타원의 장단축 비율과 회전 각도에 의한 유동 변화

The effects of axis ratio and rotation angle on flows around an elliptical cylinder

오근우*
연세대학교 계산과학공학과

초 록

본 논문에서는 타원형 실린더 주위의 유동과 항력 및 양력 계수의 변화를 관찰하였다. EDISON_CFD를 이용하여 자유 유동(free stream)에서 타원형 실린더의 장단축 비율과 회전된 각도의 변화에 따라 실린더 후방의 유동과 압력 분포의 변화를 보고, 이에 따른 항력 계수 및 양력 계수의 변화를 시뮬레이션하였다. 또한, 채널 유동 내에서 벽 근접에 따른 유동 변화와 항력 및 양력 계수의 변화를 관찰하였다.

Key Words : 타원형 원통 (Elliptic cylinder), 장단축 비율 (Axis ratio), 회전 각도 (Rotation angle), 항력 (Drag Force), 양력 (Lift Force)

1. 서 론

실린더 주위의 유동에 대한 시뮬레이션은 산업기술에의 응용, 자동차 외형 설계, 항공기 디자인, 교각 건설 등과 같은 많은 기계 공학적 응용분야에 있어서 기본이 되는 부분이다. 대부분의 물체 주변의 유동에서 vortex shedding은 흔한 현상이며 이는 공기 역학, 열전달, mixing 그리고 물체의 진동에 중요한 역할을 한다. 물체 주변의 유동에 대한 많은 연구들이 실험적으로 그리고 수치적으로 행해졌다. Williamson and Brown et al.[(1)]에서는 원형 실린더에 대한 St-Re의 관계를 연구하였고, Tandea et al.[(2)]에서는 free stream에서 다양한 회전 각도에 따른 타원형 실린더 주위의 유동에 대한 streakline과 streamline을 촬영하기 위한 실험이 행해졌다. Jackson et al.[(3)]에서는 AR의 변화에 따른 타원형 실린더 주위의 유동을 저 레이놀즈 수에서 연구하였다. Badr et al.[(4)]에서는 free stream에서 진동하는 타원형 실린더 주위의 유동에 대해 연구하였다. 연구에 사용된 수치해석 도구로는 가상경계법을 이용한 EDISON_CFD의 YUIBM1 Solver를 사용하였다. 이에 사용된 가상경계법(Immersed Boundary Method)을 이용한 실린더 유동에 대한 연구는 Park et al.[(5)]에 의해 진행된바 있다.

타원형 실린더는 장단축 비율 AR(b/a)을 변화시킴에 따라 원형 실린더나 평판의 형태로도 바뀔 수 있기 때문에 물체의 기본 형태로 여겨진다. 지금까지 타원형 실린더에 대한 연구는 AR<1 그리고 주로 타원의 각도 회전 없이 이루어졌고, free stream(unbounded flow)에서만 행해졌다. 본 연구에서는 AR>1 그리고 타원의 각도를 변화시킴에 따라 시뮬레이션이 이루어졌고, free stream이 아닌 channel내의 유동에 대해 양력 계수(Lift coefficient)와 항력 계수(Drag coefficient)의 변화를 살펴보았다.

2. 유효성 검증과 문제 정의(Validation and Problem Definition)

2.1 문제 정의(Problem Definition)

본 시뮬레이션에서는 Fig 1의 계산 영역에서의 수치해석을 통해 타원형 실린더 주위의 유동에 의한 항력 계수와 양력 계수의 변화를 관찰하였다. 외부 경계 조건으로는 계산 영역의 왼쪽 입구에서 $u = U_\infty = 1, v = 0$ 으로 Subsonic inlet condition을 주었고, 오른쪽 출구에서는 같은 값으로 Subsonic

outlet condition을 주었다. 계산 영역의 위와 아랫면은 벽이 없는 Far field boundary condition과 No-slip 조건의 벽이 있는 Viscous adiabatic wall condition을 주어 각각의 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. Neumann boundary condition으로 인한 back pressure를 방지하기 위해 실린더 후방으로 $20D_h$의 충분한 거리를 확보하였다. YUIBM1 Solver의 가상 경계법을 사용하기 위해서 타원형 실린더 형상의 Lagrange Points를 정의하여야 한다. 가상경계법의 수치적 오류를 줄이기 위해선 Point간의 간격이 일정하여야 한다. 이를 위해 Chebyshev nodes를 사용하여 Fig. 2.와 같이 Lagrange Points를 정의하였다.

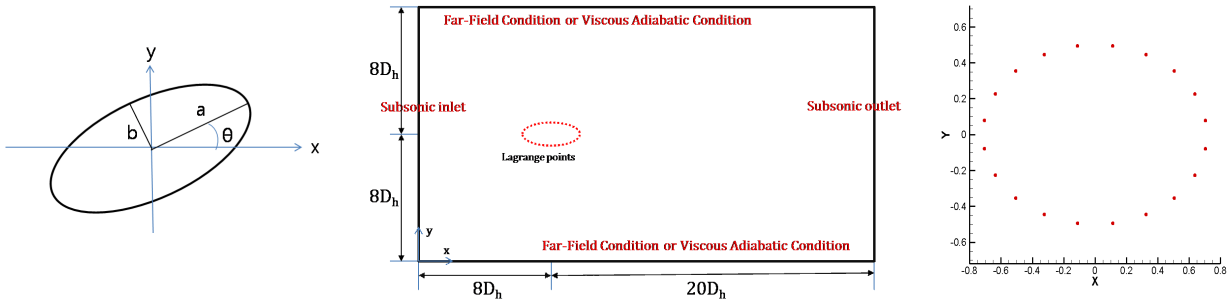


Fig. 1. 계산 영역 및 경계 조건, 타원의 파라미터 정의, Lagrange Points

2.2 유효성 검증(Validation)

Grid	AR				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
161x101	0.6287	0.7866	0.9392	1.0935	1.2467
301x181	0.6202	0.7767	0.9281	1.0797	1.2293
481x301	0.6295	0.7841	0.9397	1.0933	1.2450
Faruquee(2007)	0.7103	0.8052	0.9075	1.0172	1.1344

Table 1. 격자 크기에 따른 항력 계수 결과 값 비교

격자의 수를 늘려가며 주어진 AR에 따른 항력 계수를 비교하였다. 참고 논문의 항력 계수의 변화 경향을 나타내며 최대 11%(평균 6%)의 오차를 나타내었다. 격자의 크기를 줄일수록 계산 시간이 늘어나기 때문에 허용 범위 내의 오차를 감안하며 시뮬레이션 시간을 줄이는 것이 효과적이기 때문에 오차를 최대한 적게 나타내는 $40/D_h$의 격자 크기를 사용한 모델을 시뮬레이션에 사용하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 Free stream에서 AR의 변화에 따른 항력 계수 변화

타원형 실린더의 AR에 따른 유동의 특성을 파악하기 위해 같은 특성 길이(characteristic length)를 단축으로 가지는 네 가지 실린더 주변의 유동을 계산하였다. 레이놀즈 수는 Faruquee et al.[6]에서 확인 된 원형 실린더의 후방에 와흘림(vortex shedding)이 생기는 임계 레이놀즈 수인 Re_{cr}=40을 전후

로 20과 100에 대해 각각을 시뮬레이션 하였다. Fig. 3. 에서는 레이놀즈 수와 AR이 커질수록 역압력 구배가 커지고 이에 따라 타원형 실린더 후방부에 와흘림이 생김을 확인할 수 있다. (a),(b)에서 AR이 1보다 클 경우 레이놀즈 수 20(<Re_{cr})에서도 와흘림이 발생함을 확인하였고 (g),(h)에서 AR이 작은 타원형 실린더는 레이놀즈 수 100(>Re_{cr})에서도 후방부의 와흘림을 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

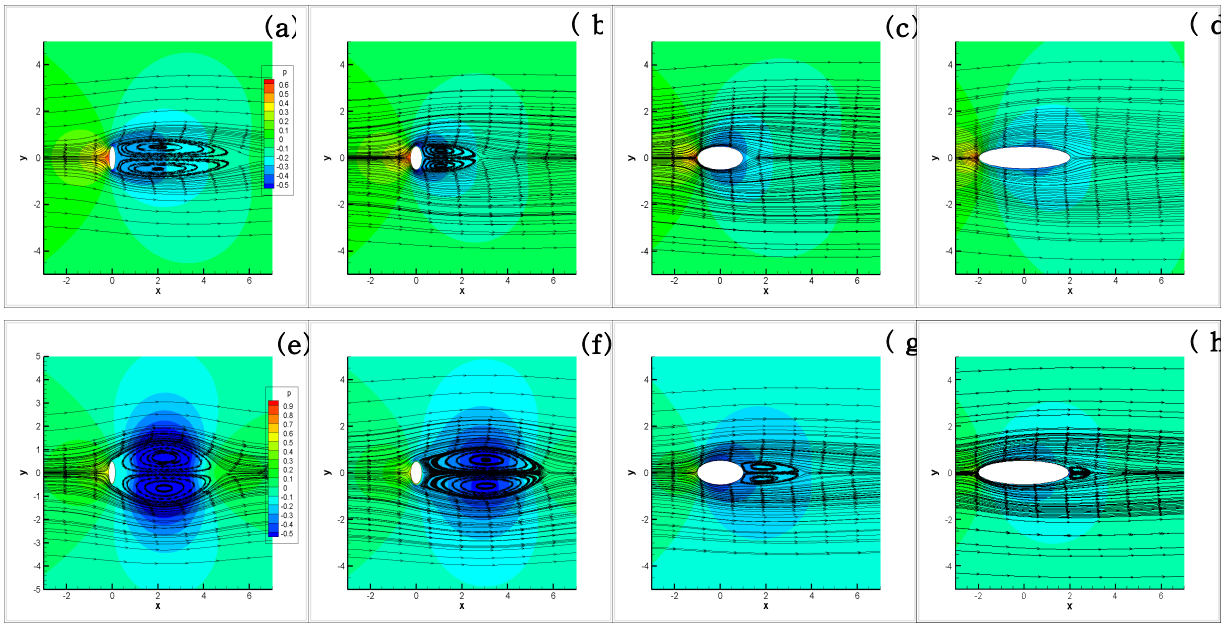


Fig. 2. Re=100와 AR에 따른 유동 변화 및 압력 분포 변화 (a) AR=4.0, (b) AR=2.0, (c) AR=0.5, (d) AR=0.25, (e) AR=4.0, (f) AR=2.0, (g) AR=0.5, (h) AR=0.25, (a)~(d): Re=20, (e)~(h): Re=100

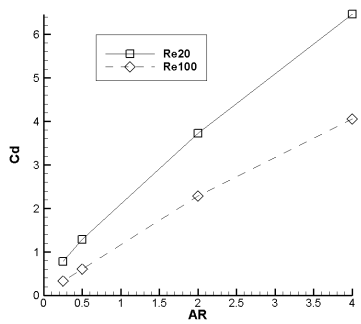


Fig. 3. Re=100와 AR에 따른 항력 계수 변화

두 레이놀즈 수에 대해 AR이 증가함에 따라 항력 계수가 증가함을 확인할 수 있었다. AR이 커짐에 따라 adverse pressure gradient가 커지고 이에 따라 압력에 기인한 항력 계수가 커지기 때문으로 판단할 수 있다.

3.2 Free stream에서 타원형 실린더의 회전 각도에 따른 항력 계수 변화

타원형 실린더에서 회전된 각도에 따른 유동 특성을 파악하기 위해 AR이 2.0과 0.5인 두 실린더에 대해 30도 간격으로 실린더를 회전 시킨 시뮬레이션을 실행하였다. Re_{cr}보다 낮은 레이놀즈 수 20에서는 타원형 실린더의 장축과 U_∞의 streamline 방향이 이루는 각인 angle of attack이 작아질수록 항력 계수가 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6.에서 보여지듯이 angle of attack이 0이 아닐 경우 실린더 후방에서 역압력 구배가 증가하여 와흘림(vortex shedding)이 발생하고 항력 계수가 증가함으로 판

단할 수 있다. Re_{cr}보다 큰 레이놀즈 수 100의 경우에는 angle of attack이 0일 때 항력 계수가 최소가 되고 최댓값은 90도일 때가 아닌 0~90도 사이에서 발생함을 알 수 있다.

양력 계수는 U_∞의 streamline 방향을 축으로 양쪽의 유동이 대칭이 되는 경우(theta=0, 90) 0의 값을 나타낸다. 이는 축을 기준으로 양 쪽에 압력 차가 존재 하지 않기 때문으로 판단할 수 있다.

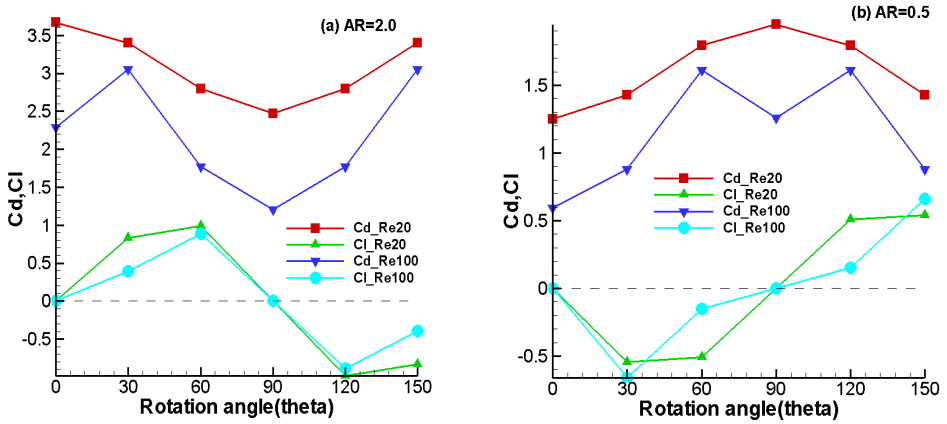


Fig. 4 AR=2.0과 AR=0.5에서 타원형 실린더의 회전 각도에 따른 항력 및 양력 (Re=20, 100)

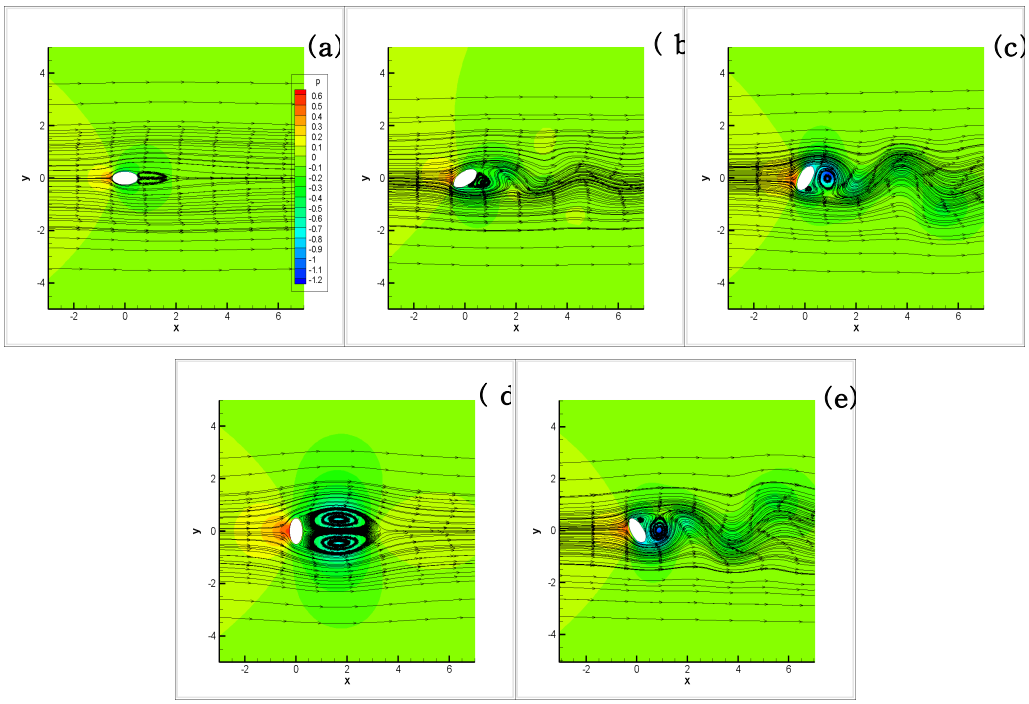


Fig. 5 AR=0.5에서 타원형 실린더의 회전 각도에 따른 유동 및 압력 분포(Re=100), (a)theta=0, (b)theta=30, (c)theta=60, (d)theta=90, (e)theta=120

3.3 채널 유동에서 타원형 실린더의 벽 근접에 따른 항력과 양력 계수 변화

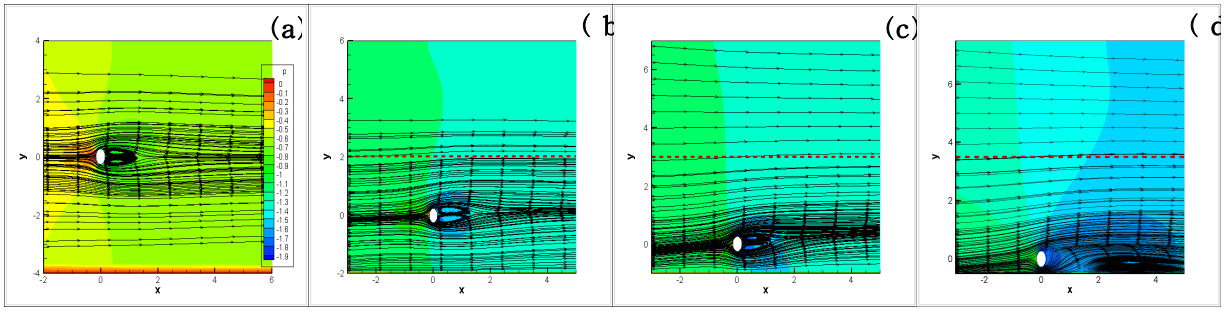


Fig. 6. AR=2.0 타원형 실린더의 벽 근접에 따른 유동 및 압력 분포 변화(Re=20)

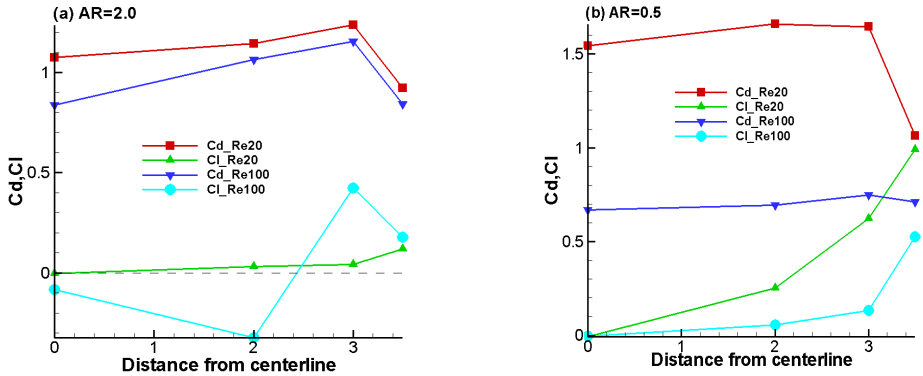
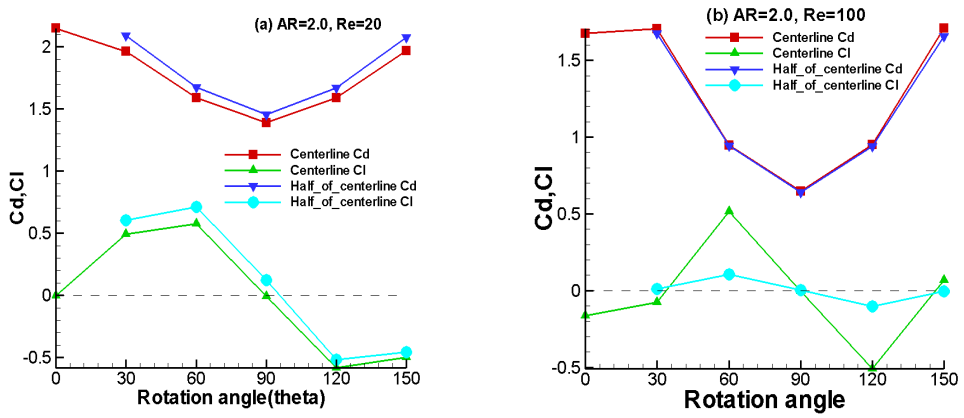


Fig. 7. AR=2.0, AR=0.5 타원형 실린더의 벽 근접에 따른 항력 및 양력 계수 변화

3.4 채널 유동에서 벽 근처 타원형 실린더의 회전 각도에 따른 항력과 양력 계수 변화

채널 내 유동에서 벽 근처에서 회전하는 타원형 실린더에 대해 항력과 양력 계수 변화를 관찰하였다. 이를 위해 채널의 centerline(ⓐ)과 centerline과 벽면의 중간지점(Half of centerline-ⓑ)에서 타원형 실린더를 회전시키며 시뮬레이션 하였다. ⓐ에서 항력 및 양력 계수의 분포는 theta=90에 대해 3.2.절의 내용과 마찬가지로 대칭인 형태를 보였다. 항력 계수는 레이놀즈 수 20인 경우 ⓑ의 위치에서 증가함을 알 수 있다. 이는 물체가 벽면으로 다가갈 때에 받게 되는 벽 근접 효과(Wall effect)에 의한 것으로 판단할 수 있으며 이에 대한 것은 Park et al,.[5]에서 연구되었다. 양력 계수는 ⓐ에서 대칭의 형태를 보이던 것이 ⓑ의 위치에선 더 이상 대칭을 보이지 않게 된다. 타원의 각도에 의한 양력과 더불어 채널 내 유동의 uniform하지 않은 속도장의 영향으로 압력차가 발생하여 벽에서 ⓐ방향의 양력이 추가되었기 때문으로 판단할 수 있다.



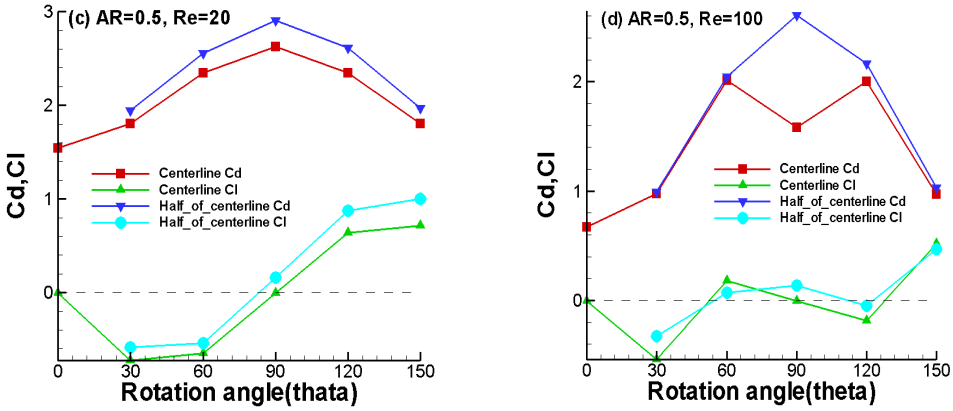


Fig. 8. Channel의 centerline과 centerline과 벽과의 중간지점(Half of centerline)에서 타원형 실린더의 회전 각도에 따른 항력 및 양력 계수 (a)AR=2.0 Re=20, (b)AR=2.0 Re=100, (c)AR=0.5 Re=20, (d)AR=0.5 Re=100

3. 결 론

본 연구에서는 EDISON_CFD를 이용하여 타원형 실린더의 형태에 따른 주위의 유동과 항력 및 양력 계수의 변화를 보았다. 이를 위해 장단축 비율 AR(b/a)과 회전 각도를 변화시키며 시뮬레이션을 진행하였고, 자유 유동(free stream)과 채널 내 유동에 대해 시뮬레이션 하였다.

(a) 같은 projected length(단축의 총 길이)를 가지는 타원들의 AR을 변화 시켰을 때, AR이 증가할수록 Re_{cr}보다 작은 레이놀즈 수에서도 박리가 일어남을 확인하였다. 또한 이에 따라 항력 계수도 증가함을 확인하였다.

(b) 타원의 회전 각도를 변화시킴에 따른 유동 및 항력, 양력 계수의 변화를 보았다. 항력 계수는 타원의 장축과 U_∞의 streamline이 이루는 각인 angle of attack이 0이 될 때 최소를 보였다. 양력 계수는 U_∞의 streamline을 기준으로 양쪽의 유동이 대칭이 되는 theta=0, 90에서 0의 값을 나타냈다.

(c) 타원형 실린더가 벽에 근접함에 따라 항력 계수는 증가 후 벽 근처에서 급감하였다.

(d) 타원형 실린더가 벽면 쪽으로 이동하면 항력은 레이놀즈 수에 따라 변화가 없거나 증가하며, 양력 계수는 더 이상 대칭을 나타내지 않게 된다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 지원 사업인 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Williamson, C. H. K, and Brown, G. L., 1998, "A Series in $1/\sqrt{Re}$ to Represent the Strouhal-Reynolds Number Relationship of the Cylinder Wake," J. Fluids Struct., **12**(8), pp. 1073-1085.

(2) Tandea, S., 1977, "Unsteady Separated Flow Around Bodies," Prog. Aerosp. Sci., **17**, pp. 287-348.

(3) Jackson, C. P., 1987, "A finite Element Study of the Onset of Vortex Shedding in Flow Past Variously Shaped Bodies," J. Fluid Mech., **182**, pp. 23-45.

(4) Badr, H., 1994, "Oscillating Viscous Flow Over an Inclined Elliptic Cylinder," Ocean Eng., **21**, pp. 401-426.

(5) Hyun Wook Park et al., 2012, "벽 근접 효과에 의한 물체의 항력 양력 변화," J. Comput. Fluids Eng. Vol. 17., pp. 68~74.

(6) Faruquee, Z., and David S-K. Ting, 2007, "The effect of axis ratio on laminar fluid flow around an elliptical cylinder," International J. of Heat and Fluid Flow, **28**, pp. 1178~1189