

주위 경관을 고려한 360 W급 풍력터빈나무 설계 및 유동해석

하민수¹ · 정원혁² · 최낙준³ · 박영철[†]

(원고접수일 : 2012년 11월 26일, 원고수정일 : 2013년 1월 2일, 심사완료일 : 2013년 1월 18일)

Design and CFD study of 360 W class wind turbine tree in accordance with environmental scenery

Min-su Ha¹ · Won-hyuk Jung² · Nak-joon Choi³ · Young-chul Park[†]

요약: 이 논문은 수직축 헬리컬 풍력터빈을 이용한 360 W급 풍력터빈나무(wind turbine tree)를 개발 하는데 목적이 있다. 설계를 수행한 100 W 급 헬리컬 풍력터빈을 공력해석을 통해 성능을 예측하였다. 풍력터빈 1개의 성능 분석을 한 후 하나의 풍력단지와 같이 하나의 풍력터빈 나무에 4개의 풍력터빈을 설치하여 유동해석 시 출력의 변화를 확인하였다. 본 연구의 결과로부터 수직축 헬리컬 풍력터빈 나무의 결과를 속도분포와 압력분포로 도출하였고, 수치해석으로부터 정격출력 360 W 이상을 확보할 수 있음을 확인하였다.

주제어: 풍력터빈나무, 수직축 풍력터빈, 로터 블레이드, 유동해석, 헬리컬 풍력터빈

Abstract: The objective of this paper is to develop 360 W class wind turbine tree using a helical type wind turbine. The performance of 100 W class helical wind turbine which finished the conceptual design has been forecast through the CFD analysis. After performed the analysis of one wind turbine performance, four wind turbine have been installed at the structure of a tree type and then the change of a output data has been verified through the CFD analysis. In this study, the CFD results of a helical wind turbine tree have been shown by a velocity and pressure distribution. The result could obtain more than rated power 360 W through the CFD analysis.

Keywords: Wind turbine tree, Vertical axis wind turbine, Rotor blade, Flow analysis, Helical wind turbine

1. 서 론

화석연료 사용 등으로 인한 CO₂ 증가는 지구 온난화를 야기하며 기후변화 등 인류 생활에 큰 위협이 되고 있다. 이를 극복하기 위한 신재생에너지에 대한 연구는 선택이 아닌 필수이다[1].

주위 경관을 고려한 풍력터빈 나무는 기존 나무의 개념을 새롭게 풍력터빈에 적용하여 재해석 한 것으로, 줄기 또는 기둥으로부터 가지가 뻗어나가는 개념

을 응용한 것이다. 풍력터빈 나무에 적용되는 설비용량 100 W의 수직축 풍력터빈을 설계하였다. 풍력터빈 나무는 도심 및 공원 등에 설치 가능하여 소음 및 환경적인 요소를 고려하였을 때 100 W의 풍력터빈이 적합하다. 풍력터빈 나무는 단위 용량 100 W 풍력터빈 4기로 구성되도록 설계 하였다. 이 경우 풍력터빈 운전 시 후류에 의한 영향으로 풍력터빈 출력이 감소 될 수 있으며, 이는 단독 설치형 풍력터빈이 풍력발전단지를

† 교신저자: (604-714) 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길 37

동아대학교 기계공학과, E-mail: parkyc67@dau.ac.kr, Tel: 051)200-6991

1 동아대학교 기계공학과 대학원, E-mail: msha@dnde.co.kr, Tel: 051)920-2480

2 ㈜디엔디이, E-mail: whjung@dnde.co.kr, Tel: 051)920-2480

3 ㈜디엔디이, E-mail: njchoi@dnde.co.kr, Tel: 051)920-2480

이를 때에도 유사한 문제가 발생할 수 있는 것으로 설계 및 해석 시 유의하여야 한다[2]. 풍력터빈 나무는 후류의 영향을 최소화하기 위하여 헬리컬 로터의 설치 높이를 다르게 하며, 줄기(타워)나무를 중심으로 설치 각도 또한 다르게 설계하였다. 이러한 이유로 전체 용량은 손실을 고려하여 360 W출력을 나타낼 것으로 예상된다. 설계된 풍력터빈 나무는 전산유동해석을 실시하여 출력을 검증하였다.

2. 헬리컬 로터 및 풍력터빈 나무 설계

2.1 터빈 블레이드 익형 선정

익형은 공력 특성과 구조적인 특성을 감안하여 수직축 풍력터빈 블레이드에서도 널리 사용되는 NACA 0018을 사용하였다[3]. Figure 1은 NACA 0018 익형을 도시한 것이다.

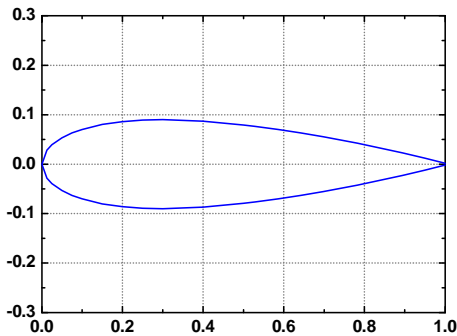


Figure 1: NACA 0018 airfoil

2.2 헬리컬 로터 설계

본 논문에서는 블레이드 출력성능 평가를 위해 100 W급 헬리컬 로터 블레이드의 형상 및 스트럿을 설계하였다.

로터 블레이드는 정격풍속 10 m/s에서 100 W의 출력을 발생 하도록 식 (1)을 이용하여 설계하였다[4].

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 C_p \quad (1)$$

여기서 P , ρ , A , V , 및 C_p 는 각각 정격 출력, 공기 밀도, 수평 면적, 정격 풍속 및 동력 계수를 의미한다. 최종 로터 블레이드 설계 사양은 Table 1에 정리

하였으며 스트럿과 풍력터빈 나무의 블레이드 후류에서 발생하는 성능 저하로 인하여 손실되는 동력을 감안한 결과이다.

Table 1: Design specification of 100 W class helical rotor blade

Item	Description
출력 (P)	100 W
정격 풍속 (V_{∞})	10 m/s
동력 계수 (C_p)	0.16
수평 면적 (A)	1.58 m ²
중횡비 (h/2R)	1.1
로터 반경 (R)	0.60 m
로터 높이 (h)	1.32 m
회전속도 (N)	130 rpm
주속비 (λ)	0.82
솔리디티 (solidity)	0.3
시위길이 (chord length)	0.283 m
블레이드 수(N)	4 EA
블레이드 경사 각도	66.7°

Figure 2는 헬리컬 로터의 3D 모델을 나타내고 있으며, 블레이드, 회전축 그리고 스트럿으로 이루어져 있다.

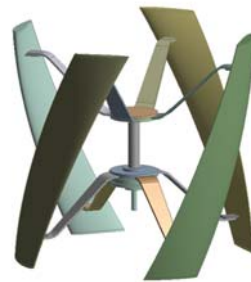


Figure 2: 3D model of a helical rotor

2.3 풍력터빈 나무 설계

풍력터빈 나무는 일반적인 나무에서 가지가 펼쳐지는 개념으로 설계하였다. 풍력터빈을 지지하고 설치하기 위한 타워를 줄기로 하고 타워에서 4개의 가지가

뺏어져 나오는 형상을 가지고 있다. 또한 풍력터빈 작동 시, 각 터빈의 후류에 영향을 미치지 줄이기 위하여 각 가지의 높이를 다르게 정의하고, 나무를 중심으로 각도별로 위치시켜 설계하였다. Figure 3은 설계된 풍력터빈 나무의 3D 모델을 나타내고 있으며, 높이가 낮은 순서부터 WT1 ~ WT4로 정의하였다.

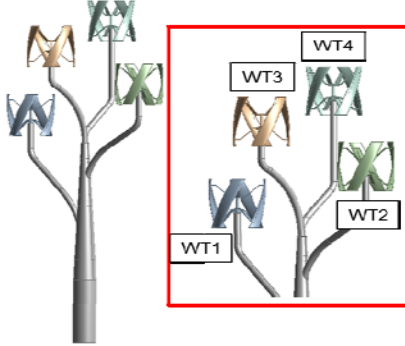


Figure 3: 3D model of the wind turbine tree

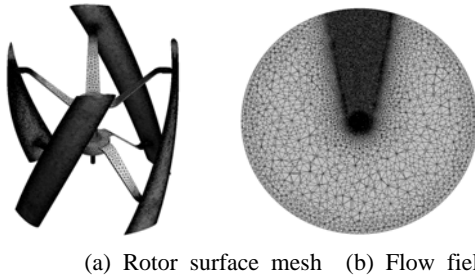
3. 수치해석

수치해석은 총 2가지의 경우에 대하여 수행하였다. 헬리컬 로터의 단일 유동 해석과 풍력터빈 나무 전체 유동 해석을 통하여 출력을 검증하였다.

3.1 헬리컬 로터 단일 유동 해석

3.1.1 헬리컬 로터 격자

Figure 4는 수치 해석을 수행하기 위한 헬리컬 로터 및 전체 유동장에 대한 각각의 계산 격자를 도시한 것이다. 블레이드 표면에서 발생하는 실손에 의한 복잡한 유동 흐름을 정확하게 예측하기 위하여 프리즘(prism) 격자를 벽면 주위로 조밀하게 생성하였다.



(a) Rotor surface mesh (b) Flow field

Figure 4: Numerical grids of helical rotor blade with flow field

Table 2: Mesh information for helical rotor blade with flow field

Item	Description
No. of nodes	4,474,602
No. of elements	21,417,240

유동장 직경은 로터 직경의 8배, 높이는 블레이드 높이의 1.5배로 생성하였다. Table 2에 해석을 위한 격자 정보를 나타내고 있다.

3.1.2 경계조건

헬리컬 로터 단일 유동 해석은 과도상태(transient) 해석을 실시하였다. Figure 5는 해석을 위한 경계조건이 적용되는 영역을 도시한 것이다. 영역은 입구, 출구, 바닥면, 윗면 등으로 구성된다. Table 3은 각 경계조건의 세부내용을 나타내고 있다.

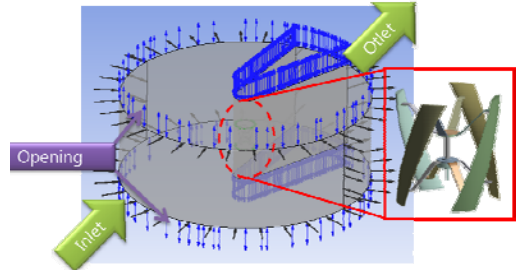


Figure 5: Region of boundary conditions of one helical rotor for CFD analysis

Table 3: Boundary conditions of one helical rotor for CFD analysis

Item	Description
Inlet	10 m/s
Outlet	Atmospheric pressure
Top/Bottom	Opening condition $U_{Opening} = U_{spec}^i + V_{spec}^j + W_{spec}^k$ $i, j = 0, k=1$ (flow direction)
RS interface	General grid interface
Analysis type	Transient

여기서 바닥면과 윗면은 Opening 경계조건을 부여하였으며, 추가 유동이 발생하지 않도록

유체 유입 방향과 동일한 방향성을 부여하였다.

공기밀도는 IEC 61400-1에서 규정한 1.225 kg/m³을 적용하였다[5]. 전산유동해석은 범용 유동해석 소프트웨어인 ANSYS CFX를 사용하였다. 난류 모델은 Menter의 논문[6][7]에서도 언급한 바와 같이 에어포일 및 풍력터빈 블레이드에서도 실험과 비교적 잘 일치하는 RANS 기반의 SST(shear stress transport) 전이 난류 모델이 사용되었다. 난류 강도는 IEC-61400-1에서 제시하는 등급 중에서 가혹한 조건인 18%를 적용하였다. 하드웨어는 리눅스 클러스터 (8 CPU, Intel Xeon X5650 2.66 GHz, 6 core)로 계산을 수행하였다.

3.1.3 헬리컬 로터 단일 유동 해석 결과

3.1.3.1 출력 해석

출력은 토크와 회전 각속도의 곱으로 결정된다. 본 연구에서 회전 속도는 발전기 정격출력에서의 정격회전속도 130 rpm을 적용하였다. Figure 6은 정격풍속 10 m/s에서의 시간에 따른 헬리컬 로터의 출력을 나타내고 있다. 시간의 흐름에 따라 헬리컬 로터 블레이드가 회전하고 방위각이 변화함에 따라서 토크가 변화함을 알 수 있다. 평균 출력은 약 148 W로 설계 출력 100 W 이상이므로 블레이드 설계가 타당함을 알 수 있다.

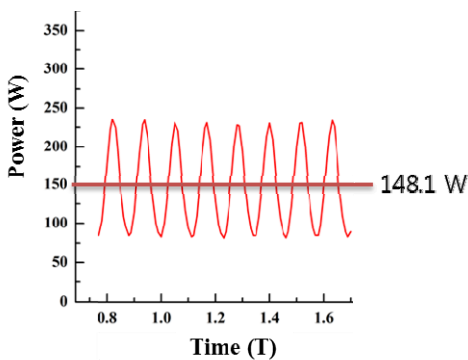


Figure 6: Aerodynamic power output with the variation of time by CFD analysis

Figure 7은 본 연구에서 설계한 100 W급 수직축 헬리컬 로터에 대한 수치해석 결과로부터 출력계수

(C_p)에 의한 성능곡선을 주속비(λ) 변화에 따라 나타낸 것이며, 출력계수는 다음의 식 (2)로 정의된다[8].

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (2)$$

$\lambda = 0.86$ 에서 출력계수는 $C_p = 0.18$ 의 최대값을 나타내고 있으며, 그 전후로는 낮아지는 경향을 보인다. $\lambda = 0.86$ 에 해당하는 풍속은 10 m/s이므로 수직축 헬리컬 로터 설계법의 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다.

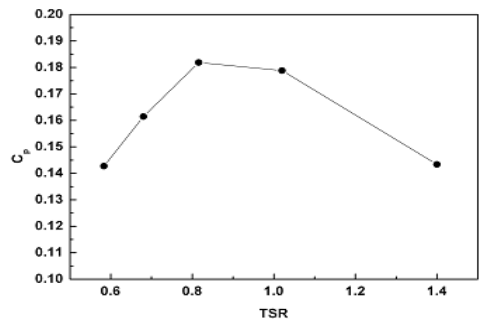


Figure 7: C_p -TSR curve

3.1.3.2 속도 및 압력 분포

Figure 8은 헬리컬 로터의 중심 단면에서 방위각 0도의 속도 분포를 도시한 것이다. 바람의 유입측 블레이드에서 발생된 후류의 영향으로 유출측의 주위유동이 매우 낮은 유속이 형성된다. 이것은 유입측에서 블레이드를 통과하는 유체의 운동에너지가 회전에 필요한 에너지로 변환되어 유속이 크게 감소한 결과라고 판단된다.

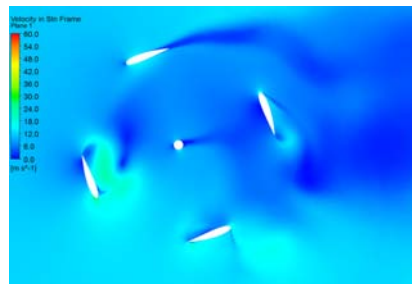


Figure 8: Velocity contour of the helical turbine with azimuth angle of 0 degree.

Figure 9은 헬리컬 로터의 중심 단면에서 압력 분포를 나타내고 있다. 블레이드 흡입면의 압력차는 후연보다 전연에서 크게 나타난다.

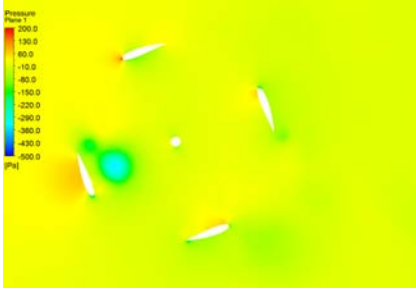


Figure 9: Pressure contour of the helical turbine with azimuth angle of 0 degree

3.2 풍력터빈 나무 유동 해석

3.2.1 풍력터빈 나무 격자

Figure 10은 풍력터빈 나무 전체 형상 및 유동장에 대한 격자를 나타내고 있다. 풍력터빈 나무에 설치되어 있는 4개의 로터는 단일 유동해석에 사용된 격자를 사용하였으며, 유동장 직경은 나무 가지 반경의 4배, 유동장 높이는 나무 높이의 2배로 유동영역을 생성하였다. Table 4에 해석을 위한 격자 정보를 나타내고 있다.

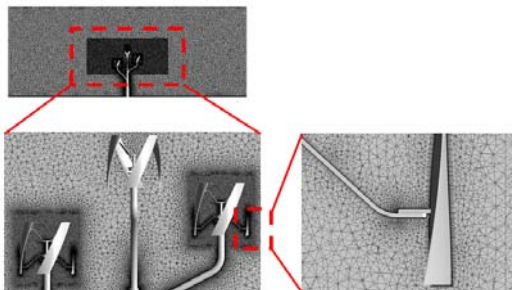


Figure 10: Numerical grids of the wind turbine tree for the CFD analysis

Table 4: Mesh information for wind turbine tree

Item	Description
No. of nodes	15,658,178
No. of elements	58,428,597

3.2.2 풍력터빈 나무 경계 조건

풍력터빈 나무 유동 해석은 유동경향과 평균적인 출력을 확인하기 위해 정상상태해석을 실시하였다. Figure 11은 해석을 위한 경계조건이 적용되는 영역을 도시한 것이다. 영역은 입구, 출구, 바닥면, 윗면 등으로 구성된다.

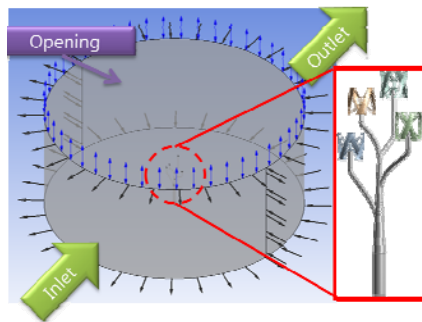


Figure 11: Region of boundary conditions for the wind turbine tree for CFD analysis

Table 5: Boundary conditions for the wind turbine tree for CFD analysis

Item	Description
Inlet	10 m/s at the hub with wind shear
Outlet	Atmospheric pressure
Top	Opening condition $U_{Opening} = U_{spec}i + V_{spec}j + W_{spec}k$ $i, j = 0, k=1 \text{ (flow direction)}$
Bottom	No slip condition
RS interface	General grid interface
Analysis type	Steady-state

Table 5는 각 경계조건의 세부내용을 나타낸 것으로 입구는 풍력터빈 나무 허브 높이에서 정격 풍속이 되도록 윈드 쉬어(wind shear) 효과를 고려하였다. 식 (3)은 윈드 쉬어 계산식을 나타낸 것이다[9].

$$V = V_0 \left(\frac{z}{z_h} \right)^a \quad (3)$$

여기서, V , V_0 , z , z_h , 및 a 는 각각 높이에 따른 풍속, 정격 풍속, 높이, 허브 높이 및 윈드 쉬어 지수를 의미한다. **Figure 12**는 윈드 쉬어 지수 0.23일 때 입구에서의 연직방향의 계산된 속도분포를 나타낸다.

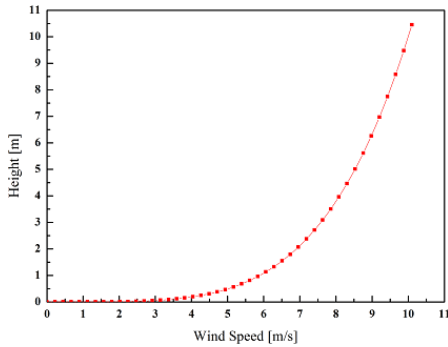


Figure 12: Calculated inlet wind speed according to the height with a wind shear

각 풍력터빈의 후류에 의하여 공기역학적 출력 변화가 발생되고 후류의 영향 및 출력 변화를 확인하기 위하여 **Figure 13**과 같이 4가지의 방향에 대하여 유동해석을 실시하였다.

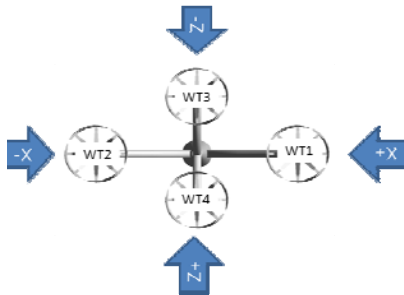


Figure 13: Wind direction of the wind turbine tree

3.2.3 풍력터빈 나무 유동 해석 결과

3.2.3.1 출력 해석

각 바람의 방향에 따른 WT1 ~ WT4 출력을 **Table 6**에 나타내었다. 각각의 풍력터빈 로터의 출력이 차이는 방향에 따라 각각의 풍력터빈에서 후류의 영향으로

발생된 결과라고 판단된다. 그리고 윈드 쉬어의 영향으로 높이에 따른 유입속도가 다르므로 출력의 변화가 있게 된다. 풍력터빈 나무 전체 평균출력은 약 654 W이다.

Table 6: Aerodynamic power output with the variation of wind direction by CFD analysis

Direction	Power (W)				
	WT1	WT2	WT3	WT4	Total
+Z	162	177	171.5	226	736
-Z	213	178	177.63	144	713
+X	162	42.4	123.11	235	562
-X	52.8	156	268.1	128	605

3.2.3.2 속도 및 압력 분포

Figure 14와 **Figure 15**는 해석 결과 중 +Z 방향으로 바람이 유입될 때 WT3, WT4를 지나는 중심 단면에서 속도와 압력 분포를 대표적으로 도시한 것이다.

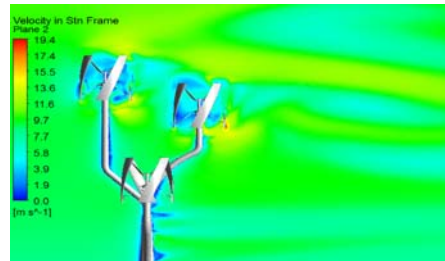


Figure 14: Velocity contour of the wind turbine tree under +Z wind direction



Figure 15: Pressure contour of the wind turbine tree under +Z wind direction

속도 분포를 살펴보면 WT4를 통과한 후 풍속이 감소하고 속도가 회복되기 전에 WT3에 도달 하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인하여 WT3의 로터출력이 감소되

는 것을 알 수 있다. 풍력터빈에서 발생된 후류로 인해 모든 방향에 따라 비슷한 출력감소가 나타나며 +X 방향과 -X 방향은 풍력터빈과 나무 구조물에서 발생된 후류로 인해 출력이 더욱 낮아진다.

압력 분포를 살펴보면 전방의 풍력터빈의 전후 블레이드의 압력차이가 후방의 블레이드의 압력차이보다 크게 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 전방의 풍력터빈에서의 압력손실이 후방의 풍력터빈까지 전해져 출력이 감소됨을 알 수 있다.

4. 결 론

100 W급 헬리컬 로터와 360 W급 풍력터빈 나무에 대하여 전산유동해석을 수행하여 다음과 같은 결론 얻었다.

1) 블레이드 설계는 기본 자이로밀형 로터를 설계하는 수식을 이용하여 100 W의 출력을 가지는 헬리컬 로터 설계를 진행하였다. 단일 헬리컬 로터를 이용하여 3차원유동해석을 수행하였으며, 유동해석 결과 출력은 148 W의 출력을 얻었다.

2) 4개의 헬리컬 로터를 부착한 풍력터빈 나무 유동해석을 통하여 후류에 의한 출력의 변화를 확인하였다. 전체 평균 654 W 출력을 나타내어 360 W 이상의 출력을 가지는 풍력터빈 나무를 설계하였다.

3) 향후 후류의 영향을 최소화하기 위하여 풍력터빈 로터의 높이 및 가지형상에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지역산업기술개발사업 (과제번호 : R0000744)의 일환으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

[1] J.-Y. Shin, Y.-S. Son, D.-G. Cha, C.-G. Lee, and I.-C. Hwang, "Aerodynamic characteristics of a vertical axis wind turbine blade", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 30, no. 8, pp. 877-884, 2006 (in Korean).
 [2] N.-J. Choi, S.-H. Nam, and J.-H. Jeong, and K.-C. Kim, "CFD study on aerodynamic power

output of 6 MW offshore wind farm according to the wind turbine separation distance", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 1063-1069, 2011 (in Korean).

[3] R. E. Sheldahl and P. C. Klimas, "Aerodynamic characteristics of seven airfoil sections through 180 degrees angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines", SAND80-2114, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1981
 [4] I. Paraschivoiu, *Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept*, Presses internationales Polytechnique, 2002.
 [5] DNV/Risø, *Guidelines for Design of Wind Turbines*, Jydsk Centraltrykkeri, 2002.
 [6] R. B. Langtry, J. Gola, and F. R. Menter, "Predicting 2D airfoil and 3D wind turbine rotor performance using a transition model for general CFD codes", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Sciences Meeting*, 2006.
 [7] F. R. Menter, R. Langtry, and S. Völker, "Transition modeling for general purpose CFD codes", *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 44, no. 1-4, pp 277-303.
 [8] J. Y. Lee, N. J. Choi, H. Y. Yoon, and Y.-D. Choi, "Design and flow analysis on the 1kw class horizontal axis wind turbine rotor blade for use in southwest islands region", *Journal of Fluid Machinery*, vol. 15, no. 3, pp. 5-11, 2012 (in Korean).
 [9] M. L. Ray, Rogers and J. G. McGowan, "Analysis of wind Shear models and trends In different terrains," *Proceedings of American Wind Energy Association Windpower 2006*.