

表層海流 迅速豫測을 위한 回旋積分法의 適用 Application of a Convolution Method for the Fast Prediction of Wind-Induced Surface Current in the Yellow Sea and the East China Sea

강관수* · 정경태*

Kwan Soo Kang* and Kyung Tae Jung*

要 旨 : 본 논문에서는 실시간 해황예보 시스템 개발의 일환으로 수행된 회선적분법을 이용한 신속 표층유속 재현에 대하여 다룬다. 바람응력은 공간적으로 균일하고 대기압은 무시된다. Data Base 구축을 위하여 4방향의 바람(북서, 북동, 남서, 남동)을 고려하여 각 지점의 회선적분의 가중치를 Galerkin-FEM 모형에 의해 계산하였다. 시간에 따른 바람응력이 주어지면 구성된 Data Base를 이용하여 회선적분법에 의해 신속한 예보가 가능하다. 시간적으로 변하는 임의의 바람응력은 6시간 단위로 정의되는 wind pulse의 연속으로 표현되며 총 12개의 pulse(즉, 72시간전)가 convolution product에 사용된다. 회선적분법의 적용 가능성을 확인하기 위하여 황해를 이상화한 해역과 황해와 동지나해에 이르는 실제 해역에서의 수치실험이 수행되었다. 고려한 바람응력은 역풍류 생성 확인을 위하여 시간에 따라 sin 함수적으로 변하는 북풍을 고려하였고, 실험 결과 역풍류 생성의 확인과 회선적분법을 이용한 신속 표층해류 예측 가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract □ In this paper, the performance of the convolution method has been investigated as an effort to develop a simple system of predicting wind-driven surface current on a real time basis. In this approach wind stress is assumed to be spatially uniform and the effect of atmospheric pressure is neglected. The discrete convolution weights are determined in advance at each point using a linear three-dimensional Galerkin model with linear shape functions(Galerkin-FEM model). Four directions of wind stress(e.g. NE, SW, NW, SE) with unit magnitude are imposed in the model calculation for the construction of data base for convolution weights. Given the time history of wind stress, it is then possible to predict wind-driven currents promptly using the convolution product of finite length. An unsteady wind stress of arbitrary form can be approximated by a series of wind pulses with magnitude of 6 hour averaged value. A total of 12 pulses are involved in the convolution product. To examine the accuracy of the convolution method a series of numerical experiments has been carried out in the idealized basin representing the scale of the Yellow Sea and the East China Sea. The wind stress imposed varies sinusoidally in time. It was found that the predicted surface currents and elevation fields were in good agreement with the results computed by the direct integration of the Galerkin model. A model with grid $1/8^\circ$ in latitude, $1/6^\circ$ in longitude was established which covers the entire region of the Yellow Sea and the East China Sea. The numerical prediction in terms of the convolution product has been carried out with particular attention on the formation of upwind flow in the middle of the Yellow Sea by northerly wind.

1. 서 론

산업화 및 국제화와 더불어 해상운송량이 급증함에 따라 해마다 연안에서 인위적 또는 자연적인 재해로 인하여 많은 인명과 재산상의 피해가 발생하고 있다. 최근 발생한 광양만의 시프린스호 좌초로 인한 유류

오염사고 등이 실례로 대책강구 및 피해저감을 위한 실시간 해황정보 시스템 구축이 요구되고 있다. 실시간 예보를 위해서는 궁극적으로 기상 수치모형과의 연계가 필요하다. 영국은 1970년대 초부터 기상예보와 관련하여 해수면 상태를 예보하는 체계를 마련하고자 노력하였고(Heaps, 1985), 미국은 캐나다와의 공동연

*韓國海洋研究所 沿岸工學部 (Coastal Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, 425-600, Korea)

구로 5대호 주변의 각종 기상변화, 호수의 흐름상태 및 수질상태를 항시 관측, 감시, 예보하며, 발생가능한 재해에 대하여 예보하는 체계를 개발하는 것에 초점을 두고 있다(여, 1994). 실시간 해양예보 체계 구축은 국내에서도 절실히 필요로 하고 있어 국가적 차원의 연구개발 및 시스템 구축이 요구되나 여러 사정으로 인해 이 분야의 연구 개발 투자가 미흡하고 기상 수치모형과의 연계기술은 아직 연구 경험이 없으며 일부 대학과 해양연구소를 중심으로 극히 초보적인 연구가 수행중에 있다. 수행중인 연구의 대부분도 파랑관측 모니터링 시스템에 주안점을 두고 있으며 실시간 해상변화 예보를 기상예보모델의 자료를 이용하여 흐름과 파랑을 연계하는 해상예보모델에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 최근 기상청과 해양연구소가 실시간 예보시스템 구축에 관한 연구를 시도하고 있으나 주된 입력자료인 해상풍 및 해면기압자료를 근거로 해양모델을 실시간으로 운영하는 체계 확립은 상당기간이 요구될 것이다.

현 시점에서 유류 오염사고 및 해난사고시 취송류 실시간 예측을 위해 제공될 수 있는 자료는 대표 풍향, 풍속정도일 것이다. 따라서 본 연구는 수색구조 작업 등에 유용하게 사용할 수 있는 신속 표층유속 예보 체계 구축의 일환으로 수행되었으며 일차적 시도로서 회선적분(convolution integral)개념을 도입하였다(일본수로협회, 1984). 회선적분 개념은 수문학등에서 많이 사용되는 기법으로 대표적으로 단위유량도법이 이 개념을 이용하는 기법이다. 본 연구에서는 일정한 풍속과 유향을 갖는 바람응력에 대해 유속의 변화는 선형적으로 반응한다는 가정을 전제하고 있다. 즉, 일정한 크기의 바람응력이 일정 시간(본 연구에서는 6시간)에 외력으로 작용한 후 정해진 시간마다의 결과를 Data Table화 하여 시간에 따라 변하는 외적 입력조건(여기서는 바람응력)이 주어지면 이에 따른 유속장을 사전에 준비된 Data Table을 이용하여 신속하게 예측할 수 있게 하였다. Data Table은 경제성이 우수한 강(1994)이 개발한 바 있는 유사변환기법을 이용한 Galerkin 함수모형(Galerkin function model)을 사용하여 구하였다. 국내에서 회선적분법을 사용한 연구로는 김(1994)이 대한해협의 해류예측 연구에 관련하여 취송류 예측에 적용한 바 있다.

회선적분법을 이용한 실험은 황해를 이상화한 해역(idealized basin)에서의 수치실험과 황해와 동지나해

의 실제지형을 고려한 수치실험이 포함된다. 본 연구에서 고려한 바람응력은 시간적으로 sin 함수적으로 변하는 북풍을 고려하여 Hsueh 등(1986) 수치실험한 바 있는 역풍류 생성 기작을 확인하고자 하였다. 실제 지형으로 고려한 해역은 동중국해를 포함한 황해전체 해역이며 모델의 격자체계는 $1/8^\circ \times 1/6^\circ$ 격자체계를 사용하였다. 동측으로 대마도를 포함한 대한해협까지 모델영역을 잡고 서측은 중국대륙에 의해 경계지위지며 남측으로 육봉해를 포함하면서 대만까지로 모델영역을 잡았으며 회선적분법의 적용을 위해 선형방정식이 사용되었다.

2. Convolution Product를 이용한 취송류 예측

대상해역내 외력으로 균일한 바람장만이 존재하고 해역내 취송류가 선형방정식에 의거 결정된다고 가정하면 어떤 시각의 취송류 $u(t)$ 는,

$$u(t) = \int_{-\infty}^t w(\tau)h_u(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

로 주어질 수 있다. 여기에서 $w(\tau)$ 는 풍속, $h_u(t-\tau)$ 는 바람에 대한 흐름의 응답을 표시하는 함수로서 단위 강도에 의한 바람이 단위시간동안 부여된 경우의 취송류의 변동이다. 즉, 어떤 시각의 취송류는 과거의 바람 $w(t)$ 와 응답 $h_u(t)$ 을 알면 결정 가능하다.

회선적분법의 적용을 위해 식 (1)을 다음과 같이 개략화 한다.

$$u(t) = \sum_{m=1}^n w(m\Delta\tau)h_u(t-m\Delta\tau)\Delta\tau \quad (2)$$

여기서 n 은 사용된 wind pulse의 총 갯수이다.

식 (2)에 대해 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 일정시간(Δt)동안 바람이 불고 바람이 멈추었을 경우 해역내 특정지점에서의 유속 변화 양상은 Fig. 1과 같고 과거의 바람응력을 일정시간(Δt)동안 동일하다고 가정한다면 특정시각의 취송류 양상은 Fig. 2와 같이 주어진 바람응력에 대해 지체된 시간만큼의 유속의 선형함으로 가정할 수 있다. 일정한 크기를 갖는 대표적인 4방향의 바람응력에 대한 지체된 시간마다의 응답(유속)은 수치모형을 이용하여 미리 Data Table화 하면 convolution product에 의해 신속 표층해

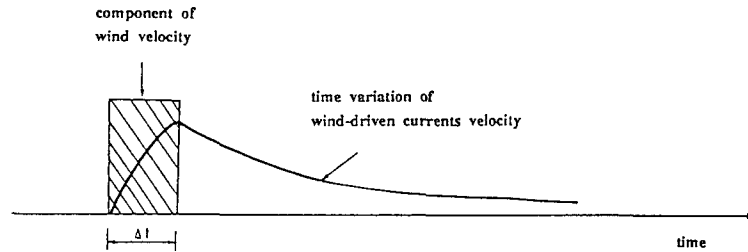


Fig. 1. Time variation of current subject to unit input of wind stress.

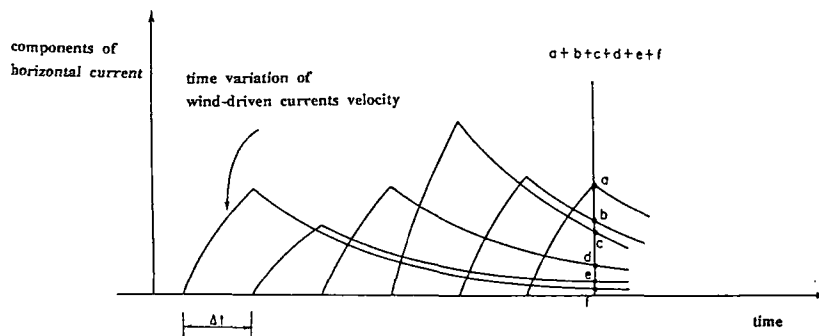


Fig. 2. Linear summation of wind-driven currents by past records of wind stress.

류 산정이 가능하다. Data Table 구성을 위한 수치 모형의 기본정식은 다음 절에서 자세히 논의된다.

3. Data Table 구성을 위한 기본방정식 및 경계조건

이류항을 포함한 비선형항과 수평 확산항을 무시하고 등밀도(homogeneous water), 정수압조건(hydrostatic assumption)을 가정하면 극좌표계에서의 기본방정식을 다음과 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{R \cos \phi} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \int_0^h u dz + \frac{\partial}{\partial \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \int_0^h v \cos \phi dz \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - rv = \frac{-g}{R \cos \phi} \frac{\partial \xi}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + ru = \frac{-g}{R} \frac{\partial \xi}{\partial \phi} + \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5)$$

여기서,
 λ, ϕ 동향, 북향의 경도와 위도

- z 평균해면하의 연직좌표
- ζ 평균해면상의 해수위
- h 평균해면하의 수심
- ρ 해수의 밀도
- R 지구의 반경
- γ 코리올리스 계수 [$= 2\omega \sin \phi$]
- ω 지구회전의 각속도
- g 중력가속도
- u, v 수심 z 에서의 동향, 북향의 유속성분
- N 연직 와점성계수

해수면과 해저면에서의 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$-\rho \left(N \frac{\partial u}{\partial z} \right)_S = F_S; \quad -\rho \left(N \frac{\partial v}{\partial z} \right)_S = G_S \quad (6)$$

$$-\rho \left(N \frac{\partial u}{\partial z} \right)_B = F_B; \quad -\rho \left(N \frac{\partial v}{\partial z} \right)_B = G_B \quad (7)$$

여기서 ρ 는 해수밀도이며 첨자 S, B 는 해수면 및 해저면에서 정의되는 값을 나타내며, F_S, G_S 는 해수

면상 바람응력의 x, y 방향 성분, F_B, G_B 는 해저면 마찰응력의 x, y 방향 성분을 나타낸다.

외해 경계에서의 유속의 처리는 Davies and Furnes (1980)에 의해 북해에서 수치실험시 적용한 다음과 같은 방사조건(radiation condition)을 사용한다.

$$q = \frac{c}{h}(\zeta - \zeta_M) \quad (8)$$

여기서, q 는 수심적분 유속, ζ 는 총수위, ζ_M 는 기상 변화로 야기된 해수위변화량으로 본 연구에서는 0으로 처리하였다. h 는 수심이고 c 는 장파의 전파속도로서 \sqrt{gh} 이다. 육지경계의 처리는 육지의 법선방향으로 흐름이 존재하지 않는다는 조건을 사용하였다.

4. 수치실험

수치실험은 먼저 실제 해역에 적용하기에 앞서 황해 정도의 규모를 갖는 이상해역을 가정하여 수치실험을 수행한 다음 황해와 동중국해에 적용하였다. 앞서도 언급하였지만 Galerkin-FEM 모형을 사용하였고(강, 1994) 절점수는 6개를사용하였다. 그 외의 수치실험 입력조건은 다음과 같다.

1) 바람응력

공간적으로 균일한 바람장을 가정하였고, Hsueh 등(1986)의 바람장을 근거로 다음과 같은 간단한 시간함수형을 고려하였다. 즉,

$$F_w(t) = \begin{cases} \pi \sin\left(\frac{2\pi}{8T} t\right) & \text{if } 0 \leq t \leq 4T \\ 0 & \text{if } 4T \leq t \leq 8T \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $F_w(t)$ 는 window 함수, T 는 편의상 S_2 조석주기, 12시간을 사용하였다.

바람응력은 바람이 불기 시작한 시점으로 부터 2일간 지속되며 그후 2일간은 바람이 불지않는 것으로 정의되었다. 바람이 불기시작한 시점으로부터 1일이 경과한 후 바람응력의 크기가 최대에 이르며 이후 감소하여 1일후에는 바람이 완전히 멈추게 된다.

2) 운동량확산계수의 정의

본 수치실험에서는 연직 운동량확산계수의 산정은 Bowden 등(1959)이 Irish Sea에서 관측자료에 근거하여 제안한 식 (13)을 사용하기로 한다.

$$\alpha = k_1 U l \quad (10)$$

여기서, k_1 은 2.5×10^{-3} 으로 제안하였고 l 은 Bowden 등(1959)에 의하여 제안된 특성길이(length scale)이다. 본 연구에서 특성길이는 수심과 동일하게 처리하였다.

U_i 는 총유속으로서 조석에 의한 유속과 바람에 의한 유속의 합으로 정의하였다.

$$U_i = U_{tide} + (\bar{u}_w^2 + \bar{v}_w^2)^{1/2} \quad (11)$$

여기서, U_{tide} 는 0.5 m/sec로 고려하였으며, \bar{u}_w, \bar{v}_w 는 바람에 의한 수심평균유속이다.

3) 해저면 경계조건의 처리

해저면 경계조건으로 다음 식과 같은 선형마찰식을 사용하였다.

$$F_B = k\rho u_B, \quad G_B = k\rho v_B \quad (12)$$

여기서, k 는 상수 또는 x, y 의 함수인 해저면 마찰계수이고 u_B, v_B 는 x, y 방향 성분의 해저면 유속이다. 본 연구에서 선형마찰계수는 0.002로 일정하게 주었다.

4.1 이상해역에의 수치실험

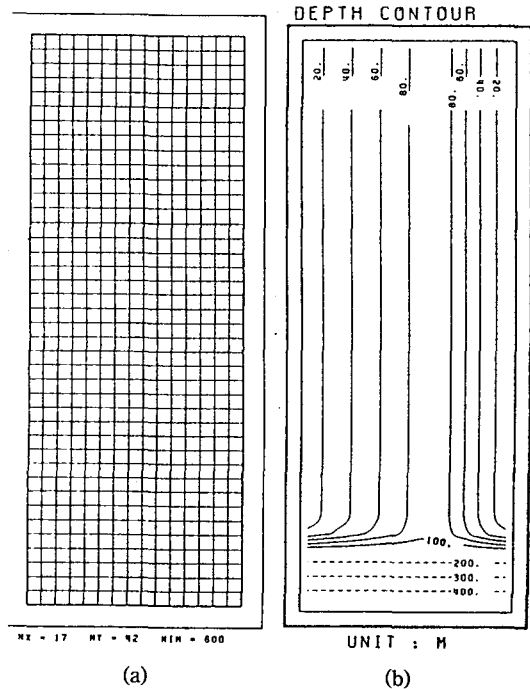


Fig. 3. (a) Grid system of model domain, (b) Depth contours of model domain.

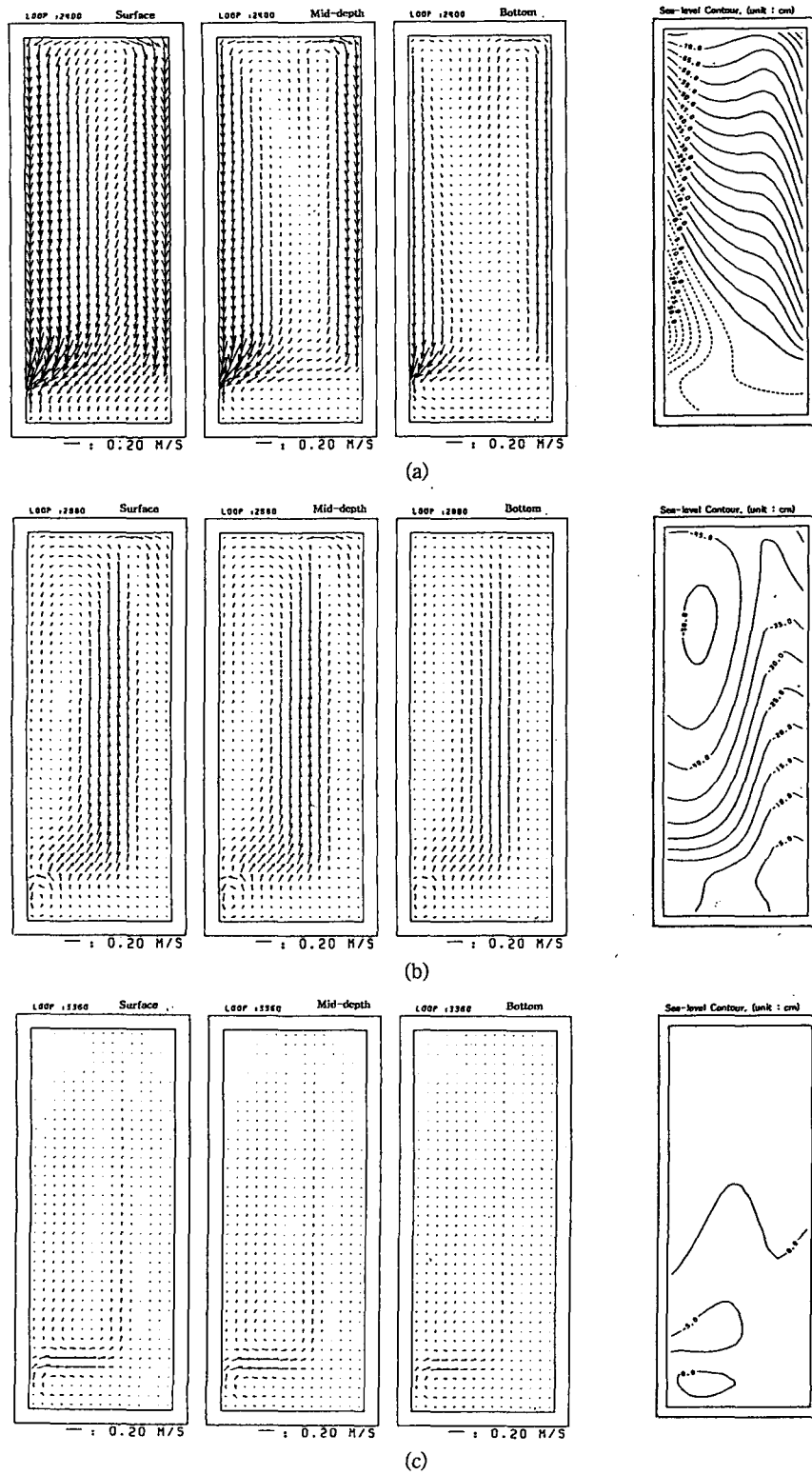


Fig. 4. Surface, mid-depth and bottom current field and sea-level contours computed (a) 1 day, (b) 2 days and (c) 3 days after the onset of wind forcing.

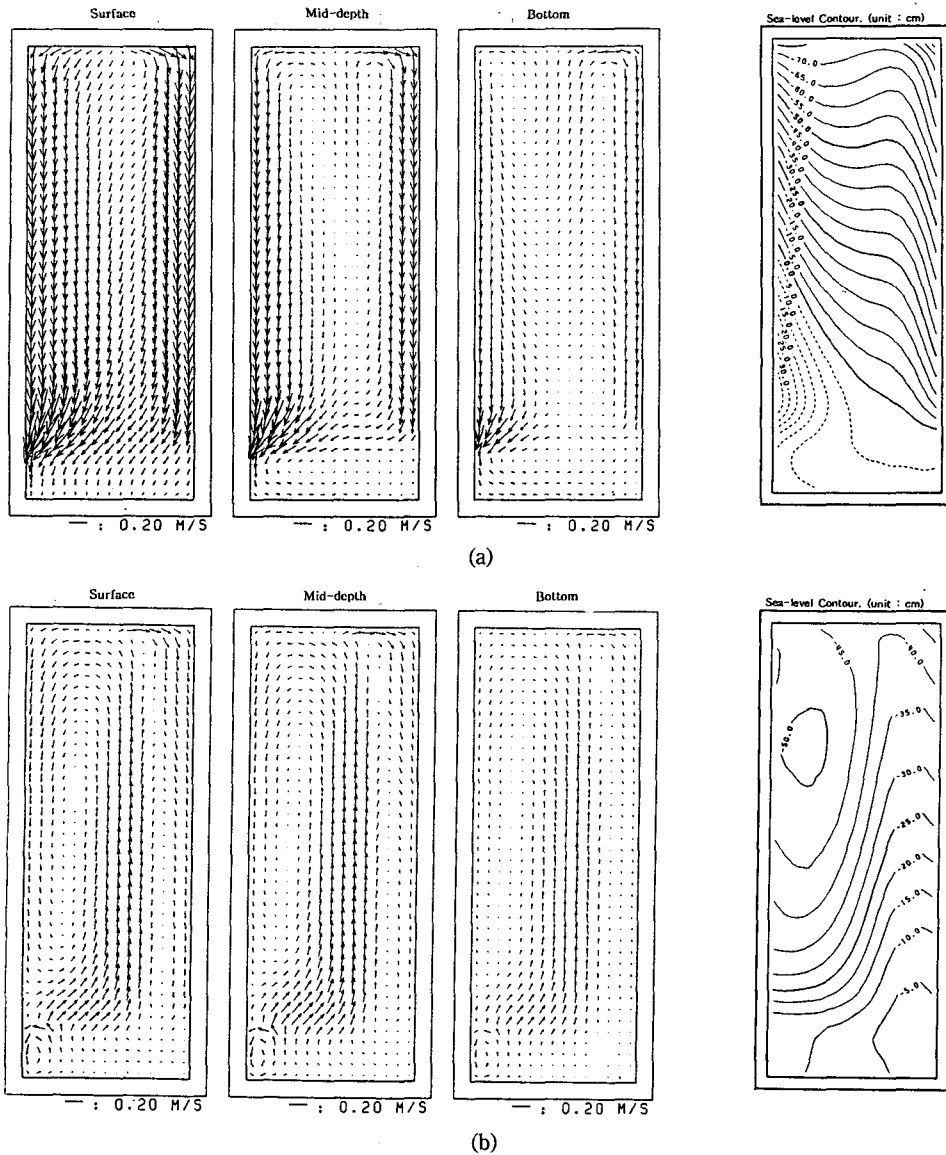


Fig. 5. Surface, mid-depth and bottom current field and sea-level contours computed (a) 1 day, (b) 2 days and (c) 3 days after the onset of wind forcing using convolution weights.

황해를 이상화한 해역의 격자체계와 수심은 Fig. 3과 같다. 고려한 해역은 450 km×1,200 km로 하였으며 격자체계는 17×42=714개로 구성하였으며 30 km의 등격자를 고려하였다. 남쪽에 위치한 전격자를 외해경계로 가정하였으며 전항력계수는 위도 35°의 상수값으로 정의하였다. 수심은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 v 형태를 가정하였으며 외해경계 근처에 깊은 수심이 존재한다고 가정하였다. 초기조건의 영향을

제거하기 위하여 2일동안의 예비계산을 수행한 후 결과를 분석하였다.

Fig. 4는 바람이 불기시작한 후 1일 간격마다의 상층, 중층, 저층의 유속장과 해수면 변화양상이다. 바람이 불기시작하여 바람이 가장 강한 때인 1일후의 결과는 수심이 얇은 양측 연안을 따라 강한 유속이 생기며 중층과 저층에서 깊은 골을 따라서 약한 역풍류가 존재함을 알 수 있다. 해수면 변화 양상을

검토하여 보면 외해경계 근처의 깊은 수심으로 인하여 왼쪽으로 wind setup 이 생기는 것을 확인할 수 있다. 바람이 완전히 멈춘 2일이 지난 후의 결과는 수심이 얕은 지역에서 바람방향의 약한 흐름이 존재하며 깊은 곳을 따라 강한 역풍류가 생김을 알 수 있다. 바람이 완전히 멈춘후 지속적인 역풍류로 인하여 모델영역 안으로 물이 보충되면서 해수면이 초기상태에 다다른다.

Fig. 5는 6시간 동안 시간적으로 평균한 일정한 바람응력이 주어진다고 가정하여 convolution weights를 고려하여 얻은 결과이다. 바람이 가장 강할 때와 바람이 멈출때의 결과를 제시하였는데 Fig. 4의 (a), (b)와 비교하여 보면 거의 유사하게 재현함을 알 수 있었다.

4.2 황해, 동중국해에서의 수치실험

앞서의 수치실험을 통해 얻은 경험을 바탕으로 실제해역에 적용하여 보았다. 적용한 해역은 동중국해를 포함한 황해전체 해역이며 모델의 격자체계는 Fig. 6

(a)와 같은 $1/8^{\circ} \times 1/6^{\circ}$ 격자체계를 사용하였다. 동측으로 대마도를 포함한 대한해협까지 모델영역을 잡고 서측은 중국대륙에 의해 경계지워지며 남측으로 육붕해를 포함하면서 대만섬까지로 모델 영역을 잡았으며 남동쪽 경계로 류큐열도를 경계선으로 하여 개방경계를 취하였다. 모델영역의 수심은 Fig. 6(b)에 나타나 있다. 황해가 전반적으로 수심 100 m 이하인 천해역인 반면 개방경계조건 근처에서는 육붕을 벗어나 1000 m을 넘는 심해부가 존재한다.

Fig. 7은 바람이 불기 시작한 후 12시간 간격의 해수면 변화를 나타낸 그림이다. 바람이 계속 강해지는 24시간까지 해수면 변화가 크게 나타나고 있다. 동지나해 남동부에 깊은 수심이 존재하는 탓으로 취송류 흐름이 대한해협쪽으로 유도되면서 중국 동쪽 연안쪽으로 wind setup이 일어남을 알 수 있고 바람이 멈추면서 경도 방향의 해수면 경사가 커지면서 역풍류가 생김을 알 수 있다. 바람이 멈춘 후 24시간이 경과하면서 해수면 경사가 이주 완만해지고 초기상태에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이는 Hsueh 등

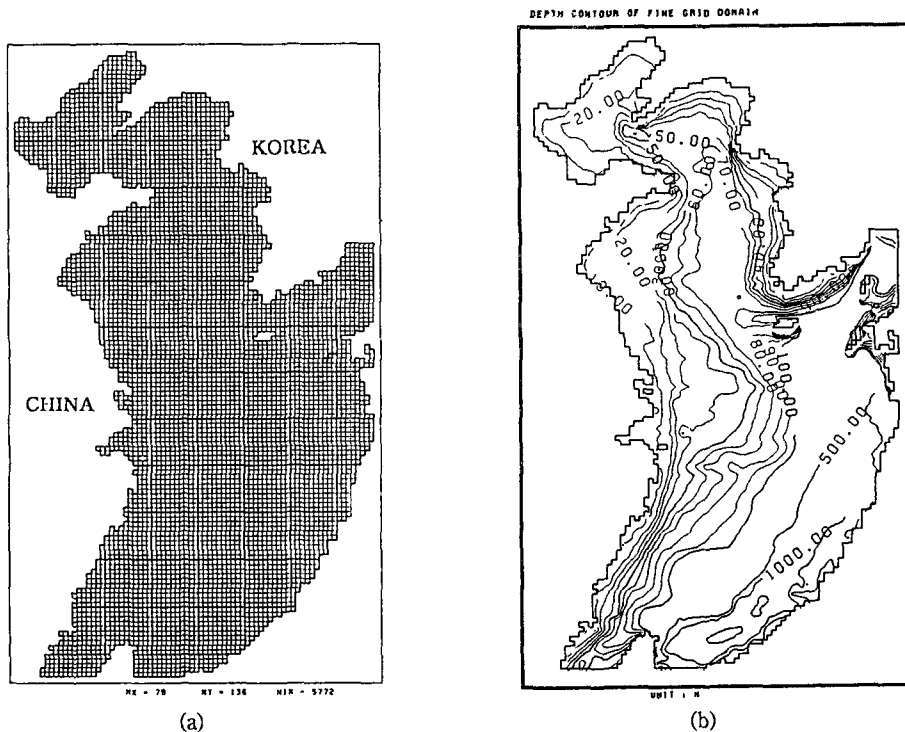


Fig. 6. (a) Grid system of model domain in the Yellow Sea and the East China Sea (b) Depth contours of model domain in the Yellow Sea and the East China Sea of model domain.

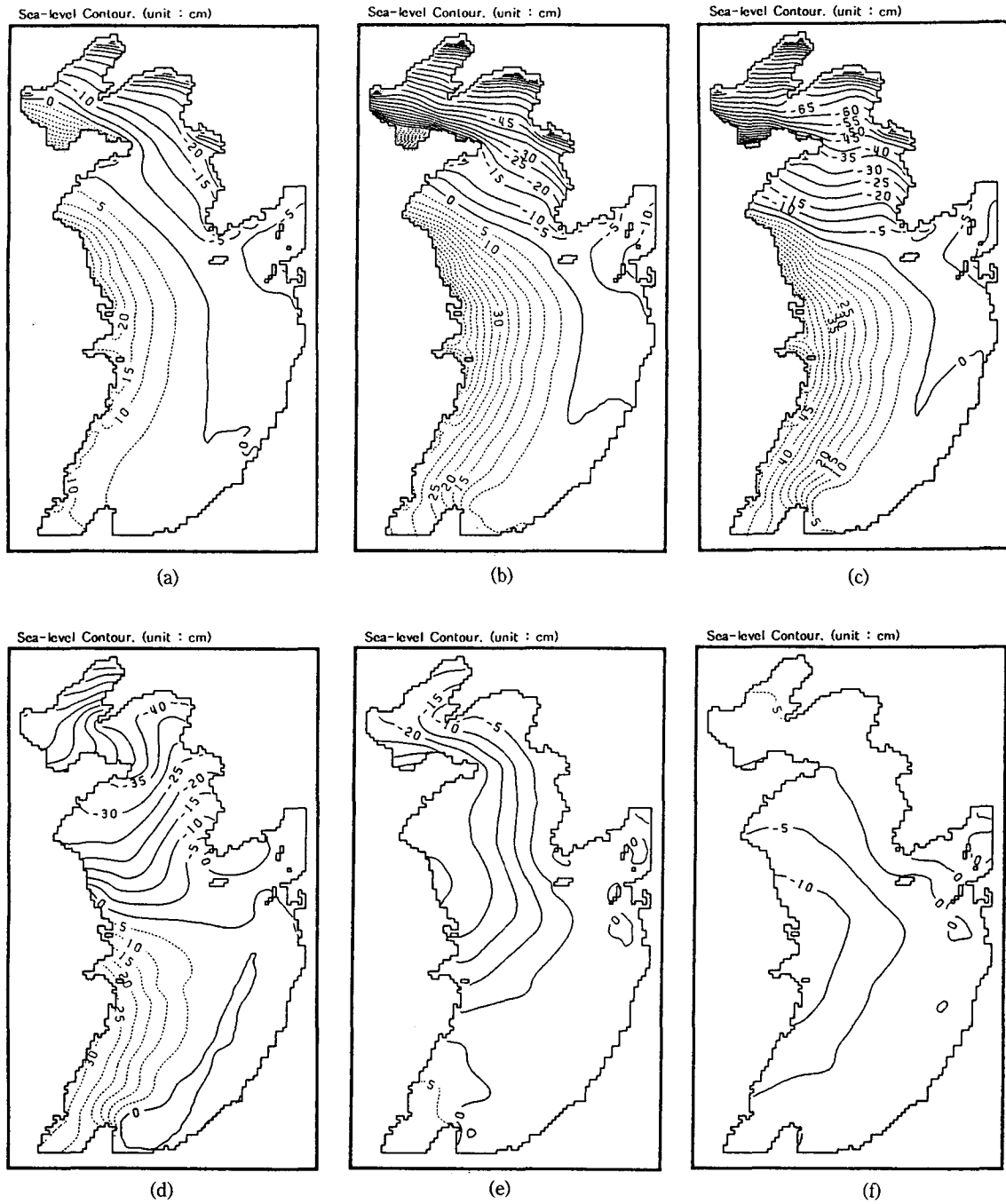


Fig. 7. Sea-level contours computed (a) 12 hours, (b) 24 hours, (c) 36 hours, (d) 48 hours and (e) 60 hours after the onset of wind forcing.

(1986)의 수치실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 바람이 가장 강할때, 즉, 바람이 불기 시작하여 24시간이 경과한 후의 상층, 중층, 저층의

유속장이다. 상층에서는 바람이 불어가는 방향으로 흐름이 형성되며 특히 중국 동측연안에서 강한 흐름이 발생한다. 중층, 저층에서도 비슷한 양상의 흐름이

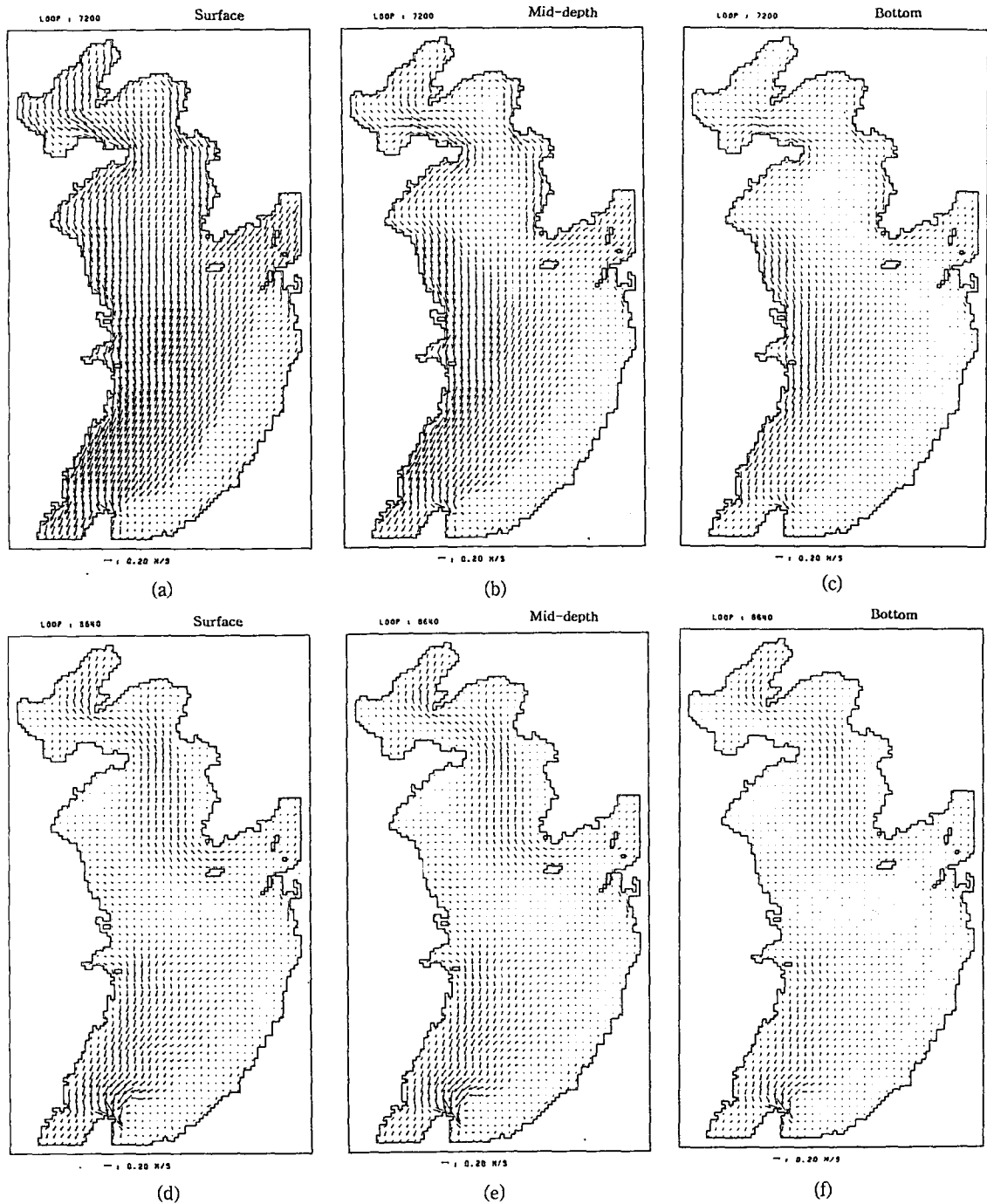


Fig. 8. Surface, mid-depth and bottom current field computed (a) 1 day and (b) 2 days after the onset of wind forcing.

나타나며 저층에서는 아주 약한 흐름이 형성된다. 동지나해 대류봉단과 류큐열도 내측사이에 깊은 수심을 갖는 해역이 존재하는 탓으로 대만해협을 따라

강한 흐름이 나타남을 알 수 있다. 또한 대한해협을 통해서 강한 흐름이 발생함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 바람이 멈춘 시각의 상층, 중층, 저층의 유속장이다.

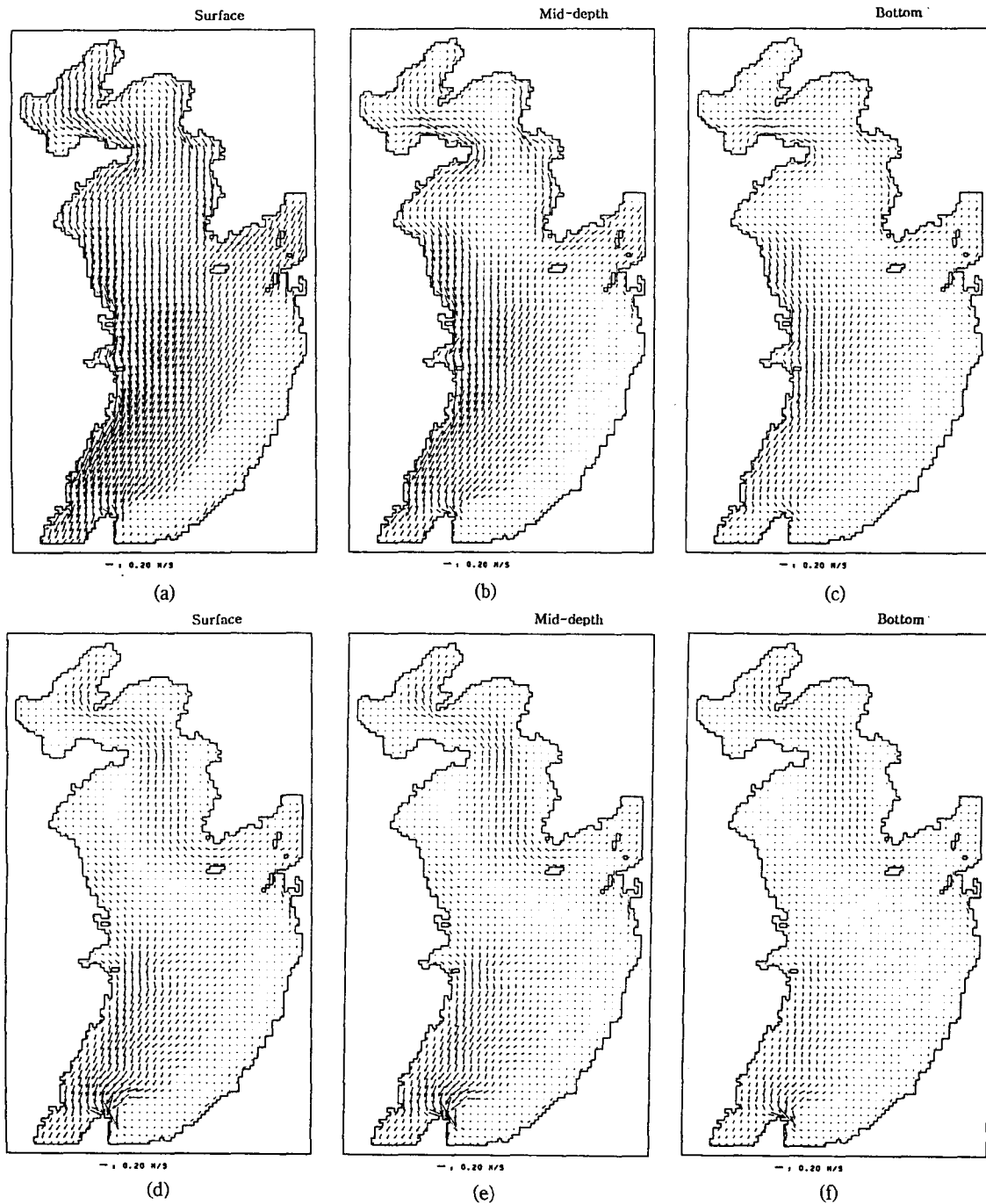


Fig. 9. Surface, mid-depth and bottom current field computed (a) 1 day and (b) 2 days after the onset of wind forcing using convolution weights.

황해의 깊은 골을 따라 전층에 걸쳐 강한 역풍류가 존재함을 알 수 있고 타이완해협을 통해서 바람이 불어가는 방향으로 여전히 강한 흐름이 있음을 알 수

있다.

Fig. 9는 Fig. 8과 동시간대에 convolution weights를 이용한 유속장으로 결과가 상당히 유사함을 알 수

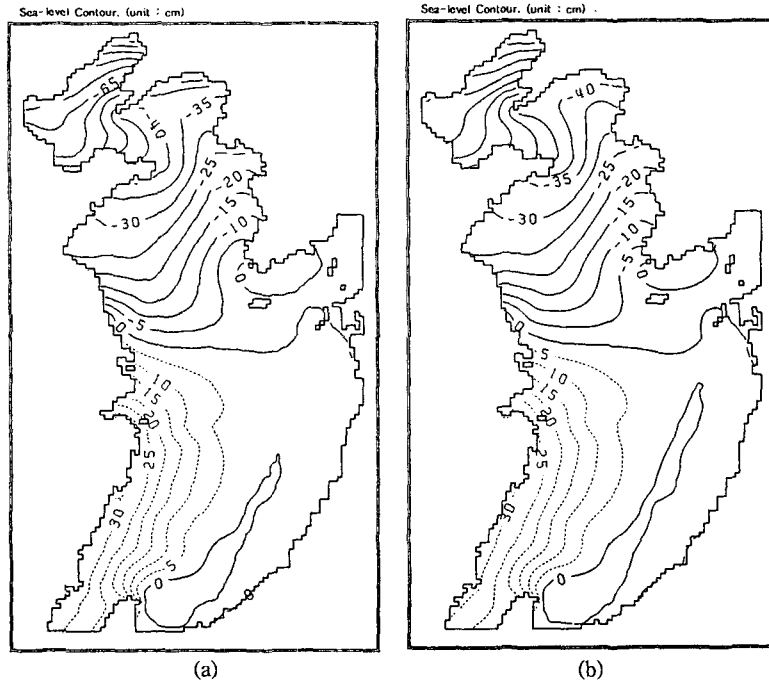


Fig. 10. Comparison of sea-level contours computed 2 days after the onset of wind forcing (a) using convolution weight, (b) using real simulation.

있다. Fig. 10은 바람이 멈춘 시각에 실제로 수행한 해수면 변화양상과 convolution weight를 이용한 해수면 변화를 비교한 그림인데 약간의 차이가 있으나 역시 거의 유사하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 토의

신속표층해류 산정을 위한 3차원 해수유동모델을 개발하였다. 신속표층해류산정을 위한 기초연구 결과가 제시되었으며 본 연구에서는 회선적분 개념이 도입되었다. 몇가지 수치실험 결과 적용의 타당성을 검증하였으며 특히 연직운동량확산계수를 시간적으로 변화하는 경우에도 적용 가능성이 입증되었다. 따라서, 본 연구의 결과는 대상해역을 대표하는 바람장의 시간변화만이 요구되므로 정확도는 떨어지나 현실적으로 신속표층해류 산정에 매우 유용할 것으로 사료된다. 실시간 표층해류산정을 위하여서는 조류 정보의 추가가 필요하며 본 연구에서 공간적으로 전 영역에서 바람응력이 일정하다고 한 가정은 모델 영역의 크기로 보아 무리가 따를 것으로 보이며 바람응력의 공간분

포에 대한 심층적 연구가 요구된다 하겠다. 또한 실시간 바람응력의 정보를 취득하는 것도 현실적으로 쉽지 않으므로 실시간 기상예보모형과의 연계를 통한 정확한 바람응력 산정에 대한 연구도 필요하다 하겠다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 박사후 과정 연구와 한국해양연구소의 94년도 특정연구 “연안재해 방지기술 개발(I)” 연구의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

강관수, 1994. 유사변환기법을 이용한 3차원 해수유동 수치모형, 서울대학교 박사학위 논문.
 김경환, 1994. 대한해협 해류예측에 관한 연구, 성균관대학교 한국해양연구소 학연과정 석사학위 논문.
 여운광, 1994. 오대호 연안의 예·경보체계에 대하여, 한국해안·해양공학회 발표논문 초록집, 84-87.
 日本水路協會, 1988. 重要海域の流況豫測用データ-プルの整備(對馬海峽を中心とする九州北西岸域)

- Bowden, K.F., Fairbairn, L.A. and Hughes, P., 1959. The distribution of shearing stresses in a tidal current, *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, **2**, 288-305.
- Davies, A.M. and Furnes, G.K., 1980. Observed and computed M_2 tidal currents in the North Sea, *J. of Physical Oceanography*, **10**, 237-257.
- Heaps, N.S., 1985. Tides, storm surges and coastal circulations, in *Offshore and coastal modelling*, ed. P.P.G. Dyke, A.O. Moscardini, and E.H. Robinson, 3-54.
- Hsueh, Y. Richard, D.R. and DeWitt, P.W., 1986. Winter-time winds and coastal sea-level fluctuations in the Northeast China Sea. Part II: Numerical model, *J. of Physical Oceanography*, 241-261.