

황해·東中國海의 M_2 潮汐 殘差位 및 M_4 潮汐 生成에 대한 非線形項의 影響 Effect of Nonlinear Terms on the Generation of M_2 Tide Residual Elevation and M_4 Tide in the Yellow Sea and the East China Sea

李鍾贊* · 鄭景太* · 崔秉昊**

Jong Chan Lee*, Kyung Tae Jung* and Byung Ho Choi**

요 지 : 황해·동중국해역의 M_2 조석 잔차위 및 M_4 형성에 대한 비선형항의 영향을 2차원 수심 적분된 M_2 조석 수치모형을 이용하여 살펴보았다. 대상 해역은 황해·동중국해 전역을 포함하는 117°E - 130°E , 24°N - 41°N 해역으로 수치 모형의 해상도는 경·위도 방향으로 각각 $1/6^\circ$, $1/8^\circ$ 이며, 방사 개방 경계 조건이 사용되었다. 이류항의 영향은 음의 잔차위를 형성하는 반면 연속 방정식의 천해항의 영향은 양의 잔차위를 형성하는 상반된 효과를 보였다. M_4 성분의 생성에 대한 이류항과 연속방정식의 천해항의 기여도는 약 90% 이상으로 나타났으며, M_4 성분의 생성에 대한 2차의 저면마찰항의 기여도는 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

Abstract □ Effects of nonlinear terms on the generation of M_2 tide residual elevation and M_4 tide in the Yellow Sea and the East China Sea are investigated using a depth-integrated two-dimensional nonlinear M_2 tidal model. The model domain (117°E - 130°E , 24°N - 41°N) covers the whole region of the Yellow Sea and the East China Sea with grid resolution of $1/6^\circ$ in longitude and $1/8^\circ$ in latitude. A radiational boundary condition is used along the open boundaries. Calculations show that advection terms yield negative residual elevation, while shallow-water terms in continuity equation yield positive residual elevation. The contribution of both advection terms and shallow-water terms to the generation of the M_4 constituent is more than 90 percents, but that of quadratic bottom friction terms to the M_4 constituent is comparatively small.

1. 서 론

우리 나라 및 중국의 산업화가 가속화되면서 연안 도시를 중심으로 한 폐수 및 생활 하수 등의 오염 물질이 대량으로 황해에 유입되고 있어 황해에서의 순환 및 오염 물질의 장주기 이동 경로가 주요 관심사가 되고 있다. 그 일환으로 부표(drifter)를 이용한 관측이 시도된 바 있으며(Choi, 1993), 최근 황해에 대한 공동 연구 조사가 한국과 중국에 의해 수행되고 있으나 오염 물질의 이동 경로에 대한 확증을 얻기에는 아직 미흡한 실정이다. 오염 물질의 장주기 순환과 관련된 잔차위는 기상 조건, 대상 해역의 밀도 구배 등에 의해서 생성되기도 하나 본 연구에서는 주기성 조류의 비선형 효과에 의해

발생하는 조석 잔차류에 대하여 살펴보고자 한다. 비선형 효과는 연속 방정식의 천해항, 운동 방정식의 이류항 및 마찰항에 기인하며 조석 잔차류 외에 배조(over-tide) 및 복합조(compound tide)를 형성한다. 조석 잔차류는 북해와 같이 조석이 우세한 해역에서 장주기 물질 순환을 결정하는 요소의 하나로 알려져 있으며(Nihoul과 Rondonay, 1975), 가장 대표적인 배조는 M_4 분조로서 퇴적물의 이동 방향을 결정하는데 중요한 역할을 담당하며(Pingree와 Griffiths, 1979; Hunter, 1979), 대체로 M_4/M_2 의 비는 10% 이내(Uncle, 1991)로 알려져 있다.

황해 및 동중국해에 대한 M_2 분조 또는 주요 4개 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 대한 조석 및 조류에 대해서는, Choi와 Fang(1993)에 정리된 바와 같이, 많은 연구가

*韓國海洋研究所 沿岸工學研究部 (Coastal Engineering Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Korea)

**成均館大學校 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan Univ., Suwon Science Campus, Suwon 440-746, Korea)

수행되었으며, 조위의 경우 관측치와 부합하는 좋은 결과를 얻었다. 그러나 비선형 방정식을 사용함에 따라 파생되는 M_4 또는 M_2 조석에 기인한 잔차위(또는 잔차류)에 대한 연구는 황해·동중국해의 일부 해역에 국한되었거나 양질의 자료 부족으로 아직까지도 정설이 없는 상황이다.

관측치에 근거한 결과는 아니나 수치 모형을 이용한 황해·동중국해에 대한 M_4 또는 잔차위(또는 잔차류)에 관한 기존 연구를 간략히 살펴보면 다음과 같다. Choi(1988)는 경·위도로 각각 $1/4^\circ$, $1/5^\circ$ 의 해상도를 갖는 초기의 모형(Choi, 1980)을 개선한 해상도 $1/12^\circ$, $1/15^\circ$ 의 수치모형을 황해·동중국해에 적용하여 M_4 분조 및 M_2 조석에 기인한 잔차류를 살펴보았으며, 해양연구소(1995)는 Kang 등(1991)의 모형에 비선형항을 고려하고 $1/12^\circ$, $1/16^\circ$ 의 해상도를 갖는 수치 모형을 수립한 후 한반도 주변 해역의 M_2 조석에 기인한 잔차위 및 잔차류의 공간 분포를 살펴본 바 있다. 이와 정(1996)은 $1/6^\circ$, $1/8^\circ$ 의 해상도를 갖는 수치 모형에 M_2 조위를 관측치와 계산치의 가중 평균치로 대체하는 간단한 자료합성법을 도입하여 황해·동중국해에서의 M_2 및 M_4 의 공간 분포를 살펴보았다. 그 결과 M_2 분조에 대해서는 기존의 수치 모형보다 관측치와 부합하는 결과를 얻었으나 M_4 에 대해서는 자료 합성함으로써 오히려 왜곡된 결과가 유발될 수 있음을 보였다.

이들의 연구들은 모든 비선형이 사용된 결과로부터 M_4 또는 잔차위를 계산한 것으로, M_4 또는 잔차위 형성에 대한 각각의 비선형항 영향을 파악하기는 어렵다. 본 연구에서는 2차원 M_2 조석 비선형 모형을 황해·동중국해에 적용하여 각각의 비선형항에 대한 영향을 살펴보고자 한다. 구체적으로 M_2 조석만을 외력으로 정의하여 배조인 M_4 , 조석에 기인한 잔차위 및 잔차류 형성에 대한 연속 방정식의 천해항, 운동 방정식의 이류항 및 2차의 저면마찰항의 개별적인 영향을 살펴보았다.

2. 기본 방정식 및 차별화

2.1 기본 방정식

위도에 따른 전향력의 변화를 고려하기 위하여 구면 좌표계를 사용하면, 균일 밀도 해역에서의 조석 운동을 지배하는 수심 적분된 연속 방정식과 운동 방정식은 다음과 같이 주어진다(기조력항, 이류항 중 지구의 곡률을 고려한 항 및 수평확산항은 무시되었다).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial(HU)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(HV \cos \phi)}{\partial \phi} \right\} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - fV \\ = -\frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{\tau_\lambda^w - \tau_\lambda^b}{\rho H} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + fU \\ = -\frac{g}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} + \frac{\tau_\phi^w - \tau_\phi^b}{\rho H} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 t 는 시간, λ 는 경도, ϕ 는 위도, ζ 는 평균해면으로부터의 해수면 변위, U , V 는 각각 λ , ϕ 방향의 수심 평균된 유속, R 은 지구의 반경, f 는 Coriolis 계수(= $2\Omega \sin \phi$), Ω 는 지구의 회전각속도, g 는 중력 가속도, h 는 평균해면하 수심, H 는 순간 총수심(= $h + \zeta$), ρ 는 해수 밀도, $(\tau_\lambda^w, \tau_\phi^w)$, $(\tau_\lambda^b, \tau_\phi^b)$ 는 각각 바람응력과 저면 마찰응력을 나타낸다.

2.2 경계 조건

해수면에서의 경계 조건으로는 바람응력이 정의되나 본 연구에서는 바람응력을 고려하지 않았다. 해저면 경계 조건으로는 식 (4)와 같이 유속의 제곱에 비례하는 2차의 저면마찰식을 사용하였다.

$$(\tau_\lambda^b, \tau_\phi^b) = \rho c_f \sqrt{U^2 + V^2} (U, V) \quad (4)$$

여기서 c_f 는 무차원의 저면마찰계수이다.

개방 경계에는 Flather(1976)가 제안·사용한 식 (5)와 같은 방사 경계 조건(radiational boundary condition)을 사용하였다.

$$q_n = q_T + \frac{c}{H} \cdot (\zeta - \zeta_T) \quad (5)$$

여기서 q_T 와 ζ_T 는 독립적으로 주어지는 개방 경계에서의 유속 및 해수위로서, 밀침자 T 는 조석 성분을 의미하며, q_n 은 개방 경계에서 계산되는 유속이다. c 는 장파의 속도로 $\text{MIN} \{ \sqrt{gH}, \Delta s / \Delta t \}$ 를 사용하였으며, Δs 는 수평 방향의 격자 간격, Δt 는 계산 시간 간격을 의미한다.

2.3 유한차분식

식 (1)–(3)은 Arakawa-C 격자 체계 하에서 반음해법인 ADI(Alternating Direction Implicit) 방법을 적용하여

유한차분화하였다. Staggered 격자를 사용함에 따라 유속의 공간 위치는 ζ 의 위치와는 다름을 나타내기 위하여 첨자 $i \pm 1/2$ 또는 $j \pm 1/2$ 로 표시하였으며, 밀침자가 표시되지 않은 변수는 차분식 첫째항의 공간좌표와 같다. 윗첨자는 계산시각을 의미한다. 실제의 컴퓨터 코드에서는 $\zeta_{i,j}$, $U_{i+1/2,j}$, $V_{i,j+1/2}$ 는 각각 $\zeta(i,j)$, $U(i,j)$, $V(i,j)$ 로 표현된다. $(n)\Delta t$ 에서 $(n+1/2)\Delta t$ 의 차분식은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{V_{i,j+1/2}^{n+1/2} - V_{i,j+1/2}^n}{(\Delta t/2)} + \frac{\tilde{U}^n}{R \cos \phi} \delta_\lambda V^n + \frac{V^n}{R} \delta_\phi V^{n+1/2} + f \tilde{U}^n = -\frac{g}{R} \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n}{\Delta \phi} + \frac{F_\phi^n}{h + \zeta^n} \quad (6a)$$

$$\frac{U_{i+1/2,j}^{n+1/2} - U_{i+1/2,j}^n}{(\Delta t/2)} + \frac{U^{n+1/2}}{R \cos \phi} \delta_\lambda U^n + \frac{\tilde{V}^{n+1/2}}{R} \delta_\phi U^n - f \tilde{V}^{n+1/2} = -\frac{g}{R \cos \phi} \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta \lambda} + \frac{F_\lambda^n}{h + \zeta^n} \quad (6b)$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^n}{\Delta t/2} + \frac{\{(h + \zeta^*)U^{n+1/2}\}_{i+1/2,j} - \{(h + \zeta^*)U^{n+1/2}\}_{i-1/2,j}}{R \cos \phi \Delta \lambda} + \frac{\{(h + \zeta^n)V^n \cos \phi\}_{i,j+1/2} - \{(h + \zeta^n)V^n \cos \phi\}_{i,j-1/2}}{R \cos \phi \Delta \phi} = 0 \quad (6c)$$

상기식에서 F_λ , F_ϕ 는 각각 λ , ϕ 방향에 대한 바람 응력과 저면마찰응력의 차를 나타낸다. 식 (6)에 사용된 δ_λ , δ_ϕ 는 차분연산자로 이들의 기호들은 다음과 같으며, 윗첨자는 좌변에만 표기하였고 반복되는 밀침자는 괄호의 바깥에 표기하였다.

$$\tilde{U}^n = 0.25(U_{i+1/2,j} + U_{i+1/2,j+1} + U_{i-1/2,j} + U_{i-1/2,j+1}) \quad (7a)$$

$$\tilde{V}^{n+1/2} = 0.25(V_{i+1,j+1/2} + V_{i+1,j-1/2} + V_{i,j+1/2} + V_{i,j-1/2}) \quad (7b)$$

$$\tilde{U}^n \delta_\lambda V^n$$

$$= \begin{cases} \tilde{U}(V_{i+2} + 4V_{i+1} - 4V_{i-1} - V_{i-2})_{j+1/2}/(12\Delta\lambda) \\ \tilde{U}(V_{i+1} - V_{i-1})_{j+1/2}/(2\Delta\lambda) \text{ if } V_{i+2,j+1/2} \text{ or } V_{i-2,j+1/2} = 0 \\ 0 \text{ if } V_{i+1,j+1/2} \text{ or } V_{i-1,j+1/2} = 0 \end{cases} \quad (7c)$$

$$V^n \delta_\phi V^{n+1/2} = V_{i,j+1/2}(V_{i,j+3/2} - V_{i,j-1/2})/(2\Delta\phi) \quad (7d)$$

$$U^{n+1/2} \delta_\lambda U^n = U_{i+1/2,j}(U_{i+3/2,j} - U_{i-1/2,j})/(2\Delta\lambda) \quad (7e)$$

$$\tilde{V}^{n+1/2} \delta_\phi U^n$$

$$= \begin{cases} \tilde{V}(U_{j+2} + 4U_{j+1} - 4U_{j-1} - U_{j-2})_{i+1/2}/(12\Delta\phi) \\ \tilde{V}(U_{j+1} - U_{j-1})_{i+1/2}/(2\Delta\phi) \text{ if } U_{i+1/2,j+2} \text{ or } U_{i+1/2,j-2} = 0 \\ 0 \text{ if } U_{i+1/2,j+1} \text{ or } U_{i+1/2,j-1} = 0 \end{cases} \quad (7f)$$

따라서 식 (6a)로부터 V 에 대한 3중 대각 행렬식이 구성되며, 식 (6b)와 (6c)는 서로 연계되어 ζ , U 에 대한 3중 대각 행렬식을 구성한다. 식 (6b)와 (6c)는 다음과 같이 두번을 반복·계산하였다. 첫 번째 계산에서는 ζ^* 를 ζ^n 로 하여 U , ζ 를 계산한 후, 두 번째 계산에서는 ζ^* 의 값으로 첫 번째 계산에서 얻은 ζ 를 사용하여 최종적으로 $U^{n+1/2}$, $\zeta^{n+1/2}$ 을 얻도록 하였다. 이들 행렬식은 Thomas 알고리즘을 사용하여 계산하였다.

위의 차분식은 계산하고자 하는 변수의 위치를 중심으로 중앙차분하였음을 나타내고 있으며, 육지 경계 근처의 이류항 차분식은 계산될 변수의 왼쪽 또는 오른쪽에 육지 경계가 존재하는지에 따라 1차의 전방차분 또는 후방차분을 사용하여 처리하였다. 또한 식 (6a)를 먼저 계산하므로써 $V^{n+1/2}$ 을 얻을 수 있으며, 계산된 $V^{n+1/2}$ 는 식 (6b)의 이류항 및 전향력항을 계산하는데 사용되었다.

$(n+1/2)\Delta t$ 에서 $(n+1)\Delta t$ 의 차분식도 $(n)\Delta t$ 에서 $(n+1/2)\Delta t$ 의 차분식과 유사하며, 이류항의 처리를 제외한 전반적인 수치해법은 Stelling(1984)과 거의 같다. 특히 연속방정식의 천해항을 보다 정확히 계산하기 위하여 Choi(1980, 1988), Kang 등(1995)의 차분식과는 달리 반복법이 사용되었다. 이상의 ADI 방법을 간략히 요약하면 다음과 같다. $(n)\Delta t$ 에서 $(n+1/2)\Delta t$ 의 계산은 λ 방향에 대하여 U 와 ζ 는 서로 연계되어 음해법으로 계산되며 V 는 V 만의 3중 대각 행렬로 구성되어 계산되고, $(n+1/2)\Delta t$ 에서 $(n+1)\Delta t$ 의 계산은 ϕ 방향에 대하여 V 와 ζ 가 서로 연계되어 음해법으로 계산되며 U 는 U 만의 3중 대각 행렬로 구성되어 계산된다.

3. 수치 실험 및 토의

모형 적용 해역은 황해·동중국해 전역을 포함하는 117°E-130°E, 24°N-41°N의 해역으로, 수심 자료는 DBDB5 자료를 근거로 하되 연안역의 수심은 해도를 참조하여 재편집되었다(Fig. 1). 대한 해협, 대만 해협 및 Ryukyu 제도 외측의 북서 태평양 상에 위치하는 외해 개방 경계에는 M₂ 분조의 q_T , ζ_T 를 부여하였고,

개방 경계를 제외한 모든 지점의 ζ, u, v 는 0으로 정의한 후, 충분히 초기 조건의 영향이 제거된 20 M₂ 조석 주기 후의 결과를 논의하였다. 사용된 격자 간격과 시간 간격은 $\Delta\lambda = 16^\circ, \Delta\phi = 18^\circ, \Delta t = 186.31 \text{ sec}$ 이며, 저면 마찰계수(c_f)로 0.0025를 사용하였다.

2차의 저면 마찰식에 의한 비선형 효과는 다음과 같은 전개례를 통하여 체계적으로 분석된다(Fang, 1987; Parker, 1991).

$$\frac{c_f}{h+\zeta} |q|q = \frac{c_f}{h} |q|q - \frac{\zeta}{h} \frac{c_f}{h} |q|q + \dots \quad (8)$$

여기서 $q = (U, V)$ 로 유속 벡터를 의미한다.

이하의 논의에서 편의상 식 (8)의 첫번째 항을 $|q|q$, 식 (8)의 두번째 항을 $\zeta|q|q$, 연속 방정식의 천해항은 $\nabla \cdot (\zeta q)$, 운동 방정식의 이류항은 $(q \cdot \nabla)q$ 로 표기하기로 한다. 여기서 $\nabla = (\frac{\partial}{R \cos \phi \partial \lambda}, \frac{\partial}{R \partial \phi})$ 이다.

조석 잔차위 및 M₄ 성분의 생성에 대한 비선형항들의 영향을 살펴보기 위하여 비선형항으로 $|q|q$ 항만을 고려한 경우, $|q|q$ 항에 $\zeta|q|q, (q \cdot \nabla)q, \nabla \cdot (\zeta q)$ 및 모든 비선형항을 고려한 5가지 경우를 수치 실험하였

다. 각각의 비선형항을 추가함에 따른 영향을 구체적으로 살펴보기 위하여 동일 위도상(36°N)에 위치한 3개의 정점(Fig. 1)에 대하여 해수위의 크기를 비교하였다. 정점(A, B, C)의 경도상 위치와 수심은 각각 (120.5°E, 122.5°E, 125.5°E)와 (19 m, 54 m, 80 m)이다.

3.1 M₂ 조석

M₂의 무조점 체계와 M₄의 무조점 체계와의 관계를 살펴보기 위하여 M₂ 조석도를 도시하였다. 도시된 계산 결과(Fig. 2)는 모든 비선형항을 포함한 결과로 관측치와 진폭 10 cm, 위상 10° 정도의 차이를 보이고 있다. 저면 마찰 계수 값의 변화에 따른 모형 결과와 관측치와의 비교 및 제시된 결과보다 관측치와 부합하는 M₂ 조석도는 얻기 위해서는 이와 정(1996)을 참고할 수 있다. 그러나 간단한 자료합성법을 적용한 이와 정(1996)의 계산 결과는 비선형 효과를 규명하기에는 불합리한 것으로 보고되었는데, M₂ 만을 자료합성할 경우 자료합성점에서의 M₄ 분조의 크기가 상당히 감소된 값으로 주어지기 때문이다. 개방 경계의 조위를 지정된 값으로 부여한 이와 정(1996)의 M₂ 조석도와 방사 경계 조건을 사용하여 얻은 M₂ 조석도(Fig. 2)로부

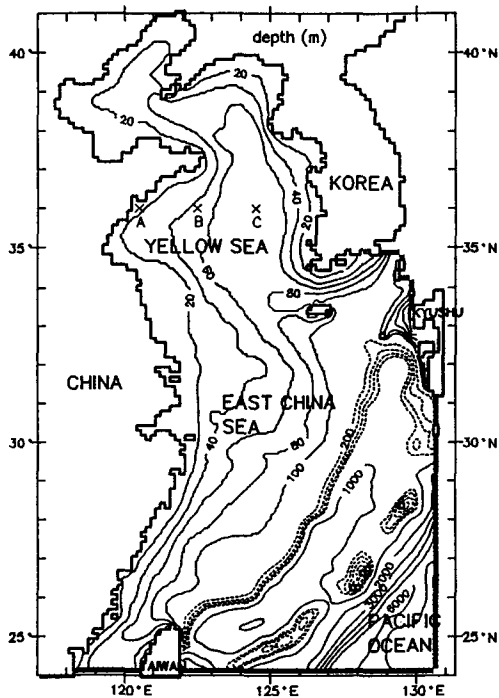


Fig. 1. Bathymetric chart of the Yellow Sea and the East China Sea. *denotes open boundary and × selected points.

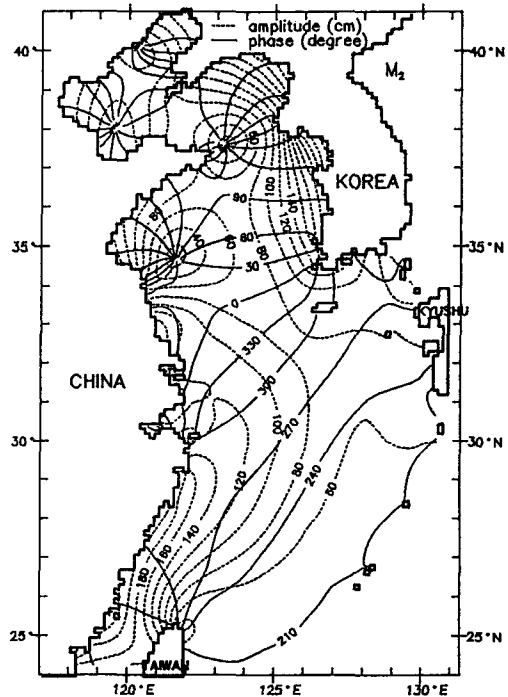


Fig. 2. Calculated M₂ tidal chart. ---: amplitudes (cm). —: phase (deg.). Degree refers to 135°E.

터 개방 경계에 부여한 q_T 와 ζ_T 의 타당성을 알 수 있다. 참고로 (A, B, C) 지점에 대한 M₂ 진폭은 (99.4, 61.3, 91.4) cm로, 다음에 살펴볼 비선형항의 영향은 M₂ 성분에는 거의 나타나지 않았다.

3.2 A, B, C 지점에서의 비선형 효과 비교

각각의 비선형항 추가에 따른 영향을 구체적으로 살펴보기 위하여 정점(A, B, C)에서의 해수위 크기를 비교하였다. Table 1은 각 정점에 대한 잔차위 및 잔차위의 공간 변화율, M₄의 진폭 및 지각을 요약한 것이다. 여기서 잔차위는 각각의 결과(조위)를 조석 주기에 평균하여 계산한 것이며, 제시되는 잔차류도 계산된 유속을 조석 주기에 평균하여 얻은 Eulerian 잔차류이다 (Tee, 1976).

2차의 저면마찰항인 $|q|q$ 항은 주기의 홀수배 성분만으로 선형화되므로(Pingree와 Maddock, 1978; Pingree와 Griffiths, 1979) M₄ 분조는 $|q|q$ 항만에 의해서는 거의 발생되지 않았음을 보이고 있다. Table 1에 제시

된 바와 같이, M₄ 분조는 주로 이류항과 천해항에 의해 발생됨을 알 수 있으며, 이류항과 천해항에 의한 M₄ 진폭의 합은 모든 비선형항을 포함한 M₄ 진폭의 90% 이상을 차지하고 있다. 비선형항을 모두 포함한 경우의 M₄ 진폭은 약 M₂ 진폭의 2-10% 정도였다(M₂의 진폭이 20 cm 이상인 경우에 대해 계산된 M₄/M₂ 진폭 비의 평균은 3%였다).

비교에 사용된 정점(A, B, C)에서의 결과에는 $|q|q$ 항에 의해 음의 잔차위가 미약하게 나타났다. 그러나 잔차위는 주로 이류항과 천해항에 의해 파생됨을 Table 1로부터 알 수 있다. 특히 이류항의 영향은 음의 잔차위를 보이는 반면 천해항의 영향은 양의 잔차위를 초래하는 상반된 효과를 보이는 것으로 나타났다. 잔차위의 공간 변화율(지형류 균형을 만족할 경우의 잔차류로 볼 수 있다)에는 이류항에 의한 잔차류의 절대값이 천해항에 의한 잔차류의 절대값보다 오히려 크게 나타났다. 즉 잔차류의 주요 생성 요인으로 이류항을 언급한 Tee(1976)의 결과와 부분적으로 부합하는 결과

Table 1. Summary of nonlinear effects at selected points

Station	Non - linear terms turned on:	Zero - frequency			M ₄ - component	
		ζ (cm)	$\Delta_\lambda \zeta$	$\Delta_\phi \zeta$	A (cm)	P (deg.)
A (19 m)	$ q q$ only	-0.00	0.00	0.00	0.002	250.1
	$ q q + \zeta q q$	0.23	-0.21	0.34	0.648	307.8
	$ q q + (q \cdot \nabla)q$	-0.61	-0.43	-0.48	2.824	209.8
	$ q q + \nabla \cdot (\zeta q)$	0.72	0.09	-0.47	7.011	203.8
	All non - linear terms	0.35	-0.54	-0.66	9.596	209.2
B (54 m)	$ q q$ only	-0.01	-0.00	-0.01	0.002	280.1
	$ q q + \zeta q q$	0.14	-0.06	0.06	0.061	100.8
	$ q q + (q \cdot \nabla)q$	-0.21	0.28	-0.05	-0.569	353.1
	$ q q + \nabla \cdot (\zeta q)$	0.73	-0.07	0.17	0.423	331.1
	All non - linear terms	0.67	0.15	0.19	0.931	346.9
C (80 m)	$ q q$ only	-0.00	0.01	0.00	0.006	231.9
	$ q q + \zeta q q$	-0.01	-0.01	0.00	0.299	108.1
	$ q q + (q \cdot \nabla)q$	-0.14	-0.18	0.23	1.090	12.3
	$ q q + \nabla \cdot (\zeta q)$	0.40	-0.19	-0.00	2.321	30.0
	All non - linear terms	0.25	-0.41	0.23	3.412	29.5

$$\Delta_\lambda \zeta = \frac{g}{fR \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} \quad (\text{in cm/s}), \quad \Delta_\phi \zeta = \frac{g}{fR} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} \quad (\text{in cm/s}).$$

를 보이고 있으나 Tee(1976)는 운동 방정식의 각 항에 대한 영향만을 고려하였기 때문에 연속 방정식의 천해항에 대한 영향은 파악할 수 없다, 수심이 비교적 얇은 A 지점의 결과에서 보는 바와 같이, 잔차류의 형성에 대한 저면마찰항 및 천해항의 영향도 무시할 수 없는 것으로 판단된다.

3.3 M₄ 조석

비선형항에 의해 파생된 M₄ 조석의 등진폭도 및 등조시도는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 모든 비선형항을 포함한 결과로 위상은 60° 간격으로 도시하였는데 이는 근사적으로 1시간 간격에 해당한다. 주기가 M₂의 1/2인 M₄ 분조의 경우 파장이 짧아지면서 황해, 발해만 등에 M₂ 무조점 수의 2배보다 많은 무조점이 형성되고 동중국해에도 무조점이 나타나고 있다. 전반적인 M₄의 진폭은 M₂ 진폭의 약 3%에 달하는 값을 보이고 있다 (10 cm 미만의 값에 대해서는 2 cm 간격으로 실선을 사용하여 도시하였으며, 10 cm 이상의 값에 대해서는 5 cm 간격으로 점선을 사용하여 도시하였다).

황해 중앙부와 동중국해 대부분의 M₄ 진폭은 약 2-3 cm로 작게 나타났다. 대체로 M₄ 진폭은 연안 천해역에

서 크게 나타나고 있으며, 서한만, 한국 서해안 및 중국 연안에서 약 15 cm에 달하였다. 발해만의 M₄ 진폭은 천해역임에도 불구하고 약 5 cm 내외로 작게 나타났고 한국 남해안 일대의 M₂ 진폭은 80-100 cm로 비교적 큰데도 불구하고 M₄ 진폭은 약 2-3 cm로 작게 나타났다. 따라서 M₂ 조위의 진폭(또는 M₂ 조류의 진폭)과 M₂ 조위 진폭의 공간 변화율(또는 조류 진폭의 공간 변화율)이 클수록 M₄는 크게 파생되는 것으로 사료된다.

Choi(1988)의 M₄ 결과에는 발해만에 뚜렷한 4개의 무조점이 제시되고 있으나 본 결과에는 4개의 무조점이 상대적으로 불분명하게 나타났다. Choi(1988)의 결과는 경·위도 격자 간격으로 각각 1/12°, 1/15°의 격자를 사용하여 얻어진 것으로, 본 연구에서 사용된 해상도보다 좋아 발해만의 무조점이 비교적 뚜렷이 재현된 것으로 판단된다. 그러나 이러한 해상도의 차이(κ_{135} 를 사용한 Choi(1988)의 결과와 g_{135} 를 사용한 본 결과와는 M₄의 경우 약 20°의 위상 차가 있음을 감안한다 하더라도 Choi(1988)의 결과와 본 계산 결과와는 지각에서 상당한 차이를 보이고 있다.

Choi(1988)의 M₄ 결과와 본 계산 결과 모두 (124°E, 35°N) 부근에 시계 방향으로 회전하는 무조점이 뚜렷

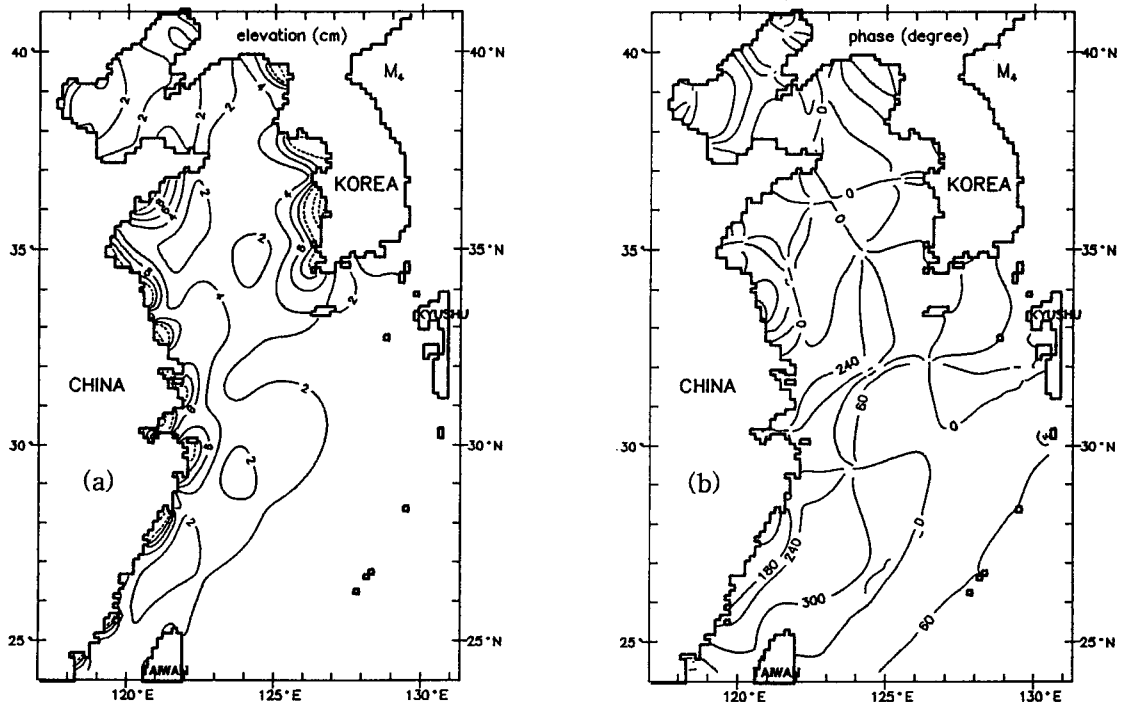


Fig. 3. Calculated M₄ tidal chart with all nonlinear terms. (a) co-amplitudes chart (cm). (b) co-phase chart (deg.). Degree refers to 135°E.

하게 나타났었다. 이와는 달리, 35°N 중국 연안에 2개의 시계 방향으로 회전하는 무조점이 본 결과에는 나타났으나 Choi(1988)의 결과에는 나타나지 않았다. 해상도가 좋은 Choi(1988)의 결과에 나타나지 않았던 무조점이 상대적으로 해상도가 낮은 본 결과에 나타난 점은 설명하기 어렵다. 개방 경계에 M_2 조위를 부여한 이와 정(1996)의 M_4 조석도와 방사 경계 조건을 사용한 본 연구의 M_4 조석도는 개방 경계 근처를 제외하고는 거의 비슷하게 나타나 개방 경계 조건의 차이에 의한 것이 아님을 알 수 있다. Choi(1988)의 이류항 차분식과 본 연구의 이류항 차분식이 다른 점 및 서로 다른 수심자료(특히 중국 연안의 수심)를 사용한 점이 이러한 차이를 보인 것으로 추측된다. 보다 정확한 M_4 의 공간 분포를 파악하기 위해서는 많은 관측치와의 비교가 선행되어야 하겠다.

3.4 잔차위 및 잔차류

비선형항에 의해 파생되는 0-frequency 성분에 대한 해수위(잔차위)의 공간 분포를 등치선으로 살펴보았다. Table 1에서 살펴본 바와 같이, 이류항에 의해서는 음의 잔차위가 나타난 반면 연속 방정식의 천해항에

의해서는 양의 잔차위가 두드러졌다. 이러한 경향이 일부 해역에 국한된 것인지 황해·동중국해 전역에 걸쳐 나타나는 것인지 살펴보기 위하여 2차의 저면마찰항과 이류항을 고려하여 계산한 잔차위를 도시하면 Fig. 4와 같다. 점선은 양의 잔차위, 실선은 음의 잔차위를 나타내며, 등치선의 간격은 0.5 cm이다. 북위 35°와 장강 사이의 중국 연안, 서해안 특히 목포 부근에 약 -2 cm에 달하는 잔차위를 보이고 있으며, 황해·동중국해 전역에 음의 잔차위를 보이고 있다.

비선형항으로 2차의 저면마찰항과 연속 방정식의 천해항을 고려한 경우의 잔차위는 Fig. 5와 같다. 이류항에 의한 잔차위와는 달리 북위 35°와 장강 사이의 중국 연안에 약 2 cm에 달하는 양의 잔차위가 형성되었고, 미약하나 서해안에는 음의 잔차위를 보이고 있다.

모든 비선형항을 고려한 결과(Fig. 6)는 근사적으로 Fig. 4와 Fig. 5의 합에 해당한다. 서해안의 잔차위는 Fig. 4, Fig. 5에 비하여 더욱 하강되었고, 중국 연안의 잔차위는 이류항과 연속 방정식의 비선형항의 상반된 효과로 인하여 음의 잔차위를 보이기도 한다. 발해만, 황해의 북서부 및 중국 연안의 일부에서는 양의 잔차

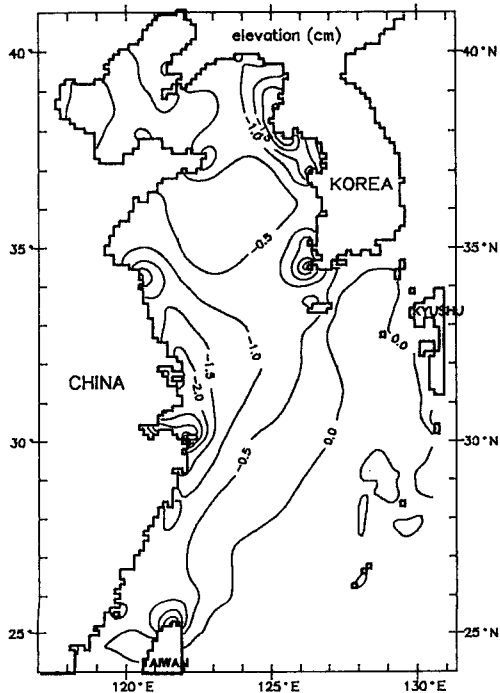


Fig. 4. Calculated tide residual elevation with quadratic bottom friction terms and advection terms.

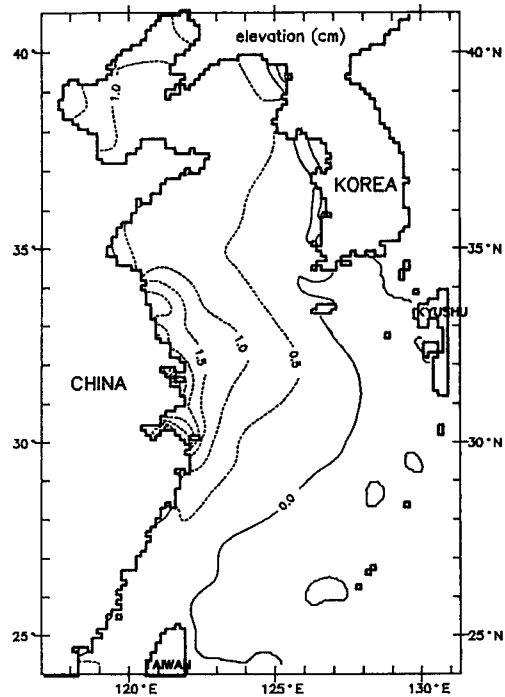


Fig. 5. Calculated tide residual elevation with quadratic bottom friction terms and shallow-water terms in continuity equation.

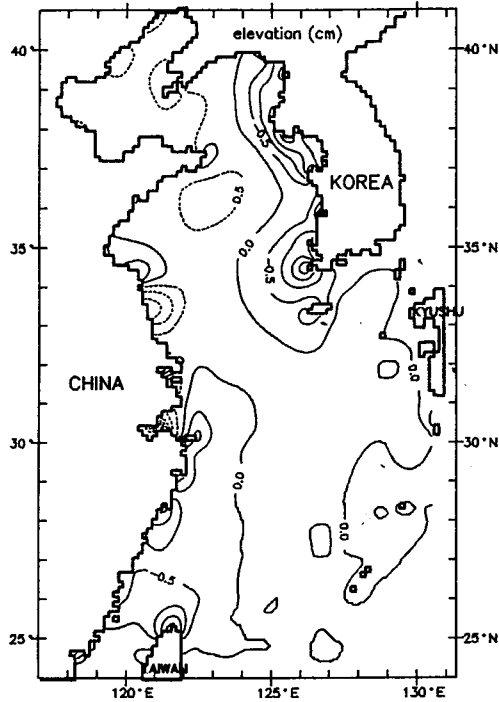


Fig. 6. Calculated tide residual elevation with all nonlinear terms.

위를 보이고 있으며, 대만의 북부와 한국 서해안(특히 목포 부근과 군산 및 경기만 일대)에는 비교적 큰 음의 잔차위를 보이고 있다. 한국 해양연구소(1995)의 잔차위 공간 분포는 35°N 근처의 중국 연안에는 양의 잔차위만을 보여 본 결과와는 약간의 차이를 보이고 있으나 서해안 근처에서는 거의 비슷한 크기를 보이고 있다. 구체적인 결과는 제시하지 않았으나 clamped 개방 경계 조건을 사용하여 얻은 잔차위는 방사 경계 조건을 사용한 본 결과에 비해 전반적으로 약간 상승된 잔차위 분포를 보였다. 따라서 사용된 수심의 차이, 이류항 차분식의 차이 및 개방 경계 조건의 차이도 잔차위의 공간 분포를 다르게 산정한 요인으로 판단된다.

모든 비선형항을 고려하여 계산한 조석 잔차류는 Fig. 7과 같다. 한반도 남서단과 제주도 근처, 대만 및 Ryukyu 열도 주변에서는 비교적 뚜렷한 조석 잔차류가 나타났으나, 중국 연안과 서해안 연안에서는 기존의 연구(Choi, 1980, 1988; 한국 해양연구소, 1995)와는 달리 뚜렷한 조석 잔차류는 나타나지 않았다. 기존 연구에서는 개방 경계에 M_2 조위를 부여하였기 때문에 초기의 영향은 저면마찰항에 의해 감소되나, 저면마찰항에 의해 충분히 감소되지 않은 초기 조건의 영

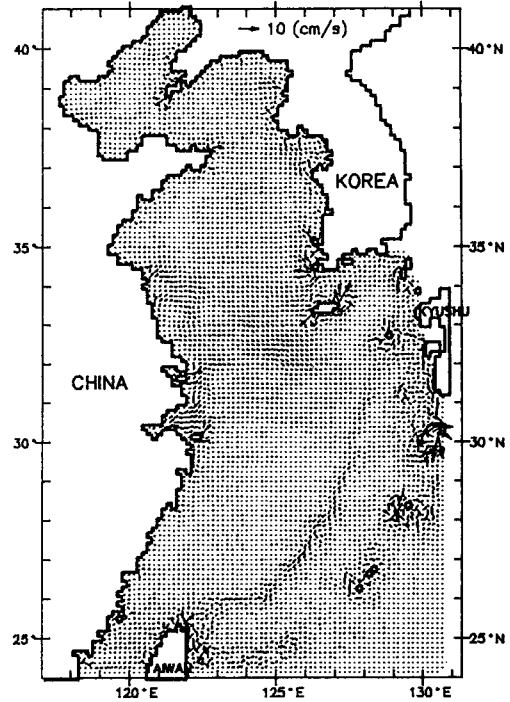


Fig. 7. Calculated Eulerian residual currents with all nonlinear terms.

향이 M_2 분조에 비해 상당히 작은 M_4 및 잔차류에 포함될 수 있는 반면, 본 연구에서는 약 10 조석 주기 동안 수치 실험한 기존 연구에 비해 오랜 기간인 20 조석 주기 동안 수치 실험하였고 또한 초기 조건의 영향이 모형의 개방 경계를 통해 방사되는 방사 경계 조건을 사용하였기 때문에 기존 연구보다 작은 잔차류가 나온 것으로 추정된다. 그러나 전반적인 잔차위와 잔차류의 절대값은 매우 작으며, 관측치와 비교되지 않았기 때문에 어느 결과가 타당하지 판단하기 어려운 점이 있다.

4. 결론 및 제언

2차원 수심 적분된 수치모형을 이용하여 조석이 우세한 황해·동중국해역의 M_4 및 잔차위, 잔차류 형성을 살펴보았다. 비선형항의 효과는 주로 이류항과 연속 방정식의 천해항에 의한 것으로 나타났으며, 2차의 저면마찰식에 의한 비선형 효과는 무시할만한 크기로 나타났다. 이러한 비선형항의 영향은 M_2 성분 자체에는 비교적 작게 나타났으나 M_4 성분과 0-frequency 성분(잔차위 또는 잔차류)에는 뚜렷하게 나타났다.

이류항의 영향은 음의 잔차위를 형성하는 반면 연속 방정식의 비선형항의 영향은 양의 잔차위를 형성하는 상반된 효과를 보였다. 전반적인 M_4 의 진폭은 M_2 진폭의 약 3%에 달하는 값을 보였으며, 이러한 M_4 성분의 생성에 대한 이류항과 연속방정식의 비선형항(즉, 천해항)의 기여도는 약 90% 이상으로 나타났고, 2차의 저면마찰항에 의한 M_4 성분 생성은 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

기존의 수치모형 연구에서 제시된 잔차류 및 M_4 분포의 공간 분포와 본 연구의 결과와는 상당한 차이가 있었다. 수심, 개방경계조건, 이류항 처리 등이 이러한 차이의 원인일 수 있겠으나 어느 결과가 보다 타당한지 파악하기 위해서는 상당량의 관측이 이루어진 후 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- 이종찬, 정경태, 1996. 자료합성법을 이용한 황해 및 동중국해의 M_2 조석, 해양연구, **18**(1), 13-24.
- 한국해양연구소, 1995. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환(1차년도).
- Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Korea Ocean Research and Development Institute Report 80-02.
- Choi, B.H., 1988. A fine grid two-dimensional M_2 tidal model of the East China Sea, *J. of Korean Association for Hydrological Science*, **21**(2): 183-192.
- Fang, G., 1987. Nonlinear effects of tidal friction, *ACTA Oceanologica Sinica*, 6(Supp. I): 105-122.
- Flather, R.A., 1976. A tidal model of the north-west European continental shelf, *Mem. Soc. R. Sci. Liege, ser 6*, **10**: 141-164.
- Hunter, J.R., 1979. On the interaction of M_2 and M_{2n} tidal velocities in relation to quadratic and higher power laws, *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, **32**: 146-153.
- Kang, S.K., Lee, S.R. and Yum, K.D., 1991. Tidal computation of the East China Sea, the Yellow Sea and the East Sea, In *Oceanography of Asian Marginal Seas* (ed) K. Takano, 25-48.
- Nihoul, J.C.J. and Rondonay, R.C., 1975. The influence of the tidal stress on the residual circulation, *Tellus*, **27**: 484-489.
- Parker, B.B., 1991. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions, In *Tidal Hydrodynamics* (ed) B.B. Parker, 237-268.
- Pingree, R.D. and Maddock, L., 1978. The M_4 tide in the English Channel derived from a non-linear numerical model of M_2 tide, *Deep-Sea Research*, **26**: 53-68.
- Pingree, R.D. and Griffiths, D.K., 1979. Sand transport paths around the British Isles resulting from M_2 and M_4 tidal interactions, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **59**: 497-513.
- Stelling, G.S., 1984. On the construction of computational methods for shallow water flow problems, Rijkswaterstaat Communication, No. 35.
- Tee, K.T., 1976. Tide-induced residual current, a 2-D nonlinear numerical tidal model, *J. of Marine Research*, **34**: 603-628.