

가막만의 해수유동에 미치는 바람의 영향

박성은 · 조규대 · 홍철훈* · 김동선* · 조광우**
 부경대학교 해양학과, *부경대학교 해양산업개발연구소, **일본 큐슈대학교 응용역학연구소

An Effect of Wind on Circulation in Kamak Bay

Sung-Eun PARK, Kyu-Dae CHO, Chul-Hoon HONG*, Dong-Sun KIM* and Kwang-Woo CHO**

Department of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

*Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

**Dynamics Simulations Research Center, RIAM, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan

The effect of wind on the circulation in Kamak Bay in the southern sea of Korea was examined using a numerical shallow water model. The experiments were primarily focused on how the effect of wind influence the tidal residual current. According to wind directions, the residual currents were changed; the westerly wind created a strong anti-clockwise eddy in the northwestern area of the bay where the flow field is usually very weak; the easterly wind strengthened the flow field in the central area of the bay; the patterns of flow fields to the north and south winds were almost the same as one without the wind, although the flow field became slightly stronger. The model fairly reproduced features in the observed current field at Pyongsu.

Key words: Kamak Bay, wind, a shallow water model, circulation, residual current

I. 서론

한국 남해안의 여수반도 남쪽에 위치하고 있는 가막만(Fig. 1)은 북동쪽의 여수항을 통해 여수해만과 남쪽 수로를 통해 한국 남해와 각각 연결된다. 특히 남쪽 만입구는 송도 등을 비롯한 많은 섬들이 위치하고 있어 해수의 유출입시 복잡한 유동구조를 보일 것으로 예상된다. 만의 평균수심은 약 9m이며 내만은 수심변화(약 6~11m)가 매우 작은 것이 특징이다.

가막만의 해수유동에 관하여는 일찌기 수로국(1968)이 남쪽 만구역과 여수항 근처에서 조류도를 작성한 바 있고, 국립수산진흥원(1978)은 만내의 주된 해수교환이 북쪽 여수항과 남쪽 만구역을 통하여 거의 동시에 이루어지면서 유입된 해수는 대경도 남단에서 상접함을 보고하였다. 유속관측을 통해 Lee and Chang(1982)은 해수교환을 추산하였으며, Lee(1983)는 자정능력을 계산하였고, Lee and Cho(1990)는 수괴특성을 분석하였다. 한편, 해수유동에 관한 수치실험 연구는 비록 만의 일부(백도의 북쪽)이긴 하였으나 Lee et al.(1991)이 천해모델을 이용하여 처음으로 행하였으며, Cho(1996)는 3차원 생태계 모델을 이용하여 생물생산량을 조사하였다.

해수유동에 미치는 바람의 효과에 관하여는 Lee(1992)가 취송류를 계산하여 관측결과와 비교한 바 있다. Fig. 2는 Lee et al.(1995)이 계산한 평사에서의 유속벡터의 진행도(progressive vector diagram)를 보여준다. 7월 21일 이후 수일간 지속되던 남향류가 8월 1일 이후 동향류로 바뀐 것이 주목된다. 이 시기의 여수측 후소의 바람시계열(Fig. 3)을 살펴볼 때 북북동풍에서 남풍으로 풍향이 바뀐 것을 알 수 있다. 즉, Lee et al.(1995)이 지적한 바와 같이 이것은 가막만의 해수유동에 바람의 영향이 크게 작용하고 있음을 시사하는 것 같다. 다만, 이들 연구들이 대부분 만내의 일부 해역에 한정되어 있어 만 전반에 걸친 바람의 영향을 살펴볼 수는 없었다.

따라서 본 연구에서는 수치모델을 이용하여 가막만의 해수유동에 미치는 바람의 영향을 조사하였다. 특히 여기서는 풍향변동에 따른 잔차류의 변화에 주목하였다.

II. 연구방법

본 연구에 사용된 지배방정식은 천해 방정식(shallow water equation)으로서 운동방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial uV}{\partial y} - fV = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \gamma u \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{\tau_x}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial vU}{\partial x} + \frac{\partial vV}{\partial y} + fU = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \gamma v \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{\tau_y}{\rho} \quad (2)$$

및 연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

이다. 여기서

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u \, dz, \quad V = \int_{-h}^{\zeta} v \, dz$$

이고, u, v 는 x, y 방향의 유속, h 는 평균해면으로부터의 수심, ζ 는 평균해면으로부터의 변위, H 는 수심($=h+\zeta$), ρ 는 해수밀도, f 는 코리올리 인수, g 는 중력가속도, γ 는 해저마찰계수($=0.003$), A_h 는

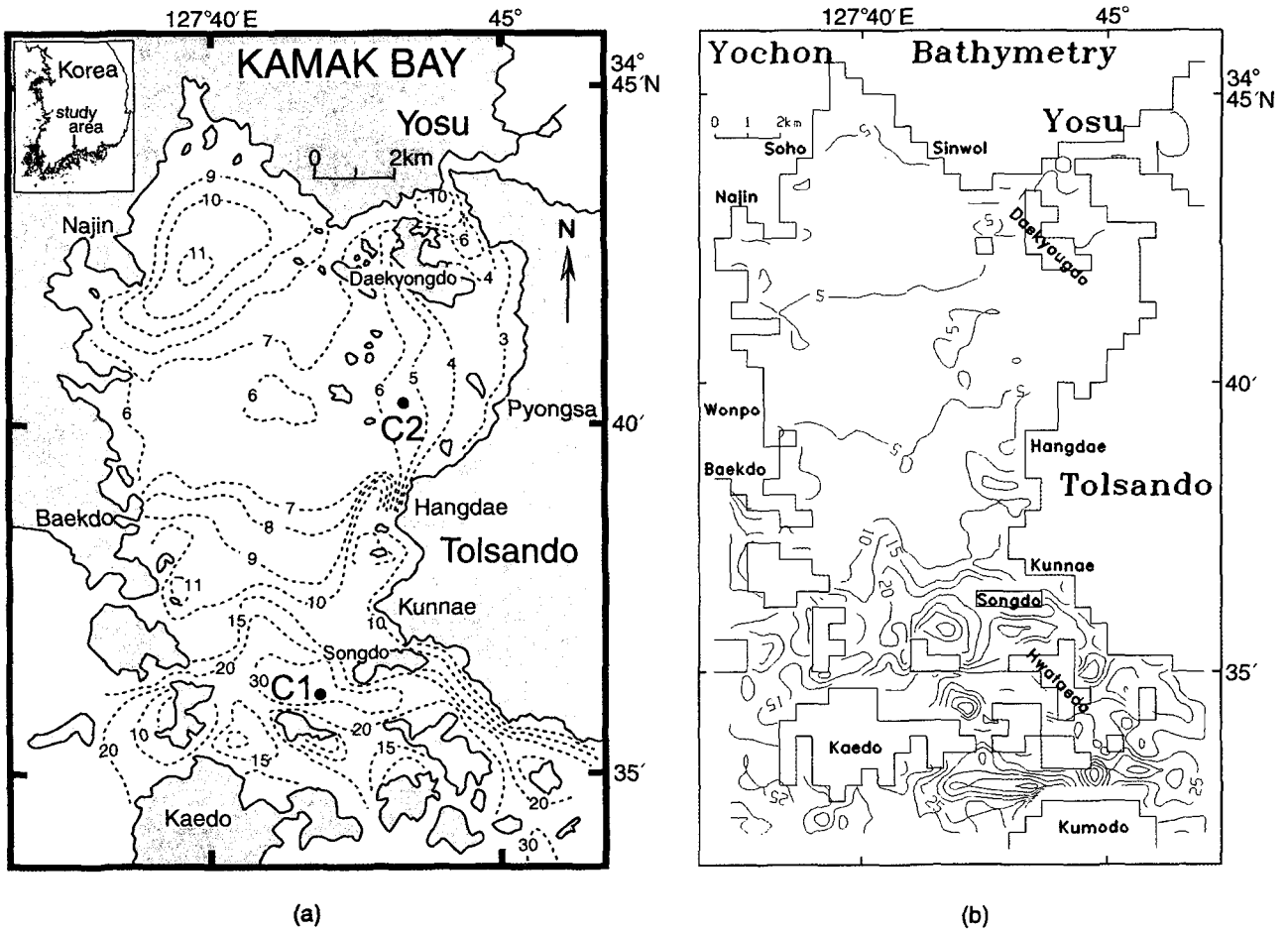


Fig. 1. (a) Bathymetric map of Kamak Bay. Depths are in meters. (b) The model bathymetry. St. C1 and C2 represent velocity observation points.

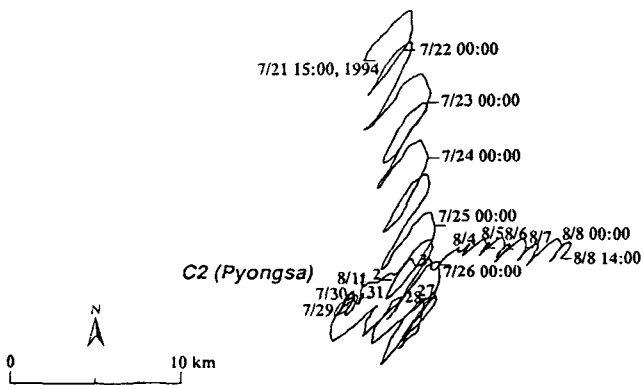


Fig. 2. Progressive vector diagram of current velocity at Pyongsa (reproduced from Lee et al., 1995).

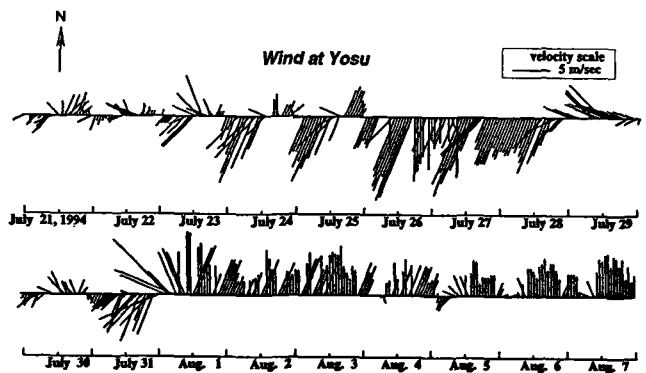


Fig. 3. Stick diagram of wind velocity (Lee et al., 1995).

수평외점성계수 ($=10^6 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), τ_x , τ_y 는 각각 x , y 방향의 바람응력을 나타낸다.

계산은 가막만 및 외해를 포함한 광역 (Fig. 4)에 걸쳐 수행되었으나 본 연구에서는 가막만에서 얻어진 결과만을 제시한다. 또 조석은 반일주조가 72~73% 정도로 우세하므로 (Lee et al., 1995) 편의상 M_2 만 고려하였다. 수치실험은 간차류에 미치는 바람효과에 주목하여 이상적인 바람이 불 경우와 실제의 여수지역의 바람

이 불 경우를 각각 구분하여 수행하였다. 즉 전자의 경우 동·서·남·북 각 풍향별로 일정한 바람 (1월 평균풍, 3.31 m/s)을 4 조석 주기 동안 부과하였다. 또 후자의 경우는 여수측후소에서 1980~1993년 동안 관측한 월평균 자료를 누런 평균한 바람을 부과하였다. 바람응력 (τ_x , τ_y)에 사용된 풍속은 다음과 같다. 풍속값은 해상풍속이 통상 육상풍의 약 1.5~2.0 배에 해당하므로 (Yanagi, 1980) 관측값의 2배로 주어졌다.

$$\tau_x = \rho_a C_d W_x |W|, \quad \tau_y = \rho_a C_d W_y |W|, \\ |W| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, C_d 는 항력계수, 그리고 W_x, W_y 는 각 풍속의 x, y 방향 성분을 나타낸다. 항력계수값은 편의상 本多·光易(1980)의 식을 따랐다. 즉,

$$W < 8 \text{ m/s}, \quad C_d = (1.29 - 0.024 W) \times 10^{-3} \\ 8 \text{ m/s} < W < 35 \text{ m/s}, \quad C_d = (0.581 + 0.063 W) \times 10^{-3}$$

이다.

본 연구에서는 4주기 동안 계산을 수행한 뒤, 마지막 주기의 결과를 제시하였다. 격자간격 ($\Delta x, \Delta y$)은 편의상 500 m로 하였으며, CFL 조건을 고려하여 시간간격 (Δt)은 5 sec로 하였다. 조석의 개방경계값은 KORDI (1996)에서 관측한 자료를 선형보간하여 사용하였다. 각 지점별 조석값은 Table 1과 같다. 또, 연안경계 조건으로 해안선의 법선 및 접선 방향의 유속은 없도록 하였으며, 개방경계 조건은 아래와 같이 방사조건을 적용하였다 (Hearn and Holloway, 1990). 즉,

$$u = \frac{\sqrt{gH}}{H} \zeta$$

이다. 한편, 이 조건은 개방경계에서 중력과의 방사는 원활하나, 그외의 파, 즉 해저지형성파는 잘 방사되지 않는다 (Chapman, 1985). 계산결과는 Lee et al. (1995)의 장기유속관측 결과와 비교하였다. 유속관측은 1994년 7월 21일~8월 8일까지 송도 (C1)와 평사 (C2)에서 각각 수면하 5m와 2m에서 이루어졌다.

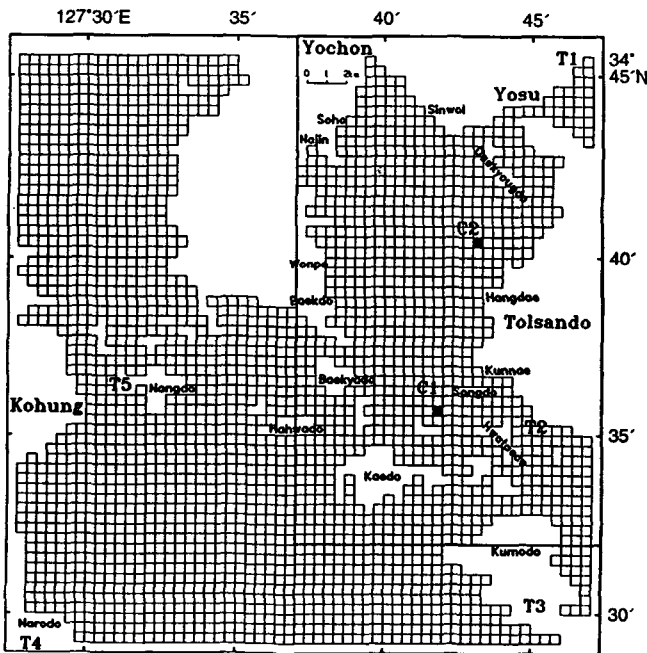


Fig. 4. Finite difference grids in the model region.

III. 결 과

Fig. 5는 송도와 평사에서 계산(실선) 및 관측(점선)된 조류 타원도를 보여준다. 평사에서는 조화분해에서 얻어진 M_2 성분만을, 송도에서는 자료소실로 인해 조화분해를 행하지 못한 제성분이 포함된 결과를 나타낸다. 전반적으로 두 지점에서의 유향은 매우 잘 일치하나, 진폭은 만 입구인 송도 (Fig. 5a)보다 만 안쪽인 평사 (Fig. 5b)가 비교적 잘 대응하였다. 송도의 경우 관측결과가 계산결과보다 크게 나타난 것은 M_2 이외의 다른 성분 (예를 들면 S_2, K_2) 등이 포함되었기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 점을 감안할 때 계산값은 전반적으로 관측값과 좋은 대응을 보여주는 것으로 생각된다. Fig. 6은 평사에서 관측된 유속과 계산결과를 비교한 것이다. 유속과 창낙조류의 전이시간이 다소 차이가 있을 뿐 계산결과가 M_2 만 사용한 결과임을 고려할 때 유향이나 그 진폭은 전반적으로 관측결과와 잘 대응된다고 생각된다.

Fig. 7은 바람을 고려하지 않았을 경우의 잔차류 분포를 나타낸다. 대경도 남단 및 남쪽 만입구 주변에 많은 와류가 존재하고 있는 것을 볼 수 있다. 이 와류는 평사에서는 시계방향, 백도와 항대리 부근에서는 반시계 방향으로 나타난다. 이와 같이 많은 와류가 형성되는 것은 해저지형의 영향 때문인 것으로 해석된다. 즉 Fig. 8에서 보여주듯이 다른 제조건은 변동없이 일정한 수심 (20 m) 하에서 수행한 실험결과를 보면 백도 주변을 제외하고 거의 와류운동이 약화되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Jung et al. (1994)이 득량만에서 보여준 결과와 매우 유사하다. 특히, 만 중앙부에는 와류의 영향에 의해 동에서 서로 흐르는 흐름이 강한 경향을 보인다.

Fig. 9는 바람효과를 보다 더 구체적으로 살펴보기 위하여 동·

Table 1. Harmonic constants in open boundaries.

Stations	Duration of observation	Amplitude (cm)	Phase (°)
Yosu (T1)	88. 1. 1~88.12.31	101.2	253.9
Hwataedo (T2)	68. 6.24~68. 7.23	97.8	255.7
Kumodo (T3)	77. 4. 9~77. 8.20	99.3	242.9
Narodo (T4)	86. 6. 8~86.10.12	97.6	261.9
Nangdo (T5)	93. 7. 8~93. 8. 6	103.8	261.4

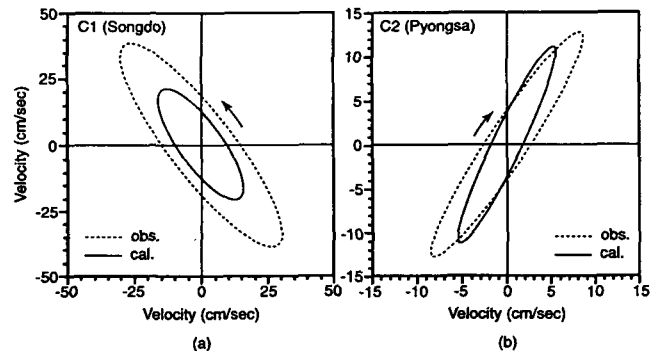


Fig. 5. Tidal current ellipse in the model (solid line) and the observation (dashed line) (Lee et al.; 1995) at Pyongsa.

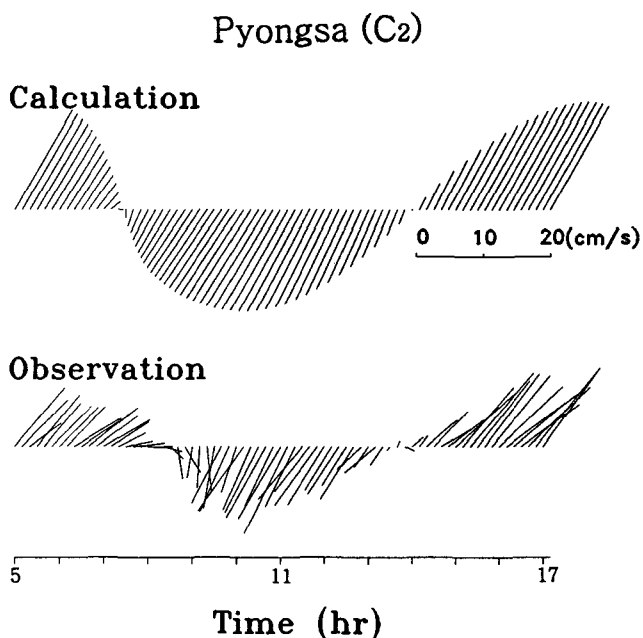


Fig. 6. The stick diagram of velocities in the model (upper) and the observation (Lee et al.; 1995) (lower).

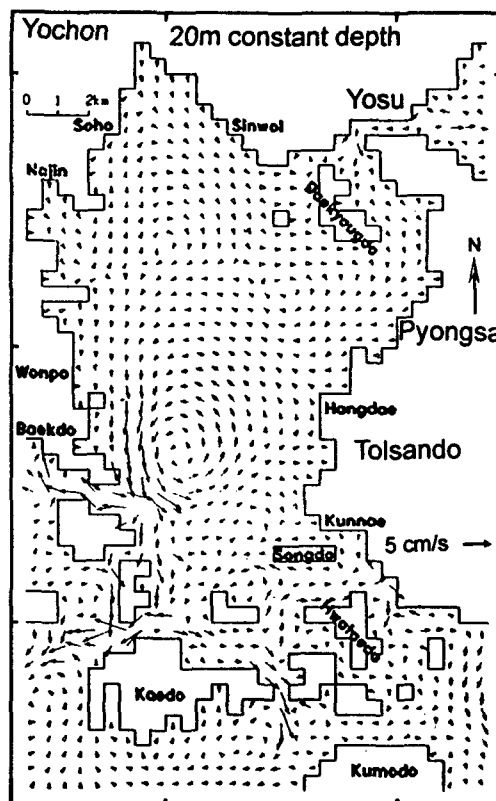


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for the constant depth.

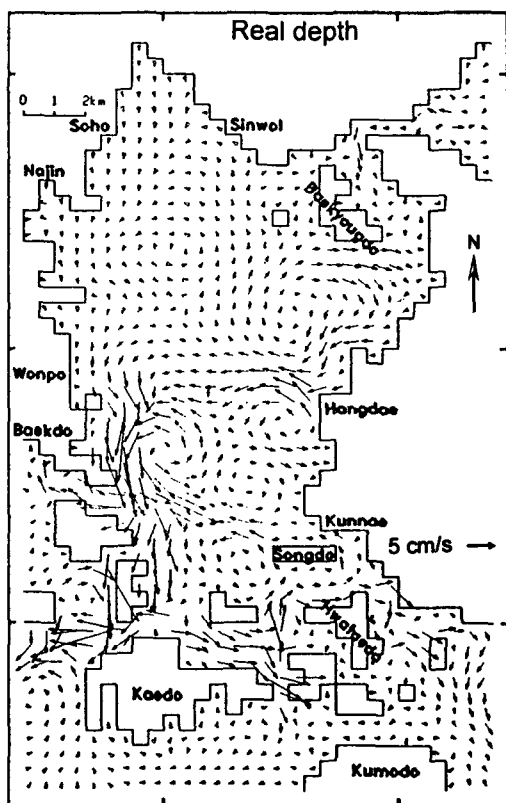


Fig. 7. Residual current fields (cm/s) in Kamak Bay.

서·남·북 각 풍향별 일정한 바람 (3.31 m/s)을 주고 조사한 결과를 보여준다. 먼저 남풍 (Fig. 9a) 및 북풍 (Fig. 9b)의 경우를 보면 전반적으로 흐름의 세기가 다소 강해진 것을 제외하면 바람이 없을 때의 잔차류 (Fig. 7)와 와류의 위치나 방향등 유동형태가 거의 유사한 것을 알 수 있다. 특히 Lee et al. (1995)이 지적한 바와 같이 평사 (C2)에서의 흐름을 주목해 볼 때 북풍 (Fig. 9b)의 경우는 남향류, 남풍 (Fig. 9a)의 경우는 동향류가 형성되어 관측과 좋은 대응을 보인다. 그러나 동풍 (Fig. 9c) 및 서풍 (Fig. 9d)의 경우는 유동형태가 크게 달라짐을 알 수 있다. 즉 동풍의 경우 바람이 없을 경우에 비해 만 중앙부의 흐름이 크게 강해지고 대경도 남단의 와류형태가 사라지면서 만의 서부연안을 따라 남향류가 보다 강해지는 경향을 보였다. 또 북서 내만역에는 시계 방향의 와류가 형성되었다. 한편, 서풍의 경우는 북서 내만역에 반시계 방향의 강한 와류가 형성되는 것이 무엇보다도 특이하였다. 또 남풍 및 서풍시를 제외하고 만 중앙부는 동에서 서로 흐르는 흐름이 바람이 없을 때보다 더욱 강해졌다. 실험결과로 볼 때 바람에 대한 만의 응답은 남·북풍의 경우보다 동·서풍에 대해 민감하였다. 특히 평소에는 거의 약하던 북서 내만의 와류가 서풍에 민감하게 반응하였다.

한편, 실제 여수지방의 바람에 의한 영향을 실험하기 위하여 사용된 여수측후소의 14년간 월평균 바람벡터 (실선, 16방위) 및 평균풍 (화살표)을 Fig. 10에 나타내었다. 각 월별 평균풍 (화살표)을 주목해 볼 때 대체로 추계부터 동계 (9~3월)에 걸쳐 북풍 또는

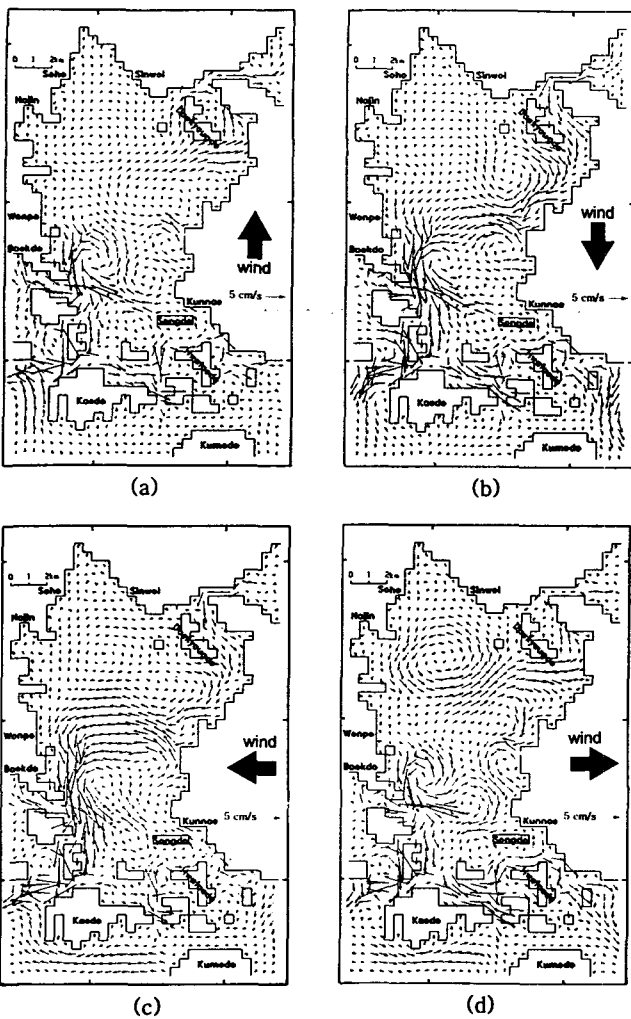


Fig. 9. Same as Fig. 7 except for the case of southerly wind (a), northerly wind (b), easterly wind (c), and westerly wind (d).

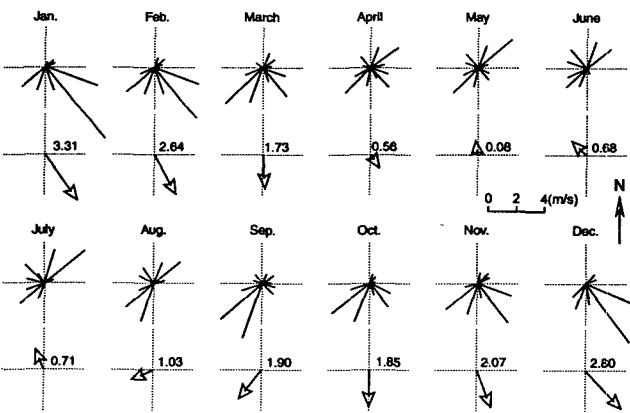


Fig. 10. Monthly mean wind velocity and direction at Yosu during 1980 to 1993.

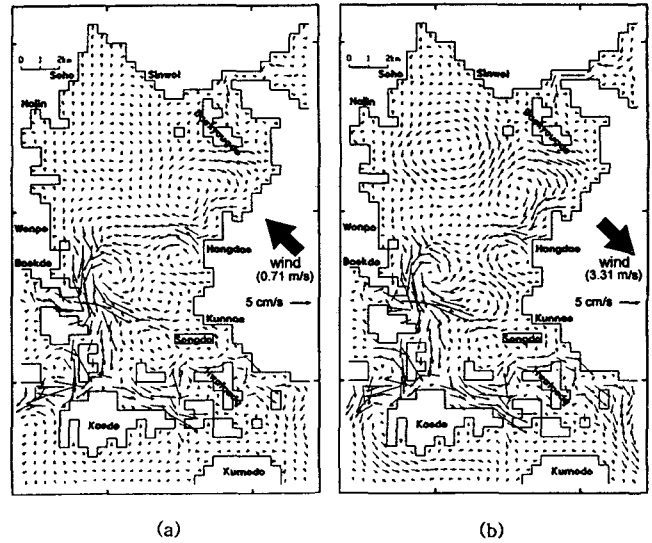


Fig. 11. Same as Fig. 7 except for the northwesterly wind (a) and southeasterly wind (b).

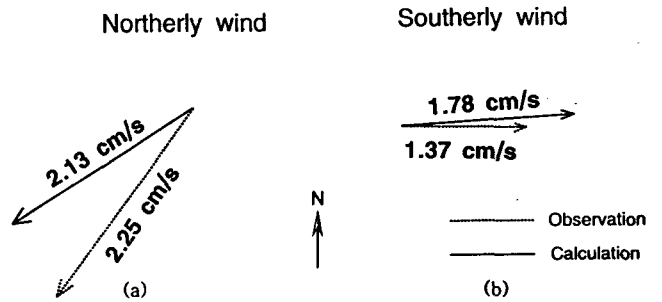


Fig. 12. Stick vectors of residual current in the model (solid line) and the observation (dashed line) at Pyongsa in the cases of the northerly wind (a), and southerly wind (b).

북서풍 (약 1.7~3.3 m/s)이 강하고, 춘계에서 하계 (4~7월)에 걸쳐 미약한 남풍 또는 남서풍 (1 m/s 이하)이 주된 풍계를 보인다. 본 연구에서는 바람이 가장 강한 동계 (1월, 3.31 m/s)와 하계 (7월, 0.71 m/s)에 대해 조사하였다. Fig. 11에서 바람이 매우 약한 하계의 경우 (Fig. 11a)는 바람이 없는 경우 (Fig. 7)와 비교해 볼 때 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 동계 (Fig. 11b)는 먼저 북서 내만역에 강한 반시계 방향의 와류가 형성되고 대경도 남쪽의 와류는 보다 강해졌다. 그러나 만 중앙부의 동서류는 상대적으로 크게 약화되었다. 이러한 특징들은 앞서 Fig. 9에서의 결과와 좋은 대응을 보여 주었다.

Fig. 12는 평사해역의 관측점 (C2)에서 관측기간 동안 북풍 (7월 26~28일) 및 남풍 (8월 2~7일)이 불 때 관측된 흐름을 각각 평균한 평균류, 그리고 같은 방법으로 북풍 및 남풍을 주었을 때 얻어진 계산결과를 비교한 것이다. 전반적으로 계산결과가 관측과 좋은 대응 (특히 남풍에 대해)을 보여주었다. 특히 앞서 관측결과에서 지적한 바와 같이, 북풍시에는 남향류, 남풍시에는 동향류를 보여 주었다.

IV. 결 론

천해모델을 이용하여 가막만의 해수유동(특히 잔차류)에 미치는 바람의 효과를 조사하였다. 실험결과는 조류타원도나 유속벡터에서 전반적으로 좋은 대응을 보였다. 실험결과로 볼 때 남·북풍보다 동·서풍에 대해 만내의 유동장이 보다 민감하게 응답하였다. 즉 남·북풍의 경우는 유속의 세기만 다소 강화되었을 뿐 바람이 없을 때의 잔차류의 유동형태와 거의 유사하였다. 한편, 동·서풍의 경우는 특히 서풍에 민감하게 반응하여 평소 미약하던 북서 내만에 반시계 방향의 강한 와류를 형성하였다. 실제의 누년 여수지방 바람자료를 이용한 모델실험결과는 Lee et al. (1995)의 관측결과를 근거로 지적인 흐름의 특징을 잘 표현하였다. 즉 평사해역(C2)에서의 흐름은 북풍시에는 남향류를 보였으나 남풍시에는 동향류를 보였다.

본 연구는 조석잔차류에 바람효과가 어떻게 작용하는지에 주목하여 수행되었다. 최근의 연구결과(예를 들면 Hong, 1998)에서는 만내의 지형적 영향에 따라 연직류의 존재 가능성이 시사되고 있고, 조석류, 수온, 염분 등의 변화로 인한 밀도류가 만내의 조석류에 미치는 효과를 무시할 수 없는 것으로 보고되고 있다(Bae et al., 1998). 이러한 효과들은 본 연구에서는 모델의 한계로 인해 조사할 수가 없었다. 이에 관한 연구는 향후 과제로 남는다.

사 사

본 연구는 부경대학교 해양산업개발연구센터를 통한 한국과학기술연구원 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- Bae, S.W., K.D. Cho, D.S. Kim and K.W. Cho. 1997. Circulation experiment of the Chinhae Bay using a three-dimensional diagnostic numerical model. Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 33 (4), 360~369 (in Korean).
- Chapman, D.C. 1985. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model, J. Phys. Oceanogr., 16, 1060~1075.
- Cho, E.I. 1996. The estimation of carrying capacity for marine culture grounds using an eco-hydrodynamic model. Ph.D. thesis, Pukyong National University, 139pp (in Korean).
- Hearn, C.J. and P.E. Holloway. 1990. A three-dimensional barotropic model of the response of the Australian North West Shelf to tropical cyclones. J. Phys. Oceanogr., 20, 60~80.
- Hong, C.H. 1998. On the circulation in the Jinhae Bay using the Princeton Ocean Model. 1. Characteristic in vertical tidal motion. J. Fish. Sci. Tech., 1 (2), 168~179.
- Jung, E.J., C.H. Hong, B.G. Lee and G.D. Cho. 1994. A numerical study on the circulation in Deukryang Bay. J. Kor. Fish. Soc., 27 (4), 397~403.
- KORDI. 1996. Harmonic Constants of Tide around the Korea Peninsula. 282pp.
- Lee, G.H. 1992. The pattern of sea water circulation in Kamak Bay. Bull. Korean Fish. Tech. Soc., 28 (2), 117~131 (in Korean).
- Lee, G.H. and K.D. Cho. 1990. Distributions of the temperature and salinity in Kamak Bay. Bull. Korean Fish. Soc., 23 (1), 25~39 (in Korean).
- Lee, J.C., H.S. Choo, G.H. Lee and K.D. Cho. 1995. Tides and currents of Kamak Bay in July~August 1994. J. Kor. Fish. Soc., 28 (5), 624~634.
- Lee, K.S., Y.S. Lee and S.H. Lee. 1991. Numerical simulation on tidal currents in a Bay. -Application to Kamak Bay-, J. Korean Associ. Hydrolo. Sci., 24 (4), 41~48 (in Korean).
- Lee, M.C. 1983. A capacity of self-purification in Kamak Bay. Bull. Yosul Nat'l Fish. Univ., 4, 19~25 (in Korean).
- Lee, M.C. and S.D. Chang. 1982. Tidal exchange of sea water in Kamak Bay. J. Oceanol. Soc. Korea, 17, 12~18 (in Korean).
- Yanagi, T. 1980. Variability of the constant flow in Osaka Bay. J. Oceano. Soc. Japan, 36, 246~252.
- 本多忠夫·光易 恒. 1980. 第27回海岸工学講演會論文集, 90~93.
- 국립수산진흥원. 1978. 연안어장 및 임해공업단지 주변 해역의 해수유동, 89~92.
- 수로국. 1968. 여수항 및 그 부근 일대의 조류, 수로기술연보, 157~180.

1998년 4월 30일 접수

1999년 9월 20일 수리