

# 유독 와편모조류 *Alexandrium pacificum*의 생장과 마비성 패독 생산에 미치는 수온과 염분의 영향

Li PeiJin\* · 오석진\*\* · 김석윤\*\*†

\* 부경대학교 지구환경시스템과학부 해양학전공 석사과정, \*\* 부경대학교 지구환경시스템과학부 해양학전공 교수

## Effects of Temperature and Salinity on the Growth and Paralytic Shellfish Toxin (PST) Production by Toxic Dinoflagellate *Alexandrium pacificum*

PeiJin Li\* · Seok Jin Oh\*\* · Seok-Yun Kim\*\*†

\* Master's course, Major of Oceanography, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University

\*\* Professor, Major of Oceanography, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University

**요 약** : 배양실험을 바탕으로 다양한 수온과 염분 조건에서 유독 와편모조류 *Alexandrium pacificum* (LIMS-PS-2611)의 성장속도와 마비성 패독(PST)의 변화를 조사하였다. *A. pacificum*는 수온 25℃, 염분 30 psu 조건에서 최대성장속도를 보였으며, 최대성장속도의 70% 이상은 수온 20~25℃, 염분 25~35 psu 구간에서 나타났다. *A. pacificum* 체내의 PST 주요성분은 N-sulfocarbamoyl계의 C1+2와 GTX5이었으며, 미량성분은 carbamate계의 neoSTX이었다. 수온과 염분에 따른 독함량의 변화를 보면, *A. pacificum*는 수온 20℃, 염분 30 psu의 조건에서는 비교적 낮은 독 함량을 보였다. 염분의 증가에 따라 독 함량이 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 최대성장속도를 보였던 수온과 염분 조건에서는 낮은 독 함량을 보였다. 따라서 6월 수온이 20-25℃ 범위일 때 발생하는 이매패류 독화현상은 *A. pacificum*에 의한 영향일 가능성이 있다.

**핵심용어** : *Alexandrium pacificum*, 성장속도, 마비성 패독, 수온, 염분

**Abstract** : Growth rate and production of the paralytic shellfish poisoning toxin (PST) of a toxic dinoflagellate *Alexandrium pacificum* (LIMS-PS-2611) isolated from the southern sea of Korea, were examined under various temperatures and salinity conditions. The maximum growth rate (0.28 day<sup>-1</sup>) was observed under 25℃ and 30 psu. Optimal growth (≥ 70% of maximum growth rate) was obtained between 20~25℃ and 25~35 psu. Among the PSTs of *A. pacificum*, the principal toxins were C1+2 and GTX5 in N-sulfocarbamoyl toxin group, and minor components were characterized as neoSTXs in the carbamate toxin group. Maximum toxin content was observed under 20℃ and 30 psu, and the toxin content increased with the increase of salinity. Low toxin contents were measured under the temperature and salinity conditions of the maximum growth rate. Therefore, the PSP of bivalve, which occurs at a temperature range of 20-25℃ in June, might have been derived from *A. pacificum*.

**Key Words** : *Alexandrium pacificum*, Growth rate, Paralytic shellfish toxin, Temperature, Salinity

### 1. 서론

와편모조류는 해양 생태계에서 중요한 일차 생산자 중 하나이지만 유해조류대발생(Harmful Algal Blooms; HABs)의 원인이 되기도 하며(Sunda et al., 2006), 일부 중독 독을 합성하는 능력을 바탕으로 다른 생물들을 독화시키기도 한다(Oikawa et al., 2004; Sekiguchi et al., 2001). 특히 유독 와편모조류

*Alexandrium pacificum*(과거에는 *A. catenella*로 명명)은 체내에 saxitoxin(STX)을 기본으로 하는 마비성 패독(paralytic shellfish toxin; PST)을 합성하는 것으로 알려져 있다(Anderson et al., 2012). 더욱이 이매패류가 유독 식물플랑크톤을 여과 섭식하면 생체전환에 따라 강독으로 전환되어 축적된다(Taylor et al., 1995; Tanabe and Sako, 2006). 여러 연구보고에 따르면 지구온난화와 산업발달에 따른 선박평형수 이동 등으로 유독 와편모조류의 출현 범위가 확대되고 있으며(Hallegraeff, 2010), 전 세계적으로 PST 문제는 수산양식과 공중위생 측면

\* First Author : fanchen-69@naver.com, 051-629-6576

† Corresponding Author : yunk0411@gmail.com, 051-629-6574

에서 심각한 문제를 발생시키고 있다(Hallegraeff, 1993).

한국에서의 대표적인 PST 원인종은 *A. catenella*(과거에는 *A. tamarense*로 명명), *A. pacificum* 그리고 *Gymnodinium catenatum*이며(Shin et al., 2017), 춘계에는 *A. catenella*를 중심으로 이매패류를 독화시키는 것으로 보고되어 있다(Mok et al., 2013). 더욱이 매년 규제 제한치(80 µg STX eq 100 g<sup>-1</sup> of shellfish) 초과에 따라 이매패류 출하 금지가 되는 등 사회·경제적으로 큰 피해를 발생시키고 있다. 또한 연근해 표층 수온의 상승에 따라 PST의 문제는 광역화 및 조기화하고 있으며, 비교적 높은 수온에서 잘 성장하는 *A. pacificum*의 우점화가 우려되고 있다(Oh et al., 2012). 특히, PST 발생시기가 과거에는 춘계에 국한되었던 것이 점차 하계 초기까지 장기화되고 있는 추세로(Kim et al., 2002; Oh et al., 2012), 올해(2022년)의 경우, 6월에도 부산 기장군 인근 연안에서 PST 기준치 초과가 보고되었으며, 그 후에도 한국 남동해 연안에서 지속적으로 검출된 바 있다(NIFS, 2022).

PST는 수온, 염분, 영양염 및 조도 등 물리·화학적 환경요소에 따라 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 알려져 있으며(Anderson et al., 1990; Hamasaki et al., 2001), 일부 환경요소는 독함량 및 생산에 직접적인 영향을 주지만, 성장속도 등의 변화에 따라 달라지는 간접적인 영향도 있다(Laabir et al., 2013). 수온은 생장에 있어 효소활성에 관여하기 때문에 수온이 상승하면 세포활성도 증가하며, 성장속도도 증가한다고 알려져 있다(Goldman and Carpenter, 1974). 반면에 낮은 수온에서는 세포분열속도 및 단백질 합성의 저하로 인하여 독함량이 증가하는 것으로 알려져 있다(Anderson et al., 1990). *Alexandrium*속의 대발생은 하구역 및 육수 유입의 영향을 받는 연안역에서 자주 발생하며(Larocque and Cembella, 1990; Franks and Anderson, 1992), 일부 배양실험을 통하여 광염성 종으로 알려져 있다(Franks and Anderson, 1992). PST 함량과 염분 사이의 관계에 대해서는 Hamasaki et al.(2001)이 세포 체내 PST 함량이 염분과 성장 속도에 반비례한다고 보고하였으며, Parkhill and Cembella(1999)는 염분이 직접적으로 PST 변화에 영향을 주지 않고, 염분변화에 따른 성장률의 변화가 PST의 변화에 영향을 미친다고도 보고하였다. 또한 Laabir et al.(2013)는 염분의 변화에 따른 PST 함량의 변화는 크지 않는 것으로 보고하는 등 연구자들에 따라 서로 다른 결과를 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 춘계 및 하계에 PST 문제를 발생시킬 가능성이 있는 *A. pacificum*의 성장속도와 PST의 함량 및 성분 변화에 미치는 수온과 염분의 영향을 규명하였으며, 이를 통해 *A. pacificum*의 독화 예보에 필요한 기초 정보를 제공하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 *Alexandrium pacificum* 배양

본 실험에서 사용된 *A. pacificum* (LIMS-PS-2611)은 한국해양과학기술원 해양시료도서관에서 분양받았으며, 기장 인근 해역의 해수를 바탕으로 만든 f/2 배지(Guillard and Ryther, 1962)에서 수온 20°C, 염분 30 psu, 광량 150 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (12L:12D; cool-white fluorescent lamp)로 계대 배양을 수행하였다. 분리주에 대한 무균화 처리를 하지 않았지만, 생물적인 오염을 막기 위해서 모든 실험기구는 고온고압 멸균(120°C, 200 kpa, 20 min) 및 건조멸균(90°C, 4 hr)시켜 이용하였다. 그리고 *A. pacificum* 배양에 대한 전처리 등 모든 실험은 무균 작업대(clean bench)에서 진행하였다.

### 2.2 수온과 염분 조합에서 *Alexandrium pacificum*의 성장속도 변화

*A. pacificum*의 수온과 염분의 단계별 배양조건으로 수온은 10, 15, 20, 25, 30°C의 5단계, 염분은 15, 20, 25, 30, 35 psu의 5단계로 총 25개 조합의 조건을 설정하였다. 광량은 계대 배양조건과 유사하게 150 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(12L:12D; cool-white fluorescent lamp)로 조절하였다. 본 실험에 들어가기에 앞서 수온과 염분 조건에 대한 적응을 위한 전배양을 수행하였다. 즉, 계대배양조건인 수온 20°C와 염분 30 psu에서 대수생장기까지 성장시킨 후, 수온은 20°C에서 하루에 1°C씩 온도를 증가 또는 감소시켜 각각의 온도에 도달하였다. 염분은 단계적으로 30 psu 배지의 세포가 대수생장기에 도달하였을 때, 25 psu에 접종하였으며, 다시 대수생장기에 있는 세포를 20 psu에 접종하여 염분 변화에 따른 영양을 최소화하였다. 최종적으로 각 수온과 염분의 염분 단계에서 대수생장기 후 기까지 성장시킨 후, 본 실험을 수행하였다. 고염분인 35 psu의 배지는 자연 증발시켜 준비하였으며, 저염분인 15~30 psu의 배지는 초순수이온수를 첨가하여 조절하였다.

각각의 수온과 염분 단계에 적응된 세포는 150 ml의 f/2배지에 최종 세포밀도 약 150~200 cells ml<sup>-1</sup>가 되도록 접종하였다. 그 후, 세포의 계수는 하루에 한 번씩 동 시간대(오전 10:00)에 1 ml씩 분취하여 광학 현미경을 통해 직접 검경하였다. 모든 실험은 2 반복(duplicate)을 기본으로 실시하였고, 성장속도(growth rate; µ)는 대수생장기(exponential growth phase) 기간의 세포밀도를 이용하여 다음 식(1)로 계산하였다.

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

µ: 성장속도(growth rate; day<sup>-1</sup>)

$N_0$ ,  $N_t$ : 대수성장기 초기와  $t$ 시간 후의 세포밀도(cells ml<sup>-1</sup>)  
 $\Delta t$ : 대수성장기의 배양기간(day)

### 2.3 수온과 염분 조합에서 *Alexandrium pacificum*의 PST 변화

PST를 분석하기 위한 시료의 전처리는 각각 수온과 염분 구배에서 대수성장기 후기까지 성장한 100 ml의 배지에 들어 있는 세포를 원심분리(3,000×g, 10 min)하였으며, 상등액을 제거하고 잔존한 pellet과 동량의 0.5 N acetic acid를 첨가하였다. 시료는 -20℃의 냉동고에서 24시간 보관한 후, 초음파와 파쇄기(POWERSONIC 420, Hwashin tech Co., Kwangju)를 사용하여 파쇄하고, 원심분리(10,000×g, 10 min)하여 상등액을 분취하였다. 분취한 상등액을 한외여과기(Ultrafree-MC; MWCO 10,000Da, Millipore, Massachusetts)에 넣어 원심분리(10,000×g, 10 min)하였고, 여액은 분석 전까지 -20℃에 보관하였다.

PST의 분석은 역상계 컬럼(Hypersil GOLD C8 column; 250 mm × 4.6 mm; Thermo Scientific, Massachusetts)으로 분리한 후, post-column 방법에 의한 High Performance Liquid Chromatography (HPLC)로 분석하였다(Oshima, 1995). 분석 과정에서 이용하는 표준독소는 N-sulfocarbamoyl toxin 1과 2(C1과 2), gonyautoxin 1과 4(GTX 1과 4), gonyautoxin 2와 3(GTX 2와 3), gonyautoxin 5(GTX5), neosaxitoxin (neoSTX), saxitoxin(STX), decarbamoylsaxitoxin (dcSTX)이었다(Marine Biosciences at the National Research Council, Halifax, NS, Canada). 독함량(toxin contents)은 분석된 시료와 표준독소의 상대 면적비로부터 계산하였고 fmole cell<sup>-1</sup>로 표시하였다. 독성(toxicity)은 독성등가치수(Toxicity Equivalency Factors)를 사용하여 분석된 시료의 독함량과 각 이성질체의 고유한 값으로부터 계산하였다(단위: pg STXeq cell<sup>-1</sup>; Oshima, 1995).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수온과 염분 조합에서 *Alexandrium pacificum*의 성장속도 변화

*A. pacificum* 성장속도에 대한 수온과 염분의 영향은 수온 10℃의 전 염분단계와 30℃의 15와 20 psu에서 성장하지 않았다(Fig. 1). 세포밀도는 고수온 20℃와 25℃에서 대체적으로 높았으며, 수온 15℃로 감소하면, 세포밀도가 감소하였다(Fig. 1). 수온과 염분에 대한 성장속도의 contour plotting으로 표현한 결과(Fig. 2), 최대성장속도는 수온 25℃, 염분 30 psu에서 0.38 day<sup>-1</sup>이었으며, 최대성장속도의 70%는 수온 20~30℃, 염분 25~35 psu 구간에서 보였다(Fig. 2). 따라서 *A. pacificum*는 수온의 감소와 함께 성장속도가 급격히 감소하나, 염분은 성장에 큰 영향이 없는 것으로 판단되어, *A.*

*pacificum*는 수온에 대해서는 비교적 협온성, 염분에 대해서는 광염성의 생리적인 특성이 있는 것으로 보였다. Table 1은 *A. pacificum*과 춘계에 PST 문제를 발생시키는 *A. catenella* 분리주에 따른 최적 수온 및 염분에 대한 성장속도를 나타내었다. 대부분 *A. pacificum*의 성장속도는 분리주에 따라 다소 차이를 보였지만, 최적 수온과 염분 조건은 유사하였다. 또한 *A. pacificum*는 홍콩의 분리주를 제외한다면, *A. catenella*보다 비교적 높은 수온에서 잘 성장하였다. Oh et al.(2012)는 실내실험에서 도출한 결과를 이용하여 비교적 저수온기인 4월과 5월의 경우 *A. catenella*가, 6월은 *A. catenella*와 *A. pacificum*의 혼합, 7월은 *A. pacificum*이 우점 할 가능성이 높다고 보고하였다. Kremp et al.(2012)은 *Alexandrium*가 기후 변화에 대응할 수 있는 충분한 적응성을 가지고 있다고 보고하였기 때문에, 비교적 높은 수온역에서 적응이 되어 있는 *A. pacificum*은 한반도 주변해역의 수온상승에 따라, 출현시기가 조기화 및 장기화 될 가능성이 높을 것으로 판단된다.

### 3.2 수온과 염분 조합에서 *Alexandrium pacificum*의 독함량과 독성 변화

*A. pacificum*의 독함량(Toxin content)과 독성(Toxicity)은 15℃~25℃의 배양 조건에서 염분의 증가와 함께 증가하는 것으로 나타났으며, 30℃의 수온 조건에서는 각 염분별로 독함량과 독성에 대한 변화가 크지 않았다. 가장 높은 독함량(24.0 fmol cell<sup>-1</sup>)과 독성(2.96 pg STXeq cell<sup>-1</sup>)은 수온 20℃와 염분 약 30 psu의 조건에서 보였으며(Fig. 3), 최대성장속도를 보였던 수온 25℃, 염분 30 psu에서 다른 조건보다 낮은 독함량과 독성을 나타내었다(Fig. 3). 타 해역에서 분리된 *A. pacificum* 종주에서도 20℃ 수온 조건에서 제일 높은 독함량과 독성을 보여, 본 연구결과와 일치하였다(Table 2).

염분은 세포의 삼투압과 밀접한 연관이 있으며, 염분에 대한 종의 내성 범위가 다르기 때문에 성장속도 차이에 따라 PST 생산에 영향을 주게 된다(Laabir et al., 2013). Lim and Ogata(2005)는 성장속도와 독함량의 관계를 바탕으로 3 그룹, 즉 (1) 비교적 낮은 염분에 잘 적응한 광염성 종, (2) 비교적 높은 염분에 잘 적응한 광염성 종 그리고 (3)협염성 종으로 구분하였다. *A. pacificum*은 "(2)"에 해당하는 종으로 비교적 높은 염분에서 높은 성장속도를 보였으며, 독함량 및 독성은 염분의 변화에 영향을 받았다. 하지만, *Alexandrium* 종에 대한 염분과 독의 관계는 종에 따라 달라지는 특성을 보이며, 같은 종일지라도 분리해역에 따라 특성이 달라지기 때문에(Laabir et al., 2013), 향후 복수의 종주에 대한 환경변화와 이에 따라 달라지는 독함량 변화의 검토가 필수적일 것으로 생각된다.

유독 외편모조류 *Alexandrium pacificum*의 성장과 마비성 패독 생산에 미치는 수온과 염분의 영향

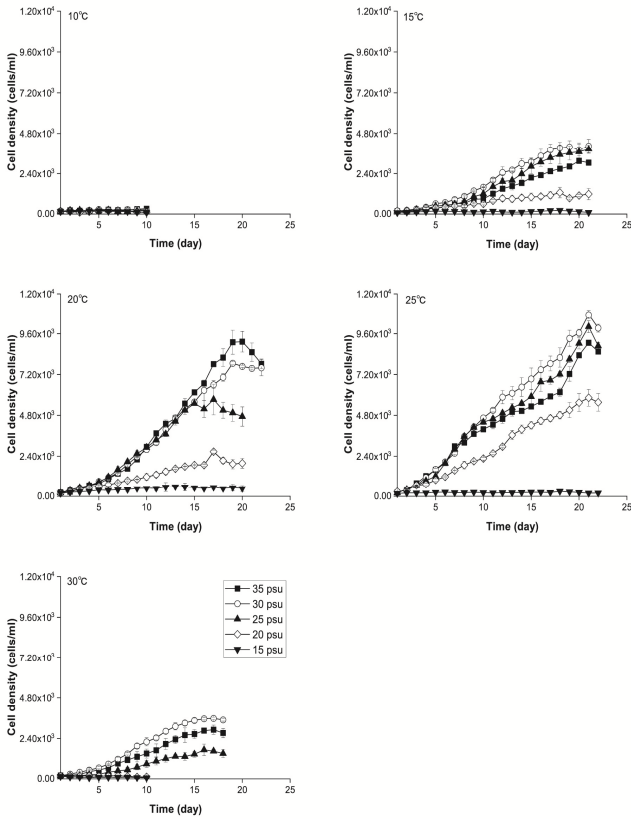


Fig. 1. Growth curves of *Alexandrium pacificum* grown at various water temperature and salinity conditions.

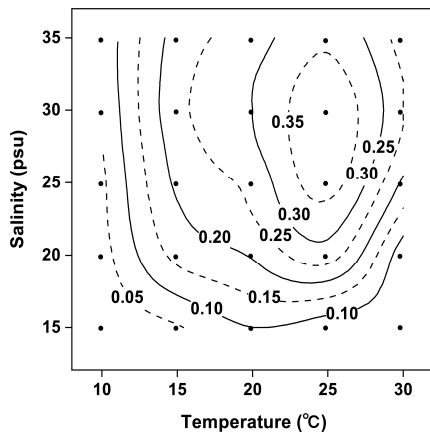


Fig. 2. Contour plotting of exponential phase growth of *Alexandrium pacificum* at various water temperature and salinity conditions.

### 3.3 수온과 염분 조합에서 *Alexandrium pacificum*의 독조성 변화

*A. pacificum* 체내의 PST 주요성분은 N-sulfocarbamoyl group의 C1+2와 GTX5이였으며, 미량성분은 carbamate group의 neoSTX이였다(Fig. 4). 분리주에 따른 독조성의 비율을 비교하면(Table 3), 중국과 일본해역에서 분리된 *A. catenella*는 체내 C1+2와 GTX5가 약 90%를 차지하였으며, 비교적으로 강독 GTX1+4이 약 10% 차지하였다. 다른 분리주를 보면 독조성은 C1+2, C3+C4 그리고 GTX5는 70%를 차지하였으며, GTX4와 neoSTX은 약 30%로 약독이 대부분을 차지하였다.

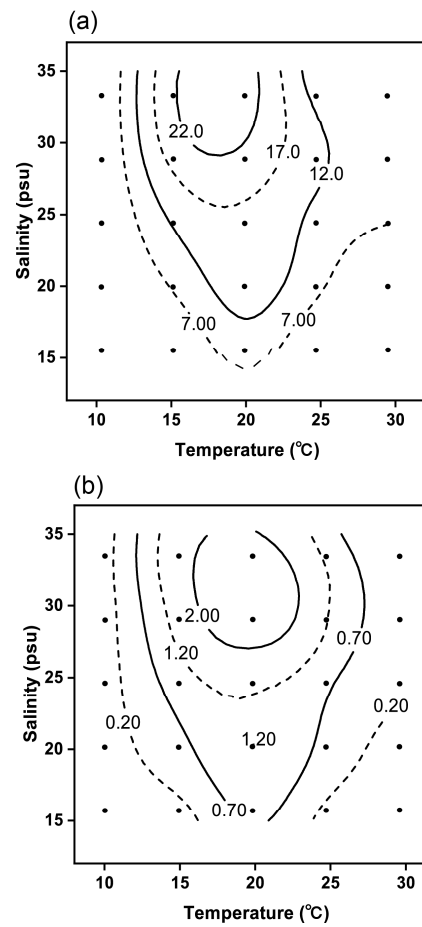


Fig. 3. Contour plotting of (a) toxin contents ( $\text{fmol cell}^{-1}$ ) and (b) toxicities ( $\text{pg STX cell}^{-1}$ ) of *Alexandrium pacificum* growth at various water temperature and salinity conditions.

Table 1. Comparison of optimal temperature and salinity for growth rates of the various *Alexandrium pacificum* and *A. catenella* strains

Species	Isolated area	Growth rate (day <sup>-1</sup> )	Temperature (°C)	Salinity (psu)	References
<i>A. pacificum</i>	Geoje, Korea	0.38	25	30	This study
	Masan, Korea	0.36	25	30	Oh et al. (2012)
	Hong Kong	0.28	20-25	30-35	Siu et al. (1997)
	Japan	0.51	20-25	25-35	Matsuda et al. (2006)
<i>A. catenella</i>	Hong kong	0.60	23	25-30	Wang and Hsieh (2005)
	Japan	0.42	17	29	Hamasaki et al. (2001)
	Masan, Korea	0.31	15	30	Oh et al. (2012)
	Argentina	0.30	14	30-35	Fulco and Gaysos (2004)

Table 2. Comparison of toxin contents and toxicities of the various *Alexandrium pacificum* strains

Species	Isolated area	Temperature (°C)	Salinity (psu)	Toxin contents (fmol cell <sup>-1</sup> )	Toxicity (pg STXeq cell <sup>-1</sup> )	References
<i>A. pacificum</i>	Korea	20	30	21.89	2.96	This study
	Japan	20	-	33.5	2.1	Yoshida et al. (2001)
		20	-	23.5	4.1	Yoshida et al. (2001)
	Annaba	20	-	-	3.8	Hadjadji et al. (2020)
	French	17	33	31.33	13.9	Caruana et al. (2020)

Table 3. Average toxin profile (%) of various *Alexandrium pacificum* strains

Species	Isolated area	C1+2	C3+4	GTX1+4	GTX2+3	GTX5	neoSTX	STX	References
<i>A. pacificum</i>	Korea	44.4	-	-	-	48.8	6.8	-	This study
	China	80-90		5-15			-	-	Xu et al. (2012)
	Japan	72	3.9	5.2	0.5	18.4	-	-	Yoshida et al. (2001)
		45.9	19	28.6	-	-	6.5	-	Yoshida et al. (2001)

수온과 염분변화에 따른 독조성을 보면(Fig. 4), 20°C의 수온 조건에서는 염분이 증가할수록 C1+2 비율이 감소하였으며, GTX5의 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 15°C, 25°C 그리고 30°C에서는 C1+2와 GTX5의 비율이 염분의 증가와 관계없이 일정하였다. 다만, 20°C와 25°C의 배양 조건에서 30 psu와 35 psu의 염분 범위에서 neoSTX이 미량성분으로 측정되었다(Fig. 4).

Anderson(1990)와 Oshima et al.(1993)는 PST의 생산은 유전과 관련이 있으므로 독성은 환경변화에 따라 달라질 수 없기 때문에, 독조성은 종 특이성(species-specific)을 가지며 생화학적 마커(biochemical markers)로 사용 가능하다고 하였다(Ogata et al., 1987; Maranda et al., 1985; Cembella et al., 1987;

Boyer et al., 1987; Boczar et al., 1988; Anderson, 1990; Ishida et al., 1993; Taroncher-Oldenburg et al., 1997). 하지만 많은 선행 연구에서 환경변화에 따라 독조성의 변화를 제시하였는데, neoSTX과 STX의 비율은 정상기(stationary phase)에서 증가하며(Boczar et al., 1988), 질소가 충분한 조건하에서 STX의 비율이 증가하였다(MacIntyre et al., 1997). 인 제한된 조건에서는 *Alexandrium fundyense*가 GTX2+3과 C1+2의 함량이 높아졌다(Taroncher Oldenburg et al., 1999). 또한 염분의 변화는 저염분 환경에서 *A. minutum* 세포에서 GTX 1의 함량이 높았지만, 고염분 환경에서는 GTX2+3의 함량이 높았다(Hwang and Lu, 2000). 따라서 독조성을 이용하여 군집동태(population dynamic)의 해석은 불가능할 것으로 생각된다.

유독 와편모조류 *Alexandrium pacificum*의 성장과 마비성 패독 생산에 미치는 수온과 염분의 영향

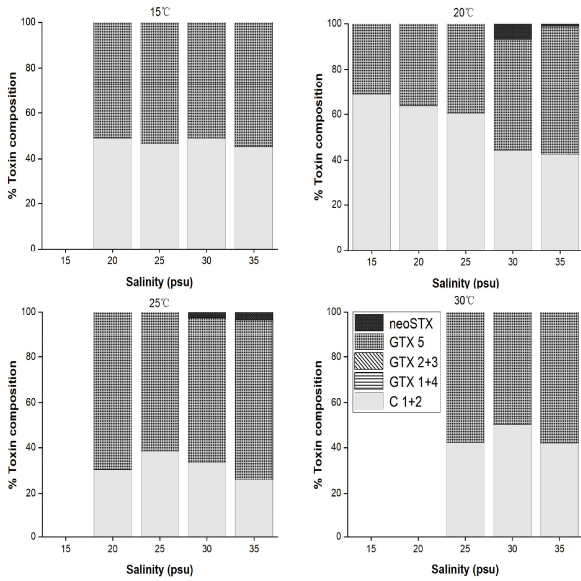


Fig. 4. Changes in toxin profile of *Alexandrium pacificum* grown at different water temperatures and salinities.

일반적으로 PST 성분 중 불안정한 약독인 N-sulfocarbamoyl 을 가지는 유독 와편모조류를 이매패류가 섭이하게 되면, 생체전환이 발생하여 독성이 강독인 carbamate로 전환된다. 즉, 유독 와편모조류가 존재하여 해수 중에 독성이 낮게 측정되더라도, 이매패류는 강한 독성을 나타내게 될 가능성이 있다(Shon et al., 2009). 따라서 어업민의 생산 및 소득향상을 위한 PST의 예측·예보를 위해서는 유독 와편모조류 및 섭식한 이매패류의 독조성 간의 관계를 밝히는 것이 중요한 과제 중 하나일 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 *A. pacificum*의 성장과 PST 생산에 미치는 수온과 염분의 영향을 연구하였다. *A. pacificum*는 고수온 환경에서 성장속도가 높았고 광염성의 생리적인 특성을 보였다. 또한 최대성장속도를 보였던 수온과 염분에서 낮은 독함량과 독성을 보였지만, 20°C의 높은 염분에서 높은 독함량과 독성을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 최근 6월입에도 불구하고, 부산 인근 연안에서 PST 기준치 초과 및 남동해 연안 일대에서 독화 문제는 춘계에서 PST를 발생시키는 원인종 *A. catenella*가 아닌, *A. pacificum*에 의한 것일 가능성을 제시할 수 있다. 더욱이 지구온난화로 인한 한반도 인근 해역의 수온 증가는 *A. catenella* 및 *A. pacificum*의 조기 출현에 따라 PST 문제가 장기화될 가능성도 있다. 따라서 신뢰가 높은 PST 독화 예보를 위해서는 분리주 별 *A. pacificum*

의 독조성의 다양성, 물리·화학적 환경요인에 따른 PST의 변화 그리고 *A. pacificum*의 섭이에 따라 달라지는 이매패류의 독성 및 조성 등의 이해가 반드시 필요할 것으로 생각된다.

#### 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었다.

#### References

- [1] Anderson, D. M., D. M. Kulis, J. J. Sullivan, S. Hall, and C. Lee(1990), Dynamics and physiology of saxitoxin production by the dinoflagellates *Alexandrium* spp, Marine Biology, Vol. 104, pp. 511-524.
- [2] Anderson, D. M.(1990), Toxin variability in *Alexandrium* species. In: Graneli, E., B. Sundstrom, L. Edler, and D. M. Anderson (Eds.), Toxic Marine Phytoplankton, Elsevier, Amsterdam, pp. 41-51.
- [3] Anderson, D. M., T. J. Alpermann, A. D. Cembella, Y. Collos, E. Masseret, and M. Montreson(2012), The globally distributed genus *Alexandrium*: Multifaceted roles in marine ecosystems and impacts on human health, Harmful Algae, Vol. 14, pp. 10-35
- [4] Boczar, B. A., M. K. Beitler, J. Liston, J. Sullivan, and R. A. Cattolico(1988), Paralytic shellfish toxins in *Protogonyaulax tamarensis* and *Protogonyaulax catenella* in axenic culture, Plant Physiology, Vol. 88, No. 4, pp. 1285-1290.
- [5] Boyer, G. L., J. J. Sullivan, R. J. Andersen, P. J. Harrison, and F. J. R. Taylor(1987), Effects of nutrient limitation on toxin production and composition in the marine dinoflagellate *Protogonyaulax tamarensis*, Marine Biology, Vol. 96, pp. 123-128.
- [6] Caruana, A. M. N., M. Le Gac, F. Hervé, G.-A. Rovillon, S. Geffroy, F. Malo, E. Abadie, and Z. Amzil(2020), *Alexandrium pacificum* and *Alexandrium minutum*: harmful or environmentally friendly?, Marine Environmental Research, Vol. 160, pp. 105014.
- [7] Cembella, A. D., J. J. Sullivan, G. L. Boyer, F. J. R. Taylor, and R. J. Anderson(1987), Variation in paralytic shellfish toxin composition within the *Protogonyaulax tamarensis/catenella* species complex: red tide dinoflagellates, Biochemical Systematics and Ecology, Vol. 15, No. 2, pp. 171-186.
- [8] Franks, P. J. S. and D. M. Anderson(1992), Alongshore

- transport of a toxic phytoplankton bloom in a buoyancy current: *Alexandrium tamarensis* in the Gulf of Maine, Marine Biology, Vol. 112, pp. 153-164.
- [9] Fulco, V. K. and A. M. Gayoso(2004), Effects of light, temperature and salinity on the growth rate of *Alexandrium tamarensis* from Patagonia (Argentina). In Steidinger, K. A., J. H. Landsberg, C. R. Tomas and G. A. Vargo (Eds), Harmful Algae 2002, Florida Fish and Wildlife Conservation Commission, Florida Institute of Oceanography, and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Florida, pp. 391-392.
- [10] Goldman, J. C. and E. J. Carpenter(1974), A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth, Limnology and Oceanography, Vol. 19, No. 5, pp. 756-766.
- [11] Guillard, R. R. L. and J. H. Ryther(1962), Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella* *Hustedt* and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran, Canadian Journal of Microbiology, Vol. 8, No. 2, pp. 229-239.
- [12] Hadjadji, I., M. Laabir, H. Frihi, Y. Collos, Z. J. Shao, P. Berrebi, E. Abadie, Z. Amzil, N. Chomérat, J. L. Rolland, F. Rieuvilleneuve, and E. Masseret(2020), Unsuspected intraspecific variability in the toxin production, growth and morphology of the dinoflagellate *Alexandrium pacificum* R. W. Litaker (Group IV) blooming in a South Western Mediterranean marine ecosystem, Annaba Bay (Algeria), Toxicon, Vol. 180, pp. 79-88.
- [13] Hallegraeff, G. M.(1993), A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. Phycologia, Vol. 32(2), pp. 79-99.
- [14] 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.
- [15] Hamasaki, K., M. Horie, S. Tokimistu, T. Toda, and S. Taguchi(2001), Variability in toxicity of the dinoflagellate *Alexandrium tamarensis* isolated from Hiroshima Bay, western Japan, as a reflection of changing environmental conditions, Journal of Plankton Research, Vol. 23, No. 3, pp. 271-278.
- [16] Hwang, D. F. and Y. H. Lu(2000), Influence of environmental and nutritional factors on growth, toxicity, and toxin profile of dinoflagellate *Alexandrium minutum*, Toxicon, Vol. 38, No. 11, pp. 1491-1503.
- [17] Ishida, Y., C. -H. Kim, Y. Sako, N. Hirooka, and A. Uchida(1993), PSP toxin production is chromosome dependent in *Alexandrium* spp. In: Smayda, T. J. and Y. Shimizu (Eds.), Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, Elsevier, Netherlands, pp. 881-887.
- [18] Kim, K. Y., M. Yoshida, Y. Fukuyo, and C. H. Kim(2002), Morphological Observation of *Alexandrium tamarensis* (Lebour) Balech, *A. catenella* (Whedon et Kofoid) Balech and one related morphotype (Dinophyceae) in Korea, Algae, Vol. 17, No. 1, pp. 11-19.
- [19] Kremp, A., A. Godhe, J. Egardt, S. Dupont, S. Suikkanen, S. Casabianca, and A. Penna(2012), Intraspecific variability in the response of bloom-forming marine microalgae to changed climate conditions, Ecology and Evolution, Vol. 2, No. 6, pp. 1195-1207.
- [20] Laabir, M., Y. Collos, E. Masseret, V. Savart, M. Sibat, and Z. Amzil(2013), Influence of environmental factors on the paralytic shellfish toxin content and profile of *Alexandrium catenella* (Dinophyceae) isolated from the Mediterranean Sea, Marine Drugs, Vol. 11, No. 5, pp. 1583-1601.
- [21] Larocque, R. and A. D. Cembella(1990), Ecological parameters associated with the seasonal occurrence of *Alexandrium* spp. and consequent shellfish toxicity in the lower St. Lawrence estuary (Eastern Canada). In Graneli, E., B. Sundstrom, L. Edler, and D. M. Anderson (Eds.), Toxic Marine Phytoplankton, Elsevier, Amsterdam, pp. 368-373.
- [22] Lim, P. -T. and T. Ogata(2005), Salinity effect on growth and toxin production of four tropical *Alexandrium* species (Dinophyceae), Vol. 45, No. 6, pp. 699-710.
- [23] MacIntyre, J. G., J. J. Cullen, and A. D. Cembella(1997), Vertical migration, nutrition and toxicity in the dinoflagellate *Alexandrium tamarensis*, Marine Ecology and Progress Series, Vol. 148, pp. 201-216.
- [24] Maranda, L., D. M. Anderson, and Y. Shimizu(1985), Comparison of toxicity between populations of *Gonyaulax tamarensis* of eastern North American waters, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 21, No. 3, pp. 401-410.
- [25] Matsuda, A., T. Nishijima, K. Fukami, and M. Adachi(2006), Growth kinetics and paralytic shellfish poisoning toxin production in phosphorus limited cultures of *Alexandrium catenella*, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 72, No. 2, pp. 193-200.
- [26] Mok, J. -S., K. -C. Song, K. -J. Lee, and J. -H. Kim(2013), Variation and profile of paralytic shellfish poisoning toxins in Jinhae Bay, Korea, Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 16, No. 3, pp. 137-142.
- [27] NIFS(2022), <https://www.nifs.go.kr/bbs?id=shellfish>
- [28] Ogata, T., T. Ishimaru, and M. Kodama(1987), Effect of water

- temperature and light intensity on growth rate and toxicity change in *Protogonyaulax tamarensis*, Marine Biology, Vol. 95, pp. 217-220.
- [29] 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. 133-141.
- [30] Oikawa H., T. Fujita, K. Satio, S. Watabe, M. Satomi, and Y. Yano(2004), Comparison of paralytic shellfish poisoning toxin between carnivorous crabs (*Telmessus acutidens* and *Charybdis japonica*) and their prey mussel (*Mytilus galloprovincialis*) in an inshore food chain, Toxicon, Vol. 43, No. 6, pp. 713-719.
- [31] Oshima, Y.(1995), Post-column derivatization HPLC methods of paralytic shellfish poisons, In; Manual on harmful marine microalgae, Hallegraef, G. M., D. M. Anderson and A. D. Cembella(eds), UNESCO, Paris, pp. 81-94.
- [32] Oshima, Y., S. I. Blackburn, and G. M. Hallegraef(1993), Comparative study on paralytic shellfish toxin profiles of the dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* from three different countries, Marine Biology, Vol. 116, pp. 471-476.
- [33] Parkhill, J. P. and A. D. Cembella(1999), Effects of salinity, light and inorganic nitrogen on growth and toxigenicity of the marine dinoflagellate *Alexandrium tamarensis* from northeastern Canada, Journal of Plankton Research, Vol. 21 No. 5, pp. 939-955.
- [34] Sekiguchi, K., S. Sato, S. Kaga, T. Ogata, and M. Kodama (2001), Accumulation of paralytic shellfish poisoning toxins in bivalves and an ascidian fed on *Alexandrium tamarensis* cells, Fisheries Science, Vol. 67, No. 2, pp. 301-305.
- [35] Shin, H. H., Z. Li, E. S. Kim, J-W. Park, and W. A. Lim(2017), Which species, *Alexandrium catenella* (Group I) or *A. pacificum* (Group IV), is really responsible for past paralytic shellfish poisoning outbreaks in Jinhae-Masan Bay, Korea?, Harmful Algae, Vol. 68, pp. 31-39.
- [36] Shon, M. B., Y. S. Kim, and C. H. Kim(2009), Paralytic shellfish poisoning of *Mediterranean mussels* from Jinhae Bay in Korea, Korean Journal Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 42, No. 4, pp. 366-372.
- [37] Siu, G. K. Y., M. L. C. Young, and D. K. O. Chan(1997), Environmental and nutritional factors which regulate population dynamics and toxin production in the dinoflagellate *Alexandrium catenella*, Hydrobiologia, Vol. 352, pp. 117-140.
- [38] Sunda, W. G., E. Graneli, and C. J. Gobler(2006), Positive feedback and the development and persistence of ecosystem disruptive algal blooms, Journal of Phycology, Vol. 42, No. 5, pp. 963-974.
- [39] Tanabe, S. H. and Y. Sako(2006), Genetic differentiation in the marine dinoflagellates *Alexandrium tamarensis* and *Alexandrium catenella* based on DNA-DNA hybridization, Plankton and Benthos Research, Vol. 1 (3), pp. 138-146.
- [40] Taroncher-Oldenburg, G., D. M. Kulis, and D. M. Anderson (1997), Toxin variability during the cell cycle of the dinoflagellate *Alexandrium fundyense*, Limnology and Oceanography, Vol. 42, No. 5, pp. 1178-1188.
- [41] Taroncher-Oldenburg, G., D. M. Kulis, and D. M. Anderson (1999), Coupling of saxitoxin biosynthesis to the G1 phase of the cell cycle in the dinoflagellate *Alexandrium fundyense*: temperature and nutrients effects, Nat Toxins, Vol. 7 (5), pp. 207-219.
- [42] Taylor, F. J. R., Y. Fukuyo, and J. Larsen(1995), Taxonomy of harmful dinoflagellates. In: Hallegraef, M., D. M., Anderson, A. D. Cembella and H. O. Enevoldsen (Eds), Manual on Harmful Marine Microalgae, UNESCO, Paris, pp. 283-317.
- [43] Wang, D. Z. and D. P. H. Hsieh(2005), Growth and toxin production in batch cultures of a marine dinoflagellate *Alexandrium tamarensis* HK9301 isolated from the South China Sea, Harmful Algae, Vol. 4, No. 2, pp. 401-410.
- [44] Xu, J., A. Y. T. Ho, L. He, K. Yin, C. Hung, N. Choi, P. K. S. Lam, R. S. S. Wud, D. M. Anderson, and P. J. Harrison(2012), Effects of inorganic and organic nitrogen and phosphorus on the growth and toxicity of two *Alexandrium* species from Hong Kong, Harmful Algae, Vol. 16, pp. 89-97.
- [45] Yoshida, T., Y. Sako, and A. Uchida(2001), Geographic differences in paralytic shellfish poisoning toxin profiles among Japanese populations of *Alexandrium tamarensis* and *A. catenella* (Dinophyceae), Phycological Research, Vol. 49, No. 1, pp. 13-21.

Received : 2022. 08. 31.

Revised : 2022. 09. 30. (1st)

: 2022. 10. 17. (2nd)

Accepted : 2022. 10. 28.