

2008년 한국 남해안에서 분리한 유해 와편모조류 *Cochlodinium polykrikoides* Margelef의 성장에 미치는 수온, 염분 그리고 광조건의 영향

오석진*·김창훈¹·권형규²·양한섭²

부경대학교 해양과학공동연구소, ¹부경대학교 해양바이오신소재학과,
²부경대학교 해양학과

Effects of Water Temperature, Salinity and Irradiance on the Growth of Harmful Dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margelef isolated from South Sea of Korea in 2008

Seok Jin Oh*, Chang-Hoon Kim¹, Hyeong Kyu Kwon²
and Han-Soeb Yang²

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

¹Department of Marine Bio-Materials & Aquaculture,
Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Department of Oceanography, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea

The effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margelef isolated from the South Sea of Korea were examined in the laboratory. Growth was examined under the following combinations of temperature and salinity: 15, 20, 25 and 30°C, and 15, 20, 25, 30 and 35 psu at a constant irradiance of 180 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. No growth was observed with a temperature of 15°C and a salinity of 15 psu. Moderate growth rates of more than 0.30 /day were obtained at 25°C with salinities of 25–35 psu. These values are similar to in situ observations for this species. The maximum growth rate, 0.35 /day, was obtained at 25°C and 30 psu. In light experiments, cell growth of *C. polykrikoides* was conducted with constant temperature (20°C) and salinity (30 psu) under light photon flux densities (PFD) of 10, 25, 50, 70, 100, 150, 250 and 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. *C. polykrikoides* did not grow at 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Cell growth was observed at irradiance values of 25 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ and above. The irradiance-growth curve was described as $\mu = 0.30 \cdot (I - 15.27) / (I + 27.22)$, ($r = 0.99$). This suggests a compensation PFD of 15.27 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ and a maximum growth rate of 0.30 /day. In conclusion, *C. polykrikoides* prefers high salinity, temperature and irradiance in summer in Korea. These results provide important information for understanding the mechanism of *C. polykrikoides* blooms and developing technology to predict blooms of this organism in the field.

Key words: *Cochlodinium polykrikoides*, Growth, Temperature, Salinity, Irradiance

서 론

유해 와편모조류 *Cochlodinium polykrikoides* MARGALEF는 Puerto Rico 연안에서 처음으로 발견되었으며 (Margelef, 1961), 미국, 캐나다, 중남미, 호주 인도양 등에서 적조를 일으키고 있다 (Hallaegraeff, 1992; Turquet et al., 1998; Whyte et al., 2001; Garate Lizarraga et al., 2000). 1990년대 이후에는 매년 우리나라, 일본 및 중국에서도 하계에 적조를 일으켜 수산업 등에 큰 피해를 일으키고 있다 (Kim et al., 2001). 연안역에서 식물플랑크톤의 이상 성장에 영향을 주는 대표

적인 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 종 특이성에 따라 성장이 가능한 최적 수온이 다르다 (Eppley, 1972; Goldman and Carpenter, 1974). 그리고 휴면포자 형성을 포함하는 월동양식과 발아에도 직접적으로 영향을 미치기 때문에 종천이 및 생존전략에 있어 중요한 요인 중에 하나이다 (Yamaguchi, 1994). 염분은 세포의 삼투압과 관련이 있어 급격한 염분 변화는 원형질 분리나 세포 자해를 파열시키지만 (Boney, 1979), 염분에 대한 종의 내성 범위가 틀리기 때문에 광염성과 협염성 종으로 나뉜다.

*Corresponding author: sjoh1972@pknu.ac.kr

대부분 연안에서 적조를 유발하는 종은 광염성으로, 와편모조류는 12-30 psu 그리고 침편모조류는 8-30 psu에서 잘 성장하는 것으로 알려져 있다 (Iwasaki, 1979).

해양의 기초생산자인 식물플랑크톤은 태양에너지를 이용하여, 무기물로부터 유기물을 합성한다. 식물플랑크톤의 광합성과 성장은 빛의 성질에 따라 크게 좌우되며, 특히 빛의 조성은 광합성 생물 및 비광합성 생물의 신진대사까지 영향을 준다 (Sánchez-Saavedra and Voltina, 1994). 특히 편모조류는 운동능력을 보유하고 있어, 광학적으로 성장할 수 있는 심도까지 유영이 가능하므로 저층의 풍부한 영양염을 섭취할 수 있다. 따라서 보다 낮은 광 조건에서도 성장할 수 있는 좋은 유영심도가 깊어져 다른 종보다 유리한 생존 전략을 가질 수 있다.

미세조류 생리적인 특성은 분리된 해역 및 시기에 따라 다르기 때문에 (Gallagher, 1982), 기존에 보고되어 있는 자료와 비교를 목적으로 (Kim et al., 2001; Lee et al., 2001; Kim et al., 2004; Lee and Moon 2008; Lim et al., 2009), 2008년도 8월 남해안에서 분리한 *C. polykrikoides*의 최적 수온, 염분 그리고 광조건의 특성을 실내 배양실험을 통해 살펴보았다. 또한 *C. polykrikoides*가 언제 어디서 고밀도로 성장하는지 예측하기 위해서 종의 성장과 생존을 지배하는 물리, 화학, 생물학적인 영향을 수량적으로 파악하는 것이 필요하다. 그래서 수온과 염분의 관계를 다항식으로 표현하여 *C. polykrikoides*의 출현 예측모델을 구축하고, 저차영양단계의 생태계 모델 작성에 있어 기본적인 식견을 제공함으로써, 본 종에 따른 어류폐사 예보에 필요한 정보를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

*Cochlodinium polykrikoides*의 분리와 배양

2008년 8월 육지도 남방 50 km 떨어진 해역 (N34°15'009", E128°35'120"; Fig. 1)에서 채수 한 해수에서 pasteur pipette (ca. ϕ 50-100 μ m)를 이용하여 *C. polykrikoides*의 세포 (현존량 약 10 cells/L)를 분리 하였다. 분리되어진 세포는 여과해수 (0.22 μ m pore size, Millipore GSWP)에 4-5회 세척한 후 배양 튜브 (TB-2800, Japan)에 이식하였다. 이 때 사용되어진 배지는 해수를 바탕으로 한 f/2 (Guillard and Ryther, 1962)로 selenium (H_2SeO_3)을 최종농도가 0.001 μ M되게 첨가하여 사용하였다 (Doblin et al., 1999). 배양온도와 염분은 현장수온과 염분으로 (22°C, 33 psu), 조도는 약 100 μ mol/m²/s (12L: 12D; cool-white fluorescent lamp, DW-500M)였다. 분리한 세포에 대한 무균화 처리는 수행하지 않았지만, 2차 생물학적 오염을 막기 위해 모든 실험기구는 가압증기멸균 (202 kpa, 20 min) 또는 건조멸균 (185°C, 1 hr)하여 사용하였으며, 모든 실험은 무균작업대 (clean bench)에서 수행하였다.

수온과 염분의 변동에 따른 성장속도의 변화

배양 온도는 15, 20, 25, 30°C의 4단계, 염분은 15, 20, 25, 30, 35 psu의 5단계로 조합한 총 20 단계의 조건에서 성장속도 변화를 관찰하였다. 염분 조절은 배양액에 사용한 남해 육지

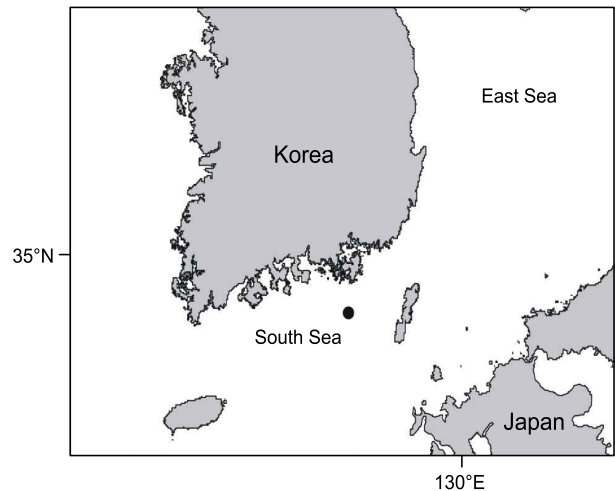


Fig. 1. Sampling station of the *Cochlodinium polykrikoides* in South Sea of Korea, 2008.

도 인근 해역의 해수가 약 33 psu이기 때문에 15-30 psu은 초순수이온수를 사용하여 조절하였으며, 35 psu는 자연 증발시켜 사용하였다. 수온과 염분의 급속한 변화는 세포 성장에 악영향을 주기 때문에 세포의 이식을 다음과 같이 수행하였다. 우선 수온 22°C, 염분 33 psu 그리고 100 μ mol/m²/s에 전배양 (pre-culture)을 한 후 대수성장기 (exponential phase)의 세포를 염분 20, 25, 30, 35 psu의 배지에 이식하여 배양하였다. 그리고 20 psu의 배지의 세포가 대수성장기에 있을 때 다시 15 psu로 이식하여 염분변화에 따른 영향을 최대한 줄였다. 수온은 22°C의 배양된 세포를 하루에 1°C씩 온도를 증가 또는 감소 시켜 각각의 온도단계에 도달하였다. 각각의 수온과 염분 단계에 적응이 된 세포를 50 ml의 f2배지에 최종 세포수가 약 100 cell/ml 되도록 첨가하였다. 그 후, 이들에 한 번씩 도립현미경 하에서 세포 성장여부를 관찰하였다. 광조건은 전배양의 조건과 같으나, 조도는 배양기 위치에 따라 조금씩 변화하기 때문에 1일 2회 각각의 배양튜브 위치를 변화 시켜 주었다. 성장속도는 다음과 같은 식을 이용하였으며 대수성장기 (exponential growth phase)를 보이는 기간 동안의 세포수를 이용하여 최소자승법 (least square regression)에 따라 계산하였다.

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

N_0 , N_t : 대수성장기에서 초기와 t시간 후의 세포수 (cells/ml)
 Δt : 대수성장기의 기간 (day)

한편, *C. polykrikoides*가 언제 어디서 고밀도로 증식을 하는지 예측이 필요하다. 그래서 이들 종의 성장과 생존을 지배하는 물리, 화학, 생물학적인 영향을 수량적으로 파악하는 것이 필요하다. 본 실험에서 설정되어진 각각의 수온과 염분 단계는 등간격으로 설정되어 있기 때문에 성장속도에 영향을 주는 수온과 염분의 관계를 다음과 같이 다항식으로 나타내었다.

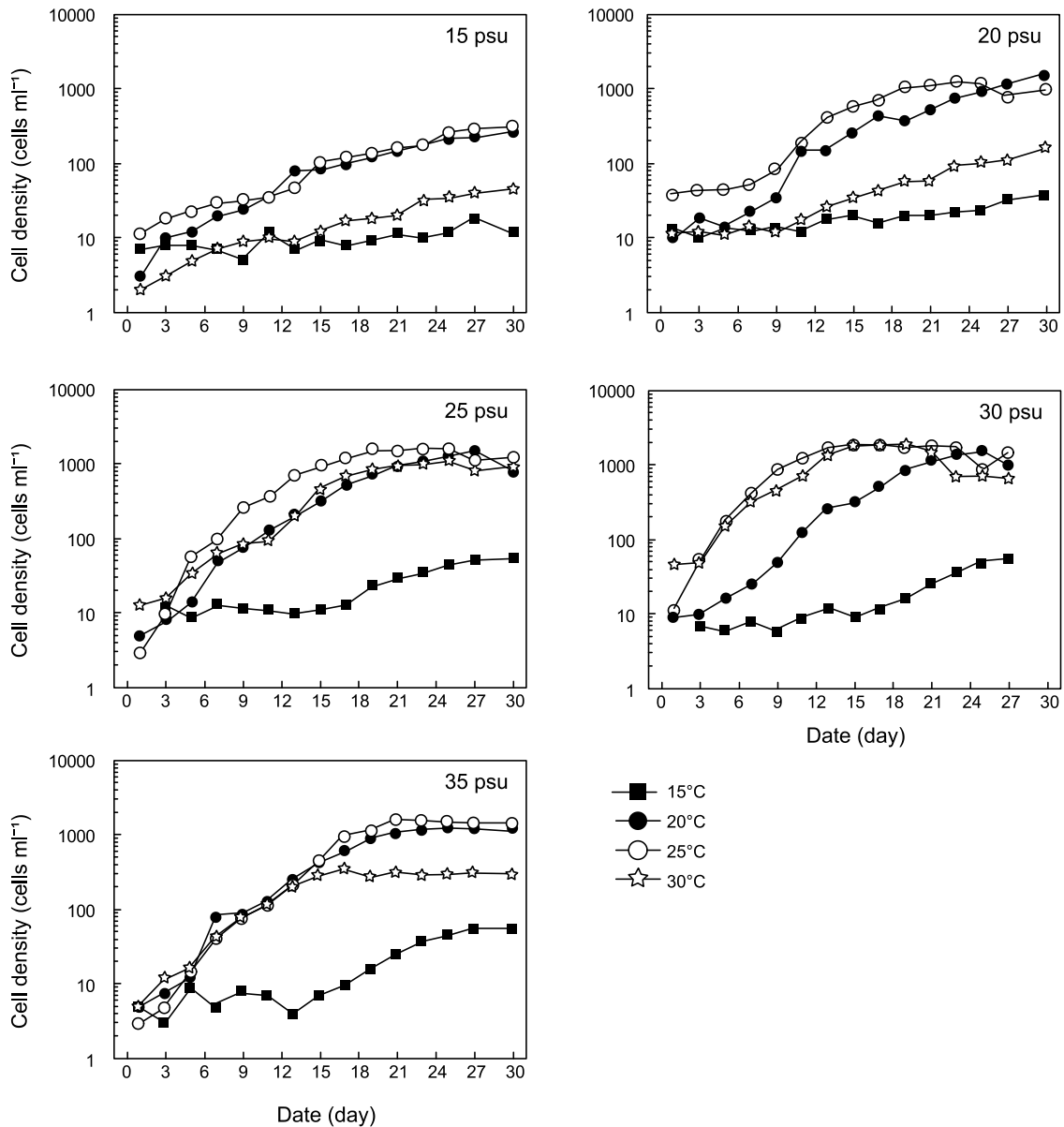


Fig. 2. Growth curves of *Cochlodinium polykrikoides* grown at various water temperature and salinity combinations. Each symbol represents the average of triplicate data. pH 8.2 and 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (12L: 12D; cool-white fluorescent lamp).

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

- μ : 성장속도(specific growth rate; /day)
- T: 수온(temperature; °C)
- S: 염분(salinity; psu)
- β_{nn} : 편회귀계수(regression coefficient)
- ε : 오차항(error term)

여기에서는 3차항까지 변수증감법 (forward-backward stepwise selection)에 따른 중회귀분석법 (multiple linear regression analysis)으로 편회귀계수 (partial regression

coefficient)를 구하였다.

광조건에 따른 성장속도 변화

광조건에 따른 증식속도의 연구는 C. polykrikoides을 수온 22°C, 염분 33 psu, 조도 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (12L: 12D; cool-white fluorescent lamp)에서 세포밀도 약 3.0×10^3 cell/ml까지 성장시킨 후 100 ml 시험관에 f2 배지 10 ml를 주입하고, 최종세포밀도가 100 cells/ml가 되도록 접종하였다. 광조건은 10, 25, 50, 70, 100, 150, 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (QSL-2100 Series; Laboratory Radiometer, Biospherical Instrument Inc.)의 7 단계로 조절하였으며, 이틀에 한번 오전 10시에 형광광도계 (Model 10-AU-005, Turner Designs, USA)로 in vivo chlorophyll 형광값

을 측정하였다. 측정은 안정한 형광값을 얻기 위해 약 5분 동안 암조건에서 방치 후 측정하였다 (Brand et al., 1981). 성장속도와 광조건의 관계는 Lederman and Tett (1981)의 직각 쌍곡선모델 (rectangular hyperbolic curve)을 개량한 다음 식을 이용하여 비선형최소자승법으로 각각의 변수를 구하였다.

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

μ : 성장속도 (specific growth rate; /day)

I: 조도 (Irradiance; $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

I_0 : 조도의 역치 (compensation PFD; $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

μ_m : 최대성장속도 (maximum specific growth rate; /day)

K_s : 반포화상수 (half-saturation light intensity; $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)

결과 및 고찰

수온과 염분의 변동에 따른 성장속도의 변화

2008년도 남해안의 *C. polykrikoides*의 출현양상은 기준에 보고되어진 외해나 일부 개방해역에서 발생하던 것과 달리, 2008년도 적조는 낮은 밀도로 연안해역에 한정되어 장기간 지속되었다 (Lim et al., 2009). 또한 수온은 다른 연도와 다르게 강한 냉수대의 장기 출현을 보였으며, 국립수산물학원 (<http://www.nfdri.re.kr>)은 7월과 8월 표층수온이 주변해역보다 낮아 냉수주위보를 발령되기까지 하였다. 또한 낮은 강우량에 따라 해수로 공급되는 영양염 공급도 낮아져, 대규모 적조 형성을 억제시킨 것으로 보였다 (Lim et al., 2009).

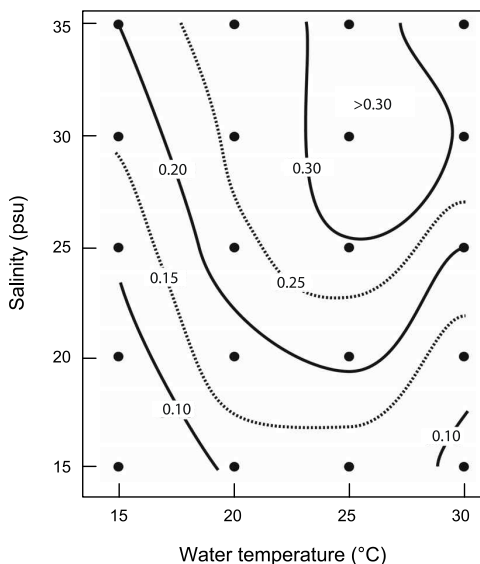


Fig. 3. Contour plots of specific growth rate (/day) of *Cochlodinium polykrikoides* at various water temperature and salinity combinations. Calculation was made for the exponential growth phase in the batch culture incubation (see Fig. 2).

본 연구에서 수행되어진 수온과 염분 단계에 대한 성장속도 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. *C. polykrikoides*는 15 psu의 15°C를 제외하고는 모든 수온과 염분 범위에서 성장을 하였다. 15 psu에 수온에 대한 성장속도의 범위는 0.10-0.12 /day이며, 20 psu에서는 0.10-0.21 /day, 25 psu에서는 0.13-0.29 /day, 30 psu에서는 0.16-0.35 /day 그리고 35 psu에서는 0.20~0.32 /day이었다. 이들 성장속도를 각각의 수온과 염분에 대한 contour plotting을 작성하면, 최대성장속도는 25°C와 30 psu에서 0.35 /day의 성장속도를 보였다 (Fig. 4). 또한 최대 성장속도의 85%를 차지하는 0.30 /day이상의 성장속도는 25°C에서 25-35 psu의 수온과 염분 구배로 고온, 고염에서 높은 성장속도를 보이는 특성을 보였다.

남해에서 분리한 *C. polykrikoides*는 일본 Furue 만에서 분리한 strain의 최대성장속도를 보였던 수온과 유사하였으나, 염분은 다소 낮게 나타났으며 (25°C, 34 psu; Kim et al., 2004), 0.3 /day이상의 성장속도를 보였던 범위는 30-36 psu로 본 연구 strain보다 협엄적인 생리적인 특성을 보였다. 1999년도에 본 연구해역과 유사한 곳에서 분리한 strain은 25°C와 35 psu에서 최대성장이 나타났지만, 30 psu에서의 성장속도와 큰 차이가 없었다 (Lee et al., 2001). 1992년부터 2007년까지 국립수산물학원이 실시한 해양환경측정망 자료와 적조정보자료를 분석한 Lee and Moon (2008)은 *C. polykrikoides* 적조는 수온이 23.1-27.8°C (평균 25.4°C), 염분은 27.75-33.83 psu (평균 29.12 psu)로 보고하였으며, 본 배양실험의 최대성장속도를 보였던 수온, 염분과 일치하는 결과를 나타내었다.

미국의 *C. polykrikoides* 적조의 경우, Long Island에서 수온이 20-25°C, 염분이 22-30 psu에서 발생하였으며 (Gobler et al., 2008), Monterey 만은 Long Island보다 넓은 범위인 11-30°C psu, 염분은 30-34 psu이었다 (Kudela et al., 2008) 또한 Pettaquamscutt Cove는 수온 19-28°C, 염분 25-30 psu로 (Tomas and Smayda, 2008), 우리나라 strain과 수온과 염분에 대한 생리적인 차이는 크지 않았다. 일본의 Imari 만은 20.0-30.6°C 27.9-34.1 psu (Yamatogi et al., 2002), Ariake 해는 27.9-29.0°C 그리고 29.33-29.36 psu (Yamatogi et al., 2006)로 이 역시 큰 차이가 없었다. 하지만, *C. polykrikoides*가 적조를 발생할 때 혼재하여 세포밀도가 증가하는 유독 와편모조류 *Gymnodinium catenatum*의 경우는 해역에 따라 적조를 유발하는 수온이 달라, 개체군을 구별하는 중요한 요소로 작용한다 (Oh and Yoon, 2004). 또한 규조류 *Skeletonema costatum*의 경우도 지역에 따라 생리적인 특성이 달라진다는 보고가 있다 (Gallagher, 1982; Lee and Shim, 1995). 지금까지 보고되어 있는 *C. polykrikoides*의 수온 및 염분의 성장특이성은 strain에 따라 큰 차이가 없어 같은 개체군에 속하는 것으로 보이지만, 이와 같은 결론을 도출하기 위해서는 유전자 분석과 같은 심도 있는 접근이 필요할 것으로 보인다.

*C. polykrikoides*의 배양실험으로 얻어진 성장속도에 따른 수온과 염분의 조건을 이용한 이원배치 분산분석 (two-factor ANOVA) 결과, 0.05% 수준 내에서 본 종의 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 30.5%, 65.8% 그리고 96.3%를 설명하고 있기 때문에 C. polykrikoides의 성장속도는 염분이 수온보다 영향을 미친다고 할 수 있지만, 그 보다 두 함수의 교호작용이 성장에 있어 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다 (Table 1). 또한, 얻어진 결과를 수온과 염분의 2인자 요인으로 해석한 결과, C. polykrikoides은 수온 또는 염분의 각각의 주효과와 그것들의 상호작용이 1%수준에 유의하였다. 변수는 3차항까지 하였으며, 변수증가법에 따른 중회귀분석에 따라 편회귀계수를 구하였다. 따라서 얻어진 회귀식은 다음과 같다.

$$\mu = -0.050 \cdot S + 0.002 \cdot T^2 + 0.003 \cdot S^2 - 0.00007597 \cdot T^3 - 0.000035 \cdot S^3 + 0.0000457 \cdot T^2 S - 0.00003529 \cdot T S^2 \quad (1)$$

여기서 중회귀계수는 0.995 (F=159.819; <0.0001)로 광조건, 영양염 그리고 포식과 피식과 같은 환경요소를 제외한 수온과 염분 함수만을 이용하여 C. polykrikoides의 성장속도를 추정할 수 있다 (Fig. 4).

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

Source of variation	d.f.	Sum of squares	Mean square	F value	P value
Temperature	3	0.058	0.019	33.258	4.279E-6
Salinity	4	0.124	0.031	53.866	1.441E-7
Interaction	7	0.182	0.026	45.034	1.119E-7
Error	12	0.007	5.58E-4	-	-
Corrected total	19	0.189	-	-	-

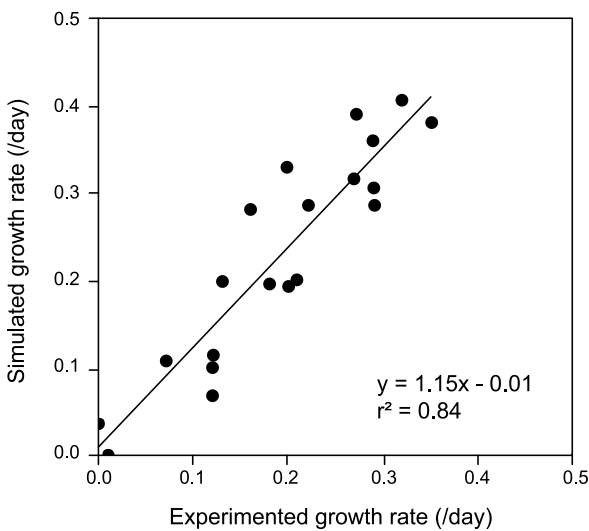


Fig. 4. Relationship between experimental data and simulation data of growth rate in *Cochlodinium polykrikoides*.

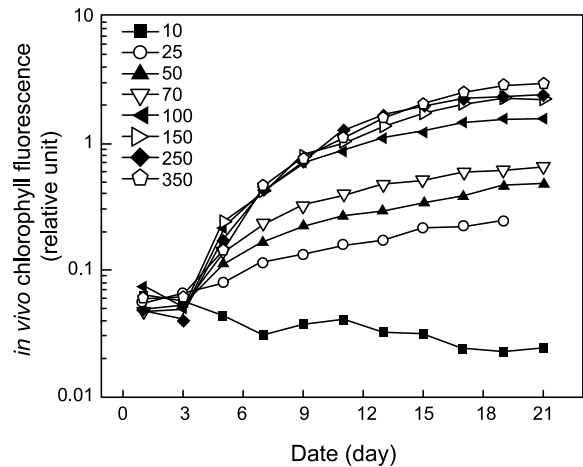


Fig. 5. *in vivo* chlorophyll fluorescence values of *Cochlodinium polykrikoides* grown at various light intensities (12L: 12D).

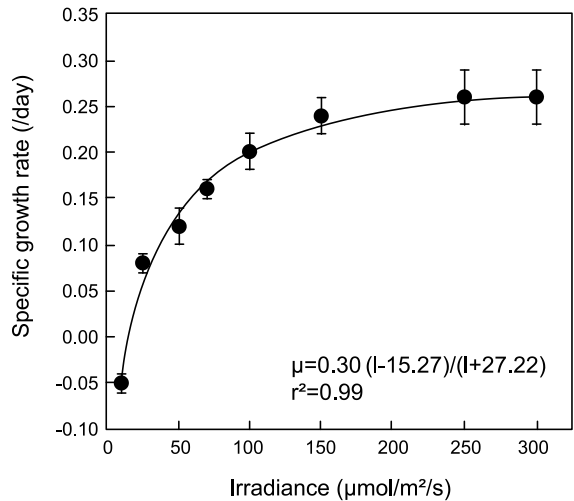


Fig. 6. Specific growth rate of *Cochlodinium polykrikoides* as function of light intensities.

조도에 따른 성장속도 변화

10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 조도에서는 C. polykrikoides이 성장하지 않았지만, 25-100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 조도의 증가와 함께 성장속도도 증가하였다 (0.08-0.20 /day). 150-300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 성장속도는 0.24-0.26 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이며, 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이상의 성장속도는 거의 유사하였다 (Fig. 5). 비선형최소자승법에 따라 유도된 식은 $\mu = 0.30 \cdot (I - 15.27) / (I + 27.22)$, ($r = 0.99$)로, μ_m 은 0.30 day^{-1} , I_0 는 15.27 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, K_s 는 53.18 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 나타났다 (Fig. 5).

본 연구에서 사용된 최대조도는 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 일부 미세조류에서 보이는 광저해현상 (photoinhibition, Oh et al. 2007)은 보이지 않았다 (Fig. 6). 이와 같은 결과는 다른 연구자들의 보고와 일치하는 것으로 Furue 만 및 Inokushi 만에서 분리한 strain에서 각각 최대 230과 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 조도에서

광저해현상은 없었다 (Kim et al., 2004; Oh et al., 2006). 또한 통영연안에서 분리한 strain은 현재 보고된 조도보다 낮은 7500 lux (약 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에 해당; 1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s} = 73.86 \text{ lux}$)에서 시험한 결과 광저해현상은 나타나지 않았다 (Lee et al., 2001). 하지만 실제 하계의 표층에서 입사하는 조도는 약 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이상일 경우가 대부분이기 때문에 배양기의 조명시설의 한계를 극복할 수 있다면 더욱 높은 조도 하에서 실험이 필요할 것으로 생각된다. 한편, 본종의 I_0 는 약 15.27 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 비교적 약한 조도에서 성장을 할 수 있는 것으로 나타났으며, Furue 만의 10.38 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 보다는 높았지만, Inokushi 만에서 분리한 strain의 15.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 와 유사하였다 (Kim et al., 2004; Oh et al., 2006).

남해안에서 *C. polykrikoides*과 유사한 시기에 출현을 하며 형태적으로 유사한 *G. catenatum*의 경우 (여수해만에서 분리한 strain), 10.4 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 유사한 조도에 대한 적응능력이 있었으며 (Oh and Yoon, 2004), 하계 우리나라 연안역에서 출현하여 어류양식업에 피해를 주고 있는 *Karania mikimotoi* (일본 Hiroshima 만에서 분리한 strain)는 0.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 *C. polykrikoides*보다는 낮았다 (Yamaguchi et al., 1989; 2000). 한편 진해만에서 춘계에 이매패류를 독화시키는 *Alexandrium tamarense* (일본 Hiroshima 만에서 분리한 strain)는 35-76 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 높은 값을 보였으며 (Yamamoto et al., 1995; Yamamoto and Tarutain, 1997), 칠펜모조류 *Heterosigama akashiwo*는 1.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 낮았다 (Takahashi and Hara, 1989). 따라서 본 종은 위에 열거한 식물플랑크톤 중 광에 대해 중간적인 생태적 지위를 가지는 것으로 생각된다.

한편 남해안에서 *C. polykrikoides*의 성장 가능한 수심을 추정해 보면, 이들 세포가 가장 성장에 있어 적합한 하계에 태양광의 평균 조도를 2,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 하고, 태양광이 해수면에서 입사할 때 약 50%가 감소한다면, 해수면에 태양조도는 1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 가 된다. 남해안의 투명도는 해역에 따라 큰 차이는 있지만 평균 5.33 m (Yang, 1978)로 가정하고, 자연광에서 $K=1.7/T$ (K , 흡수계수; D , 투명도 (m); Poole and Atkins, 1929)로 흡수계수는 0.32의 값을 얻을 수 있다. 이것을 Lambert의 방정식 $I_d = I_s \cdot e^{-kd}$ (I_d , 수심 d 에서 조도 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$); I_s , 해수면의 조도 (1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)에 대입하여 본 종의 성장에 필요한 I_0 에 해당하는 수심은 약 13 m로 계산된다. 이 수심은 대부분의 남해안 연안역 저층까지 해당되는 수심이거나, 외해의 경우 수온약층이 형성되는 수심이기 때문에, *C. polykrikoides*의 광 이용성만을 고려할 때 남해안의 연안역에서 거의 모든 해역에서 성장할 수 있을 것으로 생각된다.

*C. polykrikoides*는 이분열에 따라 체인을 형성하여 비교적 빠른 속도로 유평한다 (Park et al., 2001). Fraga et al. (1989)에 따르면 체인을 형성하는 종은 그렇지 않는 종보다 빠른 유평 속도를 가진다고 하였으며, *C. polykrikoides*의 경우, 약 3-4 m/hr의 수직이동속도로 (Park et al., 2001), *G. catenatum*와 같이 긴 체인을 형성하는 종 (1.2 m/hr; Baba et al., 2001)보다도 높은 수직이동속도를 보인다. 이는 표층보다 풍부한 영양염을 섭취하기 위해 저층으로 하강한 후 필요한 영양염을 흡수하

고, 일출에 광합성을 위해 표층으로 상승할 수 있다는 것을 의미한다. Lee and Kim (2007)의 보고에 따르면 저층의 지하수 유출에 따라 용존태 유기물의 공급은 무기영양염이 제한된 해역에 식물플랑크톤의 적조를 유발시키는 중요 원인으로 제공한다고 언급하였다. 따라서 *C. polykrikoides*의 경우 수심 13 m 내외에 영양염 공급원이 있는 경우 저층까지 빠른 속도로 유평하여 그들의 성장에 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 와편모조류 중 *K. mikimotoi*와 *Heterocapsa circularisquama*의 경우도 저층의 부영양화가 적조 형성의 원인 중의 하나로 취급되어지고 있으며, 저층의 정화 작용 없이 이들 bloom을 제어 할 수 없을 것이라고 보고하고 있어 (Yamaguchi and Honjo, 1989; Oh et al., 2004), I_0 에 따른 유평능력제한은 중경쟁에서 중요한 요인이 될 수 있다.

본 연구의 수온과 염분의 실내실험의 결과는 남해안에서 *C. polykrikoides*의 출현 조건과 유사하여, 본 실내실험 결과를 이용하여 성장속도에 미치는 수온과 염분의 관계를 수량적으로 표현이 가능하였다. 이는 *C. polykrikoides*의 피해를 줄 수 있는 세포밀도까지 성장을 예측할 수 있어 어업피해 방지에 도움이 될 수 있을 것이다. 또한 비교적 낮은 I_0 는 일주야 운동과 함께 남해안에서 다른 식물플랑크톤과의 영양염 경쟁, 포식자와 피식자의 먹이 관계, 해류의 흐름 등의 조건을 제외한다면 충분히 우점화 전략에 중요한 해답이 될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2008년도 농림수산식품부 해양수산특정연구개발사업의 연구비지원 (과제번호 : 20080132) 및 전남대학교 특성화사업 (해양미래자원개발사업단)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 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 Jpn 48, 95-99.
- Brand LE, Guillard RRL and Murphy LS. 1981. A method for the rapid and precise determination of acclimated phytoplankton reproduction rates. J Plankton Res 3, 193-201.
- Boney AD. 1979. Phytoplankton. Camelot Press, Southampton, U.K., 1-116.
- Doblin MA, Blackburn SI and Hallegraff GM. 1999. Growth and biomass stimulation of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* (Graham) by dissolved organic substances. J Exp Biol Ecol 236, 33-47.
- Eppley RW. 1972. The temperature and phytoplankton growth in the sea. Fish Bull US 70, 1063-1085.
- Fraga S, Gallager S and Anderson D. 1989. Chain-forming

- dinoflagellates: an adaptation to red tides. In: Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology. Okaichi T, Anderson DM and Nemoto T, eds. Elsevier, New York, U.S.A., 281-284.
- Gallagher JC. 1982. Physiological variation and electrophoretic banding patterns of genetically different seasonal populations of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). J Phycol 18, 148-162.
- Garate-Lizarraga I, Bustillos-Guzman J, Morquecho J and Lechuga-Deveze C. 2000. First outbreak of *Cochlodinium polykrikoides* in the Gulf of California. Harmful Algae News, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO 21, 7.
- Gobler CJ, Berry DL, Anderson OR, Burson A, Koch F, Rodgers BS, Moore LK, Goleski JA, Allam B, Bowser P, Tang Y and Nuzzi R. 2008. Characterization, dynamics and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms on eastern Long Island, NY, USA. Harmful Algae 7, 293-307.
- Goldman JC and Carpenter EJ. 1974. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. Limnol Oceanogr 19, 756-766.
- Guillard RRL and Ryter D. 1962. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran. Can J Microbiol 8, 229-239.
- Hallegraeff GM. 1992. On the global spreading of toxic dinoflagellates. Ciguatera Inf Bull 2, 2-4.
- Iwasaki H. 1979. Physiological ecology of red tide flagellates. In: Biochemistry and physiology of protozoa. Levandowsky M and Hutner SH, eds. Academic Press, New York, U.S.A., 357-393.
- Kim DI, Matsuyama Y, Nagasoe S, Yamaguchi M, Yoon YH, Oshima Y, Imada N and Honjo T. 2004. 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 HK, Jung CS, Lim WA, Lee CK, Kim SY, Youn SH, Cho YC and Lee SG. 2001. The spatio-temporal progress of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms in the coastal waters of Korea. J Kor Fish Soc 34, 691-696.
- Kudela RM, Ryan JP, Blakely MD, Lane JQ and Peterson TD. 2008. Linking the physiology and ecology of *Cochlodinium* to better understand harmful algae bloom events: A comparative approach. Harmful Algae 7, 278-292.
- Lederman TC and Tett P. 1981. Problems in modeling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton. Bot Mar 24, 125-134.
- Lee CK, Kim HG, Lee SG, Jung CS, Kim HG and Lim WA. 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 of the growth in culture. J Kor Fish Soc 34, 536-544.
- Lee MO and Moon HJ. 2008. Marine environments in the neighborhood of the Narodo as the first outbreak Region of *Cochlodinium polykrikoides* blooms. J Kor Soc Mar Environ Eng 11, 113-123.
- Lee WH and Shim JH. 1995. Intraspecific variation in the light intensity niche component of the diatom *Skeletonema costatum* from Korean coastal waters. J Kor Soc Oceanogr 30, 436-441.
- Lee YW and Kim GB. 2007. Linking groundwater-born nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer. Estuarine Coastal and Shelf Sci 71, 309-317.
- Lim W-A, Lee Y-S, Park J-G. 2009. Characteristics of *Cochlodinium polykrikoides* bloom in southeast coastal water of Korea, 2008. The Sea 14, 155-162.
- Margalef R. 1961. Hidrografia y fitoplancton de um rea marina de la costa meridional de Puerto Rico. Invest Pesq 18, 33-96.
- Oh SJ and Yoon YH. 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.
- Oh SJ, Yoon YH, Kim DI, Shimasaki Y, Ohsima Y and Honjo T. 2006. Effects of light quantity and quality on the growth of the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae). Algae 21, 311-316.
- Oh SJ, Park D-S, Yang H-S, Yoon YH, Honjo T. 2007. Bioremediation on the benthic layer in polluted inner bay by promotion of microphytobenthos growth using light emitting diode (LED). Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering 10, 93-101.
- Park J, Jeong M, Lee J, Cho KJ and Kwon OS. 2001. Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea. Phycologia 40, 292-297.

- Poole HH and Atkins WRG. 1929. Photoelectric measurements of submarine illumination throughout the year. *J Mar Biol Ass* 16, 297-324.
- Sánchez-Saavedra MP and Voltina D. 1994. The chemical composition of *Chaetoceros* sp. (Bacillariophyceae) under different light condition. *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*. Okaichi T, Anderson DM and Nemoto T, eds. Elsevier, New York, U.S.A., 265-268.
- Tomas CR and Smayda TJ. 2008. Red tide blooms of *Cochlodinium polykrikoides* in a coastal cove. *Harmful Algae* 7, 308-317.
- Turquet J, Quod JP, Couté A and Faust M. 1998. Assemblage of benthic dinoflagellates and monitoring of harmful species in Réunion island (SW Indian Ocean) during the 1993-1996 period. In: *Harmful Algae*. Reguera B, Blanco J, Fernandez ML and Wyatt T, eds. Xunta de Galicia and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 44-47.
- Whyte J, Haigh N, Ginther N and Keddy L. 2001. First record of blooms *Cochlodinium* sp. (Gymnodiniales, Dinophyceae) causing mortality to aquacultured salmon on the west coast of Canada. *Phycologia* 40, 298-304.
- 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. 1994. Physiological ecology of the red tide flagellate *Gymnodinium nagasakiense* (Dinophyceae) - Mechanism of the red tide occurrence and its prediction. *Bull Nansei Natl Fish Res Inst* 27, 251-394 (in Japanese with English abstract).
- Yamamoto T, Yoshizu Y and Tarutani K. 1995. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarensense* isolated from Mikawa Bay, Japan. *Jpn J Phycol* 43, 91-98 (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).
- Yamatogi T, Maruta H and Ura K. 2002. Occurrence of *Cochlodinium polykrikoides* red tide and its characteristics in Imari Bay in 1999. *Bull Nagasaki Prefectural Inst Fish* 28, 21-22.
- Yamatogi T, Sakaguchi M, Iwataki M and Matsuoka K. 2006. Effects of temperature and salinity on the growth of four harmful red tide flagellates occurring in Isahaya Bay in Ariake Sound, Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi* 72, 160-168 (in Japanese with English abstract).
- Yang YR. 1978. Optical properties of sea water (IV). *Bull Kor Fish Tech Soc* 14, 37-41.

2010년 8월 11일 접수
 2010년 11월 17일 수정
 2010년 12월 6일 수리