

전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화

정해진 · 박종규¹ · 최현용 · 양재삼 · 심재형² · 신윤근³ · 이원호 · 김형섭 · 조경제¹

군산대학교 자연과학대학 해양학과, ¹인제대학교 환경연구소
²서울대학교 자연과학대학 해양학과, ³상지대학교 환경공학과

The Outbreak of Red Tides in the Coastal Waters off Kohung, Chonnam, Korea

2. The Temporal and Spatial Variations in the Phytoplanktonic Community in 1997

HAE JIN JEONG, JONG KYU PARK¹, HYUN-YONG CHOI, JAE SAM YANG, JAE HYUNG SHIM²,
YOON KEUN SHIN³, WON HO YIH, HYUNG SUP KIM AND KYEONG JAE CHO¹

Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

¹The Institution of Environmental Research, Inje University, Kimhae 621-749, Korea

²Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

³Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

전남 고흥군 나로도 해역은 1995년 이후 해마다 8월부터 10월까지 남해안에서 대규모로 발생하는 유해성 적조가 가장 먼저 발견되는 곳이다. 이 해역에서의 유해성 적조의 발생에 대한 연구를 하기 위하여, 1997년 6월 20일부터 9월 22일까지 모두 5차례에 걸쳐 최대 6개 정점, 5개 깊이에서 시료를 채집한 뒤 적조원인생물과 연관 식물플랑크톤의 분포를 조사하여 본 연구와 동시에 조사, 분석된 수온, 염분, 영양염류 분포 등 환경요인들과의 연관성을 연구하였다. 1997년의 경우 이 해역에서 8월 24일에 적조띠가 처음 발견되었는데 가장 우점했던 유해성 적조원인생물은 이제까지 알려진 것과는 다르게 *Gyrodinium impudicum*이었으며 *Cochlodinium polykrikoides*의 밀도는 *G. impudicum*의 밀도보다 훨씬 낮았다. 적조발생직전인 8월 21일에는 *G. impudicum*의 최대밀도가 90 cells ml⁻¹로 낮았고 주로 내측(nearshore)에서 밀도가 외측보다 높았으나, 발생 직후인 8월 27일에는 *G. impudicum*의 최대밀도가 30,000 cells ml⁻¹까지 이르렀고, 적조띠는 주로 외해(offshore)에 위치한 정점들에서 발견되었다. 이러한 갑작스러운 밀도의 증가는 *G. impudicum*의 최대성장률을 고려해 볼 때 *G. impudicum*의 적조띠가 다른 곳에서 이미 형성되었다가 본 조사해역으로 이동해왔거나, 저밀도로 산재해 있던 *G. impudicum*의 개체들이 물리적인 힘에 의하여 급속히 모여 적조띠를 이루었을 가능성을 제시할 수 있다. 8월 21일과 8월 27일 사이에 내측 정점에서는 *G. impudicum*의 밀도는 일정한 반면에, *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Pseudonitzschia pungens* 등 규조류가 대번식하였다. 이는 강우 뒤 육수의 유입이 내측 환경에 상당한 영향을 주었고 이러한 유입수의 고농도의 영양염류가 규조류의 급속한 성장을 야기시켰으며, 규조류의 급증은 오히려 상대적으로 성장률이 훨씬 낮은 *G. impudicum* 등 와편모류의 성장을 억제했을 가능성이 높다. 그러므로 이 해역에서의 적조발생은 advection, physical aggregation과 같은 물리적인 힘과 적조원인생물과 연관 식물플랑크톤간의 경쟁의 영향을 받았을 것으로 생각된다.

We investigated the phytoplankton community from June to September 1997 in the waters off Kohung, Korea where red tides dominated by harmful dinoflagellates had occurred from August to September or October since 1995. We took water samples five times from 5 depths at 6 or less stations in this study period. The most dominant harmful dinoflagellate during the red tide which had outbroken on August 24, 1997 was *Gyrodinium impudicum*, not *Cochlodinium polykrikoides*. On August 21 just before the harmful red tide occurred the abundance of *G. impudicum* at the inner bay station, 90 cells ml⁻¹, was higher than that at the outer bay station. However, on August 27 just after the red tide had outbroken, the abundance of *G. impudicum* at the inner bay station did not increase, whereas that at the outer bay increased rapidly and reached to the maximum of 30,000 cells ml⁻¹. Instead, diatoms such as *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Pseudonitzschia pungens* rapidly increased at the inner bay station where fresh water from lands has reached. The high abundance of dia-

toms might have inhibited the growth of red tide dinoflagellates at this station. The transport of already formed red tide patches from offshore areas, aggregation of scattered cells driven by physical forces, and/or competition between diatom and dinoflagellates might be responsible for this appearance of dense red tide patches at the outer bay station.

서 론

적조(red tide)란 플랑크톤의 대규모 번식으로 인하여 해수의 색이 변하는 현상으로 생태계의 균형을 파괴하고, 어패류의 대량 폐사를 야기시키며, 관광산업에 막대한 손실을 주는 심각한 환경 문제이다(ECOHAB, 1995). 세계적으로 볼 때 적조의 발생해역과 발생빈도가 증가하고 이에 따른 피해도 증가하고 있어 적조의 원인규명과 피해대책 연구는 과학자들 뿐만 아니라 관련 산업의 종사자들, 그리고 어패류의 소비자들에게도 많은 관심의 대상이 되고 있다.

우리나라의 연안에서도 그 동안 많은 적조가 발생해 왔는데 특히 1995년 이후 8월부터 10월 사이에 남해안을 중심으로 *Gyrodinium impudicum*과 *Cochlodinium polykrioides*가 우점하는 대규모 유해성 적조가 발생하여 수산업에 막대한 손실을 주고 있으며(김 등, 1998), 1995년에는 동해안(김 등, 1998), 1998년 가을에는 서해 근산연안에서도 이러한 유해성 적조가 출현하였다(Jeong *et al.*, unpublished data). 이 유해성 적조는 해마다 전남 고흥군 나로도 해역에서 처음 발견되어져 왔기 때문에 먼저 이 해역에서의 적조발생 양상(pattern)과 그 특징을 조사하고 이를 토대로 발생기작을 밝히는 연구가 절실하다.

적조발생기작은 적조원인생물, 해역, 계절에 따라 다를 수 있으며 (Eppley and Harrison, 1975; Tyler and Seliger, 1978; Fermin *et al.*, 1996), 이를 정확히 밝히기 위해서는 해양생물학적 자료뿐만 아니라 이와 동시에 조사된 해양물리, 화학, 지질학적 자료가 필요하다. 지금까지 밝혀진 적조발생의 유형은 여러 가지가 있는데 그 중 가장 널리 알려진 것들은 그 해역에 seed population이 free-living 상태나 휴면포자 상태로 존재하다가 성장에 좋은 환경이 주어졌을 때 개체들이 꾸준히 분열하여 적조띠를 이루는 경우(eg., Anderson, 1995), 낮은 밀도로 산재되어 있던 적조생물들이 전선(front)이나 내부파(internal wave) 등과 같은 물리적인 힘에 의하여 집적되는 경우(Kamykowski, 1974), 다른 해역에서 형성되었던 적조띠가 조사해역으로 옮겨오는 경우(Tyler and Seliger, 1978) 등이다. 이러한 유형은 복합적으로 작용할 수도 있는데, 예를 들어 적조생물들이 세포분열을 하여 그 개체군의 밀도가 조금씩 증가하는 과정에서 물리적인 힘이 작용하여 산재해 있던 적조생물들을 좁은 지역에 집적시키게 되면 밀도가 급증하여 갑작스러운 적조띠를 이룰 수 있다. 이때 성장에 좋은 환경이란 일반적으로 광조건이 좋고, 영양분(식물플랑크톤의 경우는 영양염류; 혼합영양성 플랑크톤의 경우는 영양염류와 먹이)이 풍부하며(Stoecker *et al.*, 1997), 난류(turbulence)가 약하고(Thomas and Gibson, 1990; Tynan, 1993), 피식물이 작아야 한다(Watras *et al.*, 1985, Jeong and Latz, 1994; Jeong *et al.*, 1999a, 1999b). 그런데 이러한 일반적인 호조건은 거의 모든 식물 및 혼합영양성 플랑크톤에 해당하므로 특정한 적조원

인생물이 적조를 일으키기 위해서는 다른 종에 비하여 보다 더 높은 성장률을 가질 수 있는 조건이 형성되어야 한다. 그러므로 나로도 해역에서 *Gyrodinium impudicum*과 *Cochlodinium polykrioides*가 다른 종을 극복하고 적조를 일으키는 환경을 알아보는 것은 매우 중요하다.

나로도 해역은 해창만, 여자만 등을 통하여 육수가 유입되고 또한 외양수의 유입이 빈번하게 일어나는 곳이다(양 등, 2000). 그러므로 이 해역에서의 담수와 외양수의 유입이 식물플랑크톤 군집변화에 어떠한 영향을 주고, 나아가 적조발생에 어떠한 영향을 주는지를 조사해야 한다. 본 연구가 시작되기 전에 본 해역에서의 플랑크톤군집에 대한 자세한 조사자료가 없으므로 본 연구에서는 나로도 해역에서 유해성 적조가 발생하기 2~3개월 전부터 적조발생직전, 직후, 적조소멸 시기에 여러 정점에서 적조생물들을 포함한 식물플랑크톤의 시공간적 분포 변화를 조사하고 동시에 조사된 수온, 염분, 영양염류 농도 분포 변화를 조사하여 유해성 적조의 발생, 발전, 소멸과정을 알아보고, 이에 영향을 주는 주요 환경요인과의 상호관계를 분석하였다. 본 연구에서는 남해안의 유해성 적조발생기작을 조사하는데 기초적인 자료를 제공하여 앞으로 조사해야 할 연구방향을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

시료채집 및 분석 방법

전남 고흥 나로도 해역에서 8월 하순경에 발생하는 유해성 적조의 발생연구를 위하여 유해성 적조가 일어나기 전인 1997년 6월 20일, 8월 1일, 적조발생 직전인 8월 21일, 적조발생 직후인 8월 27일, 적조 소멸직후인 9월 22일에 정점 5, 9, 12(Fig. 1)에서 시료를 채집하였다. 8월 27일에는 slick과 patch가 형성되어 있었던 정점 2, 13과 만의 바깥에 위치한 정점 14, 16을 추가하여 시료를 채집하였다. 각 정점에서의 시료는 수층 내의 5~7개 깊이에서 채취하였다. 채취 깊이는 CTD를 이용하여 수심, 수온, 염분, fluorescence 자료를 현장에서 분석한 뒤 결정하였고 채취방법은 31 Niskin 채수기를 이용하였다. 채취된 시료 중 21의 시료는 생물분석을 위해 한 개의 11와 여러 개의 250 ml 폴리에틸렌 병에 넣은 후 Lugol 용액으로 즉시 고정하였고 500 ml은 영양염류 분석을 위하여 냉동보관 하였다. Lugol로 고정된 시료는 용액 내 iodine의 광산화를 막기 위하여 암소에 보관하여 실험실로 운반하였다.

실험실에서는 시료내 세포의 균일한 분포를 위하여 100회 이상 흔들려 준 후 1 ml를 Sedgwick-Rafter counting chamber에 넣었으며, 세포수가 많은 시료(8월 27일 시료)는 그 중 48~64%만을 광학현미경으로 관찰하였고 세포수가 적은 시료에서는 100% 모두 검경, 동정하였다. 식물플랑크톤의 현존량은 단위 체적당 개체수(cells ml⁻¹)로 환산하였으며, 광학현미경은 Olympus

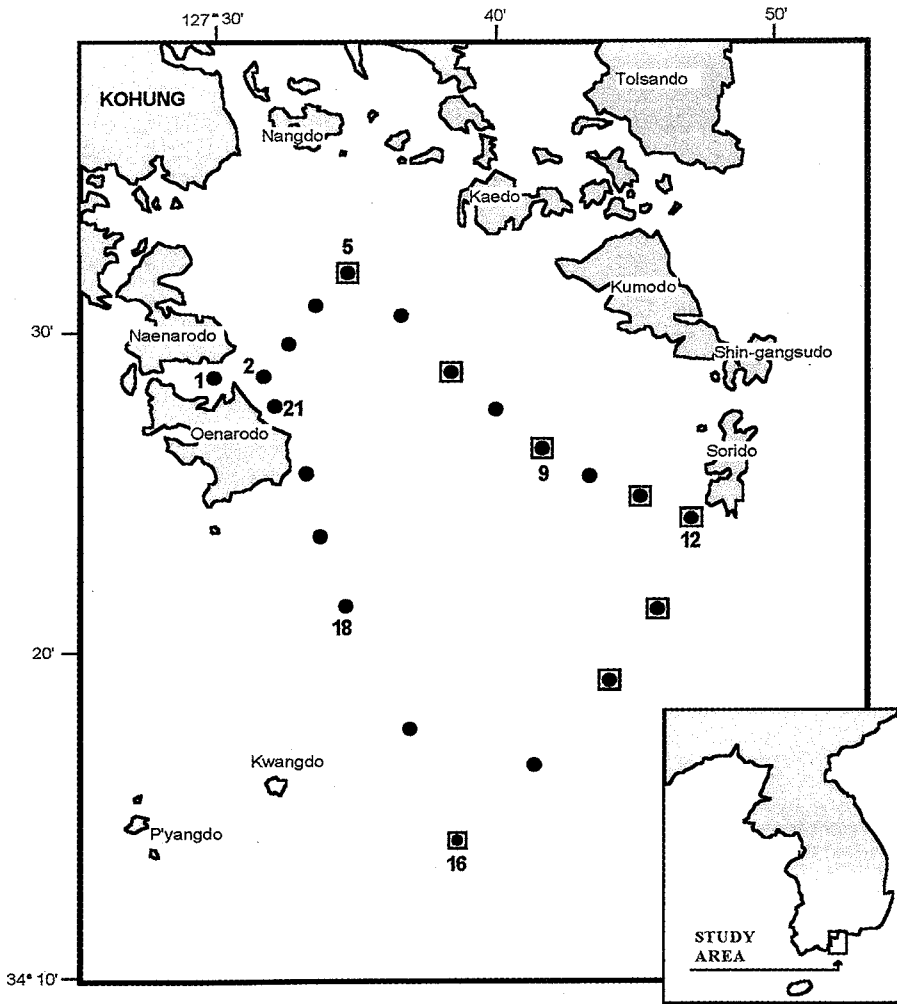


Fig. 1. Map showing the sampling locations off Naro-do, Kohung, Korea. ●, CTD casting; □, core and water sampling.

model AX70를 이용하였다.

자료분석

외편모류를 동정한 결과 독립영양성(autotrophic), 종속영양성(heterotrophic), 혼합영양성(mixotrophic) 외편모류가 모두 나타났으나, 본 논문에서는 독립영양성 외편모류만 취급하였다.

본 논문에서 언급한 한 종의 시기별 최대밀도(Maximum Density at each sampling Time; 이하 MDT)는 한 조사시기에 채집한 모든 시료(모든 정점과 모든 깊이) 각각에서 해당 종의 밀도를 구한 뒤 그 중 가장 높은 값을 택한 것이고, 정점별 평균밀도(Averaged Density at Each Station; 이하 ADES)는 조사 시기별로 한 정점의 모든 깊이에서 구한 밀도 값들을 평균한 것이며, 모든 정점의 평균밀도(Averaged Density at All Stations; 이하 ADAS)는 한 시기 모든 시료에서 구한 해당 종의 밀도값을 평균한 값이다. 양 등(2000)에 의하면 본 해역은 해수의 advection이 많이 일어나는 곳이므로 한 시기의 ADAS는 매우 중요한 의미를 갖는다.

다양성지수(diversity index, H')는 $H' = -\sum (P_i) \times \ln(P_i)$ 식을 이용하여 계산하였다(Shannon and Wiener, 1963). 여기서 P_i 는 i 번째 종이 전체 개체수에서 차지하는 비율을 의미한다.

결 과

유해성 적조의 주요 원인생물

1997년에도 1995년, 1996년과 마찬가지로 8월 24일 경에 전남 고흥군 나로도해역에서 처음으로 유해성 적조가 발생된 후 남해안 다른 연안에서도 적조발생이 보고되기 시작하였다. 유해성 적조의 원인생물로는 이제까지 알려진 것과는 다르게 *Gyrodinium impudicum*이 가장 우점하였으며(MDT=31,700 cells ml^{-1}), *Cochlodinium polykrikoides*는 그 밀도가 *G. impudicum* 보다 훨씬 낮았다(MDT=950 cells ml^{-1}). 또한 DAP(Domoic Acid Poisoning)를 일으키는 규조류인 *Pseudonitzschia pungens*가 높은 밀도로 출현하였다(MDT=2,060 cells ml^{-1}).

출현 식물플랑크톤의 종의 수와 밀도의 시간적 변화

조사기간 동안 조사해역에서 식물플랑크톤의 경우 1 cells ml^{-1} 이 넘는 출현종의 수가 총 180여종 가까이 되었는데(Tables 1), 독립영양성 외편모류(autotrophic dinoflagellates)와 규조류(diatom)가 각각 42종과 134종으로 우점하였고, silicoflagellates, euglenophyta, cryptomonad, raphidophyta에 속하는 종들이 각각 1~3종 출현하였다. 외편모류와 규조류의 출현종은 시간적 변화

Table 1. The list of phytoplankton > 1 cells ml⁻¹ occurring in the waters off Naro-do, Kohung, Korea from June 20 to September 22, 1997. Mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates were not included

SPECIES NAME	Date	20-Jun	1-Aug	21-Aug	27-Aug	22-Sep
DIATOMS						
<i>Actinopterychus senarius</i>					+	+
<i>Amphiprora alata</i>					+	
<i>Amphiprora gigantea</i>		+				+
<i>Asterionellopsis glacialis</i>		+	+	+	+	+
<i>Asteromphalus cleveanus</i>			+	+		
<i>Bacillaria paxillifera</i>				+		
<i>Bacteriastrum comosum</i>				+	+	
<i>Bacteriastrum delicatulum</i>				+	+	
<i>Bacteriastrum furcatum</i>				+	+	+
<i>Bacteriastrum hyalinum</i>				+	+	
<i>Cerataulina dentata</i>		+		+	+	
<i>Cerataulina pelagica</i>					+	
<i>Chaetoceros affinis</i>		+		+	+	
<i>Chaetoceros anastomosans</i>				+		
<i>Chaetoceros breve</i>		+			+	
<i>Chaetoceros compressus</i>		+	+	+	+	
<i>Chaetoceros coronatus</i>		+				
<i>Chaetoceros costatus</i>				+		
<i>Chaetoceros constrictus</i>				+	+	
<i>Chaetoceros curvisetus</i>					+	
<i>Chaetoceros danicus</i>			+	+	+	
<i>Chaetoceros decipiens f. singularis</i>					+	
<i>Chaetoceros denticulatus</i>					+	
<i>Chaetoceros didymus</i>				+	+	
<i>Chaetoceros eibenii</i>				+		
<i>Chaetoceros frichei</i>				+	+	
<i>C. didymus resting spore</i>					+	
<i>Chaetoceros lacinosus</i>					+	
<i>Chaetoceros laeve</i>				+	+	
<i>Chaetoceros lauderi</i>					+	
<i>C. lauderi resting spore</i>					+	
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>		+	+	+	+	
<i>C. lorenzianus resting spore</i>				+	+	
<i>Chaetoceros mesanensis</i>					+	
<i>Chaetoceros neglectus</i>					+	
<i>Chaetoceros perpusillus</i>					+	
<i>Chaetoceros pendulum</i>				+		
<i>Chaetoceros peruvianus</i>				+	+	
<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>		+	+	+	+	+
<i>C. pseudo. resting spore</i>					+	
<i>Chaetoceros similis</i>					+	
<i>Chaetoceros socialis</i>		+		+	+	
<i>Chaetoceros subtilis</i>		+		+	+	
<i>Chaetoceros spp. < 10 µm</i>		+	+	+	+	+
<i>Cyclotella meneghiniana</i>		+				
<i>Cocconeis sp.</i>					+	
<i>Corethron pelagicum</i>					+	
<i>Coscinodiscus centralis</i>					+	
<i>Coscinodiscus oculus iridis</i>				+		+
<i>Coscinodiscus sp.</i>				+	+	
<i>Cylindrotheca closterium</i>		+	+		+	+
<i>Ditylum brightwellii</i>						+
<i>Dactyliosolen fragilissimus</i>				+	+	
<i>Dactyliosolen phuketensis</i>					+	
<i>Detonula pumila</i>		+	+	+	+	
<i>Diploneis crabro</i>		+	+	+	+	
<i>Diploneis sp.</i>					+	
<i>Ditylum sol</i>					+	
<i>Eucampia zodiacus</i>		+		+	+	
<i>Fragilaria oceanica</i>					+	
<i>Fragilaria sp.</i>					+	
<i>Guinardia delicatula</i>		+		+	+	+
<i>Guinardia flaccida</i>				+	+	
<i>Guinardia striata</i>		+		+	+	+
<i>Haslea Wawriake</i>				+	+	
<i>Hemiaulus hauckii</i>				+		
<i>Helicotheca tamesis</i>					+	
<i>Hemiaulus membranaceus</i>				+	+	
<i>Hemiaulus hauckii</i>					+	
<i>Hyalodiscus stelliger</i>					+	

Table 1. Continued

SPECIES NAME	Date	20-Jun	1-Aug	21-Aug	27-Aug	22-Sep
<i>Lauderia galcialis</i>				+	+	
<i>Leptocylindrus danicus</i>		+	+	+	+	+
<i>Leptocylindrus mediterraneus</i>		+	+	+	+	
<i>Leptocylindrus minimus</i>		+		+	+	+
<i>Licmophora abbreviata</i>				+	+	
<i>Lithodesmium variabile</i>				+	+	
<i>Mastogloia minuta</i>		+	+	+	+	+
<i>Melosira octogona</i>		+				
<i>Mastogloia</i> sp.				+		
<i>Mastogloia rostrata</i>					+	
<i>Meuniera membranacea</i>		+		+	+	+
<i>Navicula distans</i>			+	+		
<i>Navicula salinarum</i>		+	+	+	+	+
<i>Navicula</i> sp.				+	+	
<i>Nitzschia americana</i>		+		+	+	
<i>Nitzschia longissima</i>		+	+	+	+	+
<i>Nitzschia sigma</i>		+	+	+	+	+
<i>Nitzschia</i> sp.						+
<i>Odontella longicruris</i>					+	
<i>Odontella sinensis</i>		+			+	
<i>Paralia sulcata</i>		+	+	+	+	
<i>Pleurosigma aestuarii</i>		+	+			+
<i>Pleurosigma angulatum</i>						+
<i>Pleurosigma intermedium</i>					+	
<i>Pleurosigma normanni</i>			+	+	+	
<i>Pleurosigma rectum</i>		+	+	+	+	
<i>Porosira glacialis</i>		+		+	+	
<i>Pseudonitzschia delicatissima</i>		+	+	+		+
<i>Pseudonitzschia</i> cf. <i>multistriata</i>					+	
<i>Pseudonitzschia pseudodelicatissima</i>					+	+
<i>Pseudonitzschia pungens</i>				+	+	+
<i>Pseudonitzschia seriata</i>				+	+	
<i>Pseudonitzschia</i> sp. 98					+	
<i>Pseudonitzschia subcurvata</i>				+	+	
<i>Pseudonitzschia subpacificia</i>				+	+	
<i>Pseudonitzschia tugidula</i>					+	
<i>Pseudosolenia calcar avis</i>				+	+	
<i>Rhizosolenia alata</i>		+			+	
<i>Rhizosolenia bergonii</i>					+	
<i>Rhizosolenia formosa</i>				+		
<i>Rhizosolenia hebetata</i>				+	+	+
<i>Rhizosolenia imbricata</i>		+		+	+	+
<i>Rhizosolenia pungens</i>		+			+	
<i>Skeletonema costatum</i>		+		+	+	+
<i>Stephanopyxis turris</i>				+	+	
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>		+				
<i>Surirella gemma</i>		+	+	+	+	+
<i>Surirella</i> sp.					+	
<i>Thalassionema bacillare</i>				+	+	
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>		+		+	+	
<i>Thalassionema nitzschioides</i>		+		+	+	+
<i>Thalassiosira decipiens</i>				+		+
<i>Thalassiosira eccentrica</i>		+			+	
<i>Thalassiosira leptopus</i>					+	
<i>Thalassiosira rotula</i>				+	+	
<i>Thalassiosira subtilis</i>		+			+	+
<i>Thalassiosira</i> sp. A		+		+	+	+
<i>Thalassiosira</i> sp. B		+	+		+	+
<i>Thalassiosira</i> sp.					+	
<i>Tropidoneis antarctica</i>		+		+	+	+
Pennate sp. A (40 µm)					+	+
Pennate sp. C (20 µm)			+			+
Pennate sp. A 100 µm				+		
SILICOFLAGELLATES						
<i>Dictyocha fibula</i>		+	+	+	+	
<i>Distephanus speculum</i>		+	+	+	+	
<i>Ebria tripartita</i>		+		+	+	+
DINOFLAGELLATES						
<i>Alexandrium cohorticula</i>		+	+			
<i>Alexandrium fraterculus</i>					+	

Table 1. Continued

SPECIES NAME	Date	20-Jun	1-Aug	21-Aug	27-Aug	22-Sep
<i>Alexandrium leei</i>			+	+	+	
<i>Alexandrium minutum</i>					+	
<i>Alexandrium pseudogonyaulax</i>					+	
<i>Alexandrium</i> sp.					+	
<i>Amphidinium acutissimum</i>			+			
<i>Amphidinium longum</i>		+				
<i>Amphidinium</i> sp.		+			+	
<i>Ceratium fusus</i>		+	+	+		
<i>Ceratium horridum</i>		+				
<i>Ceratium lineatum</i>					+	
<i>Ceratium kofoidii</i>			+		+	+
<i>Ceratium tripos</i>					+	
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>					+	+
<i>Gonyaulax polygramma</i>			+		+	
<i>Gymnodinium elongatum</i>					+	
<i>Gymnodinium vestifici</i>					+	
<i>Gymnodinium</i> sp.				+	+	
<i>Gymnodinium</i> sp. A					+	
<i>Gymnodinium</i> sp. 5 - 10 μ m		+	+			+
<i>Gyrodinium impudicum</i>			+	+	+	
<i>Gyrodinium lachryma</i>					+	
<i>Gyrodinium</i> sp.				+	+	
<i>Gyrodinium</i> sp. A					+	
<i>Gyrodinium</i> sp. 5 - 10 μ m		+	+			+
<i>Hemiaulus sinensis</i>					+	
<i>Katodinium glaucum</i>		+		+	+	+
<i>Katodinium rotundata</i>					+	
<i>Lingulodinium polyedrum</i>					+	
<i>Nematodinium partitum</i>				+		
<i>Oxytoxum sphaeroideum</i>					+	
<i>Peridinium</i> sp.					+	
<i>Phalacroma rotundata</i>					+	
<i>Pronoctiluca rostrata</i>				+	+	
<i>Prorocentrum balticum</i>					+	
<i>Prorocentrum compressum</i>					+	
<i>Prorocentrum dentatum</i>					+	
<i>Prorocentrum triestinum</i>		+	+	+	+	
<i>Pyrophacus steinii</i>				+		
<i>Torodinium robustum</i>					+	
Naked dino. (coccoid form)			+			
Coccoid form < 5 μm		+	+			+
Cryptomonoid form < 5 μm		+	+		+	+
EUGLENOPHYTA						
<i>Euglena</i> sp.		+			+	
<i>Eutreptiella</i> sp.				+	+	+
RAPHIDOPHYTA						
<i>Chatonella</i> sp.					+	

가 뚜렷하였다. 한 시기에 시료를 채집한 모든 정점, 모든 깊이에서 출현한 외편모류와 규조류의 총 종수는 6월 20일에 각각 9종과 48종, 8월 1일에는 11종과 26종이었으나 8월 21일에는 10종과 78종, 그리고 8월 27일에는 34종과 110종이 발견되어 규조류는 8월 1일과 21일 사이에, 외편모류는 8월 21일과 27일 사이에 종의 수가 크게 증가함을 알 수 있다(Fig. 2). 그러나 내만 정점인 정점 5에서는 외편모류의 출현종수가 8월 21일과 27일 사이에 오히려 감소했음을 알 수 있다. 그러나 적조 소멸 직후인 9월 22일에는 외편모류와 규조류의 출현종수가 각각 5종과 36종으로 크게 감소하였다.

다양성지수는 독립영양성 외편모류의 경우 6월 20일에 0.28~0.81, 8월 1일에 0.77~1.04, 8월 21일에 0.47~0.75, 8월 27일

0.48~0.77(slick이나 patch에서는 0.12~0.45), 9월 22일에는 0.18~0.73으로 나타났다. 규조류의 경우 6월 20일에 0.57~1.36, 8월 1일에 0.64~1.09, 8월 21일에 0.91~1.44, 8월 27일 0.48~0.78(slick이나 patch에서는 0.34~0.82), 9월 22일에는 0.52~0.78으로 나타났다. 이 결과는 적조가 발생했을 경우 slick이나 patch 내에서는 다양도지수가 낮아지지만 그 외에서는 큰 변화가 없음을 의미한다.

독립영양성 외편모류와 규조류의 시기별 MDT는 6월 20일에 35와 290 cells ml⁻¹, 8월 1일에 80과 100 cells ml⁻¹, 8월 21일에 100와 500 cells ml⁻¹로 큰 변화가 없었으나 8월 27일에 31,700과 13,900 cells ml⁻¹로 급증하였다. 그러나 9월 22일에 이들의 MDT는 20과 360 cells ml⁻¹로 다시 급감하였다. 한 조사

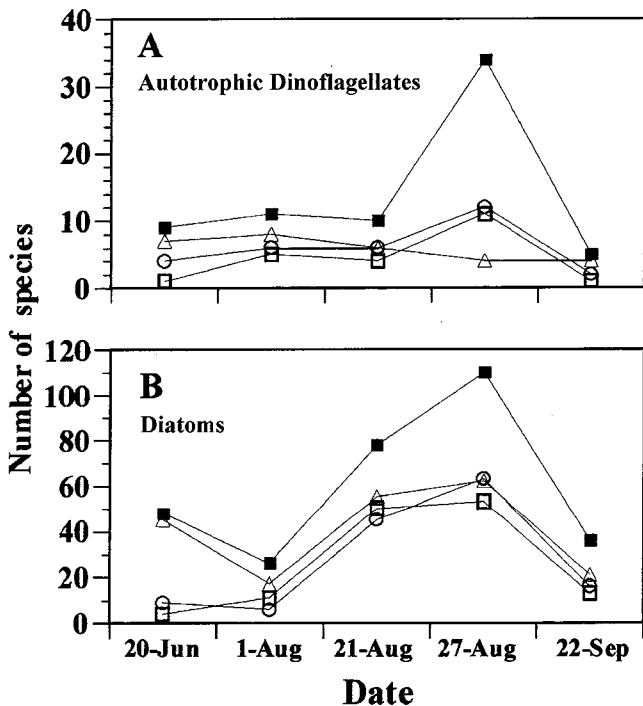


Fig. 2. The temporal variations in the species number of autotrophic dinoflagellates (A) and diatoms (B) at St 5 (open triangles), 9 (open circles), and 12 (open squares) off Naro-do, Kohung, Korea from June 20 to September 22, 1997. Water samples at each station were usually taken from 5 depths. Closed squares were the total species numbers at all sampling stations in each sampling time.

시기에 조사된 추가정점을 포함한 모든 정점에서 와편모류와 규조류의 ADAS는 6월 20일에 14와 118 cells ml⁻¹, 8월 1일에 15와 19 cells ml⁻¹, 8월 21일에 39와 208 cells ml⁻¹이었으나 8월 27일에 1,320과 3,870 cells ml⁻¹로 급증하였다. 그러나 9월 22일에 이들의 ADAS는 11과 231 cells ml⁻¹로 급감하였다. MDT:ADAS 비율은 얼마나 강한 patch가 형성되어 있는지를 간접적으로 알려주는데 8월 27일의 규조류나 다른 조사시기의 와편모류와 규조류 경우 비율이 모두 2~5 정도이었으나 8월 27일에는 와편모류의 비율이 약 25로 이 시기에 와편모류가 좁은 해역에 고밀도의 patch를 형성하고 있음을 알 수 있다.

독립영양성 와편모류와 규조류의 관측시기별 우점종은 6월 20일에 *Prorocentrum triestinum*과 *Skeletonema costatum*, 8월 1일에 *Alexandrium cohorticula*, *Scrippsiella trochoidea*와 *Chaetoceros pseudocurvisetus*, 8월 21일에 *Gyrodinium impudicum*과 *C. pseudocurvisetus*, *S. costatum*, 8월 27일에는 *G. impudicum*과 *C. pseudocurvisetus*와 *Pseudonitzschia pungens*, *S. costatum*, 9월 22일에는 *Gyrodinium* sp.(5~10 μm)과 *S. costatum*으로 와편모류의 경우 우점종이 자주 바뀌었으나 규조류의 경우는 크게 바뀌지 않았다(Table 1).

규조류에 속하는 *Asterionellopsis glacialis*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Leptocylindrus danicus*, *Mastogloia minuta*, *Navicula salinarum*, *Nitzschia longissima*, *Nitzschia sigma*, *Surirella gemma* 등은 모든 시기에 나타났고 *Skeletonema*

*costatum*와 *Prorocentrum triestinum* 등 25종이 4번의 조사시기에 나타났으나 유해성 적조의 원인생물인 *Gyrodinium impudicum*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Pseudonitzschia pungens* 등은 2~3번의 조사시기에만 출현하여 특정한 시기를 선호함을 알 수 있다(Table 1).

출현 식물플랑크톤의 종의 수와 밀도의 공간적 변화(수평적)

독립영양성 와편모류와 규조류의 ADES를 살펴보면 총 5회의 관측 중에서 6월 20일, 8월 1일, 8월 21일, 9월 22일에는 와편모류와 규조류의 ADES가 모두 내만 정점인 정점 5에서 가장 높았으며 외만 정점인 정점 9와 12에서 낮았다. 그러나 8월 27일의 경우는 와편모류와 규조류의 ADES가 서로 다른 분포를 나타냈는데 와편모류의 ADES는 정점 9와 12에서 높았고 정점 5에서는 훨씬 낮은 반면에 규조류의 ADES는 정점 5에서는 훨씬 높았다(Fig. 3). 와편모류와 규조류의 최고 우점종인 *Gyrodinium impudicum*과 *Skeletonema costatum*의 수직, 수평적 분포는 이러한 양상을 더욱 뚜렷하게 보인다(Fig. 4). 특히 *G. impudicum*의 밀도는 정점 12의 바깥 정점(추가정점)에서 매우 높은 반면 *S. costatum*의 농도는 매우 낮았다. 이러한 결과는 평상시에는 독립영양성 와편모류와 규조류 모두 내만에서가 외만에서 보다 더 높은 밀도를 가지고 있으나, *G. impudicum* 적조가 일어날 때 *G. impudicum*를 포함한 와편모류는 외만쪽에서 높은 농도를 가지며 내만에서는 낮은 농도를 가지고 있음을 알 수 있어 규조류의 경우는 육상기원의 육수유입에 의해 그 밀도가 영향을 받으나

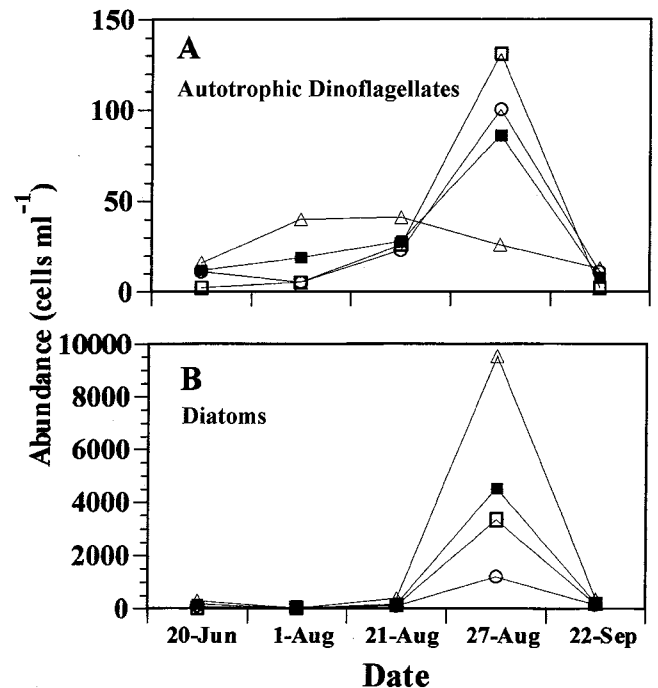


Fig. 3. The temporal variations in the abundances of autotrophic dinoflagellates (A) and diatoms (B) at St5 (open triangles), 9 (open circles), and 12 (open squares) off Naro-do, Kohung, Korea from June 20 to September 22, 1997. Closed squares were the values averaging the abundances of three sampling stations in each sampling time.

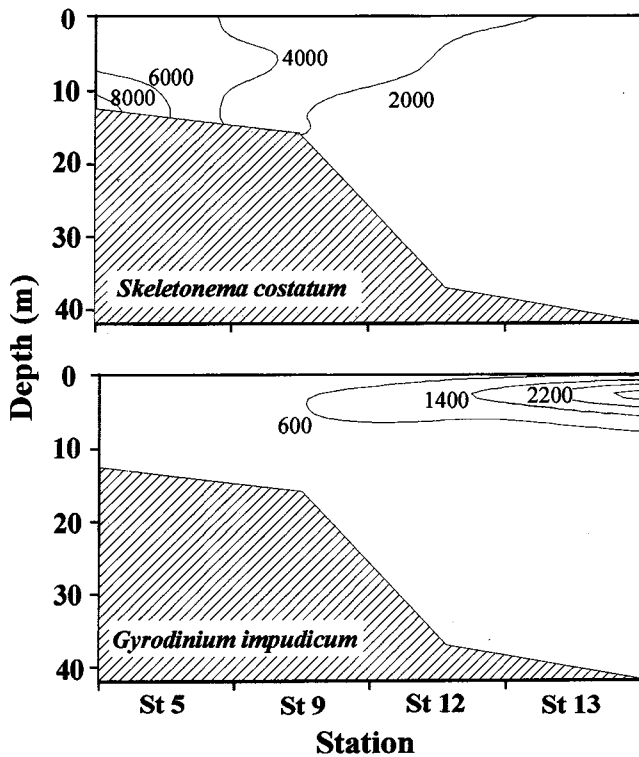


Fig. 4. The distributions of the abundances of *Gyrodinium impudicum* and *Skeletonema costatum* in the waters off Naro-do, Kohung, Korea on August 1997. Sampling depths were 0, 2, 4, 6, 8, 10, and 12m for St 5, 0, 3, 6, 9, 12, and 15m for St 9, 0, 3, 6, 9, 12, 15, and 18m for St 12, and 0, 1.5, 3, 6, 9, and 12m for St 13.

외편모류의 경우는 다른 요인의 영향도 함께 받을 가능성이 있음을 알 수 있다.

외편모류와 규조류 밀도의 비율

외편모류와 규조류의 출현종수와 밀도비율은 이들이 서로 다른 생리, 생태적 특성을 가진 경쟁생물이라는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 두 그룹의 가장 우점종인 *Gyrodinium impudicum*과 *Skeletonema costatum*의 밀도 비율(Ratio of the density of *G. impudicum* to that of *S. costatum*; 이하 RGS)은 8월 1일에는 정점 5와 9, 8월 21일에는 정점 9와 12에서 1보다 높았으나 그 외의 시기에는 모든 정점에서 1보다 낮았다. 특히 *G. impudicum* 적조가 일어난 8월 27일에는 정점 5의 전수심에서의 RGS는 0.01 미만으로 매우 낮았지만 RGS가 외만쪽으로 갈수록 높아져 patch에서는 1 이상의 값을 가졌다. 이러한 결과는 전반적으로 연구해역이 *G. impudicum*를 포함한 외편모류 보다 *S. costatum* 등 우점 규조류가 잘 자랄 수 있는 환경이 형성되어 있었다고 할 수 있고, 적조발생시기의 경우 내만에서는 규조류에 유리하고 외만에서는 *G. impudicum* 등 외편모류가 비교적 유리한 환경이 형성되었다고 할 수 있다.

Gyrodinium impudicum 적조띠의 형성과 특징

*Gyrodinium impudicum*은 농도는 낮지만(최대밀도 9 cells ml⁻¹) 8월 1일에 정점 5에서 출현하였다. 8월 21일에는 이 종의 정점

별 최대밀도는 정점 5, 9, 12에서 각각 90, 40, 20 cells ml⁻¹로 나타났으나 이 해역에서 적조띠는 육안으로 관찰되지 않았다. 8월 24일에 처음으로 이 종에 의한 적조띠가 발견되었으며 8월 27일에 정점 5, 9, 12에서의 *G. impudicum*의 밀도는 각각 90, 200, 350 cells ml⁻¹로 나타나 정점 5, 9, 12에서 *G. impudicum*의 밀도는 8월 21일의 정점별 밀도분포와 반대로 나타남을 알 수 있었다(Fig. 3). 그러나 정점 12에서의 *G. impudicum* 밀도는 다른 적조 patch나 slick에서의 밀도에 비하여 낮은 편이다. 추가 정점인 정점 2에서는 긴 slick이 형성되어 있었는데 밀도가 30,000 cells ml⁻¹ 이상이였다. 그리고 정점 12 바깥쪽 정점인 정점 13 부근에도 *G. impudicum*의 밀도가 ml당 2,000 개체 이상인 patch가 많이 형성되어 있었다. 그러나 그보다 더 바깥쪽에 위치한 정점 14와 16에서는 밀도가 10 cells ml⁻¹ 미만이었다.

토 의

본 연구에서는 다음과 같은 사항을 밝혔는데; (1) 1997년 8월 24일 경에 전남 고흥군 나로도해역에서 처음 발생한 유해성 적조원인생물은 *Gyrodinium impudicum*이 가장 우점하였고 *Cochlodinium polykrikoides*는 그 밀도가 *G. impudicum*보다 훨씬 낮았으며, DAP을 일으키는 것으로 알려진 규조류인 *Pseudonitzschia pungens*가 높은 밀도로 출현하였다. (2) 규조류의 출현종수는 8월 1일과 적조발생 직전인 8월 21일 사이에 가장 많이 증가하였으나 외편모류는 그 보다 늦은 8월 21일과 27일 사이에 증가하였으며 적조발생 후에도 slick외에서는 다양도지수가 크게 감소하지 않았다. (3) 적조발생 직후 외편모류는 내만에서 외만으로 갈수록 증가하여 외만쪽에 적조띠를 이루었고 규조류는 반대로 외만에서 내만으로 갈수록 증가하였다.

주요 적조원인생물

본 연구기간 동안 적조를 일으킨 적조원인생물이 주로 *Gyrodinium impudicum*이며 *Cochlodinium polykrikoides*의 밀도는 *G. impudicum* 보다 훨씬 낮았으나 1998년 같은 해역에서 발생한 대규모 적조의 원인생물과 1998년 10월에 전북 근산해역에서 나타난 대규모 적조의 원인생물이 *C. polykrikoides*인 것으로 보아(정 등 unpublished data), 1995년, 1996년에 발생한 적조의 원인생물을 다시 분석할 필요가 있다고 생각된다. 두 종은 형태적으로 비슷하나 유전자적으로는 큰 차이점이 있는 것으로 나타났다(박과 박 1999).

출현 식물플랑크톤의 종의 수와 밀도의 시간적 변화

연구해역에서 1 cell ml⁻¹이 넘는 밀도를 가진 식물플랑크톤의 출현종수는 정상시에는 독립영양성 외편모류는 5~10여 종, 규조류의 경우는 25~50여 종이었으나 적조발생 직전과 적조발생 후에는 외편모류는 35여 종까지, 규조류의 경우는 110여 종까지 급증하였다. 이는 적조발생직전의 환경조건이 많은 식물플랑크톤 종들의 성장에 공통적으로 유리하였음을 의미한다. 특히 외편모류가 8월 21일과 8월 27일 사이에서 가장 많이 증가한 반면 규조류는 8월 1일과 8월 21일 사이에서 종의 수가 가장 많이 증

가한 결과는 이러한 유리한 조건이 주어졌을 때 비교적 성장률이 높은 규조류가 성장률이 낮은 와편모류 보다 먼저 반응했을 가능성을 제시한다.

적조발생 직전에 나타난 출현중수의 증가에 영향을 준 요인은 크게 2가지로 생각할 수 있다. 첫째는 빛과 영양염류 조건, 해수의 유동정도가 많은 종들에게 유리하게 만들어진 경우이고, 둘째는 다른 특성을 가진 해수나 담수가 유입되면서 많은 종들을 운반해 오는 경우이다. 이 기간동안 연구해역에서의 물리, 화학, 또는 기상적인 큰 변화는 8월 4일부터 8월 10일 사이에 6일간 200 mm의 강우가 있었다는 것이다. 이로 인하여 연안부근에 상당한 담수가 유입되었을 가능성이 높는데 이는 8월 21일에 내측에 위치한 정점 5의 염분이 낮아진 것으로 알 수 있다(양 등, 2000). 하지만 정점 5에서의 총무기질소(Total Dissolved Inorganic Nitrogen; 이하 TDIN)농도는 8월 1일부터 21일 사이에 오히려 약 3.2 μM 에서 2.6 μM 로 약간 감소하였다. 이 결과는 두가지의 해석이 가능하다. 첫째는 담수가 유입되는 source 중 하나인 해창만 입구에서 채취한 담수의 TDIN이 약 200 μM 로 높은 편이나 그 담수의 양이 많지 않고 희석이 빨리되어 TDIN의 큰 변화가 없는 경우이고, 둘째는 담수로 유입된 TDIN이 식물플랑크톤에 의하여 빨리 소모가 되는 경우이다. 이 기간 동안 규조류의 ADAS이 약 10배 정도로 더디게 증가하였으나 1 cell ml⁻¹이 넘는 밀도를 가진 규조류의 출현중 수는 크게 증가한 결과로 보아 두가지 해석이 모두 가능하다. 즉 담수의 영향이 그리 크지는 않았으나 많은 규조류의 성장을 자극하였을 가능성이 크다. 8월 21일부터 27일 사이에 정점 1에서의 TDIN 농도 역시 약 2.6 μM 에서 1.9 μM 로 약간 감소하였다. 이 시기에도 규조류의 밀도가 크게 증가하였는데 이 증가를 이끈 것은 *Skeletonema costatum*이다. 이 정점 해역의 수층이 잘 혼합되었고 *S. costatum*의 nitrate에 대한 K_{1/2}(최대 성장률의 50%에 이르게 하는 영양염류의 농도)이 0.4~0.5 μM 이며, 다른 규조류의 K_{1/2}도 0.4~3 μM 밖에 되지 않으므로 대규모 규조류의 밀도 증가를 충분히 시킬 수 있다(Eppley et al., 1969). 그러므로 규조류의 증가는 12 m 깊이의 수층의 TDIN을 약간 감소시켰을 것으로 사료된다.

8월 21일부터 27일 사이 정점 5에서는 규조류의 밀도가 급속하게 증가한 반면 와편모류의 출현중수와 밀도가 오히려 감소하였고, 8월 27일 *Gyrodinium impudicum*과 *Skeletonema costatum*의 수직, 수평적 분포를 비교했을 때 정반대로 나타난 것으로 보아 고밀도의 규조류가 와편모류의 성장을 저해했을 것으로 사료된다. 이것은 고농도의 영양염류를 포함한 육수가 연안으로 유입되었을 경우 일반적으로 규조류의 성장률이 와편모류의 성장률 보다 훨씬 높으므로 규조류가 대번식을 이루고 동시에 경쟁하는 와편모류의 성장을 억제하여 유해성 적조의 발생을 억제할 수 있는 가능성을 제시하는 것이다.

*Gyrodinium impudicum*의 적조띠가 발견된 곳들은 정점 12 밖과 정점 13 근방으로 표층의 TDIN 농도가 0.9~1 μM 로 낮으나 30 m 저층의 농도는 > 10 μM 인 곳이다. *G. impudicum* 또는 *Chochlodinium polykrikoides*가 일일수직이동을 하는데 실내에서 측정된 이들의 최대유영속도는 1.4 mm s⁻¹에 이른다(Jeong et al., 1999a). 이러한 속도로 이동할 경우 이들은 10시간 동안 약

50 m를 내려갈 수 있으므로 낮에는 표층부근에서 강한 빛을 받고 밤에는 저층으로 이동하여 풍부한 영양염류를 받으면서 성장을 할 수 있다. 이때 규조류의 경우 연안으로부터 많이 떨어져 성장에 필요한 육상기원 물질을 받아들이기 힘들고 표층의 영양염류의 농도가 낮으므로 와편모류의 급속한 성장을 막기 힘들었을 것으로 사료된다.

본 연구와 동시에 이루어진 수온, 염분, 영양염류 등 물리, 화학적 환경요인의 시공간적 변화를 보았을 때 본 해역은 외부로부터 외양수의 유입이 자주 일어나는 것으로 밝혀졌다(양 등, 2000). 이러한 외양수의 유입은 적조생물을 외부로부터 연구해역으로 이동시킬수 있는 가능성을 제시할 수 있다. 그러나 와편모류의 ADAS 경우 8월 21일과 27일 사이에는 34배의 증가율을 보여 0.58 d⁻¹의 성장률을 가졌는데 이 값은 독립영양성 와편모류들의 일반적인 성장률 범위 안에 들어 있으므로 일단 외부로부터 높은 밀도의 와편모류가 이동해 오지 않아도 만내에서 지속적인 성장이 되면서 물리적인 집적으로 적조띠를 이룰 수 있어 좀 더 광범위한 해역에서의 자세한 연구가 필요하다.

Gyrodinium impudicum 적조띠의 형성과 특징

일반적으로 *Gyrodinium impudicum*의 밀도가 약 500 cells ml⁻¹이 넘었을 때 적조띠가 보인다. 그러므로 8월 21일에 표층에서 적조띠가 발견되지 않았으므로 이때의 농도는 500 cells ml⁻¹를 넘지 않았을 가능성이 높다. 그런데 5~7일 후 100여 배인 32,000 개체로 증가하였으므로 *G. impudicum*의 최대분열속도(약 0.4 d⁻¹, 정 등 unpublished data)와 영양염류 분포를 고려하였을 때 개체분열을 통한 적조띠 형성은 어렵다고 사료되고 또한 *G. impudicum*의 최대밀도가 slick에서 발견된 점을 미루어 보아 적조발생초기에 적조띠의 형성은 물리적 집적에 의해 가속되었을 가능성이 높다. 이러한 slick의 형성은 내부파나 전선에 의해 형성되는 경우가 많은데(Kamykowski, 1973) 앞으로 이에 대한 자세한 연구가 필요하다.

사 사

본 연구를 수행하는데 있어서 현장에서 시료채취를 도와준 군산대학교 김재성, 이창원, 김성택, 고성민, 윤주이, 최윤정, 김수경과 이인곤 전라남도 해양자원과장, 김영남 고흥어촌지도소에게 감사사를 드립니다. 본 연구는 1996년도 학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1998. 한국연안의 적조. 국립수산진흥원, 85 pp.
- 박종규, 박영식, 1999. *Chochlodinium polykrikoides*와 *Gyrodinium impudicum*의 형태특성과 24S rRNA 유전자 염기서열비교. 한국해양학회지, 4: 363-370.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리, 화학적인 특성. 한국해양학회지, 5: 16-26
- Anderson, D.M., 1995. Toxic red tides and harmful algal blooms: a

- practical challenge in coastal oceanography: *Rev. Geophysics*, Suppl. US National Report to the Int. Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994, pp. 1189-1200.
- ECOHAB, 1995. A national Research Agenda. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, 61 pp.
- 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*, edited by Locicero, V.R., Wakefield, Massachusetts Science and Technology Foundation, Massachusetts, 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. and M.I. Latz, 1994. Growth and grazing rates of the heterotrophic dinoflagellates *Protoperdinium* spp. on red tide dinoflagellates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **106**: 173-185.
- Jeong, H.J., Shim J.H., Kim, J.S., Park, J.Y., Lee, C.W., 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.
- Kamykowski, D., 1974. Possible interactions between phytoplankton and semidiurnal internal tides. *J. Mar. Res.*, **32**: 65-87.
- Shannon, C.E. and W. Wiener, 1963. *The mathematical theory of communication*. Illinois University Press, Urbana, 177 pp.
- Stoecker D.K., A. Li, D.W. Coats, D.E. Gustafson and M.K. Nannen, 1997. Mixotrophy in the dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **152**: 1-12.
- 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. 227 pp.
- 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.

1999년 5월 4일 원고 접수

1999년 11월 13일 수정본 채택