을 실시하였다. 배양액 중 세포밀도를 약 3.0×10^3 cells mL^{-1} 까지 증식시킨 후, 60 mL 배양튜브(25 x 150 mm)에 f/2 배지 20 mL를 주입하여, 최종 세포밀도는 약 100 cells mL^{-1} 되도록 접종하였다. 광 조건은 가시광선 차단필름을 이용하여 10, 20, 50, 75, 100, 200, 300 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$ (QSL-2100, Biospherical Instrument Inc., San Diego CA

USA)의 7단계로 조절하였다. 매일 1회 오전 10시에 0.5 mL의 배양액을 채취하여 도립현미경(Type-210, Nikon, Tokyo Japan)을 이용하여 세포수를 관찰하였다. 성장속도는 대수성장(exponential growth)을 보이는 기간 동안의 세포수를 이용하여 다음 (1)식에 의해 계산하였다.

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

N_0 , N_t : 대수성장기에서 초기와 t시간(day) 후의 세포수 (cells mL^{-1})

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.

$$\mu = \mu_m \frac{I - I_c}{(K_s - I_c) + (I - I_c)} \quad (2)$$

μ : 성장속도(specific growth rate; day^{-1})

I : 광량(irradiance; μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$)

I_c : 보상광량(compensation photon flux density (PFD); μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$)

μ_m : 최대 성장속도(maximum specific growth rate; day^{-1})

K_s : 반포화광량(half-saturation light intensity; μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$)

파장에 따른 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장특성

가시광선 중 대표적인 3개 파장의 빛(청색, 적색, 황색)을 선택하여 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장실험을 실시하였다. 이 때 청색은 450 nm, 적색은 650 nm, 황색은 590 nm의 파장에 해당한다. 이들 파장은 발광다이오드(light emission diode, LED)를 이용하여 주사하였으며, 명암주기는 12L:12D hr, 광량은 70 μ mol photons $m^{-2} s^{-1}$ 이었다. *C. polykrikoides*은 70 mL culture flask에(Easy Flask, Nunc., Roskilde Denmark) 최종 세포수가 10 cells mL^{-1} 이 되게 20 mL f/2 배지에 접종한 후, 매일 1회 오전 10시에 도립현미경을 이용하여 세포수를 관찰하였다. 이 실험 또한 triplicate로 수행하였으며, 성장속도는 전술의 (1)식에 따라 계산하였다.

결과 및 고찰

*Cochlodinium polykrikoides*의 세포밀도는 10 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 초기 세포밀도와 거의 유사한 약 $10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 변화가 없었으나, 20 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서는 약 $500 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 증가 하였으며 50-300 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서는 약 $1,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 까지 증가하였다(Fig. 1a). 성장속도는 10 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 조건에서는 성장하지 않았지만, 20-100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 조건에서는 광량의 증가에 따라 성장속도가 증가하였다(0.12-0.30 day^{-1}). 200-300 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 광 조건에서는 성장속도가 0.31 day^{-1} 로 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 광 조건에서 성장속도와 유사하였다(Fig. 1b). 광 조건에 의해 유도된 성장식은 $\mu = 0.34 (I - 9.76)/(I + 12.5)$, ($r = 0.98$)(Fig. 1b)로, μ_m 은 0.34 day^{-1} , I_c 는 9.76 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, K_s 는 32.0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다.

*Cochlodinium polykrikoides*는 배양에 사용된 최대 광량인 300 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 일부 식물플랑크톤에서 보고되는 광 저해현상(photoinhibition)은 나타나지 않았다(Fig. 1b). 이와 같은 결과는 통영연안(최대 7500 lux; Lee et al. 2001)과 일본 Furue만(최대 230 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Kim et al. 2004a)에서 분리한 strain으로부터 광 저해현상이 발견되지 않았다는 내용과 유사한 내용이다. 다만 실제 자연환경은 보다 높은 광 조건을 나타내기(여름 표층은 2000 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상), 실험실 조건만으로 광 저해현상을 단정할 수는 없으며 보다 높은 광 조건 실험이 필요하다.

한편 일본 Inokushi만 산 *C. polykrikoides*의 I_c 는 약 9.76 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 일본 Furue만 strain의 10.4 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 와 비슷한 결과를 보여(Kim et al. 2004a), 비교적 약한 광 조건에서도 충분한 성장이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 연안해역에서 적조를 형성하여 수산업에 심각한 영향을 미치는 주요 유해성 편모조류의 보상광량(I_c)과 비교하면, 한국 남해안에서 *C. polykrikoides*이 발생시 출현을 보이는 *Gymnodinium catenatum*(여수해만에서 분리한 strain)이 10.0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Oh and Yoon 2004), 양식 어패류를 폐사시키는 침편모조류인 *Chattonella antiqua*와 *C. marina*는 10.3 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Yamaguchi et al. 1991)로 *C. polykrikoides*과 유사한 광 생리적인 특성을 보였다. 그리고 *Karenia mikimotoi*(일본 Hiroshima 만에서 분리한 strain)에서 0.7 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Yamaguchi and Honjo 1989), 침편모조류인 *Heterosigma akashiwo*는 1.0 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 낮았다(Takahashi and Hara 1989). 반면에 이른 봄 진해만에서 이매패류 독화 원인종인 *Alexandrium tamarense*(일본 Hiroshima 만에서 분리한

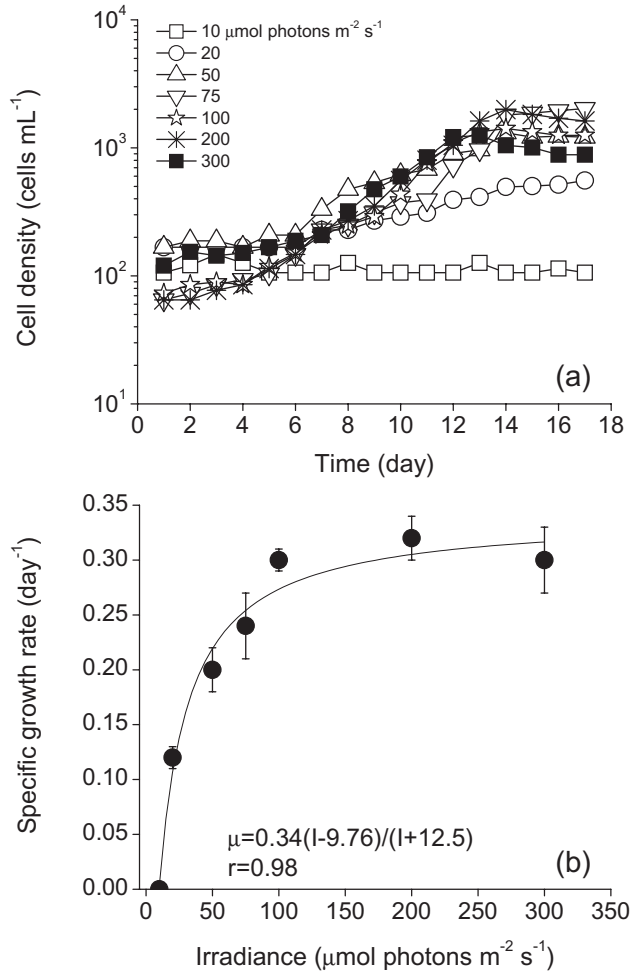


Fig. 1. (a) Growth curves of *Cochlodinium polykrikoides* under various light intensities. Temperature 25°C, salinity 30 psu, and pH 8.0. (b) Specific growth rates of *Cochlodinium polykrikoides* as a function of light intensity. Growth rate was calculated from the exponential growth phase in batch culture incubation.

strain)는 35-76 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Yamamoto and Tarutani 1997)로 *C. polykrikoides*보다 높아 종에 따른 차이가 크게 나타났다.

*Cochlodinium polykrikoides*의 초기 적조 발생지역인 여수해만에서 I_c 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 7월 여수해만의 평균 소산계수인 0.299(Yoon, unpublished data), I_0 는 하계의 평균 광량인 2,000 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 해수면으로 입사할 때 50%가 감소한다고 고려하여 1,000 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 을 대입하였다. 계산 결과, *C. polykrikoides*의 성장에 필요한 I_c 에 해당하는 수심은 약 15.4 m가 계산되었다. 이 수심은 여수해만 같은 경우 중·저층까지 해당되며, 남해안 외양역의 경우 수온약층보다 깊은 수심으로 *C. polykrikoides*의 광 이용만을 고려하면 남

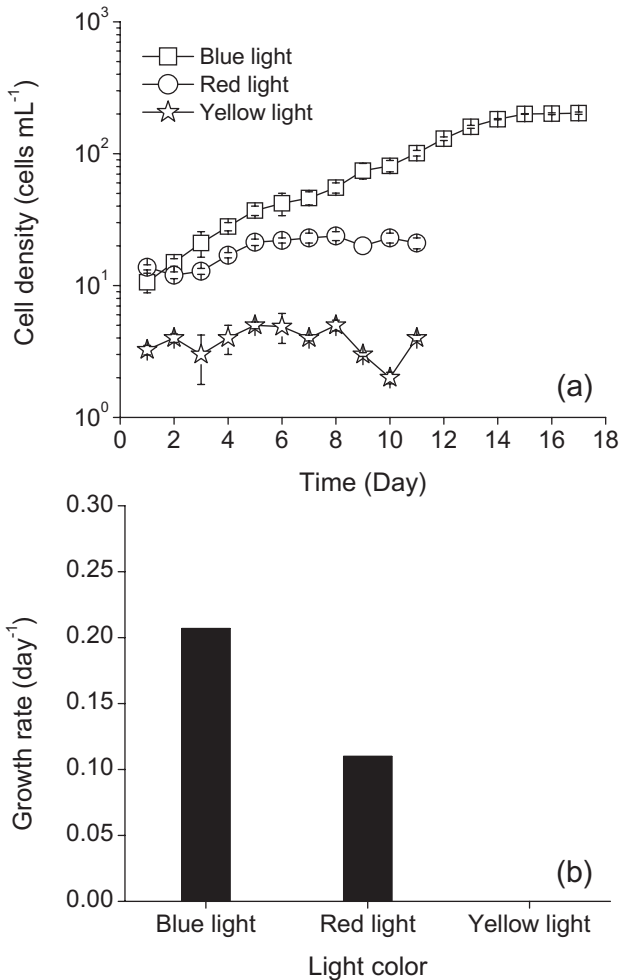


Fig. 2. Growth of *Cochlodinium polykrikoides* under different wavelengths (blue, yellow and red light). (a) growth curves, (b) Specific growth rates.

해연안해역 어디에서도 이종의 유영세포가 발견될 수 있다. 특히, Kim *et al.* (2004b)에 따르면 *C. polykrikoides*의 유영속도는 최대 3.6 m hr⁻¹로 대표적인 유해 적조 플랑크톤 *G. catenatum*의 1.2 m hr⁻¹ (Baba *et al.* 2001), *K. mikimotoi*의 2.2 hr⁻¹ (Koizumi *et al.* 1996), *C. antique*의 0.8 m hr⁻¹ (Watanabe *et al.* 1995) 보다 높았다. 따라서 *C. polykrikoides*는 무기형태 영양염 뿐만 아니라 용존태 유기 영양염 또한 흡수 가능한 것으로 밝혀져 (Kim *et al.* submitted), 표층에 영양염류가 고갈되어 있을 경우 이 종의 비교적 빠른 유형 능력과 낮은 I_c에 기인해 저층에 풍부한 영양염을 섭취할 수 있을 것이다.

한편 빛의 파장은 식물플랑크톤의 광합성을 조절하는 중요한 요인이기에 (Sánchez-Saavedra and Voltolina 1994), 식물플랑크톤의 종 천이 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 내만 및 연안 해

역과 같은 경우 현탁입자에 청녹색 파장이 흡수되어 황색 파장이 우점한다 (Faust *et al.* 1982). 더욱이 적색파장은 해수 물 분자 또는 해염에 의해 극표층에서 흡수된다. 따라서 청녹색 파장을 주로 흡수하고 낮은 I_c를 가지는 종은 부유물질이 많은 연안·내만해역에서 성장을 유지하기 힘들며, 반대로 황색파장을 주로 이용하는 종은 외양역에서 우점 되기 힘들다. *Cochlodinium polykrikoides*는 청색파장에서 최종세포수가 약 200 cells mL⁻¹까지 증가하였으며, 적색파장은 약 20 cells mL⁻¹에 그쳤다. 그리고 황색파장에서는 세포수의 변동이 없었다 (Fig. 2a). 청색파장의 성장속도는 0.21 day⁻¹로, 집중세포수의 차이 때문에 복수 파장을 이용한 광조건 실험(형광등; Fig. 1b)과 비교하기는 어렵지만, 복수 파장의 70 μmol photons m⁻² s⁻¹와 유사한 성장속도를 보였다(0.25 day⁻¹). 적색 파장에서 성장속도는 0.11 day⁻¹로 청색파장의 절반 수준이었으며, 황색파장에서는 성장 하지 못하였다(Fig. 2b).

청색광의 경우, 일부 미세조류의 엽록소의 함유량과 성장속도를 증가시키는 경향을 보이지만 (Jeffrey and Vesk 1977), 홍조류에서는 반대의 작용이 보고되기도 한다 (Mercado *et al.* 2002). Figueroa *et al.* (1995)는 Chlorophyceae, Pheophyceae와 Rhodophyceae의 성장이 청색 파장에서 증가하는 것을 분명히 하였고, 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 와편모조류, *Heterocapsa pygmaea* (Nelson and Prézélin 1990)와 규조류 *Skeletonema costatum* (Tremblin *et al.* 2000) 그리고 일부 저서성 규조류 (Correa-Reyes *et al.* 2001)는 청색 파장에서 성장이 증가되지 않았다. 이와 같이 단일 파장에서도 종에 따라 다른 성장을 보이는 기질 특이성을 나타낸다고 볼 수 있다.

*Cochlodinium polykrikoides*는 낮은 I_c와 청색파장을 잘 이용하며 다른 파장의 이용성이 낮은 것으로 보아 청색파장이 도달하는 해역, 즉 부유물질이 많은 내만해역보다 연안 및 외양해역에서 잘 성장할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 *C. polykrikoides* 적조가 다른 적조원인생물과는 달리, 왜 내만해역보다 연안/외양해역에서 보다 광범위하게 발생하는가에 대한 의문을 풀기 위한 중요한 단서가 될 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 일본 미에현 산업 지원센터 (Mie Industry and Enterprise Support Center; MIESC)의 Collaboration of Regional Entities for the Advancement Technological Excellence (CREATE) 프로그램 일환으로 수

행하였다.

참고문헌

- Aidar E., Giancesella-Galvão S.M.F., Sigaud T.C.S., Asano C.S., Liang T.H., Rezende K.R.V., Oishi M.K., Aranha F.J., Milani G.M. and Sandes M.A.L. 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.
- Baba T., Hiyama S. and Tainaka T. 2001. Vertical migration of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* and toxicity of cultures oyster in Senzaki Bay, Yamaguchi Prefecture. *Bull Plankton Soc. Japan* **48**: 95-99 (in Japanese with English abstract).
- Correa-Reyes J.G., Sánchez-Saavedra M.P., Siqueiros-Beltrones D.A. and Flores-Acevedo N. 2001. Isolation and growth of eight strains of benthic diatoms, cultured under two light conditions. *J. Shellfish Res.* **20**: 603-610.
- Faust M.A., Sager J.C. and Meeson B.W. 1982. Response of *Prorocentrum mariae-lebouriae* (Dinophyceae) to light of different spectral qualities and irradiances: growth and pigmentation. *J. Phycol.* **18**: 349-356.
- Figueroa F.L., Aguilera J. and Niell F.X. 1995. Red and blue light regulation of growth and photosynthetic metabolism in *Porphyra umbilicalis* (Bangiales, Rhodophyta). *Eur. J. Phycol.* **30**: 11-18.
- Guillard R.R.L. and Ryther D. 1962. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. *Can. J. Microbiol.* **8**: 229-239.
- Holdsworth E.S. 1985. Effect of growth factor and light quality on the growth, pigmentation and photosynthesis of two diatoms, *Thalassiosira gravida* and *Phaeodactylum tricorutum*. *Mar. Biol.* **86**: 253-262.
- Honjo T., Yamamoto S., Nakamura O. and Yamaguchi M. 1989. Annual cycle of motile cells of *Gymnodinium nagasakiense* and ecological features during the period of red tide development. In: Granéli E., Sundström B., Edler L. and Anderson D.M. (eds), *Toxic marine phytoplankton*. Elsevier, New York. pp. 165-170.
- Jeffrey S.W. and Vesik M. 1977. Effects of blue-green light on photosynthetic pigments and chloroplast structure in the marine diatom *Stephanopyxis turris*. *J. Phycol.* **13**: 271-279.
- Kim D.-I., Matsubara A., Oh S.J., Simasaki O., Oshima Y. and Honjo T. Effects of nitrogen and phosphorus sources on utilization and growth kinetics of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* isolated from Yatsushiro Sea, Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi* (submitted; in Japanese with English abstract).
- Kim D.-I., Matsuyama Y., Nagasoe S., Yamaguchi M., Yoon Y.H., Oshima Y., Imada N. and Honjo T. 2004a. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). *J. Plankton Res.* **26**: 1-6.
- Kim D.-I., Nagasoe S., Oshima Y., Yoon Y.H., Imada N. and Honjo T. 2004b. A massive bloom of *Cochlodinium polykrikoides* in the Yatsushiro Sea, Japan in 2000. In: Steidinger K. A., Landsberg J.P., Tomas C.R. and Vargo G.A. (eds), *Harmful algae 2002*. UNESCO, Florida. pp. 83-85.
- Koizumi Y., Uchida T. and Honjo T. 1996. Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during a red tide in Hoketsu Bay, Japan. *J. Plankton Res.* **18**: 289-294.
- Lederman T.C. and Tett P. 1981. Problems in modeling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton. *Bot. Mar.* **24**: 125-134.
- Lee C.K., Kim H.G., Lee S.G., Jung C.S., Kim H.G. and Lim W.A. 2001. Abundance of Harmful algae, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum* and *Gymnodinium catenatum* in the coastal area of south sea of Korea and their effects of temperature, salinity irradiance and nutrient on the growth in culture. *J. Korean Fish. Soc.* **34**: 536-544 (in Korean with English abstract).
- Margalef R. 1961. Hidrografia y fitoplancton de un rea marina de la costa meridional de Puerto Rico. *Invest. Pesq.* **18**: 33-96.
- Matsuoka K. and Iwataki M. 2004. Present status in study on a harmful unarmored dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margalef. *Bull. Plankton Soc. Japan* **51**: 38-45 (in Japanese with English abstract).
- Mercado J.M., Sánchez P., Carmona R. and Niell F.X. 2002. Limited acclimation of photosynthesis to blue light in the seaweed *Gracilaria tenuistipitata*. *Physiol. Plant* **114**: 491-498.
- Nelson N.B. and Prézelin B.B. 1990. Chromatic light effects and physiological modeling of absorption properties of *Heterocapsa pygmaea* (= *Glenodinium* sp.). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **63**: 37-46.
- NFRDI 1999. *Harmful algal blooms in Korean coastal waters from 1997 to 1998*. National Fisheries Research and Development Institute, Busan. 215 pp (in Korean).
- NFRDI 2000. *Harmful algal blooms in Korean coastal waters from 1999*. National Fisheries Research and Development Institute, Busan. 206 pp (in Korean).
- Oh S.J. and Yoon Y.H. 2004. Effects of water temperature, salinity and irradiance on the growth of the toxic dinoflagellate, *Gymnodinium catenatum* (Graham) isolated from Yeosuhae Bay, Korea. *Algae* **14**: 293-301 (in Korean with English abstract)
- Sánchez-saavedra M.P. and Voltolina D. 1994. The chemical composition of *Chaetoceros* sp. (Bacillariophyceae) under different light conditions. *Comp. Biochem. Physiol.* **107B**: 39-44.
- Takahashi M. and Hara Y. 1989. Control of diel vertical migration and cell division rhythm of *Heterosigma akashiwo* by day and night cycles. In: *Red Tides*, edited by Okaichi T, Anderson D.M. and Nemoto T. Elsevier, New York. pp. 265-268.
- Tremblin G., Cannuel R., Mouget J.-L., Rech M. and Robert J.M. 2000. Change in light quality due to a blue-green pigment, mariennine, released in oyster-ponds: effect on growth and photosynthesis in two diatoms, *Haslea ostrearia* and *Skeletonema costatum*. *J. Appl. Phycol.* **12**: 557-566.
- Wallen D.G. and Geen G.H. 1971. Light quality in relation to

- growth, photosynthetic rates and carbon metabolism in two species of marine plankton algae. *Mar. Biol.* **10**: 34-43.
- Watanabe M., Kohata K., Kimura T., Takamatsu T., Yamaguchi S. and Ioriya T. 1995. Generation of a *Chattonella antiqua* bloom by imposing a shallow nutricline in a mesocosm. *Limnol. Oceanogr.* **40**: 1447-1460.
- Yamaguchi M. and Honjo T. 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 abstract).
- Yamaguchi M., Imai I. and Honjo T. 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* **57**: 1277-1284 (in Japanese with English abstract).
- Yamamoto T. and Tarutani K. 1997. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarensense* isolated from Hiroshima Bay, Japan. *Jpn. J. Phycol.* **45**: 95-101 (in Japanese with English abstract).
-
- Received 10 June 2006
Accepted 8 August 2006