

## 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*에 노출된 어류의 산소 소모량 및 조직 변화

심정민 · 이주 · 이용화 · 김봉석\*

국립수산과학원 동해수산연구소, \*국립수산과학원 생명공학과  
(2009년 7월 31일 접수; 2009년 10월 6일 수정; 2009년 11월 13일 채택)

### Response of Oxygen Consumption and Gill Tissue of Fish Exposed to Red Tide Organism *Cochlodinium polykrikoides*

Jeong-Min Shim, Chu Lee, Yong-Hwa Lee and Bong-Suck Kim\*

East Sea Fisheries Research and Development Institute, NFRDI, Gangneung, 210-860, Korea  
\*Biotechnology Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-902, Korea  
(Manuscript received 31 July, 2009; revised 6 October, 2009; accepted 13 November, 2009)

#### Abstract

Eco-physiological research and the control of *Cochlodinium polykrikoides* was carried out to elucidate eco-physiological characteristics of red tide organism through culture experiment depending on the condition of photon irradiance. Oxygen consumption of *C. polykrikoides* was high with a value of 1.12 mg/L/hr in the dark compared with that of 0.13 mg/L/hr at  $100 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ . DO values in a circular chamber with the lapse of time in seawater containing *C. polykrikoides* were declined in the dark period. DO values of seawater containing *C. polykrikoides* in the dark were declined from 7.01 mg/L to 2.65 mg/L in 30 cm depth and from 7.01 mg/L to 6.63 mg/L in 5 cm depth depending on the depth of circular culture vessel. Olive flounder, *Paralichthys olivaceus* and file fish, *Stephanolepis cirrhifer* exposed to *Cochlodinium* showed the separation of the lamella epithelium from gill filament, which disrupted the respiratory process at the gill level.

**Key Words :** *Cochlodinium polykrikoides*, Photon irradiance, Oxygen consumption, Lamella epithelium

#### 1. 서론

*Cochlodinium polykrikoides*는 우리나라 연안에서 적조를 일으키는 생물 중 경제적 손실을 가장 많이 일으키는 종의 하나로 특히 1995년에는 전남 고흥군 연안에서 발생하여 동해 강릉연안까지 광범위한 해역에 적조를 일으켰고, 유입한 해수를 사용한 육

상 양식장에서 사육 중인 어류와 공동어장 및 정지망 포획대상 어종까지도 대량 폐사시켜 750 여억원의 엄청난 재산상의 피해를 가져왔다<sup>1)</sup>. '95년 이후는 해마다 남해안에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조는 동해연안으로까지 확산되고 있으며 이 종에 대한 생리, 생태 및 폐사 기작과 관련하여 온도, 영양염 및 광조건 등의 배양조건에 따른 *Cochlodinium*의 성장률, 생활사 등 생리적인 특성에 대한 다수의 보고가 있다<sup>2-6)</sup>.

수산생물의 폐사와 관련해서는 *Cochlodinium* 속

Corresponding Author: Jeong-Min Shim, East Sea Fisheries Research and Development Institute, NFRDI, Gangneung, 210-860, Korea  
Phone: +82-33-660-8532  
E-mail: jmshim@nfrdi.go.kr

에 속하는 여러 종은 방어와 돔 등 어류 및 굴의 폐사를 유발시키며, 마비성 패독(Paralytic Shellfish Poisoning)을 유발하였다는 보고가 있다<sup>7-10</sup>. 일본에서는 *C. polykrikoides*와 *Cochlodinium*속의 다른 종이 어류 독을 생산한다고 알려져 있다<sup>11</sup>. 1990년 중국에서도 *Cochlodinium* 적조가 처음으로 발생하여 수산생물을 대량 폐사시킨 바 있으며 미국에서도 이 속에 의한 적조가 발생한 바 있다<sup>12,13</sup>.

*Cochlodinium*에 의한 어류폐사 기작으로는 *Cochlodinium*이 분비하는 점액성분에 의한 호흡곤란과 질식<sup>14</sup>, 유해 활성산소 생성과 관련된 산화적 반응에 따른 아가미 기능 저하<sup>15</sup> 및 독성물질에 의한 폐사<sup>11,16</sup> 등이 보고되었다.

본 연구에서는 *C. polykrikoides*의 어류 폐사와 관련된 생리적인 특성을 파악하기 위한 기초 연구로 실험실내 배양을 통해서 광 조건에 따른 어류의 산소 소모율 변화와 *Cochlodinium* 적조수에 노출된 어류 아가미의 조직학적 변화를 살펴보고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

*C. polykrikoides* 적조수를 채취하여 입체현미경하에서 capillary pipette으로 4개 세포군체를 분리하여 24 multi-cell well에 옮긴 후 F/2 배지<sup>17</sup>에서 계대 배양하였다. 배양조건은 온도 22 °C, 광량 100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 광주기 14 L:10 D로서 배양기(EYELA, MTI-201B)에서 실험하였다.

광량에 따른 *C. polykrikoides*의 산소 소모량을 조사하기 위하여 배양된 *C. polykrikoides*를 20 L 밀폐용기에 3,500 cells/mL 농도로 수용하여 22 °C에서 광량(암처리, 20, 60 및 100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ )에 따른 본 종의 산소 소모량을 측정하였다. 외부에서의 산소유입을 방지하기 위하여 20 L 밀폐용기에서 다기능수질측정기(YSI 6000)를 컴퓨터단말기에 연결하여 유속 2.7 L/min에서 시간 경과별 산소 소모량을 측정하였다. 온도는 컴퓨터단말기에 나타나는 수온을 관찰하면서 항온배양기내에서 조정하였다. *Cochlodinium* 적조수에서의 어류의 산소 소모량을 조사하기 위하여 넙치(평균 14.5 cm, 28 g) 5마리를 실험온도에서 순치시키고 3,500 cells/mL 밀도의 적조수 20 L를 포함하고 있는 원형의 밀폐순환수조에 투입하여 10분간 안정시킨 후 용존산소를 10분 간격으로 측정하

였다. 실험은 *C. polykrikoides* 및 넙치의 성장이 가장 양호한 22 °C에서 수행하기 위해 온도조절 항온기 내에서 행해졌다.

*C. polykrikoides*의 밀도에 따른 용존산소와 pH의 변화를 살펴보기 위하여 암처리 된 직사각형 플라스크 수조 (37×51×30 cm)에 본 종을 1000, 3000, 5000 cells/mL의 밀도로 포함한 해수 40 L를 투입 후 시간 경과에 따른 농도 변화를 관찰하였다. 광주기에 따른 용존산소의 변화를 파악하기 위하여 *C. polykrikoides*의 광주기 14 L:10 D하에서 밀폐된 20 L 수조에 본 종을 5,000 cells/mL 밀도로 조절하여 다기능수질측정기(YSI 6000)로 용존산소의 농도 변화를 24시간 연속 측정하였다. 또한 배양용기의 수심에 따른 용존산소의 변화는 6,000 cells/mL의 적조수 20 L에 수심을 5, 30 cm로 조절하고 암흑 상태로 밀봉된 원형수조 내의 용존산소와 용존산소 포화도(DO%)를 YSI 6000으로 측정하였다.

*Cochlodinium* 적조수에 노출된 어류의 조직학적 변화를 조사하기 위하여 적조가 발생하는 시기에 넙치 3마리(평균 13.7 cm, 26 g), 쥐치 3마리(평균 15.2 cm, 31 g)를 실험어로 이용하였다. 5000 cells/mL 밀도의 *Cochlodinium* 적조수 20 L를 각각 두개의 원형수조에 넣고 넙치와 쥐치를 노출시킨 후, 시간경과에 따른 폐사개체의 아가미를 적출하여 시료를 이용하였다. 이 때 각각 대조군의 아가미를 함께 적출하였다. 절취된 시료는 Bouin's 용액에 24시간 고정하여 수세한 후 70% ethanol을 거쳐 에탄올 탈수과정을 거쳤다. 아가미의 조직절편은 paraffin 절편법에 따라 5~7  $\mu\text{m}$  두께의 파라핀 연속절편을 만들었다. 조직표본은 Mayer's hematoxylin-eosin으로 비교 염색하여 현미경하에서 비교 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 광량에 따른 *C. polykrikoides*와 어류의 산소 소모량 변화

광량에 따른 *C. polykrikoides*의 산소 소모량은 광량이 낮을수록 증가하여 암소에서는 1.12 mg/L/hr로 100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 일 때 0.13 mg/L/hr과 비교해서 암소에서 약 8배 높은 산소 소모량을 보였다(Fig. 1). 반면 넙치의 산소 소모량은 광량에 의한 영향이 적어서 암소에서 225.3 mg/kg/hr, 100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 205.6 mg/kg

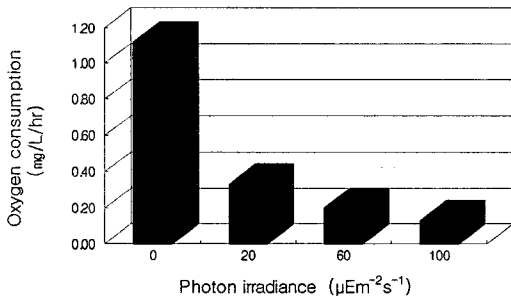


Fig. 1. Photon irradiance dependent oxygen consumption of red tide organism *C. polykrikoides* stocked in the 20 L closed seawater vessels at a density of 3,500 cells/mL.

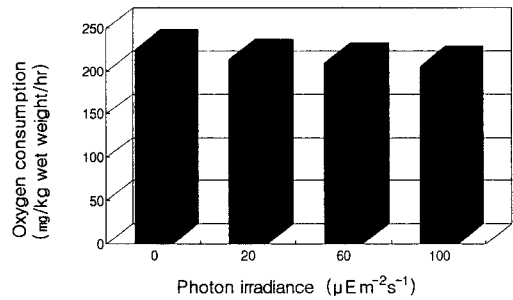


Fig. 2. Photon irradiance dependent oxygen consumption of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) stocked in the 20 L closed seawater vessels containing *C. polykrikoides* with a density of 3,500 cells/mL.

/hr로 암소에서와 100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서의 산소 소모율이 1.08배 차이를 보였다(Fig. 2). 암소에서는 단위 사육수당 적조생물의 산소 소모율은 넓치 산소 소모율의 70%나 되었으며, 광량이 높을수록 적조생물의 산소 소모율은 낮아져 100  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서는 9%에 지나지 않았다.

*Cochlodinium*의 밀도에 따른 용존산소의 변화를 조사한 결과 용존산소는 4시간 경과 후 1000, 3000, 5000 cells/mL에서 각각 5.9, 5.8, 5.1 mg/L을, 5시간 경과 후에는 4.7, 4.3, 3.8 mg/L로 측정되어 *Cochlodinium*의 밀도에 따른 용존산소의 변화 폭이 큰 것으로 나타났다(Table 1). 반면에 *Cochlodinium*의 밀도에 따

른 pH의 변화는 실험 초기와 8시간 경과 후에도 1000, 3000, 5000 cells/mL에서 각각의 변화 범위가 7.98~8.03, 7.98~8.04 및 7.82~8.01로서 시간대별, 밀도별 pH 변화는 크지 않은 것으로 나타났다(Table 2).

*Cochlodinium*을 대량 배양하면서 광주기에 따른 용존산소의 소모를 24시간 연속 관찰한 결과, 명기에는 광합성에 의한 산소의 생성이 활발하여 용존산소의 농도가 7.08 mg/L로 높게 나타났으나 암기에서는 시간이 경과함에 따라 점차 감소하여 최저 2.55 mg/L로 5 mg/L 이상의 차이를 나타내었다(Fig. 3). 이는 명기시에는 광합성에 의해 산소가 형성되었으나 암기시에는 광합성보다는 호흡에 의한 산소

Table 1. Dissolved oxygen in *C. polykrikoides* seawater of dark treated aquarium without aeration

Cell number (cells/mL)	Incubation period (hour)								
	I	1/2	1	2	3	4	5	6	7
1,000	6.4	6.2	6.0	5.9	5.9	4.7	4.4	4.1	3.8
3,000	6.4	6.1	6.0	5.9	5.8	4.3	4.1	3.7	3.5
5,000	6.3	6.0	5.8	5.8	5.1	3.8	3.4	3.0	3.0

\* An aquarium under 25 °C has been filled with 40 L dinoflagellate *C. polykrikoides* seawater. I, Initial value of dissolved oxygen.

Table 2. pH on *C. polykrikoides* seawater in a dark-treated aquarium without aeration

Cell number (cells/mL)	Incubation period (hour)									
	I	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8
1,000	8.03	8.02	8.01	8.01	8.00	7.99	7.98	7.98	7.98	7.98
3,000	8.04	8.03	8.03	8.03	8.02	8.01	8.01	8.01	8.00	7.98
5,000	8.01	7.99	7.95	7.95	7.92	7.89	7.87	7.85	7.83	7.82

\* An aquarium under 25 °C has been filled with 40 L dinoflagellate *C. polykrikoides* seawater. I, Initial value of pH.

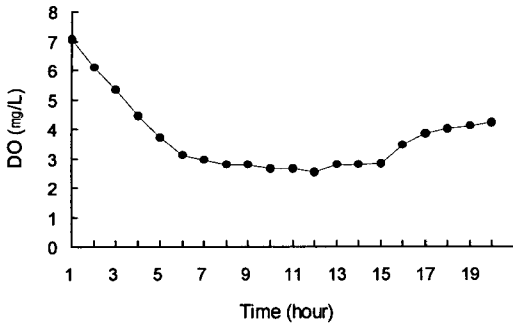


Fig. 3. Variation of DO under photoperiod during the mass culture of *C. polykrikoides* in a culture vessel of 40 L.

의 소모에 기인한 것으로 사료된다.

*Cochlodinium*을 대량 배양하는 원형수조를 암흑 상태로 밀봉 후 수심별 적조수의 용존산소 변화를 살펴보면 시간이 경과함에 따라 수심 5 cm와 30 cm에서 큰 차이를 나타내었다. 수심 5 cm에서는 1시간 경과시 7.01 mg/L였으나 5시간 경과시에는 6.63 mg/L로서 용존산소 변화폭이 적었다. 그러나 수심 30 cm에서는 1시간 경과시 7.01 mg/L였으나 5시간 경과시에는 2.65 mg/L로서 급격한 용존산소 감소를 보였다(Fig. 4).

*Cochlodinium*과 같은 편모조류는 운동성을 가지고 있어 주·야간 수직이동을 할 수 있으며 종에 따라서는 밤에 영양염이 풍부한 저층으로 이동하고 낮 동안에는 영양염이 없는 표층으로 부상하여 광

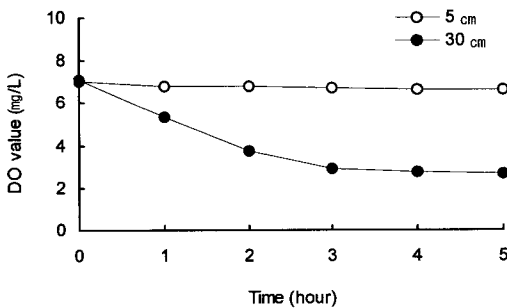


Fig. 4. Variation of dissolved oxygen depending on the culture vessel depth in *C. polykrikoides* seawater in a dark-treated circular chamber without aeration. An aquarium was filled with *C. polykrikoides* seawater of the density of 6,000 cells/mL at 23±0.3 °C and 33.1±0.2.

합성 중에는 체내의 축적된 영양분을 이용한다고 보고되어 있다<sup>18~22)</sup>. 이와 같은 결과는 본 연구에서 *Cochlodinium*의 대량 배양시 암기에는 플랑크톤이 저층에 가라앉아 호흡에 의한 용존산소 소모로 수조내의 용존산소가 시간이 경과함에 따라 감소하였으며 이에 따른 표층과 저층의 산소소모가 다르게 나타난 것과 일치한다. 남해안에서 *Cochlodinium* 적조 발생시 가두리 양식장의 경우 *Cochlodinium*이 저층에서 올라오는 시간인 오전 10시경에 대량폐사가 일어난다고 알려져 있으며<sup>23)</sup>, 이러한 결과는 저층의 광량 부족에 의한 용존산소 결핍이 폐사를 일으키는 원인의 하나임을 보여준다.

와편모조류의 종류에 따라 침강속도는 명암주기에 따라 다르며 실제 *Prorocentrum micans*와 *Gymnodinium kovalevskii*는 야간에 아주 빨리 가라앉으나 이 때 분열속도는 느렸고, 주간에는 천천히 가라앉으나 분열속도는 빠르다고 보고하였다<sup>24)</sup>. 따라서 광주기 및 광량에 따라 수직운동을 하고 양성주광성을 나타내며, 침강속도는 암처리시에 증가하며 생물의 종에 따라서 영양염, 광량 등의 조건에 따라 특이적으로 수직운동을 하며 *Gonyaulax polyedra*와 *Cachonina niei*는 배양시 광하에서 표층으로 이동하고 암조건에는 저층으로 가라앉는다고 보고하였다<sup>25)</sup>. 이는 본 연구에서 *Cochlodinium*의 대량 배양시 암기에는 저층에 가라앉아 호흡에 의한 용존산소 소모로 수조내의 용존산소가 시간이 경과한 결과와 일치한다. 실제 *Cochlodinium* 적조수에 넘치 수용시 산소공급만 충분히 되면 어체 폐사가 거의 일어나지 않았으며, 광량에 따른 산소 소모량과 밀도에 따른 용존산소량의 차이는 이를 잘 뒷받침한다.

이와 같은 결과는 *Cochlodinium*이 육상 넘치양식장에 유입되었을 때 양식넙치와 적조생물의 산소 소모율은 광량과 밀접한 관련이 있음을 의미하며, *Cochlodinium* 적조 발생시 어류의 폐사는 용존산소 결핍에 기인한다는 것을 알 수 있다. 실제 *Cochlodinium* 적조수에 넘치 수용시 산소공급만 충분히 되면 어체 폐사가 거의 일어나지 않았으며, 광량에 따른 산소 소모량과 밀도에 따른 용존산소량의 차이는 이를 잘 뒷받침한다.

### 3.2. *Cochlodinium*에 노출된 어류의 조직 변화 넙치와 쥐치를 5000 cells/mL 밀도의 적조수에 노

출시킨 결과 아가미의 상피세포층에 이상이 관찰되었다. 대조군의 넙치 아가미는 1차 새엽과 2차 새판의 상피세포 및 지지세포의 배열이 정상과 유사하였으며 1차 새엽의 두께도 일정하게 나타났다(Fig. 5). 그러나 5,000 cells/mL의 *Cochlodinium*에 노출된 후 폐사한 넙치의 아가미는 2차 새판 상피세포층이 지지세포층으로부터 박리되었다. *Cochlodinium*에 노출된 쥐치 아가미 조직상은 대조군의 아가미에 비해 2차 새판의 뒤틀림이 두드러졌고 상피세포층의 박리가 전반적으로 나타났다(Fig. 5).

*Cochlodinium*에 의한 어류폐사의 원인이 산소부족에 의한 호흡곤란임을 보여주는 여러 가지 보고가 있다. Kim 등<sup>15)</sup>에 의하면 어류 폐사는 활성산소가 주원인으로 작용하여 아가미 세포의 구조와 기능의 변화를 유도함으로써 산소교환 능력이 떨어지는 것이 원인이라고 하였다. 또한 Toyoshima 등<sup>26)</sup>에 따르면 *Chattonella antiqua*에 노출된 어류의 아가미 새엽은 이온수송 기능에 변화를 일으켜 아가미 가스 호흡을 방해한 결과 산소 결핍을 일으킨다고 보고하였으며, Ishimatsu 등<sup>27)</sup>은 *Chattonella*에 의해 형성된 O기가 아가미의 mucus cells을 자극하여 분비

된 다당류가 가스 교환능력을 저하시켜 아가미 새엽의 호흡이 차단된다고 보고하였다.

또한 *Cochlodinium* 적조수에 노출된 어류의 아가미 조직을 대조군과 비교하면 넙치의 조직표본에서 모두 아가미 새의 상피외부가 박리되는 현상을 보였으며 이는 *Cochlodinium*의 점액질에 의한 기계적인 영향이거나 산소 차단에 의한 감염의 결과인 것으로 사료된다. 편모조류에 의해 폐사된 어류의 아가미 조직 변화에 관해서는 다수가 보고되었다. Jose<sup>28)</sup>에 따르면 *Heterosigma carterae*에 의해 폐사된 연어의 2차 아가미 새엽 상피가 박리되는 현상이 나타났으며 이로 인한 삼투압 쇼크가 유발된다고 보고하였다. 또한 Chang 등<sup>29)</sup>에 따르면 *Heterosigma carterae* 적조로 인한 폐사 연어의 아가미 조직에서 상피 외부가 박리되었으며 Shimada 등<sup>30)</sup>은 *Chattonella antiqua*에 노출됨에 따라 아가미의 가스교환이 방해받아 삼투조절 기능을 상실함으로써 어류를 폐사시킨다고 하였다.

이상의 결과를 종합할 때 육상양식장의 내부가 어둡거나 양식해수에 용존산소의 농도가 낮을 때, 양식넙치에 심각한 영향을 줄 가능성이 있다는 것

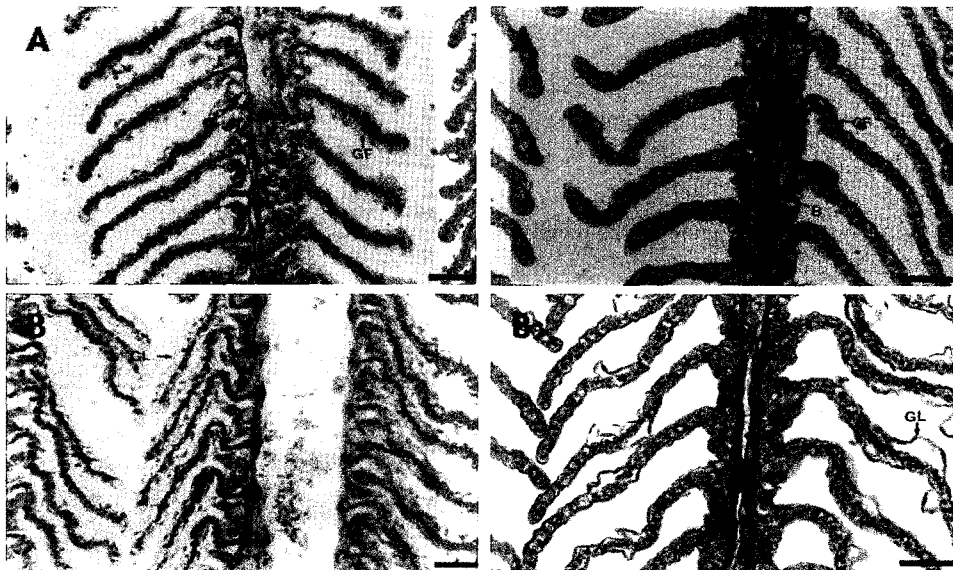


Fig. 5. Longitudinal section of control(A) and effected gill filament and lamella(B) of file fish *Stephanolepis cirrhifer*(left) and oliver flounder *Paralichthys olivaceus*(right) exposed to seawater with *Cochlodinium* of 5000 cells/mL. Note detached epithelial tissue from supporting cell in secondary lamella of affected fish. GF; Gill filament, GL; Gill lamella, B; Bony, support, arrow; chloride cell. Scale bar=50  $\mu$ m

을 의미한다. 따라서 육상양식장에서의 *Cochlodinium* 적조를 구제하는 방법의 하나로 적조수가 육상양식장으로 유입 시 양식장의 환경조절을 들 수 있다. 따라서 적조발생시 양식장 관리 대책의 하나로 산소의 대량공급과 양식장내 광량의 조절 등은 양식생물의 피해를 줄이는데 큰 효과를 나타낼 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 *C. polykrikoides*의 실험실내 배양실험을 통해서 어류폐사 원인을 밝히기 위한 기초실험으로 광량에 따른 어류의 산소 소모량과 *Cochlodinium* 적조수에 노출된 어류의 조직 변화를 조사함으로써 *Cochlodinium*의 생태적인 특징을 파악하고자 하였다.

*C. polykrikoides*의 산소 소모량은 광량이 낮을수록 증가하였으며 암소에서는  $1.12 \text{ mg/L/hr}$ 로  $100 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의  $0.13 \text{ mg/L/hr}$ 에 비해 약 8배나 높은 산소 소모량을 보였다. 암흑 상태로 밀봉된 *Cochlodinium* 대량 배양 원형수조 내의 수심별 적조수의 용존산소 변화는 수심 5 cm에서는 1시간 경과시  $7.01 \text{ mg/L}$ 였으나 5시간 경과시에는  $6.63 \text{ mg/L}$ 로서 용존산소 변화 폭이 적었다. 그러나 수심 30 cm에서는 1시간 경과시  $7.01 \text{ mg/L}$ 였으나 5시간 경과 시에는  $2.65 \text{ mg/L}$ 로서 급격한 용존산소 감소를 보였다. *Cochlodinium* 적조수에 노출된 어류의 아가미 조직을 대조군과 비교하면 모두 아가미 새판의 상피외부가 박리되는 현상을 보였으며 이는 *Cochlodinium*의 점액질에 의한 기계적인 영향이거나 산소 차단에 의한 감염의 결과인 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- 1) Kim H. G., S. G. Lee, K. H. An, S. H. Youn, P. Y. Lee, C. K. Lee, E. S. Cho, J. B. Kim, H. G. Choi and P. J. Kim, 1997, Recent red tides in Korean coastal waters, NFRDI, Korea, 280pp.
- 2) Lim W. A., Y. S. Lee and S. G. Lee, 2008, Characteristic of environmental factors related to outbreak and decline of *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the southeast coastal waters of Korea, 2007, J. Korean Soc. Oceanogr., 13(4), 325-332.
- 3) Lee C. K., H. C. Kim, S. G. Lee, C. S. Jung, H. G. Kim and W. A. Lim, 2001, Abundance of harmful algae, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum* and *Gymnodinium catenatum* in the coastal area of south sea of Korea and their effects of temperature, salinity, irradiance and nutrient on the growth in culture, J. Korean Fish. Soc., 34(5), 536-544.
- 4) Kim H. C., D. M. Kim, D. I. Lee, C. G. Park and H. G. Kim, 2001, Limiting nutrients of *Cochlodinium polykrikoides* red tide in Saryang Island coast by algal growth potential(AGP) assay, J. Korean Fish. Soc., 34(5), 457-464.
- 5) Kim H. C., C. K. Lee, S. G. Lee, C. G. Park and H. G. Kim, 2001, Physico-chemical factors on the growth of *Cochlodinium polykrikoides* and nutrient utilization, J. Korean Fish. Soc., 34(5), 445-456.
- 6) Kim C. J., H. G. Kim, C. H. Kim and H. M. Oh, 2007, Life cycle of the ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waters, Harmful algae, 6, 104-111.
- 7) Taylor F. J. R., 1985, The taxonomy and relationships of red tide flagellate. In Toxic Dinoflagellates, eds. by D. M. Anderson, A. W. White and D. G. Baden, Elsevier, North Holland, New York, 11-26.
- 8) Reyes-Vasques G., E. Ferraz-Reyes, E. Vasquez, 1979, Toxic dinoflagellates blooms in northeastern Venezuela during 1977, In Toxic Dinoflagellates Blooms, eds. by Taylor D. L., Seliger H. H., Elsevier, North Holland, New York, 191-194.
- 9) Zubkoff P., J. Munday, R. Rhodes and J. Warinner, 1979, Mesoscale features of summer (1975-1977) dinoflagellate blooms in the York River, Virginia (Chesapeake Bay estuary), In Toxic Dinoflagellates Blooms, eds. by Taylor D. L., Seliger H. H., Elsevier, North Holland, New York, 279-286.
- 10) Yuki K. and S. Yoshimatsu, 1987, Two fish killing species of *Cochlodinium* from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan, In Red Tide Biology, Environmental Science and Toxicology, eds. by Okaichi T., Anderson D. M., Nemoto T., Elsevier, New York, 451-454.
- 11) Onoue Y. and K. Nozawa, 1989a, Separation of toxins from harmful red tide occurring along the coast of Kagoshima prefecture, In Okaichi T., Anderson D. M., Nemoto T., eds. Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology, Elsevier, New York, 371-374.
- 12) Duqi Y. H. and X. Wang, 1993, Toxic dinoflagellate red tide a *Cochlodinium* sp. along the coast of Fujian, China, In Toxic Phytoplankton Booms in the Sea, eds. by Smayda T. J., Shimizu Y., 235-238.
- 13) Marshall H. G., 1995, Succession of dinoflagellate blooms in the Chesapeake Bay, U.S.A., In Harmful Marine Algal Blooms, eds. by Lassus P., Arzul G., Erard E., Gerden P., Marcaillou C., 615-620.

- 14) Lee J. S., 1996, Bioactive components from red tide plankton, *Cochlodinium polykrikoides*. J. Korean Fish. Soc., 29(2), 165-173.
- 15) Kim C. S., S. G. Lee and H. G. Kim, 2000, Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, J. Exp. Mar. Bio. Eco. 254(2), 131-141.
- 16) Onoue Y., K. Nozawa, K. Kumanda, K. Takeda and T. Aramaki, 1985, Toxicity of *Cochlodinium* type '78 Yatsushiro occurring in Yatsushiro Sea, Bull. Japan. Soc. Sci. Fish., 51(1), 147.
- 17) Guillard R. R. L., 1975, Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates, 29-60.
- 18) 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, eds. by Anderson D. M., White A. W., Baden D. G., Elsevier, Amsterdam, 189-194.
- 19) Figueiras F. G. and F. Fraga, 1989, Vertical nutrient transport during proliferation of *Gymnodinium catenatum* Graham in Ria de Vigo, North west Spain, In Toxic Marine Phytoplankton, eds. by Graneli E., Sundstrom B., Edler L., Anderson D. M., Elsevier, Amsterdam, 144-148.
- 20) Masataka W., K. Kohata and M. Kunugi, 1990, Nitrogen and phosphate accumulation by *Chattonella antiqua* during diel vertical migration in a stratified microcosm. In Toxic Marine phytoplankton, eds. by Graneli E., Sundstrom B., Edler L., Anderson D. M., Elsevier, Amsterdam, 244-248.
- 21) Eppley R. W., O. Holm-hansen and J. D. H. Strickland, 1968, Some observations on the vertical migration of dinoflagellates, J. Phycol., 4, 333-340.
- 22) Lieberman O. S. and M. Shilo, 1994, The physiological ecology of a freshwater dinoflagellate bloom population: vertical migrations, nitrogen limitation, and nutrient uptake kinetics, J. Phycol., 30, 964-971.
- 23) Na G. H., K. D. Park, S. H. Lee, G. H. Kim and J. B. Nam, 1997, Diel migration of dinoflagellates, *Cochlodinium polykrikoides* in situ. J. Aquaculture Kor., 10(4), 457-462.
- 24) Akina D. K., 1969, Relative settling rate of dinoflagellata in relation to their rates of division, Oceanography, 9, 248-251.
- 25) Sweeney B. M., 1984, Circadian rhythmicity in dinoflagellates, Dinoflagellates, Academic press, 343-364.
- 26) Toyoshima T., M. Shimada, T. Okaichi and T. H. Murakami, 1985, Ultrastructural alterations on chloride cells of the yellowtail, *Seriola quinqueradita*, following exposure to the red tide species *Chattonella antiqua*, Mar. Biol., 88, 101-108.
- 27) Ishimatsu A., M. Sameshima, A. Tamura and T. Oda, 1996, Histological analysis of the mechanisms of *Chattonella*-induced hypoxia in yellowtail, Fisheries Sci. 62(1), 50-58.
- 28) Jose R. C. V., 1999, Role of associated bacteria in *Heterosigma carterae* toxicity to salmonids, Aquatic Toxicology, 45, 19-34.
- 29) Chang F. H., C. Anderson and N. C. Boustead, 1990, First record of a *Heterosigma*(Raphidophyceae) bloom with associated mortality of cage-reared salmon in Big Glory Bay, New Zealand, New Zealand J. Mar. Freshwater Res., 24, 462-469.
- 30) Shimada M., T. H. Murakami, T. Imahayashi, H. S. Ozaki, T. Toyoshima and T. Okaichi, 1983, Effect of sea bloom, *Chattonella antiqua*, on gill primary lamellae of the young yellowtail, *Seriola quinqueradita*, Acta Histochem. Cytochem., 16, 232-244.