

## 한국 남해의 해수순환: 2차원 순압모델

김충기\* · 장경일<sup>1</sup> · 박 경<sup>2</sup> · 석문식<sup>1</sup>

(주)한국해양과학기술

<sup>1</sup>한국해양연구소 해양환경 · 기후연구본부 해양물리연구단

<sup>2</sup>인하대학교 해양학과

## The South Sea Circulation of Korea: Two-dimensional Barotropic Model

CHOONG KI KIM\*, KYUNG IL CHANG<sup>1</sup>, KYEONG PARK<sup>2</sup> AND MOON SIK SUK<sup>1</sup>

*Korea Ocean Science & Engineering Corporation, 175-9, Huam-Dong, Yongsan-Ku, Seoul 140-190, Korea*

<sup>1</sup>*Ocean Prediction Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

개방경계에서의 조석 강제력과 해수의 유·출입에 의한 남해의 해수순환을 모의하기 위하여 수직적분된 2차원 Princeton Ocean Model을 적용하였다. 두 강제력을 동시에 고려하기 위하여 일차적으로 개방경계에서 조석을 부과하여 조류순환을 재현한 후 개방경계에서 모델이 계산한 평형상태의 조류와 관측된 해류를 동시에 고려하는 2단계 모델링기법을 채택하였다. 조류의 영향이 제거된 순환모델 결과에 의하면 남해에서 정상상태의 해류분포는 강한 해류의 영향으로 조석 잔차류 분포와는 상당히 다른 양상을 보이고, 해역에 따라서는 조류만큼 강한 해류가 나타난다. 제주해협을 통해 유입된 제주해류는 해저지형의 영향으로 인해 국지적으로 연안역과 가까워지거나 멀어지면서 동향하며, 제주도 동쪽과 대마도 사이를 통하여 남해로 유입되는 대마난류는 제주도 동쪽에서 비교적 멀리 북쪽까지 북상 후 시계방향으로 회전하여 제주해류와 합쳐진다. 제주해류와 대마난류가 합쳐진 후 대한해협을 통해 동해로 유출될 때 대마도 서쪽의 수심이 깊은 골에서 해류의 강화가 일어나며, 이는 수층의 두께가 증가함으로써 생성되는 양의 상대와도를 없애주기 위한 마찰경계층이 형성되기 때문인 것으로 사료된다. 개방경계에서의 조석 강제력과 해수 유·출입을 개별적으로 고려할 경우 연안역에서의 해수순환은 두 강제력을 모두 고려한 경우의 순환형태와 차이를 보이고 있어 이들 두 강제력이 동시에 고려되어야 함을 뚜렷이 보여준다.

A vertically-averaged, two-dimensional version of the Princeton Ocean Model has been applied to the South Sea to simulate the circulation driven by tides and inflows/outflows across open boundaries. To incorporate both forcing properly, a two-step modeling approach is adopted, in which the tidal circulation is first simulated by specifying the tides along the open boundaries, and then both the calculated tidal currents and the observed steady mean currents are prescribed across the open boundaries. Model results show that the steady, subtidal circulation of the South Sea is different from the residual circulation due to tidal rectification, and subtidal currents become locally as strong as tidal currents. The Cheju Current entering the model domain across the Cheju Strait flows eastward in general while shifting onshore or offshore areas following local isobaths. The Tsushima Current entering across the southern boundary reaches farther to the north in the eastern vicinity of Cheju-Do as compared to that entering across other parts of the southern boundary. The Tsushima Current turns to the east, merges with the Cheju Current, and both the Cheju and Tsushima Current exit to the East Sea through the western channel of the Korea Strait. An intensification of the outflow occurs over the deep trough adjacent to the Tsushima Island, which appears to be due to the formation of the frictional boundary layer in order to remove excess positive relative vorticity generated by an increase in the layer thickness. The circulation driven by both the tidal and inflows/outflows is different from that driven by each forcing separately in coastal areas, which implies that both forcings should be considered simultaneously in the simulation of more realistic coastal circulation.

\*Corresponding author: ck\_bada@hanmail.net

## 서론

남해는 한국 연안을 따라 많은 섬들이 산재하고 크고 작은 내만이 발달하여 지형적으로 복잡하며, 해저지형은 한국 연안으로부터 외해 쪽으로 비교적 완만하게 변하는 반면 제주도과 대마도 부근해역에서는 수심 100 m까지 다소 급한 변화를 보인다. 부산과 대마도 사이의 대한해협에서는 수심 200 m 이상의 깊은 골(trough)이 대마도 쪽으로 해협과 평행하게 발달되어 있으며 골을 중심으로 한국 연안측은 경사가 완만하며 대마도 쪽으로는 경사가 비교적 급하다(Fig. 1). 남해는 서쪽으로는 황해, 남쪽으로는 동중국해, 그리고 동쪽으로는 동해와 연결되어 있어 성질이 서로 다른 수괴들의 상호교환이 있는 지역으로 남해에서의 해수유동은 남해의 지리적인 경계를 통한 제반 수괴의 유·출입 조건, 조석 및 바람 강제력, 공간적인 해수의 밀도분포 등 복합적 작용에 의해 결정될 것으로 사료된다.

남해에서 조석 및 조류 특징은 전반적으로 반일주조 조석이 우세하며, 거문도를 기점으로 서로 반대의 위상을 보이므로 연안역 조석기준으로 같은 조시에 반대 방향의 흐름이 나타난다(Odamaki, 1989). 조석의 크기는 M<sub>2</sub> 분조의 경우 동해에서 10 cm 이하이고 서쪽으로 갈수록 증가하여 제주해협부근에서는 80~100 cm에 이른다. 남해순환에 가장 큰 영향을 미치는 쿠로시오에 기원한 고온고염의 대마난류는 제주연안을 시계방향으로 선회하여 남해로 유입되거나 제주-대마도 사이와 대한해협을 통해 동해로 유출된다(Lie and Cho, 1997; 김 등, 1991; Chang et al., 1995). 또한 황해나 동중국해에서 기원한 저염의 해수도 제주해협을 통해 남해로 유입되기도 한다(조와 김, 1994; 김과 노, 1994). 제주해협에서 일평균 해류의 공간적인 분포는 제주해협 깊은 골의 저층에 약한 서향류가 나타난 것을 제외하고는 전 단면에서 동향류가 나타나며, 최대유속 28 cm/s에 이르는 동향류가 제주해협 골의 북쪽사면에

나타난다(Suk et al., 1996; 한국해양연구소, 1997). 대한해협 서수도에서 관측된 해류분포는 북동향류가 전 단면에 걸쳐 우세하며 최대 유속은 관측시기에 따라 40~100 cm/s에 달한다(Isobe et al., 1991; Kaneko et al., 1991; 심, 1997, 1998). 해류의 주축은 한국 연안측에 치우쳐 나타나는 경우도 있으나 대부분 수심이 깊은 골을 따라 최대 유속이 나타나며 제주해협과 대한해협 서수도의 해수수송량은 여름철과 가을철에 최대 겨울이나 봄철에 최소를 보인다(Yi, 1966; 한국해양연구소, 1991).

최근에 심각한 문제로 대두되고 있는 유출유 또는 적조 문제를 다룰 경우 남해의 전반적인 해수 순환을 재현할 수 있는 모델이 필요하고, 이를 위해서는 남해가 조류뿐 아니라 해류가 우세한 지역임을 감안할 때 조류와 함께 개방경계를 통한 유·출입 조건, 바람 및 해수의 밀도분포 등에 의한 해수 순환을 재현할 필요가 있다. 기존에 수행된 남해를 포함한 해역에 대한 수치모델 연구들(Fang, 1986; 최 등, 1994)은 조석 강제력만을 고려하여 남해 전체의 조석을 재현하는데 중점을 두었고, 남해의 일부 내만에 국한된 수치모델에 관한 연구 역시 조석 및 조류의 재현에 초점을 두었다. 김(1994)은 대한해협에서 순압 수치모델을 이용하여 조석 및 바람 강제력 그리고 개방경계를 통한 해수의 유·출입을 개별적으로 고려한 모델을 구성하여 각각의 강제력이 남해의 해수유동에 미치는 영향을 연구한 바 있지만 각각의 외력을 동시에 고려하지는 않았다. 이 연구에서는 수치모델을 이용하여 조석강제력과 개방경계를 통한 유·출입을 동시에 고려한 남해의 2차원 해수순환을 재현하였으며, 바람과 밀도분포에 의한 영향은 고려되지 않았다. 사용된 모델에 관한 설명과, 조석강제력과 해수의 유·출입을 동시에 고려하기 위한 개방경계조건에 관한 기술은 2장에, 모델결과와 검증결과와 모델에 의한 남해의 해수유동은 3장에 기술하였으며 결론 및 토의는 4장에 수록하였다.

## 수치모델 및 모델의 구성

본 연구에서 사용된 모델은 수평방향 2차원 Princeton Ocean Model(POM)이다(Blumberg and Mellor, 1987; Mellor, 1996). 2차원 POM은 유한차분법을 이용하여 원시운동방정식의 해를 구하는 모델이며, 자유해면의 시·공간적인 변동이 포함되므로 조석강제력을 고려할 수 있다.

수치모델에서 공간적인 격자 간격보다 규모가 작은 운동을 매개변수화하는 수평혼합항에 포함되는 난류와동점성계수와 해저면 마찰력을 결정하는 마찰계수는 불확실성이 높은 값이며, 해역이나 모델에 의해 재현하고자 하는 현상에 따라 통상 해양에서 사용되는 일정한 범위내의 값을 임의로 사용하는 경우가 많다. 본 연구에서 난류와동점성계수는 모델의 격자 크기와 수평적인 전단속도가 비례한다는 Smagorinsky(1963)의 수식을 이용하여 계산하였다. 해저 경계면 마찰항은 quadratic stress law를 사용하였고, 이때 마찰계수는 Park and Oh(1998)의 방법을 따라 37개 연안 조석 관측점에서 관측된 조석 조화상수를 평균적으로 가장 잘 재현하는 마찰계수 값, 0.0025을 결정하여 사용하였다.

모델의 격자구성은 x, y 방향으로 동일하게 3 km로 구성하였고 사용된 좌표축은 x축은 제주도에서 대마도로, y축은 제주도에서 추자도 방향으로 증가하는 직교좌표계이다. 좌표계를 통상적인 동-

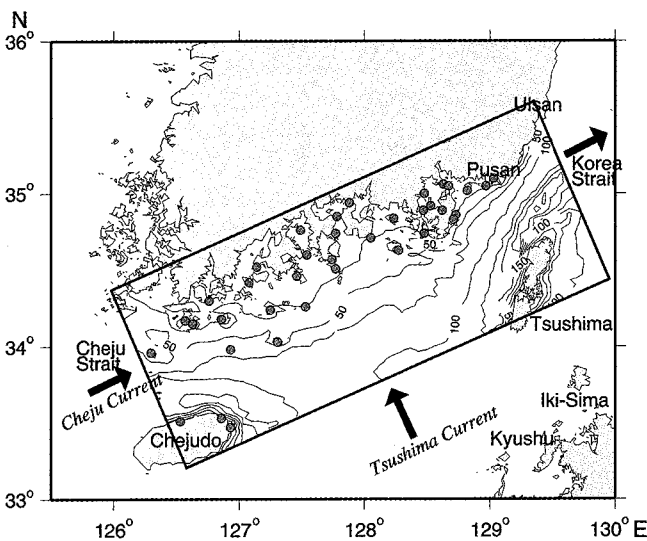
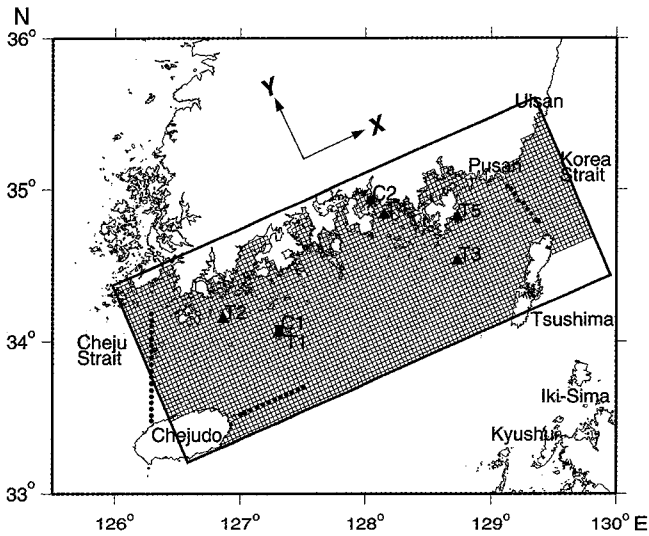


Fig. 1. A location map and numerical models domain (rectangular box) of the South Sea with major isobaths shown in meters. Filled arrows indicate an inflows/outflows system across model's open boundaries. Filled circles denote the locations of coastal tide stations, where long-term tide data are available for the model calibration to determine the bottom friction coefficient.



**Fig. 2.** Configuration of the numerical model grid, and locations of model verification points, ▲ for the surface elevation and ■ for currents. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) traverse surveys were conducted along three lines marked by ●.

서, 남북 방향으로 설정하지 않고, Fig. 2와 같이 회전시킨 이유는 개방경계 조건을 보다 효율적으로 부과하기 위한 것으로서 모델에서의 x 방향은 남해의 평균적인 해류방향과 대략 일치한다.

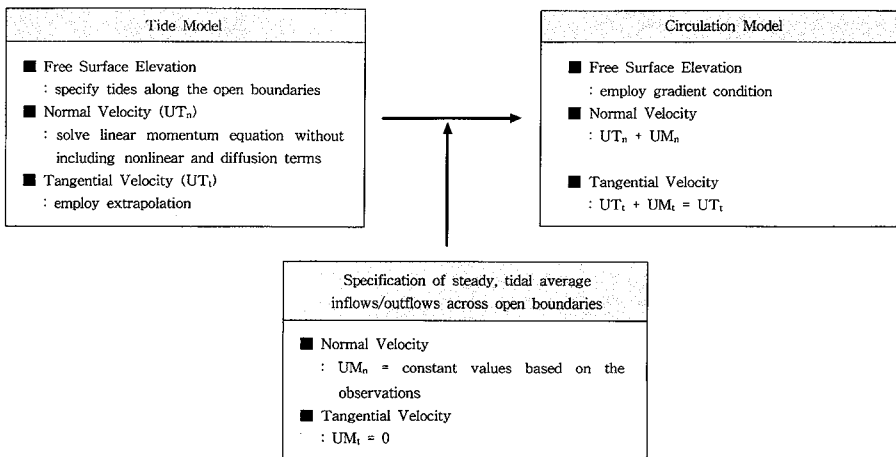
본 연구에서는 기존의 남해에서의 해수 유동모델과 달리 개방경계에서 해류와 조류분포를 직접 부과함으로써 조석강제력과 개방경계를 통한 해수의 유·출입을 동시에 고려하였다. 통상 조석모델의 경우 개방경계를 따라 자유해면 분포를 부과하는 반면에, 개방경계를 통한 해수의 유·출입을 고려하는 경우에는 개방경계에서의 해류분포를 부과한다. 그러므로 두 강제력을 동시에 고려하는 경우 개방경계에서 조석과 해수 유·출입과 연관되는 자유해면 분포를 부과하거나, 혹은 해류와 조류를 부과하는 두 가지 방법이 가능하다. 본 연구에서는 다음과 같은 이유로 개방경계에서 지형류 균형을 가정한 자유해면 분포를 부과하는 대신 해류와 조류분포를 직접 부과하여 남해의 해수순환을 재현하였다: 1) Chang *et al.*(1997)과 같이 지형류 균형을 가정한 일정한 자유해

면 분포를 조석에 중첩시켜 부과하는 방법을 사용할 경우 제주해협의 개방경계에 인접한 1~5개의 격자에서 개방경계에 수직인 동향류 대신 경계에 평행한 북향류가 강하게 발달하는 것이 발견되었고, 2) 3곳의 개방경계를 포함하는 모델 영역의 개방경계에 자유해면 분포를 부과할 경우 인접한 개방경계간의 평균적인 해수면 차이를 어떻게 설정하는가에 따라 모델 결과가 민감하게 달라지고, 3) 해류분포에 의한 자유해면 분포를 추정하기보다는 해류분포를 직접 측정하거나 역학적인 계산 등에 의해 해류분포를 계산하는 것이 보다 용이하다.

개방경계에서 자유해면 분포 대신 해류와 조류분포를 부과하여 두 강제력에 의한 남해의 순환을 재현하기 위하여 본 연구에서는 2단계 모델링 기법을 이용하였다. 해류분포는 관측된 자료에 근거하여 용이하게 개방경계에서 그 분포를 부과할 수 있었던 반면에 조석 강제력의 경우 개방경계에서의 조류분포가 직접적으로 가용하지 않은 대신 조위 분포는 기존의 연구결과나 조석도에 근거하여 비교적 정확하게 개방경계에서의 조위분포를 입력자료화 할 수 있었다. 2단계 모델링 기법은 일차적으로 개방경계를 따라 조위를 부과하여 모델영역 내 조류를 계산한 후(조석모델), 개방경계를 따라 조석모델에서 계산된 시간에 따라 변하는 조류에 1997년 3월과 4월에 제주해협, 제주도 동부, 대한해협에서 ADCP에 의해 관측된 자료(한국해양연구소, 1997)를 근거로 시간에 대하여 일정한 일평균 유·출입 조건을 더해 줌으로써 두 강제력을 동시에 고려하는 모델(순환모델)을 새로이 구성하였다(Fig. 3 참조). 본 연구에서 사용한 2단계 모델링 기법은 계산시간이 다소 길어지는 단점은 있지만 다수의 개방경계를 포함하는 모델 영역에서의 활용이 효과적이고, 본 연구를 통해 국내에서는 최초로 시도된 기법인 관계로 보다 상세히 설명하고자 한다.

**조석모델 개방경계조건**

조석모델에서의 개방경계는 C-grid 상에서 자유해면이 계산되는 격자점과 일치하며, 개방경계의 각 격자점에서 매 시간 간격마다 주요 4개 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ )의 조화상수를 이용하여 조위를 지정하여 주었다. 주요 4개 분조의 진폭과 지각은 한국해양연구소(1996)의 자료로부터 구하였고, 제주도와 대마도를 가로지르는 경계와 같이 자료가 없는 개방경계에서는 Odumaki(1989)의 등조석도를 이용하였다. 개방경계에 수직인 방향의 유속 성분에 대한 경계조건은 비선형항과



**Fig. 3.** A schematic illustration of the treatment of open boundary conditions in the two-step modeling approach of the circulation model driven by tides and inflows/outflows forcing.

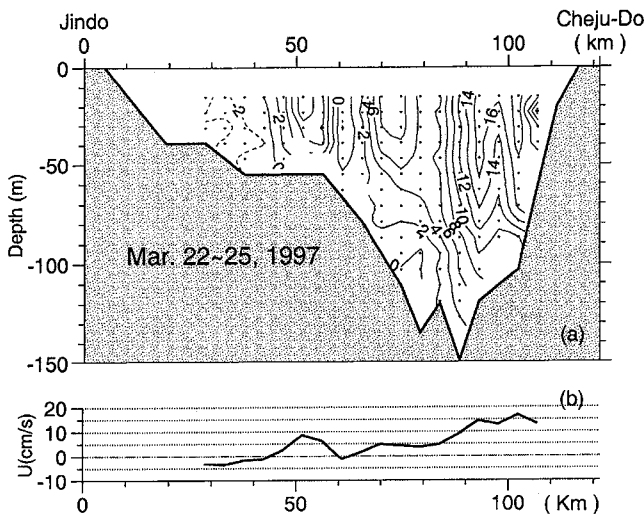
**Table 1.** Outline of ADCP traverse surveys in the Cheju Strait and the western channel of the Korea Strait conducted in 1997.

Sections occupied	Period of measurements	Number of multiple traverses	Total time of observation (Hour:minute)	Reference
Cheju-Do—Jin-Do (Northern part)	97/3/22—3/23	9	25:52	한국해양연구소 (1997)
Cheju-Do—Jin-Do (Southern part)	97/3/24—3/25	9	24:42	한국해양연구소 (1997)
Eastern part of Cheju-Do	97/3/25—3/26	8	25:50	한국해양연구소 (1997)
Western channel of the Korea Strait	97/4/25—4/26	9	24:54	심 (1998)

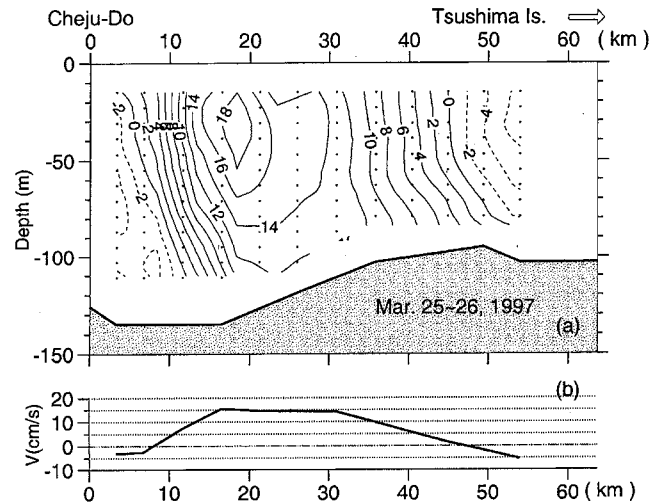
수평확산항을 포함하지 않는 운동방정식을 이용하여 계산하였고, 개방경계와 평행한 방향의 유속 성분에 대한 경계조건은 모델내부에서 계산된 값을 이용, 외삽법을 사용하여 계산하였다.

**개방경계에서의 해류분포 및 모델 입력자료**

개방경계에서의 유·출입 경계조건으로는 1997년 3월과 4월에 모델영역의 경계에 해당되는 제주해협, 제주도 동부, 대한해협에서 ADCP를 사용하여 25시간 동안 8-9회 반복 관측한 자료(Table 1)를 이용하였다. 제주해협, 제주도 동부에서 ADCP관측에 의한 일평균 해류 분포는 Figs. 4, 5에 나타내었고, 실제로 모델적용에서는 그림 하부에 제시된 수심 평균 유속을 사용하였다. 수심 평균된 유속분포에 의하면 제주도 근해에서 동향류가 강하고 북쪽으로 갈수록 감소하다가 골의 북쪽에 위치한 천해역에서 다시 증가하며 진도 근해에는 서향류가 나타나는 분포를 보인다. 수직적인 유속차이가 작은 3월과 4월의 수심 평균된 유속분포는 수심별 제주해류의 공간적인 분포특성을 잘 나타낸다. 제주도 동부에서는 제주 연안역에 인접한 해역에서 미약한 남향류가 나타나며, 대마난류에 의한 북향류는 제주도에서 약 18 km 떨어진 해역에서 18 cm/s로 가장 강하며 대마도쪽으로 갈수록 북향류의 유속이 약해져 관측된 단면의 북동쪽 끝 부분에서는 다시 남향의 흐름이 나타난다. 관측된 일평균 해류분포에 의하면 남해로 유입되는 해수 수송량은 제주해협에서 0.37 Sv, 제주도 동부에서 0.44 Sv이다. 국립해양조사원에서 1997년 4월에 부산-대마도간의 대한해협 서수



**Fig. 4.** (a) Sectional distribution of diurnally-averaged along-strait (EW direction) currents, and (b) vertically averaged along-strait currents across the Cheju Strait based on ADCP surveys in March 1997. Positive value indicates the eastward flow.



**Fig. 5.** (a) Sectional distribution of diurnally-averaged along-strait (EW direction) currents, and (b) vertically averaged along-strait currents across a line east of Cheju-Do based on ADCP surveys in March 1997. Positive value indicates the northwestward flow.

도에서 ADCP 반복 관측 결과에 의하면(심, 1998) 대한해협 서수도를 통한 동해로의 유입량은 1.22 Sv이었다. 제주해협과 대한해협 서수도에서의 관측이 약 한 달간의 시간차이를 보이지만 이 기간 중 해수 수송량의 큰 변화가 없었다고 가정하면 제주도에서 대마도 사이의 단면 중 관측이 수행되지 못한 단면을 통한 해수 수송량은 약 0.41 Sv으로 추정된다. 이상의 결과를 종합하면 남해로부터 대한해협 서수도를 통해 동해로 유입되는 해수 수송량의 약 30%는 제주해협에서 기원된 것이며 나머지 70%는 제주도-대마도 사이를 통해 대한해협으로 유입되는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 조와 김(1994)이 염보존방정식을 이용하여 박스모델에서 계산한 대한해협에서 제주해협을 통과한 수송량의 비율(31~36%)과 유사한 값이다.

**순환모델 개방경계조건**

순환모델에서의 개방경계는 C-grid 상에서 개방경계에 수직한 유속성분이 계산되는 격자점과 일치하도록 하여, 동쪽과 서쪽의 개방경계에서는 u, 그리고 남쪽 개방경계에서는 v가 계산되는 격자점과 일치한다. 조석강제력과 해수의 유·출입을 동시에 고려한 순환모델의 개방경계조건은 식 (1), 식 (2)와 같이 조석모델에서 계산한 조류에 관측된 일평균 해류를 더한 값을 부과한다. 식 (1)과 (2)는 동쪽과 서쪽경계의 예이며, 남쪽 개방경계에서도 개방경계 조건의 개념은 동일하다.

$$U(t) = U_{\text{tide}}(t) + U_{\text{mean}} \quad (1)$$

$$V(t) = V_{\text{tide}}(t) \quad (2)$$

여기서

t: 시간

U, V: 각각 개방경계에 수직한 유속성분과 평행한 유속성분

$U_{\text{tide}}, V_{\text{tide}}$ : 조석모델에 의해 계산한 개방경계에서의 조류 성분

$U_{\text{mean}}$ : 관측자료에 근거한 경계에 수직한 해류성분

$U_{\text{tide}}, V_{\text{tide}}$ 는 조석모델에 의해 계산된 시간에 따라 변하는 조류 성분이며  $U_{\text{mean}}$ 은 시간변동 하지 않는 고정된 값으로 ADCP를 이용하여 관측된 개방경계에 수직한 일평균 유속 성분이다. ADCP 관측이 이루어지지 않은 제주도 동부에서 대마도사이의 개방경계에서는 전체 개방경계를 따라 유·출입되는 수송량이 보존되도록 수송량을 계산 한 후, 이를 각 격자에서 수심과 격자간격의 곱으로 나누어  $U_{\text{mean}}$ 을 계산하였다. 각 개방경계에서의 수송량 유·출입은 서쪽경계인 제주해협과 남쪽경계를 통해 각각 0.4 Sv, 1.15 Sv의 유입이 있고 동쪽경계인 대한해협을 통해 1.55 Sv이 유출되도록 하였다.

## 모델 결과

### 모델결과의 검증

조석 강제력과 개방경계를 통한 해수의 유·출입을 고려한 순환모델 결과는 시간에 따라 변하는 조류순환과 조류가 제거된 남해의 해류분포를 함께 포함한다. 모델 결과를 토의하기 전에 모델에 의해 계산된 해·조류 분포를 실제 관측된 분포와 비교함으로써 모델 검증을 수행하였다. 모델 검증을 위한 자료는 우선 남해의 연안역에 분포하는 조위 관측소에서 관측되는 조위자료가 가용하므로 조위 관측소와 인접한 격자점에서 계산된 조위와 실제 관측된 조위를 비교할 수 있다. 그러나 이미 모델에서 연안역 조위 자료를 가장 잘 재현하는 해저면 마찰계수를 사용하였으므로 모델 결과의 검증을 위하여 모델 영역내에서 관측된 자료(해저면 마찰계수 결정에 사용되지 않은 자료)를 이용하는 것이 보다 신빙성이 있다.

남해에서 모델 결과를 신뢰성 있게 검증할 수 있도록 장기적으로 관측된 자료는 많지 않다. 본 연구에서는 모델 영역내부의 5개 정점(Fig. 2의 T1부터 T5)에서 관측된 해수면 시계열 자료와 2개 정점(Fig. 2의 C1과 C2)에서 관측된 해·조류 시계열 자료를 이용하여 모델결과를 검증하였다. 관측 개요는 Table 2에 수록하였

고 관측지점은 Fig. 2에 표시하였다(한국해양연구소, 1987, 1989 참조). 관측 결과와 모델 결과는 조화분석을 통해 조석주기와 비조석 주기로 자료를 분리한 후, 관측된 조석·조류를 관측 지점과 가장 인접한 격자점에서 계산된 조석과 조류와 비교하였고, 비조석 성분인 해류에 대해서는 전 관측기간 동안의 평균 해류를 15일 평균한 순환모델 결과, 조석모델 결과 및 유·출입 조건만을 부과한 경우의 결과와 비교하였다.

Fig. 6, 7은 조석과 조류에 대한 모델 검증 결과를 나타낸다. 검증 결과를 정량화하기 위하여 아래와 같이 정의한 RMS 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였고, Table 3에 각 정점별 RMSE값을 나타내었다.

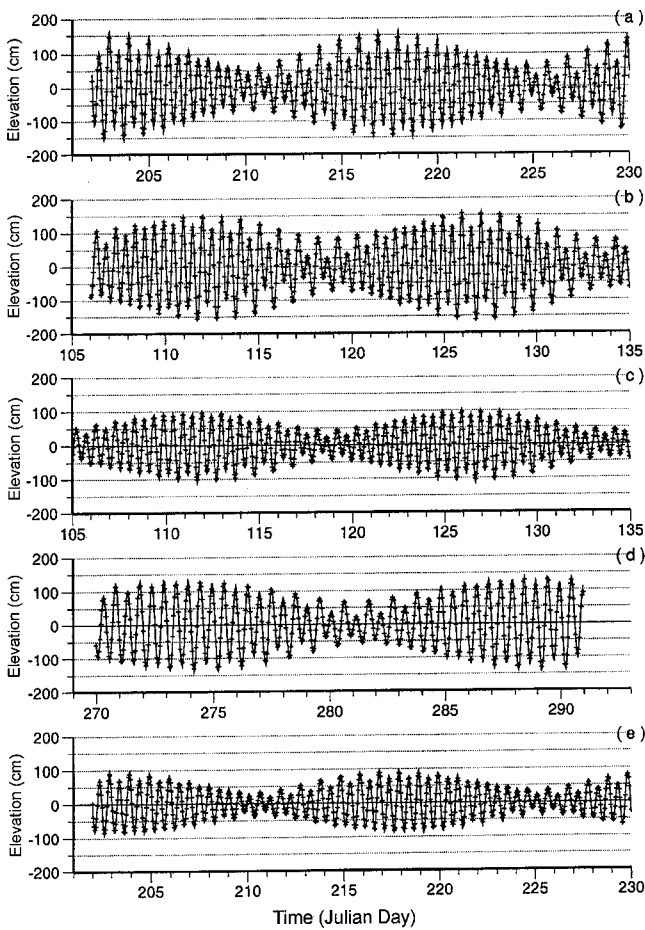
$$RMSE = \left[ \frac{\sum (\text{Calculated}_t - \text{Observed}_t)^2}{N} \right]^{1/2}$$

위의 식에서 N은 검증에 사용된 자료의 개수이고 아래첨자 t는 관측시간을 의미한다. T1에서 T5까지의 정점에서 모델이 계산한 조석은 전반적으로 관측자료를 잘 재현한다(Fig. 6과 Table 3). T1 정점에서 RMS 오차 15.5 cm를 제외하면 전반적으로 10 cm 정도의 작은 오차를 보였으며 조시는 5개 정점 모두 관측치와 잘 일치하였다. 거문도 근방의 외해역인 정점 C1(Fig. 2)에서의 조류에 대한 검증결과(Fig. 7과 Table 3) 동서방향의 유속성분(U)의 RMS 오차는 12 cm/s이고 남북방향의 유속성분(V)은 7.3 cm/s로 U보다 작은 오차를 보인다. 내만에 위치한 정점 C2(Fig. 2)에서의 검증결과는 U 성분의 RMS 오차는 17.1 cm/s이고 V 성분의 RMS 오차는 34.9 cm/s로 외해역의 정점 C1에 비해 큰 RMS 오차를 보인다. C2 정점에서 나타나는 상대적으로 큰 오차는 본 모델에서 사용된 격자 크기가 지형변화가 심한 내만의 지형과 수심을 잘 재현하지 못하기 때문에 발생한 것으로 사료되며, Fig. 2에 의하면 본 모델 적용에 사용된 격자 크기(3×3 km)로는 C2 정점이 위치한 수로를 2개의 격자로밖에 표현하지 못하고 있다.

외해역에 위치한 관측점 C1의 경우 조석 강제력만을 고려했을 때 조석 잔차류는(Fig. 8의 Case-2) 관측된 평균해류에 비해 매우 작게 나타나고 있어, 조석 잔차류만으로는 남해의 외해역에서 관측된 해류를 설명할 수 없음을 알 수 있다. 개방경계를 통한 유·출입 조건만 고려한 경우(Fig. 8의 Case-3) 계산된 평균 해류는 관측된 평균해류에 비해 크기가 다소 크게 나타나고 해류의 방향이 시계방향으로 편향된 경향을 보이며, 두 외력이 모두 고려된 경우(Fig. 8의 Case-1) 모델에 의해 계산된 평균 해류는 관측된 평균해류의 크기와 방향을 비교적 잘 재현하였다. 내만에 위치한 관측점

**Table 2.** Outline of time-series data for surface elevation and current velocity used for model verification.

Station	Symbol	Location		Duration
		Longitude (E)	Latitude (N)	
Komundo	T1	127°18'38"	34°03'23"	86/7/20-8/21
Chongsando	T2	126°51'50"	34°09'00"	89/4/16-5/20
Hongdo	T3	128°43'57"	34°32'04"	89/4/13-5/25
Samchonpo	T4	128°08'57"	34°49'57"	89/9/27-10/18
Kojedo	T5	128°44'03"	34°49'09"	86/7/13-8/25
Komundo	C1	127°18'51"	34°04'44"	86/7/20-8/12
Samchonpo	C2	128°02'36"	34°56'00"	89/9/27-10/18

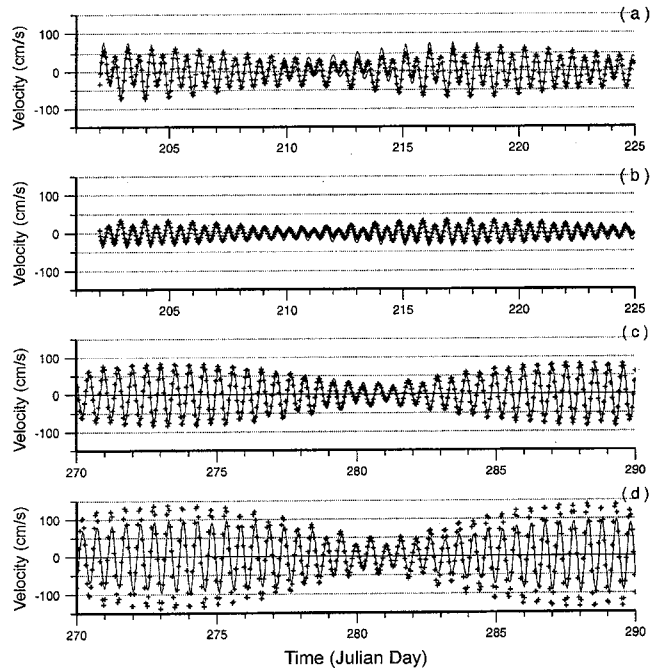


**Fig. 6.** Comparisons between observed (+) and calculated (solid lines) tides at stations (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T4, and (e) T5. See Fig. 2 for locations of the stations.

C2에서는 부과된 강제력에 관계없이 모든 모델결과가 관측치와 큰 차이를 보이는데 이는 3×3 km 격자 크기로는 내만의 해수유동을 재현하기에 부족하며 또한 본 연구에서는 바람 등 다른 외력이 고려되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 관측된 자료가 많지 않아 남해 전역에 걸쳐 모델 결과가 실제의 평균해류 분포를 사실적으로 재현하는지의 여부는 알 수 없지만, 모델 검증 결과는 조석강제력과 개방경계에서의 유·출입을 동시에 고려한 순환모델이 비록 바람에 의한 강제력과 해양의 성층화를 고려하지 않았지만 남해의 연안역을 제외한 대륙붕 해역에서의 해류분포를 잘 재현하고 있음을 시사한다.

**모델에 의한 남해의 해수유동**

조석 강제력과 개방경계를 통한 해수의 유·출입이 고려된 모델 결과는 시간 변동하는 조류와 시간에 따라 변하지 않는 해류를 모두 포함한다. 본 절에서는 조시에 따라서 시간 변동하는 해수유동과 비조석 성분의 해류분포를 살펴보았다. Fig. 9은 조석과 유·출입 조건이 동시에 고려된 순환모델 결과와(Case-1, Figs. 9a, 9b) 조석 강제력만을 고려한 경우의(Case-2, Figs. 9c, 9d) 모델 결과 중 부산에 인접한 격자점에서 서향류가 나타나는 낙조류시(Figs.



**Fig. 7.** Comparisons between observed (+) and calculated (solid lines) tidal currents at station C1 for (a) U component and (b) V component, and at station C2 for (c) U component and (d) V component. See Fig. 2 for locations of the stations.

**Table 3.** Root mean square error (RMSE) for observed and calculated tides and tidal currents.

Variable	Station	RMSE
Surface Elevation (cm)	T1	15.5
	T2	11.3
	T3	4.9
	T4	10.7
	T5	5.4
Current Velocity (cm/s)	C1 U	12.0
	C1 V	7.3
	C2 U	17.1
	C2 V	34.9

9a, 9c)와 동향류가 나타나는 창조류시(Figs. 9b, 9d) 순간 유속이 최대인 조시때의 모델결과를 나타낸다. 부산을 기준으로 낙조류시에는(Fig. 9c) 제주해협과 대한해협을 통하여 남해로 해수가 유입되어 일부는 내만으로 유입되고 일부는 제주도과 대마도 사이의 남쪽경계를 통해 해수가 빠져나가며, 창조류시에는(Fig. 9d) 내만으로부터 외해역으로 유출되는 해수와 남쪽경계를 통해 유입된 해수가 제주해협과 대한해협을 통해 빠져나간다. 결과적으로 제주해협과 대한해협에서의 순간 조류는 반대방향으로 흐른다. 기존 자료의 분석결과에서도 반일주조 조류의 경우 거제도 서쪽해역을 경계로 동쪽과 서쪽의 위상이 약 5시간정도 차이를 보여 제주해협과 대한해협에서 조류는 거의 반대 방향으로 흐른다(Odamaki, 1989). 그러나 최강창조 4시간 전(부산에서 저조시)의 조류의 방향은 제주해협과 대한해협에서 모두 동향의 흐름이 나타나고 있

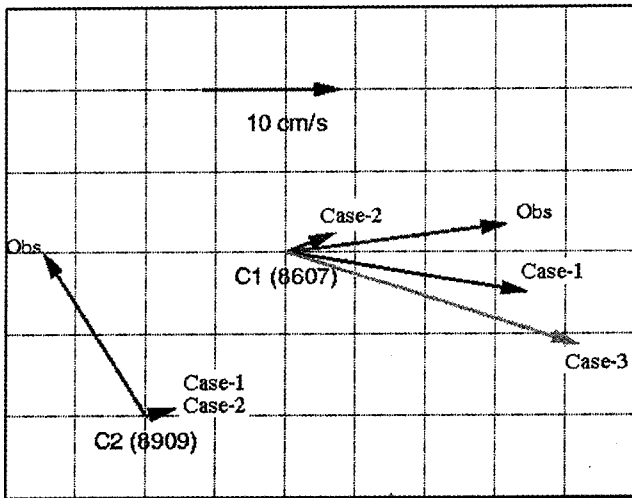


Fig. 8. Comparison between observed and calculated 15-day mean velocity vectors at stations C1 and C2. Obs means 15-day averaged observed velocity, Case-1 means the result of the model driven by both tides and inflows/outflows, Case-2 means the model result driven by tides only and Case-3 means the model result driven by inflows/outflows only. It is almost zero that the result of the Case-3 at station C2, so the results of the Case-1 and Case-2 are same.

어 두 지역의 위상차가 항상 일정하게 유지되지는 않았다(김, 1998). 조류의 세기는 대한해협에서는 50~70 cm/s 정도, 제주해협에서는 50 cm/s 정도로 기존의 관측 결과(Odamaki, 1989)와 유사한 크기를 보인다. 조석 강제력과 유·출입 조건이 동시에 고려된 Case-1의 경우 제주해협과 대한해협의 평균해류로 인하여 동향류의 유속이 서향류의 유속에 비해 강해지는 경향을 보이며 특히 Case-2의 결과와는 달리 대마도 서쪽연안을 따라서는 창조와 낙조시 모두 북동향의 흐름이 나타나는데 이는 25 cm/s 이상의 강한 북동향의 해류 때문에 사료된다(Kaneko et al., 1991; Ro et al., 1995). 제주해협에서도 같은 경향을 보여 동향의 해류로 인하여 낙조시 동향류는 강해지고 창조시 서향류는 감소하는 경향이 뚜렷하여 제주해협에서 기존에 관측된 결과와 잘 일치한다(김, 1979).

조석 강제력과 개방경계에서의 해수 유·출입에 의한 강제력이 개별적으로 그리고 복합적으로 연안역 순환에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 조석과 유·출입 조건이 모두 고려된 순환모델인 Case-1의 결과(Fig. 10a)와 조석 강제력만이 고려된 조석모델인 Case-2의 결과(Fig. 10b) 및 유·출입 조건만을 고려한 Case-3의 해류 분포(Fig. 10c)와 비교하였다. 세 경우 모두 모델에서 고려한 4개 분조의 혼합 조석주기인 15일 동안 모델 결과를 평균하여 조류가 제거된 남해의 해류 분포를 나타낸다.

순환모델 결과에 의하면(Fig. 10a) 제주해협을 통해 5~11 cm/s의 크기를 갖는 제주해류가 남해로 유입되고 제주도와 대마도 사이를 통해서는 대마난류가 약 15 cm/s 정도의 유속으로 남해로 유입되며, 유입된 대마난류는 시계방향으로 방향을 바꾸어 제주해류와 합쳐진 후 대한해협을 통해 최고 50 cm/s 이상의 유속으로 남해에서 동해로 유출된다. 전반적으로 수심이 50 m보다 얕은 연안역에서의 해류는 수심이 깊은 외해의 육봉 해역에 비해 약하며, 2차원 모델에 의해 재현된 남해의 해류분포는 가용한 관측자료에

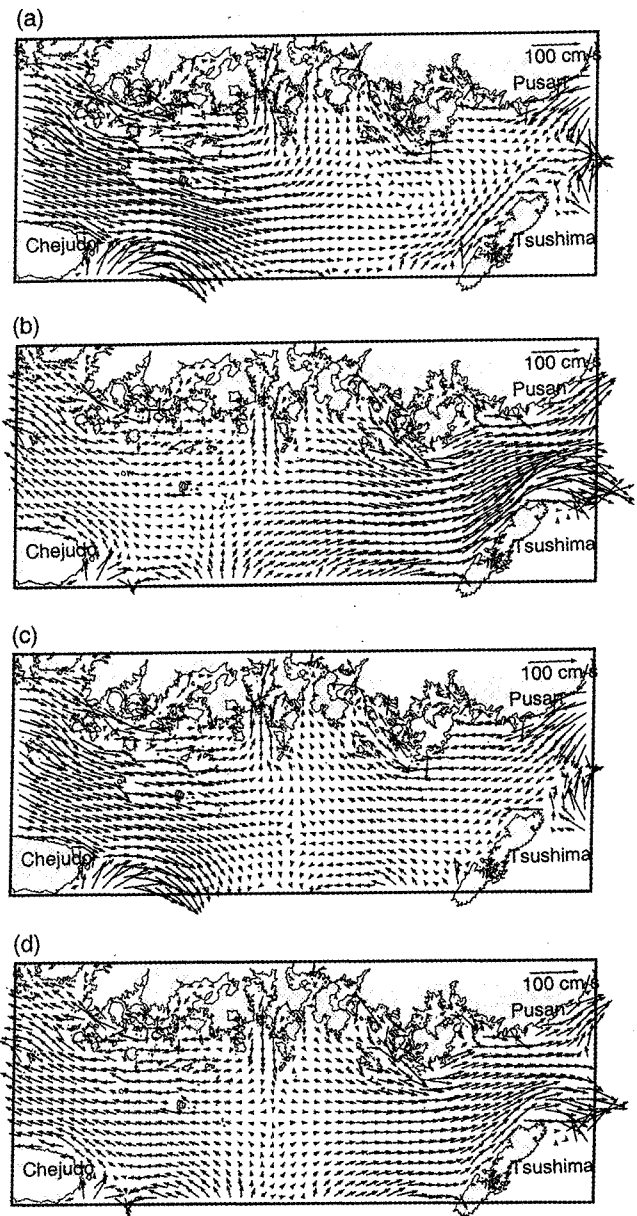
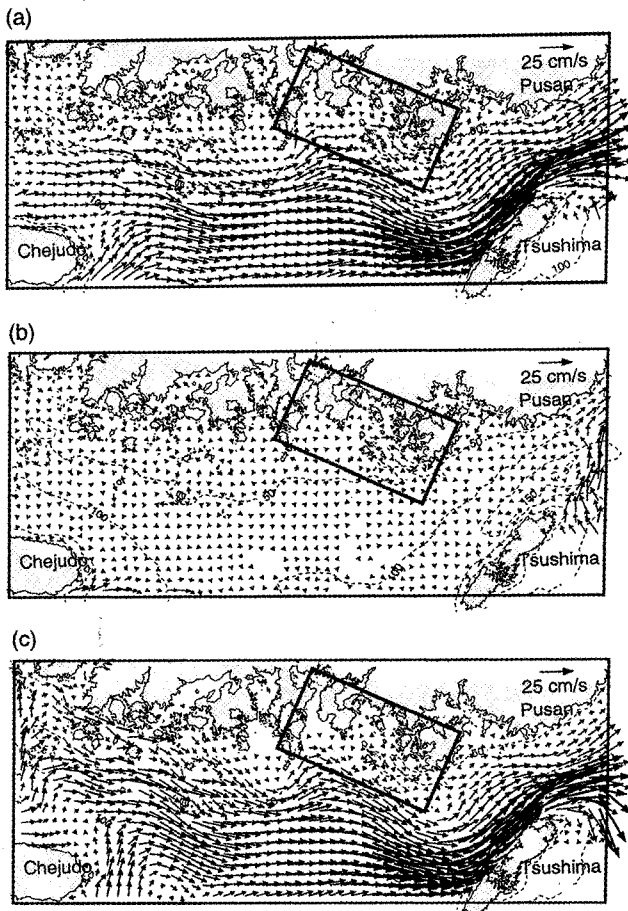


Fig. 9. Instantaneous velocity distributions (a and c) at the time of maximum westward flow and (b and d) maximum eastward flow near Pusan. (a) and (b) are the results of the circulation model (Case-1), while (c) and (d) are the results of the tide model (Case-2).

근거하여 작성된 남해의 해류도(Miita and Ogawa, 1984; Lie and Cho, 1997)와 유사한 분포를 보인다. 제주해협을 통해 남해로 유입된 제주해류는 거문도에 이르기까지 동향 후 거문도 부근에서는 남쪽으로 방향을 바꾼 후 동향하고 있어 여수반도 남쪽의 소리도 서쪽에서는 연안역으로부터 해류의 주축이 외해역으로 멀어진다. 소리도와 거제도 사이에서는 해류의 주축이 다시 연안역으로 가까워지는데 이와 같이 해류의 주축이 연안역으로부터 멀어지거나 가까워지는 경향은 해저지형에 의한 것으로 사료된다(Fig. 1참조). 대한해협으로 접근할수록 동향 혹은 북동향의 해류가 세기가 강화되는 경향이 있는데 이는 유출 경계인 대한해협의 폭이



**Fig. 10.** 15-day mean velocity distributions calculated by the model driven by (a) both tides and inflows/outflows (Case-1), (b) by tides only (Case-2), and (c) by inflows/outflows only across open boundaries (Case-3).

좁아지기 때문이다. 대한해협에서는 해저지형의 영향으로 대마도 서쪽의 깊은 골을 따라 해류가 강화되는 경향을 보이며, 대한해협 골에서의 해류의 강화는 실측 결과와 유사하다(Isobe *et al.*, 1991; Kaneko *et al.*, 1991; Ro *et al.*, 1995; 심, 1998). 수심이 깊은 대한해협 골에서 해류가 강화되는 이유는 수심이 증가함으로써 유발되는 양의 상대와도가 정상상태를 유지하기 위하여 마찰에 의해 제거되어야 하므로 골 부근에서 마찰계층이 형성되기 때문인 것으로 사료된다.

조석 강제력만이 고려된 경우 평균 해류 분포는(Fig. 10b) 연안역에서 국지적으로 강한 조석 잔차류를 유발하지만, 남해의 대부분의 해역에서 잔차류의 크기가 5 cm/s 미만으로 남해의 해류분포를 재현하지 못한다. 모델영역의 동쪽 개방경계인 대한해협과 남쪽 경계의 제주도 인접한 격자점에서는 국지적으로 개방경계에 평행한 방향으로 강한 잔차류가 나타나는데 이는 개방경계에서 입력된 조석값의 오차와 모델 격자간 수심의 급격한 변화 때문으로 사료된다. Tee(1990)는 지형이나 수심의 급격한 변화가 있는 곳에서 불규칙적인 큰 흐름이 있고 이는 수평방향의 해상도가 충분하지 않기 때문이며 해결방법으로는 격자크기를 충분히 작게 하거

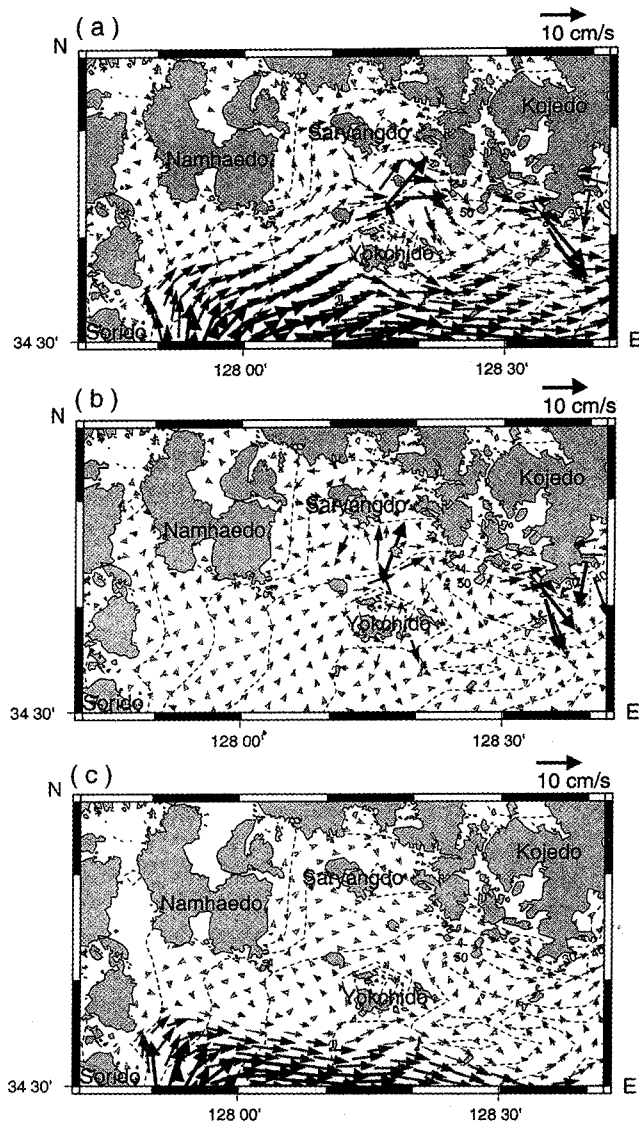
나 수심 또는 지형을 인위적으로 평활화 함으로써 제거 될 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 이러한 강한 조석 잔차류의 영향이 모델 내부까지 영향을 미치지 않고 그 영향이 경계 부근에 국한되어 수심이나 지형을 평활화 하지 않았다. 개방경계를 통한 유·출입만을 고려한 경우(Fig. 10c) 제주도 동쪽을 통해 유입된 대마난류가 Fig. 10a에서 보다 북쪽까지 이른 후 시계방향으로 회전하며, 제주해협 북쪽에서는 제주해류의 일부가 북향 후 연안역을 통해 남동향 함으로써 Fig. 10a에서보다 제주해협 북쪽 연안역의 남동향류가 강화되었다. 거문도 동쪽의 육붕 해역에서의 해류분포는 Fig. 10. a, c가 큰 차이를 보이지 않는다.

수치모델을 이용하여 내만이나 연안역에서 해수유동을 연구할 때 조석 강제력이나 바람에 의한 강제력은 고려하지만 개방경계를 통하여 유·출입하는 해류의 영향을 고려하지 않는 경우가 많았다(Kim, 1994). 연안역과 외해역사이에 조석주기보다 긴 시간 규모의 해수교환이 중요하지 않은 연안역의 경우 수심이 얕은 연안역의 해수유동은 바람에 의한 기상요인과 조석잔차류에 의해 주로 지배될 것이다. 모델영역 내 대부분의 연안역에서는 해류가 강하지 않으나 남해안의 유독성 적조 다발 지역 중 하나이며, 50 m 등심선이 연안에 근접하여 지나가는 소리도와 거제도 사이의 연안역에서는(Fig. 10에서 모델영역내의 □해역: 국립수산진흥원, 1997) 해류의 주축이 연안쪽으로 접근함에 따라 해류가 비교적 강하게 나타난다. Fig. 10의 세 경우에 대하여 소리도와 거제도 사이의 연안역(Fig. 10에서 □해역)에서의 해류 분포를 확대한 그림이 Fig. 11에 제시되어 있다. 조석강제력만 고려한 경우 일부 섬 주위를 제외하고는 3 cm/s 이하의 작은 유속 분포를 보인다(Case-2, Fig. 11b). 조석강제력은 고려하지 않고 해수의 유·출입만을 고려한 경우(Case-3, Fig. 11c) 육지도 남서쪽에 10 cm/s 이상의 강한 흐름이 나타나지만 이런 강한 흐름이 육지도 서쪽까지 영향을 미치지 못하고 육지도 남서쪽에서 시계 방향으로 회전 후 육지도 남쪽을 따라 동향한다. Case-2와 Case-3의 결과 모두 연안에 인접한 해역에서는 일정한 해수의 흐름이 나타나지 않는다. Case-2(Fig. 11b)의 경우 섬 근처에서 국지적으로 발생한 강한 흐름이 Case-3의 결과(Fig. 11c)에서는 나타나지 않고 있어, 섬 근처에서의 국지적인 강한 흐름은 조석잔차류에 의한 것임을 알 수 있다. 조석강제력과 유·출입을 동시에 고려한 Case-1의 경우(Fig. 11a)에는 육지도 남서쪽을 통해 유입된 10 cm/s 이상의 강한 흐름이 육지도 서쪽까지 북상 후 주류는 시계 방향으로 회전 후 육지도 남쪽에서 동향하지만, 일부는 육지도와 남해도 사이까지 유입되어 육지도 북쪽 해역에서도 약 5 cm/s 이상의 크기로 육지도를 우회하는 시계 방향의 순환 형태가 나타난다. 이러한 Fig. 11a에서의 순환 형태는 연안에 더욱 인접한 사량도 북쪽까지 영향을 미치고 있어, 각각의 강제력을 개별적으로 고려한 Fig. 11b 및 Fig. 11c와는 분명한 차이를 보인다. 따라서 연안역의 해수순환을 재현하기 위해서는 남해의 개방경계에서의 조석뿐만 아니라 해수의 유·출입도 반드시 고려하여야 함을 알 수 있다.

## 결론 및 토의

조류, 해류, 밀도류, 취송류 등의 복합적인 작용에 의해 영향을 받고 시·공간적으로 물리적 특성이 크게 변하는 남해의 해수 순





**Fig. 11.** 15-day mean velocity distributions in the square region shown in Fig. 10 calculated by the model driven by (a) both tides and inflows/outflows (Case-1), (b) by tides only (Case-2), and (c) by inflows/outflows only across open boundaries (Case-3).

환을 재현하기 위한 첫 번째 단계로서 본 연구에서는 제반 강제력 중 조석과 해수의 유·출입 조건을 동시에 고려하는 수치모델을 구성하여 남해의 순압 2차원 해수유동을 재현하였다. 기존의 관측 결과에 의하면 남해는 조류순환뿐 아니라 10 cm/s 이상의 해류의 세기로 특징 지워지는 평균적인 해수순환이 뚜렷하고, 국지적으로는 해류의 세기가 조류보다 크게 나타나고 있어, 시간에 따른 해수유동을 재현하기 위하여 기본적으로 고려되어야 할 강제력은 조석과 개방경계를 통한 해수의 유·출입이다. 남해를 대상으로 아직 이 두 강제력을 고려하여 해수유동을 고찰한 연구가 없었으며, 본 연구에서는 개방경계에 조류와 해류를 부과하여 두 강제력을 동시에 부과하였다.

모델결과는 외해역에서 관측된 조석, 해·조류 및 인공위성 추적부이 자료에 근거하여 작성된 해류도와 유사한 남해의 해수순

환을 재현하였다. 그러나 3×3 km 격자 간격으로는 지형 및 수심 재현이 충분치 않은 내만에서의 모델 결과는 관측 결과와 차이를 보이는데, 이는 모델에서 사용된 격자간격 문제 외에 바람 등의 외력을 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 순환모델 결과에 의하면 제주해협을 통해 유입된 제주해류의 주축이 국지적으로 연안역과 가까워지거나 멀어지면서 동향하는데 이는 해저지형에 의한 것으로 추정되며, 전반적으로 수심이 50 m보다 얕은 연안역에서의 해류는 외해역에 비해 약하다. 제주도 동쪽을 통해 유입된 대마난류는 북상 후 시계방향으로 회전하여 북동향하는 제주해류와 합쳐지며 대한해협에서는 해저지형의 영향으로 대마도 서쪽의 깊은 골을 따라 해류가 강화되는 경향을 보이며, 이러한 대한해협 골에서의 해류의 강화는 관측 결과와 부합된다. 대한해협 골에서의 해류의 강화는 수심이 증가함으로써 유발되는 양의 상대와도를 제거하여 정상상태를 유지하기 위해 골 부근에서 마찰경계층이 형성되기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구의 주된 결론의 한 가지는 해류 지배적인 남해에서 내만을 포함한 연안역 순환 및 연안역과 외해역간의 장기적인 물질교환을 규명하기 위해서는 개방경계를 통한 해류분포가 고려된 남해 분지구도의 순환모델링이 필요하다는 점이다. 향후 내만을 포함한 연안역의 순환과 연안역과 외해역간의 상호 작용을 보다 사실적으로 재현하고 연구하기 위해서는 모델 공간적인 해상도의 개선이 요구되며, 시·공간적으로 물리적 특성이 크게 변하는 남해의 해수순환을 적절히 재현하기 위해서는 남해의 밀도분포와 바람응력 및 담수유입이 고려된 3차원 수치모델로의 발전이 필요하다. 특히 남해에는 전 계절에 걸쳐 동서방향의 전선이 나타나며(Gong, 1971; Lee, 1983; 노와 김, 1983), 이러한 전선은 전선에 평행한 방향의 흐름을 강화시킴으로 인하여 동향의 해류 주축의 위치를 변화시킬 수 있다. Lee and Cho(1997)가 다수의 인공위성 추적부이의 궤적을 이용하여 작성한 남해의 해류도와 본 연구결과를 비교할 경우 관측에 의한 해류도에서 강한 해류의 주축이 모델에서보다 남쪽에 나타남을 알 수 있는데, 이는 본 연구에서 고려되지 않은 남해의 수평적인 밀도분포에 의한 것으로 사료된다. 수치모델의 개선과 병행하여 해양관측 측면에서 개방경계에서의 장기적인 해류관측을 통해 경계조건을 개선하고, 모델 영역 내 해역에서 장기 관측을 통한 모델의 충분한 검증이 이루어질 필요가 있다.

### 감사의 글

논문 심사를 맡아 좋은 지적을 많이 해 주시고, 논문을 보다 간결하게 정리할 수 있도록 충고해 주신 심사위원 여러분께 깊이 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구소의 기관과유사업인 “남해 물질순환과 생지화학환경연구(BSPE99725-00-1235-4)”와 해양수산부 수탁과제인 “해양예보시스템 구축(BSPM 99025-00-1216-1)” 사업의 지원으로 수행되었다.

### 참고문헌

국립수산진흥원, 1997. 한국 연안의 적조(Recent Red Tides in Korean Coastal Waters). 구덕인쇄사, 280 pp.

- 김충기, 1998. 남해에서 조석과 해류에 의한 해수순환 및 물질이동의 수치모델 연구. 인하대학교 해양학과 석사학위논문, 66 pp.
- 김경환, 1994. 대한해협 해류에측에 관한 연구. 성균관대학교 토목공학과 석사학위논문, 113 pp.
- 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, **26**: 262-277.
- 김복기, 1979. 제주해협 해류와 조류에 관하여. 국립수산진흥원 연구보고, **21**: 7-21.
- 김인옥, 노홍길, 1994. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한연구. 한국수산학회지, **27**: 515-528.
- 노홍길, 김 구, 1983. 제주와 목포, 제주와 완도간의 표면수온 변화. 한국해양학회지, **18**: 64-72.
- 심문보, 1997. 직접측류에 의한 대한해협 서수도의 해수수송량. 1997년 수로기술연보, 316-321.
- 심문보, 1998. 대한해협 서수도의 해수수송량. 1998년 수로기술연보, 9-16.
- 조양기, 김 구, 1994. 여름철 남해 저온수의 특성과 기원. 한국해양학회지, **29**: 414-421.
- 최병호, 방인권, 김경환, 1994. 대한해협조류의 3차원분포. 한국해양안 · 해양공학회지, **6**: 421-438.
- 한국해양연구소, 1987. 한국해협 종합해양자원도 작성연구(남해). 한국해양연구소, BSPG 00046-136-7, 357 pp.
- 한국해양연구소, 1989. 한국해협 종합해양자원도 작성연구(남해). 한국해양연구소, BSPG 00091-251-7, 555 pp.
- 한국해양연구소, 1991. 대한해협 서수도의 수리학적 연구. 한국해양연구소, BSPE 00195-362-1, 77 pp.
- 한국해양연구소, 1996. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집. 한국해양연구소, 282 pp.
- 한국해양연구소, 1997. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학환경연구. 한국해양연구소 보고서, BSPE 97612, 51-177.
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Three Dimensional Coastal Models (N.S. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 1-16.
- Chang, K.I., K. Kim, S.W. Lee and T.B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju Strait in Spring, 1983. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 203-215.
- Chang, K.I., C.K. Kim, M.S. Suk, S.Y. Nam and L.H. Kantha, 1997. Barotropic circulation of the South Sea-preliminary model results. *Ocean Research*, **19**: 139-152.
- Fang, G., 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chinese J. Oceanology and Limnology*, **4**: 1-16.
- Gong, Y., 1971. A study on the south Korean coastal front. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **6**: 25-36.
- Isobe, A., A. Kaneko, S.-K. Byun, S.-D. Chang and S. Tawara, 1991. On the current structures in the western channel of the Tsushima/Korea Strait - from the result of the ADCP surveys in September 1989. *Engineering Sciences Reports*, Kyushu University, Japan, **13**: 45-51.
- Kaneko, A., S.-K. Byun, S.-D. Chang and M. Takahashi, 1991. An observation of sectional velocity structures and transport of the Tsushima Current across the Korea Strait. In: Oceanography of Asian Marginal Seas (K. Takano, ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 179-195.
- Kim, C.-K., 1994. Three-dimensional numerical model experiments of tidal and wind-driven currents in Chinhae Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **29**: 95-106.
- Lee, J.C., 1983. Characteristics of front near Cheju Strait in early winter. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **16**: 51-58.
- Lie, H.J. and C.H. Cho, 1997. Surface current fields in the eastern East China Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**: 1-7.
- Mellor G.L., 1996. *Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Princeton University, 40 pp.
- Mitta, T. and Y. Ogawa, 1984. Tsushima currents measured with current meters and drifters. In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas (T. Ichiye, ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 67-76.
- Odamaki, M., 1989. Tides and tidal currents in the Tsushima Strait. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **45**: 65-82.
- Tee, K.T. and D. Lefavre, 1990. Three-Dimensional Modeling of the Tidally Induced Residual Circulation Of Southwest Nova Scotia. *Coastal and Estuarine Studies*, **38**: 79-92.
- Park K. and J.-H. Oh, 1998. Calibration and verification of a hydrodynamic model in Chunsu Bay and adjacent coastal water. *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers*, **10**: 109-119.
- Ro, Y.J., M.-J. Park, S.-R. Lee and J.C. Lee, 1995. Structures and variability of the T-S field and the current across the Korea Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 237-249.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, **91**: 99-164.
- 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.
- Yi, S.U., 1966. Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **1**: 7-13.

1999년 7월 30일 원고접수

2000년 10월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 이동규