

가막만에서 분리한 유해성 침편모조류 *Chattonella marina* (Subrahmanyn) Hara et Chihara (Raphidophyceae)의 성장에 미치는 수온, 염분 및 빛의 영향

노일현 · 윤양호* · 김대일¹ · 오석진²

전남대학교 대학원 수산과학과, ¹해양경찰청 해양오염관리국, ²부경대학교 해양과학공동연구소

Effects of Water Temperature, Salinity and Irradiance on the Growth of the Harmful Algae *Chattonella marina* (Subrahmanyn) Hara et Chihara (Raphidophyceae) Isolated from Gamak Bay, Korea

Il Hyeon NOH, Yang Ho YOON*, Dae-Il KIM¹ and Seok Jin OH²

Department of Fisheries Science, Graduate School of Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

¹Marine Pollution Control Bureau, Korea Coast Guard, Incheon 406-741, Korea

²Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, Daeyeon-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

The effects of water temperature, salinity and irradiance on the growth of harmful algae *Chattonella marina* isolated from Gamak Bay in South Sea, Korea were investigated. *C. marina* was able to grow in temperatures of 15-30°C and salinities of 10-35 psu. Maximum specific growth rate (0.64/day) was observed with combination of 25°C and 25 psu. Optimal growth ($\geq 70\%$ of maximum specific growth rate) was obtained with all salinities of the above 20°C. This result indicated that *C. marina* is a stenothermal of the high water temperature and euryhaline organism. *C. marina* was did not grow at irradiance $\leq 10 \mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Photoinhibition did not occur at 300 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$, which was the maximum irradiance used in this study. The irradiance-growth curve was described as $\mu=0.78(I-11.4)/(I+34.1)$ at 25°C and 25 psu. The half-saturation photon flux density (PFD) (K_s) was 56.9 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ and compensation PFD (I_c) was 11.4 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$. The result of the present study indicate that *C. marina* has advantage physiological characteristic to the interspecific competition at the embayment and costal areas of South and West Sea, Korea in summer.

Key words: *Chattonella marina*, Specific growth rate, Gamak Bay, Harmful algae, HABs

서 론

산업발달과 인구증가로 인한 연안해역의 부영양화는 범지구적인 현상이며, 이와 관련한 유해·유독 플랑크톤의 대발생 (Harmful Algae Blooms, HABs)은 해양생태계 및 인류 건강에 상당한 위협을 주고 있다 (Anderson, 1989; Hallegraeff, 1993). HABs 대표종인 침편모조류 *Chattonella marina* (Subrahmanyn) Hara et Chihara는 *Chattonella antiqua*와 함께 brevetoxins (BTX) 계와 유사한 지용성 신경독을 생산하는 종으로 (Onoue et al., 1990; Ahmed et al., 1995), 어류의 섭이와 호흡시 유리지방산 (free fatty acids)과 활성산소 (reactive oxygen species)에 의한 지질 과산화작용으로 삼투압 장애를 불러일으켜 어류를 폐사 시킨다 (Shimada et al., 1983; Oda et al., 1992; Marshall et al., 2003; Tang et al., 2005). 이와 같이 어류에 치명적일 수 있는 *C. marina*에 의한 적조는 인도 Malabar 연안에서 처음으로

발생하여 어류의 집단 폐사를 일으켰다 (Subrahmanyan, 1954). 이후 *C. marina*를 비롯한 *Chattonella* spp.는 일본의 부영양화된 내만해역을 중심으로 적조를 형성하여 막대한 수산피해를 발생시키고 있으며 (Imai et al., 1986; Okaichi, 1989; Yamaguchi et al., 1991; Hiroshi et al., 2005), 이 외에도 중국, 동아시아, 호주, 미국, 남부 브라질 그리고 네덜란드 등 범지구적인 출현 양상과 대발생이 보고되고 있다 (Tseng et al., 1993; Obedrecht and Abreu, 1995; Vrieling et al., 1995; Zhang et al., 2006). 이에 따라 최근, UNESCO 산하의 IOC에서는 *C. marina*를 국제적인 협력관리 및 주시대상 종에 해당하는 유해·유독 조류로 분류하고 있다.

한편, Hara et al. (1994)에 따르면, 세계적으로 *Chattonella*속은 현재 *C. marina*를 비롯하여 *C. antiqua*, *C. globosa*, *C. minima*, *C. ovata*, *C. subsalsa* 및 *C. verruculosa* 등 7종이 보고되고 있으며, 이중 *C. marina*를 비롯해 *C. antiqua*, *C. globosa* 및 *C. ovata* 등 4종이 한국 연안에서 출현하고 있다 (Kim et

*Corresponding author: yoonyh@chonnam.ac.kr

al., 2005). 우리나라에서의 *Chattonella*속에 대한 기록은 1983년 진동만에서 *Chattonella* sp.에 의한 첫 적조가 보고되었으나 (Park et al., 1988), 적조에 의한 어패류의 폐사 등의 수산피해 기록은 없었다. 이후 *Chattonella*속 출현과 관련한 기록은 보이지 않다가, 2004년 이후 남해와 서해를 중심으로 재차 출현이 확대·증가되는 양상을 나타내었다 (Kim et al., 2005; 국립수산과학원 홈페이지 <http://ssfri.nfrdi.re.kr>). 특히, 2005년 하계 한국 남서해역인 장흥연안과 완도 신지도 및 고흥 거금도 해역을 중심으로 *C. antiqua*가 고밀도로 출현 (최대 850 cells/mL) 하여 *Cochlodinium polykrikoides*와 함께 장기간에 걸친 혼합적조를 형성하였고, 2006년 하계 역시 *Chattonella* spp.가 서해 태안군 안면도 일원에서 고밀도로 출현하여 (최대 3,000 cells/mL, 국립수산과학원 홈페이지 <http://ssfri.nfrdi.re.kr>) 관련 수산업 종사자와 연구자들을 긴장시키고 있다.

해양에서 식물플랑크톤 세포수의 급속한 증가는 적조발생의 필수요인이기에 대상 생물의 성장에 영향을 미치는 환경조건과 생태·생리학적 특징을 파악하는 것은 무엇보다 중요하다. 특히, 대상 종이 가지는 수온과 염분 및 빛의 최적조건은 그 종의 성장에 대단히 중요한 조건이 된다. 국외에서 분리된 *C. marina*의 수온, 염분 및 빛에 대한 증식 생리특성의 경우, 호주 Boston Bay와 일본 Seto Inland Sea의 Suo-Nada에서 각각 분리된 종들의 최적 성장조건에 있어서 Boston Bay 분리주가 10 psu 정도 높은 염분을 필요로 한 반면, 최대 성장속도는 Suo-Nada 분리주가 월등히 높은 것으로 보고되었다 (Yamaguchi et al., 1991; Marshall and Hallegraef, 1999). 빛에 대한 성장조건 역시 차이를 보여, 일본 Kagoshima Bay 분리주가 20 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 에서 성장이 가능하며, Suo-Nada 분리주의 경우 보상광량 (I_c)이 10.5 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 로 매우 낮은 반면, Boston Bay 분리주의 I_c 는 25 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 로 2배 이상의 높은 값을 나타내어 각기 다른 환경에 대한 증식 생리특성에 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 일반적으로 동일종이라 할지라도 규조류인 *Skeletonema costatum*의 경우 역시 분리주에 따라 많은 생리적 차이를 보이는 것으로 알려져 있기에 (Gallagher, 1982), 최근 우리나라 연안 해역에서 출현이 확대·증가되고 있는 *C. marina*에 대한 증식 생리특성을 파악하는 것은 무엇보다 중요하다고 판단된다.

본 연구는 남해 가막만에서 분리한 *C. marina*의 최적 성장에 영향을 주는 수온, 염분 및 빛의 조건을 파악하였다.

재료 및 방법

*Chattonella marina*의 분리와 전 배양조건

2004년 7월 한국 남해 중앙부에 위치한 가막만의 어류 해상가두리양식장이 밀집한 화태도 인근 해역에서 표층해수를 채수하였다. *C. marina*의 세포는 pasteur pipette (ca. \varnothing 50-100 μm)으로 분리하였다 (Guillard, 1995). 분리된 세포는 여과해수 (Membrane filter, pore size 0.45 μm ; 32.5 psu)를 이용해 3-4회 반복 세척한 후 CmGM-0407 분리주를 확립하여 배양튜브

(Costal Co., NY-14831)에 이식하였다. 사용된 배지는 남해 외양수를 바탕으로 한 32.5 psu의 개량형 SWM-3 배지 (Itoh and Imai, 1987)로 pH는 1 N-HCl과 1 N-NaOH를 이용하여 8.2로 조정하여 사용하였다. 전 배양시 온도와 광 조건은 25°C, 130 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ (12L:12D; cool-white fluorescent lamp)에서 실시하였다. *C. marina*에 대한 무균화 처리는 하지 않았지만, 2차 생물학적 오염을 막기 위해 모든 실험기구는 고압멸균 (202 kpa, 20 min) 및 건열멸균 (120°C, 3 hr)하여 사용하였다.

수온과 염분 단계별 성장속도 변화

수온과 염분에 따른 성장실험 장치는 수온 10, 15, 20, 25 및 30°C의 5단계, 염분은 10, 15, 20, 25, 30 및 35 psu의 6단계를 조합한 총 30 단계의 조합조건에서 성장속도를 관찰하였다. 배양실험에 사용한 배양기는 설정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 편차를 가진 온도구배항온기 (Vision Co., VS-3DM)를 이용하였다. 염분농도 조절을 위해 10-30 psu는 초순수이온수를 첨가하였고, 35 psu는 60°C로 설정한 교반기를 이용해 증발시켰다.

수온과 염분의 급격한 변화에 의한 접종 생물의 충격을 줄이기 위해서 수온 25°C, 염분 32.5 psu, 광 조건 130 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 하에서 전 배양을 실시하여 얻은 대수성장기 세포를 1-2개월에 걸쳐 희망 수온과 염분 조건에 순차적으로 옮겨서 미리 순응시켰으나, 10°C하의 모든 염분조건에서 세포 성장이 이루어지지 않아 성장률을 0/day로 간주하였다.

각각의 수온과 염분 단계에서 적용된 세포는 25 cm³ 용적의 배양 플라스크 (Sarstedt Inc. Co., NC-28658)에 개량형 SWM-3 배지 25 mL를 주입한 후, 세포밀도가 약 100 cells/mL가 되도록 접종하였고, 광학현미경 (Nikon, Optiphot-2)하에서 Sedwick-Rafter counting chamber를 이용하여 2일 간격으로 직접검정에 의해 세포의 증식속도를 관찰하였다. 또한 배양실험시 광 조건은 배양기 위치에 따라 광량이 조금씩 변하기에 1일 2회 배양용기의 위치를 달리함과 동시에 세포의 점액질 생산에 의한 세포 응집을 방지하기 위해 부드럽게 흔들어 주었다. 각 수온과 염분 조합의 실험은 triplicate로 수행하였으며, 성장속도는 평균값으로 나타내었다. 다만, triplicate 중 명확히 오류로 판단된 값은 평균시 제외하였다.

세포의 비성장속도 (μ)는 대수성장기 (exponential growth phase) 동안의 세포수에 대해 아래의 식을 이용해 계산하였다.

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

N_0 , N_t : 대수성장기의 초기와 t 시간 (day) 후의 세포밀도 (cells/mL)

Δt : 대수성장기 배양시간 (day)

한편, *C. marina*의 증식에 영향을 미치는 수온과 염분의 관계를 파악하기 위해 다음과 같은 다항식을 표현하여 *C. marina*의 출현 모델을 예측하여 계산하였으며, 제 3차 까까지

변수감소법에 따른 중회귀분석을 실시하였다.

$$\mu = \beta_{00} + \beta_{10} \cdot T + \beta_{20} \cdot T^2 + \beta_{30} \cdot T^3 + \beta_{01} \cdot S + \beta_{02} \cdot S^2 + \beta_{03} \cdot S^3 + \beta_{11} \cdot T \cdot S + \beta_{12} \cdot T \cdot S^2 + \beta_{21} \cdot T^2 \cdot S + \dots + \beta_{nn} \cdot T^n \cdot S^n + \epsilon$$

- μ : 성장속도 (specific growth rate/day)
- T: 수온 (water temperature; °C)
- S: 염분 (salinity; psu)
- β_m : 회귀계수 (regression coefficient)
- ϵ : 오차항 (error term)

광 조건에 따른 성장속도 변화

광 조건에 따른 성장속도 역시 광학현미경을 이용한 직접 검정으로 평가하였다. 수온과 염분 단계별 성장실험과 동일한 조건에서 전 배양을 실시하여 세포밀도 약 8.0×10^3 cells/mL까지 성장시켰다. 이후 이 대수성장기 세포를 25 cm³ 용적의 배양 플라스크에 개량형 SWM-3 배지 25 mL를 주입한 후, 세포밀도가 약 100 cells/mL 정도 되게 접종하였다. 광 조건은 25°C, 25 psu하에서 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 200, 250 그리고 300 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 의 11단계로 하였다. 배양 기간 중 매일 2회씩 배양용기의 위치를 달리하여 배양기 내 광량의 편차를 최소화 하였다. 이 실험 또한 triplicate로 수행하였다. 성장속도와 광량과의 관계는 Lederman and Tett (1981)의 모델을 개량한 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

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

- μ : 성장속도 (specific growth rate/day)
- I: 광량 (irradiance; $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
- I_c : 보상광량 (compensation photon flux density; $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
- μ_m : 최대 성장속도 (maximum specific growth rate/day)
- K_s : 반포화광량 (half-saturation light intensity; $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

결 과

수온과 염분단계별 성장속도

*C. marina*의 성장에 대한 수온과 염분단계별 영향은 수온 10°C의 모든 염분조건과 수온 15°C의 염분 10 psu를 제외한 수온과 염분범위에서 성장하는 것으로 나타났다. 성장이 이루어진 각 단계별 조합 중 수온 조건에 따른 염분 구배별 성장속도의 범위를 살펴보면, 수온 15°C에서는 0.02-0.11/day (0.09±0.04/day; 10 psu에서는 성장이 이루어지지 않아 제외함), 20°C에서는 0.24-0.37/day (0.32±0.05/day), 25°C에서는 0.43-0.64/day (0.55±0.07/day) 그리고 30°C에서는 0.40-0.55/day (0.49±0.07/day)로 나타났다 (Fig. 1). 또한 수온과 염분에 대한 성장속도를 contour plotting으로 표현한 결과 수온이 높을수록 성장속도가 증가하여 수온 25-30°C에서 높은 성장률을 보였고,

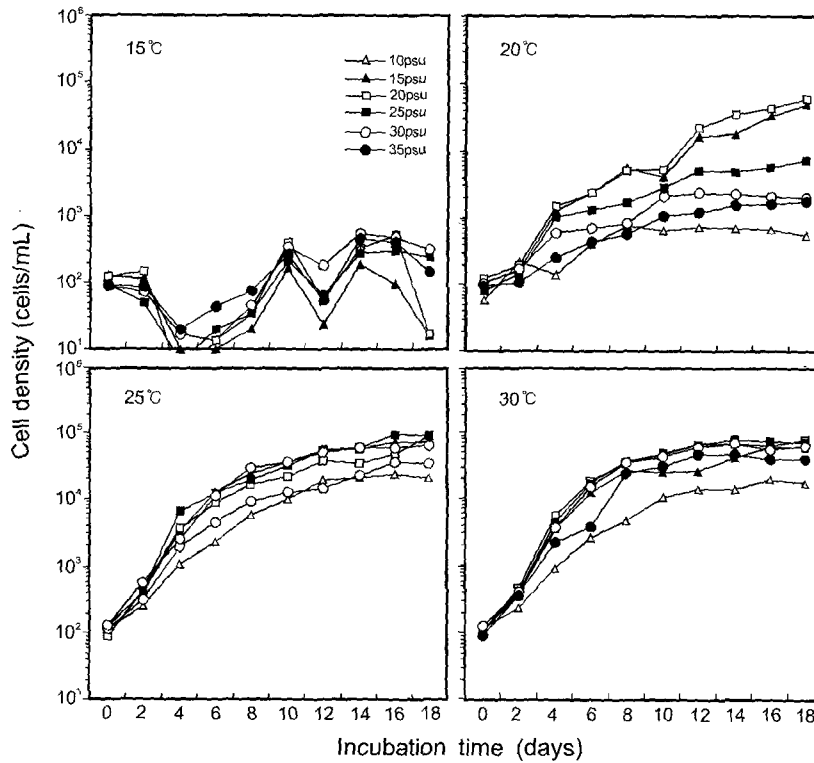


Fig. 1. Growth curves of *Chattonella marina* grown at various water temperature and salinity combinations. Each symbol represents the average of triplicate data. pH 8.2, 130 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (12L: 12D; cool-white fluorescent lamp).

최대 성장속도는 수온 25°C, 염분 25 psu에서 0.64/day로 나타났다 (Fig. 2). *C. marina*의 배양실험으로 얻어진 성장속도에 따른 수온과 염분의 조건을 이용한 이원 배치 분산분석 (two-factor ANOVA) 결과, 0.001% 수준 내에서 *C. marina*의 성장속도에 대한 수온과 염분의 유의한 영향을 나타내었다. 수온과 염분 및 그들의 교호작용의 제곱 합 (sum of squares)은 총 제곱 합 (total sum of squares)에서 각각 90.6%, 2.3% 및 5.5%를 설명하고 있기에 *C. marina*의 성장속도는 수온에 크게 의존할 뿐 염분과 교호작용의 영향은 매우 작은 것으로 나타났다 (Table 1). 또한 중회귀분석에 의해 예측모델식을 계산한 결과 아래의 식을 얻을 수 있었다.

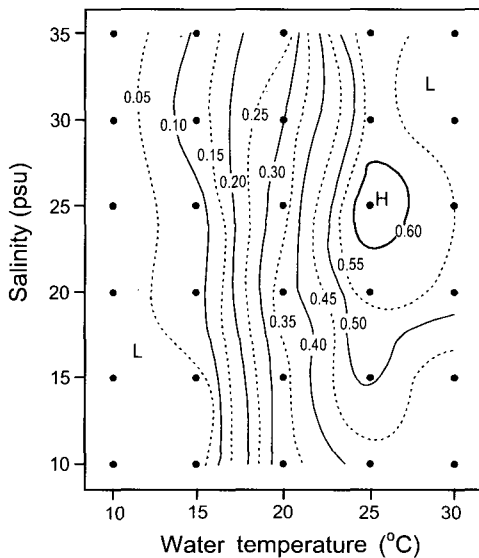


Fig. 2. Contour plots of specific growth rate/day of *Chattonella marina* as a function of temperature and salinity.

Table 1. Summary of two-way analysis of variance (ANOVA) of the population growth rate of *Chattonella marina* as a function of temperature, salinity and their interaction

Source of variation	d.f.	Sum of squares	Mean square	F
Temperature	4	4.383	1.096	957.576*
Salinity	6	0.110	0.018	15.979*
Interaction	24	0.267	0.011	9.729*
Error	70	0.080	0.001	
Total	104	4.893		

*p<0.001.

$$\mu = 1.157 - 0.293T + 0.018T^2 - 0.00031T^3 + 0.001TS + 0.000068T^2S - 0.0001851TS^2$$

구해진 모델식의 보정된 R²값은 0.959로, 배양실험 결과의 실측값과 예측값 사이에 높은 상관계수 (r=0.976)를 나타내고 있어, *C. marina*의 성장에 광 조건과 영양염 제한요인 등과 같은 환경변수들을 배제할 경우 현장의 수온과 염분 농도를 이용해 종의 성장속도를 추정할 수 있다 (Fig. 3).

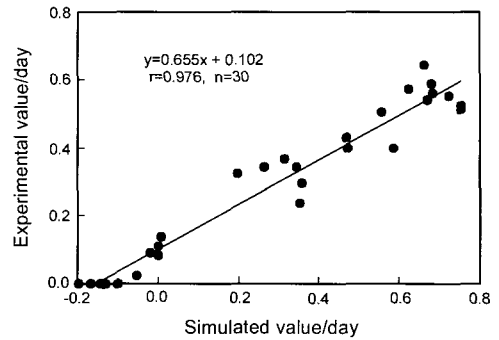


Fig. 3. Relationship between experimental value and simulated value of growth rate in *Chattonella marina*.

광 조건에 따른 성장속도

*C. marina*는 10 μmol photons/(m² s)의 광 조건에서는 성장하지 않았고, 30 μmol photons/(m² s)부터 성장이 이루어졌으나 최대 세포밀도는 477 cells/mL로 낮게 나타났다. 그러나 50-70 μmol photons/(m² s)에서 각각 2.3×10⁴와 2.6×10⁴ cells/mL까지 증가했으며, 90-300 μmol photons/(m² s)에서는 6.0×10⁴-8.9×10⁴ cells/mL까지 세포밀도가 크게 증가하였다 (Fig. 4, A). 또한 성장이 이루어진 광 조건 (30-300 μmol photons/(m² s))에서 성장속도의 범위는 0.17-0.63/day로 나타났으나, 성장 포화상태를 보인 90 μmol photons/(m² s) 이상의 광량에서 성장속도는 거의 유사하였다 (Fig. 4, B). 광 조건에 의해 유도된 성장식은 아래와 같다.

$$\mu = 0.78 \frac{I - I_c}{I + I_s} \quad (r = 0.976)$$

여기서 μ_m은 0.78/day, I_c는 11.4 μmol photons/(m² s) 그리고 K_s는 56.9 μmol photons/(m² s)로 나타났다.

고찰

남해 가막만에서 분리한 *C. marina*는 수온 15-30°C, 염분 10-35 psu 범위에서 성장이 가능하였으며, 최대 성장속도 (0.64/day)는 수온 25°C와 염분 25 psu에서 관찰되었다. 이와 같이 성장이 가능한 수온과 염분의 범위는 일본 Suo-Nada와 Kagoshima Bay 분리주와 동일하였으나, 호주 남부 Boston Bay 분리주 보다는 조금 더 높은 수온 및 낮은 염분에서 성장이 가능하였다 (Table 2). 그리고 일본 Suo-Nada와 Kagoshima Bay 분리주가 25°C, 20 psu에서, 호주 Boston Bay 분리주가 25°C, 30 psu에서 최대 성장속도를 보여 최적 수온조건은 동일한 반면, 염분조건은 분리주에 따라서 다소 차이를 보였다 (Table 2). 이 외에 가막만의 *C. marina*는 동 속인 *C. antiqua* (일본 Suo-Nada 분리주)와 *C. subsalsa* (미국 Delaware Inland Bay 분리주)의 최대 성장속도 시의 수온, 염분 조건과 유사한 반면, 15°C, 25 psu에서 매우 빠른 성장속도를 보인 *C. verruculosa* (일본 Hiroshima Bay 분리주)보다는 최적 수온이 크게 높은 것으로 나타났다 (Table 2). 또한 여러 유해성 와편

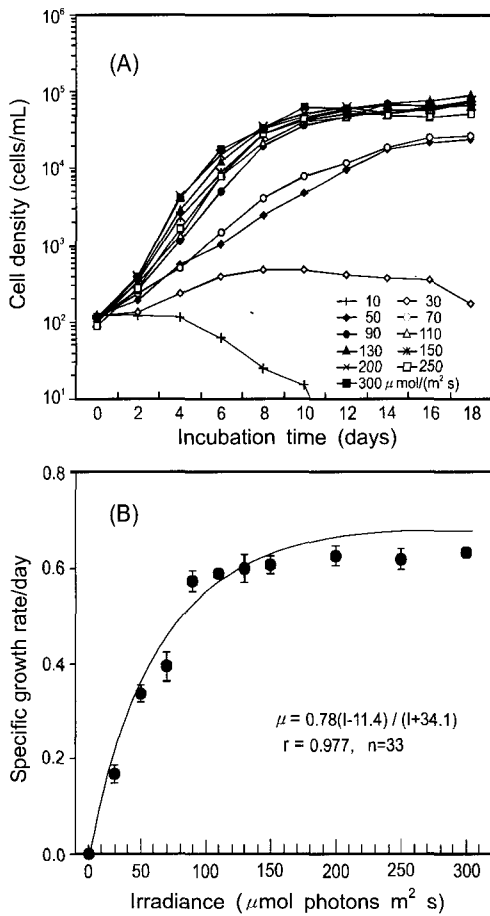


Fig. 4. Growth curves (A) and specific growth rate/day (B) of *Chattonella marina* as function of light intensities at constant temperature and salinity.

모조류와 비교하면, 가막만의 *C. marina*는 *Alexandrium tamarense*와 *Gyrodinium aureolum*보다 높은 수온에서, *A. tamarense*, *Heterocapsa circularisquama*, *Gymnodinium catenatum* 및 *Cochlodinium polykrikoides*보다 낮은 염분 조건에서 최대 성장속도를 나타내고 있으며, *Karenia mikimotoi*와 *H. circularisquama*를 제외한 다른 종들에 비해서 최대 성장속도가 빠른 것을 알 수 있었다 (Table 2). Kahn et al. (1998)은 *C. marina*의 대발생에 있어 가장 중요한 환경요인은 수온이라고 보고했다. 최근 우리나라 여수연안에서 *C. marina*를 비롯한 *Chattonella* spp.는 20.8-28.4°C 범위에서 출현하였으며 (Kim et al., 2005), 남해의 장흥, 완도 및 고흥 연안해역과 서해 태안군 안면도 일원에서 약 22.1-23.1°C 범위에서 *Chattonella* spp.에 의한 적조 (1,000-3,000 cells/mL)가 발생하였다 (국립수산과학원 홈페이지 <http://ssfri.nfrdi.re.kr>). 이와 같은 수온 범위는 본 연구의 실내 실험의 결과로 나타난 최대 성장속도의 약 70%에 해당하는 것으로 배양실험 결과와 잘 일치한다. 또한 성장에 대한 최적수온은 *C. marina* cyst가 높은 발아율을 보이는 수온범위 (20-25°C; Imai and Itoh, 1987;

Imai et al., 1991)와 유사하기에, 발아된 유영세포가 빠른 시일 안에 대발생 할 수 있음을 암시한다. 한편, 일본 Seto Inland Sea에서 *C. marina*는 우리나라와 유사한 23°C 이상의 수온에서 적조를 형성 (Imai et al., 1986)한 반면, 네덜란드 연안과 호주 Boston Bay에서는 이보다 낮은 18°C 이하에서도 대발생이 가능한 것으로 보고되었다 (Vrieling et al., 1995; Marshall and Hallegraeff, 1999). 즉 같은 종이라 할지라도 각 분리주에 따른 생리적 차이는 개체군 특성을 구별하는 중요한 인자로 작용할 수 있다.

가막만의 *C. marina*는 성장에 주요인으로 작용한 수온보다 염분에 대해 광범위한 내성을 가지는 것으로 나타났다 (Fig. 2, Table 1). 일반적으로 연안과 하구역의 규조류는 넓은 염분 범위에서 생존이 가능하며, *Thalassiosira pseudonana*의 경우 0-34 psu 이상의 염분범위에서 잘 성장하는 것으로 알려져 있다 (Guillard and Ryther, 1962). *C. marina*의 염분에 대한 내성은 이러한 규조류 보다는 작지만 한국 연안에서 주요 유해적조발생 외편모조류인 *Co. polykrikoides* 보다는 넓은 염분범위에서 성장이 가능한 것으로 나타났다 (Table 2). 또한 현장 출현에 있어서 동 속인 *C. subsalsa* 역시 11-28 psu의 넓은 범위에서 bloom이 확인되었으며 (Zhang et al., 2006), 또 다른 침편모조류인 *Heterosigma akashiwo* 역시 1-50 psu의 광범위한 범위에서 출현하였다 (Smayda, 1998; Zhang et al., 2006). 반면, *Fibrocaps japonica*는 이와 반대로 낮은 온도에 대한 내성 (5°C에서 생존제한)이 있으며, 염분에 대한 내성은 *C. marina*보다 적어 15 psu 아래의 염분에서 성장하지 않은 것으로 나타났다 (Khan et al., 1996). 즉 비교적 광범위한 염분 내성을 갖는 *C. marina*의 생리특성은 하계 담수 및 외부해수 등에 의해 염분 변동이 큰 우리나라 내만과 연안 해역에서 다른 유해성 적조생물과의 중간 경쟁에 유리하게 작용할 것으로 사료된다.

*C. marina*는 최대 광 조건인 300 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 에서 광 저해현상은 보이지 않았다. 하지만 Marshall and Hallegraeff (1999)에 따르면 본 종은 1,000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 에서 광 저해현상이 나타나며, 1,200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 에서 마이너스 성장을 보였다. 하계 가막만의 표층해수에 입사하는 최대 광량을 고려할 때 (최대 2,400 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$, Noh et al., unpublished), 본 연구의 광 조건보다 약 8배 정도 높다. 따라서 *C. marina*의 광 영향에 따른 더욱 세밀한 생리특성을 알기 위해서는 더 높은 광 조건하에서의 연구가 필수적이라 하겠다. 가막만의 *C. marina*의 I_c 는 11.4 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 로 일본 Suo-Nada 분리주 (10.5 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$, Yamaguchi et al., 1991)와 비슷하였지만, 호주 Boston Bay 분리주 보다는 낮은 값 (25 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$, Marshall and Hallegraeff, 1999)을 보였다. Marshall and Hallegraeff (1999)는 이와 같은 분리주에 따른 광 이용의 차이에 대해, 비교적 유사한 수온조건을 가지나 빛 요구조건이 다른 아시아 (한국, 일본, 중국) 그룹과 호주/뉴질랜드 그룹, 그리고 열대지역 해수인 인도/미국의 Florida

Table 2. The comparison of temperature and salinity ranges for growth of the *Chattonella marina*, *Chattonella* spp. and other dinoflagellates from various environments

Strains(Environments)	MSGR/day	Temperature	Salinity	Reference
<i>Chattonella marina</i>				
Gamak Bay, Korea	0.64	25 ^a ; 15-30 ^b	25 ^a ; 10-35 ^b	This study
Suo-Nada, Seto Inland Sea, Japan	0.56 (0.81*)	25 ^a ; 15-30 ^b	20 ^a ; 10-35 ^b	Yamaguchi et al., 1991
Kagoshima Bay, Japan	0.42 (0.60*)	25 ^a ; 15-30 ^b	20 ^a ; 10-35 ^b	Khan et al., 1998
Boston Bay, Australia	0.33 (0.47*)	25 ^a ; 10-30 ^b	30 ^a ; 15-45 ^b	Marshall and Hallegraeff, 1999
<i>Chattonella</i> spp.				
Suo-Nada, Seto Inland Sea, Japan (<i>C. antiqua</i>)	0.67 (0.97*)	25 ^a ; 15-30 ^b	25 ^a ; 10-35 ^b	Yamaguchi et al., 1991
Hiroshima Bay, Japan (<i>C. verruculosa</i>)	1.21 (1.74*)	15 ^a ; 15-25 ^b	25 ^a ; 15-35 ^b	Yamaguchi et al., 1997
Delaware Inland Bay, USA (<i>C. subsalsa</i>)	0.78	20 ^a ; 4-30 ^b	25 ^a ; 5-30 ^b	Zang et al., 2006
Other HABs dinoflagellates				
Suo-Nada, Japan (<i>Karenia mikimotoi</i>)	0.70 (1.0*)	25 ^a ; 10-30 ^b	25 ^a ; 15-30 ^b	Yamaguchi and Honjo, 1989
Oslofjord Sea, Norway (<i>Gyrodinium aureolum</i>)	0.42 (0.61*)	20 ^a ; 12.5-22.5 ^b	22.3 ^a ; 17.8-34 ^b	Nielsen and Tønseth, 1991
Mikawa Bay, Japan (<i>Alexandrium tamarense</i>)	0.23	15 ^a ; 5-20 ^b	32 ^a ; 10-35 ^b	Yamamoto et al., 1995
Ago Bay, Japan (<i>Heterocapsa circularisquama</i>)	0.90 (1.30*)	30 ^a ; 15-30 ^b	35 ^a ; 10-35 ^b	Yamaguchi et al., 1997
Yeosuhae Bay, Korea (<i>Gymnodinium catenatum</i>)	0.50	25 ^a ; 15-30 ^b	30 ^a ; 15-35 ^b	Oh and Yoon, 2004
Furue Bay, Japan (<i>Cochlodinium polykrikoides</i>)	0.41	25 ^a ; 15-30 ^b	34 ^a ; 20-36 ^b	Kim et al., 2004
Hakozaki Harbor, Japan (<i>Gyrodinium instriatum</i>)	0.49 (0.70*)	25 ^a ; 15-30 ^b	30 ^a ; 5-40 ^b	Nagasoe et al., 2006

MSGR/day, maximum specific growth rate; *Original paper(division/day)

^aMaximum growth rate condition, ^bTotal growth range, ND: no data.

그룹 등 *C. marina*는 두개의 생활양식 또는 세 개의 생태적 표현특성을 갖는다고 제안하고 있다. 한편, 본 종의 I_c 값을 한국 남해에 자주 출현하는 유해성 편모조류와 비교하면, *K. mikimotoi* (일본 Suo-Nada 분리주; Yamaguchi and Honjo, 1989)의 $0.7 \mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 와 *He. akashiwo* (Takahashi and Hara, 1989)의 $1.0 \mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 보다 높은 반면, *A. tamarense* (일본 Hiroshima Bay 분리주; Yamamoto et al., 1995)의 $45 \mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 보다 낮고, *Co. polykrikoides* (일본 Furue Bay 분리주; Kim et al., 2004), *G. catenatum* (한국 여수해만 strain; Oh and Yoon, 2004)의 $10.4 \mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 과 유사하였다.

Oh and Yoon (2004)은 우리나라 남해 연안의 평균 투명도로 부터 얻어진 소광계수와 해수면 광도 및 실내배양에 따른 I_c 값을 가지고 *G. catenatum*의 성장수심을 14 m로 계산하였다. *C. marina*는 *G. catenatum*와 유사한 I_c 값을 나타내기에 남해 연안에서 *C. marina*의 성장이 가능한 수심 역시 이와 유사한 약 14 m 전후가 될 것으로 추정된다. 아직까지 *C. marina*의 생존전략 중 주야수직이동의 여부는 보고되지 않았지만, 동 속으로서 형태학적 특성 및 cyst 단계를 포함한 생리 특성이 유사한 *C. antiqua* (Imai and Itoh, 1987; Imai et al., 1984, 1991; Yamaguchi et al., 1991; Kahn et al., 1998)의 경우 *Co. polykrikoides*와 *G. catenatum* 등과 같이 빛과 영양염의 효율적 이용을 위해 주야수직이동을 하는 것으로 알려져 있다 (Watanabe et al., 1991, 1995; Bada et al., 2001; Kim et al., 2004). *C. antiqua*의 주야수직이동 속도는 Watanabe et al. (1995)에 의해 일본 Harima-Nada에서 길이 18 m, 직경 5 m 크기의 자연환경과 교류가 가능한 mesocosm에서 관찰되었고, 침강·상승시 속도가 유사한 0.8 m/hr로 산출되었으며

(Watanabe et al., 1995), 명 조건과 거의 동일한 비율로 암 조건에서도 영양염을 흡수(명 조건의 83-93%)할 수 있는 것으로 나타났다 (Nakamura and Watanabe, 1983). 이로부터 *C. marina* 역시 야간에는 하강하여 저층에서 풍부한 영양염을 흡수하고, 주간에는 상승하여 성장가능 수심 내에서 효율적인 광 이용이 가능할 것으로 추정된다. 다만 본 연구에서 *C. marina*의 주야수직이동 및 성장에 필요한 영양염 흡수동력학 등의 연구가 수행되지 않아 이를 단정할 수 없다.

이와 같은 내용으로부터 수온과 염분 및 광 조건만을 고려 하더라도, 가막만의 *C. marina*는 낮은 광 조건에서 성장이 가능하며, 고온을 선호하는 협온성 그리고 넓은 염분범위에서 성장이 가능한 광염성 생리특성을 갖기에, 하계 높은 수온과 염분의 변동이 큰 특성을 지닌 우리나라 남해와 서해의 내만 및 연안에서 종간 경쟁에 유리한 위치를 차지하여 충분히 우점 가능한 종이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- Ahmed, M.D., O. Arakawa and Y. Onoue. 1995. Toxicity of cultured *Chattonella marina*. In: Harmful Marine Algal Blooms. Lassue, P., G. Arzul, E. Erard, P. Gentien and C. Marcaillou, eds. Lavoisier, New York, 499-504.
- Anderson, D.M. 1989. Physiology and bloom dynamics of toxic *Alexandrium* species, with emphasis on life cycle transitions. In: Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms. Anderson, D.M., A.D. Cambella and G.M. Hallegraeff, eds. Springer, Berlin, 29-48.

- Bada, T., S. Hiyama and T. Tainaka. 2001. Vertical migration of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* and toxicity of cultured oyster in Senzaki Bay, Yamaguchi Prefecture. *Bull. Plankton Soc. Jap.*, 48, 95-99.
- Guillard, R.R.L. 1995. Culture methods. In: Manual on harmful marine microalgae. Hallegraeff, G.M., D.M. Anderson and A.D. Cembella, eds. UNESCO, Paris, 45-62.
- Guillard, R.R.L. and J.H. Ryther. 1962. Studies of marine planktonic diatoms. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula conjervaces* (Cleve) Gran. *Can. J. Microbiol.*, 8, 222-239.
- Hara, Y., K. Doi and M. Chihara. 1994. Four new species of *Chattonella* (Raphidophyceae, Chromophyta) from Japan. *Jpn. J. Phycol.*, 42, 407-420.
- Hallegraeff, G.M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32, 79-99.
- Hiroshi, S., H. Okada, I. Imai and T. Yoshida. 2005. High toxicity of the novel bloom forming species *Chattonella ovata* (Raphidophyceae) to cultured fish. *Harm. Algae*, 4, 783-787.
- Imai, I. and K. Itoh. 1987. Annual life cycle of *Chattonella* spp., causative flagellates of noxious red tides in the Inland Sea of Japan. *Mar. Biol.*, 94, 287-292.
- Imai, I., K. Itoh and M. Anraku. 1984. Distribution of dormant cells of *Chattonella* in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, and temperature characteristics of germination. *Jap. Bull. Plankton Soc.*, 31, 35-42.
- Imai, I., S. Itakura and K. Itoh. 1991. Life cycle strategies of the red tide causing flagellates *Chattonella* (Raphidophyceae) in the Seto Inland Sea. *Mar. Poll. Bull.*, 23, 165-170.
- Imai, I., K. Itoh and M. Kamizono. 1986. Distribution of dormant cells of *Chattonella* (Raphidophyceae) and occurrence of summer red tide in Suo-Nada, western Seto Inland Sea. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 52, 1665-1671.
- Itoh, K. and I. Imai. 1987. Raphidophyceae. In: The Japan Fisheries Resources Conservation Association. ed. A Guide for Studies of Red Tide Organisms. Shuwa, Tokyo, 122-130.
- Kahn, S., O. Arakawa and Y. Onoue. 1998. Physiological investigation of a neurotoxin-producing phytoflagellate, *Chattonella marina* (Raphidophyceae). *Aquacult. Res.*, 29, 9-17.
- Khan, S., O. Arakawa and Y. Onoue. 1996. Growth characteristics of a neurotoxin producing chloromonad, *Fibrocapsa japonica* (Raphidophyceae). *J. World Aquacult. Soc.*, 27, 247-253.
- Kim, D.-I., Y. Matsuyama, S. Nagasoe, M. Yamaguchi, Y.H. 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.
- Kim D.-I., S. Nagasoe, Y. Oshima, Y.H. Yoon, N. Imada and T. Honjo. 2004. A massive bloom of *Cochlodinium polykrikoides* in the Yatsushiro Sea, Japan in 2000. In: Harmful Algae 2002. Steidinger, K.A., J.P. Landsberg, C.R. Tomas and G.A. Vargo, eds. UNESCO, Florida, 83-85.
- Kim, D.I., I.H. Noh and Y.H. Yoon. 2005. *Chattonella* spp. (Raphidophyceae), a novel species responsible for the potentially harmful algal blooms in Korean coastal waters. *Proc. KOSMEE Fall Annual Meeting*, 127-131.
- Lederman, T.C. and P. Tett. 1981. Problems in modeling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton. *Bot. Mar.*, 24, 125-134.
- Marshall, J.A., P.D. Nichols, B. Hamilton, R.J. Lewis and G.M. Hallegraeff. 2003. Ichthyotoxicity of *Chattonella marina* (Raphidophyceae) to damselfish (*Acanthochromis polycanthus*): the synergistic role of reactive oxygen species and free fatty acids. *Harm. Algae*, 2, 273-281.
- Marshall, J.M. and G.M. Hallegraeff. 1999. Comparative ecophysiology of the harmful alga *Chattonella marina* (Raphidophyceae) from South Australian and Japanese waters. *J. Plankton Res.*, 21, 1809-1822.
- 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. *Harm. Algae*, 5, 20-25.
- Nakamura, Y., J. Takashima and M. Watanabe. 1988. Chemical environment for red tides due to *Chattonella antiqua* in the Seto Inland Sea, Japan Part 1. Growth bioassay of the seawater and dependence of growth rate on nutrient concentration. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 44, 113-124.
- Nakamura, Y. and M.M. Watanabe. 1983. Nitrate and phosphate uptake kinetics of *Chattonella antiqua* in light/dark cycles. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 39, 167-170.
- Nielsen, M.V. and C.P. Tønseth. 1991. Temperature and salinity effect on growth and chemical composition

- of *Gyrodinium aureolum* Hulburt in culture. J. Plankton Res., 13, 389-398.
- Obedrecht, C. and P.C. Abreu. 1995. Raphidophycean in southern Brazil. Harm. Algae News, 12/13, 4.
- Oda, T., A. Ishimatsu, S. Shimada, S. Takeshita and T. Muramatsu. 1992. Oxygen-radical-mediated toxic effects of the red tide flagellate *Chattonella marina* on *Vibrio alginolyticus*. Mar. Biol., 112, 505-509.
- Oh, S.J. and Y.H. Yoon. 2004. Effect of water temperature, salinity and irradiance on the growth of the toxic dinoflagellate, *Gymnodinium catenatum* (Graham) isolated from Yeosu Bay, Korea. Algae, 19, 293-301.
- Okaichi, T. 1989. Red tide problems in Seto Inland Sea, Japan. In: Environmental Science and Toxicology. Okaichi, T., D.M. Anderson, T. Nemoto, eds. Red tides: Biology, Elsevier, New York, 137-142.
- Onoue, Y., M.S. Haq and K. Nozawa. 1990. Separation of neurotoxins from *Chattonella marina*. Nippon Suisan Gakkaishi, 56, 695.
- Park, J.S., H.G. Kim and S.K. Lee. 1988. Red Tide occurrence and succession of its causative organisms in Jinhae Bay. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 41, 1-26.
- Shimada, M., T.H. Murakami, T. Imahayashi, H.S. Ozaki, T. Toyoshima and T. Okaichi. 1983. Effects of sea bloom, *Chattonella antiqua*, on gill primary lamellae of the young yellowtail, *Seriola quinqueradiata*. Acta Histochem. Cytochem., 16, 232-244.
- Smayda, T.J. 1998. Harmful algal blooms: Their eco-physiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. Limnol. Oceanogr., 42, 1137-1153.
- Subrahmanyam, R. 1954. On the life-history and ecology of *Hornellia marina* gen. et sp. nov., (Chloromonadineae), causing green discoloration of the sea and mortality among marine organisms off the Malabar Coast. Indian J. Fish., 1, 182-203.
- Takahashi, M. and Y. Hara. 1989. Control of diel vertical migration and cell division rhythm of *Heterosigma akashiwo* by day and night cycles. In: Red Tides. Okaichi, T., D.M. Anderson and T. Nemoto, eds. Elsevier, New York, 265-268.
- Tang, J.Y., D.M. Anderson and D.W.T. Au. 2005. Hydrogen peroxide is not the cause of fish kills associated with *Chattonella marina*: Cytological and physiological evidence. Aqua. Toxicol., 72, 351-360.
- Tseng, C.K., M.J. Zhou and J.Z. Zou. 1993. Toxic phytoplankton studies in China. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea. Smayda, T.J. and Y. Shimizu, eds. Elsevier, New York, 347-352.
- Vrieling, E. G., R.P.T. Koeman, K. Nagasaki, Y. Ishida, L. Peperzak, W.W.C. Gieskes and M. Veenhuis. 1995. *Chattonella* and *Fibrocapsa* (Raphidophyceae): First observation of, potentially harmful, red tide organisms in Dutch coastal waters. Netherl. J. Sea Res., 33, 183-191.
- Watanabe, M., K. Kohata and T. Kimura. 1991. Diel vertical migration and nocturnal up-take of nutrients by *Chattonella antiqua* under stable stratification. Limnol. Oceanogr., 36, 593-602.
- Watanabe, M., K. Kohata, T. Kimura, T. Takamatsu, S. Yamaguchi and T. Ioriya. 1995. Generation of a *Chattonella antiqua* bloom by imposing a shallow nutricline in a mesocosm. Limnol. Oceanogr., 40, 1447-1460.
- Yamaguchi, M. and T. Honjo. 1989. Effect of temperature, salinity and irradiance on the growth of the noxious red tide flagellate *Gymnodinium nagasakiense* (Dinophyceae). Nippon Suisan Gakkaishi, 55, 2029-2036.
- Yamaguchi, M., I. Imai and T. Honjo. 1991. Effect of temperature, salinity and irradiance on the growth of the noxious red tide flagellate *Chattonella antiqua* and *C. marina* (Raphidophyceae). Nippon Suisan Gakkaishi, 57, 1227-1284.
- Yamaguchi, M., S. Itakura, K. Nagasaki, Y. Matsutama, T. Uchida and I. Imai. 1997. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the red tide flagellate *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) and *Chattonella verruculosa* (Raphidophyceae). J. Plankton Res. 19, 1167-1174.
- Yamamoto, T., Y. Yoshizu and K. Tarutani. 1995. Effect of Temperature, Salinity and Irradiance on the Growth of Toxic Dinoflagellate *Alexandrium tamarense* isolated from Mikawa Bay, Japan. Jap. J. Phycol., 43, 91-98.
- Zhang, Y., F.X. Fu, E. Whereat, K.J. Coyne and D.A. Hutchins. 2006. Bottom-up controls on a mixed-species HAB assemblage: A comparison of sympatric *Chattonella subsalsa* and *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) isolates from the Delaware Inland Bays, USA. Harm. Algae, 5, 310-320.

2006년 8월 30일 접수

2006년 12월 26일 수리