

2000년 여름 남해안에 나타난 *Cochlodinium polykrikoides* 우점 적조의 발생 특성

임월애* · 정창수 · 이창규 · 조용철¹ · 이삼근 · 김학균 · 정익교²

국립수산과학원 해양환경부,

¹청평내수면연구소, ²부산대학교 해양학과

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

WOL-AE LIM, CHANG-SU JUNG, CHANG-KYU LEE, YONG-CHUL CHO¹, SAM-GEUN LEE,
HAK-GYOON KIM AND IK-KYO CHUNG²

Oceanography and Marine Environment Department, National Fisheries Research &
Development Institute, Busan 619-902, Korea

¹Chongpppyong Inland Fisheries Institute, National Fisheries Research & Development
Institute, Gyeonggi 477-815, Korea

²Dept. of Marine Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

2000년 한반도 남해안에서 발생한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 초기발생, 진행과 소멸현상을 현장과 NOAA 위성 표층수온 자료를 이용하여 검토하였다. 일반적으로 *C. polykrikoides* 적조는 1995년에서 1999년에는 적조 때가 고흥 나로도해역에서 최초 발생되었으나, 2000년에는 여수해만 해역에서 최초로 발생되었다. 이는 한반도 남해 해역에서 여러 해수가 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다: 1) 대마난류와 남해연안류, 2) 진도냉수대와 남서해 연안 수 및 3) 남동연안의 저온수와 외양난류수. 이 기간동안 실시한 현장조사에서는 *C. polykrikoides*의 유영세포가 이들의 경계역에 집적되는 경향을 나타내었는데, 특히 8월말에 대마난류와 남해연안류 사이의 남해 해양전선이 여수 해만에서 형성되어 2000년 *C. polykrikoides* 적조가 바로 이 지점에서 시작하는 것을 관찰할 수 있었다(8월 22일). 이 *C. polykrikoides* 우점 적조는 *Alexandrium tamarense*, *Gymnodinium mikimotoi*, *Skeletonema costatum*, 그리고 *Chaetoceros* spp.와 혼합하여 발생하였다. 적조발생 기간 중에 한반도에는 'Prapiroon'과 'Saomai' 2개의 태풍이 *C. polykrikoides* 적조세력에 영향을 미쳤다. 태풍 'Prapiroon'이 통과한 후 *C. polykrikoides* 유영세포의 수는 최대를 보였고, 태풍 'Saomai' 통과 후 적조는 소멸하였다(9월 20일). 10월 5일에는 진해만과 한산-거제만에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생하였는데, 이때의 위성사진은 22°C의 수온전선이 한산-거제만을 거쳐 진해만까지 깊숙이 관입되어 있었으며, 적조발생해역 및 현장수온도 일치하고 있었다. 또한 이 지역에서 가을과 겨울철에 우점 출현하는 *Akashiwo sanguinea*(=*Gym. sanguineum*)와 *C. polykrikoides*이 함께 적조를 형성하였다.

We investigated the outbreak, maintenance, and decline of the red tide dominated by *C. polykrikoides* in the coastal waters off Southern Korea from August to October, 2000, by combining field data and NOAA satellite images. In general, the *C. polykrikoides* blooms, which have occurred annually in Korean coastal waters from 1995 to 1999, initiate between late August and early September around Narodo Island and expand to the whole area of the southern coast. However, initiation and short-term change of the bloom of 2000 were quite different from the pattern observed previously. In mid-August, thermal fronts in sea surface temperature(SST) were formed: 1) between the Tsushima Warm Current Water (TWCW) and the Southern Korean Coastal Waters (SKCW), 2) between the Jindo cold water mass and the southwestern coastal waters, and 3) between the upwelled cold waters in the southeast coast and the offshore warm waters. Free-living cells of *C. polykrikoides* were concentrated in these frontal regions. In late August, the thermal front TWCW-SKCW approached the mouth of Yeosuhae Bay where Seomjin River water and anthropogenic pollutants from the Industrial Complex of Gwangyang Bay are discharged. In the blooms of 2000 initiated in Yeosuhae Bay in late August, the dominant species, *C. polykrikoides*, co-occurred with *Alexandrium tamarense*, *Gymnodinium mikimotoi*, *Skeletonema*

*Corresponding author: limwa@nfrda.re.kr

coastatum, and *Chaetoceros* spp. Two typhoons, 'Prapiroon' and 'Saomai' during the *C. polykrikoides* bloom probably affected the abundance of this species. After the former typhoon passed the Korean Peninsula, cell growth of *C. polykrikoides* was maximal, but after the latter typhoon, the *C. polykrikoides* bloom disappeared (20 September). On 5 October, the blooms dominated by *C. polykrikoides* broke out within the coastal waters of Jinhae Bay and Hansan-Keoje Bay. NOAA satellite images showed that the isothermal line of 22°C extended into Jinhae Bay. In this bloom, *C. polykrikoides* also occurred simultaneously with *Akashiwo sanguinea* (= *Gymnodinium sanguinum*), a common red tide-forming dinoflagellate species in fall and winter in these coastal bays.

Key words: *Cochlodinium polykrikoides*, Tsushima Warm Current Water, South Korean coastal waters, Typhoon

서 론

와편모조류인 *C. polykrikoides*는 1995년 한반도 남·동해안에서 8월과 9월에 걸쳐 대규모 적조를 일으킨 이후 매년 유사한 시기에 반복하여 발생하고 있는데, 1998년과 1999년에는 서해 군산 연안에서도 발생하여, *C. polykrikoides*에 의한 적조발생은 우리나라 전 연안에서 자연 환경은 물론 사회·경제적으로도 심각한 문제를 야기해 왔다(Kim, 1997; 김 등, 1998b; 김 등, 1999a; 김 등, 2000). 예를 들어, *C. polykrikoides*의 대증식으로 인한 양식어류의 대량 폐사 및 이를 구제하기 위한 막대한 양의 황토살포는 막대한 경제적 손실을 초래하고 있지만, *C. polykrikoides* 적조의 발생 및 생리·생태학적 현상은 아직까지 명확하게 밝혀져 있지 않아 이에 대한 연구가 지속되고 있다.

*C. polykrikoides*의 대증식과 관련된 그 동안의 연구에서 제시된 적조발생 기작들을 살펴보면, 물리·화학적 측면의 연구결과는, 첫째, 수온약층이 초기에 소멸되면서 표·저층수의 혼합에 의한 저층의 풍부한 영양염류의 표층 공급과 수온 상승이 *C. polykrikoides*의 세포증식을 일으킨다는 주장(김 등, 1999b; 이 등, 2001a)과 이와는 반대로, 남해 외해역으로부터 저층수의 유입이 *C. polykrikoides* 적조발생에 주요 원인으로 작용한다는 연구결과도 보고되고 있다(최, 2001). 또한, 양 등(2000)은 나로도해역에서 해수 물성과 영양염류의 분포를 조사한 결과 높은 영양염류, 고온, 저염의 특성을 가진 양자강 희석수의 간헐적 유입이 *C. polykrikoides* 적조의 발생 및 소멸을 일으킨다고 하였다. 생물학적 측면에서 적조발생 기작을 살펴보면, 정 등(1999b)은 *C. polykrikoides* 적조발생해역에서 동·식물플랑크톤간의 현존량역상관 관계를 나타내므로 동물플랑크톤이 식물플랑크톤의 양적 변화에 관여하고 있음을 설명하였다. 그리고, 정 등(2000a)은 또한 종속영양성 와편모조류와 섬모충들의 시공간적인 분포가 식물플랑크톤의 분포와 밀접한 관계가 있음을 제시하고 이를 적조생물 포식에 대한 기초자료를 제공하였다. 정 등(2000b)은 유해생물의 최대성장률을 고려하여 적조발생 기작을 설명하였는데, 나로도해역에서의 유해적조는 물리적인 이동 및 집적과 적조원인생물과 다른 식물플랑크톤간의 경쟁에 의해 영향을 받는다고 하였다. 최근에는 적조 종과 이들에 의한 적조 발생에 적합한 물리환경과의 관계를 분석하기 위하여 원격탐사 관측 방법도 응용되어, NOAA위성에 의해 관측한 표층 수온 분포와 *C. polykrikoides* 적조발생 사이의 연관성을 보고하고 있다(서 등, 2000).

이와 같은 *C. polykrikoides*에 대한 많은 연구 결과들은 수온이 24~27°C 정도인 8월에서 9월에 나로도 주변해역에서 해수의 물

리적인 작용에 의한 영양염류의 공급에 의해 최초로 *C. polykrikoides* 적조가 발생했다는 것을 보여주었다. 그러나 아직 본 종의 뚜렷한 발생 기작을 규명하지 못하고 있으며, 차후 많은 연구의 필요성을 공통적으로 제시하고 있다.

그러나 위와 같은 결론들은 *C. polykrikoides* 적조발생 기작을 일반화하여 다음의 사항을 설명하기는 어렵다. 첫째, 왜 한반도 남해연안에서의 *C. polykrikoides* 적조는 1980년대에는 낙동강, 진해만의 당동, 남해도 동·서쪽 등 육상 오염물질의 부하가 비교적 높게 발생하는 해역에서 발생하였으나(김 등, 2001a), 최근 들어(1995, 1997-1999년) 비교적 외해역인 고흥 나로도 해역에서 발생하고 있을까? 모든 식물플랑크톤들은 영양염류가 풍부한 해역에서는 활발한 증식이 가능하나, 영양염류 제한이 발생한 해역에서 활발한 증식을 기대하기 어렵다(Bernhard and Peele, 1997; Holmboe et al., 1999). *C. polykrikoides*의 적조발생은 영양염류의 공급 없이는 지속적인 증식이 불가능하며 이와 같은 관점에서 풍부한 영양염류를 가진 연안수의 영향이 활발한 증식을 가능하게 할 것이다. 둘째, *C. polykrikoides*적조는 8월말과 9월이 주성기로 알려져 있으나, 1993년 남해 미조 연안과 1998년, 1999년 전북 군산해역에서 수온이 다소 낮은 10월에도 적조발생이 있었다. 이러한 결과를 볼 때, *C. polykrikoides* 적조 발생을 8월과 9월의 시기에만 한정시킬 수는 없을 것이다.

본 연구에서는 2000년 한반도 남해안에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조의 발생 특성이 그 동안의 연구에서 나타난 일반적인 결론과 다소 상이한 현상을 나타내고 있어, 2000년의 현장관측 자료를 이용하여 *C. polykrikoides* 적조현상과 관련된 그 발생 기구의 또 다른 한 설명 가능성을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에서는 2000년 한반도 남해에서의 *C. polykrikoides*의 유영세포 출현양상과 이 세포들이 어떠한 발생환경 조건에 의해 대발생하여 진행하고, 소멸하는가를 조사하기 위하여, Kuroshio 지류가 흐르는 제주도 부근해역과 남해연안류와 대마해류가 만나는 남해연안을 정점으로 정하였다(Fig. 1a). 조사 시기는 7월 19-20일, 8월 5-6일, 그리고 8월 14-18일 3회에 걸쳐 적조발생 환경에 대한 사전조사를 실시하였으며, 선박은 국립수산과학원의 탐구 3호를 이용하여 실시하였다. *C. polykrikoides*적조발생 이후는 국립수산과학원의 탐구 9호를 이용하여 나로도, 남해도, 통영, 부산 연안에 대하여 *C. polykrikoides*의 세포수 및 발생 범위를 매일 조사하였다(Fig. 1b). 강수량은 여수시 기상관측소에서 관측한 자료

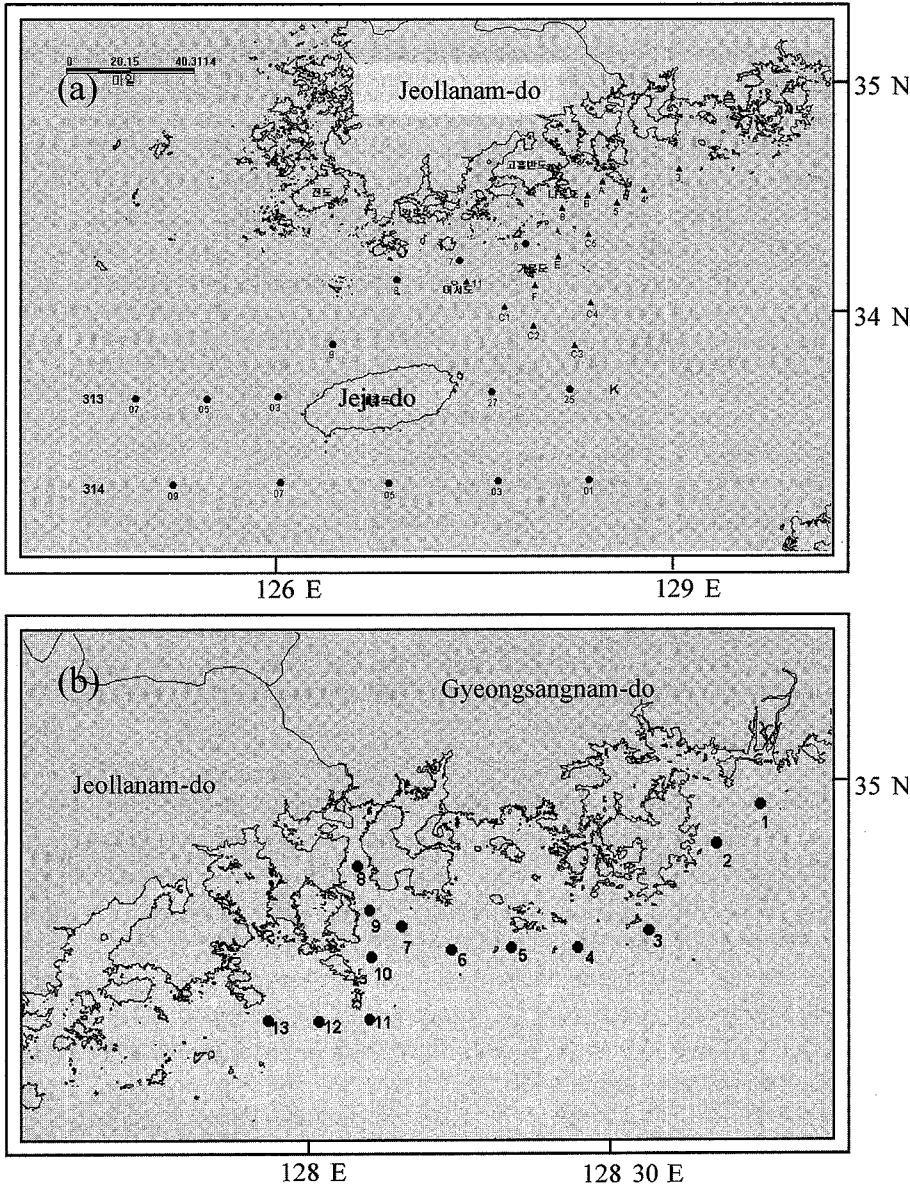


Fig. 1. Maps showing the study area (a) before outbreak of *C. polykrikoides* blooms, (b) after breakout.

를 이용하였다(Fig. 2). 수온은 CTD(SeaBird, SBE-25)를 이용하여 측정하였으며, *C. polykrikoides*의 적조 발생 전 유영세포의 관찰은 낮 시간대(11:00-15:00)에 표층 해수 5 L를 15 µm sieve로 여과, 농축하여 현미경(Nikon Alphaphot-2)으로 선상에서 현장관찰을 하였으며, 세포수는 3회 이상 반복 검경하여 평균하였다. 적조 발생 후의 *C. polykrikoides*의 세포수는 적조발생해역의 표층수를 채수하여 검경하였다. 나 등(1997)과 정 등(1999a)의 *C. polykrikoides*의 현장 일주운동 실험결과에서 *C. polykrikoides*은 낮 시간대(11:00-16:30)에 표층에서 4 m층까지 밀도가 집중되어 있어 표층수로 *C. polykrikoides*의 세포수를 관찰하여도 좋을 것으로 판단했다. 현장에서 조사한 *C. polykrikoides* 적조의 발생 범위 및 변동에 따른 표층수온의 영향을 조사하기 위하여 국립수산진흥원의 2000년 8월 13-22일, 8월 23-29일, 8월 30일, 9월 2일, 9월 7일, 9월 19일, 9월 23-24일, 10월 5일의 주간해황 예보자료를 이용하여 비교하였다.

결 과

2000년 *C. polykrikoides* 적조 발생 개요

2000년 *C. polykrikoides* 적조발생을 요약하면 1) 8월 22일 여수해만에서 최초 발생되었으며, 2) 8월 31일의 태풍 ‘Prapiroon’ 이후 *C. polykrikoides*의 세포수는 더욱 증대되어, 최대밀도 15,000 cells/ml를 나타내었고, 9월 7일에는 동해 남부해역까지 확산되어 출현하였으나, 9월 12일 태풍 ‘Saomai’ 이후 적조는 소멸되었다(Fig. 2). 3) 10월 5일 한산-거제만 및 진해만 서쪽 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 재발생하여 13일간 지속되다 소멸하였다.

Fig. 2는 남해도 부근해역에서 계수된 *C. polykrikoides* 최대 세포밀도이며, 7월 24일에서 27일의 강우는 *C. polykrikoides* 지속적인 세포 증식을 시켰으며, 8월 3일의 강우도 증식에 큰 영향을 미친 것으로 나타났다.

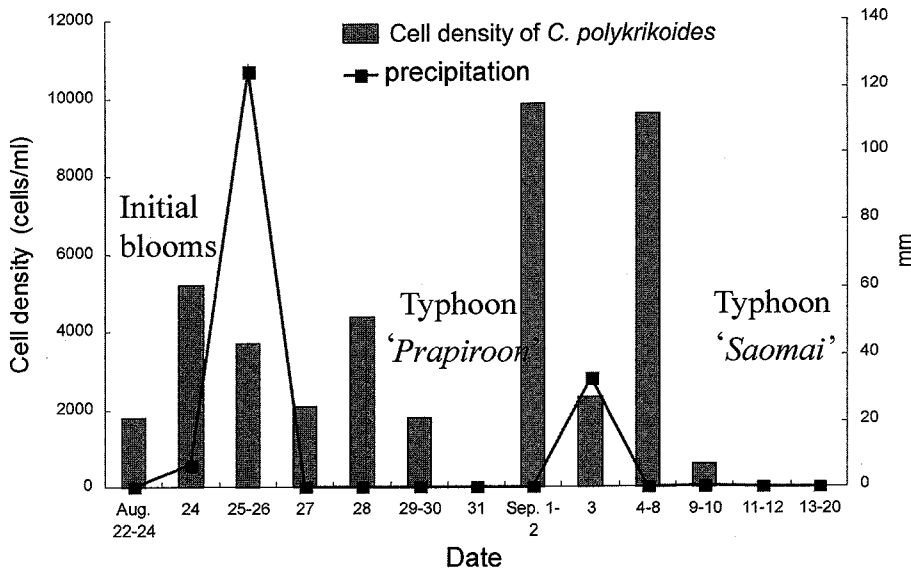


Fig. 2. Temporal variation of *C. polykrikoides* cell density around Namhae Island from August to October, 2000.

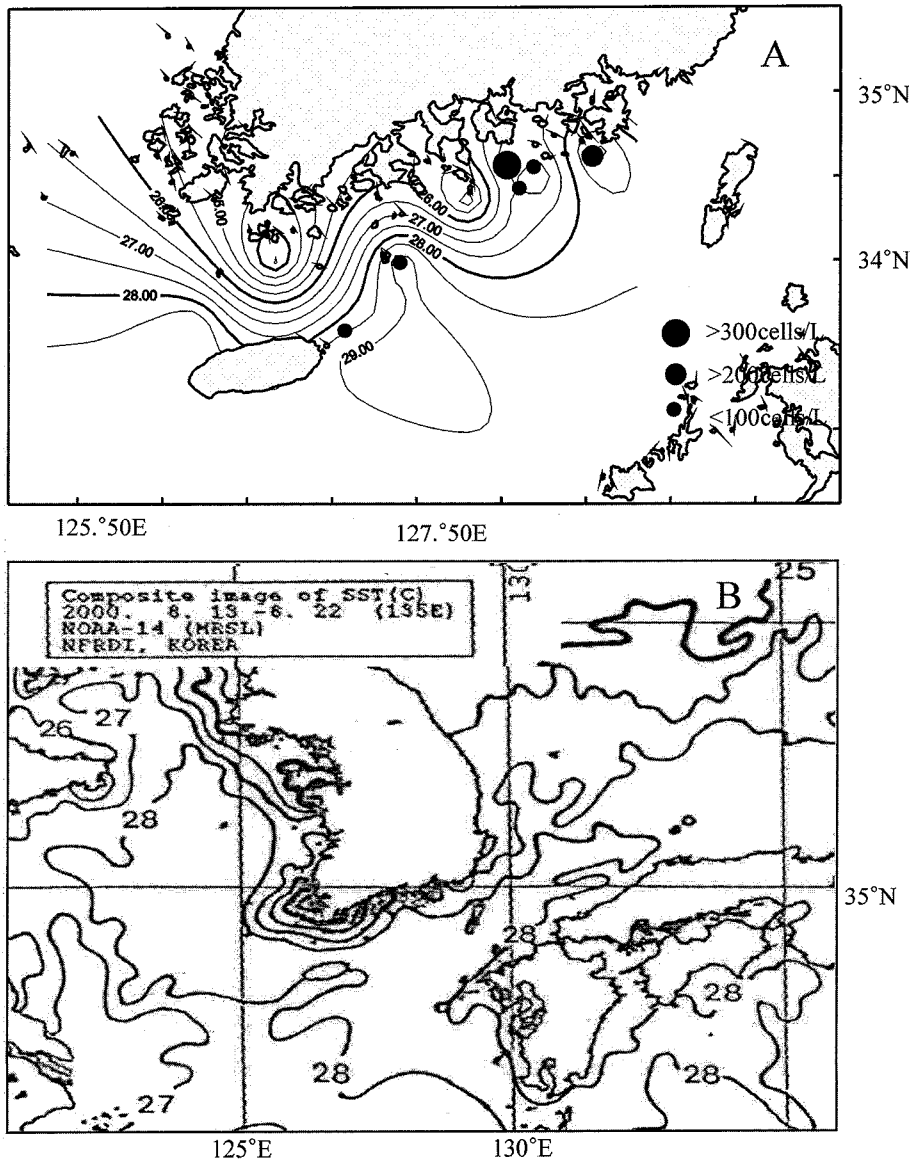


Fig. 3. Horizontal distribution of surface temperature and abundance of *C. polykrikoides* on August 14-18, 2000(A), NOAA satellite image of surface water temperature on August 13-22, 2000(B).

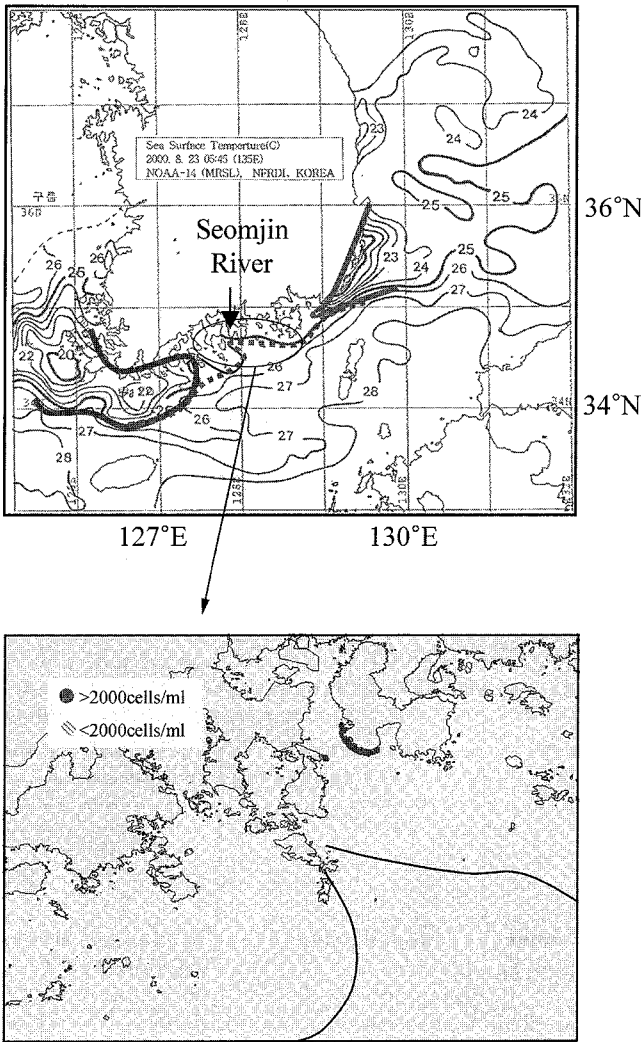


Fig. 4. NOAA satellite image of surface water temperature just after the outbreak of *C. polykrikoides* blooms in Korean waters on August 23-29, 2000 (○ Zone of the first outbreak of *C. polykrikoides* blooms in 2000).

최초 적조 발생

유해적조가 발생하기 직전인 8월 14-18일의 현장조사에서는 *C. polykrikoides*의 유영세포가 남해안 연안 및 제주도 부근해역에서 널리 분포하고 있었고. 연안수와 외양수 사이의 수온전선대에 집중되어 있다는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 3A). 또한, 수온 위성 자료도 이와 비슷한 양상을 나타내었다(Fig. 3B). 2000년 8월 23-29일 기간의 적조발생 초기 인공위성 표층수온 분포도를 살펴보면, 한반도 남해 동·서쪽에 각각 저수온대가 형성되어 있으며 또한 연안 가까이 연안수와 외양수의 수온전선대가 형성되어 있었다(Fig. 4). 이 기간 중 *C. polykrikoides* 적조발생 시의 식물플랑크톤 군집조성을 보면(Table 1), 외편모조류인 *Gymnodinium mikimotoi*, *Alexandrium tamarense*와 규조류인 *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* spp. 등이 혼합 출현하는 것으로 나타났다.

적조진행과 소멸

8월 22-30일 기간에 여수 해만과 통영주변해역에 머물렀던 적조띠는 남해 동쪽 해역의 저수온대가 사라지면서 동쪽의 거제도 주변까지 이동하였던 반면, 서쪽 해역으로의 이동이 나타나지 않았다. 이 현상은 이 기간에 남해 서쪽 해역에서 발생하였던 진도 부근의 저수온 수괴의 출현에 의하여 설명될 수 있을 것 같다. 9월 2일 부산해역에서 다시 15-20°C의 저수온대가 형성되면서 동쪽 해역의, *C. polykrikoides* 적조도 점차 그 세력이 약해지는 경향을 보였으나, 9월 7일 경에는 냉수대 소멸과 더불어 거제 동쪽의 적조가 해류를 따라 동쪽으로 이동한 듯 부산 연안해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 다시 출현하는 것으로 관찰되었다(Fig. 5). 2차 태풍 'Saomai' 소멸 후부터(9월 16일 이후) 연안수온은 9월 23-24일까지 급격히 내려갔고(Fig. 6), *C. polykrikoides* 유영세포는 거제도 남쪽 여차 부근해역에서만 1~2 cells/ml가 발견되었다(Fig. 6A). 10월 5일에는 한산-거제만과 진해만의 가조도 부근해역에서 *C. polykrikoides*의 적조가 발생하였는데, 이때의 위성사진과 현장조사 결과를 비교해 보면, 22°C의 수온전선이 한산-거제만을 거쳐 진해만까지 깊숙이 관입되어(현장 관측 수온 22.0°C) 적조발생해역과도 일치하고 있다는 것을 알 수 있다(Fig. 7).

Table 1. The characteristic of *C. polykrikoides* blooms occurred with other phytoplankton which responsible for red tides from August to October, 2000 (unit: cells/ml)

Date	Area	Cochl.	Al.	Gym.	Skel.	Ch.	C.
8.21-22	Yeosu	50-410	200-410	140-910	-	-	-
	Namhae	200-4,200	-	200-3,800	-	-	-
	Tongyeong	10-60	20-10,000	20-800	-	-	-
8.28-30	Yeosu	120-1,380	-	-	4,300-24,000	3,600-4,800	-
	Tongyeong	100-2,400	500-6,000	-	-	-	-
9.5-7	Gijang	2-130	-	-	800-1,200	1,000-2,000	-
9-12	Keoje	550-2,500	150-850	300	-	-	-
10. 8-18	"	200-2,600	-	*	-	-	350
				300-1,100			
10-18	Tongyeong	80-1,000	-	*	-	-	-
				80-850			

Cochl.(*C. polykrikoides*), Al.(*Alexandrium tamarense*), Gym.(*Gymnodinium mikimotoi*), * (*Gymnodinium sanguineum*), Skel.(*Skeletonema costatum*), C.(*Ceratium* spp.)

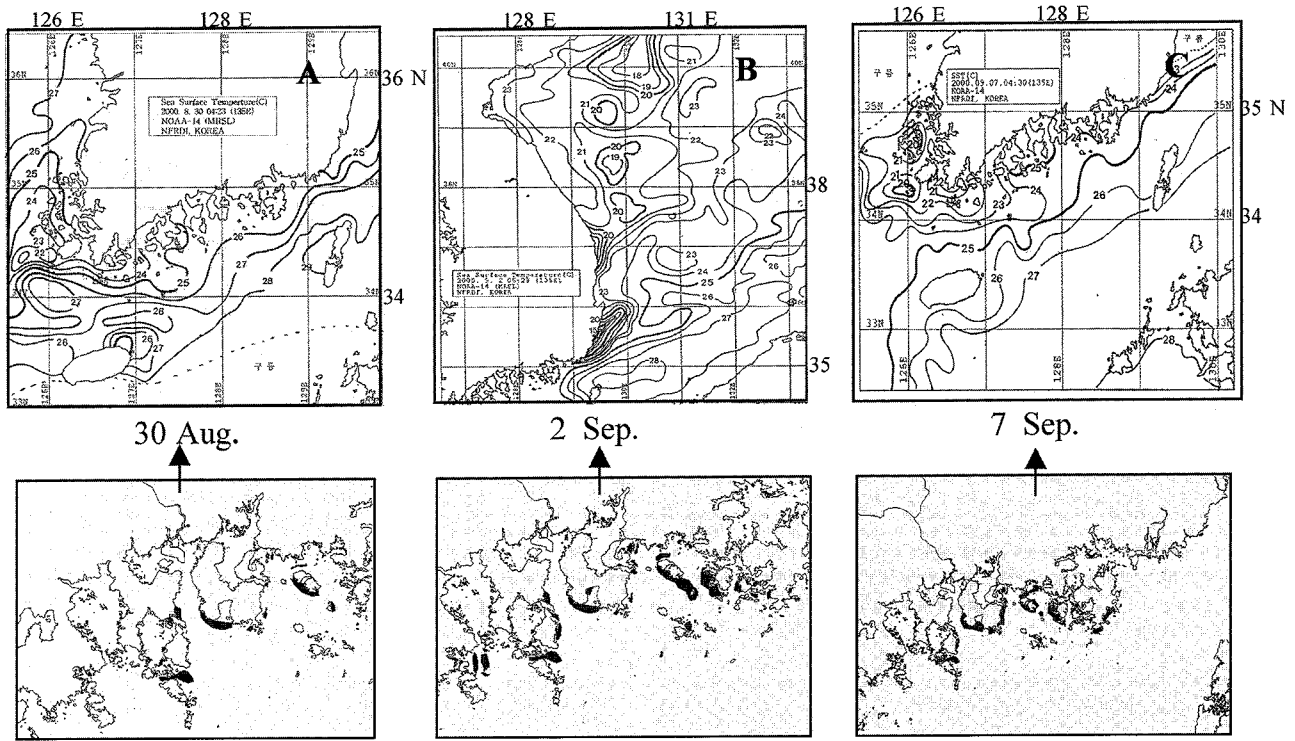


Fig. 5. NOAA satellite image of surface water temperature and area of *C. polykrikoides* bloom in Korean waters on August 30, September 2, and 7, 2000.

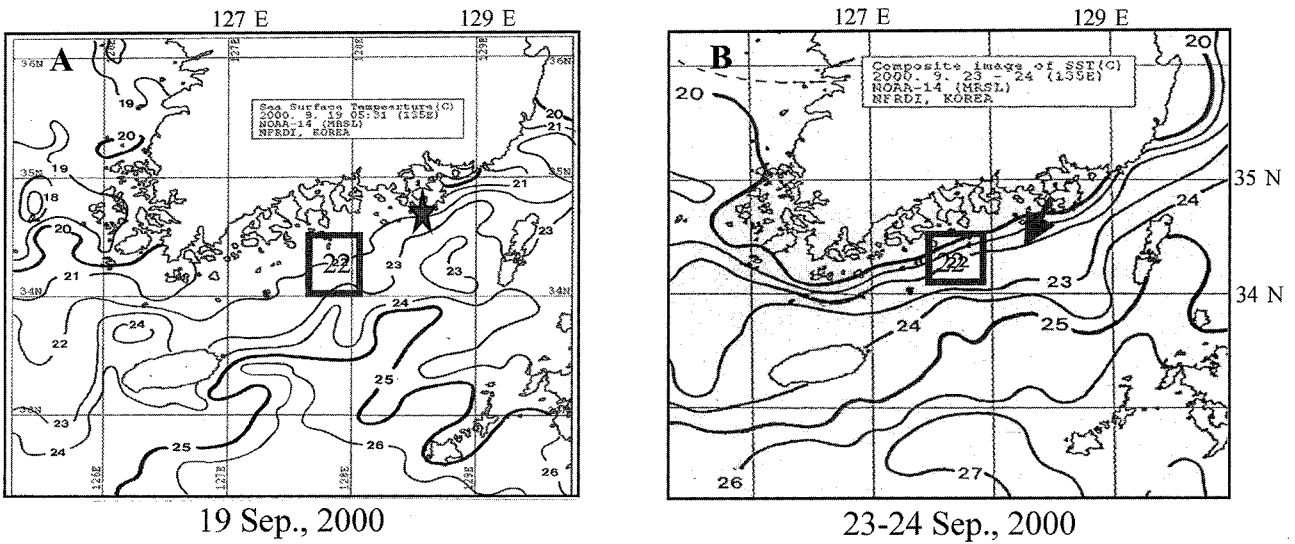


Fig. 6. NOAA satellite image of surface water temperature in Korean waters on September 19 and 23-24, 2000. ☆, 1 to 2 cells/ml of *C. polykrikoides* appeared only in this area.

고 찰

2000년 유해적조의 다른 해의 현상과 다른 특징들은 여수해안에서 최초 발생하였고, 다른 식물플랑크톤과 혼합하여 적조를 형성하고, 진해만에서 10월에 다시 발생한 특징을 가졌다. 그 외에 전남 고흥에서 부산 기장군까지 적조발생해역은 다른 해에 비하

여 비교적 범위가 작았으며, 최대 밀도 역시 다른 해(20,000-44,000 cells/ml)에 비해 상대적으로 낮았다.

한반도 남해안에는 제주도 동남쪽에서 대한해협으로 고온, 고염의 대마난류수가 흐르고, 이 대마난류수보다 저온·저염인 남해안수가 육지에 면하여 연중 존재하여, 두 수괴 사이에는 연안 경계 전선이 형성되는데, 이 전선은 해저지형, 육수유입, 기상요인

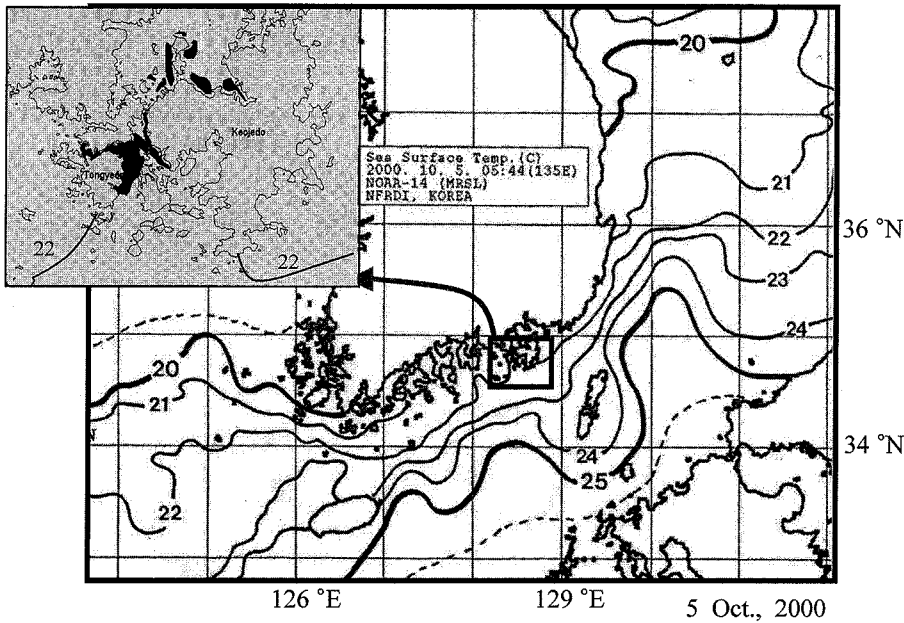


Fig. 7. Enlarged map showing *C. polykrikoides* bloom reoccurring area and NOAA satellite image of surface water temperature on October 5 (2000). The isothermal line of 22°C was expanded to Jinhae Bay through Han-san-Keoje Bay.

그리고 쿠로시오의 영향 등 여러 가지 요인에 의하여 계절적으로 그 변화가 대단히 크다(공, 1971; 강, 1974; Lee *et al.*, 1984). 또한, 최근에는 양자강수의 영향으로 여름철 남해 표층수에 이상저염 현상이 나타나고 있다(김과 노, 1994; 김 등, 1998a). 이와 같이, 한반도 남해의 수괴 배치는 여러 해류들의 영향으로 심한 시·공간적인 변동성을 가진다. 이러한 수괴들이 만나는 전선역에서는 생산력이 높고 종조성이 풍부한 것으로 알려져 있다(Yang and Kim, 1990; Chung and Yang, 1991; 박 등, 1998; 강과 전, 1999; 양 등, 1999). 남해의 식물플랑크톤의 분포는 이 수온전선대를 따라 높은 현존량을 보이며, 전선의 위치에 따라 그 농도가 달라진다는 것은 이전의 여러 연구에서도 잘 밝혀져 있다(박과 이, 1990; 강과 전, 1999). 정 등(2001)은 2000년 유해적조 사전 조사에서 *C. polykrikoides* 유영세포가 남해안 및 제주도 부근에 분포하고 있다는 것을 보고하였다. 특히, Fig. 3에서와 같이 적조발생 직전 남해도 부근 표층 수온전선에 *C. polykrikoides*의 유영세포들이 집중되어 있어, 이들의 증식에 의한 여수 해만에서의 최초 적조발생 가능성을 뒤받침 했다. 특히 하계에 이러한 수온전선이 남해도 부근에 형성된다는 것은 박과 이(1990)의 보고에서도 나타나 있다. 1988년 여수 남쪽 해역은 2월과 4월에는 높은 현존량을 보이나 반대로 8월에는 최소량으로 출현한 것은 여러 환경요인 중 다른 해보다 대마난류수괴가 연안까지 접근한 것이 큰 요인인 것으로 보고하였다. 또한, 정 등(1999b)은 1998년 8월 하순에 남해도 부근해역에서 동물플랑크톤 중 대마난류의 지표종인 *Sagitta enflata* 양이 급격히 증가된 것을 대마난류가 연안 가까이 유입한 이유라고 설명하였다.

여수 해만은 외해역과 내만역을 이어주는 중요한 수로로 섬진강에서 많은 담수가 유입되고(Kim and Kang, 1991), 여기에 광양제철과 여천국가산업단지 등의 산업폐수 및 생활하수 등 부영양수 유입이 이 지역의 식물플랑크톤의 현존량과 천이에 많은 영향을 미치고 있다(심 등, 1984; Moon, 1990). 이 등(1999)은 돌산도 동부연안에서 담수 유입으로 영양염의 공급은 규조적조를 발생시

킨다고 하였으며, 외편모조류에 의해서도 적조가 발생하는 해역으로 알려져 있다(김 등, 1998b; 김 등, 1999a, 김 등, 2000). 이러한 내만수와 외양수의 만남은 여수해만 부근 해역에서 수온전선 형성 뿐 아니라, 식물플랑크톤의 군집에도 영향을 미치는 것으로 보인다(Table 1). 규조류인 *Skeletonema costatum*과 *Chaetoceros* spp.는 육수의 영향을 많이 받는 해역에서 자주 적조를 일으키는 종으로 알려져 있다. Smayda and Reynolds(2001)는 외편모조류를 내만에서 외해역으로의 환경요인의 기울기에 따라 외편모조류의 식물생활형태 유형(vegetation life-form types)을 정하였는데 이에 따르면, *Gymnodinium mikimotoi*와 *Alexandrium tamarense*를 이들의 적조형성지역, 영양염 요구, 생태적 특성에 바탕을 두어 전선역분류군(frontal zone taxa)으로 분류하였는데, 여수해만의 전선역에서 이들의 높은 출현은 이들의 설명에 의해 해석될 수 있다. 본 연구에서 내만성 종 및 전선역분류군과 *C. polykrikoides*이 혼재되어 나타나는 것은, 중간 경쟁에 의해 *C. polykrikoides*이 활발한 증식이 어려웠으며, 단독으로 적조를 일으키지 못한 결과인 것으로 보인다. 정 등(2000b)도 나로도해역에서의 유해적조조사에서 육수 유입이 있는 안쪽 해역에서는 규조류의 번식이 우세하였으며, 그로 인한 중간 경쟁에서 외편모조류는 성장이 억제된다고 하였다.

나로도에 최초로 적조가 발생했던 1995년, 1997년, 1998년의 적조 발생 직전 인공위성 표층수온 자료를 보면, 1995년의 경우 적조발생직전인 8월 28일에는 진도 부근의 저수온대와 동해 저수온대 그리고 대마 난류세력이 나로도 주변해역에서 경계를 이루고 있었으며, 1997년은 진도 및 동해의 냉수세력은 약하게 발달된 반면, 대마난류세력이 연안으로 확장하여 나로도 외측을 경계로 하여 연안수와 뚜렷한 경계를 형성했다. 그리고, 1998년의 경우에도 *C. polykrikoides* 적조발생 시점인 8월 31일 수온분포를 보면 진도 냉수세력이 강한 반면, 남해동부해역의 냉수대는 거의 형성되어 있지 않고 연안 가까이 전선이 형성되어 나로도 부근에 수온전선이 강하게 나타나있었다(김 등, 1999b). 그러나, 2000년의

인공위성 표층수온자료를 보면(Fig. 4), 각 전선이 만나는 해역에서 적조가 발생했다는 것을 알 수 있다. 결국, 본 조사에서 나타난 결과들은 *C. polykrikoides* 최초 적조발생해역은 나로도 부근해역에 국한되는 것이 아니라 외양수의 연안으로의 접근에 따른 연안 경계전선의 위치에 의해 크게 영향을 받으며, 이와 같은 결과는 또한, 수온전선대의 위치 변화가 *C. polykrikoides* 적조의 최초 발생 지역을 결정할 수 있다는 것을 시사한다.

Fig. 2에서 유영세포수의 변화를 살펴보면 8월 30일부터 9월 1일에 한반도에 영향을 미친 12호 태풍 'Prapiroon' 내습 이후 1주일간 적조생물이 급격히 증가하였다. 이는 상대적으로 비의 양은 적으나 58.3 m/s의 사상 최대의 강한 바람으로 서해안을 통과함으로써 우리나라 연안해역에 혼합을 일으켰으며, 그 증거로써 Fig. 5의 9월 2일의 표층수온 분포는 태풍의 오른쪽에 있던 동해연안의 상층수와 저층의 냉수를 강제 혼합시킴으로써 동해연안수온이 일시적으로 급하강하였고(저수온대 9월 7일 소멸; Fig. 5B) 태풍 후 맑은 날씨와 기온상승이 지속되었다. 그 결과 동해안으로 적조는 확산되지 못하고 남해안지역에서만 혼합에 의한 저층의 영양염류 공급에 의해 활발한 증식이 가능했던 것으로 해석되었다. Roberts *et al.*(1998)는 20 m/s 이상의 태풍은 호수 생태계에서 물리적, 화학적, 생리화학적 반응을 일으킬 수 있음을 생리적 실험으로 증명하였는데, 식물플랑크톤 성장에 인산인이 제한영양염으로 작용하는 호수생태계에서, 태풍직후 일주일간은 영양염류 제한이 관측되지 않았으나, 그 후 다시 태풍전의 상태로 되돌아가게 되었다. 14호 태풍 'Saomai'는 2000년 태풍 중에서 규모와 강도가 가장 큰 것으로 최대풍속 39 m/s와 집중호우 53 mm/h로 남해안에 상륙하여 경상도 내륙을 따라 북상하여 동해 북부 먼바다로 빠져나가 소멸하였다. 'Saomai' 소멸 후 한반도 연안의 연안관측수온에 의하면 연안수온의 평년편차가 1~2°C 낮게 관찰되었다(국립수산진흥원, 2001a). 이 낮은 수온은 9월말까지 지속되었으나(Fig. 6), 10월 초순에 평년과 비슷한 수온양상으로 회복되었으며(국립수산진흥원, 2001b), Fig. 7에서와 같이 10월 5일에는 22°C의 수온전선이 남해안에 영향을 미쳤다. 서 등(2000)은 *C. polykrikoides* 적조발생의 해역분포 양상과 표층수온 분포양상간의 관계를 조사하여, 적조발생 시 초기 수온 값과 수온전선의 분포양상이 적조의 분포 유지와 소멸 시까지 밀접한 관련성을 지니며 적조분포의 시공간적인 조정자 역할을 한다고 보고했다. 또한, 수온 범위대의 등온선의 이동에 따라 적조의 생성 및 소멸이 발생하고, 그 등온선은 해마다 해양환경에 따라 달라진다는 것을 보고하였다. 본 연구에서는 *C. polykrikoides* 소멸은 22°C 수온전선의 분포와 거의 일치하였으며, 이는 단순한 수온전선을 나타내는 것이 아니라 외양수의 연안으로의 유입 정도를 나타낼 수 있다.

진해만에서의 *C. polykrikoides* 적조발생은 크게 두 가지 원인으로 설명 가능한데, 첫째, Fig. 7의 수온분포와 같이 22°C로 대별되는 *C. polykrikoides*의 유영세포가 포함된 외양수의 유입이 씨앗의 역할을 하였으며, 둘째, *C. polykrikoides*의 유영세포는 진해만의 높은 영양염류(Hong *et al.*, 1991; 조와 채, 1999)을 이용하여 22°C의 비교적 낮은 수온(적조시의 수온: 24~27°C)에도 불구하고 활발한 증식이 가능하였던 것으로 생각된다. Rhee and Gotham(1981)은 식물플랑크톤의 성장에 미치는 온도와 영양염류 제한의 상호작용에 대한 연구에서 수온이 내려가면 많은 영양염

류의 요구가 생기게 되며, 영양염류의 공급이 충분해진다면, 식물플랑크톤의 성장은 저해 받지 않는다고 하였다. 김 등(2001c)과 이 등(2001b)은 실험실에서의 배양 실험을 통하여 *C. polykrikoides*의 성장은 수온 19~28°C의 비교적 넓은 수온대와 30~35 psu의 넓은 염분조건에서 성장하는 광온, 광염성 종임을 밝혔고, 이는 비교적 저수온에서도 *C. polykrikoides*은 적조를 형성할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다. 김 등(2001b, c)의 연구에 의하면 영양염류 농도에 대한 친화성 지표가 되는 반포화상수(Ks)로부터 이들이 Eppley *et al.*(1969)의 외양성 종보다는 Ks 값이 높고, 연안성 편모조류의 Ks 값보다는 대체적으로 낮은 값을 나타내며, MacIsaac and Dugdale(1969)의 구분에 따른 빈영양성 종이보다 더 부영양성 종에 해당하지만 암모니아질소 Ks값은 부영양성 종보다 낮은 값을 가지므로 해서 본 종은 내만의 부영양화된 해역보다는 부영양화상태가 높아지고 있는 나로도, 남해도, 거제도 등의 해역에서 자주 발생하는 원인이라고 설명하였다. 또한, 영양염류 첨가에 따른 *C. polykrikoides*의 증식에 대한 최근 연구결과에서는 *C. polykrikoides* 적조 발생 전과 소멸 시 해수에는 질소와 인이 동시에 *C. polykrikoides*의 성장 제한 영양염류로 나타났으나, 적조발생 시 해수에는 영양염류의 제한이 나타나지 않는다는 결과를 얻었으며(김 등, 2001b), 본 연구에서 관찰한 결과도 여수해만과 진해만 서부 및 한산-거제만은 각각 부영양화된 연안수가 외양으로 운반되는 통로로서 *C. polykrikoides*의 성장에 적합한 지역으로 생각된다.

한편, *C. polykrikoides* 증식의 지속성 여부는 그 해역의 중구성에 의해서도 설명할 수 있다. 서부 진해만과 한산-거제만에서의 종조성을 살펴보면, 가을과 겨울철에 우리 나라 남해안에서 종종 적조를 일으키는 *Akashiwo sanguinea*(=*Gym. sanguineum*)와 *C. polykrikoides*이 함께 적조를 형성하였다(Table 1). *A. sanguinea*는 질산질소의 Ks값이 1.02(Thomas and Dodson, 1974)로 *C. polykrikoides* 2.10(김 등, 2001c)보다 낮아, *C. polykrikoides* 보다 성장률이 높은 것으로 나타났으며, 이 지역에서 지속적으로 유입되는 영양염에도 불구하고(Hong *et al.*, 1991), 중간 경쟁에 의해 장기간 지속되지 못하고 *A. sanguinea*만 남고 소멸한 것으로 판단되나(Brzesinski and Nelson, 1988), 중간경쟁에 대해서는 좀더 깊이 있는 연구가 진행된 후 더욱 상세한 설명이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- 강영실, 전경암, 1999. 한국 남해 연안전선의 생물·화학적 특성 및 영양역학 구조. 한국수산 학회지, 32: 22-29.
- 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 수진 연구보고, 12: 107-121.
- 공영, 1971. 한국 남해안 전선에 관한 연구. 한국해양학회지, 6: 25-36.
- 국립수산진흥원, 2001a. 2000년 한국근해 해양정보. 해양자료속보 제 1887호, 124 pp.
- 국립수산진흥원, 2001b. 2000년 한국근해 해양정보. 해양자료속보 제 1894호, 131 pp.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27: 515-528.
- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암, 1998a. 1996년 여름철

- 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포 특성. 한국해양학회지 '바다', **3**: 165-169.
- 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1998b. 한국연안의 적조-최근적조의 발생 원인과 대책-. 국립수산진흥원, 292 pp.
- 김학균, 조용철, 정창수, 이필용, 정영균, 배헌민, 오봉철, 이창규, 조은섭, 김정배, 김창숙, 임월애, 윤성화, 1999a. 1997, 1998년도 한국연안의 적조발생 상황. 국립수산진흥원, 215pp.
- 김학균, 최우정, 정영균, 정창수, 박종수, 안경호, 백철인, 1999b. 나로도 인근해역에서 *C. polykrikoides* 적조의 최초발생과 환경특성. 수진연구보고, **57**: 119-129.
- 김학균, 조용철, 정창수, 배헌민, 오봉철, 이창규, 조은섭, 김창숙, 임월애, 윤성화, 김정배, 2000. 1999년도 한국연안의 적조발생 상황. 국립수산진흥원, 206 pp.
- 김학균, 정창수, 임월애, 이창규, 김숙양, 윤성화, 조용철, 이삼근, 2001a. 한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과 변천. 한국수산학회지, **34**: 691-696.
- 김형철, 김동명, 이대인, 박청길, 김학균, 2001b. 조류성장잠재력 시험에 의한 사랑도 연안 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 제한영양염. 한국수산학회지, **34**: 457-464.
- 김형철, 이창규, 이삼근, 김학균, 박청길, 2001c. *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 미치는 물리·화학적 요인과 영양염 이용. 한국수산학회지, **34**: 445-456.
- 나기환, 박경대, 이숙희, 김건호, 남정배, 1997. Dinoflagellates, *Cochlodinium polykrikoides*의 현장일주 이동. 한국양식학회지, **10**: 457-462.
- 박주석, 이삼근, 1990. 한국남해의 식물플랑크톤의 분포와 수괴특성. 한국수산학회지, **23**: 208-214.
- 박철, 이창래, 김정창, 1998. 동해전선역 동물플랑크톤 군집: 2. 수온과 분포의 관계. 한국수산학회지, **31**: 749-759.
- 서영상, 김정희, 김학균, 2000. NOAA 위성자료에 의한 해수표면 수온분포와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생의 상관성. 한국환경과학회지, **9**: 215-221.
- 심재형, 신윤근, 이원호. 1984. 광양만 식물 플랑크톤 분포에 관한 연구. 한국해양학회지, **19**: 172-186.
- 양영진, 김상현, 노홍길, 정도근, 1999. 한국 남·서해 및 동중국해 북부해역에 출현하는 표층수온전선과 선망어장과의 관계. 한국수산학회지, **32**: 618-623.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 1. 물리·화학적인 특성. 한국해양학회지 '바다', **5**: 16-26.
- 이영식, 박종수, 김성수, 전경암, 김영숙, 박중현, 백철인, 1999. 여수 돌산도 동부연안에서 담수유입에 의한 수질변화특성과 규조적조 발생. 수진연구보고, **57**: 111-117.
- 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤, 2001a. *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경 특성. 한국해양학회지 '바다', **6**: 259-264.
- 이창규, 김형철, 이삼근, 정창수, 김학균, 임월애, 2001b. 남해안 연안에서 적조생물, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gymnodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 출현 상황과 온도, 염분, 조도 및 영양염류에 따른 성장 특성. 한국수산학회지, **34**: 536-544.
- 정해진, 박종규, 김재성, 김성택, 윤주이, 김수경, 박용민, 2000a. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 3. 1997년도 중속 영양성 외편모조류와 섬모류의 시공간적 변화. 한국해양학회지 '바다', **5**: 37-46.
- 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경제, 2000b. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지 '바다', **5**: 27-36.
- 정창수, 김학균, 조용철, 이창규, 임월애, 조은섭, 윤성화, 1999a. 적조예찰 및 예보자동화 연구. 수진사업보고서, 395-409.
- 정창수, 최우정, 김학균, 정영균, 김정배, 임월애. 1999b. 1998년도 남해도 인근수역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 동물플랑크톤의 분포특성. 수진연구보고, **57**: 153-161.
- 정창수, 조용철, 김학균, 이창규, 임월애, 김숙양, 2001. 적조광역 모니터링 및 예측연구, 적조 예찰 및 예보자동화 연구. 수진사업보고서, 352-366.
- 조흥연, 채장원, 1999. 진해·마산만 일반수질항목 및 영양염류의 장기추이분석. 해양연구, **21**: 13-25.
- 최현용, 2001. 한국 남해 나로도도 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계. 한국해양학회지 '바다', **6**: 49-62.
- Bernhard, A.E. and E.R. Peele, 1997. Nitrogen limitation of phytoplankton in shallow embayment in Northern Puget Sound. *Estuaries*, **20**: 759-769.
- Brzezinski, M. and D.M. Nelson, 1988. Interactions between pulsed nutrient supplies and a photocycle affect phytoplankton competition for limiting nutrients in long-term culture. *J. Phycol.*, **24**: 346-356.
- Chung, C.S. and D.B. Yang, 1991. On the primary productivity in the southern sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **26**: 242-254.
- Eppley, R.W., J.N. Rogers and J.J. McCarthy, 1969. Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **14**: 912-920.
- Holmboe, N., H.S. Jensen, and F.Ø. Andersen, 1999. Nutrient addition bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton in an eutrophic estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **186**: 95-104.
- Hong, G.H., K.T. Kim, S.J. Pae, S.H. Kim and S.H. Lee, 1991. Annual cycles of nutrients and dissolved oxygen in a nutrient-rich temperate coastal bay, Chinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **26**: 204-222.
- Kim, D.C. and H.J. Kang, 1991. Suspended sediment budget in Gwangyang Bay through the Yeosu Sound. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **24**: 31-38.
- Kim, H.G., 1997. Recent harmful algal blooms and mitigation strategies in Korea. *Ocean Res.*, **19**: 185-192.
- Lee, J.C., J.Y. Kim and S.D. Chang, 1984. Thermohaline structure of the shelf front in the Korea strait in early winter. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**: 56-67.
- MacIsaac, J.J. and R.C. Dugdale, 1969. The kinetics of nitrate and ammonia uptake by natural populations of marine phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, **16**: 415-422.
- Moon, C.H. 1990. Studies on the phytoplankton and nutrients in the Yeosu Hae Bay. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **22**: 408-414.
- Rhee, G.-Y. and I.J. Gotham, 1981. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.*, **26**: 635-

- 648.
- Robarts, R.D., M.J. Waiser, O. Hadas, T. Zohary and S. MacIntyre, 1998. Relaxation of phosphorus limitation due to typhoon-induced mixing in two morphologically distinct basins of Lake Biwa, Japan. *Limnol. Oceanogr.*, **43**: 1023–1036.
- Smayda, T.J. and C.S. Reynolds, 2001. Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *J. Plankton Res.*, **23**: 447–461.
- Thomas, W.H. and A.N. Dodson, 1974. Effect of interactions between temperature and nitrate supply on the cell-division rates of two marine phytoflagellates. *Mar. Biol.*, **24**: 213–217.
- Yang, H.S. and S.S. Kim, 1990. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **23**: 417–424.
-
- 2002년 2월 18일 원고접수
2002년 5월 16일 수정본 채택
담당편집위원: 서해립