

Dinoflagellates, *Cochlodinium polykrikoides*의 현상 일주이동

나기환 · 박경대 · 이숙희* · 김진효* · 남정배*

경남도 수산국, *한국어장환경기술(주)

Diel migration of Dinoflagellates, *Cochlodinium polykrikoides* in situ

Gui Hwan Na, Kyung Dae Park, Sook Hee Lee*, Gyun Hyo Kim*
and Jung Bae Nam*

Bureau of Fisheries, Kyungnam Province, Changwon 641-702, Korea

*Korea Aquafarm Environment Technology, Tongyoung 650-110, Korea

During the period of the *Cochlodinium polykrikoides* red tide occurrence in the southern coast of Korea in 1997, we observed the vertical migration of red tide organisms *in situ*, along with environmental factors such as water temperature, dissolved oxygen, pH, chlorophyll *a* and nutrients for practical application of loess suspension techniques to diminish fisheries damage.

To cope with serious outbreaks of red tide of *C. polykrikoides*, the finfish culturists resorted with loess suspension to disperse the bloom watermass by turning around it with fishing boats in full speed. Peak in afternoon the cell numbers were diminished in the surface layer after sunset and red tide organisms settled down in the middle and bottom layer in the evening with 2.5m/h downward migration, then they migrated to the surface layer progressively again after sunrise.

Chlorophyll *a* and dissolved oxygen showed the same trends of variation with the cell number. In the course of controlling the red tide with loess suspension we could not find any severe oxygen deficiency to kill the culture species.

Key words : Diel migration, *Cochlodinium polykrikoides*, Loess suspension

서 론

매년 8월 말에서 9월 초에 남해안 소라도 근해에서 처음 발생하여 남해안, 동해안으로 점차 확산되는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 발생과정부터 확산범위에 이르기까지의 국립수산물진흥원(1997)의 적조속보를 통해 관련 기관과 일반 어민에게 신속히 전달되고 있다. 그러나 이러한 적조현상은 한 장소에서도 주·야간 및 조류에 따라 이동되는 정도가 다르며, 특히 적조원인 생물의 주·야 수직 이동에 대한 연구 및 대책이 아직도 충분치 못하여 지방자치단체들을 통해

현재 황토살포(나 등, 1996) 등으로 이에 대비하고 있으나 피해를 감소시키기 위한 생태학적인 이해와 처리기술개발은 아직 미비한 실정이다.

본 연구는 1997년 8월 30~31일, 9월 1일~2일에 2회에 걸쳐 적조가 심하게 발생된 경남 통영시 사량도 해역 및 산양읍 저도해역의 *C. polykrikoides*가 주간 및 야간에 어떻게 이동되는가를 알기 위하여 우렁쟁이 양식장과 가두리 양식장을 중심으로 조사를 실시하였다. 조사결과 야간에 우렁쟁이 양식장에서는 적조원인생물 군집을 포착하지 못하였으나, 저도의 가두리어장에서는 야간에도 적조군집이 포착되어 이들의 수

직이동을 파악할 수 있었다.

현재 유일한 적조방제 방법으로 시행되고 있는 황토살포는 적조가 발생된 해역에서 일사량이 증가하면서 표면으로 떠올라 육안으로 확인이 가능할 때만 황토를 살포하고 있으므로 이 종들의 일주운동을 파악하여 일어날 수 있는 피해를 사전에 줄일 수 있는 대책안 마련을 위하여 본 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

조사장소는 1997년 9월 1일 15시 부터 적조가 심하게 발생한 경남 통영시 산양읍 학림리 저도 어촌계 가두리 양식장을 선정하였다(Fig. 1). 어장면적 2 ha에 조피볼락, 농어, 쥐치, 넙치, 방어 등의 성어와 치어를 양식하고 있었다. 학림도와 저도사이 수로쪽의 가두리 중앙부에 한 정점을 정하여 매 2시간마다 수온, 용존산소, *C. polykrikoides* 세포수의 변화, Chlorophyll *a*와 영양염(NO_2^- -N, NH_4^+ -N, NO_3^- -N, SiO_2 -Si, PO_4^{3-} -P)을 분석하였다.

수온은 간이채수기의 봉상수온계로 측정하였고 용존산소는 Winkler 변법으로 현장에서 고정하여

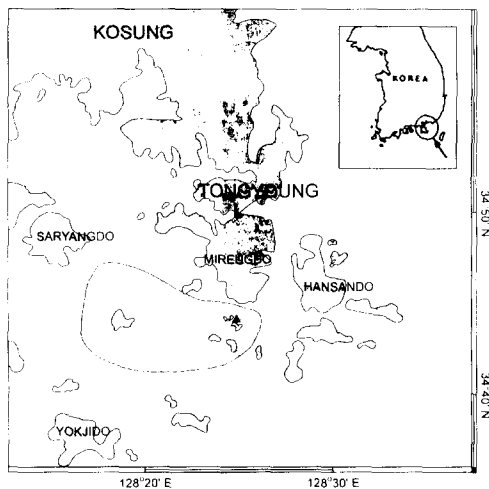


Fig. 1. Map showing the *Cochlodinium polykrikoides* red tide occurrence area (●) and vertical migration observation site (▲).

실험실로 운반한 후에 측정하였으며, 영양염 분석을 위해 현장에서 0.45 μm GF/C filter로 500 ml의 시료를 여과한 후, 여액은 실내로 운반하여 암모니아, 아질산, 질산, 인산, 규산과 pH를 분석하였고, chlorophyll *a*는 UNESCO SCOR 방법(Strickland and Parsons, 1972)에 따라 현장에서 90% acetone에 녹여 냉장고에 보관 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 적조생물의 주·야 수직이동은 현장에서 채수한 250 ml를 Lugol액으로 고정하여 광학현미경 아래에서 세포수를 계수하였다.

결 과

수온의 변화

표층과 저층의 1일 동안 수온변화는 Fig. 2와 같다. 하루 중 가장 높은 수온은 18시에 1 m 층에서 26.9°C이었고, 가장 낮은 수온은 저층 15 m에서 22°C로 4.9°C의 온도차를 나타낸 반면 저녁동안에는 표저층간 차이가 낮보다는 적었다. 표층에서의 시간별 온도변화는 최고 26.9°C (10시, 12시, 16시)였으며 최저는 오전 6시에 25.0°C로써 1.9°C의 차이를 나타내었다. 한편 수심별 평균은 표층 26.0°C, 1 m층 25.6°C, 4 m층 25.2°C, 7 m층 24.8°C, 10 m층 24.4°C, 15 m층이 23.6°C로 층별 뚜렷한 수온약층은 없이 표저층 해수교환이 활발하였음을 나타내었다.

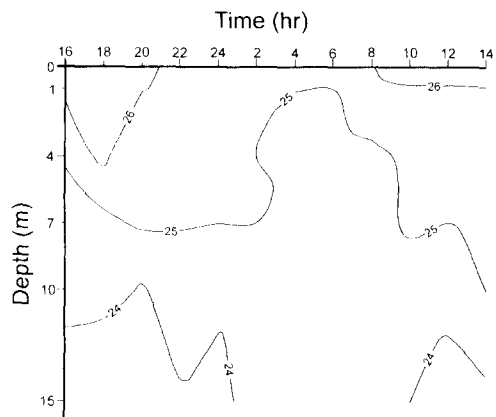


Fig. 2. Contour of water temperature variation (°C).

용존산소의 변화

조사 당일 적조가 심하게 발생하여 낮에 조사 장소 주위에서 황토를 오전 12시부터 오후 6시까지 연속적으로 뿌려 적조가 가두리에 밀려들지 않도록 어선으로 가두리 주위를 선회하면서 황토현탁액을 뿌릴 때와 이후 밤에 2시간 간격으로 채수하여 분석한 용존산소의 변화는 Fig. 3과 같다.

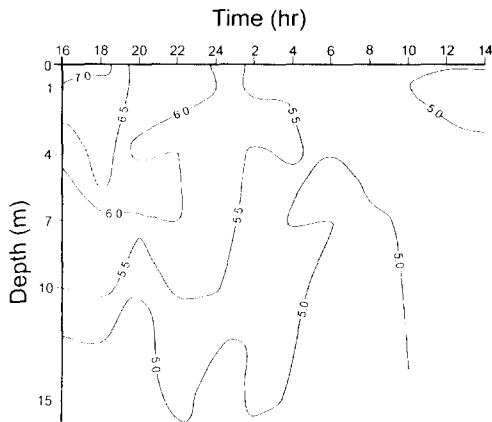


Fig. 3. Contour of Dissolved oxygen variation (ml/l).

9월1일 심한 적조의 영향으로 용존산소의 분포는 표층에서 7.0 ml/l 이상으로 높았고 낮동안과 새벽 2시까지도 10 m층까지 5.5 ml/l 이상으로 용존산소의 부재나 빈 산소수피의 발생은 관측되지 않았다. 단지 오전 6시부터 8시까지 4 m층까지 다소 낮은 용존산소를 나타내었으나 (5.0 ml/l), 가두리가 설치되어 있는 수심 5 m까지는 대부분 5.0 ml/l 이상으로 어류를 폐사시킬 수 있는 농도는 아니었다.

***Cochlodinium polykrikoides* 세포수 변화**

조사 기간 중 적조가 심했던 9월 1일 16시 1 m층에서 3,990 cells/ml로 가장 높은 밀도를 나타낸 반면 9월 2일 2시 7 m층과 6시 표층, 1 m, 7 m층에서 *C. polykrikoides* 세포가 관찰되지 않았다. 주야 수직이동 경향은 16시 4 m층에서도 2,110 cells/ml로 높은 밀도를 보였던

*C. polykrikoides*는 해가 기울기 시작하여 일사량이 감소한 18시에는 전체 수층에서 1,000 cells/ml 이하로 골고루 분포하다가, 20시에는 10 m층에서 2,120 cells/ml, 15m 층에서 1,670 cells/ml로 저층에서 크게 증가하였다. 22시부터 최고 밀도층은 15m층에서 1,500 cells/ml, 24시에 800 cells/ml, 2시에 460 cells/ml, 4시에 240 cells/ml, 6시에 310 cells/ml 였으나 8시에는 10m층에서 410 cells/ml, 10시에는 420 cells/ml, 12시에는 550 cells/ml로 최대 밀도층을 나타내었으며 11시에 적조가 주위에서 잠깐 나타났다가 사라진 후인 14시에는 4m 층에서 510 cells/ml로 최대 밀도층을 나타내어 밤에는 저층에 분포하고 아침 8시부터는 점차 표층으로 이동하는 주야간 수직이동을 뚜렷하였다. 특히 22시부터 새벽 4시까지의 최대 밀도층의 개체수가 반감되었으며, 또한 최대 밀도층이 20시와 22시 사이에서 시간당 2.5 m 이상 침강하는 것으로 나타났다 (Fig. 4).

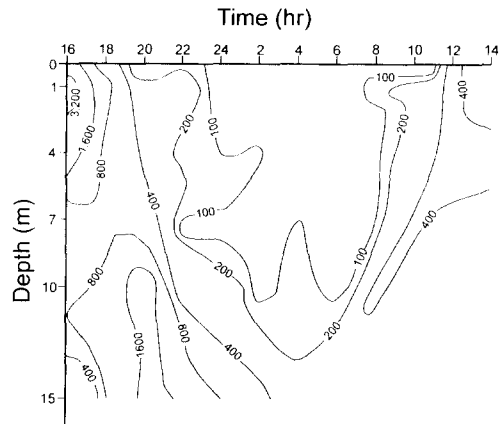


Fig. 4. Contour of cell number variation (cells/ml).

Chlorophyll a의 변화

C. polykrikoides 세포수의 변화와 아울러 Chlorophyll a의 변화량은 Fig. 5와 같다.

16시 표층에서 가장 높은 65.8 µg/l을 나타내었으며 9월 2일 4시 표층에서 1.0 µg/l로서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 각 층별 시간별

Chlorophyll *a*의 농도분포는 *C. polykrikoides*의 분포밀도에 의해 좌우되어 나타났는데 5.0 $\mu\text{g}/\ell$ 이상에서는 *C. polykrikoides*의 세포수의 변화경향과 일치하였으며, 특히 밤에 저층에서 높은 농도를 나타낸 것은 세포수의 결과와 같았다.

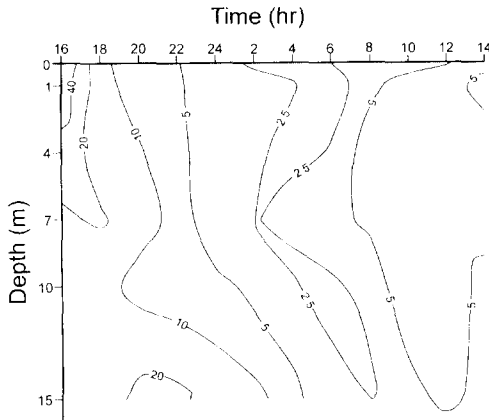


Fig. 5. Contour of chlorophyll *a* variation ($\mu\text{g}/\ell$).

pH 및 영양염 변동

C. polykrikoides 일주운동과 더불어 나타나는 pH와 영양염 변동은 Table 1과 같다.

조사시간 중 pH의 변화는 평균 8.45, 범위 8.62~8.31로서 18시 표층에서 8.62로 가장 높았고 저층(15 m)에서 8.31로 가장 낮았다. *Cochlodinium*이나 적조로 인한 저산소 등에 의해 일어날 수 있는 영양염 중 가장 먼저 증가되는 성분인 암모니아의 변화는 평균 0.29 $\mu\text{g-at}/\ell$, 범위 0.45~0.16 $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 9월 2일 10시 1 m 층에서 0.45 $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 가장 높은 농도를, 9월 2일 4시 10 m, 15 m 층에서 0.16 $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었다.

아질산의 변동은 전체 평균 0.51 $\mu\text{g-at}/\ell$, 범위 0.11~2.05 $\mu\text{g-at}/\ell$ 였으며 9월 2일 12시 10 m

층에서 최고(2.05 $\mu\text{g-at}/\ell$) 농도를, 9월 1일 22시 표층에서 최저(0.11 $\mu\text{g-at}/\ell$) 농도를 나타내었다. 한편 규조류 등에 선택적으로 잘 이용되는 질산염은 평균 2.87 $\mu\text{g-at}/\ell$, 범위는 최저 1.57 $\mu\text{g-at}/\ell$ (9월 1일 18시 7 m), 최고 7.68 $\mu\text{g-at}/\ell$ (9월 2일 12시 10 m)의 농도분포를 나타내었다. 질소성분과 함께 제1차 생산을 제한하는 요소인 인산은 평균 0.28 $\mu\text{g-at}/\ell$, 최저 0.14 $\mu\text{g-at}/\ell$ (9월 1일 22시 7 m), 최고 0.90 $\mu\text{g-at}/\ell$ (9월 1일 24시 표층)를 나타내었다. 한편 규산의 분포는 평균 9.35 $\mu\text{g-at}/\ell$ 이었으며 최저 6.46 $\mu\text{g-at}/\ell$ (9월 1일 18시 표층), 최고 14.63 $\mu\text{g-at}/\ell$ (9월 2일 12시 10 m)를 나타내었다.

고찰

양식어류의 대량폐사를 일으킬 수 있는 고밀도(3,000 cells/ml 이상) *C. polykrikoides* 적조 대책은 이들의 생태를 정확히 파악하여 효과적인 구제 대처하는 기술개발이 필요하다. *C. polykrikoides*와 같이 활발한 유영운동을 하는 종들은 주·야간 수직이동을 하면서 낮에는 표층에서 활발한 광합성으로 유기물을 생산하여 에너지를 축적하고, 밤에는 저층으로 내려가 영양염을 흡수하여 대사에 필요한 영양분을 공급받는 것으로 알려져 있다(Cullen et al., 1985; Eppley et al., 1968; Figueiras and F. Fraga, 1990; Kamykowski and S. J. Zentara, 1977; Watanabe et al., 1988).

본 조사에서 낮에는 표층에서 4 m층까지 밀도가 집중되고, 해가 지면서 저면으로 밀도가 다소 분산되면서 밀도 최대층이 10 m이하에 분포하는 것이 확인되었다. 이런 현상은 Chlorophyll *a* 조사와 잘 일치하고 있다. 조사기간 중의 용존

Table 1. Variation of nutrients at the sampling station ($\mu\text{g-at}/\ell$).

	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SiO ₂ -Si
Mean	0.29	0.51	2.87	0.28	9.35
Range	0.16~0.45	0.11~2.05	1.57~7.68	0.14~0.90	6.46~14.63
S · D	0.06	0.46	0.88	0.12	1.85

산소의 변화는 적조 직후의 조사자료이지만 야간의 저산소 수위가 만들어지는 것은 관찰할 수 없었으며, 용존산소 분포도(Fig. 3)에서 볼 때 적조생물군에 따라 초저녁에는 저층까지 용존산소의 증가가 있었으나, 새벽에는 미약하나마 낮은 농도(5.0 ml/l)로 중층까지 올라오는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 황토살포에 따라 대량으로 해저에 침전되는 것으로 예상되는 *C. polykrikoides* 사체에 의한 직접적인 용존산소의 소모현상은 관찰되지 않았다. 적조진행 중에 일어날 화학적 변화를 pH와 영양염 변동으로 고려할 때 pH는 표·저층 범위 8.3~8.6 사이로 다소 높게 나타났으며 암모늄은 통상 연안에서 나타나는 농도보다는 다소 낮게 나타났으며, 아질산은 정상, 질산은 다소 높은 농도를 보여 질산염은 *C. polykrikoides*에 의해 선택되어 흡수 이용되는 이용율이 암모늄이온보다는 낮은 것으로 보인다. 질소계통의 영양염과 같이 식물부유생물에 의해 소비되는 인산의 경우도 본 조사시간 중 결핍되지 않은 농도를 나타내어 제한인자로는 볼 수 없었으며, 이 보고에서는 제외되었지만 본 조사 정점을 정하기 전 적조가 매우 농밀하게 발생된 인근 해역에서 인산염을 조사한 자료는 4.18 $\mu\text{g-at/l}$ 를 나타내어 매우 이례적으로 높은 농도를 나타낸 것은 인산을 필요 이상 세포내 축적 한 후(phosphate luxury deposition) 진해만의 경우(나, 1987)와 미역의 인산염 용출과 같이(강·나, 1991) blooms이 진행되면서 수계로 방출된 결과로 사료된다. 한편 규산염의 농도분포를 볼 때 식물부유생물의 군집이 *C. polykrikoides*로 되어 규조류 등이 우세하지 못한 결과 해수중 규산의 소모가 적고 황토살포에 따른 규산의 영향으로 판단된다.

본 조사결과로 볼 때 *C. polykrikoides* 이동에 따른 현장 가두리 양식어민의 적조 대처 방안은 주간에는 적조대가 표층에 주로 분포되어 있으므로 황토살포를 하게되면 80% 이상 제거되어 적조를 방지할 수 있고, 선박에 의한 적조수피의 분산작업을 통해 피해를 예방할 수 있으나 적조

생물이 양식가두리 수심 5 m 부근으로 가라앉는 18시에서 20시 사이와 떠오르는 시간대인 오전 8시에서 10시 사이에 적조생물 농밀군이 가두리 어장에 피해를 줄 수 있으므로 황토살포작업 시간을 연장하는 것이 적조예방에 필요하다고 판단된다. 특히 조류가 빠른 어장에서는 눈에 보이지 않게 농밀군이 통과하여 피해를 볼 수 있으므로 육안관찰 뿐만 아니라 의심되는 때에는 유생채집망(망목크기 60 μm)으로 수직채집하여 물이 잘 빠지지 않고 미끈미끈하면 *C. polykrikoides* 군집이 저층에 분포하고 있다고 보면 되므로 가두리 주변에 황토를 미리 살포하는 것이 안전한 적조 방제 대책이 될 수 있다.

실제로 1997년도 8월 31일 통영시 사랑면 양지리 지선의 어류 대량폐사(약 20만마 추정)는 피해를 본 시간대가 오전 10시로 저층에서부터 올라오는 적조농밀층이 가두리 어류에 영향을 준 것으로 보이며, 9월 1일 본 조사팀이 일주운동을 조사하던 현장에서도 주위에서 황토를 살포하는 중에도 고밀도 적조가 가두리로 밀려와 가두리 내의 농어(크기 15 cm 전후)가 가두리 외부로 도피하려고 튀어 오르고 있었을 때 황토를 살포하여 곧바로 안정을 되찾는 것을 볼 수 있었다. 그 후 황토현탁액을 가두리로 계속 흘러 보낼 때 가두리 외부의 황토현탁액이 흘러가는 곳에 학공치 떼가 모여 유영하는 것을 관찰할 수 있었고, 저층의 베도라치가 표층으로 떠올라 유영하는 것을 볼 때 황토현탁액에 의한 적조방제 대책이 현실적인 대안일 뿐만 아니라 양식어류에도 수질환경이 악화될 때 호조건을 유지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

요 약

1997년 9월 1일과 2일 심한 적조가 발생된 해역의 가두리 양식어장에서 적조원인 생물인 *Cochlodinium polykrikoides*의 주야 수직이동을 세포수와 Chlorophyll a로 분석한 결과 낮에는 표층에서 4 m까지 농밀층이 분포하고 있었으나

저녁에는 저층 10 m, 15 m층에 주로 분포하였다. 이로 볼 때 황토를 이용한 적조방제는 저녁 18시부터 20시까지, 아침 8시부터 10시까지가 눈에 보이지 않는 위험시기이다. 조사 당시 가두리 주위에 황토를 12시부터 18시까지 연속적으로 뿌려 적조를 방제하였으나 가두리 주위에서 용존산소의 분포는 정상이었다. 이때 수질환경 중 pH는 8.45로 정상치보다 높았으며 영양염 중 암모니아와 인산은 균집유지에 효율적으로 이용되었고 질산염과 규산염은 정상보다 다소 높은 농도를 나타내었다.

REFERENCES

- Cullen, J. J., M. Zhu, R. F. Davis and D. C. Pierson, 1985. Vertical migration, carbohydrate synthesis, and nocturnal nitrate uptake during growth of *Heterocapsa niei* in a laboratory water column. In : Toxic dinoflagellates, Anderson, D. M., A. W. White and D. G. Baden (eds.), Elsevier, Amsterdam, 189-194.
- Delgado, M., E. Graces and J. Camp, 1996. Growth and behaviour of *Dinophysis sacculus* from NW Mediterranean. In : Harmful and toxic algal blooms. Yasumoto, T., Y. Oshima and Y. Fukuyo (eds.), Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. 261-264.
- Eppley, R. W., O. Holm-Hansen and J. D. H. Strickland, 1968. Some observation on the vertical migration of dinoflagellates. *J. Phycol.*, 4 : 333-340.
- Figueiras, F. G. and F. Fraga, 1990. Vertical nutrient transport during proliferation of *Gymnodinium catenatum* Graham in Ria de Vigo, North west Spain. In : Toxic Marine Phytoplankton, Graneli, E., B. Sundström, L. Edler and D. M. Anderson, (eds.), Elsevier, New York. 144-148.
- Kamykowski, D. and S. J. Zentara, 1977. The diurnal vertical migration of motile phytoplankton through temperature gradients. *Limnol. Oceanography*, 22 : 148-151.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1972. A practical handbook of seawater analysis. *J. Fish. Res. Bd. Can. Bull.*, 167 : 45-138.
- Watanabe, M., K. Kohata and M. Kunigi, 1988. Phosphate accumulation and metabolism by *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) during diel vertical migration in a stratified microcosm. *J. Phycol.*, 24 : 22-28.
- 강청미 · 나기환, 1991. 미역의 인산염 용출시험. 수진원연구보고, 45 : 41-46.
- 국립수산진흥원, 1997. 한국연안의 적조-최근 적조의 발생원인과 대책, 280 pp.
- 나기환, 1987. 진해만 일원의 적조발생과 환경. 적조 및 어장보전 대책에 관한 심포지엄 결과 보고서, 수산진흥원, 39-44.
- 나기환 · 최우정 · 전영렬, 1996. 부유황토에 의한 적조방제 연구. 한국양식학회지, 9 : 239-245.