

한국연안에서 분리한 적조형성 미세조류 10종의 성장에 미치는 온도, 염분, 광도의 영향

이창규* · 이옥희¹ · 이삼근

국립수산과학원, ¹인제대학교 환경공학부

Impacts of Temperature, Salinity and Irradiance on the Growth of Ten Harmful Algal Bloom-forming Microalgae Isolated in Korean Coastal Waters

CHANG KYU LEE*, OK HEE LEE¹ AND SAM GEUN LEE

National Fisheries Research & Development Institute, Pusan 619-900, Korea

¹School of Environmental engineering, Inje University, Pusan 621-749, Korea

한국 연안에서 출현하는 주요 적조생물의 적조발생 특성을 알아보기 위해 편모조류 10종을 대상으로 하여 수온과 염분, 광도에 따른 종의 성장률을 조사하였고, 또한 최근 13년간의 적조발생자료와 1999년도 및 2000년도 남해안연안에서 조사한 적조생물의 출현밀도를 비교, 분석하였다. 수온에 따른 적조생물의 성장은 *Heterocapsa triquetra*, *Eutreptiella gymnastica*, *Alexandrium tamarense*의 경우 대체로 16~22°C에서 최대성장률을 보였으나, 10~16°C의 저수온에서도 비교적 높은 성장률을 보였고 22°C 이상의 고수온에서는 오히려 성장률이 급격히 감소되는 것으로 나타나 저온성종의 특성을 보였다. *Prorocentrum micans*와 *Pyramimonas* sp.는 19°C 이하의 저수온에서는 낮은 성장률을 보였으나 22~25°C에서는 높은 성장률을 보여 고온종의 특성을 나타냈으며, *Akashiwo sanguinea*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum minimum*, *Scrippsiella trochoidea*는 16~25°C의 광범위한 수온 범위에서 비교적 높은 성장률을 보여 광온성종의 특성을 보였다. 또한 이러한 결과는 이 종들이 자연상태에서 적조를 일으키는 수온 범위와도 대체로 일치하였다. 염분에 따른 성장은 대부분의 종이 염분 30~35 psu에서 높은 성장률을 보였는데, *E. gymnastica*는 35 psu 이상의 고염분보다는 10~30 psu의 저염분에서 더 높은 성장률을 나타내 저염성을 보였으며, *H. akashiwo*, *P. minimum*, *H. triquetra*는 15~40 psu의 넓은 염분 범위에서 양호한 성장률을 보여 광염성종의 특성을 보였다. 이 종들은 한국 연안에서 강우 직후 염분이 25 psu 이하로 하강하는 저염분 상태에서 빈번히 적조를 일으키고 있는데, 이것은 이종들의 저염 및 광염성 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되었다. 광도별 성장은 *H. akashiwo*, *P. minimum*, *Pyramimonas* sp.는 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 고광도에서 비교적 높은 성장률을 보였다. *A. sanguinea*, *A. tamarense*, *H. triquetra*는 50~100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 높은 성장률을 보였고 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도에서는 오히려 성장률이 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 전반적으로 수온과 일조량이 높은 시기인 하계에 적조를 일으키는 고온성 종은 고광도에서 성장이 좋은 것으로 나타났고, 수온과 일조량이 낮은 동, 춘계에 적조를 일으키는 저온성 종은 저광도에서 성장이 양호한 것으로 나타났다.

In order to understand growth characteristics of ten major species of microalgae responsible for frequent harmful algal blooms in Korean coastal waters, the growth rates of the isolates were examined in relation with the impacts of water temperature, salinity and irradiance. In addition, their bloom events since 1990 as well as monthly abundance of vegetative cells were analyzed. *Heterocapsa triquetra*, *Eutreptiella gymnastica* and *Alexandrium tamarense* were considered as relatively mid temperature adapted species in that growth rates were comparatively high at low water temperatures of 10~16°C and drastically decreased at above 22°C. *Prorocentrum micans* and *Pyramimonas* sp. were categorized as relatively high temperature adapted species by showing comparatively better growths at high water temperatures above 25°C. *Akashiwo sanguinea*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum minimum* and *Scrippsiella trochoidea* were eurythermal species with relatively high growth rates in a broad ranges of water temperature, 16~25°C. On the other hand, *E. gymnastica* were slightly halophobic, showing better growths at low salinities of 10~30 psu than at above 35 psu. *H. akashiwo*, *P. minimum* and *H. triquetra* were euryhaline species with remarkable growths in a broad ranges of salinity,

*Corresponding author: cklee@nfrdi.re.kr

15~40 psu. Frequent algal blooms by these three species at extremely low salinities below 25 psu after rainfall were attributed to their euryhaline and slightly halophobic physiological characteristics. Growth rates of *H. akashiwo*, *P. minimum* and *Pyraminonas* sp. increased with the increase of irradiance within the experimental ranges of $2\sim 150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. However, *A. sanguinea*, *A. tamarensis* and *H. triquetra* showed better growths at comparatively low irradiance of $50\sim 100 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and drastic decreases in growth rates above $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ of irradiance. Overall, relatively high temperature adapted species make blooms frequently in high water temperature season with strong natural irradiance, and relatively low temperature adapted species grow better at low water temperature with relatively weak natural irradiance.

Keywords: Dinoflagellates, Blooms, Abundance, Growth Rate, Water Temperature, Salinity, Irradiance

서론

한국 연안의 적조발생은 1970년대에는 일부 폐쇄성 내만해역에서 연간 10건 내외로 간헐적으로 발생하였다. 1980년대에는 연간 30여건 이상으로 적조발생건수가 급격히 증가되기 시작하였다. 1990년도 이후부터는 적조발생건수와 발생해역이 증가됨은 물론 적조원인생물도 규조류에서 편모조류로 바뀌는 특징을 보이고 있다. 수산피해액은 1980년대까지는 피해액수가 20억원 이하로 비교적 경미하였으나 1990년대에 들어서는 매년 수십억원 이상의 피해를 야기시키고 있다(김 등, 1998).

1990년대 이후 한국 연안에서 적조를 야기하는 편모조류는 일정한 주기성을 보이는데(Kim *et al.*, 1996; 이 등, 2002), 이는 연안해역에 적조생물의 증식에 적합한 풍부한 영양염류, 적정 수온, 염분 및 일조량 등과 같은 호적환경조성과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정된다. 따라서, 이들 종에 대한 생리·생태적 특성을 파악하는 것은 종별 적조발생 시기와 특성을 이해하고 나아가, 이 종들에 대한 적조발생 시기를 예측하는데 유용할 것이다.

현재까지 한국 연안에서 출현하는 적조생물의 종별 생리·생태적 특성을 다룬 연구는 부분적으로 산재한다(Kim, 1986a, b; 박 등, 1988; Kim *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1996; Kim and Shin, 1997; 이 등, 1997; Lee *et al.*, 1999; Jung *et al.*, 1999; Jeong *et*

al., 2000; Yang *et al.*, 2000; 이 등, 2001). 그러나, 한국에서 적조를 일으키는 주요 적조생물을 대상으로 실내 성장실험 결과와 연안해역에서 적조생물 유영세포의 출현상황 및 장기간의 적조발생 자료를 서로 연관시켜 적조발생 시기와 특성을 종별로 파악해 본 결과는 거의 없다.

이 연구에서는 1990년대 이후 한국 연안에서 적조를 일으키는 주요 적조원인생물 10종의 성장특성을 알아보고자 실내배양실험을 통해 수온과 염분 및 광도에 따른 성장률을 조사하였고 또한, 1999년, 2000년 남해안 연안에서 유영세포의 출현시기와 밀도 그리고, 1990년도 이후 이 종들에 의한 적조발생 자료를 비교, 분석하였다.

재료 및 방법

적조 발생 상황 및 적조생물 출현량 조사

적조발생 건수는 1990~2003년도 국립수산과학원에 접수된 동, 서, 남해안연안의 적조발생 상황 자료 중 종명이 불명확한 것을 제외시킨 후, 적조생물 종과 발생 해역을 기준으로 각각 1건씩으로 구분하여 산정하였다. 또한, 우리나라 남해안연안 적조생물 유영세포 출현량 조사는 1999년 2월부터 2000년 11월에 실시하였고, 조사정점은 총 21개였으며(Fig. 1), 조사주기는 1~2월 간격이

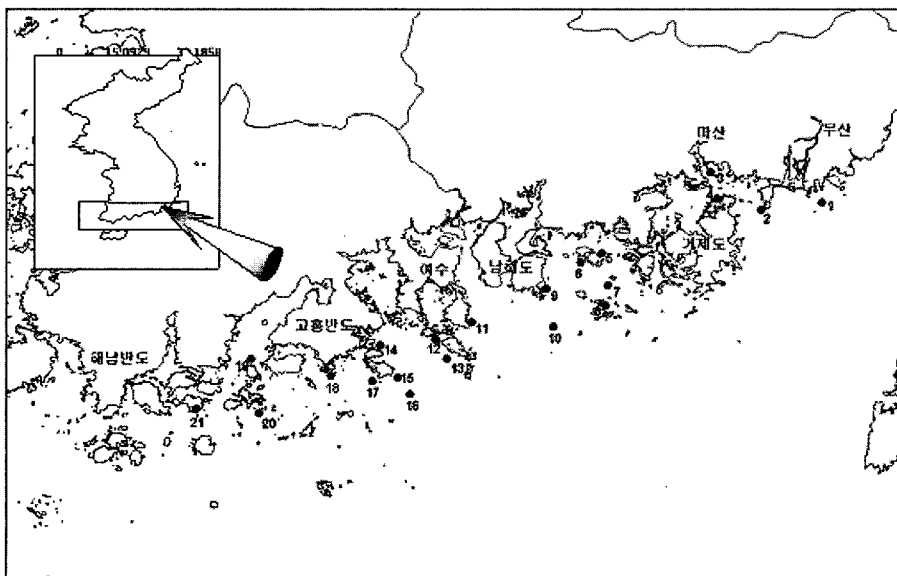


Fig. 1. Map showing the sampling sites.

Table 1. Origin of isolates of ten harmful algal bloom species

Species	Sampling location	Sampling date	Isolation method
<i>Prorocentrum micans</i> EHRENBERG	Masan	JUN, '97	CP ¹
<i>Prorocentrum minimum</i> (PAVILLARD) SCHILLER	Tongyoung	JUL, '97	CP
<i>Prorocentrum triestinum</i> SCHILLER	Namhae	JUL, '98	CP
<i>Akashiwo sanguinea</i> G.HANSEN & MOESTRUP	Tongyoung	DEC, '97	CP
<i>Alexandrium tamarense</i> (LEBOUR) BALECH	Yeosoo	MAY, '98	cyst ³
<i>Heterocapsa triquetra</i> (EHRENBERG) STEIN	Masan	FEB, '99	CP
<i>Scrippsiella trochoidea</i> (STEM) LOEBLICH ?	Wando	AUG, '99	cyst
<i>Herosigma akashiwo</i> HADA	Masan	JUN, '97	CP
<i>Eutreptiella gymnastica</i> THRONSEN	Masan	JUL, '98	DM ²
<i>Pyramimonas</i> sp.	Busan	JUN, '97	DM

CP¹: capillary pipette method, DM²: dilution method; cyst³: excystment from dormant cyst

었다. 유영세포의 출현량은 2년간 조사된 값 중 큰 값을 기준으로 하여 월별로 정성적으로 표시하였다.

채수 시료는 고정액을 쓰지 않고 채집 당일 광학현미경을 이용하여 검경하였다. 채수시료의 농축은 생시료 250~2,000 ml를 망목 125 µm와 15 µm의 망지를 각각 이용하여 여과하였다. 시료를 채집한 모든 정점에서는 CTD(Seabird Electronics, SBE 25)를 이용하여 수온과 염분을 파악하였다.

배양 실험

본 실험에 이용된 적조생물 10종은 1997~1999년에 우리나라 남해안 연안 등지에서 채집한 생시료를 capillary pipette이나 희석법(dilution)을 이용하여 유영세포를 직접 분리하거나, 또는 저질층의 휴면포자를 직접 발아시켜 분리하였다. 종별 분리방법과 시료채집 장소는 Table 1과 같다. 실험용 배지는 규산염이 제외된 f/2를 사용하였다(Stein, 1973).

수온에 따른 성장실험은 10~31°C 범위 내에서 3°C 간격으로 구분하여 실시하였다. 염분에 따른 성장실험은 33 psu에서 배양된 종을 15~40 psu 범위 내에서 5 psu 간격으로 하여 실시하였다. 염분의 조절은 30 psu 이하는 증류수를 이용하여, 35 psu 이상은 NaCl을 이용하여 조절하였고, 염분의 측정은 salinometer (T.S-digital Lab. Salinometer Model 3-G)를 사용하였다. 염분실험용 배지제조에 있어서는 증류수 희석에 따른 영양염류 농도의 감소를 고려하여 최종 영양염류의 농도가 기본실험구인 33 psu와 동일하도록 f/2 stock solution 첨가량을 조절하였다. 한편, 33 psu 이하의 염분조절 시 첨가된 증류수가 성장에 미치는 영향을 알아보기 위해 인공 합성배지인 ASP 배지를 이용하여 성장도 조사를 하였다. 예비조사결과는 염분에 따른 종의 성장도는 f/2배지와 비교할 때 절대값에 있어서는 다소 낮았으나 상대 성장도는 염분구간별로 뚜렷한 차이를 보였다. 따라서, 증류수 첨가로 인한 미량금속 원소의 농도저하가 실험결과에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

광도에 따른 실험은 60 µE · m⁻² · s⁻¹ 내외에서 배양된 종을 2~150 µE · m⁻² · s⁻¹에서 6개 구간으로 구분하여 실시하였다. 광원으로는 형광램프를 이용하였다. 광도의 측정은 조도계(LI-COR, LI-250)를 이용하였다.

적조생물 배양실험은 부산시 기장군 연안 해수를 0.45 µm membrane filter로 여과하여 고압멸균기로 멸균한 다음 영양염류의 농도와 염분 등을 측정된 후, 이것을 실험조건에 맞게 조정하

여 사용하였다. 배양기로는 multi-incubator(EYELA MTI-201)을 이용하였고, 실험용기로는 screw cap test tube(15×130 mm)를 사용하였다. 배양조건은 형광등을 이용하여 명암주기를 14L:10D로 조정하였으며, 수온, 염분 및 광도는 각각 23°C, 33 psu 및 100 µE · m⁻² · s⁻¹로 하였다. 세포의 초기 접종밀도는 세포의 용적을 고려하여 크기에 따라 접종밀도를 약간씩 달리하였는데, 크기가 작은 *Eutreptiella gymnastica*는 700 cells/ml로 하였고, 세포의 크기가 비교적 큰 *Akashiwo sanguinea*는 150 cells/ml, 그 밖의 종은 200~500 cells/ml로 하였다. 세포의 계수는 접종한 날로부터 최대밀도에 도달할 때까지 격일간격으로 실시하였다. 모든 실험결과는 3반복한 것을 평균하여 구하였으며, 성장률은 세포의 최초 접종일로부터 세포밀도가 정체기에 도달했을 때까지의 세포밀도를 구하여 Stein(1973)의 식

$$K(\text{division/day}) = \ln(N_1 - N_0) / (T_1 - T_0) \ln 2$$

(T₁-T₀: 실험종료시까지의 소요일수, N₀: 실험개시시의 세포밀도, N₁: 실험종료시의 세포밀도)에 따라 구하였다.

결 과

수온에 따른 성장

수온에 따른 적조생물 10종의 성장률은 Fig. 2와 같다.

수온 10~31°C에서 *Scrippsiella trochoidea*의 성장률은 0.28~0.49로 광범위한 수온구배에서 양호한 성장을 하는 것으로 나타나 광온성의 특징을 보였다. 특히, 수온 19~28°C에서는 0.42~0.49의 높은 성장률을 보였고 25°C에서 최대성장을 보였다. *Akashiwo sanguinea*는 16~22°C에서 0.35~0.38의 비교적 높은 성장률을 보였는데, 최대 성장률은 16°C로 나타났고 전반적으로 28°C 이상의 고수온보다는 13°C 내외의 저수온에서 오히려 성장률이 높게 나타났다. *Alexandrium tamarense*는 10~22°C에서의 성장률이 0.29~0.31, 고수온인 25~28°C에서 0.03~0.19로 나타나 22°C 이상의 고수온에서는 성장률이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. *Eutreptiella gymnastica*는 수온 10~22°C에서 0.70~0.83의 높은 성장률을 보였으나, 고수온인 25°C부터는 성장률이 감소하기 시작하여, 28°C 이상에서는 0.33 이하의 저조한 성장률을 보임으로써, 고수온보다는 저수온에서의 성장률이 더 높은 것으로 나타났다. *Heterosigma akashiwo*는 10~31°C에서의 성장률이 0.47~0.69로써 전반적으로 광범위한 수온구배에서 양호한 성장을 함으로써 광온

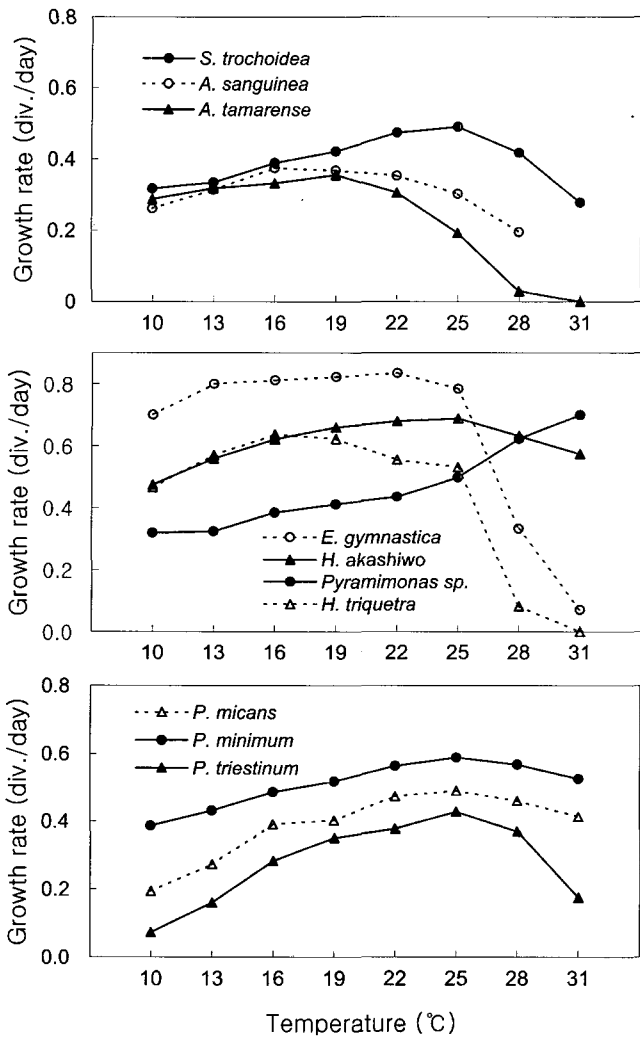


Fig. 2. Growth rates of ten bloom-forming microalgae depending on different water temperatures.

성의 특징을 보였다. 수온 16~28°C에서는 0.62~0.69의 높은 성장률을 보였으며, 25°C에서 최대 성장을 나타냈다. *Heterocapsa triquetra*는 저수온인 10~16°C에서는 수온이 증가함에 따라 성장률도 증가하여 0.47~0.64의 높은 성장률을 보였으나, 19°C부터는 성장률이 점차 감소하기 시작하였고, 28°C 이상에서는 0.08이하의 지극히 저조한 성장률을 보였다. 따라서 *H. triquetra*는 저온성 종의 특징을 나타냈다. *Pyramimonas sp.*는 저수온인 10~22°C에서는 0.32~0.43의 저조한 성장률을 보였으나 고수온인 25°C 부터는 성장률이 급격히 증가하기 시작하여 31°C에서는 0.70의 높은 성장률을 보여, *H. triquetra*와는 반대로 고온성 종의 특징을 보였다. *Prorocentrum micans*은 수온 10~31°C에서 0.19~0.49의 성장률을 나타냈는데, 10~25°C에서는 수온이 증가할수록 성장률도 증가하였다. 고수온인 28~31°C에서는 성장률이 다소 감소하였으나 성장률은 0.41~0.46로 비교적 양호하였다. 전반적으로 10~16°C의 저수온보다는 28~31°C의 고수온에서의 성장률이 월등히 높게 나타났다. *Prorocentrum minimum*은 수온 10~31°C에서 성장률이 0.39~0.59였는데, *P. micans*와 마찬가지로 10~25°C에서는 수온이

증가할수록 성장률도 증가하였다. 28°C 이상의 고수온에서는 성장률이 다소 감소되었으나 0.52~0.57로 여전히 양호한 성장을 하는 것으로 나타났다. *P. minimum*은 광범위한 수온구배에서 양호한 성장을 함으로써 광온성 특징을 보였으며 대체로, 10~16°C의 저수온보다는 19~31°C의 고수온에서의 성장률이 월등히 높게 나타났다. 수온 10~31°C에서 *Prorocentrum triestinum*의 성장률은 0.07~0.43을 보였는데, 19~28°C에서의 성장률은 0.35~0.43으로 비교적 높게 나타났고, 16°C 이하 및 31°C 이상에서는 0.20 이하의 매우 저조한 성장률을 보였다.

염분에 따른 성장

염분 10~40 psu에서 적조생물 10종의 성장률은 Fig. 3과 같다. *Scrippsiella trochoidea*의 성장률은 저염분인 10~20 psu에서는 0.23이하로 낮았으나, 25~40 psu에서는 0.37~0.42의 비교적 높은 성장률을 보임으로써 광염성의 특징을 나타냈는데, 전반적으로 저염분보다는 고염분에서의 성장률이 더 높은 것으로 나타났다. *Akashiwo sanguinea*는 저염분인 15 psu 이하와 고염분인 40 psu에서는 0.21 이하의 저조한 성장률을 보였으나, 20~35 psu에서는

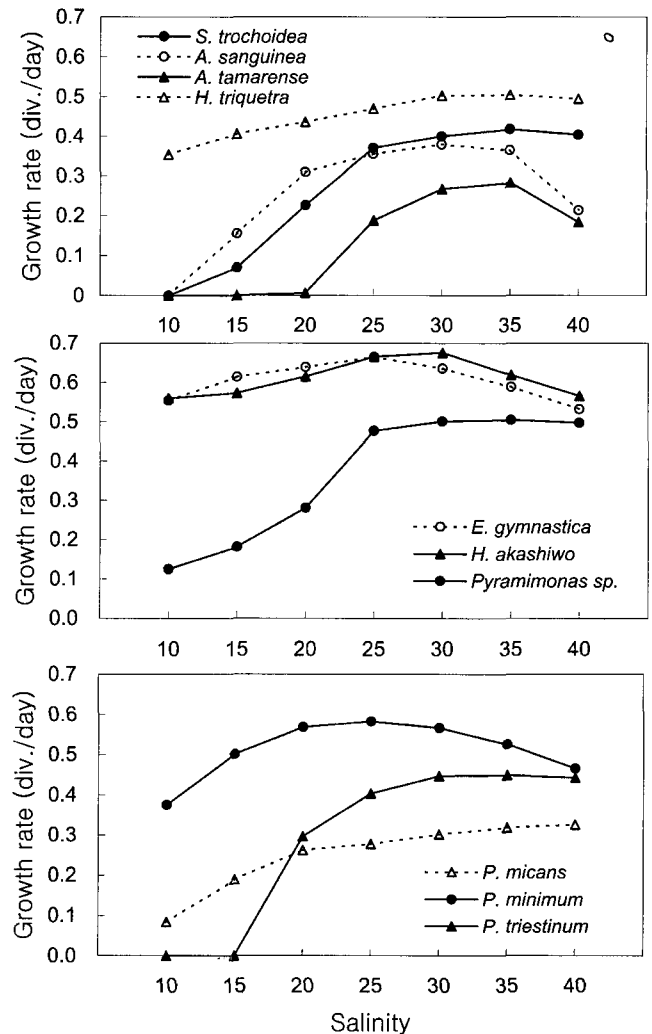


Fig. 3. Growth rates of ten bloom-forming microalgae depending on different salinities.

0.31~0.38의 비교적 높은 성장률을 보였다. *Alexandrium tamarense*는 20 psu 이하의 저염분에서는 0.01 이하의 매우 저조한 성장률을 보였고, 25~40 psu에서는 0.19~0.28의 비교적 높은 성장률을 보였다. *Heterocapsa triquetra*는 10~40 psu의 넓은 염분범위에서 0.35~0.50의 높은 성장률을 보여 광염성의 특징을 나타냈다. *Eutreptiella gymnastica* 역시 10~40 psu의 넓은 염분범위에서 0.53~0.66의 높은 성장률을 보여 광염성의 특징을 나타냈으며 특히, 30 psu 이상의 고염분보다는 25 psu 이하 저염분에서 성장이 더 양호한 것으로 나타났다. *Heterosigma akashiwo*는 10~40 psu의 넓은 염분범위에서 0.56~0.68의 성장률을 보여 광염성의 특징을 보였는데, 최대성장은 25~30 psu에서 나타났으며 특히, 35 psu 이상의 고염분보다는 저염분에서 성장이 더 우수한 것으로 나타났다. *Pyramimonas* sp.는 20 psu 이하의 저염분에서는 0.12~0.28의 낮은 성장률을 보였으나 25~40 psu에서는 0.48~0.50의 성장률을 보였으며, 대체로 저염분보다는 고염분에서 성장이 더 양호한 것으로 나타났다. *Prorocentrum micans*는 15 psu 이하의 저염분에서의 성장률은 0.19 이하로 낮았으나, 20~40 psu에서는 0.26~0.33으로 비교적 높은 성장률을 보였고 35 psu에서 최대 성장률을 보였다. *P. minimum*은 10 psu에서 성장률이 0.37로 특별히 낮았던 것을 제외하고는 15~40 psu에서 0.47~0.58의 높은 성장률을 보여 광염성 특징을 보였다. 전반적으로 고염분보다는 저염분에서의 성장률이 더 높은 것으로 나타났다. *P. triestinum*은 25~40 psu에서 0.40~0.45의 비교적 높은 성장률을 보였으나, 20 psu 이하의 저염분에서는 성장률이 0.30 이하로 저조하였고, 30~35 psu에서 최대 성장률을 보였다.

광도에 따른 성장

광도에 따른 적조생물 10종의 성장률은 Fig. 4와 같다.

광도 2, 10, 20, 50, 100, 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Scrippsiella trochoidea*의 일간성장률은 각각 0.03, 0.21, 0.38, 0.40, 0.41, 0.37로 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광도가 높을수록 성장률도 증가되었으며, 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서는 성장률이 감소하는 것으로 나타났다. 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Akashiwo sanguinea*의 일간 성장률은 0.06~0.36으로 나타났는데, 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광도가 높을수록 성장률도 증가하였다. 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서의 성장률은 0.35로 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서와 비슷하였으나, 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서의 성장률은 0.27로 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서보다 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Alexandrium tamarense*의 일간 성장률은 0.00~0.28로 나타났는데, 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광도가 높을수록 성장률도 증가하였으나 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 부터는 광도가 증가할수록 성장률이 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Eutreptiella gymnastica*의 일간 성장률은 0.13~0.64로 나타났다. 20 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광도가 증가할수록 성장률도 급격히 증가되었으나, 50~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광도에서는 0.63~0.65의 성장률을 보임으로써 성장률이 더 이상 증가되지는 않았다. 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Heterosigma akashiwo*의 일간 성장률은 0.00~0.68로 나타났는데, 광도가 높을수록 성장률도 점차 높아지는 것으로 나타났으며, 최대성장률은 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서였다. 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Heterocapsa triquetra*의 일간 성장률은 0.17~0.65로 나타났는데, 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광

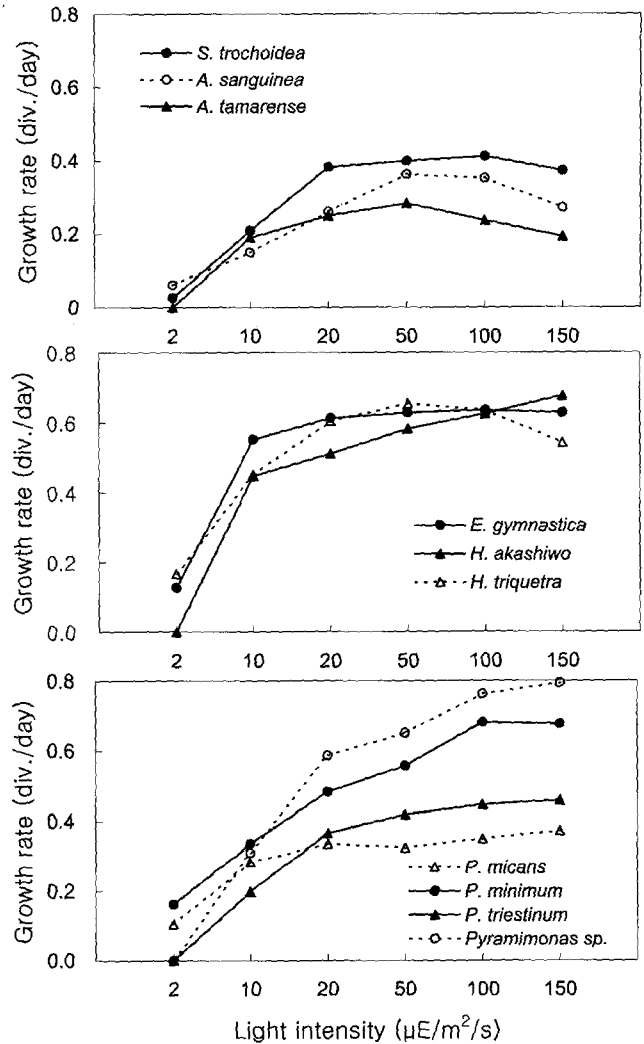


Fig. 4. Growth rates of ten bloom-forming microalgae depending on different irradiances.

도가 높을수록 성장률도 급격히 증가하였다. 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서는 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서의와 비슷한 성장률을 보였으나 150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서는 성장률이 현저히 감소되는 것으로 나타났다.

광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Pyramimonas* sp.의 일간성장률은 0.00~0.79였는데, 광도가 높을수록 성장률도 직선적으로 증가하는 경향을 보였으며 특히, 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도에서 양호한 성장을 하였다. 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 *Prorocentrum micans*의 일간성장률은 0.10~0.37였는데, 전반적으로 광도가 높을수록 성장률도 증가하는 경향을 보였으며, 고광도인 100~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 0.35~0.37의 양호한 성장률을 보였다. *P. minimum*은 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 0.16~0.68의 성장률을 보였는데, 광도가 높을수록 성장률도 직선적으로 증가되었다. 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 저광도보다는 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상 고광도에서의 성장률이 현저히 높은 것으로 나타났다. *P. triestinum*은 광도 2~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 0.00~0.46의 성장률을 보였는데, 광도가 높을수록 성장률도 증가하는 경향을 보였고, 전반적으로 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상 고광도에서의 성장률도 0.45 내외로 양호하였다.

Table 2. Microalgal species responsible for red tides in Korean coastal waters since 1972

Class	Species
Cyanophyceae (남조강)	<i>Anabaena affinis</i> LEMMERMANN
	<i>Anabaena solitaria</i> KLEBAHN ex KOMAREA
	<i>Microsystis</i> sp.
Cryptophyceae (은편모조강)	<i>Cryptomonas</i> sp.
Dinophyceae (와편모조강)	<i>Akashiwo sanguinea</i> G. HANSEN & MOESTRUP
	<i>Alexandrium affine</i> (INOE and FUKUYO) BALECH
	<i>Alexandrium fraterculus</i> (BALECH) BALECH
	<i>Alexandrium tamarense</i> (LEBOUR) BALECH
	<i>Ceratium furca</i> (EHRENBERG) CLAPAREDE et LACHMANN
	<i>Ceratium fusus</i> (EHRENBERG) DUJARDIN
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> MARGALEF
	<i>Gonyaulax polygramma</i> STEIN
	<i>Gymnodinium</i> sp.
	<i>Gymnodinium mikimotoi</i> (MIYAKE et KMINOMI ex ODA)
	<i>Gyrodinium fissum</i> (LEVANDER) KOFOID & SWEZY
	<i>Gyrodinium</i> sp.
	<i>Heterocapsa triquetra</i> (EHRENBERG) STEIN
	<i>Noctiluca scintilans</i> (MACARTNEY)
	<i>Oxyphysis oxytoxoides</i> KOFOID
	<i>Pheopolykrikos hartmannii</i> (ZIMMERMAN) MATSUOKA et FUKUYO
	<i>Prorocentrum dentatum</i> STEIN
	<i>Prorocentrum gracile</i> SCHUTT
	<i>Prorocentrum micans</i> EHRENBERG
	<i>Prorocentrum minimum</i> PAVILLARD
	<i>Prorocentrum triestinum</i> SCHILLER
<i>Protoperidinium bipes</i> (PAULSEN) BALECH	
<i>Scrippsiella trochoidea</i> (STEM) LOEBLICH III	
Bacillariophyceae (규조강)	<i>Asterionella japonica</i> CLEVE
	<i>Chaetoceros decipiens</i> CLEVE
	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> MANGIN
	<i>Cylindrotheca closterium</i> (EHRENBERG) REIMANN & LEWIN
	<i>Dictylum brightwellii</i> (WEST) GRUN
	<i>Eucampia zodiacus</i> EHRENBERG
	<i>Leptocylindrus danicus</i> CLEVE
	<i>Pseudo-nitzschia longissima</i> RALES
	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> GRUNOW
	<i>Pseudo-nitzschia seriata</i> CLEVE
	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.
	<i>Rhizosolenia fragilissima</i> BERGON
	<i>Rhizosolenia indica</i> GRAN
	<i>Skeletonema costatum</i> (GREVILLE) CLEVE
	<i>Stephanopyxis palmeriana</i> (GREVILLE) GRUNOW
	<i>Thalassiosira decipiens</i> (Grun.) JöRG
	<i>Thalassiosira mala</i> TAKANO
	<i>Thalassiosira nordenskioldi</i> CLEVE
	<i>Thalassiosira rotula</i> MEUNIER
Chrysophyceae (황갈조강)	<i>Dictyocha fibula</i> EHRENBERG
Raphidophyceae (침편모조강)	<i>Chattonella antiqua</i> (HADA) ONO
	<i>Chattonella</i> sp.
	<i>Fibrocapsa japonica</i> TORIUMU & TAKANO
	<i>Heterosigma akashiwo</i> HADA
Prasinophyceae (담녹조강)	<i>Micromonas</i> sp.
Euglenophyceae (유글레나강)	<i>Eutreptiella gymnastica</i> THRONDSSEN

Table 3. Harmful algal bloom event in Korean coastal waters from 1990 to 2003 (Numbers in parentheses indicate percentages occupied)

Species	Month												Total
	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
<i>Alexandrium tamarense</i>				3(75)						1(25)			4(100)
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	1(5)	1(5)		8(45)	4(22)	3(17)		1(5)					18(100)
<i>Akashiwo sanguinea</i>		1(2)			6(13)	5(11)	6(13)	8(17)	10(22)	7(16)		3(7)	46(100)
<i>Heterosigma akashiwo</i>					28(22)	49(39)	42(33)	8(6)					127(100)
<i>Heterocapsa triquetra</i>	1(14)	1(14)	4(58)		1(14)								7(100)
<i>Prorocentrum micans</i>	1(3)				1(3)	13(42)	10(32)	3(10)		1(3)	2(7)		31(100)
<i>Prorocentrum minimum</i>						1(8)	4(33)	5(43)	1(8)	1(8)			12(100)
<i>Prorocentrum triestinum</i>						11(39)	8(29)	8(29)	1(3)				28(100)
<i>Pyramimonas</i> sp.						1(100)							1(100)
<i>Scrippsiella trochoidea</i>							1(33)	1(33)	1(33)				3(100)
Water temperature (mean)	8.1	8.0	9.9	13.4	16.7	19.7	23.0	24.1	24.0	19.8	15.5	11.0	

적조발생상황

1972년도부터 2003년도까지 한국 연안에서 적조를 일으키는 미세조류는 규조강(Bacillariophyceae) 19종, 와편모조강(Dinophyceae) 23종, 침편모조강(Raphidophyceae) 4종, 담녹조강(Prasinophyceae) 2종, 은편모조강(Cryptophyceae) 1종, 황갈조강(Chrysophyceae) 1종, 유글레나강(Euglenophyceae) 1종, 남조강(Cyanophyceae) 3종으로 총 54 종이다(Table 2). 동, 서, 남해안연안에서 1990년도부터 2003년도까지 적조생물 10종의 종별 적조발생시기와 발생건수는 Table 3과 같다.

Alexandrium tamarense 적조는 총 4건이 발생하였는데 이중 3건이 수온 14°C 내외인 4월이었고 나머지 1건은 10월로써 적조발생빈도는 추계보다는 춘계가 월등히 높은 것으로 나타났다. *Akashiwo sanguinea*는 1~12월 사이에 총 46건의 적조가 발생하였는데, 16°C 이상인 5~10월에 90% 이상이 발생함으로써 비교적 고수온기 동안에 주로 적조를 발생한 것으로 나타났다. *Eutreptiella gymnastica*는 1~6월동안 총 18건의 적조가 발생하였는데, 85% 이상이 수온 13~20°C인 4~6월에 발생하였다. *Heterosigma akashiwo* 적조는 총 127건의 적조가 발생하였는데, 수온 16°C 이상인 5~8월 사이에만 발생하였다. *Heterocapsa triquetra* 적조는 수온이 17°C 이하인 1~5월에 총 7건이 발생하였는데, 특히 10°C 내외의 저수온기인 3월에 적조발생빈도가 가장 높은 것으로 나타났다. *Prorocentrum micans* 적조는 1~11월 사이에 총 31건의 적조가 발생하였는데, 20°C 이상인 6~8월에 84%가 발생하여 대부분 고수온기 동안 적조를 일으키는 것으로 나타났다. *P. minimum*은 6~10월 사이에 총

12건의 적조가 발생하였는데, 특히 수온이 20°C 이상인 7~8월에 약 76%가 발생하여 고수온기 동안에 주로 적조를 일으키는 것으로 나타났다. *P. triestinum*은 총 28건의 적조가 발생하였는데, 수온이 약 20°C 이상인 6~9월에만 발생한 것으로 나타났다. *Pyramimonas* sp.에 의한 적조는 1997년도 6월 수온 20°C 내외일 때 부산연안에서 1건만이 발생하였다. *Scrippsiella trochoidea*에 의한 적조는 23°C 이상의 고수온기인 7~9월에 발생하였고, 발생건수는 총 3건으로 적조발생 빈도가 비교적 적은 편이었다.

유영세포 출현시기

1999년도와 2000년도에 남해안연안 21개 정점을 대상으로 실시한 적조생물 10종 유영세포의 출현결과는 Table 4와 같다.

*Alexandrium tamarense*는 대체로 동, 춘계인 2~6월과 추계인 9~10월에 출현하였는데 4~5월과 10월에 1,000 cells/l 이상의 비교적 높은 출현밀도를 보였고, 특히 진해만 연안에서의 출현량이 높은 것으로 나타났다. *Eutreptiella gymnastica*는 춘계인 3~6월에 출현하였는데, 4~5월에 1,000 cells/l 이상의 높은 출현밀도를 보였다. *Akashiwo sanguinea*는 2~11월까지 거의 연중 출현하였는데, 특히 고수온기인 5~9월에 출현밀도가 높은 것으로 나타났다. *Heterosigma akashiwo*는 춘, 하계인 5~8월 사이에만 출현하였는데 출현기간 내내 1,000 cells/l 이상의 비교적 높은 밀도를 유지하였다. *Heterocapsa triquetra*의 출현시기는 동, 춘계인 2~6월이었는데, 3~5월에 가장 높은 출현밀도를 보였다. *Prorocentrum micans* 유영세포의 출현시기는 3~11월로써 거의 연중 출현하였는데, 출

Table 4. Abundance of microalgal species in the southern coastal waters of Korea in 1999 and 2000 (+: 20-1000 cells/l, ++: ≥1000 cells/l)

Species	Month										
	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	
<i>Alexandrium tamarense</i>	+	+	++	++	+				+	++	
<i>Eutreptiella gymnastica</i>		+	++	++	+						
<i>Akashiwo sanguinea</i>	+	+	+	++	++	++	++	++	+	+	
<i>Heterosigma akashiwo</i>				++	++	++	++				
<i>Heterocapsa triquetra</i>	+	++	++	++	+						
<i>Prorocentrum micans</i>		+	++	++	++	++	++	++	+	+	
<i>Prorocentrum minimum</i>					++	++	++	++	+		
<i>Prorocentrum triestinum</i>					+	++	++	++	+		
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	+	+	++	++	++	++	++	+	+	+	

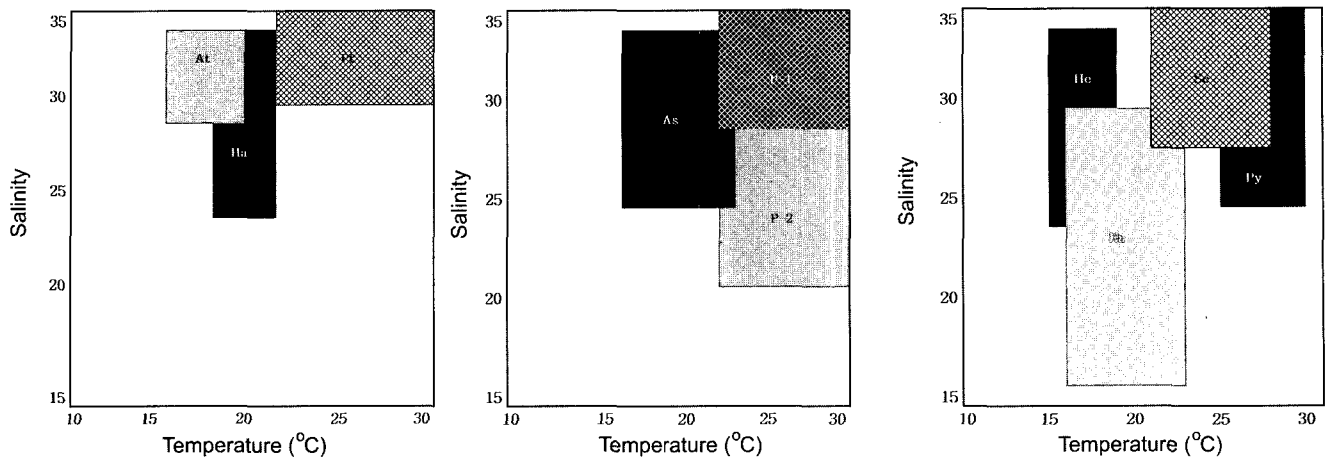


Fig. 5. Optimal water temperatures and salinities of ten microalgae (At, *Alexandrium tamarense*; Ha, *Heterosigma akashiwo*; Pt, *Prorocentrum triestinum*; As, *Akashiwo sanguinea*; P-1, *Prorocentrum micans*; P-2, *Prorocentrum minimum*; He, *Heterocapsa triquetra*; Eu, *Eutreptiella gymnastica*; Py, *Pyraminonas* sp.; Sc, *Scripsiella trochoidea*).

현량은 동, 추계보다는 춘, 하계인 4~9월에 비교적 높게 나타났다. *P. minimum*은 6~10월에 출현하였고, 고수온기인 6~9월에 비교적 높은 밀도를 보였다. *P. triestinum* 유영세포는 *P. minimum*과 마찬가지로 6~10월에 출현하였는데, 출현량에 있어서도 고수온기인 7~9월에 1,000 cells/l 이상 높게 나타났다. *Scripsiella trochoidea*의 유영세포는 2~11월까지 거의 연중 출현하였는데, 고수온기인 4~8월 사이에 1,000 cells/l 이상의 비교적 높은 출현밀도를 보였다.

10종에 대한 배양실험과 연안에서의 출현 시기 및 적조발생 자료를 종합하여 종별 최적수온 및 최적염분을 정리한 것은 Fig. 5와 같다.

토 의

1985년도 이전까지는 주로 규조류에 의한 적조발생빈도가 높았으나 그 이후부터는 편모조류에 의한 적조발생빈도가 점차 높아지고 있는데, 이 실험에서 이용한 10종의 편모조류는 1990년대 이후 진해만, 북신만, 울산만 등지와 같은 내만해역에서 빈번히 적조를 일으키고 있다(Kim, 1986a, b; Kim *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1996).

*Scripsiella trochoidea*는 일본 오사카만, 멕시코 Baja California 연안, 이집트의 Alexandria 연안 등지에서 주로 6~8월에 적조를 발생한 것으로 알려져 있는데, 적조발생환경은 연안해역의 부영양화와 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(Adachi, 1972; Labib, 2000; Garate Lizarraga *et al.*, 2001). 이 실험에서 *S. trochoidea*는 광온성 종으로 넓은 수온범위에서 출현하는 것으로 나타났으며, 호적수온은 20°C 이상의 고수온기인 7~9월 사이에만 적조를 형성한 것으로 나타났다. 염분에 있어서는 저염분보다는 25 psu 이상의 고염분에서 성장률이 높은 것으로 나타나 집중강우 후 다량의 영양염류 유입과 저염분 상태에서 적조를 빈번히 발생하는 *Heterosigma akashiwo*, *Eutreptiella gymnastica* 등과는 달리 25 psu 이하의 저염분에서는 적조발생 가능성이 희박한 것으로 판단되었다. 한편, *S. trochoidea*는 부영양화 수역인 진해만 내측 해역에서 대부분 적조를 발생함으로써 고위도와 중남미 및 지중해 연안에서와 마찬가지로 적조발생 원인이 부영양화와 밀접한 관련이

있을 것으로 추정되었으며, 적조발생 가능 시기도 대체로 일치하는 경향을 보였다.

*Akashiwo sanguinea*는 적조발생시 부분적인 수산생물 폐사가 보고됨으로써 유해성 종으로 추정되고 있으나, 아직까지 구체적인 독소가 밝혀지지는 않았다(Steidinger *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2000). 이종의 적조발생해역은 중국, 일본, 미국, 멕시코 호주 남부연안 등지로 보고되고 있다(Cannon, 1990; Robichaux *et al.*, 1998; Steidinger *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2000; Botes *et al.*, 2000). 이종의 적조발생 시기는 주로 봄~가을철이며, 강하구 등으로부터의 담수유입과 함께 영양염류가 다량 유입되는 연안역에서 표층층간 혼합이 적고 성층이 안정화된 상태에서 광도가 비교적 높은 경우 많이 발생되며, 특히 20 psu 내외의 저염분에서 적조발생빈도가 높은 것으로 알려져 있다(Robichaux *et al.*, 1998). 실내실험에서 이종은 16~22°C에서 비교적 높은 성장률을 보였고, 연안에서 유영세포가 거의 연중 출현하는 것으로 나타났는데, 특히 4~8월의 출현률이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 적조가 발생한 시기는 대체로 5~10월이었다. 한편, 이종은 저염분인 20 psu에서부터 비교적 성장이 양호한 것으로 나타났고, 특히 강후 직후 육지로부터 다량의 영양염류와 담수의 유입이 비교적 많은 진동만, 마산만, 가덕도 등지의 연안내측해역에서 적조발생빈도가 현저히 높게 나타남으로써, 미국과 호주 등지에서의 적조발생 조건과 일치하는 경향을 보였다. 따라서, 이종은 봄-가을철에 육수의 영향을 비교적 많이 받으면서 표, 저층간 혼합이 적은 연안내측해역에서 주로 적조가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

마비성 패독종인 *Alexandrium tamarense*는 한국(Kim and Shin, 1997), 미국(Franks, 1990), 호주(Hallegraeff, 1992), 남아공(Hallegraeff, 1995), 러시아(Sorokin *et al.*, 1996), 중국(Zhu *et al.*, 1997), 영국(Joint *et al.*, 1997), 우루과이(Brazeiro *et al.*, 1997), 프랑스(Lassus *et al.*, 1999), 이탈리아(Lassus *et al.*, 1999), 일본(Yamamoto *et al.*, 2002), 캐나다(Weise *et al.*, 2002) 등과 같이 세계 각국에서 적조가 보고되고 있다.

이종은 북반구 온대수역에서 주로 춘계와 추계에 적조를 일으

키는데, 적조발생기작은 강우직후 강하구를 통한 담수의 연안유입과 염분약층(halocline)의 형성, 풍향, 풍속과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Anderson *et al.*, 1983; Franks and Anderson, 1992; Anderson, 1998; Weise *et al.*, 2002). 이 종은 마비성 패독을 일으켜 패류를 독화시키는 것은 물론(Anderson, 1984; Kim and Shin, 1997; 이 등, 1997) 적조발생시 가두리내의 양식생물을 직접 폐사시킬 수도 있는 것으로 보고되고 있다(Cembella *et al.*, 2002). 이종의 유영세포는 1999년도에는 2-5월에 출현하였으나, 2000년도의 경우는 추계인 9-11월에도 1,000 cells/L 이하의 낮은 농도로 출현함으로써 대체로 고수온기인 하계를 제외하고는 2-11월에 걸쳐 출현하는 것으로 판단된다. 적조발생 시기는 추계인 10월보다는 대부분 춘계인 4-5월에 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 이 실험에서 22°C 이상의 고수온에서는 성장률이 급격히 저하되는 것으로 나타났는데, 이러한 현상은 이종이 20°C 이하인 봄철에 주로 적조를 일으키는 특성과도 관련이 있을 것을 생각된다. 이 실험에서 20 psu 정도의 낮은 염분에서도 성장이 비교적 양호한 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 山本 등(2000)가 이종의 적조발생 가능 염분으로 제시한 15-35 psu 범위와 거의 일치하였다.

한편, Franks(1990), Anderson *et al.*(1998), Weise *et al.*(2002)는 미국 북동부연안에서의 *A. tamarense* 적조발생은 강하구로부터 담수의 연안유입에 의한 저염분 상태에서의 염분약층형성과 밀접한 상관관계가 있다고 보고하였는데, 이러한 결과는 이종의 적조발생해역이 낙동강하구로부터 비교적 담수의 영향을 많이 받는 해역인 부산-가덕도-거제동부-진해만 동부 수역에 편중되고 있는 것과 밀접한 상관성이 있다. 특히, 진해만 동부수역은 지형적인 특성상 낙동강 하구로부터 담수유입이 용이할 뿐만 아니라 Franks and Anderson(1992), Cembella *et al.*(2002) 등이 적조발생조건으로 제시한 바람에 의한 수층 혼합이 비교적 적은 해역에 해당된다. 또한, Yamamoto *et al.*(2002)은 이종의 성장이 인에 의해 크게 제한을 받으며, 굴 양식장으로부터 배출되는 배설물은 인의 제공원으로 중요한 역할을 한다고 보고하였는데, 진해만 동부수역에는 다량의 굴양식장이 존재함으로써 이종의 적조발생에 유리한 입지조건이 될 수 있다. 山本 등(2000)은 이종의 보상광량이 45~76 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 다른 편모조류에 비하여 낮다고 보고하였는데, 이 실험에서도 광도 50 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 높은 성장률을 보였고 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도에서는 오히려 성장률이 감소되는 것으로 나타났다. 따라서, 이종의 경우 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도에서는 광적해 반응(photo inhibitory response)을 받는 것으로 추정되었다. 이러한 광적응 특성은 이종이 주간에 표층보다는 5 m 내외의 중층에서 주로 분포하는 생태적 특성과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다.

*Heterosigma akashiwo*는 미국(Gaines and Taylor, 1986), 캐나다(Haigh and Taylor, 1990), 호주(Hallegraeff, 1992), 일본(Honjo, 1993; Yoshida *et al.*, 1998), 중국(Yan *et al.*, 2002) 등지에서 적조를 일으키고 있으며, 연어와 방어 등에 대한 수산피해도 보고되고 있다. 이 종은 특히, 고수온과 고광도 그리고 질소, 인, 철, 비타민 B₁₂ 등과 같은 영양염류가 풍부하고 해류의 유속이 비교적 낮은 해역에서 빈번하게 적조를 일으키며, 강우 직후 낮은 염분농도에서 성장이 양호한 광염성종으로 알려져 있다(Watanabe *et al.*, 1982; Yamochi and Abe, 1984; Hosaka, 1992; Honjo, 1993; Kim

et al., 1996; Yoshida *et al.*, 1998; Yan *et al.*, 2002). 한국에서 이종의 적조발생 시기는 수온이 20°C 이상인 5-8월이고 적조발생 해역은 주로 반폐쇄성 내만해역인 진해만, 북신만, 진주만 등지이다(김 등, 1998). 배양실험에서 *H. akashiwo*는 수온 16~28°C에서 비교적 높은 성장률을 보였는데, 이러한 결과는 적조발생시기의 연안수온과 일치하였으며, Mori *et al.*(1982), Watanabe and Nakamura(1984) 및 Yan *et al.*(2002) 등이 보고한 적수온 범위(15~25°C)와도 일치하는 결과였다. 또한, 이종은 염분 15~30 psu에서도 높은 성장률을 보임으로써 광온성을 보였는데, 특히 30 psu 이상의 고염분보다는 25 psu 내외의 저염분에서 성장이 가장 양호한 것으로 나타났다. 이종의 이러한 생리적 특징은 강우직후 풍부한 영양염류의 유입과 염분 저하가 쉽게 일어나는 내만수역에서 빈번히 적조가 발생하는 것과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

한편, Ono *et al.*(2002)은 *H. akashiwo* 적조가 주로 발생하는 수온인 20~23°C보다 높은 25°C 이상의 고수온 및 100 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도 하에서는 독성이 현저히 감소한다고 보고하였는데, 한국에서 출현하는 *H. akashiwo*는 독성이 없고 수산생물에 대한 피해도 일으키지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서, 한국의 종은 일본과 캐나다 등지에서 보고된 종과는 strain 특성이 서로 다른 것으로 추정되며, 앞으로 strain 간의 염기서열 분석 등을 통한 형질특성 확인이 요구된다. 또한 이종은 allelopathic substance (polysaccharide-protein complex)를 분비하는 것으로 알려져 있는데, 이러한 물질은 *Skeletonema costatum* 등의 증식을 억제시키면서 *Prorocentrum* 속의 증식을 촉진시키는 것으로 보고되고 있다(Honjo, 1993). 한국에서 춘, 하계동안 *H. akashiwo*에 의한 적조발생 직전 우점종이던 *S. costatum*이 이종의 출현과 함께 급격히 소멸되고 대신 *P. triestinum*과 같은 *Prorocentrum* 속이 주로 동반 출현하는 경우가 많은데, 이는 *H. akashiwo*가 분비하는 allelopathic substance와 관련이 있을 것으로 추측되며 앞으로 이에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

*Eutreptiella gymnastica*는 일본(Iwasaki, 1971; Yamoichi, 1984a), 발틱해(Olli *et al.*, 1996) 등지에서 적조를 발생하며, 온도와 염분에 대한 내성이 크고 특히, 영양염류가 풍부하며 해수의 유동이 적은 상태에서 빈번히 적조를 일으키는 것으로 보고되고 있다(Okaichi, 1980; Yamochi, 1984b). Iwasaki(1971)와 Olli *et al.*(1996)은 이종이 8~17 psu의 낮은 염분에서 성장이 양호하고, 무기영양염류 뿐만 아니라 glycerophosphate, guanylic acid 등과 같은 유기영양염류를 이용하며 또한, 미량금속으로는 철(Fe)이 충분히 존재할 때 특히 성장이 양호한 것으로 보고하였다. 한국에서 이종은 부영양화가 정도가 심한 마산만 등의 내측수역에서 적조를 발생하고 있는데, 적조발생시기인 춘계동안 이수역의 용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)의 농도는 각각 250 $\mu\text{g/L}$ 와 40 $\mu\text{g/L}$ 이상으로(한국 해양환경 조사연보, 2003) 부영양화 정도가 매우 심한 해역이다. 이러한 특성은 Iwasaki(1971)와 Olli *et al.*(1996)이 이종의 적조발생 조건으로 제시한 부영양화와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 이 종은 배양실험에서 10~22°C의 저수온에서 비교적 높은 성장률을 보였으나 25°C 이상에서는 성장률이 급격히 감소하였는데, 이러한 결과는 남해안연안에서 유영세포의 주요 출현 시기가 3~6월이었고, 적조발생 시기도 4~6월에 90% 이상 집중됨으로써 이종의 최적 성장 수온과 일치하는 결과였다.

한편, 이종은 염분 10~35 psu에서 비교적 높은 성장률을 보임으로써 광염성을 보였는데 35 psu 이상의 고염보다는 오히려 20 psu 내외의 저염에서 성장률이 월등히 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 적조발생해역이 33 psu 이상의 연안외측해역보다는 강하구 인근수역이나 강우시 육수의 영향을 크게 받아 염분이 20 psu 내외로 하강하는 마산만 등지의 내만해역이라는 점과 잘 일치하였다. 이 종의 적조발생해역 염분은 발틱해 연안의 경우 5~6 psu(Olli *et al.*, 1996), 일본은 8~17 psu(Iwasaki, 1971)로 한국에 서보다 다소 낮은 염분에서 적조를 발생하는 것으로 나타났는데, 이러한 차이는 strain의 차이에 의한 것으로 추측되며, 더불어 유글레나(Euglenoid) 강에 속하는 종류 중 유일하게 해산/기수종으로 출현하는 이종이 담수로부터 유래되어 해수에 적응된 종이라는 것을 암시해주는 것으로 풀이된다.

한편, 이종은 광도 $20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광도가 높을수록 성장률이 증가하였으나, 그 이상의 광도에서는 동, 춘계에 주로 적조를 일으키는 *H. triquetra*, *A. tamarense*에서처럼 성장률은 정체 또는 감소되는 양상을 보였다. Litaker *et al.*(2002b)은 광량이 낮은 동계에 주로 적조를 일으키는 *H. triquetra*의 경우 $5 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 낮은 광도에서도 광을 효율적으로 활용할 수 있는 능력이 있다고 보고하였다. 이 실험에서 이종은 $20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 낮은 광도에서 최대성장을 보임으로써 *H. triquetra*처럼 광을 효과적으로 활용할 수 있는 능력을 지닌 것으로 생각된다. 또한, 이종의 보상광량을 별도로 조사하지는 않았으나 광도에 따른 성장률 결과로부터 추정해볼 때 고수온기에 적조를 일으키는 종보다는 보상광량이 훨씬 낮고, $100 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도에서는 광저해를 받는 것으로 생각된다.

*Heterocapsa triquetra*는 일본의 오사까만(Yamaji, 1984), 미국 North Carolina Newport estuary(Litaker *et al.*, 2002a) 등지에서 주로 저수온기에 적조를 일으키는 것으로 보고되고 있다. Litaker *et al.*(2002a, b)은 강우에 의한 영양염류 유입과 저염분이 이종의 적조발생에 지대한 영향을 미치는 요인이며, 낮은 광도에서도 광을 효과적으로 이용할 수 있는 능력을 보유하고 있어 PAR(Photosynthetically Active Radiation)의 일간변화가 크고 광량이 적은 동계에도 적조를 발생할 수 있다고 보고하였다. 이 실험에서 *H. triquetra*는 수온 13°C에서 비교적 높은 성장률을 보였으나 19°C 이상에서부터는 성장률이 급격히 감소됨으로써 저온성을 보였고, 염분에 있어서는 10 psu 이상의 모든 염분구간에서는 0.4~0.5 정도의 비교적 높은 성장률을 보임으로써 광염성을 보였다. 또한, 광도에 있어서는 $20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 까지는 광도가 증가할수록 성장률도 증가하였고 $100 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 고광도에서는 성장률이 급격히 감소되는 특성을 보였다.

한국에서는 이종이 1~3월의 동계에 주로 마산만 등지에서 적조를 일으키는데, 적조발생해역은 질소와 인의 농도가 높고 육수의 영향을 직접적으로 받는 내만해역으로 염분이 대체로 15~30 psu 정도로 낮은 해역이다. 이러한 특성은 Litaker *et al.*(2002a, b)이 제시한 이종의 적조발생 호적환경과 대체로 일치한다. 따라서 겨울철~봄철 강우 직후 영양염류의 유입이 많이 일어나는 진해만 등과 같은 내만해역에서는 이종에 의한 적조발생 가능성이 높은 것으로 판단된다.

*Prorocentrum micans*는 미국 동부연안(McLaughlin, 1979), 칠

레 San Jorge bay(Rodriguez and Zarate, 1985), 일본(Kato, 1988), 호주 남부(Cannon, 1990), 중국(Wang *et al.*, 2000) 등지에서 적조를 일으킨 것으로 보고되고 있다. 이 종에 의한 적조발생은 연안의 부영양화 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있는데(Kato, 1988), 호주 남부의 Adelaide 기수역에서는 담수가 연안에 유입되면서 성층현상이 발생하고 조류의 이동이 비교적 적을 때 고밀도 적조를 형성하는 것으로 알려져 있다(Cannon, 1990). Wang *et al.*(2000)은 실내배양 시 이 종의 최적 성장수온이 25°C 내외라고 보고하였고, Kato(1988)는 이종의 성장가능 수온이 18°C 이상부터라고 하였는데, 이 실험에서는 수온 16°C에서부터 성장률이 증가하기 시작하여 25°C에서 최대성장률을 보임으로써 이들과 비슷한 결과를 보였다. 이 실험에서 염분에 따른 성장률은 20~35 psu의 광범위한 구간에서 양호한 성장률을 보임으로써 이종이 광염성 종임을 나타냈다. Wang *et al.*(2000)은 이 종이 25~34 psu에서, McLaughlin(1979)은 27~36 psu에서 가장 성장이 양호하다고 보고하였는데 이러한 결과는 이 실험과 유사한 것이었다. Kain and Fogg(1960)은 이종이 20~40 psu 정도의 염분변화에 대해서 적용할 수 있는 능력이 있다고 보고하였는데, 이 실험에서도 20 psu의 낮은 염분에서도 안정적인 성장을 보임으로써 염분내성이 강한 종으로 판단되었다. 따라서, 이종은 수온이 높은 하계에 연안의 영양염류가 증가하게 되면 적조발생이 가능하고, 특히 염분내성이 강한 특성이 있어 집중강우로 인한 저염분 하에서도 지속적인 성장이 가능한 것으로 판단된다.

*Prorocentrum minimum*은 일본(Okaichi and Imatomi, 1979; Kondo *et al.*, 1990), 포르투갈(Silva, 1985), 캐나다(Haigh and Taylor, 1990), 지중해(Grzebyk and Berland, 1996), 발틱해(Hajdu *et al.*, 2000) 등지에서 적조를 일으키는 것으로 알려져 있다. 이 종은 영양염류 농도가 높고 염분이 비교적 낮은 기수역에서 주로 고수온기에 적조를 많이 일으키는 것으로 알려져 있다(Kondo *et al.*, 1990; Grzebyk and Berland, 1996; Hajdu *et al.*, 2000). 이 실험에서도 저수온보다는 25°C 내외의 고수온에서의 성장이 양호하였는데 특히 31°C의 고수온에서도 높은 성장률을 보임으로써 실험에 이용된 *Prorocentrum* 속의 3종 중 가장 고온성 종으로 판단되었다. Grzebyk and Berland(1996)은 이종이 8~31°C의 수온범위에서도 성장이 가능하며 최적수온은 18~26.5°C라고 보고하였는데 이 실험에서도 이와 비슷한 결과를 보였다. Grzebyk and Berland(1996)와 Hajdu *et al.*(2000)은 이종이 염분내성이 강한 광염성종으로써 5~8 psu에서도 성장이 가능하며 최적염분은 15~35 psu라고 보고하였다. 이 실험에서도 가장 낮은 염분구간인 10 psu에서 0.38 div./day의 비교적 높은 성장률을 보였고 최적염분은 20~30 psu로 나타나 이들의 보고와 유사한 경향을 보였다. 이종은 *Prorocentrum* 속 3종 중 가장 광염성인 종으로 판단되었는데 특히, 저염분에서 성장이 가장 양호한 것으로 나타났다. Grzebyk and Berland(1996)은 이 종의 경우 $500 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 고광도에서도 광저해를 받지 않는다고 보고하였는데, 이 실험에서도 최고광도인 $150 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 높은 성장률을 보임으로써 고광도에서도 광저해를 적게 받는 종으로 판단되었다. 최근 서해안에서는 하계에 수온이 30~33°C, 염분이 20 내외인 축제식 새우양식장에서 이종에 의한 적조가 자주 발생되고 있는데(미보고), 이러한 현상은 극도의 고수온과 저염분에서도 성장이 가능한 이종의 특이한 생리적 특성

때문으로 판단된다.

이 실험에서 *Prorocentrum triestinum*은 25°C에서는 비교적 높은 성장률을 보였으나 19°C 이하의 저수온과 28°C 이상의 고수온에서는 낮은 성장률을 보였다. 또한, 30 psu 이상의 염분에서는 성장이 양호하였으나 20 psu 이하의 저염분에서는 거의 성장을 하지 못한 것으로 나타나 *Prorocentrum* 속 3종 중 가장 협온성 및 협염성 종으로 판단되었다. 광도에 있어서는 고광도인 100~150 $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서도 비교적 양호한 성장을 보였다. Nishijima *et al.*(1989)은 이종의 최적수온이 20~30°C, 최적염분이 31.5~35.0 psu, 최적광도는 6,000 lux라고 보고하였는데, 이러한 결과는 이 실험 결과와 일치하였다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원에서 수행한 적조생물의 생리·생태 연구결과 중의 일부입니다. 이 연구를 위해 시료분석 및 자료정리에 도움을 준 국립수산과학원 유해생물팀의 장수정, 임월애 박사님을 비롯한 여러 연구원님들과 적조예찰업무에 항시수고를 아끼지 않는 지방해양수산청 및 수산연구소 적조담당 직원여러분께도 감사 드립니다. 마지막으로 이 논문을 검토해 주신 국립수산과학원 박철 부장님과 부산대학교 정익교 교수님께 감사 드립니다.

참고문헌

- Adachi, R., 1972. A taxonomical study of the red tide organisms. J. Fac. Fish. Pref. Univ. Mie, **9**: 9–144.
- Anderson, D.M., 1984. Shellfish toxicity and dormant cysts in toxic dinoflagellate blooms. In: Seafood toxins, Ragelis E.P. ed., American Chemical Society, Washington D.C. 125–138 pp.
- Anderson, D.M., 1998. Physiology and bloom dynamics of toxic *Alexandrium tamarense* species with emphasis on life cycle transitions. In: Physiological ecology of harmful algal blooms. Anderson, D.M., A.D. Cembella and G.M. Hallegraeff, eds., NATO, ASI Series. Ecological science, **41**: 29–48.
- Anderson, D.M., D.M. Kulis and G.J. Doucette, 1994. Biogeography of toxic dinoflagellates in the genus *Alexandrium* from the north-eastern United States and Canada. Mar. Biol., **120**: 467–478.
- Anderson, D.M., S.W. Chisholm and C.J. Watras, 1983. The importance of life cycle events in the population dynamics of *Gonyaulax tamarensis*. Mar. Biol., **76**: 179–190.
- Botes, L., G.C. Pitcher and P.A. Cook, 2000. The potential risk of harmful algae to abalone farming on the south coast of South Africa. Journal of Shellfish Research, **19**: 502.
- Brazeiro, A., J.T. Mendoca and G. Ferrari, 1997. The first toxic bloom of *Alexandrium tamarense* in Uruguay: associated environmental factors. Atlantica 1997, **19**: 19–29.
- Cannon, J.A., 1990. Development and dispersal of red tides in the Port River, South Australia. In: Toxic Marine Phytoplankton. Graneli, E., B. Sundstroem, L. Edler and D.M. Anderson, eds. 1990. 110–115.
- Cembella, A.D., M.A. Quilliam, N.I. Lewis, A.G. Bauder, C. Dell-Aversano, K. Thomas, J. Jellet and R.R. Cusack, 2002. The toxic marine dinoflagellate *Alexandrium tamarense* as the probable cause of mortality of caged salmon in Nova Scotia. Harmful Algae, **1**: 313–325.
- Franks, P.J., 1990. Dinoflagellate bloom and physical systems in the Gulf of Maine. Tech. Rep. Woods Hole Oceanogr. Inst., 1990, 267 pp.
- Franks, P.J.S. and D.M. Anderson, 1992. Alongshore transport of a toxic phytoplankton bloom in a buoyancy current: *Alexandrium tamarense* in the Gulf of Maine. Mar. Biol., **112**: 153–164.
- Garate-Lizarranga, I., M.L. Hernandez-Orozco, C.J. Band-Schmidt and G. Serrano-Casillas, 2001. Red tides along the coasts of Baja California Sur, Mexico (1984 to 2001). 2001. Investigations Marinas, CICIMAR, **16**: 127–134.
- Grzebyk, D. and B. Berland, 1996. Influences of temperature, salinity and irradiance on growth of *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae) from the Mediterranean Sea. J. Plankton. Res., **18**: 1837–1849.
- Haigh, R. and F.J.R. Taylor, 1990. Distribution of potentially harmful phytoplankton species in the northern Strait of Georgia, British Columbia. Can. J. Fish. Aquat. Sci., **47**: 2339–2350.
- Hajdu, S., L. Elder, I. Olenina and B. Witek, 2000. Spreading and establishment of the potentially toxic dinoflagellate *Prorocentrum minimum* in the Baltic Sea. Int. Rev. Hydrobiol., **85**: 561–575.
- Hallegraeff, G.M., 1992. On the global spreading of toxic dinoflagellates. Ciguatera Inf. Bull., **2**: 2–4.
- Hallegraeff, G.M., 1995. Harmful algal blooms: A global overview. In: Manual on harmful marine microalgae. Hallegraeff G.M., D.M. Anderson and A.D. Cembella ed. IOC Manuals and Guides No. **33**: 1–19.
- Honjo, T., 1993. Overview on bloom dynamics and physiological ecology of *Heterosigma akashiwo*. in: Toxic phytoplankton blooms in the sea. Smayda T.J. and Y. Shimizu, eds. Amsterdam Netherlands Elsevier, **3**: 33–42.
- Hosaka, M., 1992. Growth characteristics of a strain of *Heterosigma akashiwo* HADA isolated from Tokyo Bay, Japan. Bull. Plankton Soc. Jpn., **39**: 49–58.
- Iwasaki H., 1971. Studies on the red tide flagellates on *Eutreptiella* sp. and *Exuviaella* sp. appeared in Bingo-Nada, the Seto Inland Sea in 1970. J. Oceanogr. Soc. Jpn., **27**: 152–157.
- Jeong, H.J., J.K. Park, H.Y. Choi, J.S. Yang, J.H. Shim, Y.K. Shin, W.H. Yih, H.S. Kim and K.J. Cho, 2000. The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea. 2. The temporal and spatial variations in the phytoplanktonic community in 1997. J. Oceanol. Soc. Korea, **5**: 27–36.
- Joint, I., J. Lewis, J. Aiken, R. Proctor, G. Moore, W. Higan and D.M. Anderson, 1997. International variability of PSP outbreaks on the north east UK coast. J. Plankton Res., **19**: 937–956.
- Jung, C.S., W.J. Choi, H.K. Kim, Y.G. Jung, J.B. Kim and W.A. Lim, 1999. Interrelation between *Cochlodinium polykrikoides* blooms and community structure of zooplankton in the coastal waters around Namhaedo in the South Sea of Korea, 1998. Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst. Korea, **57**: 153–161.
- Kain, J.M. and E. Fogg, 1960. Studies of the growth of marine phytoplankton. 3. *Prorocentrum micans* Ehrenberg. J. Mar. Biol. Assoc. UK, **39**: 33–50.

- Kato, S., 1988. Oceanographic conditions associated with an intensive red tide bloom of *Prorocentrum micans* in Ise Bay. Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish., **54**: 1673–1679.
- Kim, C.H. and J.B. Shin, 1997. Harmful and toxic red tide algal development and toxins production in Korean coastal waters. Algae, **12**: 269–276.
- Kim, H.G., 1986a. Ecological study of dinoflagellate responsible for red tide. 1. The population growth and control of *Prorocentrum triestinum* Schiller. Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, **39**: 1–6.
- Kim, H.G., 1986b. Ecological study of dinoflagellate responsible for red tide. 2. The population growth of *Prorocentrum minimum* (Pav.) Schiller. Algae (The Kor. J. Phycol.), **1**: 103–106.
- Kim, H.G., J.S. Park and S.G. Lee, 1990. Coastal algal blooms caused by the cyst-forming dinoflagellates. Bull. Korean Fish. Soc., **23**: 468–474.
- Kim, H.G., S.G. Lee and K.H. An, 1996. Interannual changes in *Heterosigma akashiwo* blooms. Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, **52**: 1–14.
- Kondo, K., Y. Seike and Y. Date, 1990. Red tides in the brackish lake Nakanoumi. 2. Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. Bull. Plankton Soc. Jpn., **37**: 19–34.
- Labib, W., 2000. Dinoflagellate “Brown tides” in Alexandria, Egypt waters during 1997/1998. Pak. J. Mar. Sci., **9**: 33–49.
- Lassus, P., E. Abadie, Z. Amzil, C. Belin, M.A. Comps, P.P. Elziere, C. Le-Bec, C.L.B. Marcaillou, E. Nezan and R. Poggi, 1999. Contamination of Thau lagoon by *A. tamarensis*. The November/December 1988 episode. Plouzane-France Ifremer, 1999, 44 pp.
- Litaker, R.W., P.A. Tester, C.S. Duke, B.E. Kenney, J.L. Pinckney and J. Ramus, 2002a. Seasonal niche strategy of the bloom-forming dinoflagellate *Heterocapsa triquetra*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **232**: 45–62.
- Litaker, R.W., V.E. Warner, C. Rhyne, C.S. Duke, B.E. Kenney, J. Ramus and P.A. Tester, 2002b. Effect of diel and interday variations in light on the cell division pattern and in situ growth rates of the bloom-forming dinoflagellate *Heterocapsa triquetra*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **232**: 63–74.
- McLaughlin, J.J.A., 1979. Salinity influence on the ecology of phytoflagellate blooms in Lower New York Bay and adjacent waters. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., **37**: 213–223.
- Mori, S., Y. Nakamura, M. Watanabe and S. Yamochi, 1982. The effect of various environmental factors on the growth yield of red tide algae. II. *Olisthodiscus luteus*. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn., **30**: 71–86.
- Nishijima, T., Y. Hata, S. Yamaguchi, 1989. Physiological ecology of *Prorocentrum triestinum*. Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish., **55**: 2009–2014.
- Okaichi, T., 1980. Soluble organic substances in bottom mud of the Seto Inland Sea and their physiological effects on *Eutreptiella* sp. Umi To Sora, **56**: 93–105.
- Okaichi, T. and Y. Imatomi, 1979. Toxicity of *Prorocentrum minimum* var. *Mariae-Lebouriae* assumed to be a causative agent of short-necked clam poisonings. In. proceedings of 2nd International Conference on toxic dinoflagellate blooms., 385–388 pp.
- Olli, K., A.S. Heiskanen and J. Seppala, 1996. Development and fate of *Eutreptiella gymnastica* bloom in nutrient-enriched enclosures in the coastal Baltic Sea. J. Plankton Res., **18**: 1587–1604.
- Ono, K., S. Khan and Y. Onoue, 2000. Effects of temperature and light intensity on the growth and toxicity of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae). Aquacult. Res., **31**: 427–433.
- Robichaux, R.J., Q. Dortch and J.H. Wrenn, 1998. Occurrence of *Gymnodinium sanguineum* in Louisiana and Texas coastal waters, 1989–1994. NOAA Tech. Rep. NMFS, **143**: 19–26.
- Rodriguez-Villar, L. and O. Zarate-Huerta, 1985. Observations of red tides in San Jorge Bay, Antofagasta, Chile. Estud. Oceanol. Inst. Invest. Univ. Antofagasta, **4**: 81–85.
- Silva, E.S., 1985. Ecological factors related to *Prorocentrum minimum* bloom in obidos lagoon (Portugal). In. proceedings of 3rd International Conference on toxic dinoflagellate blooms, 251–256 pp.
- Sorokin, Y.I., P.Y. Sorokin and G. Ravagnan, 1996. On an extremely dense bloom of the dinoflagellate *Alexandrium tamarensis* in lagoon of the Po River Delta: impact on the environment. J. Sea Res., **35**: 251–255.
- Steidinger, K.A., D.A. Stockwell, E.W. Truby, W.J. Wardle, Q. Dortch and F.M. Van-dolah, 1998. Phytoplankton blooms off Louisiana and Texas, May-June 1994. NOAA Tech. Rep. NMFS, **143**: 13–18.
- Stein, J.R., 1973. Handbook of Phycological Methods. Cambridge University Press, London, 289–311 pp.
- Wang, Z., Q. Zhang and H. Lu, 2000. Effect of temperature, salinity, light and pH on the growth of red tide organisms *Prorocentrum micans*. Oceanol. Limnol. Sin., Haiyang Yu Huzhao., **32**: 15–18.
- Watanabe, M.M. and Y. Nakamura, 1984. Growth characteristics of a red tide flagellate, *Heterosigma akashiwo* HADA. I. The effect of temperature, salinity, light intensity and pH on growth. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn., **63**: 51–58.
- Watanabe, M.M., Y. Nakamura and S. Mori, 1982. Effects of physico-chemical factors and nutrients on the growth of *Heterosigma akashiwo* HADA from Osaka Bay, Japan. Jap. J. Phycol., **30**: 279–288.
- Weise, A.M., M. Levasseur, F.J. Saucier, S. Senneville, E. Bonneau, S. Roy, G. Sauve, S. Michaud and J. Fauchot, 2002. The link between precipitation, river runoff and blooms of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarensis* bloom in the St. Lawrence. Can. J. Fish. Aquat. Sci., **59**: 464–473.
- Wu, Y., C. Zhou, Y. Zhang, X. Pu and W. Li, 2000. Evolution and causes of formation of *Gymnodinium sanguineum* bloom in Yantai Sishili Bay. Oceanol. Limnol. Sin., Haiyang Yu Huzhao., **32**: 159–167.
- Yamaji, I., 1984. Illustration of the marine plankton of Japan, Hoikusha Pub. Co. Japan. 122 pp.
- Yamamoto, T., T. Hashimoto, K. Tarutani and Y. Kotani, 2002. Effects of winds, tides and river water runoff on the formation and disappearance of the *Alexandrium tamarensis* bloom in Hiroshima Bay, Japan. Harmful Algae, **1**: 301–312.
- Yamochi, S., 1984a. Effects of temperature on the growth of six species of red-tide flagellates occurring in Osaka Bay. Bull. Plankton Soc. Jpn., **31**: 15–22.
- Yamochi, S., 1984b. Nutrient factors involved in controlling the growth of red tide flagellates *Prorocentrum micans*, *Eutreptiella* sp. and *Chattonella marina* in Osaka Bay. Bull. Plankton Soc.

- Jpn., **31**: 97-106.
- Yamochi, S. and T. Abe, 1984. Mechanisms to initiate a *Heterosigma akashiwo* red in Osaka Bay. 2. Diel vertical migration. Mar. Biol., **83**: 255-261.
- Yan, T., M. Zhou and P. Qian, 2002. Growth of fish-killing red tide species raphidophyte *Heterosigma akashiwo*. Oceanol. Limnol. Sin. Haiyang Yu Huzhao, **33**: 209-214.
- Yang, J.S., H.Y. Choi, H.J. Jeong, J.Y. Jeong and J.K. Park, 2000. The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea: 1. Physical and chemical characteristics in 1997. J. Oceanol. Soc. Korea, **5**: 16-26.
- Yoshida, Y., S. Kojima and M. Sato, 1998. Relationship between the dominant occurrence of *Heterosigma akashiwo* and water quality or meteorological factors in the inner part of Tokyo Bay. Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish., **64**: 1013-1019.
- Zhu, M., R. Li, X. Mu and R. Ji, 1997. Harmful algal blooms in China Seas. Ocean. Res., **19**: 173-184.
- 국립수산과학원, 2003. 한국해양환경 조사연보 2002. 제7권. 193 pp.
- 김창훈, 신재범, 1997. 한국 연안의 유해·유독 적조조류의 발생과 독성생산. Algae (The Kor. J. Phycol.), **12**: 251-264.
- 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1998. 한국 연안의 적조. -최근 적조의 발생 원인과 대책-. 국립수산진흥원, 292 pp.
- 山本民次, 樽谷賢治, 松田 治, 2000. 有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense*의 플러 발생 메카니즘과의豫知および防御の可能性. 水産研究業書 **48**: 250-176.
- 신재범, 2002. 유독적조발생 예측을 위한 와편모조 *Alexandrium tamarense/catenella* 휴면포자의 분포 및 발아능 조사. 부경대학교 수산학석사 학위논문, 46 pp.
- 이종수, 신일식, 김영만, 장동석, 1997. '96년 거제에서 패류 중독 사고를 유발한 진주담치의 마비성 독소. 한국수산학회지, **30**: 158-160.
- 이창규, 김형철, 이삼근, 정창수, 김학균, 임월애. 2001. 남해안 연안에서 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 출현상황과 온도, 염분, 광도 및 영양염류에 따른 성장특성. 한국수산학회지, **34**: 691-696.
- 박주석, 김학균, 이삼근, 1988. 진해만의 적조현상과 원인생물의 천이. 수진연구보고, **41**: 1-26.

2004년 10월 5일 원고접수

2004년 12월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 정익교