

유해성 *Cochlodinium polykrikoides* 최초 발생에 관한 나로도 해역의 환경학적 특성 및 식물플랑크톤 군집 구조

조 은 섭*

국립수산과학원 남해수산연구소

Received January 24, 2005 / Accepted March 29, 2005

Environmental and Biological Effects at Narodo, in the Southern Water of Korea, on Bloom of Ichthyotoxic Dinoflagellates *Cochlodinium polykrikoides*. Eun Seob Cho*. *South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, South Korea* – The aim of this study was to examine the fluctuation in phytoplankton assemblages with regarding to environmental conditions and nutrients, which were surveyed quarterly over the four seasons (February, May, July, and October). In turn, an understanding of biological effects should provide insights into a wide range of initiated *Cochlodinium* blooms in Narodo. Sampling was carried out throughout 2001 on the coasts of Busan (St. 1), Yeosu (St. 2), Narodo (St. 3), Kohung (St. 4), and Kwangdo (St. 5). The maximum surface water temperature was recorded in July, and it ranged from 20 to 22°C. Salinity showed no great variation, which maintained itself in the range of 29-34 psu. The maximum surface salinity was recorded in February, which was about 34 psu. The chlorophyll *a* concentration of the surface water ranged from 0.01 to 1.3 $\mu\text{g l}^{-1}$. The concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$ were persistently high from February to October; in particular, the peak was observed at St. 1 in February and May (0.15 and 0.19 $\mu\text{mol l}^{-1}$, respectively), while it was detected at St. 2 in July and October (0.22 and 2.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$, respectively). Similar trends to those for $\text{NH}_4\text{-N}$ were observed in the concentrations of $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$. In contrast to nitrogen, a distinct peak of $\text{PO}_4\text{-P}$ at St. 3, 4, and 5 was observed throughout year (0.01~0.1 $\mu\text{mol l}^{-1}$), except for October. At St. 1 encounter a peak of cell number of 30,000 and 13×10^3 cells l^{-1} , respectively, in July and October. During the period of this study, the majority of the taxa were diatoms. The dinoflagellates were rather abundant after February, in particular at St. 3, 4, and 5 which attained an abundance of 10~20% without marked fluctuation during the period of this study. At St. 3, the highest average cell width, 178.11 μm , was recorded: the highest cell length, 337.72 μm , was measured in July. Consequently, dinoflagellates bloom in July at Narodo influenced by warm water current are not only associated with a desirable development of cell morphometric characteristics, but also with the health growth of *C. polykrikoides*. During the period of this study, warm water currents caused an increased water temperature in Narodo, but did not change the amount of nutrients.

Key words – biological effects, *Cochlodinium polykrikoides*, environmental conditions, fish mortality, the first occurrence, red tide

*Cochlodinium polykrikoides*는 와편모조류에 속하며, 적합한 환경조건 하에서는 단세포에서 여러 세포가 연결되어 긴 체인을 형성하는 것이 특징이다[9,11]. *C. polykrikoides* 적조생물이 대규모로 증식되면 세포내의 점성물질 분비로 바닷물의 점성이 높아지고 물고기의 아가미 호흡을 막아 질식사(질식사)를 유발시킨다[11]. *C. polykrikoides* 적조로 인한 어류 대량폐사는 우리나라뿐만 아니라 인근 일본에서도 상당한 피해를 가져온다고 한다[10]. *C. polykrikoides* 적조역사는 1982년 진해만에서 처음 보고된 이래 계속해서 우리나라 연안에서 매년 발생되고 있다[11]. 그러나 1990년 이후부터 최초발생은 진해만에서 점점 남해안으로 옮겨졌다. 아마도 1990년 초부터 진해만의 인구증가 및 공업화에 따른 수질악화로 *C. polykrikoides*

발생에 적합하지 못한 것으로 추측된다.

남해 연안역은 넓은 대륙붕이 발달해 있고 또한 복잡한 해안 지형으로 의해서 형성된 만 (bay)들이 산재해 있어 어패류의 산란장 및 생육장으로 중요한 역할을 한다[13,14,15]. 특히 북돌바다는 남해안의 중앙에 위치하고 있고, 육지로부터 담수의 영향과 외해수의 영향을 모두 받는 해역이다. 이러한 해양 지리학적 특성 때문에 *C. polykrikoides*가 1990년 중반부터 계속해서 최초로 발생되고 있다. 최초 발생을 쿠루시오 해류와 연안수와의 혼합[4,12], 외해수 유입[13], 저염수[15]에 의한 것으로 설명하고 있으나, 아직까지 여기에 대한 뚜렷한 결론을 내리지 못하고 있다. *C. polykrikoides*는 식물플랑크톤으로서 외부 환경요인 및 해류에 의하여 종 조성 및 구조에 많은 영향을 미칠 수 있다. 군집구조 해석은 *C. polykrikoides* 적조발생을 해양·환경학적으로 국한시키는 것보다 생물학적으로 설명할 수 있는 자료로 생각된다. 이미 언

*Corresponding author

Tel : +82-61-690-8959, Fax : +82-61-686-1588

E-mail : eun-5657@hanmail.net

급한 여러 연구자들의 보고는 대부분 여름철에만 국한된 북
 돌바다의 환경특성에 대해서 나타내고 있다. 따라서 *C. poly-*
krikoides 적조가 발생하는 해역을 중심으로 사계절에 걸친
 환경학적 특성과 식물플랑크톤 군집변동을 조사함으로써 북
 돌바다가 과연 다른 해역에 비하여 *C. polykrikoides* 발생에 적
 합한 이유가 무엇인지를 살펴보고자 한다.

재료 및 방법

부산(St. 1), 여수(St. 2), 외나로도(St. 3), 내나로도(St. 4), 광
 도(St. 5) 정점을 대상으로 실시했다(Fig. 1). 현장조사는 2001
 년 2월, 5월, 7월, 10월 4차례에 걸쳐 수행하였다. 각 조사 정
 점에서의 표층수온과 염분은 YSI 6920을 이용하여 측정하였고,
 식물플랑크톤의 정량 분석을 위하여 해수 1 L를 채수하여
 Lugol's solution으로 고정한 후 실험실로 운반하였다. 3일 이
 상 침강시킨 후 상등액을 제거하여 5 ml로 농축시켰다. 농축
 시료는 Sedgwick-Rafter에 분산시킨 뒤 광학현미경(Olympus,
 BX50) 하에서 검경한 뒤 무작위로 세포 400 마리를 추출하여
 길이와 폭을 측정하였다. 부유물질(SS)은 미리 무게를 측정
 한 공경 0.7 μm 의 유리섬유 여과지(GF/F filter)로 여과하여
 건조한 후 항량 차로 측정하였고, Chlorophyll *a*는 해수시료
 를 공경 0.45 μm 여과지로 여과하여 90% acetone으로 추출한
 후 Spectrophotometer (Perkin Elmer, LS50B)로 비색 정량하
 였다. 암모니아-질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 질산-질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 아질산-질소
 ($\text{NO}_2\text{-N}$), 인산-인($\text{PO}_4\text{-P}$)는 해양환경공정시험법에 따랐다[16].
 식물플랑크톤의 cell morphometric 자료는 SPSS-PC 통계패
 키지(SPSS 7.5 for Window)를 이용하여, one-way ANOVA
 및 Duncan's multiple range test에 의하여 분석하였다.

결과 및 고찰

Fig. 2은 각 조사정점에 대한 수온, 염분, chlorophyll *a*를

나타낸 것이다. 수온의 경우 2월부터 상승하기 시작하여 7월
 에 최고 20-22 $^{\circ}\text{C}$ 범위였고, 부산은 10월에는 7월에 비해 수온
 이 떨어지는 경향을 보였으나, 나로도, 여수, 광도해역은 유
 지되거나 상승되는 변화를 보였다. 염분은 수온이 낮은 2월
 에 가장 높은 33-34 psu 범위에서 7월에 30 psu 정도로 보여
 약 3-4 psu 차이를 나타내었다. Chlorophyll *a*도 2월부터 지
 속적으로 증가되어 7월 최고 1.2 $\mu\text{g l}^{-1}$ 을 보였다. 조사 정점
 간 큰 차이는 볼 수 없으나, 부산의 경우 다른 해역에 비하여
C. polykrikoides 적조가 발생할 수 있는 7월이 수온에서 다소
 떨어지고 그 이후로도 약간씩 낮아지는 경향을 보이는 것이
 특징이다. Fig. 3은 영양염의 농도변화를 나타낸 것으로, 암
 모니아질소는 2월, 5월, 7월에는 거의 0.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이하로 존
 재하다가 10월에 급속히 증가되어 최고 2.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 을 보였
 다. 이러한 변화는 질산질소, 아질산질소, 인산인에서도 조사
 해역에 관계없이 거의 비슷한 경향을 보였다. 질산질소는 부
 산에서 최고 0.7 $\mu\text{mol l}^{-1}$, 여수는 최고 1.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$, 나로도
 는 최고 0.5-0.7 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 범위를 보였고, 광도는 다른 해역에 비
 하여 상당히 낮은 최고 0.4 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 을 나타내었다. 아질산질
 소는 최고농도의 범위가 광도를 제외하고는 3-4 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이었
 으나, 광도는 다소 낮은 최고 2.5 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 였다. 인산인은 대체
 적으로 최고 0.6 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 범위를 보였다.

Fig. 4는 총세포수의 변화를 나타낸 것으로, 부산은 7월에
 최고 25,000 $\times 10^3$ cells l^{-1} , 여수와 외나로도 모두 7월에 최고
 400 $\times 10^3$, 300 $\times 10^3$ cells l^{-1} 각각 보였다. 그러나 내나로도
 와 광도는 5월에 최고 10 $\times 10^3$, 45 $\times 10^3$ cells l^{-1} 각각 나타났다.
 총세포수 중 식물플랑크톤의 조성을 보면 (Fig. 5), 부산에서 7월
 에 규조류가 전체의 80% 이상을 나타내었고, 2월에는 40%
 정도 기타종이 점유를 하였다. 와편모조류는 5월에 가장 많
 은 20% 정도를 차지했다. 여수도 부산처럼 규조류의 상대빈
 도가 7월에 90% 이상을 점하였다. 와편모조류는 5월에 20%
 정도 차지했다. 그러나 나로도
 와 광도의 규조류, 와편모조류,

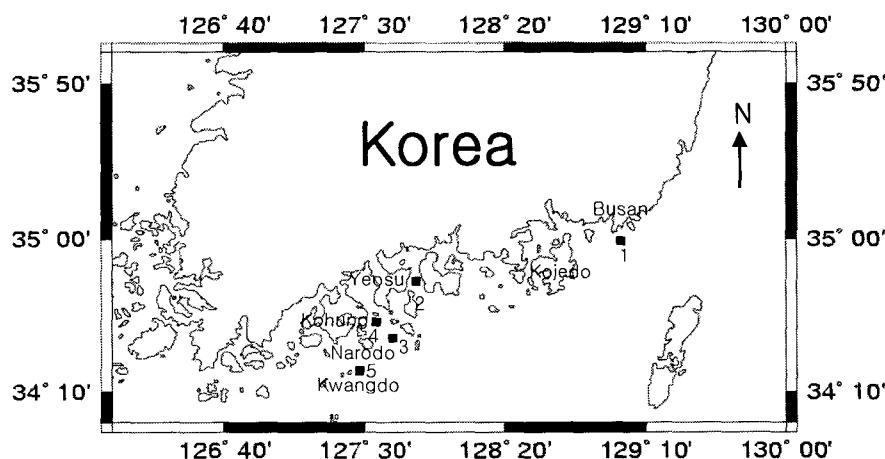


Fig. 1. Sampling locations on the south coast of Korea for *Cochlodinium polykrikoides*.

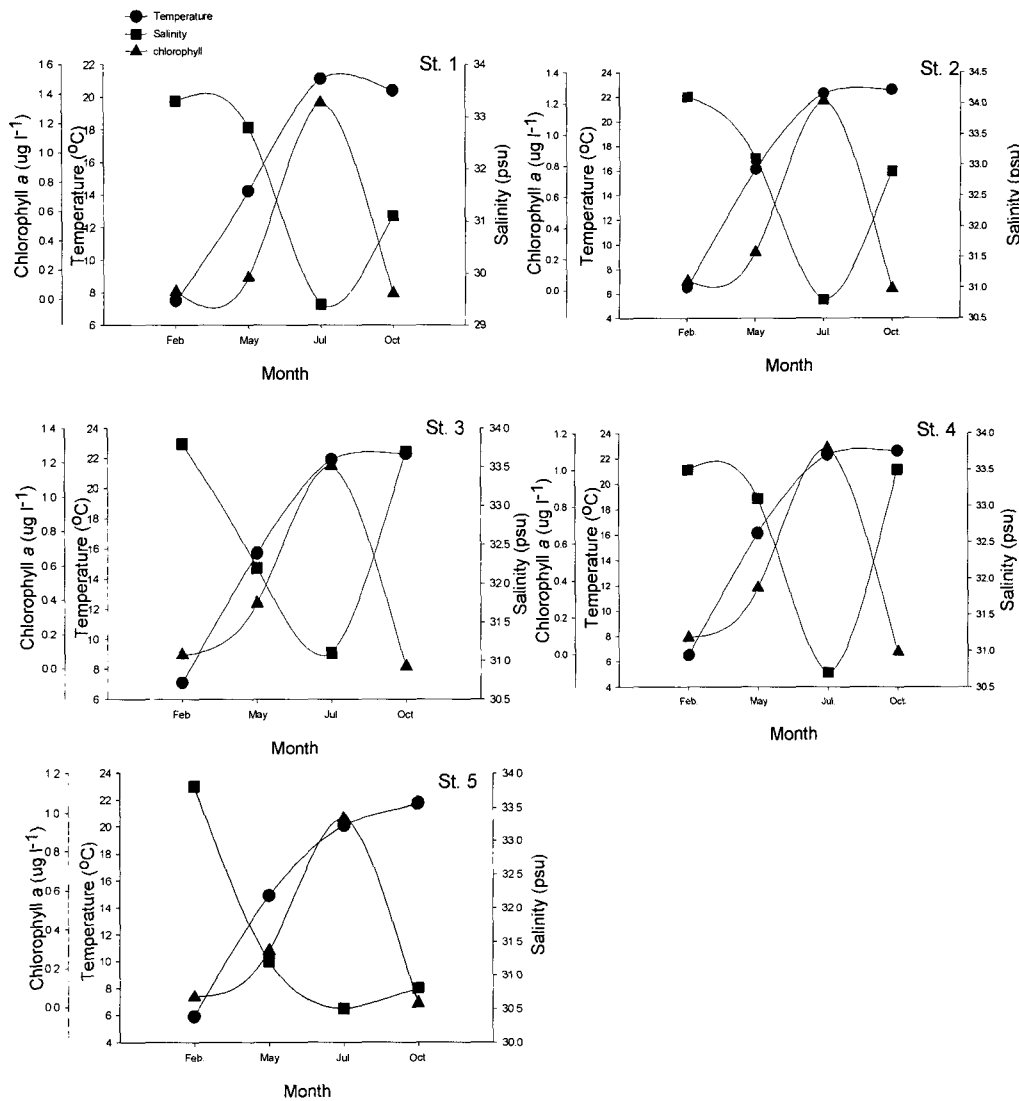


Fig. 2. Seasonal variations of the sea water temperature, salinity, and chlorophyll a at sampling sites.

기타종에 대한 상대비율의 변화가 거의 비슷하게 나타났다. 7월에 부산과 여수에 비하여 와편모조류의 비율이 가장 높게 나타난 것이 큰 특징이다. Table 1은 무작위로 추출한 세포의 평균 길이와 폭을 나타낸 것으로, 부산에서 나타난 식물플랑크톤의 길이가 가장 길게 나타난 것은 2월에 174 μm 이며 폭은 5월에 133 μm 로 보였다. 여수도 2월에 세포의 길이가 가장 긴 200 μm 였고, 폭도 2월에 151 μm 로 나타났다. 그러나 나로도와 광도 모두 7월에 분포하고 있는 식물플랑크톤의 세포 길이가 가장 길게 나타났다.

일반적으로 와편모조류는 차가운 바닷물 보다 따뜻한 바다에서 생육속도가 높다. *C. polykrikoides*는 와편모조류에 속하는 식물플랑크톤의 일종으로 적조를 일으키기 위하여 환경요인, 영양염 및 기상요인 등이 잘 조화되어야 일시적으로 성장이 된다[1,2,8]. 이 중 수온은 적조를 일으킬 수 있는 가장 중요한 원인 중의 하나이다[3]. *C. polykrikoides*는 1982년

이래로 매년 우리나라 연안에 발생하는 적조 종으로 부산에서 최초로 발생한 기록은 아직 없다[11]. 김 등[10]의 보고에 따르면 *C. polykrikoides* 최적 성장의 수온 범위는 21-26 $^{\circ}\text{C}$ 로, 7월 이후 최소한 20 $^{\circ}\text{C}$ 이상을 유지하여야 된다는 결론이다. 이 실험을 통해서도 7월 이후부터 부산은 수온이 약간씩 감소하는 것으로 보아서, *C. polykrikoides* 적조생물의 최초발생을 위한 적정 수온이 다른 해역에 비하여 낮아서 좋지 못한 환경으로 보인다. 비록 영양염은 부산에서도 7월 이후부터 급격히 증가하는 경향이긴, *C. polykrikoides* 최초 적조를 형성하는데 큰 역할을 못하는 것으로 보인다. *C. polykrikoides* 적조는 영양염이 풍부한 연안보다 외해역에서 발생한다고 한다[11,12]. 아마, 1990년 중반 이후부터 남해안에서 발생하는 이유도 *C. polykrikoides* 적조 발생을 위해서는 부영양보다 오히려 빈영양에 가까운 해역에 발생하는 점을 미루어 보아서 특정 영양염 보다 수온이 많은 영향을 미치는 것으로 보

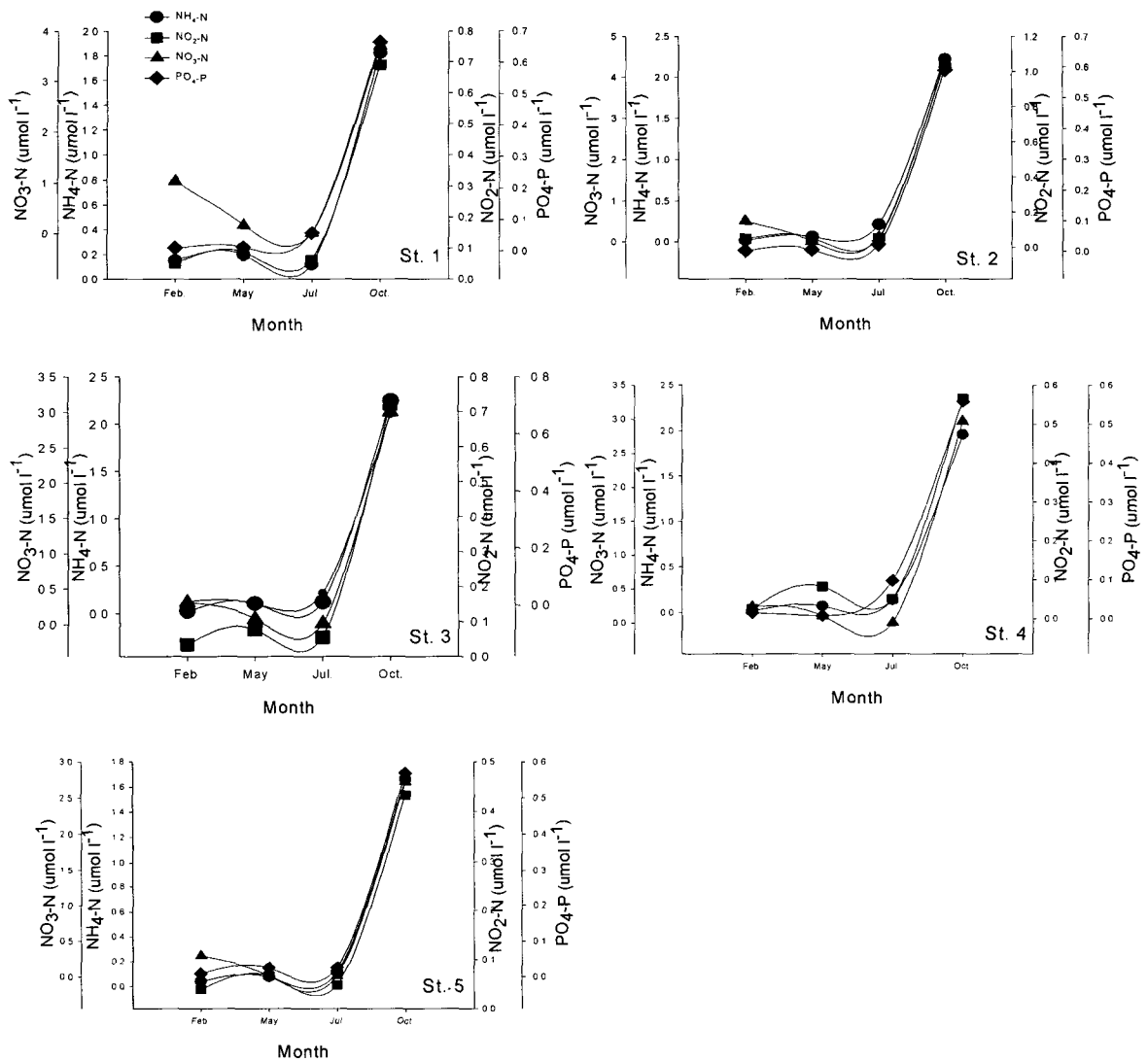


Fig. 3. Seasonal variations of $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations at sampling sites.

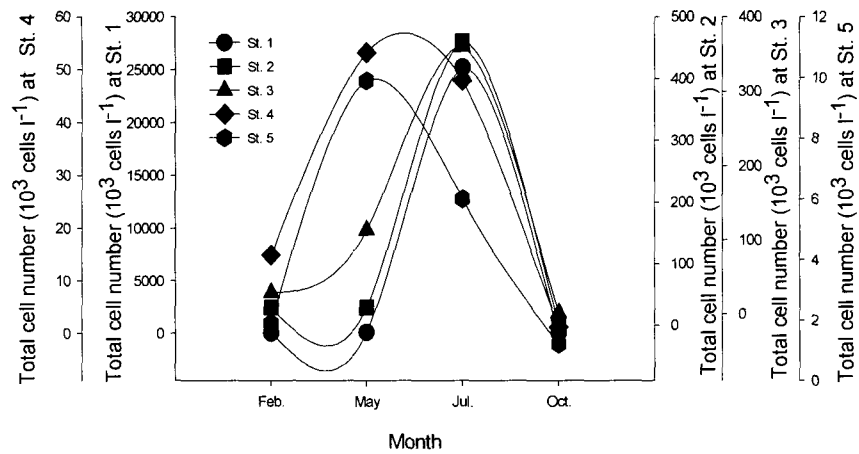


Fig. 4. Seasonal variations of total cell number in phytoplankton at sampling sites.

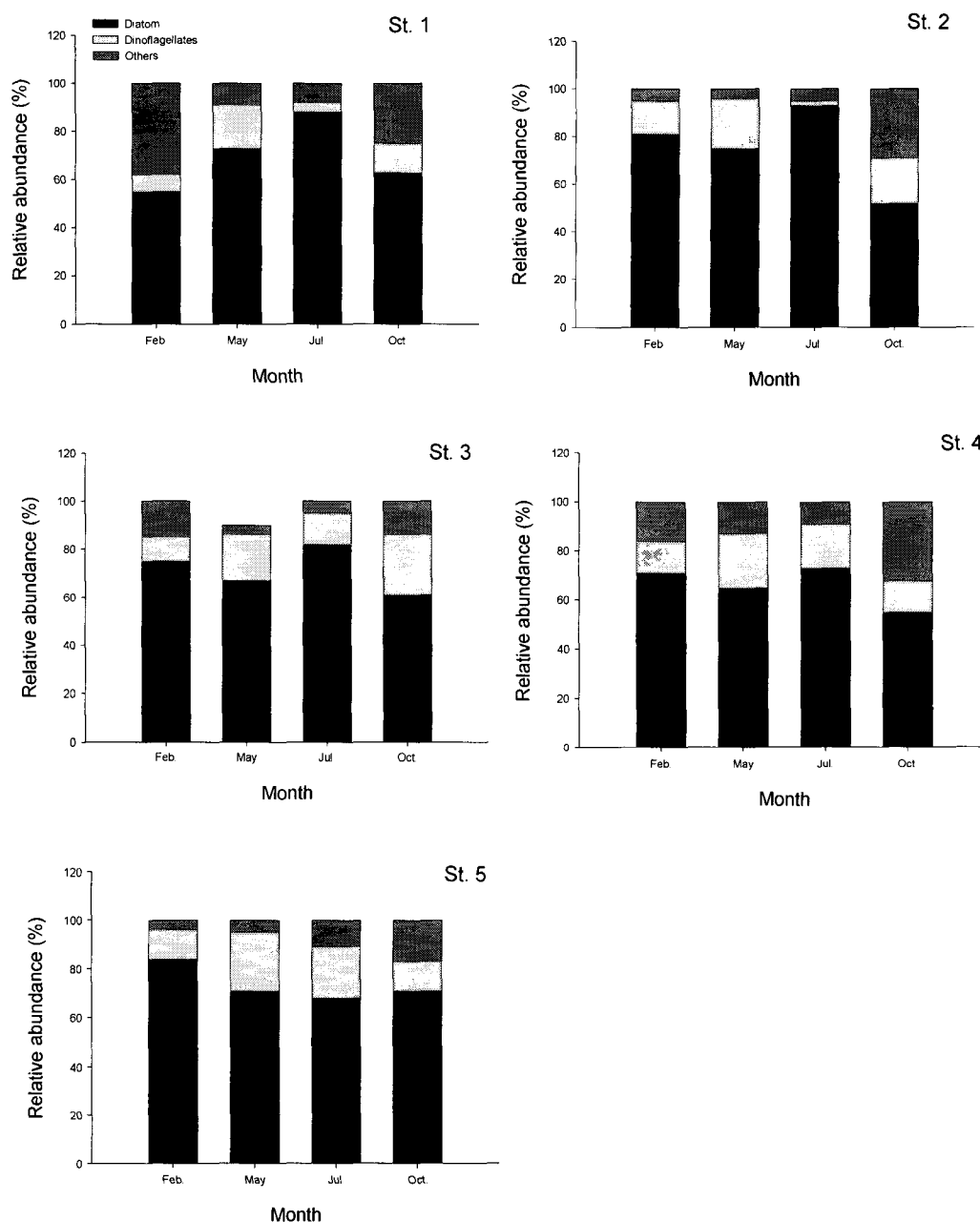


Fig. 5. Seasonal variations of relative abundance in phytoplankton at sampling sites.

Table 1. Multiple comparison of seasonal mean values and standard deviation ($n=400$) of cell length and cell width in phytoplankton at different sampling sites. The same superscript letters indicate that means are not significantly different ($p < 0.05$, Duncan test) (unit: μm)

| Sampling site | Feb. | | May | | Jul. | | Oct. | |
|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | cell length | cell width | cell length | cell width | cell length | cell width | cell length | cell width |
| St. 1 | 174.50±103.59 ^b | 113.75±99.00 ^{cd} | 148.55±74.16 ^e | 133.45±71.04 ^{fg} | 115.87±76.44 ^b | 21.00±33.91 ^{ab} | 142.95±142.98 ^d | 41.52±52.24 ^{ab} |
| St. 2 | 200.25±99.86 ⁱ | 151.40±89.95 ^{ij} | 118.95±58.65 ^b | 125.05±62.23 ^{de} | 164.47±89.71 ^f | 39.75±57.39 ^{ab} | 94.32±99.05 ^b | 40.94±29.82 ^{ab} |
| St. 3 | 169.65±64.33 ^f | 143.90±61.58 ^{gj} | 106.80±76.90 ^b | 114.15±74.73 ^{cd} | 337.72±83.64 ^k | 34.05±26.29 ^{ab} | 98.27±107.54 ^b | 43.58±85.82 ^{ab} |
| St. 4 | 130.75±80.81 ^c | 102.95±81.72 ^{cd} | 122.90±68.32 ^b | 123.45±74.50 ^{de} | 207.82±95.61 ^{ij} | 65.22±52.80 ^{bc} | 57.36±29.98 ^a | 37.55±19.76 ^{ab} |
| St. 5 | 122.25±131.86 ^b | 115.70±65.74 ^{cd} | 128.10±79.82 ^c | 130.35±91.85 ^{fg} | 187.87±76.37 ^h | 99.52±108.18 ^{cd} | 106.93±111.18 ^b | 63.90±99.72 ^{bc} |

인다[6]. Fig. 4를 보면 부산과 붓돌바다 해역과의 총세포수 차이는 최고 100배 정도에 이르지만, 종 조성 면에서 보면 뚜렷하게 외편모조류가 월등히 많이 분포하고 있다. 또한, Table 1에 나타난 바와 같이 체인을 형성하는 외편모조류로 인하여 세포의 길이도 7월에 부산해역에 비하여 약 2배 정도의 현저한 차이를 보이고 있다. 붓돌바다는 북쪽의 여자만과 남쪽의 남해 사이에 위치한 경계해역으로 외해수, 담수, 연안수 등의 작용으로 해황의 수괴도 클 뿐만 아니라 식물플랑크톤의 시·공간적 군집 동태의 변동도 또한 클 것이다 [5]. 그러나 이 실험에서 확실한 점은 붓돌바다 해역은 부산해역에 비하여 외편모조류의 분포비율이 높다는 사실이다. 당연히 외편모조류가 많이 분포하고 있어야 *C. polykrikoides*도 상호 공존하고 있으면서 일시적으로 급성장하여 적조를 형성한다[7]. 지형학적으로 붓돌바다는 외양수와 만에서 유입되는 연안수와 경계되는 해역이지만, 부산해역은 직접적으로 외해수 영향을 받기 때문에 수온이 7월 이후 약간씩 감소되는 원인인 것으로 추측된다. *C. polykrikoides*가 다른 외편모조류보다 월등하게 높은 성장률을 보이는 생존전략이 무엇이며, 어떻게 하여 폭발적인 성장을 하게 되는가에 대하여 많은 연구와 토의가 있어야 될 것으로 생각된다. 즉 상호 공존 속에서 순간적인 성장 폭발이 외부적인 요인인가 아니면 내부적 혹은 유전적인 요인인지? 이러한 요인을 찾으면 *C. polykrikoides* 적조원인을 찾는 데 좋은 자료가 될 것으로 추측된다.

요 약

유해성 적조생물 *C. polykrikoides*가 매년 발생하는 나로도 와 반대로 전혀 최초발생이 되지 않는 부산해역을 정점으로 2001년 2월, 5월, 7월, 10월에 걸쳐 환경요인과 식물플랑크톤의 군집 동태를 조사했다. 수온은 7월에 최고 20-22°C 범위를 보였고, 염분도는 각 정점별 큰 차이는 없었으며, 최고 34 psu 을 나타내었다. chlorophyll *a*의 농도 범위는 0.01-1.3 $\mu\text{g l}^{-1}$, 암모니아질소는 정점1에서 2월과 5월에 0.15, 0.19 $\mu\text{mol l}^{-1}$, 정점2에서 최고 7월과 10월에 각각 0.22, 2.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 보였다. 질산질소와 아질산질소도 암모니아성질소와 비슷한 변화 곡선을 나타내었다. 인산인은 정점3, 4, 5에서 최고 0.01-0.1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 범위를 나타내었다. 실험기간 동안 대부분 규조류가 우점으로 나타났고, 정점1에서 7월과 10월에 최고 30,000, 13×10^3 cells l^{-1} 을 보였고, 출현세포의 평균 폭은 정점3에서 최고 178.11 μm , 세포 길이는 7월에 337.72 μm 였다. 나로도 해역이 부산에 비하여 *C. polykrikoides* 최초 적조발생의 원인은 아마도 외해로 유입되는 전선에 의해서 성장에 알맞은 환경여건을 만들어 줌과 아울러 다른 외편모조류의 세포형태나 출현 빈도에 영향을 미치는 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 국립수산물품질관리원(남해 해양환경 연구, RP-05-ME-13)의 지원에 의해 운영되었습니다.

참 고 문 헌

1. Cembella, A. D., N. J. Antia and P. J. Harrison. 1984. The utilization of inorganic and organic phosphorous compounds as nutrients by eukaryotic microalgae: A multidisciplinary perspective. *Rev. Microbiol.* **10**, 317-391.
2. Ellegaard, M., N. F. Christensen and O. Moestrup. 1993. Temperature and salinity effects on growth of a non-chain-forming strain of *Gymnodinium catenatum* (Dinophyceae) established from a cyst from recent sediments in the Sound, Denmark. *J. Phycol.* **29**, 418-426.
3. Hallegraeff, G. M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* **32**, 79-99.
4. Kang, Y. S., H. G. Kim, W. A. Lim, C. K. Lee, S. G. Lee and S. Y. Kim. 2002. An unusual coastal environment and *Cochlodinium polykrikoides* blooms in 1995 in the South Sea of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.* **37**, 212-223.
5. Lee, S. W. 1996. An outline of oceanographysics. Jipmundang Press, Seoul. 225 pp.
6. Shumway, S. E. 1990. A review of the effects of the blooms on shellfish and aquaculture. *J. World Aquacult. Soc.* **21**, 65-104.
7. Uchida, T., S. Toda, Y. Matsuyama, M. Yamaguchi, Y. Kotani and T. Honjo. 1999. Interactions between the red tide dinoflagellates *Heterocapsa circularisquama* and *Gymnodinium mikimotoi* in laboratory culture. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **241**, 285-299.
8. Viquez, R. and P. E. Hargraves. 1995. Annual cycle of potentially harmful dinoflagellates in the Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Bull. Mar. Sci.* **57**, 467-475.
9. 국립수산물품질관리원. 2000. 1999년도 한국연안의 적조발생상황. **206** pp.
10. 김대일. 2003. Physiological and ecological studies on harmful red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. 일본 큐슈대학교 박사학위논문, **154** pp. (in Japanese)
11. 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중. 1997. 한국연안의 적조생물, 구덕인쇄사, **280** pp.
12. 김학균, 최우정, 정영균, 정창수, 박종수, 안경호, 백철인. 1999. 나로도 인근해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생과 환경특성. 수진연구보고. **57**, 119-129.
13. 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생 연구: 1. 물리·화학적 특성. *바다*. **5**, 16-26.
14. 최용규, 조은섭, 이용화, 이영식. 2005. 2004년 7월 붓돌바다의 켈물, 전류 및 밀물시 수온과 염분 분포. *한국환경과학회지*. **14** (인쇄중)
15. 최현용. 2001. 한국 남해 나로도 와 소라도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계. *바다*. **6**, 49-62.
16. 해양수산부, 2002, 해양환경공정시험방법, **330** pp.