

## 한국 남해안 내만의 해양환경과 적조발생의 특징

이문옥\* · 김평주\* · 권영아\*  
\*전남대학교 수산해양대학 해양기술학부

### Characteristics of Marine Environment and Algal Blooms in the Inner Bays of the Korean South Coast

MOON-OCK LEE\*, PYEONG-JOO KIM\* AND YEONG-AH KWON\*

\*Dept. of Ocean Engineering, Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, Korea

**KEY WORDS:** Algal bloom 적조, Marine environment 해양환경, Causative organism 원인생물, Occurrence type 발생유형, Eurythermal 광온성, Euryhaline 광염성, Stenothermal 협온성, Stenohaline 협염성

**ABSTRACT:** The primary objective of this study was to gain insight into the characteristics of algal blooms in relation to the marine environment of the Korean Southern Coast, using more than 22 years worth of data since the first known occurrence of algal blooms. Algal blooms tend to occur when the precipitation or water temperature for a ten-day period prior to the annual bloom exceeds the long-term mean value. There are three notable causative species in six different inner bays, namely *Prorocentrum* sp., *Skeletonema costatum*, and *Heterosigma akashiwo*, and in addition, these three species appeared in different conditions of water temperature and salinity at each region.

### 1. 서 론

우리 나라 남해안에 위치한 가막만 및 진해만 해역은 굴을 비롯한 각종 패류나 다양한 어류를 생산하고 있는 매우 중요한 어장이다. 가막만은 경남 통영 해역에 이어 두 번째로 많은 굴을 생산하고 있는 주요 어장 중의 하나로서, 우리나라 전체 연간 굴생산량의 약 30%를 점하고 있는 해역이며 미국 식품의약품국에서도 그 안전을 보장할 정도로 양호한 수질을 자랑하고 있는 곳이기도 하다. 그러나, 1989년에 6,500톤에 이르던 알굴 생산량이 1994년에는 1,700톤으로 급감한 이래 2004년에는 2,450톤으로 굴생산은 과거에 비해 현저히 낮은 수준을 유지하고 있는 실정이다. 특히, 가막만의 적조는 1984년에 규조류인 *Chaetoceros* spp.와 *Skeletonema costatum*에 의해 처음 발생한 이래 2005년까지 총 43회 발생하였으며, 5월부터 9월 사이에 집중적으로 발생하였다. 게다가 최근에는 유독성 와편모조류인 *Prorocentrum* sp.와 *Cochlodinium polikrikoides*에 의한 적조 발생이 두드러지는 경향에 있어 가막만내의 수산생물의 서식환경을 크게 위협하고 있다. 또한, 마산만, 행암만, 당동만, 원문만 등의 내만을 포함한 진해만 해역은 굴을 비롯한 홍합, 피조개 등의 양식장으로서 뿐만 아니라 대구 등 어류의 산란장 및 치어육성장으로서 중요한

위치를 점하고 있는 어장이었다. 그러나, 1960년대 이후 조성되기 시작한 임해공업단지로부터 만내로 유입되는 산업폐수나 생활하수로 인해 부영양화가 진행하여 1980년대 이후 거의 매년 적조가 발생하고 있다. 특히, 적조 원인생물이 초기에는 규조류가 우점하였으나, 최근에는 와편모조류를 주로 하는 편모조류에 의한 발생이 증가하는 등 원인종도 다양화하고 있는 실정이다. 본 연구는 가막만 및 진해만 해역의 해양환경과 적조발생의 특징을 분석함으로써 최종적으로는 이들 해역의 생물 생산성 회복 방안을 모색하기 위해 수행되었다.

### 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 국립수산과학원이 진해만에서 적조가 발생한 1981년부터 2005년까지 정점관측망에서 조사한 진해만의 해양환경자료(수온, 염분, DO, COD, DIN, DIP), 적조발생자료(발생일시, 발생해역, 적조밀도, 원인생물), 여수지방해양수산청(2005)이 2000년부터 2004년까지 조사한 여수지역 양식어장 환경조사자료(수온, 염분, DO, COD, DIN, DIP, Ch-a), 기상청의 마산, 통영, 거제, 여수 지방에 관한 30년간의 평년기상자료(기온, 강수량, 일사량) 등을 참고하였다. 이들 자료를 분석하여 가막만, 마산만, 행암만, 당동만, 원문만 및 진해만에 있어서의 해양환경과 적조발생의 특징을 파악하고 또한 이들 양자간의 연관성을 검토하였다. Fig. 1은 연구대상 해역의 위치를 나타낸다.

\* 교신저자 이문옥: 전남 여주시 둔덕동 산의 96-1번지

061-659-3151 leemo@chonnam.ac.kr

### 3. 각 해역별 해양환경

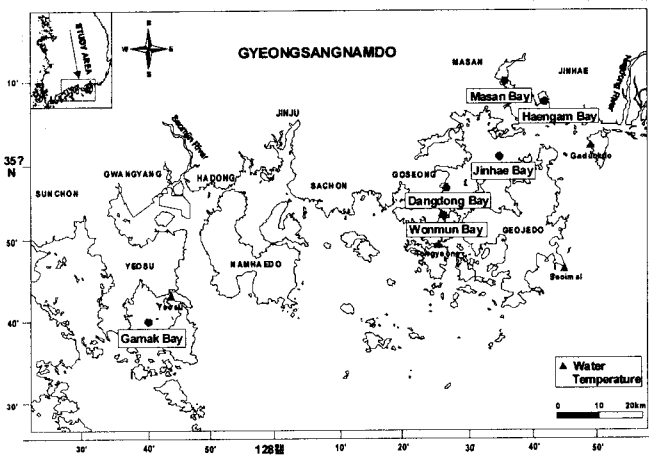


Fig. 1 Study area and water temperature observation points

#### 3.1 년평균 표층수온의 변화

Fig. 2는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수온의 장기관측 정점인 가덕도, 통영, 서이말 및 여수에서 기록된 년평균 표층수온의 변화를 보여준다. 먼저, 가덕에서 1934~1944년, 1953~2004년까지 장기관측된 표층 수온의 변화를 보면, 1934년에 14.7°C이던 수온은 2004년에 17.3°C로, 70년동안 2.6°C가 상승하여 년평균 0.037°C씩 증가한 것으로 나타났다. 다음 통영의 경우는, 1933~1943년, 1979~2005년까지 표층수온이 장기관측되었으며, 1933년에 15.9°C이던 수온은 2005년에 16.3°C로, 72년동안 0.4°C가 상승하여 년평균 0.006°C씩 증가하였다. 또한, 서이말에서는 1968~2004년까지 표층수온이 장기관측되었는데, 1968년에 15.9°C이던 수온은 2004년에 16.5°C로, 36년동안 0.6°C가 상승하여 년평균 0.017°C씩 증가하였다. 한편, 여수에서는 1984~2004년까지 표층수온이 관측되었으며, 1984년에 15.0°C이던 수온은 2004년에 16.9°C로, 20년동안 1.9°C가 상승하여 년평균 0.085°C씩 증가하였다. 따라서, 이들 4곳의 정점중 여수가 가장 년평균 수온증가율이 컸고, 통영이 가장 작았으나 모든 조사 정점에서 표층수온이 점차 증가하고 있는 경향을 띠고 있는 것은 분명하다.

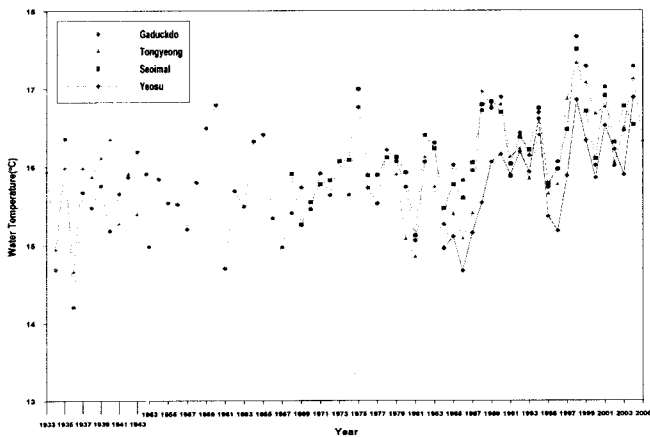


Fig. 3 Variations of average sea surface temperature at each region

또한, Fig. 3은 대표적으로 가막만 및 진해만에 있어서의 계절별 표층의 평균수온을 변화를 나타낸다. 이들 결과에 따르면, 봄(5월)과 여름(8월)에는 표·저층간의 수온차로 인한 성층이 형성되고 가을(11월)과 겨울(2월)에는 표·저층간의 수온차가 거의 없어 성층이 해소되는 모습이 연상된다. 이러한 수온 변화는 적조 발생은 물론, 우점종의 분포에도 영향을 미치게 된다.

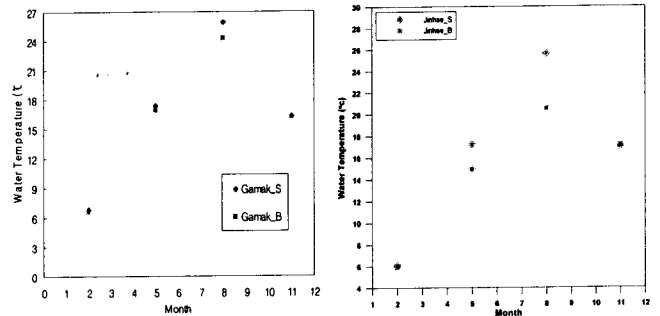


Fig. 3 Seasonal Variation of water temperature at each bays

#### 3.2 년평균 염분의 변화

Fig. 4는 가막만 및 진해만에 있어서의 계절별 평균 염분 변화를 나타낸다. 이들 결과에 의하면, 성층 형성기인 봄(5월)과 여름(8월)에는 전 해역에서 염분이 낮아지고, 특히 8월에 표층과 저층간의 염분차가 가장 커지는 경향을 가진다. 그러나, 가막만의 8월의 표층 염분은 30.6 psu로 진해만보다 높은 반면 표·저층간의 염분차는 오히려 작다. 대부분의 해양플랑크톤은 증식에 알맞는 적정염분농도가 있으며, 염분농도가 낮으면 광합성 작용이 급격히 감소한다.

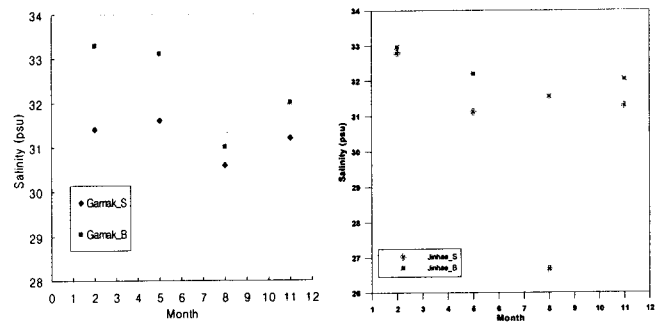


Fig. 4 Seasonal Variation of salinity at each bays

#### 3.2 년평균 강수량 및 일사량

먼저, Fig. 5(a)는 각 지역별 평년강수량의 월변화를 나타낸다. 가막만이 위치한 여수의 강수량은 진해만이 위치한 통영과 유사하지만, 마산이나 거제의 강수량은 여수나 통영에 비해 현저히 많고 특히 하계를 중심으로 강우가 집중하고 있음을 알 수 있다. 강우는 플랑크톤 증식제한 요인인 질소, 인, 미량금속 등 영양염류를 연안으로 유입시키며, 또한 많은 강우는 연안역의 염분을 저하시켜 저염분에 잘 자라는 종이 적조를 일으키게 한다. 또한, Fig. 5(b)는 각 지역별 평년일조량의 월변화를 나타낸다. 진해만 인근의 거제에서의 일조량이 가장 많고 다음이 가막만이 위치한 여수이며, 통영이나 마산의 일조량은 타 지역에 비해 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 일사량은 플랑

크톤의 광합성에 영향을 미치는 환경요인으로서 플랑크톤의 서식가능한 수층과 증식속도를 좌우한다.

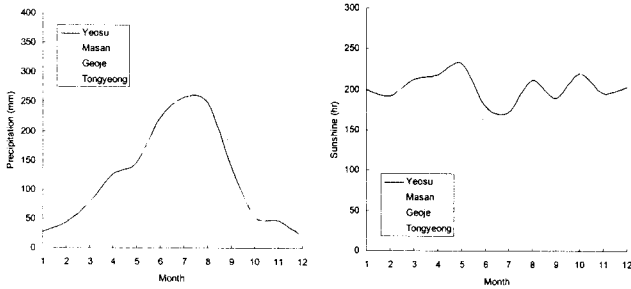


Fig. 5 Monthly average precipitation and sunshine time

#### 4. 각 해역별 적조 발생 및 원인생물 출현 특성

##### 4.1 적조발생빈도

- (1) 가막만 : 1984~2005년까지 총 43회 발생하였고 (발생누적일수 100일), 발생시기는 5월부터 9월까지지만 주로 7월과 8월에 집중적으로 발생하였다.
- (2) 마산만 : 1981~2005년까지 총 200회 발생하였고 (발생누적일수 256일), 발생시기는 2~11월 사이지만 5~8월에 집중적으로 발생하였다.
- (3) 행암만 : 1981~2005년까지 총 97회 발생하였고 (총 발생누적일수 126일), 발생시기는 3~10월 사이지만 5~9월에 집중적으로 발생하였다.
- (4) 당동만 : 1981~2005년까지 총 35회 발생하였고 (총 발생누적일수 69일), 발생시기는 4~10월 사이지만 7~9월에 집중적으로 발생하였다.
- (5) 원문만 : 1981~2005년까지 총 36회 발생하였고 (총 발생누적일수 71일), 발생시기는 4~10월 사이지만 7~9월에 집중적으로 발생하였다.
- (6) 진해만 : 1981~2005년까지 총 207회 발생하였고 (총 발생누적일수 280일), 발생시기는 2~11월 사이지만 5~9월에 집중적으로 발생하였다.

##### 4.2 적조발생유형

적조로 인식할 수 있는 최저생물농도는 생물에 따라 다르지만 우리나라와 일본에서는 대략 적조생물의 밀도 1,000cells/ml를 적조인식한계로 보고 적조주의보 발령 기준으로 하고 있다 (박 등, 1985). 그런데, 적조생물인 규조류나 편모조류는 1일 1회 2분열(binary fission)을 하므로 10일 정도가 지나면 이와 같은 적조기준밀도에 도달하게 된다 (Yanagi, 1990). 따라서, 적조발생전 10일 동안의 해양환경조건이나 기상조건은 적조발생기구의 해명에 있어 중요하다. 이러한 전제하에 각 해역별로 지금까지 적조가 발생하기 전 10일 동안의 표층 수온, 강수량 및 일사량을 조사하여 적조가 어떠한 환경하에 발생하는지를 조사하였다. 그래서 만약, 적조발생전 10일 동안의 수온이 25년 (가막만의 경우는 22년) 동안의 장기간 평균한 당해 시기의 수온을 초과하였을 경우를 T형이라고 규정하였다. 마찬가지로

만약, 적조발생전 10일 동안의 강수가 25년 (가막만의 경우는 22년) 동안의 장기간 평균한 당해 시기의 강수를 초과하였을 경우를 P형, 일사량이 초과하였을 경우를 S형, 이들 요소간에 복합하여 나타난 경우를 PT형 또는 PS형 등으로 각각 규정하였다. 이들 결과에 의한 각 해역별 적조발생 유형은 다음과 같다.

- (1) 가막만 : 적조발생 총 43회중 P형이 15회, T형이 13회, PT형이 12회, PS형이 3회로 나타났다. 따라서, 가막만 적조는 적조발생전 10일 동안에 장기간의 평균값을 웃도는 강수나 수온이 지속될 경우 발생할 가능성이 가장 높은 것으로 나타났다.
  - (2) 마산만 : 적조발생 총 200회 중 P형이 59회, T형이 51회, PT형이 40회, PS형이 22회, S형이 28회로 나타났다. 따라서 전술한 가막만과 마찬가지로 P형 또는 T형, 즉 적조발생전 10일 동안에 장기간의 평균값을 웃도는 강수나 수온이 지속될 경우 적조가 발생할 가능성이 가장 높은 것으로 나타났다.
  - (3) 행암만 : 적조발생 총 97회 중 P형이 35회, T형이 16회, PT형이 24회, PS형이 10회, S형이 12회로 나타나, 강수 또는 강수와 수온이 동시에 장기간의 평균값을 웃도는 경우 적조발생 가능성이 가장 높았다.
  - (4) 당동만 및 원문만 : 적조발생 총 35회의 36회 중 P형이 17회와 15회, T형이 3회와 5회, PT형이 10회와 8회, PS형이 1회와 4회, S형이 4회로 각각 나타났다.
  - (5) 진해만 : 적조발생 총 207회 중 P형이 99회, T형이 33회, PT형이 49회, PS형이 8회, S형이 18회로 나타났다.
- 이상의 경우를 종합하면, 조사대상 모든 해역에서 적조는 평년치를 웃도는 강수가 10일 이상 지속될 경우 발생할 가능성이 가장 높고 경우에 따라서는 강수에 더하여 수온이 평년에 비해 더 높을 경우에도 적조는 발생가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 즉, 평년을 웃도는 강수에 의해 육지로부터 플랑크톤 증식에 필요한 다량의 영양염류 및 미량금속 등이 바다로 공급되고 여기에 더하여 적절한 수온이 지속됨으로써 적조밀도에 이르게 되는 것으로 판단된다.

##### 4.3 각 해역별 대표적 출현종

각 해역에서 탁월종으로 출현한 대표종은 가막만이 5종 (*Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* sp., *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp., *Cochlodinium polykrikoides*), 마산만이 5종 (*Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp., *Prorocentrum micans*, *Thalassiosira* sp.), 행암만이 5종 (*Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp., *Prorocentrum micans*, *Thalassiosira* sp.), 당동만이 3종 (*Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp.), 원문만이 3종 (*Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp.), 진해만이 5종 (*Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp., *Cochlodinium polykrikoides*, *Gymnodinium* sp.)으로서, 이들 생물종의 출현 특징으로서 첫째, 조사대상 전 해역에서 *Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp.가 탁월종으로 출현하였고, 둘째, 마산만과 행암만에서 출현하는 탁월종은 동일하였으며, 게다가 *Prorocentrum micans* 및 *Thalassiosira*

sp. 두 종은 마산만과 행암만에서만 탁월종으로 출현하였으며, 넷째, *Cochlodinium polykrikoides*는 가막만과 진해만 두 해역에서만 탁월종으로 출현하였고, 다섯째, *Chaetoceros sp.*는 가막만에서만 탁월종으로 출현한 점 등을 들 수 있다.

#### 4.4 공통적인 출현종의 환경조건

조사대상 전 해역에서 공통적으로 출현한 세계 종 *Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo* 및 *Prorocentrum sp.*의 수온 및 염분 범위를 살펴보면 다음과 같다.

(1) *Skeletonema costatum* : 가막만에서는 수온 17.5~26.8°C, 염분 25.01~34.54psu로 광온(eurythermal)·광염(euryhaline)형, 마산만에서는 수온 4.6~29.0°C, 염분 17.46~32.64psu로 광온(eurythermal)·광염(euryhaline)형, 행암만에서는 수온 21.4~28.6°C, 염분 27.84~31.30psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형, 당동만에서는 수온 21.1~27.3°C, 염분 24.56~31.75psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형 (단, 고온 영역에서 출현), 원문만에서는 수온 21.1~29.8°C, 염분 22.40~31.44psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형, 진해만에서는 수온 5.4~29.3°C, 염분 20.20~33.11psu로 광온(eurythermal)·광염(euryhaline)형으로 각각 나타났다.

(2) *Heterosigma akashiwo* : 가막만에서는 수온 16.5~20.1°C, 염분 33.15~35.38psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형 (단, 저온·고염 영역에서 출현함), 마산만에서는 수온 10.3~26.8°C, 염분 17.36~34.64psu로 광온(eurythermal)·광염(euryhaline)형, 행암만에서는 수온 13.1~28.8°C, 염분 18.51~33.46psu로 광온(eurythermal)·광염(euryhaline)형, 당동만에서는 수온 16.9~27.3°C, 염분 17.02~33.00psu로 협온(stenothermal)·광염(euryhaline)형, 원문만에서는 수온 19.5~29.8°C, 염분 22.40~31.81psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형, 진해만에서는 수온 10.9~23.0°C, 염분 29.12~33.29psu로 광온(eurythermal)·협염(stenohaline)형 (단, 고염 영역에서 출현함)으로 각각 나타났다.

(3) *Prorocentrum sp.* : 가막만에서는 수온 19.7~26.6°C, 염분 28.82~34.57psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형 (단, 고온·저염 영역에서 출현함), 마산만에서는 수온 16.2~28.8°C, 염분 17.46~31.70psu로 협온(stenothermal)·광염(euryhaline)형, 행암만에서는 수온 22.7~29.4°C, 염분 24.90~31.30psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형 (단, 고온·저염 영역에서 출현함), 당동만에서는 수온 19.9~27.3°C, 염분 17.02~32.39psu로 협온(stenothermal)·광염(euryhaline)형, 원문만에서는 수온 27.2~29.8°C, 염분 24.22~30.00psu로 협온(stenothermal)·협염(stenohaline)형 (단, 고온 영역에서 출현함), 진해만에서는 수온 17.1~28.5°C, 염분 24.21~32.95psu로 광온(eurythermal)·광염(euryhaline)형으로 각각 나타났다. 이들 세계 종 *Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo* 및 *Prorocentrum sp.*의 해역별 출현 조건을 서로 비교하여 나타낸 것은 Fig. 6(a)~(c)와 같다. 이들 결과에 따르면, 먼저 *Skeletonema costatum*은 진해만과 마산만에서는 수온과 염분의 변화범위가 상대적으로 넓은 조건에서 출현하지만, 가막만을 비롯한 행암만, 원문만, 당동만 등

타해역에서는 수온과 염분의 변화범위가 좁은 조건에서 출현하는 것으로 나타났다. 또한, *Heterosigma akashiwo*는 마산만, 행암만 및 당동만에서는 수온과 염분의 변화범위가 넓은 조건하에 출현하지만, 가막만, 진해만 및 원문만에서는 수온과 염분의 변화범위가 좁은 조건에서 출현한다. 한편, *Prorocentrum sp.*는 마산만과 당동만에서는 수온과 염분의 변화범위가 넓은 조건하에 출현하지만, 가막만, 진해만, 행암만 및 원문만에서는 수온과 염분의 변화범위가 좁은 조건에서 출현하는 것을 알 수 있다. 이상에서 살펴 본 바와 같이, 비록 동일한 적조생물종이라 하더라도 각 해역마다 출현하는 수온과 염분조건이 다른 것은 이들 생물종이 각 해역의 환경특성에 맞도록 적응한 결과로 풀이된다.

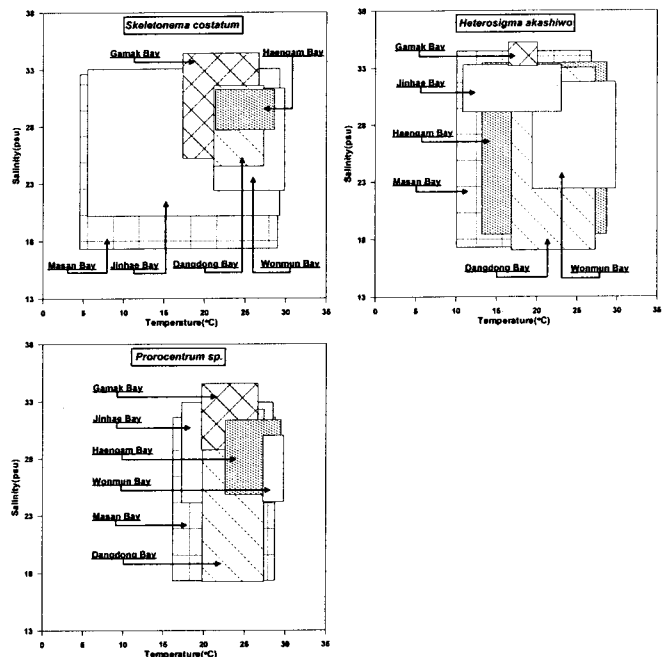


Fig. 6(a)~(c) Appearance conditions for *Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo* and *Prorocentrum sp.*

#### 참 고 문 헌

최만영, 곽승국, 조경제 (2000). "마산-진해만에서 *Prorocentrum* 개체군의 발생양상과 분포", 한국생물환경학회지, 제 18권, 제 4호, pp. 447-456.  
 박주석, 김학균, 이필용 (1985). 해양오염 및 적조조사지침, 국립수산물과학원, pp. 1-297.  
 Yamatogi, T., Sakaguchi, M., Iwataki, M. and Matsuoka, K. (2006). "Effects of temperature and salinity on the growth of four harmful red tide flagellates occurring in Isahaya Bay in Ariake Sound, Japan", Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 72, No. 2, pp. 160-168.  
 Yanagi T. (1990). "Physical processes relating to red tide", Bull. Faculty of Eng., Ehime University, Ehime, Vol. 12, pp. 206-216.