Article

대한해협 주변 내부조석의 계절적 변동성: 3차원 고해상도 모델 연구

이현정¹ · 이호진^{2*} · 박재훈^{2,3} · 하호경^{1,4}

¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26
²한국해양대학교 해양과학기술전문대학원
(606-791) 부산광역시 영도구 태종로 72
³한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787
⁴인하대학교 자연과학대학 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 인하로 100

Seasonal Variability of Internal Tides around the Korea Strait: 3-D High-resolution Model Simulation

Hyun Jung Lee¹, Ho Jin Lee^{2*}, Jae-Hun Park^{2,3}, and Ho Kyung Ha^{1,4}

¹*Korea Polar Research Institute, KIOST
Incheon 406-840, Korea*

²*School of Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University
Busan 606-791, Korea*

³*Ocean Circulation and Climate Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea*

⁴*Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Inha University
Incheon 402-751, Korea*

Abstract : This study investigates spatial and temporal variations in the generation and propagation of internal tides around the Korea Strait using a three-dimensional high resolution model (Regional Ocean Modeling System; ROMS). The model results were verified through comparison with in-situ current measurements from an array of 12 acoustic Doppler current profilers (ADCPs) deployed in the Korea Strait. Fluxes and distributions of internal tidal energy were calculated using simulation results gathered in February and August. Our analyses reveal that energetic semidiurnal internal tides are generated in a region around the Korea Strait shelf break (35.5°N, 130°~130.5°E), where the strong cross-slope semidiurnal barotropic tidal currents interact with a sudden topographical change. The semidiurnal internal tidal energy generated in summer displays values about twice as large as values in winter. Propagation of semidiurnal internal tides also reveals seasonal variability. In February, most of the semidiurnal internal tides propagate only into the open basin of the East Sea due to weak stratification in the Korea Strait, which inhibits their southwestward propagation. In August, they propagate southwestward to 35.2°N along the western channel of the Korea Strait because of strong stratification. In addition, semidiurnal internal tides generated in a region west of Tsushima Island are found to propagate to the coast of Busan. This can be explained by the intensified stratification due to the strong intrusion of bottom cold water in the western channel of the Korea Strait during summer.

Key words : internal tide, Korea Strait, stratification, ROMS, ADCP, South Sea, bottom cold water

*Corresponding author. E-mail : hjlee@kmou.ac.kr

1. 서 론

남해는 서쪽으로 황해와 동중국해에 연결되어 있고, 동쪽으로는 동해와 연결되어 있어 서로 다른 수괴의 상호 교환이 있는 지역으로 조류 및 해류 등의 복합적 작용에 의한 해수 유동이 존재하는 해역이다(김 등 2000). 지형적 특징은 연안을 따라 수심 50 m 이하의 완만한 경사를 가지며 제주도 연안과 대마도 연안에서 100 m까지 다소 급한 수심 변화를 보인다. 대한해협 서수도에서는 200 m 이상의 깊은 골(trough)이 해협과 평행하게 발달되어 있으며 골을 중심으로 한국 연안측은 경사가 완만하며 대마도 쪽으로는 경사가 비교적 급하다.

남해의 해수 유동을 일으키는 가장 큰 기작 중의 하나인 조석은 반일주조의 경우 최고 0.8 m s^{-1} 정도의 강한 조류(Odamaki 1989)를 만든다. 또 다른 유동은 고온 고염의 대마난류로 제주연안을 시계방향으로 돌아 남해로 유입되거나 제주도와 대마도 사이를 통해 남해로 유입되고 대한해협을 통해 동해로 유출된다(김 등 1991; Chang et al. 1997; Lie and Cho 1997). 또한 양자강 등 황해나 동중국해에서 기원한 저염의 해수도 제주해협을 통해 남해로 유입되기도 한다(김과 노 1994; 조와 김 1994).

내부조석은 성층화된 해양과 대륙붕단(shelf break), 해산과 같이 수심이 급격히 변하는 해저지형에서 혼하게 나타난다(Niwa and Hibiya 2001). 내부조석은 표면 조석과는 다르게 깊이별로 다른 방향의 흐름을 가지고, 대양에서 약 100 km 정도의 상대적으로 짧은 파장을 가진다. 성층화된 해양에서 발생하는 내부조석파는 밀도 경계면의 상하 운동을 유발하여 혼합층 두께의 단주기 변화에 큰 영향을 미친다. 따라서 남해에서의 내부조석파의 존재 여부는 남해 연안에서의 용승 및 해수 혼합과 관련하여 연구되어야 할 중요한 주제라 할 수 있다.

Park and Watts (2006)는 내부조석이 대한해협 북단 약 북위 35.5° , 동경 $130\sim 131^\circ$ 부근 해역에서 주로 제한되어 생성되며 동해로 전파된다고 보고하였지만 관측 자료의 제한으로 인해 대한해협으로 전파하는 내부조석에 관한 보고는 없었다. 기존에 수행된 남해를 포함한 해역에 대한 수치모델 연구들(Fang 1986; 최 등 1994)은 조석 및 조류의 재현에 초점을 두었다. Book et al. (2004)은 Griffin and Thompson (1996)이 개발한 순압(barotropic) 자료동화 2차원 조석 모델을 이용해 남해 및 대한해협의 조류와 조위를 계산하였다. 하지만 경압(baroclinic)성분은 고려하지 않고 순압성분만을 고려하였기 때문에 내부조석의 존재를 확인할 수 없었다. Niwa and Hibiya (2001)는 $1/12^\circ$ 해상도의 3차원 모델을 이용하여 태평양 전체의 내부조석 에너지를 계산하였고, 서태평양이 동태평양보다 2~3배 더 크게 나타남을 확인하였다. Niwa and Hibiya (2004)는 고

해상도 모델을 이용하여 동중국해의 내부조석 생성의 공간 분포 및 에너지 플럭스를 계산하였다. 하지만 그들은 동중국해의 주요한 해수 유동인 쿠로시오 해류를 포함시키지 않았다.

본 연구에서는 장기계류된 음향도플러 유속계(acoustic Doppler current profiler, ADCP) 자료를 통해 남해와 대한해협에 내부조석이 발생함을 확인하고, 해류와 조류를 모두 포함시킨 3차원 고해상도 모델을 사용하여 생성되는 내부조석 에너지의 시·공간적 분포 특성을 규명하고자 한다.

2. 자료 및 방법

관측 자료

본 연구에서는 모델이 재현한 조석의 검증을 위하여 미국 해군 연구소(U.S Naval Research Laboratory, NRL)에서 “Link ages of Asian Marginal Seas(LINKS)” 프로그램의 일환으로 실시한 대한해협 정점관측으로부터 얻어진 자료(Teague et al. 2006)를 이용하였다. NRL은 대한해협을 가로지르는 2개의 측선을 따라 13개 정점을 선정하여 해저면 계류 ADCP를 이용하여 해류와 해수압을 장기간 측정하였다(Fig. 1). N2~N6와 S1~S6 정점에서는 1999년 10월 회수 및 재 투입을 통해 1999년 5월부터 2000년 3월까지 약 10개월의 연속관측이 수행되었다. N1 정점에서는 처음 5개월간 자료 획득에 실패하였고, C1 정점은 1999년 10월에 추가로 설치된 정점으로 이 두 정점에서는 1999년 10월부터 2000년 3월까지 약 5개월간의 연속관측이 수행되었다. 측정된 유속의 연직 해상도는 1~4 m 간격이고 시간 간격은 15분~1시간이다(Table 1).

3차원 해양 순환 모델

본 연구에 사용된 3차원 해양 순환 모델은 Regional Ocean Modeling System(ROMS - version 3.4)이다. 모델 영역은 남해와 대한해협, 동해 남부해역을 포함하는 북위 $33.3\sim 36.5^\circ$, 동경 $126.9\sim 132^\circ$ 로 설정하였다(Fig. 1). 수평적으로 346×551 의 격자로 설정하였고 격자 간격은 $1/108^\circ$ 로 약 1 km의 공간 해상도를 가진다. 수직적으로는 S-좌표계(stretched terrain-following coordinate)를 사용하며 총 20개 층으로 설정하였다. 모델에 입력된 수심자료는 30초 간격의 한국해양과학기술원 수심자료를 이용하였다(서 2008). 격자 간 수심이 급격히 변화하는 해역에서는 변화율을 줄이기 위해 수심 평활화(smoothing) 과정을 거쳤으며, 최소 수심은 2 m로 고정하였다. 수직 확산계수 계산은 남해와 같은 천해역에 적합한 Mellor-Yamada 난류확산 모형(Mellor and Yamada 1982)을 이용하여 계산하였다. 난류와동 점성계수는 모델의 격자 크기와 수평적

Fig. 1. Model domain and bathymetry. Black squares indicate ADCP mooring locations. Lines A and B indicate sections for Figs. 3 and 8, respectively. Depths are in meters (contour intervals are 20 and 500 m for solid and dashed curves, respectively)

Table 1. ADCP summary

Mooring stations	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (m)	Time			Bin size (m)
				Start day	End day	Interval (h)	
S1	34.32	127.90	59	130	289	0.50	2
				290	437	0.50	1
S2	34.13	128.12	89	129	289	0.50	2
				290	438	0.50	2
S3	33.93	128.34	113	129	288	0.50	4
				290	438	0.50	4
S4	33.74	128.56	107	128	287	0.50	4
				288	438	0.50	4
S5	33.54	128.78	152	128	287	0.25	4
S6	33.35	129.00	115	128	286	0.50	4
				288	438	0.50	4
C1	34.95	129.26	103	292	444	0.50	2
N1	35.31	129.60	119	293	440	0.50	4
N2	35.20	129.67	142	125	282	0.25	2
				285	441	0.50	4
N3	35.01	129.99	132	126	283	0.25	4
				285	441	0.50	4
N4	34.84	130.21	127	126	283	0.50	4
				285	441	0.50	4
N5	34.67	130.43	130	127	284	0.50	4
				285	442	0.50	4
N6	34.50	130.65	118	127	284	0.50	4
				286	442	0.50	4

인 전단속도가 비례하는 Smagorinsky (1963)의 수식을 이용하여 계산하였다. 해표면에서의 열속(heat flux)은 Fairall et al. (1996)의 Bulk 식에 의해 계산된다.

개방 경계 조건으로 해수면 변위는 Chapman (1985) 조건을, 수심평균된 2차원 유속은 Flather (1976) 방사(radiation) 경계조건을 사용하였다. 3차원 유속, 수온 및 염분은 Marchesiello et al. (2001)의 방사경계조건을 사용하여 계산하였다. 수온과 염분의 경우에는 방사경계조건과 더불어 관측 값을 복원 입력(nudging)하는 방법으로 모델 결과를 보정하며 복원시간 간격은 1일이다. 모델 개방 경계에서의 유속, 수온 및 염분은 큐슈대학의 1/15° 해상도의 실시간 동해 모델링 결과 중 1999년부터 2000년까지의 자료를 월 평균하여 사용하였다. 해표면에서의 대기 강제력은 1/2° 간격의 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)에서 제공하는 1999~2008년 예보자료를 12시간 간격으로 내삽하여 사용하였다. 남해연안에서 염분 분포에 영향을 미치는 영산강과 낙동강의 유입은 국가수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)의 1999년부터 2008년까지 10년 월평균 자료를 이용하여 고려하였다. 각 강물의 수온은 이 (2007)의 관측 값을 사용하였고, 염분은 연중 0으로 고정하였다. 모델에서 이용된 조석자료는 오레곤대학에서 제공한 1/12° 간격의 조석 모델결과(OTIS Regional Tidal Solutions) 자료를 모델영역에 맞게 내삽하였다. 이 모델에 쓰인 자료에는 M_2 , S_2 , O_1 , K_1 , N_2 , K_2 , P_1 , Q_1 의 8대 분조와 장주기 분조인 M_m , M_f 가 포함되어 있다. 모델은 안정화를 위해 월평균된 기후 자료를 사용하여 5년간 시간 적분 하였으며, 이 후 1999년~2000년까지 2년간 실시간 과거재현(hindcast) 모델링을 수행하였다.

3. 결 과

모델 검증

모델결과를 검증하기 위해 모델에 의해 계산된 조석과 조류를 관측 값과 비교하였다. 관측된 13개 정점 중 1999년 10월부터 관측된 C1 정점을 제외한 12개 정점과 동일한 지점의 조위 값을 조화 분해하여 주요 4대 분조의 진폭과 위상을 비교하였다(Table 2, 3). 분석된 진폭의 단위는 cm 이고, 위상은 그리니치 자오선을 기준으로 분석하였다. M_2 분조의 경우 S1~S6 정점의 진폭이 77.64~93.37 cm의 범위로 N1~N6 정점의 진폭 16.12~24.85 cm의 범위보다 약 4배 더 크게 나타났으며 S_2 분조의 경우도 S 정점이 N 정점보다 약 4배 더 크게 나타났다. 관측 값과 비교했을 때, M_2 분조와 S_2 분조의 경우 각각 모델이 관측에 비해 평균 3.47 cm, 1.80 cm 더 높게 모사하였다. 위상의 경우 M_2 분조는 모델과 관측의 차이가 평균 1.70°이며 S_2 분조는 평균 2.47° 내외로 나타났다. K_1 분조의 경우 S1~S6 정점의 진폭이 16.67~18.68 cm의 범위로 N1~N6 정점의 진폭 0.80~7.91 cm의 범위보다 S1~S6 정점의 진폭이 약 2배 더 크게 나타났다. O_1 분조의 경우 역시 S1~S6 정점의 진폭이 약 2배 더 크게 나타났다. 관측 값과 비교했을 때, 모델이 관측에 비해 각각 평균 0.73 cm, 0.87 cm 더 낮게 모사하였다. 위상의 경우에는 K_1 분조는 평균 7.92°, O_1 분조는 평균 9.48°의 차이를 나타냈다.

Fig. 2는 모델에 의해 계산된 조류와 ADCP계류 관측결과(Teague et al. 2001)를 비교한 그림이다. 총 13개의 정점 중 Teague et al. (2001)에서 제시한 11개의 정점에서의 1999년 5월부터 10월까지 유속 시계열 자료를 조화 분석하여 비교하였다. 모델에 의해 재현된 주요 4대 분조의 조

Table 2. Summary of observed (Obs.) and simulated (Model) tidal amplitudes (in cm), and their differences (diff.) for the major four tidal constituents (M_2 , S_2 , K_1 , and O_1) at 12 mooring stations (S1~S6 and N1~N6)

Mooring stations	M_2			S_2			K_1			O_1		
	Model	Obs.	Diff.	Model	Obs.	Diff.	Model	Obs.	Diff.	Model	Obs.	Diff.
S1	93.37	86.16	7.21	43.78	40.14	3.64	18.44	19.88	-1.44	12.73	14.28	-1.55
S2	86.62	80.09	6.53	40.82	37.52	3.30	17.21	18.41	-1.20	12.10	13.34	-1.24
S3	82.13	76.09	6.04	38.87	35.81	3.06	16.67	17.86	-1.19	11.97	13.27	-1.30
S4	79.28	73.87	5.41	37.57	34.79	2.78	16.73	17.79	-1.06	12.43	13.57	-1.14
S5	77.84	72.11	5.73	36.88	33.04	3.84	17.45	18.60	-1.15	13.41	14.78	-1.37
S6	77.64	72.85	4.79	36.73	34.27	2.46	18.68	19.95	-1.27	14.84	16.10	-1.26
N1	16.12	16.28	-0.16	8.14	9.22	-1.08	1.36	1.34	0.02	2.09	2.21	-0.12
N2	18.43	17.08	1.35	9.39	9.25	0.14	0.80	0.98	-0.18	2.05	2.34	-0.29
N3	18.88	18.28	0.60	9.81	9.96	-0.15	2.62	2.60	0.02	3.48	3.67	-0.19
N4	20.82	19.86	0.96	10.74	10.70	0.04	4.11	4.33	-0.22	4.74	5.14	-0.40
N5	22.76	21.32	1.44	11.63	11.00	0.63	5.86	6.38	-0.52	6.29	6.91	-0.62
N6	24.85	23.43	1.42	12.72	12.29	0.43	7.91	8.43	-0.52	8.22	9.12	-0.90

Table 3. Same as Table 2 except for tidal phases (in degrees). The phases are the Greenwich phase lags according to the convention given by Foreman (1977)

Mooring stations	M_2			S_2			K_1			O_1		
	Model	Obs.	Diff.	Model	Obs.	Diff.	Model	Obs.	Diff.	Model	Obs.	Diff.
S1	0.37	1.80	-1.43	24.94	26.10	-1.16	51.64	58.50	-6.86	26.35	34.70	-8.35
S2	359.78	0.90	-1.12	24.20	25.20	-1.00	58.99	65.80	-6.81	35.67	44.10	-8.43
S3	358.98	0.10	-1.12	23.36	24.20	-0.84	66.24	73.30	-7.06	44.40	53.40	-9.00
S4	358.21	359.00	-0.79	22.53	23.30	-0.77	73.37	80.20	-6.83	52.53	61.30	-8.77
S5	357.59	357.40	0.19	21.82	21.50	0.32	80.28	87.50	-7.22	59.85	68.70	-8.85
S6	356.92	358.00	-1.08	21.02	22.20	-1.18	86.51	93.40	-6.89	65.85	74.70	-8.85
N1	334.84	333.00	1.84	5.34	4.00	1.34	249.18	266.70	-17.52	180.71	194.20	-13.49
N2	342.77	344.00	-1.23	11.60	12.70	-1.10	199.50	206.50	-7.00	159.91	171.10	-11.19
N3	0.95	357.80	-1.25	28.24	23.70	4.54	156.65	165.60	-8.95	140.23	150.80	-10.57
N4	9.86	7.20	2.66	35.90	31.20	4.70	153.19	160.50	-7.31	134.66	144.10	-9.44
N5	19.03	14.40	4.63	43.63	36.90	6.73	155.90	162.30	-6.40	134.91	144.00	-9.09
N6	27.01	23.90	3.11	50.92	45.00	5.92	160.49	166.70	-6.21	137.12	144.90	-7.78

Fig. 2. Tidal ellipses for the four major tidal constituents (M_2 , S_2 , K_1 , and O_1) at 11 ADCP mooring stations. Blue and red ellipses indicate model results and observations, respectively

류타원은 S6 정점을 제외하고 거의 모든 정점에서 관측과 거의 일치하였다. M_2 분조의 경우 S1 정점에서 장축의 기울기가 약 6° , 장축이 약 2 cm s^{-1} 의 차이를 보였다. 나머

지 정점의 경우 M_2 , S_2 분조의 경우는 관측결과가 모델결과보다 약간 크게 나타났지만 장축의 오차는 1 cm s^{-1} 이하이고 단축의 오차도 0.5 cm s^{-1} 이하이다. 장축의 기울

Fig. 3. Temperature section along line 208 of NFRDI (line A in Fig. 1) from observation in (a) February and (c) August 1998 and from model simulation in (b) February and (d) August 1999. Isotherm interval is 2°C

기의 차이도 대부분 2° 이내로 전반적으로 모델이 연구 대
상해역의 조류를 잘 재현한 것으로 판단된다.

다음으로 모델이 계절별 성층을 잘 재현하는가를 판단
하기 위하여 국립수산과학원이 대한해협 동부에 위치한
208 정선에서 관측한 수온 자료와 모델이 재현한 수온의
연직 분포를 비교하였다(Fig. 1에서의 line A). 1999년 관
측 자료의 부재로 인해 관측 수온은 1998년 2월 6일과
8월 19일 자료를 사용하여 모델로 계산된 2월과 8월의 월
평균 수온과 비교하였다(Fig. 3). 관측 자료의 여름철 수온
자료를 살펴보면 동경 129.5~130° 부근의 바닥에서 대한
해협 저층냉수(<10°C)가 나타나고, 이것은 208 정선의 동
쪽보다 서쪽에서 강한 성층이 형성된 것을 볼 수 있다. 모
델결과에서도 208 정선의 서쪽 부근의 바닥을 따라 대한
해협 저층냉수가 형성되며, 그로 인해 강한 성층이 발생하
였다. 겨울철은 연직 혼합이 활발하게 일어나 모델과 관측
모두 수온이 거의 일정하여 성층이 나타나지 않지만, 관측
자료와 모델 결과 모두 바닥 근처에서 약 10°C 내외의 냉
수가 존재한다. 전반적으로 모델이 내부조석 생성에 있어
중요한 역할을 하는 수온 분포를 잘 재현하는 것으로 판
단된다.

내부조석의 생성 및 전파

모델 검증 결과 본 모델이 연구영역의 조류와 성층을
잘 재현하고 있어 모델결과를 이용하여 연구영역에서 생
성되는 내부조석 에너지의 시·공간적 분포 특성을 정량
적으로 파악하였다. 내부조석 에너지의 분포를 계산하기
위해서 외부 조석(barotropic tide)에서 내부조석 에너지로
변환되는 양(barotropic-to-baroclinic energy conversion
rate, E_{bt2bc})을 Niwa and Hibiya (2004)에서 제시된 다음의
식으로 계산한다.

$$E_{bt2bc} = \frac{1}{T} \int_0^t (g \int_{-H}^{\eta} \rho' w_{bt} dz) dt \quad (1)$$

여기서, ρ' 는 시간 평균을 뺀 밀도의 변화량, T 는 평균된
기간으로 본 연구에서는 72시간이다. w_{bt} 는 순압 흐름에
의한 직교 좌표계 상의 연직속도로 다음과 같이 계산된다.

$$w_{bc} = \bar{U} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \bar{V} \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \quad (2)$$

σ 는 바닥에서 -1이고 해표면에서 0인 S-좌표계를 나타내
고 $\bar{U}$ 와 $\bar{V}$ 는 수심평균된 유속이다. 생성된 내부조석의

Fig. 4. Spatial distribution of depth-integrated barotropic-to-baroclinic energy conversion rate and baroclinic energy flux of diurnal tides in (a) February and (b) August. The baroclinic energy flux was averaged over last three days of simulation

전파는 수심적분된 경압성분의 에너지 플럭스(E_{bc})를 이용하여 계산한다(Niwa and Hibiya 2004).

$$E_{bc} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_{-H}^{\eta} \vec{U} P' dz \right) dt \quad (3)$$

여기서, P' 은 시간 평균을 뺀 압력의 변화량, $\vec{U}$ 는 경압 속도 성분이다. T 는 평균된 기간으로 72시간이다.

Fig. 4는 일주기 외부조석의 내부조석의 변환량(E_{bt2bc})과 에너지 플럭스 계산 결과이다. 색은 외부조석으로부터 내부조석으로의 에너지 변환량을, 화살표는 에너지 플럭스를 각각 나타낸다. 내부조석은 북위 35.5°, 동경 130~130.5° 부근 대한해협 대륙붕단역의 국한된 지역에서 생성된다. 모델 영역에서 적분된 E_{bt2bc} 의 총량은 2월에 약 0.17 GW이고, 8월에 약 0.09 GW이다. 그러나 발생한 대

부분의 내부조석은 동해나 남해로 유입되지 못하고 발생해역인 대륙붕단역 부근에 국한되어 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 대한해협 주변해역에서의 관성 주기가 일주기 보다 작기 때문에 내부조석파가 전파되지 못하고 발생해역 부근에 갇혀 있기 때문이다(Baines 1982; Park and Watts 2006). 반면 반일주기 조석의 경우에는 일주기와 달리 관성주기 보다 짧기 때문에 자유롭게 동해 내부로 전파가 가능하다.

Fig. 5는 반일주기 조석 성분의 E_{bt2bc} 와 에너지 플럭스를 계산한 결과이다. 내부조석 에너지가 생성된 지역은 북위 35.5~35.7°, 동경 129.5~131° 사이로 급격한 지형변화가 존재하는 대륙붕단을 따라 넓게 위치한다. 내부조석 에너지가 생성된 해역은 Park and Watts (2006)의 관측 결과와도 일치한다. 모델 영역에서 계산된 E_{bt2bc} 의 총량은 2월에 약 0.24 GW이고 8월에 약 0.50 GW로 일주기에 비해 약 2~5배 더 크다. 또한 8월에는 대륙붕단역외에도 깊은 골 지형이 존재하는 대한해협 서수도 부근에서도 내부조석 에너지가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2월에는 서수도 골에서의 내부조석 에너지가 존재하지 않는다.

에너지의 플럭스 또한 계절에 따라 큰 차이를 나타낸다. 2월의 경우 동해 쪽으로 전파되는 최대 에너지 플럭스는 1 kW m^{-2} 에 달하고 평균 0.5 kW m^{-2} 이다. 반면에 대한해협 쪽으로 전파되는 에너지 플럭스는 미약하다. 8월의 경우 동해 쪽으로 전파되는 최대 에너지 플럭스는 2 kW m^{-2} 에 달하고 평균 1 kW m^{-2} 로 내부조석 생성에 비례하여 에너지 플럭스도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 대한해협으로 에너지 전파도 다소 증가하여 최대 북위 35.2°까지 전파하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 대한해협 서수도 부근의 내부조석 에너지 플럭스는 대륙붕단역에서 발생한 것이 아니라 서수도의 깊은 골에서 발생한 내부조석이 전파하는 것으로 보인다. 서수도 깊은 골에서 생성된 내부조석 에너지가 부산 연안 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있다.

Baines (1982)는 M_2 내부조석과 생성에 미치는 주요 외력 요인으로 성층과 조석의 크기와 더불어 조류의 방향을 제시하였다. 즉, 조류의 방향이 등수심선에 수직이 될수록 내부조석과 생성이 최대가 된다. Fig. 6은 모델이 계산한 반일주기 성분의 조류 타원을 나타낸다. 내부조석 에너지가 크게 발생하는 대륙붕단역 주변에서는 M_2 , S_2 조류타원 모두 주축 방향이 등수심선과 수직이 되는 것을 확인할 수 있다. 특히 내부조석의 주 생성 해역인 동경 129.5~131° 부근에서 M_2 성분 조류 타원의 주축 성분이 상대적으로 더 크고 등수심선과 수직이 된다.

모델에 계산된 내부조석과 조류 관측 결과를 비교하기 위해 1999년 5월부터 2000년 3월까지의 ADCP 관측 자

Fig. 5. Same as Fig. 4 except for semidiurnal tides

료 중 여름과 겨울철을 대표하는 1999년 8월과 2000년 2월 유속 값의 깊이 별로 조화 분해하여 연직 구조를 서로 비교하였다. Kurapov et al. (2003)은 경압성분만을 고려하기 위해 각 깊이 별 유속에서 수심평균 유속을 제거하여 조화분해하였다. 본 연구에서는 관측과 동일한 지점에서의 모델 결과를 동일한 방법으로 분석하여 내부조석 존재 여부를 살펴보았다. Fig. 5에 따르면 대륙붕단역에서 발생한 내부조석은 8월에 북위 35.2°까지 유입되는 것으로 보아 NRL의 ADCP 관측정점 중 N1~N6 정점과 C1 정점까지 영향을 줄 수 있을 것으로 추정되어 이 정점들에서 내부조석 존재 여부를 분석하였다.

Fig. 7은 여름과 겨울철을 대표하는 1999년 8월과 2000년 2월 유속 값을 수심평균 유속을 제거하여 깊이별로 조화 분해하여 구한 조류 타원이다. 관측과 모델을 비교한 결과 겨울철에 비해 성층이 강화되는 여름철에 내부조석의 특징이 더 뚜렷하게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 2월의 경우에는 관측과 모델 모두 상하층 조류타원의

크기 차이가 거의 없는 분포를 보여준다. 이는 겨울철에 관측 정점으로 내부조석파가 유입되지 않은 결과로 판단된다.

8월 관측의 경우에는 N2 정점에서 상하층의 조류타원 분포가 경압성분의 내부조석 특징을 나타내고 있는 반면에 모델에서는 N3 정점에서 뚜렷한 경압성분을 보여준다. 즉, 상층에서 조류타원이 가장 강하게 나타나고 점차 감소하며 노드 점(약 60 m)을 지나 다시 저층으로 가면서 강해지는 특징을 보인다(Fig. 7c~7d).

또한 동일기간에 관측 값은 존재하지 않지만 C1 정점에서 노드 점을 가지는 뚜렷한 내부조석 특징이 8월에 재현되었다. 이 정점에서의 내부조석은 Fig. 5에서 확인한 바와 같이 대한해협 서수도 깊은 골에서 발생한 내부조석이 전파된 것으로 해석된다. Takikawa et al. (2013)은 대한해협 서수도 깊은 골 부근에서 내부조석파의 발생을 보고하였다. 6월 하순경에 관측된 이 내부조석은 대한해협 저층냉수의 유입에 의해 생성된 130 m 깊이 근처의 수온

Fig. 6. Current ellipses for barotropic (a) M_2 , and (b) S_2 tides. Contours (black in the upper panels and blue in the lower panels) indicate depths with 20 m interval

약층이 약 20 m 크기로 연직 진동하는 특성을 보였다. 모델에서 8월에 재현된 대한해협 서수도 깊은 골에서의 내부조석 또한 대한해협 저층냉수의 유입(Fig. 3)에 따른 강한 성층의 발달로 인해 발생하는 것으로 Takikawa et al. (2013)에 의해 관측된 결과와 잘 일치하는 것으로 보인다.

4. 토 의

모델 계산 결과 대한해협의 대륙붕단역에서 생성된 내부조석 에너지는 동해 내부로의 전파(Park and Watts 2006) 뿐 만 아니라 대한해협 북위 35.2°까지 전파되는 것으로 나타났으며 상대적으로 성층이 강하게 형성되는 8월의 경우에 대한 해협으로의 유입이 상대적으로 우세해지는 것을 확인하였다. 또한 대한 해협 서수도에서는 또 다른 내부조석의 생성지가 확인되었는데, 상대적으로 수심의 변화가 크고 200 m 이상의 깊은 골 지형의 사면에서 내부조석이 발생하여 우리나라 연안 쪽으로 에너지가 전

Fig. 7. M_2 tidal current ellipses at 7 ADCP mooring locations (C1, N1~N6). The depth-averaged M_2 tidal current ellipses are shown above the surface and the other ellipses below the surface represent deviations from the depth average at each site. Upper two and lower two panels are estimated from (a and c) observation and (b and d) simulation results in February and August, respectively

파되는 것으로 나타났다. 대한해협 서수도에서의 내부조석 생성은 8월에 우세하게 나타나고 2월에도 아주 미약하지만 여전히 존재한다. 서수도의 깊은 골에서 관측된 ADCP 정점인 C1 정점에서의 조류 타원 분석결과를 보면 2월 관측과 모델이 유사한 패턴을 보여주는데, 80~90 m 사이에서 조류 타원의 노드가 존재한다. 8월의 모델 계산 결과는 보다 분명한 내부조석의 특징을 보여주는데, 2월과 마찬가지로 80 m 부근에서 조류 타원의 노드가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

대한해협 서수도의 깊은 골에서 발생하는 내부조석은 이 해역으로 유입되는 저층 냉수에 의해 영향을 받을 것

Fig. 8. Temperature section along line B in (a) February and (b) August. Location of line B is shown in Fig. 1

으로 판단된다. Fig. 8은 내부조석 에너지 생성지역에서 Fig. 1의 B 측선을 따라 그린 연직 수온 단면도이다. 2월의 경우에는 대한해협的大部分이 14°C 내외의 균일한 수온을 보이지만 깊은 골 지형 부근에서 10°C 이하의 냉수가 존재하는 것을 확인할 수 있다. Teague et al. (2002)에 따르면 1999년 12월에 유입되기 시작한 저층냉수가 2월까지 영향을 준 것으로 보고되었다.

8월에는 20 m 깊이에서 22°C 등수온선을 경계로 계절 수온약층이 발달하는 것을 확인할 수 있고, 2월과 마찬가지로 100 m 깊이 부근에서 12°C 등수온선을 경계로 저층 냉수 존재에 따른 강한 성층이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 C1 정점에서 모델에 의해 재현된 내부조석은 대한해협 서수도 골에 존재하는 저층냉수에 의한 성층화와 지형에 의해 발생했을 가능성이 크다. 또한 북위 35.5~35.7°, 동경 129.5~131° 사이의 대륙붕단역에서 발생하는 내부조석 에너지는 2월에 경우에는 대부분 동해 내

부로만 전파되고, 8월에 경우에는 N 정선의 일부 정점까지는 영향을 미치지만(관측의 경우에는 N2, 모델의 경우에는 N3) 더 이상 대한해협 내로 유입되지 않는 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 해류와 조류를 모두 포함시킨 3차원 고 해상도 모델을 사용하여 대한해협 부근에서 생성되는 내부조석 에너지의 시·공간적 분포를 파악하였다. 수치실험 결과 여름철이 겨울철보다 약 2배 이상의 내부조석 에너지가 생성되었고 수심이 급격히 변하고 순압조석이 우세하며 조류 타원의 주축방향이 등수심선을 가로지르는 해역에서 내부조석이 효과적으로 생성되었다.

모델 영역에서 북위 35.5° 이남은 수심 200 m 이하의 지역으로 계절에 따라 성층화 정도가 달라져 생성된 내부조석 에너지가 남해 연안으로 전파되는 범위에 영향을 미쳤다. 대부분의 내부조석은 Park and Watts (2006)에서 제시한 북위 35.5°, 동경 129.5~131° 사이에서 나타났다. 이곳에서 생성된 내부조석 에너지는 성층이 약화되는 2월의 경우 생성된 에너지의 대부분이 동해 쪽으로 전파되고 남해연안으로의 전파는 제한되는 반면, 성층이 강화되는 8월의 경우 북위 35.2°까지 일부 에너지가 전파되지만 대한해협 서수도까지는 영향을 미치지 못한다.

반면 대마도 서쪽 깊은 골에서는 또 다른 내부조석이 생성되었는데 생성되는 내부조석 에너지는 성층이 강화되는 8월의 경우 훨씬 증가하였으며 골과 수직한 방향으로 전파되어 남해 연안까지 영향을 준다. 성층이 약화되는 2월의 경우 여름철에 생성되는 내부조석 에너지에 비해 적은 양이 생성되지만 대한해협 저층냉수의 유입으로 지역적 성층화가 강화되어 여전히 내부조석이 생성되었다. 그러나 대한해협 서수도의 깊은 골에서 발생하는 내부조석의 경우에는 향후 추가 관측과 보다 정밀한 격자망의 모델링을 통해 존재 여부 및 발생 기작을 확인해야 할 것으로 사료된다. 만약 대한해협 서수도에서 내부조석이 발생하여 그 에너지가 남해 연안까지 영향을 미친다면 남해 연안 용승 및 해양 혼합 등의 현상과 관련하여 의미 있는 연구가 될 것으로 생각된다.

사 사

이 원고를 심사해주신 심사자들에게 고마움을 전합니다. 이 연구는 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(“CO2 해양지중저장 기술개발” 및 “위성기반 한반도 주변해역 해양 탄소 추정모델 개발”).

참고문헌

- 김 구, 노홍길, 이상호 (1991) 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지 「바다」 **26**:262-277
- 김인옥, 노홍길 (1994) 제주도 주변해역에 출현하는 중국 대륙연안수에 관한 연구. 한국수산학회지 **27**:515-528
- 김충기, 장경일, 박경, 석문식 (2000) 한국 남해의 해수순환: 2차원 순압모델. 한국해양학회지 「바다」 **5**(4):257-226
- 서승남 (2008) 한국 주변해역 30초 격자 수심: KorBathy30s. 한국해양안 · 해양공학학회지 **20**(1):110-120
- 이길하 (2007) 우리나라 연안 기온과 수온의 비선형 상관관계 분석. 한국해양안 · 해양공학학회지 **19**(2):128-135
- 조양기, 김구 (1994) 여름철 남해 저온수의 특성과 기원. 한국해양학회지 「바다」 **29**(4):414-421
- 최병호, 방인권, 김경환 (1994) 대한해협조류의 3차원분포. 한국해양안 · 해양공학학회지 **6**:421-438
- Chapman DC (1985) Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. J Phys Oceanogr **15**:1060-1075
- Chang KI, Kim CK, Lee SW, Shim TB (1997) Barotropic circulation of the South Sea-preliminary model results. Ocean Res **19**:139-152
- Baines PG (1982) On internal tide generation models. Deep-Sea Res **29**:307-338
- Book JW, Pistek P, Perkins H, Thompson KR, Teague WJ, Jacobs GA, Suk MS, Chang KI, Lee JC, Choi BH (2004) Data Assimilation Modeling of the Barotropic Tides in the Korea/Tsushima Strait. J Oceanogr **60**:977-977
- Fang G (1986) Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. Chin J Oceanol Limn **4**:1-16
- Fairal CW, Bradley EF, Rogers DP, Edson JB, Young GS (1996) Bulk parameterization of air-sea fluxes in TOGA COARE. J Geophys Res **101**:3747-3767
- Flather RA (1976) A tidal model of the northwest European continental shelf. Mem Soc R Sci Liege **6**(10):141-164
- Griffin DA, Van Loan CF (1996) The adjoint method of data assimilation used operationally for shelf circulation. J Geophys Res **101**(C2):3457-3477
- Kurapov AL, Egbert GD, Allen, JS, Miller RN, Erofeeva SY, Kosro PM (2003) The M2 internal tide off Oregon: Inferences from data assimilation. J Phys Oceanogr **33**:1733-1757
- Lie HJ, Cho CH (1997) Surface current fields in the eastern East China Sea. J Korean Soc Oceanogr **32**:1-7
- Marchesiello P, McWilliams JC, Shchepetkin AF (2001) Open boundary conditions for long-term integration of regional ocean models. Ocean Model **3**:1-20
- Mellor GL, Yamada T (1982) Developement of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev Geophys **20**:851-875
- Niwa Y, Hibiya T (2001) Numerical study of the spatial distribution of the M2 internal tide in the Pacific Ocean. J Geophys Res **106**:22441-22449
- Niwa Y, Hibiya T (2004) Three-dimensional numerical simulation of M2 internal tides in the East China Sea. J Geophys Res **109**:C04027. doi:10.1029/2003JC001923
- Odamaki M (1989) Tides and tidal currents in the Tsushima Strait. J Oceanogr Soc Japan **45**:65-82
- Pack JH, Watts DR (2006) Internal Tides in the Southwestern Japan/East Sea. J Phys Oceanogr **36**:22-34
- Smagorinsky J (1963) General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. Mon Weather Rev **91**:99-164
- Takikawa T, Ogihara T, Nerai C, Morimoto A (2013) Observation on internal tidal waves of bottom cold water in western channel of the Tsushima Straits. Proceedings of the 17th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, 565-568.
- Teague WJ, Perkins HT, Jacobs GA, Book JW (2001) Tide observations in the Korea-Tsushima strait. Cont Shelf Res **21**(5):545-561
- Teague WJ, Jacobs GA, Perkins HT, Book JW (2002) Low-Frequency Current Observations in the Korea/Tsushima Strait. J Phys Oceanogr **32**:1621-1641
- Teague, WJ, Ko DS, Jacobs GA, Perkins HT, Book JW, Smith SR, Chang KI, Suk M-S, Kim K, Lyu SJ, and Tang TY (2006) Currents through the Korea/Tsushima Strait: A review of LINKS observations. Oceanogr **19**:50-63

국문 참고자료의 영문 표기

English translation / romanization of references originally written in Korean

- Kim K, Rho H-K, Lee SH (1991) Water masses and circulation around Cheju-Do in summer. J Korean Soc Oceanogr **26**:262-277 (in Korean)
- Kim I-O, Rho H-K (1994) A Study on China Coastal Water Appeared in the Neighbouring Seas of Cheju Island. Korean Fish Soc **27**:515-528 (in Korean)
- Kim CK, Chang KI, Park K, Suk MS (2000) The South Sea Circulation of Korea: Two-dimensional Barotropic Model. J Korean Soc Oceanogr **5**(4):257-226 (in Korean)
- Seo S-N (2008) Digital 30sec Gridded Bathymetric Data of Korea Marginal Seas - KorBathy30s. J Korea Soc Coastal Ocean Eng **20**(1):110-120 (in Korean)
- Lee K-H (2007) Nolinear correlation analysis between air and water temperatures in the coastal zone, Korea. J

Korea Soc Coastal Ocean Eng **19**(2):128-135 (in Korean)

Tidal Current in the Korea Strait. J Korea Soc Coastal Ocean Eng **6**:421-438 (in Korean)

Cho Y-K, Kim K (1994) Characteristics and Origin of the Cold Water in the South Sea of Korea in Summer. J Korean Soc Oceanogr **29**(4):414-421 (in Korean)

Choi BH, Bang IK, Kim KH (1994) Vertical Distribution of

Received Dec. 16, 2013

Revised Feb. 12, 2014

Accepted Feb. 30, 2014