

전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구 1. 1999년도 여름-가을 식물플랑크톤의 시공간적 변화

유영두* · 정해진 · 심재형¹ · 박재연¹ · 이경재¹ · 이원호 · 권효근 · 배세진² · 박종규³
군산대학교 해양과학대학 해양정보과학과, ¹서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부
²한국해양연구원 해양환경 · 기후연구본부, ³인제대학교 환경공학과

Outbreak of Red Tides in the Coastal Waters off the Southern Saemankeum areas, Jeonbuk, Korea

1. Temporal and Spatial Variations in the Phytoplankton Community in the Summer-fall of 1999

YEONG DU YOO, HAE JIN JEONG, JAE HYUNG SHIM¹, JAE YEON PARK¹, KYEONG JAE LEE¹,
WONHO YIH, HYO KEUN KWEON, SE JIN PAE², JONG KYU PARK³

Department of Oceanography, College of Ocean Sciences and Technology, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

¹Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Marine Environment and Climate Change Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, Korea

³Department of Environmental Engineering, Injae University, Kimhae, Kyeongsang, Korea

대규모 간척사업이 진행되고 있는 전북 새만금 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides*가 우점하는 유해성 적조의 발생에 대한 연구를 하기 위하여, 1999년 8월 10일부터 11월 11일까지 모두 5차례에 걸쳐 4개 정점에서 시료를 채집한 뒤 적조원인생물의 시공간적 분포와 수온, 염분, 영양염류 분포 등 환경요인들과의 연관성을 연구하였다. 조사 기간 중 출현한 유해성 적조생물은 *Alexandrium tamarense*, *C. polykrikoides*, *Gymnodinium catenatum*, *Gyrodinium aureolum*, *Gymnodinium impudicum* 등이며, 크기 20 μm *Gymnodinium* sp.는 8월 10일 264 cells ml^{-1} , *G. aureolum*은 9월 16일 200 cells ml^{-1} , *C. polykrikoides*는 10월 18일 463 cells ml^{-1} 의 최대풍도로 적조를 일으켜 조사 시기에 따라 다양한 종들이 적조를 일으킨다는 것을 알 수 있었다. 1997년 전남 고흥 나로도 해역에서 발생된 *C. polykrikoides* 적조발생과 비교하면 새만금 해역에서는 적조가 시기적으로 약 50일 정도 늦게 발생하였고, 6°C 정도 낮은 수온에서 발생하였다. *C. polykrikoides*는 9월 16일에 처음으로 발견되었는데(최대풍도: 5 cells ml^{-1}), 20~25°C 수온에서의 최대성장률(0.3~0.4 d^{-1})을 감안하였을 때 이미 외부에서 만들어진 적조 피가 연구해역으로 유입되지 않고 자체성장만으로도 10월 18일의 최대풍도에 도달할 수 있다고 판단된다. 새만금 해역과 고흥 해역 모두 *C. polykrikoides* 적조는 주로 규조류의 풍도가 낮은 환경에서 나타나, 규조류와의 경쟁에서 유리한 환경조건이 갖춰졌을 때 *C. polykrikoides*가 우점하게 된다고 추정할 수 있다.

We investigated the outbreak of red tides dominated by harmful dinoflagellates from August to November 1999 in the coastal waters off the southern Saemankeum areas where a huge red tide dominated by *Cochlodinium polykrikoides* had been first observed in 1998. We took water samples from 2~5 depths of 4 stations (with 3-4 additional stations during red tides) in this study period and then measured the abundance of phytoplankton, water temperature, salinity, and the concentrations of nutrients. In the study period harmful dinoflagellates *Alexandrium tamarense*, *C. polykrikoides*, *Gymnodinium catenatum*, *Gyrodinium aureolum*, *Gymnodinium impudicum* were present, and of these *G. aureolum* and *C. polykrikoides* formed red tide patches on September 16 and October 18, respectively. The date of the outbreak of red tide dominated by *C. polykrikoides* in the study area was approximately 50 days later than that off the Kohung areas in 1997 and the surface water temperature when the red tides outbreaked in the former area was 6°C lower than that for the latter area. The maximum abundance of *C. polykrikoides* on September 16, October 7 and 18 were 5, 14, and 463 cells ml^{-1} , respectively. The growth rate of *C. polykrikoides*, isolated from the study area, was 0.3~0.4 d^{-1} at 20~25°C, which enable this species to reach the maximum concentration without being transported from the adjacent waters containing

*Corresponding author: ydyoo77@kunsan.ac.kr

already made red tide patches. The outbreaks of red tides dominated by *C. polykrikoides* in the study area and off Kohung have occurred when and/or where the concentrations of diatoms were low. This evidence suggests that the outbreak of red tides dominated by *C. polykrikoides* is adversely affected by the high diatom concentrations or the conditions favorable for the growth of diatoms.

Key words: *Cochlodinium polykrikoides*, Diatom, Dinoflagellate, Harmful algal bloom, Nutrients, Salinity, Temperature

서 론

적조(red tide)란 플랑크톤의 대규모 번식으로 인하여 해수의 색이 변하는 현상으로 생태계의 균형을 파괴하고, 어패류의 대량폐사를 야기시키며, 관광산업에 막대한 손실을 주는 심각한 환경문제이다(ECOHAB, 1995). 세계적으로 볼 때 적조의 발생해역과 발생빈도가 증가하고 이에 따른 피해도 증가하고 있어 적조의 신속한 현황 파악, 정확한 원인규명, 적극적인 피해대책 연구는 과학자들뿐만 아니라 관련 산업의 종사자들, 그리고 어패류의 소비자들에게도 매우 중요한 관심의 대상이 되고 있다(Jeong, 1995).

우리 나라의 연안에서도 그 동안 많은 적조가 발생해 왔는데 특히 1995년 이후 8월말 또는 9월초에 남해안 전남 고흥-여수 해역에서 처음 발생하여 30~50일 정도 지속하면서 주로 동진하는 *Cochlodinium polykrikoides*와 *Gymnodinium impudicum*이 우점하는 대규모 유해성 적조(이하 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조)는 해마다 수산업에 막대한 손실을 주고 있다(김 등, 1998; 양 등, 2000; 정 등 2000a, 2000b; 최 2001). 서해안의 경우, 최초의 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조가 1998년 10월초에 새만금 해역을 포함한 전북 해역에서 대규모로 발생하여(최대풍도: 630 cells ml⁻¹, 10월 30일, Jeong & Yoo, unpublished data) 학계와 수산업계에서 큰 관심을 갖게 되었다.

서해안 전북해역 중 북부해역(군산-변산반도)은 1990년 이래로 새만금 개발 사업이 진행되고 있는 해역으로 2002년 현재 방조제 공사가 70%가량 완성된 상태인데, 방조제가 완공되면 고군산군도-새만금 방조제-변산반도를 잇는 “ㄷ” 자형 인공만이 형성되어 (Fig. 1) 해수의 흐름이 제한되고, 난류(turbulence)의 강도가 약화되며(Thomas and Gibson, 1990; Tynan, 1993), 인공담수호 내의 육수가 해양으로 유통되는 2개의 배수 갑문이 모두 이 해역에 위치하여 고농도의 영양염류가 갑자기 유입되는 등, 때에 따라 적조발생에 유리한 조건이 형성될 것으로 예상되는 해역이다. 특히 1998년 이 해역에서 유해성 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조 띠가 광범위하게 형성되었던 점을 감안할 때, 앞으로도 계속 이러한 유해성 적조가 발생된다면 큰 환경, 경제, 사회적 문제를 야기 시킬 수 있으므로 이 해역에서 적조생물의 종류, 시·공간적 분포, 변화 양상, 환경영향 요인 등을 밝히는 것은 매우 시급하고 중요하다.

한 해역에서 적조의 발생, 유지, 소멸에 영향을 주는 환경요인에는 수온, 염분, 난류세기(Juhl *et al.*, 2000), 광도, 수층의 안정성 및 수온약층의 위치(Eppley and Harrison, 1975), 물리적 집적현상(Kamykowski, 1974), 해수의 순환(Ferrelle *et al.*, 1996), 외부로부터 대류에 의한 이동(Tyler and Seliger, 1978) 등 물리적 요인, 영양염류(Eppley 1969; Smayda, 1997) 등과 같은 화학적 요인, 포식압(Watras *et al.* 1985; Jeong and Latz 1994; Jeong 1995;

Jeong *et al.* 1999a, 1999b, 2001a, 2001b, 2002), 다른 식물플랑크톤과의 경쟁(정 등, 2000a) 등 생물학적 요인이 있고 이들이 복합적으로 작용하는 경우가 많다. 본 연구가 시작되기 전에 본 해역에서의 적조생물 동향에 대해 집중적으로 조사한 연구논문이 거의 없으므로, 우선 이에 대한 기초자료를 습득하기 위하여 본 연구를 시작하였다.

본 연구에서는 유해성 적조가 발생하기 전부터, 적조발생 후, 적조소멸 시기에 여러 정점에서 적조생물들을 포함한 식물플랑크톤의 시·공간적 분포 변화를 조사하였다. 동시에 수온, 염분, 영양염류 농도 분포, 원생동물성 포식자(protozoan grazer)(정 등, submitted), 후생동물성 포식자(metazooplanktonic grazer)(김 등, in preparation)의 포식압 등을 동시에 조사하여, 새만금 해역을 비롯한 서해안의 유해성 적조발생 양상 및 기작을 연구하는데 필요한 기초적인 자료를 제공하고 차후의 연구방향을 제시하고자 하였다. 또한 본 연구 결과를 해마다 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조가 가장 먼저 발생하는 전남 고흥-여수 해역에서의 적조발생상황 연구 결과와 비교하여(양 등 2000, 정 등 2000a & b), 우리 나라에서 매년 여름-가을에 발생하는 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조에 대한 일반화된 발생, 유지, 소멸 기작을 밝히는데 기여하고자 하였다.

재료 및 방법

시료채집 및 분석 방법

전북 새만금 해역에서 유해성 적조의 발생연구를 위하여 1999년 8월 10일, 9월 16일, 10월 7일, 유해성 *Cochlodinium polykrikoides*/*Gymnodinium impudicum* 적조발생 후 인 10월 18일, 적조 소멸 직후인 11월 11일에 4개의 정점(Fig. 1)에서 시료를 채집하였다. 정규 시료채집 시기 뿐 만 아니라 9월 2일과 10월 28일에도 새만금 해역 전체(군산-십이동파도-연도-새만금방조제-고군산군도-위도-변산반도)에 대하여 적조 띠가 있는 곳에서는 시료를 추가적으로 채집하였다. 각 정점에서의 해수 시료는 수층 내의 2~5개 깊이에서 3 L Niskin 채수기를 이용하여 채집하였다. 채취된 시료 중 식물플랑크톤 정량 분석용 시료는 500 ml 폴리에틸렌 병들에 넣은 후 Lugol 용액으로 즉시 고정하고, iodine의 광산화를 막기 위하여 알루미늄 호일로 씌운 뒤 암소에 보관하여 실험실로 운반하였다. 정성 시료는 표층부근에서 식물플랑크톤 네트(망목 20 μm)로 채집하여 100 ml 폴리에틸렌 병에 넣은 후 glutaraldehyde 용액으로 즉시 고정하였다. 영양염류 분석용 시료는 채수한 뒤 현장에서 즉시 여과한 뒤 냉동보관 하였다.

먼저 식물플랑크톤 정성 시료를 분석 한 뒤 정량 시료를 분석하였는데 고정된 시료 내 세포의 균일한 분포를 위하여 100회 이상 흔들여 준 후 1 ml를 Sedgwick-Rafter counting chamber에 넣었으며, 세포수가 많은 시료는 그 중 48~64%만을 광학현미경

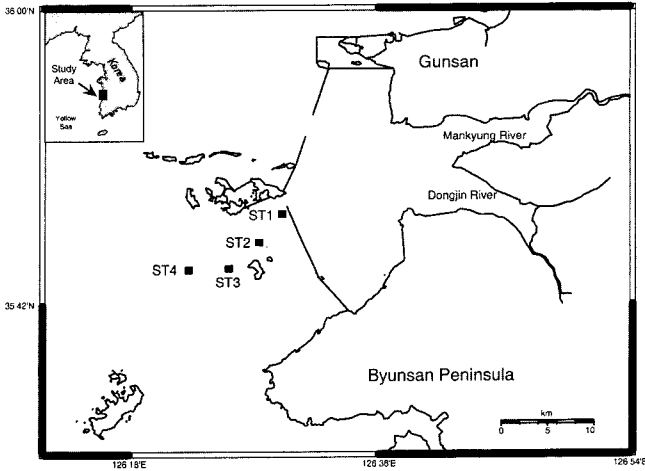


Fig. 1. A map showing the sampling stations off the southern Saemangeum areas.

(Olympus model BX50)으로 관찰하였고 세포수가 적은 시료에서는 100% 모두 검경, 동정하였다. 식물플랑크톤의 현존량은 단위 체적당 세포수(cells ml⁻¹)로 환산하였다.

수온과 염분은 CTD(Sea Bird SBE-19)를 이용하여 측정하였으며, 영양염류인 NH₄, NO₃, NO₂, PO₄, SiO₂는 auto-analyzer(Bran-Luebbe TRAACS 2000)를 이용하여 분석하였다.

자료분석

외편모류를 동정한 결과 독립영양성(autotrophic), 혼합영양성(mixotrophic) 외편모류가 모두 나타났는데 이들의 생리적 유사성을 고려하여 본 논문에서는 이 들을 묶어 독립-혼합영양성 외편모류로 명기하였다.

본 조사해역은 조석간만의 차가 크므로 수평적인 분포보다는 각 정점에서 실측한 값들을 평균한 값을 이용하는 것이 타당하다고 판단하여 다음과 같은 풍도와 농도를 정의하여 이용하였다. 먼저 한 종 또는 한 분류학적 그룹의 시기별 최대풍도(Maximum Abundance at All Stations in each sampling time; 이하 MAAS)는 한 조사시기에 채집한 모든 시료(모든 정점과 모든 깊이) 각각에서 해당 종 또는 분류학적 그룹의 풍도를 구한 뒤 그 중 가장 높은 값을 택한 것이고, 정점별 평균풍도(Averaged Abundance at Each Station; 이하 AAES)는 조사시기별로 한 정점의 모든 깊이에서 구한 풍도 값들을 평균한 것이며, 모든 정점의 평균풍도(Averaged Abundance at All Stations; 이하 AAAS)는 한 시기 모든 시료에서 구한 해당 종의 풍도 값을 평균한 값이다. 온도, 염분, 영양염류 농도도 이와 비슷하게 계산하였는데 정점별 평균 온도, 염분, 영양염류 농도(Averaged Temperature, Salinity, or Nutrient concentration at Each Station; 이하 ATES, ASES, or ACES)는 조사시기별로 한 정점의 모든 깊이에서 구한 값들을 평균한 것이며, 모든 정점의 평균 온도, 염분, 영양염류 농도(Averaged Temperature, Salinity, or Nutrient concentration at All Stations; 이하 ATAS, ASAS, or ACAS)는 한 시기 모든 시료에서 구한 값을 평균한 값이다.

결 과

수온과 염분의 시간적 변화

조사해역에서 측정된 모든 정점의 표층 수온을 평균한 값의 시간적 변화를 보면 8월 10일에서 9월 16일까지는 24.3~24.6°C 사이로 변화가 거의 없었으나, 10월 7일에 19.9°C로 급감하기 시작하여 10월 18일에는 18.4°C, 11월 11일에 15.9°C로 감소하였다(Fig 2A).

모든 정점의 표층 염분을 평균한 값은 8월 10일에서 9월 16일까지는 31.3~31.5 psu를 유지하였으나, 10월 7일에 30.7 psu로 감소하기 시작하여 10월 18일에 29.4 psu로 최저를 기록하였다. 그 후 11월 11일에 다시 31.2 psu까지 상승하였다(Fig 2B).

영양염류의 시간적 변화

조사해역에서 암모니아(NH₄), 질산염(NO₃), 아질산염(NO₂)를 합친 총무기질소(Total Dissolved Inorganic Nitrogen; TDIN)의 평균농도인 ACET(Average Concentration at Each sampling Time: 조사시기별 모든 시료 분석치의 평균)의 경우는 8월 10일에 3.7 μM로 낮았으나 9월 16일에 6.7 μM로 증가하기 시작하여 10월 7일에는 최대값인 9.5 μM에 도달하였고, 10월 18일까지 9.4 μM로 유지되다가 11월 11일에는 6.0 μM로 급감하였다(Fig 3A).

인(P)의 ACET 경우는 8월 10일과 9월 16일에 0.2 μM로 낮다가 10월 7일에는 0.7 μM로 급증하였으나 10월 18일에 0.5 μM로 감소하기 시작하여 11월 11일에 0.3 μM로 비교적 낮게 나타났다(Fig 3B).

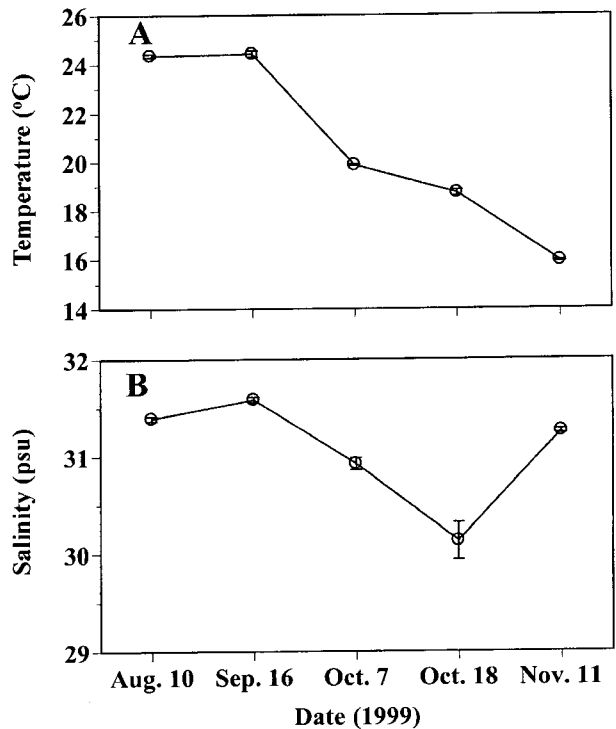


Fig. 2. The temporal variations in surface water temperature (A) and salinity (B) from August 10 to November 11, 1999. The symbols represent mean+standard error. Means are calculated by averaging all values measured at each station at each sampling time.

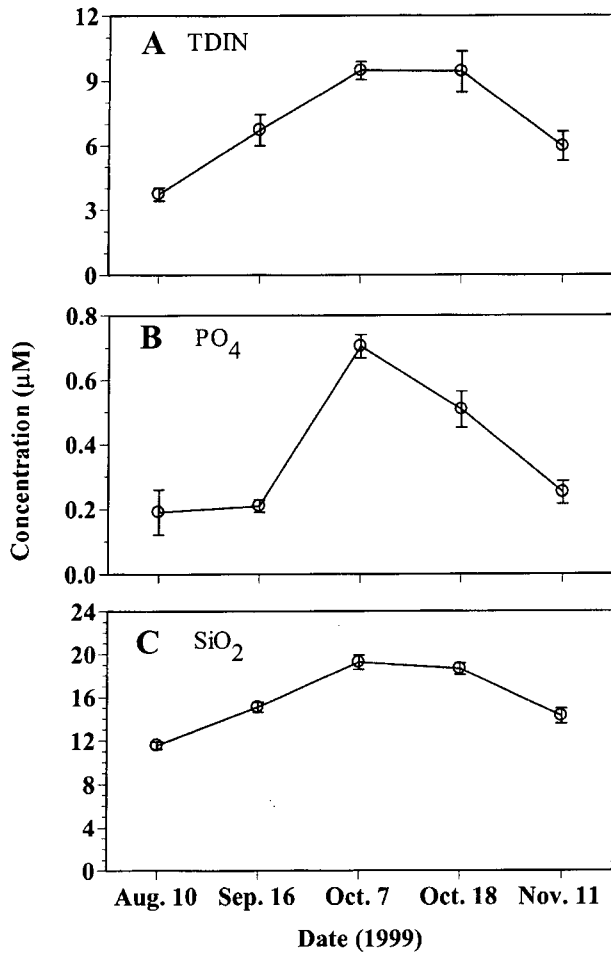


Fig. 3. The temporal variations in total dissolved inorganic nitrogen (TDIN, A), phosphate(PO₄, B), and silicate (SiO₂, C) from August 10 to November 11, 1999. The symbols represent mean+standard error. Means are calculated by averaging the values measured from all depths and stations at each sampling time.

규소(Si)의 ACET 경우는 8월 10일에 11.6 µM에서 9월 16일에 15.1 µM로 증가하기 시작하여 10월 7일에 19.3 µM까지 증가했다가 10월 18일에 18.6 µM로 유지되었으나 11월 11에 14.2 µM로 감소하였다(Fig. 3C).

출현 종 수와 풍도의 시간적 변화

조사기간 동안 조사해역에서 식물플랑크톤의 경우 1 cells ml⁻¹이 넘는 출현 종의 수가 총 160여종이었는데(Table 1), 그 중 규조류(diatoms), 독립-혼합영양성 와편모류가 각각 119종과 36종으로 많은 종 수를 보였지만, silicoflagellates, raphidophyceae에 속하는 종들은 각각 4, 3종씩 출현하였다.

규조류, 독립-혼합영양성 와편모류의 출현종 수의 시간적 변화는 뚜렷하게 나타났는데 (Fig. 4), 규조류의 경우 8월 10일에 44종으로 낮았으나 9월 16일에는 81종으로 증가하여 10월 7일에는 81종으로 유지되었으나 유해성 *Cochlodinium polykrikoides*적조가 발생한 10월 18일에는 43종로 급감하였고 적조가 끝난 11월 11

Table 1. The list of phytoplankton >1 cells ml⁻¹ occurring in the waters off Saemankeum, Korea from August 10 to November 11, 1999.

Species name\date	10-Aug	16-Sep	7-Oct	18-Oct	11-Nov
Bacillariophyceae					
<i>Actinocyclus octonarius</i> var. <i>tenellus</i>			+	+	+
<i>Actinoptychus senarius</i>			+		+
<i>Actinoptychus splendens</i>	+				
<i>Amphora lineolata</i>	+				
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	+	+	+	+	
<i>Asterionellopsis kariana</i>		+	+		+
<i>Asteromphalus flabellatus</i>	+				
<i>Azpeitia nodulifer</i>		+	+	+	+
<i>Bacillaria paxillifer</i>	+	+	+	+	
<i>Bacteriastrum elegans</i>		+			
<i>Bacteriastrum furcatum</i>	+				
<i>Bacteriastrum hyalinum</i>	+				
<i>Bellerochea malleus</i>		+			
<i>Biddulphia alternans</i>		+			
<i>Chaetoceros affinis</i>		+	+		+
<i>Chaetoceros bervis</i>		+	+	+	+
<i>Chaetoceros compressus</i>	+	+			
<i>Chaetoceros convoltus</i>			+		
<i>Chaetoceros costatus</i>		+	+	+	+
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	+				
<i>Chaetoceros danicus</i>	+	+	+	+	+
<i>Chaetoceros debilis</i>	+	+	+		+
<i>Chaetoceros decipience</i>	+	+	+		+
<i>C. decipience</i> forma <i>singularis</i>	+	+			
<i>Chaetoceros diadema</i>		+	+		
<i>Chaetoceros didymus</i>			+		+
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	+				
<i>Chaetoceros pendulus</i>				+	+
<i>Chaetoceros peruvianus</i>	+	+	+		
<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>		+	+	+	+
<i>Chaetoceros</i> sp. type A	+	+	+	+	+
<i>Chaetoceros</i> sp. type B		+			+
<i>Cocconeis</i> sp.			+		
<i>Coreathron criophilum</i>		+	+	+	+
<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>		+	+	+	
<i>Coscinodiscus centralis</i>		+	+	+	+
<i>Coscinodiscus concinnus</i>					+
<i>Coscinodiscus gigas</i>	+	+	+	+	+
<i>Coscinodiscus granii</i>		+	+		
<i>Coscinodiscus jonesianus</i>		+		+	+
<i>Coscinodiscus marginatus</i>			+		
<i>Coscinodiscus megalomma</i>		+	+	+	+
<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>		+	+	+	+
<i>Coscinodiscus radiatus</i>		+	+	+	+
<i>Coscinodiscus subconcaus</i>			+		
<i>Coscinodiscus</i> sp. type A	+	+	+		
<i>Coscinodiscus</i> sp. type B			+		
<i>Cylindrotheca closterium</i>	+	+	+		
<i>Dactyliosolen fragillima</i>	+	+	+	+	+
<i>Detonula pumila</i>		+	+	+	+
<i>Diploneis crabro</i>				+	

Table 1. continued

Species name\date	10-Aug	16-Sep	7-Oct	18-Oct	11-Nov
<i>Ditylum brightwellii</i>	+	+	+		+
<i>Eucampia zodiacus</i>	+	+	+		+
<i>Grammatophora marina</i>		+			
<i>Guinardia flaccida</i>	+	+		+	
<i>Guinardia delicatula</i>			+	+	+
<i>Gyrosigma balticum</i>		+			
<i>Gyrosigma scalproides</i>		+		+	
<i>Hemiaulus hauckii</i>		+		+	
<i>Hemiaulus sinensis</i>	+				
<i>Lauderia borealis</i>	+				
<i>Leptocylindrus danicus</i>	+	+	+	+	+
<i>Leptocylindrus minimus</i>			+		+
<i>Melosira lineata</i>	+	+		+	
<i>Melosira nummuloides</i>			+		+
<i>Melosira</i> sp.				+	
<i>Meuniera membranaceae</i>	+	+		+	+
<i>Navicula</i> sp.		+	+	+	+
<i>Nitzschia lanceolata</i>	+				
<i>Nitzschia longissima</i>		+	+	+	
<i>Nitzschia pacifica</i>		+			
<i>Nitzschia sigma</i>		+	+		+
<i>Nitzschia sigma</i> var. <i>intermedia</i>					+
<i>Nitzschia vitrea</i>	+				
<i>Nitzschia</i> sp. type A	+	+	+		+
<i>Nitzschia</i> sp. type B		+	+		
<i>Odontella aurita</i>	+	+			
<i>Odontella longicruris</i>					+
<i>Odontella longicruris</i> var. <i>hyalina</i>		+			+
<i>Odontella mobiliensis</i>		+			+
<i>Odontella sinensis</i>		+	+		
<i>Paralia sulcata</i>	+	+	+	+	+
<i>Plagiogramma vanheurckii</i>	+				
<i>Pleurosigma aestuarii</i>	+				
<i>Pleurosigma angulatum</i>		+	+		
<i>Pleurosigma elongatum</i>		+	+	+	+
<i>Pleurosigma longum</i>		+			
<i>Pleurosigma normanii</i>					+
<i>Pleurosigma</i> sp.		+	+		+
<i>Proboscia alata</i> for. <i>indica</i>	+	+	+	+	+
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	+				+
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	+	+	+	+	+
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp. type A		+	+		+
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp. type B			+		+
<i>Rhizosolenia bergonii</i>		+	+		+
<i>Pseudosolenia calcar avis</i>	+	+			
<i>Rhizosolenia imbricata</i>			+		
<i>Rhizosolenia robusta</i>		+		+	
<i>Rhizosolenia setigera</i>	+				+
<i>Rhizosolenia stolterforthii</i>	+	+	+	+	
<i>Skeletonema costatum</i>	+	+	+	+	+
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>		+	+	+	
<i>Stephanopyxis turris</i>	+	+	+		+
<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>			+		
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	+	+	+	+	+

Table 1. continued

Species name\date	10-Aug	16-Sep	7-Oct	18-Oct	11-Nov
<i>Thalassiosira decipiens</i>			+	+	+
<i>Thalassiosira eccentrica</i>			+		
<i>Thalassiosira gravida</i>	+	+	+	+	+
<i>Thalassiosira hyalina</i>		+	+		+
<i>Thalassiosira mala</i>		+			
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>		+			
<i>Thalassiosira rotula</i>		+	+		+
<i>Thalassiosira</i> sp. A		+	+		+
<i>Thalassiosira</i> sp. B		+			
<i>centric diatom</i>	+	+	+	+	+
<i>pennate diatom</i>		+	+	+	+
Dictyochophyceae					
<i>Dictyocha fibula</i>	+	+	+	+	+
<i>Distephanus speculum</i>	+	+	+		
<i>Distephanus speculum</i> var. <i>octonarius</i>	+	+	+	+	+
<i>Ebria tripartita</i>			+	+	+
Dinophyceae					
<i>Akashiwo sanguinea</i>	+	+	+	+	
<i>Alexandrium minutum</i>					+
<i>Alexandrium tamarense</i>	+	+	+	+	
<i>Alexandrium</i> sp. type A	+	+	+	+	
<i>Alexandrium</i> sp. type B			+	+	
<i>Amphidinium</i> sp.		+	+	+	
<i>Ceratium breve</i>	+	+			
<i>Ceratium furca</i>		+		+	+
<i>Ceratium fusus</i>	+	+	+		
<i>Ceratium kofoidii</i>	+	+		+	+
<i>Ceratium tripos</i>	+	+			
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>		+	+	+	
<i>Cochlodinium</i> sp.			+	+	
<i>Dinophysis acuminata</i>		+			+
<i>Dinophysis caudata</i>		+		+	
<i>Dinophysis fortii</i>	+	+			
<i>Dinophysis rotundata</i>	+				
<i>Diplopsalopsis asymmetrica</i>	+				
<i>Gonyaulax spinifera</i>		+			
<i>Gonyaulax polygramma</i>		+			
<i>Gymnodinium catenatum</i>		+	+	+	
<i>Gymnodinium impudicum</i>		+	+	+	+
<i>Gymnodinium simplex</i>		+	+	+	
<i>Gymnodinium</i> sp. type A		+	+	+	+
<i>Gymnodinium</i> sp. type B	+	+	+	+	
<i>Gymnodinium</i> sp. type C	+	+	+		
<i>Gyrodinium aureolum</i>		+	+		
<i>Katodinium</i> sp.					+
<i>Pyrophacus horologium</i>	+	+			
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	+	+	+		
<i>Scrippsiella</i> sp.	+		+		
Raphidophyceae					
<i>Chattonella antiqua</i>	+				
<i>Chattonella</i> sp. type A		+	+		+
<i>Chattonella</i> sp. type B		+			

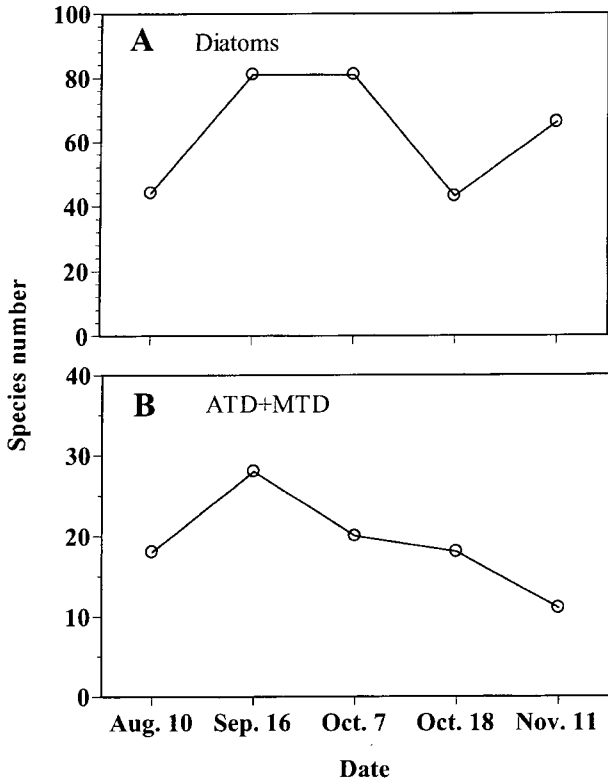


Fig. 4. The temporal variations in the species number of diatoms (A) and autotrophic (ATD) + mixotrophic dinoflagellates (MTD) (B) present from August 10 to November 11, 1999.

일에는 66종으로 다소 증가하였다(Fig. 4A). 독립-혼합영양성 와편모류의 시기별 총 종수는 8월 10일에 18종으로 낮았으나, 9월 16일에는 28종으로 가장 높게 나타났으나, 10월 7일에는 20종, 10월 18일에는 18종, 11월 11일에는 11종으로 점차 감소하여 규조류와는 다른 양상을 보였다.

규조류의 시기별 최대풍도(Maximum Abundance at All Stations in each sampling time; 이하 MAAS)는 8월 10일에 1,753 cells ml⁻¹으로 높은 값을 나타냈으나 9월 16일에 175 cells ml⁻¹로 모든 종에서 급감하기 시작하여 10월 7일에 101 cells ml⁻¹, 유해성 적조발생 시기인 10월 18일에 25 cells ml⁻¹로 최저값을 나타냈으나 적조가 소멸된 11월 11일에는 981 cells ml⁻¹로 다시 급증하였다(Fig. 5A). 독립-혼합영양성 와편모류의 MAAS는 8월 10일에 336 cells ml⁻¹로 비교적 높게 나타났으나 9월 16일에 127 cells ml⁻¹로 급감하기 시작하여 10월 7일에 37 cells ml⁻¹로까지 감소하였다. 그러나 10월 18일에 463 cells ml⁻¹로 독립-혼합영양성 와편모류는 급증하여 *C. polykrikoides* 적조파를 형성하였다(Fig. 5B). 그러나 11월 11일에는 15 cells ml⁻¹로 독립-혼합영양성 와편모류는 급감하였다. 그러므로 유해성 *C. polykrikoides* 적조발생 전, 후인 10월 7일, 18일, 11월 11일에는 규조류, 독립-혼합영양성 와편모류의 시기별 MAAS가 반대로 나타남을 알 수 있었다.

한 조사시기에 조사된 모든 정점에서 규조류의 평균 풍도인 AAAS는 8월 10일에 각각 925 cells ml⁻¹으로 높았으나 9월 16일에 71 cells ml⁻¹, 10월 7일에 37 cells ml⁻¹, 유해성 적조발생 시기인

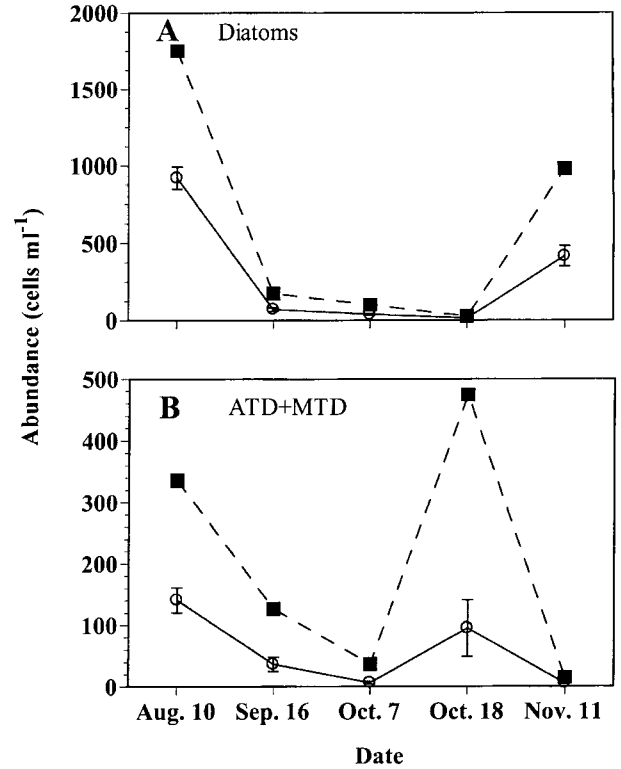


Fig. 5. The temporal variations in the maximum (closed squares) and mean (open circles) abundances of diatoms (A) and autotrophic (ATD) + mixotrophic dinoflagellates (MTD) (B) present from August 10 to November 11, 1999. The symbols represent mean+standard error. Means are calculated by averaging the values measured from all depths and stations at each sampling time.

10월 18일에 13 cells ml⁻¹로 지속적으로 크게 감소하였지만, 적조가 소멸된 11월 11일에는 417 cells ml⁻¹로 다시 급증하였다(Fig. 5A). 독립-혼합영양성 와편모류의 AAAS는 8월 10일에 각각 141 cells ml⁻¹으로 비교적 높았으나 9월 16일에 38 cells ml⁻¹, 10월 7일에 7 cells ml⁻¹로 감소하였다(Fig. 5B). 그러나 10월 18일에는 *C. polykrikoides* 적조발생으로 와편모류의 AAAS가 92 cells ml⁻¹로 급증하였고, 적조소멸 뒤인 11월 11일에는 6 cells ml⁻¹로 감소하였다.

MAAS: AAAS 비율은 플랑크톤들이 얼마나 강한 patch가 형성되어 있는지를 간접적으로 알려주는 것으로 10월 18일의 규조류나, 이 시기 외 다른 시기의 독립-혼합영양성 와편모류와 규조류 경우 비율이 모두 0.5~2.7 정도이었으나 10월 18일에는 독립-혼합영양성 와편모류의 비율 MAAS: AAAS이 약 5.1로 이 시기에 독립-혼합영양성 와편모류가 좁은 해역에 고밀도의 patch를 형성하고 있음을 알 수 있다. 즉, 10월 18일의 독립-혼합영양성 와편모류의 정점별 평균 풍도인 AAES의 수평적 분포가 정점 4에서 매우 높았으나 정점 2에서는 훨씬 낮게 나타난 결과로 적조 띠가 외측에 형성되어 있음을 반영한다(Fig. 6).

규조류의 관측시기별 우점종은 8월 10일, 9월 16일, 11월 11일에는 *Skeletonema costatum*, 10월 7일과 18일에는 *Paralia sulcata* 등이었다(Fig. 7A-C). 독립-혼합영양성 와편모류의 관측시기별 우점종은 8월 10일에 *Gymnodinium* sp. A(20 μm), 9월 16일에 *Gyrodinium aureolum*이었으나 10월 7일과 10월 18일, 11월 11일

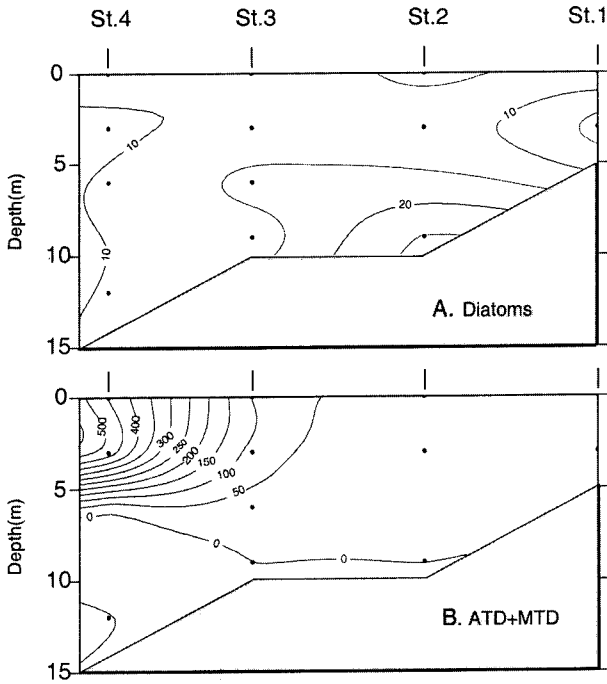


Fig. 6. The spatial distributions of diatoms (A) and autotrophic (ATD)+mixotrophic dinoflagellates(MTD) (B) on October 18, 1999 when the red tide dominated by *C. polykrikoides*/*G. impudicum* outbreak. Closed circles are the sampling depths.

에는 모두 *Cochlodinium polykrikoides*로 나타났다(Fig. 7D-G).

규조류에 속하는 *Chaetoceros danicus*, *Leptocylindrus danicus*, *Paralia sulcata*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Skeletonema costatum*과 독립 혼합영양형 외편모류인 *Gymnodinium* sp. A(20µm)와 *Prorocentrum minimum* 등은 모든 시기에 나타났고, 유해성 적조의 원인생물인 *Cochlodinium polykrikoides*와 *Gymnodinium impudicum*은 9월 16일 이후 계속 출현하였다(Table 1).

적조원인생물동태

조사기간 중 조사해역에서 출현한 외편모성 적조생물은 *Alexandrium tamarense*, *Ceratium kofoidii*, *C. furca*, *C. fusus*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Dinophysis acuminata*, *Gymnodinium catenatum*, *G. impudicum*, *Gymnodinium* sp.A(20µm), *Gyrodinium aureolum*, *Prorocentrum dentatum*, *P. triestinum*, *Scrippsiella trochoidea* 등 13종이고, 규조류성 유해성 적조생물은 *Pseudo-nitzschia pungens* 이었다(Table 1). 이 들 중 실제로 적조띠를 형성하여 적조를 일으킨 종들은 *Gymnodinium* sp. A(8월 10일, 최대풍도=264 cells ml⁻¹), *G. aureolum*(9월 16일, 최대풍도는 200 cells ml⁻¹, 정점 4 인근), *C. polykrikoides*(10월 18일, 최대풍도=463 cells ml⁻¹)이었다.

*Cochlodinium polykrikoides*는 농도는 낮지만(최대풍도 5 cells ml⁻¹) 9월 16일에 정점 4에서 처음 발견되었다. 10월 7일에 처음으로 이 종에 의한 적조 띠가 발견되었으며 10월 18일에 정점 1, 2, 3, 4에서의 *C. polykrikoides*의 풍도는 각각 24, 20, 31, 463 cells ml⁻¹로 나타났다. 그러나 정점 4에서의 *C. polykrikoides* 풍도는 다른 해역의 적조 patch나 slick에서의 풍도에 비하여 낮은 편이다.

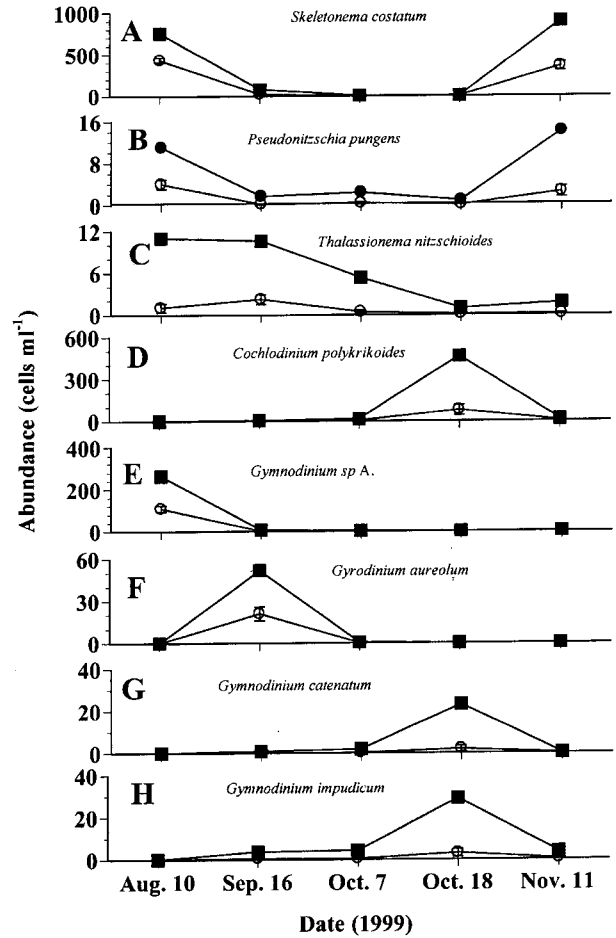


Fig. 7. The temporal variations in the maximum (closed squares) and mean (open circles) of the dominant diatoms (A) and autotrophic (ATD)+mixotrophic dinoflagellates (MTD) (B) present from August 10 to November 11, 1999. The symbols represent mean+standard error. Means are calculated by averaging the values measured from all depths and stations at each sampling time.

토 의

환경요인의 시간적 변화

유해성 적조가 다시 발생한 본 조사기간 동안, 조사해역에서 수온(15.9~24.9°C)은 지난 5년간 조사해역에서의 수온(14.7~25.2°C)과 비슷하게 나타났으며, 염분(29.4~31.5 psu)도 지난 5년간 염분(28.2~32.5 psu)과 큰 차이가 없었다.

본 연구기간 동안 10월 7일과 10월 18일에 각각 0.5 psu 염분의 감소는 강우량이 10월 2일에 내린 26 mm, 10월 10일-14일 사이에 내린 115 mm 강우에 기인한다고 판단된다(기상청, 2001). 이러한 담수의 유입으로 인하여 TDIN, PO₄, SiO₂가 각각 9, 0.5~0.7, 18 µM로 비교적 높게 유지되었던 것으로 판단된다(Fig. 3). 10월 7일-18일 사이에 SiO₂경우는 거의 일정한 수준을 유지하였는데 이는 규조류가 적어 거의 소비가 없었던 것으로 판단되나, PO₄는 감소되어 *Cochlodinium polykrikoides* 등 적조생물이 PO₄를 상당히 소비했을 가능성이 높은 것으로 판단된다. 이는 조사해

역에서 PO_4 의 농도가 *C. polykrikoides*의 적조발생에 영향을 줄 가능성이 말해주는 것으로 이에 대한 생리적 실험이 필요하다.

출현 종 수와 풍도의 시간적 변화

규조류의 출현종 수와 풍도는 *Cochlodinium polykrikoides*가 우점하는 적조가 발생한 10월 18일에 가장 낮게 나타났다. 앞서 언급한 것처럼 유해성 적조발생 전인 10월 7일과 적조발생 직후인 10월 18일의 TDIN, PO_4 , SiO_2 등 영양염류 농도가 조사기간 중 가장 높은 시기여서 성장률이 와편모류에 비하여 훨씬 빠른 규조류가 가장 적게 나온 것은 해석하기 어려운 부분이 있으나 추정해 볼 수 있는 것은 규조류에 대한 포식자들에 의한 포식압이 높고, *C. polykrikoides*에 대한 포식압이 상대적으로 작을 경우이다. 실제로 10월 18일에 섬모류(정 등, submitted)와 후생동물플랑크톤(김 등, submitted)의 풍도가 조사기간 중에 가장 높아 이에 대한 가능성을 있는데 이를 증명하기 위해서는 추가적인 실내외에서의 포식압 측정 실험이 필요하다. 실제로 섬모류 중에서 규조류를 집중적으로 소비할 수 있는 무피성 섬모류(naked ciliate) 종들이 많으나(Montagnes et al., 1996), *C. polykrikoides*나 *Gymnodinium impudicum*의 경우 크기가 $150 \mu m$ 이상 되는 소수의 큰 *Strombidinopsis*만이 효과적으로 포식할 수 있다(Jeong et al., 1999).

조사기간 동안 조사해역에서 식물플랑크톤의 경우 1 cells ml^{-1} 이 넘는 출현 종은 해마다 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*이 우점하는 적조가 가장 먼저 발생하는 전남 고흥-여수 해역에서 1997년 8월-11월에 출현한 식물플랑크톤 종류와 80%정도 비슷하였는데 그 중 규조류는 85%, 와편모류는 76%, silicoflagellate는 75%, raphidophyceae는 33%가 같게 나타나 8월-11월 출현 규조류, 와편모류, silicoflagellate가 상당히 비슷함을 알 수 있다(정 등, 2000a). 특히 유해성 적조와 연관된 독립 혼합영양성 와편모류들의 경우 새만금해역에서 출현한 종은 모두 36종인데, 이는 고흥-여수 해역에서 1997년 8월-11월에 출현한 42종과 비슷하여(정 등, 2000a), 두 해역이 지리적으로 200 km 이상 떨어져 있고, 조석간만의 차, 쿠로시오의 유입, 탁도의 차이 등이 상당히 많음에도 불구하고 비슷한 종에 의한 적조가 발생할 가능성이 높다.

새만금 해역의 적조생물 및 유해성 적조의 형성

새만금 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides*가 우점하는 적조가 1998년에 이어 1999년도에도 발생하였는데 1999년 *C. polykrikoides*의 최대풍도($463 \text{ cells ml}^{-1}$)는 1998의 최대풍도($630 \text{ cells ml}^{-1}$)와 비슷하였다. 1998년 이전에 새만금을 비롯한 인근 해역에 *C. polykrikoides*가 발견된 기록이 없었고 가시적으로 발견할 수 있었던 적조 띠가 발견된 적이 없었으나 1998년의 경우 10월 초부터 갑자기 적조 띠가 출현, 전북 부안군 상왕등도에서 군산시 십이동과도까지 수십 km(군산 KBS 항공 촬영 자료)에 걸쳐 분포하여 이미 다른 해역에서 형성되었던 적조 띠가 새만금 해역으로 유입되었을 가능성이 높았다. 그러나 1999년의 경우 새만금 해역에 발생한 *Cochlodinium polykrikoides*적조는 다음 두 가지 상황을 고려할 때 외부에서 유입되지 않고 조사해역 내에서 세포증식을 통하여 형성되었을 가능성도 배제할 수 없다; 첫째, 최근 새만금 해역의 저질에서 *Cochlodinium* 속(genus)에 속하는 휴면포자(dormant cyst)가 발견되었는데, 이 해역 수층에서 나타난

*Cochlodinium*종은 *C. polykrikoides* 1종 뿐이었으므로 이 휴면포자는 *C. polykrikoides*의 것이었을 가능성이 높다(박 등, unpublished data). 둘째, 새만금 해역에서 분리, 배양한 *C. polykrikoides*의 수는 $20 \sim 25^\circ C$ 에서 최대성장률 $0.3 \sim 0.4 \text{ d}^{-1}$ 를 감안하면(정 등, unpublished data), 적조발생 1개월 전인 9월 16일 5 cells ml^{-1} 에서 10월 18일 $463 \text{ cells ml}^{-1}$ 에 쉽게 도달할 수 있다. 그러나 역시 이러한 상황을 확실히 증명하기 위해서는 *C. polykrikoides*의 것으로 추정되는 휴면포자를 알아서켜 그 종인지를 정확히 동정해야 하고, 난류(turbulence), 포식자에 의한 피식(mortality due to predation)을 감안한 성장률을 구해야 한다. 이러한 것들이 사실로 증명된다면 앞으로 새만금 해역에 조사기간 동안 발견된 비슷한 최고 풍도의 *C. polykrikoides* 적조가 반복적으로 발생할 가능성이 높다.

새만금 해역과 고흥-여수 해역의 적조발생 비교

전남 고흥-여수 해역은 1995년 이래 매년 유해성 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*적조가 가장 먼저 발생하는 곳으로(양 등 2000, 정 등 2000a & b), 이 곳에서의 적조발생과 본 연구해역에서의 적조발생 양상을 비교할 필요가 있다. 새만금 해역은 만경강과 동진강이 유입되고 인근에 금강도 있어 담수의 유입이 있을 경우 연안 환경에 큰 영향을 줄 수 있는 곳인 반면, 고흥-여수 해역은 여수 북동쪽에 섬진강이 위치하고 있으나 그 거리가 상당히 멀고 고흥에 해창만이라는 저수지가 있으나 이 곳에서 방출되는 담수의 영향은 그리 크지 않으리라고 추정된다(양 등, 2000).

고흥-여수 해역에서는 8월-10월 사이에 주로 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*에 의한 유해성 적조만 발생되어 왔으나, 새만금 해역에서는 8월에 *Gymnodinium* sp. A, 9월에는 *Gyrodinium aureolum*, 그리고 10월에는 *C. polykrikoides*가 적조를 일으키는 등 적조원인생물 종이 빠르게 바뀌어 새만금 해역의 환경변화가 고흥-여수 해역보다 심하고 이러한 환경변화가 적조의 원인 종을 신속하게 바꿀 수 있다고 판단된다(Table 2).

새만금 해역에서 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*의 농도가 1 cells ml^{-1} 이상으로 나타나기 시작한 시기는 9월 16일로써, 1997년 고흥-여수 해역의 8월 1일보다 50여일 정도 늦게 나타났으나 이때 새만금 해역의 수온과 염분이 각각 $24.6^\circ C$, 31.5 psu로 고흥-여수 해역의 $24.8^\circ C$, 31.6 psu와 매우 비슷하게 나타났다. 영양염류의 경우는 새만금 해역에서는 TDIN, PO_4 가 각각 6.7, $0.2 \mu M$ 로 고흥-여수 해역에서 TDIN, PO_4 가 각각 4.5, $0.1 \mu M$ 보다 약간 높았다. N:P비를 살펴보면 새만금 해역은 5-260, 고흥 해역은 5-47으로 새만금 해역이 더 인(P) 농도의 영향을 받을 가능성이 높다(Table 2).

새만금 해역에서 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*의 적조 띠가 나타나기 시작한 시기는 10월 18일로써, 1997년 고흥-여수 해역의 8월 27일보다 역시 1.5개월 정도 늦게 나타났다. 이때 새만금 해역의 표층 수온과 염분의 평균은 각각 $20.0^\circ C$, 29.4 psu로 고흥-여수 해역의 $26.3^\circ C$, 31.6 psu보다 수온은 $6.3^\circ C$, 염분은 2.2 psu 낮게 나타났다. 영양염류의 경우는 새만금 해역에서는 TDIN, PO_4 가 각각 9.4, $0.5 \mu M$ 로 고흥-여수 해역에서 TDIN, PO_4 가 각각 2.4, $0.1 \mu M$ 보다 약 5배 가량 더 높았다. 새만금 해역에서의 N, P 농도가 더 높았음에도 불구하고 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*의 최대 풍도는 $463 \text{ cells ml}^{-1}$ 으로 고흥-여수 해역의 $31,700 \text{ cells ml}^{-1}$ 보다 훨씬 낮았다. 이 경우 (1) 수온의 차이, (2) 탁도나 난류세기 차이,

Table 2. Comparison of the process of red tides dominated by *Cochlodinium polykrikoides*/*Gymnodinium impudicum* off Saemankeum areas (SMK) in 1999 and off Kohung-Yeosu (KY) in 1997 (Jeong et al., 2000a). Water temperature, salinity, and TDIN(Total dissolved inorganic nitrogen), phosphate (P), diversity index were means calculated by averaging all values measured at each depth of the station where the maximum abundances of *C. polykrikoides*/*G. impudicum* were observed at the different stages. Species number were obtained by combining the values from all depths at the station. The maximum abundance of total diatoms were obtained from the same sample which gave the that for *C. polykrikoides*/*G. impudicum*.

Stage	Item	SMK	KY
Before the outbreak of red tides	the first date when the abundance of <i>Cochlodinium</i> / <i>Gymnodinium</i> > 1 cells ml ⁻¹	September 16	August 1
	Water temperature (°C)	24.6	24.8
	Salinity (psu)	31.5	31.6
	TDIN (μM)	6.7	4.5
	P (μM)	0.2	0.1
	TDIN/P	33.5	45
	species number of diatoms	52	17
	species number of dinoflagellates	12	10
	diversity index	2.38	0.87
	Outbreak of red tides	the first date when <i>Cochlodinium</i> / <i>Gymnodinium</i> red tides outbreaked	October 18
Water temperature (°C)		20.0	26.3
Salinity (psu)		29.4	31.6
TDIN (μM)		9.4	2.4
P (μM)		0.5	0.1
TDIN/P		18.8	24.0
species number of diatoms		23	62
species number of dinoflagellates		11	15
diversity index		0.20	0.12
		the maximum abundance of total diatoms (cells ml ⁻¹)	2.5
	the maximum abundance of <i>Cochlodinium</i> / <i>Gymnodinium</i> (cells ml ⁻¹)	463	31,700
	co-occurring dominant diatoms	<i>Guinaria flaccida</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassiosira nitzchioides</i>	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> , <i>Pseudonitzschia pungens</i> , <i>Skeletonema costatum</i>
	co-occurring dominant dinoflagellates	<i>Alexandrium tamarense</i> , <i>Gymnodinium catenatum</i> , <i>Prorocentrum minimum</i>	<i>Lingulodinium polyedrum</i> , <i>Prorocentrum triestinum</i> , <i>Scrippsiella trochidea</i>
disappearance of red tides	the date when <i>Cochlodinium</i> / <i>Gymnodinium</i> red tides disappeared	November 11	September 21
	Water temperature (°C)	15.9	26.3
	Salinity (psu)	31.2	31.6
	TDIN (μM)	6.0	3.6
	P (μM)	0.25	0.2
	TDIN/P	24.0	18.0
	species number of diatoms	49	21
	species number of dinoflagellates	4	5
	diversity index	0.87	0.69
		the maximum abundance of total diatoms (cells ml ⁻¹)	899
	the maximum abundance of <i>Cochlodinium</i> / <i>Gymnodinium</i> (cells ml ⁻¹)	12.8	3.1
	co-occurring dominant diatoms	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> , <i>Guinardia delicatula</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	<i>Nitzschia longissima</i> , <i>Guinardia delicatula</i> , <i>Rhizosolenia delicatula</i> , <i>Skeletonema costatum</i>
	co-occurring dominant dinoflagellates	<i>Ceratium furca</i> , <i>Ceratium kofoidii</i> , <i>Prorocentrum minimum</i>	<i>Ceratium kofoidii</i> , <i>Prorocentrum triestinum</i> , <i>Scrippsiella trochidea</i>

(3) 포식압 차이, (4) 물리적 집적 정도(front 영향) 차이 등의 추론이 가능하므로 추후 실내외에서의 생리, 생태적 연구가 필요하다.

C. polykrikoides/*G. impudicum* 적조발생시 같이 나타난 규조류 및 독립-혼합영양성 외편모류 우점종의 경우 새만금 해역은 규조류인 *Guinaria flaccida*, *Skeletonema costatum*, *Thalassionema nitzschioides*와 독립-혼합영양성 외편모류인 *Alexandrium tamarense*, *Gymnodinium catenatum*, *Prorocentrum minimum*인 반면 고흥-여수 해역은 규조류인 *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Skeletonema costatum*, *Pseudo-nitzschia pungens*와 독립-혼합영양성 외편모류인 *Lingulodinium polyedrum*, *Scrippsiella trochoidea*, *Prorocentrum triestinum*으로 규조류인 *Skeletonema costatum* 외에는 모두 달라 경쟁종이 지역에 따라 다름을 알 수 있었다(Table 2). 그러나 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조가 발생하는 시기는 새만금 해역에서는 규조류 풍도가 가장 낮은 시기이고, 고흥-여수 해역에서는 수평적 분포를 보면 규조류의 풍도가 낮아질수록 *C. polykrikoides*/*G. impudicum*의 상대적인 풍도가 높아지는 뚜렷한 경향을 보여 규조류와 경쟁에서 이길 수 있는 조건이 형성되어야 *C. polykrikoides*/*G. impudicum* 적조가 발생되거나 유지된다고 판단된다.

C. polykrikoides/*G. impudicum* 적조가 소멸한 시기를 보면 새만금 해역은 11월11일로써, 1997년 고흥-여수 해역의 9월 22일보다 역시 50여일 정도 늦게 나타났다. 이때 새만금 해역의 표층 수온과 염분의 평균은 각각 15.9°C, 31.2 psu로 고흥-여수 해역의 26.3°C, 31.6 psu보다 수온은 6.3°C, 염분은 2.2 psu 낮게 나타났다. 영양염류의 경우는 새만금 해역에서는 TDIN, PO₄가 각각 6.0, 0.25 μM로 고흥-여수 해역에서 TDIN, PO₄가 각각 3.6, 0.2 μM보다 약간 높았다(Table 2).

C. polykrikoides/*G. impudicum* 적조가 소멸한 뒤 나타난 우점 규조류가 새만금에서 *Guinardia delicatula*, *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*이고, 고흥-여수에서는 *Guinardia delicatula*, *Skeletonema costatum*, *Nitzschia longissima*로써 매우 비슷하고, 우점 외편모류 경우에 새만금 해역에서는 *Ceratium kofoidii*, *C. furca*, *Prorocentrum minimum*이고 고흥-여수 해역은 *C. kofoidii*, *Prorocentrum triestinum*으로 매우 유사하여 두 해역의 적조소멸기작이 비슷할 가능성이 높다. 양 등(2000)에 의하면 고흥-여수의 경우 적조발생, 유지 시기의 물성과 전혀 다른 수괴가 이동해와 이 해역의 적조가 소멸되었다고 주장하였는데 새만금 해역에서도 10월 18일에 있었던 담수의 영향으로 인한 염분의 감소가 있었으나 적조소멸 후 적조발생 전 수준으로 증가하여 물성이 달라진 것을 알 수 있다.

새만금 해역은 방조제 건설이 완성되면 해수의 흐름이 제한되고 난류가 감소되며 담수호로부터 고농도의 영양염류를 포함한 담수가 불규칙하게 유입되어, 적조발생이 빈번해 질 가능성이 높으므로 방조제 완성 후에도 지속적인 연구를 실시해야 한다.

사 사

본 연구를 수행하는데 있어서 현장에서 시료채취를 도와준 군산대학교 김재성, 김성택, 윤주이, 양동진, 손영태, 김영태 대학원 학생들에게 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부/과학재단 지역협력센터(RRC)와 1999년도 교육부/학술진흥재단 BK21 연구비 지원을 받아 수행하였다.

참고문헌

- 김상청, 2001. 홈페이지 <http://www.kma.go.kr>내 날씨, 기후자료
- 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1998. 한국연안의 적조. 국립수산진흥원.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 1. 1997년도 물리, 화학적인 특성. 한국해양학회지 '바다', 5: 16-26.
- 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경제. 2000a. 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지 '바다', 5: 27-36.
- 정해진, 박종규, 김재성, 김성택, 윤주이, 김수경, 박용민, 2000b. 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 3. 1997년도 종속영양성 외편모류와 섬모류의 시공간적 변화. 한국해양학회지 '바다', 5: 37-46.
- 정해진, 유영두, 김재성, 전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구. 2. 1999년도 여름-가을 종속영양성 외편모류와 섬모류의 시간적 변화. submitted.
- 최현용, 2001. 한국 남해 나로도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계. 한국해양학회지 '바다', 6: 49-62.
- ECOHAB, 1995. A National Research Agenda. Woods Hole Oceanographic Institution. pp. 66.
- Eppley, R.W. and W.G. Harrison, 1975. Physiological ecology of *Gonyaulax polyedra*, a red tide water dinoflagellate of southern California. In: Proceedings First International Conference on Toxic Dinoflagellate Blooms. by Locicero, V.R., Wakefield, Massachusetts, Massachusetts Science and Technology Foundation. pp. 11-22.
- Eppley, R.W., J.N. Rogers, J.J. McCarthy, 1969. Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 14: 912-920.
- Fermin, E.G., F.G. Figueras, B. Arbones and M.L. Villarino, 1996. Short-time scale development of a *Gymnodinium catenatum* population in the Ria de Vigo (NW Spain). *J. Phycol.* 32: 212-221.
- Jeong, H.J., 1995. The interactions between microzooplanktonic grazers and dinoflagellates causing red tides in the open coastal waters off southern California. Ph.D. thesis. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego.
- Jeong, H.J. and M.I. Latz, 1994. Growth and grazing rates of the heterotrophic dinoflagellates *Protoperidinium* spp. on red tide dinoflagellates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106: 173-185.
- Jeong, H.J., J.H. Shim, J.S. Kim, J.Y. Park, C.W. Lee, Y. Lee, 1999a. The feeding by the thecate mixotrophic dinoflagellate *Fragilidium* cf. *mexicanum* on red tide and toxic dinoflagellate. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 176: 263-277.
- Jeong, H.J., J.H. Shim, C.W. Lee, J.S. Kim and S.M. Koh, 1999b. Growth and grazing rates of the marine planktonic ciliate *Strombidinopsis* sp. on red-tide and toxic dinoflagellate. *J. Euk. Microb.*, 46: 69-76.
- Jeong, H.J., S.K. Kim, J.S. Kim, S.T. Kim, Y.D. You, and J.Y. Yoon, 2001a. Growth and Grazing Rates of The Heterotrophic Dinoflagellate *Polykrikos kofoidii* on Red-Tide and Toxic Dinoflagellates. *J.*

- Euk. Microb.*, **48**: 298–308.
- Jeong, H.J., H.J. Kang, J.H. Shim, J.K. Park, J.S. Kim, J.Y. Song and H.J. Choi, 2001b. The interactions among a toxic dinoflagellate *Amphidinium carterae*, the heterotrophic dinoflagellate *Oxyrrhis marina*, and the calanoid copepods *Acartia* spp. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **218**: 77–86.
- Jeong, H.J., J.Y. Yoon, J.S. Kim, Y.D. Yoo, K.A. Seong. 2002. Growth and grazing rates of the prostomatid ciliate *Tiarina fusus* on red-tide and toxic algae. *Aquat. Microb. Ecol.*, (In press).
- Juhl, A.R., V. Velazquez, and M. Latz, 2000. Effect of growth conditions on flow-induced inhibition of population growth of a red tide dinoflagellate. *Limnol. Oceanogr.*, **45**: 905–915.
- Kamykowski, D., 1974. Possible interactions between phytoplankton and semidiurnal internal tides. *J. Mar. Res.* **32**: 65–87.
- Montagnes, D.J.S., J.D. Berger and F.J.R. Taylor, 1996. Growth rate of the marine planktonic ciliate *Strombidinopsis cheshiri* Snyder and Ohman as a function of food concentration and interclonal variability. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **206**: 121–132.
- Smayda, T.J., 1997. Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, **42**: 1137–1153.
- Thomas, W.H., Gibson, C.H. (1990). Quantified small-scale turbulence inhibits a red tide dinoflagellate, *Gonyaulax polyedra* Stein. *Deep Sea Res.*, **37**: 1583–1593.
- Tyler, M.A. and H.H. Seliger, 1978. Annual subsurface transport of a red tide dinoflagellate to its bloom area: Water circulation patterns and organism distributions in the Chesapeake Bay. *Limnol. Oceanogr.*, **23**: 227–246.
- Tynan, C.T., 1993. The effects of small-scale turbulence on dinoflagellates. Ph.D. Thesis dissertation. University of California, San Diego. San Diego. pp. 227
- Watras, C.J., V.C. Garcon, R.J. Olson, S.W. Chisholm and D.M. Anderson, 1985. The effect of zooplankton grazing on estuarine blooms of the toxic dinoflagellate *Gonyaulax tamarensis*. *J. Plankton Res.*, **7**: 891–908.

2002년 5월 31일 원고접수

2002년 7월 8일 수정본 채택

담당편집위원: 정익교