한국환경과학회지 제19권(제12호), 1385~1395, 2010 DOI: 10.5322/JES.2010.19.12.1385
Journal of the Environmental Sciences

동해안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생에 미치는 해황의 특성

심정민* · 황재동[1)] · 정창수[1)] · 이용화[1)] · 전경암[1)] · 권기영

국립수산과학원 동해수산연구소, [1)]국립수산과학원

(2010년 9월 13일 접수; 2010년 11월 15일 수정; 2010년 11월 29일 채택)

The Influence of Oceanic Conditions on the Occurrence of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms in the East Sea

Jeong-Min Shim*, Jae-Dong Hwang[1)], Chang-Su Jeong[1)], Yong-Hwa Lee[1)], Kyeong-Am Jeon[1)], Kee-Young Kwon

East Sea Fisheries Research and Development Institute, NFRDI, Gangneung 210-860, Korea
[1)]National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-902, Korea

(Manuscript received 13 September, 2010; revised 15 November, 2010; accepted 29 November, 2010)

Abstract

Harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* blooms have been frequently occurred in coastal areas of the East Sea since 1995. We compared the oceanic conditions in years 1995, 2001 and 2003 when the *C. polykrikoides* bloom was strong, and in years 1998 and 2004 when the *C. polykrikoides* bloom was not appeared. We studied temporal and spatial variation of upwelling and geostrophic currents on the western channel of Korean Strait, an entrance of the East Sea. The period and occurrence area of *C. polykrikoides* bloom was depended on variation of upwelling in summer. In the distributions of geostrophic current, southward current was dominant near the coast in August, 1998 and 2000. Whereas northward current was dominant near and off the coast in August, 1995 and 2003 which the *C. polykrikoides* bloom was strong. When compared dominant phytoplankton of the coastal areas in each year, Kuroshio indicator species *Proboscia alata* and *Chaetoceros affine* were dominant, respectively, in 2001 and 2003 at every stations. However, the dominant species was variable at each coastal area in 1998 and 2000. In 2003, the abundance of *Sagitta elegans* which is known as the cold water indicator was low, but the abundance of *S. enflata,* warm water indicator, was very high in Gangneung compared to Sokcho. It seemed that the distribution of *S. elegans* is restricted by strong warm water current. In conclusion, it was estimated that the distribution of *C. polykrikoides* bloom in the coastal area of the East Sea was closely related with the strength of East Korea Warm Current and upwelling.

Key Words : *Cochlodinium polykrikoides*, Upwelling, Geostrophic current, Phytoplankton, *Sagitta,* East Korea Warm Current

1. 서 론

우리나라 연안에서 매년 하절기에 발생하고 있는 유해성 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 1995년 이후 해마다 발생하여 남해안을 중심으로 동해안과 서해안으로 확산되고 있으며 우리나라뿐만 아니라 일

*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

본, 말레이시아, 대만 연안에서도 대규모 적조를 일으키면서 이 종에 대한 생리, 생태 및 폐사 기작과 관련하여 다수의 연구가 이루어지고 있다(김 등 2001a; 김 등 2001b; 이 등 2001; 심 등 2009; Kim 등, 1999a; Kim 등, 2000; Kim 등, 2002; Kim 등, 2007).

우리나라 연안에서 발생하고 있는 *C. polykrikoides* 적조의 발생 기원에 대해서는 쿠로시오 난류에 의한 유입 가능성과 휴면포자 형성 및 발아에 의한 남해연안 해역 자체 발생 가능성 등이 제기되고 있다(임과 이, 2004; Park 등, 2009). 특히 남해안에서의 *C. polykrikoides* 적조의 발생 기작과 관련하여 육상기원 요소, 외양의 물리화학적 특성, 연안의 해황, 태풍, 강우 등 다양한 요인이 작용한다고 알려져 있다(이 등, 2001; 이와 최, 2009임 등, 2002; 임 등, 2008). 적조발생의 범위나 지속 시기는 바람 등의 기상학적인 요인과 해양의 물리, 생물 및 화학적인 요인 등이 복합적으로 작용하는 것으로 보고되었으며(서 등 2000; 서 등 2003), 통계기법을 이용하여 적조발생에 영향을 미치는 인자 분석에 대한 연구 보고도 있다(이와 문, 2008). 적조발생 규모의 예측과 관련해서 대규모의 적조는 저온의 표층수온, 약한 수온성층, 고농도의 질산질소 등의 물리적인 요인이 대규모 적조에 영향을 미친다고 알려져 있으며(Han 등, 2008), 연도별 적조 발생 규모에 관한 비교 연구도 있다(강 등, 2009).

동해 연안 *C. polykrikoides* 적조의 최초 발생은 1995년을 기점으로 하여 이후 적조 발생빈도가 높아짐과 동시에 발생기간이 장기화되는 경향을 보였다(국립수산과학원, 1995; 국립수산과학원, 2004). 동해안의 적조발생은 적조의 발생시기로 볼 때 매년 남해안에서 발생 후 동해 남부 연안을 따라 북으로 확산되고 있다(김 등, 2001). 전반적으로 *C. polykrikoides* 적조의 발생 환경과 관련한 연구보고는 남해안에 국한되어 있으며 동해안의 *C. polykrikoides* 적조 발생과 관련된 연구 보고는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 남해안에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조가 동해안으로 유입되는 시기의 수온 분포, 해류 및 해양생물 변동 특성을 살펴봄으로써 동해안에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생 시 해황 특성을 조명해 보고, 향후 동해안 적조 발생을 예측하는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

동해안으로 *C. polykrikoides* 적조가 동해 전역에 광범위하게 발생하였던 해(1995년, 2001년, 2003년)와 발생하지 않았던 해(1998년, 2000년)에서 *C. polykrikoides* 적조 발생 전·후의 해황 특성을 분석하였다. 동해 남부 연안의 적조발생 전·후의 수온 자료는 NOAA 위성 적외선 영상자료(국립수산과학원)를 사용하였으며, 적조의 시공간적 확산과 연안 수온 변동 간의 관계를 비교하기 위해 국립수산과학원이 구룡포 연안에 대해 관측한 일일 연안수온자료(1965～2003년)를 이용하였다.

C. polykrikoides 적조의 동해 유입과 관련하여, 우리나라 남해안에서 대한해협을 거쳐 동해로 유입되는 대마난류수와 우리나라 동해안을 따라 북상하는 대마난류수의 지류인 동한난류의 변동을 분석하였다. 대마난류수와 동한난류수의 변동은 지형류의 계산을 통해 분석하였는데, 지형류의 계산을 위하여 국립수산과학원 동해수산연구소에서 수행하고 있는 동해 해역 정선해양조사 관측라인(Fig. 1) 중 대한해협 서수도 인근 관측 라인인 208선(울기)과 경북 울진군 죽변 항로표지관리소를 기점으로 동쪽으로 울릉도 남부해역까지 관측하는 104선(죽변)에 대해 표준 수층별 수온과 염분 값을 이용하여 식(1)과 같은 방정식을 사용하여 구하였다(Pond와 Pickard, 1983).

$$fv = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}, \quad fu = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} \tag{1}$$

여기서 f는 편향력이며, u와 v는 동쪽 및 북쪽방향의 속도를, ρ는 밀도를 ∂P는 압력의 차이를, 그리고 ∂x와 ∂y는 각각 정점간 동쪽 및 북쪽거리 성분을 나타낸다. 지형류 계산에 있어서 무류면은 연안의 경우 해저면으로 설정하였으며, 연근해역의 경우에는 수심에 따른 수온과 염분의 변화가 거의 없는 수심 500 m로 설정하였다.

C. polykrikoides 적조 발생시점인 9월 동해 연안의 해황을 간접적으로 보여주는 식물플랑크톤 우점종 자료는 국립수산과학원에서 수행하고 있는 "동해 해양환경 연구" 과제의 적조조사 정점(Fig. 1)의 분석 결과를 이용하였다. 식물플랑크톤 시료는 표층 해수 1 L를

채취후 Lugol's액을 1-2% 첨가하여 고정시킨 후 실험실로 옮겨 최소한 48시간 동안 편평한 곳에 정치하여 침전시켰으며, 사이펀으로 20 mL가 될 때까지 상등액을 제거하였다. 농축 시료는 일정량(1 mL/100 mL 또는 0.1 mL/20 mL)을 분취하여 Sedgewick Rafter Chamber 계수판에 떨어뜨린 다음, 200～400배에서 광학현미경(Axiolab, Zeiss, Germany)으로 동정, 계수하였다. 수괴지표종인 모악류(Chaetognaths)는 2003년 8월 동해 중부해역에서 동해 해양정선 조사(Fig. 1) 중 NORPAC 넷트(망목 330 ㎛, 망구 직경 45 ㎝)를 이용하여 수직 채집 후 현장에서 5% 중성포르말린으로 고정하였다. 채취한 동물플랑크톤 중 모악류만을 재분류하여 해부현미경(SZ40, Olympus, Japan)을 사용하여 계수하여 단위체적당 개체수(개체수/10 ㎥)로 환산하였다.

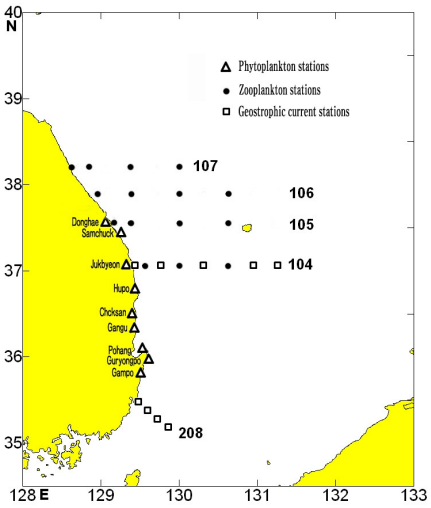

Fig. 1. Map showing the location of sampling stations.

3. 결과 및 토의

3.1. 동해안 *C. polykrikoides* 적조발생 현황

C. polykrikoides 적조는 1995년 9월 21일 동해안에 최초로 발생하여 강원도 강릉연안까지 북상한 것을 시작으로 이후 발생 빈도가 증가하였다(Table 1). 1996년, 1997년 및 1999년도에는 경북 연안에서만 발생하였고 1998년과 2000년도에는 동해안에서 발생하지 않았다. 이후 2001년 8월 14일 전남 고흥군 외나로도 동측에서 최초 발생하여 11일 후인 8월 25일 울산, 경주연안에도 발생하였고, 9월 4일에는 삼척연안까지 확산되면서 1995년 이후 두 번째로 강원도 연안까지 발생하였다. 2002년에는 경북 울진연안까지 발생하였고 2003년에는 1995년과 비슷하게 광범위한 해역에 걸쳐 장기간 지속되었다. 남해안에서 *C. polykrikoides* 적조가 최초 발생한 해역은 전남 고흥 나로도 인근 연안으로 가장 빈도가 높았고 최초 발생 시기와 범위도 거의 일정한 것으로 나타났다(김 등, 2001). 그러나 동해안에서의 적조발생 양상은 남해안과는 다르게 적조발생 범위에서의 차이가 해마다 뚜렷하게 나타났다(국립수산과학원, 2004).

3.2. *C. polykrikoides* 적조발생 전·후의 수온 분포 특성

C. polykrikoides 적조 발생 전·후의 동해 연안환경을 분석한 결과 하계의 동해 남부 연안에서의 수온 분포, 냉수대의 발생시기와 지속기간 등이 적조의 확산에 영향을 미친 것으로 추정되었다. *C. polykrikoides* 적조가 동해 연안에 최초 발생한 1995년 동해 연안의 표층수온은 7월 초순부터 8월 하순까지 평년보다 3～6℃ 낮은 저수온 현상을 보였으며, 9월 14일까지는 20℃ 이하의 수온분포로 적조생물이 연안으로 유입되지 못하였다(Fig. 2). 그러나 9월 하순이 되면서 21℃ 정도로 수온이 상승하여 남해에서 발생한 *C. polykrikoides* 적

Table 1. The occurrences of C. *polykrikoides* blooms in the coastal area of the East Sea from 1995 to 2003

Year	1995	1996	1997	1999	2001	2002	2003
Occurrence areas (Period of blooms)	Ulsan～Samcheok (Sep. 21～Oct. 18)	Ulsan～Gyongju (Sep. 22～Oct. 3)	Ulsan～Pohang (Sep. 5～Sep. 22)	Ulsan～Uljin (Aug. 28～Sep. 6)	Ulsan～Gangneung (Aug. 25～Sep. 15)	Ulsan～Uljin (Aug. 16～Sep. 27)	Ulsan～Gangneung (Aug. 27～Oct. 10)
Cell density (Cells/㎖)	630～7,200	800～1,000	200～7,000	100～43,000	100～19,000	1～30,000	60～26,000

조가 난류를 따라 북상하면서 연안으로 집적되었다. 당시의 21℃ 등온선 분포의 북쪽 한계와 적조발생의 북쪽 한계가 연안에서 일치하여 등온선 분포와 적조 발생 해역 분포 간에 높은 상관성이 있는 것으로 보고되었다(서 등, 2000). 2003년에는 동해 전 연안에 걸쳐 25~26℃의 수온 분포로 *C. polykrikoides* 적조의 확산에 적절한 환경 조건이 형성되었으며, 이러한 수온 분포는 남해 나로도 연안의 *C. polykrikoides* 적조 발생 시 평균 수온 분포와 같았다(이와 최, 2009).

반면에 유해적조가 발생하지 않았던 1998년 9월의 표면수온 분포도를 분석한 결과 동해 남부해역의 기장~울산 연안수온이 주변 연근해역보다 약 3℃ 낮은 수온 분포를 보였다. *C. polykrikoides* 적조 발생에 적당한 수온인 25℃의 수온대가 울산연안에서 외해측으로 분포해 난류의 흐름이 동해 중부연안으로 확장되지 않았다(서 등, 2003). 2000년에는 적조발생 전 8월에는 평년수온보다 높았으나 적조발생시기인 9월에는 평년보다 3~4℃ 정도 낮은 냉수대가 발달되면서 유해적조의 유입이 차단되었다. 연안 역에 형성된 냉수대는 주변해역과 수온차이로 인해 물의 장벽을 형성하여 적조생물의 연안 접근을 막는 한편, 낮은 수온으로 인해 적조생물의 생리작용에 많은 영향을 미쳐 적조의 확산을 막는 역할을 하는 것으로 알려졌다(Mann과 Lazier, 1991a). 또한 *C. polykrikoides* 적조가 발생하지 않았던 1998년과 2000년도의 적조발생 기간 중 공통된 특징은 태풍의 발생으로 1998년 태풍 "야니", 2000년에 태풍 "사오마이"가 적조 미발생에 직접적인 영향을 미친 것으로 여겨진다. 태풍은 남해안에 발생한 *C. polykrikoides* 적조의 조기 소멸에 영향을 주는 중요한 요인 중의 하나로 알려져 있다(이 등 2001; 이와 문, 2008).

적조발생 중 연안 수온분포 뿐만 아니라 적조발생 전 냉수대 발생 또한 *C. polykrikoides* 적조의 확산에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 동해 남부 구룡포 연안의 표층 수온변동을 연도별로 비교한 결과(Fig. 3), 1995년 연안 수온은 평년(1965~2003년)과 비교하였을 때 8월초부터 9월초까지는 평년대비 1.6~7.6℃ 낮았고, 냉수대의 지속시기가 매우 길었다. 2001년과 2003년에는 각각 7월 중순에 0.5~5.4℃, 7월 하순에 0.5~2.4℃ 낮았으며, 평년에 비해 동해 남부 연안의 냉수대 발생빈도가 높았으나 단기간 발생 후 소멸되었다. 반면에 동해안으로 *C. polykrikoides* 적조가 확산되지 않았던 1998년과 2000년에는 적조 발생 전에 냉수대가 발생하지 않았고, 오히려 적조발생 기간 중 동해 남부 연안의 냉수대 발달로 인해 표층의 수온 상승이 억제되었다. 그 결과 적조생물의 유입이 차단되면서 동해안에서 적조발생이 상당히 제한되었다(서 등, 2000; Mann과 Lazier, 1991a).

연안에서 발생하는 용승은 저층의 풍부한 영양염을 표층으로 공급함으로써 동·식물플랑크톤의 생산력을 증대시키는 등 기초생산력을 증대시키는 것으로 알려져 있다(Pingree 등, 1975; Fevre, 1986; Mann과

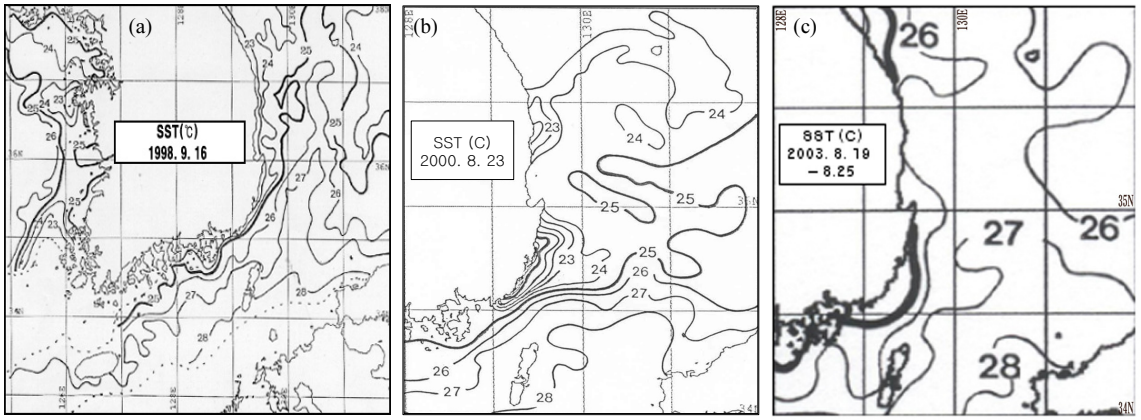

Fig. 2. Sea surface temperature(SST) on (a) 16 September 1998, (b) 23 August 2000 and (c) 19 August 2003 redrawn from NOAA satellite images by National Fisheries Research and Development Institute.

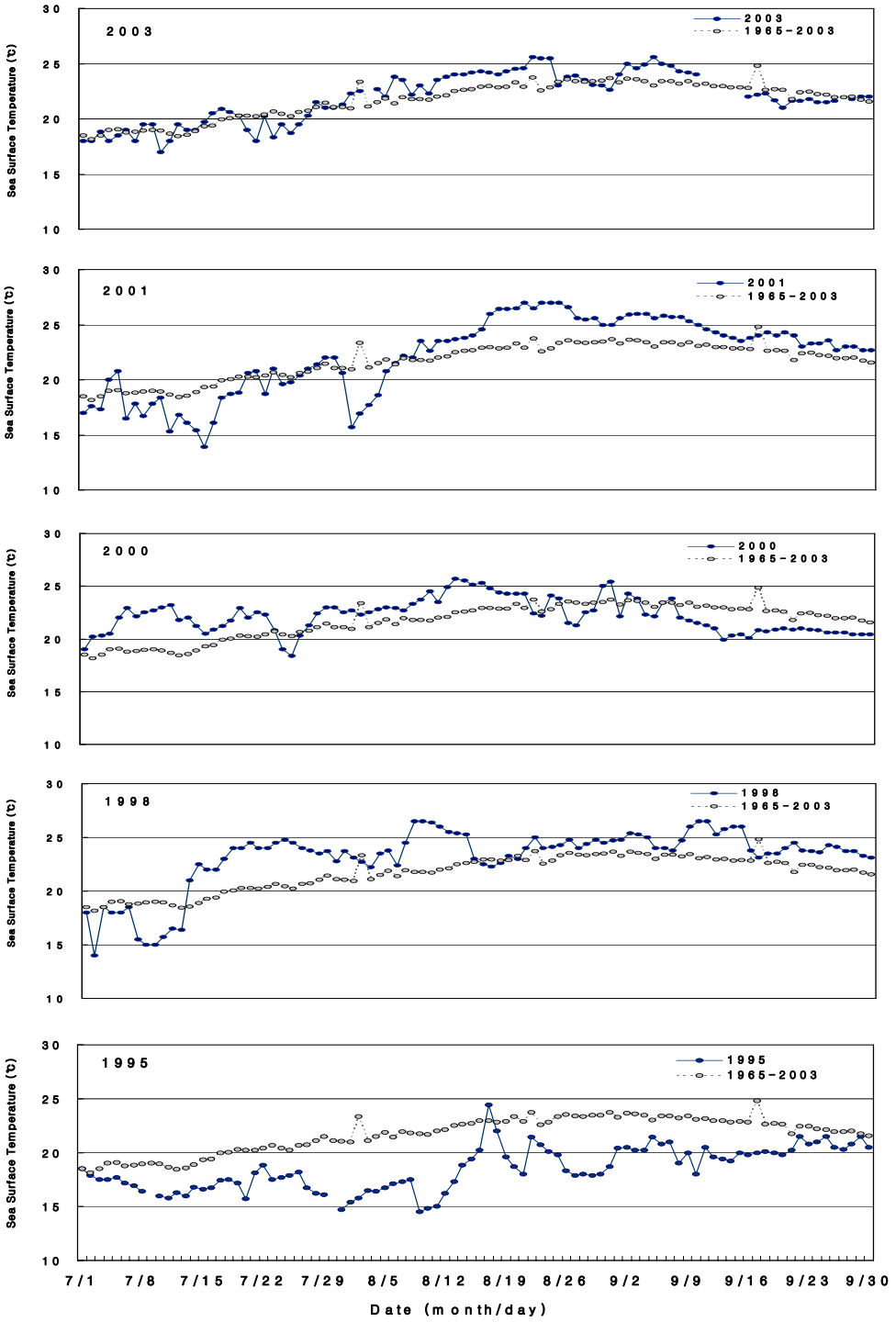

Fig. 3. Daily variations of sea surface temperature and averaged sea surface temperature during 28 years at Gurongpo from July to September, 1995, 1998, 2000, 2001 and 2003.

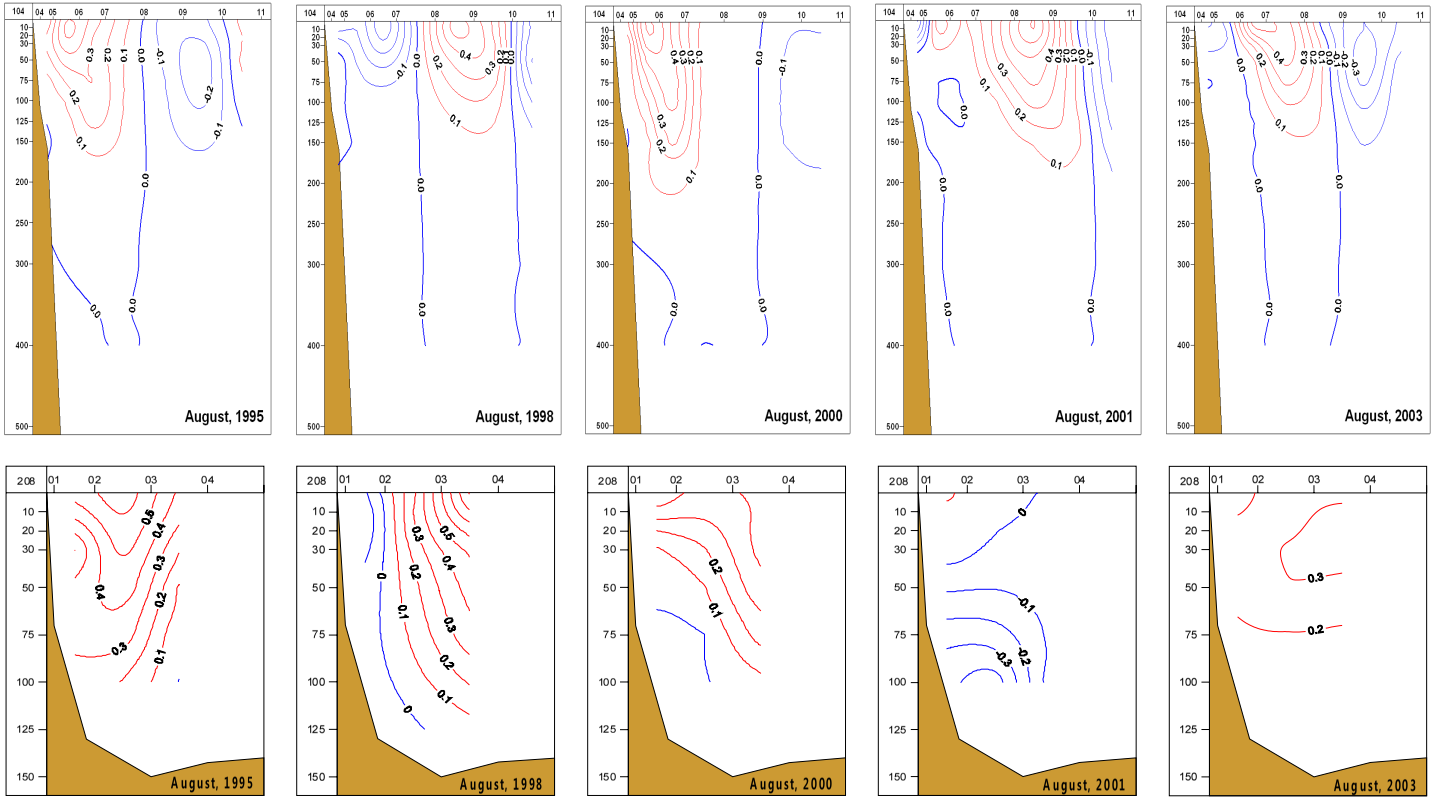

Fig. 4. The distributions of geostrophic current on 104 line(Jukbyeon) and 208 line(Ulgi). (Red line: Northward current, Blue line: Southward current)

Lazier, 1991b). 식물플랑크톤 군집구조의 변화는 여러 가지 환경조건이 변화함에 따라 종간 차별적인 성장활동의 결과 나타나며(Kilham과 Kilham, 1980), 특히 식물플랑크톤 성장을 좌우하는 요인으로 영양염이 중요하다. 영양염의 변화는 용승 해역에서 더욱 뚜렷해지며 규조류의 현존량이 높아지거나 특이하게 와편모조류의 대발생이 일어나기도 한다(Estrada와 Blasco, 1979; Turpin과 Harrison, 1979). Kang 등(2002)에 따르면 *C. polykrikoides* 적조 발생 규모가 매우 컸던 1995년 남해의 해황 특성을 분석한 결과, 나로도와 소리도 사이 해역에서 용승이 형성되었고 이로 인해 영양염과 클로로필-a의 농도가 높게 나타났다. 쿠로시오 난류세력의 확장에 인한 용승은 질산염의 농도 증가를 유발하며 그 결과 클로로필 농도 증가를 유도한다(Gong 등, 1997). 또한 남해 나로도 주변연안에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조도 초여름 남서풍계열의 지속적인 바람에 의해 발생한 용승에 기인한다고 알려져 있다(Lee와 Kang, 2003). 하계 *C. polykrikoides* 적조의 시공간적 분포 특성에 따른 확산 유형을 분석한 보고에 따르면 동해 남부와 중부해역에서 발달한 연안의 냉수대가 동해에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생의 규모를 결정짓는 주요 원인 중의 하나로 보고 있다(서 등, 2003). 이와 같은 결과로 볼 때 용승으로 인한 저층의 풍부한 영양염 용출이 *C. polykrikoides*의 성장에 영향을 준 것으로 추정된다.

3.3. *C. polykrikoides* 적조발생과 지형류 변동

C. polykrikoides 적조가 발생했던 해와 발생하지 않았던 해의 대한해협 서수도 인근 관측 라인인 208선(울기)과 104선(죽변)에서 8월 지형류는 주축이 형성되는 수심에서 차이를 보였다(Fig. 4). 또한 유속과 방향에 있어서도 연도별 차이를 보여 동한난류의 변동이 *C. polykrikoides* 발생에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. *C. polykrikoides* 적조가 강원연안까지 확산되었던 1995년 8월에 있어 104선의 경우 정점 8을 기준으로 연안역에는 북상하는 흐름이 나타난 반면 외양역에서는 남하하는 흐름이 나타났다. 북상하는 흐름의 세기는 0.5 m/s이었고, 흐름의 주축은 정점 5와 6 사이의 수심 10~20 m 지점에 형성되었다. 2001년 8월의 경우 연안에서 정점 5까지는 남하하는 흐름이 나타났으며, 정점 5에서 10까지는 북상하는 흐름을 보이다가 정점 10을 지나서는 다시 남하하는 흐름이 나타났다. 북상하는 흐름의 최대 유속은 0.7 m/s였으며, 주축은 표층에서 10 m 수심에 형성되었다. 남하하는 흐름의 최대 유속은 0.3 m/s였으며, 뚜렷한 주축이 나타나지 않았다. 2003년 8월의 경우 연안에서 정점 5와 6 사이까지는 남하하는 흐름이, 정점 5와 6의 중간지점에서 정점 8과 9의 중간지점까지는 북상하는 흐름을 보이다가 외양역에서는 남하하는 흐름이 나타났다. 북상하는 흐름의 최대 유속은 0.5 m/s였으며, 주축은 정점 7의 표층에서 10 m 수심에 형성되었다. 남하하는 흐름의 최대 유속은 0.3 m/s였으며, 주축은 정점 9와 10 사이의 50 m 수층에서 형성되었다. 208선에서도 104선과 유사한 지형류 분포를 보여 1995년과 2003년에서는 북상하는 흐름이 강하게 발달하였다. 그러나 2001년에는 남하하는 흐름이 다소 강하게 나타나 1995년과 2003년과는 상반되는 분포를 보였다.

반면에 *C. polykrikoides* 적조가 발생하지 않았던 1998년의 8월에 있어 104선의 경우 연안역에는 남하하는 흐름이 형성되었으나, 정점 08에서 10 사이에서는 북상하는 흐름을 보이다 다시 정점 10에서 11 사이에서는 남하하는 흐름을 보였다. 남하하는 흐름이나 북상하는 흐름 모두 대체로 표층에서 10 m 사이에 주축이 형성되었다. 2000년 8월의 경우 연안역에는 북상하는 흐름을 보였으며, 최고 유속은 0.6 m/s였다. 주축은 정점 5와 6 사이의 표층에서 10 m 수심에 형성되었다. 반면 외양역에서는 남하하는 흐름이 나타났지만 유속의 세기는 약하였다. 208선의 지형류 분포에 있어 1995년에는 연안에서 남하하는 흐름이 나타났으나 2000년에는 북상하는 흐름이 주축을 이루어 반대되는 흐름을 나타내었다.

동해 남부해역에서 지형류의 변동 특성과 *C. polykrikoides* 적조 발생 규모를 비교 분석한 결과 적조가 동해안에 확산되었던 해에는 강한 동한난류가 동해 연안을 따라 강하게 형성된 반면, 확산되지 않았던 해에는 동한난류 성분이 이안되어 북상하는 것으로 관측되었다. 이와 같은 동한난류의 변동 양상은 *C. polykrikoides* 적조의 북상에도 많은 영향을 끼친 것으로 생각된다. 권과 조(2002)가 1998년 남해안의 조

류, 해류 및 바람 자료를 이용하여 *C. polykrikoides* 적조 확산과의 상관성을 분석한 결과 동향류가 우세하여 제주해협에서 남해로 적조생물이 유입된다고 보고하였다. 멕시코 Yucatan 연안의 적조 확산을 추정하기 위해장단기 풍향, 풍속 및 지형류의 영향을 분석한 결과 지형류가 식물플랑크톤의 이동에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Enriquez 등, 2009). 본 연구에서도 동해안에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생과 지형류 변동은 연도별 차이는 있지만 다소의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 전반적으로 *C. polykrikoides* 적조 발생과 해류와의 관계에 관한 연구가 미흡한 실정이므로 금후 해류와 적조의 이동에 관한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

3.4. *C. polykrikoides* 적조발생과 해양생물 분포 특성

C. polykrikoides 적조 발생시기인 9월에 강원도 강릉에서 경상북도 감포까지 9개 주요 연안별 식물플랑크톤 종조성을 비교한 결과 주요 우점종 분포에서 확연한 차이를 나타내었다(Table 2). 2001년 9월에는 동해 전 연안에 쿠로시오 지표종인 *Proboscia alata*와 *Dactyliosolen fragilissimus* 등이 우점 출현하였다. 2003년에는 *Chaetoceros affine*와 *Chaetoceros lorenzianus*가 많은 출현량과 함께 전 연안에서 우점 출현하였다. 반면에 동해안으로 적조가 유입되지 않았던 1998년의 경우, 9월 동해연안의 식물플랑크톤 우점종은 감포연안에서는 *Skeletonema costatum*, 강구~구룡포 연안에서는 *Prorocentrum triestinum*으로 연안별로 다소 차이를 보였고, 2000년의 경우 감포에서는 *Thalassiosira rotula*, 구룡포에서는 *Chaetoceros didymus*, 포항에서는 *Ceratium* spp. 등 연안별로 우점종이 각각 다르게 분포하였다. 수온변동에 직접적인 영향을 받는 식물플랑크톤의 분포는 수괴 특성을 간접적으로 보여주는 지표인데, 식물플랑크톤 종조성 등의 군집특성을 분석한 결과 수괴에 따라 다른 군집분포를 보여준다고 알려져 있다(Pemberton 등, 2004). 따라서 동해 전 연안에 식물플랑크톤의 우점종이 동일하다는 사실은 동일한 수괴가 분포한다는 환경 특성을 보여주며, 또한 *C. polykrikoides* 적조가 발생했던 당시 동해 전 연안이 동한난류의 영향을 받았음을 추정하게 된다.

동물플랑크톤 분류군 중 수온, 염분 등 환경요인에 민감하게 반응하는 수괴 지표종으로 잘 알려진(박, 1973; 박 등 1990; 유와 김, 1997) 화살벌레(*Sagitta*)류의 분포를 분석한 결과 *C. polykrikoides* 적조가 강릉까지 북상하였던 2003년 8월에는 한류지표종인 *Sagitta elegans*와 쿠류시오 난류지표종인 *S. enflata*의 현존량 분포가 해역별로 차이를 나타내었다(Fig. 5). 한류지표종

Table 2. The dominant species of phytoplankton showing the oceanic conditions in the coastal areas of the East Sea during 1998-2003

Area \ Year	1998 (un-occurred)	2000 (un-occurred)	2001 (Ulsan ~Samcheok)	2003 (Ulsan ~Donghae)
Donghae	*Prorocentrum triestinum*	*Thalassiosira alleni*	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Samchuk	-	-	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Jukbyeon	*Guinardia flaccida*	*Chaetoceros didymus*	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Hupo	*Guinardia flaccida*	*Ceratium* spp.	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Chuksan	-	-	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Ganggu	*Proro. triestinum*	*Ceratium* spp.	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Pohang	*Proro. triestinum*	*Ceratium* spp.	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Gurongpo	*Proro. triestinum*	*Chaetoceros didymus*	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*
Gampo	*Skeletonema costatum*	*Thalassiosira rotula*	*Proboscia alata* *Dactyliosolen fragillissimus*	*Chaetoceros affine* *Chaeto. lorenzianus*

인 *S. elegans*의 출현량은 속초연안에서 42.8 개체수/10 ㎥이었던 반면, 강릉과 묵호연안에서는 5 개체수/10 ㎥로 속초연안에 비해 훨씬 낮은 분포를 보였다. 한류지표종의 낮은 출현량은 난류세력의 확산 영향으로 한류의 남하가 억제된 결과로 볼 수 있다. *Sagitta*속은 수온에 따른 종의 분포 특성이 뚜렷하여 해수의 유동과 수괴의 기원을 밝히는데 좋은 지표로 알려져 있다(Ulloa, 2004). 동해안에서 *C. polykrikoides* 적조가 최초 발생한 1995년 8월에 남해안의 동물플랑크톤 현존량은 150 ㎎/㎥ 이상으로 평년(1965-1998) 평균에 비해 다소 많았는데, 이는 난류세력의 확장과 동시에 발생한 용승의 영향으로 생물생산력이 높았던 것으로 나타났다(Kang 등 2002). 이와 같은 결과로 볼 때 동한난류 세기의 강약에 따라 동해안에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생 규모가 달라지며, 또한 동물플랑크톤 등 부유생물의 분포 특성도 차이를 보이는 것으로 추정되었다.

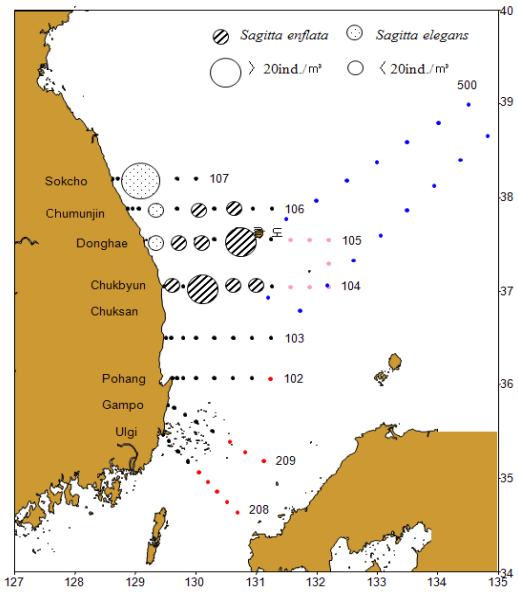

Fig. 5. The abundance of *Sagitta enflata* and *Sagitta elegangs* in the East Sea in August 2003.

또한 2003년 *C. polykrikoides* 적조 발생시에는 동해안의 난류세력의 확장을 보여주는 기타 해양생물들의 출현량이 높았다(국립수산과학원, 2004). 온대성의 보름달물해파리(*Aurelia aurita*)와 노무라입깃해파리(*Nemopilema nomurai*)의 대량 출현, 동해안에서는 처음 어획된 보라문어(*Tremoctopus* sp.) 및 초대형 노랑가오리(*Dasyatis* sp.) 등의 출현은 수온 변화에 대응하는 생물 지표종의 측면에서 볼 때 강원도 연안으로의 난류세력이 강하게 발달한 데 기인된 것으로 여겨진다.

4. 결 론

유해성 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 동해안에 최초 발생한 해는 1995년으로 이후 발생 빈도가 증가하였다. *C. polykrikoides* 적조 발생 시의 해황 특성을 살펴보기 위하여 적조 발생범위가 넓었던 1995년, 2001년 및 2003년, 동해안에 발생하지 않았던 1998년과 2000년 하계에 표층 수온, 냉수대 발생 특성, 지형류 분포 및 부유생물 분포 특성을 비교 분석하였다. *C. polykrikoides* 적조 발생은 표층 수온의 분포 양상, 냉수대의 발생시기와 지속기간, 동한난류의 세기 등에 직접적으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 대한해협 서수도 인근 관측 라인인 208선(울기)와 104선(죽변)에서 연도별 8월의 지형류 분석 결과 1995년에는 북향류가 우세한 반면, 1998년에는 남향류가 연안에 우세하게 나타났다. 또한 동해 연안별 식물플랑크톤의 종조성을 비교한 결과 2001년과 2003년에는 쿠로시오 난류 지표종인 *Proboscia alata*와 *Chaetoceros affine*가 동해 전 연안에 각각 우점하였으나 1998년과 2000년에는 연안별로 다른 우점종 분포를 보였다. *C. polykrikoides* 적조 발생시기의 동해 중부 해역의 화살벌레류 분포를 보면 한류지표종인 *Sagitta elegans*보다 쿠류시오 난류지표종인 *S. enflata*의 현존량이 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 동해안에서의 *C. polykrikoides* 적조발생 규모는 냉수대 발생과 동한난류의 세기에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 적조발생시 동·식물플랑크톤의 분포 특성은 *C. polykrikoides*의 발생 범위를 추정하는 요인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 국립수산과학원 동해수산연구소 “동해 기후변화 거점 모니터링 시스템 구축(RP-2010-ME-

038)" 연구 과제의 일환으로 수행되었습니다. 적조예찰을 위해 수고하신 관계자 분께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

강양순, 박영태, 임월애, 조은섭, 이창규, 강영실, 2009, *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생규모에 대한 비교 연구, 한국해양학회지 바다, 14(4), 229-239.

국립수산과학원 동해수산연구소, 1995, '95년 동해안 적조발생과 추이, 86.

국립수산과학원 동해수산연구소, 2004, 동해 적조 10년, 55.

권철휘, 조규대, 2002, 한국 남해안에서 *Cochlodinium* 적조 확산모델, 한국수산학회지, 35(6), 568-577.

김학균, 정창수, 임월애, 이창규, 김숙양, 윤성화, 조용철, 이삼근, 2001, 한국연안의 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 변천, 한국수산학회지, 34(6), 691-696.

김형철, 김동명, 이대인, 박청길, 김학균, 2001a, 조류잠재력시험에 의한 사량도 연안 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 제한 영양염, 한국수산학회지, 34(5), 457-464.

김형철, 이창규, 이삼근, 김학균, 박청길, 2001b, *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 미치는 물리·화학적 요인과 영양염 이용, 한국수산학회지, 34(5), 445-456.

박주석, 1973, 대한해협의 부유성 모악류의 수직분포와 수괴 유동, 한국해양학회지, 8, 22-32.

박주석, 이삼석, 강영실, 이병돈, 허성회, 1990, 한국 남해의 요각류 및 모악류의 분포와 수괴 특성. 한국수산학회지, 23, 245-252.

서영상, 장이현, 김학균, 2003, *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 시공간 분포와 중규모 해양환경 변동간의 관계성, 한국지리정보학회지, 6(3), 139-150.

서영상, 김정희, 김학균, 2000, NOAA 위성자료에 의한 해수표면 수온분포와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 상관성, 한국환경과학회지, 9(3), 215-221.

유광일, 김원록, 1997, 고리해역에서의 모악류의 계절변동, 한국환경생물학회지, 15, 9-17.

심정민, 이주, 이용화, 김봉석, 2009, 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*에 노출된 어류의 산소 소모량 및 조직변화, 한국환경과학회지, 18(11), 1283-1289.

이문옥, 최재훈, 2009, *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생시의 한국 남해안의 수온 및 염분 분포, 한국해양환경공학회지, 12(4), 235-247.

이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤, 2001, *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생 기작과 대책: 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경 특성, 한국해양학회지 바다, 6(4), 259-264.

이창규, 김형철, 이삼근, 정창수, 김학균, 임월애, 2001, 남해연안에서 적조생물, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 출현상황과 온도, 염분, 조도 및 영양염류에 따른 성장 특성, 한국수산학회지, 34(5), 536-544.

임월애, 정창수, 이창규, 조용철, 이삼근, 김학균, 정익교, 2002, 2000년 여름 남해안에 나타난 *Cochlodinium polykrikoides* 우점 적조의 발생 특성, 한국해양학회지 바다, 7(2), 68-77.

임월애, 이창규, 2004, 초여름 남해 동부연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 분포와 세포 특징, 한국해양학회지 바다, 9, 106-109.

임월애, 이영식, 이삼근, 2008, 2007년 남해동부해역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과 소멸에 미치는 환경 특성, 한국해양학회지 바다, 13(3), 325-332.

이문옥, 문진환, 2008, *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생 해역인 나로도 주변 해역의 해양환경, 한국해양환경공학회지, 11(3), 113-123.

Kang, Y. S., Kim, H. G., Lim, W. A., Lee, C. K., Lee, S. G., Kim, S. Y., 2002, An unusual coastal environment and *Cochlodinium polykrikoides* blooms in 1995 in the South Sea of Korea, J. Oceanol. Soc. Korea, 37(4), 212-223.

Enriquez, C., Marino-Tapia, I. J., Herrera-Silveira, J. A., 2009, Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events, Conti. Shel. Res., 30(2), 127-137.

Estrada, M., Blasco, D., 1979, Two phases of the phytoplankton community in the Baja California upwelling, Limnol. Oceanogr., 24, 1065-1080.

Gong, G. H., Shiah, F. K., Liu, K. K., Chuang, W. S., Chang, J., 1997, Effect of Kuroshio intrusion on the chlorophyll distribution in the southern East China Sea during spring 1993, Conti. Shel. Res., 17(1), 79-94.

Han, I. S., Jang, I. H., Suh, Y. S., Seong, K. T., 2008, Relationship between temperature distributions and outbreaks of harmful algal blooms in Korean waters, J. Fish. Sci. Technol., 11, 50-60.

Johnson, T. B., Terazaki, M., 2003, Species composition and depth distribution of chaetognaths in a Kuroshio

warm-core ring and Oyashio water, J. Plankton Res., 25(10), 1279-1289.

Pemberton. K., Rees, A. P., Miller, P. I., Raine, R., Joint, I., 2004, The influence of water body characteristics on phytoplankton diversity and production in the Celtic Sea, Conti. Shelf. Res., 24(17), 2011-2028.

Kilham, P., Kilham, S. S., 1980, The evolutionary ecology of phytoplankton, in: Morris, I.(ed.), Physiological Ecology of Phytoplankton, Blackwell, Oxford, 571-597.

Kim, C. J., Kim, H. G., Kim, C. H., Oh, H. M., 2007, Life cycle of the ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waters, Harmful algae, 6, 104-111.

Kim, C. S., Lee, S. G., Lee, C. K., Kim, H. G., Jung, J., 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., Lee, S. G., Kim, H. G., 2000, Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, J. Exp. Mar. Biol. & Eco., 254, 131-141.

Kim, D. K., Oda, T., Muramatsu, T., Kim, D. I., Matsuyama, Y., Honjo, T., 2002, Possible factors responsible for the toxicity of *Cochlodinium polykrikoides*, a red tide phytoplankton, Comp. Biochem. Phys. C: Toxico. & Pharma., 132, 415-423.

Le, Fevre. J., 1986, Aspect of biology of frontal systems, Adv. Mar. Biol., 23, 164-299.

Lee, D. K., Kang, Y. H., 2003, The physical environments and *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the sea near Naro-do, Ocean and Polar Res., 25(3), 303-314.

Mann, K. H., Lazier, J. R. N., 1991, Fronts in coastal waters, in: Mann, K. H. and Lazier, J. R. N.(eds), Dynamics of Marine Ecosystem, Blackwell Scientific Publications Inc., 213-254.

Park, T. G., Kang, Y. S., Park, Y. T., Bae, H. M., Lee, Y., 2009, Detection of fish killing dinoflagellates *Cochlodinium polykrikoides* and *Karlodinium veneficum* (Dinophyceae) in the East China Sea by real-time PCR, Algae, 24(2), 1-10.

Pingree, R. D., Pugh, P. M., Holligan, P. M., Froster, G. R., 1975, Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approached to English Channel, Nature, 258, 672-677.

Pond, S., Pickard, G. L., 1983, Introductory dynamical oceanography, 2nd ed., Pergamon Press Ltd., Oxford, England, 66-83.

Turpin, D. H., Harrison, P. J., 1979, Limiting nutrient patchiness and its role in phytoplankton ecology, J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 39, 151-166.

Ulloa, R., Palma, S., Silva, N., 2004, Relationship between spatial distribution of chaetognaths and oceanographic conditions off Concepcion Bay, Chile, Deep-Sea Res., 51, 537-550.