

## 한국 남해안에서 *Cochlodinium* 적조 확산모델

권철휘<sup>+</sup> · 조규대\*

부경대학교 해양산업개발연구소, \*부경대학교 해양학과

### Numerical Model for Spreading of *Cochlodinium* Bloom in the Southern Coastal Waters in Korea

Chul Hui KWOUN<sup>+</sup> and Kyu Dae CHO\*

Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

\*Dept. of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

The spreading *Cochlodinium polykrioides* bloom in the southern coastal waters of Korea was simulated using numerical model including the physical processes of water flow and the chemical processes of increasing cell of *C. polykrioides* by uptake of dissolved nutrients. The circulation of sea water was simulated by two dimensional tide model reflecting the main four tidal components of M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub> and permanent current was driven by inflow/outflow across open boundaries. According to the result of model which tidal and permanent current were reflected simultaneously, eastward flows entering the southern waters from the western waters of Korea are dominant, but westward flows are weak relatively. These result suggest that it is difficult for initial *C. polykrioides* bloom generated in the coastal waters of Goheung to move to the western coast of Korea through Jeju Strait. For spreading model of *C. polykrioides*, the range of generating distribution and the generating time of *C. polykrioides* bloom in coastal area are similar to those of observation data in the field. Wind is the most important factor in moving and distribution of red tide. Permanent current flowing eastward is also considered to be important factor and tidal current was a little influenced.

Key words: Red-tide, *Cochlodinium*, Numerical model, Tidal current, Permanent current

#### 서론

최근의 우리나라에서 발생하는 적조의 원인종은 대부분 편모조류이며, 이들 종은 고밀도화 및 그 발생기간이 장기화되어 가고 있다. 이로 인한 수산피해도 매년 증가되고 있는 실정이다 (NFRDI, 1997a; 1999b; 2000). 연구해역인 남해안에서 *Cochlodinium* 속은 1982년도부터 거의 매년 수산피해를 일으키고 있으며, 또 1992년에는 유독성 *Gyrodinium* sp.에 의해 통영과 거제부근 해역을 중심으로 고밀도 적조가 발생하였다 (Kim et al., 1999; Lee et al., 1999).

적조와 관련된 외국의 연구사례는 적조의 발생기구 구명과 방제기술의 개발분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다 (Yanagi et al., 1995). 또한, 국내에서도 1980년대 이후부터 적조생물의 발생 상황, 적조생물의 군집 및 증식에 미치는 환경요인 (Lim et al., 1993) 등 생물학적인 과정의 연구와 황토살포등에 의한 유독적조 방제대책 연구 (Na et al., 1998; Kim, 2000; Han et al., 2001)들이 활발히 진행되어오고 있다. 그러나 이러한 연구만으로는 남해연안에서 발생하는 적조의 이동 및 확산과정을 통한 피해 최소화를 위한 적조 방제대책에 미흡한 점이 있다. 따라서 한국 남해안에서 적조에 관한 연구를 위해서는 적조발생의 1차적인 원인인 적조생물 증식과정 뿐만 아니라 해양에서의 조류, 해류 및 바람 등의 2차적인 외부요인을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

한국 남해연안에서 해수순환을 파악하기 위하여 조석강제력과

개방경계를 통한 해수의 유·출입을 동시에 고려한 2차원 해수순환모델을 수행하였으며, 해수순환모델의 결과를 적조의 증식, 이동 및 확산과정의 모델에서 기초자료로서 이용하였다. 국립수산과학원 (NFRDI, 1997a; 1997b; 1999a; 1999b; 2000)에 의하면 1995년부터 2000년까지의 적조 상황자료를 조사한 결과, 1995년 이후의 적조발생에 따른 피해의 대부분은 *C. polykrioides*종에 의한 피해였다. 따라서 본 연구에서는 *C. polykrioides*종에 대한 적조발생상황을 고려하였으며, 연구해역인 남해연안에서 1998년 하계 적조발생 상황을 기초로 하여 적조생물의 생물학적인 과정과 해수순환의 물리화학적 과정을 동시에 고려한 적조모델을 구축하고, 적조발생상황을 수치모델로써 재현하고자 하였다.

#### 자료 및 방법

##### 1. 관측자료

적조의 발생, 확산 및 이동상황 등은 1998년 8월 31일부터 9월 26일까지의 국립수산진흥원 적조속보자료를 이용하였다 (NFRDI, 1999a). 또한, 연구해역 (Fig. 1)에서 적조생물의 증식에 필요한 해수중 질소 농도는 국립수산과학원에서 매년 발행하는 한국해양 환경 조사연보의 해수중 용존 무기질 농도를 이용하였는데, 남해연안의 총 33개 해역 (Fig. 3)으로 구분하여 1998년 8월의 해수중 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도를 이용하였다 (Table 1). 연구해역에서의 조류와 해류의 흐름을 파악하기 위하여 연안내만의 입구에 위치한 삼천포에서 1989년 9월 27일부터 10월 12일까지 약 15일간 Annderaa RCM-4을 이용한 해조류 관측자료와

<sup>+</sup>Corresponding author: kwounch@hanmail.net

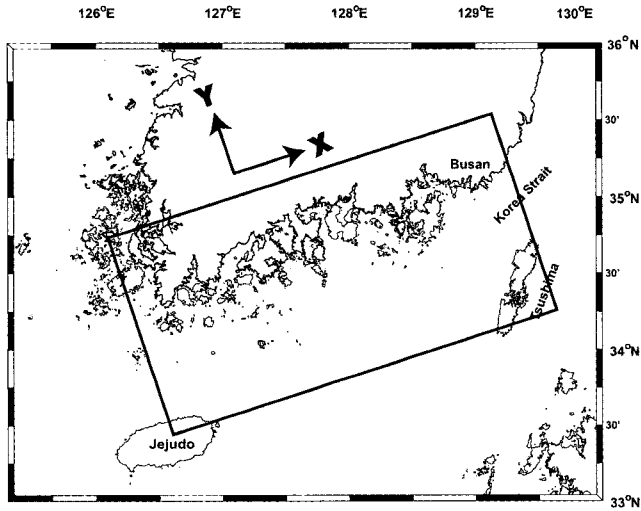


Fig. 1. Numerical model domain (rectangular box) of south sea of Korea.

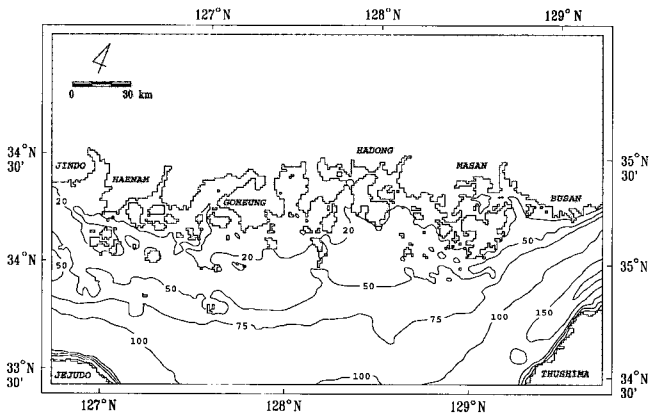


Fig. 2. Bathymetry of the study area.

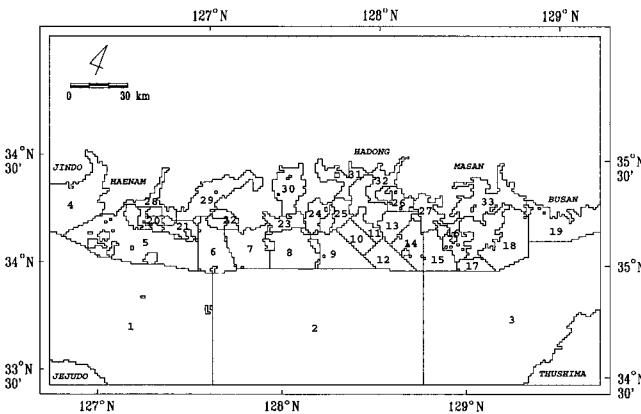


Fig. 3. Environmental monitoring map in south sea of Korea.

외해쪽에 위치한 거제도에서 1989년 7월 20일부터 8월 4일까지 관측된 해조류자료 (한국해양연구소, 1989; 1997)를 이용하였다.

수치실험을 통하여 연구해역에서의 해류를 계산하기 위하여 개

Table 1. Characteristics of coastal environment monitoring on August in 1998 by NFRDI

Area	Station	Term (mg/L)	1	2	3	4	5	6
Western Part of South Sea		NH <sub>4</sub> -N	0.000	-	-	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.040	-	-	-	-	-
Southern Part of East Sea		NH <sub>4</sub> -N	-	0.000	0.000	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	-	0.034	0.032	-	-	-
Jindo coast		NH <sub>4</sub> -N	0.013	0.004	0.005	0.008	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.083	0.122	0.042	0.052	-	-
Wando coast		NH <sub>4</sub> -N	0.015	0.004	0.034	0.019	0.007	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.088	0.049	0.068	0.017	0.021	-
Goheung coast		NH <sub>4</sub> -N	0.020	0.016	0.018	0.006	0.008	0.006
		NO <sub>3</sub> -N	0.090	0.108	0.118	0.031	0.020	0.048
Southern coast of Namhae		NH <sub>4</sub> -N	0.014	0.011	0.009	0.030	0.017	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.001	0.004	0.004	0.165	0.006	-
Outer coast of Tongyeong		NH <sub>4</sub> -N	0.010	0.014	0.009	0.009	0.017	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.197	0.129	0.028	0.016	0.035	-
Southern coast of Koje		NH <sub>4</sub> -N	0.006	0.044	0.002	0.018	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.143	0.201	0.094	0.081	-	-
Eastern coast of Koje		NH <sub>4</sub> -N	0.319	0.196	0.118	0.111	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.548	0.380	0.068	0.080	-	-
Busan coast		NH <sub>4</sub> -N	0.018	0.030	0.050	1.220	0.083	0.103
		NO <sub>3</sub> -N	0.050	0.049	0.050	1.415	1.099	0.162
Doam Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.005	0.013	-	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.049	0.026	-	-	-	-
Dekryang Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.015	0.017	0.009	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.059	0.040	0.008	-	-	-
Yoja Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.003	0.005	0.003	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.125	0.089	0.092	-	-	-
Kwangyang Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.054	0.061	0.066	0.081	0.050	0.055
		NO <sub>3</sub> -N	0.072	0.160	0.174	0.066	0.028	0.114
Jinju Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.285	0.128	-	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	1.035	0.666	-	-	-	-
Jinhae Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.121	0.392	0.258	0.422	0.165	0.267
		NO <sub>3</sub> -N	0.307	0.178	0.173	0.200	0.269	0.169
Kamak Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.005	0.133	0.006	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.126	0.028	0.009	-	-	-
Yosu coast		NH <sub>4</sub> -N	0.044	0.044	0.061	0.037	0.017	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.009	0.001	0.001	0.176	0.064	-
Sancheonpo coastal		NH <sub>4</sub> -N	0.083	0.046	0.015	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.427	0.273	0.195	-	-	-
Kosung-Jaran Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.097	0.061	0.069	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.643	0.201	0.074	-	-	-
Tongyeong coast		NH <sub>4</sub> -N	0.035	0.052	0.223	0.116	0.084	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.070	0.015	0.282	0.111	0.282	-
Masan Bay		NH <sub>4</sub> -N	1.346	0.839	-	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.093	0.127	-	-	-	-
Haengam Bay		NH <sub>4</sub> -N	0.461	-	-	-	-	-
		NO <sub>3</sub> -N	0.226	-	-	-	-	-

방경계에서의 해수 수송량을 조사하였는데, 해수 수송량의 산정은 1997년 3월과 4월에 모델영역의 외부경계에 해당되는 제주해협, 제주도 동부 및 대한해협에서 ADCP를 사용하여 25시간 동안 8~9회 반복 관측한 자료를 사용하였다 (Kim et al., 2000). 또한, 국립해양조사원의 1997년 4월 대한해협 서수도에서 ADCP 반복 관측 자료를 이용하여 대한해협 서수도를 통한 동해로의 유입량을

산정하였다 (심, 1998).

연구해역에서 바람의 특성을 파악하기 위하여 기상청 (METRI)의 5개 육상관측소인 완도, 고흥, 여수, 통영, 부산 지점에서 3년간 (1998~2000년), 3개월 (8~10월) 평균 바람자료를 조사하였다.

## 2. 조류모델

연구해역인 한국 남해안에서 해수순환을 재현하기 위하여 수심에 대해 연직 적분된 2차원 조류모델을 사용하였다. 2차원 조류모델의 기본방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 연직면에 대해 평균하고, 외력으로 지구자전에 의한 영향, 해저의 마찰력 및 증력을 포함하였다. 이상과 같은 가정하에서 수심에 대해 적분된 연직 2차원 조류모델의 운동방정식과 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_x}{(h+\eta)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_y}{(h+\eta)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (h+\eta)u}{\partial x} + \frac{\partial (h+\eta)v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

- x, y: 2차원 직교좌표 (x: 동쪽, y: 북쪽)
- u, v: x, y방향의 수심평균된 유속 (m/sec)
- $\eta$  : 평균해면으로부터의 해면변위값 (m)
- h : 평균해면하의 수심 (m)
- f : Coriolis parameter ( $2\Omega \sin \theta$ ,  $\Omega$ : 각속도,  $\theta$ : 위도)
- $A_h$  : 수평외동점성계수 ( $1 \times 10^2$  m<sup>2</sup>/sec)
- g : 중력가속도 (9.8 m/sec<sup>2</sup>)

또한, 식 (1), (2)에서  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ 는 해저마찰로, 식 (4), (5)에서와 같이 계산하였다.

$$\tau_x = -\gamma_b^2 (u^2 + v^2)^{1/2} u \quad (4)$$

$$\tau_y = -\gamma_b^2 (u^2 + v^2)^{1/2} v \quad (5)$$

여기서  $\gamma_b^2$ 는 해저마찰계수로서 0.0026으로 두었다 (Park and An, 1990). 차분방법은 Dufort-Frankel법을 이용한 leap-frog scheme를 사용하였다. 해면의 승강에 대해서는 semi-implicit scheme을 적용하였다 (Backhaus, 1983). 경계조건으로는 흐름이 경계를 가로지르지 못하도록 하였으며, 경계면에서 경계에 평행한 성분이 zero가 되는 non-slip condition ( $u=v=0$ )을 적용 하였다. Time step인  $\Delta t$ 는 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)조건을 만족하도록 결정하였다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2gH_{\max}}} \quad (6)$$

여기서  $H_{\max}$ 는 연구해역의 최대수심 (m),  $\Delta s$ 는 정방형 격자에서의 격자 크기 (m)이다. 연구해역인 남해안에서의 개방경계에서 주요 4개 분조 ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )의 진폭과 지각은 한반도 주변 조석조화상수 자료집 (한국해양연구소, 1996)으로부터 구하였고, 제주도과 대마도를 가로지르는 경계와 같이 자료가 없는 개방경계

에서는 Odamaki (1989)의 등조석도를 이용하였다.

모델의 격자구성은 x, y방향으로 동일한 1.25 km의 정방격자로 구성하였으며, 230×105개의 격자로 구성되어졌다. 사용된 좌표축은 x축의 방향은 제주도에서 대마도, y축의 방향은 제주도에서 추자도 방향으로 증가하는 직교좌표계이다. 좌표계를 일반적인 방법인 동-서, 남-북 방향으로 설정하지 않고 Fig. 1과 같이 회전시킨 이유는 개방경계에서의 입력조건을 보다 효율적으로 부과하기 위해서 남해의 평균적인 해류방향과 좌표축의 x방향을 일치시켰다.

## 3. 해수수송량 및 해류모델

개방경계 (Fig. 1)에서의 해수수송량의 산정은 1997년 3월과 4월에 모델 계산영역의 서쪽경계인 제주해협, 남쪽경계인 제주도 동부 및 동쪽경계인 대한해협에서 ADCP를 사용하여 25시간 동안 8~9회 반복 관측한 자료를 사용하였다. 관측된 일평균 해류분포에 의하면, 서쪽경계인 제주해협을 통하여 남해로 유입되는 해수 수송량은 0.37 Sv (1 Sv =  $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/sec)이었다 (Kim et al., 2000). 동쪽경계인 대한해협 서수도에서 1997년 4월의 ADCP반복 관측 결과에 의하면, 동해로의 유입량은 1.22 Sv이라고 하였다 (심, 1998). 3월과 4월의 제주해협과 대한해협에서 해수수송량에 큰 변화가 없고, 제주해협과 제주도과 대마도의 단면을 통하여 유입된 해류가 대한해협 서수도를 통하여 동해로 유입된다고 가정하면, 제주도와 대마도사이의 해협에서는 0.85 Sv의 해수수송량을 추산할 수 있다. 즉, 1997년 춘계 남해로부터 대한해협 서수도를 통해 동해로 유입되는 해수는 제주해협을 통하여 약 30%, 제주도와 대마도를 잇는 단면을 통하여 70%의 해수가 유입되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 Cho and Kim (1994)이 염보존방정식을 이용하여 박스모델에서 계산한 대한해협에서 제주해협을 통과한 수송량의 비율 (31~36%)과 유사한 값을 나타내었다.

또한, 대한해협의 서수도에서 해수수송량은 관측시기에 따른 변동이 있는데, Isobe et al. (1994)에 의하면 대한해협을 통한 해수 수송량은 하계에서 추계사이에서 최대를 보이며, 동계에서 춘계사이에 최소를 보인다고 하였다. 관측시기에 따라서도 그 양이 변동하는데, 1987년 9월 1일에 2.26 Sv, 1988년 9월에 0.98 Sv 그리고 1989년 9월에 2.35 Sv 등으로서 관측날짜에 따라 큰 차이를 보인다고 하였다 (Byun and Kaneko, 1999). 따라서, 대한해협 서수도에서 최대 수송량을 나타내는 9월의 평균 해수수송량은 3년간 (1987~1989년) 평균한 약 1.8 Sv로 산정하였다. 제주해협 및 제주도와 대마도사이의 단면을 통하여 유입되는 해수 수송량은 각각의 경계에서 유출입되는 해수수송량의 비율에 따라서 0.56 Sv, 1.28 Sv로 산정하였다.

이상과 같이 구한 각각의 외부경계에서의 해수 수송량을 이용하여 연구해역내에서 수치실험을 통하여 해류분포를 재현하였다. 해류모델에서는 서쪽경계인 제주해협과 남쪽경계인 제주도와 대마도를 잇는 단면을 통하여 해수가 남해로 유입되고, 동쪽경계인 대한해협 서수도를 통하여 동해로 유출되도록 하였으며, 그 유·출입량을 일치하게 하였다. 각각의 개방경계에서는 유입되는 해수량에 해당하는 만큼의 수위를 일정하게 높인 후, 조류모델과 같은 방법에 의한 수위차로써 모델을 구동하게 하였다. 모델의 결과값

이 평형상태에 도달하기에 충분하다고 판단되는 시간인 15일후의 계산값을 해류값으로 구하였다.

4. 적조확산모델

본 적조확산모델에서 사용된 격자망은 해수순환모델에서 사용한 격자망과 동일하게 사용하였는데, 이 모델은 해양 물리적인 과정과 생물학적인 과정을 포함한 복합모델이다. 본 연구에서는 적조생물의 이류 및 확산과정을 Lagrangian 입자추적법을 사용하는데, 적조생물 100개체당 1개의 입자로 간주하였고, 각각의 입자들은 단위시간 동안에 이류 및 확산에 의해 이동하는 것으로 가정하였다. 계산 시간간격인  $\Delta t$  시간 후의 입자의 위치인  $X_{n+1}$ 는 현재의 위치  $X_n$ 에서 유속 및 바람에 의해  $\Delta t$  시간 동안 입자가 이동한 거리와 난류확산 (turbulent diffusion)에 의해  $\Delta t$  시간 동안 입자가 이동한 거리를 합한 것과 같다는 가정을 하였다.

$$X_{n+1} = X_n + \frac{(U_c + U_w)\Delta t + R^2}{R} \\ R = \gamma \sqrt{6(K_x + K_y)\Delta t}$$

여기서,  $U_c$ 는 입자가 위치한 격자에서의 유속으로서 해수순환모델의 계산결과이다.  $U_w$ 는 바람에 의해 입자가 이동하는 속도를 나타내는데, 바람에 의해 직접적으로 영향을 받는 해양표면에서의 흐름을 풍속의 3%에 해당하는 속도 (wind drift current)로 적용하였다. 그리고, 확산항  $R$ 은 임의의 행보이론 (random-walk theory)에 의해 계산하였다.  $\gamma$ 는 uniform random number이며, 평균이 "zero"이고 표준편차가 1.0이다.  $D_h$ 는 분산계수 ( $5 \times 10^4$ )이며, 계산시간  $\Delta t$ 는 10분으로 두었다.

적조생물 자체의 증식과 사멸과정을 포함하는 생물학적인 과정은 적조세포가 해양에서의 생물제한요소인 질소를 섭취함으로써 성장하는 과정을 나타내었는데, 적조생물 세포내의 질소농도 축적과정은 Michaelis-Menten식의 변형에 의해 다음과 같이 가정하였다.

$$\text{day: } \frac{dq(t)}{dt} = V_{mdNH_4} \frac{N_{NH_4}(t)}{K_{sdNH_4} + N_{NH_4}(t)} = V_{mdNO_3} \frac{N_{NO_3}(t)}{K_{sdNO_3} + N_{NO_3}(t)} \quad (9)$$

$$\text{night: } \frac{dq(t)}{dt} = V_{mnNH_4} \frac{N_{NH_4}(t)}{K_{snNH_4} + N_{NH_4}(t)} \quad (10)$$

- $V_{mdNH_4}$  : maximum intake rate of ammonium at daytime (0.014/hour)
- $V_{mnNH_4}$  : maximum intake rate of ammonium at night (0.0076/hour)
- $V_{mdNO_3}$  : maximum intake rate of nitrate at daytime (0.016/hour)
- $N_{NH_4}(t)$  : concentration of ammonium
- $N_{NO_3}(t)$  : concentration of nitrate
- $K_{sdNH_4}$  : half-saturation constant of ammonium at daytime (0.58  $\mu M$ )
- $K_{sdNO_3}$  : half-saturation constant of nitrate at daytime (0.47  $\mu M$ )
- $K_{snNH_4}$  : half-saturation constant of ammonium at night (0.60  $\mu M$ )

초기값으로 사용하는 적조생물의 개체수는 연구해역에서 관측된 적조생물의 관측개체수를 적용하였는데, 적조생물이 주간에는 암모니아와 질산을 모두 섭취하지만, 야간에는 암모니아만을 섭취한다고 가정하였다. 해수중 질소와 암모니아의 농도는 연구해역의 해양특성을 반영하기 위하여 국립수산과학원에서 해양오염측정망

자료를 이용하여 총 33개의 구역으로 구분하였다 (Fig. 3). 적조생물의 증식속도에 관한 이전의 연구 (Yanagi et al., 1995)에서는 *Gymnodinium*의 최대증식속도를 0.033 division/hour로 사용하였으나, 본 연구에서는 남해 연안의 해수를 채수한 후, *C. polykrikoides*속을 실험실 배양실험에 의한 specific growth rate를 적용하였는데 (Kim, 1999), 수온 25°C에서 배양했을 때 0.435 division/day과 염분 30 psu 때의 0.363 division/day의 평균인 0.399 division/day을 적용하였다.  $q(t)$ 의 초기값은 1.0으로 두었으며, 생물학적인 과정을 거친 후의  $q(t)$ 의 값이 2.0을 초과하게 되면, 세포분열을 한다고 가정하여 세포수를 2개로 증가시켰다. 첫 번째 세포의  $q'(t)$ 의 값은 1.0로 두었으며, 두 번째 세포의  $q'(t)$ 는  $q(t) - 1$ 로 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 조류

조류모델의 검증은  $M_1, S_2, K_1, O_1$  등 각각의 분조별로 조류를 계산한 후, 계산된 각각의 조위와 조류에 대해서 실측된 관측자료와 비교하였다. 조위 검증은 남해의 해안선에 인접한 국립해양조사원의 부산, 통영, 여수, 완도 및 거문도 검조소 (T1~T5)에서 1998년 9월 한달 동안 관측된 매시별 자료를 이용하였다 (Fig. 4). 검증결과를 살펴보면, 반일주조인  $M_2$ 분조와  $S_2$ 분조의 조위검증에서는 계산값이 관측값을 비교적 잘 재현한 것으로 나타났으나, 일주조인  $K_1$ 분조와  $O_1$ 분조의 조위 검증에서는 반일주조에 비하여 상대적인 계산값과 관측값의 차이가 나타났다 (Fig. 5). 이와같은 결과는 진폭과 위상의 변동이 크게 나타나는  $K_1$ 과  $O_1$ 분조의 무조점이 계산영역의 동쪽 개방경계와 인접한 해역에 위치하기 때문에 나타난 결과로 판단된다 (Kim et al., 2000).

조류검증은 계산결과값과 C1, C2의 두 개 정점 (Fig. 4)에서 관측된 자료와 비교하였는데 (Fig. 6), 삼천포의 C1정점에서는 일주조 성분의 조류는 크기와 방향면에서 비교적 계산값이 관측값을 잘 재현한 것으로 나타났다. 반면, 반일주조 성분의 조류에서 유

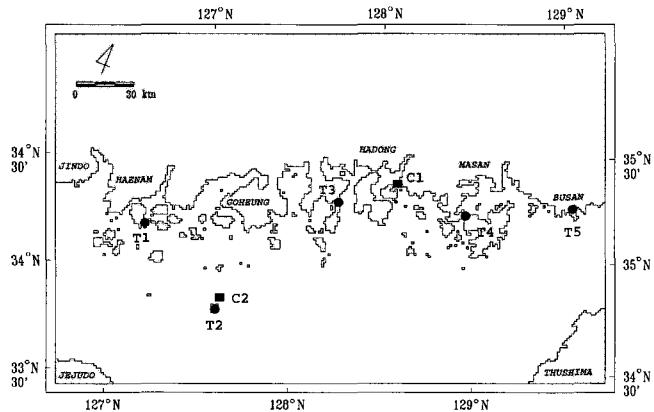


Fig. 4. Locations of model verification points for the surface elevation (T1~T5 stations) and for currents (C1 and C2 stations).

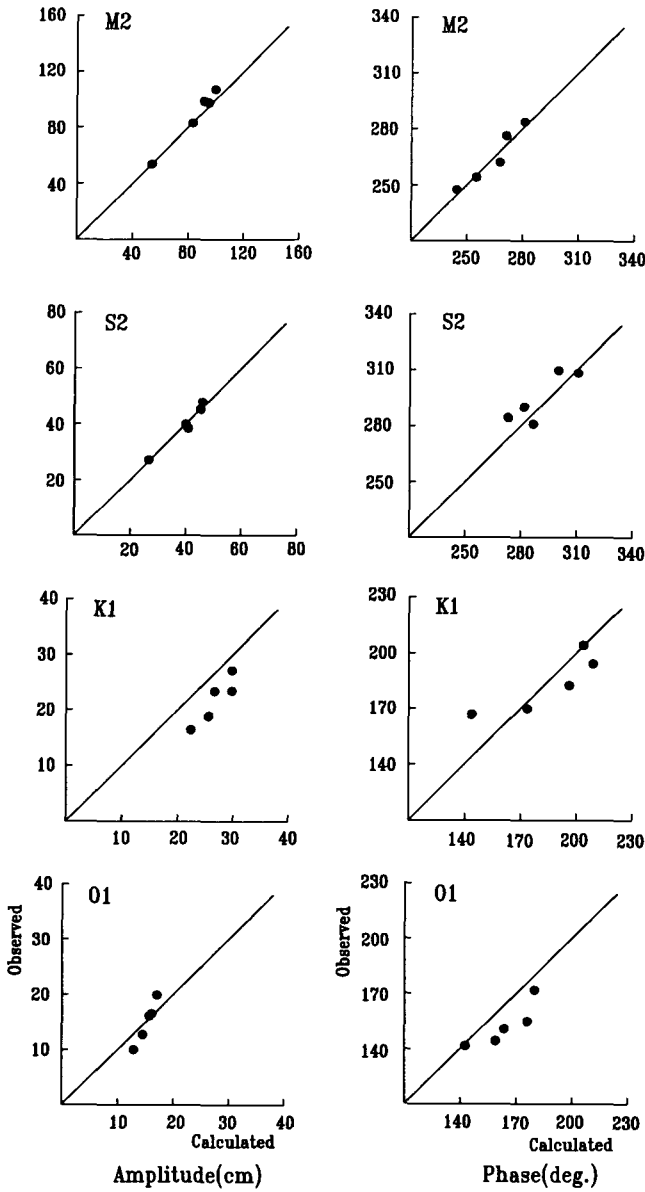


Fig. 5. Computed and observed amplitude and phase of  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  tides.

속의 세기는 계산값이 관측값에 비하여 작게 나타났으며, 조류의 방향은 계산값이 관측값에 보다 북향성분이 강하게 나타났다. 이 결과는 검증지점의 연안 경계지형을 계산격자가 잘 재현하기 못하였고, 바람 등 다른 외부요인을 고려하지 않았기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 외해측에 위치한 거문도의 C2정점에서 조류검증에서 조류의 세기는 계산값과 관측값이 서로 유사하게 나타났으나 조류의 방향은 계산값이 관측값보다 북향성분이 크게 나타났다. 이와같이 계산값에서 북향성분이 우세한 것은 바람에 의한 취송성분과 해류성분이 고려되지 않은 결과로 판단된다.

주요 4대 분조에 의한 조류계산결과를 살펴보면, 동쪽의 개방경계를 기준으로 하여 서향류가 최강일 때 (Fig. 7(a))에는 제주해협과 대한해협을 통하여 해수가 남해로 대부분 유입되어 제주도와

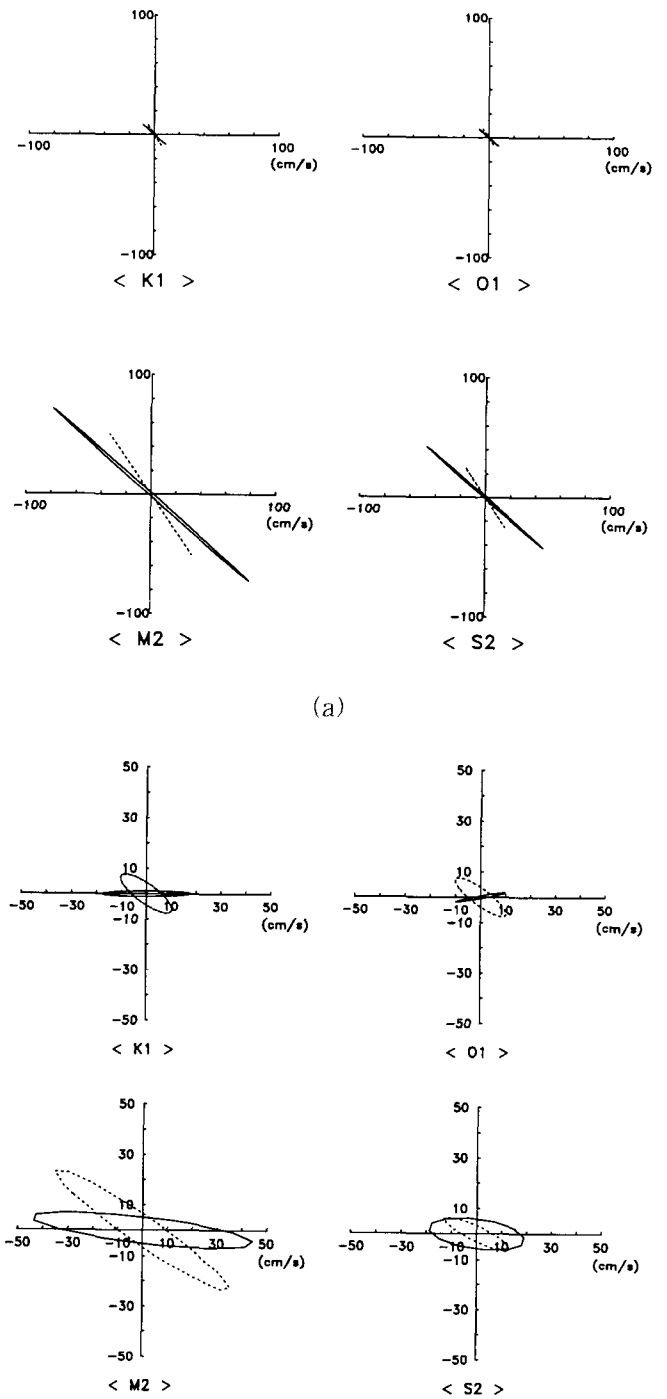
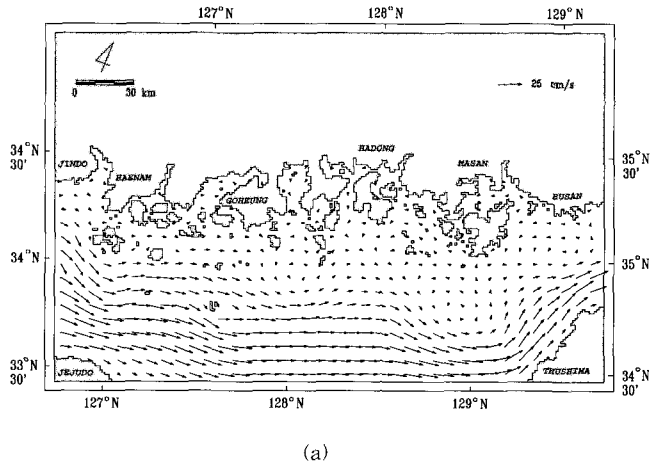
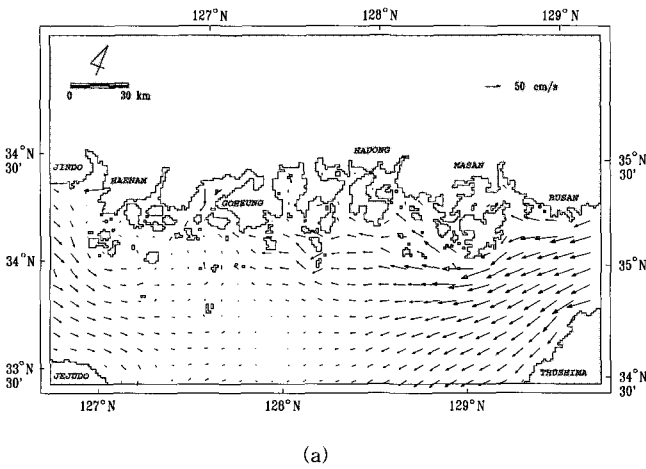


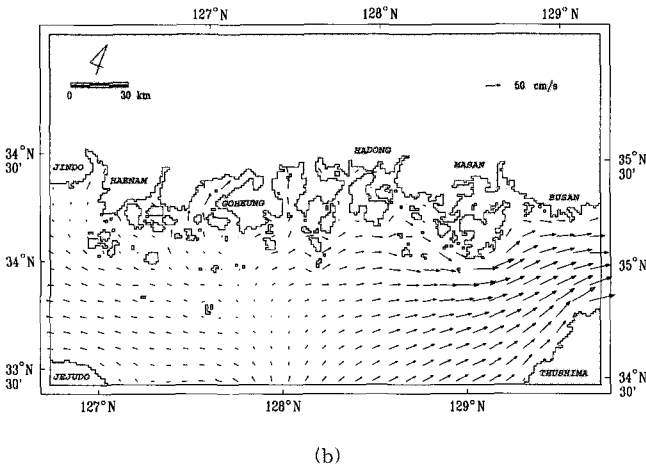
Fig. 6. Comparison between observed (solid lines) and calculated (dashed lines) tidal currents at C1 station (a) and C2 station (b).

대마도 사이의 남쪽경계를 통해 외해로 유출되는 것으로 나타났다. 동향류가 최강일 때 (Fig. 7(b))에는 거문도 동쪽해역을 중심으로 제주도과 대마도 사이의 해역에서 유입된 해수가 각각 제주

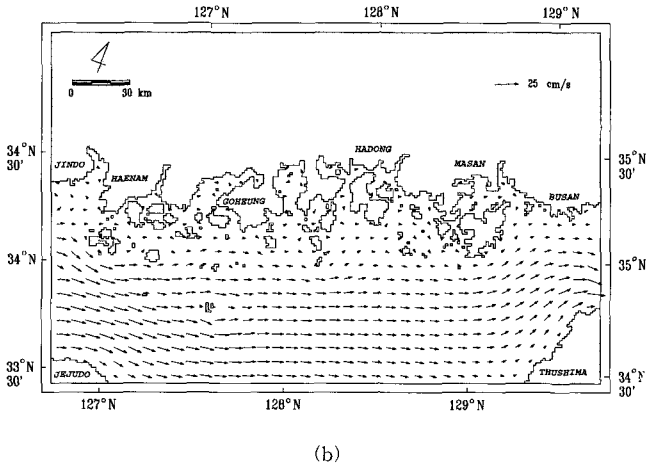


(a)

(a)



(b)



(b)

Fig. 7. Instantaneous velocity distributions at the time of maximum westward (a) and eastward (b) flow by tides.

Fig. 8. Velocity distributions calculated permanent currents with real depth (a) and constant depth (b).

해협과 대한해협을 통해 빠져나가는 양상을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 Odamaki (1989)에 의한 거문도를 기점으로하여 동·서 양쪽이 서로 반대의 위상을 나타낸다는 연구와도 일치하고 있다.

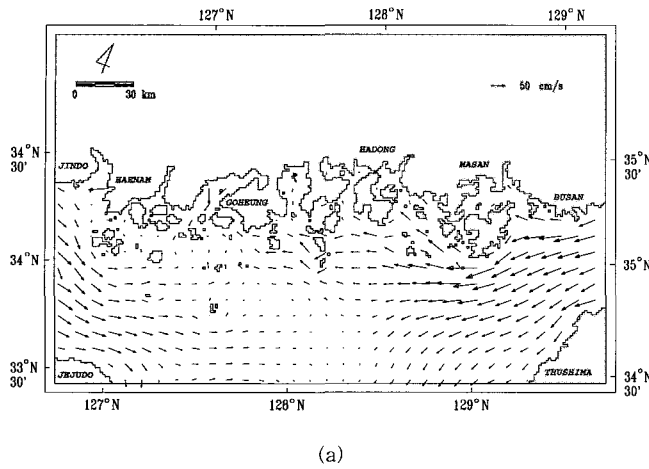
2. 해류

해류모델의 계산결과 나타난 해류의 유속을 살펴보면 (Fig. 8 (a)), 제주도해협 중앙부근에서 약 25 cm/sec의 강한 동향류가 나타났는데, 이것은 국립해양조사원 발행의 항류도에서 나타난 0.5 knots (약 25 cm/sec)와 일치하는 결과이다. 계산결과 나타난 제주도와 인접한 동측해역에서는 남하하는 약 5 cm/sec의 흐름 또한, 수로국발행의 항류도에서 관측된 0.1 knots (약 5 cm/sec)의 남향류와도 일치하고 있다. 특히, 대한해협의 수심 200 m 이상의 최심부인 골부근에서 약 25 cm/sec 이상의 강한 해류가 나타났는데, 이것은 최대 유속 28 cm/sec에 이르는 동향류가 제주해협 끝의 북쪽사면에 나타난다 (Suk et al., 1996)는 기존의 결과와 유사성을 보이고 있다.

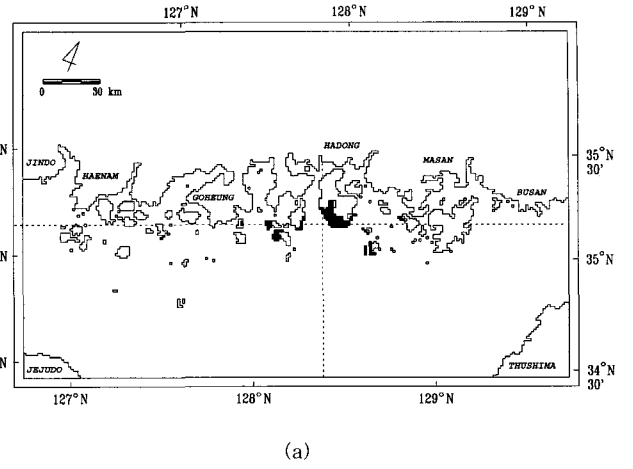
거제도 남쪽해역에서 나타나는 반원형의 해류흐름은 Kim et al. (2000)에 의하면 해류의 주축이 연안역으로부터 멀어지거나 가까워지는 경향은 해저지형에 의한 것으로 사료된다고 하였다. 따라

서 해류분포에 영향을 주는 수심차이에 의한 영향을 조사하기 위하여 연구해역의 모든 계산격자에서 수심을 50 m로 균일하게 두고 해류모델을 수행하였다. 실제 수심을 적용하였을 때 나타난 거제도 남쪽의 반원형의 해류 흐름은 나타나지 않았으며 전반적인 해류의 형태는 서쪽에서 동쪽으로 진행하는 방향의 흐름을 나타내었다 (Fig. 8(b)). 이상과 같은 결과를 미루어볼 때 수심변화에 의해서 반원형의 해류가 생성된다는 결과를 수치실험을 통하여 파악할 수 있었다.

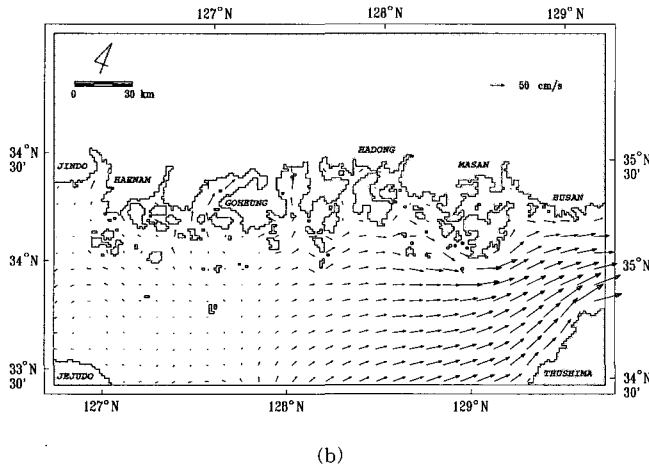
조류와 해류모델의 결과를 합하여 해수의 순환을 살펴보았다. 동쪽 개방경계를 기준으로 서향류가 최강일 때의 흐름을 살펴보면 (Fig. 9(a)), 최대 유속은 거제도 남쪽 약 10 km 해역에서 약 100 cm/sec 이상의 강한 흐름을 보였으며, 제주해협에서는 약 70 cm/sec의 최강유속을 보였다. 동향류가 최강일 때의 흐름을 살펴보면 (Fig. 9 (b)), 쓰시마 북서쪽 약 10 km 해역에서 100 cm/sec 이상의 최강 유속이 나타났다. 이상과 같은 결과에서 볼 수 있듯이 제주해협에서는 남해연안으로 유입되는 동향류가 우세한 반면에 남해연안에서 서해쪽으로 유출되는 서향류의 세기는 상대적으로 미약한 것으로 조사되었다. 이것은 왕복성 조류와 지속적으로 동향류의 해



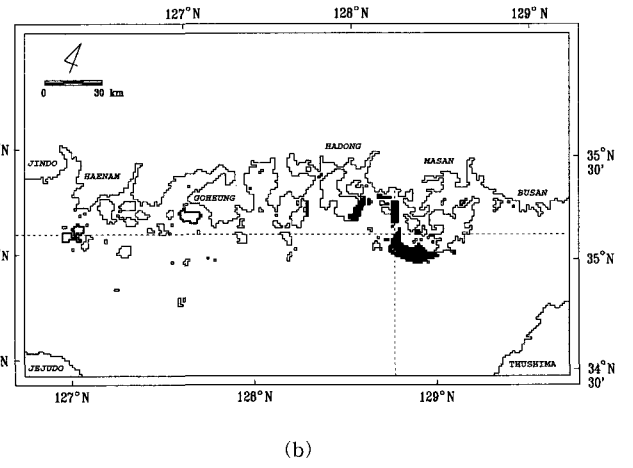
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 9. Velocity distributions at the time of maximum westward (a) and eastward (b) flow by tidal currents and permanent currents.

Fig. 10. Red tide areas observed on 18 (a) and 26 (b) September 1998.

류가 합쳐지면서 서향류의 유속이 상쇄되었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 최근 적조의 최초발생해역인 고흥연안에서 발생한 적조가 제주해협을 통하여 서해쪽으로 이동하기 어렵게 만드는 원인중에 하나라고 추정된다.

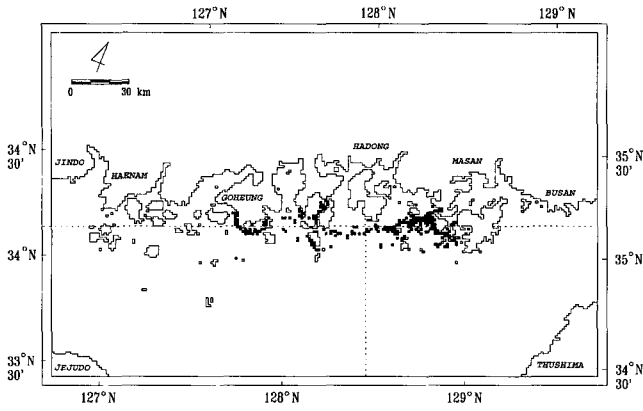
3. 적조확산모델

연구해역인 한국 남해안에서 발생한 적조의 이동과정 및 확산분포를 파악하기 위하여 고흥연안과 외나로도 남쪽해역에서 최초로 발생한 *C. polykrikoides*종의 적조발생상황을 1998년 8월 31일부터 최대 bloom이 일어난 9월 26일까지 수치실험으로 재현하고자 하였다. 최초 발생일로부터 18일후인 9월 18일과 최대 bloom이 일어난 9월 26일의 적조발생상황과 계산결과를 비교하였다.

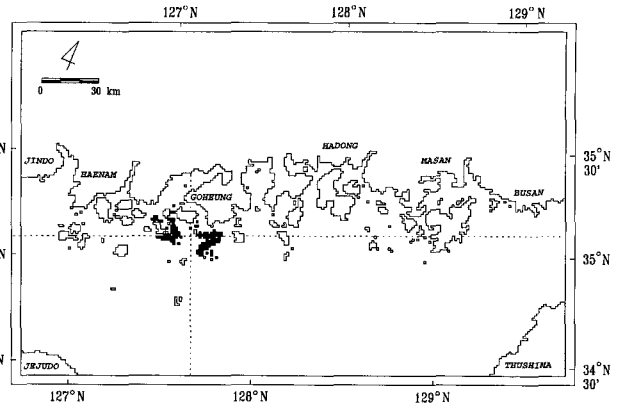
먼저, 조류와 해류뿐만 아니라 바람에 의한 영향 (Lange and Huhnerfuss, 1978; Han et al., 1995)을 파악하기 위하여 육상에 위치한 기상청 5개 지점 (완도, 고흥, 여수, 통영, 부산)에서 3년간 (1998~2000년), 3개월 (8~10월) 평균 바람자료인 서남서풍의 3 cm/sec의 가상바람을 적용하였다. 계산결과와 관측자료를 비교

한 결과, 모두에서 적조가 최초 발생지역으로부터 동쪽방향으로 이동 및 확산되었으며, 최초 발생해역으로부터 가장 동쪽에서 관측된 적조의 위치도 계산결과와 일치하였다. 반면, 고흥반도 남서쪽 일부 연안해역과 가막만의 돌산도 서쪽연안해역에서는 적조가 관측되지 않았으나, 계산결과에서는 나타났다. 그 원인은 연안경계지형이 적조가 해류와 바람의 영향에 의해 동쪽으로 이동하는 것을 방해하였기 때문에 나타난 결과로 추정된다 (Fig. 11(a), (b)). 해수순환모델과 적조증식모델을 이용하여 적조발생상황을 재현한 결과, 계산결과가 적조발생상황을 관측자료와 동일한 위치와 범위까지는 재현하기가 어려웠지만 전체적인 적조의 발생 범위와 이동시기는 비교적 유사하게 재현한 것으로 나타났다.

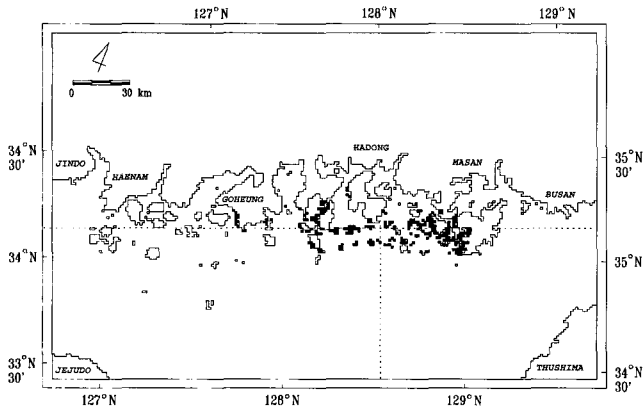
바람의 영향이 고려되지 않은 조류가 적조의 이동 및 확산과정에 어떤 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 조류모델의 결과와 적조의 증식과정을 결합하여 수치실험을 수행하였다. 9월 18일의 계산한 결과 (Fig. 12(a)), 외나로도 서쪽해역과 고흥반도 남서쪽의 평일도와 금당도 사이의 해역에서 발생한 것으로 나타났으며, 9월 26일의 계산결과 (Fig. 12(b))에서는 9월 18일의 발생분포에서 더 확장된 형태로 나타났으나 그 발생범위를 크게 벗어나지는



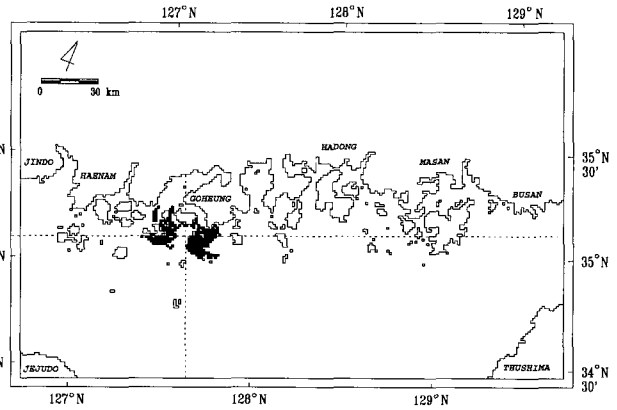
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 11. Distribution of calculated red tide reflected with tidal currents, permanent currents and ideal wind on 18 (a) and 26 (b) September 1998.

Fig. 12. Distribution of calculated red tide reflected only tidal currents on 18 (a) and 26 (b) September 1998.

못하였다. 연안해역에서의 왕복성 조류양상을 나타내고 있었으며, 계산결과가 관측결과를 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

바람의 영향이 고려되지 않은 해류가 적조의 이동 및 확산에 미치는 영향을 조사한 결과 (Fig. 13(a), 13(b)), 9월 18일에 고흥반도 남서쪽의 거금도 주변해역과 거금도와 평일도 사이의 해역에서 집중적으로 형성된 적조는 9월 26일에는 외나로도 남쪽해역에까지 확장되어 분포하고 있는 것으로 나타났다. 계산된 적조발생분포는 최초 적조발생해역으로부터 동남쪽방향의 외해쪽으로 유출되는 해류흐름방향과 유사하게 이동 및 확산을 하는 것으로 나타났으나 실측된 적조발생분포를 잘 재현하지는 못하였다.

따라서 적조의 증식의 해양·물리적인 외부요인중에서는 바람이 적조의 이동 및 확산에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 실제 연구해역에서의 실시간 해상풍 자료를 적용한다면 육상의 바람자료를 적용하는 것보다 더 정확하게 적조발생을 재현할 수 있을 것으로 판단된다. 이상과 같은 연구결과는 한국 남해연안에서 발생하는 적조발생에 따른 피해의 최소화와 효율적인 적조 방제대책에 기초자료로서 활용될 것으로 기대된다.

### 요 약

본 연구에서는 한국 남해안의 적조발생상황을 기초자료로하여 적조생물의 증식과정, 해수순환의 물리적인 과정 및 영양염류를 고려한 생물학적인 과정 등을 동시에 고려한 적조발생모델을 구축하여 적조발생상황을 수치모델로써 재현하고자 하였다. 수치모델을 통하여 해류를 재현한 결과, 거제도 남쪽해역에서 나타나는 반원형의 해류분포는 그 해역에서의 급격한 수심변화에 의해서 생성되는 것으로 조사되었다. 조류와 해류를 동시에 고려한 해수순환모델 결과, 제주해협에서는 남해로 유입되는 동향류가 우세한 반면에 남해에서 서해쪽으로 유출되는 서향류의 세기는 미약한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 고흥연안에서 최초로 발생한 적조가 제주해협을 통하여 서해쪽으로 이동하기 어렵게 만드는 원인중의 하나라고 판단된다. 조류와 해류가 적조발생분포에 미치는 영향을 수치실험을 통하여 조사하였는데, 적조발생분포가 왕복성조류의 형태와 해류에 의한 외해쪽으로의 이동양상을 모두 포함하고 있었다. 그러나, 계산결과는 실제 적조발생분포를 잘 재현하지는 못하였다.



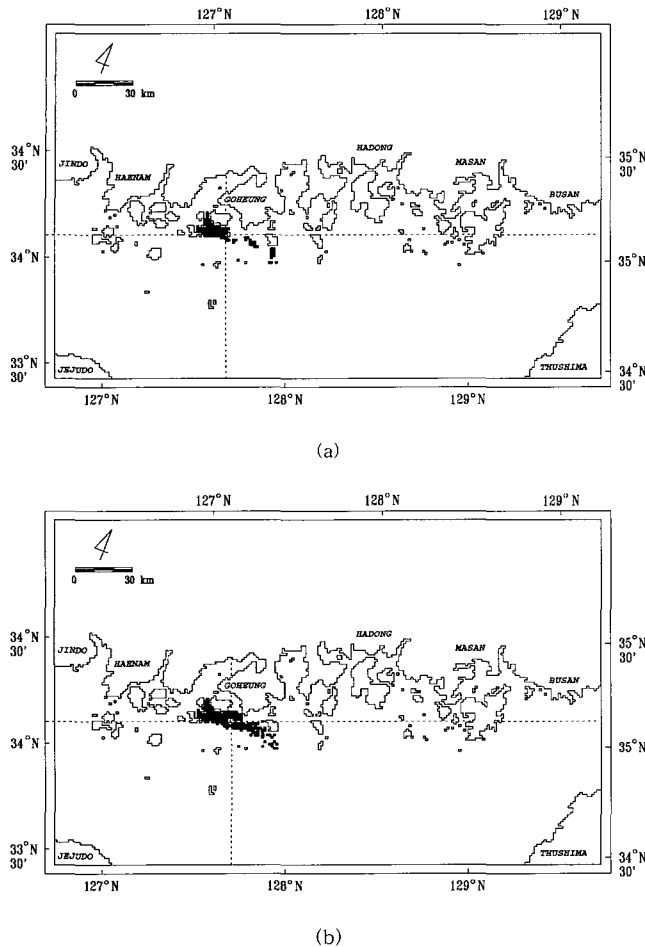


Fig. 13. Distribution of calculated red tide reflected only permanent currents on 18 (a) and 26 (b) September 1998.

그러나, 한국 남해연안에서 부는 서남서방향의 가상바람을 적용하여 계산한 결과, 전체적인 적조의 발생 범위와 이동시기는 비교적 유사하게 재현할 수 있었다. 또한, 적조의 이동 및 확산분포에 가장 큰 영향을 미치는 것은 서남서 방향의 바람의 영향으로 연구되었다.

### 감사의 글

논문의 구성과 모델의 정립을 위하여 많은 도움을 주신 국립수산과학원 이삼근 과장님, 해양대학교 윤종휘 교수님, 부경대학교 류청로 교수님, 김동선 박사님께 감사를 드립니다. 본 연구는 부경대학교 해양산업개발연구소의 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

Backhaus, J.O. 1983. A semi-implicit scheme for the shallow water equation for application to shelf water sea modeling. *Con. Shelf Res.*, 2, 243~254.

- Byun, S.K. and A. Kaneko. 1999. Structure and vorticity of the current observed across the western channel of the Korea Strait in September of 1987~1989. *Ocean Research*, 21, 99~108 (in Korean).
- Cho, Y.K. and K. Kim. 1994. Characteristics and origin of the cold water in the south sea of Korea in summer. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 29, 414~421 (in Korean).
- Han, M.Y., W.T. Kim and D.J. Kim. 2001. A theoretical consideration on the clay spreading method as a remedy for algal blooms in natural waters. *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, 15, 217~221 (in Korean).
- Han, S.K., H.J. Lie and J.Y. Na. 1995. Temporal and spatial characteristics of surface winds over the adjacent seas of the Korean peninsula. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30, 550~564 (in Korean).
- Isobe, A., S. Tawara, A. Kaneko and M. Kawano. 1994. Seasonal variability in the Tsushima warm current, Tsushima-Korea Strait. *Con. Shelf Res.*, 14, 23~35.
- Kim, C.K., K.I. Chang, K. Park and M.S. Suk. 2000. The south sea circulation of Korea: Two-dimensional barotropic model. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 5, 257~266 (in Korean).
- Kim, H.C. 1999. Algal Growth Potential (AGP) and Limiting Nutrients of Harmful Red Tide *Cochlodinium polykrikoides*. M. S. thesis. Pukyong National University, 78pp. (in Korean).
- Kim, H.G., W.J. Choi, Y.G. Jung, C.S. Jung, J.S. Park, K.H. An and C.I. Baek. 1999. 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. Inst. Korea*, 57, 119~129 (in Korean).
- Kim, S.J. 2000. Removal of red tide organisms-2. Flocculation of red tide organisms by lising loess. *J. Korean Fish. Soc.*, 33, 455~462 (in Korean).
- Lange, P. and H. Huhnerfuss. 1978. Drift response of monomolecular slicks to wave and wind action. *J. Phys. Oceanogr.*, 8, 142~150.
- 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 the southern coast of Korea. *Bull. Nat'l. Fish. Res. Inst. Korea*, 57, 131~139 (in Korean).
- Lim, W.A., H.G. Kim, W.J. Lee and S.S. Lee. 1993. Composition of fatty acid and the effect of environmental factors on the population growth of *Scrippsiella trochoidea* a dinoflagellate responsible for a red tide. *J. Korean Fish. Soc.*, 26, 198~230 (in Korean).
- Na, G.H., K.D. Park and J.A. Lee. 1998. Experimental elimination of blue-green algae *Microcystis* sp. by loess suspension in column test. *J. KSWQ DEC*, 14, 399~404 (in Korean).
- NFRDI. 1997a. Harmful Algal Blooms in Korean Coastal Waters in 1995. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 191pp. (in Korean).
- NFRDI. 1997b. Harmful Algal Blooms in Korean Coastal Waters in 1996. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 129pp. (in Korean).
- NFRDI. 1999a. Harmful Algal Blooms in Korean Coastal Waters from 1997 to 1998. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 215pp. (in Korean).
- NFRDI. 1999b. Annual Report of Korean Coastal Environment Monitoring 1998. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 151pp. (in Korean).

- NFRDI. 2000. Harmful Algal Blooms in Korean Coastal Waters in 1999. National Fisheries Research and Development Institute, Korea, 206pp. (in Korean).
- Odamaki, M. 1989. Tides and tidal currents in the Tsushima Strait. J. Oceanogr. Soc. Japan, 45, 65~82.
- Park, K.A. and H.S. An. 1990. A study of numerical experiments on the tide and surge in the Korea Straits. J. Korean Earth Science Soc., 11, 13~20 (in Korean).
- Suk, M.S., G.H. Hong, C.S. Chung, K.I. Chang and D.J. Kang. 1996. Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. J. Korean Soc. Oceanogr., 31, 55~63 (in Korean).
- Yanagi, T., T. Yamamoto, Y. Koizumi, T. Ikeda, M. Kamizono and H. Tamori. 1995. A numerical simulation of red tide formation. J. Marine Systems, 6, 269~285.
- 심문보. 1998. 대한해협 서수도의 해수수송량. 1998수로기술연보, 9~16.
- 한국해양연구소. 1989. 한국해협 종합해양자원도 작성연구 (남해). 한국해양연구소, BSPE 00091-251-7, 555pp.
- 한국해양연구소. 1996. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집. 한국해양연구소, 282pp.
- 한국해양연구소. 1997. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학환경연구. 한국해양연구소 보고서, BSPE 97612, 51~177.

---

2002년 8월 29일 접수

2002년 10월 31일 수리