

원형 디스크 주위 유동에 대한 RANS 유동해석 비교 연구

유남규* · 김병재*†

Comparative study of flow over a circular disk using RANS turbulence models

Nam Kyu Ryu* and Byoung Jae Kim*†

Abstract For a flow normal to a circular disk, the flow separation occurs from the edge of the disk and the flow recirculation zone exists behind the disk. Many existing studies conducted simulations of flow normal to a circular disk under low Reynolds numbers. Some studies performed LES or DES simulations under high Reynolds numbers. However, comparative study for different RANS models for high Reynolds numbers is very limited. This study presents numerical simulations of a flow normal to a circular disk using Realizable $k-\epsilon$ model and SST $k-\omega$ model. The recirculation bubble length and drag coefficient were compared with the experimental data. The SST $k-\omega$ model showed the excellent predictions for the recirculation bubble length and drag coefficient.

Key Words : Circular Disk (원형 디스크), Drag coefficient(항력계수), Turbulent model(난류모델)

1. 서론

물체 주위 유동은 응용성 측면에서 매우 중요하며, 오랜 연구 역사가 있다. 원형 디스크는 지금까지 자주 사용된 기본 형상 중 하나이다. 원형 디스크 주위 유동을 실험적으로 측정하기 위해, 초기연구에서는 디스크 자체를 챔버 내에서 움직이거나, 최근에는 풍동을 이용하였다⁽¹⁻³⁾.

원형 디스크 주위 유동에 대한 수치해석 연구는 단순한 형상임에도 비교적 최근에 수행되었다. 초

기 연구는 낮은 레이놀즈 수 영역에서 이루어졌다. Shenoy (2008), Fabre (2008), Meliga (2009), Chrust (2010)은 500 이하의 저 레이놀즈 조건에서 원형 디스크 주위 유동을 해석하였다⁽⁴⁻⁷⁾. 비교적 높은 레이놀즈 수 영역의 난류유동 조건에서의 수치해석은 LES (Large Eddy Simulation) 방법을 이용하는 연구가 많다. Zhong (2012), Yang (2015), Tian (2016)은 $10^4 \sim 10^5$ 범위의 비교적 고 레이놀즈 수 조건에서 원형 디스크의 주위 유동과 후류에 대한 해석을 수행하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

LES는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있지만 많은 시간과 계산 자원을 요구하는 비용적인 문제도 있다. 이에 RANS 방식을 이용하여 해석하려고 하는 시도도 있었다. 대표적으로, RANS ($k-\omega$)와 LES를 이용하여 원형 디스크 주위 유동을 해석하고 이를 비교한 Roohi (2016) 연구, RANS ($k-\omega$), DES, LES 등 여러 난류 모델을 비교한 Breuer

† Department of Mechanical Engineering,
Chungnam National University, 99 Daehak-ro,
Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea,
Assistant Professor
E-mail: bjkim@cnu.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering,
Chungnam National University, Ph. D student

(2003)의 연구가 있다^(11,12). 그러나 원형 디스크 주위 유동에 대한 수치연구에서 RANS 모델 간의 차이에 대한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 대표적으로 Realizable $k-\varepsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 이용해 원형 디스크 주위 유동의 특성을 예측하고, 이를 기존의 실험 및 수치해석 연구와 비교한다. 이를 통해 원형 디스크 유동해석에 합리적인 난류 모델을 제시한다.

2. 수치해석 조건 및 방법

2.1 해석 조건

그림 1은 원형 디스크 유동 해석을 위한 원통형 계산영역을 보여준다. 원형 디스크는 직경이 D 이고 두께는 $0.02D$ 이다. 외부 유동을 해석하므로 유동영역의 입구와 출구는 디스크로부터 각각 $5D$ 와 $10D$ 만큼 거리를 두었다. 따라서 전체 계산영역은 직경이 $10D$ 이고 길이는 $15D$ 가 된다. 유체는 비교 대상 실험들과 동일한 대기압 상온 상태의 공기이다^(3,13). 수치해석은 두 종류의 실험 조건에 대해 수행되었는데, 해석에 사용된 원형 디스크 직경은 실험에 따라 $D = 50 \text{ mm}$ 또는 76.2 mm 로 설정하였다.

입구는 속도 조건, 최외각 경계는 미끄럼 조건, 출구는 압력 조건을 부여하였다. 실험에 따라 디스크 직경 기준으로 레이놀즈 수가 2.1×10^5 또는 1.5×10^5 가 되는 입구속도를 부여하였다. 입구의 난류 조건은 5%의 강도와 10의 점성계수비로 부여하였다. 수치해석은 ANSYS FLUENT를 이용하여 진행되었다. 그림 2는 격자 생성을 위해 분할된 계산 영역과 원형 디스크 모습을 보여준다.

그림 3은 원형 디스크의 상부 모서리 부근에서 생성된 격자 모습을 보여준다. 수치해석의 정확도와 효율적인 계산 자원 활용을 위해 벽 근처에는 조밀한 격자를 배치하고 원형 디스크에서 멀어질수록 큰 격자를 배치하였다.

격자 민감도 확인을 위해 원형 디스크 벽면으로부터 첫번째 격자 크기가 $y^+ = 1$ 을 유지하되, 8백만개 ~ 1천 5백만개 사이에서 총 4개의 서로 다른

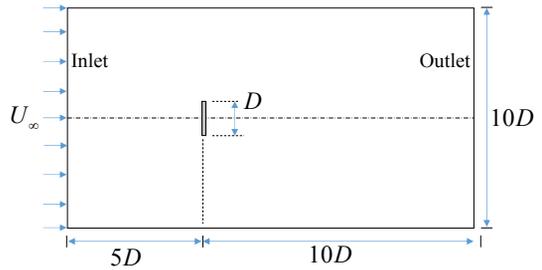


Fig. 1. Side view of the cylindrical simulation domain

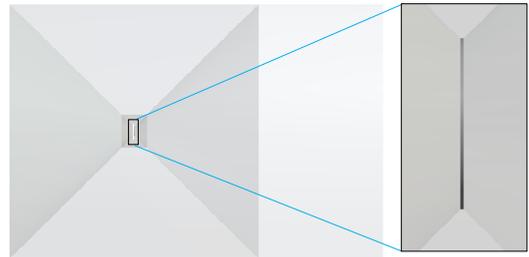


Fig. 2. Simulation domain division for mesh generation

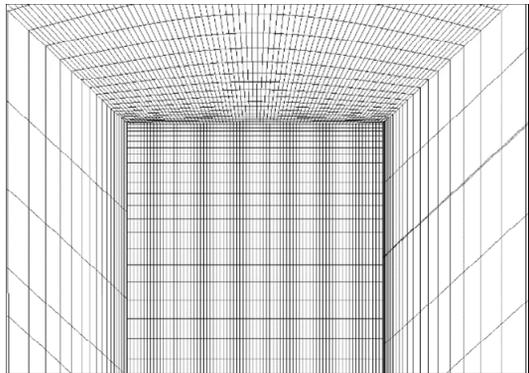


Fig. 3. Mesh near the upper edge of the circular disk

격자 수를 가진 격자를 테스트하였다. 격자 수렴성이 확인된 12,062,403개 격자를 해석에 사용하였다.

2.2 수치해석 방법

원형 디스크 주위의 난류 유동 해석하기 위해 Realizable $k-\varepsilon$ 모델과⁽¹⁴⁾ SST $k-\omega$ 모델을⁽¹⁵⁾ 사용하여 그 결과를 비교하였다. 두 모델에 대한 자세한 내용은 ANSYS FLUENT 매뉴얼⁽¹⁶⁾에 기술

되어 있다. 두 모델의 주요 특징은 아래와 같다.

Realizable $k-\varepsilon$ 모델에서 난류점성이 아래와 같이 계산된다.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

표준 $k-\varepsilon$ 모델과 달리 C_μ 가 상수가 아니며, 유동장 정보에 따라 달라진다. 따라서 표준 $k-\varepsilon$ 모델에 비하여, 경계층, 유동박리, 재순환영역 예측이 우수한 경향을 갖는다. Realizable $k-\varepsilon$ 모델에 사용되는 변수는 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 로 설정하였다. 벽면처리 기법으로 원형 디스크 표면에 Enhanced Wall Treatment 방법을 적용하였다.

SST $k-\omega$ 모델은 자유흐름에 적합한 $k-\varepsilon$ 모델과 경계층 해석에 적합한 $k-\omega$ 모델이 결합되어 있다. 난류점성은 아래와 같이 계산된다.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max[1/\alpha^*, SF_2/(a_1\omega)]} \quad (2)$$

여기서 S 유동변형률 크기이다. 난류점성이 실제보다 크게 계산되는 것을 방지하여 더 나은 유동박리 예측을 제공한다. 일반적으로, SST $k-\omega$ 모델은 표준 $k-\omega$ 에 비하여 좀 더 복잡한 유동에서 우수한 예측을 보여준다. SST $k-\omega$ 모델에 사용되는 변수는 $\sigma_{k,1} = 2.0$, $\sigma_{\omega,1} = 2.0$, $\sigma_{k,2} = 1.0$, $\sigma_{\omega,2} = 1.168$, $\beta_{1,1} = 0.075$, $\beta_{1,2} = 0.0828$ 로 설정하였다.

압력-속도 커플링은 SIMPLE 방식을 사용하였으며, Cell Based 최소차승법으로 진행되었다. 이산항의 계산에서 난류운동에너지는 1차 Upwind로, 압력과 모멘텀은 2차 Upwind로 설정하였다. Time step은 10^{-5} 초로 매우 작게 설정하였다. 각 time step 당 수렴 잔차 조건은 모든 변수에 대하여

2×10^{-5} 으로 설정하였다.

해석이 정상상태에 도달하기 위해 물리적 시간으로 1분 계산을 수행하였으며(총 6×10^6 번 계산), 그 후 신뢰성 있는 시간평균 결과를 얻기 위해 1분의 물리적 계산을 추가적으로 수행하였다. 본 논문에서 보여주는 결과는 후반 1분 간 데이터로부터 시간평균한 결과이다.

3. 결과

두 종류의 실험에 대하여 두 난류모델을 각각 사용하여 해석을 수행하였다.

첫 번째 해석은 Berger 실험 조건에서 수행되었다. Berger 실험은 원형 디스크 후류의 재순환영역을 실험적으로 보고하고 있다⁽³⁾. 실험에 사용된 디스크 직경은 50.0 mm이며, 수치해석에서도 원형 디스크 길이를 50.0 mm로 하였다. 디스크 직경과 입구속도를 기반으로 한 레이놀즈 수는 2.1×10^5 이다.

그림 4는 Realizable $k-\varepsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 각각 사용하였을 때, 시간평균 유동장의 유선을 보여주며, 그림 5는 시간평균 유동장의 축방향 유속 분포를 보여준다. 보는 바와 같이 두 모델의 계산결과가 상당히 차이가 있다.

원형 디스크 중심을 통과하는 라인에서 수평방향 유속 부호가 바뀌는 지점과 디스크까지의 거리를 재순환영역 길이(L_w)라 하고, 시간평균 유동장에서의 재순환영역 길이를 $\overline{L_w}$ 라 한다. 그림4에서 $\overline{L_w}$ 는 디스크 중앙(원점)에서 재순환영역이 끝나는 지점까지의 수평방향 거리가 된다. 원형 디스크 하류 재순환영역이 $k-\varepsilon$ 모델일 때 더 길게 형성됨을 볼 수 있다.

표 1은 $\overline{L_w}$ 값에 대하여, 본 연구 해석 결과, LES를 기준 문헌 결과, 실험 결과를 비교하고 있다. SST $k-\omega$ 모델 해석 결과가 실험 결과에 매우 근접함을 볼 수 있으며, LES 결과 보다도 더 나은 예측 값을 보여준다. 여기서 LES는 레이놀즈 수가 1.5×10^5 일 때 결과이나, 레이놀즈 수가 충분히 크면 유동 구조는 레이놀즈 수에 크게 변하지 않을

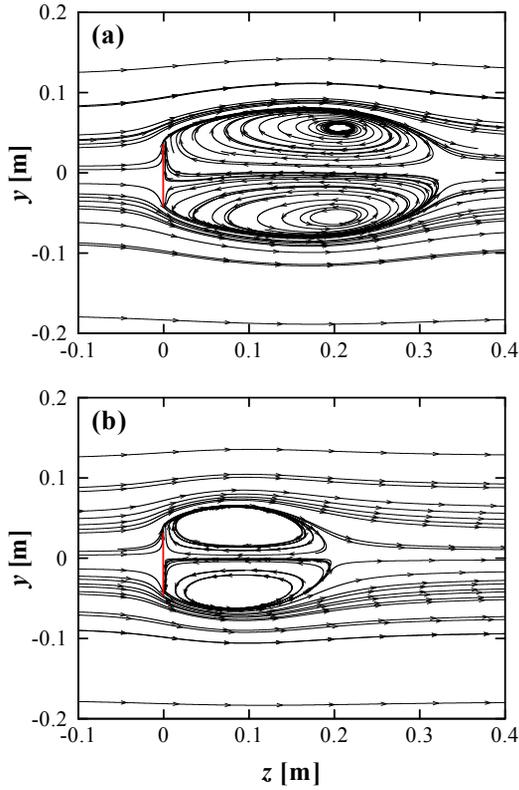


Fig. 4. Streamlines of the time-averaged flow field: (a) Realizable $k-\varepsilon$; (b) SST $k-\omega$

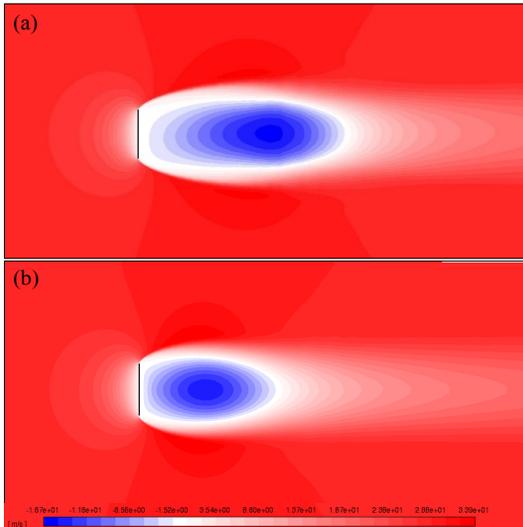


Fig. 5. Time averaged axial (horizontal) velocity contours (a) Realizable $k-\varepsilon$; (b) SST $k-\omega$

것이라 판단되어 비교에 사용되었다. Realizable $k-\varepsilon$ 모델은 실험과 차이가 큰 예측을 보여준다. 그림4에서 보는 바와 같이 원형 디스크 모서리에서 유동박리 현상이 일어나고, 재순환영역에서는 유동이 회전을 한다. 상기 결과는 $k-\varepsilon$ 난류모델은 회전유동 예측 정확도가 높지 않은 경향을 잘 보여준다. 또한 $k-\varepsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점을 결합한 SST $k-\omega$ 모델이 유동박리와 회전유동에 유리하다는 사실도 잘 보여준다.

두번째 해석은 Roos실험 조건에 대해 수행되었다. 이 실험은 직경 76.2 mm 원형 디스크에 대하여 항력계수를 보고하고 있다⁽¹³⁾. 수치해석에서의 원형 디스크 직경도 76.2 mm로 설정하였다. 디스크 직경과 입구속도를 기반으로 한 레이놀즈 수는 1.5×10^5 이다.

Table 1. Comparison of recirculation bubble lengths

Case	$\overline{L_w} / D$
Realizable $k-\varepsilon$	4.12
SST $k-\omega$	2.62
Experiment [3]	2.5
LES [9]	2.61 - 2.64

Table 2 Comparison of the drag coefficients

Case	$\overline{C_d}$
Realizable $k-\varepsilon$	1.03
SST $k-\omega$	1.18
Experiment [13]	1.15 - 1.28
LES [9]	1.126 - 1.124

표 2는 본 수치해석의 결과로부터 얻어진 시간 평균 항력계수를 실험 결과⁽¹⁵⁾ 및 LES결과를 비교하고 있다⁽⁹⁾. 항력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_D = \frac{8F_d}{\rho U_\infty^2 \pi D^2} \quad (3)$$

여기서 F_d 는 항력이며 U_∞ 는 입구 유속이다. SST $k-\omega$ 모델 결과는 실험값과 유사함을 볼 수 있다. LES 결과도 실험값과 유사하다. 그림 6은 시간평균 압력 분포를 보여준다. 두 모델은 원형 디스크 전방에서 유사한 압력 분포를 보여주나, 디스크 후방에서는 다른 압력 분포를 보여준다. 이 결과를 통해서도 압력이 낮은 재순환영역이 $k-\varepsilon$ 모델일 때 더 넓음을 확인할 수 있다.

마지막으로 그림 7은 순간 와도 분포를 보여준다. 상부 모서리와 하부 모서리에서 와도는 각각 음수와 양수의 값을 가진다. 정성적으로는 타당해 보이나, RANS 모델의 특성상 LES 를 이용한 기존 해석연구⁽⁹⁾ 보다는 와도 예측이 정확하지는 않다.

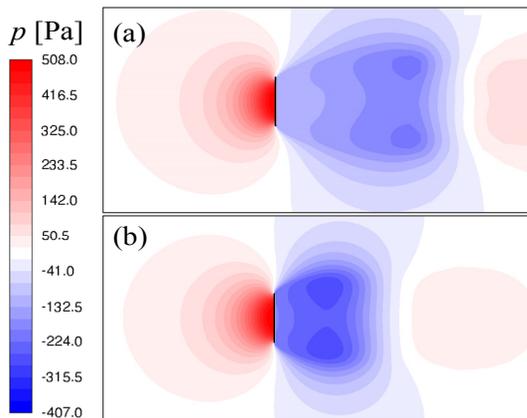


Fig. 6. Time averaged pressure contours: (a) Realizable $k-\varepsilon$; (b) SST $k-\omega$

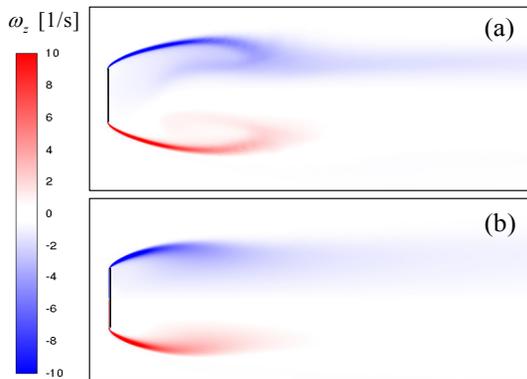


Fig. 7. Instantaneous vorticity contours: (a) Realizable $k-\varepsilon$; (b) SST $k-\omega$

그림 7에서는 기존 LES 결과와 달리 와도의 세밀한 국소 변화가 관찰되지 않는다.

4. 결론

유체의 흐름 방향에 수직한 원형 디스크의 주위 유동을 Realizable $k-\varepsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 이용하여 해석하였다. 디스크 직경 기반 레이놀즈 수는 1.5×10^5 과 2.1×10^5 이다. 원형 디스크 후류의 재순환영역 길이와 디스크에 작용하는 항력계수를 실험 값과 비교하였다.

Realizable $k-\varepsilon$ 모델은 재순환영역 길이와 항력 계수 모두 실험에서 벗어난 값을 보여 예측에 적합하지 못한 결과를 보였다. 반면 SST $k-\omega$ 모델은 실험과 매우 잘 일치하였다. 이 결과는 유동 박리 현상이 일어나고 재순환영역이 있는 회전 유동에 대하여, $k-\varepsilon$ 모델은 예측 정확도가 높지 않았으나 SST $k-\omega$ 모델은 예측 정확도가 비교적 높다는 일반적인 사실에도 부합한다.

저항계수와 재순환영역길이는 일종의 평균 값이라 볼 수 있다. SST $k-\omega$ 모델이 이러한 평균 값을 잘 예측하기는 하였지만, 와도의 세밀한 국소 변화가 관찰되지 않았다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단터의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A2C1010460)

REFERENCE

- 1) Marshall, D. and Stanton, T.E. (1931) On the eddy system in the wake of flat circular plates in three dimensional flow. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character 130 (813), 295-301.
- 2) Roberts, J. (1973) Coherence measurements in an axisymmetric wake. AIAA Journal 11 (11),

- 1569-1571.
- 3) Berger, E. et al. (1990) Coherent vortex structures in the wake of a sphere and a circular disk at rest and under forced vibrations. *Journal of Fluids and Structures* 4 (3), 231-257.
- 4) Shenoy, A. and Kleinstreuer, C. (2008) Flow over a thin circular disk at low to moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* 605, 253.
- 5) Meliga, P. et al. (2009) Global mode interaction and pattern selection in the wake of a disk: a weakly nonlinear expansion. *Journal of Fluid Mechanics* 633, 159.
- 6) Fabre, D. et al. (2008) Bifurcations and symmetry breaking in the wake of axisymmetric bodies. *Physics of Fluids* 20 (5), 051702.
- 7) Chrust, M. et al. (2010) Parametric study of the transition in the wake of oblate spheroids and flat cylinders. *Journal of fluid mechanics* 665, 199.
- 8) Yang, J. et al. (2015) Low-frequency characteristics in the wake of a circular disk. *Physics of Fluids* 27 (6), 064101.
- 9) Tian, X. et al. (2016) Large-eddy simulations of flow normal to a circular disk at $Re = 1.5 \times 10^5$. *Computers & Fluids* 140, 422-434.
- 10) Zhong, H.-J. and Lee, C.-B. (2012) The wake of falling disks at low Reynolds numbers. *Acta Mechanica Sinica* 28 (2), 367-371.
- 11) Breuer, M. et al. (2003) Comparison of DES, RANS and LES for the separated flow around a flat plate at high incidence. *International journal for numerical methods in fluids* 41 (4), 357-388.
- 12) Roohi, E. et al. (2016) Simulation of three-dimensional cavitation behind a disk using various turbulence and mass transfer models. *Applied Mathematical Modelling* 40 (1), 542-564.
- 13) Roos, F.W. and Willmarth, W.W. (1971) Some experimental results on sphere and disk drag. *AIAA journal* 9 (2), 285-291.
- 14) Shih, T. et al. (1994) A new ke eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-Model development and validation. NASA TM 106721.
- 15) Menter, F.R. (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal* 32 (8), 1598-1605.
- 16) Fluent, A. (2011) *Ansys fluent theory guide*. ANSYS Inc., USA 15317, 724-746.