

C. polykrikoides 적조 발생시의 한국 남해안의 수온 및 염분 분포

이문옥^{1,†} · 최재훈²

¹전남대학교 해양기술학부 조선해양공학전공

²전남대학교 대학원 해양공학과

Distributions of Water Temperature and Salinity in the Korea Southern Coastal Water During *Cochlodinium polykrikoides* Blooms

Moon Ock Lee^{1,†} and Jae Hoon Choi²

¹Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Chonnam 550-749, Korea

²Dept. of Ocean Engineering, Graduate School, Chonnam National University, Chonnam, 550-749, Korea

요 약

나로도를 중심으로 한 한국 남해안에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조의 원인 규명을 위해 1995년부터 2008년까지 국립수산물관리원이 조사한 정선해양관측 및 위성정보 자료에 기초하여 동계 및 하계에 있어서의 수온염분 분포의 특징을 조사하였다. *C. polykrikoides* 적조는 나로도 주변 해역에서의 평균 수온이 약 25.0~26.0 °C, 염분이 약 31.00 psu 전후일 때 가장 많이 발생하였다. 한국남해 연안수와 외해수 사이에는 동계 및 하계에 각각 서로 다른 열염전선이 관측되었다. 즉, 동계에는 저온저염의 한국남해 연안수, 쓰시마 난류계의 중간수, 고온고염의 쓰시마 난류, 저온저염의 중국대륙 연안수 사이에 네 개의 전선이 관측되었다. 반면, 하계에는 저온고염의 한국남해 연안수, 고온저염의 쓰시마 난류, 고온고염의 중국대륙 연안수 사이에 두 개의 전선이 관측되었다. 이러한 열염전선은 서로 물리적 성질이 다른 수괴에 의해 형성된다는 사실이 T-S diagram을 통해서도 확인되었다. 이상으로부터, 나로도 주변해역에서 하계에 발생하는 *C. polykrikoides* 적조는 한국남해 연안수와 쓰시마 난류 사이에 형성되는 열염전선과 밀접한 연관관계를 가지고 있음을 알 수 있었다.

Abstract – In order to elucidate the cause of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the Korea southern coastal water, we investigated observational data of water temperatures and salinities in summer and winter, obtained from the stoppage of ship by NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute) as well as composite images by NOAA from 1995 to 2008. *Cochlodinium polykrikoides* blooms occurred when water temperature was approximately 25.0~26.0 °C and salinity was 31.00 psu on average in Narodo neighboring seas. Different thermohaline fronts were observed between the Korea southern coastal water and the open sea water in summer and winter, respectively. That is, in winter four fronts were observed between the Korea southern coastal water with low temperature and low salinity, intermediate water originated from Tsushima Warm Current, Tsushima Warm Current with high temperature and high salinity, and the China coastal water with low temperature and low salinity. In contrast, in summer two fronts were observed between the Korea southern coastal water with low temperature and high salinity, Tsushima Warm Current with high temperature and low salinity, and the China coastal water with high temperature and high salinity. These thermohaline fronts also proved to be formed by two water masses with a different physical property, in terms of T-S diagrams. Consequently, we noticed that *C. polykrikoides* blooms occurring in Narodo neighboring seas in summer had a close relationship with thermohaline fronts observed between the Korea southern coastal water and Tsushima Warm Current.

Keywords: *Cochlodinium polykrikoides* blooms(코클로디니움 적조), Thermohaline fronts(열염전선), the Korea southern coastal water(한국남해 연안수), Tsushima Warm Current(쓰시마 난류), China coastal water(중국대륙 연안수), T-S diagram(T-S 다이어그램)

[†]Corresponding author: leemo@chonnam.ac.kr

1. 서 론

Cochlodinium polykrikoides(이하 *C. polykrikoides*) 적조는 1982년 진해만에서 처음 발생한 이래 지금은 나로도 연안을 비롯하여, 군산, 완도, 가막만, 돌산, 통영, 거제, 부산, 기장, 울산, 포항, 죽변, 묵호, 강릉 등 거의 우리나라 전 연안에서 적어도 1회 이상 발생한 기록을 가지고 있을 정도로 그 발생범위가 광역화하고 있는 추세에 있다. 더구나, 1995년 이래 그 발생빈도가 증가하여, 유독성 적조로 인하여 우리 나라 남해안에 걸쳐 발생하는 수산 생물에의 피해도 적지 않다. 최근 들어서 국내에서의 현저한 피해는 없으나, 여전히 유독성의 *C. polykrikoides* 적조에 의한 수산생물에의 피해는 전 세계적으로 계속 보고되고 있다 (Zhou *et al.*[2007]; Gobler *et al.*[2007]; Kudela *et al.*[2008]; Anton *et al.*[2008]). 따라서, *C. polykrikoides* 적조의 발생기작을 해명하고 수산생물의 피해를 줄이기 위한 방안 마련이 절실히 요청되고 있다.

한편, Fig. 1은 1995년 이래 2008년까지 우리나라 연안에서 *C. polykrikoides* 적조가 최초로 발생한 해역을 나타낸다. 여기서, 그림 속의 숫자는 해당 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 최초발생한 빈도수를 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 *C. polykrikoides* 적조는 지난 14년 동안 고흥반도를 중심으로 한 나로도 연안역(삿돌바다 포함)에서 11회, 여수 연안역(돌산도 포함)에서 11회, 남해에서 2회, 그리고 거제도 연안역에서 1회 발생하였다. 즉, 1995년 이래 *C. polykrikoides* 적조는 대부분 나로도 주변 해역 또는 여수 연안역에서 최초로 발생하고 있음을 알 수 있다.

지금까지 많은 연구자들에 의해 외편모조인 *C. polykrikoides*에 의한 적조발생기작의 해명과 그 확산범위 예측, 독성, 생활사 등과 관련하여 많은 연구가 수행되었다. 그중에 *C. polykrikoides* 적조의 발생기작을 수온염분 분포 또는 이들에 의한 전선 형성과 관련하여 해명을 시도한 선행연구로는 양 등[2000], 이 등[2001], 최[2001], Lee and Cho[2001], 서 등[2003], 조와 최[2005], Lee and Lee[2006], Lee[2008], Lee and Kim[2008], Lee *et al.*[2009] 등이 있다. 특히, 양 등[2000]은 나로도 인근 해역에서의 적조 발생과

소멸에 양자강 하천수와 같은 외해수 유입(특히 용존무기질소의 공급)이 밀접히 관여하고 있을 가능성을 시사하였고, Lee and Lee[2006]는 *C. polykrikoides* 적조가 나로도 주변 해역에서 최초로 발생하는 이유는 *C. polykrikoides*의 성장을 촉진하는 해수가 쓰시마 난류를 따라 이들 해역으로 수송되기 때문이라고 추정하였다. 또한, Lee[2008]는 나로도 인근 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생하는 8월말에 계절풍이 남서풍에서 북서풍으로 바뀔 때, 양쯔강 하천수가 에크만 수송으로 유입하게 되고, 그 결과 나로도 연안수와 양쯔강 하천수 사이에 전선(front)이 형성된다고 하였다. 그래서 이 전선을 따라 양쯔강 하천수에 있는 *C. polykrikoides* 세포의 집적과 침강이 *C. polykrikoides* 적조 형성에 유리한 생태 물리적 환경을 조성한다고 하는 가설을 제안하였다. 따라서, 나로도 주변 해역에서의 *C. polykrikoides* 적조 발생에는 수온 및 염분에 의한 전선 형성과 소멸이 중요한 역할을 하고 있는 것으로 생각된다.

한편, 나로도가 위치한 한국 남해안은 제주해협 및 대한해협을 통과하는 쓰시마 난류(Tsushima Warm Current, 이하 TWC로 정의함)를 비롯하여 중국대륙 연안수(China Coastal Water, 이하 CCW로 정의함), 양쯔강 유출수(Yangtze River Water, 이하 YRW로 정의함), 한국 남해 연안수(Korea Southern Coastal Water, 이하 KSCW로 정의함) 등이 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다(이[1983]; Yang *et al.*[1998]; Yang *et al.*[1999]; Lee and Choo[2001]; Choo[2002]; Hao *et al.*[2008]). 따라서, 본 연구는 *C. polykrikoides* 적조 발생시 나로도 주변 해역에서의 수온 및 염분 분포의 특징을 파악하고 또한, 이들에 의한 열염전선의 형성 여부를 확인하기 위하여 수행되었다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1995년부터 2008년까지의 국립수산물과학원(<http://www.nfrdi.go.kr>)의 적조정보, 해양환경관측망, 정선해양관측 및 위성정보 자료를 참고하였고, 기상청(<http://www.kma.go.kr>)의 일사량, 강수량 및 태풍정보 등을 참고하였다. 이들 자료로부터 *C. polykrikoides* 적조 발생 당시의 수온 및 염분의 수평연직분포의 특징을 파악하고, 위성 영상과의 대비를 통해 열염전선의 위치와 그 배치구조를 확인하였다. TWC, CCW, KSCW 등에 의한 전선(前線, front)의 위치는 이[1983], Choo[2001], Yang *et al.*[1999] 등을 참고하여 판단하였다.

3. 결 과

3.1 수온 및 염분 분포

먼저, Fig. 2는 국립수산물과학원이 1961년부터 2009년 현재까지 25개선의 207개 정점에서 매년 2개월 간격으로 6회, 14개 표준 수층에서 실시하고 있는 정선해양관측망 중, 고흥 연안역에 대한 관측정점을 나타낸다. 또한, Table 1은 1995년부터 2008년까지 이

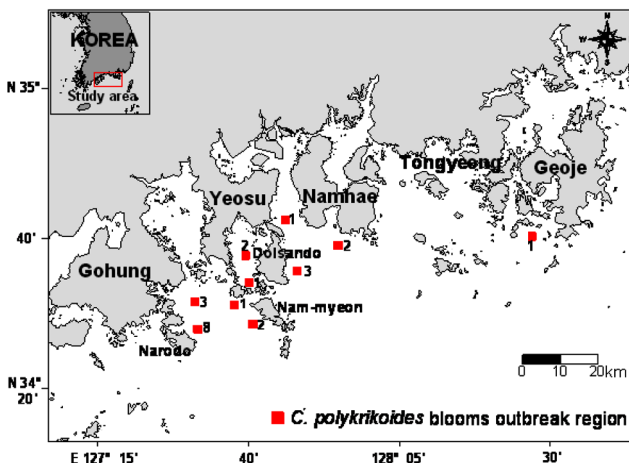


Fig. 1. First outbreak regions for *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

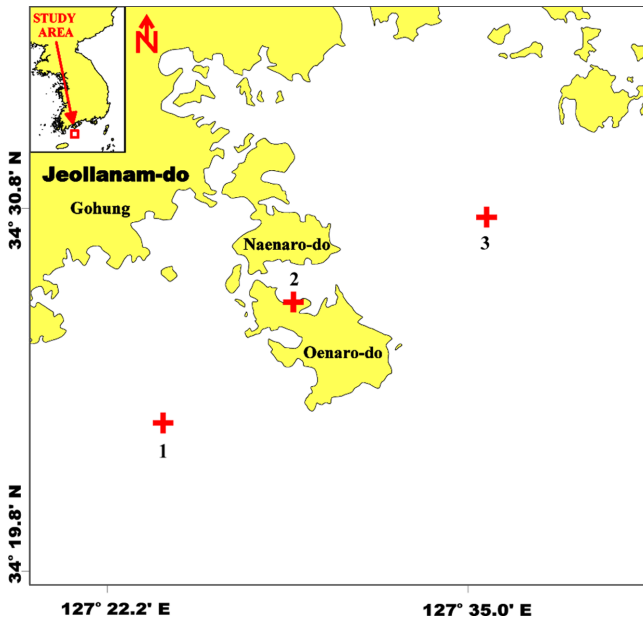


Fig. 2. Oceanographic stations by stoppage of a ship in the vicinity of Narodo Islands.

들 정점을 포함한 나로도 부근 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 최초로 발생하였을 당시, 한반도 부근의 NOAA 영상자료, 국립수산과학원의 수온 염분관측자료 및 고흥지방의 기상자료를 나타낸다. Table 1에서 ①은 NOAA영상 판독에 의한 수온, ②는 수산과학원이 적조 발생 당시에 관측한 현장수온, ③은 적조 발생 월의 정선해양관측 수온, ④는 적조 발생 월의 정선현장관측 염분, ⑤는 적조 발생 10일 전부터 적조 발생 당일까지의 고흥지방의 일 평균 일사량, ⑥은 적조 발생 10일 전부터 적조 발생 당일까지의 고흥지방의 총 강수량을 각각 나타낸다. 이들 결과에 따르면, *C. polykrikoides* 적조발생 당시의 NOAA 영상자료에 의한 수온은 수산과학원이 관측한 현장 수온과 대체로 유사한 것을 알 수 있다.

또한, 적조 발생 당시의 현장수온은 23.1~27.1 °C(평균 25.1 °C)로, 적조 발생 월의 정선관측 정점에서의 수온 22.6~28.1 °C(평균 25.5 °C)의 범위내에서 변화하지만, 양자간에 큰 차이는 없는 것으

로 생각된다. 한편, 고흥 나로도 해역에 있어서의 적조 발생 월의 염분은 28.0~34.13 psu(평균 31.02 psu)의 범위로 나타났다. 이것은 Lee and Kim[2008]이 *C. polykrikoides* 적조가 빈발하는 8월에 나로도 주변 해역에서 조사한 염분 범위 27.80~33.83 psu(평균 30.71 psu)와 유사하다. 반면, 수온과 일사량, 또는 염분과 강수량 사이에는 뚜렷한 유의성이 보이지 않았다. 이들 결과로부터, 나로도 부근 해역에서의 *C. polykrikoides* 적조는 평균적으로 수온이 25.0~26.0 °C, 염분이 31.00 psu 전후일 때 가장 많이 발생한 것으로 나타났다.

한편, Fig. 3은 나로도 부근 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 1998년 8월 31일을 전후하여 획득된 NOAA 합성영상자료에 의한 한반도 주변의 표층 수온분포를 나타내는데, 남해안을 따라 25.0~26.0 °C의 등온선이, 보다 따뜻한 외양수와의 사이에 연안전선을 형성하고 있음을 보여준다. 또한, Fig. 4a~4b는 나로도 부근 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 해의 8월에 국립수산과학원이 관측한 표층 수온 및 염분분포를 나타낸다. 이들 자료에 따르면, 수온과 염분의 수평분포가 서로 유사하며, 1998년과

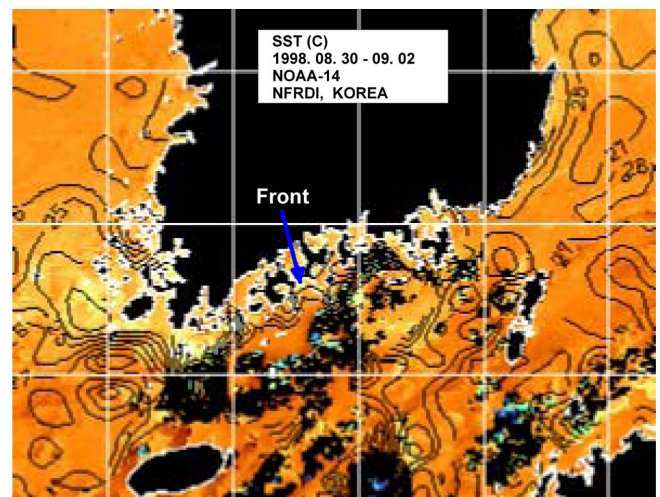


Fig. 3. NOAA composite image during *C. polykrikoides* blooms on Aug. 30~Sept. 2, 1998.

Table 1. Water temperature and salinity near the Narodo region during the first *C. polykrikoides* blooms

Serial No.	Date of outbreak /extinction	Water temp. by NOAA image ① (°C)	water temp. in situ ② (°C)	Water temp. for the month ③ (°C)	Salinity for the month ④ (psu)	Insolation ⑤ (hr)	Precipitation ⑥ (mm)
1	Aug. 29, 1995/Oct. 13	-	23.2~24.0	27.8	28.0	5.5	45.0
2	Sept. 5, 1996/Sept. 25	-	25.0~26.0	22.7	31.87	4.5	6.5
3	Aug. 25, 1997/Sept. 10	25.0~26.0	26.0	25.6	31.87	8.4	3.0
4	Aug. 31, 1998/Sept. 16	25.0	24.7~24.9	28.1	30.97	6.4	15.0
5	Aug. 11, 1999/Sept. 15	26.0±0.8	26.4~27.0	25.4	29.52	3.8	133.5
6	Aug. 14, 2001/Sept. 5	-	24.4~25.2	26.5	31.73	9.1	53.0
7	Aug. 2, 2002/Sept. 18	26.0	24.0~25.9	22.6	30.05	8.0	42.5
8	Aug. 13, 2003/Sept. 7	25.0	23.5~24.2	26.0	30.58	5.8	110.5
9	July 20, 2005/Aug. 8	24.0~25.0	23.1~26.9	24.7	32.61	6.1	35.0
10	Aug. 7, 2006/Oct. 19	26.0~27.0	25.0~27.1	23.6	29.94	10.7	0.0
11	July 27, 2007/Sept. 4	26.0	23.5~25.8	27.1	34.13	6.8	20.0

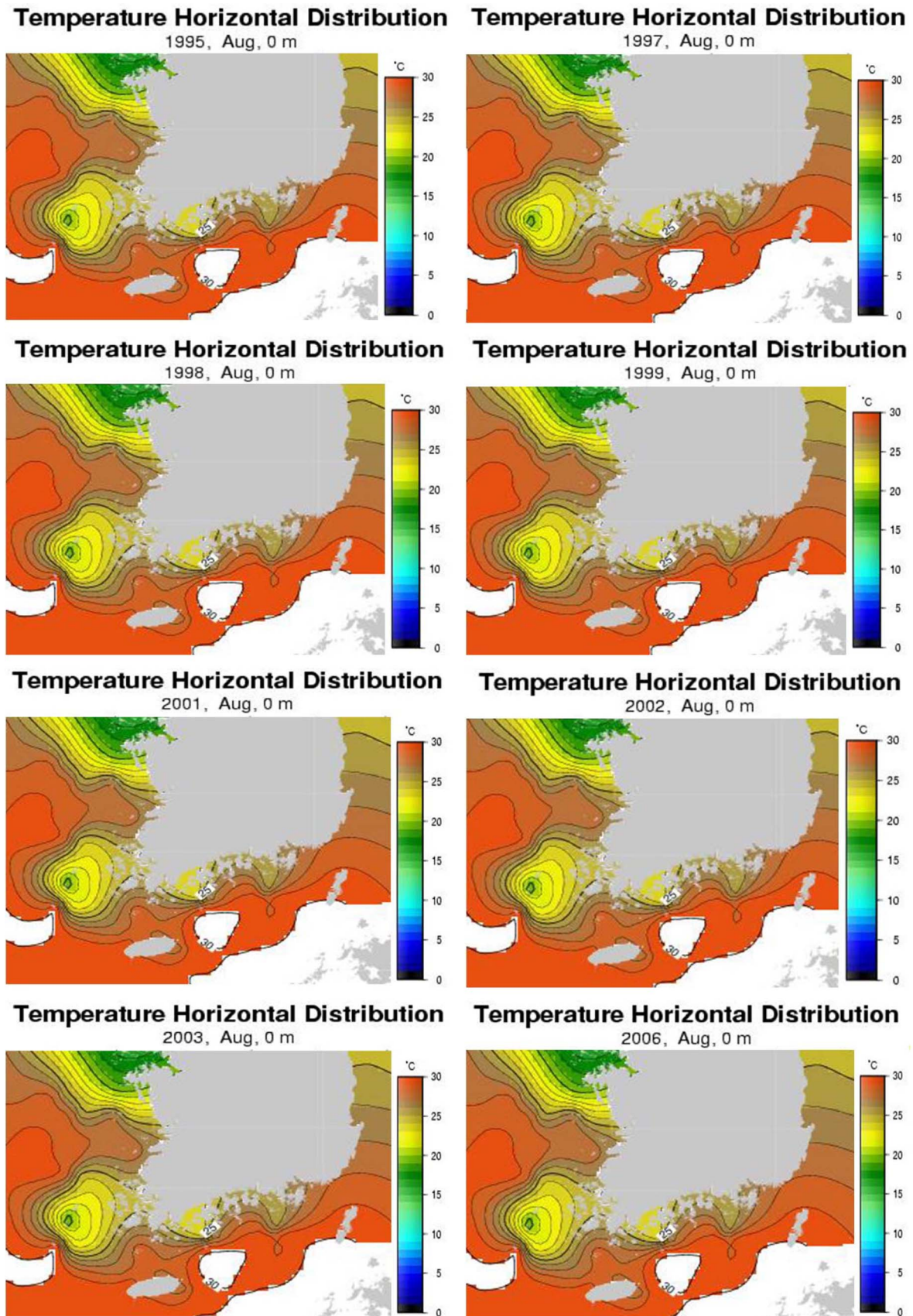


Fig. 4. (a) Horizontal distributions of surface water temperature in August of the year when *C. polykrikoides* blooms occurred near Narodo Islands.

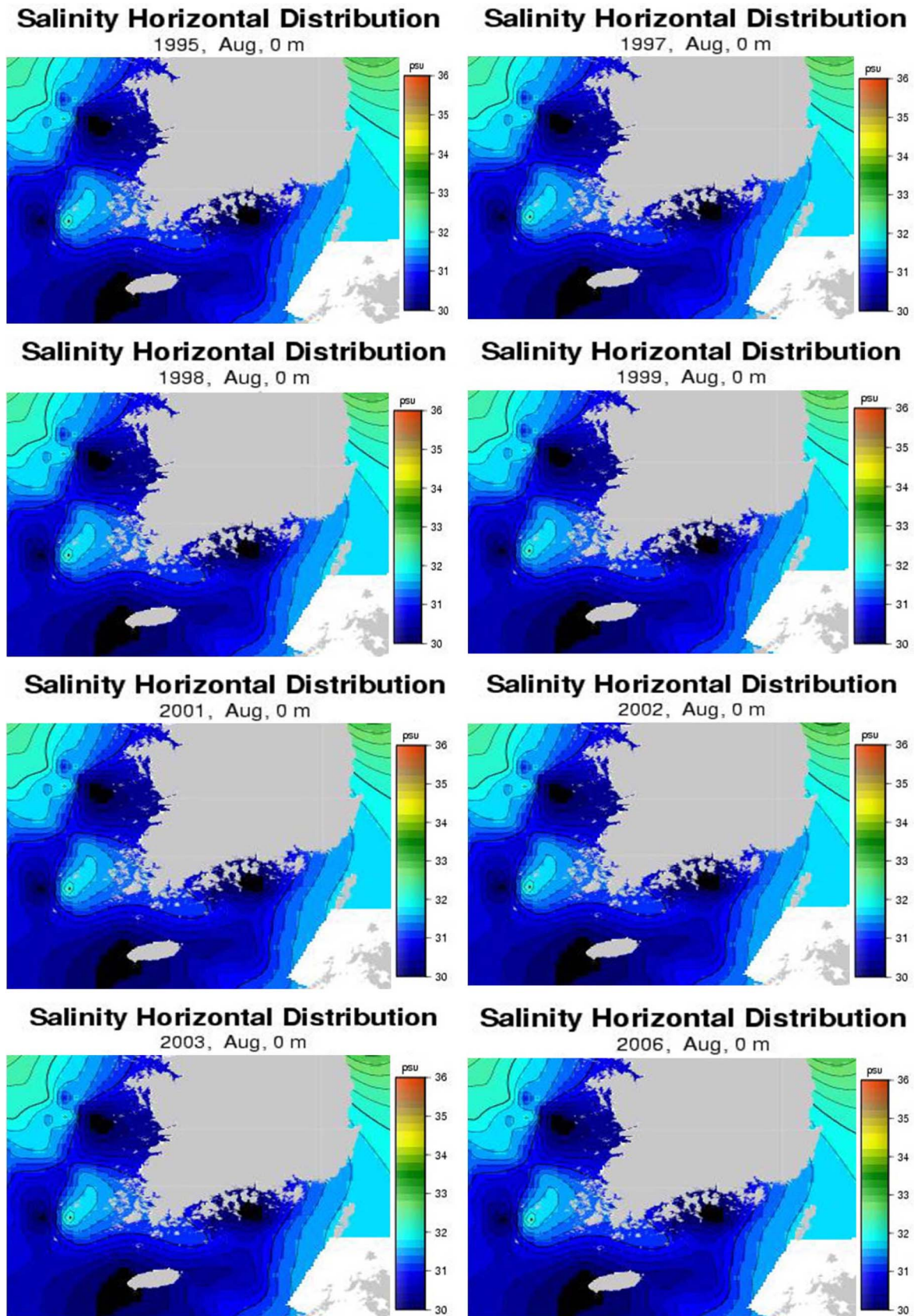


Fig. 4. (Continued) (b) Horizontal distributions of surface salinity in August of the year when *C. polykrikoides* blooms occurred near Narodo Islands.

2003년, 2006년에는 수온 또는 염분에 의한 전선 형성이 다소 불명하지만, 다른 5개년에 있어서는 수온 25.0 °C 및 염분 32.00 psu에 의한 열염전선이 한국 남해안을 따라 뚜렷이 형성되어 있음을 알 수 있다. 즉, 저온 고염의 한국 남해 연안수(KSCW)와 고온 저염의 쓰시마 난류(TWC) 사이에 전선을 형성하고 있음을 보여 준다. 그러나, 1999년의 경우는 한국 연안이 저염인 데 반하여, 외양은 고염인 점이 주목된다. 이것은, 전술한 Table 1에서 보는 바와 같이, 1999년 8월의 적조 발생 전 10일 동안의 강수량이 133.5 mm로 다른 해에 비해 상대적으로 많았고, 또한 이로 인해 염분도 29.52 psu로 그만큼 다른 해에 비해 상대적으로 낮았던 사실에 기인하는 것으로 생각된다.

3.2 열염전선 분포 특성

상기한 수온과 염분의 수평분포로부터 나로도 연안수와 외양역 사이에는 특히, 하계에 열염전선이 형성된다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 전선 형성에는 이 해역을 흐르는 TWC와 YRW 등이 관여하고 있을 것으로 생각된다. 이[1983]는 TWC의 표층에서의 수온과 염분이 동계에는 15 °C 및 34.4 psu 이상인 반면, 하계에는 동중국해의 저염수의 영향을 받아 28.5 °C 및 30.4 psu 정도라고 하였다. 또한, 그는 KSCW의 수온과 염분은 표층에서 동계에 8 °C 및 34.4 psu이며, 하계에 25.5 °C 및 31.8 psu 정도라고 하였다. 그러나, Choo[2002]는 하계 표층에서의 수온과 염분이 20~23 °C

및 염분 33.0 psu 이상을 KSCW, 21~25 °C 및 32.0~32.5 psu를 중간수(대마난류수계), 26 °C 이상 및 31.5 psu 이하를 TWC로 각각 정의하였다. 또한, Yang *et al.*[1998]은 한국 남해 및 동중국해 북부 해역에서 수괴들 사이에 형성되는 각 계절에 따른 다양한 형태의 수온 전선을 보고하였고, Yang *et al.*[1999]은 수온의 수평경사가 0.1 °C/km 이상일 경우를 연안 전선역으로 정의하였다.

한편, Hu *et al.*[2009]은 연평균 유출량이 9,200 MT에 이르는 YRW의 약 70%가 5월부터 10월까지의 홍수기에 집중되어 있다고 보고하고 있고, 또한 Hou *et al.*[2009]은 YRW에 의해 하구로 운반되는 다량의 영양염류로 인하여 1980년대 이래 유독성 적조가 양쯔강 하구 부근과 그 인접수역에서 자주 발생하고 있음을 지적하고 있다. 특히, Guo *et al.*[2007]는 중국 연안을 포함한 한반도 연안에 미치는 해류계의 하나로서 Tsushima Warm Current를 지적하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 기존의 연구결과를 바탕으로, Fig. 5에서 보는 바와 같이 나로도를 중심으로 하여 제주해협과 남해안을 횡단하는 세 개의 단면 A, B 및 C line을 설정하고 이들 단면에서의 수온 및 염분분포를 조사하였다. 여기서는 수온 및 염분분포에 의해 전선이 비교적 명료하다고 판단되는 2001년을 대표적으로 선택하였다. 본 단면 설정에 사용된 자료는 국립수산과학원이 지난 1961년부터 우리 나라 서해, 남해, 동해의 연안에서 외양에 이르기까지 25개 정선의 207개 정점에서 2개월 간격으로 매년 6회, 14개 표준 수층에서 실시하고 있는 정선해양

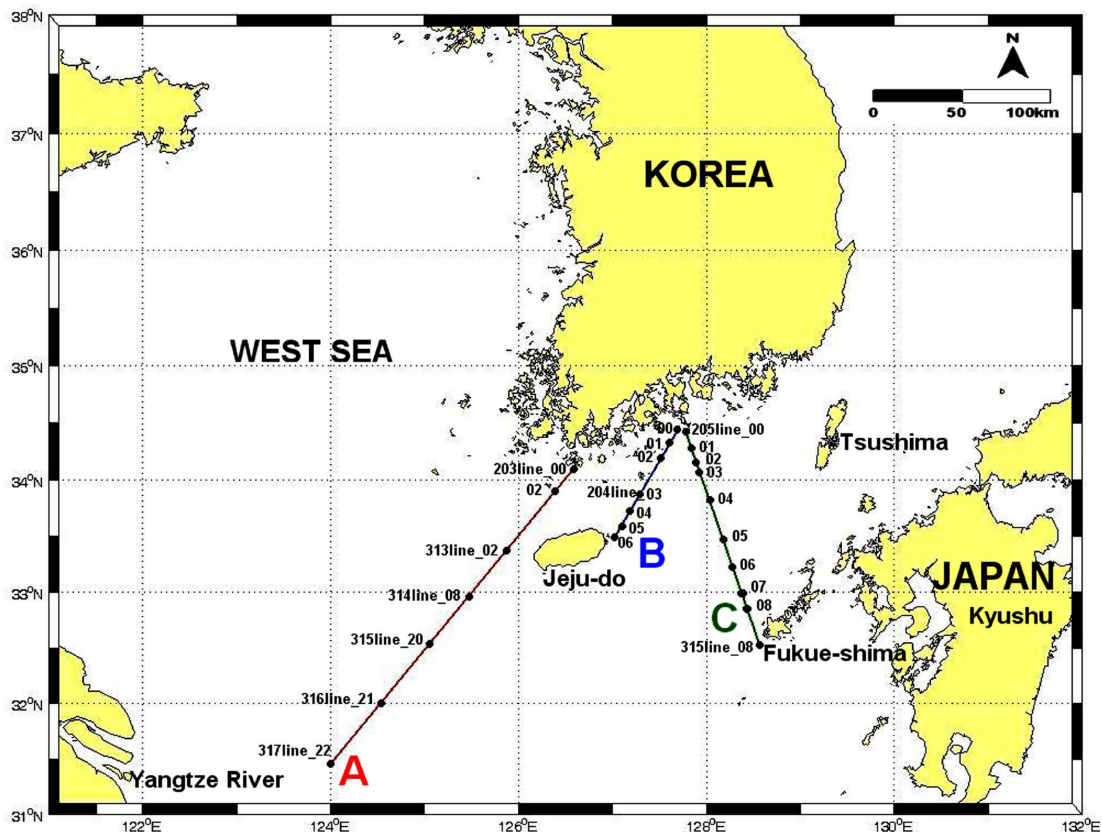


Fig. 5. Observational lines A, B, and C for vertical profiles of water temperature and salinity.

관측망에서 취득한 자료의 일부로서, 본 연구 목적에 맞는 세 개의 단면상의 정점만을 선택한 것이다. 또한, 여기에 제시된 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 해(이를 적조년으로 정의함)의 전선 형성의 특징을 파악하기 위해 적조가 발생하지 않았던 해(이를 평상년으로 정의함)인 2008년에 있어서의 T-S daigram을 상호 비교하였다.

3.2.1 A line

A line이 통과하는 해역은 CCW 또는 YRW, TWC 및 KSCW 등의 영향이 서로 혼재하는 곳으로 생각된다. 즉, 동계인 Fig. 6(a)에서는, 정점 317-22 및 314-08 사이에 존재하는 수온 10~14 °C, 염분 33.0~33.8 psu의 CCW 또는 YRW, 정점 314-08 및 203-02 사이에 존재하는 수온 14 °C 이상, 염분 34.0~34.2 psu의 TWC 및 TWC수계의 중간수(Intermediate Water, 이하 IW로 정의함), 그리고 정점 203-02 및 203-00 사이에 존재하는 수온 10~13 °C, 염분 33.4~34.0 psu의 KSCW가 각각 전선을 형성하고 있다. 특히, 이들 수괴의 수온 및 염분 분포 형태는 그 크기나 범위에 있어서 서로 매우 유사함을 알 수 있다. 하계인 Fig. 6(b)에서는 한국 연안의 정점 203-02 부근까지 수온 26 °C 이상, 염분 30~31 psu의

TWC가 영향을 미치지만, 정점 203-02 및 203-00 사이에는 수온 20~27 °C, 염분 30.4~32.2 psu의 KSCW가 위치하여 이들 간에 사이에 전선을 형성하고 있다.

한편, Fig. 7은 A line상에서 KSCW, TWC 및 YRW를 각각 대표한다고 판단되는 정점 203-00, 314-08 및 317-22에서의 수온염분값을 이용하여 작성한 2월과 8월의 T-S diagram이다. 특히, 여기서는 나로도 주변 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 해(적조년, red tide year)인 2001년과 적조가 발생하지 않은 해(평상년, normal year)인 2008년을 서로 비교하는 것에 의해 적조발생시의 환경 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 참고로 여기에 제시된 T-S diagram상의 수온 및 염분값은 국립수산물과학원의 정선해양관측시의 표준 수심인 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m에 있어서의 값들을 나타내며, 기호 표시는 적조년은 투명하게, 평상년은 검게 각각 나타내었다. 먼저, 2월의 경우 TWC(그림에서 수온 14 °C 이상, 염분 34.0 psu 전후인 정점 317-22에서의 수괴)는 적조년인 2001년과 평상년인 2008년간의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나, KSCW(그림에서 정점 203-00에서의 수괴) 및 YRW(그림에서 정점 317-22에서의 수괴)는 상당한 차이를 보인다. 즉, 적조년에는 TWC는 평상년과 비교하여 거의 차이가 없으나, KSCW

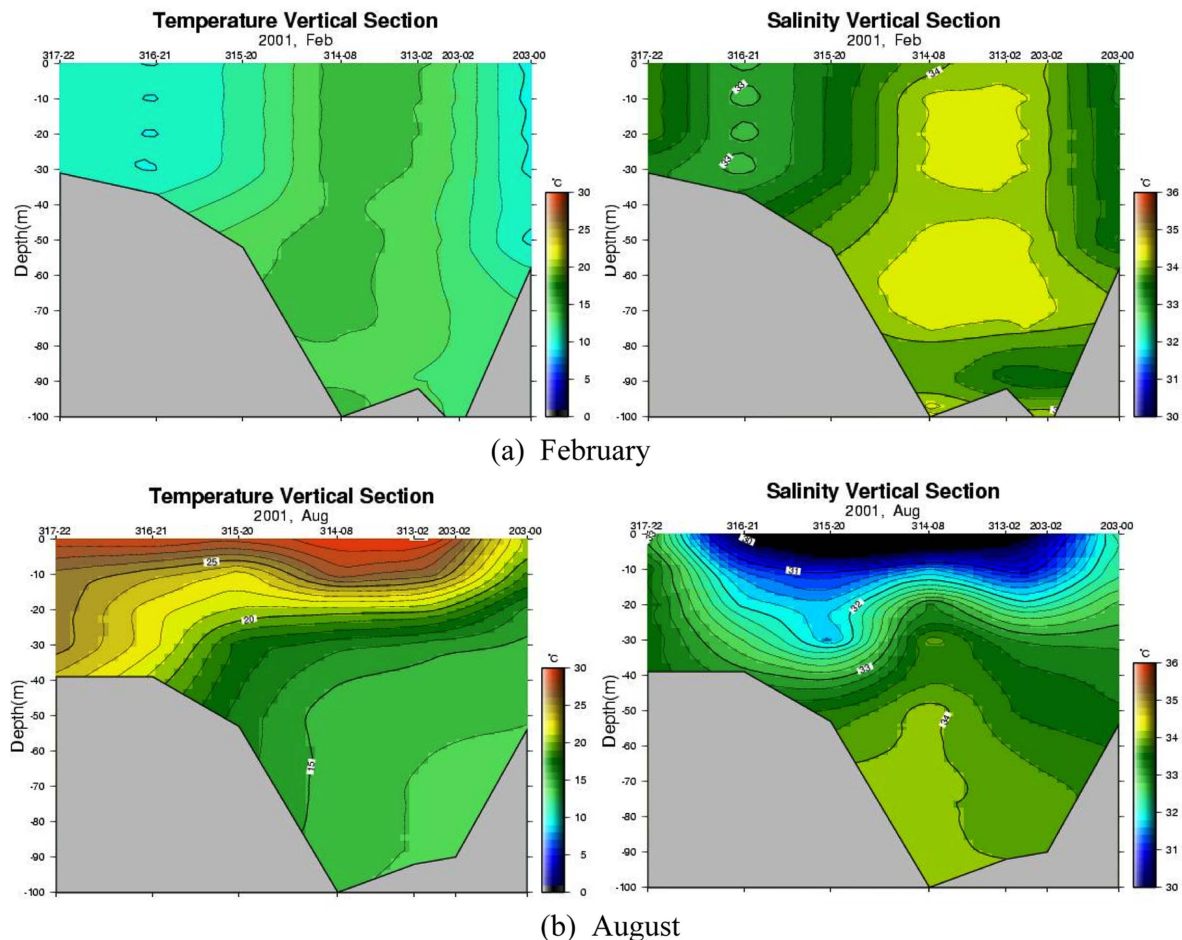


Fig. 6. Vertical cross-section of water temperature and salinity for the line A in February (a) and August (b), 2001.

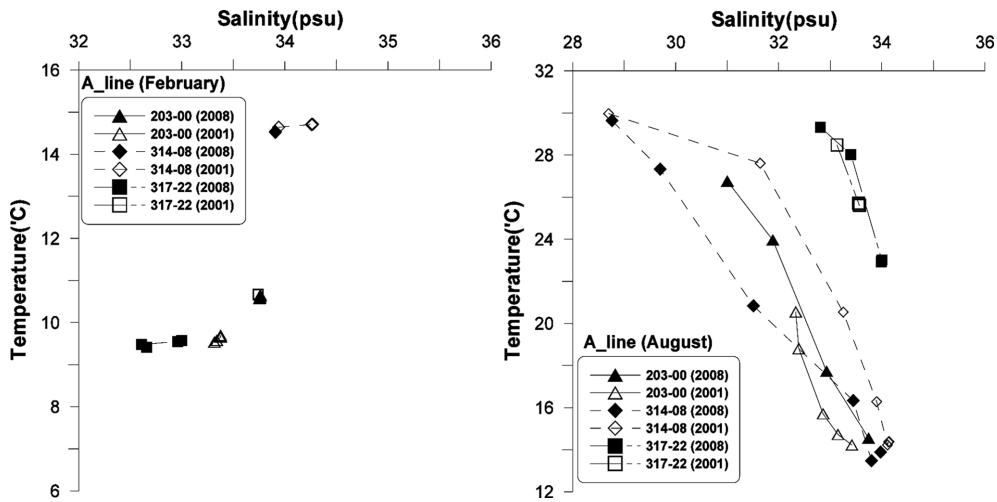


Fig. 7. T-S diagrams for the line A in 2001 (red tide year) and 2008 (normal year).

는 평상년보다 저온저염인 반면, YRW는 평상년보다 고온고염인 것을 알 수 있다. 한편, 8월의 경우 TWC는 2월과 마찬가지로 적조년과 평상년의 차이는 뚜렷하지 않다. 그러나, 적조년의 KSCW는 표층 부근의 수온 및 염분이 평상년에 비해 현저히 낮은 반면, YRW는 중층에서의 염분이 평상년에 비해 현저히 높다. 이것은, 적조년의 8월에는 평상년에 비해 KSCW와 TWC간의 수온 및 염

분차가 더 증가하며, 따라서, 그만큼 두 수괴간의 전선, 즉 열염전선이 더 강화된다는 사실을 의미한다.

3.2.2 B line

B line이 통과하는 해역은 TWC와 KSCW가 서로 상접하는 곳으로 생각된다. 동계인 Fig. 8(a)에서는 정점 정점 204-06 부근의

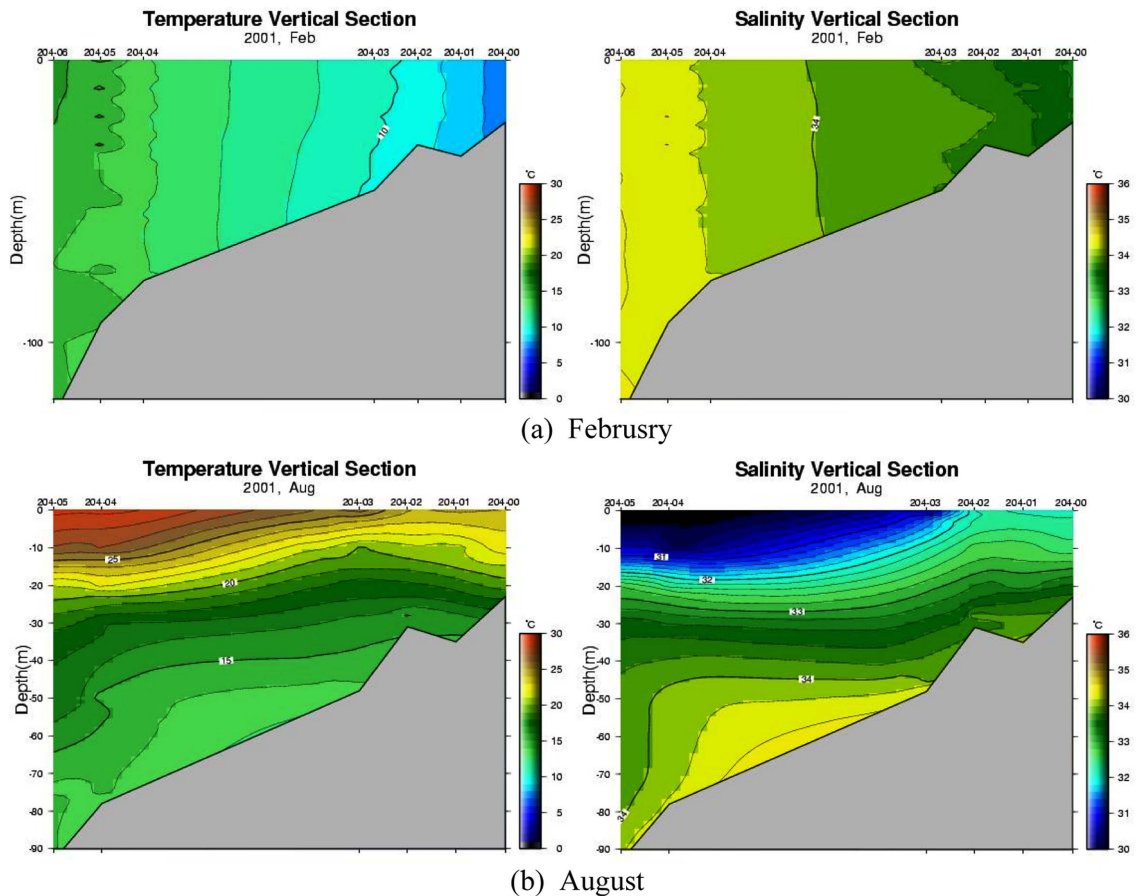


Fig. 8. Vertical cross-section of water temperature and salinity for the line B in February (a) and August (b), 2001.

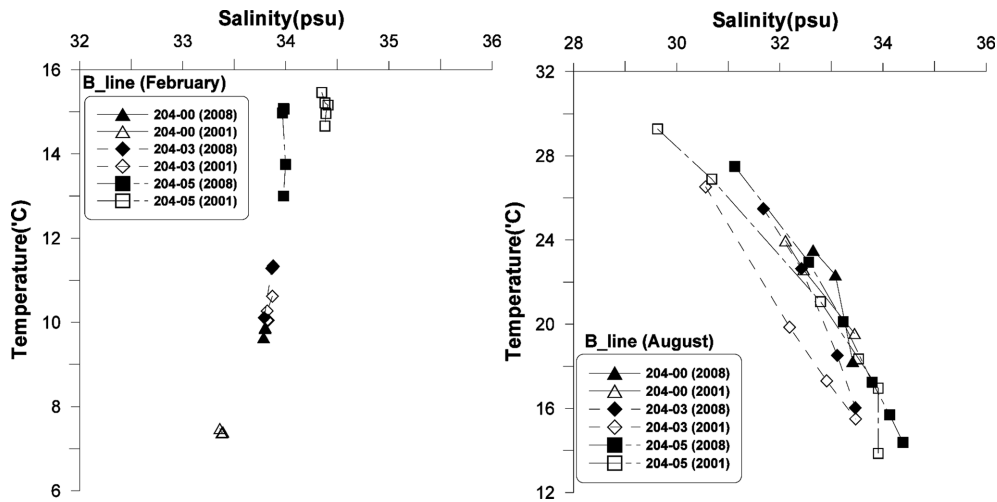


Fig. 9. T-S diagrams for the line B in 2001 (red tide year) and 2008 (normal year).

수온 15°C 이상, 염분 34.4psu 이상의 TWC, 정점 204-05 및 204-03 부근까지의 수온 10~16°C, 염분 33.8~34.4psu의 TWC수계의 IW, 그리고 정점 204-03 및 204-00 사이의 수온 10°C 이하, 염분 33.8 psu 이하의 KSCW가 각각 위치하고 있다. 하계인 Fig. 8(b)에서는 수온 26°C 이상, 염분 31 psu 이하의 TWC가 제주 해협내의 정점 204-03 부근까지 영향을 미치며, 정점 204-03 및 204-00 사이

에는 수온 23~26°C, 염분 31.4~32.2 psu의 KSCW가 위치하고 있다.

전술한 A line의 경우와 마찬가지로, Fig. 9는 B line상에서 KSCW, TWC 수계의 IW 및 TWC를 대표한다고 판단되는 정점 204-00, 204-03 및 204-05에서의 수온염분값에 따른 2월과 8월의 T-S diagram이다. 먼저, 2월의 경우 TWC(그림에서 정점 204-05에서의 수괴)는 적조년인 2001년에 평상년인 2008년에 비해 수온

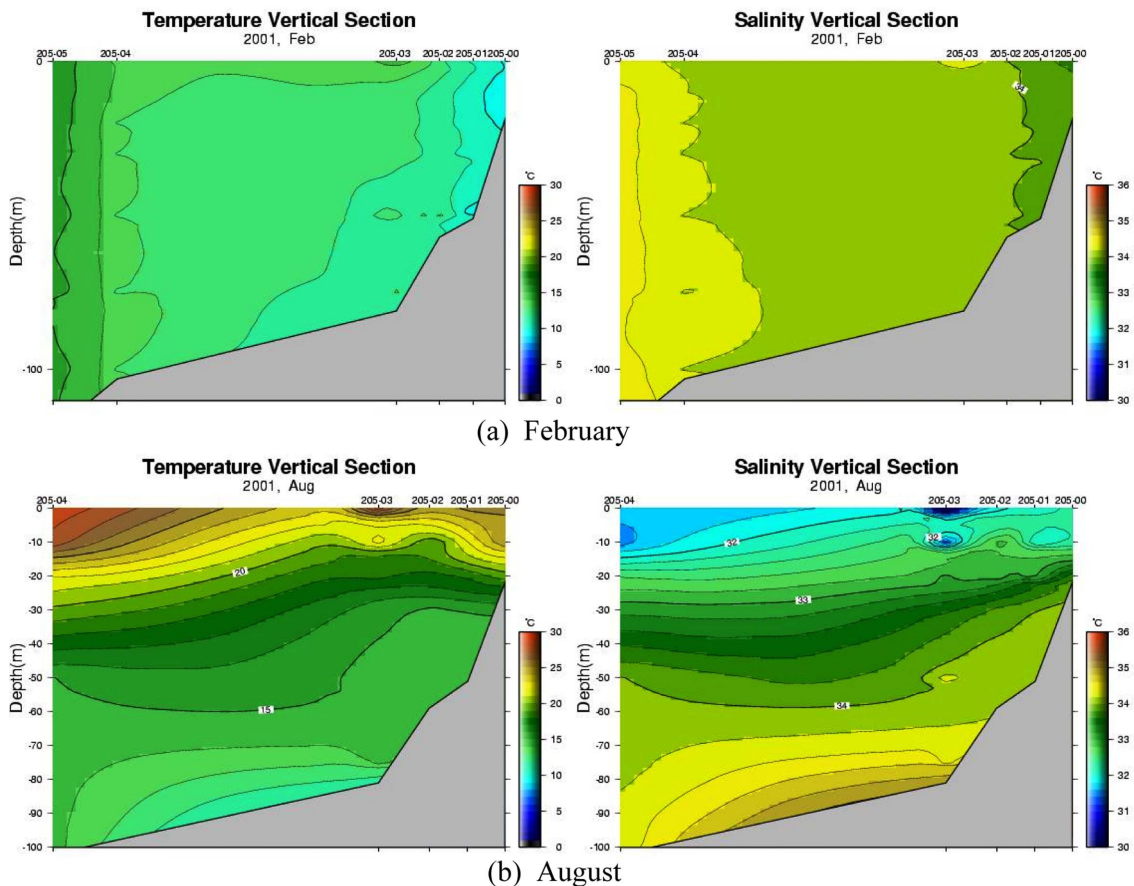


Fig. 10. Vertical cross-section of water temperature and salinity for the line C in February (a) and August (b), 2001.

및 염분이 다소 높은 반면, KSCW(그림에서 정점 204-00에서의 수괴)는 평상년보다 수온 및 염분이 현저히 낮다. 또한, TWC 수계의 IW(그림에서 정점 204-03에서의 수괴)는 정상년과 비교하여 수온은 다소 낮으나 염분은 거의 유사하다. 한편, 8월의 경우 적조년의 TWC는 평상년에 비해 상대적으로 표층 부근의 수온은 높고 염분은 낮다. 또한, TWC 수계의 IW는 표층에서는 평상년에 비해 수온이 높고 염분은 낮은 반면 중층이하에서는 수온과 염분 모두 평상년에 비해 상대적으로 낮다. 그러나, 적조년의 KSCW는 표층과 중층에서 평상년에 비해 수온은 다소 높고 염분은 다소 낮다.

3.2.3 C line

C line이 통과하는 해역은 전술한 B line에 비해 TWC의 영향을 보다 강하게 받는 곳으로 생각된다. 동계인 Fig. 10(a)에서는 정점 205-05 부근의 수온 15°C 이상, 염분 34.4 psu 이상의 TWC 및 TWC수계의 IW, 정점 205-02부터 연안까지는 수온 10~12°C, 염분 34 psu 이하의 KSCW가 위치하고 있다. 하계인 Fig. 10(b)에서는 정점 205-04 및 205-03 사이에 수온 26°C 이상, 염분 31.6 psu 이하의 TWC와, 수온 23~26°C, 염분 31.6~32 psu의 TWC계의 중간수, 그리고 남해안 연안에는 수온 24~26°C, 염분 31.8~32.4 psu의 KSCW가 각각 위치하고 있다. 그러나, 이 때의 KSCW는 독립적인 수괴가 아니라 TWC의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 또한, Fig. 11은 C line상에서 KSCW, TWC 수계의 IW 및 TWC를 각각 대표한다고 판단되는 정점 205-00, 205-03 및 205-04에서의 수온염분값에 따른 2월과 8월의 T-S diagram이다. 먼저, 2월의 경우 KSCW(그림에서 정점 205-00에서의 수괴)는 적조년인 2001년이 평상년인 2008년과 비교하여 수온 및 염분에 큰 차이가 없다. 그러나, 적조년 TWC 수계의 IW(그림에서 정점 205-03에서의 수괴)는 평상년에 비해 수온 및 염분이 다소 낮은 반면, TWC(그림에서 정점 205-04)는 평상년보다 수온과 염분이 더 높다. 한편, 8월에는 적조년의 KSCW는 표층 염분이 평상년보다 더 낮지만 저층 염분은 평상년보다 더 높고 수온은 낮다.

즉, 적조년에는 평상년에 비해 성층이 더 강화되는 것을 의미한다. 또한, 적조년 TWC 수계의 IW는 평상년에 비해 전층에 걸쳐 수온은 높고 염분은 낮다. 이에 대하여, 적조년의 TWC는 표층과 저층의 수온과 염분은 평상년과 거의 대등하지만, 중층에서는 평상년에 비해 염분이 다소 낮다.

4. 고 찰

전술한 Table 1에서 알 수 있듯이, 나로도 해역에서의 *C. polykrikoides* 적조는 현장 수온이 23.1~27.1°C(평균 25.1°C), 발생 월의 수온이 22.6~28.1°C(평균 25.5°C), 발생 월의 염분이 28.0~34.13 psu(평균 30.71 psu) 범위에서 발생하는 것으로 나타났다.

한편, 이 등[2008]이 1995년 이래 2007년까지 나로도 해역에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조를 주성분 분석한 결과에 따르면, 제1 주성분이 일사량, 제2 주성분이 수온, 제3 주성분이 COD 농도, 제4 주성분이 용존산소 등으로 나타났다. 또한, Lee *et al.*[2009]에 따르면, 가막만에서 1995년부터 2006년까지 발생한 *C. polykrikoides* 적조는 수온에 비해 훨씬 넓은 염분 변화를 가진 광염성으로 밝혀졌다. 따라서, 전술한 Table 1 및 이상의 결과를 종합해 볼 때, 나로도 해역의 *C. polykrikoides* 적조 또한 협온(stenothermal) 광염(eurysaline)의 조건하에 발생하는 것으로 추찰된다. 이것은 나로도 해역의 수온이 25.0~26.0°C에 도달하면 *C. polykrikoides* 적조는 염분 농도에 크게 구애받지 않고 발생한다는 것을 의미한다. 또한, Lee and Kim[2008], Lee *et al.*[2009]에 따르면, *C. polykrikoides* 적조가 빈발하는 8월의 수온은, 나로도 주변 해역이 22.8~27.8°C(평균 25.6°C), 가막만이 23.3~27.0°C(평균 25.0°C), 진해만이 24.0~26.6°C(평균 25.4°C)로, 세 해역 모두 평균 수온은 25.0~26.0°C의 범위로 서로 유사하였다. 반면, 8월의 염분은 나로도 주변 해역이 27.80~33.83 psu(평균 30.71 psu), 가막만이 16.34~34.02 psu(평균 26.80 psu), 진해만이 24.79~31.45 psu(평균 28.87 psu)로, 해역에 따라 상당한 차이를 보였다. 이러한 결과 또한 *C. polykrikoides* 적

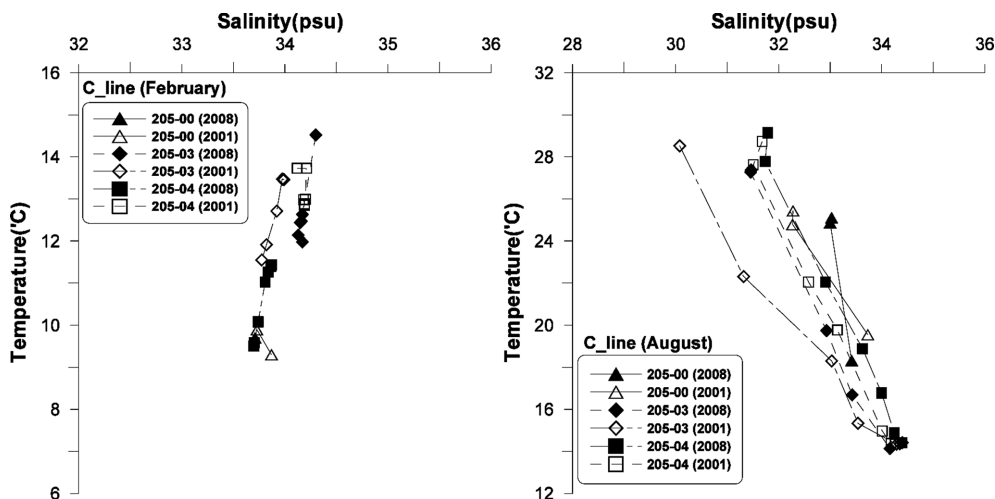


Fig. 11. T-S diagrams for the line C in 2001 (red tide year) and 2008 (normal year).

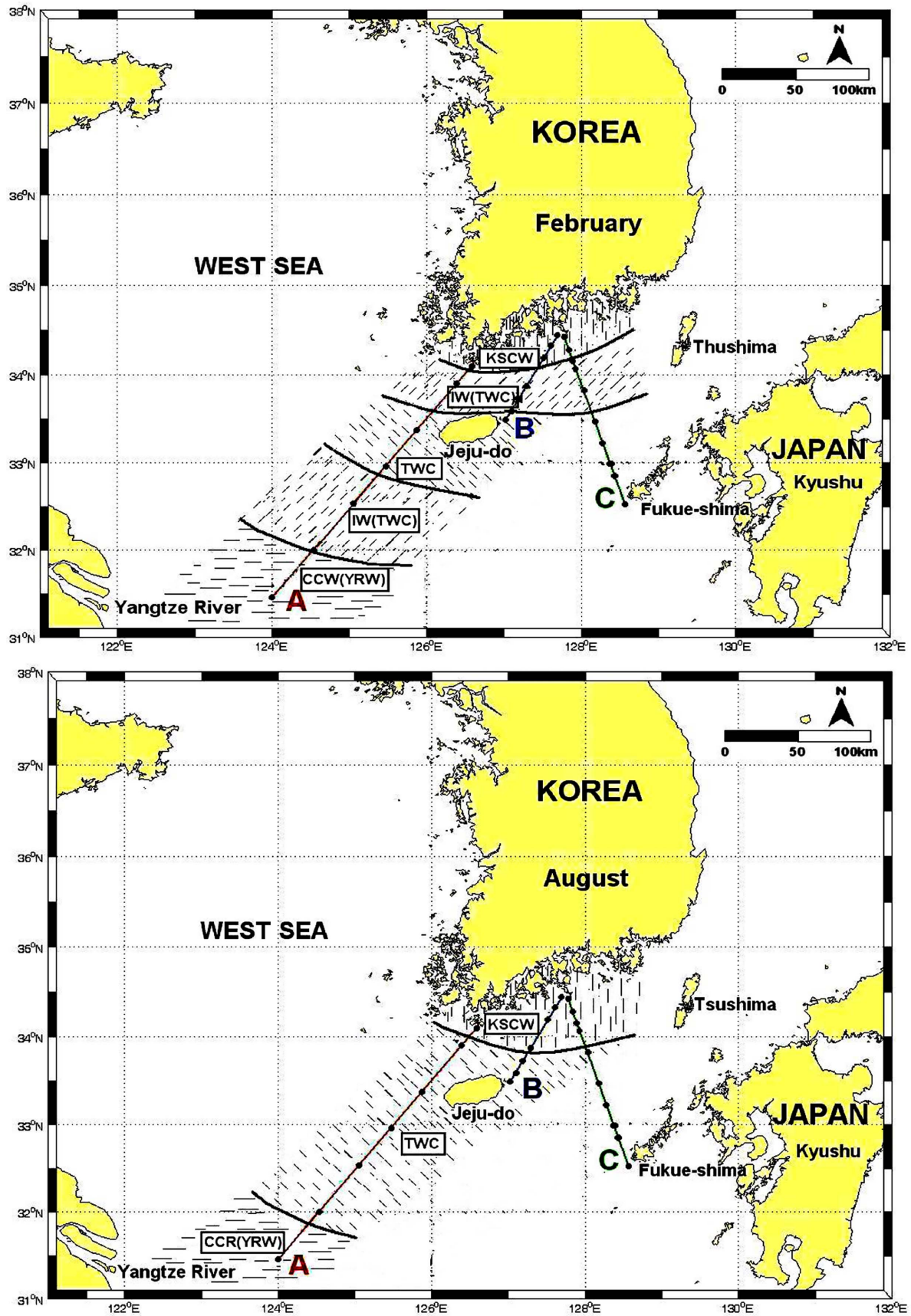


Fig. 12. Thermohaline fronts in relation to the outbreak of *C. polykrikoides* blooms in 2001.

조가 해역에 따른 염분의 폭 넓은 변화에도 불구하고 수온만 적절하면 발생할 수 있다는 사실을 뒷받침한다.

한편, 전술한 Fig. 3의 NOAA 영상자료 및 Fig. 4(a)의 정선관 측자료에 의하면, 나로도 부근 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 당시, 남해안의 찬 연안수와 보다 따뜻한 외양수와 사이에 뚜렷한 수온전선을 보여주었다. 특히, Fig. 4(b)의 염분의 수평 분포를 보면, 나로도 부근 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생한 1995년과 2001년 8월에 32~33psu의 등염선이 전술한 Fig. 4(a)의 25°C 등온선의 배치와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 이것은 나로도 주변 해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 발생할 경우 수온 염분에 의한 열염전선 형성의 가능성을 시사한다. 이러한 열염전선은 전술한 Fig. 5에서 나로도 해역을 중심으로 한 세 개의 단면 A~C 및 T-S daigram을 통한 수괴 분석을 통해 그 존재가 확인되었다. 이 열염전선은 Fig. 6, Fig. 8 및 Fig. 10에서 보는 바와 같이 계절에 따라 그 위치가 변화하고, 또한 동계에 연직방향으로 균질하던 수괴는 하계에 강한 성층을 보여 주었다. 이들 각 단면에서의 계절에 따른 전선 변화를 종합하여 나타낸 것이 Fig. 12이다.

먼저, 동계인 2월에는 저온저염의 KSCW, IW(TWC계의 중간수), 고온고염의 TWC, 저온저염의 CCW와의 사이에 네 개의 전선이 형성되어 있음을 보여 준다. 반면, 하계인 8월에는 저온고염의 KSCW, 고온저염의 TWC, 고온고염의 CCW 사이에 두 개의 전선이 형성되어 있음을 알 수 있다. 즉, 동계에 저온저염의 KSCW는 하계에는 저온고염이 되고, 동계에 고온고염의 TWC는 하계에는 고온저염이 되는 것을 알 수 있다. 또한, 동계에 KSCW와 TWC, TWC와 CCW 사이에 각각 존재하던 IW(TWC계의 중간수)는 하계에 소멸한다. 이때, KSCW는 동계에 비해 하계에는 외해쪽으로 그 세력을 다소 확장하는 반면, TWC는 외해쪽에서 한국 및 중국 대륙의 연안쪽으로, 즉 남북방향으로 각각 그 세력을 확장하는 경향을 나타낸다. 이것은 하계에 KSCW와 TWC, 또는 TWC와 CCW 사이에서 열염전선이 동계에 비해 보다 강화되었다는 것을 의미한다. 특히, 하계에 TWC는 인접한 YRW로부터 다량의 영양염류를 공급받을 가능성이 클 것으로 생각된다(Hu *et al.*[2009]; Hou *et al.*[1009]). 한편, 동계에 저온저염의 CCW는 하계에는 TWC에 비해 고온고염이 된다. 따라서, 나로도 주변 해역은 하계에 *C. polykrikoides* 적조가 발생할 경우, 육역에 인접한 KSCW로부터는 물론 외해의 열염전선에 위치한 TWC로부터 필요한 영양염을 공급받을 가능성이 크다고 판단된다. 이것은 양 등[2000]이 나로도 인근 해역에서의 적조 발생과 소멸에 양자강 하천수와 같은 외해수 유입이 밀접히 관여하고 있을 가능성을 시사한 것이나, Lee[2008]가 *C. polykrikoides* 적조가 발생하는 8월에 나로도 연안수와 양쯔강 하천수 사이에 전선이 형성된다고 하는 가설과는 상당한 차이를 보인다. 그러나, Lee and Lee[2006]가 나로도 주변해역에서의 *C. polykrikoides* 적조의 최초 발생이 쓰시마 난류에 의한 해수의 수송 때문이라고 추정된 것과는 정성적으로 일치한다. 이상으로부터, 나로도 주변해역에서 하계에 발생하는 *C. polykrikoides* 적조는 한국남해 연안수(KSCW)와 쓰시마 난류(TWC) 사이에 형

성되는 열염전선과 밀접히 연관되어 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

나로도 해역을 중심으로 한 한국 남해안에서 하계에 빈발하는 *C. polykrikoides* 적조의 원인을 규명하기 위하여 1995년부터 2008년까지 국립수산물과학원이 조사한 적조정보, 해양환경관측망, 정선 해양관측 및 위성정보 자료를 검토하였다. 그 결과, *C. polykrikoides* 적조 발생 당시 수온염분의 수평 및 연직분포는 다음과 같았다.

(1) 나로도 주변 해역에서 *C. polykrikoides* 적조는 평균적으로 수온이 25.0~26.0°C, 염분이 31.00psu 전후일 때 가장 많이 발생하였다. 특히, 이 해역에서의 *C. polykrikoides* 적조는 수온이 대략 25.0~26.0°C에 도달하면, 염분에 크게 구애받지 않고 발생하는 광염성의 경향을 나타내었다.

(2) 나로도 연안수, 즉 한국남해 연안수와 외해수 사이에는 동계 및 하계에 각각 서로 다른 열염전선이 형성되었다. 동계에는 저온저염의 한국남해 연안수, 쓰시마 난류계의 중간수, 고온고염의 쓰시마 난류, 저온저염의 중국대륙 연안수 사이에 네 개의 전선이 형성되었다. 반면, 하계에는 저온고염의 한국남해 연안수, 고온저염의 쓰시마 난류, 고온고염의 중국대륙 연안수 사이에 두 개의 전선이 형성되었다. 즉, 동계에 저온저염의 한국남해 연안수는 하계에 저온고염이 되고, 동계에 고온고염의 쓰시마 난류는 하계에 고온저염이 되었다. 이러한 전선 형성에 따른 수괴의 분포는 T-S diagram에 의해서도 확인할 수 있었다. 또한, 한국 남해 연안수는 하계에는 동계에 비해 그 세력을 외해쪽으로 확장하는 한편, 쓰시마 난류는 외해쪽에서 한국 및 중국 대륙의 연안방향으로 각각 그 세력을 확장하여 이들 간에 열염전선이 형성되었다.

(3) 이상으로부터, 나로도 주변해역에서 하계에 발생하는 *C. polykrikoides* 적조는 한국남해 연안수와 쓰시마 난류 사이에 형성되는 열염전선과 밀접한 연관을 가지고 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝히며, 여기에 감사사를 표합니다.

참고문헌

- [1] 서영상, 장이현, 김학균, 2003, “*C. polykrikoides* 적조의 시공간적 분포와 중규모 해양환경 변동간의관계성”, 한국지리정보학회지, Vol. 6, No. 3, 139-150.
- [2] 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000, “전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리화학적 특성”, 한국해양학회지, Vol. 5, No. 1, 16-26.
- [3] 이석우, 1983, 물리해양학 통론, 집문당, 235-245.
- [4] 이문옥, 문진한, 2008, “*Cochlodinium polykrikoides* 적조의

- 최초발생해역인 나로도 주변해역의 해양환경”, 한국해양환경공학회지, Vol. 11, No. 3, 113-123.
- [5] 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박중수, 고우진, 조영조, 박승운, 2001, “*Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책, 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경특성”, 한국해양학회지, Vol. 6, No. 4, 259-264.
- [6] 조은섭, 최용규, 2005, “남서 해역의 유해성 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* Margalef 모니터링을 위한 환경특성과 식물플랑크톤 군집 동태”, 한국환경과학회지, Vol. 14, No. 2, 177-184.
- [7] 최현용, 2001, “한국 남해 나로도 와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계”, 한국해양학회지, Vol. 6, No. 2, 49-62.
- [8] Choo, H.S., 2002, “The variations of oceanic conditions and the distributions of eggs and larvae of anchovy in the southern sea of Korea in summer”, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 35, No.1, 77-85.
- [9] Anton, A., Teoh, P.L., Mohd-Shaleh, S.R. and Mohammad-Noor, N., 2008, “First occurrence of *Cochlodinium* blooms in Sabah, Malaysia”, Harmful Algae, Vol. 7, 331-336.
- [10] Gobler, C.J., Berry, D.L., Anderson, O.R., Burson, A., Koch, F., Rodgers, B.S., Moore, L.K., Galeski, J.A., Allam, B., Bowser, P., Tang, Y. and Nuzzi, R., 2008, “Characterization, dynamics, and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms on eastern Long Island, NY, USA”, Harmful Algae, Vol. 7, 293-307.
- [11] Guo, Z.G., Lin, T., Zhang, G., Zheng, M., Zhang, Z.Y., Hao, Y.C., Fang, M., 2007, “Sedimentary fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River Estuary coastal sea for the past century”, Science of the Total Environment, Vol. 386, 33-41.
- [12] Hu, K.L., Ding, P.X., Wang, Z.B. and Yang, S.L., 2009, “A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China”, Journal of Marine Systems, Vol. 77, 114-136.
- [13] Hou, L.J., Liu, M., Yang, Y., Ou, D.N., Lin, X., Chen, H. and Xu, S.Y., 2009, “Phosphorus speciation and availability in intertidal sediments of the Yangtze Estuary, China”, Applied Geochemistry, Vol. 24, 120-128.
- [14] Kudela, R.M., Ryan J.P., Blakely, M.D., Lane, J.Q. and Peterson, T.D., 2008, “Linking the physiology and ecology of *Cochlodinium* to better understand harmful algal bloom events: A comparative approach”, Harmful Algae, Vol. 7, 278-292.
- [15] Lee, C.I. and Cho, K.D., 2001, “Variation characteristics of water masses by advection of Tsushima Warm Current in southern part of the East Sea”, 2001년 춘계수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, 242-243.
- [16] Lee, M.O., Kim, B.K., Kwon, Y.A. and Kim, J.K., 2009, “Characteristics of the marine environment and algal blooms in Gamak Bay”, Fisheries Science, Vol. 75, No. 2, 401-411.
- [17] Lee, M.O. and Kim, J.K., 2008, “Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea”, Marine Environmental Research, Vol. 65, No. 2, 128-147.
- [18] Lee Y.S. and Lee, S.H., 2006, “Factors affecting outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in coastal areas of Korea”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 52, 626-634.
- [19] Yang, Y.J., Kim, S.H. and Rho, H.K., 1998, “A study on the temperature fronts observed in the south-west sea of Korea and the northern area of the East China Sea”, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 31, No.5, 695-706.
- [20] Yang, Y.J., Kim, S.H. and Rho, H.K. and Jeong, D.G., 1999, “Relationship between SST fronts and purse-seine fishing grounds in the south-west sea of Korea and northern area of the East China Sea”, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 32, No.5, 618-623.
- [21] Zhou, M.J., Shen, Z.L. and Yu, R.C., 2008, “Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River”, Continental Shelf Research, Vol. 28, No. 12, 1483-1489.

2009년 6월 3일 원고접수

2009년 11월 23일 심사완료

2009년 11월 24일 수정본 채택