

낮은 레이놀즈 수에서 벽면에 근접하여 이동하는 실린더 주위의 유동해석 과 승 현†

(원고접수일 : 2012년 10월 8일, 원고수정일 : 2012년 11월 2일, 심사완료일 : 2012년 11월 12일)

Flow Analysis over Moving Circular Cylinder Near the Wall at Moderate Reynolds Number

Seung-Hyun Kwag†

요 약 : 유한체적법을 기반으로 나비에 스토크스 방정식을 비구조격자로 풀어 실린더 주위의 공력특성을 규명하였다. 보텍스, 속도, 압력, 잔차, 항력계수 등의 데이터를 가지고 분석하였고 레이놀즈 수는 50, 100이다. 유동특성은 $Re > 50$ 에서 주기적으로 진동하는 소용돌이를 후류에 형성하며 이 현상은 이동하는 실린더에서도 유사한 현상을 보여 주었다. 지면효과는 실린더 위쪽에서 형성된 소용돌이가 벽면에 근접할수록 실린더의 후방으로 길게 늘어나는 현상을 보이고, 실린더와 근접벽면 사이의 유속이 정체되어 실린더와 벽면 사이의 간격이 0.6 에서는 근접 평판과 실린더 사이의 유동이 거의 끊겨짐을 알 수 있었다. 본 수치계산의 검증을 위하여 항력계수를 타 연구결과와 비교하였다.

주제어 : 유동해석, 실린더유동, 전산유체역학, 낮은 레이놀즈수

Abstract: The aerodynamic characteristics of circular cylinder in a channel are studied to make clear the flow feature by solving the Navier-Stokes equation based on the finite volume method with unstructured grids. Reviews are made on with the vorticity, velocity, dynamic pressure, residual and drag, where the Reynolds numbers are 50 and 100. The flows for $Re \geq 50$ shows the vortex shedding in the wake, and the result is the same as the case of moving cylinder. The ground effect of flat bottom results in the growth of vortex, being generated in the upper side of the cylinder and elongated in the rear. As the cylinder approaches to wall, for example 0.6, the cylinder plays as a role of blockage to obstruct the flow between the cylinder and wall. The drag coefficients are compared with others' results to confirm the validity of the present numerical simulation.

Key words: Flow Analysis, Cylinder Flow, CFD (Computational Fluid Dynamics), Moderate Reynolds Number

1. 서 론

마린엔지니어링 및 해양설계 분야에서 낮은 레이놀즈 수 유체유동은 해결해야 할 중요한 과제이다. 실린더 후류의 유동, 부분적 조밀격자생성 그리고 후류에 발생하는 보텍스 shedding의 메커니즘은 오랫동안 연구의 대상이었다[1-2]. 이와 관련된 공학적 연구로 지면효과에 의한 실린더의 공력특성이 있다. 유체 내에서 일정한 속도로 이동하는 실린더 주위의 유동특성을 규명하기 위한 수치실험

은 물체를 이동시키는 대신 유체를 일정속도로 유입시켜 실린더 주위에 나타나는 유동의 유체동력학적 특성을 연구해 왔다[3]. 실린더가 평판에 접근하여 움직이는 경우에도 평판을 유체와 같은 속도로 이동시켜 실린더의 이동에 의한 상호작용 및 상대운동을 해석하게 된다. 물체에 근접한 면이 평판이 아닌 경우에는 상사 유동을 만들기 위해서 근접 면을 유동과 같은 속도로 이동시켜야 하는데 이때 매 시간 마다 격자형상의 계산이 요구되므로

† 교신저자(한라대학교 컴퓨터응용설계학과, E-mail: shkwag@halla.ac.kr, Tel: 033-760-1233)

실린더를 직접 운동시켜 해석하는 것과 비교할 때 별로 효과적이지 못하다. 물체의 직접적인 이동 및 경계면의 변형을 필요로 하는 수치실험일 때는 격자의 변형과 재생이 불가피하며 이를 구현하는 데는 수치코드도 복잡해지고 해석시간도 많이 요구된다. 본 연구는 이동하는 원형실린더의 유동특성에 관한 것으로 고정실린더와 이동실린더 주위의 유동현상의 차이와 벽면에 근접하여 이동할 때의 유동현상을 규명하였다. 벽과 실린더 사이의 유동은 레이놀즈 수, 떨어진 거리 등이 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있고 낮은 레이놀즈 수의 보텍스 shedding에 대한 현상을 연구하였다. 전산유체역학에서는 다양한 모델링과 연구목적에 부합하는 폭넓은 선택이 옵션으로 되어 있는데 특히 실린더와 벽 사이의 거리에 따른 보텍스, 속도, 압력분포, 레지듀얼, 항력 등의 데이터를 가지고 분석하였다. 본 연구에서는 유체동력학적 현상들을 확인하기 위하여 FLUENT 상용코드를 사용하여 수치실험을 수행하였다.

2. 수치시물레이션

2.1 기본 방정식과 수치조건

지배방정식은 Navier-Stokes 방정식이며 유한체 적법으로 혼합격자를 만들어 수치해석을 수행하였다. Navier-Stokes 방정식을 이산화하여 계산을 수행하였다[4].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi dA + \int_V S \phi dV \quad (1)$$

수송방정식 (1)에서 첫 번째 항은 비정상항, 두 번째는 대류항, 세 번째는 확산항, 네 번째는 생성항이다.

Transport방정식	variable of ϕ
연속방정식	1
x 모우멘텀	속도 (u)
y 모우멘텀	속도 (v)
z 모우멘텀	속도 (w)

압력 및 속도는 coupled, cell-based 구배조건을

적용했고 계산은 음해법의 수치기법을 사용했다.

2.2 격자생성, 경계조건 및 계산영역

격자는 비구조 사면체 및 육면체 형상으로 생성하였다. 경계조건은 입구면, 출구면, 벽에 각각 속도, 압력 조건을 부여하였고 공간내부에는 연속체 조건을 주었다. 입구면에는 단위속도를, 출구면에는 제로구배 압력조건을 주었다. 계산영역은 전체 영역을 부분적으로 분할하여 조밀화 작업을 수행하였다. 평판과 실린더 사이의 거리는 a로 명기했고 0.6, 1.0, 2.0 세 경우로 나누어 격자를 별도로 생성하였다.

3. 수치해석 및 토의

3.1 수치해석 결과

Figure 1과 Figure 2는 실린더 후방에서 생성되는 볼텍스 메커니즘을 보여주고 있다. Figure 3은 격자모양과 계산영역을 보여준다.



Figure 1: Vortex generation past a circular cylinder

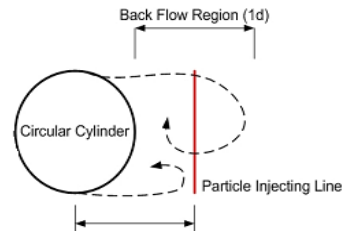


Figure 2: Vortex mechanism

격자는 gambit에 탑재되어 있는 mesh module을 사용하여 생성하였다. 여기서 element, type, interval size 등의 계수를 설계에 반영하였고 Figure 3과 같이 영역을 나누어 clustering을 수행하였다.

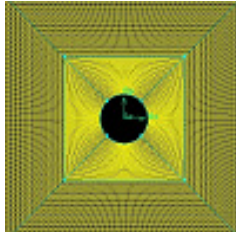


Figure 3(a): Grid view

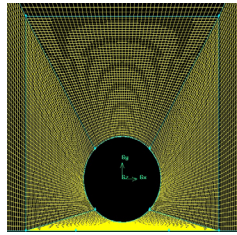


Figure 3(b): Grid generation

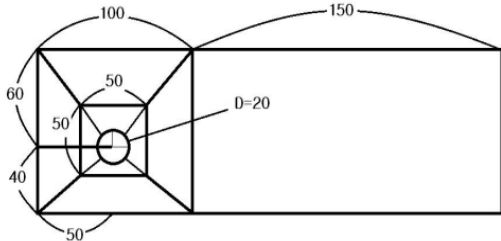


Figure 3(c): Domain partitioned for clustering($a=2.0$)

Figure 4는 레이놀즈 수 50에서의 보텍스 분포로 고정 및 이동 실린더에서의 보텍스의 세기를 나타낸 것으로 각 경우의 수치해석 결과이다. 고정 실린더의 경우가 보텍스 구배가 더 강함을 알 수 있다.



Figure 4(a): Vorticity contour of flow over fixed cylinder



Figure 4(b): Vorticity contour of flow over moving cylinder

Figure 5는 레이놀즈 수 50에서의 고정 및 이동 실린더 주위의 압력등고선을 보여준다. 입구에서 일정한 속도로 유입되는 고정실린더 주위의 압력 분포는, 일정한 속도로 이동하고 있는 실린더 주위에 형성된 압력 분포와 형상이 흡사하지만, 이동 실린더 후미에 형성된 저압 영역은 부채꼴 형태로 고정실린더 후류에 형성된 압력분포와 비교하여 더 넓게 확산되어 있는 것을 알 수 있다. 그 원인은 고정실린더 주위의 유동해석에서 평판 역시 고정되어 있어 평판이 근접할 때 상대적으로 높은 압력이 형성되고, 이로 인해 실린더 주위에 형성된 유동의 확산을 막기 때문이다.

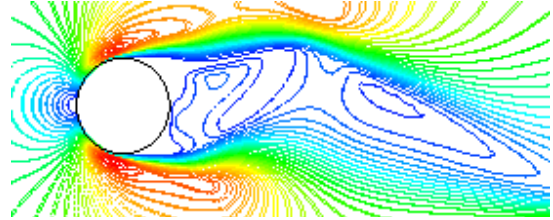


Figure 5(a): Pressure contour of flow over fixed cylinder at $Re=50$

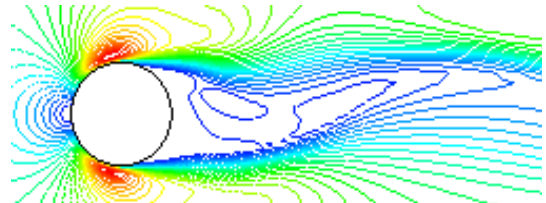


Figure 5(b): Pressure contour of flow over moving cylinder at $Re=50$

Figure 6, Figure 7은 레이놀즈 수 50, 100에서의 유선을 보여 준다. 고정된 실린더 주위를 흐르는 유동의 유선은 레이놀즈 수가 50 이하에서는 실린더의 후미에 대칭적 와류가 상하로 형성되고 레이놀즈 수가 100 일 때는 주기적으로 반복되는 소용돌이가 후류에 형성된다. 유동은 실린더가 이동함에 따라 전후로 실린더 이동 방향과 같은 방향의 실린더를 중심으로 큰 소용돌이 유동장이 만들어지는 것을 볼 수 있다.



Figure 6(a): Streamlines of flow over fixed cylinder at $Re=50$

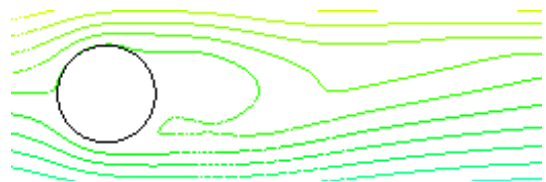


Figure 6(b): Streamlines of flow over moving cylinder at $Re=50$



Figure 7(a): Streamlines of flow over fixed cylinder at $Re=100$

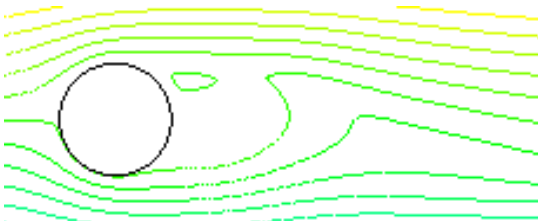


Figure 7(b): Streamlines of flow over moving cylinder at $Re=100$

Figure 8, Figure 9는 레이놀즈 수 50, 100 에서의 보텍스 형상을 보여 주고 있다. 움직이는 실린더 후방에서의 간극 a 는 2.0, 1.0, 0.6 이다.



Figure 8(a): Vorticity contour moving cylinder at $Re=50$ and $a=2.0$



Figure 8(b): Vorticity contour moving cylinder at $Re=50$ and $a=1.0$

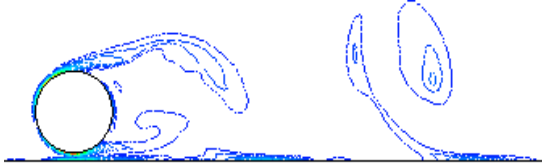


Figure 8(c): Vorticity contour moving cylinder at $Re=50$ and $a=0.6$

지면효과로 인하여 벽면에 근접하여 이동하는 실린더 주위의 유동특성은 벽에 근접한 거리에 따라 상이하게 되는데, 레이놀즈 수가 50이고 실린더를 평판에 근접시켰을 때 후류에서 주기적인 요동하는 진동현상을 볼 수 있다. 벽면에 근접할수록 후류에 형성되는 소용돌이는 형상이 길어지며 간극 a 가 0.6일 때는 실린더와 근접면 사이의 간격이 더 좁아져 이 사이의 유동은 상당할 정도로 지연된다. 후류에 형성된 소용돌이 형상은 차단벽면을 넘어 흐르는 유동현상과 유사한 형상을 만든다.

Figure 9는 레이놀즈 수 100의 결과인데 이 경우도 거의 같은 경향을 보이지만 벽면에 근접할수록 실린더 위쪽에서 시작한 소용돌이가 근접 벽면에서 발생한 와에 의해서 2차(secondary) 소용돌이가 생성됨을 볼 수 있다.



Figure 9(a): Vorticity contour moving cylinder at $Re=100$ and $a=2.0$



Figure 9(b): Vorticity contour moving cylinder at $Re=100$ and $a=1.0$



Figure 9(c): Vorticity contour moving cylinder at $Re=100$ and $a=0.6$

3.2 항력계수 결과

고정 실린더 $Re=100$ 의 항력계수는 Mei[5]의 경우 3.22 이고, Schafer[6]의 경우 3.24 이다. 본 계산의 결과는 3.20 이다. 이동 실린더의 경우는 3.09

로 약간 작게 나타났다. 이동 실린더의 경우 상하 평판의 상대적 운동의 차이가 그 원인의 일부로 볼 수 있다. 더구나 이동 실린더를 이용한 수치실험에서 속도와 시간에 맞추어 순서에 따라 이동시킨 후 계산을 수행한 결과에 기인된 것으로 판단된다. **Figure 10**은 시간에 따른 원형 실린더의 유동해석 결과이다. 유체 내에서 이동하는 실린더 후류의 유선형상을 시간경과에 따라 보여준 것이다.



Figure 10(a): iter. number 300



Figure 10(b): iter. number 500



Figure 10(c): iter. number 1000



Figure 10(d): iter. number 1500



Figure 10(e): iter. number 2000



Figure 10(f): iter. number 2500



Figure 10(g): iter. number 3000

4. 결 론

유한체적법을 기반으로 나비에 스토크스 방정식을 풀어 실린더 후류의 공력특성 현상을 규명하였다. 보텍스, 속도, 압력, 항력계수 등의 데이터를 가지고 분석하였고 수치실험에서의 레이놀즈 수는 50, 100 이다. 레이놀즈 수가 50 이상에서 유동특성은 보텍스 형상을 나타냈고 후류에 주기적으로 진동하는 소용돌이를 보여 주었다. 이는 고정 및 이동하는 실린더에서 공히 유사하였다.

지면효과는 실린더 위쪽에서 형성된 소용돌이가 벽면에 근접할수록 증가하기 시작했으며 실린더의 후방으로 길게 늘어나는 형상을 보여주었다. 실린더와 근접벽면 사이의 유속이 지연되어 실린더와 벽면 사이의 간격이 0.6 에서는 근접 평판과 실린더 사이의 유동이 거의 끊겨짐을 알 수 있었다.

항력계수의 결과를 타 연구결과와 비교하였는데 거의 오차가 없었기에 본 계산의 타당성을 입증할 수 있었다. 수치 계산의 수렴은 연속방정식 등을 통하여 확인할 수 있었다. 압력과 속도의 잔차가 10^{-6} 부근으로 수치적 수렴을 확인하였다. 동압, 보텍스, 속도벡터 등을 가지고 분석한 결과 실린더와 벽사이의 간격이 작아짐에 따라 유동현상이 불안정함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] H. M. Kim and M. S. Jhon, "Numerical study on flow over oscillating circular cylinder using curved moving boundary treatment," Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers B, vol. 31, no. 11, pp. 895-903, 2007 (in Korean).
- [2] C. Zhu, S. C. Liang and L.S. Fan, "Particle wake effects on the drag force of an interactive particle," International Journal of Multiphase Flow, vol. 20, pp. 117-129, 1994.
- [3] S. C. Liang, T. Hong and L.S. Fan, "Effects of particle arrangements on the drag force of a particle in the intermediate flow regime," International Journal of Multiphase Flow, vol. 22, no. 2, pp. 285-306, 1996.

- [4] J. H. Ferziger and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, 1997.
- [5] R. Mei, D. Yu, W. Shyy and L. S. Luo, "Force evaluation in the lattice boltzmann method involving curved geometry," Physical Review E, vol. 65, no. 041203, 2002.
- [6] M. Schafer and S. Turek, "Flow simulation with high-performance computer II," Notes in Numerical Fluid Mechanics, vol. 52, 1996.