

자유수면과 움직이는 벽면 사이에 놓인 원형 실린더 주위의 층류 유동구조

서장훈¹·정재환²·윤현식^{3,†}·박동우⁴·전호환²
삼성중공업 조선해양연구소¹
부산대학교 조선해양공학과²
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터³
현대중공업 선박해양연구소⁴

Laminar Flow Structures Near a Circular Cylinder in between a Free-Surface and a Moving Wall

Jang-Hoon Seo¹·Jae-Hwan Jung²·Hyun-Sik Yoon^{3,†}·Dong-Woo Park⁴·Ho-Hwan Chun²
Samsung Heavy Industry Co. Ltd.¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan University²
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan University³
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.⁴

Abstract

The present study numerically investigates the interaction between a free-surface and flow around a circular cylinder over a moving wall. In order to simulate the flow past the circular cylinder over a moving wall near a free-surface, this study has adopted the direct-forcing/fictitious domain (DF/FD) method with the level set method in the Cartesian coordinates. Numerical simulation is performed for a Reynolds numbers of 100 in the range of $0.25 \leq g/D \leq 2.00$ and $0.5 \leq h/D \leq 2.00$, where g/D and h/D are the gaps between the cylinder and a moving wall and the cylinder and a free-surface normalized by cylinder diameter D , respectively. According to g/D and h/D , the vortex structures have been classified into three patterns of the two-row, one-row, steady elongation. In general, both of g/D and h/D have the large values which mean the cylinder is far away from the wall and the free-surface, two-row vortex structure forms in the wake. When g/D decreases, the two-row vortex structure gradually transfers into the one-row vortex structure. When the g/D reveals the critical value below which the flow becomes steady state, resulting in the steady elongation vortex.

Keywords : Free surface(자유수면), Circular cylinder(원형 실린더), Moving wall(움직이는 벽면), Direct-forcing/fictitious domain (DF/FD)

1. 서론

원형 실린더의 후류에 와(Vortex)의 발달과 이러한 와의 흘림(vortex shedding) 현상에 의한 항력과 양력의 변화는 진동, 소음 및 혼합의 발달을 야기시키고, 구조물의 강도상에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 와의 발달과 흘림 현상에 대해 유체역학 분야에서 학문 및 공학적으로 중요한 문제중 하나로 대두되어 왔다(Ahmed, 1996; Braza, et al., 1986, Mittal & Balachandar, 1994; Yoon, et al., 2004).

특히, 실린더 하단의 정지 또는 움직이는 벽이 실린더 주위의 유동에 미치는 영향에 대한 연구는 해상 및 지상 구조물과 관련해서 중요한 분야로 인식되어 왔다.

움직이는 벽 위의 실린더 주위의 유동에 대한 연구는 정지된

벽 위의 실린더 주위에 유동의 연구와는 다르게, 실린더 하부에 위치한 벽이 자유 유동 (free-stream) 속도 와 같은 속도로 움직인다. 따라서 벽 위의 원형 실린더 주위의 유동장을 수치해석 시에 유입류에 의한 바닥에서 경계층은 고려되어지지 않으며, 이러한 조건하에 실린더와 벽과의 간격(g/D)의 변화에 따른 유동의 정량적인 값인 항력과 양력 계수, Strouhal 수, 벽 와도 등에 관해서 연구가 이루어진 바 있다(Yoon, et al., 2007).

또한 이상유체(two-phase fluids)의 해석은 최근 유체역학 분야에서 중요한 연구 분야로 자리잡고 있다. 서로간의 상이 다른 다상유체 (multi-phase fluids)의 경우 각각이 지니고 있는 물성치의 차이에 의해서 자유수면(free-surface)이 주어지게 되고, 이러한 자유수면에 의해서 물성치가 다른 유체간의 상경계를 구분짓게 된다. 자유수면은 유체의 운동이나 외력에 의해서 변형을

일으키게 되는데, 이러한 자유수면의 변형에 의해서 물체 및 저장고의 충격하중의 발생 및 슬로싱(sloshing)현상을 발생시키게 된다. 또한 자유수면 근처에 있는 물체가 이동하는 경우, 물체 후류에 발생하는 파(wave)의 발생으로 인해, 물체가 가지고 있는 항력 및 양력의 변화에 영향을 미치게 된다. 자유수면 근처의 원형 실린더 주위의 유동에 대한 해석으로서, 자유수면의 변화, 실린더 후류에 발생하는 와의 변화 및 원형 실린더에 발생하는 항력과 양력 및 스트롤 수에 대한 연구가 이루어져 왔다(Yu & Tryggvason, 1990; Rood, 1995; Lundgren & Koumoutsakos, 1999; Miyata, et al., 1990). 또한 자유수면의 높이(h/D, 여기서 h는 실린더 상부에서 자유수면 높이까지의 거리 및 D는 실린더 직경)의 변화와 함께, 인위적으로 프루드 수(Fn)을 변화시켰을 때, 자유수면의 변화 및 와 구조(Vortex structure)의 변화에 대한 연구가 진행되어 왔다(Reichl, et al., 2005).

본 연구에서는 앞서 설명한 실린더 하부에 자유유동 속도와 같은 속도로 움직이는 벽과 실린더 상부에 이상유체로 인한 자유수면이 있을 때, 자유수면 및 벽면에 의하여 실린더 주위의 유동에 미치는 영향을 해석한다. 특히 자유수면의 위치(h/D)를 변화시킴과 동시에 실린더 하부의 움직이는 벽면과의 거리(g/D)를 함께 변화에 따른 자유수면과 움직이는 벽면과의 거리를 변화시킴으로써 실린더 후류에 작용하는 와 구조의 변화, 흘림 현상에 관해서 상세한 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서 고려한 비압축성(incompressible), 점성(viscous) 유동을 지배하는 방정식들은 아래의 식(1)과 식(2)에서 각각 정의된 연속방정식과 운동량방정식이다.

$$\frac{u_i}{x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(u_i u_j) \\ & = -\frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu(\phi)}{Re} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 u_i 는 속도(velocity), x_i 는 좌표계(coordinate), p 는 압력(pressure), t 는 시간(time), ρ 는 밀도(density), μ 는 동점성계수(dynamic viscosity), f_i 는 가상경계 및 입자 내부에서 작용하는 체적력(volume force)을 나타낸다. 그리고 각 변수들은 특성길이(L , characteristic length), 특성 속도($U_0 (= \sqrt{gL})$, characteristic velocity)와 특성 시간($t_0 (= \sqrt{L/g})$, characteristic

time)을 이용하여 아래 식(3)과 같이 무차원화 되었다.

$$x_i = \frac{x_i^*}{L}, \quad u_i = \frac{u_i^*}{U_0}, \quad p = \frac{p^*}{\rho_i U_0^2}, \quad t = \frac{t^*}{t_0} \tag{3}$$

식(2)의 무차원 변수 Re와 Fn은 각각 Reynolds 수와 Froude 수를 의미한다.

$$Re = \frac{\rho_l U_0 L}{\mu_l}, \quad Fn = \frac{U_0}{\sqrt{gL}} \tag{4}$$

이상유체(two-phase fluids)의 밀도와 점성계수는 각각 액체의 밀도(ρ_l)와 점성계수(μ_l)로 무차원화 되었다.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_l}, \quad \mu = \frac{\mu^*}{\mu_l} \tag{5}$$

기초방정식은 유한체적법(finite volume method)을 기반으로 한 비 엇갈림 격자계(non-staggered grid)를 사용하였다. 속도와 압력은 동일 지점인 격자의 셀 중심(cell center)에서 계산되었다(Zang, et al., 1994). 대류항과 외력항 등은 2차 정도의 Adams-Bashforth Scheme을, 확산항 등은 Crank-Nicolson Scheme을 사용하여 이산화하였다. 시간 진행은 Kim and Moin (1985)이 제안한 Fractional-step method를 이용하였다.

2.2 Direct-Forcing/Fictitious Domain(DF/FD)방법

본 연구에서는 Glowinski, et al. (2001)이 제시한 가상영역법(fictitious domain method)에 direct forcing 가상 경계 법과 결합하여 더욱 발전시킨 Uhlmann (2005)이 제시한 방법을 사용하였다. Uhlmann은 가상경계점에서의 forcing 값을 구하기 위하여, 가상영역법을 도입하였으며, 가상 경계점에서의 forcing 값을 각 오일러안(Eulerian) 격자 점으로 변환시키기 위하여 direct forcing 가상 경계 법을 사용하였다. 초기 조건에 의해 채널의 벽과 실린더의 충돌은 없다고 가정하였고 실린더가 바닥과 닿기 직전까지의 운동에만 관심을 두었다. 식 (2)에서 계산 영역에서 작용하는 체적력은 유체와 가상경계 사이의 상호작용을 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f(x) = \int_{\Omega_f} F_k \times \delta(x - X_k) dX_k \tag{6}$$

여기서 X_k 는 가상경계 위의 라그랑지안 포인트(Lagrangian point), x 는 계산영역인 오일러안 그리드(Eulerian grid)이다. $F_k(X_k)$ 는 라그랑지안 포인트에 작용하는 힘이며 $\delta(x - X_k)$ 는 Dirac delta function으로 본 연구에서는 Roma, et al. (1999)에 의해 제안된 방법을 사용하였다.

$$\delta_h(x-x_0) = \frac{1}{h} \phi\left(\frac{x-x_0}{h}\right) \quad (7)$$

$$\phi(r) = \begin{cases} \frac{1}{6}(5-3|r| - \sqrt{-3(1-|r|)^2+1}), & 0.5 \leq |r| \leq 1.5 \\ \frac{1}{3}(1 + \sqrt{-3|r|^2+1}), & |r| \leq 0.5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

2.3 레벨셋(Level set)방법

레벨셋 방법에서는 이상유체의 경계면(interface)을 계산하기 위하여, 부호(sign)를 가지는 거리함수(distance function)인 $\phi(x, t)$ 를 이용한다. 이 함수는 상 경계면에서는 0(zero)의 값을 그 경계면을 기준으로 액체측은 양(positive)의 거리 값을 그리고 기체측은 음(negative)의 거리 값을 갖게 된다.

일반적으로 기체-액체의 상 경계면(phase interface) 근처에서는 밀도와 점도 등의 유체 물성치 변화가 급격하게 일어난다. 이로 인한 수치적 불안정성을 막기 위해서 상경계면의 두께(2ϵ) 구간 내에서 Heaviside 함수($H(\phi)$)를 이용하여 경계면 근처에서는 식(8)과 같이 밀도와 점도 변화를 부드럽게 하였다(Sussman, et al., 1994).

$$\rho(x, t) = \rho_l + (\rho_g - \rho_l)H(\phi(x, t)) \quad (8)$$

$$\mu(x, t) = \mu_l + (\mu_g - \mu_l)H(\phi(x, t))$$

상경계면의 결정, 즉 ϕ 값은 아래의 Hamilton-Jacobi형태의 방정식(9)에 의해 결정된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

위의 식 (8)의 계산으로 얻어지는 해는 부호를 갖는 거리함수 이나, 상경계면으로부터 먼 곳에서는 계산된 거리 값의 정확도가 다소 낮아지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 재초기화(re-initialization)과정이 필요하다.

본 연구에서는 Sussman, et al. (1998)에 의해 제안된 재초기화 방법을 사용하였다.

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + s(d_0)(|\nabla d| - 1) = \lambda \delta(\phi) |\nabla \phi_0| \quad (10)$$

$$s(d_0) = \frac{d_0}{\sqrt{d_0^2 + (|\nabla d_0| \epsilon)^2}} \quad (11)$$

여기서, τ 는 가상 시간, ϕ_0 는 재초기화를 위한 초기값, λ 는 질량손실을 보정하기 위해 사용되는 계수이다. 식 (9)는 공간적으로는 3차 정확도의 ENO(essentially non-oscillatory)법을 사용하였고, 시간에 대해서는 3차 정확도의 TVD Runge-Kutta scheme

을 적용하였다. (Yue, et al., 2003; Sussman, et al., 1998; Shu & Osher, 1989) 그리고 상경계면 근처에서만 국부적으로 레벨셋 방법을 적용하여 계산의 효율성을 높였다.

2.4 계산조건 및 경계조건

계산영역은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 실린더 상류인 유체가 들어오는 영역부터 후류 부분까지의 거리는 $-15D \leq x \leq 25D$ 이며, 실린더 하부의 움직이는 벽으로부터 자유수면 위의 무한원 방까지의 거리는 $0 \leq y \leq 16D$ 이다. 유입부의 무차원화된 속도는 x 방향 속도인 $U_0 = 1$ 이며, 유출부의 경계조건으로 대류 경계조건을 사용하였다. 여기서 대류속도는 출구평균속도를 적용하였다. $y = 16D$ 인 무한 원방에서는 유체가 자연스럽게 나갈 수 있는 대칭 조건을 사용하였으며, 실린더 표면에서는 점착조건을 적용하였다.

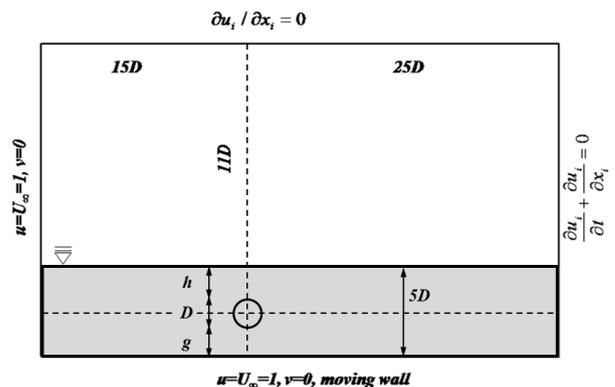


Fig. 1 Computational domain and coordinate system along with boundary conditions

본 연구에서는 움직이는 벽면과 원형 실린더의 거리를 나타내는 g/D 의 값으로 0.10, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0를 고려하였으며, 초기 자유 수면과 실린더와의 거리 h/D 는 0.5, 1.0, 2.0의 세 가지 값을 고려하였다.

격자는 $g/D, h/D$ 가 변화하는 구간내인 움직이는 벽면에서부터 y 방향으로 $5D$ 거리까지는 정규분포 격자를 주었으며, 이 구간에서의 최소격자거리는 0.016이다.

3. 수치해석 방법의 검증

먼저, 본 연구에서 도입된 수치해석 방법들로 가상경계법(DF/FD)과 레벨셋법들 각각에 대한 검증으로 고립된 원형실린더 주위에 대한 유동과 댐붕괴 문제를 고려하였다. 먼저, 본 연구에서 도입된 수치해석 방법들인 가상경계법(DF/FD)과 레벨셋법에 대해 개별적으로 먼저 검증을 수행한 후, 두 방법이 동시에 적용되는 문제에 대해 최종적으로 검증을 수행한다.

3.1 고립된 원형실린더 주위의 유동해석

가상경계법(DF/FD)에 대한 검증을 위해 벽이 존재하지 않는

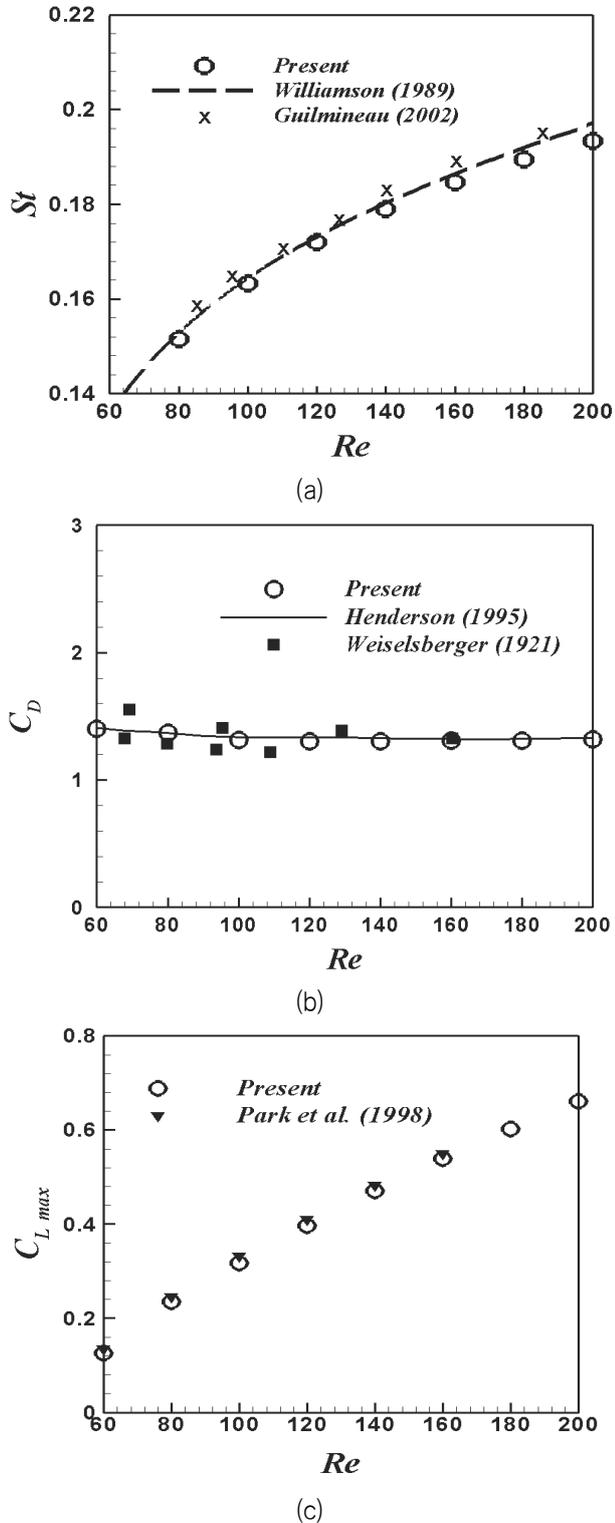


Fig. 2 Comparisons of the present study and references for the cases of an unbounded circular cylinder. (a) strouhal number, (b) drag coefficient, (c) RMS of lift coefficient

고립된 실린더 주위의 유동장의 계산 값들을 선행 연구들과 비교 하였다. Strouhal 수 (St), $\overline{C_D}$ (평균 항력 계수) 및 $C_{L,r.m.s}$ (양력계수의 RMS(Root Mean Square) 값) 들은 기존의 수치 및 실험 결과 값들과 잘 일치함을 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

3.2 자유수면의 붕괴

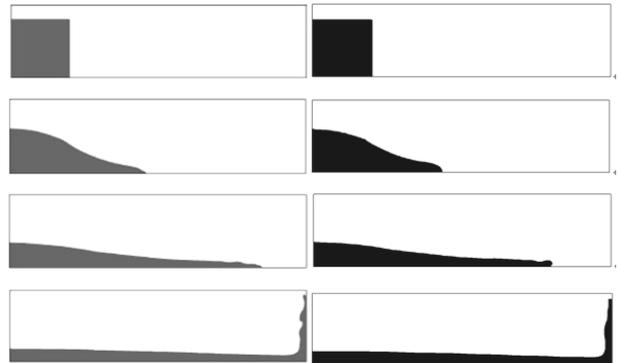


Fig. 3 Instantaneous free-surface position of broken dam; Yue, et al.(2003) (left column) and present result(right column)

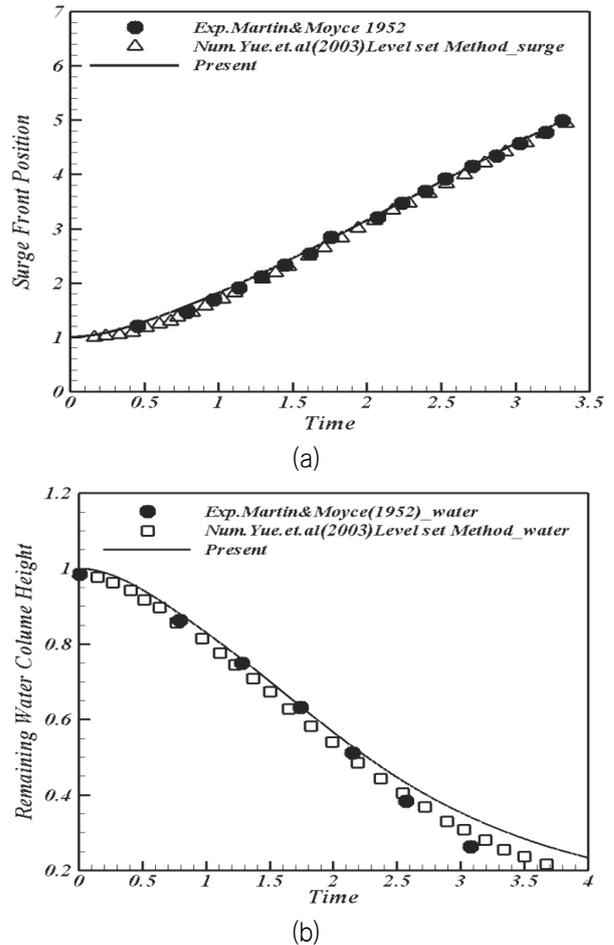


Fig. 4 Surge front positions and water column height of free-surface position of broken dam

이상유체의 계산을 위해 적용되는 레벨셋기법의 연계를 확인하기 위해 댐 붕괴에 대한 선행 연구들과 비교하였다. 각 시간별 유체가 이동한 형상은 Fig. 3과 같으며 유체의 왼쪽 벽에서의 위치 및 아래쪽 바닥에서 오른쪽 벽으로 갈 때의 위치에 대한 비교는 Fig. 4와 같다. 보인 바와 같이 선행연구와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3.3 DF/FD방법과 레벨셋 기법을 연계한 수치해석 기법의 검증

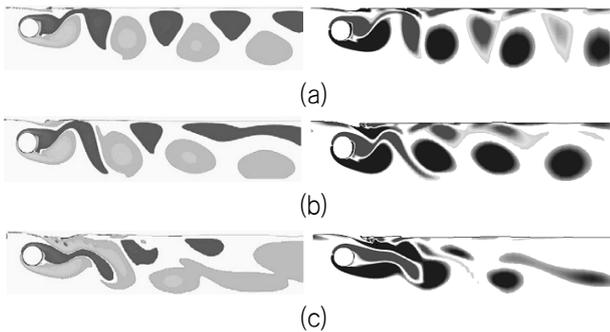


Fig. 5. Vortex sheets for a gap ratio of $h/D=0.55$ for froude numbers of (a) $Fr=0.3$ (b) 0.4 and (c) 0.6 ; Reichel, et al. (left column) and present (right column)

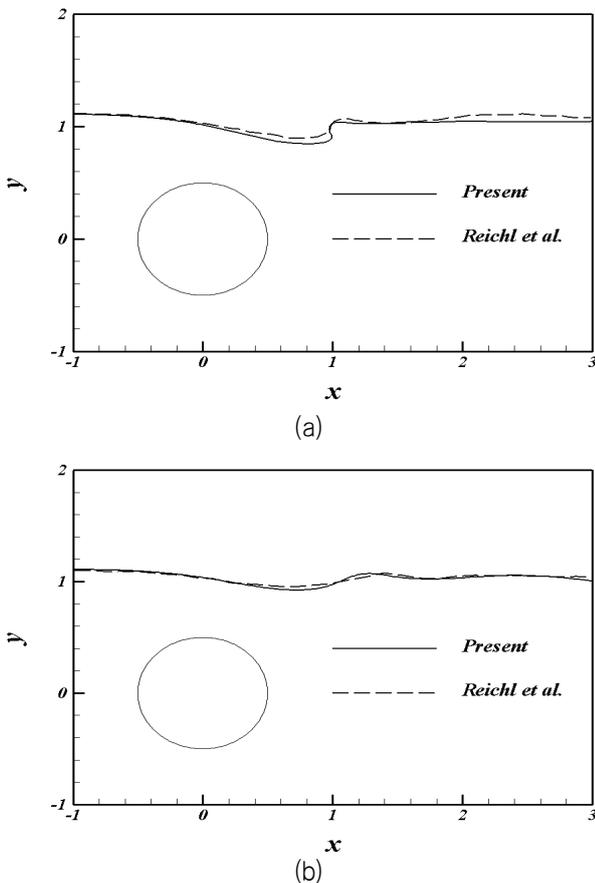


Fig. 6 Surface profiles at (a) the maximum lift and (b) the minimum lift for $Fr=0.4$

본 연구에서는 자유 수면과 움직이는 바닥 사이에 놓인 실린더의 후류 유동을 해석하기 위하여 DF/FD방법과 레벨셋방법을 동시에 도입하여 수치연산을 수행한다. 따라서, 본 연구에서 도입한 두가지 수치해석방법들이 동시에 적용되는 문제이며, 또한 본 연구에서 다루는 현상과 유사성이 있는 문제로서 Reichl, et al. (2005)의 선행연구를 검증 문제로 고려한다.

Reichl, et al. (2005)은 자유수면 아래에 놓인 원형 실린더 주위의 유동에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 실린더의 직경(D)로 무차원화되어진 실린더와 자유수면간의 거리인 h/D 및 Fr 에 따른 실린더 후류와 자유수면의 변화를 고찰하였다.

본 연구에서는 Reichl, et al. (2005)이 고려한 케이스들 중에서 대표적으로 $h/D=0.55$ 에서 $Fr=0.3, 0.4$ 와 0.6 에 대해 비교 및 검증을 수행한 결과, Fr 에 따른 순간 와도 등고선과 $Fr=0.4$ 에서의 자유수면 형상이 선행연구와 잘 일치하는 것을 Fig. 5와 6을 통해 확인할 수 있다.

4. 해석결과

4.1 $h/D=2$

먼저, 본 연구에서 고려한 자유수면과 실린더 간의 거리들 중 가장 큰 $h/D=2$ 일 때, 움직이는 벽면과 실린더 간격(g/D)이 실린더 후류에 미치는 영향을 고찰하기 위해서, Fig. 7에서는 $h/D=2$ 일 때 서로 다른 g/D 들에서의 순간 와도 등고선들을 보여주고 있다. 여기서, 실선과 점선은 양과 음의 와도를 각각 나타낸다.

$g/D=2$ 인 경우, 즉 실린더가 움직이는 벽면에서 가장 멀리 위치한 경우, 고립된 실린더 경우와 같이 실린더 상하벽면에서의 유동박리(flow separation)로 인해 떨어져나간 와의 주기적인 흐름에 의해서 실린더 상부와 하부에서는 음과 양의 와도가 시간에 따라서 주기적으로 형성되어진다. 이로 인해 전반적으로 후류는 중심선에 대해 대칭인 이열 와 구조(two-row street of vortices)를 보이는 것을 Fig. 7(a)을 통해 확인할 수가 있다. 실린더에 의해서 발생한 와들의 영향으로 인해 자유수면 아래면에서는 실린더 상부에서 발생한 음의 와도와 반대 부호인 양의 부호를 가지는 와도가 생성되는 반면, 움직이는 벽면 위에서는 실린더 하부의 양의 와도와는 반대 부호인 음의 와도들이 후류에 생성되어진다. 하지만, 이러한 자유수면과 움직이는 벽면위에서의 전단층들은 매우 약해 실린더 후류의 이열 와 구조에 큰 영향을 미치지 않는다.

실린더와 움직이는 바닥면과의 거리인 g/D 가 줄어들수록, 실린더 아래에서 발생하는 양의 와는 움직이는 바닥면에서 발생하는 음의 와와 강한 상호작용을 일으킨다. 따라서, 실린더 하부에서 발생한 양의 와는 후류로 가면서 바닥면에서 발생한 반대방향의 와와 접하는 동안 길게 늘어나고, 또한 벽면에 의한 수직방향 운동의 제약에 의해서 말림(roll-up)이 지연되며 궁극적으로 자연소산되어진다.

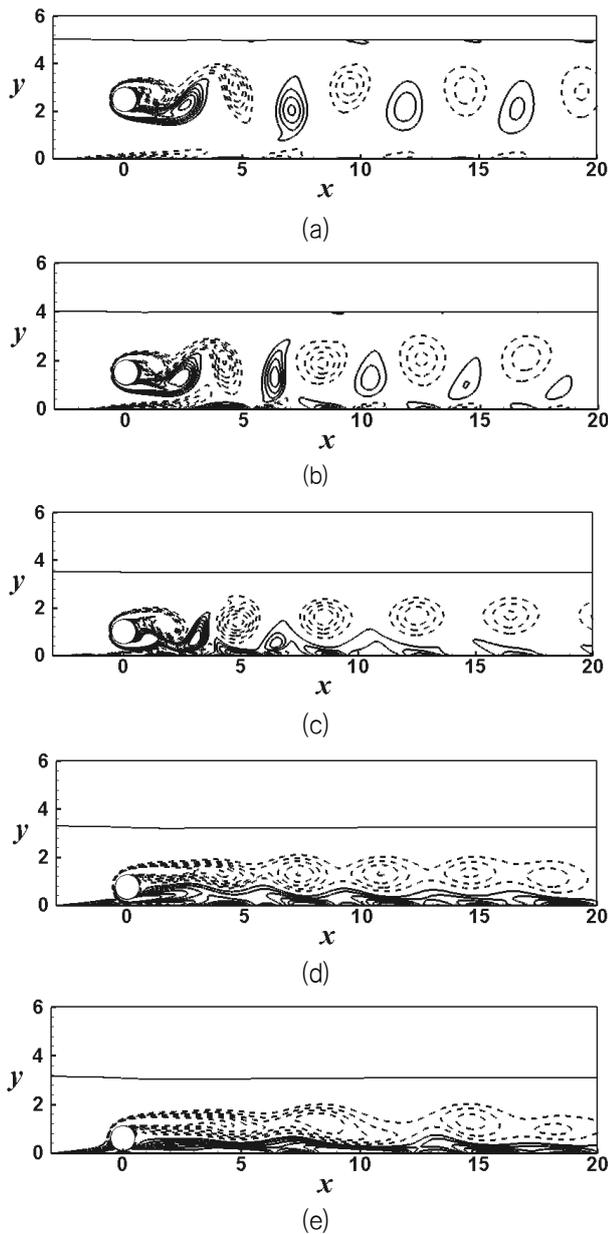


Fig. 7. Contours of the instantaneous vorticity at $h/D=2$ for different g/D s: (a) $g/D=2$, (b) $g/D=1$, (c) $g/D=0.5$, (d) $g/D=0.25$ and (e) $g/D=0.1$

자유수면의 영향이 상대적으로 적은 $h/D=2$ 에서, $g/D=0.5$ 일 때, 실린더와 근접한 후류에서는 일열 와 구조를 가지나 일정 후류지역 이후에서는 일열 와 구조로의 천이상태를 겪게 되며, $g/D=0.25$ 가 되면, 후류에서 와의 흠뻐는 더 이상 일어나지 않고 후류는 일열 와 구조로 되는 것을 Fig. 7(c)와 (d)에서 확인할 수가 있다.

가장 작은 간격인 $g/D=0.1$ 의 경우, 유동은 실린더 중심에 대해서 비대칭적인 와의 형상을 유지하는 매우 약한 비정상상태가 된다. 이때, Fig. 7(e)에서 보이는 바와 같이, 실린더 후류 영역에서 실린더 하부의 와의 길이는 실린더 상부의 와의 길이보다 짧아진다. 이는, 실린더와 움직이는 벽 사이의 유동(gap flow)은 점성

영역의 증가에 의해 실린더 상부의 유동보다 약해지기 때문이다.

$h/D=2$ 일 때, 자유수면은 g/D 가 변화하더라도 변형이 없이 거의 초기 형상을 유지하는 것을 앞선 Fig. 7에서 확인한 바가 있다. 따라서 실린더 후류 유동구조는 h/D 에는 거의 영향이 없으며 g/D 의 변화에 의존하는 것으로 판단되어진다. 이는 단상유동에서 실린더 후류에 미치는 실린더와 움직이는 벽면간의 거리의 영향을 연구한 Lee, et al. (2007)과 Yoon, et al. (2010)의 결과로부터 자유수면이 존재하지 않더라도 실린더가 움직이는 벽면에 가까워지면 본 연구에서 보이는 결과와 유사한 결과를 보인다.

4.2 $h/D=1$

Fig. 8은 $h/D=1$ 일 때 서로 다른 g/D 들에서의 순간 와도 등고

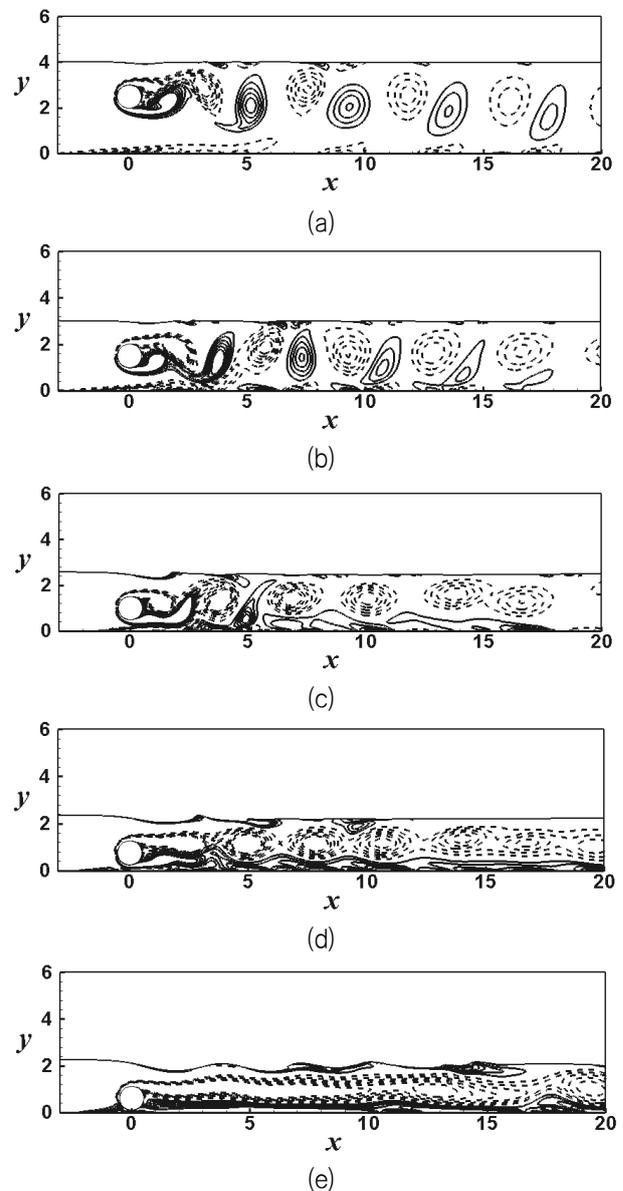


Fig. 8 Contours of the instantaneous vorticity at $h/D=1$ for different g/D s: (a) $g/D=2$, (b) $g/D=1$, (c) $g/D=0.5$, (d) $g/D=0.25$ and (e) $g/D=0.1$

선들을 보여준다. $h/D=2$ 일 때, 자유수면은 g/D 가 변화더라도 변형이 없이 거의 초기 형상을 유지하는 것을 앞선 Fig. 7에서 확인한 바가 있다.

$g/D=2$ 일 때, 후류에서는 전반적으로 $h/D=2$ 에서 $g/D=2$ 일 때와 거의 유사한 주기적인 와의 흘림에 의한 음과 양의 와도가 중심선에 대해 대칭인 이열 와 구조를 보이는 것을 Fig. 8(a)를 통해 확인할 수가 있다. 실린더가 자유수면과 가까워짐에 따라 실린더에서 떨어져나간 양음의 와도들에 의해 자유수면에서 반대부호의 와도들이 $h/D=2$ 에서 보다 실린더 가까이에서 일찍 발생한다.

또한, $h/D=1$ 에서 $g/D=2$ 일 때의 후류는, $h/D=2$ 에서 $g/D=2$ 인 경우에 비해, 자유수면의 변형은 미세하게 일어나게 되고, 자유수면으로 와도의 확산으로 인해 이열 와 구조의 중심은 아래로 약간 기울어진다.

$g/D=1$ 일 때, 먼 후류로 갈수록 실린더 하부의 양의 와도는 움직이는 바닥면의 음의 와도와 상호작용에 의해 소산되어가지만, 실린더 후류구조는 대체적으로 이열 와 구조를 보이는 것을 Fig. 8(b)로부터 관찰할 수가 있다.

$g/D=0.5$ 인 경우, 국부적으로 자유수면의 변형이 대략 실린더 중심에서 실린더 직경만큼 떨어진 후류에서 발생하는 것으로 확인할 수가 있다. $h/D=2$ 에서 $g/D=0.5$ 일 때와 같이(Fig. 7(c)), 실린더와 근접한 후류에서는 이열 와 구조를 가지지만, 일정 후류 지역 이후에서는 일열 와 구조를 형성하는 천이상태를 보이는 것을 Fig. 8(c)에서 확인할 수가 있다.

g/D 가 감소할수록, 즉 실린더가 움직이는 벽면에 가까워질수록, 자유수면의 변형이 크게 일어나기 시작하는 초기 위치가 후류로 더욱 밀려나는 것을 Figs. 8(a-e)의 비교를 통해 검증할 수가 있다. 또한, g/D 가 감소할수록 자유수면의 변형이 증가하며 이로 인해 파가 후류쪽으로 대류되는 것을 본 연구에서 고려한 g/D 들 중에서 가장 작은 $g/D=0.1$ 에서 뚜렷이 관찰할 수가 있다.

g/D 에 따른 이러한 자유수면의 변형이 증가됨에 따라, 자유수면 바로 아래에 생성되며 실린더 상부에서 발생한 와도와 반대부호를 가진 와도는 확산이 자유수면으로부터 대류되어 나아가면서 후류의 와도와 상호작용을 통해 후류 와 구조의 변형을 가져온다. $h/D=1$ 에서는 앞서 살펴본 $h/D=2$ 의 경우들에 비해서, 실린더가 자유수면과 가까워짐에 의해 실린더 상부영역이 좁아짐에 따라 유동의 상하운동이 제한된다. 따라서, 같은 크기의 g/D 에서, $h/D=2$ 에 비해 $h/D=1$ 에서 와도가 후류방향으로 더욱 길게 늘어난다.

4.3 $h/D=0.5$

Fig. 9는 $h/D=0.5$ 일 때 서로 다른 g/D 들에서의 순간 와도 등고선들을 보여준다. $h/D=0.5$ 에서 $g/D=2$ 일 때, 앞선 논의한 $h/D=2$ 와 1일 때와 같은 g/D 에서 보다, 후류영역이 자유수면과 가까워지면서 상대적으로 낮은 압력이 형성되는 후류영역으로 유동이 빨려들어감으로 인해 실린더 상부의 자유수면도 아래쪽으로 기울어진다. 실린더 상부에서 떨어져 나간 음의 와도들과 자유수

면과의 상호작용으로 인해 자유수면 아래쪽에 반대부호의 와도들이 생성된다. 이렇게 생성되어진 양의 와도들은 자유수면의 아래쪽으로 확산하여 실린더에서 분계되어 나온 음의 와도의 강도를 감소시킨다. 따라서, 더 큰 h/D 에서 보다, 먼 후류로 갈수록 음의 와도가 더 빨리 감소되어지는 것으로 Fig. 9(a)를 통해 확인할 수가 있다. $g/D=1$ 인 경우는 $g/D=2$ 일 때보다 실린더 상부 위의 자유수면의 변형이 $g/D=2$ 일 때보다 더 큰 것을 제외하고는 전반적으로 $g/D=2$ 일 때와 유사한 후류 분포를 보이는 것을 Fig. 9(b)에서 관찰할 수가 있다. $g/D=2$ 과 $g/D=1$ 의 경우들에서는, 2열 와 구조가 후류로 갈수록 음의 와도가 양의 와도보다 일찍 소산되면서 1열 와 구조를 형성한다.

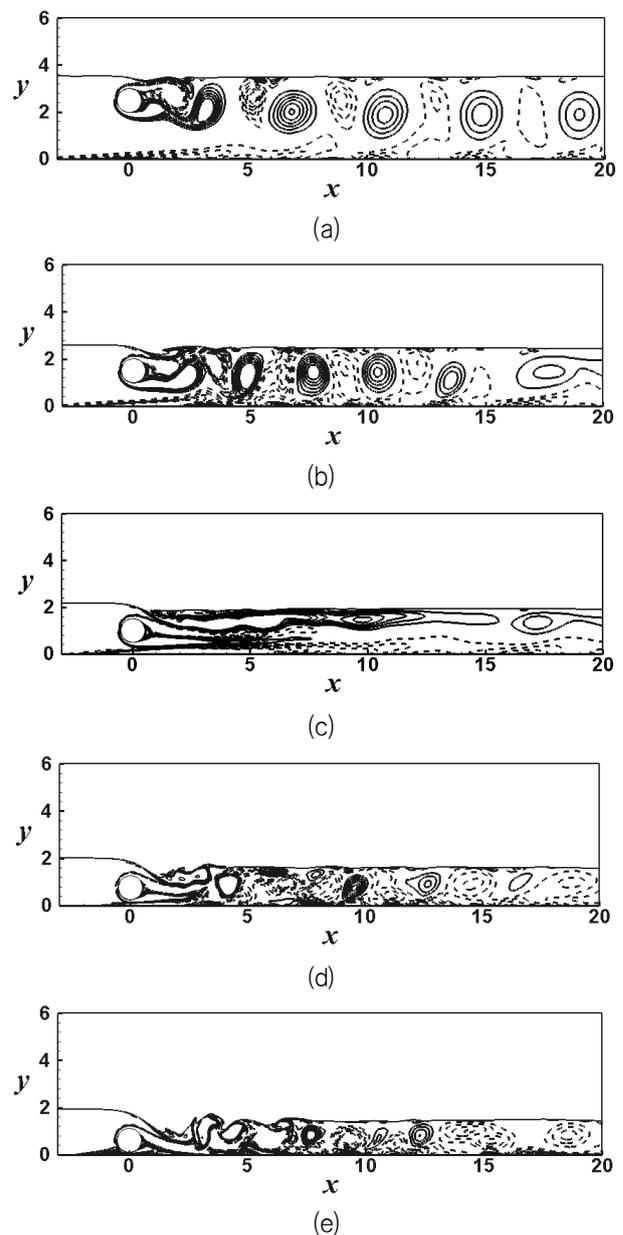


Fig. 9 Contours of the instantaneous vorticity at $h/D=0.5$ for different g/D s; (a) $g/D=2$, (b) $g/D=1$, (c) $g/D=0.5$, (d) $g/D=0.25$ and (e) $g/D=0.1$

g/D 가 더욱 작아지면 즉, 실린더 상부와 자유수면 및 실린더 하부와 움직이는 바닥면사이의 간격유동이 더욱 강해지면, 실린더 상부와 자유수면 사이에 강한 제트와 같은 간극 유동이 형성되어져서 국소적으로 자유수면을 실린더 후류쪽으로 강하게 흡입하여 자유수면이 갈라지는 현상이 발생한다. 또 g/D 가 줄어들수록, 실린더와 바닥면사이의 간격이 좁아짐에 의해, 이 좁아진 간격사이로 유량이 줄어들어 유체의 흐름에 저항이 증가하여 상류(Upstream)로 밀려나가고, 실린더의 상부로 유동이 형성된다. 따라서 실린더 상부와 자유수면과의 거리가 증가하게 되는 것을 Figs. 9 (c), (d) 그리고 (e) 통해 확인할 수 있다.

실린더 하부에도 벽면과의 간격이 줄어들어 와도가 발달할 수 있는 공간이 제한되어짐으로 단지 양의 와도가 후류쪽으로 길게 늘어나는 것을 확인할 수가 있다. 따라서, 실린더의 상부와 하부에서 발생하는 와들에 의한 와의 분계(vortex shedding)는 일어나지 않는다.

5. 결론

본 연구는 Multi-direct function을 도입한 가상경계법과 Level-set 함수를 이용한 자유수면 해석 기법을 이용하여 자유수면과 움직이는 바닥 위 실린더 유동장의 상호작용에 수치해석을 하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 바닥과의 거리를 나타내는 g/D 와 자유 수면과의 거리를 나타내는 h/D 가 가장 높은 경우에는 무한 원방에 고립된 실린더에서 발생하는 이열 와 구조를 가지게 된다.

(2) 움직이는 바닥과의 거리가 감소하면 실린더 하부에서 발생하는 양의 와 구조는 움직이는 벽에서 발생하는 음의 와 구조와 강한 상호작용에 의해 실린더 후류의 와 구조는 이열 와 구조로 변하게 된다.

(3) 자유수면의 변형과 붕괴는 자유 수면과 실린더 사이의 간격이 줄어들 때 발생한다. 실린더 상부에서 발생하는 음의 와도는 자유수면 근처의 유동을 후류로 이끌게 되고, 국부 전단층의 발생을 일으키게 되어 자유수면의 변형이 발생한다.

본 연구를 통해 자유수면 아래의 수중 운동체가 바닥과의 거리가 가까워져 천수(shallow water)영역에 도달함에 따라 자유 수면과 바닥과의 영향을 확인 하였으며 향후 3차원 해석을 통하여 연구결과의 산업 활용성을 높이고자 한다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0025618). 또한, 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0030662).

참 고 문 헌

- Ahmed, R.A., 1996. Steady-state Numerical Solution of the Navier-Stokes and Energy Equations around a Horizontal Cylinder at Moderate Reynolds Numbers from 100 to 500. *Heat Transfer Engineering*, 17(1), pp.31-80.
- Braza, M. Chassaing, P. & Minh, H.H., 1986. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder. *Journal of Fluids Mechanics*, 165, pp.79-130.
- Glowinski, R. Pan, T.W. Hesla, T.I. Joseph, D.D. & Périaux, J., 2001. A fictitious domain approach to the direct numerical simulation of incompressible viscous flow past moving rigid bodies: application to particulate flow. *Journal of Computational Physics*, 169, pp.363-426.
- Kim, J. & Moin, P., 1985. Application of a Fractional Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations. *Journal of Computational Physics*, 59(2), pp.308-323.
- Lee, J.B. Yoo, H.S & Chun, H.H., 2007. A Numerical Study on the Fluid Flow around a Circular Cylinder near a Moving Wall. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.119-129.
- Lundgren, T. & Koumoutsakos, P., 1999. On the generation of vorticity at a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 382(1), pp.351-366.
- Mittal, R. & Balachandar, S., 1994. Direct numerical simulation of flow past elliptic cylinders. *Journal of Computational Physics*, 124, pp.351-367.
- Miyata, H. Shikazono, N. & Kani, M., 1990. Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free-surface. *Ocean Engineering*, 17(1-2), pp.81-104.
- Reichl, P. Hourigan, K. & Thompson, M.C., 2005. Flow past a cylinder close to a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 533, pp.269-296.
- Roma, A.M. Peskin, C.S. & Berger, M.J., 1999. An adaptive version of the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*, 153(2), pp.509-534.
- Rood, E.P., 1995. Vorticity interactions with a free surface. *Fluid Vortices(ed. S. I. Green)*, 16, pp.687-730.
- Shu, C. & Osher, S., 1989. Efficient Implementation of essentially Non Oscillatory Shock Capturing Schemes II. *Journal of Computational Physics*, 83(1), pp.32-78.
- Sussman, M.S. Fatemi, E. Smereka, P. & Osher, S., 1994. A Level set approach for computing solutions to incompressible two phase flow. *Journal of Computational Physics*, 114(1), pp.146-159.

Sussman, M.S. Fatemi, E. Smereka, P. & Osher, S., 1998. An improved Level set method for incompressible two-phase flows. *Journal of Computers & Fluids*, 27(5-6), pp. 663-680.

Uhlmann, M., 2005. An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows. *Journal of Computational Physics*, 209(2), pp.448-476.

Yoon, H.S. Chun, H.H. Ha, M.Y. & Lee, H.G., 2004. A numerical study on the fluid flow and heat transfer around a circular cylinder in an aligned magnetic field. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 47(19-20), pp.4075-4085.

Yoon, H.S. Lee, J.B. & Chun, H.H., 2007. A numerical study on the fluid and heat transfer around a circular cylinder near a moving wall. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 50(17-18), pp.3507-3520.

Yoon, H.S. Seo, J.H. & Kim, J.H., 2010. Laminar forced convection heat transfer around two rotating side-by-side circular cylinder. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 53(21-22), pp.4525-4535.

Yu, D. & Tryggvason, G. 1990. The free surface signature of unsteady two dimensional vortex flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 218, pp.547-572.

Yue, W. Lin, C.L. & Patel, V.C., 2003. Numerical simulation of unsteady multidimensional free surface motions by Level set method. *International Journal of Numer Methods in Fluids*, 42(8), pp.853-884.

Zang, Y. Street, R.L. & Koseff, J.R., 1994. A Non-Staggered Grid, Fractional Step Method for Time-Dependent Incompressible Navier-Stokes Equations in Curvilinear Coordinates. *Journal of Computational Physics*, 114, pp. 18-33.

