

벽 근접 효과에 의한 물체의 항력 양력 변화

박 현 옥, 이 창 훈, 최 정 일*

연세대학교 계산과학공학과

EFFECT OF WALL PROXIMITY ON DRAG AND LIFT FORCES ON A CIRCULAR CYLINDER

Hyun Wook Park, Changhoon Lee and Jung-il Choi*

Dept. of Computational Science & Engineering, Yonsei Univ.

Near-wall effect on wakes behind particles is one of the important factors in precise tracking of particles in turbulent flows. However, most aerodynamic force models for particles did not fully consider the wall effect. In the present study, we focused on changes of hydrodynamic forces acting on a particle depending on wall proximity. To this end, we developed an immersed boundary method with multi-direct forcing incorporated to a fully implicit decoupling procedure for incompressible flows. We validate the present immersed boundary method through two-dimensional simulations of flow over a circular cylinder. Comprehensive parametric studies on the effect of the wall proximity on the drag and lift forces acting on an immersed circular cylinder in a channel flow are performed in order to investigate general flow patterns behind the circular cylinder for a wide range of Reynolds number ($0.01 \leq Re \leq 200$). As the cylinder is closer to the wall, the drag coefficient decreases while the lift coefficient increases with a local maximum. Maximum drag and lift coefficients for different wall proximities decrease with increment of Reynolds number. Normalized drag and lift coefficients by their maximum values show universal correlations between the coefficients and wall proximity in a low Reynolds number regime ($Re \leq 1$).

Key Words : 가상경계법 (Immersed Boundary Method), 벽 근접 효과(Wall proximity), 항력(Drag Force), 양력(Lift Force)

1. 서 론

채널 안의 난류 유동 내에서의 입자의 거동은 자동차 엔진의 실린더 내부의 발화 현상, 배기구의 배기 현상 등과 같이 많은 자연적, 기계공학적인 현상과 관련이 있다. 이러한 현상에 대한 해석을 위해 채널 내에서의 입자 유동에 관한 수치해석 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이때, 난류 내에서의 입자의 거동을 보기 위해 수십~수백만 개의 입자가 띄워지게 되는데, 이러한 배경 난류와 입자 주위의 국소 유동특성까지 해석하는 것은 불가능하며, 입자를 Lagrangian 점으로 표현하고 입자 공력계수를 기반으로 입자와 유동과의 상호작용을 고려한 수치해석 연구가 일반적이다[1].

일반적으로 난류 채널 유동 내 입자의 크기가 채널에 비해 상대적으로 작기 때문에 구형으로 가정되며, 입경에 근거한 Reynolds 수의 범위는 약 0.1~50 정도이다. 입자 공력계수는 균일유동 내의 구에 작용하는 공력의 엄밀해, 수치해석 및 실험 등에 의한 결과를 기반으로 결정할 수 있으며, 특히 Reynolds 수가 매우 낮은 Stokes 유동에서는 구에 작용하는 공력계수는 엄밀해에 의해 결정된다[2]. 최근에 사용되는 입자 모형은 Reynolds 수에 따른 항력 및 양력을 모두 반영하고 있다[3]. 그러나 입자모형에 사용되는 공력계수는 채널유동에서 벽의 영향을 적절히 반영하지 못하고 있으며 이로 인해 입자궤적 추적 및 배경난류의 영향 평가에 많은 오차가 예상된다. 본 논문에서는 벽 근처의 단일 입자 주위의 유동을 해석을 통하여 벽 근접효과로 인해 발생하는 유동 변화와 이에 따른 입자의 항력 및 양력 변화를 살펴보고자 한다. 단일 입자는 2차원 원형 실린더로 가정하였으며, 벽의 영향을 고려하기 위해 채널 내부의 원형 실린더 주위 유동을 해석하였다.

벽 근접효과에 따른 원형 실린더 주위 유동 해석에 대한 연구는 많은 연구자들을 통해 진행되고 있다. Taniguchi et al.

Received: August 1, 2012, Revised: August 30, 2012,

Accepted: September 3, 2012.

* Corresponding author, E-mail: jic@yonsei.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2012.17.3.068>

© KSCFE 2012

[4]은 벽 근접효과로 인해 원형실린더에 작용하는 항력이 벽이 없는 실린더에 작용하는 항력보다 감소된다는 것을 밝혀냈다. Lei et al.[5]은 벽 근접효과가 실린더를 벽으로부터 밀어내는 양력을 발생시킨다는 것과, 실린더 후류에 발생하는 비정상 와류의 주기에 영향을 주며 실린더가 벽에 특정거리 이하로 가까워 졌을 때 비정상 와류의 발생을 억제시킨다는 것을 보고하였다. Luigino et al.[6]은 이러한 비정상 와류의 발생 억제의 원인이 실린더 후류에 발생하는 와류와 벽에서 발생하는 와류의 상호작용에 의한 것이라는 것과, 벽 근접성에 따른 비정상 와류가 발생하지 않는 Reynolds 수가 다르다는 것을 제시했다. 본 논문에서는 이전에 연구되었던 현상들과 더불어, 벽 근접효과에 따라 원형실린더에 작용하는 공력계수의 변화에 초점을 맞추었다.

원형 실린더와 벽과의 거리를 변화시켜가면서 다수의 수치 계산을 위해서 가상경계법(immersed boundary method)을 기반으로 고정된 격자에서 실린더의 위치를 변화시켜가며 수치해석을 수행하였다. 가상경계법은 Navier-Stokes 방정식에 가진 항을 첨가하여 물체주위의 유동을 구현하는 방법으로써, 1972년 Peskin에 의해 처음 개발되었다[7]. 가상경계법은 물체의 형상이나 움직임에 관계없이 고정된 직교좌표계에서 물체 주위의 유동 구현이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 초기 Peskin[7]이 사용한 가상경계법은 물체의 탄성력을 통해 가진 항을 구하는 연속가진법(continuous forcing)이며, 심장 주위의 유동 계산에 사용되었다. 이후 이산(discrete)가진법 등 여러 종류의 가상경계법이 개발되었으며, 그 중 Uhlmann[8]은 차별화된 Navier-Stokes 방정식을 통해 가진 항을 구하는 직접가진(direct forcing) 방법을 제시하였다. 직접가진법은 구현이 매우 간단하며 수치 안정성(stability) 측면의 장점을 가지고 있지만, 낮은 Reynolds 수에서 엄밀한 점착조건을 구현하기에 적합하지 않다. 이를 보완하기 위해 Wang et al.[9]은 한 계산시간 간격 내에서 반복 계산을 통하여 점착조건을 만족시키는 가진 항을 구하게 되는 다중직접가진(multi-direct forcing) 기법을 개발하였다. 본 논문에서는 다중직접가진 기법이 적용된 비압축성 유동해석 기법을 통해 고정된 직교좌표계에서 벽과 원형 실린더와의 거리에 따른 유동해석을 수행하여 벽 근접성에 따른 원형 실린더의 공력계수의 변화를 조사하고자 한다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식

비압축성 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u + f \quad (1)$$

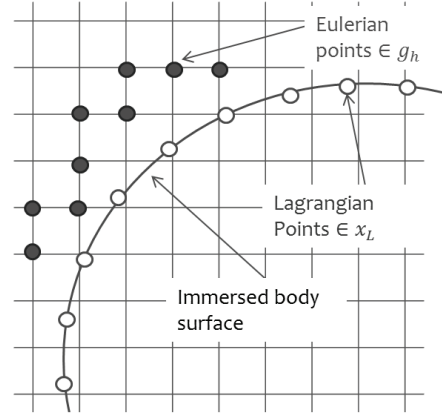


Fig. 1 Eulerian and Lagrangian points in the present immersed boundary method

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

여기서 u 는 유체 속도벡터, p 는 압력, f 는 모멘텀 가진항(momentum forcing)을 나타내며, Re 는 Reynolds 수이다.

Kim et al.[10]의 완전음해분리법(fully implicit decoupling procedure)을 이용하여, 지배방정식의 모든 항들은 Crank-Nicholson 기법을 이용하여 2차 정확도를 갖도록 시간적분되었으며, 공간적으로 중심차분법(centered difference scheme)을 사용하여 2차 정확도를 갖도록 차분되었다. 비선형 대류 항은 시간적으로 2차 정확도를 갖도록 선형화 되었다.

식 (1)과 (2)는 블록 LU 분해(Block LU decomposition)를 이용하여 다음과 같이 4단계로 진행되어 계산된다.

$$Au^* = r + mbc + f \quad (3)$$

$$\Delta t DG\delta p = Du^* - bc \quad (4)$$

$$u^{n+1} = u^* - \Delta t G\delta p \quad (5)$$

$$p^{n+1/2} = p^{n-1/2} + \delta p \quad (6)$$

여기서, 시스템행렬(system matrix, A), 잔여벡터(residual vector, r) 및 압력변화량(δp)은 다음과 같이 정의된다.

$$A = \frac{1}{\Delta t} \left\{ I + \Delta t \left(N - \frac{1}{2Re} L \right) \right\} \quad (7)$$

$$r = \frac{1}{\Delta t} u^n - Gp^{n-1/2} + \frac{1}{2Re} Lu^n \quad (8)$$

$$\delta p = p^{n+1/2} - p^{n-1/2} \quad (9)$$

또한 N, L, G, D 는 각각 차분된 대류항(convective), 점성항

(viscous), 구배 (gradient), 와 발산 (divergence) 연산자를 나타내며, u^* 는 u^{n+1} 와 u^n 사이의 중간속도 (intermediate velocity)이다. 또한 식 (3)과 (4)의 mbc 와 cbc 는 경계조건에 의해 발생하는 항 (residual term)을 나타낸다. 식 (4)의 Poisson 방정식을 계산하기 위해 BiCG-Stab 기법이 사용되었다.

2.2 가상경계법

고정된 직교좌표계에서 임의형상 물체 주위의 유동을 해석하기 위해 가상경계법이 사용되었다. Fig. 1과 같이, 고정된 직교좌표계 위의 점인 Eulerian 격자점과 물체표면 (immersed surface) 위의 점인 Lagrangian 격자점과 같이 두 종류의 격자점이 존재하며, 델타 (delta) 함수를 이용하여 두 격자점 간의 상호작용이 일어난다. 본 논문에 적용된 가상경계법은 Uhlmann의 논문에 제시된 직접가진 방법이다[8]. 식 (1)은 다음과 같이 차분될 수 있다.

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = rhs^{n+1/2} + f^{n+1/2} \quad (10)$$

여기서 $rhs^{n+1/2}$ 는 대류항, 점성항, 압력구배 (pressure gradient)항 들을 포함한다.

식(1)의 물체표면에 가해지는 가진항은 식 (10)을 이용하여 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$f^{n+1/2} = \frac{u^{(d)} - u^m}{\Delta t} \quad (11)$$

여기서 u^m 은

$$u^m = u^n + rhs^{n+1/2} \Delta t \quad (12)$$

이다. 이때 $u^{(d)}$ 는 물체 표면에서의 유체의 속도이며, 점착 조건으로 인해 $u^{(d)}$ 는 물체 표면의 속도와 일치한다. 식 (11)을 이용하여, Lagrangian 격자점에서 점착조건을 만족시키기 위해 필요한 가진항은 다음과 같이 구해진다.

$$F^{n+1/2} = \frac{U^{(d)} - U^m}{\Delta t} \quad (13)$$

여기서 $U^{(d)}$ 는 Lagrangian 격자점에서의 물체 표면에서의 유체의 속도 (desired velocity)를 나타낸다. 움직이지 않는 물체의 경우, $U^{(d)}$ 는 "0"이 된다. 그리고 U^m 은 Eulerian 격자점 위의 u^m 을 Lagrangian 격자점으로 이동시킨 값으로서

본 연구에서는 Lai and Peskin[11]이 제안한 델타 함수를 사용하여 U^m 을 다음과 같이 구하였다.

$$U^m(X_l) = \sum_{x \in g_h} u^m \delta_h(x - X_l) h^2 \quad (14)$$

여기서 δ_h 는 델타함수이며, Lagrangian 격자점과 Eulerian 격자점 사이의 내삽 (interpolation)이나 외삽 (extrapolation)에 사용된다. g_h 는 Eulerian 격자계를 나타내며, 격자들은 간격 h 로서 일정하게 분포되어 있다. Fig. 1에서 와 같이, 물체 표면의 Lagrangian 격자점은 X_l 로 정의되며, 총 개수는 N_l 이다. 식 (13)에서 구한 Lagrangian 격자점에서의 가진항을 이용하여 식 (1)의 모멘텀 방정식에 사용되는 Eulerian 격자점에서의 가진항을 델타 함수를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$f = \sum_{l=1}^{N_l} F(X_l) \delta(x - X_l) \Delta V_l \quad (15)$$

여기서 ΔV_l 은 Lagrangian 격자점에서 가진항이 가해지는 미소체적 (면적)을 나타내며, Eulerian 격자점에서의 미소체적 (면적)과 같은 값을 갖는다 ($\Delta V_l = h^2$)[8].

2.3 다중직접가진 (Multi-direct forcing)

직접가진 (direct forcing)을 이용한 물체 주위 유동 계산은 고정된 직교좌표계에서 해를 구할 수 있다는 장점이 있는 반면, 물체 표면 위의 점 (Lagrangian 격자점)과 직교좌표계 위의 점 (Eulerian 격자점)이 일치하지 않아서 델타 함수 등을 이용하여 두 격자점 간의 정보교환이 필수적이며, 이에 따른 수치오차에 의해 물체표면에서의 점착조건이 만족하지 않을 경우가 존재한다. 이를 보완하기 위해, 본 연구에서는 Wang et al. (2008)에 의해 제시된 다중직접가진 (multi-direct forcing; MDF) 기법이 사용되었다[9].

MDF의 진행 절차는 다음과 같다. 먼저, 식(3)과 직접가진에 의해 구해진 u^* 를 델타 함수를 이용하여 Lagrangian 격자점으로 이동시킨다.

$$U^*(X_l) = \sum_{x \in g_h} u^* \delta_h(x - X_l) h^2 \quad (16)$$

그 후 Lagrangian 격자점에서의 U^* 의 점착조건을 확인한다. 점착조건이 만족되면 식(4)로 넘어가게 되지만, 그렇지 않을 경우 Lagrangian 격자점에서의 직접 가진을 다시 구하게 된다.

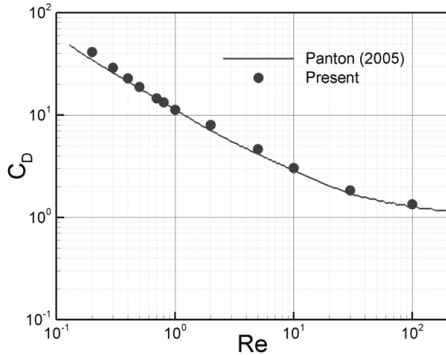


Fig. 2 Drag coefficient (C_D) depending on Reynolds number

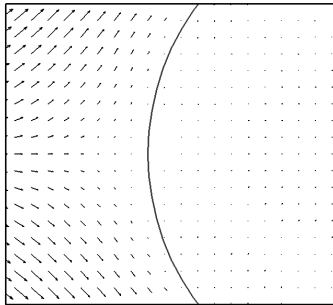


Fig. 3 Vector field around a circular cylinder, $Re=30$

$$F_k^{n+1/2} = \frac{U^{(d)} - U^*}{\Delta t} \quad (17)$$

여기서 k 는 MDF를 통해 가진이 수정된 회수를 나타낸다. Lagrangian 격자점에서의 가진을 다시 Eulerian 격자점으로 내삽/외삽을 하여 가진을 수정하게 된다.

$$f_k^{n+1/2} = f_{k-1}^{n+1/2} + \sum_{l=1}^{N_l} F_k^{n+1/2}(X_l) \delta(x - X_l) \Delta V_l \quad (18)$$

수정된 Eulerian 격자점에서의 가진을 식(3) 에 다시 적용하여 새로운 u^* 를 구하게 되며, 점착조건을 만족시킬 때까지 가진을 수정한다.

3. 결 과

3.1 2차원 균일 유동 내의 원형 실린더 주위 유동

본 연구에서 개발된 가상경계법이 적용된 비압축성 유동해

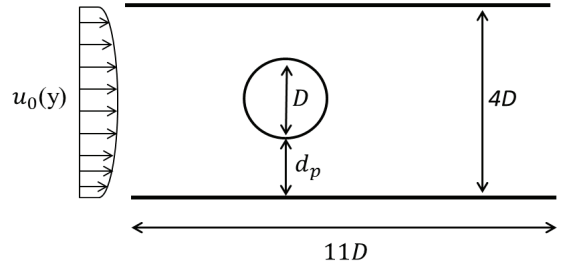


Fig. 4 Computational domain for simulation of flow past a circular cylinder near the wall

석 기법을 검증하기 위해, 2차원 균일 유동 내의 실린더 주위의 유동 계산을 수행하였다. 계산영역은 지름이 D 인 원형 실린더에 대해서 $66D \times 66D$ 로 설정하였으며, 격자는 160×160 비균일 직교 격자를 사용하였다. 입구 경계조건은 $u = 1, v = 0$ 으로 부여하였으며, 위, 아래 경계면에서는 원거리 (far-field) 경계조건으로서 $u = 1, \partial v / \partial y = 0$ 을 사용하였다. 출구에서는 $\partial u / \partial x = 0, \partial v / \partial x = 0$ 의 Neumann 경계조건이 주어졌다. Fig. 2는 Re 수에 따른 항력계수 (C_D)를 나타낸 것이다. 실제로 제시된 Panton[2]에서 제시된 항력계수의 결과에 대해, 본 연구에서 개발된 가상경계법에 의해 계산된 항력계수는 $0.1 \leq Re \leq 100$ 에서 매우 유사한 결과를 보여주고 있다. 매우 낮은 Re 수에서 항력계수의 과도예측은 계산 영역의 제한에 따른 점성영역의 축소에 의한 것으로 사료된다. Fig. 3은 $Re=30$ 에서 실린더 주위의 벡터장을 나타낸 것이며, 이를 통해 가상경계법에 의해 계산된 결과가 실린더 표면에서 점착조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 2차원 벽 근처 원형 실린더 주위 유동

가상경계법이 적용된 비압축성 유동 해석 기법을 이용하여 2차원 벽 근처 원형 실린더 주위 유동계산을 수행하였다. Fig. 4와 같이, 채널 유동 내에 지름의 길이가 D 인 원형 실린더가 존재하며, 채널영역의 크기는 $4D \times 11D$ 이며, 128×640 의 균일격자를 사용하였다. 입구경계조건은 완전발달 층류채널에서의 Poiseuille 유속분포를 부여하였으며, 출구에서는 Neumann 경계조건을 사용하였다. Re 수는 $u_b D / \nu$ 로 정의되었으며, u_b 는 입구 유동의 평균속도 (bulk velocity)을 나타낸다. 또한 원형 실린더와 벽과의 거리 (wall proximity)를 d_p 로 정의하였다.

3.2.1 벽과의 거리에 따른 유동 변화

채널 내 원형 실린더의 벽 근접효과에 따른 유동현상을 살펴보기 위해, 먼저 $Re = 20$ 에 대해 벽과의 원형 실린더의

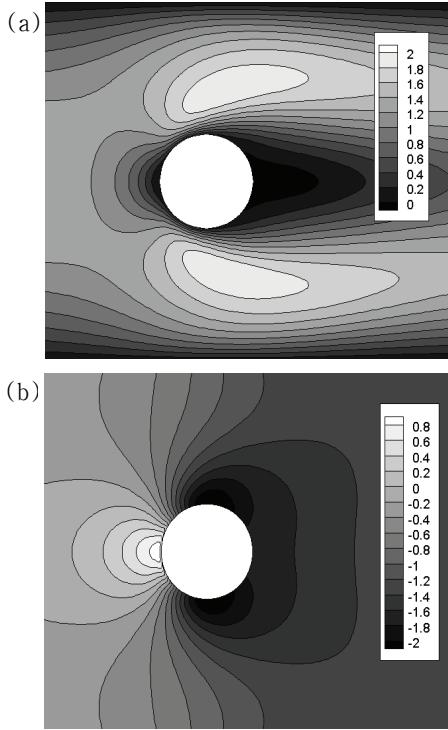


Fig. 5 Contour plots of (a) streamwise velocity and (b) pressure for $d_p = 1.5D$ (center) and $Re = 20$

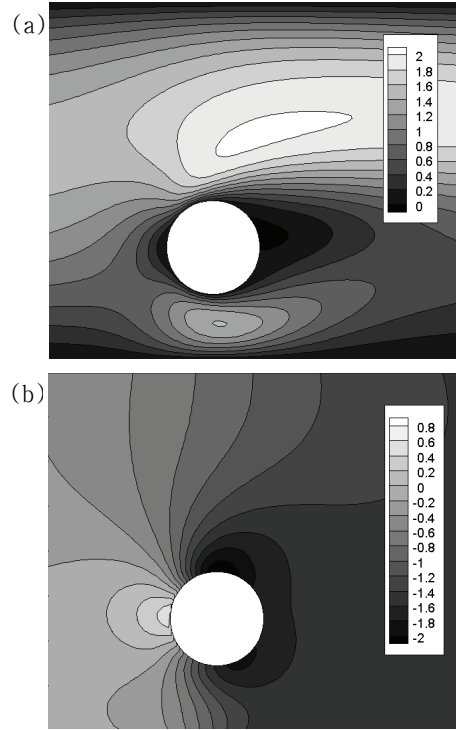


Fig. 6 Contour plots of (a) streamwise velocity and (b) pressure for $d_p = 0.5D$ (near wall) and $Re = 20$

거리에 따른 유동변화를 살펴보았다. Figs. 5와 6은 원형실린더가 채널의 중앙에 있을 경우, 벽과의 거리가 0.5D인 경우에 대해 유동방향 속도 및 압력 분포를 나타내고 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 원형 실린더 주위의 속도와 압력이 위, 아래로 대칭이며, 양력이 없음이 추정된다. Fig. 6를 통해, 원형 실린더가 벽 근처에 있을 경우, 위, 아래의 속도 및 압력 분포가 비대칭성을 나타내며, 특히 원형 실린더의 상부에서는 가속되며, 하부에서는 감속되는 형태가 관찰된다. 이와 더불어, 실린더 하부 압력이 상부 압력보다 더 높기 때문에 벽으로부터 떨어내는 힘이 원형 실린더에 가해지기 때문에 양력이 발생하게 된다. 또한 원형 실린더의 정체점 (stagnation point)에 가해지는 압력이 원형 실린더가 벽면에 근접함에 따라 낮게 나타났으며, 이에 따라 주 유동방향으로 원형 실린더에 작용하는 항력계수가 감소하게 된다.

벽 근접효과에 따른 원형 실린더의 공력특성 변화를 좀 더 자세하게 관찰하였다. 원형 실린더에 작용하는 항력 (F_D) 및 양력 (F_L)에 대해 각각의 계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_b^2 D}, \quad C_l = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u_b^2 D} \quad (19)$$

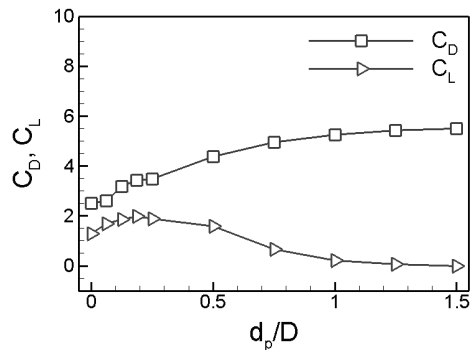


Fig. 7 The effect of wall proximity on drag and lift coefficients for $Re=20$

Fig. 7은 $Re = 20$ 유동에서 벽면 근접성에 따른 항력, 양력 계수의 변화를 보여주고 있다. 원형 실린더가 벽과 근접할수록 항력계수는 단조 (monotonic) 감소한다. 양력계수는 원형 실린더가 벽과 근접할수록 ($d_p/D \geq 0.1875$) 증가하지만, 벽면 근접지역 ($d_p/D \leq 0.1875$)에서는 오히려 감소한다.

3.2.2 Reynolds 수에 따른 유동 변화

Re 수에 따른 채널 내의 실린더 주위의 유동 변화에 따

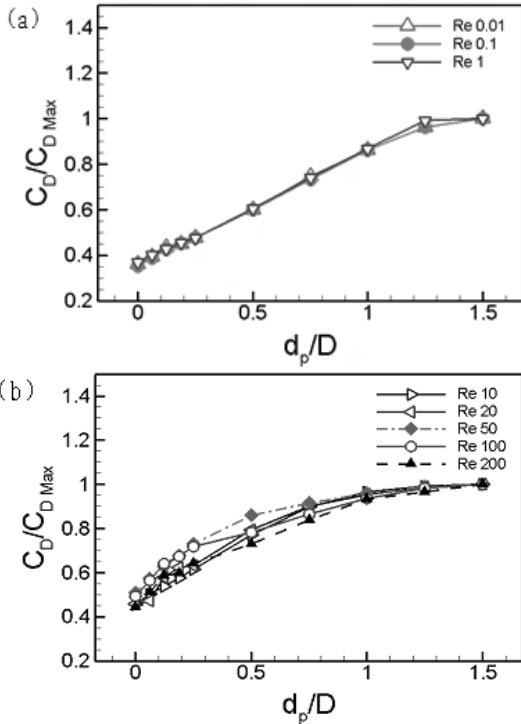


Fig. 8 Normalized Drag coefficient at (a) low $Re (Re \leq 1)$ and (b) high $Re (Re \geq 1)$

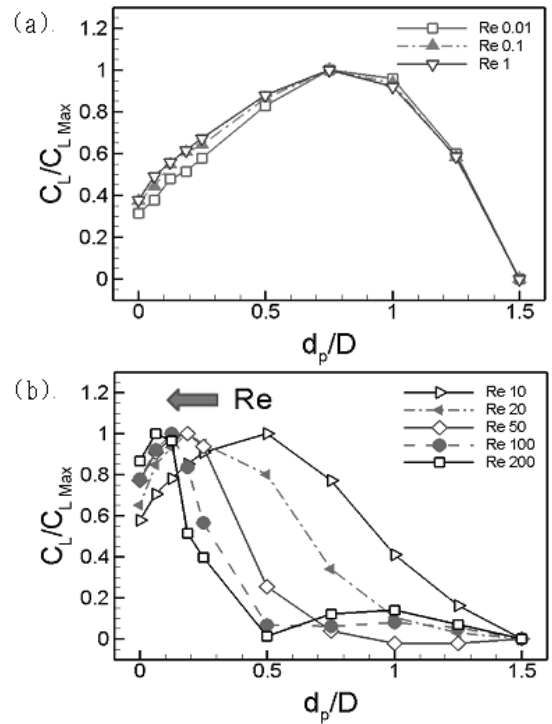


Fig. 9 Normalized Lift coefficient at (a) low $Re (Re \leq 1)$ and (b) high $Re (Re \geq 1)$

른 최대 항력계수와 최대 양력계수 및 최대 양력계수의 발생 지점에서의 d_p 를 Table 1에 제시하였다. Re 수가 커짐에 따라 항력, 양력계수 모두 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 균일 유동 내의 실린더 주위의 유동과 유사한 결과이다.

Fig. 8과 9는 각 Re 수에서의 벽면 근접성에 따른 항력, 양력계수의 변화를 보여주고 있으며, 항력, 양력계수는 Table 1에 기재된 최대 항력계수, 양력계수로 정규화(normalization)되었다. 이때 비정상 와류가 발생한 경우($Re=100, 200$)의 최대 항력계수와 양력계수는 시간에 따른 평균값으로 계산되었다. Fig. 8을 통해, 모든 Re 수에서 d_p 가 줄어들수록 항력 계수

가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, Re 수가 작을 때는 ($Re \leq 1$) 정규화 된 항력계수가 Re 수에 관계없이 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9을 통해, Re 수가 커질수록 최대 양력계수가 발생하는 실린더의 위치가 벽에 가까워지며, 항력계수와 마찬가지로 Re 수가 작을 때 ($Re \leq 1$), 정규화 된 Re 수에 관계없이 양력계수가 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Re 수가 작을 때 실린더 주위의 유동은 시간에 따라 일정한 값으로 수렴하였지만, Re 수가 100 이상일 때는 실린더 후류에 일정한 주기를 갖는 비정상 와류(Von Karman vortex street)가 발생하였다. Fig. 10은 Re 수가 100, 200일 때 d_p 에 따른 Strouhal 수 ($St = fD/u_b$)를 나타낸 것이다. 여기서 f 는 실린더 후류에 발생하는 비정상 와류의 주파수(frequency)이다. Schafer and Turek[12]에서 제시된 $Re = 100, d_p/D = 1.5$ (center) 경우에 대한 St 수를 비교했을 때, 본 연구에서 유사한 결과를 얻었다. Fig. 10에서와 같이 $Re = 100, 200$ 에서 실린더가 중앙에 있을 때($d_p/D = 1.5$) 비정상 와류가 발생하였으며, 벽과의 거리가 가까워짐에 따라 St 수는 감소하지만, 일정 거리 이하일 때는 비정상 와류가 발생하지 않았다. 그리고 비정상 와류가 발생하는 최소 d_p 는 Re 수가 200일 때가

Table 1 The effect of wall proximity on maximum drag and lift coefficients for different Reynolds numbers

Re	$C_{D,max}$	$C_{L,max}$	$d_{P,max}/D$
0.01	6537	13.54	0.75
0.1	648.9	7.290	0.75
1	65.84	6.577	0.75
10	8.456	2.974	0.5
20	5.499	1.885	0.1875
50	3.951	1.358	0.1875
100	3.030	1.125	0.125
200	2.970	0.878	0.0625

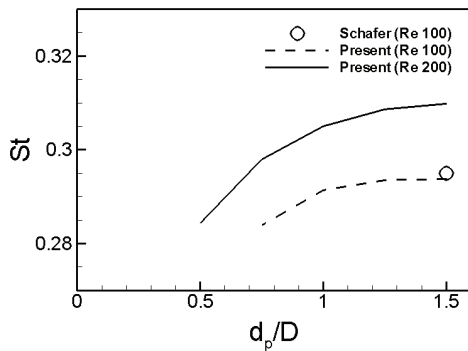


Fig. 10 Strouhal number versus distance from the wall

0.5로 100일 때의 0.75보다 더 작게 나타났으며, 이는 Luigino and Gianni[6]가 제시한 결과와 같은 현상이다.

4. 결 론

벽 근접성에 따른 원형실린더 주위의 유동현상 및 공력계수 변화를 살펴보기 위해 가상경계법 기반 수치해석 연구가 수행되었다. 다중직접가진에 의한 가상경계법을 사용하여 2차원 균일유동 내의 원형 실린더 주위 비압축성 유동해석이 수행되었으며, Re 수에 따른 항력계수를 Pantan[6]에 제시된 결과와 비교하여 가상경계법을 검증하였으며, 실린더 주위의 벡터장을 통해 실린더 표면에 접촉조건이 만족하는 것을 확인하였다. 채널 내 원형실린더의 벽 근접효과에 따른 유동현상을 살펴보기 위해, $Re=20$ 에 대해 벽과 원형실린더의 거리에 따른 유동변화를 살펴보았으며, 실린더가 벽에 가까워질수록 항력계수는 감소하지만, 양력계수는 증가하다가 벽 근접지역에서 다시 감소하는 현상이 관찰되었다. Re 수에 따른 벽 근접효과에 대한 연구가 수행되었으며, Re 수가 증가할수록 항력, 양력 계수는 감소하며, 최대 양력계수를 갖는 실린더의 위치는 벽으로 근접하는 것이 나타났다. Re 수가 작을 때 ($Re \leq 1$), 정규화 된 항력, 양력계수는 Re 수에 관계없이 매우 유사하게 나타났다. 그리고 Re 수가 100 이상일 때 원형 실린더 후류에 비정상 와류가 발생하였고 실린더와 벽과의 거리가 가까워질수록 St 수가 감소하지만 일정 이하의 거리에서는 비정상 와류가 발생하지 않았다.

후 기

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 첨단사이

언스 교육허브개발사업 (EDISON 2011-0020561)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 1996, Wang, Q. and Squares, K.D., "Large eddy simulation of particle-laden turbulent channel flow," *Phys. Fluid.*, Vol.8, pp.1207-1223.
- [2] 2005, Pantan, R.L., *Incompressible Flow*, WILEY, Canada.
- [3] 1978, Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E., *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, New York.
- [4] 1990, Taniguchi, S. and Miyakoshi, K., "Fluctuating fluid forces acting on a circular cylinder and interference with a plane wall", *Exp. Fluids*, Vol.9, pp.271-300
- [5] 1999, Lei, C., Cheng, L. and Kavanagi, K., "Re-examination of the effects of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder", *J. Wind Eng. Ind. Aer.*, Vol.80, pp.263-286.
- [6] 1999, Luigino, Z. and Gianni, P., "Flow about a circular cylinder between parallel walls", *J. Fluid Mech*, Vol.440, pp.1-25.
- [7] 1972, Peskin, C.S., "Flow Patterns Aound Heart Valves: a Digital Computer Method for Solving the Equations of Motion," *Ph.D. Thesis, Alber Einstein College of Medicine*, Yeshiva University.
- [8] 2005, Uhlmann, M., "An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows," *J.Comput.Phys*, Vol.209, pp.448-476.
- [9] 2008, Wang, Z. and Fan, J., "Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles," *int. J. Multi. Flow*, Vol.34, pp.283-302.
- [10] 2002, Kim, K. and Baek, S, Sung, H.J., "An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations," *int. j. numer. Meth. Fluids*, Vol.38, pp.125-138.
- [11] 2000, Lai, M.C. and Peskin, C.S., "An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity," *J.Comput.Phys*, Vol. 60, pp.705-719.
- [12] 1996, Schafer, M. and Turek, S., "Benchmark computations of laminar flow around a cylinder", *Notes on Numerical Fluid Mechanics*, Vol.52, pp.547-566.