

## 동북아시아 조석 모델의 최소수심에 대한 민감도 분석 A Sensitivity Test on the Minimum Depth of the Tide Model in the Northeast Asian Marginal Seas

이호진\* · 서옥희\*\* · 강현우\*\*

Ho Jin Lee\*, Ok Hee Seo\*\* and Hyoun-Woo Kang\*\*

**요 지** : 북서태평양의 115~150°E, 20~52°N 사이의 해역을 1/12° 격자망으로 구성한 광역 조석 모델을 수립, 연안역 수심 조정이 전체 조석 모델 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 최소 수심을 10 m에서 35 m까지 5 m 간격으로 증가시키며 계산된 모델의 정확도를 비교한 결과,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  진폭의 정확도가 최소 수심이 25m일 경우 최소 수심 10 m인 경우와 비교하여 각각 약 42%, 32%, 26% 정도 개선되는 것으로 나타났다. 제주도 주변 해역의  $M_2$  조석 진폭은 연안역 수심 조정에 따라 약 20 cm 이상 차이를 나타냈으며 발해만 내에 존재하는 무조점의 위치도 크게 변화하였다. 해저마찰계수 및 최소수심에 따른 평균상대오차(ARE)를 계산해 본 결과 해저마찰계수 0.0015와 최소수심 25 m의 조합이 오차를 최소화 할 수 있는 최적 값으로 확인되었다.

**핵심용어** : 연안역, 최소 수심, 조석모델링

**Abstract** : The effect of depth correction in the coastal sea has been investigated through a series of tide simulations in the area of 115~150°E, 20~52°N of northwestern Pacific with 1/12° resolution. Comparison of the solutions varying the minimum depth from 10m to 35 m with the 5m interval shows that the amplitude accuracies of  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  tide using the minimum depth of 25 m have been improved up to 42%, 32%, 26%, respectively, comparing to those using the minimum depth of 10m. The discrepancy between model results using different minimum depth is found to be up to 20 cm 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 25 m, respectively.

**Keywords** : coastal sea, minimum depth, tidal modeling

### 1. 서 론

연안의 수심 자료는 각 국가별로 군사적 또는 상업적인 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 제공되는 1/30° 해상도의 DBDB2등의 수치 수심 자료 등도 천해 및 연안 부근의 수심자료의 신뢰도는 높지 않

은 것으로 알려져 있다(Kantha, 1995; Lefevre et al., 2000).

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 수심자료인 ETOPO5를 이용하여 황해와 동중국해의 조석 모델링을 수행하였으며 개방경계의 위치, 정확한 자료의 입력, 해저면 마찰

\*한국해양대학교 해양환경생명과학부(Corresponding author: Ho Jin Lee, Division of Marine Environment & Bioscience, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea, hjlee@hhu.ac.kr)

\*\*한국해양연구원 해양에너지·환경개선연구사업단(Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

계수의 조정과 더불어 수심 자료의 수정, 특히 상대적으로 부정확성이 큰 연안역의 수심 조정이 조석 계산의 정확도를 크게 향상 시키는 것으로 보고하였다.

황해는 낮은 수심과 복잡한 지형 등의 영향으로 조차가 크고 조석의 형태도 매우 복잡한 것으로 유명하다. 황해와 우리나라 남해 연안의 국지 조석을 재현하는 경우에는 일반적으로 조간대의 노출과 침수를 고려하는 이동 경계(moving boundary)를 고려해야 한다. 그러나 북서 태평양 일부를 포함하는 광역 모델의 경우에는 격자 간격이 최소 수 km 이상이므로 이러한 연안역의 노출 효과를 고려한다는 것은 비현실적이라 할 수 있다. 이 등(2001)은 1/12° 격자 간격의 북동 아시아 해역 조석 모델에서 임계 최소 수심을 10 m로 설정하여 이 보다 낮은 연안역의 수심을 10 m의 일정한 깊이로 변경하여 모델을 수행하는 방법으로 연안역의 노출 효과를 포함하지 않았다.

상대적으로 큰 격자 규모를 가지는 광역 모델에서 연안 부근 해역의 수심 조정은 계산 결과의 정확도를 크게 좌우할 수 중요한 변수가 될 것으로 예상된다. 특히 연안역의 수심 자료는 자료 자체가 불확실성을 내포하고 있어 연구자에 따라 자료를 수정하여 사용하고 있는 것이 현실이다. 이러한 수심 자료 조정은 객관적인 기준이 있는 것이 아니라 연구자에 따라 달라질 수 있는 상당히 주관적인 작업이라 할 수 있다. 그러므로 수심 자료 수정의 효과를 보다 정량적으로 규명하고 객관적인 수심 자료 수정의 근거를 제시하기 위해 수심 자료 수정에 따른 모델 민감도 분석 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 북서 태평양 일부 해역을 포함하는 광역 조석 모델링에 있어 연안역의 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 경위도 방향으로 각각 1/12° 간격의 격자를 사용하는 2차원 조석 모델을 수립하였다. 비교적 간단하고 객관적인 연안역의 수심 조정을 위해 수심 자료 중 임계 수심 이하 해역의 수심을 일괄적으로 임계 수심 값으로 일정하게 하는 방법을 사용하였다. 임계 최소 수심 값을 10 m에서 35 m까지 5 m 간격으로 증가 시키면서 6회의 조석 모델링을 수행하였으며 각 모델 결과들의 정확도를 총 368개의 연안 관측 자료와의 비교를 통해 정량적으로 계산하였다. 또한 해저면 마찰 계수를 0.0005, 0.0015, 0.0025로 변화시키면서 각 최소 수심별 조석 모델의 정확도를 계산하는 방법

으로 해저면 마찰계수에 따른 연안역 수심 조정 효과의 변화 가능성도 검토하였다.

## 2. 수치 모델

본 연구에 사용된 수치 모델은 프린스턴 대학의 해양 순환 모델인 POM(Princeton Ocean Model)의 2차원 수심 적분 모드이다. POM은 유한 차분 모형으로 수평적으로는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며 원시 방정식(primitive equation)의 수치해를 계산한다(Mellor, 1998). 수평 운동량 확산 계산을 위한 수평 와동 점성 계수는 격자 크기와 유속 구배에 비례하는 식으로 계산되며(Smagorinsky, 1963) 비례 상수는 0.1로 주었다. 해저면 마찰력은 유속의 제곱에 비례하는 비선형 해저면 마찰력(quadratic bottom friction)을 사용하였다.

모델 영역은 동경 115°~150°E, 북위 20°~52°N이며 경위도 방향으로 1/12° 크기의 격자로 모델 격자망을 구성, 모델 격자수는 총 421×385개이다. 수심 자료는 미국 국립 지리 자료원(National Geographic Data Center)에서 제공한 1/12° 해상도의 수치 수심 자료인 ETOPO5를 사용하였으며 해양조사원에서 발행한 해도를 근간으로 하여 한반도의 해안선을 일부 수정하였다(Fig. 1).

20°N 위도선과 150°E 경도선을 따라서 개방경계가 위치하며 52°N, 115°E의 경위도선 일부 격자에서도 개방 경계가 존재한다. 개방 경계에서의 조위는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_0(i, j, t) = \sum_{k=1}^8 f_k A_k(i, j) \cos(\omega_k t - P_k(i, j) + \chi_k) \quad (1)$$

여기서  $\zeta_0(i, j, t)$ 는 개방경계( $i, j$ )격자점에서의 조위를 나타내고 아래첨자  $k$ 는 분조를 의미하며  $A_k(i, j)$ 는 ( $i, j$ )격자점에서의 진폭,  $P_k(i, j)$ 는 위상,  $\omega_k$ 는 분조의 각속도로 본 연구에서는  $M_2, S_2, K_1, O_1, K_2, N_2, P_1, Q_1$  등 주요 8개 분조를 고려하였다.  $f_k$ 는 18.6년 주기의 달 공전궤도 변화에 따른 변동을 고려하는 노드 인수(nodal factor)이고  $\chi_k$ 는 실시간 조석 계산을 위한 천문 인수(astronomical arguments)이다. 개방경계에서 진폭( $A_k(i, j)$ )과 위상( $P_k(i, j)$ )은 Matsumoto et al.[2000]이 TOPEX/POSEIDON 자료를 동화시켜 계산한 전 지구 조석 모델 결과로부터 산정된다.

개방경계를 따라 경계면의 법선 방향 유속 성분은 방사 경계 조건(radiation boundary condition)으로 계산된다. 예를 들어 동측 개방경계에서의 유속은 다음과 같이 계산된다.

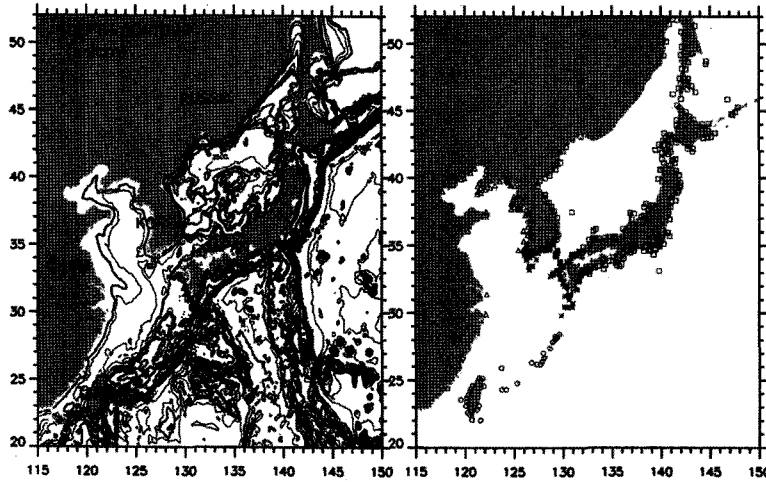


Fig. 1. The topography of the study area (left) and coastal tidal stations where the observed tidal data are compared with model results(right).

$$u = \frac{\sqrt{gh}}{h}(\zeta - \zeta_0) \quad (2)$$

위식에서  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심을 나타낸다.  $\zeta_0$ 는 (1) 식에 의해 계산된 개방경계에서의 조위를 나타내며  $\zeta$ 는 개방경계에서 연속방정식으로 계산된 해수면 변위이다. (2)식에 의해 연속방정식으로 계산된 해수면 변위( $\zeta$ )가 조위값( $\zeta_0$ ) 보다 클 경우는 모델영역 외부로 빠져나가는 유속이, 반대의 경우에는 영역 내부로 유입되는 유속이 계산된다. 개방 경계면의 접선 방향 유속 성분은 없는 것으로 가정했다. 육지 경계면에 수직인 유속 성분을 0으로 처리하였으며 모델의 초기조건은 정지상태로 유속과 조위를 0으로 주었다.

모델 계산 시간간격(time-step)은 CFL(Courant-Friedrichs-Levy)조건을 고려하여 6초로 주었으며 안정화를 위한 5일간의 예비 모델 수행( preliminary model run) 후 30일간의 조석 시뮬레이션을 추가 수행하였다. 매 1시간마다 해수면 자료를 저장하여 총 720시간의 자료를 조화분석(harmonic analysis)한 후 총 368개 연안 조석 관측 지점에서 관측 자료로부터 구한 조화상수 값과 비교하였다. 368개 연안 관측 지점의 위치는 Fig. 1에 나타났다. 비교에 사용된 자료는 이 등(2001)의 연구에서도 사용된 바 있는 International Hydrographic Office database(IHO, 1979)로 이 중 중국 자료와 1달 이하의 짧은 관측 주기의 자료를 제외한 368개의 자료만을 사용하였다. 일반적으로 황해와 동중국해는 반일 주기 조석 성분이 우세한 반면 동해는 일주기 조석 성분이 우세한 것으로 알려져 있다. 이러한 해역별 특성을

고려하여 대상 해역을 황해 연안( $\Delta$ ), 우리나라 남해와 큐슈 부근 해역(\*), 동중국해( $\circ$ ), 동해와 일본의 태평양 연안( $\square$ ) 등 4개의 그룹으로 분류하여 비교하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 최소 수심별 RMS 오차

광역 조석 모델링에 있어 연안 부근 해역에 국한된 수심 조정이 모델 결과에 미치는 영향을 규명하기 위해 모델 최소 수심 값을 지정하였으며 수심 자료 중 최소 수심 보다 얇은 연안 부근 해역의 수심은 모두 최소 수심 값으로 일정하게 수정 되도록 하였다. 최소 수심으로 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m 등 6가지 경우를 고려하였으며 각 최소 수심별 조석 계산은 주요 4개 분조의 조화 분석을 위해 30일간 수행되었다. 해저마찰력 계산을 위해 필요한 해저면 마찰계수로는 Lefevre et al.(2000)가 황해동중국해 조석 모델 민감도 분석 결과를 근거로 제시한 0.0015의 값을 사용하였다. Table 1은 4개 분조에 대한 368개 연안 관측 자료와 각 최소 수심별 모델 결과를 비교하여 진폭과 위상의 RMS 오차를 계산한 것이다.

모든 분조에서 연안역의 수심 조정에 따라 RMS 오차가 변화하였는데 특히  $M_2$  분조의 변화폭이 다른 분조에 비해 크게 나타났다.  $M_2$  분조 진폭의 경우, 최소수심을 10m로 설정했을 때 RMS 오차는 24.30cm이었으며 최소 수심이 증가함에 따라 RMS 오차가 감소하여 25m일 때 14.11cm로 약 42% 정도 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최소수심이 25m보다 커질수록 오차가 다시

**Table 1.** RMS error of model results depending on minimum depths (bottom friction coefficient 0.0015)

Tidal components		Minimum depth					
		10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	35 m
$M_2$	Amp(cm)	24.30	19.55	15.96	14.11	17.58	22.80
	Pha(°)	25.21	22.53	19.33	18.58	20.42	24.59
$S_2$	Amp(cm)	10.47	9.44	9.20	7.92	7.11	8.15
	Pha(°)	25.45	22.31	19.60	22.04	23.49	24.38
$K_1$	Amp(cm)	5.97	5.29	4.69	4.42	4.50	4.95
	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

증가하여 35 m의 경우에 RMS 오차는 22.80 cm로 증가한다. 위상의 경우에도 최소 수심이 10 m일 때 25.21° 내외에서 25 m일 때 18.58°로 약 8° 정도 개선되었다. 진폭과 같이 위상의 경우에도 25 m 최소 수심을 기준으로 오차가 다시 증가하여 35 m의 경우에는 24.59°로 증가한다.

$S_2$  분조도  $M_2$  분조와 유사한 양상을 나타내는데 진폭의 경우 최소수심 10 m일 때 10.47 cm의 RMS 오차에서 최소 수심이 25 m일 때 7.92 cm로 24.3% 감소하였으며 최소수심이 30 m일 때 7.11 cm로 약 32% 정도 오차가 감소한다. 위상의 경우에는 최소 수심이 20 m일 때 RMS 오차가 19.6°로 가장 작았다.  $K_1$  분조 진폭의 RMS 오차는 최소수심이 10 m일 때 5.97 cm이고 최소 수심이 25 m일 때 4.42 cm로 약 26% 오차가 감소하였으며 위상은 최소 수심 20 m일 때 13.6°로 가장 작고 수심 조정에 따른 RMS 오차의 변화폭은 2.5° 정도로 비교적 작았다.  $O_1$  분조는 최소수심이 10 m, 15 m, 20 m일 경우에는 진폭과 위상의 RMS 오차가 각각 3.04 cm~3.22 cm, 10.94°~11.31° 거의 일정한 값을 나타냈으며 최소 수심이 30 m 이상으로 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하여 35 m일 때 오차는 5.87 cm와 15.2°로 증가했다.

Lefevre et al.(2000)은 ETOPOS 자료 중 연안역의 수심을 영국과 프랑스 해군의 해도 자료를 이용하여 수정한 후  $M_2$  분조만을 고려하여 시뮬레이션 한 결과 연안역 수심 조정 전과 후의 RMS 오차가 각각 44.82 cm와 28.58 cm로 약 36%의 오차가 개선되는 것으로 보고하였다.  $K_1$  분조만을 고려할 경우에는 연안역 수심 조정 전과 후의 RMS 오차가 각각 10.04 cm와 7.01 cm로 약 30% 정도 오차가 개선되었다. 참고로 Lefevre et al.(2000)의 결과는 Fig. 1에서 동해와 일본의 태평양 연안(□) 관측점을 제외한 황해와 동중국해, 우리나라 남해 연안의 192개 연안 관측 자료를 비교한 결과이다. 본 연구에서 사용된 연안 관측 자료 수와 다소 차이가 있지만 최소 수심을 조정하는 방법

을 통한 연안역의 수심 조정에 의해 Lefevre et al.(2000)과 거의 같은 정도의 정확도 개선 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서도  $M_2$  분조만을 고려하여 각 최소 수심별 조석 모델링을 수행하였다. 그 결과 8개 분조를 동시에 고려했을 경우와 유사한 양상을 확인 할 수 있었는데 최소 수심이 10 m일 때 22.46 cm이던 RMS 오차가 최소수심이 증가함에 따라 오차가 감소하여 25 m일 때의 RMS 오차는 13.23 cm로 약 41% 정도 오차가 감소하였다. 25 m를 기점으로 최소 수심이 30 m, 35 m로 증가하면서 RMS 오차도 다시 증가하는 양상을 나타냈다. RMS 오차의 전반적인 크기는 8개의 분조를 동시에 고려한 경우에 비해  $M_2$  분조만을 고려한 경우가 상대적으로 작은 값을 나타냈다.

### 3.2 연안 관측 자료와 모델 결과 비교

Fig. 2는 368개 연안 관측 지점에서 관측된  $M_2$  분조의 진폭(y축)과 조석 모델로 계산된 진폭(x축)을 비교한 그림이다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 황해 연안 관측점은 △로, 우리나라 남해와 류슈 연안은 \*, 동중국해는 ○, 동해와 일본의 태평양 연안 □ 기호로 구분하여 표시하였다.

최소 수심을 10 m로 설정할 경우 전체적으로 황해 연안(△)에서의 모델 결과는 관측에 비해 작게 계산된 반면 우리나라 남해안과 류슈 연안(\*)에서의 모델 결과는 관측에 비해 더 크게 계산된 경향을 확인할 수 있다(Fig. 2(a)). 이러한 결과는 기존의 황해동중국해  $M_2$  조석 모델링에서도 재현된 바 있는데 해저 마찰계수를 증가하거나 감소하는 방법으로 모델 결과를 수정할 경우에는 모델 결과 값 전체가 감소하거나 증가하는 결과를 초래하기도 했다(So, 2000; Lee et al., 2002). 그러나 본 연구와 같이 최소 수심을 설정하여 연안역의 수심을 수정할 경우에는 기존의 결과와는 다른 결과를 얻을 수 있었는데 Fig. 2(b), 2(c)와 2(d)와 같이 최소 수심이 15 m, 20 m, 25 m로 증가함에

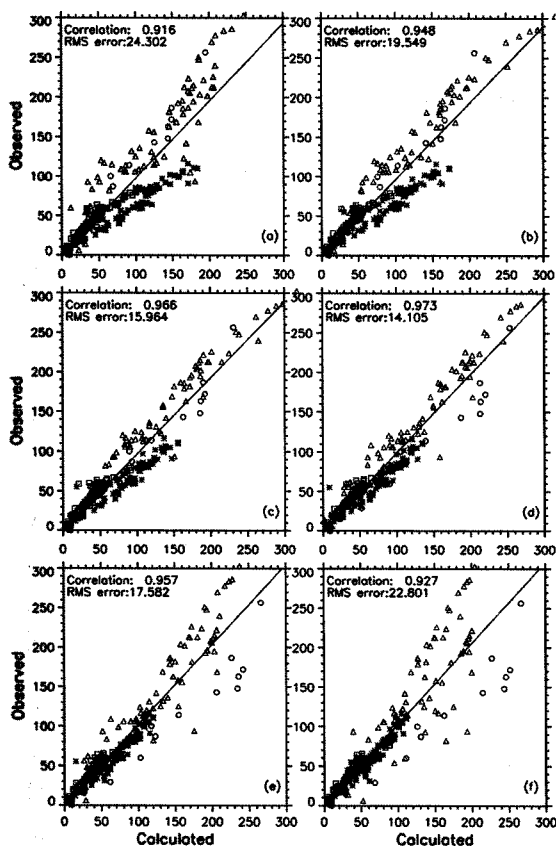


Fig. 2. Comparison between observed tidal amplitude of  $M_2$  and calculated values with the minimum depth of (a) 10 m, (b) 15 m, (c) 20 m, (d) 25 m, (e) 30 m and (f) 35 m.

파라 황해 연안( $\Delta$ )의 모델 결과는 점차 증가하는 반면 남해안( $*$ )의 모델 결과는 점차 감소하여 관측 값에 근접해가는 것을 확인할 수 있다. 최소 수심이 25 m일 경우에는 다른 경우에 비해 모델 결과와 관측 값이 가장 잘 일치하였으며 모델 결과와 관측 사이의 상관도는 0.97로 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 최소 수심이 35 m로 증가함에 따라 황해 연안의 모델 결과는 다시 관측에 비해 작아지고 동중국해( $\circ$ )의 모델 결과는 관측에 비해 커져 상관도가 0.93으로 낮아졌다.

Fig. 3은  $S_2$  분조의 관측 진폭과 모델 결과를 비교한 그림이다. 전체적으로  $M_2$  분조의 결과와 유사한 경향을 보여준다. 즉, 최소 수심이 10 m일 경우에는 황해 연안( $\Delta$ )에서의 모델 결과는 관측에 비해 작은 값을 남해안과 큐슈 연안( $*$ )에서의 모델 결과는 관측에 비해 큰 값을 나타내며 최소 수심이 증가함에 따라 황해 연안의 모델 결과는 점차 증가하여 관측 값에 접근하며 남해안과 큐슈 연안의 모

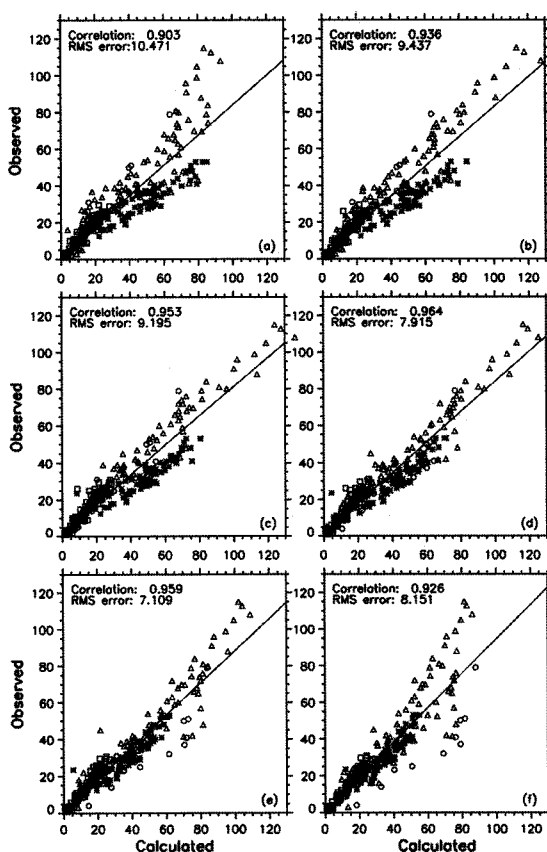


Fig. 3. Comparison between observed tidal amplitude of  $S_2$  and calculated values with the minimum depth of (a) 10 m, (b) 15 m, (c) 20 m, (d) 25 m, (e) 30 m and (f) 35 m.

델 결과는 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 최소 수심이 25 m일 경우 모델 결과와 관측 사이의 상관도는 0.96으로 가장 높은 상관관계를 나타냈으며 최소 수심이 30 m일 경우 모델 결과와 관측 값이 가장 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 최소 수심이 35 m로 증가함에 따라 상관도는 0.93으로 낮아지며  $M_2$  분조와 같이 황해 연안의 모델 결과는 다시 관측에 비해 작아지고 동중국해( $\circ$ )의 모델 결과는 관측에 비해 커지는 경향을 나타낸다(Fig. 3(f)). 그러나  $M_2$  분조와 비교할 때 최소 수심이 30 m일 경우에도 전체적으로 관측에 비해 모델 결과가 약간 크게 계산된 경향이 있다.

### 3.3 $M_2$ 조석도

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 최소 수심을 10 m와 25 m로 설정하여 계산한 모델 결과로  $M_2$  분조의 조석도이다. 위상은 Greenwich 자오선을 기준으로 한 값이고 진폭의 단위는 cm이다. 조석 모델 결과 동해에서는 대한 해협 북동쪽

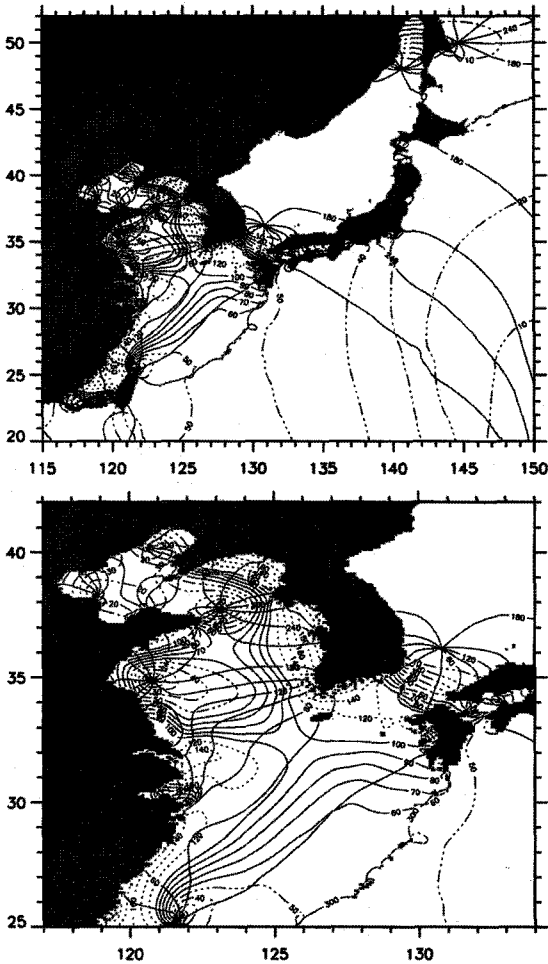


Fig. 4.  $M_2$  tidal chart calculated with the minimum depth of 10 m.

과 동해 북부 타타르 해협 부근에 총 2개의 무조점이 재현되었다. 모델로 재현된 무조점의 위치는 Nishida(1980)와 Odamaki(1989)가 제시한  $M_2$  조석도의 무조점 위치와 거의 일치한다.  $180^\circ$  등조위선의 위치를 제외하고는 동해에서는 최소 수심 조정에 따른 모델 결과의 차이가 크게 나타나지 않는다.

반면 상대적으로 수심이 얇은 황해에서는 두 모델 결과의 차이가 상대적으로 뚜렷하게 나타나는데 특히 발해만 내에 존재하는 2개의 무조점의 위치가 최소 수심에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 최소 수심을 10 m로 설정할 경우  $38^\circ\text{N}$ ,  $119^\circ\text{E}$  부근에 무조점이 위치하는데 반해 최소 수심을 25 m로 설정할 경우에는  $38^\circ\text{N}$ ,  $120^\circ\text{E}$  부근에 무조점이 위치한다. Ogura(1933)와 Nishida(1980)의 조석도에 제시된 무조점의 위치와 비교할 때 최소 수심 25 m

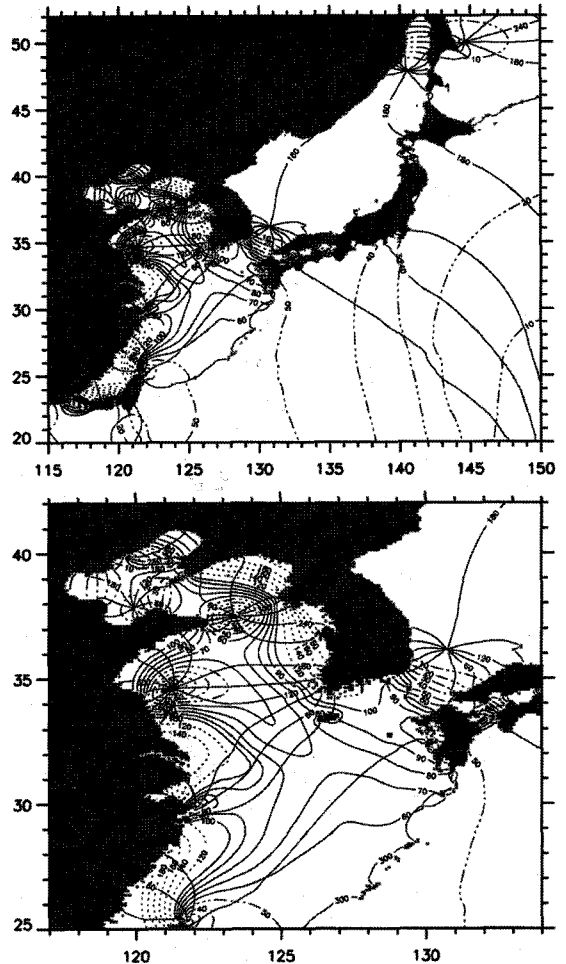


Fig. 5.  $M_2$  tidal chart calculated with the minimum depth of 25 m.

를 사용한 모델 결과는 약간 동쪽으로 치우친 반면 최소 수심 10 m를 사용한 모델 결과는 상대적으로 서쪽으로 크게 치우쳐 탈무조점(degenerated amphidrom)의 형태를 보여준다. 요동반도 서측 요동만 내에서의 무조점은 두 모델 결과 모두 육지 쪽으로 치우쳐 탈무조점의 형태를 나타내는데 최소 수심 10 m일 때의 결과에 비해 25 m일 경우의 무조점이 서쪽으로 더 치우쳐 존재한다.

등조위선 분포에 있어서도 오키나와 해구 부근의 60 cm 등조위선을 제외하고는 동중국해의 대륙붕역과 황해 내부에서 두 모델 결과가 명확히 구분된다. 최소 수심을 10 m로 설정할 경우에는 100 cm의 등조위선이 제주도 주변을 둘러 큐슈 서안에 연결되어 있으며 우리나라 서남해안을 따라서는 140 cm의 등조위선이 존재한다. 제주도 남측 동중국해 대륙붕역에서의 조석 진폭은 최대 90 cm에 달한다

(Fig. 4). 그러나 최소 수심이 25 m일 경우에는 70 cm의 등조위선이 제주도 서측 해역까지 혀 모양으로 확장된 형태를 띠며 80 cm의 등조위선이 제주도 서안을 걸쳐 큐슈 남단까지 연결되어 있다. 서남해안을 따라서는 100 cm의 등조위선이 존재하고 제주도 남측 동중국해 대륙붕역에서의 조석 진폭도 70 cm 내외로 감소한다(Fig. 5) 황해동중국해를 대상으로 한 대부분의 조석 수치모델링에 있어 제주도 부근 해역의  $M_2$  조석이 관측된 값보다 크게 계산되는 경향이 있는데(이 등, 2001) 본 연구에서는 최소 수심을 25 m로 설정하여 연안역의 수심을 조정할 결과  $M_2$  조석의 진폭이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

**3.4 해저면 마찰계수와 최소 수심**

최소 수심 설정을 통한 연안역의 수심 조정은 천해에서의 해저마찰력에 의한 조석 에너지의 감쇄에 영향을 미칠 것으로 추측된다. 따라서 연안역의 수심 조정 효과는 해저면 마찰계수의 크기에 따라 변화될 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 이러한 효과를 검토하기 위해 해저면 마찰계수를 0.0005와 0.0025로 변화시키면서 각 최소 수심별 조석 모델링 수행, 결과를 비교하였다. Fig. 6은 최소 수심별 진폭의 RMS 오차를 비교한 그림이다. 해저면 마찰계수가 0.0005일 때  $M_2$  분조의 진폭은 최소 수심 10 m에서 RMS 오차가 19 cm 정도로 가장 작았으며 20 m까지 거의

일정하게 유지되다가 25 m 이상에서 급격하게 증가한다. 반면 해저면 마찰 계수가 0.0025일 때는 마찰 계수가 0.0015일 때의 결과와 유사한 패턴을 보여주는데 최소 수심이 증가함에 따라 RMS 오차가 감소하여 25 m의 최소 수심에서 RMS 오차가 21 cm 내외로 가장 작은 값을 나타냈다. 전반적으로 해저면 마찰계수가 0.0025일 때의 오차가 0.0015의 경우 보다 크게 나타났으며 최소 수심이 35 m일 경우에는 두 경우의 RMS 오차가 거의 일치하였다. 전체적으로 해저면 마찰 계수 0.0005의 경우에는 다른 두 경우보다 마찰 효과가 크게 주어 오차도 상대적으로 크게 계산되며 패턴도 다른 양상을 나타내는 것으로 판단된다.  $S_2$  분조도  $M_2$  분조와 유사한 경향을 나타내는데 0.0005의 마찰계수를 사용할 경우 RMS 오차는 다른 두 경우에 비해 상대적으로 더 컸으며 0.0015와 0.0025의 경우에는 최소 수심이 증가함에 따라 오차도 감소하여 최소 수심이 30 m 일 때 최소 오차를 나타냈다.  $K_1$  분조의 경우에는 해저면 마찰계수가 0.0025를 사용할 때 오차의 변화폭이 매우 작았지만 0.0015일 때와 같이 최소 수심이 20 m일 때 가장 작은 RMS 오차를 나타냈다.  $O_1$  분조의 경우에는 20 m까지는 거의 일정하다가 최소 수심이 증가하면서 오차도 같이 증가하는 양상을 나타낸다.

위상의 경우에는 최소 수심별 RMS 오차에 있어 0.0015와 0.0025의 해저면 마찰 계수를 사용할 경우의 차이는 거의

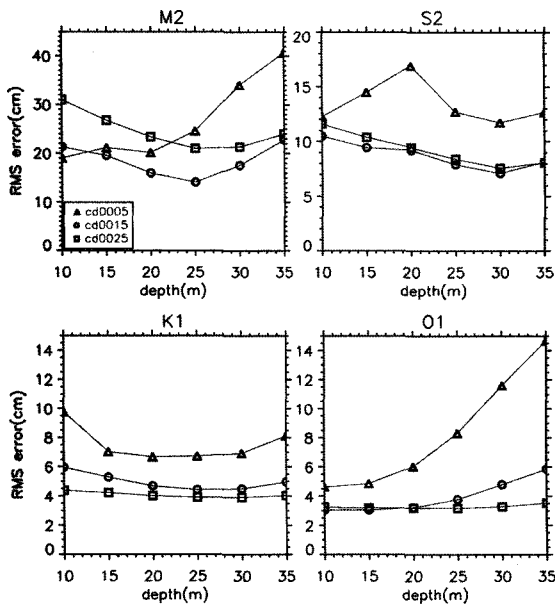


Fig. 6. RMS errors of the calculated tidal amplitudes for  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$ .

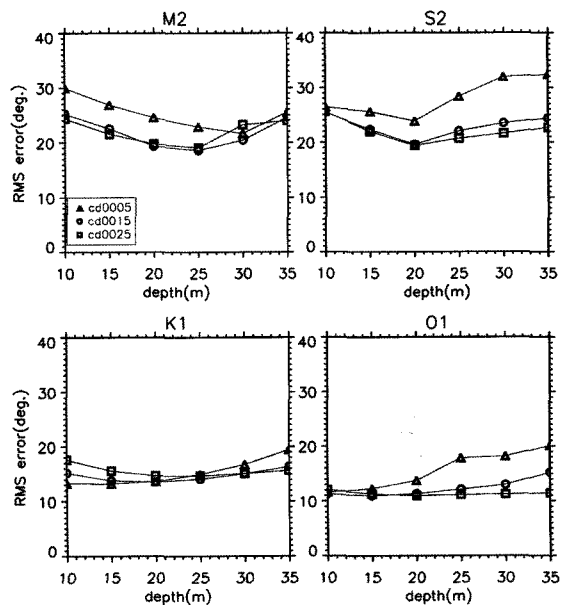


Fig. 7. RMS errors of the calculated tidal phases for  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$ .

없으며 해저면 마찰 계수를 0.0005를 사용하는 경우가 상대적으로 RMS 오차가 더 크게 나타났지만 그 차이는  $S_2$ 와  $O_1$  분조에서 최대  $10^\circ$  이내로 진폭에 비해서는 상대적으로 작게 나타났다(Fig. 7). 이러한 결과는 위상을 결정하는 변수는 조석파의 전파속도( $=\sqrt{gh}$ )이므로 해저면 마찰 계수보다는 지형에 의한 영향을 더 크게 받은 결과로 판단된다.  $M_2$ 와  $S_2$  분조에는 전반적으로 최소 수심이 증가할수록 RMS 오차가 감소하는 경향을 나타내는데  $M_2$  분조의 경우 25 m와 30 m에서 최소가 되며  $S_2$  분조의 경우 20 m에서 최소 오차를 가진다.  $K_1$  분조의 경우에도 대략 20 m 부근에서 최소 오차를 나타내며  $O_1$  분조의 경우에는 진폭의 경우와 같이 20 m까지는 거의 일정하다가 최소 수심이 증가하면서 오차도 같이 증가하는 양상을 나타낸다.

해저면 마찰계수와 최소 수심 변화를 동시에 고려하여 주어진 모델 영역에서 최적 변수 값을 결정하기 위해 각 조석 분조별 진폭의 RMS 오차를 각 분조별 평균 진폭으로 나눈 ARE(Averaged Relative Error)를 계산하였다. ARE는 다음과 같이 계산된다.

$$ARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{A_i} \quad (3)$$

여기서,  $R_i$ 는 각 분조별 RMS 오차 값이고,  $A_i$ 는 각 분조별 평균 진폭,  $N$ 은 분조의 수(=4)이다. ARE는 각 분조별 RMS

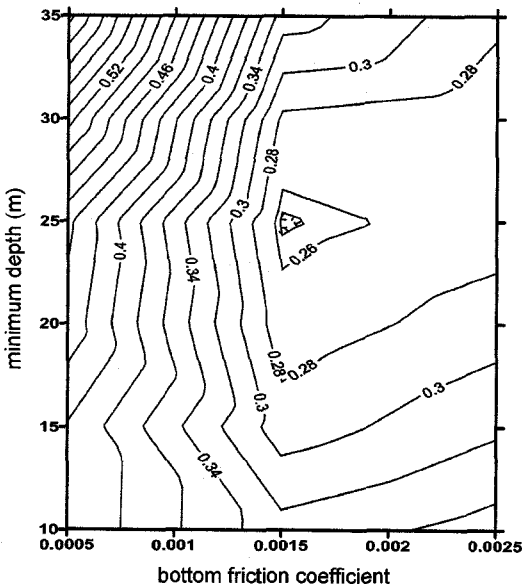


Fig. 8. Computed ARE(Averaged Relative Error) with a function of the bottom friction coefficient and minimum depth.

오차를 진폭의 평균값에 대해 정규화한 것으로서, 모델 영역 내에서의 분조별 진폭 특성을 고려한 상대적인 RMS 오차의 평균값이 된다. 즉 평균적인 모델 값과 관측 값의 차이를 백분율로 제시할 수 있다.

Fig. 8은  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  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 받을 수 있으며, 최소 수심 25 m가 모델의 정확도를 최대화 할 수 있는 최적 값으로 나타났다. 결론적으로 4개 분조로부터 구한 ARE의 분포에 따르면, 해저면 마찰계수로 0.0015를 사용하고 최소 수심을 25 m로 설정할 경우 ARE는 약 25% 내외로 다른 경우에 비해 모델의 정확도가 가장 높은 것으로 나타났다.

이 등(2001)은  $M_2$  분조만을 고려한 조석 계산의 경우에는 0.0025의 해저면 마찰계수를 사용하였으나  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  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 증가할수록 마찰계수는 감소해야 한다(Bower et al., 1991). 따라서 8개의 분조를 동시에 고려한 본 연구의 경우에는 일반적으로 조석 모델링에서 많이 사용되는 0.0025의 마찰계수에 비해 다소 작은 값인 0.0015내외에서 양호한 결과를 나타내는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 광역 조석 모델링에 있어 연안 부근 해역에 국한된 수심 조정이 모델 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 북서 태평양의  $115\sim 150^\circ E$ ,  $20\sim 50^\circ N$  사이의 해역을 모델 영역으로 하는  $1/12^\circ$  격자 간격의 광역 조석 모델을 수립하였다. 연안역의 수심 조정은 모델 최소 수심 값을 지정, 입력된 수심 자료 중 최소 수심 보다 얇은 연안 부근 해역의 수심은 모두 최소 수심 값으로 일정하게 수정하는 방법을 사용하였다. 모델 최소 수심으로



10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m 등 6가지 경우를 고려하였으며 각 최소 수심별 조석 계산은 주요 4개 분조의 조화 분석을 위해 30일간 수행되었다. 각 모델 결과들의 정확도는 총 368개 연안 관측 자료와 비교를 통해 정량적으로 계산되었다.

계산 결과 연안역의 수심 조정에 따른 조석 계산 결과의 정확도는  $M_2$  분조에서 특히 크게 변화하였는데 최소 수심이 10 m, 25 m일 때 진폭의 RMS 오차가 각각 24.30 cm와 14.11 cm로 약 42% 정도 오차가 감소하였다.  $S_2$  분조의 경우에는 10 m, 25 m일 때 각각 10.47 cm와 7.92 cm로 RMS 오차가 약 24% 정도 감소하였으며  $K_1$  분조의 경우에는 각각 5.97 cm와 4.42 cm로 심 RMS 오차가 약 26% 오차가 감소하였다. 최소 수심이 30 m와 35 m로 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하는 양상을 나타냈는데 위상의 경우에도 유사한 결과를 나타냈다.  $O_1$  분조의 다른 분조와는 약간 다른 양상을 나타냈는데 최소 수심 25 m 까지는 진폭과 위상 모두 RMS 오차가 최소 수심에 따라 크게 변화하지 않고 거의 일정하게 유지되다가 30 m와 35 m로 증가함에 따라 RMS 오차도 증가하는 결과를 나타냈다.

368개 연안관측 지점에서의 조석 모델로 계산된 진폭값과 관측 진폭값을 비교한 결과 최소 수심이 10 m일 경우와 비교하여 최소 수심이 25 m로 증가함에 따라 황해 연안의 모델 결과는 점차 증가하고 남해안의 모델 결과는 점차 감소하여 관측 값에 근접해가는 경향을 나타냈다. 일반적으로 황해동중국해를 대상으로 한 대부분의 조석 수치 모델링에 있어 나타나는 남해안과 제주도 부근의  $M_2$  조석이 관측된 값보다 크게 계산되는 경향이 있었는데 최소 수심 설정을 통한 연안역 수심 조정으로도 이러한 문제점이 크게 개선되는 결과를 얻을 수 있었다. 조석 모델로 계산된  $M_2$  조석도를 비교한 결과 특히 발해만 내에 존재하는 2개의 무조점의 위치가 최소 수심에 따라 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 황해 내부와 제주도 남측 동중국해 대륙붕역에서의 조석 진폭도 최소 수심 조정에 따라 약 20 cm 이상 차이를 나타냈다. 해저면 마찰계수를 0.0005, 0.0015, 0.0025로 변화 시키면서 각 최소 수심별 조석 모델의 정확도를 계산한 결과 해저면 마찰 계수 0.0005의 경우에는 다른 두 경우보다 마찰 효과가 크게 줄어 오차도 상대적으로 크게 계산되며 패턴도 다른 양상을 나타냈지만 전체적으로 최소 수심 25 m 부근에서 RMS 오차가 최소가 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 25 m의 조합이 본 모델의 경우 오차를 최소화 할 수 있는 최적 값으로 확인되었다.

본 연구에서는 비교적 간단한 연안역의 수심 조정만으로도 모델 결과가 어느 정도 변화할 수 있는지를 검토하였다. 일반적으로 연안역의 조석 특성은 수심 분포에 매우 민감하다. 수심은 해저마찰에 의한 조석 에너지의 감쇄의 크기를 좌우할 뿐만 아니라 조석파 전파 방향에도 영향을 미친다. 황해 특히 발해만과 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 연구에서는 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 등지형 조석모델(nested tide model)의 경우에는 서로 다른 격자체계의 모델을 동적으로 결합하는 모델로 국지적으로 보다 상세하고 정확한 수심 자료의 입력이 가능하며 상세역에서는 연안역의 조간대 노출 효과 고려할 수 있어 현실적인 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.

## 감사의 글

본 연구는 “해양기상 변화탐지 기술개발(기상연구소)”과 “공공기술연구회 협동연구사업(한국해양연구원, PG45100)”의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- 이중찬, 김창식, Matsumoto, K., Ooe, M., (2001). Topex/Poseidon 고도계자료를 이용한 북동 아시아 해역의 조석 산정. 한국해양학회지, 6(1), 1-12.
- 홍성진 (2000). 새만금 해역의 방조제 건설에 따른 황해조석현상변화의 수치적 연구. 석사학위논문, 성균관대학교.
- Bowers, D.G, Rippeth, T.P. and Simpson, J.H., (1991) Tidal friction in a sea with two equal semidiurnal tidal constituents. Continental Shelf Research, 11(2), 203-209.
- IHO (1979). Tidal constituent bank station catalogue.
- 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.
- 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.
- Lefevre, F., Provost, C. L. and Lyard, F. H., (2000). How can we improve a global ocean tidal model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 105(C4), 8707-8725.
- 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, 1-180.
- 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.

---

Received August 22, 2007

Accepted September 18, 2007