

한국 남해안에서 2차원 해수순환모델

권철휘⁽¹⁾, 조규대⁽²⁾, 김동선

A Numerical simulation for the circulation of sea water in the Southern Coastal Waters in Korea

by

Chul Hui KWOUN⁽¹⁾, Kyu Dae CHO⁽²⁾ and Dong Sun KIM

요 약

한국 남해연안에서의 해수순환을 알아보기 위하여 수치모델을 이용하여 개방경계에서 조석강제력에 의한 조류와 해수수송량을 이용한 해류를 재현하였다. 주요 4대 분조에 의한 조류모델의 결과, 제주해협에서 최강 동향류 세기가 최강 서향류 세기보다 약 2배정도 더 크게 나타났다. 수치실험에 의해서 계산된 해류분포에서 거제도 남측에 나타나는 반원형의 해류분포가 나타났는데, 그 분포가 해저지형의 변화에 의해서 발생하는 것으로 수치실험을 통하여 밝혀졌다. 조류와 해류를 동시에 고려한 해수순환모델 결과, 제주해협에서는 남해로 유입되는 동향류가 우세한 반면에 남해에서 서해쪽으로 유출되는 서향류의 세기는 미약한 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 장기적인 관점에서의 물질교환을 고려할 때, 고흥연안의 해상 부유물질이 제주해협을 통하여 서해쪽으로 이동하기 어렵게 만드는 원인중의 하나라고 판단된다.

Abstract

The circulation of sea water was simulated by two dimensional tide model using the main four tidal components and permanent current driven by inflow/outflow across open boundaries. According to the result of tide model, the maximum speed of eastward flow on the Cheju Strait is twice higher than that of westward flow. According to the result of permanent current, the flow of permanent current showing semi-circle pattern in the southern part of Kojedo was due to variation of topography. According to the result of circulation model in the Cheju Strait, eastward flow entering in the southern waters from the Yellow Sea of Korea were dominant, but outflows westward were weak. These results suggest that it was difficult to move for suspended particulate matter into the Yellow sea from the southern waters through Cheju Strait.

Keywords: Circulation, Tide Model, Permanent Current, Semi-Circle Pattern, Topography.

1. 서 론

한국의 남해안은 대한해협(Korea Strait)과 제주

해협(Cheju Strait)을 사이에 두고 동해와 동중국해를 잇는 중요한 해상교통의 통로이며, 긴 해안선을 가졌을 뿐만 아니라 많은 만과 섬들로

(1) 정희원, 부경대학교 해양산업개발연구소, kwounch@hanmail.net

(2) 부경대학교 해양학과

이루어져 복잡하다. 이러한 지형적인 특징을 가지고 있는 남해안에서 매년 적조에 의한 수산피해가 날로 증가되고 있을 뿐만 아니라 해난사고로 인한 기름유출에 의하여 연안어장의 피해가 증가되고 있는 추세이다. 이와 같이 남해연안에서 발생하는 해양 환경오염의 영향을 분석하고 대책을 강구하기 위해서는 해수유동의 이해가 필수적이다.

남해안에서 해류에 관한 연구로는 고온·고염의 대마난류가 제주도의 남북방향으로 스치면서 시계방향으로 선회하여 남해를 거쳐 대한해협을 통해 동해로 유출되며(공[1971]), 황해나 동중국해에서 기원한 저염수가 제주도의 남북 양방향을 스치면서 남해로 유입되고 있다는 연구결과(김과 노[1994], 김과 노[1997])가 있다. 또한, 중국대륙연안수가 한국 남해안까지 영향을 미치고 있다고 있으며(Huh[1982], 양[1994]), 이와 같은 저염수 흐름의 방향은 인공위성으로 추적한 부표의 이동경로에 의해서 제시된 상층수의 이동경로와도 일치하고 있다(Beardseley et al.[1992]).

최 등[1994]는 수치모델을 이용하여 조석 강제력만을 고려한 남해 전체의 조석에 관한 연구를 하였으며, 그 외 많은 연구자들이 남해안의 진해만과 같은 일부 내만 수역에 국한된 수치모델을 수행하여 조석 및 조류에 관한 연구를 하였다(장 등[1993]). 김[1998]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 연구하였지만, 각각의 외력을 동시에 고려하지는 않았다. 김 등[2000]은 조석모델의 경우는 개방경계를 따라 자유해면 분포를 부과하였으며, 해류는 개방경계에서 관측한 해류를 직접 부과하여 남해의 해수순환을 재현하였다. 그러나 직접 측류에 의한 해류는 관측시기와 관측위치에 따라서 해류의 세기와 방향이 큰 차이를 보이고 있으며(Byun And Kanako[1999]), 특정시기 및 특정해역에서의 해류관측자료가 없을 때는 해류분포를 재현하기가 어렵다. 따라서 특정시기에 해당하는 추정 가능한 임의의 해수수송량을 이용하여 해류를 재현할 필요성이 요구되고 있다. 또한, 남해안과 같이 연안 경계지형이 복잡하고 섬들이 많은 해역에서 복잡한 지형에 따른 해류류를 재현하기 위해서 사용한 기존의 3km 격자크기(김 등[2000])

로서는 어려움이 있었다.

본 연구에서는 수직·수평 방향의 길이가 1.25km 인 계산격자를 사용한 수치실험을 통하여 조석강제력에 의하여 조류를 재현하였으며, 해류를 재현하기 위해서는 개방경계를 통하여 유·출입되는 해수수송량을 이용하여 해수의 양이 일치되도록 각 개방경계에서의 수위를 일정하게 유지한 후, 그 수위차로써 해류모델을 구동하게 하였다. 조류와 해류가 각각 남해의 해수유동에 미치는 영향을 조사하였고, 두 외력이 동시에 고려되었을 때의 남해 해수순환의 특성을 파악하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 해수수송량 및 해류의 산정

개방경계(Fig. 1)를 통하여 유·출입되는 해수수송량을 산정하기 위하여 1997년 3월과 4월에 모델 계산영역의 서쪽경계인 제주해협, 남쪽경계인 제주도 동부 및 동쪽경계인 대한해협에서 Acoustic Doppler Current Profiler를 이용하여 25시간 동안 8~9회 반복 관측한 자료를 이용하였다. 관측된 일평균 해류분포에 의하면, 남해로 유입되는 해수수송량은 서쪽경계인 제주해협에서 0.37Sv(1Sv=1×10⁶m³/sec)였다(김 등[2000]). 동쪽경계인 대한해협 서수도에서 1997년 4월의 ADCP반복 관측 결과에 의하면, 동해로의 유입량은 1.22Sv이라고 하였다(심[1998]). 3월과 4월의 제주해협과 대한해협에서 해수수송량에 큰 변화가 없고, 제주해협과 제주도와 대마도의 단면을 통하여 유입된 해류가 대한해협 서수도를 통하여 동해로 유입된다고 가정하면, 제주도와 대마도사이의 해협에서는 0.85Sv의 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 조와 김[1994]이 염보존방정식을 이용하여 박스모델에서 계산한 대한해협에서 제주해협을 통과한 수송량의 비율(31~36%)과 유사한 값을 나타내었다. 이상과 같이 대한해협의 서수도에서 해수수송량은 관측시기에 따라 변동하고 있는데, Isobe et al.[1994]에 의하면 대한해협을 통한 해수 수송량

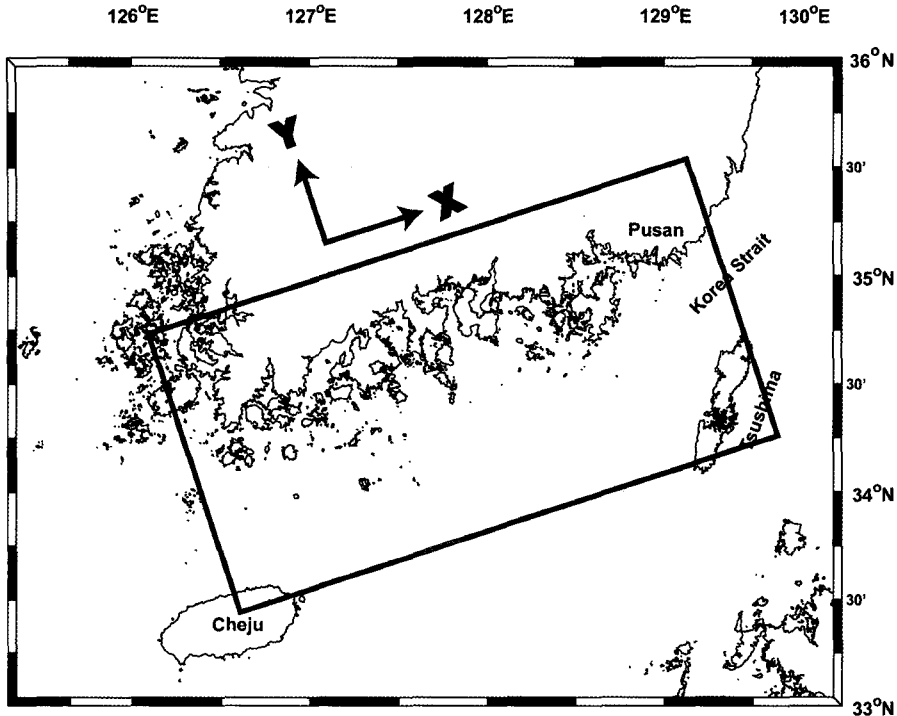


Fig. 1 Numerical model domain(rectangular box) of South Sea of Korea.

은 하계에서 추계사이에 최대를 보이며, 동계에서 춘계사이에 최소를 나타낸다. 관측시기에 따라서도 그 양이 변동하는데, 1987년 9월 1일에 2.26Sv, 1988년 9월에 0.98Sv 그리고 1989년 9월에 2.35Sv 등으로서 관측날짜에 따라 큰 차이를 보이고 있다(Byun and Kanako[1999]).

본 연구에서는 대한해협 서수도에서 최대 해수수송량을 나타내는 9월의 해수수송량을 산정하기 위하여 1987년부터 1989년까지 9월의 3년간 평균된 해수수송량인 약 1.8Sv를 서수도에서 동해로 유출되는 해수수송량으로 계산하였다. 제주해협과 제주도과 대마도사이의 단면을 통하여 유입되는 해수수송량은 각각의 경계에서 유출입되는 해수수송량의 비율에 따라서 0.555Sv, 1.275Sv로 산정하였다.

이상과 같이 구한 각각의 외부경계에서의 해수수송량을 이용하여 연구해역내에서 수치실험을 통하여 해류분포를 재현하고자 하였다. 해류모델에서는 서쪽경계인 제주해협과 남쪽경계인 제주도와 대마도를 잇는 단면을 통하여 해수가

남해로 유입되고, 동쪽경계인 대한해협 서수도를 통하여 동해로 유출되도록 하였으며, 그 유·출입량을 일치하게 하였다. 해수가 유입되는 개방경계에서 해수수송량을 개방경계의 계산격자에 해당하는 총 면적으로 나누어서 단위시간당 평균 수위를 구하였다. 또한, 직접측류에 의한 해류관측자료를 이용하여 개방경계의 단면에 해당하는 격자들에서 상대적인 유속의 비율을 구한 후, 이 비율을 근거로하여 각 계산격자에서 수위차를 유지하면서 그 수위차로써 해류모델을 구동하게 하였다. 모델의 결과값이 평형상태에 도달하기에 충분하다고 판단되는 시간인 15일후의 계산값을 해류값으로 구하였다.

2.2 조류모델

연구해역인 한국 남해안에서에서 조류에 의한 해수유동을 재현하기 위하여 수십 연직 적분된 2차원 조류모델을 사용하였다. 2차원 조류모델의 기본방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 연직면에 대해 평균하고, 외력으로 지구

자전에 의한 영향, 해저의 마찰력 및 중력을 포함하였다. 연안 해역의 조류·조석의 계산을 위하여 평균해면을 원점으로 하여 직교 좌표계로 나타내었다. 또한, 계산의 편리를 위하여 유체는 점성이고 비압축성이며, 압력은 정수압분포를 하는 것으로 가정하였다. 이상과 같은 가정하에서 수심적분된 연직 2차원 조류모델의 운동방정식과 연속방정식은 식(1)~(3)과 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)
- η : 평균해면으로부터의 해면변위값(m)
- h : 평균해면하의 수심(m)
- f : Coriolis parameter($2\Omega \sin\theta$, Ω :각속도, θ :위도)
- Ah : 수평와동점성계수($1 \times 10^2 \text{m}^2/\text{sec}$)
- g : 중력가속도($9.8 \text{m}/\text{sec}^2$)

또한, 식(1), (2)의 τ_x, τ_y 는 해저마찰을 나타내고 있으며, 식(4), (5)와 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 γ_b^2 는 해저마찰계수로써 0.0026으로 두었다(Park et al.[1990]). 식(1), (2) 및 (3)을 차분화하여 계산하였으며, 차분방법은 Dufort-Frankel 방법을 이용한 leap-frog scheme를 사용하였다. 첫 step은 backward scheme으로 계산을 시작하였다. 공간적으로는 중앙차분을 하였으며, 시간에 대해서는 전방차분법을 사용하였다. 해면의 승강에 대해서는 semi-implicit scheme을 적용하였다(Backhaus[1983]). 경계조건으로는 흐름이 경계

를 가로지르지 못하도록 하였으며, 경계면에서 경계에 평행한 성분이 zero가 되는 non-slip condition ($u=v=0$)을 적용하였다. 외부경계에서의 조위값은 식(6)과 같이 적용하였다.

$$\eta = \eta_o \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t - P\right) \quad (6)$$

여기서, η_o, P 는 open boundary에서 조위의 진폭과 위상이며, T_i 는 각각의 M_2, S_2, K_1, O_1 분조에 대한 조석주기이다. time step(Δt)은 CFL Condition을 만족하는 값으로 결정하였다.

연구해역의 해저지형은 제주해협(최고수심 120m)과 대한해협(최고수심 228m) 등의 골을 제외하고는 수심 100m 내외의 평탄한 지형을 나타내고 있다(Fig. 1). 주요 4개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 진폭과 지각은 한국해양연구소[1996]의 자료로부터 구하였고, 제주도과 대마도를 가로지르는 경계와 같이 자료가 없는 개방경계에서는 Odamaki[1989]의 등조석도를 이용하였다. Table 1은 개방경계역(Fig. 1) 인근에서 관측한 조위자료의 조화상수를 나타낸 것이다. 모델의 격자구성은 x, y방향으로 동일한 1.25km의 정방격자로 구성하였으며, 230×105개의 격자로 구성되어졌다(Fig. 2). 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. 사용된 좌표축은 x축의 방향은 제주도에서 대마도, y축의 방향은 제주도에서 추자도 방향으로 증가하는 직교좌표계이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조류

수치모델의 검증은 M_2, S_2, K_1, O_1 의 각각의 분조별로 조류를 계산한 후, 계산된 각각의 조위와 조류에 대한 진폭 및 위상값을 실측된 관측자료를 조화분해하여 구한 진폭 및 위상값과 비교하였다. 조화분해는 Foreman[1978, 1979]의 tidal package을 이용하였다. 조위 검증은 남해의 해안선에 인접한 국립해양조사원의 부산, 통영, 여수, 완도 및 거문도 검조소(T1~T5)에서 1998년

한국 남해안에서 2차원 해수순환모델

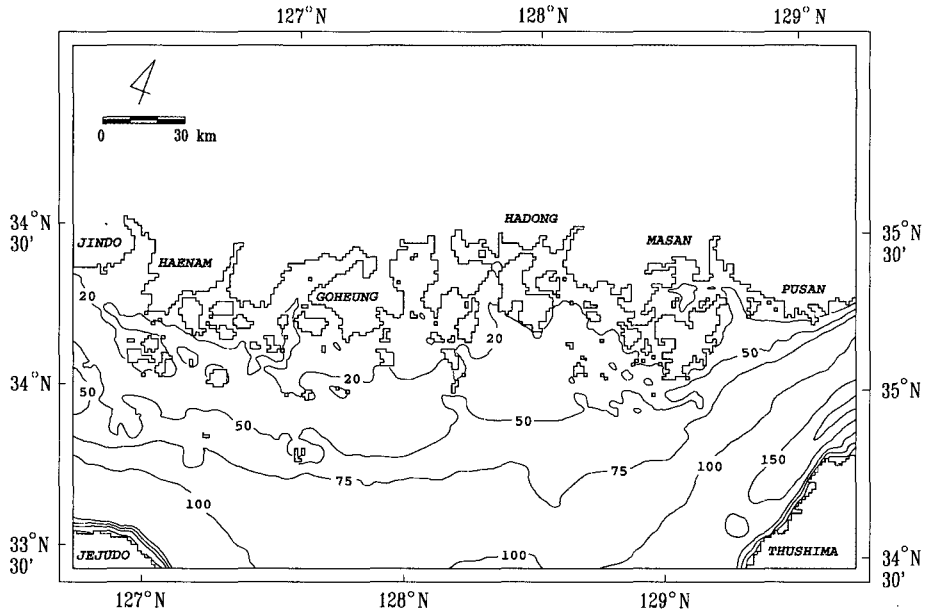


Fig. 2 Bathymetry of the study area.

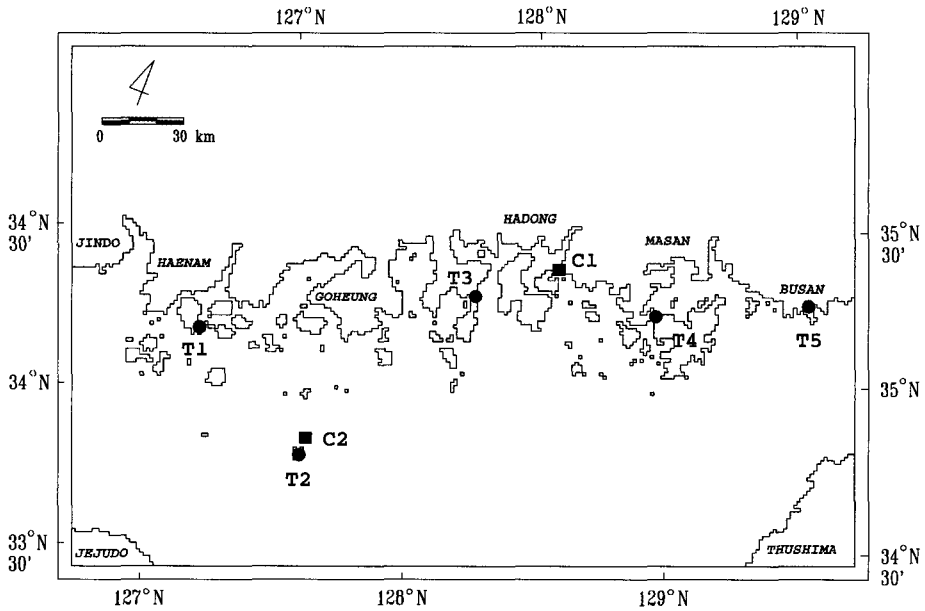


Fig. 3 Locations of model verification points for the surface elevation(T1~T5 stations) and for currents(C1 and C2 stations).

Table 1 Tidal harmonic constants around Southern Water of Korea.

Station	Position		Constituent							
	Latitude	Longitude	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁	
			A (cm)	P (°)	A (cm)	P (°)	A (cm)	P (°)	A (cm)	P (°)
Pusan	35°05' 30"	129°02' 19"	40.0	236.4	18.8	274.5	4.5	142.9	1.6	103.6
Gori	35°19' 04"	129°17' 25"	24.6	93.3	11.5	129.6	3.4	30.5	2.0	322.5
Uodo Sudo	33°30' 00"	126°54' 00"	66.0	274.0	31.0	296.0	23.0	206.0	16.0	182.0
Jeju	33°30' 51"	126°31' 50"	69.7	303.5	29.5	324.1	23.0	210.2	16.8	189.2
Hajodo	34°58' 12"	126°03' 12"	95.7	348.3	33.6	15.3	28.7	223.1	22.6	204.6
Chujado	33°58' 00"	126°18' 00"	87.6	314.5	35.0	336.1	26.0	211.4	19.2	189.1
Izumiura	34°40' 00"	129°29' 00"	32.0	254.0	16.0	277.0	5.0	248.0	4.0	251.0
Tutu	34°07' 00"	129°11' 00"	65.0	254.0	30.0	276.0	14.0	210.0	10.0	192.0

9월 1일부터 15일까지 관측된 매시별 자료를 이용하였다(Fig. 3). 반일주조인 M₂분조와 S₂분조의 조위검증에서는 계산값이 관측값을 비교적 잘 재현한 것으로 나타났으나, 일주조인 K₁분조와 O₁분조의 조위 검증에서는 반일주조에 비해서는 계산값과 관측값의 차이가 더 크게 나타났다(Fig. 4). 이와 같은 결과는 진폭과 위상의 변동이 크게 나타나는 K₁과 O₁분조의 무조점이 계산영역의 동쪽 개방경계와 인접한 해역에 위치하기 때문에 나타난 결과로 판단된다(김 등 [2000]).

실제 관측된 자료에서는 조류성분 이외에 항류 성분인 해류와 바람에 의한 취송류 등 여러 가지 흐름이 포함되어 있다. 따라서 관측자료를 조화분해하여 조류성분만을 구한 후, 수치실험의 계산결과값과 비교하였다. 조류관측자료는 한국 해양연구소에서 관측한 2개 정점(C1, C2)에서의 자료인데(Fig. 3), 거문도 정점에서 1986년 7월 20일부터 8월 8일까지 매시별 관측한 조류자료와 삼천포 정점에서 1989년 9월 27일부터 10월 18일까지 매시별 관측한 조류자료이다(한국해양연구소[1987], [1989]).

삼천포의 C1정점에서 조류모델의 결과를 검증

한 결과(Fig. 5), 일주조 성분의 조류는 크기와 방향면에서 비교적 계산값이 관측값을 잘 재현한 것으로 나타났다. 반면, 반일주조 성분의 조류에서 유속의 세기는 계산값이 관측값에 비하여 작게 나타났으며, 조류의 방향은 계산값이 관측값에 보다 북향성분이 강하게 나타났다. 조류의 세기는 계산값과 관측값의 차이가 크게 나타났는데, 그 원인은 모델에서 사용된 계산격자가 연안 경계지형을 잘 재현하기 못하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 김 등[2000]은 3km격자를 사용한 반면, 본 연구에서는 1.25km의 조밀한 격자를 사용하였음에도 불구하고 삼천포 부근의 좁은 만입구에서 계산결과가 관측결과를 제대로 반영하지 못하는 것으로 조사되었다. 이와 같이 단점을 해결하기 위해서는 전체 해역에 대하여 격자의 크기를 줄이는 방법보다는 특정 해역의 격자크기를 작게 함으로써 계산시간의 단축뿐만 아니라 좁은 협수로에서도 만족할만한 계산결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

외해측에 위치한 거문도의 C2정점에서 조류검증을 위하여 계산값과 관측값에 대한 조류타원도를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 6). 계산값과 관측값 모두에서 왕복성 조류의 형태를 가진 타원

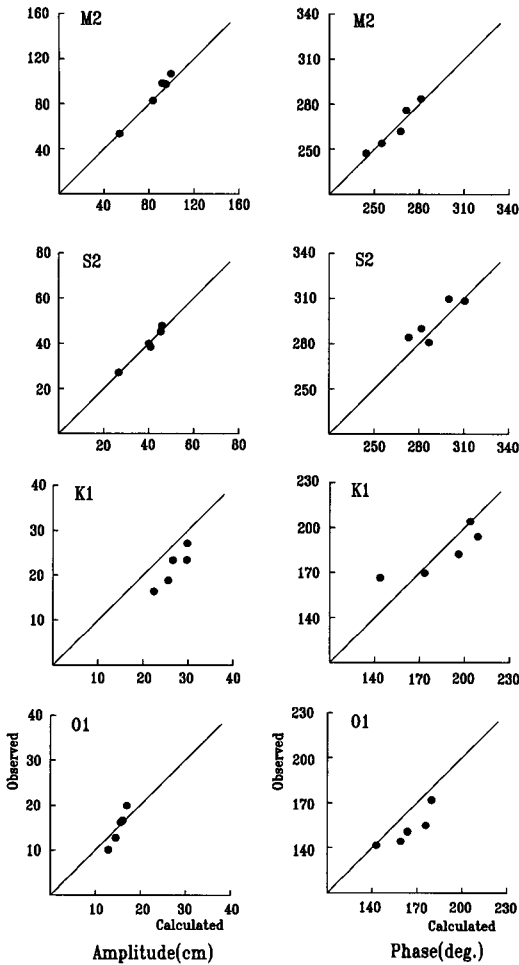


Fig. 4 Comparison of observed and calculated of M₂, S₂, K₁ and O₁ tides.

의 형태를 나타내었다. 일주조와 반일주조 성분에서의 조류의 세기는 계산값과 관측값이 서로 유사하게 나타났으나 조류의 방향은 계산값이 관측값보다 북향성분이 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 실제 해역에서 부는 바람성분이 고려되지 않았을 뿐만 아니라 개방경계지역에서의 진폭값이 K₁ 및 O₁분조에 비하여 더 큰 N₂와 K₂ 분조의 조류성분이 포함되지 않은 결과로 판단된다. 이상과 같이 조류모델의 검증결과에서 모델의 계산결과가 관측값과 비교적 유사하게 재현되었으므로 본 연구에서 사용한 조류모델로

써 계산한 결과는 한국 남해연안에서의 조류현상을 비교적 잘 반영하고 있다고 판단된다.

이상과 같은 분조별로 각각 수행한 조류계산 결과를 시간에 따른 조류의 세기와 방향을 각각 합하여 구한 결과는 다음과 같다. 먼저, 조석 강제력만을 고려한 각각의 분조에 대한 계산결과를 합한 조류도를 살펴보면, 동쪽의 개방경계 부근인 대한해협을 기준으로 하여 서향류가 최강인 때(Fig. 7)에는 제주해협과 대한해협을 통하여 해수가 남해로 대부분 유입되어 제주도과 대마도 사이의 남쪽경계를 통해 외해로 유출되는 것으로 나타났다. 최강 유속은 거제도 남쪽 약 10km해역에서 서남서 방향으로 100cm/sec이상의 유속을 나타내었으며, 서쪽 개방경계인 제주해협에서의 최강유속은 약 60cm/sec로 나타났다. 제주해협과 대한해협에서 유속의 방향은 서로 반대방향으로 나타났다. 반면, 동쪽 개방경계인 대한해협을 기준으로 동향류가 최강인 때(Fig. 8) 남쪽경계역에서 유입된 해수가 각각 제주해협과 대한해협을 통해 빠져나가는 것으로 조사되었다. 최강유속은 쓰시마 북단의 북서쪽 약 10km해역에서 북동방향의 100cm/sec이상의 북동류를 보였으며, 제주해협에서는 약 30cm/sec이하의 약한 서향류를 나타내었다. 제주해협에서의 최강 동향류는 최강 서향류보다 그 세기가 약 2배정도 더 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 제주해협의 연안지형과 밀접하게 관련된 것으로 판단되는데, 해수가 진도와 제주도 사이의 넓은 단면적에서 보일도와 제주도 사이의 좁은 단면적을 통과할 때 나타나는 유속의 증가로 판단된다. 또한 이 경우에 거문도의 동쪽해역을 기준으로 제주해협과 대한해협에서의 유속의 방향이 서로 반대로 나타났다. 이와 같이 제주해협과 대한해협에서 유속의 방향이 반대로 나타나는 결과는 Odamaki[1989]의 거문도를 기점으로 하여 동·서 양쪽이 서로 반대의 위상을 나타낸다는 연구와도 일치하고 있다.

3.2 해수수송량을 이용한 해류

개방경계를 통한 해수의 유·출입 조건만을 고려하여 계산된 해류성분과 주요 4대분조에 의한 조석잔차류의 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 계산 결과 나타난 해류의 유속을 살펴보면, 서쪽 개방경계인 제주해협을 통과한 해류는 진도 남측해

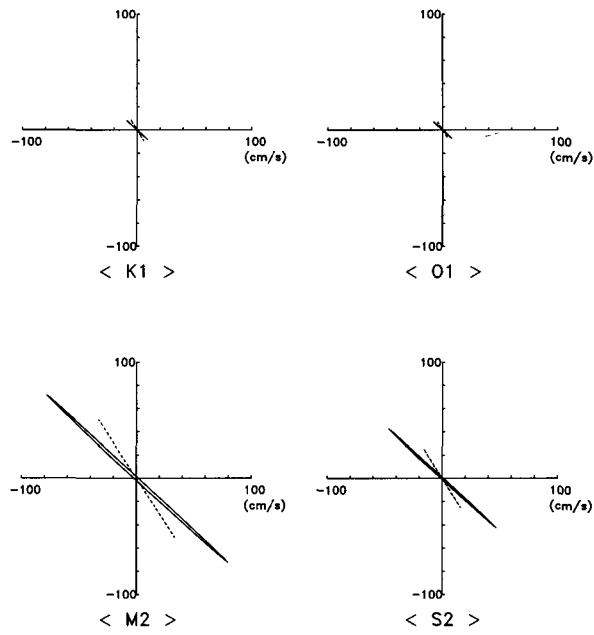


Fig. 5 Comparison between observed(solid lines) and calculated(dashed lines) tidal currents (included permanent currents) at C1 station(Samchonpo).

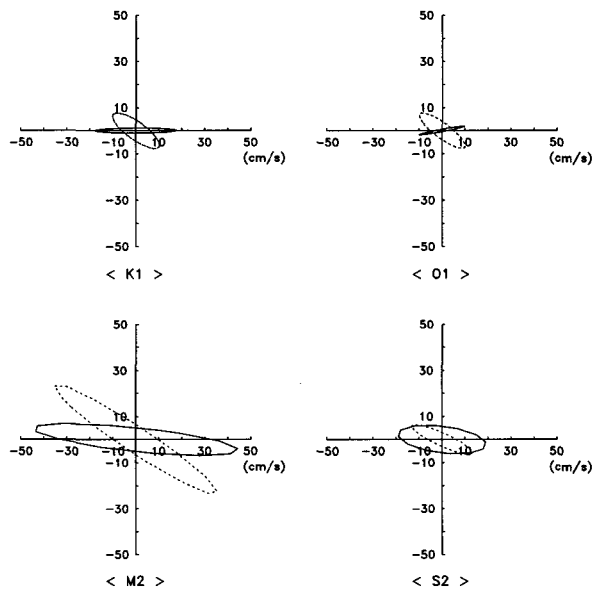


Fig. 6 Comparison between observed(solid lines) and calculated(dashed lines) tidal currents at C2 station(Komundo).

한국 남해안에서 2차원 해수순환모델

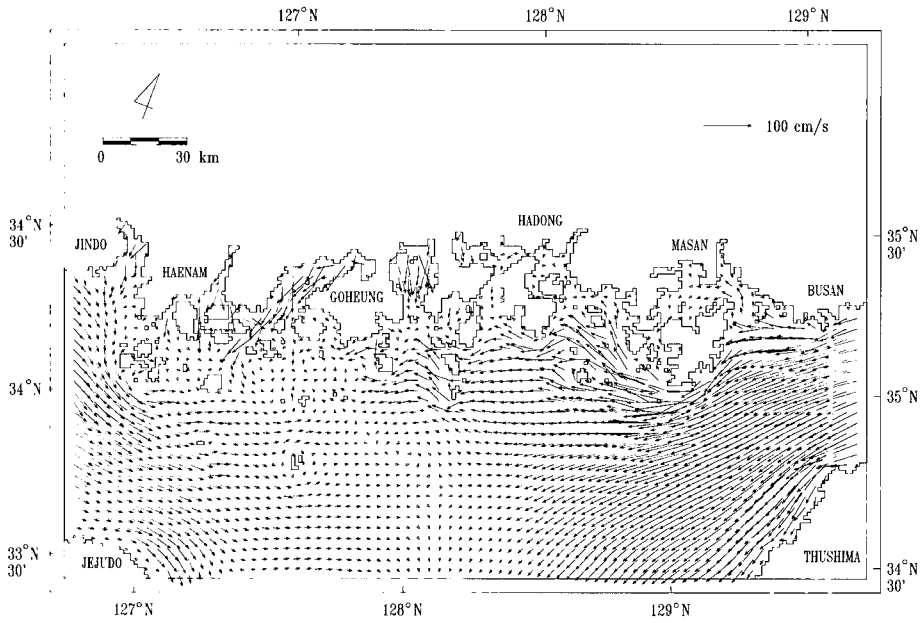


Fig. 7 Instantaneous velocity distributions at the time of maximum westward flow by tides.

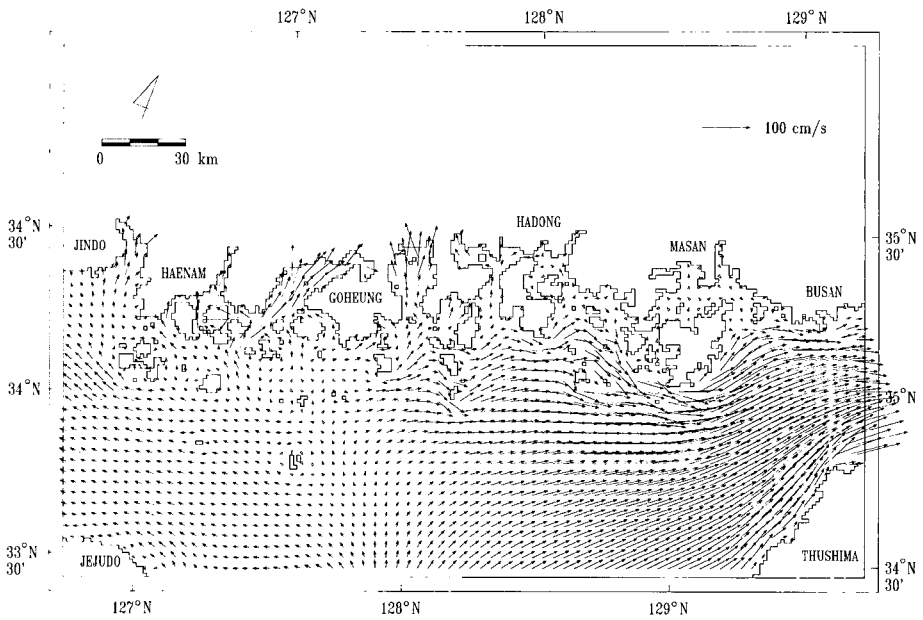


Fig. 8 Instantaneous velocity distributions at the time of maximum eastward flow by tides.

역에 이르러서는 5cm/sec이하의 약한 동향류가 되지만, 제주도 북측해역에서는 10~25cm/sec의 강한 동향류가 나타났다. 본 연구결과에서는 제주도 동측해역에서는 남하하는 약한 해류가 나타났으며, 이것은 수로국발행의 항류도에서 관측된 0.1knots의 약한 남향류와도 일치하고 있다. 남쪽 개방경계인 제주도와 대마도사이에서는 그 유속이 평균 15cm/sec인 동향류의 분포를 보였다. 대한해협외 부산 부근해역에서는 해류가 5cm/sec이하로 약하게 나타나지만 쓰시마쪽에서는 20cm/sec이상의 강한 해류가 나타났다. 특히, 대한해협의 수심 200m이상의 최심부인 골부근에서 해류가 강하게 나타난다. 이와 같은 계산결과는 제주해협에서 일부 해역의 서향류를 제외하고는 전단면에서 동향류가 나타나며, 최대유속 28cm/sec에 이르는 동향류가 제주해협 골의 북쪽사면에 나타난다(Suk et al.[1996])는 기존의 결과와 유사하게 나타났다. 소리도 남쪽해역과 거제도 동남쪽해역 등에서 해상부유 물질의 장기변동에 큰 영향을 미치고 있는 eddy를 발견할 수 있었는데, 이것은 기존의 연구(김 등[2000])에서는 파악하지 못하였던 결과이다.

또한 거문도의 동측에서 동향하는 해류가 거제도 남쪽해역사이에서 반원형의 흐름을 보이면서 동해로 유출되는 양상을 보였다. 이와 같은 반원형의 흐름에 대한 김 등[2000]의 연구결과를 살펴보면, 제주해협을 통해 유입된 제주해류의 주축이 국지적으로 연안역과 가까워지거나 멀어지면서 동향하는데 이것은 해저지형에 의한 영향으로 추정된다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 해저지형의 변화가 반원형의 흐름에 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 해류모델에서와 같은 조건하에서 수치실험을 하였다. 단, 연구해역의 모든 계산격자에서 수심을 50m로 균일하게 두고 해류모델을 수행하였다(Fig. 10). 일정한 수심을 적용하여 수치실험한 결과, 거제도 남쪽해역에서의 해류는 거제도의 남서쪽에서 남동쪽으로 진행하는 것으로 나타났으며, 반원형의 해류 흐름은 나타나지 않았다. 즉, 거제도 남쪽해역에서 반원형의 형태를 보이면서 동해로 유출되는 해류는 거제도 남쪽해역에서의 수심변화에 의해서 생성된다는 것을 수치실험을 통하여 파악할 수 있었다.

3.3 조류와 해류성분을 고려한 해수순환

조류와 해류모델의 결과를 합하여 해수의 순환을 살펴보았다. Fig. 11는 부산을 기점으로 서향류가 최강일 때, 조류와 해류를 합한 흐름을 나타내고 있는데, 대한해협 부근해역에서 약 80cm/sec의 강한 유속을 보였으며, 최대 유속은 거제도 남쪽 10km해역에서 100cm/sec이상의 강한 흐름을 보였다. 제주해협에서는 약 70cm/sec의 최강유속을 보였으며, 거제도 동쪽 해역에서는 매우 약한 흐름을 보였다. 제주해협과 대한해협에서의 흐름방향은 반대로 나타났다. Fig. 12은 부산을 기점으로 동향류가 최강일 때의 흐름을 나타내고 있는데, 쓰시마 북서쪽해역에서 100cm/sec이상의 최강유속이 나타났다. 거문도의 동쪽해역을 기준으로 우측해역에서는 대한해협으로 해수가 유출되는 양상을 나타냈으며, 좌측해역에서는 특정한 흐름방향이 없고 매우 작은 유속의 흐름양상을 나타내었다. 이것은 조류에 의해서 생성되는 서향류가 항상 동쪽으로 흐르는 동향류와 합쳐지면서 상쇄되었기 때문에 조류에 의한 서향류가 미약하게 나타나는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 장기적인 관점에서 제주해협의 동측연안에서 발생한 해상 부유물질이 제주해협을 통하여 서해쪽으로 이동하기 어렵게 만드는 원인중의 하나라고 판단된다.

4. 요약 및 결론

한국 남해연안에서의 해수순환을 알아보기 위하여 수치모델을 이용하여 조석강제력에 의한 조류를 재현하였고, 개방경계를 통한 해수수송량을 이용하여 해류를 재현하였다. 조류모델의 검증결과에서 모델의 계산결과가 관측값과 비교적 유사하게 재현되었으므로 본 연구에서 사용한 조류모델로써 계산한 결과는 한국 남해연안에서의 조류현상을 잘 반영하고 있다고 판단된다.

조류모델의 결과, 동쪽의 개방경계 부근인 대한해협을 기준으로 하여 서향류가 최강일 때(Fig. 7)에는 제주해협과 대한해협을 통하여 해수가 남해로 대부분 유입되어 제주도와 대마도사이의 남쪽경계를 통해 외해로 유출되는 것으로 나타났으며, 동향류가 최강일 때(Fig. 8)에는 남쪽경계역에서 유입된 해수가 각각 제주해협과 대한해협을 통해 빠져나가는 것으로 조사되었다. 이와 같이 최강 동·서향류가 나타날 때 제주해

한국 남해안에서 2차원 해수순환모델

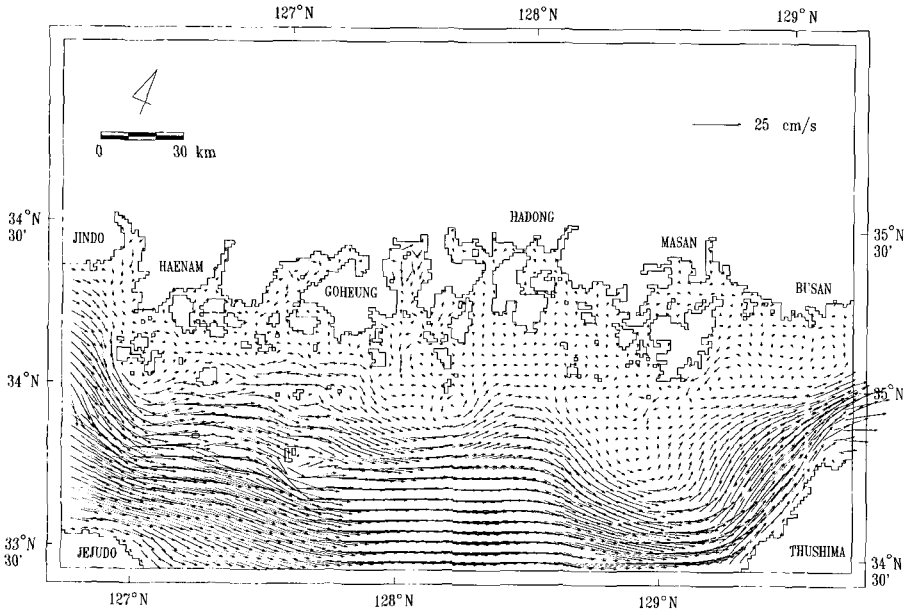


Fig. 9 Velocity distribution calculated by tidal residual currents and permanent currents.

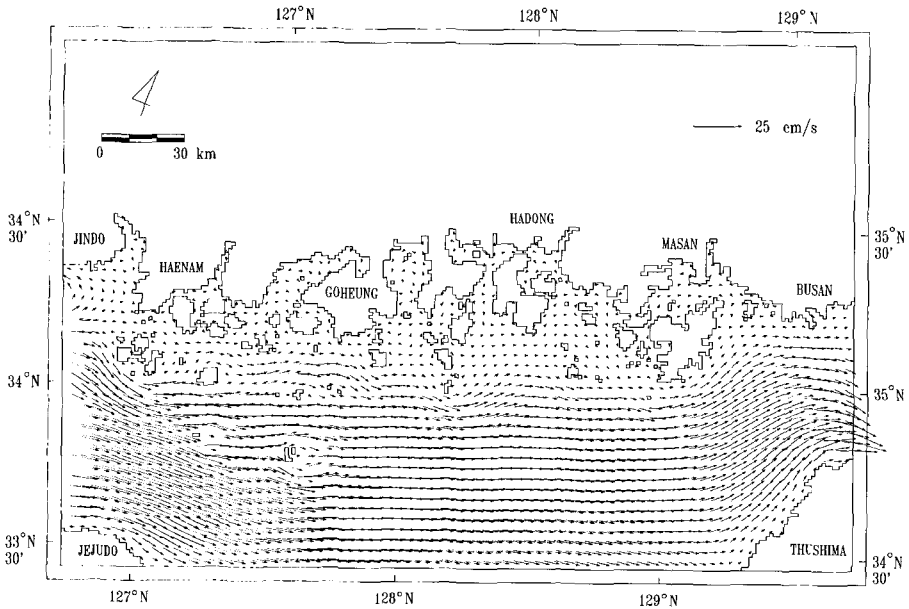


Fig. 10 Velocity distribution calculated by permanent currents simulated with constant depth.

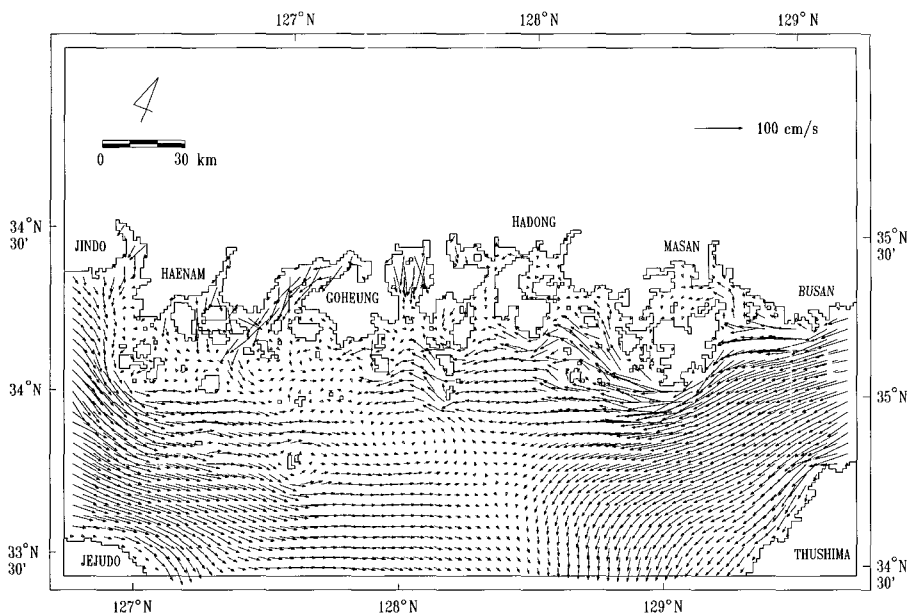


Fig. 11 Velocity distributions at the time of maximum westward flow by tides and inflows/outflows.

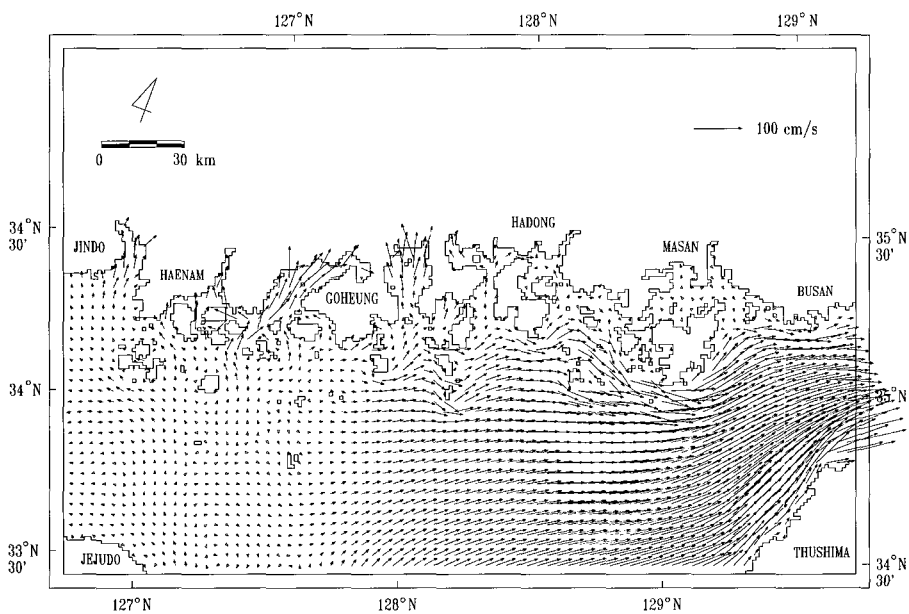


Fig. 12 Velocity distributions at the time of maximum eastward flow by tides and inflows/outflows.

협과 대한해협에서의 유속의 방향은 서로 반대로 나타났다. 제주해협에서의 최강동향류(Fig. 7)는 최강서향류(Fig. 8)보다 그 세기가 약 2배정도 더 크게 나타났다.

수치실험에 의하여 계산된 해류분포에서는 거제도 남측에 나타나는 반원형의 해류분포 나타났는데, 수심을 일정하게 적용하여 수치실험한 결과, 그 분포가 해저지형의 변화에 의해서 발생되는 것으로 밝혀졌다. 조류와 해류를 동시에 고려한 해수순환모델 결과, 제주해협에서는 남해로 유입되는 동향류가 우세한 반면에 남해에서 서해쪽으로 유출되는 서향류의 세기는 미약한 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 장기적인 관점에서의 물질교환을 고려할 때, 고흥연안의 해상 부유물질이 제주해협을 통하여 서해쪽으로 이동하기 어렵게 만드는 원인중의 하나라고 판단된다. 본 연구결과는 연구해역에서 적조 또는 유류 등 해상의 부유물질에 대한 거동예측에 있어서 중요한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 공영, 1971, "한국 남해연안 전선에 관한 연구", 한국해양학회지, 6(1), 25~36.
- [2] 김상현·노홍길, 1997, "제주해협의 해수유동 특성에 관한 연구", 한국수산학회지, 30(5), 759~770.
- [3] 김인옥·노홍길, 1994, "제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구", 한국수산학회지, 27(5), 515~528.
- [4] 김충기, 1998, "남해에서 조석과 해류에 의한 해수순환 및 물질이동의 수치모델 연구", 인하대학교 해양학과 석사학위논문, pp. 66.
- [5] 김충기·장경일·박경·석문식, 2000, "한국 남해의 해수순환 : 2차원 순압모델", 한국해양학회지, 5(4), 257~266.
- [6] 심문보, 1998, "대한해협 서수도의 해수수송량", 1998년 수로기술연보, 9~16.
- [7] 양성기, 1994, "한국 남해연안의 해표면 수온 분포와 전해전선의 변동 특성", 한국환경과학회지, 3, 111~128.
- [8] 장선덕·김차겸·이종섭, 1993, "진해만 조류의 현장관측 및 수리모형실험", 한국수산학회지, 26(4), 346~352.
- [9] 조양기·김구, 1994, "여름철 남해 저온수의 특성과 기원", 한국해양학회지, 29(4), 414~421.
- [10] 최병호·방인권·김경환, 1994, "대한해협 조류의 3차원분포", 한국해안·해양공학회지, 6, 421~438.
- [11] 한국해양연구소, 1987, "한국해협 종합해양자원도 작성연구(남해)", 한국해양연구소, BSPG 00046-136-7, pp. 357.
- [12] 한국해양연구소, 1989, "한국해협 종합해양자원도 작성연구(남해)", 한국해양연구소, BSPG 00091-251-7, pp. 555.
- [13] 한국해양연구소, 1996, "한반도 주변 조석 조화상수 자료집", 한국해양연구소, pp. 282.
- [14] 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.
- [15] Beardseely, R. C., R. Limeburner, K. kim and J. Candela, 1992, Lagrangian flow observations in the East China. Yellow and Japan Seas, *La mer*, 30, 297~314.
- [16] 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(2), 99~108.
- [17] Foreman, M.G.G., 1978, Manual for tidal currents analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Science, Patricia Bay, Sidney, BC, pp. 70.
- [18] Foreman, M.G.G., 1979, Tidal analysis based on high and low water observations. Pacific Marine Science Report 79-15, Institute of Ocean Science, Patricia Bay, Sidney, BC, pp. 39.
- [19] 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.
- [20] Isobe, A., S. Tawara, A. Kaneko and M. Kawano, 1994, Seasonal variability in the Tsushima Warm Current, Tsushima-Korea Strait. *Con. Shelf Res.*, 14(1), 23~35.
- [21] Odamaki, M., 1989, Tides and tidal currents in the Tsushima Strait. *J. Oceanogr.*

Soc. Japan, 45, 65~82.

[22] 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(1), 13~20.

[23] 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.