

## *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생시의 한국 남해안 고흥 연안의 해양환경 특징

이문옥<sup>1,†</sup> · 김병국<sup>2</sup> · 김종규<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>전남대학교 해양기술학부  
<sup>2</sup>국립공원관리공단 해양연구센터

### Marine Environmental Characteristics of Goheung Coastal Waters during *Cochlodinium polykrikoides* Blooms

Moon Ock Lee<sup>1,†</sup>, Byeong Kuk Kim<sup>2</sup> and Jong Kyu Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea  
<sup>2</sup>Marine Research Center, Korea National Park Service, Yeosu 550-833, Korea

#### 요 약

국립수산과학원이 1993년부터 2013년까지 지난 20년간 우리나라 연안에서 관측한 정선관측자료, NOAA/NGSST 위성 영상자료, 적조자료 및 수치실험자료 등을 분석하여, *Cochlodinium polykrikoides* (이하 *C. polykrikoides*) 적조의 최초의 발생지로 알려진 고흥 연안의 8월의 해양환경적 특징을 조사하였다. 조사기간 중 고흥 연안 (나로도)의 표층 및 저층의 평균 수온은 각각 25.0 °C와 23.7 °C로, 대조구인 거제 해역의 표층과 저층에서의 평균 수온인 23.8 °C와 19.4 °C 보다 약 1.2-4.3 °C가 높았다. 또한, 고흥 연안의 평균 염분은 표층과 저층에서 각각 31.78 psu와 31.98 psu로, 대조구인 거제 해역의 31.54와 32.79에 비해 표층은 다소 높으나 저층은 낮았다. 즉, 고흥 연안은 하계인 8월에 표층과 저층간의 수온 차나 염분차가 거제에 비해 크지 않았으며, 따라서, 고흥 연안은 8월에 성층이 매우 미약하거나 형성되지 않을 가능성을 시사하였다. 또한, 고흥 연안과 거제 해역의 표층에서의 DIN과 DIP농도는 각각 0.068 mg/L(4.86 μM)와 0.072 mg/L(5.14 μM), 0.015 mg/L(0.48 μM)와 0.01 mg/L(0.32 μM)로, 큰 차이를 보이지 않았다. 한편, *C. polykrikoides* 적조 발생시, 양쯔강 하구에 인접한 동중국해(31.5°N, 124°E)에서의 8월의 표층 평균 수온 및 염분은 각각 27.8 °C와 31.61psu로, 고흥 연안에 비해 수온은 2.8 °C가 높았으나, 염분은 거의 유사하였다. 또한, 동중국해의 8월 표층의 질산염(NO<sub>3</sub>-N) 및 인산염(PO<sub>4</sub>-P) 농도는 고흥 연안에 비해 현저히 높았다. 게다가, *C. polykrikoides* 적조 발생시의 NOAA/NGSST 위성 영상자료 및 수치실험결과에 의하면, 양쯔강 하천수가 제주도과 우리나라 남해안까지 확장하여 영향을 주고 있는 것으로 판단되었다. 따라서, 하계 고흥 연안에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생에는 양쯔강 하천수에 의한 영양염 공급이 크게 기여하고 있는 것으로 사료된다.

**Abstract** – We investigated marine environmental characteristics of Goheung coastal areas in August where is known to be the first outbreak site of *Cochlodinium polykrikoides* (hereafter *C. polykrikoides*) blooms, based on the oceanographic data observed from 1993 to 2013 around the Korean southern coastal waters including Eastern China Sea by National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI). The data of NOAA/NGSST satellite images as well as numerical simulation results by Seo *et al.* [2013] were also used for analysis. Water temperatures at the surface and bottom layers in Goheung coast, i.e. Narodo, were 25.0 °C and 23.7 °C so that they were higher than 23.8 °C and 19.4 °C in Geoje coast where is a reference site, respectively. In addition, salinities at the surface and bottom layers in Goheung coast were 31.78 psu and 31.98 psu so that they were a little higher than 31.54 psu at the surface but a little lower than 32.79 psu at the bottom in Geoje coast, respectively. That is, the differences in water temperature or salinity between the surface and bottom layers in Goheung coast in August were not large compared to Geoje coast. This suggests that stratification in Goheung coast in August is fairly weak or may not be established. In addition, the concentrations of DIN and DIP at the surface layer were 0.068 mg/L (4.86 μM) and

<sup>†</sup>Corresponding author: leemo@jnu.ac.kr

0.015 mg/L (5.14  $\mu$ M) in Goheung coast while 0.072 mg/L (5.14  $\mu$ M) and 0.01 mg/L (0.32  $\mu$ M) in Geoje coast, so they did not indicate a meaningful difference. On the other hand, when *C. polykrikoides* blooms, water temperature and salinity in August at the station 317-22 (31.5°N, 124°E) of the East China Sea, where is near the mouth of Yangtze River, were 27.8 °C and 31.61 psu, respectively. Thus, water temperature was much higher whereas salinity was almost similar compared to Goheung coast. Furthermore, concentrations of NO<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P in the East China Sea in August were remarkably high compared to Goheung coast. When *C. polykrikoides* blooms, according to not only the image data of satellites NOAA/NGSST but also numerical experiment results by Seo *et al.*[2013], the freshwater out of Yangtze River was judged to clearly affect the Korean southern coastal waters. Therefore, the supply of nutrients in terms of Yangtze River may greatly contribute to the outbreak of *C. polykrikoides* blooms in Goheung coast in summer.

**Keywords:** *C. polykrikoides* blooms(코클로디니움 적조), Goheung coast(고흥 연안), East China Sea(동중국해), Yangtze River(양쯔강), marine environments(해양환경)

## 1. 서 론

한국연안에서 적조를 일으키는 원인생물은 1981년 이래 2010년 까지 약 55종으로, 이 중 규조류가 22종, 편모조류가 29종으로, 1980년대까지는 규조류와 편모조류가 우점하였으나, 1990년대 들어서면서 유독성의 편모조류가 탁월하기 시작하였다. 특히, *Cochlodinium polykrikoides*(이하 *C. polykrikoides*) 적조는 1982년 한국남해안의 진해만에서 처음 발생한 이래 2013년 현재는 서해안의 태안(TA), 보령(BR)에서부터 남해안의 고흥(GH), 나로도를 거쳐 동해안의 강릉(GN), 삼척(SC)에 이르기까지 거의 우리나라 전 연안에서 1회 이상 발생한 기록을 가지고 있을 정도로 그 발생범위가 광역화하고 있는 추세이다 (Fig. 1 참조). 더구나, 1995년 이래 그 발생빈도도 증가하여, 유독성 적조로 인한 수산 생물에의 피해도 적지 않다 (Lewitus *et al.*[2012]). 특히, 2013년 하계에는 이상고온 현상의 지속으로 서해안에서 남해안을 거쳐, 동해안에 이르는 유독성 적조에 의한 사상 최악의 어업피해를 입었다. 따라서, *C. polykrikoides* 적조의 발생기작을 해명하고 수산생물의 피해를 줄이기 위한 방안 마련이 절실히 요청되고 있다. 지금까지 *C. polykrikoides* 적조는 대부분 나로도 주변 해역에서 최초로 발생한 이래, 타 해역으로 점차 이류 확산되는 경우가 많았다(Kim *et al.*[2007]; Kwon and Cho[2002]; Kim *et al.*[2001]; Shim *et al.*[2010]). 이것은 나로도 주변 해역이 *C. polykrikoides* 적조 발생에 있어서 타 해역이 가지지 못하는 어떤 환경적 특성을 가지고 있음을 시사한다.

나로도 주변 해역에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생 기구로서 지금까지의 연구결과에 따르면, 외양으로부터의 영양염의 유입, 나로도 연안수와 쓰시마 난류와의 사이에 형성되는 열염전선, 한국 남해 연안수와 양쯔강 하천수와 사이에 형성되는 전선, 계절풍 등 다양한 요인이 거론되고 있다 (Yang *et al.*[2000]; Choi[2001]; Lee *et al.*[2001]; Jung *et al.*[2002]; Suh *et al.*[2003]; Cho and Choi[2005]; Oh *et al.*[2006]; Lee and Lee[2006]; Lee[2008]; Lee and Kim[2008]; Lee and Choi[2009]; Lim *et al.*[2014]). 특히, Lee[2008]는 한국 남해안에서 있어서의 *C. polykrikoides* 적조의 발생과 소멸 조건을 조사하였다. 그는 *C. polykrikoides* 적조가 매년 8월 말경 나로도 인근 해역에서 발생하는데, 여기에는 나로도 부근에 위치한 해저협곡

(submarine canyon)이 외양수의 표층으로의 침입에 있어서 중요한 역할을 하고 있다고 주장하였다. 또한, 그는 8월말 한국의 계절풍이 남서풍에서 북동풍으로 바뀌면서 따뜻한 양쯔강 희석수(Changjiang Diluted Water; CDW)가 Ekman Transport에 의해 나로도 부근의 해수로 유입되어 내해수와 CDW사이에 전선을 형성한다고 하였다. 그래서, CDW에 있는 *C. polykrikoides* 세포의 집적(aggregation)과 하강류(downwelling)가 *C. polykrikoides* 적조의 발달에 호의적인 생태적 물리적 조건을 만든다고 하였다. Kwon *et al.*[2014a]은 단일 배양조건하에서 *C. polykrikoides*와 *Skeletonema sp.*의 용존 유기영양염의 이용능력을 바탕으로 한 종간경쟁관계를 조사한 결과, 이들 모두 용존무기질소와 무기인 이외에 다양한 용존유기질소와 유기인을 이용하며 성장하는 것을 밝혔다. 또한, 그들은 정상상태에서 용존 유기영양염만을 고려할 경우, *C. polykrikoides*가 *Skeletonema sp.*에 비해서 우점할 가능성이 있다는 사실을 확인하였다. 그러나, Kwon *et al.*[2014b]은 2013년 하계 남해 자란만에서 인접한 타 해역과는 달리 *C. polykrikoides* 적조가 전혀 발생하지 않은 것은 질소에 대한 의존성이 높은 *C. polykrikoides*가 증식에 필요한 영양염 공급을 받지 못하여 *Chaetoceros* 등 규조류와의 무기영양염 경쟁에서 불리한 위치에 있었기 때문이라고 주장하였다. 또한, Anton *et al.*[2008]은 2005년과 2006년에 말레이시아 Sepanggar 만의 어류 가두리 양식장에서 발생한 폐사의 원인이 *C. polykrikoides* 적조에 의한 것으로서, 이때 양식장에서의 NO<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P의 농도가 높았다는 사실을 지적하였다. 따라서, 상기한 Kwon *et al.*[2014a; 2014b] 및 Anton *et al.*[2008] 등의 연구결과는 *C. polykrikoides* 적조 발생에 있어서 영양염의 공급이 그만큼 중요하다는 사실을 말해 준다.

본 연구에서는 *C. polykrikoides* 적조가 왜 나로도, 즉 고흥 연안에서 매년 최초로 발생하는지를 규명하기 위하여, 고흥 연안의 해양환경을 남해안의 주요 적조 발생지 중의 하나인 거제 및 동중국해에 있어서의 해양환경과 비교·검토하였다. 특히, 적조 발생의 주요인 중의 하나인 양쯔강 하천수가 우리나라 남해안의 수질 환경에 미치는 영향 파악을 위해 위성영상자료 및 타 연구자에 의한 수치실험결과에 기초하여 열염전선의 형성유무, 희석된 하천수의 거동 등을 파악하였다.

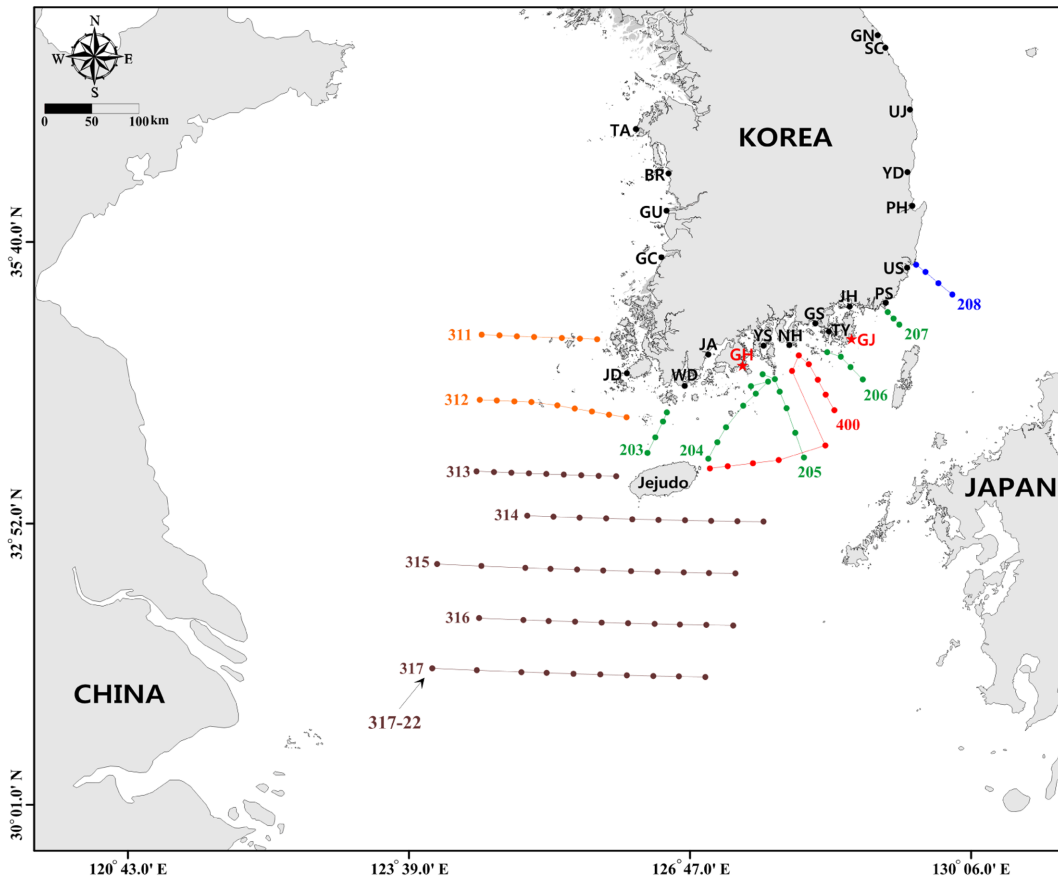


Fig. 1. Study area and oceanographic stations.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 동중국해와 한국 남해안을 포함하는 해역과 관측정점에서, 1993년부터 2013년까지 지난 20년간 국립수산물품질관리원(<http://www.nfrdi.go.kr>)이 조사한 *C. polykrikoides* 적조발생 관련자료(발생시기, 세포밀도, 해역), 해양환경관측망자료(수온, 염분, 영양염류, 클로로필\_a 농도), 정선해양관측자료(수온, 염분), NOAA 및 NGSST(New Generation Sea Surface Temperature) 위성영상자료를 각각 사용하였다. 정선해양관측자료인 수온과 염분값으로부터 Knudsen table[Knauss, 1978]을 이용하여 밀도( $\sigma_t$ )를 구하고, 수평방향의 표층 밀도분포도를 작성하였다. 이를 NOAA 및 NGSST 위성영상자료와 비교하여 한국남해 연안수와 중국연안수(또는 양쯔강 유출수)와의 사이에서의 열염전선의 형성 유무를 검토하였다. 특히, *C. polykrikoides* 적조 발생시, 양쯔강 유출수가 한국 연안에 미치는 영향을 판단하기 위하여 Seo et al.[2013]가 ROMS(Regional Ocean Modeling System) 수치모형을 사용하여 동중국해와 우리나라 전 해역에서 계산한 8월의 표층 수온과 염분 분포를 검토하였다. 또한, *C. polykrikoides* 적조의 최초발생지로 알려진 고흥(GH)연안의 해역 특성을 파악하기 위한 대조 해역으로 거제(GJ)를 설정하여, 이들 두 해역에 있어서의 수질항목(수온, 염분, DO, 영양염류 등)을 서로 비교·분석하였다.

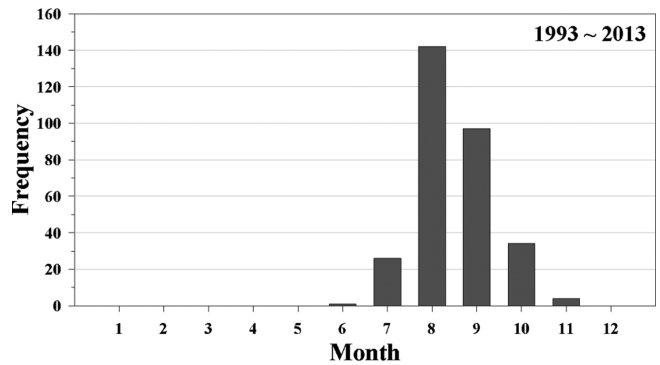


Fig. 2. Outbreak frequency of *C. polykrikoides* blooms.

참고로, 지금까지 우리나라에 있어서의 *C. polykrikoides* 적조는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 주로 하계인 8월을 중심으로 가장 많이 발생하였다. 또한, *C. polykrikoides* 적조의 최초발생시기는 Figs. 3에서 보는 바와 같이 고흥은 물론 거제에서도 해를 거듭함에 따라 점차 빨라지는 추세를 나타내고 있다.

특히, 지금까지 *C. polykrikoides* 적조가 가장 많이 최초로 발생한 해역은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 GH(고흥 및 나로도 해역)이며, 그 다음이 YS(여수, 돌산, 여천 및 가막만 해역)로, 이들 두 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 최초로 발생한 회수는 25회로서 전

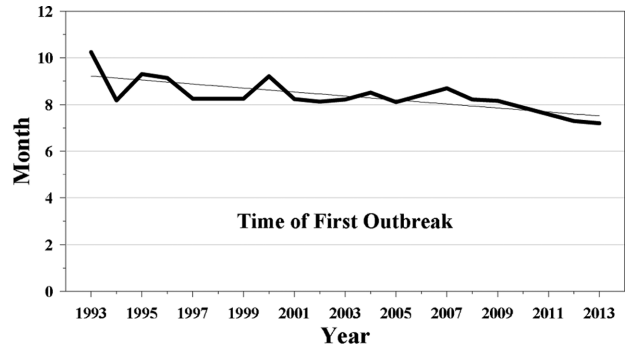
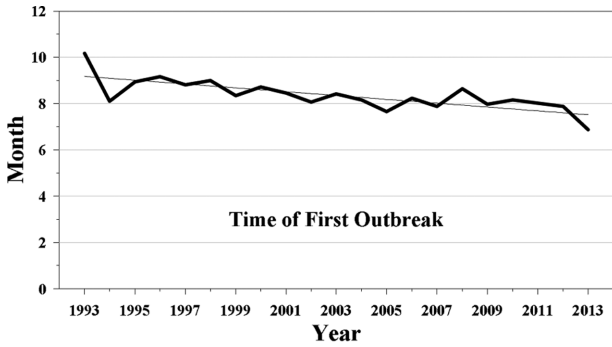


Fig. 3. The first outbreak time of *C. polykrikoides* blooms in GoHeung (left) and Geoje (right) areas.

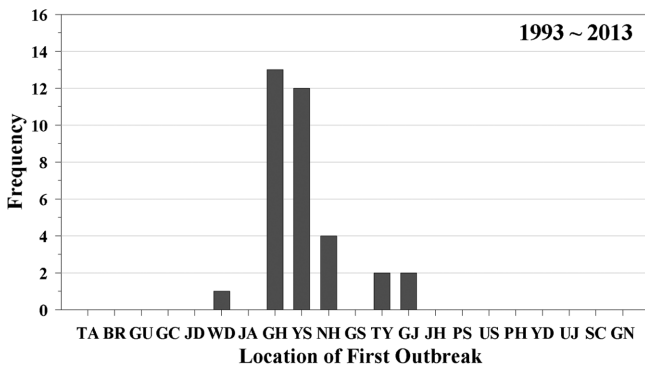


Fig. 4. The first outbreak area of *C. polykrikoides* blooms.

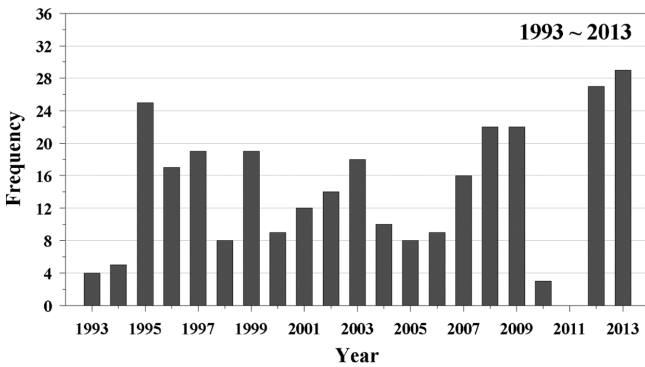


Fig. 5. Yearly outbreak frequency of *C. polykrikoides* blooms.

체 37회중 약 2/3를 차지하고 있다. 게다가, *C. polykrikoides* 적조의 최초발생해역은 모두 남해안 (JD(진도)부터 PS(부산)까지가 남해안 지역임)에 위치하고 있음을 알 수 있다. 한편, *C. polykrikoides* 적조는 1993년부터 2013년까지 지난 20년간의 연도별 발생상황은 Fig. 5와 같은데, 한국 전 해안에 걸쳐 대규모적으로 발생한 해는 1995년, 2012년 및 2013년이었고, 2011년에는 하계의 이상저온현상으로 발생하지 않았다. 이 기간 중 *C. polykrikoides* 적조는 총 294회 발생하였으며, 발생 빈도는 YS(여수), GJ(거제), GH(고흥) 순으로 높았다.

한편, Fig. 6은 하계 고흥 연안역에 출현하는 고온, 저염의 해수가 내만으로부터 유래한 것인지 아니면 외양으로부터 유래한 것인지를 밝히기 위해 설정한 6개 정점의 위치를 나타낸다. 정점은 각각 고

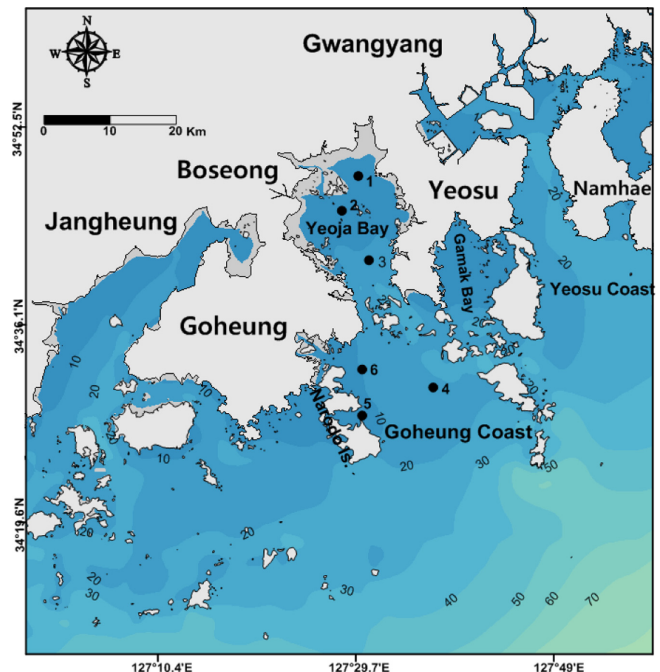


Fig. 6. oceanographic stations around GH coastal waters.

흥 해역의 북쪽인 여자만내에 3개(St. 1-3), 고흥 연안역에 3개(St. 4-6)가 설정되어 있으며, 1997년부터 2008년까지 지난 12년간 이들 정점에서 관측한 수온과 염분을 서로 비교하였다. 여기서는 여자만내 및 고흥 연안역의 수심이 10 m 전후인 천해역이기 때문에 편의상 표층값만을 비교, 검토하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 하계 적조 발생시 고흥 해역의 환경특성

Fig. 7은 1995년부터 2013년까지 지난 19년간 고흥(GH)과 거제(GJ)에서 8월에 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 빈도를 나타낸다. 전술한 Fig. 4 및 이 결과에서 알 수 있듯이, 비록 거제에서는 *C. polykrikoides* 적조가 최초로 발생한 경우는 고흥에 비해 현저히 적으나, 적조 발생은 고흥 이상으로 빈번함을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고, 왜 유독 고흥 연안에서 최초로 적조가 발생하는지 그 이유를 밝히기 위해서 인접 역인 거제 연안(GJ)을 하나의 대조 해역

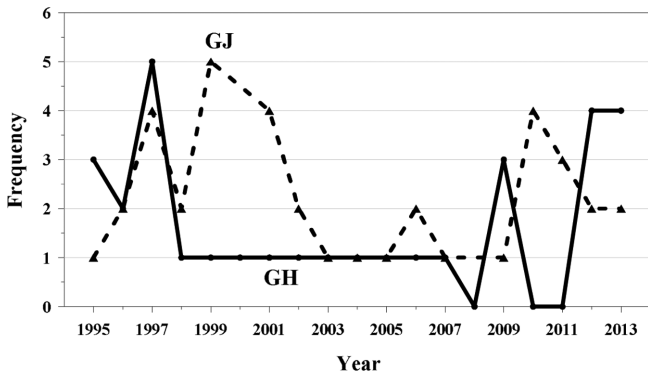


Fig. 7. Outbreak frequency of *C. polykrikoides* blooms in Goheung (GH) and Geoje (GJ) areas.

으로 설정하여 1997년부터 2008년까지 지난 12년간의 수온과 염분, pH, 용존산소(DO), 용존무기질소(DIN) 및 용존무기인(DIP)의 농도 비교를 행하였다.

3.1.1 수온

Fig. 8(a)-(b)는 지난 12년간의 고흥(GH) 및 거제(GJ)의 8월에 있어서의 표층과 저층의 수온의 연변화를 나타낸다. 표층과 저층의 수온은 고흥에서 각각 22.8-27.1 °C(평균 25.0 °C)와 22.0-26.7 °C(평균 23.7 °C), 거제에서 각각 21.7-26.5 °C(평균 23.8 °C)와 17.8-21.9 °C(평균 19.4 °C)로 나타났다. 즉, 고흥의 표층 수온은 거제보다는 약간 높은 반면, 저층 수온은 거제에 비해 약 4 °C가 더 높다. 한편, 저

층 수온은 고흥과 거제 모두 해가 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 반면, Kwak *et al.* [2015]은 1984년부터 2013년까지 30년간 국립수산물품질관리원 연구소가 조사한 한반도 전 연안의 표층 수온을 분석하여, 매년 수온이 0.024 °C씩 증가한다는 결과를 제시하고 있다.

3.1.2 염분

Fig. 9(a)-(b)는 고흥 및 거제의 8월에 있어서의 표층과 저층의 염분의 연변화를 나타낸다. 표층과 저층 염분은 고흥에서 각각 30.16-33.83 psu(평균 31.78 psu)와 30.55-34.09 psu(평균 31.98psu), 거제에서 각각 27.0-33.69 psu(평균 31.54)와 30.59-33.91 psu(평균 32.79 psu)로 나타났다. 이들 결과에 따르면, 고흥의 염분은 표층과 저층간에 큰 차이를 보이지 않는다. 또한, 고흥의 표층 염분은 거제와 거의 유사한 반면, 저층 염분은 거제에 비해 상당히 낮다. 게다가 이들 해역의 염분은 표층과 저층 모두 해에 따라 점차 증가하는 경향을 나타낸다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 고흥 해역은 하계인 8월에 표층과 저층간의 수온차나 염분차가 거제에 비해 크지 않은 것을 알 수 있다. 따라서, 고흥에서는 8월에 성층이 매우 미약하게 형성되거나 형성되지 않을 가능성이 있다. 또한, Gobler *et al.*[2008]는 2002년부터 2006년 사이 Long Island 동부에서 하계에 *C. polykrikoides* 적조가 발생하였을 때의 수온과 염분이 각각 20-25 °C 및 22.0-30.0 psu이었다고 하였다. 이들 값들과 비교해 볼 때 고흥과 거제 해역의 수온은 유사한 반면 염분은 다소 높은 것을 알 수 있다.

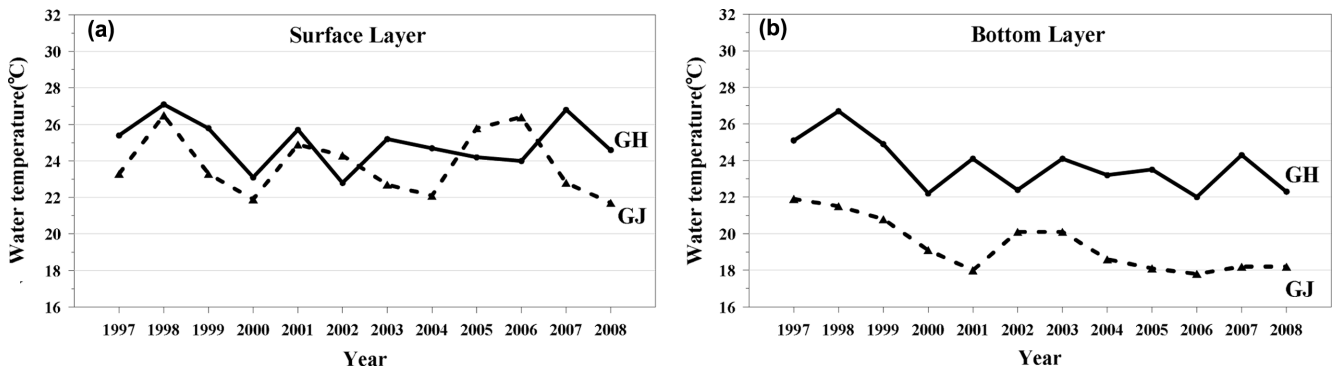


Fig. 8. (a) Surface water temperature variations in GH and GJ areas, (b) Bottom water temperature variations in GH and GJ areas.

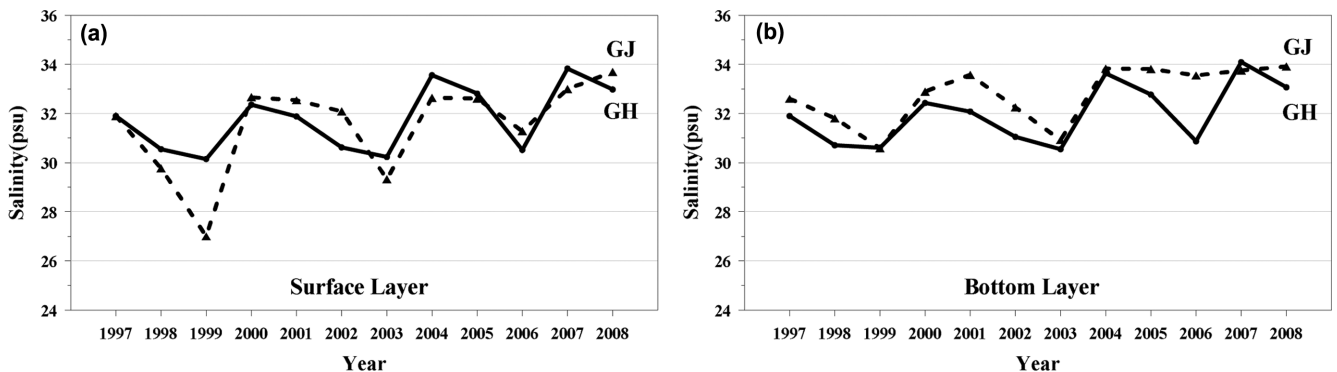


Fig. 9. (a) Surface salinity variations in GH and GJ areas, (b) Bottom salinity variations in GH and GJ areas.

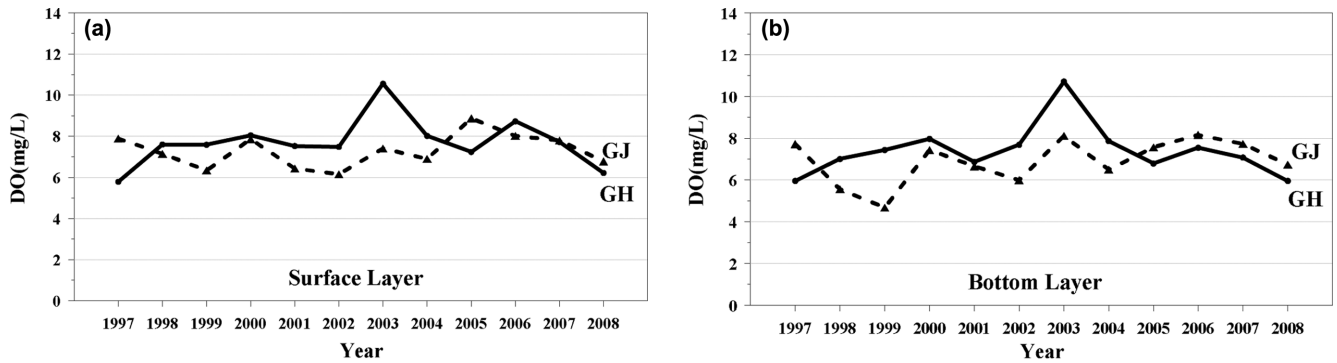


Fig. 10. (a) Variations of surface DO concentration in GH and GJ areas, (b) Variations of bottom DO concentration in GH and GJ areas.

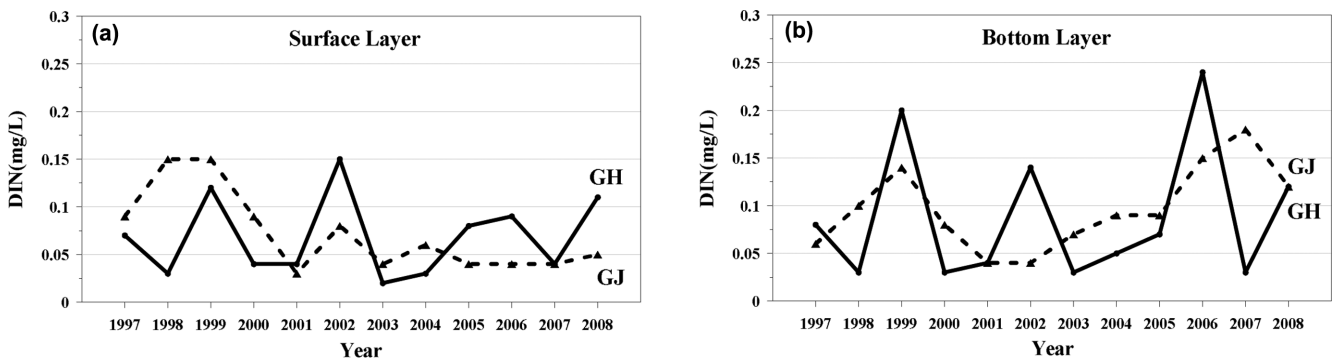


Fig. 11. (a) Variations of surface DIN concentration in GH and GJ areas, (b) Variations of bottom DIN concentration in GH and GJ areas.

### 3.1.3 용존산소(DO) 농도

Fig. 10(a)-(b)는 고흥과 거제 해역의 8월에 있어서의 표층과 저층의 DO 농도의 연변화를 나타낸다. 표층과 저층 DO 농도는 고흥에서 각각 6.2-10.6 mg/L(평균 7.7 mg/L)와 6.0-10.7 mg/L(평균 7.4 mg/L), 거제에서 각각 6.2-8.9 mg/L(평균 7.3 mg/L)와 4.7-8.2 mg/L(평균 6.9 mg/L)로 나타났다. 따라서, DO 농도는 표층과 저층 모두 고흥이 거제에 비해 다소 높다.

### 3.1.4 DIN 농도

Fig. 11(a)-(b)는 고흥과 거제의 8월에 있어서의 표층과 저층의 DIN 농도의 연변화를 나타낸다. 표층과 저층 DIN 농도는 고흥에서 각각 0.02-0.12 mg/L(1.43-8.57  $\mu\text{M}$ ) (평균 0.068 mg/L; 4.86  $\mu\text{M}$ )

와 0.03-0.24 mg/L (2.14-17.14  $\mu\text{M}$ ) (평균 0.088 mg/L; 6.29  $\mu\text{M}$ ), 거제에서 각각 0.03-0.15 mg/L (2.14-10.71  $\mu\text{M}$ ) (평균 0.072 mg/L; 5.14  $\mu\text{M}$ )와 0.04-0.18 mg/L (2.86-12.86  $\mu\text{M}$ ) (평균 0.097 mg/L; 6.93  $\mu\text{M}$ )로 나타났다. 따라서, 고흥의 DIN 농도는 표층과 저층 모두 거제에 비해 평균 농도는 다소 낮다. 또한, DIN 농도는 두 해역 모두 표층보다 저층에서 더 높다.

### 3.1.5 DIP 농도

Fig. 12(a)-(b)는 고흥과 거제의 8월에 있어서의 표층과 저층의 DIP 농도의 연변화를 나타낸다. 표층과 저층 DIP 농도는 고흥에서 각각 0.002-0.043 mg/L(0.065-1.387  $\mu\text{M}$ ) (평균 0.015 mg/L; 0.484  $\mu\text{M}$ )와 0.003-0.035 mg/L(0.097-1.129  $\mu\text{M}$ ) (평균 0.014 mg/L; 0.452  $\mu\text{M}$ ),

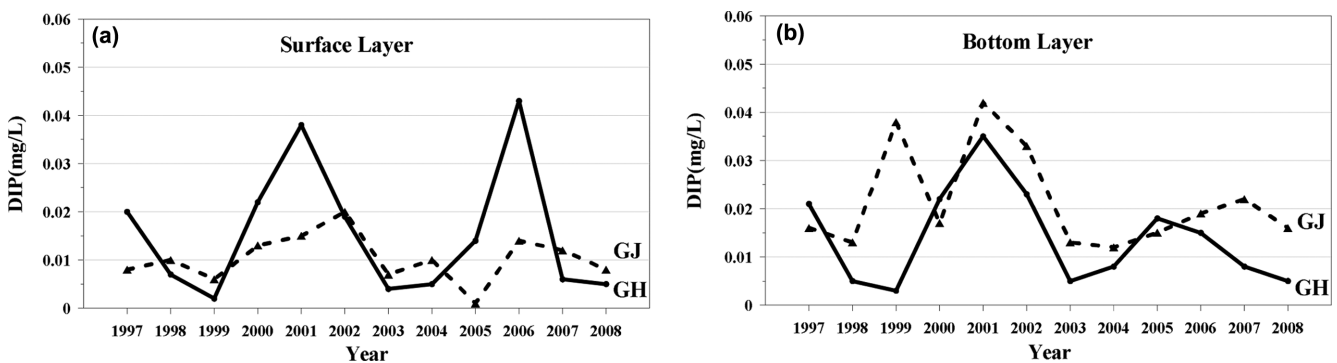


Fig. 12. (a) Variations of surface DIP concentration in GH and GJ areas, (b) Variations of bottom DIP concentration in GH and GJ areas.

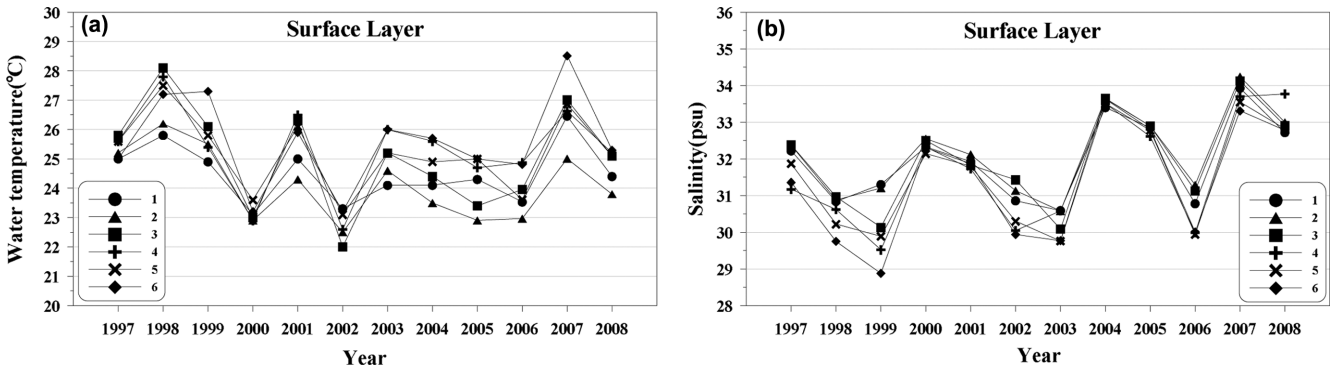


Fig. 13. (a) Variations of surface water temperature in Yeolja Bay and GH coastal waters in August, (b) Variations of surface salinity in Yeolja Bay and GH coastal waters in August.

거체에서 각각 0.001-0.020 mg/L(0.032-0.645 μM)(평균 0.01 mg/L; 0.323 μM)와 0.012-0.038 mg/L(0.387-1.226 μM)(평균 0.021 mg/L; 0.677 μM)로 나타났다. 이 결과에 따르면, DIP 농도는 표층에서는 고히이 거체에 비해 다소 높으나, 저층에서는 더 낮다. 또한, DIP 농도는 전술한 DIN 농도와 마찬가지로 저층이 표층에 비해 더 높다.

한편, 이들 해역에서의 DIN/DIP의 값, 즉 Redfield ratio는 고히의 표층과 저층에서 4.53과 6.29(μM으로 환산하면 10.04와 13.92), 거체의 표층과 저층에서 7.2와 4.62(μM로 환산하면 15.91과 10.24)로, 두 해역 모두 *C. polykrikoides* 적조 발생에 있어서 질산염이 제한인자임을 알 수 있다. Gobler *et al.*([2012]도 New York의 여러 하구에서 영양염류와 식물플랑크톤에 관한 모니터링을 실시한 결과, *C. polykrikoides* 적조가 질소-제한적이며, 또한, 질소가 *C. polykrikoides* 적조에 강하게 영향을 주고 있다는 사실을 확인하였다.

이상에서 살펴 본 고히와 거체 해역의 수질 비교에서는, 용존산소는 물론 영양염 농도에 있어서도 양 해역간에 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 하계인 8월의 *C. polykrikoides* 적조의 최초 발생에는 거체 해역에 비해 고히 해역의 상대적으로 높은 수온과 낮은 염분에 그 원인이 있을 것으로 생각된다. 이를 밝히기 위해 전술한 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 여자만내의 3개 정점(St. 1-3)과 고히 연안역 3개 정점(St. 4-6)에서 지난 12년간 관측한 수온과 염분을 서로 비교, 검토하였다.

Fig. 13(a)-(b)는 8월에 있어서의 수온 및 염분의 정점별 연변화를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 수온과 염분은 이들 6개 정점 모두 연변화 형태가 대체로 유사한데, 이것은 한 정점에서의 수온 또는 염분 변화가 인접하고 있는 다른 정점에서의 수온 또는 염분에 영향을 미치고 있기 때문으로 생각된다. 즉, 이 해역의 해수는 물리적 성질이 서로 유사한 하나의 수괴로 이루어져 있는 것으로 판단된다.

또한, Fig. 14(a)-(b)는 이들 6개 정점에서의 지난 12년간의 8월의 평균 수온과 염분의 변화를 각각 나타낸다. 여기서 그림 속의 실선은 평균치를 의미한다. 이 결과에 따르면, 수온은 북쪽의 여자만으로부터 고히 연안역으로 남하할수록 증가하는 반면, 염분은 여자만에서 고히 연안역으로 남하할수록 감소하는 경향을 보인다. 이것은 하계인 8월에 나타나는 고히 연안의 고온 현상이나 염분 저하는 여자만 등의 내만으로부터의 육수 유입에 따른 결과가 아니라, 외해수의 유입에 따른 결과임을 시사한다.

한편, Fig. 15(a)-(b)는 2000년 이래 지난 8년간의 동중국해(정점 317-22) 및 고히 연안에서의 8월의 평균 표층 수온 및 염분의 연변화를 나타낸다. 먼저, 수온은 동중국해에서 24.5-29.6°C(평균 27.8°C), 고히 연안에서 23.1-26.8°C(평균 24.6°C)로, 동중국해의 수온이 고히에 비해 약 3.0°C이상 높았다. 반면, 염분은 동중국해에서 27.5-33.88 psu(평균 31.61 psu), 고히 연안에서 30.23-33.83 psu(평균 32.09 psu)으로, 고히 연안의 표층 염분이 동중국해에 비해 다소 높

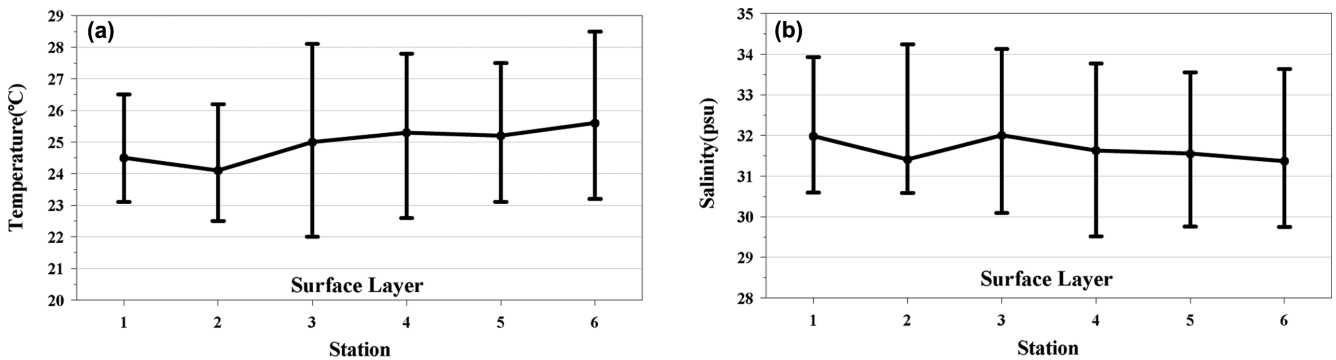


Fig. 14. (a) Variations of surface water temperature at each stations in Yeolja Bay and GH coastal waters, (b) Variations of surface salinity at each stations in Yeolja Bay and GH coastal waters.

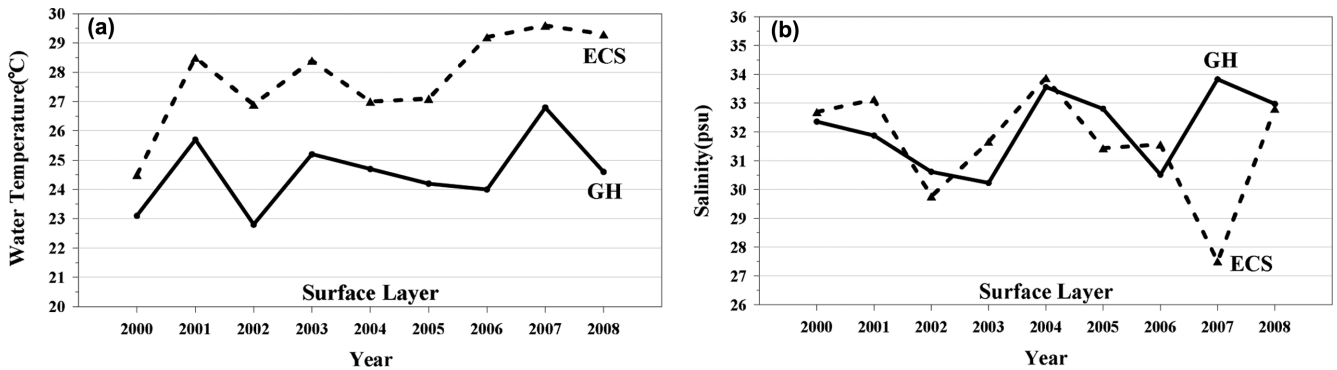


Fig. 15. (a) Variations of surface water temperature in the East China Sea (ECS) and GH in August, (b) Variations of surface salinity in the East China Sea (ECS) and GH in August.

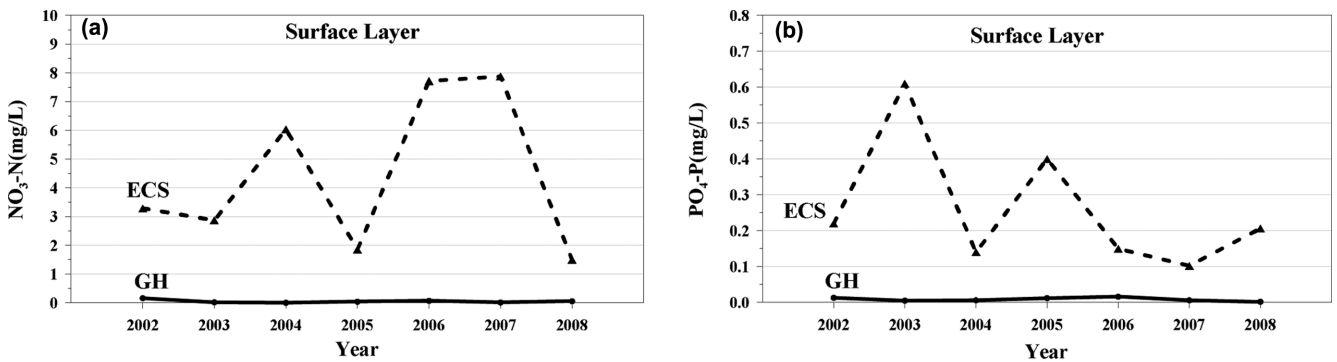


Fig. 16. (a) Variations of surface NO<sub>3</sub>-N concentration in the ECS and GH in August, (b) Variations of surface PO<sub>4</sub>-P concentration in the ECS and GH in August.

았다. 이들 두 해역의 수온과 염분값으로 볼 때, 8월에 고흥 연안에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생할 때 출현하는 고온 및 저염의 해수는 동중국해로부터 유입된 것으로 판단된다.

또한, Fig. 16(a)-(b)는 동중국해 및 고흥 연안에서의 8월의 평균 질산염(NO<sub>3</sub>-N)과 인산염(PO<sub>4</sub>-P) 농도의 연변화를 나타낸다. 이들 결과에 따르면, 질산염과 인산염 농도 모두 동중국해가 고흥에 비해 현저히 높았다. Kim *et al.* [2007]은 *C. polykrikoides*의 생활사가 형태학적으로 다른 두 단계, 즉, 갑옷을 입은 단계(발아하지 않은 휴면포자)와 갑옷을 입지 않은 식물의 성장 단계(발아한 휴면포자)를 거치게 되는데, 이러한 천이가 5월보다 일찍 일어난다는 사실을 밝혔다. 따라서, 만약 8월에 동중국해로부터 고온·고영양염 농도의 해수가 어떤 물리적 요인(예를 들면 하계의 남서풍)에 의해 고흥 연안으로 유입하게 되면 *C. polykrikoides*의 휴면포자가 발아, 집적하여 적조가 발생할 가능성은 충분하다고 사료된다.

### 3.2 적조 발생시 해역의 수평밀도분포

Fig. 17은 고흥연안에서 지난 2000년부터 2013년까지 14년간 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 하계 8월의 표층(0 m)에 있어서의 우리나라 남해안과 중국 Yangtze강 하류를 포함한 동중국해 연안의 수평밀도분포를 나타낸다. 이들 결과는 해에 따라 결측된 정선자료도 포함하고 있어서 전 해역의 면밀한 밀도분포의 검토는 다소 어

려움이 있으나, 고흥 연안의 해수 밀도( $\sigma_t$ )는 대략 21.0 전후를 보인다. 또한, 2000년, 2002년, 2003년, 2004년, 2007년, 2009년, 2010년의 경우는 한국 남해 연안수의 밀도( $\sigma_t=20-22$ )와는 달리, 제주도 남서 해역에 출현하는 비교적 저밀도( $\sigma_t=14-19$ )의 해수를 확인할 수 있다. 이것은 하계에 Yangtze강 하천수의 영향을 받은 중국대륙 연안수(염분 23.50 이하)의 확장에 따른 결과로서, 이 해역 부근을 통과하는 쿠로시오 (평균 수온과 염분을 각각 25.0 °C와 34.6 으로 가정하면  $\sigma_t=23.06$ )와는 뚜렷한 차이를 보인다[이, 1986]. 특히, 적조로 인한 사상 최악의 수산업 피해를 가져온 2013년에는 한국 남해 연안수와 외양수와의 사이에 강한 열염전선( $\sigma_t=20-22$ )이 형성되어 있음을 알 수 있다. 반면, 하계 이상 냉수의 출현으로 인해 적조가 발생하지 않았던 2011년에는 비교적 고밀도의 해수 ( $\sigma_t=21-22$ )가 한국 남해 연안수는 물론 동중국해에도 출현하고 있다. 결과적으로 말해, 상기한 이들 해에 있어서는 대략 제주도를 중심으로 하여 한국 남해 연안수와 양쯔강 하천수의 영향을 받는 중국대륙 연안수와의 사이에 열염전선(thermohaline front)이 존재하고 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 위성 영상 및 수치실험에 의한 적조 발생시의 수평 수온 및 염분 분포

Fig. 18(a)-(d)는 대표적으로 고흥연안에서 하계에 *C. polykrikoides*



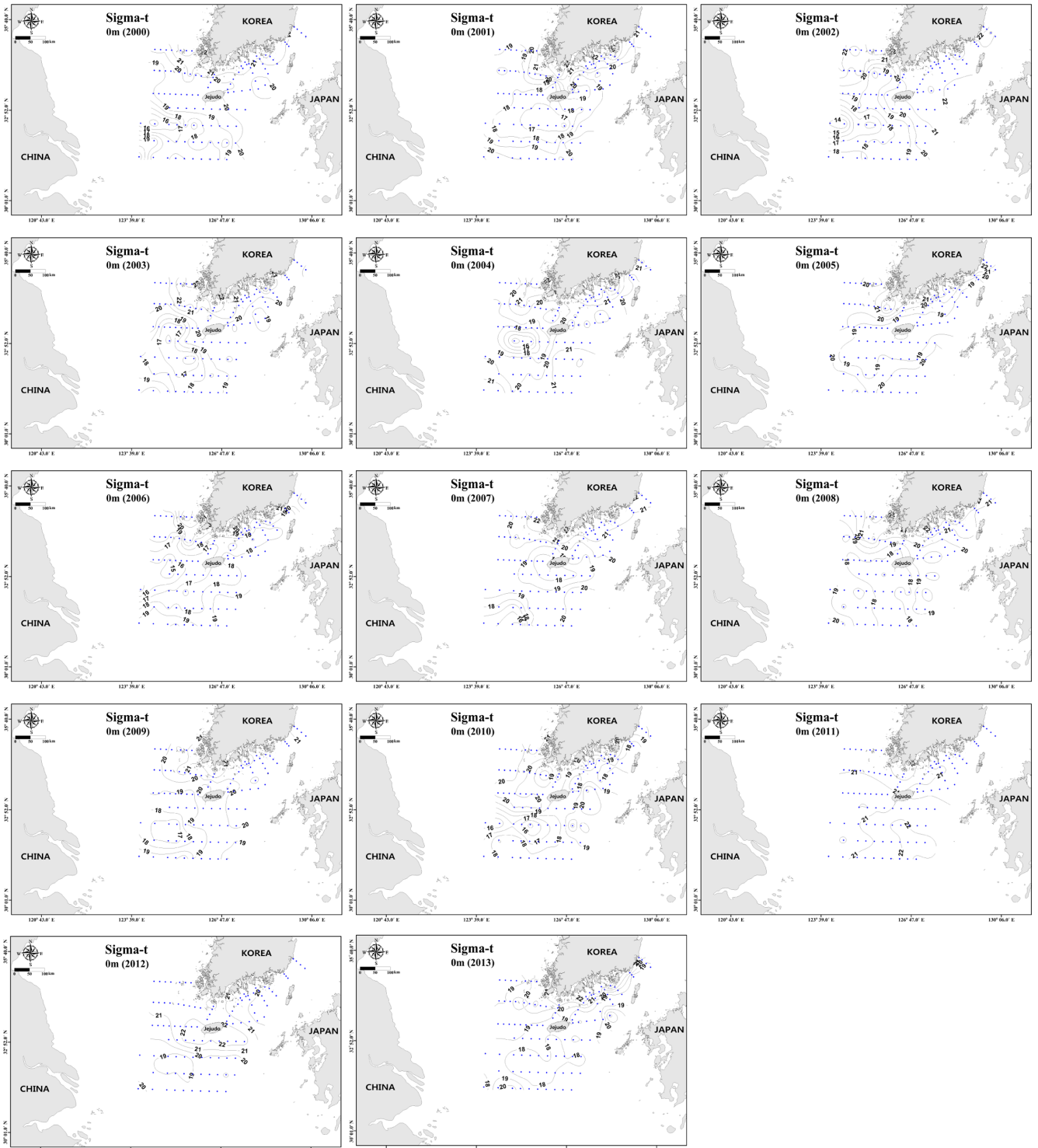


Fig. 17. Horizontal surface density distributions in summer during 2000-2013.

적조가 발생하고 있는 시기에 취득된 NOAA 및 NGSST 위성영상을 보여준다. 이들 결과에 따르면, 먼저 2000년 8월 13일부터 22일까지(Fig. 18(a))의 NOAA-14영상을 보면, 한국 남해안은 수온 24-28°C의 전선이 형성되어 있으며, 또한 양쯔강으로부터 유출한 것으로 추정되는 27-28°C의 해수가 제주도까지 확장하여 영향을 미

치고 있음을 알 수 있다. 한편, 2002년 7월 30일부터 8월 5일까지(Fig. 18(b))의 NOAA-12 영상에서는, 수온 28°C 전후의 양쯔강 하천수가 제주도 주변 해역까지 확산하고 있는 모습이 연상된다.

반면, 2009년 8월 1일(Fig. 18(c))과 27일(Fig. 18(d))의 NGSST(New Generation Sea Surface Temperature) 영상에서는 수온 26-

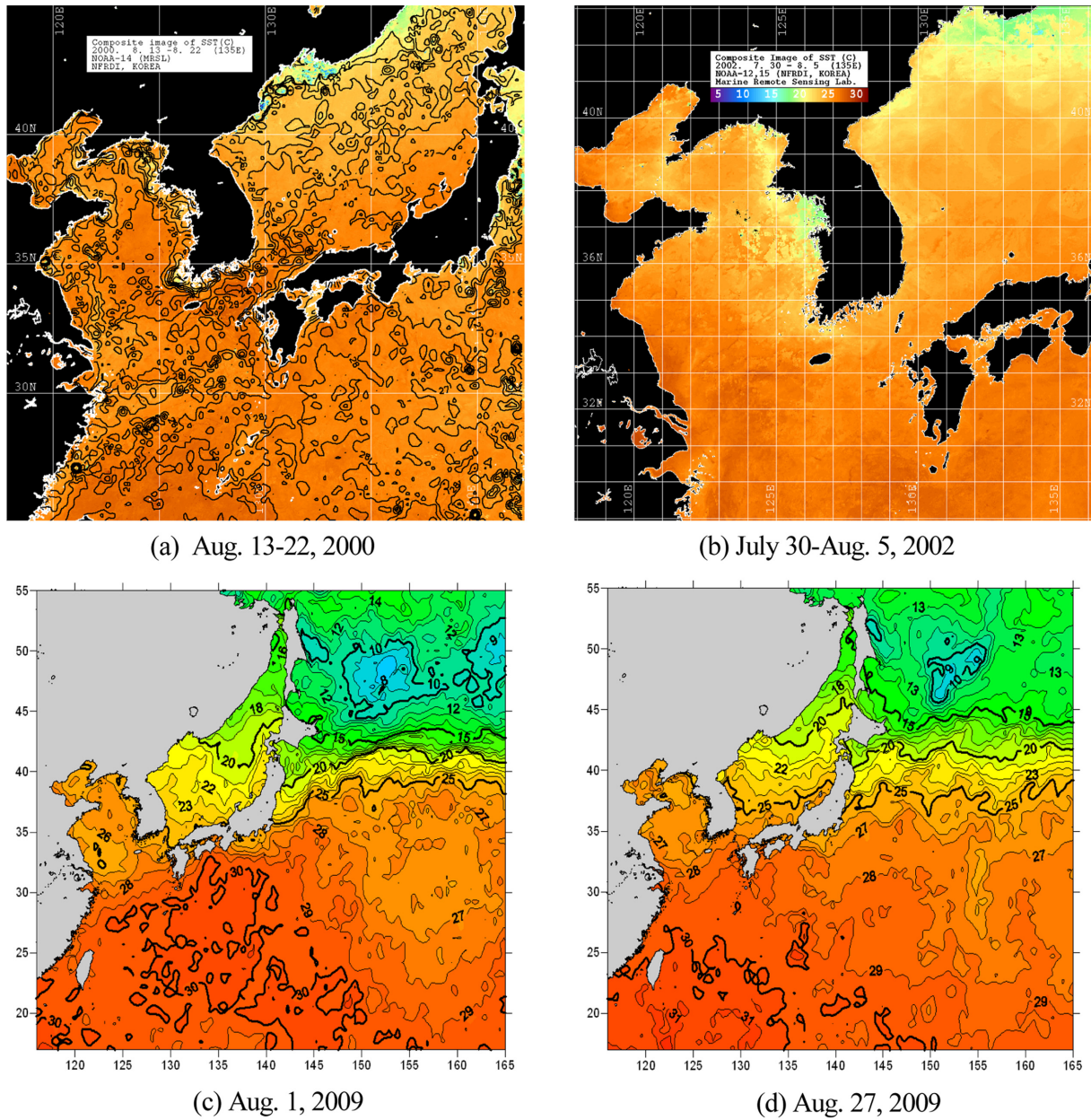


Fig. 18. (a)-(d) NOAA/NGSST satellite images of surface water temperature distributions during *C. polykrikoides* blooms.

27°C(또는 27-28°C)의 양쯔강 하천수가 제주도과 우리나라 남해안까지 확장하여 영향을 주고 있는 것으로 추측된다. 이것은 적어도 하계 고흥을 비롯한 한국 남해안에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생에 있어서 양쯔강 하천수가 영향을 미치거나 기여하고 있음을 시사한다.

한편, Seo *et al.*[2013]는 수치모형 ROMS(Regional Ocean Modeling System)을 사용하여 북서태평양 연변부(northwestern Pacific marginal seas)에 있어서의 열수송량을 계산하였다. ROMS는 Boussinesq 근사, split-explicit, free-surface와 수평방향으로는 a staggered Arakawa C grid를 사용하는 수치모형으로서, biogeochemical, sediment, sea ice 등의 문제에 적용가능하다(본 수치모형에 대한 자세한 설명은

Shchepetkin and McWilliams[2005]을 참고하기 바람). 그들은 또한, ROMS를 사용하여 표층류와 표층 수온 및 염분분포를 계산하고, 현장관측결과 및 NOAA위성자료와 비교·검증을 실시하였다. Fig. 19는 이들이 계산한 2000년부터 2013년까지 14년간의 8월의 표층 염분 분포를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 하계 8월에는 해에 따라 세력의 차이는 있으나 양쯔강 유출수가 한국 남해안에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Cho and Lee[2005]는 염분 변화가 *C. polykrikoides*의 수직이동에 미치는 영향을 조사하기 위해 수조에 일반해수와 담수와 해수를 혼합시킨 시험구를 각각 설정하여 *C. polykrikoides*의 수직부상 속도와 DNA/RNA함량 비교를 실시하였다. 그 결과, 대조구에 비하여 시험

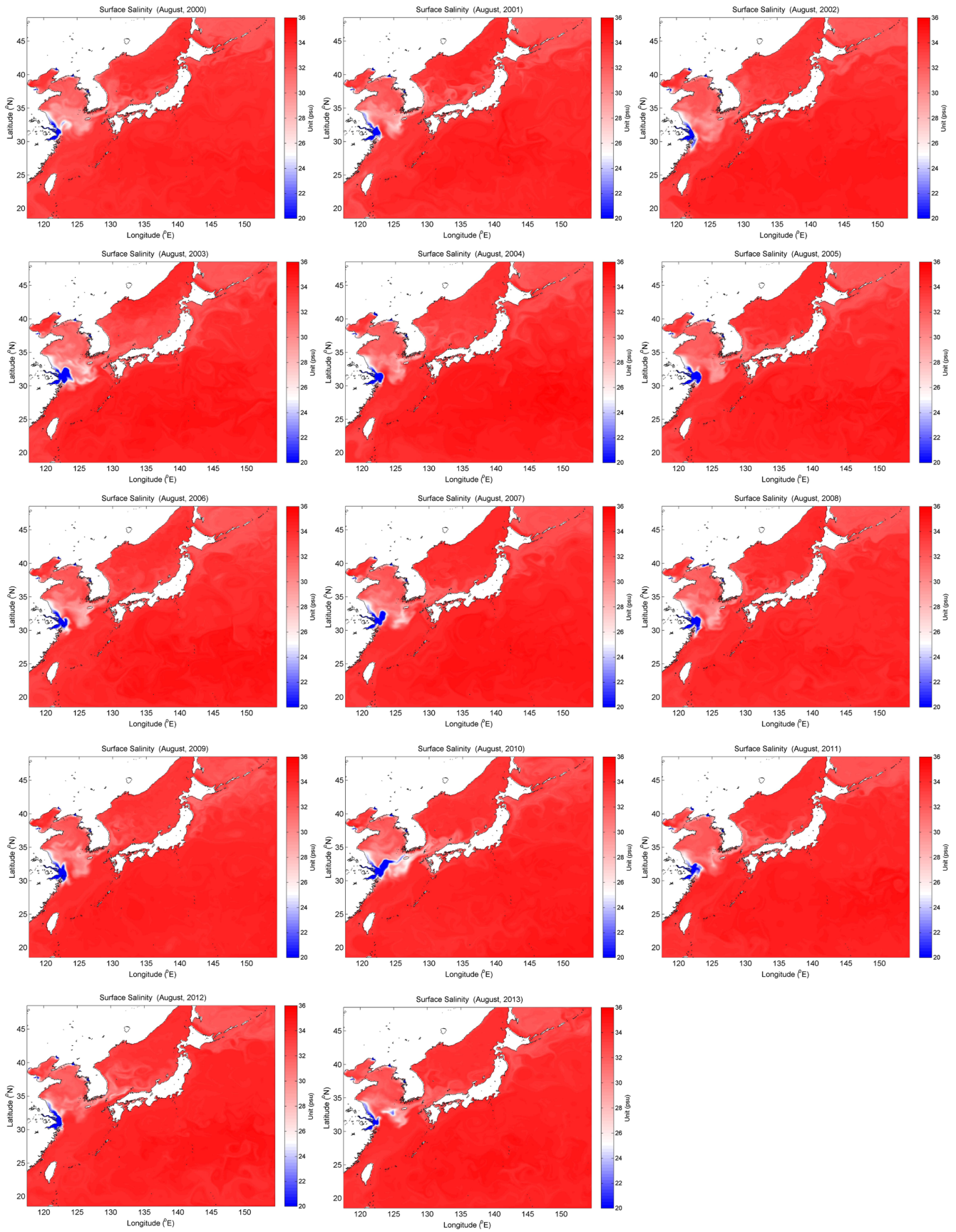


Fig. 19. Horizontal surface salinity distributions in August during 2000-2013(Seo *et al.*[2013]).

구에 분포하고 있는 *C. polykrikoides*의 DNA 및 RNA 변화폭이 높게 나타나, 담수유입이 *C. polykrikoides* 세포에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 지적하였다. 또한, 그들은 담수유입이 많은 해역에서는 *C. polykrikoides*가 신속하게 수직상승하여 어류 등의 대량폐사를 일으킬 가능성을 제기하였다. 따라서, 우리나라 남해안, 특히 하계 고흥 연안의 *C. polykrikoides* 적조 발생에는 적어도 양쯔강 유출수가 상당한 영향을 미치고 있다고 생각된다. 또한, 적조의 최초 발생이 고흥 연안인 것은 양쯔강 유출수가 유입되는 길목에 위치하고 있는 지리적 요인 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

1993년부터 2013년까지 지난 20년간 국립수산과학원이 조사한 *C. polykrikoides* 적조 및 해양환경 관측자료, NOAA 및 NGSST (New Generation Sea Surface Temperature) 위성영상자료 등을 사용하여 한국남해 연안수와 중국연안수(또는 양쯔강 유출수)와의 사이에서의 열염전선의 형성 유무를 검토하였다. 특히, *C. polykrikoides* 적조의 최초발생지로 알려진 고흥 연안의 해역 특성을 파악하기 위하여 거제 해역과 동중국해의 해역, 그리고 Seo *et al.*[2013]의 수치실험결과와 비교하였다. 얻어진 주요결과는 다음과 같다.

(1) 지금까지 우리나라에 있어서의 *C. polykrikoides* 적조는 주로 하계인 8월을 중심으로 가장 많이 발생하였으나, 적조의 최초발생 시기는 해를 거듭함에 따라 점차 빨라지는 추세를 나타내었다.

(2) 8월의 고흥 해역의 수온은 대조 해역인 거제와 유사한 반면, 염분은 거제 해역에 비해 다소 높았다. 또한, 고흥 해역은 거제 해역과는 달리 표층과 저층간의 수온이나 염분의 차이가 크지 않았다. 따라서, 고흥에서는 8월에 성층이 매우 미약하게 형성되거나 형성되지 않을 가능성이 있다.

(3) 고흥과 거제 해역의 용존산소와 영양염 농도는 큰 차이를 보이지 않았으며, 또한 DIN/DIP의 값, 즉 Redfield ratio는 4.23-7.2 ( $\mu\text{M}$ 으로 환산하면, 10.04-15.91)로, 두 해역 모두 *C. polykrikoides* 적조 발생에 있어서 질산염이 제한인자임을 알 수 있다.

(4) 특히, 고흥 연안에서의 수온은 북쪽의 여자만으로부터 남쪽의 나로도 쪽으로 남하할수록 증가하는 반면, 염분은 감소하는 경향을 보였다. 이것은 하계인 8월에 나타나는 고흥 연안의 고온 현상이나 염분 저하는 여자만 등의 내만으로부터의 육수 유입에 따른 결과가 아니라, 외해수의 유입에 따른 결과임을 시사하였다.

(5) 동중국해(정점 317-22)의 8월의 표층에서의 평균 수온은 고흥 연안에 비해 약 3.0 °C 이상 높은 반면, 염분은 고흥 연안이 동중국해에 비해 다소 높았다.

(6) 동중국해의 8월의 질산염( $\text{NO}_3\text{-N}$ )과 인산염( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) 농도는 모두 고흥에 비해 현저히 높았다. 따라서, 8월에 동중국해로부터 고온·고영양염의 해수가 어떤 물리적 요인(예를 들면, 하계의 남서풍)에 의해 고흥 연안으로 유입하게 되면 *C. polykrikoides*의 휴면포자가 발아, 집적하여 적조가 발생할 가능성은 충분하다고 사료된다.

(7) 수평방향의 밀도( $\sigma$ ) 분포, 위성영상자료 및 Seo *et al.*[2013]

에 의한 수치실험결과 등을 검토한 결과, 8월에는 대략 제주도를 중심으로 하여 한국 남해 연안수와 양쯔강 하천수의 영향을 받고 중국대륙 연안수와 사이에 열염전선(thermohaline front)이 존재하며, 양쯔강 유출수가 한국 남해안에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되었다.

(8) 따라서, 우리나라 남해안, 특히 하계 고흥 연안에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생에 양쯔강 유출수가 상당한 영향을 미치고 있으며, 또한, 적조가 매년 고흥 연안(즉 나로도 해역)에서 최초로 발생하는 것은 이곳이 양쯔강 유출수가 유입되는 길목에 위치하고 있다는 지리적 요인 때문으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 2014년도 전남대학교 연구년 교수연구비 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 깊은 감사를 표합니다.

#### References

- [1] Anton, A., Teoh, P.L., Mohd-Shaleh, S.R., and Mohammad-Noor, N., 2008, "First occurrence of *Cochlodinium* blooms in Sabah, Malaysia", *Harmful Algae*, Vol.7, No.3, 331-336.
- [2] Cho, E.S. and Choi, Y.K., 2005, "The characteristics of marine environment and phytoplankton community around southwestern waters for ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* monitoring programme", *J. Environmental Sciences*, Vol.14, No.2, 177-184.
- [3] Cho, E.S. and Lee, Y.S., 2005, "Effect of salinity-stratified waters on upward migration and ratio of extracted DNA/RNA in *Cochlodinium polykrikoides* Margalef based on the ratio of absorbance at 260 and 280 nm", *J. Life Science*, Vol.15, No.3, 468-473.
- [4] Choi, H.Y., 2001, "Oceanographic condition of the coastal area between Narodo Is. and Solido Is. in the Southern Sea of Korea and its relationship to the disappearance of red-tide observed in summer 1998", *J. Korean Soc. Oceano.*, Vol.6, No.2, 49-62.
- [5] Gobler, C.J., Berry, D.L., Anderson, O.R., Burson, A., Koch, F., Rodgers, B.S., Moore, L.K., Goleski, J.A., Allam, B., Bowser, P., Tang, Y., and Nuzzi, R., 2008, "Characterization, dynamics, and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms on eastern Long Island, NY, USA", *Harmful Algae*, Vol.7, No.3, 293-307.
- [6] Gobler, C.J., Burson, A., Koch, F., Tang, Y., and Mulholland, M.R., 2012, "The role of nitrogenous nutrients in the occurrence of harmful algal blooms caused by *Cochlodinium polykrikoides* in New York estuaries (USA)", *Harmful Algae*, Vol.17, 64-74.
- [7] Jung, C.S., Lee, C.K., Lee, Y.C., Kim, S.G., Kim, H.G., Chung, I.K., and Lee, W.A., 2002, "The outbreak, maintenance, and decline of the red tide dominated by *Cochlodinium polykrikoides* in the coastal waters off Southern Korea from August to October, 2000", *J. Korean Soc. Oceano.*, Vol.7, No.2, 68-77.

- [8] Kim, C.J., Kim, H.G., Kim, C.H., and Oh, H.M., 2007, "Life cycle of the ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waters", *Harmful Algae*, Vol.6, No.1, 104-111.
- [9] Knauss, J.A., 1978, "Introduction to physical oceanography", Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 1-338.
- [10] Kwak, M.T., Seo, K.H., Cho, Y.K., Kim, B.G., You, S.H., and Seo, J.W., 2015, "Long-term comparison of satellite and in-situ sea surface temperature around the Korean Peninsula", *Ocean Science Journal*, Vol.50, No.1, 109-117.
- [11] Kwon, H.K., Kim, H.J., Yang, H.S., and Oh, S.J., 2014a, "The importance of dissolved organic nutrients on the interspecific competition between the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* and diatom *Skeletonema* sp.", *J. Korean Soc. Oceano.*, Vol.19, No.4, 232-242.
- [12] Kwon, H.K., Kim, H.J., Yang, H.S., and Oh, S.J., 2014b, "Non-outbreak cause of *Cochlodinium* bloom in the western coast of Jaran Bay in summer, 2013", *J. Korean Soc. Marine Environment and Safety*, Vol.20, No.4, 372-381.
- [13] Lee, D.K., 2008, "*Cochlodinium polykrikoides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea", *Harmful Algae*, Vol.7, No.3, 318-323.
- [14] Lee, M.O. and Choi, J.H., 2009, "Distributions of water temperature and salinity in the Korean Southern Coastal Water during *C. polykrikoides* blooms", *J. Korean Soc. for Mar. Environ. Eng.*, Vol.12, No.4, 235-247.
- [15] Lee, M.O. and Kim, J.K., 2008, "Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea", *Mar. Environ. Research*, Vol.65, No.2, 128-147.
- [16] Lee, S.W., 1986, "Introduction to physical oceanography", Jipmundaong, Seoul, 1-268.
- [17] Lee Y.S. and Lee, S.H., 2006, "Factors affecting outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in coastal areas of Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, Vol.52, No.10, 626-634.
- [18] Lee, Y.S., Park, Y.T., Kim, Y.S., Kim, K.Y., Park, J.S., Go, W.J., Jo, Y.J., and Park, S.Y., 2001, "Countermeasure and outbreak mechanism of *Cochlodinium polykrikoides* red tide 1. Environmental characteristics on outbreak and disappearance of *Cochlodinium polykrikoides* blooms", *J. Korean Soc. Oceano.*, Vol.6, No.4, 259-264.
- [19] Lewitus, A.J., Horner, R.A., Caron, D.A., Garcia-Mendoza, E., Hickey, B.M., Hunter, M., Huppert, D.D., Kudela, R.M., Langlois, G.W., Largier, J.L., Lessard, E.J., Ralonde, R., Rensel, J.E., Strutton, P.G., Trainer, V.L., and Tweddle, J.F., 2012, "Harmful algal blooms along the North American west coast region: History, trends, causes, and impacts", *Harmful Algae*, Vol.19, 133-159.
- [20] Lim, A.S., Jeong, H.J., Jang, T.Y., Jang, S.H., and Franks, P.J.S., 2014, "Inhibition of growth rate and swimming speed of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* by diatoms: Implications for red tide formation", *Harmful Algae*, Vol.37, 53-61.
- [21] Oh, S.J., Yoon, Y.H., Kim, D.I., Shimasaki, Y., Oshima, and Y., Honjo, T., 2006, "Effect of light quantity and quality on the growth of the harmful dinoflagellate", *Cochlodinium polykrikoides* Margalef (Dinophyceae), *Algae*, Vol.21, No.3, 311-316.
- [22] Seo, G.H., Cho, Y.K., and Choi, B.J., 2013, "Variations of heat transport in the northwestern Pacific marginal seas inferred from high-resolution reanalysis", *Progress in Oceanography*, Vol.121, 98-108.
- [23] Shchepetkin, A.F. and McWilliams, J.C., 2005, "The regional ocean modeling system: a split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model", *Ocean Modelling*, Vol.9, 347-404.
- [24] Suh, Y.S., Jang, L.H., and Kim, H.G., 2003, "Relationships between spatio-temporal distributuio of *C. polykrikoides* red tide and meso-scale variation of oceanographic environment around the Korean Waters", *J. Korean Assoc. Geo. Info. Studies*, Vol.6, No.3, 139-150.
- [25] Yang, J.S., Choi, H.Y., Jeong, H.J., Jeong, J.Y., and Park, J.K., 2000, "The outbreak of red tides in the coastal waters of Kohung, Chonnam, Korea: 1. physical and chemical characteristics in 1997", *J. Korean Soc. Oceano.*, Vol.5, No.1, 16-26.

---

Received 16 June 2015

1st Revised 14 July 2015, 2nd Revised 3 August 2015

Accepted 6 August 2015