이학석사 학위논문

POM을 이용한 동아시아 지역해 조석 시뮬레이션

Tide simulation using POM in East Asian Marginal Seas

지도교수 이호진

2008 년 *2*월

한국해양대학교 대학원

해양생명환경학과 서옥희

목 차

목 차 I
표 목 차 Ⅱ
그림 목차 Ⅲ
Abstract VI
제 1 장 서론 1
제 2 장 모델 및 실험조건 4
2. 1 모델
2. 1. 1 지배방정식 5
2. 1. 2 개방 경계 조건 6
2. 2 실험조건
제 3 장 결과 11
3.1 연안역 수심조정에 따른 모델 민감도 분석
3. 1. 1 RMS 오차 11
3. 1. 2 해역별 모델 결과 비교 13
3. 1. 3 조석도 19
3. 2 해저마찰계수에 따른 모델 민감도 분석 25
3.3 수평 확산의 변화에 따른 모델 민감도 분석
3. 4 조석 잔차류
제 4 장 결론 및 토의 42
참고 문헌

List of Tables

Table	1.	Tidal	compoi	nent	ts						4
						_					<i>(</i> -
Table	2.	RMS	error	of	model	results	depending	on	minimum	depths	(bottom
friction	n co	oefficie	ent 0.00)15)							

List of Figures

Fig. 1 Bathymetry of the northwestern Pacific (left) and location of selected tidal station (right) at which the observed and calculate harmonic constants are compaered
Fig. 2 Shading of minimum depth, 10, 15, 20, 25, 30, 35m 10
Fig. 3 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of M_2 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m
Fig. 4 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of S_2 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m
Fig. 5 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of K_1 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m 17
Fig. 6 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of O_1 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m
Fig. 7 Tidal chart for M_2 harmonics. Minimum depth is 10m. Friction coefficient is 0.0015
Fig. 8 Tidal chart for M_2 harmonics. Minimum depth is 25m. Friction coefficient is 0.0015
Fig. 9 Tidal chart for K ₁ harmonics. Minimum depth is 10m. Friction coefficient is 0.0015
Fig. 10 Tidal chart for K ₁ harmonics. Minimum depth is 25m. Friction coefficient is 0.0015

Fig. 19 Residual currents averaged for 7(left) and 14(right) lunar days. 39

Abstract

Tide simulation using POM in East Asian Marginal Seas

Department of Marine and Life Environmental

ok hee Seo

The adviser ho jin Lee

Tidal modeling experiments have been carried out using 2-dimensional POM (Princeton Ocean Model) which covered the area of $115 \sim 150^{\circ}$ E, $20 \sim 52^{\circ}$ N of northwestern Pacific with 1/12° horizontal resolution. ETOPO5 bathymetry has been chosen as the depth data. Harmonic constants of eight tidal components, M₂, S₂, K₁, O₁, K₂, P₁, N₂, Q₂, which was result of tidal numerical model calculated in global ocean by Matsumoto et al. (2000) were inputted at open boundaries. Several tests have been performed with varying the minimum depth, the bottom friction coefficient and the horizontal diffusion coefficient in order to find the best solution in good agreement with the observations.

The results showed that the improvements for M_2 , S_2 , K_1 tide were made up to 42%, 32%, 26% as the minimum depth increase from 10m to 25m. The discrepancy between model results using different minimum depth is found to be up to 20cm for M_2 tidal amplitude around Cheju Islands and the positions of amphidromes are dramatically changed in the Bohai Sea. The calculated ARE(Averaged Relative Error) values have been minimized when the bottom frictional coefficient and the minimum depth is 0.0015 and 25m, respectively. RMS errors were reduced when the horizontal diffusion coefficient was the constant, 2000. The effect of the horizontal diffusion coefficient, however, was relatively small(less than 7% for amplitude) compared with the effects of minimum depth and bottom friction coefficient.

To calculate the residual current from the 8 tidal components, a sensitivity test for the averaging period has been carried out. It is suggested that the proper averaging period for residual currents calculation is about 15 lunar days. The residual current speed is strong at the southwestern tip of Korea Peninsula, Gyoung gi bay, Hang ju bay and the northern tip of Taiwan. The prominent features of this residual currents are the northward currents at the western coast of Korea Peninsula and the two eddies at the northeastern part of Yangtze Bank.

제1장서론

우리나라 서해안은 다양한 크기의 만과 작은 섬들에 의하여 해안선이 복잡하고 지형적 조석 역학이 매우 복잡하며 반일주조의 조석이 아주 큰 것으로 유명하다. 조위와 조류가 큼에 따라 조석에너지의 소산(消散) 또한 커서 Le Provost and Lyard(1998)는 황해·동중국해에서 M₂분조 조석 소산을(tidal dissipation) 180 GW 로 계산한 바 있다. 이 값은 그들이 계산한 전 지구적 조석 소산인 2 TW의 11%에 해당한다. 이에 반해 동해의 조석은 황해·동중국해와 비교하여 진폭이 크게 감소 하여 조차는 0.3m 내외에 불과하다. 동해 조석은 일조부등이 매우 현저하여 일주조 가 우세하다. 반일주조의 무조점은 동해 북쪽과 남쪽 끝부분에 위치하고, 일주조의 무조점은 세 해협(대한해협, 쓰가루해협, 쏘야해협)에 위치하는 것으로 알려져 있다. (Ogura, 1933)

황해·동중국해, 동해 등 우리나라 주변 연근해에서 일어나는 조석현상은 각각의 해역이 격리된 상황에서 일어나는 현상이 아니라 태평양에서 유입되는 조석파의 영 향을 받고 있다. 따라서 우리나라 연안역에서의 조석 현상을 시뮬레이션 하기 위해 서는 모델 영역을 우리나라 주변 바다로 국한하기보다 공간적인 범위를 넓혀서 이 들 해역과 태평양까지 포함하는 광역에서의 조석현상을 동시에 고찰해야 한다.

연안역에서 국지 조석을 재현하는 경우에는 조간대의 노출과 침수를 고려하여 이 동경계를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 북서 태평양을 포함하는 광역 모델의 경우에는 격자 간격이 최소 수 km 이상이므로 이러한 연안역의 노출효과를 고려하 는 것은 불가능하다. 뿐만 아니라 연안의 수심 자료는 각 국가별로 군사적 또는 상 업적인 목적에서 비공개하기도 하여 제한된 해역에서만 자료가 존재한다. 자료가 존재하는 경우에도 국가별 기준면 차이에 따른 수심 자료의 차이가 존재하는 것이 현실이다. 일반적으로 수치 모델링에 자주 사용되는 ETOPO5, DBDB5와 최근에 제 공되는 1/30° 해상도의 DBDB2등의 수치 수심 자료 등도 천해 및 연안 부근의 수 심자료의 신뢰도는 높지 않은 것으로 알려져 있다(Kantha, 1995; Lefevre et al., 2000). 따라서 광역 조석 모델링에 있어 연안역의 수심 설정은 원천적으로 많은 불 확실성을 내포할 수밖에 없다.

Kantha(1995)는 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 경위도 방향으로 각각 1/12° 해상도의 수치 수심자료 DBDB5를 이용한 전 지구 조석 모델링을 통해 연안 부근 해역과 대륙붕역의 DBDB5 수심 자료의 문제점과 정확한 수심 자료가 조석 재현의 정확성을 크게 좌우함을 언급한 바 있다. Lefevre et al.(2000)은 같은 종류의 수심 자료인 ETOPO5를 이용하여 황해와 동중국해의 조석 모델링을 수행하였으며 개방 경계의 위치, 정확한 자료의 입력, 해저면 마찰 계수의 조정과 더불어 수심 자료의 수정, 특히 상대적으로 부정확성이 큰 연안역의 수심 조정이 조석 계산의 정확도를 크게 향상 시키는 것으로 보고하였다.

이와 같이 연안역의 수심 자료는 자료 자체의 불확실성으로 인해 연구자에 따라 자료를 수정하여 사용하고 있는 것이 대부분이다. 그러나 수심 자료 조정은 객관적 인 기준이 있는 것이 아니라 연구자에 따라 달라질 수 있는 상당히 주관적인 작업 이라 할 수 있다. 조석 모델 결과의 정확도를 크게 좌우하는 주요 입력변수 중 하 나인 해저면 마찰계수, 개방경계조건의 경우에도 입력변수의 불확실성에 따른 모델 결과의 변화를 정량적으로 고찰하는 모델 민감도 연구가 이미 많은 연구자들에 의 하여 수행된 바 있다. 그러므로 보다 객관적인 수심 자료 조정을 통해 연안역 수심 자료 수정의 효과를 보다 정량적으로 규명하는 모델 민감도 분석 연구 또한 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 북서 태평양 일부 해역을 포함하는 광역 조석 모델링에 있어 연안 역 수심 자료 조정이 모델 결과에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 우리나라 주변 해역을 포함하는 북서 태평양의 115~150°E, 20~ 52°N 사이의 해역을 대상으로 경·위도 방향으로 각각 1/12° 간격의 격자를 사용하 는 2차원 조석 모델을 수립하였다. 보다 객관적인 연안역의 수심 조정 효과를 고려 하기 위해 수심 자료 중 임계 수심 이하 해역의 수심을 일괄적으로 임계 수심 값으 로 일정하게 하는 방법을 사용하였다. 임계 최소 수심 값을 10m에서 35m까지 5m 간격으로 증가 시키면서 6회의 조석 모델링을 수행하였으며 각 모델 결과들의 정확 도를 총 368개의 연안 관측 자료와의 비교를 통해 정량적으로 계산하였다. 그리고 해저면 마찰 계수를 0.0005, 0.0015, 0.0025로 변화시키면서 각 최소 수심별 조석 모 델의 정확도를 계산하는 방법으로 해저면 마찰계수에 따른 연안역 수심 조정 효과 의 변화 정도도 검토하였다. 마지막으로 민감도 분석을 통하여 추정된 최적의 모델 조건을 이용하여 조석 잔차류를 계산하였다. 잔차류 계산을 위한 조류속 평균기간 을 1, 7, 14, 15, 16, 28, 30, 32일(태음일 기준)로 변화시키면서 우리나라 주변 해역 의 조석 잔차류를 계산하였다. 제 2장에서는 모델과 실험조건을 설명하고, 제 3장에서는 최소수심, 해저마찰계 수, 수평확산계수에 따른 모델 민감도 분석 결과와 잔차류 계산 결과를 제시한다. 마지막으로 제 4장에서는 결론 및 토의를 서술하였다.

제 2 장 모델 및 실험조건

본 연구에서 사용된 조석 재현 수치모델은 POM(Princeton Ocean Model)으로써, 우리나라 주변 해역을 포함하는 북서 태평양 해역 중에서, 115~150°E, 20~52°N 사이의 해역을 대상으로 경·위도 방향으로 각각 1/12°간격의 격자망으로 구성한 2 차원 모델이다. 수심자료는 미국 국립 지리자료원(National Geographic Data Center)에서 제공한 ETOPO-5를 사용하였으며 해양조사원에서 발행한 해도를 근간 으로 하여 한반도 주변 해안선을 일부 수정하였다(Fig. 1). Matsumoto등(2000)의 자료에서 추출한 조화상수를 경계조건으로 사용하여 주요 8개분조인 M₂, S₂, K₁, O₁, K₂, P₁, N₂, Q₁ 분조에 대한 조석모델을 구성하였다. 각 분조의 특성은 Table 1 에 나타내었다.

Symbol	Name of Tidal component	Period	Frequency
	Name of fidal component	(solar hours)	(deg/hour)
M2	Principal lunar	12.42	28.984
S2	Principal solar	12.00	30.0
K1	Luni-solar diurnal	23.93	15.041
01	Principal lunar diurnal	25.82	13.943
K2	Luni-solar semidiurnal	11.97	30.082
P1	Principal solar diurnal	24.07	14.959
N2	Larger lunar elliptic	12.66	28.439
Q1	Larger solar elliptic	26.87	13.399

Table 1. Tidal components

2.1 모 델

본 연구에서 사용된 수치모델은 Princeton Ocean Model(POM)의 2차원 수심 적 분 모드를 근간으로 한다. POM은 Blumberg와 Mellor에 의해서 1977년 개발된 모 델로써 수평적으로는 Arakawa-C 격자체계를 사용하고 있다 (Mellor, 1998). 2.1.1 지배방정식

해수를 비압축성 유체로 가정할 때 2차원 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같 다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{V}D \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{U}\overline{V}D \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{V^2}D \right) = \widetilde{F}_y - f\overline{U}D - gD\frac{\partial\zeta}{\partial y} - \tau_{ys} + \tau_{yb} \qquad \dots \quad (3)$$

여기서, *t* : 시간 *g* : 중력가속도 $\overline{U}, \overline{V}$: x, y 방향 수심적분 유속성분 $(\overline{U} = \int_{-H}^{\zeta} udz, \quad \overline{V} = \int_{-H}^{\zeta} vdz)$ *H* : 수심 ζ : 해수면 *D* : 해수의 전체 수심(=*H*+ζ) *f* : 코리올리항 $(f = 2\Omega sin\phi, \Omega$ 는 지구의 자전각속도이며, ϕ 는 해당지점의 위도이다.)

위의 식 (2)와 식 (3)에 포함된 F_x , F_y 는 수평 이류-확산항으로 다음과 같이 결정 된다.

 A_M 은 수평확산계수로 Smagorinsky 공식을 이용하여 모델 내부에서 계산된다.

$$A_M = C \triangle x \triangle y \frac{1}{2} \left| \nabla \overline{V} + (\nabla \overline{V})^T \right| \tag{6}$$

위 식에서 △x, △y는 격자 크기를 ▽V는 유속의 수평 구배를 나타내며, C는 상수로 본 연구에서 0.10 값을 사용한다.

한편, 식 (2)과 식 (3)의 τ_{xs} , τ_{ys} 와 τ_{xb} , τ_{yb} 는 각각 해수면에서의 해상풍의 응력 및 해저 마찰 응력에 관련된 항으로 다음과 같이 정의된다.

 $\tau_{xs} = \tau_{ys} = 0 \tag{7}$

$$\tau_{xb} = C_d \overline{U} \sqrt{\overline{U^2} + \overline{V^2}} \tag{8}$$

$$\tau_{yb} = C_d \overline{V} \sqrt{U^2 + V^2} \qquad \dots \qquad (9)$$

위 식에서 C_d 는 해저면 마찰계수이다.

2.1.2 개방 경계 조건

개방 경계에서 조위는 다음과 같이 입력된다.

$$\zeta_{o}(i,j,t) = \sum_{k=1}^{8} f_{k}A_{k}(i,j)\cos\left(\omega_{k}t - P_{k}(i,j) + \chi_{k}\right)$$
(10)

위 식에서 $\zeta_o(i, j, t)$ 는 개방경계 (i, j)격자점에서의 조위, 아래첨자 k는 각 분조 를 의미하며, $A_k(i, j)$ 는 (i, j)격자점에서의 진폭, $P_k(i, j)$ 는 위상, ω_k 는 분조의 각속 도를 나타낸다. f_k 18.6년 주기의 달 공전궤도 변화에 따른 변동을 고려하는 노드 인수(nodal factor)이고 χ_k 는 실시간 조석 계산을 위한 천문 인수(astronomical arguments) 이다. f_k 와 χ_k 는 시간의 함수로 계산되는데 본 연구에서 f_k 는 1.0로 고정하였다.

개방경계 (i,j)격자점에서의 진폭과 위상, $A_k(i,j)$ 와 $P_k(i,j)$ 는 Matsumoto 등 (2000)이 TOPEX/POSEIDON 자료를 동화시켜 전 지구와 일본 주변 해역에서 계산 한 조석 수치 모형결과로부터 추출하였다. 본 연구에서는 개방경계에서 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , K_2 , P_1 , N_2 , Q_1 등 주요 8개 분조의 조화상수를 고려하였다.

개방경계에서의 유속은 방사 경계 조건(radiation condition)으로 계산된다. 예로 동쪽과 북쪽 개방 경계에서 적용된 각 경계조건은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\overline{U_o} = \frac{\sqrt{gh}}{h} \left(\zeta - \zeta_o\right) \tag{11}$$

$$\overline{V_o} = \frac{\sqrt{gh}}{h} \left(\zeta - \zeta_o\right) \tag{12}$$

위식에서 g는 중력가속도, h는 수심을 나타낸다. ζ_o는 (10)식과 같은 개방경계에 서의 조위를 나타내며 ζ는 개방경계에서 연속방정식으로 계산된 해수면 변위이다. 연속방정식으로 계산된 해수면 변위(ζ)가 조위값(ζ_o) 보다 클 경우에 u>0이 되어 모델영역 외부로 빠져나가는 유속이 존재하게 되고, 반대의 경우에는 영역 내부로 유입되는 유속이 계산된다.

육지와 바다의 경계가 되는 곳에서 경계면에 수직한 유속 성분은 0으로 처리하였으며 모델의 초기조건은 정지 상태로 유속과 조위를 0으로 설정하였다.

2.2 실험조건

모델 계산 시간간격(time-step)은 CFL(Courant-Friedrichs-Levy)조건를 고려하여 6초로 주었으며 안정화를 위한 5일간의 예비 모델 수행(preliminary model run) 후 30일간의 조석 시뮬레이션을 추가 수행하였다. 매 1시간마다 해수면 자료를 저장하 여 총 720시간의 자료를 조화분석(harmonic analysis)한 후 총 368개 연안 조석 관 측 지점에서 관측 자료로부터 구한 조화상수 값과 비교하였다. 368개 연안 관측 지 점의 위치는 Fig.1 에 나타냈다. 비교에 사용된 자료는 이 등(2001)의 연구에서도



Fig. 1 Bathymetry of the northwestern Pacific (left) and location of selected tidal station (right) at which the observed and calculate harmonic constants are compared.

사용된 바 있는 International Hydrographic Office database(IHO, 1979)로 이 중 중 국 자료와 1달 이하의 짧은 관측 주기의 자료를 제외한 368개의 자료만을 사용하였 다. 일반적으로 황해와 동중국해는 반일 주기 조석 성분이 우세한 반면 동해는 일 주기 조석 성분이 우세한 것으로 알려져 있다. 이러한 해역별 특성을 고려하여 대 상 해역을 황해 연안(△), 우리나라 남해와 큐슈 부근 해역(*), 동중국해(○), 동해와 일본의 태평양 연안(□)등 4개의 그룹으로 분류하여 비교하였다.

수립된 모델의 민감도를 분석하기 위하여 최소수심, 해저마찰계수, 수평마찰계수 를 변화시켰다. 최소수심은 10, 15, 20, 25, 30, 35m로 6가지 경우에 대하여 수치 실험을 수행하였으며, 최소수심의 변화에 따라 수심이 달라지는 지역을 Fig. 2에 나 타내었다. 다음으로 해저마찰계수와 수심조정효과를 동시에 검토하기 위해 해저마 찰계수를 0.0015, 0.0025, 0.0035로 변화시키면서 최소수심의 값도 10, 15, 20, 25, 30, 35m로 함께 변화시킨 경우에 대하여 수치실험을 수행하였다. 마지막으로 수평확산 계수에 따른 모델 민감도 분석을 위해 수평확산계수를 Smagorinsky 공식을 사용하 지 않고 500, 1000, 2000, 5000m²/s으로 상수로 주는 경우에 대하여 모델 반응을 검 토하였다.

민감도 분석을 통하여 얻은 최적의 모델 조건을 이용하여 조석 잔차류를 구하였 다. 조석 잔차류는 모델에서 계산한 수심 적분된 유속을 시간 평균하여 다음과 같 이 계산된다.

$$\left[\overline{U_r}, \overline{V_r}\right] = \frac{\int_0^T (\overline{U}, \overline{V})(h+\zeta)dt}{\int_0^T (h+\zeta)dt}$$
(13)

위 식에서 T는 조석 주기이며, $[\overline{U},\overline{V}]$ 는 수심 적분된 유속이다. 본 연구에서는 8 개의 분조가 함께 고려된 모델에서 잔차류를 계산하기 위한 적절한 T를 구하기 위 하여 태음일을 기준으로 하여 1일, 7일, 14일, 15일, 16일, 28일, 30일, 32일 동안의 수심 적분된 유속을 시간 평균하였다.



Fig. 2 Shading of minimum depth, 10, 15, 20, 25, 30, 35m.

제 3 장 결 과

3.1 연안역 수심조정에 따른 모델 민감도 분석

3.1.1 RMS 오차

광역 조석 모델링에 있어 연안 부근 해역에 국한된 수심 조정이 모델 결과에 미 치는 영향을 규명하기 위해 모델 최소 수심 값을 지정하였으며 수심 자료 중 최소 수심 보다 얕은 연안 부근 해역의 수심은 모두 최소 수심 값으로 일정하게 수정 되 도록 하였다. 최소 수심으로 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m 등 6가지 경우를 고려 하였으며 각 최소 수심별 조석 계산은 주요 4개 분조의 조화 분석을 위해 30일간 수행되었다. 해저마찰력 계산을 위해 필요한 해저면 마찰계수로는 Lefevre et al.(2000)가 황해·동중국해 조석 모델 민감도 분석 결과를 근거로 제시한 0.0015의 값을 사용하였다. Table 2는 4개 분조에 대한 368개 연안 관측 자료와 각 최소 수 심별 모델 결과를 비교하여 진폭과 위상의 RMS 오차를 계산한 것이다.

모든 분조에서 연안역의 수심 조정에 따라 RMS 오차가 변화하였는데 특히 M₂ 분조의 변화폭이 다른 분조에 비해 크게 나타났다. M₂ 분조 진폭의 경우, 최소수심 을 10m로 설정했을 때 RMS 오차는 24.30cm이었으며 최소수심이 증가함에 따라 RMS 오차가 감소하여 25m일 때 14.11cm로 약 42% 정도 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최소수심이 25m보다 커질수록 오차가 다시 증가하여 35m 의 경우에 RMS 오차는 22.80cm로 증가한다. 위상의 경우에도 최소 수심이 10m일 때 25.21° 내외에서 25m일 때 18.58° 로 약 8° 정도 개선되었다. 진폭과 같이 위상 의 경우에도 25m 최소 수심을 기준으로 오차가 다시 증가하여 35m의 경우에는 24.59°로 증가한다.

S₂ 분조도 M₂ 분조와 유사한 양상을 나타내는데 진폭의 경우 최소수심 10m일 때 10.47cm의 RMS 오차에서 최소 수심이 25m일 때 7.92cm로 24.3% 감소하였으며 최 소수심이 30m일 때 7.11cm로 약 32% 정도 오차가 감소한다. 위상의 경우에는 최소 수심이 20m일 때 RMS 오차가 19.6°로 가장 작았다. K₁ 분조 진폭의 RMS 오차는 최소수심이 10m일 때 5.97cm이고 최소 수심이 25m일 때 4.42cm로 약 26% 오차가 감소하였으며 위상은 최소 수심 20m일 때 13.6°로 가장 작고 수심 조정에 따른 RMS 오차의 변화폭은 2.5° 정도로 비교적 작았다. O₁ 분조는 최소수심이 10m, 15m, 20m일 경우에는 진폭과 위상의 RMS 오차가 각각 3.04cm~3.22cm, 10.94°~ 11.31° 거의 일정한 값을 나타냈으며 최소 수심이 30m이상으로 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하여 35m일 때 오차는 5.87cm와 15.2°로 증가했다.

Tidal		Minimum depth							
components	-	10m	15m	20m	25m	30m	35m		
ЪЛ	Amp(cm)	24.30	19.55	15.96	14.11	17.58	22.80		
1112	Pha(°)	25.21	22.53	19.33	18.58	20.42	24.59		
C	Amp(cm)	10.47	9.44	9.20	7.92	7.11	8.15		
\mathfrak{S}_2	Pha(°)	25.45	22.31	19.60	22.04	23.49	24.38		
V	Amp(cm)	5.97	5.29	4.69	4.42	4.50	4.95		
\mathbf{K}_1	Pha(°)	15.19	13.79	13.56	14.07	15.03	16.34		
O_1	Amp(cm)	3.04	3.04	3.22	3.77	4.80	5.87		
	Pha(°)	11.27	10.94	11.31	12.12	12.98	15.20		

 Table 2. RMS error of model results depending on minimum depths

 (bottom friction coefficient 0.0015)

Lefevre et al.(2000)은 ETOPO5 자료 중 연안역의 수심을 영국과 프랑스 해군의 해도 자료를 이용하여 수정한 후 M₂ 분조만을 고려하여 시뮬레이션 한 결과 연안 역 수심 조정 전과 후의 RMS 오차가 각각 44.82cm와 28.58cm로 약 36%의 오차가 개선되는 것으로 보고하였다. K₁ 분조만을 고려할 경우에는 연안역 수심 조정 전과 후의 RMS 오차가 각각 10.04cm와 7.01cm로 약 30% 정도 오차가 개선되었다. 참고 로 Lefevre et al.(2000)의 결과는 Fig. 1에서 동해와 일본의 태평양 연안(□) 관측점 을 제외한 황해와 동중국해, 우리나라 남해 연안의 192개 연안 관측 자료를 비교한 결과이다. 본 연구에서 사용된 연안 관측 자료 수와 다소 차이가 있지만 최소 수심 을 조정하는 방법을 통한 연안역의 수심 조정에 의해 Lefevre et al.(2000)과 거의 같은 정도의 정확도 개선 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서도 M₂ 분조만을 고려하여 각 최소 수심별 조석 모델링을 수행하였다. 그 결과 8개 분조를 동시에 고려했을 경우와 유사한 양상을 확인 할 수 있었는데 최소 수심이 10m일 때 22.46cm이던 RMS 오차가 최소수심이 증가함에 따라 오차 가 감소하여 25m일 때의 RMS 오차는 13.23cm로 약 41% 정도 오차가 감소하였다. 25m를 기점으로 최소 수심이 30m, 35m로 증가하면서 RMS 오차도 다시 증가하는 양상을 나타냈다. RMS 오차의 전반적인 크기는 8개의 분조를 동시에 고려한 경우 에 비해 M₂ 분조만을 고려한 경우가 상대적으로 작은 값을 나타냈다.

3.1.2 해역별 모델 결과 비교

Fig. 3은 368개 연안 관측 지점에서 관측된 M₂ 분조의 진폭(y축)과 조석 모델로 계산된 진폭(x축)을 비교한 그림이다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 황해 연안 관측점 은 △로, 우리나라 남해와 큐슈 연안은 *, 동중국해는 ○, 동해와 일본의 태평양 연 안 □ 기호로 구분하여 표시하였다.

최소 수심을 10m로 설정할 경우 전체적으로 황해 연안(△)에서의 모델 결과는 관 측에 비해 작게 계산된 반면 우리나라 남해안과 큐슈 연안(*)에서의 모델 결과는 관측에 비해 더 크게 계산된 경향을 확인할 수 있다(Fig. 3(a)). 이러한 결과는 기존 의 황해·동중국해 M₂ 조석 모델링에서도 재현된 바 있는데 해저 마찰계수를 증가 하거나 감소하는 방법으로 모델 결과를 수정할 경우에는 모델 결과 값 전체가 감소 하거나 증가하는 결과를 초래하기도 했다(So, 2000; Lee 등., 2002). 그러나 본 연구 와 같이 최소 수심을 설정하여 연안역의 수심을 수정할 경우에는 기존의 결과와는 다른 결과를 얻을 수 있었는데 Fig. 3(b), 3(c)와 3(d)와 같이 최소 수심이 15m, 20m, 25m로 증가함에 따라 황해 연안(△)의 모델값 점차 증가하는 반면 남해안(*) 의 모델값는 점차 감소하여 관측값에 근접해가는 것을 확인할 수 있다. 최소 수심 이 25m일 경우에는 다른 경우에 비해 모델값과 관측값이 가장 잘 일치하였으며 모 델값와 관측값 사이의 상관도는 0.97로 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 최소 수심 이 35m로 증가함에 따라 황해 연안의 모델값은 다시 관측값에 비해 작아지고 동중 국해(○)의 모델값은 관측값에 비해 커져 상관도가 0.93으로 낮아졌다.

Fig. 4는 S₂ 분조의 관측 진폭과 모델 진폭을 비교한 그림이다. 전체적으로 M₂ 분조의 결과와 유사한 경향을 보여준다. 즉, 최소 수심이 10m일 경우에는 황해 연 안(△)에서의 모델값은 관측값에 비해 작은 값을 남해안과 큐슈 연안(*)에서의 모델 값은 관측값에 비해 큰 값을 나타내며 최소 수심이 증가함에 따라 황해 연안의 모 텔값은 점차 증가하여 관측값에 접근하며 남해안과 큐슈 연안의 모델값은 점차 감 소하는 경향을 나타낸다. 최소 수심이 25m일 경우 모델값과 관측값 사이의 상관도 는 0.96으로 가장 높은 상관관계를 나타냈으며 최소 수심이 30m일 경우 모델값과 관측값이 가장 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 최소수심이 35m로 증가함에 따라 상관도는 0.93으로 낮아지며 M₂ 분조와 같이 황해 연안의 모델값은 다시 관측값에 비해 작아지고 동중국해(○)의 모델값 관측값에 비해 커지는 경향을 나타낸다(Fig. 4(f)). 그러나 M₂ 분조와 비교할 때 최소 수심이 30m일 경우에도 전체적으로 관측 값에 비해 모델값이 약간 크게 계산된 경향이 있다. K₁과 O₁의 경우에는 M₂, S₂에 비해 상대적으로 진폭이 작아서 수심 조정에 따른 뚜렷한 변화가 나타나지 않지만 K₁의 경우에는 최소수심 20m일 때 O₁의 경우에는 최소수심 10m일 때 최적의 결과 가 나타났다.(Fig.5, Fig.6)



Fig. 3 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of M_2 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m.



Fig. 4 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of S_2 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m.



Fig. 5 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of K_1 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m.



Fig. 6 Comparison between the calculated and the observed values for amplitudes of O_1 tidal constituent at 368 grid points. Minimum depth is (a)10m, (b)15m, (c)20m, (d)25m, (e)30m and (f)35m.

3.1.3 조석도

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 최소 수심을 10m와 25m로 설정하여 계산한 M₂ 분조의 조석도이다. 위상은 Greenwich 자오선을 기준으로 한 값이고 진폭의 단위는 cm이 다. 조석 모델 결과 동해에서는 대한 해협 북동쪽과 동해 북부 타타르 해협 부근에 총 2개의 무조점이 재현되었다. 모델로 재현된 무조점의 위치는 Nishida(1980)와 Odamaki(1989)가 제시한 M₂ 조석도의 무조점 위치와 거의 일치한다. 180° 등조시 선의 위치를 제외하고는 동해에서는 최소 수심 조정에 따른 모델 결과의 차이가 크 게 나타나지 않는다.

반면 상대적으로 수심이 얕은 황해에서는 두 모델 결과의 차이가 상대적으로 뚜 렷하게 나타나는데 특히 발해만 내에 존재하는 2개의 무조점의 위치가 최소 수십에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 최소 수심을 10m로 설정할 경우 38°N, 119°E 부근에 무조점이 위치하는데 반해 최소 수심을 25m로 설정할 경우에는 38°N, 120°E 부근에 무조점이 위치한다. Ogura(1933)와 Nishida(1980)의 조석도에 제시된 무조점의 위치와 비교할 때 최소 수심 25m를 사용한 모델 결과는 약간 동쪽으로 치우친 반면 최소 수심 10m를 사용한 모델 결과는 상대적으로 서쪽으로 크게 치우 쳐 탈무조점(degenerated amphidrom)의 형태를 보여준다. 요동반도 서측 요동만 내 에서의 무조점은 두 모델 결과 모두 육지 쪽으로 치우쳐 탈무조점의 형태를 나타내 는데 최소 수심 10m일 때의 결과에 비해 25m일 경우의 무조점이 서쪽으로 더 치 우쳐 존재한다.

등조위선 분포에 있어서도 오끼나와 해구 부근의 60cm 등조위선을 제외하고는 동중국해의 대륙붕역과 황해 내부에서 두 모델 결과가 명확히 구분된다. 최소 수심 을 10m로 설정할 경우에는 100cm의 등조위선이 제주도 주변을 둘러 큐슈 서안에 연결되어 있으며 우리나라 서남해안을 따라서는 140cm의 등조위선이 존재한다. 제 주도 남측 동중국해 대륙붕역에서의 조석 진폭은 최대 90cm에 달한다(Fig. 7). 그러 나 최소 수심이 25m일 경우에는 70cm의 등조위선이 제주도 서측 해역까지 혀 모 양으로 확장된 형태를 띠며 80cm의 등조위선이 제주도 서안을 걸쳐 큐슈 남단까지 연결되어 있다. 서남해안을 따라서는 100cm의 등조위선이 존재하고 제주도 남측 동 중국해 대륙붕역에서의 조석 진폭도 70cm 내외로 감소한다(Fig. 8) 황해·동중국해 를 대상으로 한 대부분의 조석 수치모델링에 있어 제주도 부근 해역의 M₂ 조석이 관측된 값보다 크게 계산되는 경향이 있는데(이 등, 2001) 본 연구에서는 최소 수심을 25m로 설정하여 연안역의 수심을 조정한 결과 M₂ 조석의 진폭이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 최소 수심을 10m와 25m로 설정하여 계산한 모델 결과 로 K₁ 분조의 조석도이다. 조석 모델 결과 동해에서는 대한 해협 북동쪽에 1개의 무조점이 재현되었다. 모델로 재현된 무조점의 위치는 Nishida(1980)와 Odamaki(1989)가 제시한 K₁ 조석도의 무조점 위치보다 더 우리나라 연안에 가까이 붙어있다. M₂ 분조와 마찬가지로 동해에서는 최소 수심 조정에 따른 모델 결과의 차이가 크게 나타나지 않는다.

K₁ 분조 또한 황해에서는 두 모델 결과의 차이가 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 최소수심을 25m로 설정할 경우 발해만 내에 존재하는 무조점은 최소수심을 10m로 설정한 경우와 비교하여 약간 서쪽으로 이동하였으며 황해 내에 존재하는 무조점은 최소 수심을 10m로 설정할 경우 35°N, 123°E 부근에 위치하는데 반해 최소 수심을 25m로 설정할 경우에는 34°N, 123°E 부근에 위치한다. Ogura(1933)와 Nishida(1980)의 조석도에 제시된 무조점의 위치와 비교할 때 최소 수심 25m를 사 용한 모델 결과의 무조점의 위치는 남쪽으로 1°정도 이동하였다.

등조위선 분포에 있어서도 황해 내부에서 두 모델 결과가 명확히 구분된다. 최소 수심을 10m로 설정할 경우에는 32cm의 등조위선이 제주도 서쪽을 지나 우리나라 남해안까지 연결되어 있으며 발해만과 서한만에서 조석 진폭은 최대 56cm에 달한 다. 그러나 최소 수심이 25m일 경우에는 32cm의 등조위선이 제주도까지 확장되지 않고 우리나라 서남 연안을 따라서 남해안까지 이어진다. 발해만과 서한만의 조석 진폭도 48cm 내외로 감소한다. K₁ 분조의 경우는 최소수심의 변화에 따른 조석의 변화가 M₂ 분조와 비교하여 작기는 하지만 최소 수심을 25m로 설정하여 연안역의 수심을 조정할 결과 K₁ 조석의 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있었다



Fig. 7 Tidal chart for M_2 harmonics. Minimum depth is 10m. Friction coefficient is 0.0015.



Fig. 8 Tidal chart for M_2 harmonics. Minimum depth is 25m. Friction coefficient is 0.0015.



Fig. 9 Tidal chart for K_1 harmonics. Minimum depth is 10m. Friction coefficient is 0.0015.



Fig. 10 Tidal chart for K_1 harmonics. Minimum depth is 25m. Friction coefficient is 0.0015.

3.2 해저마찰계수에 따른 모델 민감도 분석

최소 수심 설정을 통한 연안역의 수심 조정은 천해에서의 해저마찰력에 의한 조 석 에너지의 감쇄에 영향을 미칠 것으로 추측된다. 따라서 연안역의 수심 조정 효 과는 해저면 마찰계수의 크기에 따라 변화될 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 이러 한 효과를 검토하기 위해 해저면 마찰계수를 0.0005와 0.0025로 변화시키면서 각 최 소 수심별 조석 모델링 수행, 결과를 비교하였다. Fig. 11은 서로 다른 해저마찰계 수에 대한 최소 수심별 진폭의 RMS 오차를 비교한 그림이다. 해저면 마찰계수가 0.0005일 때 M2 분조의 진폭은 최소 수심 10m에서 RMS 오차가 19cm 정도로 가장 작았으며 20m까지 거의 일정하게 유지되다가 25m이상에서 급격하게 증가한다. 반 면 해저면 마찰 계수가 0.0025일 때는 마찰 계수가 0.0015일 때의 결과와 유사한 패 턴을 보여주는데 최소 수심이 증가함에 따라 RMS 오차가 감소하여 25m의 최소 수 심에서 RMS 오차가 21cm 내외로 가장 작은 값을 나타냈다. 전반적으로 해저면 마 찰계수가 0.0025일 때의 오차가 0.0015의 경우 보다 크게 나타났으며 최소 수심이 35m일 경우에는 두 경우의 RMS 오차가 거의 일치하였다. 전체적으로 해저면 마찰 계수 0.0005의 경우에는 다른 두 경우보다 마찰 효과가 크게 줄어 오차도 상대적으 로 크게 계산되며 패턴도 다른 양상을 나타내는 것으로 판단된다. S2 분조도 M2 분 조와 유사한 경향을 나타내는데 0.0005의 마찰계수를 사용할 경우 RMS 오차는 다 른 두 경우에 비해 상대적으로 더 컸으며 0.0015와 0.0025의 경우에는 최소 수심이 증가함에 따라 오차도 감소하여 최소 수심이 30m일 때 최소 오차를 나타냈다. K1 분조의 경우에는 해저면 마찰계수가 0.0025를 사용할 때 오차의 변화폭이 매우 작 았지만 0.0015일 때와 같이 최소 수심이 20m일 때 가장 작은 RMS 오차를 나타냈 다. O1 분조의 경우에는 20m까지는 거의 일정하다가 최소 수심이 증가하면서 오차 도 같이 증가하는 양상을 나타낸다.

위상의 경우에는 최소 수심별 RMS 오차에 있어 0.0015와 0.0025의 해저면 마찰 계수를 사용할 경우의 차이는 거의 없으며 해저면 마찰 계수를 0.0005를 사용하는 경우가 상대적으로 RMS 오차가 더 크게 나타났지만 그 차이는 S₂와 O₁ 분조에서 최대 10° 이내로 진폭에 비해서는 상대적으로 작게 나타났다(Fig. 12). 이러한 결과 는 위상을 결정하는 변수는 조석파의 전파속도(= \sqrt{gh})이므로 해저면 마찰 계수보 다는 지형에 의한 영향을 더 크게 받은 결과로 판단된다. M₂와 S₂ 분조에는 전반적 으로 최소 수심이 증가할수록 RMS오차가 감소하는 경향을 나타내는데 M₂ 분조의 경우 25m와 30m에서 최소가 되며 S₂ 분조의 경우 20m에서 최소 오차를 가진다. K₁ 분조의 경우에도 대략 20m 부근에서 최소 오차를 나타내며 O₁ 분조의 경우에는 진폭의 경우와 같이 20m까지는 거의 일정하다가 최소 수심이 증가하면서 오차도 같이 증가하는 양상을 나타낸다. 해저면 마찰계수와 최소 수심 변화를 동시에 고려 하여 주어진 모델 영역에서 최적 변수 값을 결정하기 위해 각 조석 분조별 진폭의 RMS 오차를 각 분조별 평균 진폭으로 나눈 ARE(Averaged Relative Error)를 계 산하였다. ARE는 다음과 같이 정의하였다.

여기서, R는 각 분조별 RMS 오차 값이고, A는 각 분조별 평균 진폭, N은 분조 의 수(=4) 이다. ARE는 각 분조별 RMS 오차를 진폭의 평균값에 대해 정규화한 것 으로서, 모델 영역 내에서의 분조별 진폭 특성을 고려한 상대적인 RMS 오차의 평 균값이 된다. 즉 평균적인 모델 값과 관측 값의 차이를 백분율로 제시할 수 있다.

Fig. 13은 M₂, S₂, K₁, O₁ 분조에 대해 해저마찰계수 및 최소수심에 따라 각각 ARE를 계산한 다음 이를 등치선으로 표시한 것이다. 최소수심을 고정하고 해저면 마찰계수만을 변화시키는 경우에는 Lefevre et al.(2000)의 결과와 같이 0.0015일 때 평균 오차 값이 최소가 되었다. 최소 수심에 따른 변화를 살펴보면 해저면 마찰계수가 0.0015 보다 작은 경우에는 일반적으로 최소 수심이 작을수록 모델의 성능이 개선되며, 최소수심이 커지면 모델의 정확도가 떨어질 뿐만 아니라 해저면 마찰계수에 대한 민감도도 크게 나타나는 경향이 있다. 해저면 마찰계수가 0.0015 보다 큰 경우에는 해저면 마찰계수에 따른 변화보다 최소 수심의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있으며, 최소 수심 25m가 모델의 정확도를 최대화 할 수 있는 최적 값으로 나타났다. 결론적으로 4개 분조로부터 구한 ARE의 분포에 따르면, 해 저면 마찰계수로 0.0015을 사용하고 최소 수심을 25m로 설정할 경우 ARE는 약

이 등(2001)의 경우에도 M2 분조만을 고려한 조석 계산의 경우에는 0.0025의 해

저면 마찰계수를 사용하였으나 M₂, S₂, K₁, O₁ 등 4개 분조를 동시에 고려한 조석 계산의 경우에는 0.002의 마찰계수를 사용하였다. 비선형 해저 마찰력의 경우에는 각 분조 간 상호작용에 의한 마찰효과가 더해질 것이므로 고려하는 분조의 수가 증 가할수록 마찰계수는 감소해야 한다(Bower et al., 1991). 따라서 8개의 분조를 동시 에 고려한 본 연구의 경우에는 일반적으로 조석 모델링에서 사용되는 해저면 마찰 계수인 0.0025에 비해 다소 작은 값인 0.0015내외에서 양호한 결과를 나타내는 것으 로 사료된다.



Fig. 11 The variation of RMS errors of amplitude according to the change of friction coefficient and minimum depth.



Fig. 12 The variation of RMS errors of phase according to the change of friction coefficient and minimum depth.



Fig. 13 The distribution of ARE depending on minimum depth and bottom friction coefficient.

3.3 수평 확산의 변화에 따른 모델 민감도 분석

우리나라 서해안은 앞서 언급한 바와 같이 해안선이 복잡하며 지형적 요인에 의 해 조석 특성이 매우 복잡한 것으로 알려져 있다. 이러한 해안선 효과는 운동량의 수평 확산에 영향을 미칠 것으로 사료되며 해저면마찰과 더불어 조석의 정확도에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서 본 절에서는 수평확산계수의 변화에 따른 조 석의 정확도 변화를 확인하기 위하여 Smagorinsky 공식을 사용하지 않고 각각 500m²/s, 1000m²/s, 2000m²/s, 5000m²/s으로 일정하게 준 경우에 대하여 수치실험을 수행하였다. 모델 최소수심은 25m, 해저마찰계수는 0.0015로 일정하게 하였다. 계산 결과 M₂ 분조는 수평확산계수가 500일 때 진폭의 RMS 오차가 13.94cm로 최소값 이 나타났으며 수평확산계수가 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하는 양상이 나타 났다(Table 3). 그러나 S₂, K₁, O₁ 분조의 경우에는 수평확산계수가 증가하면 RMS 오차는 감소하였으며 수평확산계수가 5000m²/s일 때 각각 5.96, 3.70, 2.56cm로 최소 오차 값을 나타냈다.

위상의 경우에는 수평확산계수가 500m²/s일 때 M₂, K₁ 분조의 RMS 오차가 각각 18.62, 14.02°로 최소가 되었으며 수평확산계수가 증가함에 따라 RMS 오차도 증가 하였다. S₂ 분조의 경우에는 수평확산계수가 증가함에 따라 RMS 오차는 감소하는 양상을 나타냈는데, 수평확산계수가 5000m²/s일 때 RMS 오차가 최소로 21.24° 내 외였다. O₁ 분조의 경우에는 수평확산계수가 500m²/s일 때 12.06°였으며 수평확산계 수가 증가함에 따라 RMS 오차는 감소하였다. 수평확산계수가 2000m²/s일 때 RMS 오차는11.90°로 최소가 되었다. 그러나 전체적으로 수평확산계수 조절에 따른 모델 개선의 효과는 연안역 수심 조정 효과에 비하여 작게 나타났다.

최소 RMS 오차를 나타내는 수평확산계수를 구하기 위하여 진폭의 ARE를 계산 하였으며 M₂, S₂, K₁, O₁ 분조의 위상 RMS 오차 평균을 계산하였다. 수평확산계수 가 500m²/s일 때 진폭 ARE는 0.248로 나타났으며 수평확산계수가 증가할수록 감소 하여 수평확산계수가 5000m²/s일 때 0.212로 최소가 되었다. 위상의 RMS 오차 평 균은 수평확산계수가 500m²/s일 때 16.63°였으며 2000m²/s일 때는 16.55°로 최소가 되었다.

Smagorinsky 공식을 사용하지 않고 수평확산계수를 2000m²/s의 상수로 계산한 경우와 Smagorinsky 공식을 사용하여 수평확산계수를 계산한 경우를 비교할 때 진 폭 ARE는 10%, 위상의 RMS 오차 평균은 약 0.9%정도로 미약하게 감소하는 것으 로 나타났다.

최소 수심, 해저마찰계수, 수평확산계수에 대한 모델의 민감도를 분석한 결과 최 소수심은 25m, 해저마찰계수는 0.0015, 수평확산계수는 2000m²/s으로 일정하게 한 경우에서 모델 결과와 관측치를 비교했을 때 RMS 오차가 가장 작은 것으로 나타 났다. Fig. 14~17은 최적 조건들을 모두 적용하였을 때의 M₂, S₂, K₁, O₁ 분조의 조 석도이다. 황해에서 각 분조별 무조점의 위치는 Choi(1980)가 계산한 위치와 잘 일 치한다. 반일주조의 경우 경기만에서 진폭의 최대값은 M₂ 분조는 2.4m, S₂ 분조는 1m로 나타났다. 일주조의 진폭은 경기만, 서한만, 발해만에서 높게 나타났으며 K₁ 분조는 42cm, O₁ 분조는 36cm에 이른다. 한편 동해에서는 반일주조의 경우 동해 입구와 동해 북부에서 무조점이 나타났으며 일주조의 경우에는 대한해협, 쓰가루 해협, 쏘야해협에서 무조점이 나타났다. 그러나 반일주조에 동해 입구에서 나타나는 무조점의 위치는 Ogura(1933)가 계산한 위치보다 북쪽에 나타났으며, 일주조에 대 한해협에서 나타나는 무조점의 위치는 Ogura(1933)가 계산한 위치보다 우리나라 연 안에 근접하여 나타났다.

Tidal	_	Horizontal	diffusion	coefficient	(constant)
components		500	1000	2000	5000
М	Amp.(cm)	13.94	13.97	14.25	16.00
M_2	Pha.(°)	18.64	18.68	18.84	19.67
S_2	Amp.(cm)	7.76	7.44	6.89	5.96
	Pha.(°)	21.78	21.55	21.29	21.24
K_1	Amp.(cm)	4.36	4.24	4.04	3.70
	Pha.(°)	14.02	14.03	14.16	15.07
O_1	Amp.(cm)	3.62	3.39	3.05	2.56
	Pha.(°)	12.06	11.93	11.90	12.67
ARE	Amp.(cm)	0.248	0.239	0.227	0.212
MEAN	Pha.(°)	16.63	16.55	16.55	17.16

Table 3. RMS error of model results depending on constanthorizontal diffusion coefficient. (minimum depth : 25m, bottomfriction coefficient : 0.0015)



Fig. 14 Tidal chart for M_2 harmonics. Minimum depth is 25m. Bottom friction coefficient is 0.0015. Horizontal coefficient is 2000m²/s. Lower pane is a enlarged image of the Yellow and the East China seas.

Fig. 15 Tidal chart for S_2 harmonics. Minimum depth is 25m. Bottom friction coefficient is 0.0015. Horizontal coefficient is 2000m²/s. Lower pane is a enlarged image of the Yellow and the East China seas.

Fig. 16 Tidal chart for K_1 harmonics. Minimum depth is 25m. Bottom friction coefficient is 0.0015. Horizontal coefficient is 2000m²/s. Lower pane is a enlarged image of the Yellow and the East China seas.

Fig. 17 Tidal chart for O_1 harmonics. Minimum depth is 25m. Bottom friction coefficient is 0.0015. Horizontal coefficient is $2000m^2/s$. Lower pane is a enlarged image of the Yellow and the East China seas.

3.4 조석 잔차류

8개 분조를 고려한 조석 잔차류 계산을 위하여 최소 유속 평균 기간을 각각 1, 7, 14, 15, 16, 28, 30, 32일(태음일 기준)로 하여 조석 잔차류를 계산하였다. 모델 조건 은 최소수심은 25m, 해저마찰계수는 0.0015, 수평확산계수는 2000m²/s을 사용하였 다. Fig. 18은 1일 평균 잔차류이다. 각각의 그림들은 1일 평균 잔차류로서 좌상은 보름 3일 전, 좌우는 보름, 좌하는 보름 4일 후, 우하는 하현에 계산된 결과이다. 이 와 같이 1일 평균 잔차류를 구하는 경우 달의 위상 중 어느 시기에 계산 하느냐에 따라서 그 결과는 달라질 수 밖에 없다. 그림에서 보는 바와 같이, 유속의 패턴이나 크기는 대조기와 소조기에 따라 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 19는 7 (좌)과, 14일(우)동안 유속을 평균하여 구한 잔차류를 나타낸 것이다. 좌우 그림의 유속의 크기가 다른데 7일은 8개의 조석 분조가 만들어내는 장주기 주기보다 짧기 때문에 7일 동안 유속을 평균하여 구한 잔차류는 평균기간에 따라 달라질 수 있음 을 의미한다.

Fig. 20은 14일(좌), 28일(중앙) 동안 유속을 평균하여 구한 잔차류와 14일 동안 평균한 유속과 28일 동안 평균한 유속의 차이(좌)를 나타낸 것이다. 마찬가지로 Fig. 21은 15, 30일 동안의 잔차류와 그 차이를, Fig. 22은 16, 32일 동안의 잔차류 와 그 차이를 나타낸 것이다. 14일과 28일, 15일과 30, 16일과 32일 동안 평균한 잔 차류의 유속과 패턴은 크게 다르지 않다. 그러나 15일 동안 평균하여 구한 잔차류 와 30일 동안 평균하여 구한 잔차류의 유속 차이가 14일과 28일 동안 평균하여 구 한 잔차류의 유속 차이나, 16일과 30일 동안 평균하여 구한 잔차류의 유속 차이보 다 작다. 즉, 8개의 조석 분조가 함께 존재하는 현재의 모델에서 조석 잔차류를 계 산하기 위해서는 약 15일정도의 유속을 적분하는 것이 적당하다고 생각된다.

15일 동안 유속을 평균하여 계산한 조석 잔차류는 연안을 따라서 유속이 크며 특 히 우리나라 남서연안 끝, 중국 항주만, 타이완 북쪽 끝에서 유속이 크다. 우리나라 서쪽 연안을 따라서 북항류가 존재하며 경기만 남쪽에서 서쪽으로 방향을 바꾸어 황해 중앙부에 남항류가 나타난다. 서한만 연안을 따라서 반시계 방향의 흐름이 나 타나며 서한만 외해에서는 시계방향 흐름이 나타난다. 또한 중국 양자강 하구 북쪽 에(31°~33°N) 2개의 방향이 서로 반대인 강한 와류가 존재하며 반시계 방향의 와 류에 의하여 중국 연안에서 남쪽으로의 흐름이 나타난다. 이러한 특징은 Jung et

Fig. 18 One lunar day averaged residual current according to moon phases. (upper left : waxing gibbous, upper right : full, lower left : waning gibbous, lower right : third quarter)

Fig. 19 Residual currents averaged for 7(left) and 14(right) lunar days.

al.(2001)이 M₂분조만을 고려하여 수치모델로 계산한 중국 연안의 잔차류 특징과는 뚜렷한 차이를 보인다. 그들은 중국 동쪽 연안을 따라서 북항류의 흐름이 존재하고 33°~34°N에서 시계방향의 와류가 나타나는 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 M₂ 분조만을 고려하여 잔차류를 계산하였으나 그 결과는 8개 분조를 고려하여 계산한 경우와 유속의 크기에 있어서는 차이가 나타났으나 그 패턴은 변하지 않았다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 중국 동쪽 연안은 수심 조절에 의한 지형 변화가 큰 곳이 다. 최소수심을 10m로 하여 잔차류를 계산한 경우 잔차류 패턴이 Jung et al.의 것 과 크게 다르지 않았다. 그러므로 중국 동쪽 연안의 잔차류 패턴이 기존의 연구와 다른 경향을 보인 것은 수심 조절 효과에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 20 Residual currents averaged for 14(left), 28(center) lunar days and their magnitude difference(right)

Fig. 21 Residual currents averaged for 15(left), 30(center) lunar days and their magnitude difference(right)

Fig. 22 Residual currents averaged for 16(left), 32(center) lunar days and their magnitude difference(right)

제 4 장 결론 및 토의

본 연구에서는 연안역의 수심, 해저마찰계수, 수평확산계수 조정에 따른 조석 모 델의 민감도를 분석하였다. 이를 위해 우리나라 주변 해역의 조석을 재현하기 위하 여 북서 태평양의 115~150°E, 20~50°N 사이의 해역을 모델 영역으로 하는 1/12° 격자 간격의 광역 조석 모델을 수립하였다.

계산 결과 연안역의 수심 조정에 따른 조석 계산 결과의 정확도는 M₂ 분조에서 특히 크게 변화하였는데 최소수심이 10m, 25m일 때 진폭의 RMS 오차가 각각 24.30cm와 14.11cm로 약 42% 정도 오차가 감소하였다. S₂ 분조의 경우에는 10m, 25m일 때 각각 10.47cm와 7.92cm로 RMS 오차가 약 24% 정도 감소하였으며 K₁ 분조의 경우에는 각각 5.97cm와 4.42cm로 RMS 오차가 약 26% 오차가 감소하였다. 최소 수심이 30m와 35m로 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하는 양상을 보였는데 위상의 경우에도 유사한 결과가 나타났다. O₁ 분조는 다른 분조와는 약간 다른 양 상을 보였는데 최소 수심 25m 까지는 진폭과 위상 모두 RMS 오차가 최소 수심에 따라 크게 변화하지 않고 거의 일정하게 유지되다가 30m와 35m로 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하였다.

368개 연안관측 지점에서의 조석 모델로 계산된 진폭값과 관측 진폭값을 비교한 결과 최소 수심이 10m일 경우와 비교하여 최소 수심이 25m로 증가함에 따라 황해 연안의 모델 결과는 점차 증가하고 남해안의 모델 결과는 점차 감소하여 관측 값에 근접해가는 경향을 나타냈다. 일반적으로 황해·동중국해를 대상으로 한 대부분의 조석 수치모델링에 있어 나타나는 남해안과 제주도 부근의 M₂ 조석이 관측된 값보 다 크게 계산되는 경향이 있었는데 최소 수심 설정을 통한 연안역 수심 조정으로도 이러한 문제점이 크게 개선되는 결과를 얻을 수 있었다. 조석 모델로 계산된 M₂ 조 석도를 비교한 결과 특히 발해만 내에 존재하는 2개의 무조점의 위치가 최소 수십 에 따라 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 황해 내부와 제주도 남측 동중국해 대륙붕역에서의 조석 진폭도 최소 수십 조정에 따라 약 20cm 이상 차이를 나타냈 다. 해저면 마찰계수를 0.0005, 0.0015, 0.0025로 변화 시키면서 각 최소 수십별 조석 모델의 정확도를 계산한 결과 해저면 마찰 계수 0.0005의 경우에는 다른 두 경우보 다 마찰 효과가 크게 줄어 오차도 상대적으로 크게 계산되며 패턴도 다른 양상을 나타냈지만 전체적으로 최소 수십 25m 부근에서 RMS 오차가 최소가 되는 양상을 나타냈으며 위상의 경우에는 해저면 마찰계수에 따른 RMS 오차의 차이는 진폭에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 해저마찰계수 및 최소수심에 따른 평균상대오차 (ARE)를 계산해 본 결과 해저마찰계수 0.0015와 최소수심 25m의 조합이 본 모델의 경우 오차를 최소화 할 수 있는 최적 값으로 확인되었다. 수평확산계수를 조절한 경우에는 Smagorinsky 공식을 사용하지 않고 수평확산계수를 상수로 하였을 때 RMS 오차가 줄어들었다. 그러나 수평확산계수 조절에 의한 모델의 개선 정도는 최 소수심과 해저마찰력의 조절에 의한 모델의 정확도 개선 정도에 비하여 작았다.

본 연구에서는 비교적 간단한 입력 변수 값의 조절을 통하여 모델 결과가 어느 정도 변화할 수 있는지를 검토하였다. 그 결과 연안역의 수심을 조절하는 경우에 모델의 결과가 크게 달라지는 것으로 확인되었다. 일반적으로 연안역의 조석 특성 은 수심 분포에 매우 민감하다. 수심은 해저마찰에 의한 조석 에너지의 감쇄의 크 기를 좌우할 뿐만 아니라 조석파 전파 방향에도 영향을 미친다. 황해 특히 발해만 과 같은 반 폐쇄성 해역에서의 수심 분포는 반일주기 혹은 일주기 조석파의 공명 (resonance) 특성을 좌우한다. 연안역의 수심 조정은 이러한 효과들을 통해 황해와 동중국해의 조석 특성에 작지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 본 연구 에서는 고려하지 않았지만 모델 격자의 크기로 좌우되는 모델 분해능(model resolution)은 연안역 수심 자료 조정에 있어 또 다른 변수가 될 수 있다. 예를 들어 최근 개발되는 둥지형 조석모델(nested tide model)의 경우에는 서로 다른 격자체계 의 모델을 동적으로 결합하는 모델로 국지적으로 보다 상세하고 정확한 수심 자료 의 입력이 가능하며 상세역에서는 연안역의 조간대 노출 효과 고려할 수 있어 현실 적인 조석 재현이 가능하다(홍, 2000). 이러한 모델을 적용할 경우에는 최소 수심 설정과 같은 연안역 수심 조정은 의미가 없으며 보다 정확한 수심 자료의 입력이 중요할 것으로 판단된다.

민감도 분석을 통하여 개선된 모델의 결과를 15일(태음일)동안 시간 평균하여 조 석 잔차류를 구하였다. 우리나라 서남쪽 끝, 경기만, 중국 항주만, 타이완 북쪽 끝에 서 유속이 강하게 나타났으며 우리나라 서쪽 연안을 따라서 북항류가 나타나며 경 기만 남쪽에서 서쪽으로 방향을 바꾸어 황해 중앙에서 남항류가 나타났다. 또한 중 국 양쯔강 하구 북쪽에 방향이 서로 반대인 두개의 와류가 나타났다.

본 연구에서는 아주 간단한 시간 평균을 통하여 잔차류를 계산하였으나 조화 분 석을 통하여 재구성된 시계열을 원시 자료에서 제거하는 방법으로 잔차류를 계산하 고, 둘 사이의 차이를 분석해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

이종찬, 김창식, Matsumoto, K., Ooe, M., 2001, Topex/Poseidon 고도계자료를 이용 한 북동 아시아 해역의 조석산정. 한국해양학회지, 6(1), 1-12.

홍성진, 2000. 새만금 해역의 방조제 건설에 따른 황해조석현상변화의 수치적 연구. 석사학위논문, 성균관대학교.

Choi, B.H., 1980, A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Korea Ocean Reserch and Development Istitute Report 80–02.

IHO, 1979, Tidal constituent bank station catalogue.

Kang S.K., Lee S.R. and Lie H.J., 1998, Find Grid Tidal Modeling of the Yellow and East China Seas. Con. S. R. 18, 739–772.

Kantha, L. H., 1995, Barotropic tides in the global oceans from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides 1. model description and results. Journal of Geophysical Research, 100(C12), 25, 283–25, 308.

K.T. Jung, H.W. Kang, J.K. So and H.J. Lee, 2001, A Model-generated Circulation in the Yellow Sea and the East China Sea : 1. Depth-mean Flow Fields, Ocean and Polar Research, 23(3), 2223-242

Lee, H. J., Jung, K. T., So, J. K. and Chung, J. Y., 2002. A three-dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea in the presence of M_2 tide. Continental Shelf Research, 22(1), 67–91.

Le Provost, C,. and F. Lyard, 1998, Energetics of the M_2 barotropic ocean tides: An estimate of bottom friction dissipation from a hydrodynamic model, Prog. Oceanogr., 40, 37–52. Matsumoto, K., T. Takanezawa and Ooe, M., 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimetry data into hydrodynamic model: A Global Model and a Regional Model around Japan. Journal of Oceanography 55, 567-581.

Mellor, G. L., 1998. Users guide for a three dimensional primitive equation numerical model. 41pp.

Nishida, H., 1980, Improved tidal charts for the western part of the North Pacific Ocean. Report of Hydraulic Researches, 15, 55-70.

Odamaki, M., 1989, Co-oscillating and independent tides of the Japan Sea. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 45, 217-232.

Ogura , S., 1933, The Tides in the Seas adjacent to Japan, Bulletin of the Hydrographic Department, 7, 1-189.

So, J. K., 2000, Analytical and numerical studies of the M_2 tide in the Yellow Sea and the East China Sea. Ph.D. Dissertation, Seoul National University.