

# 자유수면 아래 정방형 실린더 후류 유동에 관한 수치해석적 연구

안형수, 양경수,\* 박두현

인하대학교 기계공학과

## NUMERICAL SIMULATION OF FLOW PAST A SQUARE CYLINDER SUBMERGED UNDER THE FREE SURFACE

Hyungsu Ahn, Kyung-Soo Yang\* and Doohyun Park

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

*In the present study, two-dimensional numerical investigation of flow past a square cylinder beneath the free surface has been performed to identify the effects of presence of the free surface. 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 two fluids. To prevent transition to three-dimensional flow, Reynolds number chosen for this simulation was 150. The cases for Froude number 0.2 and gap ratio( $h/D$ ) between 0.25 and 5.00 were examined. At the specific Reynolds number, we study the effects of gap ratio on flow characteristics around a square cylinder by computing flow fields, force coefficients and Strouhal number.*

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

### 1. 서론

몽툭한 물체 주위의 유동에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해서 진행되어 왔다. 그 중에서 정방형 실린더[1-3]와 원형 실린더[4-6]에 관한 연구가 대표적이다. 최근에는 해양플랜트가 각광받기 시작하면서, 자유수면 아래 물체 주위 유동에 관한 연구도 관심이 높아졌다. 이러한 문제는 이론적인 측면뿐만 아니라 공학적인 측면에서 매우 중요하다. 자유수면은 와류를 억제하는 동시에 자신의 형상변화를 일으킨다. 그로 인해 발생하는 비대칭성이 물체의 항력과 양력에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 중요성에도 불구하고 아직까지 많은 연구가 진행되지 않았다.

여러 연구자들이 자유수면 아래 잠긴 원형 실린더를 지나는 유동에 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 et al.[7]는  $Re = 4.96 \times 10^4$ ,  $Fr = 0.24$ 에서 자유수면의 존재가  $C_D$ 와  $St$ 에 미치는 영향을 수치해석과 실험을 통해서 연구하였으며, Sheridan et al.[8-9]과 Hoyt and Sellin[10]은 실험을 통해서 자유수면의 높이와  $Fr$ 에 따른 실린더 후류의 wake 특성에 관한 연구를 수행하였다. Reichl[11]과 Reichl et al.[12-13]은  $Re = 180$ 에서 자유수면의 높이와  $Fr$ 의 변화에 따른 자유수면의 형상 변화 및 유동 특성에 관한 연구를 수행하였다.

선행연구에서는 원형 실린더에 관한 연구가 진행되었을 뿐 아직까지 정방형 실린더에 관한 연구는 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 자유수면의 존재가 정방형 실린더 후류 유동에 미치는 영향을 알아보기 위한 수치 해석적 연구를 수행하였다.

### 2. 수치해석 기법

#### 2.1 지배 방정식

기체-액체의 2상 유동에 대한 지배 방정식은 비압축성 2차

Received: September 16, 2015, Revised: December 17, 2015,

Accepted: December 18, 2015.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.4.051>

© KSCFE 2015

원 유동에 대한 연속 방정식, 운동량 방정식으로 구성된다.

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

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

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

여기서  $S$ 는 Strain tensor,  $\mathbf{g}$ 는 중력가속도를 의미한다.  $\mathbf{f}$ 는 가상경계법(Immersed Boundary Method)[14]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[15]이 사용되었다.

## 2.2 Level-set 기법

Level-set 기법[16-18]에서  $\phi$ 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)[18] 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  $\tau$ 는 재초기화를 위한 가상 시간이며,  $\lambda$ 는 질량손실 보정 계수이다.  $\phi_0$ 는 재초기화를 위한 초기값이다. 식 (4), (5)는 공간에 대해서 3차 정확도의 ENO(Essentially Non-Oscillatory) 기법[19]이 사용되었으며, 시간에서의 적분은 3차

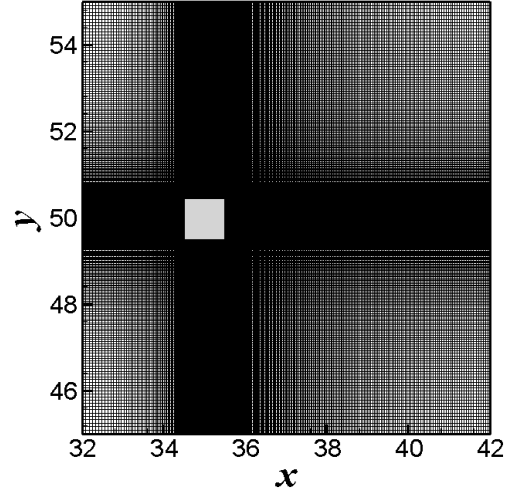


Fig. 1 Computational mesh

정확도의 TVD Runge-Kutta 기법[20]이 사용되었다.

## 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[11]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. 단상유동일 경우, 정방형 실린더 유동에서 3차원 불안정성이 발생하는 Reynolds 수는 166.5 부근이다[21]. 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  $64 \times 64$ 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 사용된 전체 격자점 수는  $768 \times 960$  이다(Fig. 1).

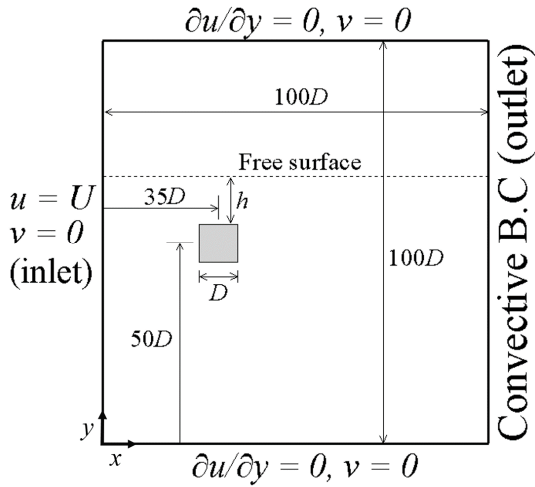


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

입구와 출구에서는 각각 Dirichlet ( $u = U, v = 0$ ) 경계조건과 대류 경계조건 ( $\partial\phi/\partial t + U_{conv}\partial\phi/\partial x = 0$ )[22]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 검증을 위해  $Re = 180$ 에서 자유수면 아래 잠긴 원형 실린더에 대하여 계산을 수행하였다. 사용한 격자점 수는 실린더에 접하는 정사각형 영역 안에  $64 \times 64$ 개, 전체  $768 \times 640$ 개의 격자를 사용하였다. Fig. 3는  $h/D$ 에 따른 표준화된 시간평균 항력계수 ( $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ ), 시간평균 양력계수 ( $\overline{C_L}$ ), 표준화된 스트로우홀 수 ( $St/St_0$ )를 나타낸다. 여기서 하첨자 0는  $Re = 180$ 에서 단상유동일 경우에 값을 의미한다.

Reichl[11], Reichl et al.[12]의 결과와 비교했을 때  $\overline{C_L}$ 는 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었으나,  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 와  $St/St_0$ 의 경우에는 전체적으로 낮게 예측되었다. 하지만  $St/St_0$ 의 경우에는 Chung[23]의 결과와 비교했을 때 더욱 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

### 4. 결 과

#### 4.1 항력, 양력 계수 및 스트로우홀 수

Fig. 3(a)는  $h/D$ 에 따른  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 를 보여준다. 여기서도

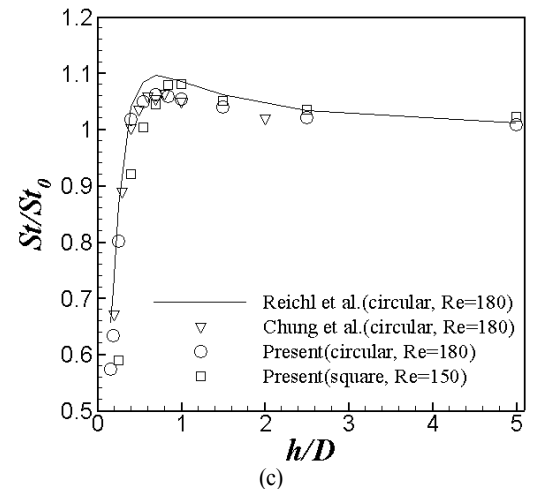
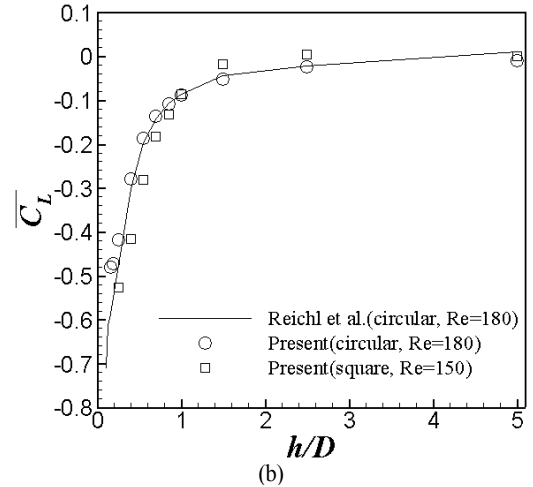
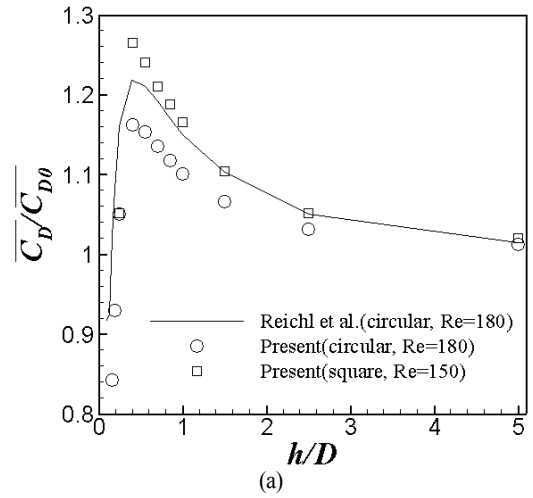


Fig. 3 Comparisons of (a) Normalized mean drag coefficient, (b) Mean lift coefficient, (c) Normalized strouhal number depending upon ratio( $h/D$ ) with the reference data

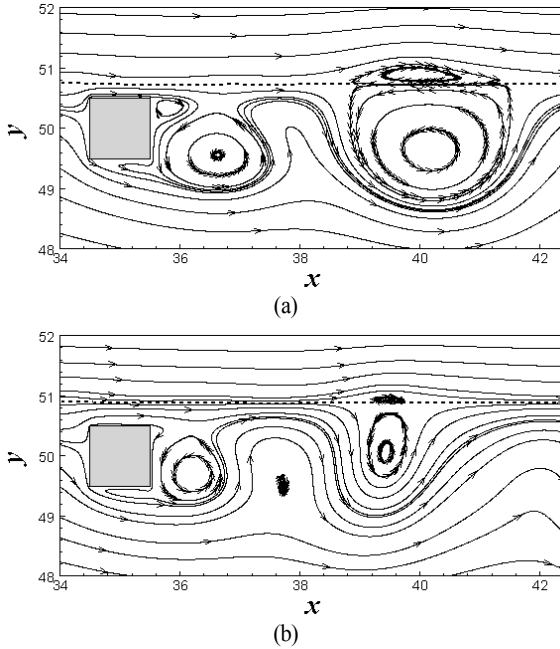


Fig. 4 Instantaneous streamlines at (a)  $h/d = 0.25$ , (b)  $h/d = 0.40$ ,  $Re = 150$

마찬가지로 하첨자 0는  $Re = 150$ , 단상유동일 때 정방향 실린더의 값을 의미한다. 모든 계산영역에서 1.0보다 큰 값이 나오는 것을 확인할 수 있었으며, 이로써 자유수면의 존재가  $\overline{C_D}$ 을 증가시키는 원인이 된다고 판단할 수 있다.  $h/D=0.4$ 를 기점으로  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 는 증가하다가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 실린더가 자유수면에서 점차 멀어질수록 값이 1.0에 가까워지는 것으로부터 자유수면에서 충분히 멀어진다면 단상유동일 경우와 유사한 유동 특성을 가진다고 볼 수 있다. 이러한 결과는  $Re$ 는 다르지만 원형실린더의 결과와 유사한 경향을 보여준다. 전체 계산 범위에서  $\overline{C_D}$ 는  $\overline{C_{D0}}$ 에 비해서 최대 26% 증가하였으며, 원형실린더(16%)에 비해서 더 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig 3(b)는  $h/D$ 에 따른  $\overline{C_L}$ 를 나타낸다.  $Fr = 0.2$ 인 경우에는 중력이 지배적이기 때문에 자유수면의 변화가 거의 없다(Fig. 4, 5). 따라서 유동이 자유수면과 실린더 사이를 지나는 것이 마치, 실린더와 벽 사이를 지나는 것과 유사하다. 따라서 유동이 좁은 틈을 지나게 되면서 실린더 상단부에서 비교적 높은 압력을 유지하게 된다. 이로 인해  $\overline{C_L}$ 은  $h/D$ 가 작을수록 더 작은 음수 값을 갖게 된다. 하지만  $h/D=2.5$  이후로는 0에 가까운 값이 나타나는 것을 확인할 수 있는데,

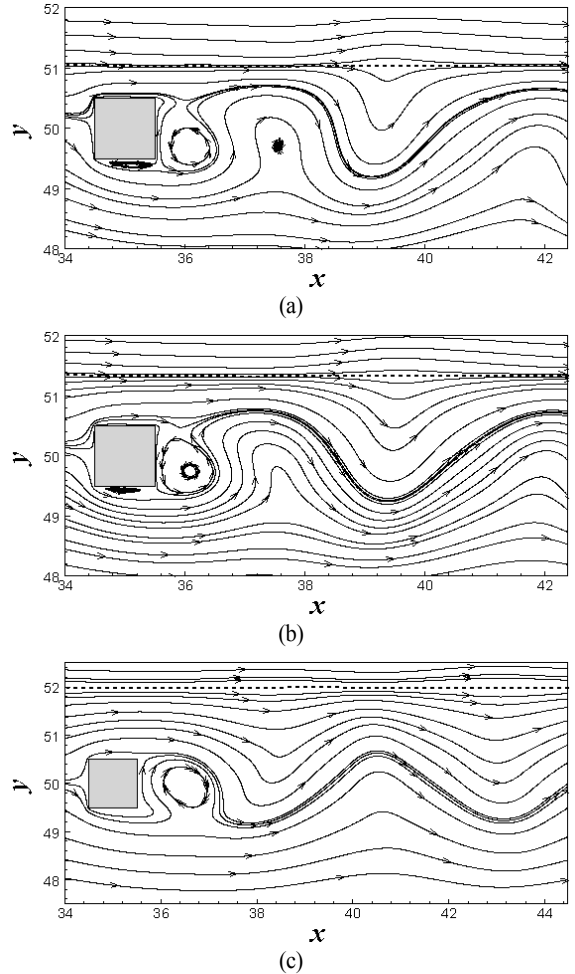


Fig. 5 Instantaneous streamlines at (a)  $h/D = 0.55$ , (b)  $h/D = 0.85$ , (c)  $h/D = 1.50$ ,  $Re = 150$

이로써 자유수면에서 멀리 떨어질수록 단상유동의 특징과 유사해짐을 알 수 있다.  $\overline{C_L}$ 의 경우에도 원형실린더와 비교했을 때 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Fig 3(c)는  $h/D$ 에 따른  $St/St_0$ 의 경향을 나타낸다.  $h/D=0.5$ 에서 단상유동일 때의 값과 유사해지면서,  $h/D=1.0$ 에서 최대값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 원형실린더에서 최대값이  $h/D=0.7$ 에서 발생하는 것과 차이를 보인다. 최대값 이후에는 다시 점차 감소하면서 1.0에 가까워짐을 확인할 수 있다.

#### 4.2 순간 유선

Fig 4-6는  $h/D$ 에 따른 순간 유선을 나타낸다. 점선

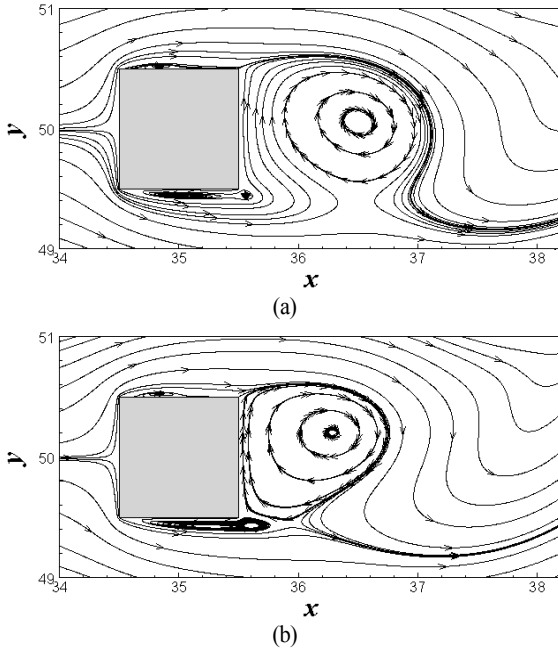


Fig. 6 Instantaneous streamlines at (a)  $h/D = 2.50$ , (b)  $h/D = 5.00$ ,  $Re = 150$

은 자유수면을 의미한다.  $h/D$ 가 0.25-0.40인 경우에는 실린더에서 멀리 떨어진 후류에서 자유수면을 기준으로 위, 아래로 서로 반대방향의 재순환 영역이 발달하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4).  $h/D = 0.25$ 인 경우에는 비교적 큰 재순환 영역이 발달하는 반면에  $h/D = 0.40$ 에서는 작은 재순환 영역이 발달하는 것으로 보아,  $h/D$ 가 작으면 큰 재순환 영역이 발생한다고 판단할 수 있다.

$h/D$ 가 0.55-1.50인 경우에는 재순환 영역이 사라지는 것을 확인하였으며,  $h/D$ 가 2.50-5.00인 경우에는 재부착점이 정방형 실린더 위쪽에서 발생하는 것을 확인하였고(Fig. 6), 이를 통해서  $h/D$ 가 2.5보다 커지게 되면 자유수면이 고려되지 않았을 때의 유동 특성과 매우 흡사해지는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.3 $h/D=1.0$ 에서 프루드 수의 영향

Fig. 7은  $Fr$ 의 변화에 따른 자유수면의 변화를 나타낸다. 점선으로 표시된 것이 자유수면을 의미한다. 4.1의 결과에서 최대  $St/St_0$ 가 발생하는  $h/D$ 는 1.0이었다. 따라서 최대  $St/St_0$ 가 발생하는  $h/D$ 에서  $Fr$ 가 유동특성에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보았다.  $Fr$ 가 점차 커지면서 자유수면의 변형 정도가 심해지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는  $Fr$ 가 작은 경우에는 중력이 지배적인

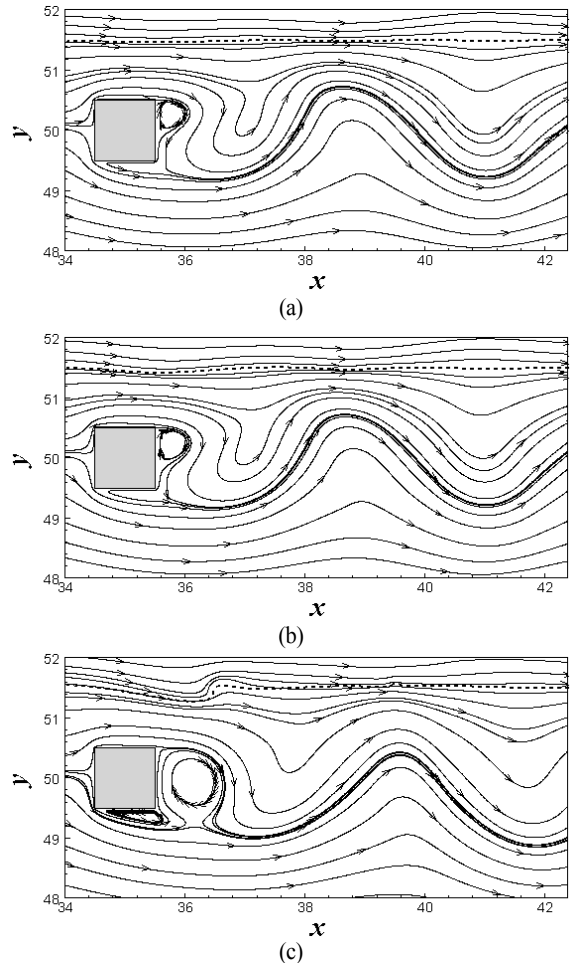


Fig. 7 Instantaneous streamlines and free surface at (a)  $Fr = 0.25$ , (b)  $Fr = 0.35$ , (c)  $Fr = 0.5$ ,  $Re = 150$

유동이었던,  $Fr$ 가 점차 커지면서 그에 대한 영향력이 감소하기 때문에 판단된다. Fig. 7(a)에서는 자유수면의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 7(b)에서는 실린더 위쪽으로 약간의 요동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)에서는 자유수면의 변화가 더욱 심하게 발생하면서 자유수면이 말려 올라가는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 8(a),(b)는  $Fr$ 에 따른  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 과  $\overline{C_L}$ 를 나타낸다.  $Fr$ 가 증가함에 따라  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 는 단조 증가하는 경향을 보이지만,  $\overline{C_L}$ 은 감소하는 경향을 보인다. 자유수면의 급격한 변화가 실린더 주변 압력에 영향을 주기 때문에 판단된다.

Fig. 8(c)는  $Fr$ 에 따른  $St/St_0$ 를 나타내며, 앞선 두 결과와는 다르게  $Fr = 0.4$ 를 기준으로 증가하다가 감소하는 경향을 보인다.

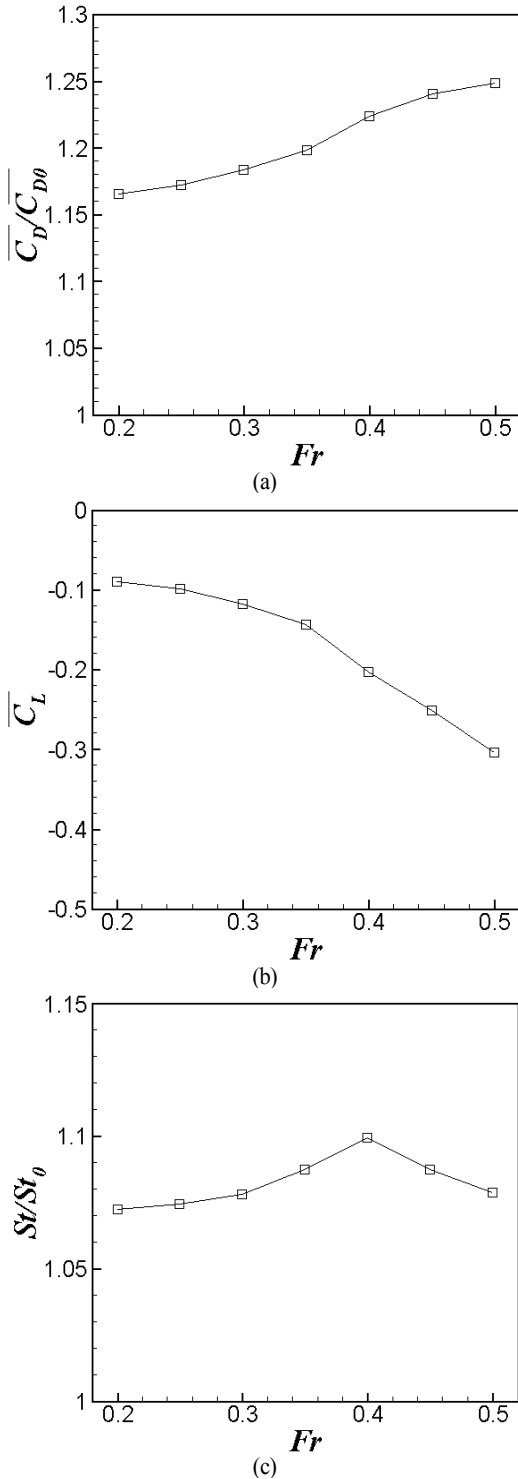


Fig. 8 (a) Normalized mean drag coefficient, (b) Mean lift coefficient, (c) Normalized mean strouhal number depending upon the Froude number,  $Re = 150$

### 5. 결 론

본 연구에서는 비교적 낮은  $Re$ 에서  $h/D$ 의 변화가  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$  및  $\overline{C_L}$ 와  $St/St_0$ 에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 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 확인할 수 있었다.  $\overline{C_L}$ 의 경우,  $h/D$ 가 커질수록 점차 증가하는 경향과 더불어, 자유수면이 고려되지 않았을 때의 결과에 가까워지는 것 또한 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 해양구조물 설계 시에는 구조물의 안정성을 위하여 유체력을 고려해야함을 확인하였다.

또한 임의의 시간대에서 유동장을 살펴보면  $h/D$ 가 0.4보다 작은 경우에는 후류에서 자유수면 위, 아래에서 재순환영역이 발달함을 확인하였고,  $h/D$ 가 0.55와 1.5 사이에서는 실린더 상단부에 재부착점이 없으며  $h/D=2.5$  이후에는 실린더 상단부에 재부착점이 발생하면서, 자유수면이 고려되지 않았을 때의 유동특성에 근접함을 확인하였다. 유동 토폴로지 변화를 통하여, 구조물 설치 시  $h/D$ 가 작으면 유동 내에 있는 부유물들이 재순환영역 내에서 계속해서 회전하면서 구조물의 파손을 일으킬 가능성이 있음을 확인하였다.

$h/D=1.0$ 에서  $Fr$ 에 따른  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ ,  $\overline{C_L}$ ,  $St/St_0$ 의 경향을 살펴보았으며,  $Fr$ 가 커짐에 따라 자유수면의 변화 정도가 더욱 심해지는 것을 확인할 수 있었다.  $Fr$ 이 증가함에 따라  $\overline{C_D}/\overline{C_{D0}}$ 은 단순 증가하고  $\overline{C_L}$ 은 단순 감소하지만,  $St/St_0$ 는  $Fr = 0.4$ 에서 최대치를 보였다.

### 후 기

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

### References

[1] 1982, Okajima, A., "Strouhal numbers of rectangular cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol.123, pp.379-398.  
 [2] 1999, Sohankar, A., Norberg, C. and Davidson, L., "Simulation of three-dimensional flow around a square cylinder at moderate Reynolds numbers," *Phys. Fluids*, Vol.11, pp.288-306.

- [3] 2004, Sharma, A. and Eswaran, V., "Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime," *Numerical Heat Transfer Part A*, Vol.45, pp.247-269.
- [4] 1989, Williamson, C.H.K., "Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol.206, pp.579-627.
- [5] 1998, Park, J., Kwon, K. and Choi, H., "Numerical simulations of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160," *KSME International Journal*, Vol.12, pp.1200-1205.
- [6] 2001, Norberg, C., "Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift," *J. Fluids. Struct.*, Vol.15, pp.459-469.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 2002, Reichl, P.J., "Flow past a cylinder close to free surface," *Ph.D. Thesis*, Monash University.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 1998, Gottlieb, S. and Shu, C.W., "Total variation diminishing runge-kutta schemes," *Math. comput.*, Vol.67, No.221, pp.74-85.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.