

정방형 실린더 주위 유동패턴에 대한 자유수면의 영향

안형수, 양경수*

인하대학교 기계공학과

EFFECTS OF THE FREE SURFACE ON THE FLOW PATTERN PAST A SQUARE CYLINDER

Hyungsu Ahn and Kyung-Soo Yang*

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

The characteristics of flow past a square cylinder submerged under the free surface have been numerically studied. An immersed boundary method was adopted for implementation of the cylinder cross-section in a Cartesian grid system. Also, a level-set method was used to capture the interface of the two fluids. The case for Reynolds number 150 was examined. At the specific Reynolds number, by varying the gap ratio(0.25, 0.40, 0.55, 0.70, 1.00, 1.50, 2.50, 5.00) the effects of the free surface on the force coefficients and Strouhal number of vortex shedding were identified. The presence of the free surface very close to the cylinder significantly affects the shedding pattern, resulting in considerable deviation of the force coefficients and Strouhal number from those of the single-phase flow. In addition, the influence of Froude number was considered in this study. By increasing Froude number(0.2-0.4), flow topology change was identified at the specific gap ratios(0.40, 0.70, 1.50, 5.00).

Key Words : 가상경계법(Immersed Boundary Method), 정방형 실린더(Square Cylinder), Level-set 기법, 자유수면(Free-surface)

1. 서론

최근 해양구조물이나 해저터널에 대한 관심이 높아지면서 자유수면 아래 물체 주위 유동에 관한 연구도 관심이 높아졌다. 자유수면과 가까이 있는 구조물의 경우 재순환영역이 크게 발달하는데, 부유물들이 재순환영역 내부에 존재하게 되면 구조물에 안정성에도 큰 영향을 미치게 된다.

여러 연구자들이 자유수면 아래 잠긴 구조물에 관한 연구를 수행한 바 있다. 연구에서 자주 언급되는 무차원 수는 레이놀즈 수(Re), 프루드 수(Fr), 스트로우홀 수(St), 항력 계수(C_D) 및 양력 계수(C_L)가 있다. 여기서 Fr 은 유체의 관성력과 중력의 상대적인 비를 의미한다. St 는 C_L 의 진동수와 실린더 직경의 곱을 입구속도로 나눈 값이며, C_D 와 C_L 은 실린더에 작용하는 항력과 양력을 동압과 면적으로 무차원화한 값이다.

Miyata 등[1]은 $Re = 4.96 \times 10^4$, $Fr = 0.24$ 에서 자유수면

의 존재가 원형 실린더의 C_D 와 St 에 미치는 영향을 연구하였으며, Sheridan 등[2,3]과 Hoyt와 Sellin[4]은 실험을 통해서 자유수면의 높이와 Fr 에 따른 실린더 후류의 wake 특성에 관한 연구를 수행하였다. Reichl[5]과 Reichl 등[6,7]은 $Re = 180$ 에서 자유수면의 높이와 Fr 의 변화에 따른 자유수면의 형상 변화 및 유동 특성에 관한 연구를 수행하였다.

본 저자들은 자유수면 아래 잠긴 정방형 실린더에 대한 연구[8]를 진행한 바 있으며, $Re = 150$, $Fr = 0.2$ 에서 순간 유동장의 특성을 파악하는 연구를 진행하였다. 이를 바탕으로 추가적인 연구를 수행하였으며, 본 연구에서는 Fr 를 증가시켜가면서, 자유수면의 존재가 정방형 실린더 주위 유동패턴에 미치는 영향을 알아보기 위한 수치해석적 연구를 진행하였다. 또한 Fr 이 변화함에 따라 C_D , C_L 과 St 이 변화하는 경향을 파악하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배 방정식

기체-액체의 2상 유동에 대한 지배 방정식은 비압축성 2차원 유동에 대한 연속 방정식, 운동량 방정식으로 구성된다.

Received: December 5, 2016, Revised: March 21, 2017,

Accepted: March 21, 2017.

* Corresponding author, E-mail: ksyang@inha.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2017.22.1.081>

© KSCFE 2017

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} (-\nabla p + \nabla \cdot (2\mu S)) + \mathbf{f} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3)$$

여기서 S 는 Strain tensor, \mathbf{g} 는 중력가속도를 의미한다. \mathbf{f} 는 가상경계법(Immersed Boundary Method)[9]에 의해 추가된 운동량 부가를 나타낸다.

각 지배 방정식은 직교좌표계에서 유한체적법(Finite Volume Method)으로 차분되었다. 공간 차분은 대류항에 대해서는 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)을 사용하였고 점성항에 대해서는 중앙차분법을 사용하였다. 시간 차분은 대류항에 대하여 3차 정확도의 Runge-Kutta 양해법(explicit)으로 적분하였고 점성항에 대하여 Crank-Nicolson의 음해법(implicit)으로 적분하였다. 연속 방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 Fractional Step 기법[10]이 사용되었다.

2.2 Level-set 기법

Level-set 기법[11-13]에서 ϕ 는 부호를 갖는 거리 함수로 정의된다. 상 경계면($\phi = 0$)의 위치는 다음과 같이 정의되는 Level-set equation에 의하여 추적된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\phi) = 0 \quad (4)$$

식 (4)에 의하여 이송된 Level-set 함수는 더 이상 거리 함수가 아닐 수 있다. 즉 $|\nabla \phi| = 1$ 를 만족하지 못하게 된다. 따라서 Level-set 함수가 거리 함수로 유지되도록 Level-set 함수의 이송 후에 재초기화(Reinitialization)[13] 되어야 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + s(\phi_0)(|\nabla d| - 1) = \lambda \delta(\phi) |\nabla \phi_0| \quad (5)$$

$$s(\phi_0) = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + (|\nabla \phi_0| \epsilon)^2}} \quad (6)$$

여기서 τ 는 재초기화를 위한 가상 시간이며, λ 는 질량손실 보정 계수이다. ϕ_0 는 재초기화를 위한 초기값이다. 식 (4), (5)는 공간에 대해서 3차 정확도의 ENO(Essentially Non-Oscillatory) 기법[14]이 사용되었으며, 시간에서의 적분은 3차 정확도의 TVD Runge-Kutta 기법[15]이 사용되었다.

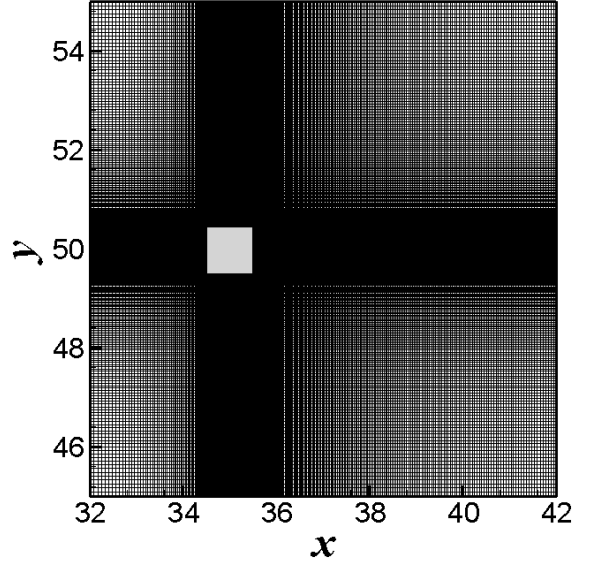


Fig. 1 Computational mesh

2.3 계산 영역과 경계 조건

본 연구에서 사용되는 Re 와 Fr 는 아래와 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho_l U D}{\mu_l} \quad (7)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}} \quad (8)$$

여기서 U 는 입구속도를 나타내며, g 는 중력가속도를 의미한다. D 는 정방형 실린더의 한 변의 길이를 나타낸다. 계산에서 쓰인 물리량은 $\rho_l / \rho_g = 100$, $\mu_l / \mu_g = 100$ 이며, Reichl[5]이 사용한 값과 동일하다. 하첨자 l , g 는 각각 liquid, gas를 의미한다. $Fr = 0.2$ 인 경우, h/D 가 0.25, 0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00, 1.50, 2.50, 5.00에 대해서 계산을 수행하였다. 단상 유동일 경우, 정방형 실린더 유동에서 3차원 불안정성이 발생하는 Reynolds 수는 166.5 부근이다[16]. 따라서 본 연구에서는 2차원적으로 해석하기 위해서 166.5보다 작은 150을 Re 로 선정하였다.

전체 계산 영역은 왼쪽아래 모서리를 원점으로 $0 \leq x \leq 100D$, $0 \leq y \leq 100D$ 이고, 실린더의 중심은 $x = 35D$, $y = 50D$ 에 위치한다. 사각형 영역 안에는 64×64 개의 균일하게 분포된 격자를 사용하였으며, 전체 격자는 x 방향과, y 방향으로 불균일(non-uniform)하게 확장되었다. 격자점의 수는 격자 세분화 연구(grid-refinement study)를 통해 결정하였으며

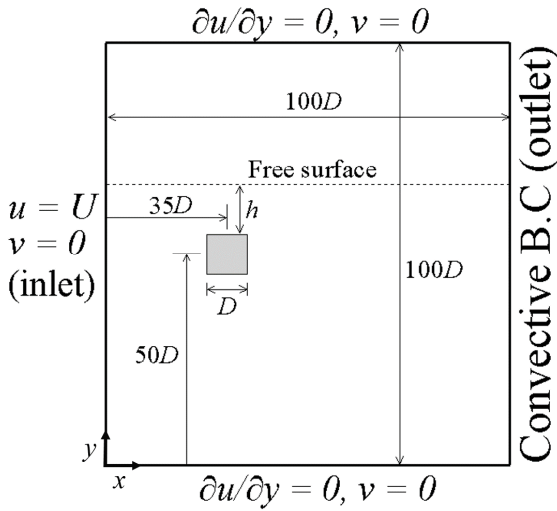


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

사용된 전체 격자점 수는 768×960 이다(Fig. 1).

입구와 출구에서는 각각 Dirichlet($u = U, v = 0$)경계조건과 대류 경계조건($\partial\phi/\partial t + U_{conv}\partial\phi/\partial x = 0$)[17]이 사용되었으며 계산영역 윗면과 아랫면에서는 미끄럼 조건($\partial u/\partial y = 0, v = 0$)을 사용하였다. 물체 표면에서는 점착 조건을 사용하였다(Fig. 2). 여기서 U_{conv} 는 출구의 평균속도를 의미한다.

3. 수치해석 기법의 검증

코드의 검증은 본 저자가 이전에 진행하였던 연구[8]에서 이루어졌으며, $Re = 180$ 에서 자유수면 아래 잠긴 원형 실린더에 대하여 계산을 수행하였다. Reichl[5], Chung[18]의 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 자세한 내용은 [8]에서 확인할 수 있다.

4. 결 과

4.1 시간평균 유선 및 와도

유동 패턴을 명확하게 확인해보기 위해서 시간에 대해서 평균하였다. h/D 에 따른 유선 및 와도 패턴을 3가지로 구분하였으며, Fig. 3와 4에 나타냈다.

첫 번째는 $h/D = 0.25$ 인 경우이다. 유선부터 살펴보면, 정방형 실린더에서 가까운 후류에서는 작은 재순환영역이 여러 개 발달함을 알 수 있으며, 실린더에서 비교적 먼 후류에서는 자유수면을 기준으로 서로 반대방향으로 회전하는 재순

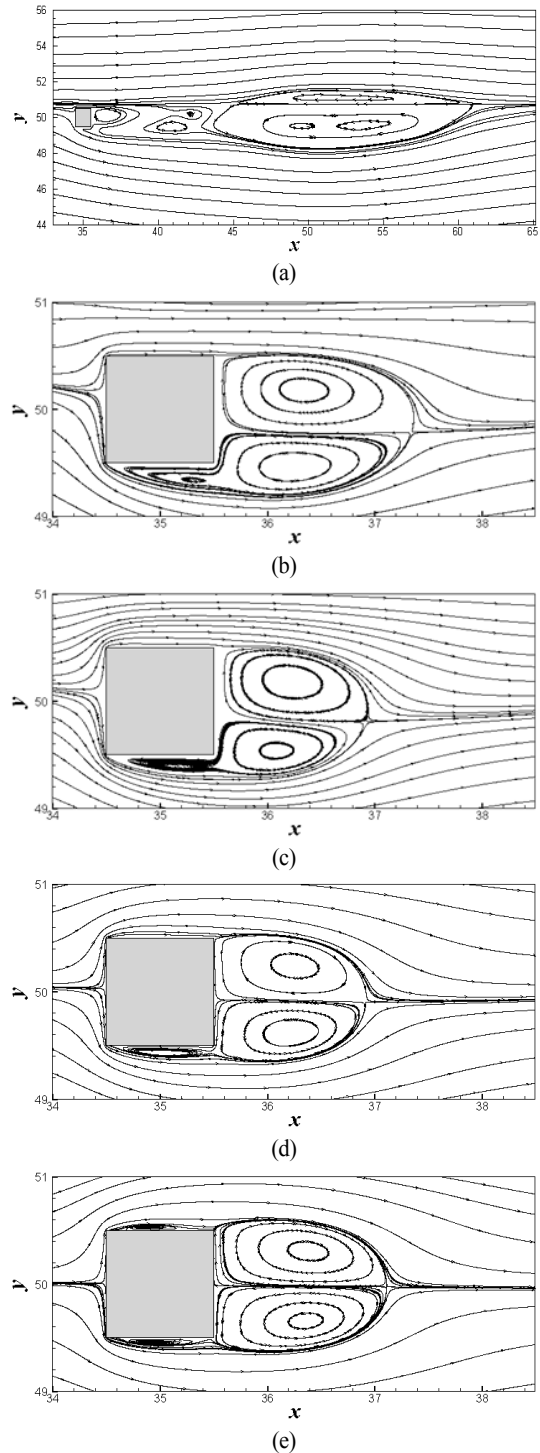


Fig. 3 Time-averaged streamlines at (a) $h/D = 0.25$, (b) $h/D = 0.40$, (c) $h/D = 0.70$, (d) $h/D = 1.50$, (e) $h/D = 5.00$, $Re = 150, Fr = 0.2$

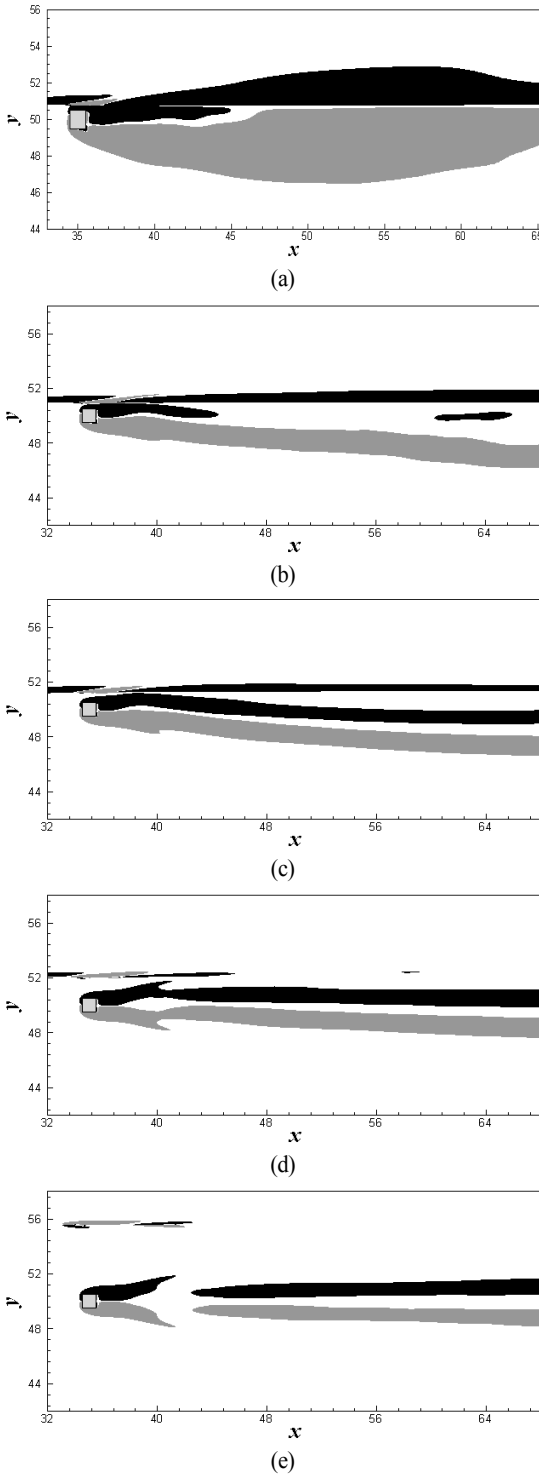


Fig. 4 Time-averaged vorticity(■ : negative, ■ : positive) at (a) $h/D = 0.25$, (b) $h/D = 0.40$, (c) $h/D = 0.70$, (d) $h/D = 1.50$, (e) $h/D = 5.00$, $Re = 150$, $Fr = 0.2$

환영역이 발달한다(Fig. 3(a)). 와도의 경우에는 자유수면 위쪽으로는 음의 와도가 크게 발달하며, 아래쪽으로는 양의 와도가 크게 발달한다. 또한 자유수면 아래에서의 음의 와도는 상대적으로 억제되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(a)).

다음으로는 $h/D = 0.40-1.50$ 인 경우로, 실린더 후류에서 서로 반대 방향으로 회전하는 비대칭적인 재순환영역이 발달한다. 이 영역에서는 saddle point가 실린더의 중심보다 아래쪽에 위치하고 있으며, 실린더 하부에 또 하나의 작은 재순환영역이 발달한다(Fig. 3(b)-(d)). 자유수면 아래에서는 양의 와도가 음의 와도에 비해 상대적으로 크게 발달하며, 위쪽에서는 음의 와도가 발달한다(Fig. 4(b)-(d)). h/D 가 작을수록 자유수면 위아래에서 같은 부호의 와도가 발달함으로써 서로 발달하는 것을 억제하는 것으로 보인다.

마지막으로는 $h/D = 2.50-5.00$ 으로, 실린더 후류에서 서로 반대 방향으로 회전하는 대칭적인 재순환영역이 발달한다. $h/D = 5.00$ 인 경우에는 실린더 상하부 모두에서 재부착 현상이 발생한다(Fig. 3(e)). 이를 통해서 $h/D = 5.00$ 이후에서는 유동특성이 완전히 잠겨있을 경우와 매우 근접함을 확인할 수 있다. 와도의 경우에는 대칭적인 형상을 나타낸다(Fig. 4(e)).

4.2 프루드 수의 영향 - 시간평균 와도

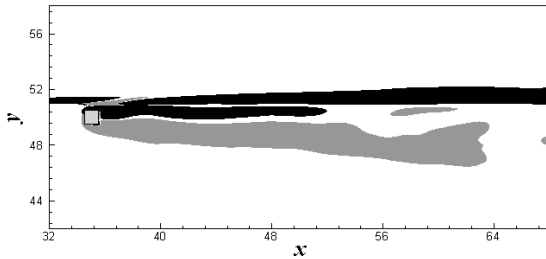
h/D 가 0.40, 0.70, 1.50, 5.00인 경우에 대해서 Fr 에 따른 시간평균 와도는 Fig. 5와 6에 나타났다. $h/D = 5.00$ 을 제외한 계산영역에서는 Fr 가 증가함에 따라 자유수면 위쪽에서 발생하는 음의 와도가 점점 크게 발달하는 것을 확인할 수 있다.

특징적인 변화는 $h/D = 0.40$ 과 $h/D = 0.70$ 에서 확인된다. $h/D = 0.40$ 의 경우에는 자유수면 아래 양의 와도가 점점 크게 발달하며, Fr 가 증가하면서 $Fr = 0.2$, $h/D = 0.25$ 에서의 와구조와 유사해진다(Fig. 4(a), Fig. 5(a), Fig. 6(a)).

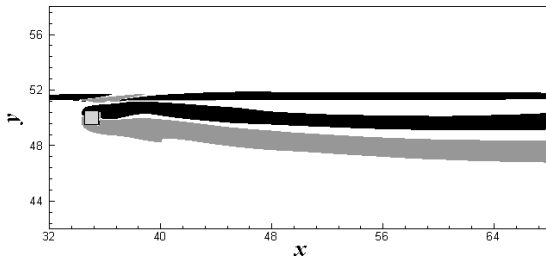
Fr 의 증가는 자유수면의 변화를 불러일으킨다. 이는 무거운 유체가 지날 수 있는 틈을 좁게 만들어 결국 h/D 가 마치 감소한 효과를 보여준다. $Fr = 0.3$ 의 경우에는 $h/D = 0.40$ 까지 영향을 받으며, $Fr = 0.4$ 에서는 $h/D = 0.70$ 인 경우까지 영향을 받는다(Fig. 5, Fig. 6). 좀 더 확실한 유동 특성을 구분하기 위해서는 세분화된 h/D 에 대한 계산이 필요할 것으로 보인다.

4.3 프루드 수의 영향 - 항력, 양력 계수 및 스트로우홀 수

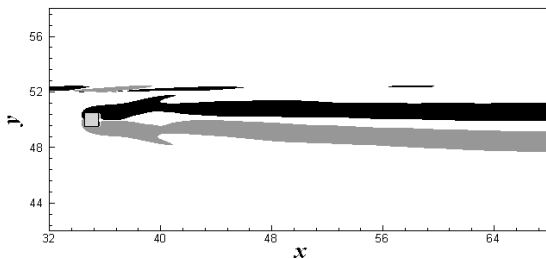
Fr 가 유동에 미치는 영향을 알아보기 위해 h/D 가 0.40, 0.70, 1.50, 5.00인 경우에 대해서 Fr 를 증가시켜가면서 계산을 수행하였다. Fr 는 0.2에서 0.4까지 0.1씩 증가시켰다.



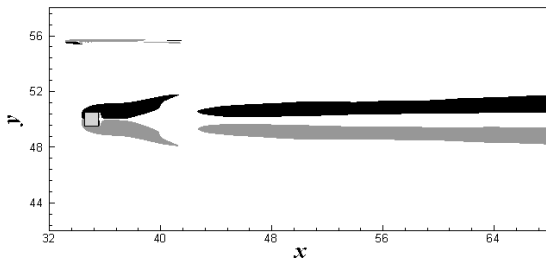
(a)



(b)



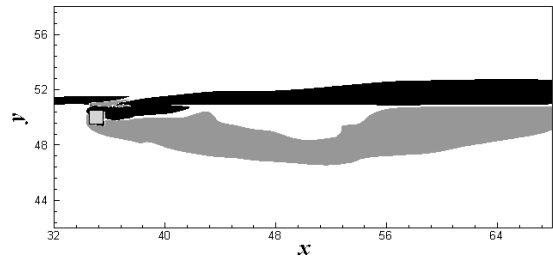
(c)



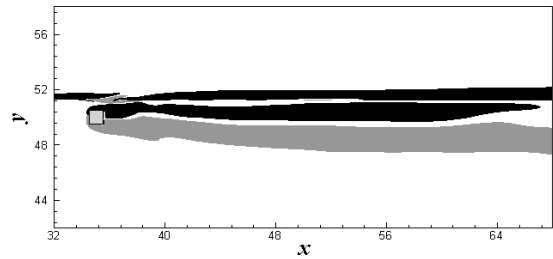
(d)

Fig. 5 Time-averaged vorticity(■ : negative, ■ : positive) at (a) $h/D = 0.4$, (b) $h/D = 0.7$, (c) $h/D = 1.5$, (d) $h/D = 5.0$, $Re = 150$, $Fr = 0.3$

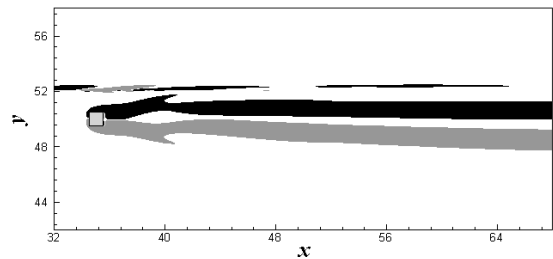
Fig. 7(a)는 각 Fr 에서 h/D 에 따른 $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 를 보여준다. 여기서 하첨자 0은 $Re = 150$ 에서 단상유동인 경우의 값에 해당한다. $h/D = 0.70$ 보다 작은 구간에서 변화가 두드러진다. $Fr = 0.2$ 인 경우에는 최대값이 $h/D = 0.40$ 에서 나타나는 반면, $Fr = 0.3$ 에서는 $h/D = 0.40-0.70$ 사이에 존재할 것으로 예측된다. $Fr = 0.4$ 에서 또한 $h/D = 0.70$ 에서 최대값이



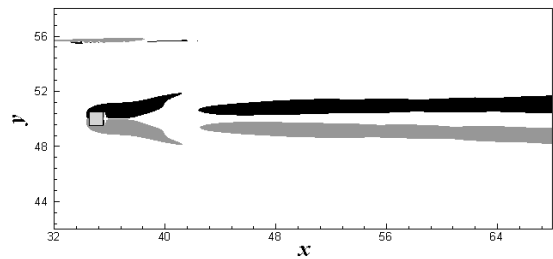
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Time-averaged vorticity(■ : negative, ■ : positive) at (a) $h/D = 0.4$, (b) $h/D = 0.7$, (c) $h/D = 1.5$, (d) $h/D = 5.0$, $Re = 150$, $Fr = 0.4$

나타나는 것으로 확인된다. 이를 토대로, Fr 가 증가함에 따라 $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 의 최대값이 h/D 이 커지는 방향으로 옮겨가는 것을 알 수 있다. $h/D = 5.00$ 에 가까워질수록 모든 계산범위에서 동일한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있는데, 이는 $h/D = 5.00$ 이후에는 Fr 이 증가함에도 불구하고 자유수면의 영향력이 크지 않다고 결론내릴 수 있다.

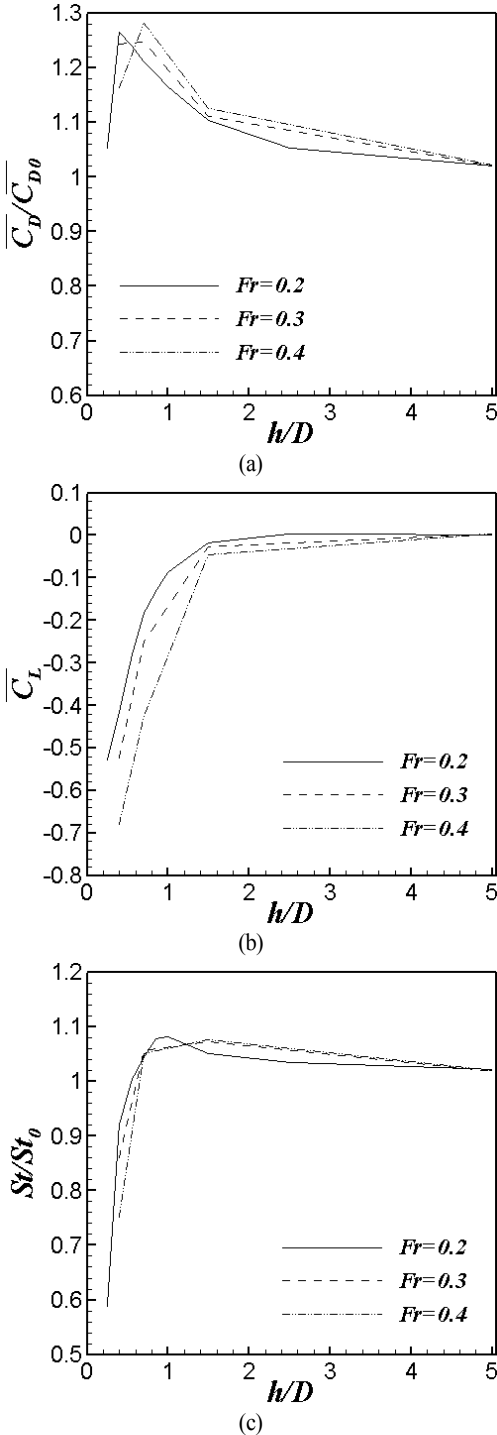


Fig. 7 (a) Normalized mean drag coefficient, (b) Mean lift coefficient, (c) Normalized mean strouhal number depending upon the ratio(h/D) and Froude number, $Re = 150$

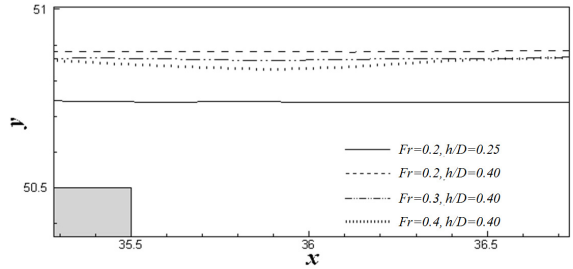


Fig. 8 Time-averaged free surface

Fig. 7(b)는 각 Fr 에서 h/D 에 따른 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다. 모든 h/D 에서 유사한 경향성을 보여준다. h/D 이 증가함에 따라 0에 가까운 값을 가지며, $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 결과에서와 마찬가지로 자유수면의 영향력이 $h/D=5.00$ 이후에는 크지 않음을 알 수 있다. $h/D=1.50$ 보다 작은 구간에서는 $\overline{C_L}$ 값의 차이가 점차 커지는 것 또한 확인된다.

Fig. 7(c)는 각 Fr 에서 h/D 에 따른 St/St_0 을 나타낸다. $h/D=0.40$ 에서 가장 큰 차이를 보이며, 나머지 구간에서는 유사한 경향을 보인다.

비교적 낮은 수심에서, 자유수면의 변화가 유동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 $h/D=0.40$ 인 경우에 시간평균된 자유수면을 Fig. 8에 나타내었다. Fr 가 증가함에 따라서 실린더 상단부의 자유수면은 점점 아래쪽으로 치우치는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

자유수면 아래 잠긴 정방형 실린더 후류 유동에 관한 연구를 수행하였다. $Fr=0.2, 0.3, 0.4$ 에서 h/D 을 증가시키면서 계산을 수행하였으며, h/D 에 따른 유동 패턴을 세 가지로 구분하였다. 유동패턴에서 Fr 의 증가는 h/D 가 감소하는 효과를 보였다. 또한 $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 와 St/St_0 의 경우에는 특정 h/D 에서 최대값이 발생하고, h/D 가 점차 증가할수록 자유수면이 고려되지 않았을 때의 결과와 가까워지는 것을 확인하였다. $\overline{C_L}$ 의 경우, h/D 가 커질수록 점차 증가하는 경향을 나타내며, $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 와 St/St_0 의 경우와 마찬가지로 자유수면이 실린더에서 충분히 멀어지면 단상유동의 결과에 가까워지는 것을 알 수 있었다. 마지막으로, Fr 를 0.2에서 0.4까지 0.1 간격으로 증가시키며 계산을 수행하였다. Fr 가 증가함에 따라 $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 의 최대값이 h/D 가 커지는 방향으로 이동함을 확인하였다. $\overline{C_L}$ 과 St/St_0 의 경우에는 Fr 이 증가함에도

동일한 경향성을 나타내는 것을 볼 수 있었으며, 비교적 자유 수면과 실린더의 간격이 좁을수록 결과 간의 차이가 커지는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A2A01002981).

References

- [1] 1990, Miyata, H., Shikazono, N. and Kani, M., "Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free surface," *Ocean Engng.*, Vol.17, pp.81-104.
- [2] 1995, Sheridan, J., Lin, J.-C. and Rockwell, D., "Metastable states of a cylinder wake adjacent to a free surface," *Phys. Fluids*, Vol.7, pp.2099-2101.
- [3] 1997, Sheridan, J., Lin, J.-C. and Rockwell, D., "Flow past a cylinder close to free surface," *J. Fluid Mech.*, Vol.330, pp.1-30.
- [4] 2000, Hoyt, J.W. and Sellin, R.H.J., "A comparison of the tracer and PIV results in visualizing water flow around a cylinder close to the free surface," *Exp. Fluids*, Vol.28, pp.261-265.
- [5] 2002, Reichl, P.J., "Flow past a cylinder close to free surface," *Ph.D. Thesis*, Monash University.
- [6] 2003, Reichl, P.J., Hourigan, K. and Thompson, M., "The unsteady wake of a circular cylinder near a free surface," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol.71, pp.347-359.
- [7] 2005, Reichl, P.J., Hourigan, K. and Thompson, M., "Flow past a cylinder close to a free surface," *J. Fluid Mech.*, Vol.533, pp.269-296.
- [8] 2015, Ahn, H., Yang, K.S. and Park, D., "Numerical simulation of flow past a square cylinder submerged under the free surface," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.20, pp.51-57.
- [9] 2006, Yang, J. and Balaras, E., "An Embedded-Boundary-Formulation for Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows Interacting with Moving Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol.215, No.1, pp.12-40.
- [10] 1985, Kim, J. and Moin, P., "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comput. Phys.*, Vol.59, No.2, pp.308-323.
- [11] 1994, Sussman, M.S., Fatemi, E., Smereka, P. and Osher, S., "A Level set approach for computing solutions to incompressible two phase flow," *J. Comput. Phys.*, Vol.114, pp.146-159.
- [12] 1998, Sussman, M.S., Fatemi, E., Smereka, P. and Osher, S., "An Improved level set method for incompressible two-phase flows," *Comput. Fluids*, Vol.27, pp.663-680.
- [13] 1999, Sussman, M.S. and Fatemi, E., "An efficient, interface-preserving level set redistancing algorithm and its application to interfacial incompressible fluid flow," *SIAM J. Sci. Comput.*, Vol.20, No.4, pp.1165-1191.
- [14] 2000, Jiang, G.S. and Peng, D., "Weighted eno schemes for Hamilton-jacobi equations," *SIAM J. Sci. Comput.*, Vol.21, No.6, pp.2126-2143.
- [15] 1998, Gottfried, S. and Shu, C.W., "Total variation diminishing runge-kutta schemes," *Math. comput.*, Vol.67, No.221, pp.74-85.
- [16] 2012, Choi, C.B., Jang, Y.J. and Yang, K.S., "Secondary instability in the near-wake past two tandem square cylinders," *Phys. Fluids*, Vol.24, 024102.
- [17] 2004, Kim, D.H., Yang, K.S. and Senda, M., "Large eddy simulation of turbulent flow past a square cylinder confined in a channel," *Comput. Fluids*, Vol.33, pp.81-96.
- [18] 2013, Chung, M.H., "An adaptive cartesian cut-cell/level-set method to simulate incompressible two-phase flows with embedded moving solid boundaries," *Comput. Fluids*, Vol.71, pp.469-486.