

조석잔차류와 해상풍에 의한 황해와 동중국해의 해수 순환과 부유물 이동 모델 연구

전혜진 · 안희수

서울대학교 사범대학 지구과학교육과

Numerical Simulation of the Circulation and Suspended Materials Movement in the Yellow Sea and the East China Sea by Tidal Residual and Wind-Driven Current

Hye Jin Jeon and Hui Soo An

Department of Earth Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract: The circulations and movement of suspended materials by tidal residual current and seasonal surface wind in the Yellow Sea and the East China Sea are investigated by using a 2-dimensional barotropic model and a particle tracing technique. The tidal residual current is relatively strong around the south and west coast of Korea including the Cheju Island and southern coast of China. The current has a maximum speed of 10 cm/s in the vicinity of Cheju Island with a clockwise circulation. General tendency of the current, however, is to flow eastward along the southern coast of Korea. At the east coast of China from Shanghai to Tunghai, it also shows a eastward flow toward the South Sea of Korea. The anticyclonic circulation formed by wind-driven current and southward current prevails along the coast of Korea in the winter season (from October to April) when northerly wind is dominant. In summer (represented by July), however, the cyclonic circulation appears due to the influence of southerly wind. Suspended materials are advected by tidal residual current and wind-driven current. The long period (ten days) displacement by wind-driven current is bigger than that by tidal residual current. However, the tidal residual current would have the more important role for the advection of the suspended material considering longer period more than several months.

Key Words: Tidal Residual Current, Wind-driven current, Particle tracing, Yellow Sea, 2-dimensional barotropic model

요 약: 본 연구는 2차원 순압모델을 사용하여 황해와 동중국해에서 조석잔차류와 춘·하·추·동 4계절의 해상풍에 의한 해수 순환과 이러한 순환에 의한 부유물의 이동 궤적을 추적하는데 목적을 두었다. 황해 해수 순환의 주요 외력은 조석과 바람이라고 생각되어, 조석은 M_2 조석으로부터 조석잔차류를 계산하였고, 계절별 바람으로서 1월(겨울), 4월(봄), 7월(여름), 10월(가을)을 사용하였다. 조석잔차류는 한국 남·서해안과 제주도 부근과 중국 양자강 하구역 부근에서 크게 나타난다. 제주도 부근에서는 10 cm/s 이상의 최대 잔차류가 나타나며 시계방향의 순환을 보이지만 전반적으로 남해안을 따라 동향류의 경향이 있다. 또한, 중국의 연운항에서 상하이 사이의 영역에서는 한국의 남해로 향하는 순환 구조가 나타나고 있다. 바람에 의해 형성된 순환은 북풍의 성격을 띤 1월, 4월, 10월에는 해역에 시계 방향의 순환이, 남풍과 열대성 저기압의 영향을 받는 7월에는 반시계 방향의 순환이 우세했다. 이로 인하여, 한국 연안에서는 7월을 제외하고는 남향류가 나타났다. 부유물은 조석 잔차류와 취송류에 의해 이동한다. 10일 동안의 이동에서는 수 십 cm/s에 달하는 취송류가 조석 잔차류보다 크게 작용했다. 그러나, 수 개월 이상의 이동에 있어서는 수 cm/s의 조석잔차류의 영향이 더 크게 나타났다.

주요어: 조석 잔차류, 취송류, 궤적 추적, 황해, 2차원 순압모델

서 론

이 지역의 해수 순환은 조류와 바람과 쿠로시오(Kuroshio) 해류 등에 의해 지배될 수 있다. 조류는 이

전 연구자들의 결과에 의하면 12시간 25분 주기의 주태음 반일주조(M_2)가 탁월하게 나타나는 편이다. 바람의 영향에 의한 순환은 계절풍의 영향으로 인해 계절별로 각기 다른 양상을 나타낸다.

해수면에서 부유하는 물질의 수송은 이 지역의 해수 순환에 따라 각각 특징적인 방향으로 이동해 갈 수 있다. 단기적(반일 또는 일)으로는 조류와 바람에 의해 지배받는 경향을 띠고, 중·장기적으로는 조석 잔차류, 해류, 바람에 의한 해수층 평균 순환 등에 의해 지배받는다.

조석 모델에 대해서는 1970년대 부터 An(1976, 1977)과 Choi(1980), Oh(1986) 등의 연구가 있었다. 바람에 의한 순환 연구는 An(1987)이 이상적인 바람을 가정하여 수행하였으나 실제 해상풍 분포는 계산된 바가 없었다. 최근 Na(1992)가 발표한 월평균 해상풍 관측자료가 이러한 연구에 유용하게 쓰이고 있다. 이 자료를 이용한 최근 연구로는 Lee(1996)의 결과가 있다.

최근 수년간 우리나라 근해에서는 대형 유조선의 침몰과 다양한 선박사고로 인해 기름과 같은 부유물의 유출이 잦았다. 이러한 상황에서 우리나라 근해에서의 해수 순환 양상을 원인력별로 비교 분석할 필요가 있으며, 이러한 순환에 의해 장기·단기적으로 이동하는 부유물의 방향과 이동량의 계산도 요구되고 있다.

본 연구에서는 2차원 순압모델을 이용해 황해와 동중국해에서 조석잔차류와 Na(1992)의 월평균 해상풍에 의해 생성된 순환류 양상을 1월, 4월, 7월, 10월에 대해서 살펴보고자 한다. 또한 부유물의 수송이 위치에 따라 어떤 방향으로 어느 정도 이루어지는지를 각 순환에 대해 계산해 보고 이들을 비교 분석하고자 한다.

수치 모델

본 연구에 사용한 모델은 천해파 방정식을 사용한 2차원 유한차분 수치모델이다. 이 모델은 3차원의 해수운동을 수직 적분하여 2차원화 함으로써 해저 조석과 대기 현상에 의한 해수 순환을 쉽고 효과적으로 설명할 수 있어 An(1976, 1977, 1987), Pingree and Maddock(1978), Choi(1980), Oh(1986), Tang(1988), Park(1989), Park(1995), Kim(1996) 등을 비롯하여 널리 사용되어왔다.

기본 방정식

연구 영역이 비교적 좁은 편이므로 지표면 곡률을 무시하여 직각 좌표계를 사용하였다. 이 좌표계의 좌표축은 x축을 동쪽, y축을 북쪽, z축을 중력 방향으로 하였다.

직각 좌표계 상에서 순압적, 비압축적, 비선형적 운동이라 가정하면 기본 방정식은 다음과 같다.

운동 방정식은(1), (2), (3)과 같이 나타낼 수 있고, 연속방정식은(4)와 같다.

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_1 \nabla_H^2 u \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_1 \nabla_H^2 v \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

위(3) 식은 연직 방향의 가속도를 무시한 정유체역학적 근사(hydrostatic approximation)를 사용하여 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\partial P = \rho g \partial z \quad (5)$$

여기에 사용한 변수 표식은 u, v, w는 x, y, z 방향의 유속, f는 전향력 상수, ρ는 해수의 밀도 (≈1.0 g/cm³), P는 압력, A_v, A₁는 수직, 수평 와동 점성 계수, g는 중력 가속도를 나타낸다.

식(1) (2) (4)는 해수면(-h)로부터 해저(d)까지 수직 적분하고(5)식을 대입하여 체적운반(transport) 속도 M, N으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} = & -g(d+h) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} (d+h) \frac{\partial P_a}{\partial x} + (\tau_s^x - \tau_b^x) + fN \\ & - (d+h) \left\{ \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} \right\} + A_1 \nabla_H^2 M \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} = & -g(d+h) \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} (d+h) \frac{\partial P_a}{\partial y} + (\tau_s^y - \tau_b^y) - fM \\ & - (d+h) \left\{ \frac{\partial \bar{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} \right\} + A_1 \nabla_H^2 N \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial y} \quad (8)$$

여기에서 사용한 변수의 의미는 다음과 같다.

$$M = \int_{-h}^d u dz, \quad N = \int_{-h}^d v dz$$

$$\bar{u} = \frac{M}{d+h}, \quad \bar{v} = \frac{N}{d+h}$$

$$\nabla_H^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

$$\tau_s = \rho_a C_D w |w|$$

$$\tau_b = \rho_l \gamma^2 v |v|$$

w는 풍속, v는 유속, ρ_a 는 대기밀도, ρ 는 해수밀도, C_D 는 항력계수, γ^2 는 해저마찰계수, Pa는 대기압(본 연구에서는 무시함)을, 그리고 (τ_x^x, τ_x^y) 와 (τ_y^x, τ_y^y) 는 x, y 방향의 표층과 해저에서의 마찰응력을 의미한다 (Schwind 1980, Bowden 1983).

공간 격자계 및 조건

본 연구에서는 우리나라 서해와 동중국해에서의 현상을 보기 위하여 경도는 117.125°E에서 129.125°E까지로 위도는 28.1°E에서 41.1°E까지 다루었다. 경도 1° 거리는 위도에 따라 달라지나 위도 32°에서의 거리가 94.402 Km이므로 이 값을 기준으로 하였다. 따라서 Δx 는 0.25° 간격인 23,600 m로 하였고 Δy 는 0.20° 간격인 22,263 m로 하여 총 49×66개의 격자로 나타내었다(Fig. 1). 여기에서 해양에 해당하는 부분은 1734개 격자로 $9.11 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 에 달한다.

수치 실험의 안정도는 시간 간격 Δt 가 어느 정도 이냐에 따라 결정된다. CFL 조건(Courant-Friedrichs-Lewy Criterion)에 의하면 시간간격은

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{2}{gh}} \left(\frac{\Delta S}{2} \right) \quad \Delta S: \text{격자간격}$$

와 같이 구할 수 있는데, 본 연구에서의 격자 간격은 y 방향이 22,263 m이고, 최대 수심이 1,100 m 이므로 2분 30초 정도면 충분하나 궤적 추적의 정확성을 위해 30초로 하였다(Ferziger and Feric, 1996).

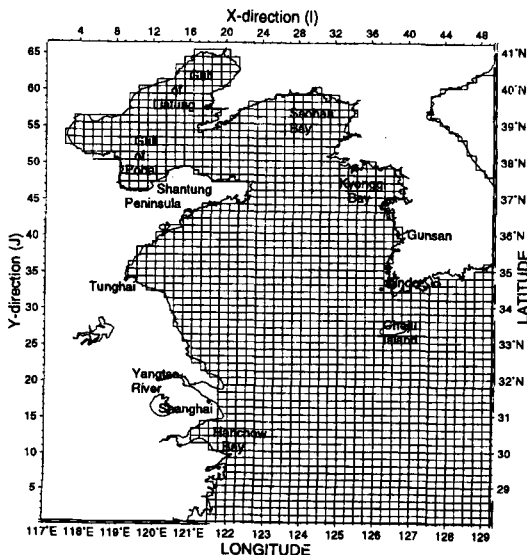


Fig. 1. Spatial grid system used in numerical calculation.

경계조건은 육지와 접하는 폐경계면(solid boundary)과 연구 영역 남동쪽에 위치한 개방 경계면으로 나누었다. 폐경계면의 경우 해수의 유입이나 유출이 없다고 가정하였고 해안의 점성 경계조건을 적용하여 해안선에 수평한 유속도 0으로 하였다. 개방 경계면에서 조위의 경계값을 대입하고 결과적으로 나타나는 유속은 자유롭게 허용하였다.

이 모델에서 사용하는 계수와 상수는 중력 가속도(g), 밀도(ρ), 전항력 상수(f), 수평외동 점성 계수(A_t), 해저 마찰 계수(γ^2), 표면바람 마찰 응력(τ_s) 이 있다. 표면바람 마찰 응력(τ_s)값은 Na(1992)의 값을 그대로 사용하였으며 나머지 값은 다음과 같이 하였다.

$$\rho_a(\text{대기밀도})=0.0125 \text{ g/cm}^3$$

$$C_D(\text{항력계수})=(0.75 + 0.067 | w |) \times 10^{-3} \text{ (Garratt, 1977)}$$

$$g=9.8 \times 10^2 \text{ cm/s}^2$$

$$\rho=1.0 \text{ g/cm}^3$$

$$f=2\omega \sin\phi \text{ radian/s} (\omega: \text{지구의 자전 각속도, } \phi: \text{격자 중심점위도})$$

$$A_t=1.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ (An and Lee, 1976)}$$

$$\gamma^2=2.6 \times 10^{-3} \text{ (An and Lee, 1976)}$$

$$\tau_s=\rho_a C_D w | w | \text{ dyne/cm}^2$$

물질 이동 계산 방법

부유물질의 궤적을 계산하기 위해서는 이동 지점의 위치를 계산하여야 하며, 이를 위해서 fourth-order Runge-Kutta scheme을 이용하였다.

$$K_1 = \Delta t \times u(t, x_n)$$

$$K_2 = \Delta t \times u\left(t + \frac{\Delta t}{2}, x_n + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$K_3 = \Delta t \times u\left(t + \frac{\Delta t}{2}, x_n + \frac{K_2}{2}\right)$$

$$K_4 = \Delta t \times u\left(t + \Delta t, x_n + K_3\right)$$

$$x_{n+1} = x_n + \frac{K_1}{6} + \frac{K_2}{3} + \frac{K_3}{3} + \frac{K_4}{6} \quad (9)$$

여기에서 x_{n+1} 은 이전 단계의 위치 x_n 으로부터 Δt 동안 속도 u로 이동한 입자의 새 위치를 나타내고, K_i 는 Runge-Kutta 계수를 나타낸다.

유속의 계산은 선형 또는 3차 보간법을 사용하는 데, 이를 위해서는 4개 또는 16개의 인접 격자점에서의 유속을 사용한다. 경계면에서는 선형 보간법을, 내부 영역에서는 3차 보간법을 사용했다. 3차 보간법의 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

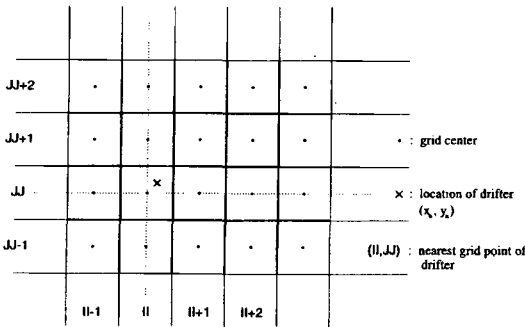


Fig. 2. Schematic of the interpolation scheme used for Lagrangian drifter calculation.

$$u(x_f, y_f) = \sum_{i=1,4} \sum_{j=1,4} u(x_i, y_j) \frac{\left[\prod_{K=1,4}^{k \neq i} (x_f - x_k) \cdot \prod_{l=1,4}^{l \neq j} (y_f - y_l) \right]}{\left[\prod_{K=1,4} (x_i - x_k) \cdot \prod_{l=1,4} (y_j - y_l) \right]} \quad (10)$$

여기에서 (x_f, y_f) 는 추적 부유물의 위치이고, (x_i, y_i) 는 16개의 인접 격자점의 위치를 나타낸다. 이동된 위치에서 부유물의 유속이 일단 계산되면(9)식의 fourth-order Runge-Kutta scheme에 의해 새 위치를 계산한다(Hofmann *et al.*, 1991).

본 모델에서는 각 격자의 중심에서의 유속이 매 Δt 간격으로 계산되므로, 정해진 부유물(drifter)에서 가장 가까운 격자점의 위치(II, JJ)를 우선 찾은 다음 II-1에서 II+2까지, JJ-1에서 JJ+2까지 16개 지점의 Euler 유속을 보간하여 Lagrange 유속을 구하였다(Fig. 2).

연구 자료 및 처리 방법

본 연구 영역의 수심은 황해의 경우 평균 수심 44 m로 60~80 m의 비교적 깊은 곳은 한국쪽으로 치우쳐 남북으로 길게 뻗어 있으며, 동중국해의 경우는 수심 1,000 m에 이르는 오키나와 해구(Okinawa trough)의 일부 지역을 포함하고 있다(Fig. 3). 수치 모델 내에서는 수심을 격자 중심값으로 입력하였으며 전체 해역의 평균수심은 111.6 m이고, 최저수심은 일부 연안에서 2 m, 최대 수심은 모델 영역 남동쪽에 위치한 오키나와 해구 쪽에서 1,300 m이다. 모델 내의 유속 계산에서는 두 격자점 값을 평균한 격자선의 수심 값을 사용하였다(이석우, 1992).

조석 잔차류에 의한 순환 형태를 살펴보기 위해 우

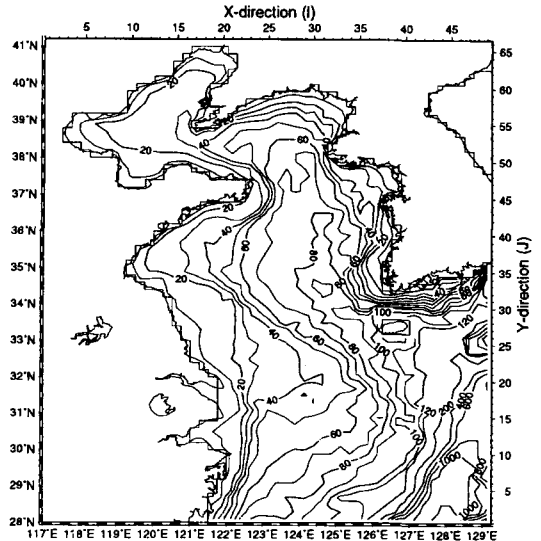


Fig. 3. Bathymetric chart of the Yellow Sea and the East China Sea (unit: m).

선 조류를 계산하였다. 조류를 계산하는 데 있어서 초기값은 개방 경계면에서 입력하며, 이 값은 Choi (1980)에 수록된 관측에 의한 조화 상수값과 일부 개방 경계 입력값과, Ogura(1933)의 관측도 값을 필요한 영역에서 내삽하여 사용하였다. 조석 잔차류($\bar{u}_{i,j}$) 값은 다음과 같이 계산한다(Dronkers, 1964).

$$\bar{u}_{i,j} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{i,j}(t) dt \quad (11)$$

여기에서 T는 1주기(12 lunar hours)를 나타내고 $u_{i,j}$ 는 매 순간 격자 중심점에서의 조류의 속도를 나타낸다.

계절풍에 의한 순환 형태를 살펴보기 위해 Na (1992)가 계산한 바람 응력값을 표층에서 작용하는 마찰력으로 하여 전 수층에 압력 변화로 작용하도록 하여 지형류 평형 상태에 도달하도록 하였다. 앞의 식(6)과 (7)에서 τ_b 값으로 입력하여 수층량을 계산한 후 수위 변화를 계산하고 다른 항들을 계산하여 10일 후의 유속과 수위 값을 출력하도록 하였다.

Na(1992)의 10년간(1978~1987) 월 평균 바람 응력 자료 중 1월, 4월, 7월, 10월의 값에 대해서만 분석하였다. 이 바람응력 자료는 본 연구 해역 중 70개 지점에 대한 값 만이 해당되며, 원 자료 격자계가 본 연구 자료 격자계에 대해 약간 회전되어 있으므로, 이 값을 회전이동하고 Inverse Distance Method에 의해 내삽하여 1734개 지점의 값을 만들었다. Inverse Distance Method는 다음과 같다.

$$z = \frac{\sum_{i=1, n} w_i z_i}{\sum_{i=1, n} w_i} \quad x_i \neq x, y_i \neq y \quad \text{or} \quad z_i \quad x_i = x, y_i = y \quad (12)$$

$$w_i = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]^{p/2}$$

여기에서 w_i 는 가중(weight) 값으로 값이 있는 지점이 내삽하려는 지점에 가까울수록 큰 값을 갖는다. p 는 3승으로 하여 가까울수록 그 영향이 더욱 크도록 하였다. z 는 원하는 격자점(x, y)에서의 바람 응력 값이고, z_i 는 내삽되기 이전의 초기 자료값의 위치(x_i, y_i)에서의 바람 응력 값을 나타내고, n 은 주어진 자료의 개수를 나타낸다.

평형 상태에 도달한 후의 유속은 일정하기 때문에 이로 인한 순환에 의해 이동하는 부유물의 위치는 Runge-Kutta-scheme을 이용하여 1시간 간격으로 궤적을 계산하였다.

결과 및 토의

조석잔차류

Fig. 4는 이 해역에서 조류 속도를 1주기 동안 평균한 조석잔차류의 계산 결과를 보여준다. 종래에는 연안 해역의 물질 확산에는 탁월한 조류의 역할이 크다고 생각되어 왔으나 수 조석 주기 이상의 장주기 물질 수송에 대해서는 왕복류인 조류보다는 미약하지만 한 방향으로 흐르는 잔차류의 역할이 크다는 것이 알려졌다(柳哲雄, 1989). 따라서 물질의 장기간 수송을 다루는 데 있어서는 잔차류에 대한 분석이 중요

하게 여겨지고 있다. 조석 잔차류는 조류 계산에 있어서 비선형항의 결과로 생성되며, 와모드(Vorticity mode) 운동으로 순환류의 구조를 갖는다.

이 해역의 조석 잔차류는 대부분 수 cm/s 정도로 작으나, 그 값이 특히 큰 곳은 항조우만(Hanchow Bay), 경기만, 진도 근처, 제주도 해역, 오키나와 해구 영역이며, 최대 유속은 제주도 남서쪽에서 10 cm/s 이상으로 나타났다. 전체적으로는 조류가 강한 영역이 잔차류도 큰 편이나, 몇몇 해안선이 특징적인 곳과 수심의 변화가 급격한 곳에서는 조류가 약해도 조석 잔차류가 크게 나타나고 있다. 순환 형태는 시계 방향과 반시계 방향의 회전 구조가 섞여서 나타나고 있다. 이러한 특성은 잔차류 생성 자체가 수심의 변화, 수평 점성 감쇄, 해저 마찰에 따른 감쇄에 의해 생성된 와도의 수렴이나 발산과 관련이 있기 때문이다.

Fig. 4의 북쪽 라오둥 반도에서는 첨부를 바라볼 때 좌측(북쪽)으로는 시계 방향의 회전이, 우측(남쪽)으로는 반시계 방향의 회전이 존재한다. 이것은 첨부를 경계로 좌우측으로 흐름이 나뉘고 첨부에 가까울수록 유속이 약해져 상대속도 차이로 와도가 형성되고 이것이 축적되어 나타나는 것이다. 이러한 경향은 산둥 반도를 경계로 해서도 설명할 수 있는데, 산둥 반도를 바라볼 때 좌측(남쪽)으로는 시계방향 회전류가 우측(북쪽)으로는 반시계 방향 회전류가 존재한다. 돌출부를 통과한 작은 만의 경우는 이러한 효과가 더 크게 나타날 수 있을 것이다. 그러나 해안선이 복잡한 한국 연안에서는 격자 간격이 큰 편이어서 쉽게 적용하기 어렵다. 한국연안은 해안선이 복잡함과 함께 수심의 변화도 급격한 편이어서 잔차류 값이 크고 회전 구조가 복잡한 편이다.

전반적으로 볼 때 한국 남·서해안과 제주도 부근과 중국 항조우만, 양자강 하구역 부근에서 크게 나타난다. 제주도 부근에서는 10 cm/s 이상의 최대 잔차류가 나타나며 시계방향의 순환을 보이지만 전반적으로 남해안을 따라 동향류의 경향이 있다. 또한, 중국의 연운항(Tungshai)에서 상해 사이의 영역에서는 한국의 남해로 향하는 순환 구조가 나타나고 있다. 이러한 조석 잔차류 순환 형태로 인하여 한국 연안의 몇 지점에서는 오염물이 배출될 경우 제자리에서 회전하는 경향이 강하고, 중국의 연운항 남쪽(34°N 이남)에서 배출된 부유 오염물은 한국 남해쪽으로 이동할 가능성이 크다.

바람에 의한 순환

황해와 동중국해 영역은 계절풍의 영향을 받는 곳으로 월별로 순환 형태가 달라질 수 있다. 각 계절을

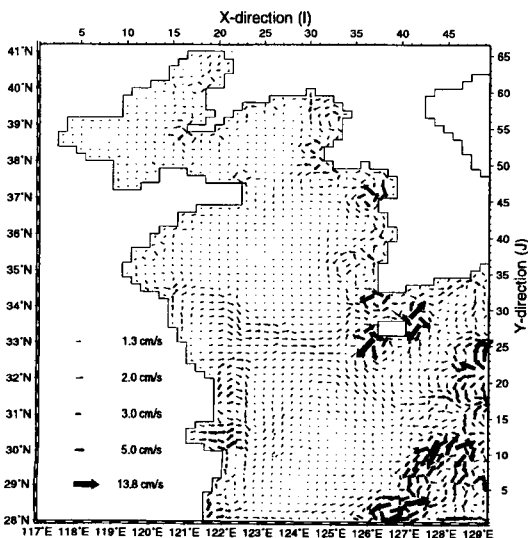


Fig. 4. Calculated M_2 tidal residual current.

대표하여 1월, 4월, 7월, 10월에 대해서 10일 동안 계산하였다. 표면에서 바람이 마찰영역으로 작용하여 수위를 변화시켜 지형류 평형상태에 도달하여 프로그램이 안정되는 것은 7일 이후이다.

1월: Fig. 5는 1월의 풍속·풍향과 수위분포, 해수 순환 형태를 보여준다. (a)는 바람장으로 경기만 쪽에서 풍속이 가장 강하여 약 2.7 m/s에 달하고 한국 남해도 약 2.5 m/s 정도가 된다. 해역의 서쪽의 중국 영역에서는 2.0 m/s 이하로 나타나는 편이고, 북쪽의 라오동만과 뽀하이만 영역은 1.5 m/s 이하로 나타나고 있다. 풍향은 해역 중앙부에서는 거의 북풍에 가까우며, 육지 연안을 따라 약간 서쪽으로 기울어지고 있고, 라오동만과 뽀하이만과 항주오만 아래로는 약간 동쪽으로 기울어진 북동풍이 불고 있다. (b)는 지형류 평형상태에 도달한 후의 표층수위를 보여주는데, 라오동만·뽀하이만 영역(최저: -11 cm)과 서한만 영역(최저: -13.6 cm)은 수위가 낮게 나타나고, 항주오만 근처(최고 8.5 cm)와 연운항(Tunghai)과 군산 사이의

황해 중심부에서 수위가 높게(최고 4.2 cm) 나타나고 있다. 이것은 북풍이 불 때 수심이 얕은 연안을 따라 해수가 중심 해역보다 강하게 남으로 내려옴에 따라 중심부는 북류가 형성되기 때문에 연운항(Tunghai)과 군산 사이 황해 중심부 영역의 해수가 높아지게 되는 것으로 설명할 수 있다. (c)의 표층 순환류 형태를 보면, 시계 방향의 회전류가 해역에 전체적으로 나타나고 있으며, 중국 연안과 뽀하이만 영역에서는 반시계 방향의 회전류가 나타나고 있다. 이러한 형태의 유속 분포는 표면 수위의 분포와 잘 일치한다. 중심부에서 중국 쪽으로는 반시계 방향 회전이 생성되고, 중심부에서 한국 쪽으로는 시계 방향 회전이 생성되는데 풍속이 크고 흐름이 강한 한국연안 쪽으로의 시계 방향 회전류가 전반적으로 강하게 나타나는 경향이 있다. 흐름이 가장 빠른 곳은 16 cm/s에 달한다.

4월: 4월의 경우는 Fig. 6에서 보여준다. (a)는 바람의 분포를 보여주며 1월보다 약한 북풍계열이 불고 있다. 라오동만과 뽀하이만 영역은 0.75 m/s 이하의

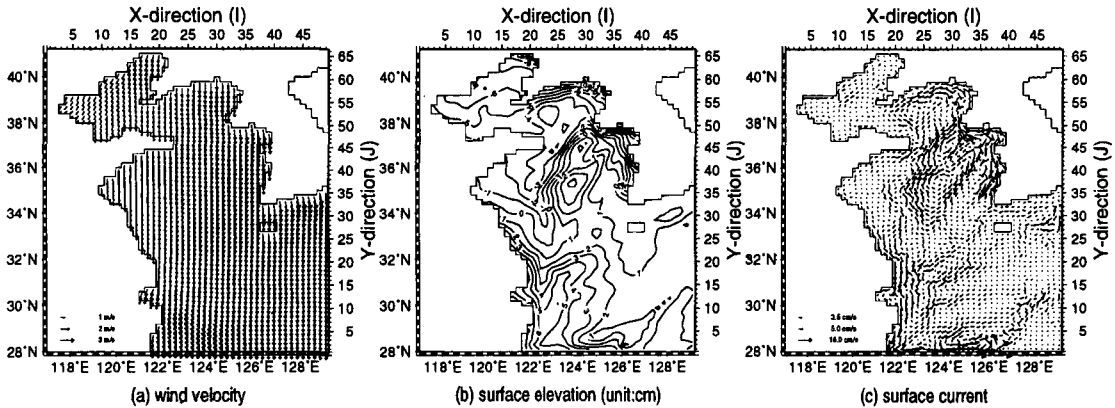


Fig. 5. January wind velocity (a), surface elevation (b) and surface current (c).

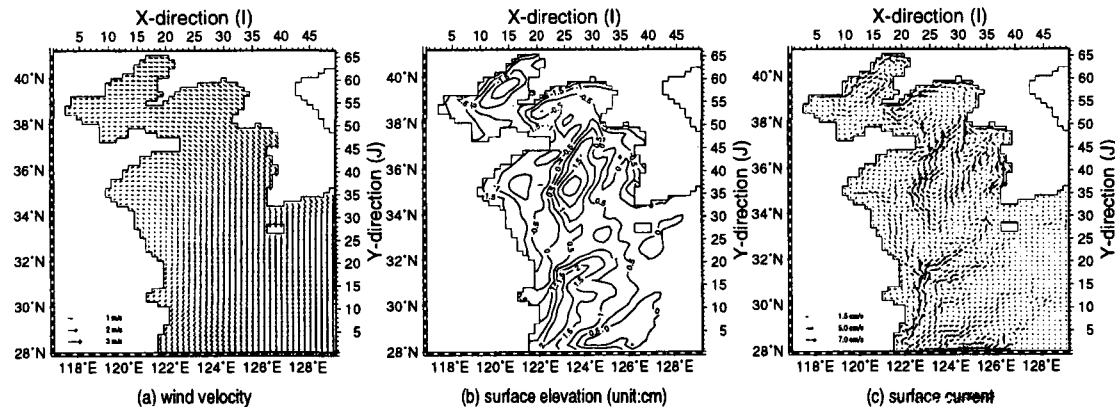


Fig. 6. April wind velocity (a), surface elevation (b) and surface current (c).

서풍이 불고 있고, 서한만과 산둥반도 사이 부터는 북서풍이 나타나 황해 중앙부와 한국 남해까지 이어지고 있으며 (0.7~1.1 m/s) 동중국해는 북풍(0.8~1.2 m/s)이 불고 있고 연운항(Tunghai) 영역에서는 약하게 (0.3~0.5 m/s) 남서풍이 불고 있으며, 항조우만 아래 쪽으로는 북서풍이 불고 있다. 이런 바람장에 의한 수위 분포 (b)를 보면 뽀하이만 서쪽으로 -3.4 cm까지 수위가 낮아지고 서한만 북쪽으로는 -2.5 cm까지 낮아져서 이 영역에서 유출된 물이 황해 중앙부에 축적되어 2.4 cm까지 수위를 상승시키고 있다. 또한 연운항(Tunghai) 남쪽으로는 -1.7 cm까지 수위가 낮아지고 있고, 바람이 약하고 북서풍이 위치한 항조우만 외해 쪽에서 2.4 cm까지 수위가 상승한다. (c)의 해수 순환을 보면 전반적으로 시계 방향의 순환이 나타나고 있다. 뽀하이만 쪽은 서풍에 의해 서쪽 수위가 낮아지고 동쪽 수위가 높아짐에 따라 반시계 순환(0.3~5 cm/s)이 형성되었고, 서한만 영역은 연안을 따라 부는 북서풍으로 인해 시계방향의 순환(0.2~5.0 cm/s)이 형성되었으며 수위가 높은 황해 중앙부를 중심으로 등수위선을 따라서도 시계방향의 순환(0.5~5.6 cm/s)이 형성되었고, 경기만과 군산 쪽으로 남향류(~6.5 cm/s)가 강하게 연장되어 있다. 오키나와 해구 서쪽으로만 약하게(0.3~3.9 cm/s) 반시계 방향의 순환이 나타나고 있다.

7월: 7월은 Fig. 7에서 보여준다. (a)의 바람분포를 보면 대단히 특징적인 분포를 하고 있다. 양자강 주변으로 약한 열대성 저기압이 위치하여 0.1~1.0 m/s의 반시계 방향의 바람이 불고 있고, 황해로 들어오면서 남동풍에서 남서풍으로 방향의 전환이 이루어져 황해 전역에서는 대단히 약한 남서풍이 불고 있으며, 일본 서쪽과 한국 남해에서는 1.0~1.4 cm/s의 강한 남풍이 불고 있다. (b)의 수위 분포를 보면,

뽀하이만 중앙부에서 1.2 cm 정도 수위가 상승하고, 1월과 4월에는 수위가 낮았던 서한만 북쪽으로 수위가 1.7 cm 정도 상승한 상태로 나타나고 있으며, 저기압성 바람이 부는 해역 남서쪽으로 수위가 -3.4 cm까지 낮아진 것이 두드러진 특징이다. (c)의 해수 순환을 보면 남쪽에 위치한 저기압 영향으로 남서쪽 저기압 근처 해역의 해수는 강한 반시계 방향 회전(~8 cm/s)이 나타나고, 황해 중심부에서는 전반적으로 유속이 작지만 한국 서안을 따라 북류가 나타나 서한만에서 반시계 방향으로 돌아나오고 있다. 남서풍이 부는 라오똥만·뽀하이만 쪽과 산둥반도 아래 쪽으로 약하게(~2.3 cm/s) 시계 방향 순환류가 나타나고 있다. 황해의 순환 유형은 남풍에 의해 수심이 얕은 연안을 따라 북류가 형성되고, 중심부에서는 남류가 형성되어져, 중국 연안에서는 시계방향으로 회전하고, 한국 연안에서는 반시계 방향으로 회전하는 순환이 형성되어 나타나는 것이다. 남서쪽의 저기압성 바람에 의하여는 강한 반시계 방향의 순환이 형성된 것이다.

10월: 10월의 경우는 Fig. 8에서 볼 수 있다. (a)의 바람 분포를 보면, 1월 보다는 약하지만 전 영역에 북풍(1.0~1.5 m/s)이 불고 있으며, 동중국해상에 두드러지게 강풍(1.0~2.0 m/s)이 불고 있다. (b)의 수위 분포를 보면, 라오똥만 북쪽 수위가 -4.6 cm까지 낮아지고, 서한만 북쪽은 -5.5 cm까지 낮아지며, 경기만 쪽은 -3.0 cm까지 낮아지는 등 한국 서해안을 따라 낮은 수위가 나타나고 있다. 수위가 높아지는 곳은 1월과 마찬가지로 항조우만 아래쪽으로 6 cm 정도까지 상승하고, 황해 중앙부에서 1.6 cm 정도 약하게 상승한다. (c)의 해수 순환을 보면 라오똥만과 뽀하이만 쪽(0.3~4.8 cm/s)과 황해 중동부(~8.6 cm/s)에서 시계 방향의 회전이 나타나고, 산둥반도 아래쪽 (~4 cm/s)

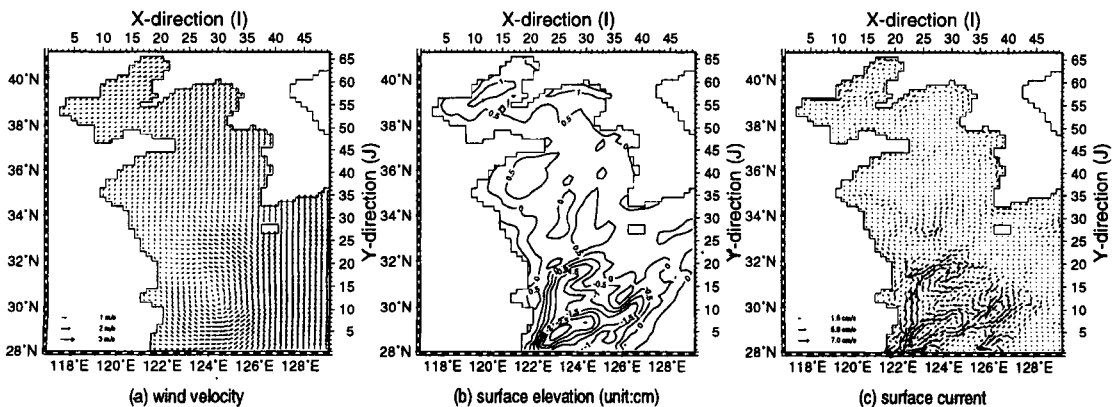


Fig. 7. July wind velocity (a), surface elevation (b) and surface current (c).

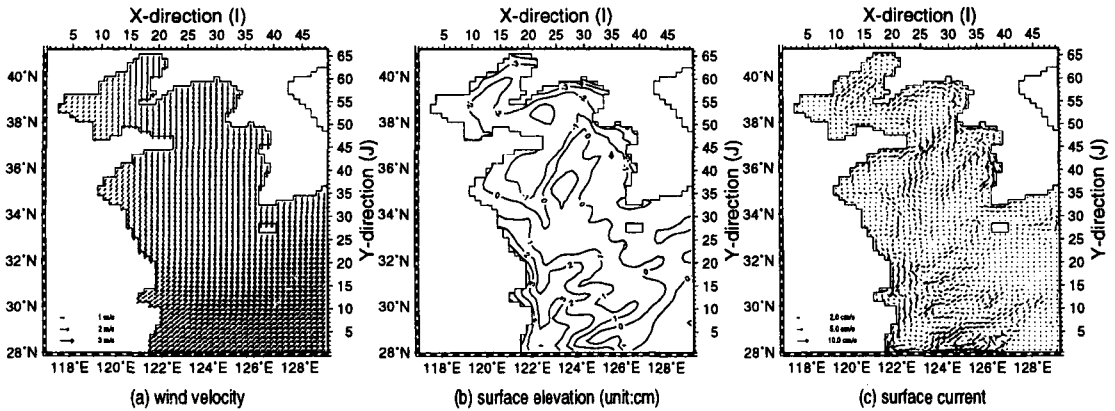


Fig. 8. October wind velocity (a), surface elevation (b) and surface current (c).

과 동중국해 중앙부(-4.5 cm/s)에서는 반시계 방향의 순환이 나타나고 있다.

전반적으로 황해에서는 여름철(7월)을 제외하고는 시계 방향의 순환이 우세하게 나타나며, 한국 연안을 따라서는 역시 7월을 제외하고는 항상 남쪽에서의 흐름이 존재하고, 중국 연안으로는 1월과 10월에는 남쪽에서의 흐름이, 4월과 10월에는 북쪽에서의 흐름이 존재한다. 또한, 동중국해에서는 1월과 4월에는 시계 방향의 회전류가 존재하고 7월과 10월에는 반시계 방향의 회전류가 존재한다. 오키나와 해구 중심부로는 분석한 네달 모두 남서에서 북동으로 향하는 흐름이 존재한다. 유속은 중국 연안보다 한국 연안 쪽에서 강한 편이다.

본 연구에서는 쿠로시오 해류에 대해 고려하지 않았으며, 남해에 대해 좀 더 정확한 순환을 파악하기 위해서는 이에 대한 고려가 필요하다. 그렇지만, 황해 내부의 순환을 모의하는 데에는 큰 영향이 없다고 본다(An 1985, An 1987). 이러한 순환을 조류와 비교한다면 그 유속이 1/10 정도 크기밖에 되지 않지만 장기간의 부유물의 이동에 있어서는 잔차류 성분의 하나가 되어 이동거리와 경로에 중요하게 기여하게 된다. 이제부터는 부유물의 이동이 각 순환에 의해 어느 정도 어떤 형태로 이루어지는지를 살펴보고자 한다.

부유물의 이동

부유물의 이동은 단기적으로는 강한 조류의 영향을 크게 받아 이동할 것이고, 장기적으로는 회전류인 조류성분을 제외한 잔차류의 영향을 받는다. 잔차류는 조류의 비선형항에 의해 생성되는 조석 잔차류, 취송류 성분, 또는 강물이나 태양가열 효과에 의해 생성된다. 조석잔차류는 일반적으로 계절에 상관없이 일

정한 편이나, 바람에 의한 취송류 성분은 계절 변동이 나타나는 편이다.

본 연구에서는 조석 잔차류와 취송류에 의한 부유물의 이동을 살펴보기 위해서 24개 지점을 정하였다.

실험은 10일 동안 첫째 조석 잔차류만 고려한 경우, 둘째 취송류만 고려한 경우, 셋째 조석 잔차류와 취송류를 함께 고려한 3가지 경우에 대한 부유물의 이동을 Runge-Kutta method를 이용하여 추적 계산하였다.

Fig. 9는 조석 잔차류에 의한 이동 궤적으로 시작 지점을 굵은 점으로 나타내었다. 조석 잔차류의 크기가 큰 한국 연안의 지점에서는 뚜렷한 이동이 나타나며 시작점에서 벗어남에 따라 유속이나 유향이 바뀔에 따라 시작점의 조석 잔차류 방향과 다르게 이동하

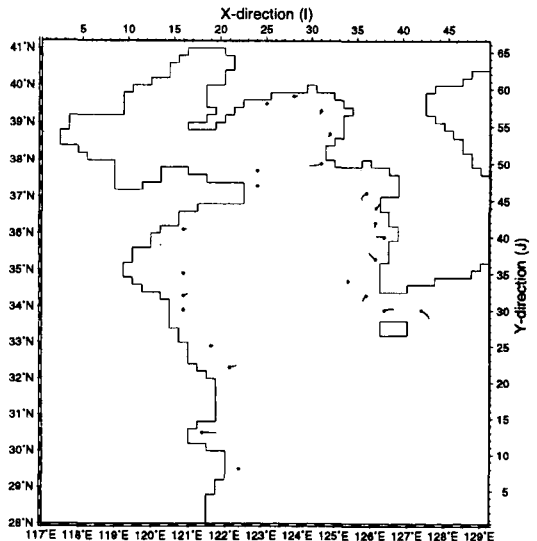


Fig. 9. Particle tracing by tidal residual current for 10 days.

게 된다. 연안으로 뚜렷하게 이동해 오는 지점은 태안 반도쪽이다. 제주도 주변에서는 조석 잔차류가 제주도를 중심으로 시계 방향으로 회전하는 경향이 있는데 부유물의 이동에서도 그러한 결과가 뚜렷하게 보인다. 조석 잔차류에 의해 이동하는 거리는 10일 동안 평균 15 km 정도이다.

취송류에 의한 부유물의 이동은 Fig. 10과 같다. 바람이 강한 1월과 10월의 이동량이 큰 편이며, 특히 한국 서해안 부근에서 크다. 평균 이동거리는 1월에 43 km, 4월 22 km, 7월 10 km, 10월 24 km로 나타났고, 최대값은 1월 군산 근처에서 109 km까지 이동하였다. 순환류의 방향에 따라 한국 서쪽 연안에서는 7월을 제외하고는 남쪽으로 이동하고 있으며 중국 연안의 이동은 미약한 편이다.

조석 잔차류와 취송류에 의한 부유물의 이동은

Fig. 11에 주어졌다. 조석 잔차류 값이 큰 제주도 북동쪽 지점은 잔차류 방향으로 이동하고, 제주도 북서쪽 지점은 1월에는 취송류와 조석 잔차류 유속이 대등하여 두 방향의 사이로 이동하고 다른 달에는 잔차류 방향으로 이동한다. 다른 대부분의 지점은 취송류 방향으로 이동하는 경향이 강하다. 평균 이동거리는 1월 47 km, 4월 29 km, 7월 16 km, 10월 28 km로 바람만 고려한 경우 보다는 4~7 km 정도 더 이동량이 늘었다. 최대값은 1월 태안반도 근처에서 108 km 남쪽으로 이동하는 것으로 나타났다.

이러한 이동은 월별 변화가 크며 바람에 의한 순환이 안정되는 데까지 수 일 이상의 시간이 걸리기 때문에 수백일의 부유물 이동에 대해서는 취송류보다 조석 잔차류의 영향이 아주 크게 나타날 수 있으리라 여겨진다. 조석 잔차류에 의해 1년 동안 이동

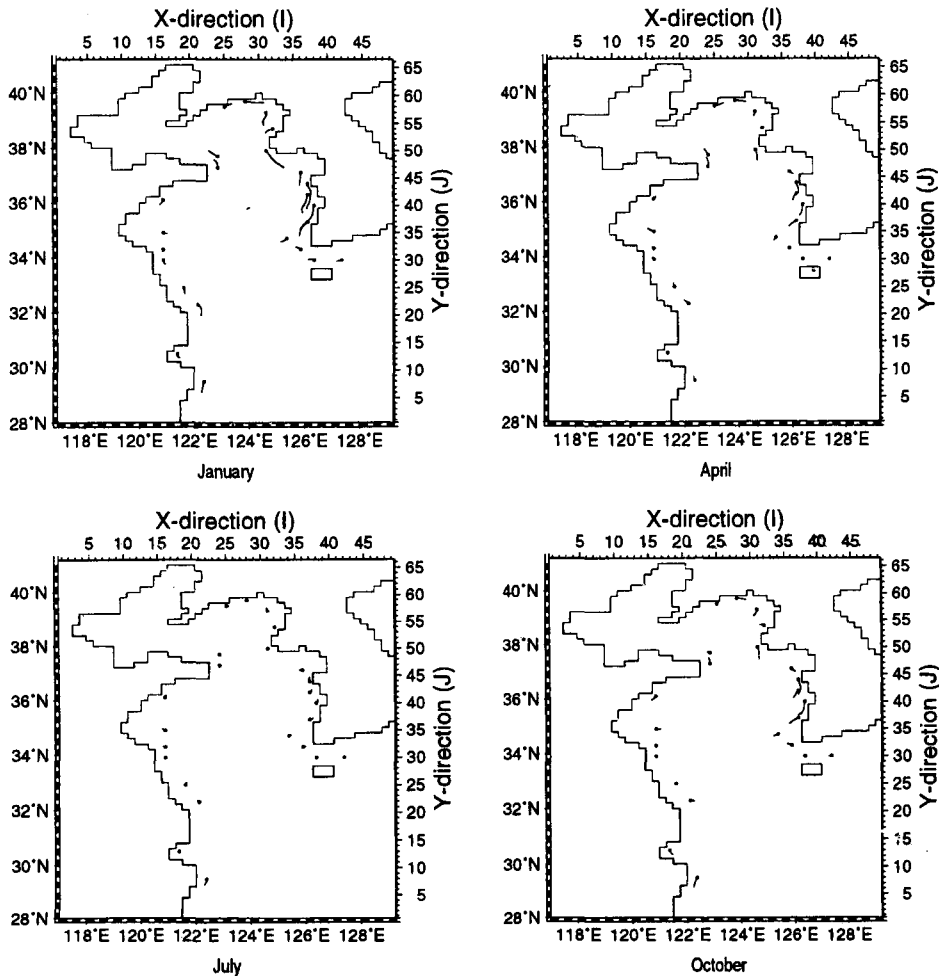


Fig. 10. Particle tracing by wind-driven current for 10 days.

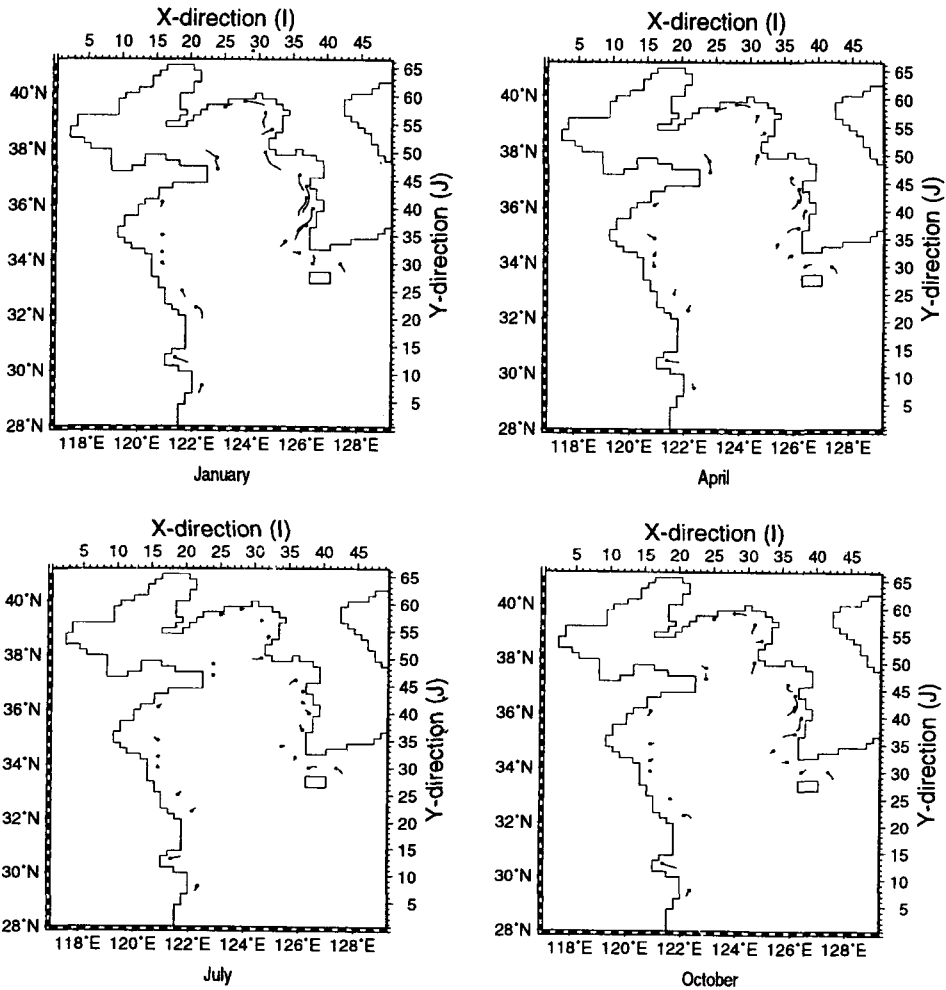


Fig. 11. Particle tracing by tidal residual and wind-driven current for 10 days.

하는 궤적을 추적하여 Fig. 12에 제시하였다. 위도 32°에서 34° 사이의 중국 연안에서는 한국 남해로의 이동이 나타나고 있으며, 한국 서해안에서도 남해로의 이동이 이루어지고 있다. 분석한 24개 지점에서의 평균 이동량은 160 km 정도이고, 최대 이동은 중국 연안의 위도 33° 양자강 북쪽 지점에서 400 km에 달했다.

결론

본 연구에서는 황해와 동중국해에서 바람에 의해 유발된 순환류를 천해파 방정식을 이용한 2차원 유한차분 순압모델을 이용하여 살펴보았다. 또한 이러한 순환에 의한 부유물의 이동을 계산하였다.

조석 잔차류의 형태는 시계 방향과 반시계 방향의 회전구조가 섞여서 나타나는데 이러한 형태는 수심

의 변화와 해안선의 형태가 결정하는 것으로 보인다. 조석 잔차류는 한국 남·서해안과 제주도 부근과 중국 항조우만과 양자강 하구역에서 크게 나타났다. 제주도 부근에서는 10 cm/s 이상의 최대 잔차류가 나타나며, 시계 방향의 순환류를 보이지만 전반적으로 남해안을 따라 동향류의 경향이 있다. 또한, 중국의 연운항(Tungshai)에서 상하이 사이의 영역에서는 한국의 남해로 향하는 순환 구조가 나타나고 있다.

겨울(1월)의 경우는 강한 북풍에 의하여 시계 방향의 순환류가 나타났고, 한국 연안 쪽으로는 강한 남향류가 나타났다. 봄(4월)의 경우는 북서풍의 영향을 받아 일부 지역을 제외하고 시계 방향의 순환이 나타났고 한국 연안으로는 1월보다는 약하지만 남향류가 나타났다. 여름(7월)의 경우는 열대성 저기압의 영향으로 해역 남서쪽에 반시계 방향이 바람이 불어 전반적으로 반시계 방향의 순환이 나타났고 한국 연

참고문헌

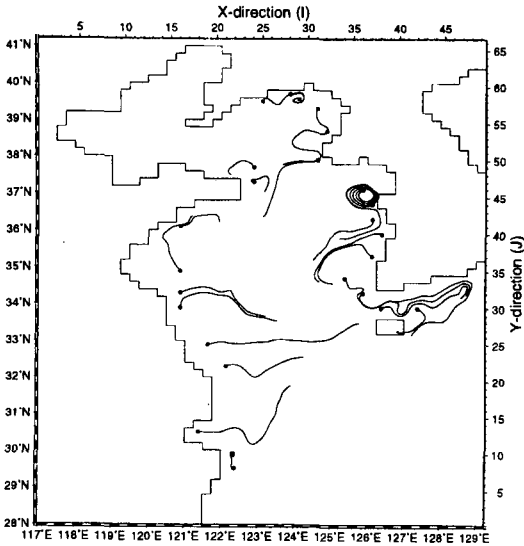


Fig. 12. Particle tracing by tidal residual current for 1 year.

안으로는 북향류가 나타났다. 가을(10월)의 경우는 북풍이 불어 1월과 비슷한 형태를 나타내 해석 전체적으로 시계 방향의 순환이 나타나고 있다. 전 달에 대해 유속은 중국 연안보다 한국 연안쪽에서 강한 편이며, 한국 연안은 7월을 제외하고는 남향류가 나타났다.

조석잔차류와 취송류는 다함께 황해의 부유물 이동에 중요한 역할을 담당할 것으로 생각되는데 10일 동안의 계산 결과에 의하면, 장소에 따라 크게 다르지만, 취송류가 조석잔차류 보다 4배 정도 크게 영향을 미쳤다.

그러나, 취송류는 월별 변화가 크며 바람에 의한 순환이 안정되는데까지 수 일 이상이 걸리기 때문에 수 백일의 부유물 이동에 대해서는 항상 일정한 조석잔차류의 영향이 훨씬 크게 나타날 수 있다. 조석 잔차류에 의한 1년의 이동을 보면 한국 서해안과 중국의 위도 32°에서 34° 영역에서는 한국의 남해안으로 이동하는 것으로 나타났다. 최대 이동값은 위도 33°의 중국연안에서 400 km에 달했다.

본 연구에서는 조류와 바람에 의한 순환만 고려하였으나 장기간 이동하는 부유물이 모이는 한국 남해에 대해 좀 더 정확한 순환 양상을 파악하기 위해서는 강한 쿠로시오 해류의 유입과 유출을 고려하여야 하겠다. 그렇지만 황해 내부의 경우는 쿠로시오 해류 영향이 미약한 것으로 알려져 있으므로 본 연구의 순환이 중요하게 작용할 수 있으리라 생각한다.

김영수, 1996, 우리나라 동해안의 지진해일 위험도 예측 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, p. 61.
 나정열, 서장원, 한상규, 1992, 한국근해의 월평균 해상풍, 한국지구과학회지, 27(1), p. 1-10.
 박경애, 1989, 대한해협에서의 조석과 해일에 관한 수치 실험 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, p. 67.
 박철민, 1995, 황해 남동부 해역에서 비선형항에 의한 M2 분조의 반응과 M4 분조의 생성에 대한 수치 실험 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, p. 72.
 안희수, 1985, 2층 밀도 성층 모델을 이용한 황해 및 동지나해 순환의 수치 실험, 한국지구과학회지, 6(1), p. 43-48.
 오임상, 최현우, 1986, 조류모델을 위한 개방 경계조건 연구, 한국지구과학회지, 7(1), p. 35-45.
 이석우, 1983, 물리해양학 통론, 집문당, p. 268.
 이석우, 1992, 한국근해 해상지, 집문당, p. 334.
 柳哲雄, 1989, 沿岸海洋學, 恒星社厚生學, p. 154.
 An H. S., 1977, A Numerical Experiment of the M2 Tide in the Yellow Sea, Journal of the Oceanographical Society of Japan vol. 33, p. 103-110.
 An H. S., 1987, The Numerical Simulation of the Oceanic Circulation in the Yellow Sea, Jour.Korean Earth Science Society, vol. 8, p. 171-176.
 An H. S. and Lee S. W., 1976, A Numerical Experiment on Tidal Currents in Asan Bay, The Journal of the Oceanological Society of Korea, vol. 11, p. 18-24.
 Bowden, K. F., 1983, Physical Oceanography of Coastal Waters, Ellis Horwood Ltd., p. 302.
 Choi, B. H., 1980, A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Korea Report 80-02, p. 72.
 Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1984, Water wave mechanics, Prentice-Hall Inc., p. 353.
 Defant, A., 1960, Physical Oceanography, Pergamon Press, p. 598.
 Garratt, J. R., 1977, Review of drag coefficients over oceans and continents, Mon. Wea. Rev., 105, p. 915-929.
 Hofmann, E. E., Hedstrom, K. S., Moisan, J. R., Haidvogel, A. B. and Mackas, D. L., 1991, Use of Simulated Drifter Tracks to Investigate General Transport Patterns and Residence Times in the Coastal Transition Zone. Journal of Geophysical Research, V96, C8, p. 15041-15052.
 Joseph J. von Schwind, 1980, Geophysical Fluid Dynamics for Oceanographers, Prentice-Hall, Inc., p. 307.
 Joseph Pedlosky, 1987, Geophysical Fluid Dynamics, Spring-Verlag, p. 710.
 Lee H. C., 1996, A Numerical Simulation for the Water Masses and Circulations of the Yellow Sea and the East China Sea, PhD Thesis, Kyushu University, p. 150.
 Tang, Y., 1988, Numerical Modelling of the Tide-induced Residual Current in the East China Sea, Prog. Oceanog., vol. 21, p. 417-429.
 Wessel, P. and Smith, Walter H. F., 1995, The Generic Mapping Tools, NOAA, p. 77.