EDISON_전산열유체를 활용한 풍력발전기 타워의 후류 불안정성 억제에 관한 수치연구

김 수 용,¹ 진 도 현,¹ 이 근 배,² 김 종 암^{*1}

¹서울대학교 기계항공공학부

²서울대학교 협동과정 계산과학전공

NUMERICAL ANALYSIS FOR SUPPRESSING UNSTEADY WAKE FLOW ON WIND TURBINE TOWER USING EDISON_CFD

S.Y. Kim,¹ D.H. Jin,¹ K.B. Lee² and C. Kim^{*1}

¹Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Univ.

²Interdisciplinary Program in Computational Science & Technology, Seoul Univ.

The performance of the wind turbine is determined by wind speed and unsteady flow characteristics. Unsteady wake flow causes not only the decline in performance but also structural problems of the wind turbine. In this paper, conceptual designs for the wind turbine tower are conducted to minimize unsteady wake flow. Numerical simulations are performed to inspect the shape effect of the tower. Through the installation of additional structures at the rear of the tower, the creation of Karman vortex is delayed properly and vortex interactions are reduced extremely, which enhance the stability of the wind turbine. From the comparative analysis of lift and drag coefficients for each structure, it is concluded that two streamwise tips with a splitter plate have the most improved aerodynamic characteristics in stabilizing wake flow.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 풍력발전기(Wind Power Generator), 비정상유동(Unsteady Flow), 와류 진동(Vortex Shedding), 에디슨_전산열유체(EDISON_CFD)

1. 서 론

최근 들어 화석에너지의 점진적 고갈로 인해 친환경 에너지에 대한 경제적, 사회적인 관심이 대두되고 있다. 또한 석탄, 석유와 같은 화석에너지의 사용은 이산화탄소 및 기타 유해 가스 배출로 인한 지구온난화를 유발시키므로, 이에 대한 대책 마련을 위해 친환경 에너지의 필요성이 제기 되고 있다.

풍력발전은 활발한 연구가 진행되고 있는 친환경 에너지 분야 중 하나로서, 바람이라는 무제한적인 환경 에너지를 이용하여 전기 에너지를 생산하며 전기 이외의 다른 부산물을

발생시키지 않기 때문에 미래 친환경 에너지원으로 주목받고 있다. 풍력발전기에 대한 연구는 주로 운용 환경과 성능 개선에 대해 진행되어 왔으며, 크게 유체역학적, 진동학적, 구조역학적 연구로 구분 지을 수 있다. 이 중에서 유체역학적인 연구는 풍력발전기의 성능을 결정짓는 블레이드 형상 설계와 밀접한 관련이 있으므로 그에 대한 다양한 실험적, 수치적 연구가 진행되어 왔다. Barber et al.[1]은 블레이드에서의 비정상 유동이 풍력발전기 성능에 미치는 영향에 대한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였으며, Enevoldsen and Mork[2]는 블레이드 주위 비정상 유동으로 인해 발생하는 진동현상 억제에 대한 연구를 수행하였다.

블레이드뿐만 아니라 발전기 타워 후류에서 발생하는 유동 불안정성은 풍력발전기 전체에 진동을 유발시키기 때문에 풍력발전기 설계 시 그 영향을 면밀히 고려해야 한다. 타워 후류 불안정성에 대한 선행 연구로 실린더 후류의 유동 불안정성에 관한 연구들이 수행되었다. Zdravkovich[3]는 실린더 후

Received: September 10, 2012 Revised: February 26, 2013,
Accepted: February 27, 2013.

* Corresponding author, E-mail: chongam@snu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.036>

© KSCFE 2013

Fig. 1 Structure of wind turbine tower; (a) base structure, (b) splitter plate, (c) radial structure, (d) streamwise structure, (e) combined structure 1, (f) combined structure 2

류의 비정상유동을 억제하기 위해 실린더 표면에 다양한 구조물을 부착하여 그 영향을 분석하는 실험적 연구를 수행하였으며, Kwon and Lee[4]는 원기둥에 나선형 구조물을 부착하여 수행한 실험을 통해 후류의 유동 특성을 분석하였다. Kim et al.[5]은 풍력발전기 타워의 고유 진동수와 외류의 고유진동수가 비슷할 때 발생하는 공명 현상에 대한 수치연구를 수행하였으며, Apelt et al.[6]과 Kwon and Choi[7]는 실린더에 부착된 Splitter plate의 길이와 레이놀즈수를 변화시키며 수치해석을 수행하였고 그에 따른 비정상유동 특성을 분석하였다.

선행 연구에서 풍력발전기 타워 주위의 비정상 유동을 억제할 수 있는 방법을 제안하였으나, 대부분 실제 풍력발전기가 운용되는 영역보다 매우 낮은 레이놀즈수 영역에 한정되어 있으며, 외류를 억제하는 부가 구조물 형상이 복잡하거나 길이 방향으로 연속적이므로 실제 발전기 타워에 적용하는 것이 매우 제한적이다. 본 연구에서는 풍력발전기 타워 후류에서 발생하는 유동 불안정성을 효과적으로 억제할 수 있으며 실제 발전기 타워에서 적용 가능하도록 타워 후면에 부착 가능한 단순한 형상을 설계하고, 다양한 형상 하에서 나타나는 공력 특성을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 EDISON_전산열유체 시스템[8-11]을 활용하여 수행하였다. EDISON_전산열유체 시스템(<http://www.joomla>).

Fig. 2 Definition of parameter ; (a) radial structure, (b) streamwise structure

edison.re.kr/index.php/welcome)은 웹기반의 교육·연구용 시스템으로서, 격자 제작, 수치해석, 결과 가시화 등 수치해석의 전 과정을 시공간에 구애받지 않고 웹상에서 수행할 수 있다.

2.1 구조물형상

본 연구에서 사용된 구조물 형상은 총 6가지이다. Fig. 1은 풍력발전기 타워의 단면을 나타낸 것으로 Fig. 1(a)의 풍력발전기 타워 기본형상을 기준으로 5가지 형태의 구조물을 부착하여 모델링하였다. Fig. 1(b)는 풍력발전기 타워에 Splitter plate를 설치한 형상이며, Fig. 1(c)는 Zdravkovich[3]의 선행연구에서 제시한 형상에 근거하여 반지름 방향의 구조물을 설치한 것이다. Fig. 1(d-f)는 본 연구에서 제안한 형상으로서, Fig. 1(d)는 선행연구[3]에서 제시한 형상을 변형시켜 자유류 방향의 구조물을 설치한 형태이며, Fig. 1(e)는 Splitter plate와 반지름 방향의 구조물을 조합한 형태이다. 마지막으로 Fig. 1(f)는 Splitter plate와 자유류 방향의 구조물을 조합한 형태이다. 각 형상은 Fig. 1(a)에서 Fig. 1(f) 순서로 Base structure, Splitter plate, Radial structure, Streamwise structure, Combined structure 1, Combined structure 2로 명명한다. Fig. 2는 타워 형상을 결정짓는 파라미터를 나타내며, Splitter plate의 길이를 s 로, 반지름 방향 구조물의 길이를 t 로, 자유류 방향 구조물의 길이를 p 로 명명하였고, 타워 반지름 길이 R 에 대한 길이 s/R , t/R , p/R 을 변화시켜가며 수치해석을 수행하였다. s/R 은 1/2, 1, 3/2에 대하여, p/R 과 t/R 은 1/8, 1/4, 1/2에 대하여 각각 계산을 수행하였다.

2.2 지배방정식

본 연구에서는 풍력발전기 타워 주위 유동을 해석하기 위하여 2차원 비정상 비압축성 RANS (Reynolds-Averaged

Fig. 3 Pressure distribution(up) and skin friction(down) of base structure

Navier-Stokes) 방정식을 적용한 EDISON 전산열유체 시스템의 2D_Incomp 해석자[8]를 사용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다. 여기서 위첨자 (̄)는 레이놀즈 평균값을 나타낸다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla \bar{p} + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \bar{u} \tag{2}$$

비압축성 방정식은 속도장과 압력장이 연결되어있지 않으므로 각 sub-iteration마다 연속방정식을 만족시키는 pseudo compressibility 방법이 적용되었다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \nabla \cdot \vec{u} \tag{3}$$

여기서 τ 는 pseudo time, β 는 pseudo compressibility parameter를 나타낸다. 2D_Incomp 해석자에 적용된 수치기법은 다음과 같다. 비정상 유동장을 해석하기 위하여 이중 시간 전진법(dual time stepping)이 사용되었으며, 비점성항은 flux difference splitting 방법에 기초한 풍상차분법을, 점성항은 중앙 차분법이 적용되었다. 또한 MUSCL을 이용하여 비점성항은 3차 정

Fig. 4 Pressure contour(left) and aerodynamic coefficients(right) of base structure

확도, 점성항은 2차 정확도로 계산되었다. 시간 전진은 내재적 시간 적분법인 LU-SGS 방법이 사용되었고, 난류 유동장 해석을 위해 Menter’s $k-\omega$ SST 난류 모델이 사용되었다. 적용된 수치해법의 자세한 내용은 참고문헌[12]에 잘 나와 있다.

3. 연구 결과

해석 격자는 모든 케이스에 대하여 약 4만~4.5만개의 O-type으로 제작하였고, 표면에서 첫 번째 격자 간격은 y^+ 가 1일 때의 간격으로, 원방 길이는 지름의 20배로 구성하였다. 일반적인 풍력발전기 주변의 평균 풍속은 약 10 m/s이며, 본 연구에서 적용한 풍력발전기는 정격출력이 2MW로서 타워의 지름은 5 m, 높이는 80 m이다(Reynolds 수 = 3.33×10^6).

무차원 시간간격은 0.05 (0.025초)로 두었으며, 타워 후류의 유동이 충분히 발달된 후의 결과를 분석하기 위하여 6,000번의 반복계산(150초)을 수행하였다.

수치 계산 결과를 검증하기 위하여 기본 형상의 표면 압력 계수 및 마찰계수를 기존 선행 연구결과들[13-15]과 비교하였다. Fig. 3은 레이놀즈수 3.6×10^6 에 대한 실험결과 및 선행 수치해석 결과들을 본 연구의 해석결과와 비교한 그림이다. 그림을 통해 실험 결과와 수치해석 결과들에서 값의 차이는 존재하나 경향성은 상당히 유사하게 나타남을 확인할 수 있고, 수치해석 결과들은 대체적으로 서로 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 또한, 세 가지 조밀도(3.5만, 4.5만, 6.5만)의 격자에 대한 수치해석을 통해서 세 격자들의 해석 결과가 서로 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 약 4만~4.5만 개의 격자를 제작하여 해석을 수행하였다.

3.1 Base structure

타워 후방에 부착한 부가 구조물의 효과를 비교하기 위하여 Base structure 주위 유동 해석을 수행하였다. Fig. 4는 Base structure 주위 압력장과 시간에 따른 공력계수를 나타낸다. 타워 상부와 하부에서 주기적으로 떨어져나가는 와류의 영향으

Fig. 5 Pressure contour and streamline(a, b) and aerodynamic coefficients(c, d) of splitter plate

로 양력계수와 항력계수가 Fig. 4에서와 같이 진동하는 것을 알 수 있다. Base structure에서 후류 재순환 영역의 평균 크기는 타워 반경의 약 1.3배 정도이다.

3.2 Splitter plate

Fig. 5(c), (d)는 s/R 이 1/2, 1, 3/2 일 때의 시간에 따른 양력계수와 항력계수를 나타낸다. s/R 이 1/2일 때 Base structure에서 발생하는 와류의 평균 크기에 대한 Splitter plate의 길이의 비는 0.38 정도이다. 이때 Base structure에 비해 양력계수의 진폭은 약 1/3정도로 감소하고 항력계수의 평균값은 약 1/2수준으로 감소한다(Table 1). Splitter plate는 Fig. 5(a), (b)와 같이 타워 후방에서 발생하는 와류의 상호 간섭을 방해하여 후류의 불안정성을 억제시키므로 양력계수 진폭과 항력계수의 평균값이 감소하게 된다. 그러나 Splitter plate의 길이가 Base structure에서 발생하는 와류의 크기와 비슷하거나 커질 때 양력계수 진폭이 Base structure보다 오히려 더 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는 Splitter plate가 길어지면 와류 간 상호 간섭이 방해되긴 하지만, 타워 후방에서 와류가 Splitter plate 길이에 비례하여 더 크게 성장하고 성장한 와류가 Splitter plate 끝부분에서 박리되면서 더 큰 압력 변화를 만들기 때문이다.

3.3 Radial structure

Fig. 6(c), (d)는 t/R 이 1/8, 1/4, 1/2일 때 양력계수와 항력계수 값을 나타낸다. Radial structure는 Fig. 6(a), (b)에서와 같이 타워 윗면과 아랫면에서 자유류 유동의 흐름을 방해하므로,

Fig. 6 Pressure contour and streamline(a, b) and aerodynamic coefficients(c, d) of radial structure

Radial structure 바로 앞의 유동 속도가 주변보다 상대적으로 낮아진다. 유동 정체로 인한 속도의 감소는 그 부근에서 압력 증가를 의미하며, 결과적으로 타워 윗면과 아랫면에서의 유동 박리에 의한 압력손실을 보상시키므로, Base structure에 비해 양력계수의 진폭이 작아진다. 양력계수 진폭의 크기는 구조물의 길이가 길어질수록 감소하는 경향을 보이는데(Table 1), 이는 구조물의 길이가 길어짐에 따라 자유류 유동의 흐름을 더 정체시켜 속도장과 압력장에 영향을 미치기 때문이다.

반면 항력계수의 평균값은 구조물 길이가 길어질수록 증가한다. 이는 구조물 면적 증가로 인한 항력의 증가 이외에도, Fig. 6(a), (b)와 같이 길이가 증가할수록 타워 후방에 생성되는 와류의 크기가 커지고 생성된 와류가 타워 뒷면에서 보다 오래 유지되므로 상대적으로 큰 압력손실이 발생하기 때문이다.

3.4 Streamwise structure

Fig. 7(c), (d)는 p/R 이 1/8, 1/4, 1/2일 때 양력계수와 항력계수 값을 나타내며, 구조물 길이가 길어질수록 양력 및 항력계수 진폭이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7(a), (b)에서 볼 수 있듯이 Streamwise structure의 길이가 짧을 때는 구조물이 없을 때와 유사하게 와류 박리가 일어나지만, 구조물의 길이가 길어지면 두 개의 Streamwise structure 사이에 와류의 크기가 제한된 채로 박리가 지속적으로 발생하기 때문이다. 그에 따라 상대적으로 $p/R=1/4$, $1/8$ 일 때보다 $1/2$ 일 때 양력 및 항력계수의 진폭이 감소하게 되는 것이다. $p/R=1/2$ 은

Fig. 7 Pressure contour and streamline(a, b) and aerodynamic coefficients(c, d) of streamwise structure

양력 및 항력계수의 진폭을 효과적으로 억제시키지만, 후류에서 나타나는 주기적인 유동 박리 현상은 지속되는 것을 볼 수 있다.

3.5 Combined structure 1

Fig. 8(c), (d)는 $s/R=1$ 인 Splitter plate에 $t/R=1/8, 1/4, 1/2$ 인 Radial structure를 함께 설치한 Combined structure 1의 양력 및 항력계수이다. Table 1에서와 같이 Radial structure의 길이가 길수록 양력계수의 진폭이 증가하고, 항력계수 평균값이 높아지는 경향을 보인다. 이는 Fig. 8(a), (b)에서 나타나는 것과 같이 $t/R=1/2$ 인 경우에 $t/R=1/8$ 에 비해 Radial structure와 Splitter plate 사이에 갇힌 와류가 더 크게 발달되어 박리되기 때문이다. Combined structure 1의 경우 앞선 구조물에 비해 후류 유동의 불안정성은 감소하지만, 여전히 타워 후류의 주기적인 유동 박리 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8 Pressure contour and streamline(a, b) and aerodynamic coefficients(c, d) of combined structure 1

3.6 Combined structure 2

Splitter plate($s/R=1/2$)는 와류 간 상호 간섭을 효과적으로 억제시키지만 Splitter plate의 길이로 인해 Base structure보다 와류의 크기가 더 크게 발달되어 불안정성을 유발시킨다. Radial structure($p/R=1/2$)의 경우 구조물 사이에 박리된 유동을 정제시켜 상하 방향의 불안정성은 다소 줄어들지만 타워 전후의 불안정성은 크게 증가하는 것을 알 수 있다. Streamwise structure($t/R=1/2$)의 경우에는 구조물 사이에 박리된 와류의 크기를 효과적으로 제한시켜 타워 상하 및 전후 방향의 불안정성을 억제시키면서도 불구하고 유동 불안정성이 존재하는 것을 알 수 있다. Combined structure 1은 앞선 3가지 구조물에 비해 후류의 유동장이 상대적으로 안정적이긴 하지만, 불안정성이 여전히 존재하는 것을 알 수 있다.

Splitter plate와 Streamwise structure를 함께 설치한 Combined

Table. 1 Non-dimensional parameters for each structure

Base Structure				Splitter plate				Radial Structure				Streamwise Structure			
C_L Amp.	C_D Aver.	St		s/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St	t/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St	p/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St
1.43	1.45	0.252		1/2	0.487	0.764	0.209	1/8	0.707	0.947	0.240	1/8	1.18	1.04	0.277
				1	1.92	0.732	0.089	1/4	0.538	1.17	0.247	1/4	0.578	0.717	0.240
				3/2	1.97	0.702	0.0577	1/2	0.468	1.59	0.204	1/2	0.241	0.209	0.148
Combined Structure 1 ($s/R=1$)				Combined Structure 2 ($s/R=1/2$)				Combined Structure 2 ($s/R=1$)				Combined Structure 2 ($s/R=3/2$)			
t/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St	p/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St	p/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St	p/R	C_L Amp.	C_D Aver.	St
1/8	0.580	0.522	0.154	1/8	0.639	0.751	0.201	1/8	0.641	0.562	0.215	1/8	0.413	0.605	0.141
1/4	0.656	0.765	0.177	1/4	0.581	0.814	0.198	1/4	0.562	0.699	0.184	1/4	0.452	0.513	0.103
1/2	0.749	1.15	0.153	1/2	0.418	0.826	0.205	1/2	0.343	0.582	0.187	1/2	0.00151	0.202	-

Fig. 9 Pressure contour and streamline(a, b) and aerodynamic coefficients(c, d) of combined structure 2

structure 2의 경우 각 구조물 효과의 단순 중첩이 아니라, 새로운 유동 특성이 나타난다. Table 1을 보면 Splitter plate만 설치한 경우와는 달리 s/R 이 증가할수록 전반적으로 양력계수의 진폭이 감소하는 결과를 확인할 수 있다.

특히 $s/R=3/2$ 이고 $p/R=1/2$ 인 경우 양력계수와 항력계수가 기본형상에 비해 각각 99.9%와 86.1%만큼 감소하였다. Fig. 9(b)의 $s/R=3/2$, $p/R=1/2$ 과 Fig. 4의 Base structure의 유선 분포를 비교해보면, 기본형상에서는 와류가 주기적으로 박리되는 반면, $s/R=3/2$, $p/R=1/2$ 인 경우 와류가 Splitter plate와 Streamwise structure 사이에 완전히 정체되어 주변 유동을 유선형으로 유도한다. 이로 인해 타워 후방의 압력장이 상하 대칭적이고, 압력의 급격한 감소가 사라져 양력계수와 항력계수가 크게 감소한 결과가 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기 타워 후류의 유동 불안정성을 억제하기 위하여 총 6가지 형상에 대해, EDISON_전산열유체 시스템을 활용하여 2차원 비정상 비압축성 난류유동 해석을 수행하였다. 5가지 형상 중 3가지 형상은 선행연구에 근거한 형상이고, 2가지 형상은 단순한 형태의 3가지 형상을 복합적으로 조합하여 본 연구에서 새롭게 제시한 형상이다.

해석 결과, $s/R=3/2$ 인 Splitter plate와 $p/R=1/2$ 인 Streamwise

structure를 함께 설치한 구조물은 주변부의 유동을 유선형으로 유도할 뿐만 아니라, 와류를 Splitter plate와 Streamwise structure 사이에 정체시켜 타워의 후류 불안정성을 가장 효과적으로 억제함을 확인할 수 있었다.

실제 풍력발전기 타워 후류는 블레이드가 발생시키는 와류에 의한 영향을 받게 되는데, 이러한 특성을 고려하여 후류 유동 구조 연구가 진행된다면, 본 연구의 결과와 더불어 향후 풍력 발전기 타워 형상의 기초 설계 시 공력 불안정성을 효과적으로 억제시킬 수 있는 선행 연구가 될 것이다.

후 기

본 논문은 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스 교육허브개발사업(EDISON)의 지원(2012-0006661)과, 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단(08기술혁신E01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 2011, Barber, S., Chokani, N. and Abhari, R.S., "Effect of wake flow non-uniformity on wind turbine performance and aerodynamics," *Proceedings of ASME Turbo Expo*.
[2] 2007, Enevoldsen, I. and Mork, K.J., "Effects of a vibration mass damper in a wind turbine tower," *MECH. STRUCT. & MACH.*, Vol 24(2), pp.155-187.
[3] 1981, Zdravkovich, M.M., "Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp.145-189.
[4] 1994, Kwon, K.J. and Lee, S.J., "Experimental Study on the Vortex Suppression in the Wake of a Cylinder by Surface Protrusions," *KSME*, pp.355-359.
[5] 2010, Kim, J.O., Cho, L. and Kim, S., "Vortex-Shedding and vibration at the towers of wind-turbine generators," *Trans of KSME*, pp.183-184.
[6] 1973, Apelt, C.J. et al., "The effects of wake splitter plates on the flow past a circular in the range $10^4 < R < 5 \times 10^4$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, pp.187-198.
[7] 1994, Kwon, K. and Choi, H., "A Passive Control of Vortex Shedding Using a Splitter Plate Attached to a Circular Cylinder," *KSME*, pp.502-507.
[8] 2011, Lee, K.B., Lee, S., Lee, C., Choi, J.I., Lee, D. and Kim, C., "EDISON_CFD: Development of e-Science-based

- Simulation Software and Contents for Education and Research in Fluid Engineering," *KSME*, pp.2024-2028.
- [9] 2011, Lee, S., Lee, K.B., Oh, S., Choi, S., Park, S.H. and Kim, C., "Development of e-Science-based Fluid Dynamics Software and Contents for Education and Research in Aerospace Engineering on the EDISON_CFD Portal," *KSAS*, pp.370-375.
- [10] 2011, Lee, S., Lee, K.B., Park, S.H., Choi, S. and Kim, C., "EDISON_CFD: Development of Simulation Software and Contents for Education and Research in Computational Fluid Dynamics on the e-Science Infrastructure," *KSCFE*.
- [11] 2011, Lee, S., Lee, K.B., Lee, C., Choi, J.I., Lee D. and Kim, C., "Development of the Simulation Software and Contents for Education and Research in Fluid Engineering on the EDISON_CFD Portal," *KFMA*, pp.8-9.
- [12] 1990, Rogers, S.E. and Kwak, D., "Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations," *ALAA J.*, Vol.28, No.2, pp.253-262.
- [13] 1999, Travin, A., Shur, M., Strelets, M. and Spalart, P., "Detached eddy simulations past a circular cylinder," *Flow Turb. Combust.*, Vol.63, pp.269-291.
- [14] 2009, Ong, M.C., Utnes, T., Holmedal, L.E., Myrhaug, D. and Pettersen, B., "Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high Reynolds numbers," *Marine Structures*, Vol.22, pp.142-153.
- [15] 1968, Achenbach, E., "Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^6$," *Fluid Mech.*, Vol.34, pp.625-639.