

정사각 실린더 주위 비정상 난류 유동에 대한 수치적 연구

Numerical Study on Unsteady Turbulent Flow Around Square Cylinder

이호준^{1*}, 유병훈¹, 이창훈¹, 최정일¹
연세대학교¹

초 록

본 연구에서는 정사각형으로 모델링된 실린더 주위에 균일한 유동이 흐를 때 나타나는 이차원 난류 유동을 분석하였다. EDISON-CFD를 이용하여 정사각 실린더 표면에서의 전단응력 분포 및 유동 현상을 시뮬레이션 하였다. 선행 연구 결과의 $\overline{C_D}$, C_L' 값과 비교하여 결과의 유효성을 검증하였다. 또한, 비정상 층류 유동(Re=100)과 비교하여 난류 유동(Re=22,000)의 특성을 분석하였고, 와 흐름에 의하여 정사각 실린더 표면이 받는 전단응력을 자세히 분석하였다.

Key Words : Turbulence flow(난류 유동), Square cylinder(정사각 실린더), Vortex shedding(와 흐름), Shear stress(전단응력)

1. 서 론

공학적인 분야에서 사용되는 많은 구조물들은 간단히 사각 실린더 형상으로 모델링 할 수 있다. 이런 사각 실린더에서 발생하는 와 흐름은 항력, 양력 그리고 구조물의 진동 등에 직접적인 영향을 미치므로 이를 주제로 한 많은 연구 결과들을 쉽게 찾아 볼 수 있다.

정사각 실린더 주위의 유동에 대한 많은 선행 연구는 실린더의 종횡비에 따른 Strouhal 수(Str), 항력 및 양력, 유동의 패턴에 주된 관심을 보이고 있다.(1-3) 또한, 난류유동에서의 수치적 모델을 검증하기 위해 $k-\epsilon$ 모델이나 혹은 변형된 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 Re=22,000에서 유동의 패턴을 분석하는 데 주로 초점을 맞추고 있다.(4-6) 하지만, 실린더 표면에서의 유동의 패턴에 대한 연구는 충분히 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 Re=100, Re=22,000의 두 가지 서로 다른 경우에 실린더 주위의 유동을 분석한 선행 연구와의 비교를 통해서, EDISON CFD를 검증하였다. 또한 난류 유동이 발생하는 Re=22,000의 경우에서는 선행 연구와의 비교를 통해 Strouhal 수(Str), 항력계수($\overline{C_D}$)등을 구하였고, 정사각 실린더 표면에서의 전단응력(τ_w)에 관하여 상세한 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 수치해석 대상

수치해석을 이용하여 정사각 실린더 후류 및 실린더 주위 유동을 관찰하였다. Fig 1에는 수치해석에 사용된 계산영역과 좌표계를 나타내었다. 외부 경계조건으로는 입구에서 $u = U_\infty = 1$, $v = 0$ 으로 일정

한 조건을 사용하였다. 또한 실린더를 기준으로 입구방향으로는 4.5D, 출구방향으로는 15.5D, 위, 아래 방향으로는 각각 7.5D의 계산영역을 사용하였다.

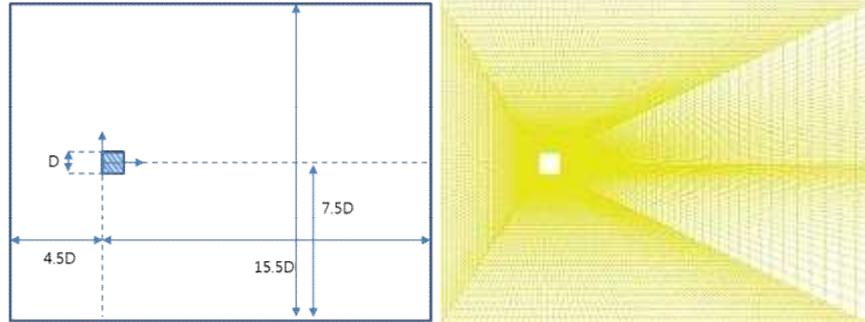


Fig. 1. 사용한 계산영역 및 좌표계 Fig. 2. 사용한 격자의 형태

2.2 수치해석 방법

Fig2는 수치계산에 사용된 격자의 형태를 나타내었다. 실린더 주위에 263개의 격자를 균일하게 분포시키고, 외부와의 간격으로는 85개의 격자를 사용하여 O-type형태의 격자를 사용 하였다. 실린더 주위의 격자는 점성유동을 제대로 분석하기 위해서는 $y^+ \approx 1$ 의 조건을 만족해야한다. 따라서 실린더에서의 첫 번째 격자와의 간격을 $\delta/D = 0.005$ 로 설정하였다. 또한 실린더 가장 근방의 격자부터 외부 경계까지는 SINH함수를 이용하여 격자를 배치하였다.

사용한 EDISON-CFD 수치해석 방법은 2차원에서 Incomp-2.0 모델을 이용하여 $Re=100, 22000$ 의 경우, CFL 수 0.5의 점성유동으로 계산을 수행하였다. 시뮬레이션 계산 시간은 발생하는 유동의 와 흐름 (Vortex Shedding)을 10주기 이상 잡아낼 수 있는 충분한 시간인, 750초를 사용하였으며, 중앙의 실린더에서는 viscous adiabatic wall조건, 외부의 경계에서는 Inflow or Outflow 경계조건을 부가하였다.

3. 결과 해석 및 고찰

수치해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 $Re=100, 22000$ 에서 사각 실린더 주위의 유동 데이터를 선행 연구결과의 Strouhal 수(Str), 평균 항력계수($\overline{C_D}$), C_D', C_L' , 등의 결과와 비교하였다. Table 1은, $Re=100$ 일 때 선행 수치해석결과와 EDISON-CFD를 이용한 결과와의 비교이다. Table 2는 $Re=22,000$ 일 때의 실제 실험결과, Kato와 Launder, Franke의 standard $k-\epsilon$ 모델 수치해석 결과와 EDISON-CFD를 이용한 수치해석 결과와의 비교이다. 기존의 수치 및 실험 결과의 값들과 잘 일치하고 있음을 Table1,2에서 확인할 수 있다.

Table 1. $Re= 100$ 에서 다른 결과와의 비교

	$\overline{C_D}$	C_{Lrms}	Str
Sohankar et al ⁽²⁾	1.47	0.157	0.146
Cheng et al ⁽⁷⁾	1.44	0.156	0.144
EDISON-CFD	1.51	0.160	0.141

Table 2. Re= 22000에서 다른 결과와의 비교

Author	Turbulence model	$\overline{C_D}$	C_D'	C_L'	Str
G. BOSCH and W. RODI ⁽⁶⁾	Modification of Kato and Launder	2.108	0.0325	1.012	0.146
Kato and Launder ⁽⁵⁾	Modification of Kato and Launder	2.050	0.0212	0.820	0.145
Franke ⁽⁴⁾	Standard $k-\epsilon$ model	1.790	0.0000	0.228	0.124
G. BOSCH and W. RODI ⁽⁶⁾	Standard $k-\epsilon$ model	1.750	0.0012	0.178	0.122
EDISON-CFD		2.170	0.0234	0.336	0.140
Experiment ⁽⁵⁾⁽⁸⁾		2.05-2.19			0.135-0.139

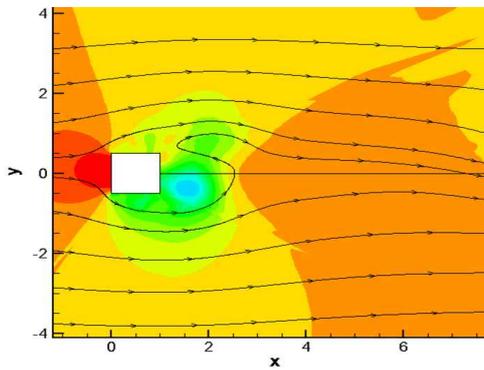


Fig. 3. Re=22000의 압력과 유선분포 C_D 최대

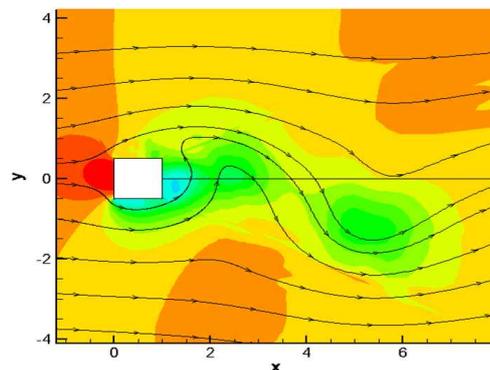


Fig. 4. Re=22000의 압력과 유선분포 C_D 최소

선행 논문 수치해석 결과와 EDISON-CFD의 결과를 비교해보면, 전체적으로, $\overline{C_D}$ 와 C_D' 의 값이 약간씩 더 큰 값을 보이고 있지만, 전체적으로는 기존의 수치 및 실험 결과의 값들과 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig 3-4. 는 Re= 22000경우의 압력 및 유선의 분포를 나타내었다. 두 경우 모두 실린더 후방에서 와류를 관찰 가능하였다. 또한 C_D 가 최소일 때는 와류가 실린더 후면에 더욱 가깝게 형성되고 와의 길이가 길어지는 것을 관찰할 수 있다.

정사각 실린더 표면에서의 전단응력 분석을 위하여 Fig 5. 와 같은 좌표계를 설정하였다. 레이놀즈 수 Re= 22000에서, 와의 발생에 따라 실린더에서 떨어진 후류의 패턴을 분석하여, 실린더가 받는 항력의 세기가 가장 커지는 경우와 가장 작아지는 경우, 평균값의 경우의 전단응력을 비교 분석하였다.(Fig 6)

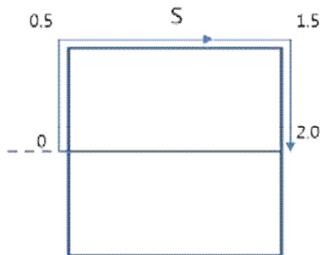


Fig. 5. 사용한 s 좌표계

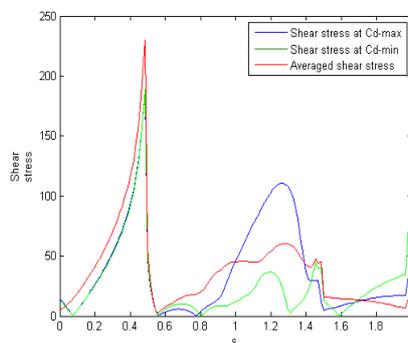


Fig 6. Re=22000 경우의 표면 전단응력

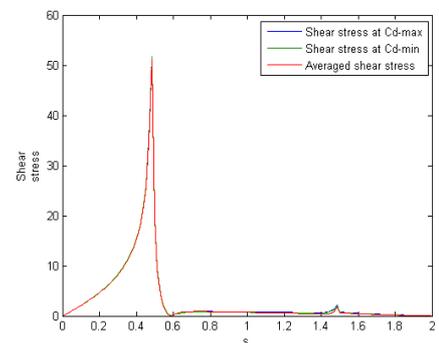


Fig 7. Re=100 경우의 표면 전단응력

Re=22000경우의 표면에서의 전단응력을 살펴보면, 실린더가 받는 전체 항력의 크기에 상관없이 3가지

경우 모두 $s=0.5$ 인 꼭짓점에서 모두 비슷하게 최대의 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 대체로 비슷한 분포를 보이고 최대값의 차이도 크지 않다. 또한, 항력의 크기에 따라서 변화를 보이고 있지만, $s=1.0$ 에서 1.5 사이의 영역(상단부)에서 또한 높은 전단응력을 보이고 있다. 이는 항력의 크기에 따라 약간씩 변화하는데, 평균 항력의 경우에는 조금 앞부분에서부터 전단응력의 값이 증가하고 $s=1.5$ 근방까지 계속 증가하는 모습을 보이고 있다. 항력의 크기가 큰 경우에는 전단응력의 값이 커지기 시작하는 s 의 크기가 조금 더 큰 값을 보이고, 항력의 크기가 최대가 되는 곳은 $s=1.5$ 보다 약간 작은 값을 보인다. 반대로 항력의 크기가 가장 작은 경우를 살펴보면, $s=1.0$ 에서 1.5 사이의 영역에서 높은 전단응력이 발생하는 모습은 관측 가능하지만, 발생하는 정도가 가장 작은 모습을 보인다. 또한 $s=2$ 근방에서도 전단응력이 상승하는 모습을 보이고 있는데, 3가지 경우 모두 비슷한 모습을 보이고 있다. 전체적인 전단응력의 크기는 $s=0.5$ 부근에서 나타나는 최대 전단응력의 절반의 크기를 보이고 있으며, 나머지 부분에서는 전체적으로 균일한 모습을 보인다.

$Re=100$ 의 경우와 비교해보면, 서로 다른 모습이 명확하게 구분된다. Fig 7은, Fig 6과 동일하게 항력이 제일 큰 경우, 작은 경우, 평균의 경우에서 표면에서의 전단응력을 표현하였다. 난류유동인 $Re=22000$ 의 경우와는 달리 3가지 경우 모두 비슷한 분포를 보인다. 하지만, 최대 응력은 공통되게 $s=0.5$ 의 꼭짓점에서 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 EDISON-CFD를 사용하여 사각실린더 주위의 유동 특성에 관한 수치적인 연구를 수행하였다. 본 연구에서 고려한 레이놀즈수(Re)는 100과 22000이다. 선행 논문의 수치 및 실험 결과와 비교하여 EDISON-CFD에서도 기존의 결과와 잘 일치하는 결과를 보여 주고 있음을 확인하였다. 실린더 표면에서의 전단응력은, $s=0.5$ 부근의 꼭짓점(박리점)에서 최대값을 갖지만, $s=1.0\sim 1.5$ 의 구간, $s=2.0$ 의 부근의 구간에서도 높은 값을 보임을 관찰하였다. 또한 항력의 크기에 따라서 표면에서의 전단응력이 변화함을 확인할 수 있다. 이상의 결과로 난류 와 흐름이 사각 실린더 주위 특히 상부, 후방에도 전단응력에 중요한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Okajima, A., 1982, "Strouhal number of rectangular, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.123, pp. 369~398.
- (2) Sohankar, A., Norberg, C., Davidson, L., 1997, "Numerical simulation of unsteady low Reynolds number flow around rectangular cylinders at incidence", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69~71., pp. 189~201.
- (3) 박용갑, 손창민, 2010, "종횡비 변화에 따른 사각실린더 주위의 유동 특성에 관한 수치적 연구", *설비공학논문집, 제22권 제 8호*, pp. 523~529.
- (4) Franke, R., Rodi, W., "Calculation of vortex shedding past a square cylinder with various turbulence models", *Turbulent Shear Flows 8, Springer, New York*, 1993, pp. 189~204
- (5) Kato, M., Launder, B.E., 1993, "The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders", Proc. 9 th symp. Turbulent Shear Flows, Kyoto, 10-4-1
- (6) Bosch, G., Rodi, W., 1998, "Simulation of vortex shedding past a square cinder with different turbulence models", *International Journal for numerical methods in fluids*, Vol. 28 pp. 601~616.
- (7) Cheng, M., Whyte, D. S., Lou, J., 2007, "Numerical simulation of flow around a square cylinder in uniform-shear flow", *Journal of Fluid and Structures*, Vol. 23 pp. 207~226.
- (8) B.E Lee, The effect of turbukence on the surface pressure field of a square cylinder, *J. Fluid Mech.*, 69, part 2, 263-282