

한국 남해에서 분리한 와편모조류 *Alexandrium affine*의 생장에 미치는 수온, 염분 그리고 광량의 영향

김지혜* · 오석진** · 김석윤***

*, ** 부경대학교 해양학과

The Effect of Temperature, Salinity and Irradiance on the Growth of *Alexandrium affine* (Dinophyceae) Isolated from Southern Sea of Korea

Ji Hye Kim* · Seok Jin Oh** · Seok-Yun Kim***

*, ** Department of Oceanography, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

요 약 : 와편모조류 *Alexandrium affine*의 생장에 대한 수온, 염분 및 광 조건 실내실험을 통해서 살펴보았다. *A. affine*의 최대성장속도 (0.69 day^{-1})는 수온 25°C , 염분 25 psu로 나타났으며, 최적성장(최대성장속도의 80%)은 수온 $20\sim 25^\circ\text{C}$ 의 염분은 $20\sim 35$ psu로 나타났다. 따라서 *A. affine*는 비교적 협온성이며, 광염성의 생리학적 특성을 가지고 있는 것으로 생각된다. 광량에 따른 성장 실험결과에서 유도된 성장식은 $\mu=0.75(I-4.25)/(I+65.47)$ 로, 보상광량(I_0)은 $4.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 반포화광량(K_i)은 $57.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 나타났다. 결론적으로 *A. affine*는 하계에 낮은 광, 염분의 변동 폭이 큰 연안해역에서도 우점화 할 수 있는 유리한 생리적 특성을 보이는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 와편모조류, *Alexandrium affine*, 수온, 염분, 광, 성장속도

Abstract : The effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of dinoflagellate *Alexandrium affine* were examined. A maximum specific growth rate (0.69 day^{-1}) was observed with a combination of 25°C and 25 psu. Optimal growth (80% of the maximum specific growth rate) was obtained at $20\sim 26^\circ\text{C}$ with salinities of 20-35 psu. The results indicated that *A. affine* is relatively stenothermal of given high water temperature and is a euryhaline species. The irradiance-growth curve found can be described as $\mu=0.75(I-4.25)/(I+65.47)$. The compensation photon flux density (I_0) and half-saturation photon flux density (K_i) were $4.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $57.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. In conclusion, *A. affine* has advantageous physiological characteristics that enable it to be a dominant species in coastal areas with high water temperature and a large salinity gradient, in spite of relatively low irradiance.

Key Words : Dinoflagellate, *Alexandrium affine*, Temperature, Salinity, Irradiance, Growth Rate

1. 서 론

최근 IPCC 5차 보고서에서 인간활동에 따라 전 지구적으로 기후변화가 발생하고 있으며, 직접적으로 생물의 생리/생태 등에도 크게 영향을 미친다고 기술되어 있다(Walther et al. 2002). 또한 인간활동에 의한 부영양화는 생물의 다양성에 크게 악영향을 주고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 기후 변화 및 부영양화로 적조 대량발생 기간이 장기화되고 있으며, 적조원인 종도 1970년대에는 규조류에서 1980년대 이후

편모조류가 우점하기 시작하였으며, 최근에는 *Cochlodinium polykrioides* 등과 같은 유해 와편모조류에 의한 적조가 발생하여 사회적인 문제를 발생시키고 있다(Kim et al., 2001).

유해 와편모조류 중 *Alexandrium*은 *Gonyaulax* 목에 속하는 편모류로서 이들 종의 절반이 독성을 가지거나 다른 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 이들 종은 전세계적으로 약 30여 종이 분포하는 것으로 보고되고 있다(Anderson et al., 2012). 한국에서 1978년 진해만에서 *Alexandrium* 종에 의한 Harmful Algal Bloom(HAB)이 최초로 보고된 이래(Cho, 1978), 다양한 *Alexandrium* 속의 출현 보고가 있으며(Kim et al., 2016a), 최근 *A. insuetum*(Shin et al., 2014)과 *A. pohangense*(Lim et al., 2015) 등 새로운 *Alexandrium* 종들의 출현하고 있다(Shin

* First Author : hjk41353@nate.com, 051-629-6576

† Corresponding Author : sjoh1972@pknu.ac.kr, 051-629-6576

et al., 2014; Lim et al., 2015). 더욱이 2017년 8월 통영 인근에서 *A. affine*가 최대 100,000 cells/ml 이상의 고밀도 적조로 발생하여(https://www.nifs.go.kr/redtideInfo?id=lis&sc=&sv=&cPage=6), *Alexandrium* 속의 생리/생태 특성에 대한 이해가 필요하다.

본 연구의 대상 종인 *A. affine*는 1985년 일본에서 최초로 보고되었으며(Fukuyo, 1985), 그 이후 베트남, 캘리포니아, 칠레, 필리핀 등 여러 국가에서 출현 보고가 있었다(Brand et al., 1981). 특히 베트남 분리주의 경우, 일부에서 saxitoxin이 발견되어, 주의가 필요한 종으로 취급되고 있다(Larsen and Nguyen-Ngoc, 2004). 한국에서는 1986년과 1987년 진동만에서 *A. fraterculus*와 *A. affine*의 혼합 적조가 최초로 보고되어 있으며(Kim et al., 1990), cyst도 연안 퇴적물에서 존재하기 때문에(Shin et al., 2007), 적조 발생 잠재적인 유발 종으로 생각되어 왔다.

유해적조조류는 해양의 기초 생산자로 수온, 염분, 빛, 무기·유기태 영양염 및 미량 원소 등의 물리화학적 환경요인 변화에 따라 우점화가 결정된다. 수온과 염분은 수괴의 안정성과 해수의 순환 등에 영향을 미치며, 식물플랑크톤의 성장과 출현 시기, 분포 등에 있어 가장 기본이 되는 요소이기 때문에 대발생의 발생 기작을 이해하는데 기본적인 환경 요인이다(Oh et al., 2012). 그리고 빛은 식물플랑크톤의 성장과 일차생산에 있어서 매우 중요한 요인으로 해수면에 입사하는 광 조건에 따라 수직적 수평적 분포에 영향을 미친다(Oh et al. 2008). 온대해역의 경우 광 조건의 변화 범위가 매우 크기 때문에 계절별 종 천이와 종간 경쟁의 요인으로 작용할 수 있다.

본 연구의 목적은 잠재적으로 유해한 것으로 알려진 *A. affine*의 생리 특성을 밝히기 위해, 실내실험을 통하여 수온, 염분 및 광량의 변화에 따른 *A. affine* 생장의 영향을 살펴본 것이며, 2017년 적조가 발생된 해역의 해양환경자료 및 기상 관측 자료를 활용하여, 향후 *A. affine*의 적조발생 가능성을 토의하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 *Alexandrium affine*의 유지배양

실험에 사용된 *A. affine*(LIMS-PS-2345)는 해양과학기술원 해양시료도서관(해양식물플랑크톤 기탁등록보존기관)에서 분자학적으로 분류 및 동정이 완료된 분리주를 분양 받아 사용하였다. 수온과 염분은 분리한 현장의 환경조건을 최대한 반영한 것으로 수온은 20℃, 염분은 30 psu, pH는 8.0에서 유지 배양을 하였다. 실험용 배지는 남해 외양역의 해수를 바탕으로 한 f/2(Guillard and Ryther, 1962) 배지에 selenium(H₂SeO₃)을

최종 농도 0.001 μM이 되도록 첨가 하여 사용하였다. 2차적인 오염을 막기 위해 모든 실험은 clean bench에서 수행하였으며, 실험기구는 고압멸균(202 kpa, 20 min)하여 사용하였다.

2.2 *Alexandrium affine*의 생장에 영향을 미치는 수온과 염분의 영향

생장에 대한 수온과 염분의 영향을 파악하기 위해서 수온 10, 15, 20, 25, 30℃의 5단계, 염분 10, 15, 20, 25, 30, 35 psu의 6단계를 조합하여 총 30단계의 조건하에서 성장속도를 관찰하였다. 실험에 사용된 해수는 유지배양과 같이 남해 외양수이며, 10~30 psu의 염분은 초순수를 사용하여 희석하였으며, 35 psu는 자연 증발시켜 조절하였다. 수온 20℃, 염분 30 psu 그리고 300 μmol m⁻²s⁻¹에 전배양한 대수 성장기 세포를 25 psu와 35 psu의 배지에 이식하여 배양하였다. 그리고 25 psu 배지에 세포의 대수 성장기 후기에 있을 때, 20 psu로 이식하여 염분변화에 따른 영향을 최대한 줄였다. 수온은 하루에 1℃씩 증감시켜 각각의 온도단계에 도달하도록 하였다. 각각의 단계에 적응된 세포를 배양튜브(DH, TT10100, DAIHAN, Korea)에 f/2배지를 5 mL주입한 후 세포수가 약 100 cell mL⁻¹가 되도록 첨가하였다. 그 후 이를 간격으로 같은 시간에 *in vivo* chlorophyll 형광값을 측정하였다. 실험은 triplicate로 수행하였으며, 성장속도는 이들의 평균값으로 나타냈다. 세포의 성장속도는 대수생장을 보이는 기간 동안의 형광값을 이용하여 다음과 같은 식을 이용하여 산출하였다.

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

μ : 비성장속도(specific growth rate; day⁻¹)

N₀, N_t: 대수성장기에서 초기와 t시간(day) 후의 형광값

Δt : 대수성장기의 기간(day)

2.3 *Alexandrium affine*의 생장에 영향을 미치는 광량의 영향

광량에 따른 성장 속도를 알아보기 위해 최적수온과 염분에 상응하는 조건(25℃, 25 psu)으로 약 200 μmol m⁻²s⁻¹의 조건에서 대수 성장기까지 성장시킨 세포를 이용하였다. 광량은 가시광선 차광필름을 이용하여 10, 20, 50, 75, 100, 150, 200, 300 μmol m⁻²s⁻¹(각 설정 조도의 ±10%)의 총 8단계로 하였고, 광량의 측정은 광도계(Biospherical Instrument Inc. QSL-2100)를 이용하였다. 이후 이를 간격으로 매일 같은 시간(오전 10:00)에 형광광도계(10-AU-Fluorometer, Turner Designs)로 *in vivo* chlorophyll 형광값을 측정하였다. 실험은 3 반복하여 수행하였으며, 성장속도는 수온과 염분에 따른 성장 실험과 같은

한국 남해에서 분리한 와편모조류 *Alexandrium affine*의 생장에 미치는 수온, 염분 그리고 광량의 영향

방법으로 식(1)을 이용하여 계산하였고, 평균값으로 나타내었다. 단, 오류로 판명된 값은 제외하여 계산하였다. 성장속도와 광량과의 관계는 광저해 현상의 유무에 따라 여러 관계식을 사용하나, 본 연구에서는 광저해 현상이 없어, Lederman and Tett(1981)의 모델을 개량한 식을 이용하여 계산하였다.

$$\mu = \mu_m \frac{I - I_C}{(K_I - I_C) + (I - I_C)} \quad (2)$$

μ : 비성장속도(specific growth rate; day⁻¹)

μ_{max} : 최대성장속도(maximum specific growth rate; day⁻¹)

I : 광량(irradiance; $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

I_C : 보상광량(compensation PFD; $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

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

2.4 해양환경자료(수온, 염분 그리고 조도)

해양 환경 특성의 변화를 파악하기 위하여 해양 환경관리공단(Korea Environment Management corporation; KOEM)에서 제공하는 해양환경측정망자료를 사용하였다. 활용한 측정망 정점은 2017년 8월 *A. affine*가 원인 중으로 생각되는 대발생이 발생한 인근의 해역으로(34° 48' 35" N, 128° 17' 41" E), 1997년부터 2017년까지 표층 수온, 염분 및 투명도 자료를 활용하였다.

일조시간과 일사량은 기상청(Korea Meteorological Administration; KMA)에서 제공되는 자료를 사용하였다. 조사 지점은 통영 지역과 가까운 진주 기상관측 지점의 자료를 이용하였다(35° 09' 49" N, 128° 02' 24" E). 조사 기간은 1997년부터 2017년으로 월별 합계를 평균 내어 사용하였다. 수평면 일사량의 단위가 MJ m⁻²이며 본 연구에서 사용한 광량 단위인 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 환산이 필요하다. 광합성에 이용하는 약 400~700 nm의 파장에서 일사량과 광량 사이에는 $1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1} = 2 \times 10^{-1} \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Nishikawa and Yamaguchi, 2006)의 관계가 있어 환산이 가능하며, 해수면에 입사광은 반사 등에 따라 15%가 손실하고 나머지 50%가 광합성 유효 파장으로 해수면에 입사한다고 가정하였다(Nishikawa et al., 2002).

3. 결과 및 고찰

3.1 *Alexandrium affine*의 생장에 영향을 미치는 수온과 염분의 영향

*A. affine*의 최적 환경 조건을 파악하기 위해 다양한 수온과 염분 조건에서 성장 실험을 실시하였다(Fig. 1). 실험 결

과, 10 psu의 모든 수온 조건에서 *A. affine*의 세포밀도가 일정하거나, 감소하는 경향을 보였다. 또한 모든 염분구간에서 10°C와 30°C의 수온에서 0.00~0.14 day⁻¹로 낮은 성장속도를 보였으며, 수온 15°C에서는 0.03~0.34 day⁻¹로 35 psu에서 높은 성장속도를 보였다. 20°C의 경우, 25~30 psu의 염분 범위에서 0.18~0.57 day⁻¹의 높은 성장속도를 보였으며, 25°C에서는 25 psu에서 실험조건 중 가장 높은 성장속도가 나타났다(0.69 day⁻¹).

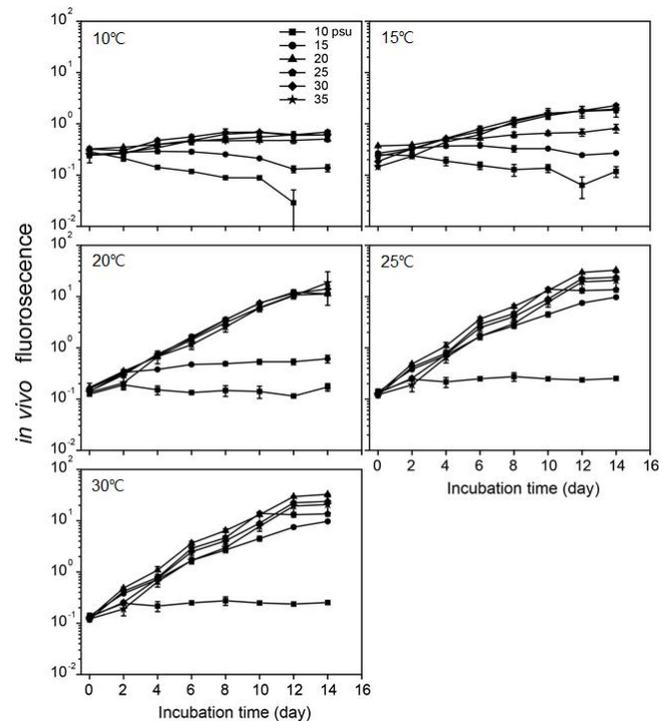


Fig. 1. Growth curves of *A. affine* grown at various water temperature and salinity combinations. Each symbol represents the average of triplicate data.

*A. affine*의 성장속도를 각각 수온과 염분에 대한 contour plotting으로 표현한 결과는 Fig. 2와 같다. 최대 성장속도의 80% 구간으로 결정되는 최적 성장조건(optimum growth condition)의 범위는 수온 20~25°C와 염분 20~35 psu로 나타났다. 최적 성장조건에 해당하는 범위를 2017년 *A. affine*가 적조를 발생한 해역의 20년간 수온과 염분 데이터를 이용하여 T-S diagram에 작성한 결과, 최적성장 조건에 해당되는 계열은 하계에 해당되었다(Fig. 3).

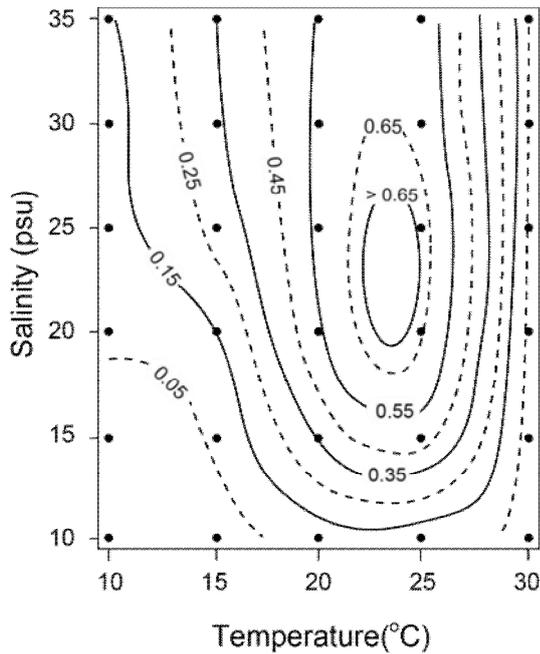


Fig. 2. Contour plots of specific growth rate (day^{-1}) of *A. affine* as a function of temperature and salinity.

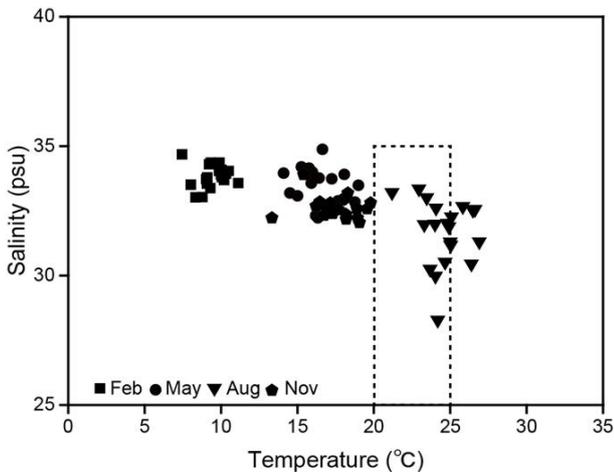


Fig. 3. T-S plots of the Tongyeong area from 1997 to 2017. Square enclosed with dotted line indicates ranges of the temperature and salinity corresponding with 80% of maximum specific growth rate of *A. affine*.

배양실험으로부터 얻어진 성장속도에 따른 수온과 염분 조건을 이용하여 이원 배치 분산분석(two way ANOVA)을 수행한 결과(Table 1), 0.05% 유의수준 내에서 *A. affine*의 성장속도에 대해 수온과 염분은 서로 통계적으로 유의한 상관성이 있는 것으로 나타났다. 수온과 염분 및 두 조건의 상호작용의 제곱합(sum of squares)은 각각 총 제곱합(total sum of squares)의

58.3%, 23.1%, 17.4%를 차지하여 *A. affine*의 생장은 수온의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. Oh et al.(2012)의 보고에 의하면, 같은 속의 *A. tamarensis*는 수온, 염분 및 두 요인의 상호작용과 성장 사이의 상관관계가 각각 62.7%, 23.7%, 11.9%로 나타났으며, *A. catenella*의 경우는 53.2%, 39.8%, 0.6%로 나타나 본 연구결과와 상응하여, *Alexandrium*은 염분보다는 수온 의존성이 큰 것으로 판단된다.

본 실험에서 도출된 결과를 *Alexandrium* 속의 생장에 미치는 수온과 염분의 영향에 대한 타 연구결과와 비교하면, 베트남 Ha Long 만으로부터 분리된 *A. affine*(Larsen and Nguyen-Ngoc, 2004)와 캘리포니아 Gulf 만의 분리주는 27°C 부근에서 가장 높은 성장속도를 나타냈으며(Band-Schmidt et al., 2003), 본 연구 중의 최적 성장 조건과는 다소 차이를 보였다. 이는 서식 지역과 환경의 차이에 따른 분리주 특이성(strain specificity)이 나타난 것으로 생각된다. *Alexandrium* 속의 다른 종들과 비교하여 보면, 우리나라 진해만의 분리주인 *A. insuetum*의 경우 25°C, 25 psu(Shin et al., 2014), 마산만의 분리주인 *A. catenella*는 25°C, 30 psu에서 최대성장속도를 보여 *A. affine*와 유사한 특성을 보였다(Oh et al., 2012). 그러나 마산만의 분리주인 *A. tamarensis*는 15°C, 30 psu에서 최대성장속도가 나타나(Oh et al., 2012), 같은 속이라도 종에 따라 성장 특성이 달라질 수 있는 것을 알 수 있다.

Table 1. Summary of two-way analysis of variance of the population growth rate of *A. affine* as a function of temperature, salinity and their interaction

Source of Variation	Sum of squares	d.f.	Mean square	F
Temperature	2.891	4	0.723	730.2
Salinity	1.144	5	0.229	231.2
Interaction	0.865	20	0.043	43.71
Error	0.059	60	0.001	
Total	4.960	89		

*A. affine*는 일부 와편모조류와 마찬가지로 생존전략으로 생활사에서 유성생식에 의해 cyst를 형성하는 것으로 밝혀져 있다(Band-Schmidt et al., 2003; Shin et al., 2014). *A. affine*의 cyst는 우리나라 연안에 분포하고 있으며 거제 연안에서 24~56 cyst g^{-1} dry(Shin et al., 2007), 가막만과 여자만, 붓돌바다 연안에 10~175 cyst g^{-1} dry가 존재하고 있다(Shin et al., 2011). cyst의 발아는 5~25°C 구간에서 발아가 일어나며, 25°C에서 발아가 가장 빠르게 일어난다는 연구 결과가 있다(Band-Schmidt et al., 2003). 본 연구에서 도출된 결과 유영 세포의 최적 수

한국 남해에서 분리한 와편모조류 *Alexandrium affine*의 생장에 미치는 수온, 염분 그리고 광량의 영향

온은 20~25°C이며 cyst의 발아의 최적수온은 25°C로 유사하게 나타났다. 이에 따라 cyst 발아된 후 빠르게 최대 성장속도에 도달할 수 있기 때문에 하계에 일시적으로 우점할 수 있을 것으로 생각된다.

이러한 생리적 특성을 바탕으로 2017년 8월 *A. affine* 원인종으로 발생한 HAB 기작을 다음과 같이 생각할 수 있다. HAB가 발생한 해역은 남해안의 통영으로 대마난류와 남해연안수의 영향을 받는 지역이다. *A. affine* HAB가 발생한 당시의 표층 수온과 염분은 27~32°C, 32 psu로 나타났으며, 수온이 평년대비 약 2~4°C 이상 높게 나타나, 이 지역에 고수온 경보가 발령되었다. 이는 이상기상에 따른 수온상승과 지속적인 쿠로시오 해류의 강화로 인한 대마난류 강화(Sakamoto et al., 2005; Wu et al., 2012)의 영향을 받은 것으로 생각된다. 실제 이상기온에 따른 수온의 상승은 HAB의 발생을 증가시키며, 대발생의 초기 발생시기와 쇠퇴시기를 조절한다(Fu et al., 2012). 샌프란시스코에서 전례 없는 대규모의 와편모조류 대발생이 일어났으며, 원인으로는 높아진 기온으로 보고하였다(Cloern et al., 2005). 또한 워싱턴의 Puget Sound에서 수온의 증가가 *Alexandrium* 적조를 촉진했다는 보고도 있다(Moore et al., 2009).

통영 지역의 수온과 염분은 0.02°C year⁻¹, 0.01 psu year⁻¹가 증가하고 있으며(Fig. 4), IPCC 5차 보고서의 RCP 8.5 시나리오에 따르면 2100년까지 한반도의 수온은 4~5°C가량 증가할 것으로 보고하고 있다(Kim et al., 2016b). 특히 통영에서 춘계와 추계의 수온 증가율도 높게 나타나기 때문에 cyst의 발아 시기가 더욱 빨라질 수 있으며, *A. affine* 유영세포의 출현기간이 점차 길어질 가능성이 있다. 앞으로 점차 수온이 증가하게 되면, 낮은 수온에서 우점하는 종들이 도태되고 *A. affine*와 같이 고수온, 광염성의 생리적 특성을 가진 종이 우점 및 대량 발생할 가능성이 높을 것으로 생각된다.

3.2 *Alexandrium affine*의 생장에 영향을 미치는 광량의 영향

광량에 따른 성장속도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 실험 결과 10~20 μmol m⁻²s⁻¹에서는 성장속도가 0.08~0.09 day⁻¹로 낮았지만, 광량 증가에 따라 성장속도가 0.34~0.63 day⁻¹로 증가했다. 또한 본 실험의 최대 광량인 300 μmol m⁻²s⁻¹까지 광 저해 현상은 보이지 않았다. Lederman and Tett(1981)식에서 도출된 결과 μ_{max}는 0.75 day⁻¹, 광에 대한 친화성 지수인 K_i는 57.0 μmol m⁻²s⁻¹로 나타났다. 또한 호흡과 광합성이 같아지는 광량 즉, 세포가 생장이 가능한 최소 광량을 의미하는 I_c는 4.25 μmol m⁻²s⁻¹였다.

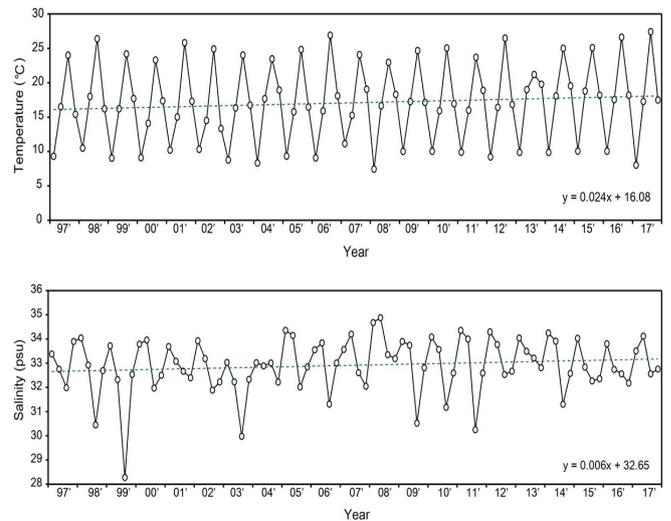


Fig. 4. Long-term changes in temperature and salinity in Tongyeong area from 1997 to 2017.

한편, *A. affine*의 I_c에 해당하는 수심을 Lambert-beer 식 (I_z=I_ce^{-kz}; I_z는 수심 z에서의 광량, I_c는 해면에서 광량, z는 수심, k는 빛의 소산 계수)에 대입하여 간접적으로 계산하였다. 이 때 진주 기상 관측 지점의 일사량 평균은 약 800 μmol m⁻² s⁻¹으로 조사되었으며, 표층 광량은 평균 400 μmol m⁻² s⁻¹로 가정하였다. 계산된 결과 광 조건만을 고려해봤을 때, *A. affine*의 생존에 있어 최대 생존 가능 수심(I_c)에 해당하는 수심은 15 m로 나타났다. 또한, 최적 서식 수심을 나타내는 K_i에 해당하는 수심은 약 8 m이었다.

Noh et al.(2010)의 연구 결과, 우리나라의 남해 연안역의 경우 수심이 낮아 하계에 높은 일사량으로 저층까지 도달하는 광도가 60 μmol m⁻² s⁻¹로 상당히 높은 광도를 보고하였다. 이처럼 *A. affine*의 광학적인 생리특성은 수심이 낮은 남해의 여러 해역에서 이들 개체군 성장을 지원하는 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 일반적으로 입사하는 광량은 수심에 따라 변하며 부유물질의 농도에도 영향을 받기 때문에, 부유물질이 높은 해역에서는 광 투과율이 감소되어 식물플랑크톤의 생장에 영향을 미친다(Oh et al., 2008). 그러나 *A. affine*는 다른 종에 비해 광요구량이 낮아 부유물질의 농도가 광량이 낮은 곳에서 광에 대한 경쟁에 유리할 것으로 판단된다.

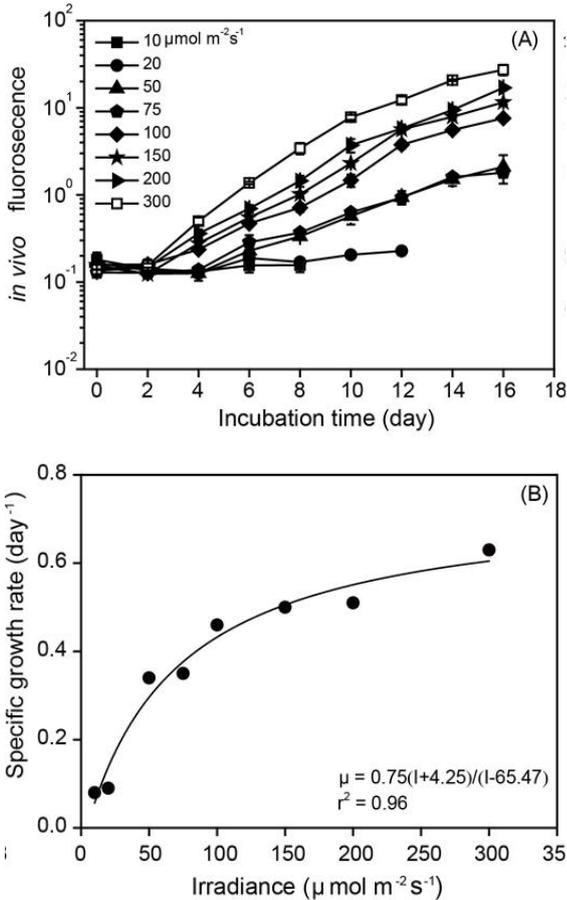


Fig. 5. Growth curve (A) and specific growth rate (B) of *Alexandrium affine* as function of light intensities. The values are represented with means of triplicate. The curve was fitted to the observed values using a non-linear least square method.

연안에서 발생하는 HAB는 수직혼합에 의한 저층으로부터 영양염 공급에 크게 영향을 받기 때문에 지구 온난화로 인한 표층의 수온 증가는 성층화를 증가시켜 표층으로의 영양염 공급이 감소하게 된다(Hallegraeff, 2010; Gentien et al., 2015). 와편모조류는 미약하지만 유영 능력을 보유하고 있어, 광학적으로도 성장할 수 있는 수심까지 유영하여 저층의 영양염을 흡수하여 성장할 수 있다(Honjo et al., 1989). *A. affine*의 유영 속도는 단일 세포의 경우 23°C에서 410 μm sec⁻¹ (1.48 m hr⁻¹)로 나타나며, 체인을 형성하면 유영 속도가 증가한다(Santiago et al., 1989). 대표적인 HAB종인 *G. catenatum*은 1.2 m hr⁻¹(Baba et al., 2001), *Karenia mikimotoi*은 2.2 m hr⁻¹(Koizumi et al., 1996), *C. antiquae*은 0.8 m hr⁻¹(Watanabe et al., 1995)로 나타났다. 따라서 *A. affine*의 유영 능력과 다른 종들에 비해 낮은 보상광량을 고려할 때, 표층에 영양염류가 고

갈되어 있을 경우도 저층에 풍부한 영양염을 이용하여 생장이 가능할 것으로 생각된다.

이상의 연구결과를 바탕으로 *A. affine*는 연안역에서 대마난류수와 같은 빈영양상태의 수괴의 영향이 증가에도 불구하고, 필요한 영양염을 저층 또는 필요한 수심에서 충분히 흡수하여, 생존 및 우점할 수 있으며, 하구역과 같이 높은 부유물질로 인하여 광 조건이 좋지 않은 해역에서도 친화성이 낮은 식물플랑크톤 보다 우수한 종 경쟁능력을 가지고 있는 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Anderson, D. M., T. J. Alpermann, A. D. Cembella, Y. Collos, E. Masseret and M. Montresor(2012), The globally distributed genus *Alexandrium*: Multifaceted roles in marine ecosystems and impacts on human health, Harmful Algae, Vol. 14, pp. 10-35.
- [2] Baba, T., S. Hiyama and T. Tainaka(2001), Vertical migration of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* and toxicity of cultures oyster in Senzaki Bay, Yamaguchi Prefecture, Bulletin Plankton Society of Japan, Vol. 48, No. 2, pp. 95-99.
- [3] Band-Schmidt, C. J., C. H. Lechuga-Devéze, D. Kulis and D. M. Anderson(2003), Culture studies of *Alexandrium affine* (Dinophyceae), a non-toxic cyst forming dinoflagellate from Bahia Concepción, Gulf of California, Botanica Marina, Vol. 46, No. 1, pp. 44-54.
- [4] Brand, L. E., R. R. L. Guillard and L. S. Murphy(1981), A method for the rapid and precise determination of acclimated phytoplankton reproduction rates, Journal of Plankton Research, Vol. 3, No. 2, pp. 193-201.
- [5] Cho, C. H.(1978), On the *Gonyaulax* red tide in Jinhae bay, Bulletin of the Korean Fisheries Society, Vol. 11, No. 2, pp. 111-114.
- [6] Cloern, J. E., T. S. Schraga, C. B. Lopez, N. Knowles, L. R. Grover and R. Dugdale(2005), Climate anomalies generate an exceptional dinoflagellate bloom in San Francisco Bay, Geophysical Research Letters, Vol. 32, pp. L14608.

- [7] Fukuyo, Y.(1985), Morphology of *Protogonyaulax tamarensis* (Lebour) Taylor and *Protogonyaulax catenella* (Whedon and Kofoid) Taylor from Japanese Coastal waters, Bulletin of Marine Science-Miami, Vol. 37, No. 2, pp. 529-537.
- [8] Fu, F. X., A. O. Tatters and D. A. Hutchins(2012), Global change and the future of harmful algal blooms in the ocean, Marine Ecology Progress Series, Vol. 470, pp. 207-233.
- [9] Gentien, P., P. Donaghay, H. Yamazaki, R. Raine, B. Reguera and T. R. Osborn(2015), Harmful algal blooms in stratified environments, Oceanography, Vol. 18, pp. 172-183.
- [10] Guillard, R. R. L. and J. H. Ryther(1962), Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula conjervaces* (Cleve) Gran, Canadian Journal of Microbiology, Vol. 8, No. 2, pp. 229-239.
- [11] Hallegraeff, G. M.(2010), Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge, Journal of Phycology, Vol. 46, pp. 220-235.
- [12] Honjo, T., S. Yamamoto, O. Nakamura and M. Yamaguchi (1989), Annual cycle of motile cells of *Gymnodinium nagasakiense* and ecological features during the period of red tide development, In: Granéli, E., B. Sundström, L. Edler, and D. M. Anderson (eds), Toxic marine phytoplankton, Elsevier, New York, pp. 165-170.
- [13] Kim, H. G., C. S. Jung, W. A. Lim, C. K. Lee, S. Y. Kim, S. H. Youn, Y. C. Cho and S. G. Lee(2001), The spatio-temporal progress of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the coastal waters of Korea, Journal of Korean Fisheries Society, Vol. 34, No. 6, pp. 691-696.
- [14] Kim, H. G., J. S. Park and S. G. Lee(1990), Coastal algal blooms caused by the cyst-forming Dinoflagellates, Bulletin of the Korean Fisheries Society, Vol. 23, No. 6, pp. 468-474.
- [15] Kim, J. S., K. W. Park, S. H. Youn, W. A. Lim, Y. D. Yoo, K. A. Seong and W. H. Yih(2016a), Species diversity of the dinoflagellate genus *Alexandrium* in the coastal waters of Korea during summer 2013, The Sea, Vol. 21, No. 4, pp. 158-170.
- [16] Kim, B. -T., J. -S. Lee and Y. -S. Suh(2016b), An analysis on the climate change exposure of fisheries and fish species in the southern sea under the RCP scenarios: focus on sea temperature variation, Journal of Fisheries Business Administration, Vol. 47, No. 4, pp. 031-044.
- [17] Koizumi, Y., T. Uchida and T. Honjo(1996), Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during a red tide in Hoketsu Bay, Japan, Journal of Plankton Research, Vol. 18, No. 2, pp. 289-294.
- [18] Larsen, J. and L. Nguyen-Ngoc(2004), Potentially toxic microalgae of Vietnamese waters, Opera Botanica, Vol. 140, pp. 5-216.
- [19] Lederman, T. C. and P. Tett(1981), Problems in modelling the photosynthesis-light relationship for phytoplankton, Botanica Marina, Vol. 24, No. 3, pp. 125-134.
- [20] Lim, A. S., H. J. Jeong, J. H. Kim, S. H. Jang, M. J. Lee and K. Lee(2015), Mixotrophy in the newly described dinoflagellate *Alexandrium pohangense*: A specialist for feeding on the fast-swimming ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, Harmful Algae, Vol. 49, pp. 10-18.
- [21] Moore, S. K., N. J. Mantua, B. M. Hickey and V. L. Trainer(2009), Recent trends in paralytic shellfish toxins in Puget Sound, relationships to climate, and capacity for prediction of toxic events, Harmful Algae, Vol. 8, No. 3, pp. 463-477.
- [22] 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 the Plankton Society of Japan, Vol. 49, pp. 1-8.
- [23] 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, Vol. 5, No. 2, pp. 141-147.
- [24] Noh, I. H., Y. H. Yoon, D. -I. Kim, S. J. Oh and J. D. Kim(2010), Growth characteristics on the water temperature, salinity and irradiance of the harmful algae *Chattonella ovata* Y. Hara et Chihara (Raphidophyceae) isolated from South Sea, Korea, The Sea, Vol. 15, No. 3, pp. 140-147.
- [25] Oh, S. J., I. S. Kang, Y. H. Yoon and H. -S. Yang(2008), Optical characteristic on the growth of centric diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve isolated from Jinhae Bay in Korea, Korean Journal of Environmental Biology, Vol. 26, No. 2, pp. 57-65.
- [26] Oh, S. J., J. A. Park, H. K. Kwon, H. -S. Yang and W. A. Lim(2012), Ecophysiological studies on the population dynamics of two toxic dinoflagellates *Alexandrium tamarensis* and *Alexandrium catenella* isolated from the southern coast of Korea I. Effects of temperature and salinity on the growth,

- Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 133-131.
- [27] Sakamoto, T. T., H. Hasumi, M. Ishii, S. Emori, T. Suzuki, T. Nishimura and A. Sumi(2005), Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model, Geophysical Research Letters, Vol. 32, pp. L14617.
- [28] Santiago, F., S. M. Gallagher and D. M. Anderson(1989), Chain-forming dinoflagellates: an adaptation to red tides, Elsevier science, pp. 281-284.
- [29] Shin, H. H., Y. H. Yoon and K. Matsuoka(2007), Modern dinoflagellate cysts distribution off the eastern part of Geoje Island, Korea, Ocean Science Journal, Vol. 42, No. 1, pp. 31-39.
- [30] Shin, H. H., Y. H. Yoon, Y. O. Kim and K. Matsuoka(2011), Dinoflagellate cysts in surface sediments from southern coast of Korea, Estuaries and Coasts, Vol. 34, No. 4, pp. 712-725.
- [31] Shin, H. H., S. H. Baek, L. Zhun, M. S. Han, S. J. Oh, S. H. Youn, Y. S. Kim, D. K. Kim and W. A. Lim(2014), Resting cysts, and effects of temperature and salinity on the growth of vegetative cells of the potentially harmful species *Alexandrium insuetum* Balech (Dinophyceae), Harmful Algae, Vol. 39, pp. 175-184.
- [32] Walther, G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J. -M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein(2002), Ecological responses to recent climate change, Nature, Vol. 416, pp. 389-395.
- [33] 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, Limnology Oceanography, Vol. 40, No. 8, pp. 1447-1460.
- [34] Wu, L., W. Cai, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M. J. McPhaden, M. Alexander, B. Qiu, M. Visbeck, P. Chang and B. Giese(2012), Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, Nature Climate Change, Vol. 2, pp. 161-166.

Received : 2019. 04. 01.

Revised : 2019. 04. 23.

Accepted : 2019. 04. 26.