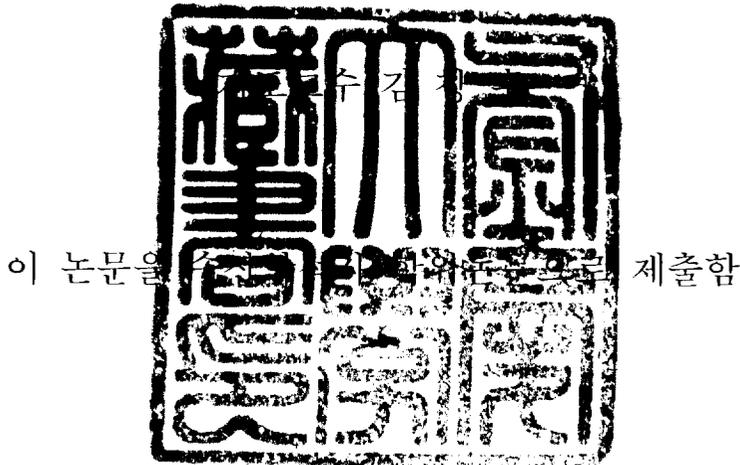


수산학석사 학위논문

2003년 한국 연안에 출현하는 유해성
와편모조류 *Cochlodinium polykrikoides*의
적조 발생 특성



2005년 2월

부경대학교 대학원

수산생물학과

안 신 홍

안신홍의 수산학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월 23일

주 심 이학박사 손 철 현



위 원 농학박사 장 영 진



위 원 농학박사 김 창 훈



목 차

목차	i
Abstract	ii
I. 서 론	1
II. 재료 및 방법	7
1. 조사 시기 및 정점	7
2. <i>Cochlodinium polykrikoides</i> 영양세포 관찰	8
3. 광합성 색소(Chlorophyll <i>a</i>)	8
4. 투명도, 수온, 염분	8
5. 영양염류	8
III. 결 과	10
1. 2003년 <i>Cochlodinium polykrikoides</i> 적조발생 개요	10
2. <i>Cochlodinium polykrikoides</i> 영양세포	12
3. 광합성 색소(Chlorophyll <i>a</i>)	15
4. 투명도	17
5. 수온 및 염분	19
6. 영양염류	27
IV. 고 찰	35
V. 참고문헌	38
VI. 요 약	48
감사의 글	49

Abstract

To elucidate the bloom dynamics of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, its cell density, temperature, salinity, transparency and nutrient concentrations were investigated from July to October 2003 in the southeastern areas of Korea. The *C. polykrikoides* HAB development showed following characteristics: 1) The occurrence of *C. polykrikoides* cells was first observed at mid July around offshore areas near Gwangdo where front was developed under the influence of the offshore current, whereas diatoms were dominant in the inshore areas. 2) The *C. polykrikoides* HAB development by the concentration of vegetative cells occurred between Narodo and Sorido (in the front of Botdol) in August. The fluctuation of nitrogen was much higher than that of phosphate in this area. The fluctuation of ammonium was the highest among nitrogen sources. This phenomenon appeared to result from the selective uptake of nutrients by *C. polykrikoides*. 3) Since September, the abundance of *C. polykrikoides* has been high at the eastern Namhaedo where physical environmental conditions were stable, but low at the eastern Dolsando where physical environmental conditions unstable because of the low salinity water plume from Gwangyang Bay.

Though there were no clear correlation between the HAB development and nutrients fluctuation, the physical environmental conditions such as temperature and salinity appeared to influence the growth dynamics of *C. polykrikoides*.

I. 서 론

적조(red tide)란 물에 사는 동·식물성 플랑크톤, 원생동물 및 박테리아와 같은 미소생물이 일시에 다량으로 증식하거나 집적함으로써 수색이 변하는 현상으로 긴 역사를 가진 자연현상의 하나이다(Halstead, 1965). “유해조류대증식(HAB)”에 대해서는 여러 학자들이 나름대로의 정의를 내려왔다. Tett(1987)는 “예외적 대증식(exceptional bloom)”으로, Richardson(1989)는 생물량이 폭발적으로 증식된 ‘대증식’이라고 정의하였다. Reid et al.(1987)은 적조를 유해한 효과를 나타내는 경우로만 국한시켜 예외적인 대발생 이라고 정의하였다. 한편, 적조관리 측면에서 Kim et al.(1993)은 크기가 30 μm 이상의 종이 1,000 cells/mL를 초과할 경우 적조로 정의하였다. 적조에 대한 이러한 정의들의 공통점은 생물량이나 세포수에 관계없이 인간 또는 생태계에 해로운 결과를 포함시키고 있다는 것이다. 공중위생과 경제적 손실(economic loss)의 측면은 물론이고, 산소결핍(hypoxia or anoxia), 조류독소(phyco toxins) 등의 부정적인 생태적 효과(negative ecological effects)를 나타내어 더욱 문제가 되고 있다(Harper et al., 1981; Paerl, 1983; Hallegraeff, 1993; Shirota, 1989; Kim, 1997).

전세계에 식물플랑크톤은 3,400~4,100여종이 있으며 그 가운데 적조를 일으키는 종은 돌말류(diatoms), 와편모조류(dinoflagellates), 규질편모조류(silicoflagellates), 착편모조류(haptophytes), 침편모조류(raphidophytes)에 속한 300여종으로 알려져 있다(Sournia, 1995).

이들 중 약 1/4인 60~80여종은 독성(biotoxin), 물리적 스트레스, 빈산소(hypoxia), 조도 감소효과, 영양염의 부적합 상태 등의 결과를 초래하여 유해종(harmful bloom species)이라 부르며 이들이 일으키는 적조를 HABs라 부르고 있다. 유해적조종 중 90% 이상이 와편모조류에 속하는데 이들

은 다른 식물플랑크톤 군과는 다른 생리·생태 특징을 가지고 있다 (Smayda, 1997). 또한 독성은 현존량의 많고 적음에 상관없이 유해한 것이 일반적인 경향이다(Richardson, 1989).

와편모조류에 속하는 *Cochlodinium polykrikoides*종은 Puerto Rico 연안에서 처음 발견 되었으며(Margalef, 1961), 이후 북미 대서양 연안의 뉴저지주 Bamegat만과 미국 캘리포니아 연안에서 적조를 일으킨 *C. heterlobatum* (Silva, 1967)과 같은 종으로 간주 되고 있다. 이종은 일본의 Harima Nada와 구주의 Yatsushiro만에서 적조를 일으켜 수산피해를 일으킨 이래(Yuki and Yoshimatsu, 1989), 일본 중부와 서부 연안에서도 적조를 일으 키고 있으며(Fukuyo et al., 1990), 최근 캐나다(Whyte et al., 2000), 멕시코의 Gulf of California (Garate Lizarraga et al., 2000) 및 중남미의 Guatemala의 태평양 연안에서도 적조를 일어 키고, 또한 이종의 포자로 여겨지는 cyst (*Cochlodinium* sp. Type F.)도 발견되었다(Kim et al., 1996, Rosales-Loessener et al., 1996). 한편, 같은 속에 속하는 *Cochlodinium* sp. 는 인도양 마다카스카 동측에 위치한 프랑스령 Reunion Island (Turquet et al., 1998), 호주의 퀸스랜드주의 Brisbane 동측에 있는 Moreton Bay (Hallaegraeff, 1991)에서 적조를 일으켰다는 보고가 있다. 그리고 *C. catenatum* 은 코스타리카와 파나마 연안에서의 산호초 폐사와 관련이 있다는 보고가 있다(Guzman et al., 1990). 이와 같이 이종은 최근에 여러나라에서 적조를 일으켜 수산생물에 피해를 일으키고 있는 종이다.

적조의 발생원인은 아직 명확하게 밝혀져 있지 않으나, 대부분의 적조는 해수교환이 제한된 폐쇄성 내만 수역, 육상 유입수와 유기 퇴적물 등에 의해 영양염이 풍부한 해역, 그리고, 일사량이 풍부하여 광합성이 활발하고, 성장에 적절한 수온이 유지되는 해역에서 빈번히 발생하는 것으로 알려져 있다(Margalef, 1978). 그러나 최근에는 이와는 전혀 다른 외양의 빈영양 환경에서도 적조가 발생하고 있다(Tester et al., 1991). 이 현상의 주요 원

인종은 와편모조류들로 규조류 적조와는 다르다. 규조류는 생태계의 먹이사슬을 교란시키거나 빈영양 해역에서 적조를 일으키는 경우가 매우 적고 다른 그룹보다 발생학적 특성이 잘 알려져 있어 적조 발생의 예측이 가능한 반면, 와편모조류의 생리·생태적 특징은 아직 잘 밝혀져 있지 않다.

우리나라에서 적조는 삼국시대부터 발생한 것으로 기록되어 있다(Han, 1998). 우리나라도 개발주도형 경제계획에 따라 임해도시들이 다수 건설되었다. 이로 인한 인구 집중으로 계절에 관계없이 적조가 발생하여 광역화, 장기화, 대규모화, 유독화 되는 특징을 나타내고 있다(김, 1999). 1970년대부터 간헐적으로 발생하던 적조는 1980년대에 들어 일부 연안 수역에서 자주 발생하였으나, 1990년대 이후에는 내만은 물론이고 비교적 외해역에서도 적조가 장기간 발생하고 있다. 지금까지 우리나라에서 보고된 적조 원인종은 약 43종이다. 그 중 4종은 담수 또는 기수종이고, 해산종으로는 규조류가 13종, 라피도조류가 3종 그리고 와편모조류가 약 20종이다(김과 김, 1999).

최근 20년 간 적조 발생은 더욱 증가하고 있으며 더욱이 독을 가지거나 다른 생물에 해를 주는 미세조류(microalgae)들에 의한 적조발생(bloom)이 두드러지게 나타나 인간의 건강과 수산자원을 위협하고 있다. 이러한 적조현상은 특정지역에 한정된 국부적인 현상에서 점차 국제적, 지구적인 현상으로 대형화하는 추세이다.

우리나라 연안에서 최근 몇 년간 계속하여 적조를 일으키고 있는 종은 *C. polykrikoides* 한 종이다. *C. polykrikoides* 적조는 1982년 최초로 발견된 이래 1983, 1986, 1987년도를 제외하고는 2000년까지 매년 발생하고 있으며, 특히 1995년도에 대규모로 발생하여 막대한 수산 피해를 일으킨 바 있다(Kim 1998). 특히, 1995년 9월부터 10월까지 남해안과 동해안에서 지속된 *Cochlodinium* 속에 의한 유해 적조는 750억원에 이르는 어업피해 신고액을 기록했다. 이와 같은 유해 적조는 앞으로도 막대한 어업피해를 일

으킬 가능성이 크며, 현재 100만 톤을 상회하는 양식산업에 결정적인 위협이 되고 있다(김과 신, 1997).

우리나라에서의 *C. polykrikoides*에 관한 본격적인 연구는 1995년 대발생을 겪은 아돔해인 1996년에 시작되었다. 이들의 초기 발생해역이 기존 적조 발생보다 외해역이어서 조사에 어려움이 따랐지만, *C. polykrikoides* 적조발생(Park et al., 1988; Kim, 1990, 1997, 1998a, 1998b; Kim et al., 1994, 1997, 1999; Lee et al., 1999; Jung et al., 1999; 김, 1999; 김 등 1995), 적조발생시의 세포용적(Kim et al., 1993), 분리와 성장(Seo et al., 1998), 휴면포자에 관한 연구(Kim et al., 1996), 적조발생과 피해대책(Kim, 1997, 1998; Choi et al., 1998; Lee et al., 2000), 탐색기법(Cho et al., 2000), 적조생물의 독성과 생리(Kim et al., 1999a, 1999b, 2000; Lee, 1996), 적조생물의 구제와 살조세균(Kim, 1998b; Park et al., 1998; Jeong et al., 2000)에 관한 연구가 상당히 많이 진행되었다.

일반적으로 호수, 저수지, 강 등의 담수생태계에서는 인산염이 조류성장의 주요 제한 영양염으로 작용(Lange, 1971; Chiaudani and Vighi, 1974; Parr and Smith, 1976; Sridharan and Lee, 1977; Schindler, 1977)하고, 해양생태계에서는 질소계 영양염이 조류성장을 제한한다(Ryther and Dunstan, 1971; Goldman, 1976; Yentsch et al., 1977; Nixon, 1981; Graneli et al., 1990). 그러나, 연안 해역은 외양 또는 육상으로부터의 영양염 공급에 의해 크게 영향을 받기 때문에 담수계에서는 인산염이 해양생태계에서는 질소계 영양염이 제한영양염이라고 일반화하기 힘들다(Kang et al., 1999).

적조는 부영양화가 진행되고 있거나 이미 부영양화된 해역에서 일어나는 것으로 알려져 있으나, 최근에는 외해역과 같이 영양염 농도가 비교적 낮은 곳에서도 빈발하고 있다(Boesch et al., 1997).

조사해역인 한국 남해중부해역은 대마난류수와 황해난류수, 중국 대륙

연안수, 한국 남해연안수와 같은 특성이 서로 다른 다양한 수괴들이 접하는 해역으로, 각 수괴 사이에는 해양전선이 형성되고 있으나(Yang and Kim, 1990; 박 등, 1998; 양 등, 1998), 특정 해류의 세력확대, 해저지형, 육수유입과 기상현상 등 여러 가지 요인에 의하여 계절 변화가 대단히 크다(공, 1971; 강, 1974; Lee et al., 1984; 나 등, 1990; 강과 전, 1999). 한편, 이 전선역에서는 물리적인 수렴현상으로 영양염류가 풍부하며, 따라서 식물플랑크톤의 생산력이 매우 높다(Pingree et al., 1975; Floodgate et al., 1981). 또한, 물리 요인과 영양환경의 급격한 변화가 한국 남해 연안의 여름철 식물플랑크톤 군집의 단기변동에 큰 영향을 미칠 수 있다(임 등, 2003).

우도와 거문도사이에서 형성되는 전선은 6월말부터는 남쪽 해역에서 수온이 상승하기 시작하여 2~3일내에 전해역이 25℃ 이상의 고온역으로 된다(양, 1994). 또한, 하계 남해연안수와 대마난류 사이는 수온, 염분, 투명도의 수평경도가 큰 전선이 형성되고 전선역은 흐름의 shear가 크다. warm streamer는 대마난류의 세력이 강해져 난류의 주축이 연안으로 접근하는 하계에 주로 나타나며, 고흥반도, 소리도 그리고 육지도 서쪽에서 반시계 방향으로 연안을 향해 유입된다. warm streamer가 유입되는 연안 해역은 반시계 방향의 표층 순환류(좌선환류)가 형성된다. 난류 접안과 warm streamer의 연안 유입으로 거문도, 소리도, 거제도 주변은 표층의 wake와 저층수의 용승현상이 나타나 용존산소, 부유물질, 영양염의 농도가 크고, warm streamer가 좌선환류를 형성하면서 거문도, 소리도 주변의 연안수가 환류역대로 유입된다(추와 김 1998).

남해의 조석 및 조류의 특징은 전반적으로 반일주조 조석이 우세하며, 거문도를 기점으로 하여 동·서 양쪽이 서로 반대의 위상을 보이게 된다(Odamaki, 1989). 또한 남해안에서 해수유동에 가장 큰 영향을 미치는 고온·고염의 대마난류는 제주도의 남북방향으로 스치면서 시계방향으로

선화하여 남해를 거쳐 대한해협을 통해 동해로 유출된다(공, 1971; 김 등, 1997; Chang, 1970). 황해나 동중국해에서 기원한 저염수도 제주도의 남북 양방향을 스치면서 남해로 유입되며(김과 노, 1994), 중국대륙연안수가 한국 남해안까지 영향을 미치고 있다(Huh, 1982; 양, 1994).

C. polykrikoides 종에 대한 분류와 생리등의 연구도 *C. polykrikoides* 적조 발생특성을 파악하기 위한 주요한 연구임에는 틀림이 없다. 그러나 이러한 연구만으로는 하계 우리나라 남해연안에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조의 발생 및 확산 과정을 이해하기는 미흡한 점이 있다. 본 연구에서는 *C. polykrikoides* 적조 발생에 대한 생리·생태뿐만 아니라 하계 *C. polykrikoides* 적조 발생지역의 물리·화학적인 환경을 조사하여 2003년도 *C. polykrikoides* 적조 발생특성을 파악하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 조사 시기 및 정점

남해안 중부 해역에서 매년 8월경에 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생연구를 위하여 유해성 적조가 일어나기 전인 2003년 7월 14일에서 18일, 적조발생 직전인 7월 28일에서 8월 2일, 적조 발생 직후인 8월 18일에서 23일, 적조발생 초기인 9월 2일에서 6일, 적조발생 성기인 9월 23일에서 27일, 적조 소멸직전인 10월 6일에서 10일에 걸쳐 우리나라 남해안 중부 해역(위도 34.148~34.857 N, 경도 126.943~128.244 E)의 20개 정점(Fig. 1)에서 *C. polykrikoides* 영양세포, 수온, 염분, 투명도, chlorophyll *a*, 영양염류에 대해 조사하였다. 또한, 나로도와 소리도 사이 해역의 8개 정점에서 수온 및 염분의 수직적 변화를 조사하였다(Fig. 2).

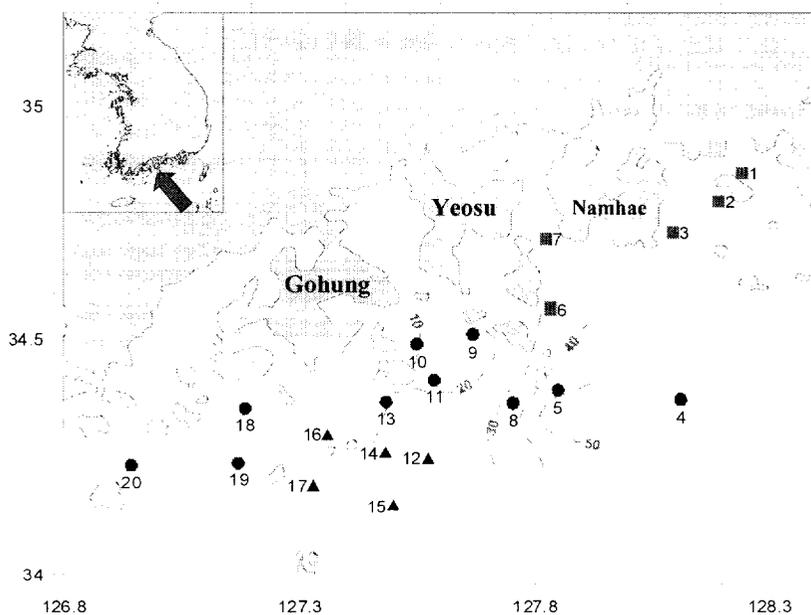


Fig. 1. Map showing the sampling location. ■, inshore; ▲, offshore.

2. *C. polykrikoides* 유영세포 관찰

C. polykrikoides 유영세포의 관찰은 각 정점의 표층에서 해수 1L를 정량 채수하여, 현장에서 Sieve(125 μm , 20 μm , Nylon mesh)로 여과, 농축하였다. 농축된 시료는 현미경(Nikon, Alphaphot-2)을 사용하여 고배율($\times 200$, $\times 400$)로 선상에서 검경, 계수하였다.

3. 광합성 색소(Chlorophyll *a*)

각 정점의 표층에서 정량 채수한 500 mL 해수를 GF/F filter(\varnothing 0.45 μm)를 이용하여 현장에서 흡인 여과하였다. 여과가 끝나기 직전에 1% MgCO_3 용액 1 mL를 여과지에 투입하였다. 여과지는 접어내어 플랑크톤이 부착된 면을 내면으로 하여 두 번 접어 냉동 보관하였다. 냉동 보관된 여과지는 냉암소(약 10 $^{\circ}\text{C}$)에서 해동한 뒤, 90% 아세톤 용액 10 mL에 침적하였다. 색소를 추출하기 위해 냉암소(5 $^{\circ}\text{C}$)에서 24시간 침적한 후 원심분리(2,000~3,000 rpm, 15 min)하였다. 침적액의 상등액을 피펫으로 취하여 형광분광광도계(Turner, 10-AU)로 측정하였다.

4. 투명도, 수온, 염분

투명도는 직경 30 cm의 투명도판(Secchi Disk)를 이용하여 선상에서 육안으로 측정하였다. 수온과 염분은 CTD (SeaBird, SEB-25)를 이용하여 각 정점별 최대 수심까지 수직 측정하였다.

5. 영양염

정점의 표층에서 500 mL 해수를 채수하여 GF/F filter(\varnothing 0.45 μm)를 이용하여 현장에서 흡인 여과하였다. 여과된 해수는 500 mL polyethylene 병에 넣어 냉동(-20 $^{\circ}\text{C}$) 보관하였다. 냉동 보관된 해수는 실험실로 운반한 뒤,

냉암소(약 10°C)에서 해동한 뒤 Flow Injection analyzer (QuikChem 8000, Lachat)로 해수중 아질산질소(NO_2^- -N), 질산질소(NO_3^- -N), 암모니아질소(NH_4^+ -N), 인산인(PO_4^{2-} -P), 규산규소(SiO_2 -Si)의 농도를 측정하였다.

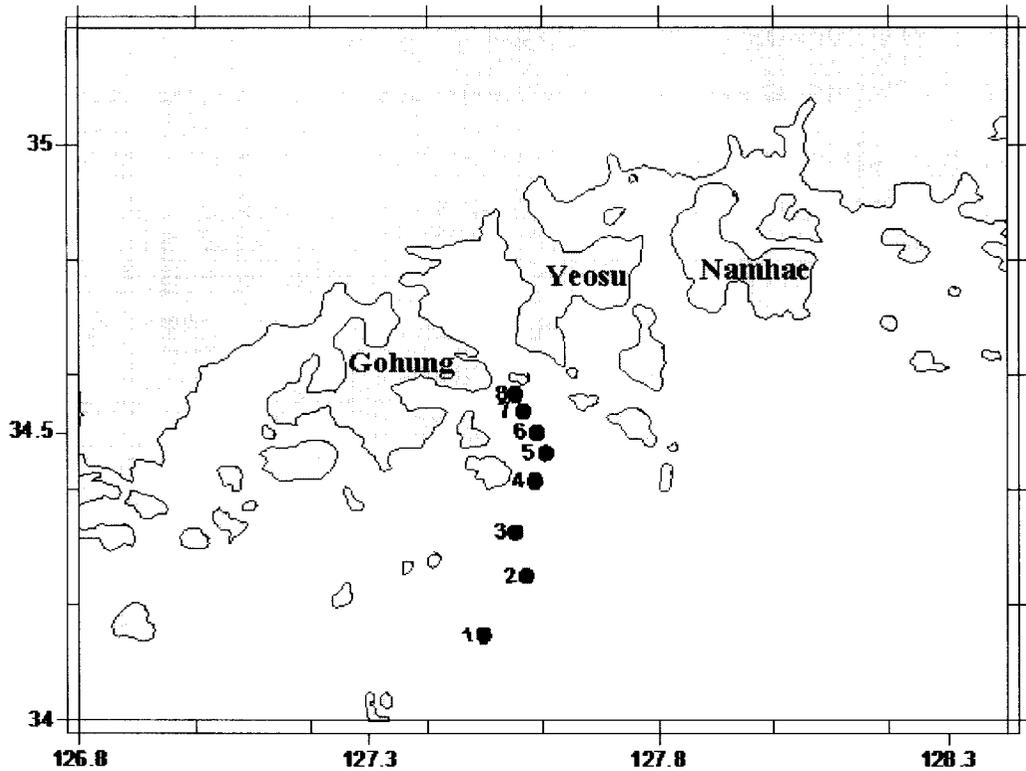


Fig. 2. Map showing the CTD casting location for vertical temperature and salinity distribution.

III. 결 과

1. 2003년 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생 개요

2003년 *C. polykrikoides* 적조발생을 정리하면, 8월 13일 봇돌바다와 남해도 동부해역에서 최초로 발생하여 62일간 지속되다가 10월 13일에 소멸되었다(Fig. 3). 2003년도 *C. polykrikoides* 적조 특징은 1) 남해서부해역의 냉수대 미발달로 진도연안까지, 대마난류의 강세와 8월 동해남부해역의 냉수대 미발달로 강릉시까지 적조가 광역적으로 발생하였다. 2) 8월중 태풍의 미 발생으로 인한 연안 해양환경이 매우 안정화되어, 9월 12~13일의 대형 태풍 “매미”가 통과하기 전까지 고밀도(48,000 cells/mL)로 지속 되었으며, 태풍 통과 후 9월말까지 고수온이 장기간 유지되어 적조 지속일이 62일로 최장 기간이었다(Fig. 4).

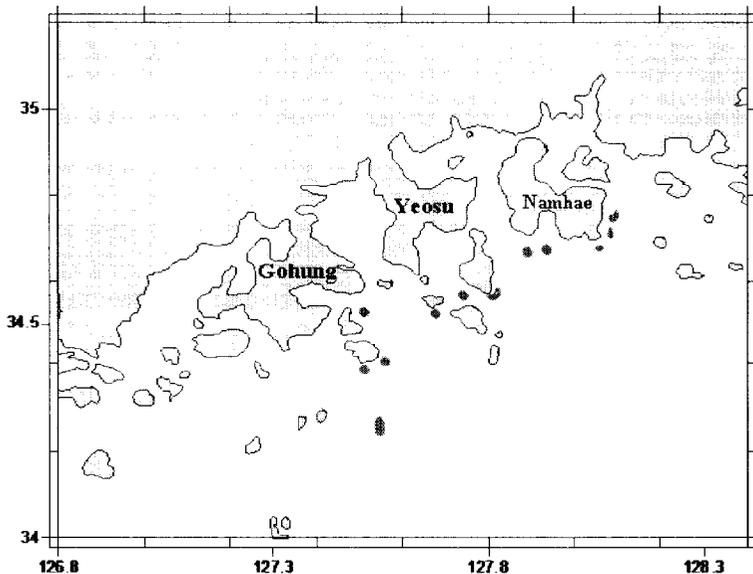


Fig. 3. Location of the first observation area of *C. polykrikoides* bloom in the South Sea of Korea at August 13, 2003.

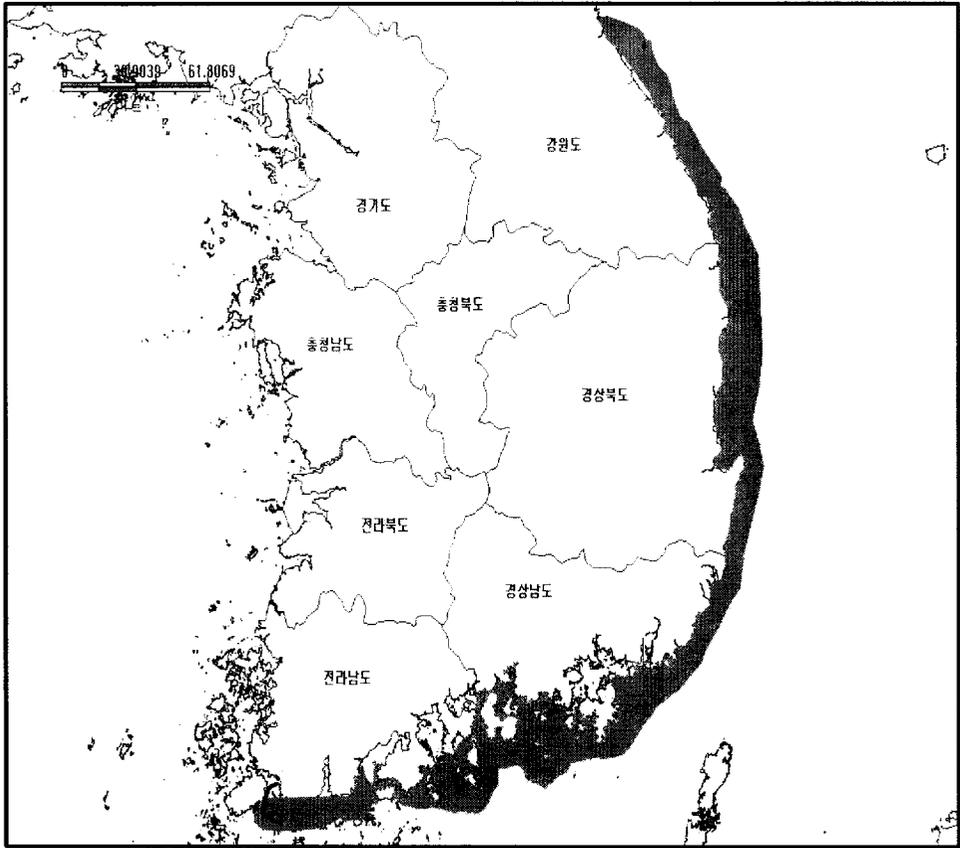


Fig. 4. Distribution of *C. polykrikoides* bloom in the South Sea of Korea at 2003.

2. *C. polykrikoides* 영양세포

2003년 *C. polykrikoides* 적조 초기발생전인 7월 14일에서 18일, 7월 28일에서 8월 2일의 관측을 통해 외해역인 정점 17에서 각각 최고 출현량인 0.3 cells/mL, 5.8 cells/mL 밀도의 *C. polykrikoides* 영양세포를 표층에서 발견하였다(Fig. 5a, b). 최초 적조 발생일인 8월 13일 이후인 8월 18일에서 23일의 관측에서는 나로도 안쪽 북돌바다해역인 정점 10에서 최고 출현량인 5,160 cells/mL의 *C. polykrikoides* 영양세포가 관찰되었다(Fig. 5c). 9월 2일에서 6일과 9월 23일에서 27일의 관측에서는 남해도 남동해역인 정점 3에서 최고 출현량인 840 cells/mL과 6,600 cells/mL의 *C. polykrikoides* 영양세포가 관찰되었다(Fig. 5d, e). 적조소멸기인 10월 6일에서 10일의 관측에서는 사랑도 남쪽해역인 정점 2에서 최고 출현량인 600 cells/mL의 *C. polykrikoides* 영양세포가 관찰되었다(Fig. 5f).

8월 13일 최초 *C. polykrikoides* 적조발생기 전후의 외해역(Fig. 1, 정점 12, 14, 15, 16, 17)과 연안역(Fig. 1, 정점 1, 2, 3, 6, 7)의 규조류와 와편모조류 종조성비를 비교하였다(Fig. 6). 외해역은 *C. polykrikoides* 적조발생전인 7월 14일에서 18일, 7월 28일에서 8월 2일의 관측에서도 이미 와편모조류에 의한 우점을 보이고 있었으며, 연안역에서는 *C. polykrikoides* 적조발생 전에는 규조류에 의한 우점을 보였으나 발생 후에는 와편모조류가 우점하였다.

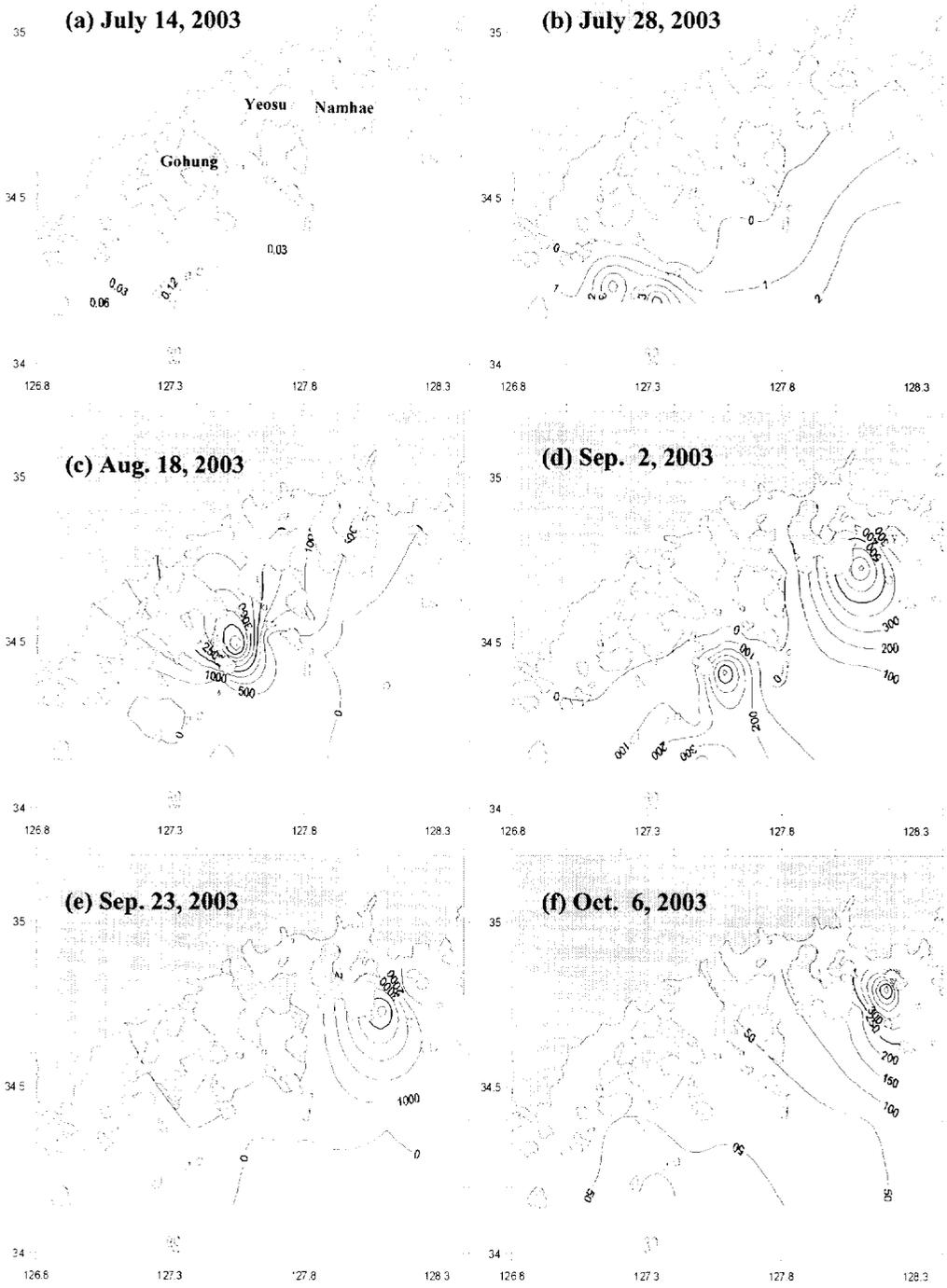


Fig. 5. Horizontal distributions of *C. polykrikoides* at the surface area (cells/mL).

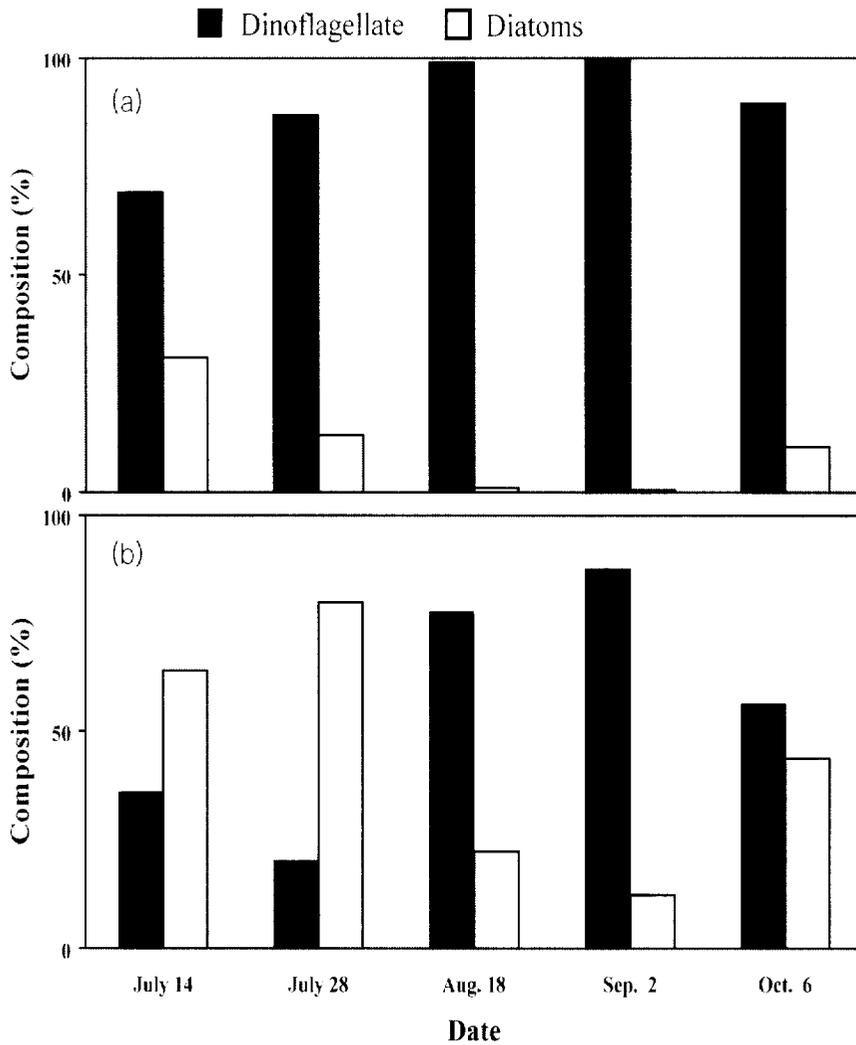


Fig. 6. Comparison of diatoms and dinoflagellates ratio during the initial HAB stage of *C. polykrikoides* at Stns 1, 2, 3, 6 and 7 (b) and Stns 12, 14, 15, 16 and 17 (a).

3. 광합성 색소(Chlorophyll *a*)

Chlorophyll *a*의 표층 수평분포를 보면, 7월 14일에서 18일에는 외해역에 비해 연안역인 통영연안에서 높은 값을 보였고, 정점 1에서 최대값인 0.637 $\mu\text{g/L}$, 정점 20에서 최소값인 0.152 $\mu\text{g/L}$, 평균 0.326 $\mu\text{g/L}$ 값을 보였다(Fig. 7a). 7월 28일에서 8월 2일에는 외해역에 비해 연안역인 광양만 입구에서 높은 값을 보였고, 정점 7에서 최대값인 1.815 $\mu\text{g/L}$, 정점 1에서 최소값인 0.060 $\mu\text{g/L}$, 평균 0.266 $\mu\text{g/L}$ 값을 보였다(Fig. 7b). 적조 발생 후인 8월 18일에서 23일에 적조 발생지역을 중심으로 높은 값을 보였고, 정점 15에서 최대값인 0.836 $\mu\text{g/L}$, 정점 17에서 최소값인 0.047 $\mu\text{g/L}$, 평균 0.263 $\mu\text{g/L}$ 값을 보였다(Fig. 7c).

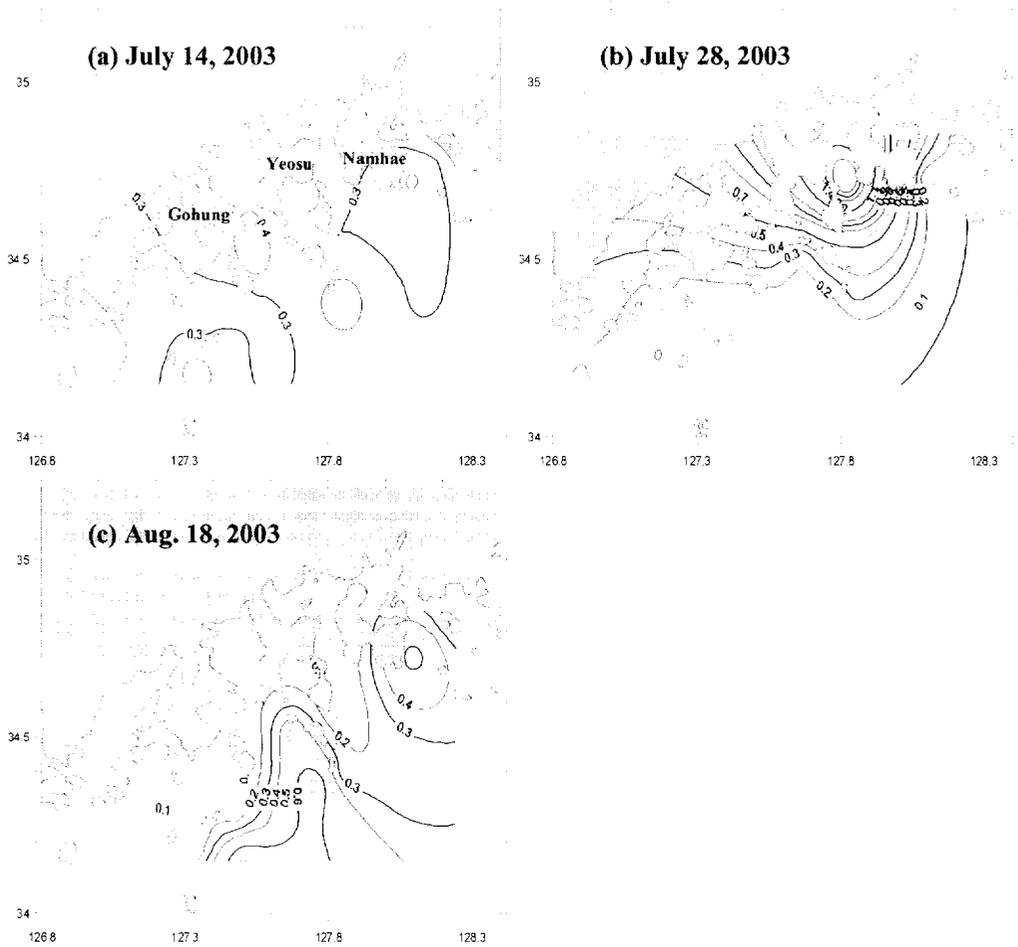


Fig. 7. Horizontal distributions of chlorophyll *a* ($\mu\text{g/L}$) at the surface area.

4. 투명도

투명도 수평분포를 보면, 연안역에 비해 외해역의 투명도가 높았다. 7월 14일에서 18일과 7월 28일에서 8월 2일에는 각각 정점 4 에서 최대값인 5.5 m, 9.5 m 정점 7에서 최소값인 1.2 m, 1 m, 평균 2.7 m, 4.5 m를 보였다 (Fig. 8a, b). 8월 18일에서 23일에는 정점 20 에서 최대 값인 11 m, 정점 7에서 최소값인 2 m, 평균 5 m를 보였다(Fig. 8c). 9월 2일에서 6일에 정점 5 에서 최대값인 11 m, 정점 2에서 최소값인 1.5 m, 평균 4.9 m를 보였다 (Fig. 8d). 9월 23일에서 27일에는 정점 4 에서 최대값인 11 m, 정점 19에서 최소값인 1.5 m, 평균 5.8 m를 보였다(Fig. 8e). 10월 6일에서 10일에 정점 4 에서 최대값인 9.5 m, 정점 11에서 최소값인 1.5 m, 평균 4.5 m를 보였다(Fig. 8f).

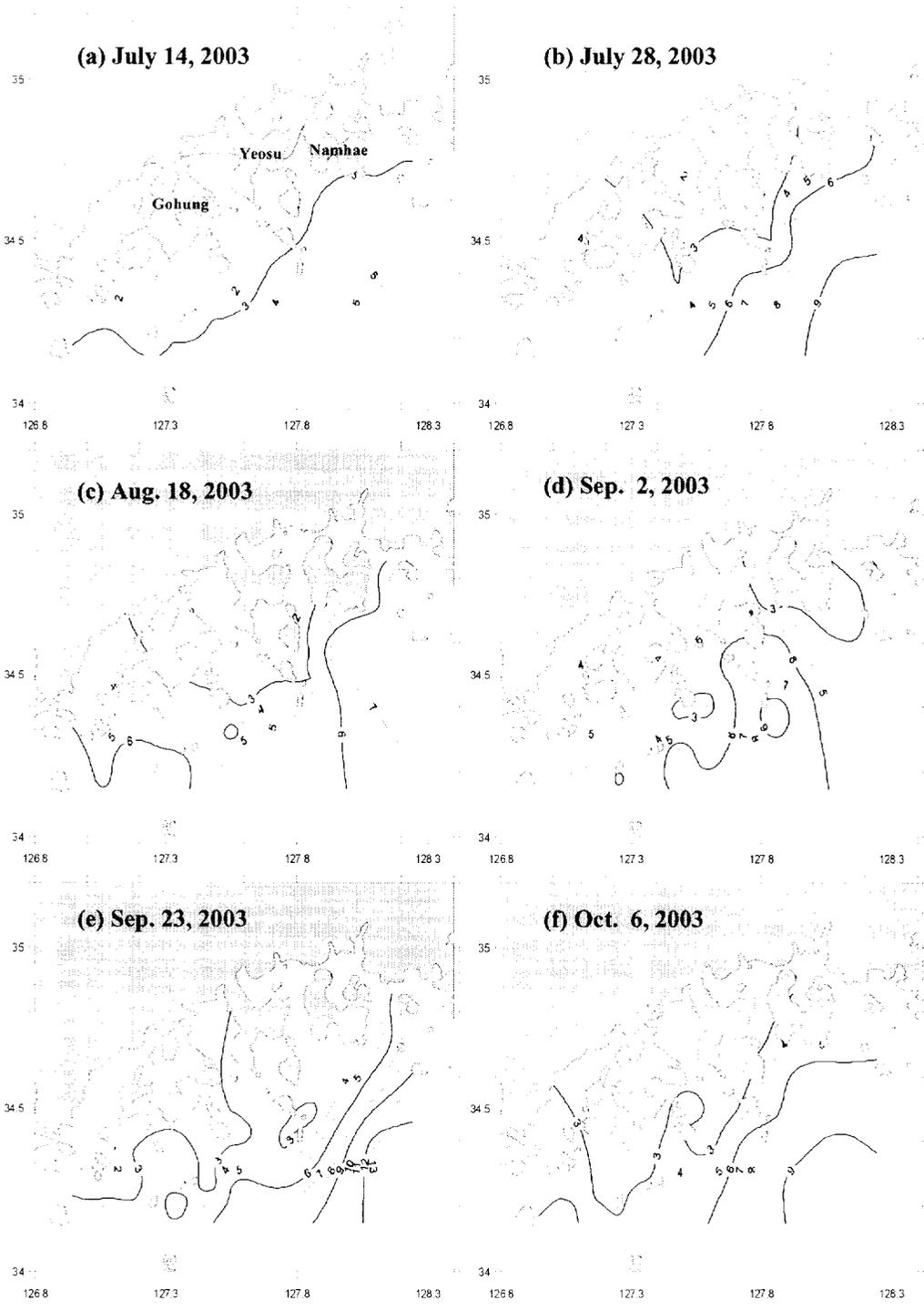


Fig. 8. Horizontal distributions of transparency (m) at the surface area.

5. 수온 및 염분

표층 평균수온은 7월 14일에서 18일에 17.92℃, 8월 18일에서 23일에 22.88℃까지 상승한 후 10월 6일에서 10일에 20.24℃로 낮아졌다. 표층 평균염분은 7월 14일에서 18일에 20.57 psu에서 7월 28일에서 8월 2일에 25.72 psu로 상승하다가 8월 18일에서 23일에 23.10 psu로 낮아진 후 9월 23일에서 27일에 27.31 psu이었다. 표층 평균수온과 표층 평균염분의 변화폭은 각각 4.96℃ 와 6.74 psu이었다. 저층 평균수온은 7월 14일에서 18일과 7월 28일에서 8월 2일에 15.13℃에서 9월 23일에서 27일에 19.72℃까지 상승한 후 10월 6일에서 10일에 14.24℃로 낮아졌고, 저층 평균염분은 7월 14일에서 18일에 22.30 psu에서 8월 18일에서 23일에 17.34 psu로 낮아진 후 9월 23일에서 27일에 25.32 psu를 기록했다. 저층 평균수온과 저층 평균염분의 변화폭은 각각 5.8℃ 와 7.98 psu이었다(Fig. 9, Table 1).

표층수온의 공간적인 분포는 적조발생전인 7월 14일에서 18일에 최대 21.03℃, 최소 18.29℃, 평균 19.66℃ (Fig. 10a), 7월 28일에서 8월 2일에 최대 23.47℃, 최소 21.28℃, 평균 22.37℃ (Fig. 10b)를 나타냈으며, 연안에 비해 상대적으로 외해쪽이 높았다. 적조발생후인 8월 18일에서 23일에 최대 27.23℃, 최소 23.08℃, 평균 25.16℃ (Fig. 10c), 9월 2일에서 6일에 최대 26.15℃, 최소 22.59℃, 평균 24.37℃ (Fig. 10d)를 나타냈으며, 외해에 비해 연안쪽이 상대적으로 높았다. 그리고 태풍 “매미” 발생 후, 적조 사멸기인 9월 23일에서 27일에 최대 22.74℃, 최소 21.70℃, 평균 22.22℃ (Fig. 10e), 10월 6일에서 10일에 최대 21.94℃, 최소 20.27℃, 평균 21.12℃ (Fig. 10f)를 나타냈으며, 연안쪽의 수온이 상대적으로 높았다.

표층염분의 공간적인 분포는 적조발생전인 7월 14일에서 18일에 최대 32.68 psu, 최소 20.57 psu, 평균 26.63 psu (Fig. 11a), 7월 28일에서 8월 2일에 최대 31.97 psu, 최소 25.72 psu, 평균 28.84 psu (Fig. 11b)를 나타냈다. 적조발생후인 8월 18일에서 23일에 최대 31.58 psu, 최소 25.62 psu, 평

균 28.60 psu (Fig. 11c), 9월 2일에서 6일에 최대 31.82 psu, 최소 26.46 psu, 평균 29.14 psu (Fig. 11d)를 나타냈다. 태풍 “매미” 발생 후, 적조 사멸기인 9월 23일에서 27일에 최대 31.37 psu, 최소 27.31 psu, 평균 29.34 psu (Fig. 11e), 10월 6일에서 10일에 최대 31.44 psu, 최소 29.46 psu, 평균 30.45 psu (Fig. 11f)를 나타냈다. 관측전시기에 걸쳐 연안이 외해에 비해 상대적으로 낮은 값인 24~28 psu를 보였으며 외해에서는 30~32 psu의 값을 나타내었다. 수온과 염분의 수직적 변화를 살펴보면 7월 14일에서 18일에 나로도와 소리도 사이 정점 5, 4 에서 약한 수온성층을 형성하였고, 외해역인 정점 2 에서 수온 19℃, 염분 32~33 psu 의 해수가 표층에서 수심 20 m까지 분포하였다(Figs 12a, 13a). 8월 18일에서 23일에 수온은 표층에서 저층까지 안정적인 성층구조를 보였고, 외해역인 정점 1, 2, 3, 4 에서 염분 31~32 psu의 해수가 표층에서 수심 25 m 까지 분포하였다(Figs 12b, 13b). 9월 2일에서 6일에 수온은 표층에서 저층까지 안정적인 성층구조를 보였고, 수심 15 m이하에서 염분 32 psu이상의 해수가 안정적인 구조를 보였으나 15 m이상의 수심에서는 정점 3 표층에서 19 psu이하의 저염수가 수심 5 m이상의 표층에서 발견되었으며, 정점 1 에서는 염분 31~32 psu의 해수가 표층에서 수심 15 m까지 분포하였다(Figs 12c, 13c). 9월 23일에서 27일에 수온 22℃, 염분 31 psu전후로 수층 전체가 균질화되는 특징을 보였다(Figs 12d, 13d). 10월 6일에서 10일에 수온은 수온 21℃, 염분 31 psu전후로 수층 전체가 균질화되었다(Figs 12e, 13e).

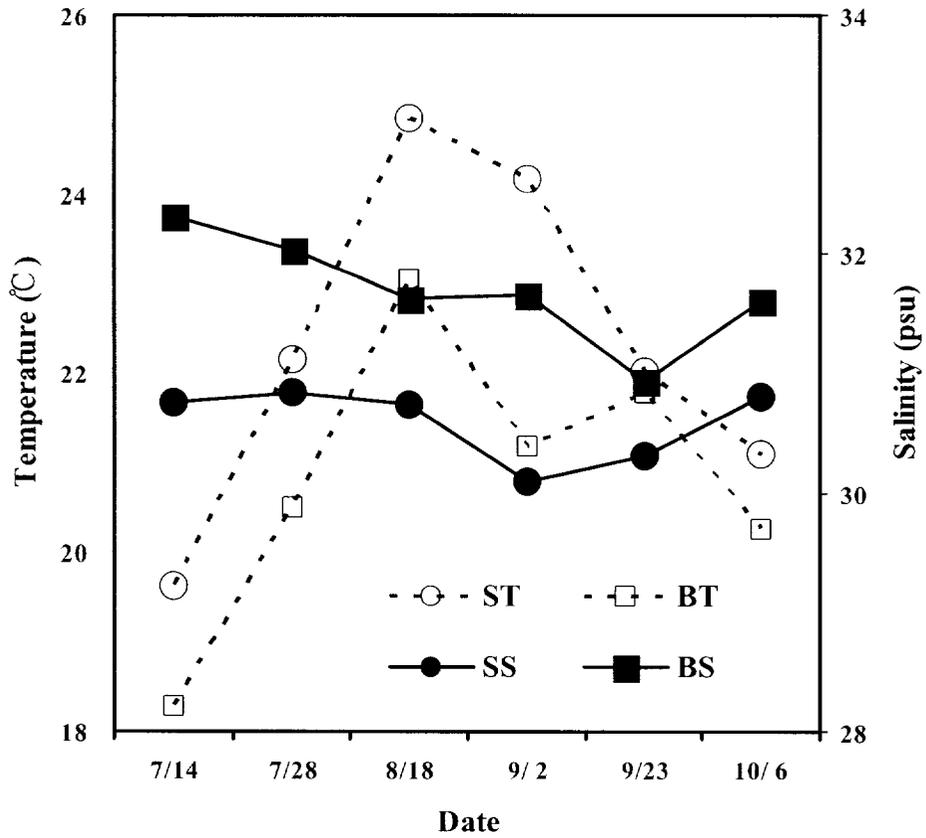


Fig. 9. Spatially average temperature ($^{\circ}\text{C}$) and salinity (psu) for total stations.

ST : Surface temperature, BT : Bottom temperature,
 SS : Surface salinity, BS : Bottom salinity.

Table 1. Ranges of temperature and salinity observed at surface and bottom of 20 stations. T_m and S_m are spatial average of temperature and salinity for 20 stations. S and B denote surface and bottom

Date	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)			Salinity (psu)			
	Min.	Max.	T_m	Min.	Max.	S_m	
July 14	S	19.63	21.03	17.92	30.75	32.87	20.57
	B	18.29	20.56	15.13	32.32	34.56	22.30
July 28	S	22.16	23.47	20.75	30.83	32.07	25.72
	B	20.51	22.73	15.47	32.04	35.52	21.49
Aug. 18	S	24.86	27.23	22.88	30.74	31.90	23.10
	B	23.05	25.46	16.33	31.62	35.57	17.34
Sep. 2	S	24.18	26.15	21.41	30.09	31.74	23.00
	B	21.18	25.42	13.92	31.66	38.40	19.09
Sep. 23	S	22.02	22.74	21.53	30.31	31.62	27.31
	B	21.77	22.70	19.72	30.93	32.50	21.27
Oct. 6	S	21.10	22.09	20.24	30.80	31.63	26.90
	B	20.27	21.85	14.24	31.60	35.61	25.32

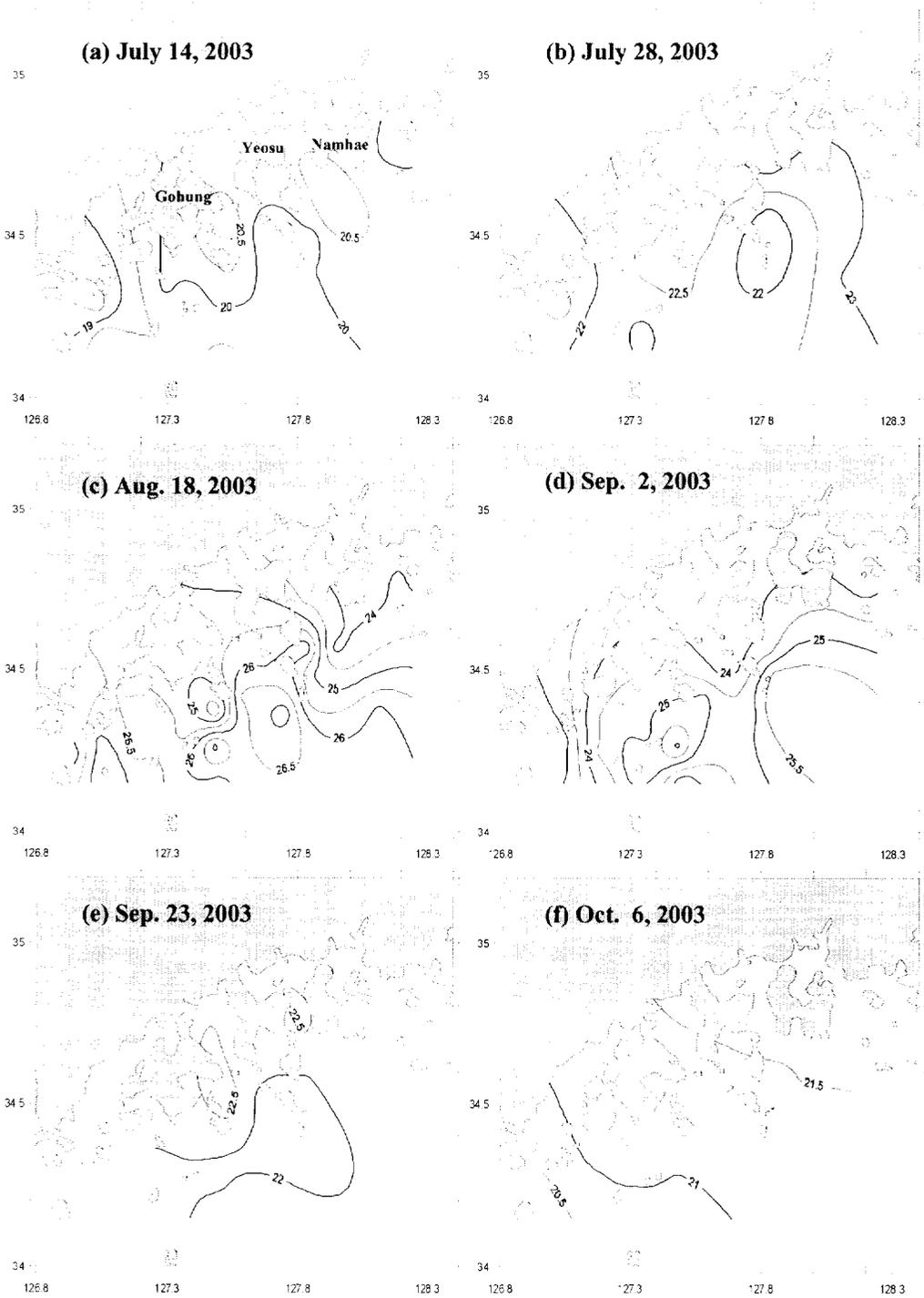


Fig. 10. Horizontal distributions of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at the surface area.

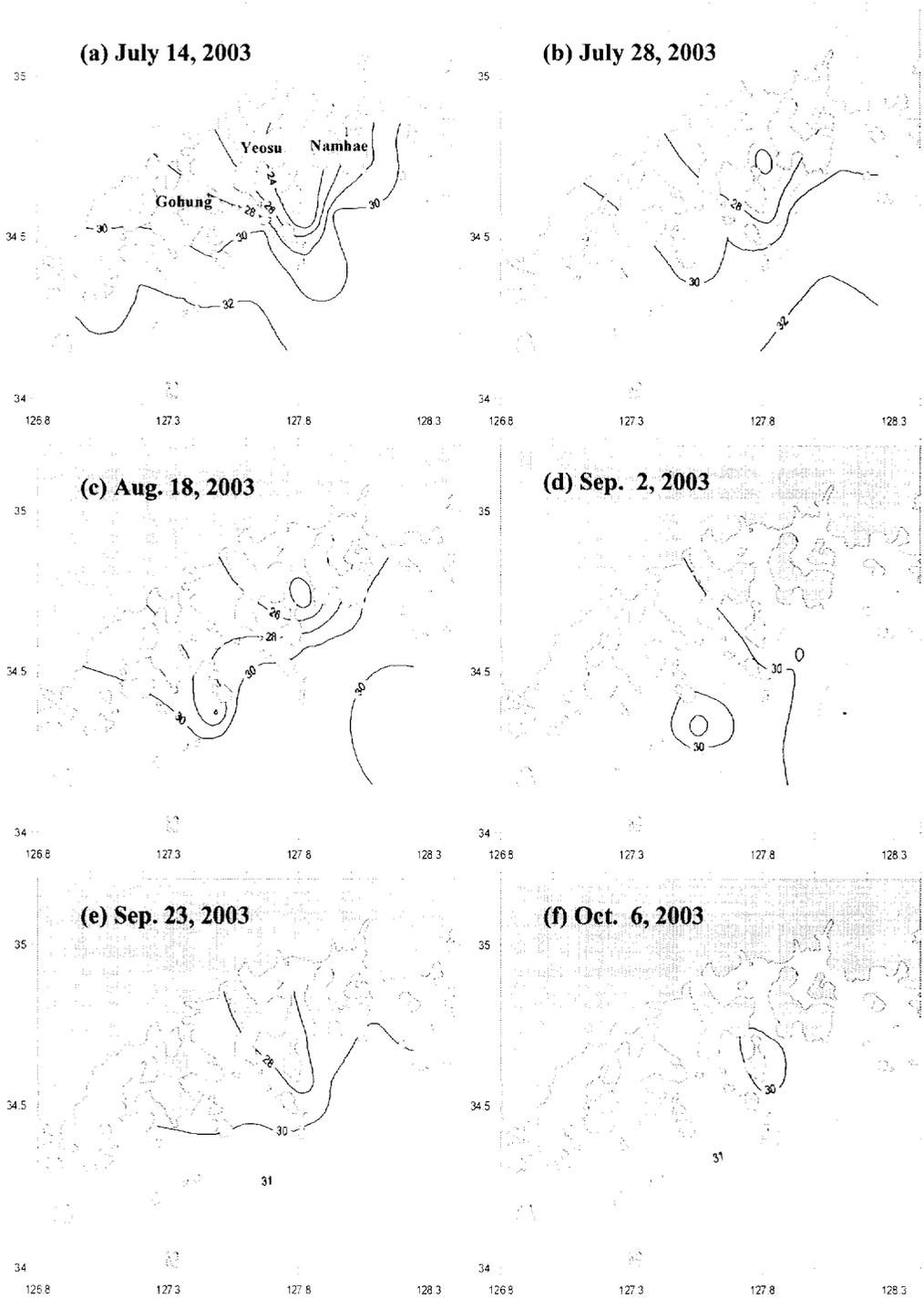


Fig. 11. Horizontal distributions of salinity (psu) at the surface area.

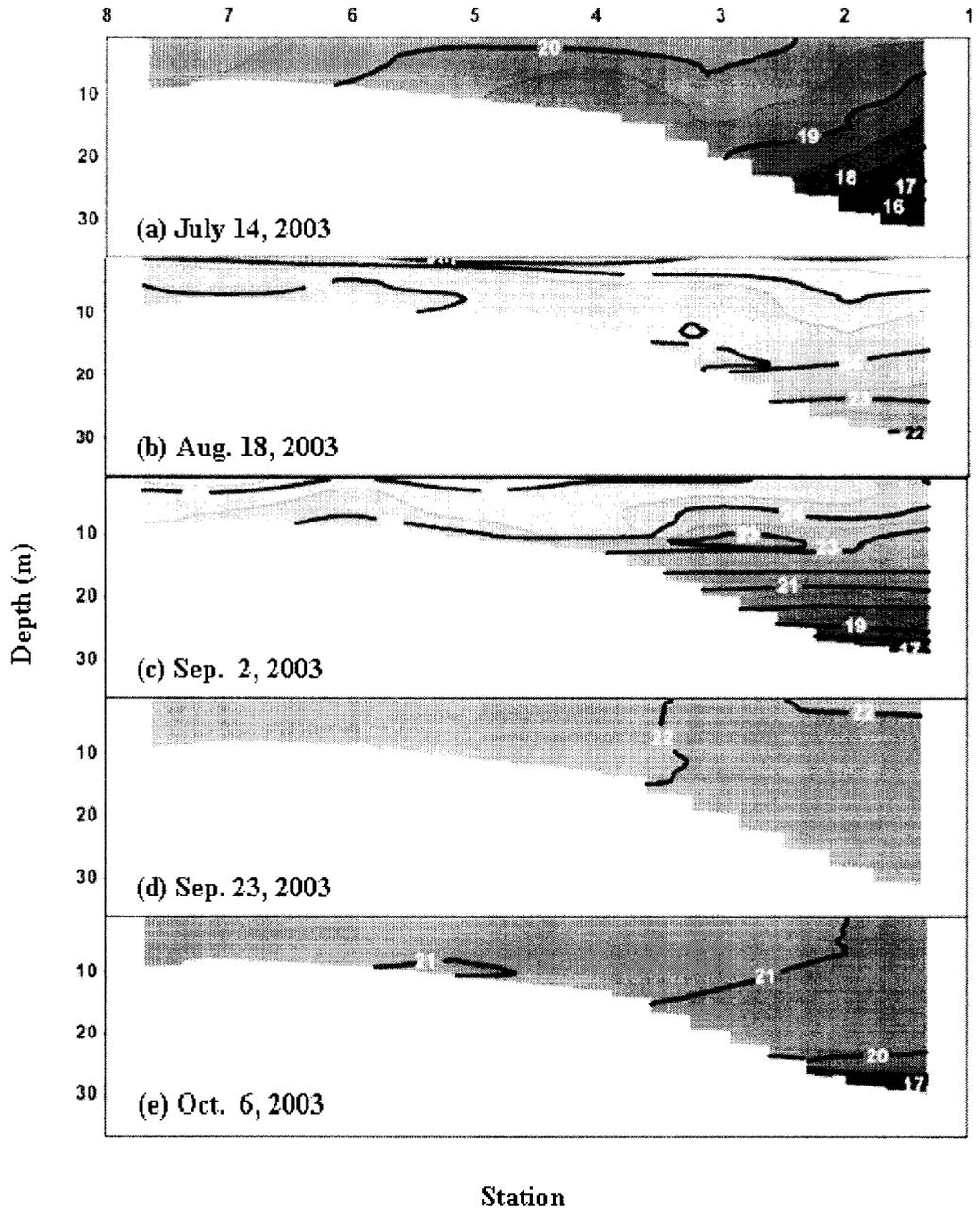


Fig. 12. Vertical distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) during observation period.

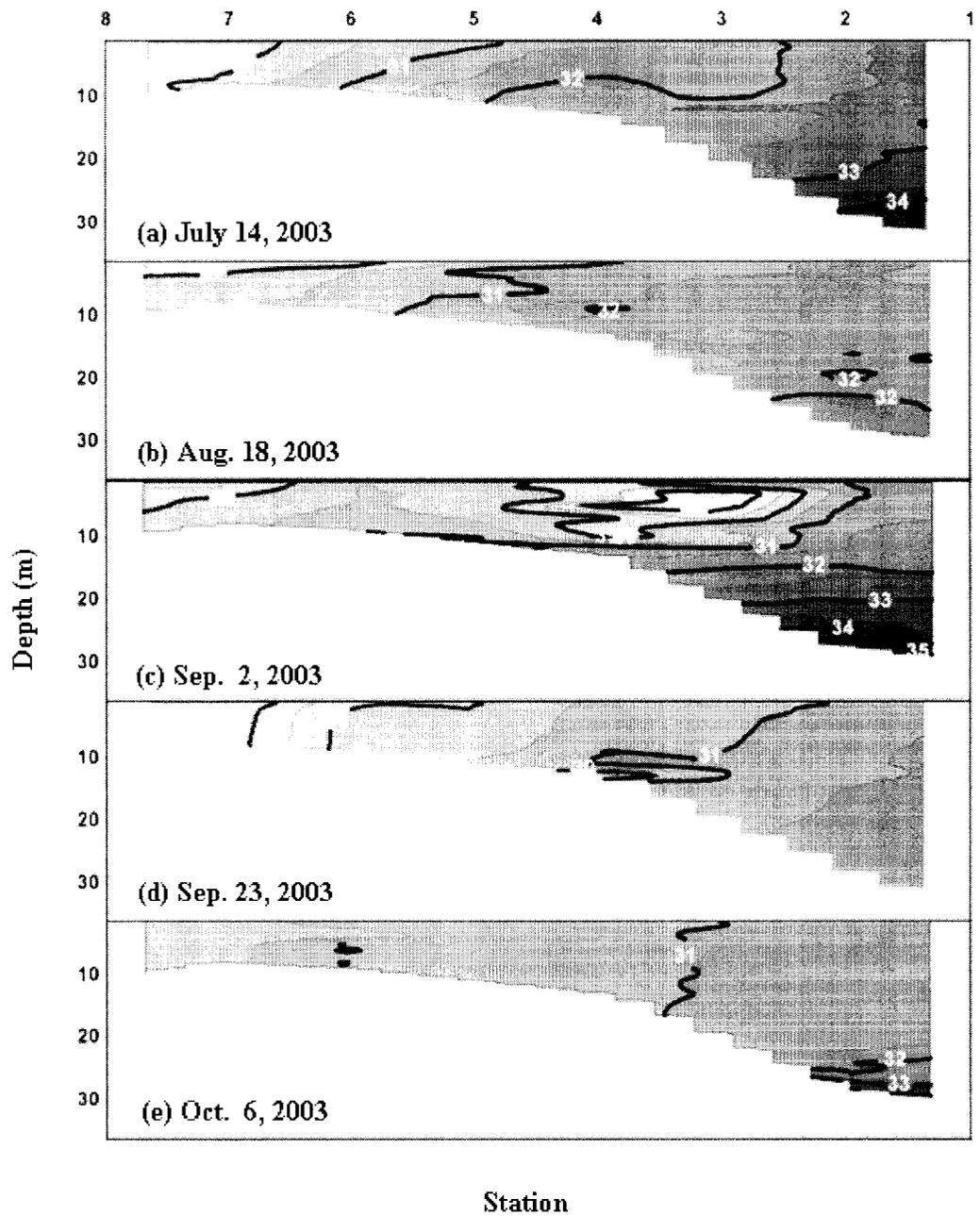


Fig. 13. Vertical distribution of salinity (psu) during observation period.

6. 영양염류

영양염류의 표층 수평분포를 보면, 아질산 질소(NO_2^- -N)의 경우 7월 14일에서 18일에 남해도 동측과 외나로도 남서쪽 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $1.42 \mu\text{M}$, 최소 $0.08 \mu\text{M}$, 평균 $0.57 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 14a). 7월 28일에서 8월 2일에 사랑도 서쪽 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $0.21 \mu\text{M}$, 최소 $0.04 \mu\text{M}$, 평균 $0.08 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 14b). 8월 18일에서 23일에 남해도 동측과 외나로도 남서쪽 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $1.42 \mu\text{M}$, 최소 $0.08 \mu\text{M}$, 평균 $0.57 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 14c). 9월 2일에서 6일에 소리도 동측과 사랑도 남서쪽 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $3.22 \mu\text{M}$, 최소 $0.01 \mu\text{M}$, 평균 $0.54 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 14d). 9월 23일에서 27일에 거금도 서측 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $0.12 \mu\text{M}$, 최소 $0.04 \mu\text{M}$, 평균 $0.06 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 14e). 10월 6일에서 10일에 남해도 외해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $0.25 \mu\text{M}$, 최소 $0.03 \mu\text{M}$, 평균 $0.08 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 14f).

질산 질소(NO_3^- -N)의 경우 7월 14일에서 18일에 남해도 남쪽 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $17.07 \mu\text{M}$, 최소 $1.02 \mu\text{M}$, 평균 $6.48 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 15a). 7월 28일에서 8월 2일에 여수 광양만 입구 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $3.09 \mu\text{M}$, 최소 $0.17 \mu\text{M}$, 평균 $0.73 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 15b). 8월 18일에서 23일에 여수 광양만 입구 해역에서 높은 값을 보였으며 최대 $6.45 \mu\text{M}$, 최소 $0.19 \mu\text{M}$, 평균 $1.13 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 15c). 9월 2일에서 6일에 여수앞 광양만 입구에서 높은 농도를 보였으며 최대 $6.15 \mu\text{M}$, 최소 $0.12 \mu\text{M}$, 평균 $1.28 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 15d). 9월 23일에서 27일에 전반적으로 고른 분포를 보였으나 거금도와 세존도에서 다소 높은 농도를 보였으며 최대 $1.66 \mu\text{M}$, 최소 0.50 , 평균 $0.84 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 15e). 10월 6일에서 10일에 전반적으로 고른 분포를 보였으나 외나로도 남쪽 해역과 세존도에서 다소 높은 농도를 보였으며 최대 3.46

μM , 최소 $0.64 \mu\text{M}$, 평균 $1.18 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 15f).

암모니아 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$)의 경우 7월 14일에서 18일에 연안역 정점에 비해 외해역 정점에서 높은 값을 보였고, 최대 $38.41 \mu\text{M}$, 최소 $2.24 \mu\text{M}$, 평균 $19.55 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 16a). 7월 28일에서 8월 2일에 연안과 외해에서 전반적으로 고른 분포를 보였으며 최대 $1.88 \mu\text{M}$, 최소 $0.25 \mu\text{M}$, 평균 $0.99 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 16b). 8월 18일에서 23일에 외해에 비해 연안에서 높은 농도를 보였으며 최대 $5.44 \mu\text{M}$, 최소 $0.04 \mu\text{M}$, 평균 $1.70 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 16c). 9월 2일에서 6일에 외해에서 높은 농도를 보였으며 최대 $35.71 \mu\text{M}$, 최소 $18.62 \mu\text{M}$, 평균 $32.34 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 16d). 9월 23일에서 27일에 전반적으로 고른 분포를 보였으나 소리도 남서 해역에서 다소 높은 농도를 보였으며 최대 $17.53 \mu\text{M}$, 최소 $0.75 \mu\text{M}$, 평균 $4.42 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 16e). 10월 6일에서 10일에 전반적으로 고른 분포를 보였으나 외나로도 남쪽 외해에서 다소 높은 농도를 보였으며 최대 $68.12 \mu\text{M}$, 최소 $0.69 \mu\text{M}$, 평균 $11.12 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 16f).

인산 인($\text{PO}_4^{2-}\text{-P}$)의 경우 7월 14일에서 18일에 외해역 정점에 비해 연안역 정점에서 높은 값을 보였고, 최대 $0.43 \mu\text{M}$, 최소 $0.0089 \mu\text{M}$, 평균 $0.07 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 17a). 7월 28일에서 8월 2일에 외해역인 정점 15에서 최대 $5.59 \mu\text{M}$ 를 보였고, 나머지 해역에서는 $0.5 \mu\text{M}$ 이하 평균 $0.36 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 17b). 8월 18일에서 23일에 광양만 입구해역에서 높은 농도를 보였으며 최대 $0.20 \mu\text{M}$, 최소 $0.02 \mu\text{M}$, 평균 $0.06 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 17c). 9월 2일에서 6일에 과양만 입구와 사랑도 해역에서 높은 농도를 보였으며 최대 $0.62 \mu\text{M}$, 최소 $0.12 \mu\text{M}$, 평균 $0.18 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 17d). 9월 23일에서 27일과 10월 6일에서 10일에 전해역에 걸쳐 낮은 농도를 나타냈으며, 거금도 해역에서 다소 높은 농도를 보였으며 각각 최대 $0.14 \mu\text{M}$, $0.09 \mu\text{M}$, 최소 $0.002 \mu\text{M}$, $0.003 \mu\text{M}$, 평균 $0.03 \mu\text{M}$, $0.03 \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 17e, Fig. 17f).

규산 규소($\text{SiO}_2\text{-Si}$)의 경우 7월 14일에서 18일에 남해도 동쪽 해역에서 높은 값을 보였고, 최대 $85.22\ \mu\text{M}$, 최소 $26.35\ \mu\text{M}$, 평균 $48.39\ \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 18a). 7월 28일에서 8월 2일에 나로도 와 소리도 사이 해역에서 높은 농도를 보였으며, 최대 $70.48\ \mu\text{M}$, 최소 $18.33\ \mu\text{M}$, 평균 $44.12\ \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 18b). 8월 18일에서 23일에 광양만 입구 해역에서 높은 농도를 보였으며 최대 $91.26\ \mu\text{M}$, 최소 $35.67\ \mu\text{M}$, 평균 $57.77\ \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 18c). 9월 2일에서 6일에 돌산도 서쪽 해역에서 높은 농도를 보였으며 최대 $94.68\ \mu\text{M}$, 최소 $14.15\ \mu\text{M}$, 평균 $43.21\ \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 18d). 9월 23일에서 27일에 사랑도 남서 해역에서 다소 높은 농도를 보였으며 최대 $59.13\ \mu\text{M}$, 최소 $36.18\ \mu\text{M}$, 평균 $45.42\ \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 18e). 10월 6일에서 10일에 광양만 입구 해역에서 다소 높은 농도를 보였으며 최대 $64.60\ \mu\text{M}$, 최소 $33.28\ \mu\text{M}$, 평균 $50.34\ \mu\text{M}$ 값을 보였다(Fig. 18f).

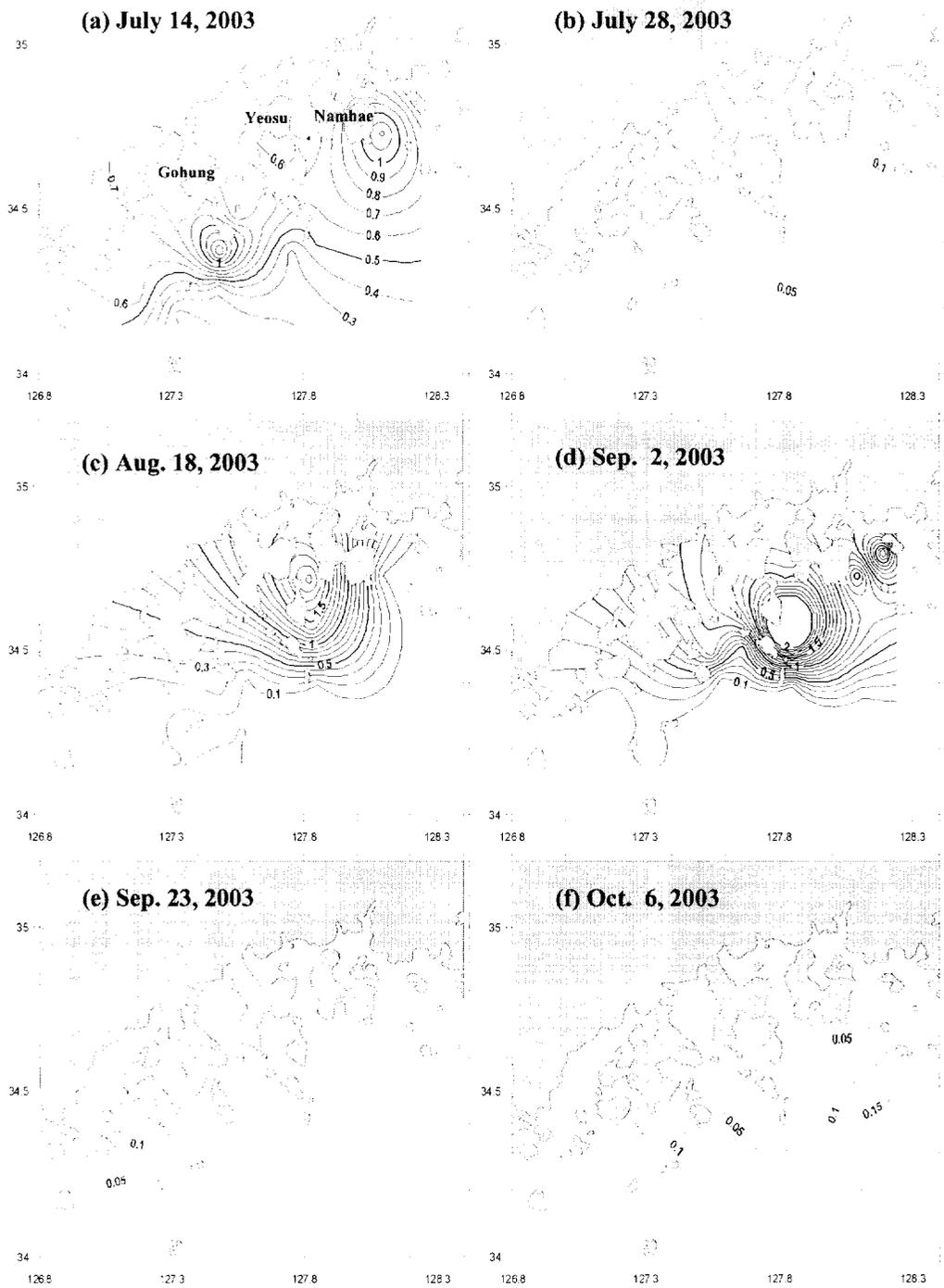


Fig. 14. Horizontal distributions of nitrite (μM) at the surface water.

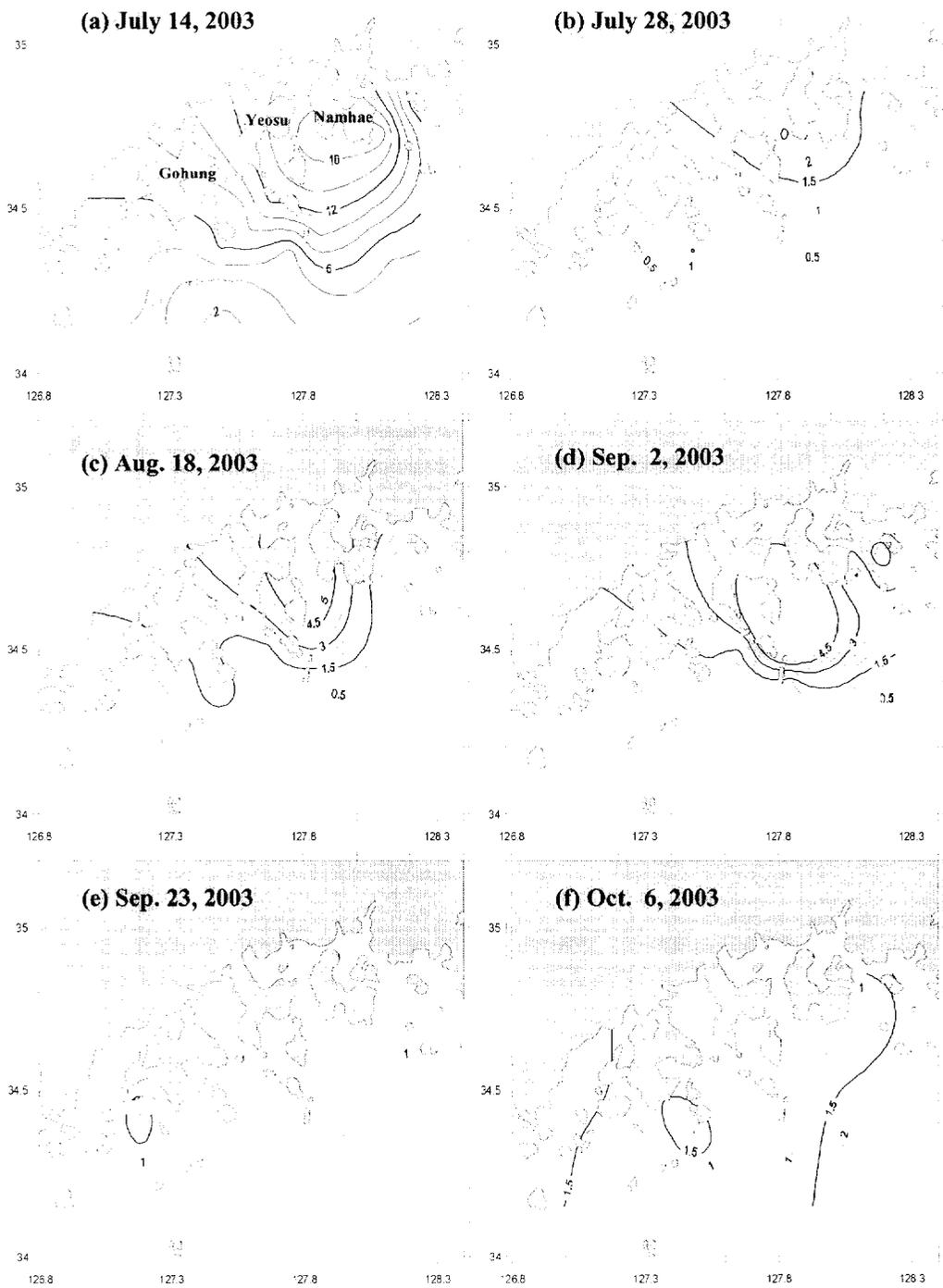


Fig. 15. Horizontal distributions of nitrate (μM) at the surface water.

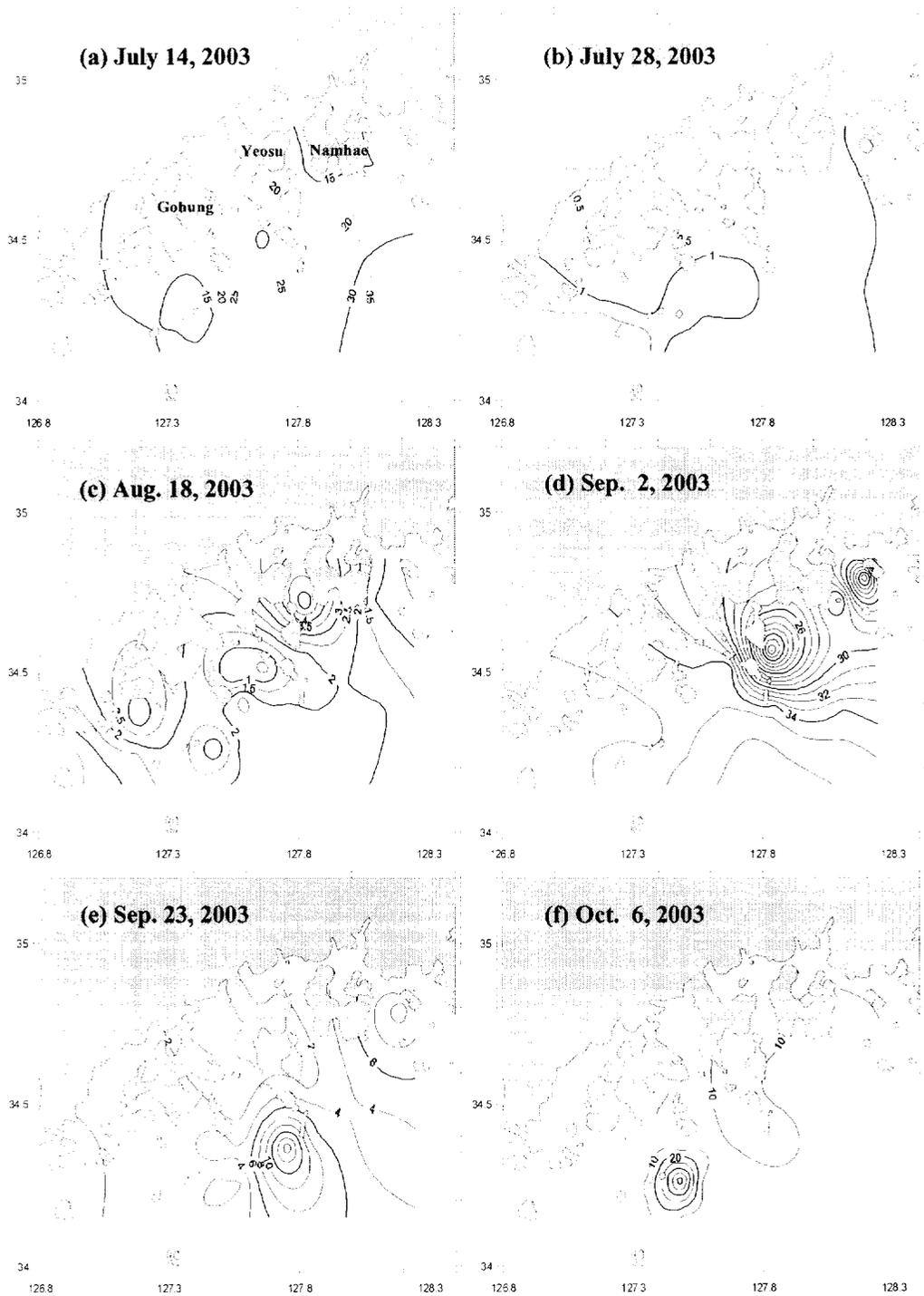


Fig. 16. Horizontal distributions of ammonium (μM) at the surface water.

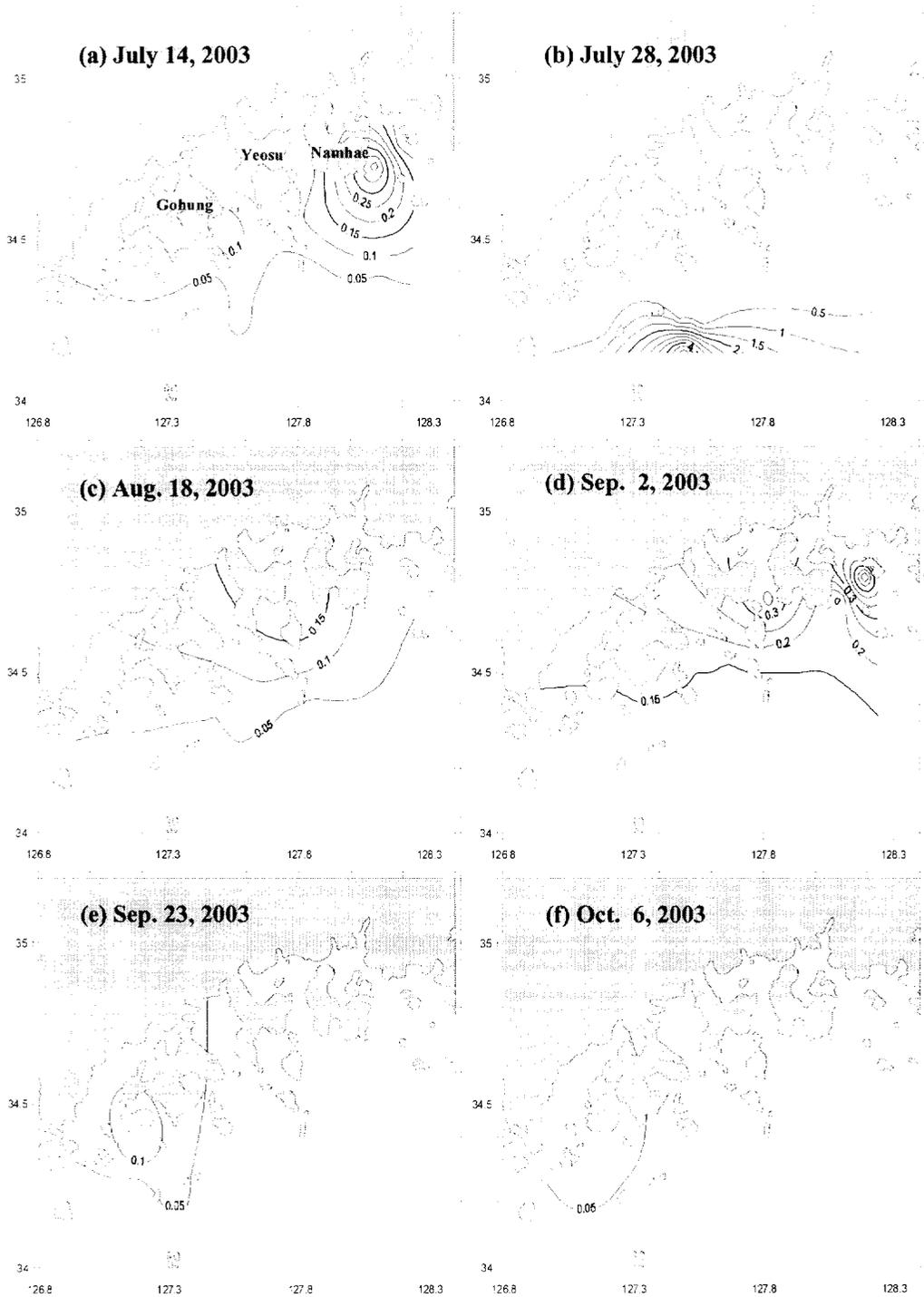


Fig. 17. Horizontal distributions of phosphate (μM) at the surface water.

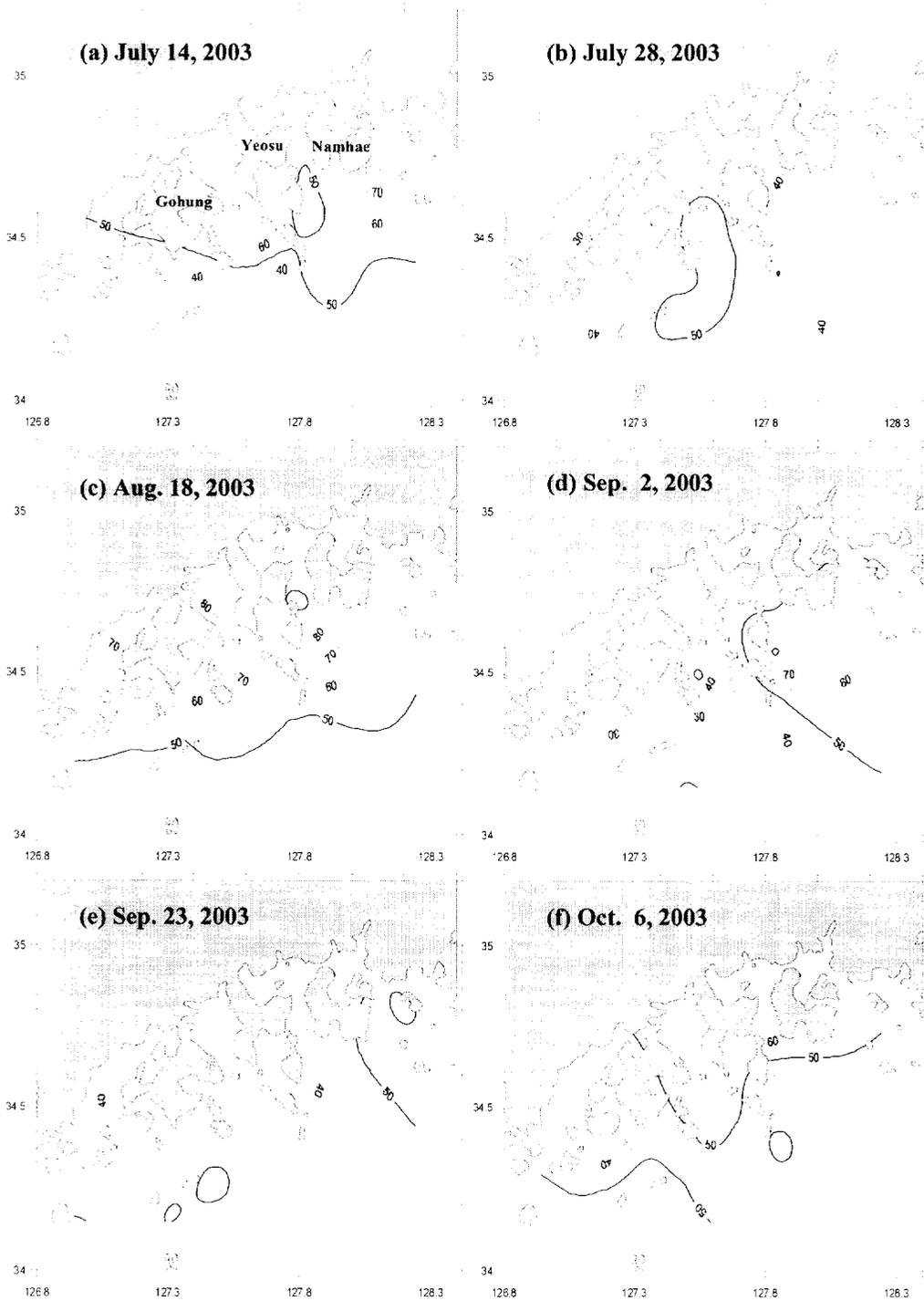


Fig. 18. Horizontal distributions of silicate (μM) at the surface water.

V. 고 찰

7월 14일에서 18일까지의 조사에서 *C. polykrikoides* 영양세포는 나로도 남쪽 외해정점(정점 14, 15, 16, 17)에서 많이 출현하였다. 이때 수온 19~20℃, 염분농도 32.00~32.68 psu 이었다. 이는 *C. polykrikoides* 영양세포의 최적 성장 온도(25℃)와 염분농도(40 psu) 보다는 낮지만 성장 가능 온도(16~31℃)와 염분농도(15~40 psu) 범위 내였다(김 등, 2001). 그리고 돌산도 동부해역 정점 5, 6, 7 에서 염분의 급격한 경도를 보였는데 이는 강수에 의한 영향으로 보인다. 수중내 생물량의 지표인 Chlorophyll *a* 는 외해역에 비해 연안역 정점 1에서 최고값을 보였는데 이는 *C. polykrikoides* 영양세포에 의한 것보다는 연안역의 우점종인 규조류가 원인 것으로 추측된다. 영양염류 분포를 보면 나로도 와 소리도 사이 북돌알 바다해역에서 암모니아 질소 농도가 23.83~32.04 μM 로 다른 조사 정점에 비해 높게 나타났다. 이는 조사전 7월 11일에서 13일에 여수지방에 내린 91 mm 의 강수량에 의해 가막만과 여자만에서 유입된 영양염류의 영향으로 추측된다. 초기 *C. polykrikoides* 영양세포 발견정점과 미발견정점간의 영양염류 분포 차이를 살펴보면, 모든 영양염류의 양은 미발견정점에서 높으나 N:P 비는 발견지역에서 높음을 보여주고 있다. 하지만, 각 영양염의 절대적인 농도가 높아 어떠한 영양염도 *C. polykrikoides* 성장에 제한요인으로서는 작용하지 않았다(김 등, 2001a, 2001b).

7월 28일에서 8월 2일까지의 조사에서 *C. polykrikoides* 영양세포 출현은 아직 나로도 남쪽 외해 정점 14, 16, 17 과 세존도 부근 정점 4 에서 많이 출현하였다. 이때 수온 21.64~22.50℃, 염분 30.78~31.78 psu 였다. Chlorophyll *a* 량은 *C. polykrikoides* 영양세포 발견 지역이 평균 0.444 μg/L로 미발견 지역의 0.195보다 높았다. 투명도는 *C. polykrikoides* 영양

세포 발견 지역이 평균 4.9 m, 미발견 지역이 평균 3.5 m 였고, Chlorophyll *a* 와 역상관을 보였다. 이는 환경변화로 인해 종천이가 이루어지고 있는 것으로 판단된다(임 등, 2003). 영양염류의 경우 전조사에 비해 전체 평균 질소량은 많이 감소하였다. 그중 암모니아 질소는 평균 19.55 μM 에서 0.10 μM 로 크게 감소하였다. 이는 전 조사시기(7월 14일에서 18일)에 비해 적은 강수량과 수중 식물플랑크톤이 소비에 의한 것으로 추측된다. 그리고 인산 인의 경우 0.07 μM 에서 0.36 μM 로 소폭 증가 하였는데 질소에 비해 낮은 영양염 요구량 때문인 것일 생각된다(김 등, 2001a, 2001b). 그리고 규산 규소의 경우도 전체 평균 농도는 48.39 μM 에서 44.12 μM 로 소폭 감소하였는데 연안역 정점에서는 감소를 보인 반면 외해역 정점에서는 증가하는 경향을 보였다. 이는 연안역은 우점종인 규조류에 의한 소비가 이루어진 반면 외해역은 와편모조류가 우점하여 소비가 이루어지지 않은 것으로 보인다.

8월 13일 *C. polykrikoides* 첫 적조 발생이후 8월 18일에서 23일까지의 조사에서 나로도와 소리도사이 붓돌앞바다 해역정점 8, 9, 10, 11 에서 *C. polykrikoides* 영양세포의 출현량이 가장 많았다. 이때 이해역에서의 평균 수온 26.42°C, 평균염분 30.44 psu로 타해역에 비해 비교적 고온고염을 보였다. 영양염류분포는 광양만에서 유입되는 담수의 영향을 받고 있는 돌산도 동부해역 정점 5, 6, 7 에서 높은 값을 보였다. 붓돌앞바다해역 정점과 돌산도동부해역 정점을 비교해 보면 *C. polykrikoides* 영양세포의 평균 출현량은 붓돌앞바다해역이 2,440 cells/mL, 돌산도동부해역이 690 cells/mL 로 붓돌앞바다해역이 높았으며, Chlorophyll *a* 값도 0.415 $\mu\text{g/L}$, 0.127 $\mu\text{g/L}$ 로 붓돌앞바다해역이 높았다. 각 해역별 정점간 온도와 염분의 표준편차는 붓돌앞바다해역이, 수온 0.63, 염분 0.82, 돌산도동부해역이 수온 0.94, 염분 4.56 이었다. 그리고 전체 영양염류의 양은 돌산도동부해역에서 높았다. 수온, 염분 등 물리적 환경 변화가 큰 돌산도동부해역보다는 비교

적 고른 수온, 염분 분포를 보여 물리적 환경이 안정된 북들앞바다해역에서 *C. polykrikoides* 영양세포 출현량이 많았다. 이는 초기 *C. polykrikoides* 영양세포 성장은 영양염류 등 화학적인 환경 요인보다는 수온, 염분 등의 물리적 환경 요인에 영향을 많이 받는 것으로 추측된다.

C. polykrikoides 적조 발생중인 9월 2일에서 6일과 9월 23일에서 27일 조사에서 *C. polykrikoides* 적조 밀도를 살펴보면 영양염류 공급이 원활한 연안역인 남해도동부해역 정점 1, 2, 3 에서 평균 403 cells/mL, 2,276 cells/mL 로 가장 높은 값을 보였다. 그러나 영양염류 농도가 거의 비슷한 돌산도동부해역에서는 *C. polykrikoides* 적조 밀도가 높지 않았는데, 이는 높은 수온·염분 정도로 볼때 *C. polykrikoides* 영양세포의 안정적인 성장과 집적에 불안정한 물리적 환경요인이 방해가 된 것으로 추측된다.

적조소멸기인 10월 6일에서 10일 조사에서 남해도 동측 해역 정점 1, 2, 3 에서 높은 밀도의 *C. polykrikoides* 적조가 관찰되었다. 모든 해역에서 수온·염분 등 물리적인 환경은 안정적인 분포를 보였고, 영양염류 농도도 증가하였으나 *C. polykrikoides* 영양세포의 농도는 감소하였다. 이는 수온 강하로 인해 *C. polykrikoides* 영양세포 증식이 억제되었으며 이로 인해 수중의 영양염류가 소비되지 않았기 때문으로 추측된다.

V. 참고 문헌

- 강영실, 전경암, 1999. 한국 남해 연안전선의 생물·화학적 특성 및 영양역학 구조. 한국수산학회지, 32: 22-29.
- 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 수진연구보고, 12: 107-121.
- 공영, 1971. 한국 남해연안 전선에 관한 연구. 한국해양학회지, 6: 25-36.
- 김상현, 노홍길, 1997. 제주해협외의 해수유동특성에 관한 연구. 한국수산학회지, 30: 759-770.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지, 27: 515-528.
- 김창숙, 김학균, 1999. 적조원인 식물성플랑크톤의 독성. 농업생명과학회지, 6: 8-14.
- 김창훈, 신재범, 1997. 한국 연안의 유해·유독 적조조류의 발생과 독성 생산. 한국조류학회지, 12: 269-276.
- 김학균, 박주석, 이필용 등, 1995. 부영양화 및 적조현상 규명에 관한 연구. 환경부·과학기술처, pp. 180-181.
- 김학균, 최우정, 정영균, 정창수, 박종수, 안경호, 백철인, 1999. 나로도 인근해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생과 환경 특성. 수진연구보고, 57: 119-129.
- 김형철, 1999. 유해성 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*의 조류성장 잠재력과 제한 영양염 추정. 부경대학교, 석사학위논문, 78 pp.
- 김형철, 김동명, 이대인, 박청길, 김학균, 2001a. 조류성장잠재력 시험에 의한 사랑도 연안 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 제한영양

- 염. 한국수산학회지, 34: 457-464.
- 김형천, 이창규, 이삼근, 김학균, 박청길, 2001b. *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 미치는 물리·화학적 요인과 영양염 이용. 한국수산학회지, 34: 445-456.
- 나정렬, 한상규, 조규대, 1990. 한반도 근해의 해류와 해수 특성 -남해연안수 확장과 수온변화-. 한국수산학회지, 23: 267-279.
- 박철, 이창래, 김정창, 1998. 동해전선역 동물플랑크톤 군집: 2. 수온과 분포의 관계. 한국수산학회지, 31: 749-759.
- 양성기, 1994. 한국 남해연안의 해표면 수온분포와 천해전선의 변동 특성. 한국환경과학회지, 3: 111-128.
- 양영진, 김상현, 노홍길, 1998. 한국 남·서해 및 동중국해 북부해역에 출현하는 수온전선. 한국수산학회지, 31: 695-706.
- 임월애, 강창근, 김숙양, 이삼근, 김학균, 정익교, 2003. 여름철 남해도 연안 식물플랑크톤 군집구조의 단기 변화. 한국조류학회지, 18: 49-58.
- 추효상, 김동수, 1998. 한국 남해의 대마난류 변동이 멸치 난·자어의 연안역 수송에 미치는 영향. 한국수산학회지, 31: 226-244.
- Boesch, D.F., D.M. Anderson, R.A. Horner, S.E. Shumway, P.A. Tester and T.E. Whitledge, 1997. Harmful algal blooms in coastal waters: Option for prevention, control and mitigation. NOAA coastal ocean program, 10: 5 pp.
- Chang, S.D., 1970. Computation of Wind Drift Currents in the Southern Waters of Korea. Bull. Korean Fish. Soc., 3: 199-206.
- Chiaudani, G. and M. Vighi, 1974. The N:P ratio and tests with *Selenastrum* to predict eutrophication in lakes. Water Res., 8: 1063-1069.

- Cho, E.S., H.G. Kim and Y.C. Cho, 2000. Sequence analysis of *Cochlodinium polykrikoides* isolated from Korean coastal waters using sequences of internal transcribed spacers and 5.8S rDNA. J. Korean Soc. Oceanogr., 35: 158-160.
- Choi, H.G., P.J. Kim, W.C. Lee, S.J. Yun, H.G. Kim and H.J. Lee, 1998. Removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* by yellow loess. J. Korean Fish. Soc., 31, 109-113.
- Floodgate, G.D., G.E. Fogg, D.A. Jones, K. Lochte and C.M. Turly. 1981. Microbiological and zooplankton activity at a front in Liverpool Bay. Nature, 290: 133-136.
- Fukuyo, Y.H., H. Takano, M. Chihara and K. Matsuoka, 1990. Redtide organisms in Japan. An Illustrated Taxonomic Guide, Uchida Rokakuho, Tokyo, 407 pp.
- Garate, L.I., J.J. Bustillos-Guzmain, I. Morquecho and L. Deveze, 2000. First outbreak of *Cochlodinium polykrikoides* in the Gulf of California. Harmful Algae News, November 2000. IOC/UNESCO, 7 pp.
- Goldman, J.C., 1976. Identification of nitrogen as a growth-limiting nutrient in waste waters and coastal marine waters through continuous culture algal assays. Water Res., 10: 97-104.
- Graneli, E., K. Wallstrom, U. Larsson, W. Graneli and R. Elmgren, 1990. Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area. Ambio, 19: 142-151.
- Guzman, H.M., J. Cortes, P.W. Glynn and R.H. Richmond, 1990. Coral mortality associated with dinoflagellate blooms in the eastern Pacific (Costa Rica and Panama). Mar. Biol., 60:

299-303.

- Hallaegraff, G.M., 1991. Aquaculturists guide to harmful Australian microalgae. CSIRO, Fishing Industry Training Board of Tasmania Inc., 58: 111 pp.
- Hallegraeff, G.M., 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32: 79-99.
- Halstead, B.W., 1965. Phylum protozoa, history and research. In : Poisonous and Venomous Marine Animals of the World, edited by Darwin Press, Inc., Princeton, N.Y., 1: pp. 161-168.
- Han, S.B., 1998. History of algal bloom records in Korean coastal waters. In: Korea-China Joint Symposium on Harmful Algal blooms, Pusan, pp. 34-43.
- Harper, D.E. Jr., L.D. McKinney and R.J. Case, 1981. The occurrence of hypoxic bottom water off the upper Texas coast and its effects on the benthic biota. *Cont. Mar. Sci.*, 24: 53-79.
- Huh, O.K., 1982. Satellite observations and annual cycle of surface circulation in the Yellow Sea, East China Sea and Korea Strait. *La mer*, 20: 210-222.
- Jeong, S.Y., Y.T. Park and W.J. Lee, 2000. Isolation of marine bacteria killing red tide microalgae. III. Algicidal effects of marine bacterium, *Micrococcus* sp. LG-5 against the harmful Dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides*. *J. Korean Fish. Soc.*, 33: 331-338.
- Jung, S.Y., W.J. Choi, H.G. Kim, Y.G. Jung, J.B. Kim and W.A. Lim, 1999. Interrelation between *Cochlodinium polykrikoides* blooms and community structure of zooplankton in the coastal waters

- around Namhaedo in the south sea of Korea, 1998. Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst., 57: 153-161.
- Kang C.K., Kim P.J., Lee W.C. and Lee P.Y., 1999. Nutrients and phytoplankton blooms in the Southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the Coastal Bay system. J. Oceanol. Soc. Kor., 34: 86-94.
- Kim H.G., 1990. Coastal algal blooms caused by cyst-forming dinoflagellates. Bull. Korean Fish. Soc., 23: 468-474.
- Kim H.G., 1997. Recent harmful algal blooms and mitigation strategies in Korea. Ocean Res., 19: 185-192.
- Kim H.G., 1998a. Harmful algal blooms in Korean coastal waters focused on three fish-killing dinoflagellate. In: Korea - China Joint Symposium on Harmful algal blooms, Pusan, pp. 1-20.
- Kim H.G., 1998b. *Cochlodinium polykrikoides* blooms in korean coastal waters and their mitigation. In: Harmful Algae, edited by B. Reguera, J. Blanco, M.L. Fernandez and T. Wyatt, Xunta de Galicia and IOC/UNESCO, pp. 227-228.
- Kim H.G., J.S. Park, S.G. Lee and K.H. An, 1993. Population cell volume and carbon content in monospecific dinoflagellate blooms. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea. Proc. 5th Int. Conf. on Toxic Marine phytoplankton, Elsevier, pp. 769-773.
- Kim H.G., J.S. Park and B.A. Kim et al. 1994. A study on red tide mechanisms and harmful algal blooms in Korean castal waters. Technical Report of Nat'l. Fish. Res. Dev. Agency., 117: pp. 130.

- Kim H.G., K. Matsuoka, S.G. Lee and K.H. An, 1996. The occurrence of a dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* from Chinhae bay, Korea. J. Korean Fish. Soc., 29: 837-842.
- Kim H.G., S.G. Lee and K.H. An et al. 1997. Recent red tides in Korean coastal waters. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst., 280 pp.
- 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 red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. J. Plank. Res., 21: 2105-2115.
- Kim H.G., W.J. Choi, Y.G. Jung, C.S. Jung, J.S. Park, K.H. An and C.I. Baek, 1999b. Initiation of *Cochlodinium polykrikoides* blooms and its environmental characteristics around the Narodo Island in western part of south sea of Korea. Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst., 57: 119-129.
- Lange, W. 1971. Limiting nutrient elements in filtered Lake Erie water. Water Res., 5: 1031-1048.
- Lee J.C., J.Y. Kim and S.D. Chang, 1984. Thermohaline structure of the shelf front in the Korea strait in early winter. J. Oceanol. Soc. Kor., 19: 56-67.
- Lee J.S. 1996. Bioactive components from red tide plankton, *Cochlodinium polykrikoides*. J. Korean Fish. Soc., 29: 165~173.
- Lee C.K., S.G. Lee and H.G. Kim, 1999. Occurrence and abundance of three morphologically similar dinoflagellates, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum* and *Gymnodinium catenatum* in southern coast of Korea. Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst., 57: 131~139.
- Lee S.J., Y. Kim, H.G. Kim, G.M. Seo, J.H. Jeong and Y.K. Hong,

2000. Algalytic of α -mannosidase on harmful marine microalgae. *J. Applied Phycology*, 12: 191~193.
- Margalef R., 1961. *Cochlodinium polykrikoides*, Hidrografiay fitoplancton de un area marina de la costa meridional de Puerto Rico. *Inv. Pesq.*, 18: 76-78, fig. 27.
- Margalef R., 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta*, 1: 493-509.
- Nixon, S.W. 1981. Remineralization and nutrient cycling in coastal marine ecosystem. In: *Estuaries and Nutrients*, edited by B.J. Neilson and L.E. Cronin, Humana, Clifton, pp. 111-138.
- Odamaki M., 1989. Tides and tidal currents in the Tsushima Strait. *J. oceanography*, PRENTICEHALLm, London, pp. 191-197.
- Paerl H.W., 1983. Nuisance phytoplankton blooms in coastal estuarine, and inland waters. *Limnol. Oceanogr.*, 33: 823-847.
- Park J.S., H.G. Kim and S.G. Lee. 1988. Red tide occurrence and succession of its causative organisms in Jinhae Bay. *Bull, Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 41: 1-26.
- Park Y.T., J.B. Park, S.Y. Chung, B.C. Song, W.A. Lim, C.H. Kim and W.J. Lee, 1998. Isolation of marine bacteria killing red tide microalgae, I. Isolation and algicidal properies of *Micrococcus* sp. LG-1 possessing killing activity for harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides*. *J. Korean Fish. Soc.*, 31: 767-773.
- Parr, M.P. and R.V. Smith, 1976. The identification of phosphorus as a growth-limiting nutrient in Longth Neagh using bioassays. *Water Res.*, 10: 1151-1154.

- Pingree, R.D., P.R. Pugh, P.M. Holligan and G.R. Forster. 1975. Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel. *Nature*, 258: 672-677.
- Reid P.C., G.A. Robinson, and H.G. Hunt, 1987. Spatial and temporal patterns of marine blooms in the northeastern Atlantic and North Sea from the continuous plankton recorder survey. *Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer*, 187: 27-37.
- Richardson K., 1989. Algal blooms in the North Sea: The good, the bad, and the ugly. *Dana*, 8: 83-93.
- Rosales-Loessener F., K. Matsuoka, Y. Fukuyo, and E.H. Sarchez, 1996. Cysts of harmful dinoflagellates found from pacific coastal waters of Guatemala. In: *Harmful and Toxic Algal Blooms*, edited by Yasumoto T., Y. Oshima and Y. Fukuyo, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, pp. 193-195.
- Ryther, J.H. and W.M. Dustan, 1971. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 171: 1008-1013.
- Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 195: 260-262.
- Seo P.S., S.J. Lee, Y. Kim, J.H. Lee, H.G. Kim and J.D. Lee, 1998. axenic culture production and growth of a dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides*. *J. Korean Fish. Soc.*, 31: 71-76.
- Shirota A., 1989. Red tide problem and counter measures (1). *Int. J. Aquat. Fish. Technol.*, 1: 25-38.
- Silva E.S., 1967. *Cochlodinium heterolobatum* sp.: structure and

- some cytophysiological aspects. J. Protozool., 14: 745-754.
- Smayda T.J., 1997. Harmful algal blooms: Their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. Limnol. Oceanogr. 42: 1137-1153.
- Sournia A., 1995. Red-tide and toxic marine phytoplankton of the world ocean: An inquiry into biodiversity. In: Harmful algal blooms, Proc. 6th Int. Conf. on Toxic Marine Phytoplankton Lavoisier, pp. 103-112.
- Sridharan, N. and G.F. Lee, 1977. Algal nutrient limitation in Lake Ontario and tributary water. Water Res., 11: 849-858.
- Tester P.A., R.P. Stumpf, F.M. Vukovich, P.K. Fowler and J.T. Turner, 1991. An expatriate red tide bloom: Transport, distribution, and persistence. Limnol. Oceanogr. 36: 1053-1061.
- Tett P., 1987. The ecophysiology of exceptional blooms. Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer 187: 47-60.
- Turquet J., J.P. Quod, A. Coute and M. A. Faust, 1998. Assemblage of benthic dinoflagellates and monitoring of harmful species in Reunion Island, SW Indian Ocean, 1993-1996. In: Harmful Algae, edited by Reguera B., J. Blanco, M.L. Fernandez and T. Wyatt, Xunta de Galicia and IOC/ UNESCO, 1998, pp. 44-47.
- Whyte J.N.C., N. Haigh, N.G. Ginther and L.J. Keddy, 2000. First record of *Cochlodinium* sp. causing mortality of net-pen reared salmon on the west coast of Canada. In: Conference abstracts and participants, Int. Conf. on Harmful Algal Bloom, 9th Conf., Tasmania 2000 2000, 66 pp.
- Yang H.S. and Kim S.S., 1990. A study on sea water and ocean

current in the sea adjacent to Korea peninsula. Bull. Korean Fish. Soc., 23: 417-424.

Yentsch, C.M., C.S. Yentsch and L.R. Strube. 1977. Variations in ammonium enhancement, an identification of nitrogen deficiency in New England coastal phytoplankton populations.

Yuki K. and S. Yoshimatsu, 1989. Two fish-killing species of *Cochlodinium* from Harima nada, Seto Inland sea, Japan. In: Red Tides, edited by Okaichi T., D.M. Anderson and T. Nemoto, Elsevier, New York, pp. 451-454.

VI. 요약

유해적조생물 *Cochlodinium polykrikoides*의 적조 발생 특성을 규명하기 위하여 남해중부해역에서 2003년 7월부터 10월까지 *C. polykrikoides* 영양세포의 출현량, 수온, 염분, 투명도, 영양염류를 정점별로 조사한 결과 다음과 같은 특징을 보였다. 1) *C. polykrikoides* 영양세포의 초기 발생은 규조류가 우점한 연안해역과는 달리 남해 외양수의 영향을 받아 전선대가 형성된 해역(광도 주변)에서 7월 중순부터 관찰되었다. 2) 8월 중순에 *C. polykrikoides* 영양세포의 집적에 의한 적조현상이 나로도와 소리도 사이 해역(붓돌 앞바다)에서 일어났다. 적조발생 지역에서 영양염류의 거동은 인보다 질소의 변동 폭이 높았으며, 이는 *C. polykrikoides*의 선택적 소비에 기인한 것으로 보인다. 질소원 중에서는 암모니아질소의 변동이 크게 나타났다. 3) 9월 이후 물리적 환경이 안정화된 남해도 동부 연안에서 *C. polykrikoides* 적조 밀도가 높았다. 반면 광양만으로부터 육수의 유입으로 인해 물리적 환경 변화가 급격한 돌산도 동부 연안에서는 *C. polykrikoides* 출현 밀도가 낮았다.

2003년도 *C. polykrikoides* 적조 발생특성은 영양염류의 변동과는 특별한 관계를 찾을 수 없었으나, 수온, 염분 등 물리적 환경 요인이 적조 밀도 변동에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 시사되었다.

감사의 글

올바른 길을 갈 수 있게 독려하시고 논문이 완성되기까지 여러모로 부족하기만한 저를 엄격한 지도와 따뜻한 사랑으로 이끌어주신 김창훈 교수님께 무한한 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 보잘 것 없는 저의 논문에 관심을 가져주시고 세심하게 검토해 주신 손철현 교수님과 장영진 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 평소 저에게 따뜻한 관심을 잊지 않으시고, 연구자의 나아갈 길과 학문하는 자세를 가르쳐 주신 조재윤 교수님, 허성범 교수님, 김동수 교수님, 배승철 교수님 그리고 남윤권 교수님께도 아울러 감사드립니다.

본 연구를 수행함에 있어서 많은 조언과 자료를 제공해 주신 국립수산과학원 이삼근 과장님, 유해생물팀 강영실 팀장님, 배현민 연구관님, 김귀영 연구관님, 이창규 연구관님, 김숙양 연구사님, 김창숙 박사님, 박영태 연구사님, 임월애 연구사님 그리고 장수정 연구사께도 아울러 감사드립니다. 또한 국립수산과학원에 재직하고 계시면서 많은 도움을 주신 분들에게도 감사드립니다.

불철주야 양식환경학연구실을 지키며 항상 옆자리에서 본 논문이 완성될 수 있도록 도와준 김영수, 김근용 후배에게 감사드리며, 또한 박기홍, 손명백, 황철희 후배들에게도 감사합니다.

끝으로 오늘날까지 아무런 부족함 없이 학업에 전념할 수 있도록 든든한 버팀목 역할을 해주시며, 크나큰 사랑으로 미천한 저를 묵묵히 지켜봐 주신 부모님과 동생들에게 감사드리며, 장인 장모님에게도 감사드립니다. 직장생활을 그만두고 공부한다고 하는 남편을 위해 묵묵히 내조를 해준 사랑하는 아내와 아들 경찬이에게 끝없는 사랑을 보냅니다.