

## *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생규모에 대한 비교연구

강양순\* · 박영태 · 임월에<sup>1</sup> · 조은섭<sup>2</sup> · 이창규 · 강영실

국립수산과학원 어장정보과  
<sup>1</sup>국립수산과학원 양식환경연구소  
<sup>2</sup>국립수산과학원 남해수산연구소

### A Comparative Study on Outbreak Scale of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms

YANG SOON KANG, YOUNG TAE PARK, WEOL AE LIM<sup>1</sup>, EUN SEOB CHO<sup>2</sup>,  
CHANG KYU LEE AND YOUNG SHIL KANG

Ecology and Oceanography Division, NFRDI, Busan, 619-705, Korea  
<sup>1</sup>Aquaculture Environment Institute, NFRDI, Tongyeong, Gyeongsangnam-do, 650-943, Korea  
<sup>2</sup>South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu, Jeollanam-do, 556-823, Korea

2007년과 2008년 *Cochlodinium* 적조발생규모에 영향을 미친 주요원인을 파악하기 위하여 적조발생기간 중 해양학적, 기상학적 특징 등을 비교분석하였다. 2007년도 남해연안과 동해연안에서 115억원의 수산피해를 일으킨 대규모 적조발생원인은 적조발생기간 중 집중강우, 냉수대발생으로 인한 연안용승, 수온성층 약화로 인한 연안역의 풍부한 영양염과 낮은 포식 동물플랑크톤 때문으로 해석되었다. 한편, 2008년도 남해안 일부 연안에서 수산피해없이 발생한 소규모 적조원인은 적조발생기간 중 지속된 가뭄과 빈영양 외양수가 연안역에 강하게 영향을 미침으로써 연안역의 낮은 영양염과 예년보다 월등히 높은 밀도의 포식 동물플랑크톤 영향 때문으로 풀이되었다. 따라서, 영양염 농도, 외양수 영향, 포식 동물플랑크톤은 2007년과 2008년 적조발생 규모에 많은 영향을 미친 것으로 추정되었다.

To understand major factors that affected on distinct *Cochlodinium* bloom scale in Korean coasts in 2007 and 2008, oceanographic and meteorological characteristics during *Cochlodinium* bloom period were compared. The main reason for large scale blooms in 2007, covering both southern coast and eastern coast with about 10 million US dollars fish kills, was attributed to sufficient nutrient supply by heavy rainfall, upwelling in the coast arising from irregular wind shift, weak thermocline and low grazing pressure by zooplanktons during *Cochlodinium* bloom development period. On the contrary, small scale blooms in 2008 covering only inshore areas of southern coast without fish kills was attributed to the low nutrient level in coastal areas by long persistent drought and strong influence of oligotrophic offshore water onto inshore and high grazing pressure by extra ordinarily abundant zooplanktons during *Cochlodinium* development period. Conclusively, it was estimated that nutrient level, strength of offshore water and feeding pressure might play a significant role in the difference of bloom scale between the two years.

**Keywords:** *Cochlodinium polykrikoides*, outbreak scale, nutrient, feeding pressure, zooplankton

### 서 론

우리나라는 1980년대 후반부터 유해성적조가 발생하여 많은 수산피해가 발생하고 있으며, 최근에는 해마다 남해안을 중심으로 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생하여 동해안 및 서해안으로 확산되었다가 소멸되는 현상을 반복하고 있다(Kim *et al.*, 1999b). *C. polykrikoides* 적조는 일본, 중국을 비롯하여 필리핀, 말레이시아 등 동남아시아의 여러해역에서도 발생하여 수산피해를 일으키고 있으며(Anton *et al.*, 2008; Azanza *et al.*, 2008), 미국, 캐나다 및 멕시코 등지에서도 1980년 이후 지속적으로 발생하는

것으로 보고되고 있다(Whyte *et al.*, 2001; Curtiss *et al.*, 2008; Tomas and Smayda, 2008; Tang and Globler, 2009). 최근에는 이란 등 페르시아만의 나라에서도 이종에 의한 적조가 발생되어 어류, 패류 및 갑각류에 많은 수산피해가 일어나는 등 전세계적인 문제가 되고 있다(<http://www.thenational.ae/article/20090113/NATIONAL/494056136/1010>).

*C. polykrikoides*에 의한 적조는 우리나라에서 1995년 이후 본격적으로 해마다 발생하고 있으며, 발생특성, 발생기작, 생리·생태적인 특성 및 피해기작 등에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다(Kim *et al.*, 1999a; Kim *et al.*, 2000; 김 등, 2001; Kim *et al.*, 2002; Lee and Lee 2006; Ducette and Lee, 2008; Park and Park 2009). 특히, 적조발생기작에 대한 연구는 최근까지 다양한 방법의

\*Corresponding author: ys8051@nfrdi.go.kr

접근이 이루어지고 있지만(Lee, 2008; Lee and Kim, 2008), 적조 발생규모에 대해서는 표층 수온이 평년비 1~2 °C 상승, 강한 연안 전선, 용승 등이 1995년 대량 적조발생의 호조건으로 분석되었고(Kang *et al.*, 2002), 또한 적조발생요인을 통계분석하여 해역별로 적조발생에 영향을 미치는 인자를 달리 분석한 결과도 있었다(이와 문, 2008). 그러나, 적조발생규모의 예측에 대하여 현재까지 분석된 것을 보면 상대적으로 저온의 표층수온, 약한 수온성층, 높은 농도의 질산질소, 쿠로시오 상류역의 많은 유량 등 물리적인 요인에 의해 대규모 적조가 발생된다고 보고되었다(Han *et al.*, 2008).

따라서, 본 논문에서는 *C. polykrikoides* 적조발생에 있어 7월말 전남 여수 가막만 일대에서 최초 발생하였으나, 이후 밀도 및 발생패턴의 현저한 차이를 보인 대규모 적조인 2007년과 소규모 적조인 2008년 결과를 비교분석하여 적조 대규모 발생원인의 일부분을 알아내고, 향후 적조발생 및 이동·확신을 예측하는데 하나의 단서를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

*C. polykrikoides*의 출현, 적조의 발달 시기 및 원인을 분석하기 위하여 2007, 2008년 적조발생전인 6월 중순경부터 유해적조소멸기까지 통영~여수~완도해역에 2~3주간격으로 수질 및 식물플랑크톤 종조성을 조사·분석하였다(Table 1). 조사정점은 우리나라에서 해마다 최초로 발생하는 나로도부터 외해역 5개 정점을 포함하여 적조발생초기에 *C. polykrikoides* 유영세포가 나타날 수 있는 해역으로 설정하였고, 통영~남해해역에 12개 정점, 여수~완도해역에 13정점을 정하였다(Fig. 1).

Table 1. The sampling periods by ship in 2007, 2008

	2007	2008
1st	6.19~21	6.24~28
2nd	7.9~12	7.7~11
3rd	7.24~27	7.22~25
4th	8.15~18	8.7~11
5th	8.31~9.4	8.18~24
6th	9.27~10.1	9.9~13
7th	-	9.19~23

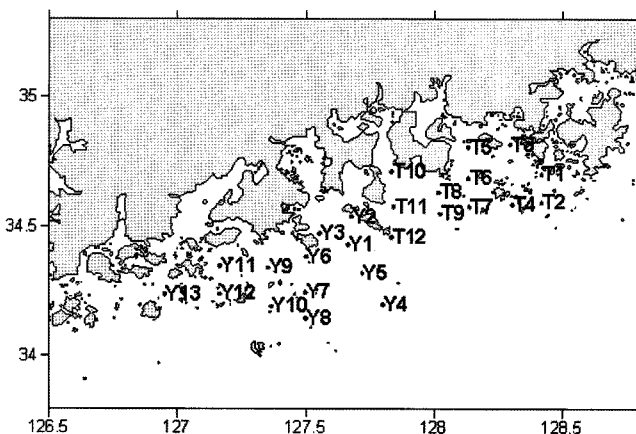


Fig. 1. A map showing location of sampling stations.

수온과 염분은 CTD(Sea Bird 19)를 이용하여 측정하였다. 영양염은 Niskin 채수기를 이용하여 현장에서 채수 후 GF/F filter로 여과하여 냉동보관하였고, chlorophyll-*a*의 농도도 해수 500 mL를 현장에서 0.45 µm membrane filter로 여과 후 냉동 보관하여 즉시 실험실로 옮겨 각각 분광광도계(UV-VIS spectrophotometer, Varian, Cary 330)를 이용하여 분석하였다(Strick and Parsons, 1972). 투명도는 직경 30 cm의 투명도판을 이용하여 현장에서 육안으로 측정하였다. 코클로디니움 유영세포는 표층수 1 L를 채수 후 10 µm seive를 이용하여 현장에서 여과하여 1.5 mL로 농축하여 생시료로 즉시 계수하였고, 식물플랑크톤의 현존량 및 출현종은 표층해수 1 L를 Lugol 용액으로 고정 후, 실험실로 옮겨 10 mL로 농축하여 계수 및 동정 분석하였다(Yamaji, 1984; Tomas, 1997). 동물플랑크톤 시료는 저층에서 표층까지 NORPAC 네트(구경 45 cm, 망목 0.33 mm)로 수직채집하여, 5% 중성포르말린으로 고정하여 종을 분석하였다. 기온, 강수량, 냉수대, 태풍정보 등은 기상청(www.kma.go.kr) 및 수산과학원의 냉수대자료(www.nfrdi.re.kr)를 분석하였다. 또한, 적조발생에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 적조주발생기인 4, 5, 6차 조사결과를 바탕으로 상관분석을 행하였으며, 모든 통계분석은 SPSS 12.0(SPSS co.) 통계프로그램을 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 적조발생규모의 비교

*C. polykrikoides*적조는 2007년 7월 31일~9월 18일까지 50일간 지속되었고, 전남 여수시 가막만 하단에서 최초 발생되어 완도~울진까지 확산되었다(Fig. 2). 최고밀도는 32,500 cells/mL(2007. 9. 4., 남해도)의 최고밀도를 보였고, 경주, 포항 등 경북, 전남 및 경남 연안에 우럭, 쥐치, 돌돔 등 어류에 113억원이라는 막대한 수산피해가 발생하였으며, 1995년 이후 3번째로 수산피해 및 최고밀도가 높은 해였다.

2008년은 2007년과 동일시기, 동일해역에서 발생되었으나, 최고밀도 7,300 cells/mL(2008. 9. 22., 거제)로 2007년에 비해 10일 가량 더 지속되었으나, 평균밀도가 예년에 비해 10배 정도 낮은 것으로 나타났다(국립수산과학원, 2009). 이는 1995년 이후 2번째로 낮은 밀도이며, 3번째로 장기간 지속되었지만, 최초로 코클로디니움에 의한 수산피해가 전혀 없는 다른 특징을 보였다(Fig. 2). 따라서, 연속되는 해로 발생시기 및 최초발생 패턴은 유사하지만, 적조생물, 밀도, 발생해역 및 수산피해에서 현저한 차이를 보인 2007년, 2008년을 각각 대규모, 소규모로 정하여 특징을 비교하였다.

### 기상요인의 비교

2007년은 냉수대가 8월 9일 거제, 기장~감포연안에서 발생되기 시작하여 주문진, 울진, 호미곶까지 확산과 소멸을 반복한 후 8월 21일 완전 소멸되었으나, 2008년은 7월 중순부터 진도 및 거제 냉수대가 강하게 발달된 후 8월 8일에 소멸되었다(국립수산과학원 해양수산연구정보 2007, 2008). 또한, 2007년은 발생초기 및 소멸기에 태풍의 직·간접적인 영향을 받았으나, 2008년은 적조발생시기 전부터 소멸기까지 전혀 태풍의 영향이 없었다.

*C. polykrikoides*적조발생 초기부터 소멸시까지 적조가 지속되는 특

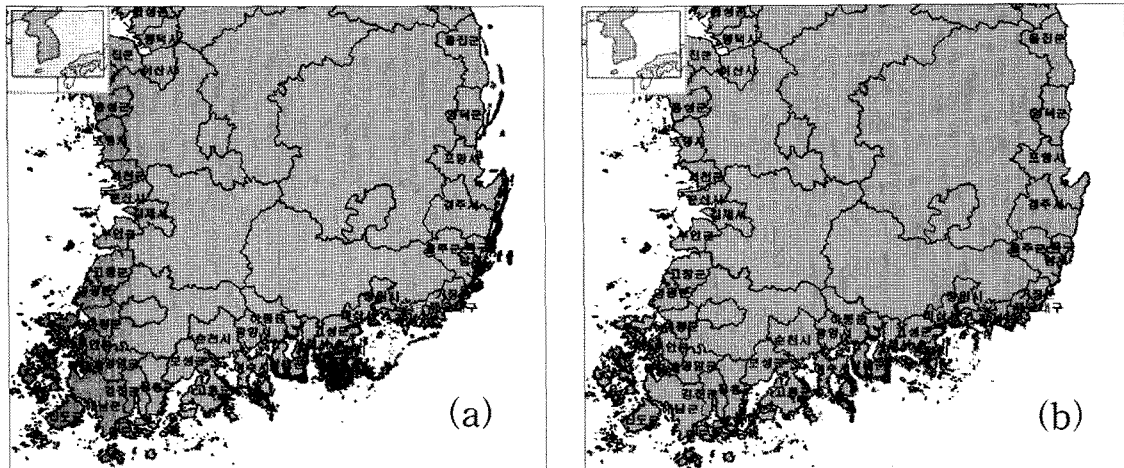


Fig. 2. The area of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in 2007 (a) and 2008 (b).

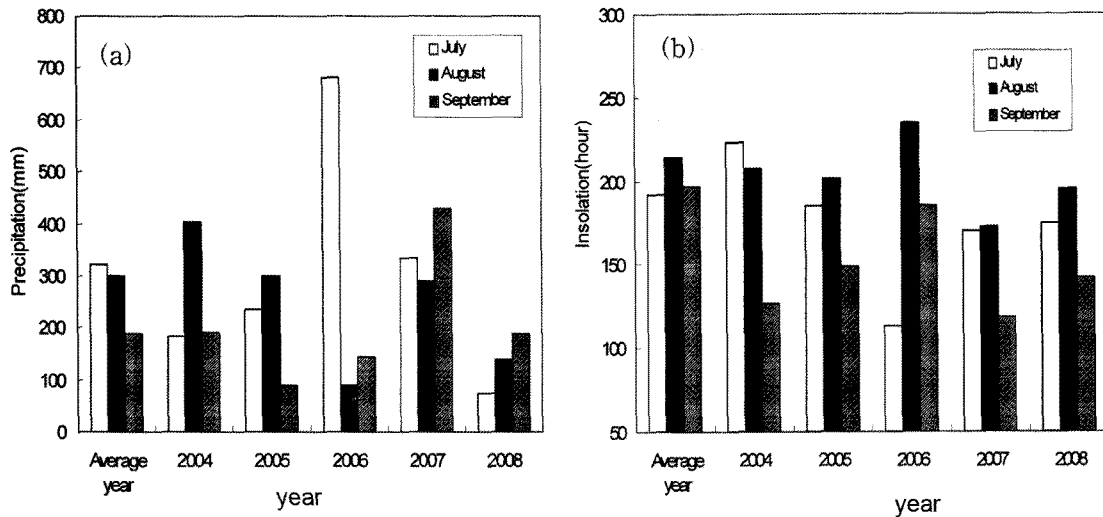


Fig. 3. Annual variation of precipitation(a) and insolation(b) in Namhae coast.

정을 보이는 남해해역의 강수량 및 일사량을 비교한 결과, 2007년은 평년비의 강수량을 보였으나, 2008년은 7, 8월에 평년비 2~4배 이하의 낮은 값을 보였다(Fig. 3). 특히, 7월 한달동안 73.9 mm (평년 322.0 mm)의 강수량을 보였고, 8월은 138.5 mm(평년 298.6 mm)로 2006년보다는 많으나, 그 외 연도에 비해서는 현저히 낮은 값을 보였다. 일조시간을 비교한 결과 2007, 2008년은 평년비(192.3~214.2 hrs) 모두 낮은 값을 보였고, 2008년은 적조발생 기간동안 월별 합계 141.9~195.4 hrs로 일조시간 월별 합계가 118.4~172.7 hrs인 2007년보다 길었다.

최근 5년간 적조지속일자 및 피해액을 비교하면, 2004, 2006년은 각각 30일, 23일로 평년(44일)보다 짧게 지속되었고, 피해액도 1.2억원, 0.7억원으로 평년(92억원)보다 현저히 낮았다. 2005년은 적조가 58일간 지속되었고, 10.6억원의 수산피해가 있었으며, 강수량의 월별분포는 평년과 비슷하였다. 그러나, 2004년의 경우, 7월 낮은 강수량 후 8월 집중강우, 2006년의 경우 7월의 긴 장마 후 8월 가뭄으로 식물플랑크톤의 종조성 등 예년과 다른 해양환경의 변화를 야기하여 적조생물의 밀도가 낮고, 지속일자가 현저

히 짧았다(국립수산과학원 2005a, 2005b, 2007; 임 등, 2009). 또한, 일조시간은 2004년 7, 8월에 평년보다 높았으나 생물의 밀도는 현저히 낮았다. 따라서, 일조시간보다는 강수량의 월별 급격한 변이는 적조의 변동에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다.

#### 해양환경요인의 비교

2007년은 표층수온은 적조발생 전 장마기간에는 17.5~22.3 °C를 유지하다가 장마이후 적조발생 직전 약 25.9 °C까지 상승하였다. 수평분포를 살펴보면 장마기간에는 내만이 외해에 비해 높았으나, 8월말에는 반대의 경향이었다(Fig. 4). 표층염분은 적조발생 전(6월 중순) 평균 33.79±0.45 psu 였으나, 7월초 장마로 인한 강우로 32.69±0.34 psu 로 낮아진 이후, 9월 초순까지 전 남해안에서 평균 약 31.13±0.83 psu로 점점 낮아지는 경향을 보였다. 이는 8월 말~9월 초 집중강우의 영향으로 생각되며, 특히, 국지적 강우로 강하구 정점부근에서는 저염의 특징을 보였다. 수온 수직분포 변동은 7월말 형성된 수온성층이 9월 초까지 대체로 수심 10~20 m 내외에서 강하게 유지되었다(Fig. 5).

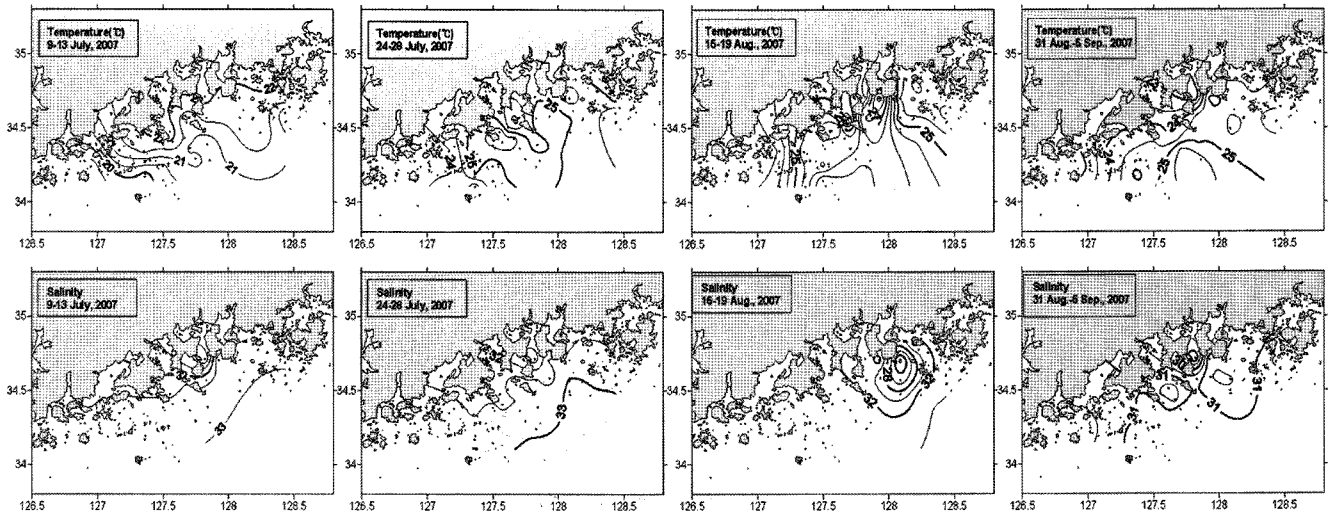


Fig. 4. Horizontal distributions of surface water temperature and salinity in the study area, 2007.

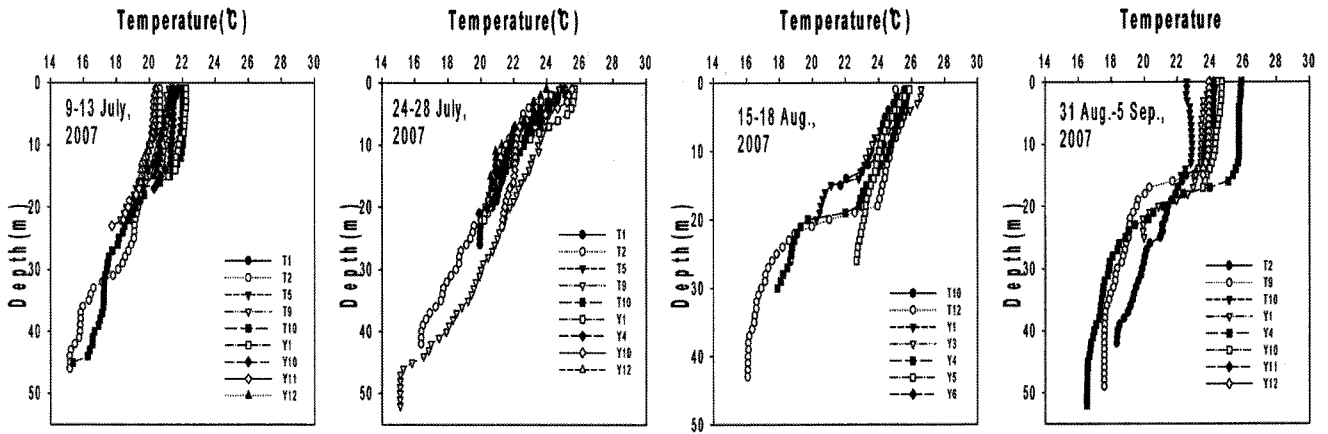


Fig. 5. Vertical profile of water temperature in the study area, 2007.

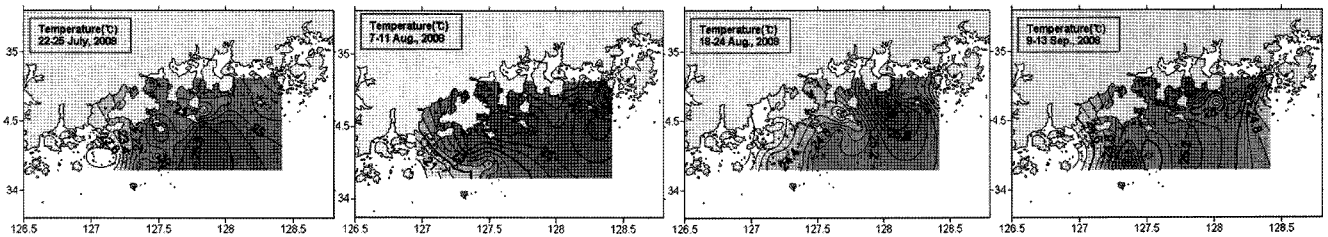


Fig. 6. Horizontal distributions of surface water temperature in the study area, 2008.

2008년도는 2007년도 비슷한 수온분포를 보였고, 적조생물이 저밀도로 출현한 7월 말 평균 수온이  $24.0 \pm 1.4$  °C였으며, 이후 소멸기에  $25.7 \pm 0.2$  °C까지 지속적으로 상승하였다(Fig. 6). 표층염분은 적조발생전(6월중순) 평균  $33.47 \pm 0.47$  psu 이었고, 이후 8월 초순  $33.00 \pm 0.18$  psu로 가장 높은 값을 보였고, 9월 초순  $31.96 \pm 0.22$  psu의 낮은 값을 보였다. 수온 수직분포에서 수온성층은 6월 하순부터 8월 중순까지 지속되었고, 9월 초순이후 약화되었다가 9월 하순 다시 10~20 m 수심에서 생성되었다(Fig. 7).

2007년 조사기간 중 질산염은 적조발생기간 내내  $1.07 \sim 6.25$   $\mu\text{M}$  이상의 높은 값을 보였고, 인산염도  $0.39 \sim 0.86$   $\mu\text{M}$  범위의 값을 보였으며, 조사기간별, 정점별 편차도 심하였다(Fig. 8). 특히, 적조

주발생기에는 질산염  $2.35 \sim 6.25$   $\mu\text{M}$ , 인산염  $0.39 \sim 0.69$   $\mu\text{M}$ 로 매우 높은 값을 보였으며, 정점별 변동도 매우 컸다. Chlorophyll-*a*의 농도도 조사기간 중 투명도가 가장 높았던 6월 중순  $8.3 \pm 4.7$  m일 때  $1.06 \pm 0.33$   $\mu\text{g/L}$ 로 가장 낮은 값을 보였고, 9월말 투명도가  $5.2 \pm 2.4$  m였을 때,  $4.20 \pm 1.82$   $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높은 값을 보였다.

2008년은 질산염  $0.39 \sim 1.96$   $\mu\text{M}$ , 인산염  $0.14 \sim 0.39$   $\mu\text{M}$ 의 농도로 2007년에 비하여 1/2이상 낮은 값을 보였다. 특히, 적조주발생기인 8월 중순에는 질산염  $0.40 \sim 1.11$   $\mu\text{M}$ , 인산염  $0.14 \sim 0.21$   $\mu\text{M}$ 로 2007년과 비교하여 3배 이상 현저히 낮은 값을 보였다(Fig. 8). 투명도가 높은 외해수가 7월 하순부터 연안에 유입되었고, 적조발생기간동안 지속적으로 연안에 접근하였다. 8월 상순 이후 남해,

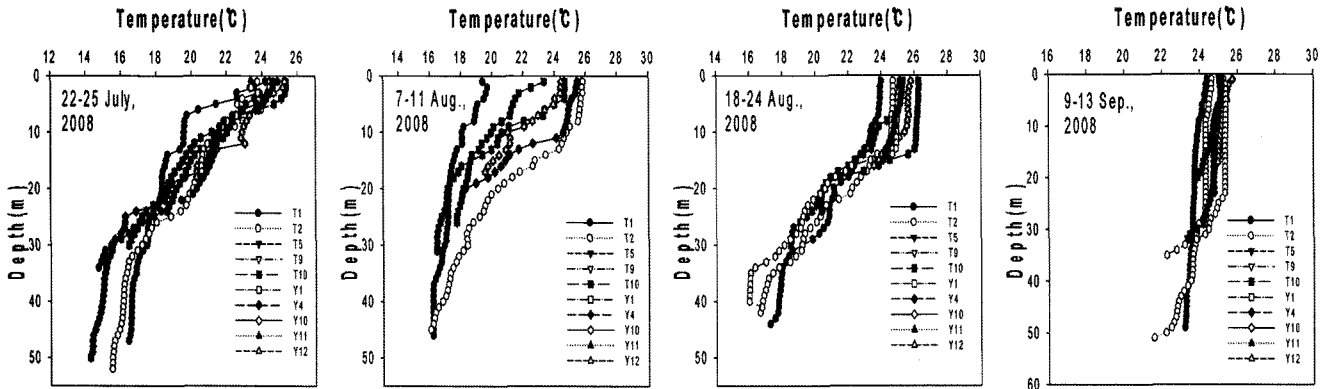


Fig. 7. Vertical profile of water temperature in the study area, 2008.

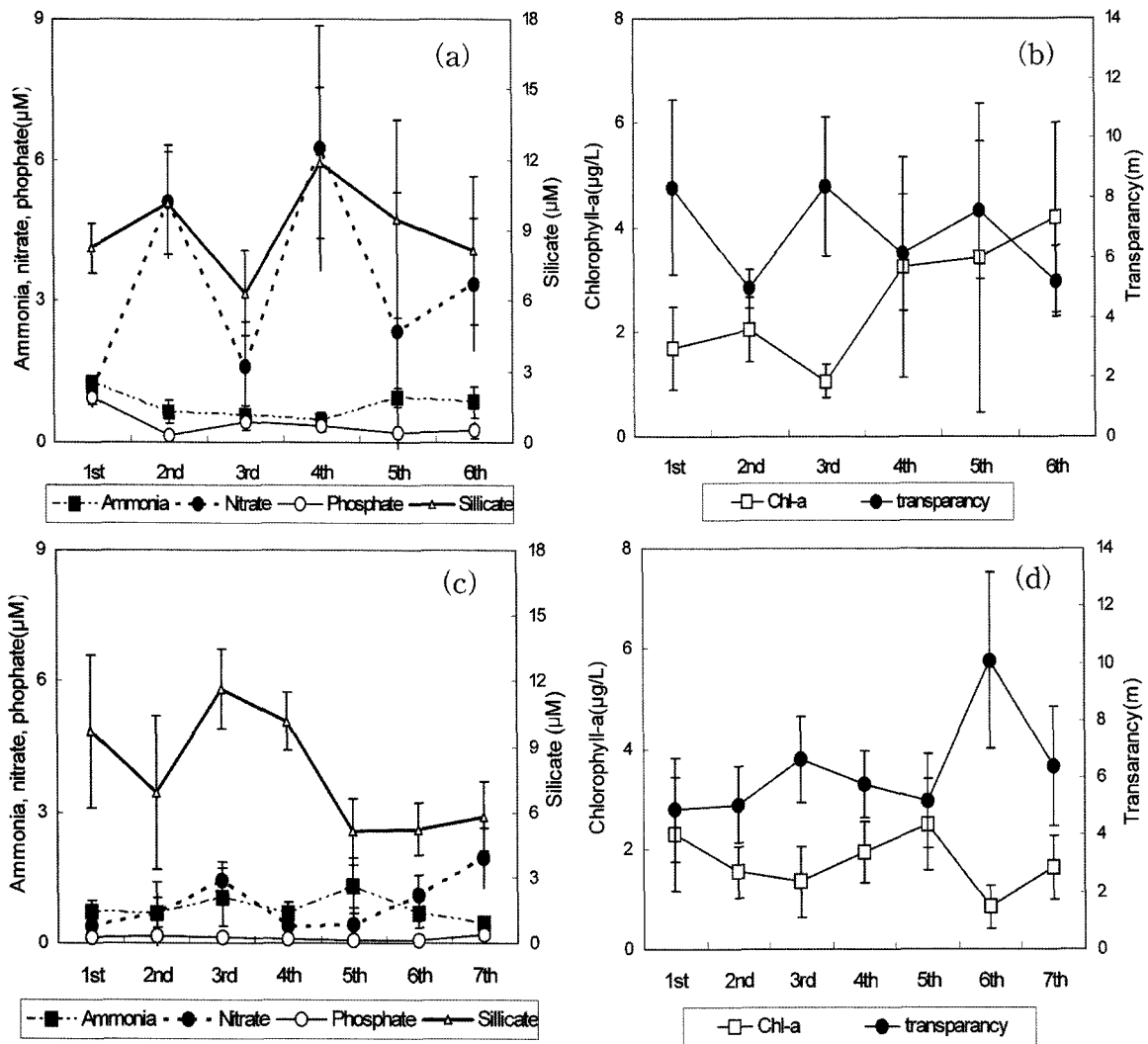


Fig. 8. Temporal variation of mean of nutrients, chlorophyll-a, and transparency in the study area in 2007(a, b), and 2008(c, d).

통영 외해역의 투명도가 10~12 m였고, 9월 중순경 여수, 남해, 통영 등 연안쪽에 12~16 m의 높은 값을 보였다(Fig. 9). 또한, chlorophyll-a 농도와 투명도를 비교한 결과, 2007년과는 달리 상관분석결과 유의성 있는 음의 상관을 보였으며, 9월 초순 투명도가 10.1±6.2 m로 가장 높았고, 정점별 편차가 컸으며, chlorophyll-

a 농도는 1.09±0.77 µg/L로 가장 낮은 것을 통해 특히, 이 시기에 대마난류인 외해수가 연안까지 강하게 영향을 미쳤음을 알 수 있었다(Fig. 8).

4, 5, 6차 환경요인과의 상관분석결과, 2007년은 수온을 제외하면, 투명도와 수온, 용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)이 각각

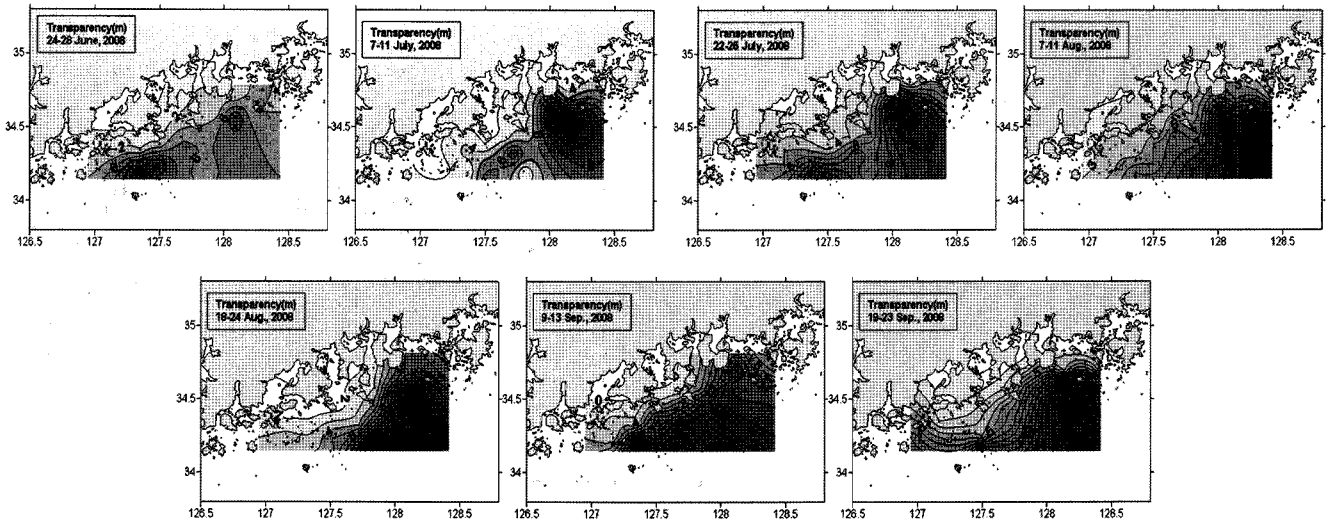


Fig. 9. Horizontal distributions of transparency in the study area, 2008.

유의성 있는 음의 상관관계를 보였는데 이는 전 연안에 풍부한 영양염으로 인하여, 외해수가 유입된 해역의 영양염이 상대적으로 낮기 때문인 것으로 생각된다(Table 2). 2008년은 염분, 용존무기질소(DIN)과 용존무기인(DIP)이 유의성 있는 음의 상관관계를 보였고, 투명도가 Chlorophyll-*a*와 유의성 있는 음의 상관관계를 보였는데 이는 위에서 언급한 외해수의 유입 및 8월 중순이후 강우로 인한 영양염 공급을 설명할 수 있다(Table 3).

**C. polykrikoides** 유영세포 비교

*C. polykrikoides* 유영세포는 2007년 적조발생전인 6월 말 최대 8.1 cells/mL, 7월초, 중순 각각 5.7, 13.0 cells/mL로 나로도 남방과 인근해역에서 높은 개체수를 보였다가, 적조가 발생됨에 따라 나로도주변해역을 중심으로 밀도가 증가되었고, 여수 가막만 부근

해역에서 적조가 발생되어 점차 주변해역으로 확산되었다.

그러나, 8월 초순 남해안 연안수역에서 발달한 적조는 8월 중순에 발생 범위와 밀도가 급격히 감소하고, 점차 소강국면으로 진입하는 경향을 보였다. 8월 중순이후 남풍계열의 바람이 북동풍으로 바뀌면서 남해안 외측수역에 산발적으로 분포하던 연안역으로 지속적으로 유입·집적되었고(국립수산과학원, 2008; 임 등, 2008), 8월 중·하순동안 적조생물 성장 호적조건이 지속됨에 따라 적조생물의 밀도가 급격히 증가되었고, 경북 울진까지 확대되었다(Fig. 10).

그러나, 8월 말~9월 초의 지속적인 강우로 인하여 연안역의 영양염공급 등으로 규조류가 번식되었고, *C. polykrikoides*와의 중간경쟁에서 규조류로 종천이됨에 따라 *C. polykrikoides* 적조가 소강상태를 보였고, 태풍의 직·간접 영향으로 소규모로 잔존하고 있던 적조생물은 편모 소실, 활력저하 등의 영향을 받아 대부분 소멸된

Table 2. Correlation matrix of environmental factors in 2007

	Salinity	DIN(μM)	DIP(μM)	Transparency (m)	Cell Number (cells/mL)	chlorophyll- <i>a</i> (μg/L)
Water temperature(°C)	-0.265	-0.370(*)	-0.380(*)	0.377(*)	-0.155	-0.103
Salinity	1	-.334	.126	0.172	0.104	-0.302
DIN(μM)	-	1	.248	-.418(*)	-.084	0.124
DIP(μM)	-	-	1	-.475(**)	-.253	0.022
Transparency(m)	-	-	-	1	-.110	-0.271
<i>C. polykrikoides</i> cell number (cells/mL)	-	-	-	-	1	0.329

(\*) significance level<0.05, (\*\*)significance level<0.01

Table 3. Correlation matrix of environmental factors in 2008

	Salinity	DIN(μM)	DIP(μM)	Transparency (m)	Cell Number (cells/mL)	chlorophyll- <i>a</i> (μg/L)
Water temperature(°C)	-0.731(**)	0.330	0.213	0.183	-0.297	-0.120
Salinity	1	-0.514(**)	-0.529(**)	-0.274	0.206	0.221
DIN(μM)	-	1	0.774(**)	0.066	-0.329	-0.167
DIP(μM)	-	-	1	0.089	-0.290	-0.186
Transparency(m)	-	-	-	1	-0.035	-0.842(**)
<i>C. polykrikoides</i> cell number (cells/mL)	-	-	-	-	1	0.110

(\*) significance level<0.05, (\*\*)significance level<0.01

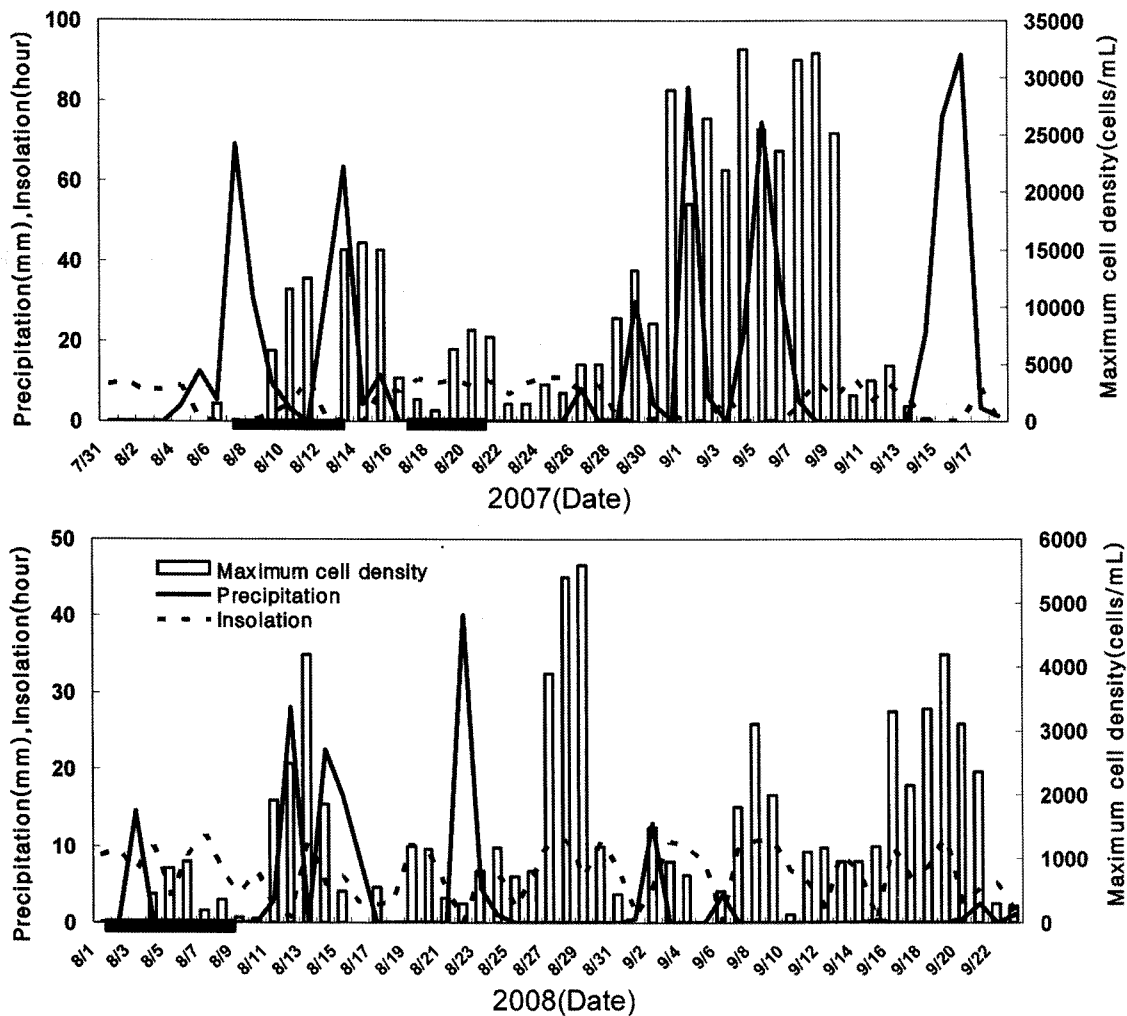


Fig. 10. Seasonal variation of precipitation, insolation and maximum *Cochlodinium* cell density in Namhae coast(Black bar is appearance period of cold water).

것으로 판단되었다.

2008년 *C. polykrikoides* 유영세포는 6월 하순 사랑도 하단에서 0.2 cells/mL, 7월 초 남해도하단, 나로도, 초도 주변해역에서도 0.4 cells/mL로 출현하였고, 이는 전년 동시기에 비하여 10배정도 적은 농도였다. 7월 하순조사에서 출현해역은 비슷하나 밀도가 증가되었으며, 7월 30일 나로도 주변해역에서 최초로 적조가 발생하였다.

이후, 통영, 완도해역으로 8월 12~13일 660~900 cell/mL의 범위로 확산되었고, 8월 20일 울산 울주군까지 확산되어 적조가 발생되었다. 이시기까지의 적조발생밀도는 예년에 비하여 저밀도로 지속되었고(최고 5,600 cell/mL), 8월말~9월초 전연안에서 저밀도 소강상태를 보였다(Fig. 10). 그러나, 9월 중순 이후 대부분의 연안역에서 수온성층의 재생성 및 늦더위로 인한 일사량 증가로 재발생되어 집적되어(최고밀도 7,300 cells/mL) 다소 고밀도로 적조가 발생되었다가, 9월 말 수온이 점차 하강함에 따라 적조가 소멸하였다(국립수산과학원, 2009).

**동물플랑크톤 분포 비교**

적조주발생기의 동물플랑크톤 분포를 조사한 결과, 2007년은

4~6차조사에서 갑각류(Crustacea)가 가장 우점하였고, 다음으로 모악류(Chaetognatha)그룹이었다. 8월 중순에는 갑각류 중 요각류(Copepoda)가 조사정점에서 높은 밀도 155~535 ind./m<sup>2</sup>로 출현하였으나, 이후 조사에서는 1~43 ind./m<sup>2</sup>의 농도로 출현하였다(Fig. 11). 그 외 식물플랑크톤을 다량 포식하는 것으로 알려진 미색동물(Urochordata)그룹의 바다술통류(Salpa)와 미충류(Appendicularia) 등이 전조사정점에서 1~32 ind./m<sup>2</sup>로 출현하였고, 모악류(Chaetognata)는 3~199 ind./m<sup>2</sup>의 범위의 농도로 출현하였다. 바다술통류(Salpa)와 미충류(Appendicularia)등이 가장 많이 출현한 것은 9월말로 전체 동물플랑크톤의 12%를 점하였다.

2008년 5, 6, 7차 조사에서 동물플랑크톤 출현종을 분석한 결과, 미색동물(Urochordata)이 가장 우점하였으며, 다음으로 갑각류(Crustacea)가 우점한 그룹이었다. 이는 2007년과는 전혀 다른 분포특징을 보인 것으로 특히, 미색동물에는 바다술통류(Salpa)와 미충류(Appendicularia)가 주종을 이루었다(Fig. 11). 이들 종은 식물플랑크톤을 여과하여 섭식하며, 섭이량이 매우 높은 것으로 알려져 있는 종이다(Katechakis et al., 2004).

9월초에는 전체 동물플랑크톤의 양도 2007년에 비해 10배이상 많은 출현량을 보였고, 사랑도 인접 정점인 T5에서 동물플랑크톤

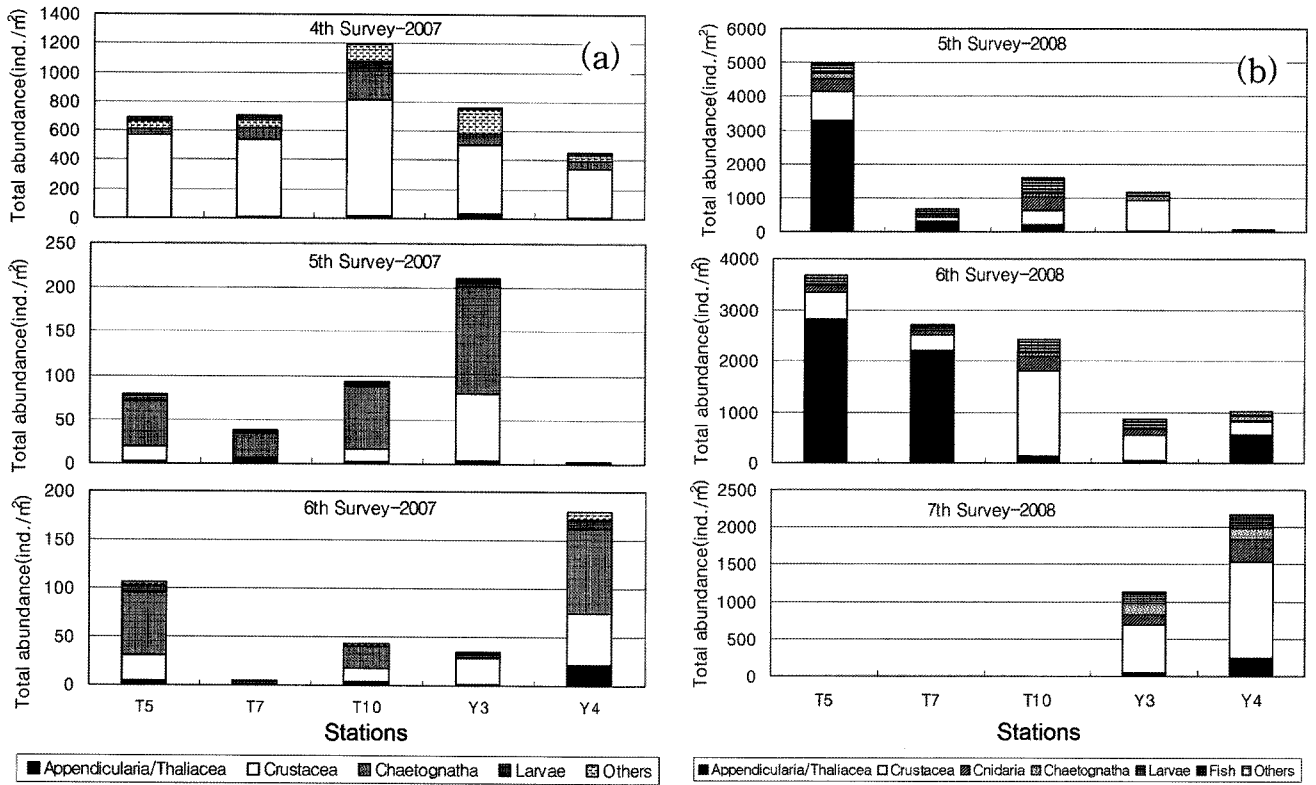


Fig. 11. Zooplankton abundance in the study area in 2007 and 2008.

출현량이 가장 높았으며, 특히 미생동물 출현량이 3,000 ind./m<sup>3</sup>로 전체 동물플랑크톤 중 약 80%를 차지하였다. 이는 2007년에 비해 10배정도 많은 출현량이다. 9월 중순에는 사랑도 및 욱지도 주변 정점인 T5와 T7에서도 미생동물의 출현량이 매우 높았으며 전체 동물플랑크톤 중 90%이상을 차지하였다. 2007년 동 시기에 1~15%를 차지한 것과는 상당한 차이를 보인 결과이다. 그러나 8월 하순에는 미생동물 뿐만 아니라 다른 동물플랑크톤도 통영연안 정점에서는 전혀 출현하지 않았다. 미생동물로는 바다술통류가 95%이상을 차지하였으며 이를 고려할 때, 바다술통류가 본 해역의 적조생물 및 식물플랑크톤을 다량 섭입함에 따라 다른 동물플랑크톤은 상대적으로 먹이 부족 현상에 노출되었기 때문이라 판단된다(Crocker *et al.*, 1991; 강 등, 2000). 또한, 요각류 중 대마난류 지표종인 *Cosmocalanus darwini*, *Undimula vulgaris*, *Calocalanus pavo*, *Canthocalanus pauper* 등이 9월 초, 중순에 통영연안의 정점에서 출현하여, 투명도가 깊어진 것이 외해수(대마난류)의 유입과 관련이 있다는 것을 뒷받침하는 결과이다.

**소규모와 대규모 적조의 발생특성 규명**

저밀도의 *C. polykrikoides* 유영세포가 적조로 발달되기 위해서는 외해수의 유입과 연안수와의 전선역에 집적이 필요하며, 이는 외해측에서 주로 이루어지며 영양염의 농도는 거의 영향을 받지 않는다(임, 2004). 그러나, 이후 대규모로 성장하기 위해서는 충분한 영양염의 공급이 필요하다. 이는 적조의 초기발생은 영양염 농도와는 큰 상관이 없지만 고밀도의 증식은 영양염의 공급과 큰 관련성을 가진다는 여러 연구결과에서 밝히고 있다(강 등, 2003; 이

등, 2007). 말레이시아에서도 2005년부터 이중에 의한 적조가 발생하고 있는데, 역시 고밀도 발생해역의 영양염은 동일하게 높은 농도를 보이고 있다(Anton *et al.*, 2008). 그러나, 일부연구에서는 양자강 희석수 등의 영향으로 외해측에 용존무기질소(DIN)의 양이 보다 높은 것으로 보고하고 있으나(양 등, 2000), 급변 연구결과에서는 2007년 뿐만아니라 강수량이 적었던 2008년에도 외해측보다는 연안측(통영, 여수내만)의 용존무기질소(DIN)의 농도가 높았던 것을 통해, 2007, 2008년의 경우, 본 조사해역에서는 고영양염의 양자강 희석수가 그다지 영향을 미치지 못한 것으로 추정할 수 있다.

소규모 적조(2008년)가 발생되었을 경우는 적조발생초기부터 주 발생기에 이르기까지 강수량이 평년대비 4배 이하로 매우 적었고, 냉수대도 7월 중순부터 발달하여 적조발생 초기인 8월 8일경 소멸되어 지속적인 영양염 공급이 이루어지지 않았다. 그러나, 반대로 대규모 적조(2007년)인 경우는 적조발생초기의 장마 및 중기이후의 집중강우로 인해 충분한 영양염 공급이 이루어졌고, 적조 밀도가 중규모 이상으로 증가된 상태에서 냉수대가 지속적으로 발달과 소멸을 반복함에 따라 영양염 공급을 받을 수 있었다(국립수산과학원, 2008). 이는, Han *et al.*(2008)이 대규모 고밀도 적조를 보인 해에는 남해의 강한 냉수가 충분한 영양염을 공급하여 적조의 확장에 중요한 역할을 한다는 결과와 일치한다.

2007년의 경우, 적조주발생기에 질산염 2.35~6.25 μM, 인산염 0.39~0.69 μM였으나, 2008년은 질산염 0.39~1.96 μM, 인산염 0.14~0.21 μM로 *C. polykrikoides*의 반포화상수(Ks)값인 2.10, 0.57 μM보다 낮은 농도를 보여, 적조밀도의 급격한 증가를 위한



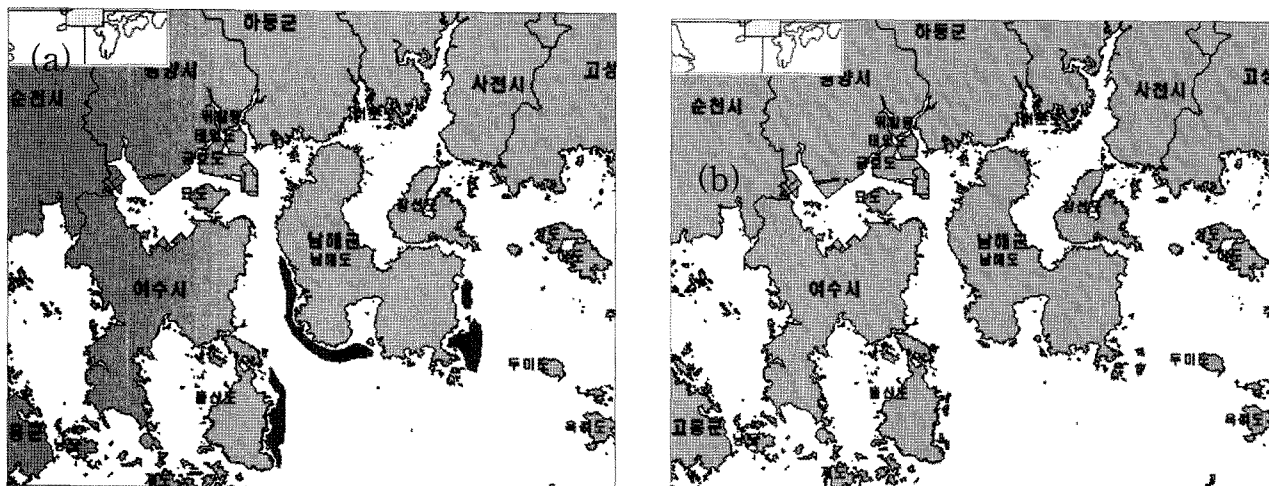


Fig. 12. The spatial map of HAB outbreaks(red area) in the South Sea of Korea ((a) 2008. 8. 29, (b)2008. 8. 30).

영양염 공급이 이루어지지 않았음을 알 수 있었다(김 등, 2001).

2007년은 적조발생 후 강우, 냉수대의 충분한 영양염으로 적조생물이 안정적으로 성장할 수 있었고, 2008년은 연안역에서 일부 고밀도로 성장한 적조가 8월부터 9월 중순까지 태풍 등의 급격한 해양환경 변동요인이 없어 강한 수온성층이 지속적으로 유지되었고, 낮은 강수량으로 인하여 육상 및 저층으로의 영양염 공급이 부족하여 2007년에 비해 높은 일사량에도 불구하고 적조생물이 지속적으로 성장할 수 없었던 것으로 생각된다. 또한, *C. polykrikoides*을 포함한 외편모조류들이 혼합영양염의 유기물, 박테리아 등을 섭취하는 혼합영양을 하는 것으로 알려져 있고, 광합성 외에 강우에 포함된 영양염외의 먹이원들의 섭취는 필수적인 것이다(Jeong *et al.*, 2004).

2007년은 적조발생전 수온성층이 소멸되었고, 적조발생 직후부터 수온성층이 다시 형성되기 시작하여 안정된 수괴를 형성한 반면, 2008년은 적조발생전부터 수온성층이 유지되어, 지속적인 저층의 영양염 공급이 이루어지지 않았다. 이는 적조발생과 수온약층의 소멸이 밀접한 관계이며, 표-저층수의 혼합이 적조대량증식에 필수적이라는 연구결과와 같이, 2008년 적조가 소규모로 형성되는데 영향을 미친 것으로 생각된다(이 등, 2001). 이와 문(2008)은 태풍이 영양염 공급 및 휴면포자의 발아촉진에 기여한다고 하였는데, 2007년은 2번의 태풍이 직-간접적인 영향을 미쳤으나, 2008년은 전혀 태풍의 영향을 받지 않은 것도 소규모 적조의 하나의 요인이 되었다.

또한, 2007년은 8월 중순이후 남풍계열의 바람이 북동풍으로 바뀌면서 남해안 외측수역에 산발적으로 분포하던 연안역으로 지속적으로 유입-집적되었으나, 2008년은 평균속력 이하 약한 바람으로 적조의 이동-확산에 전혀 영향을 미치지 못하였다(임 등, 2008; 임 등, 2009). 이는 Lee(2008)의 바람의 방향이 적조의 발생 및 확산에 미치는 연구에서도 그 중요성을 알 수 있다.

그리고, 소규모 적조인 2008년은 대규모 적조인 2007년에 비하여 적조발생기간 내내 투명도가 높은 빈영양의 외해수가 연안에 유입되었고, 이시기에 동물플랑크톤 대마난류 지표종이 출현하였으며, 낮은 chlorophyll-*a* 농도를 보였다. 또한, 식물플랑크톤 여과

섭식자이며 그 섭이률이 매우 높은 바다술통류가 2007년에 비해 현저히 높은 양으로 출현하므로써, 적조생물 및 주변 동-식물플랑크톤 출현 및 변동에 크게 영향을 미친 것으로 판단되며, 바다술통류의 이상다량 출현현상은 대마난류와 밀접한 상관성이 있는 것으로 알려져 있다(강 등, 2000). 이로 인하여 특별한 환경요인의 변화없이 남해안에서 하루만에 적조생물 범위 및 밀도의 급격한 감소한 현상으로 밀접한 영향을 미친 것으로 생각된다(Fig. 12). 특히, 통영에서 밀도의 증감을 보였던 시기에 포식 동물플랑크톤의 농도와 여수해역의 농도와 비교하면 일치하는 것을 알 수 있었다(Fig. 8). 즉, 소규모 적조에서는 대규모 적조에 비해 대량의 포식동물플랑크톤의 유입으로 지속적인 포식압에 의해 적조생물 밀도에 많은 영향을 받은 것으로 추정할 수 있다(정 등, 1999; 강 등, 2000).

따라서, 2007년 대규모 적조발생원인은 강우 및 저층으로부터 풍부한 영양염 공급, 적조가 성장할 수 있는 안정된 수괴, 알맞은 바람 방향에 의한 외해측에서 증가된 적조생물의 연안측으로 운반, 적조발달기의 수온성층 약화 및 외해수의 유입, 포식 동물플랑크톤 부재였고, 2008년 소규모 적조발생원인은 가뭄으로 인한 영양염부족, 저층 영양염 공급을 차단하는 안정된 수괴, 적조발생 초기부터 외해수의 강한 연안 유입, 강한 동물플랑크톤의 포식압 등의 복합적인 원인으로 파악된다.

결론적으로, 적조발생규모는 적조발생기의 충분한 영양염 공급(강우, 냉수대 등), 수괴의 안정도(바람, 태풍), 적조발달기의 동물플랑크톤 포식압이 주요한 인자로 작용함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 연구는 국립수산과학원사업비(RP-2009-ME-047)로 운영되었으며, 현장조사에 협조해주신 탐구 7호, 17호 승무원들께 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

강양순, 권정노, 손재경, 정창수, 홍석진, 공재열, 2003. 2002년

- 통영연안의 적조발생전후의 식물플랑크톤 군집구조의 특성. 한국수산학회지, **36**: 515-521.
- 강영실, 조영조, 고우진, 김성수, 전경안, 오현주, 2000. 한국 남해안에서 살파류(Tunicata: Thaliaceae)의 대번식과 해양생태계에 미치는 영향. 한국해양학회지 바다, **5**: 47-58.
- 국립수산과학원, 2005a. 2004년도 한국연안의 적조발생상황집, 154 pp.
- 국립수산과학원, 2005b. 2005년도 한국연안의 적조발생상황집, 95 pp.
- 국립수산과학원, 2007. 2006년도 한국연안의 적조발생상황집, 97 pp.
- 국립수산과학원, 2008. 2007년도 한국연안의 적조발생상황집, 127 pp.
- 국립수산과학원, 2009. 2008년도 한국연안의 적조발생상황집, 154 pp.
- 국립수산과학원 해양수산연구정보. <http://portal.nfrdi.re.kr>
- 김형철, 김동명, 이대인, 박청길, 김학균, 2001. 조류성장잠재력 시험에 의한 사랑동 연안 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 제한영양염. 한국수산학회지, **34**: 457-464.
- 김형철, 이창규, 이삼근, 김학균, 박청길, 2001. *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 미치는 물리·화학적인 요인과 영양염 이용. 한국수산학회지, **34**: 445-456.
- 양재삼, 최현용, 저해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구: I. 물리·화학적인 특성. 한국해양학회지, **5**: 16-26
- 이문옥, 문진한, 2008. *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생해역인 나로도 주변해역의 해양환경. 한국해양환경공학회지, **11**: 113-123.
- 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤, 2001. *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책: 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경특성. 한국해양학회지 바다, **6**: 259-264
- 이영식, 임월에, 이삼근, 2007. *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생하는 해역에서 호우에 의한 담수유입 범위와 질소, 인의 농도변화. 한국환경과학회지, **16**: 1119-1125.
- 임월에, 2004. 한국 남해안의 적조발생과정에 대한 연구. 부산대학교 대학원, 박사학위 논문, 99 pp.
- 임월에, 이영식, 박종규, 2009. 2008년 남해동부해역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생특성. 한국해양학회지 바다, **14**: 155-162.
- 임월에, 이영식, 이삼근, 2008. 2007년 남해동부해역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸에 미치는 환경특성. 한국해양학회지 바다, **13**: 323-332.
- 정창수, 최우정, 김학균, 정영균, 김정배, 임월에, 1999. 1998년도 남해도 인근수역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 동물플랑크톤의 분포특성. 수진연구보고, **57**: 153-161.
- Anton, A., P.L. Teoh, S.R. Mohd-Shaleh and N. Mohammad-Noor, 2008. First occurrence of *Cochlodinium* blooms in Sabah, Malaysia. Harmful algae, **7**: 331-336.
- Azanza, R.V., L.T. David, R.T. Borja, I.U. Baula and Y. Fukuyo, 2008. An extensive *Cochlodinium* bloom along the western coast of Palawan, Philippines. Harmful Algae, **7**: 324-330.
- Crocker, K.M., A.L. Alldredge and D.K. Steinberg, 1991. Feeding rates of the doliolid, *Dolioletta gegenbaui*, on diatoms and bacteria. J. of Plankton Research, **13**: 77-82.
- Curtiss, C.C., G.W. Langlois, L.B. Busse, F. Mazzillo and M.W. Silver, 2008. The emergence of *Cochlodinium* along the California Coast (USA). Harmful Algae, **7**: 337-346.
- Doucette, G.J. and C.K. Lee, 2008. Preface to the Harmful Algae Special Issue: Recent progress on the research and management of *Cochlodinium* blooms. Harmful Algae, **7**: 259-260.
- Han, I.S., L.H. Jang, Y.S. Suh and K.T. Seong, 2008. Relationship between temperature distributions and outbreaks of harmful algal blooms in Korean Waters. J. Fish. Sci. Technol, **11**: 50-60.
- Jeong, H.J., Y.D. Yoo, J.S. Kim, T.H. Kim, J.H. Kim, N.S. Kang and W.H. Yih, 2004. Mixotrophy in the phototrophic harmful algae *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae): Prey species, the effects of prey concentration and grazing impact. J. Eukaryot. Microbiol., **51**:563-569.
- 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. Oceano., **37**: 212-223.
- Katechakis, A., H. Stibor, U. Sommer and T. Hansen, 2004. Feeding selectivities and food niche separation of *Acartia clausi*, *Penilia avrostris* (Crustacea) and *Dolioletta denticulatum* (Thalysseae) in Blanes Bay (Catalan Sea, NW Mediterranean). J. of Plankton Research, **26**: 589-603.
- Kim, C.S., S.G. Lee, C.K. Lee, H.G. Kim and J. Jung, 1999a. Reactive oxygen species as causative agents in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. J. Plankton Res, **21**: 2105-2115.
- Kim, C.S., S.G. Lee and H.G. Kim, 2000. Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, **254**: 131-141.
- Kim, D.K., T. Oda, T. Muramatsu, D.I. Kim, Y. Matsuyama and T. Honjo, 2002. Possible factors responsible for the toxicity of *Cochlodinium polykrikoides*, a red tide phytoplankton. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, **132**: 415-423.
- Kim, H.G., W.J. Choi, Y.G. Jung, C.S. Jung, J.S. Park, K.H. and C.I. Baek, 1999b. Initiation of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms and its Environmental Characteristics Around the Narodo Island in the Western part of South Sea of Korea, Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst. Korea, **57**: 51-159.
- Lee, D.K., 2008. *Cochlodinium polykrikoides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea. Harmful Algae, **7**: 318-323.
- Lee, M.O. and J.K. Kim, 2008. Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea. Marine Environmental Research, **65**: 128-147.
- Lee, Y.S. and S.Y. Lee, 2006. Factors affecting outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in coastal areas of Korea. Marine Pollution Bulletin, **52**: 626-634.
- Park, T.G. and Y.T. Park, 2009. Detection of *Cochlodinium polykrikoides* and *Gymnodinium impudicum* (Dinophyceae) in sediment samples from Korea using real-time PCR, Harmful Algae, In Press, Corrected Proof, Available online 11. 2009.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. A practical handbook of seawater analysis. Bull. Fish. Res. Bd. Canada, 310 pp.
- Tang, Y.Z. and C.J. Gobler, 2009. Characterization of the toxicity of *Cochlodinium polykrikoides* isolates from Northeast US estuaries to finfish and shellfish. Harmful Algae, **8**: 454-462.

Tomas, C.R., 1997. Identifying Marine Phytoplankton. Academic press, 853 pp.

Tomas, C.R. and T.J. Smayda, 2008. Red tide blooms *Cochlodinium polykrikoides* of in a coastal cave. Harmful Algae, 7: 308-317.

Yamaji, I., 1984. Illustration of the Marine Plankton of Japan. 3rd ed. Hoikushm Publishing Co., 158 pp.

Whyte, J.N.C., N. Haigh, N.G. Ginther and L.J. Keddy, 2001. First

record of blooms of *Cochlodinium* sp. (Gymnodiniales, Dinophyceae) causing mortality to aquacultured salmon on the west coast of Canada. Phycologia, 40: 298-304.

---

2009년 9월 14일 원고접수

2009년 11월 24일 수정본 채택

담당편집위원: 이준백