

수직축 풍력 터빈 블레이드의 최적화 설계 및 Vortex 구조 분석

나지성* · 고승철** · 선상규*** · 방유석**** · 이준상†

Optimized blade of small vertical axis wind turbine and its vortex structure analysis

Jisung Na* and Seungchul Ko** and Sanggyu Sun*** and Yusuk Bang**** and Joon Sang Lee†

Abstract. Sensitivity studies of blade angle and twisted angle are numerically investigated to optimize the Savonius blade. As blade angle increases, the contact area between blade and wind decreases, showing the suppression of the vortex generation near blade. Compared to the blade angle of 0 degree, the blade angle of 20 degree shows about 2.6% increment of power efficiency. Based on the blade angle of 20 degree, sensitivity studies of the twisted angle are performed. The result indicates that the adjustment of the twisted angle causes the torque of blade to increase. Optimized blade can suppress the formation of the vortex structure in rear region. Also, wind flows without disturbance of vortex when passing through the optimized blade. The 1kw vertical wind turbine system with optimized blade can generate 4442.2kWh per year and have 53% capacity factor.

Key Words : 사보니우스 블레이드(Savonius blade), 와류 구조(vortex structure), 출력계수(Power coefficient), 블레이드 각(Blade angle), 비틀림 각(twisted angle)

1. 서론

최근 화석연료 고갈로 인하여 재생에너지에 관한 관심이 급증하고 있는 가운데, 풍력발전은 크게 주목받고 있는 재생 에너지 분야 중 하나이다. 그 중 소형풍력발전은 도심이나 농촌에서 가정용, 농업용으로 주로 사용되며 낮은 풍속에서도 가동가능하고 풍향에 관계없이 발전이 가능하다는 장점을 가지기에 많은 개발과 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 수직축 풍력터빈의 한 종류인 사보니우스형 풍력터빈은 상당히 낮은 풍속에서도 발전이 가능하다는 점에서 많은 관심을 받고 있다^{1, 2}.

낮은 풍속에서도 가동이 가능한 가동률에 관한 장점에도 불구하고, 사보니우스 터빈은 다른 수직축 터빈 종류에 비해 낮은 효율을 갖는다는 단점을 가진다³. 따라서 사보

니우스 터빈의 효율을 증대시키는 방안이 고려된다면 낮은 풍속에서도 많은 발전량을 기대할 수 있을 것이다. 특히 우리나라의 경우, 평균 풍속이 3-5 m/s 정도로서 낮은 편에 속하기 때문에 저풍속에서 가동 가능한 사보니우스 터빈은 국내 소형 풍력발전에 매우 적합하다고 할 수 있다⁴.

현재 사보니우스 형태 블레이드의 효율 개선에 관한 연구는 매우 저조한 상태이다. 기본적인 블레이드의 효율 향상은 형상 설계부터 시작된다. 블레이드의 각도 및 기울기, 그리고 비틀림 각도에 이르기까지 다양한 형상에 따라 블레이드에 작용하는 토크 및 에너지가 다르기 때문이다^{5,6}.

본 논문에서는 수치 해석 방법을 통해, 사보니우스 형태 블레이드로 구성된 1kw급 수직축 풍력 터빈에 대한 형상 설계 및 최적화를 수행하고 최적화된 블레이드의 출력 곡선 및 연간에너지 생산량, 가동률에 대해 논할 것이다. 2장에서는 사용한 수치해석 기법 및 시뮬레이션 계산영역 설

† Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, joonlee@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-5810

* Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

** Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

*** Higenpower Co.

**** Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

정, 경계조건 설정, Grid 설정 방법 등을 논할 것이며 3장에서 비틀림 각과 블레이드 각의 민감도 분석을 통하여 최적화된 사보니우스 형태 블레이드를 설계하고 그 블레이드의 효율 및 특성을 분석할 것이다. 4장에서는 최종적인 결론인 고찰이 수행될 것이다.

2. 수치해석방법

2.1 경계조건 및 계산영역 설정

사보니우스형 블레이드는 반원형태의 날개를 통해 항력 차이를 줌으로써 회전하는 원리이며 Savonius에 의해 처음 고안되었다. 1kw급 풍력터빈에 사용될 블레이드의 제원은, 블레이드 반원의 반지름 $r = 0.07\text{ m}$, 블레이드의 위치 $D = 0.6\text{ m}$, 높이 $H = 1.4\text{ m}$, 회전속도는 15.7 rad/s 를 고려하였다. 블레이드에 유동이 들어가기 전, 한 방향으로 바람을 편중시키는 셀파 구조물을 고려하였다. 셀파가 고려됨에 따라서, 본 논문에서는 에너지 밀도를 계산할 때 블레이드의 Swept area가 아닌 셀파에 의해 바람이 집중되는 곳의 면적을 기준으로 하였다. 블레이드 유동을 해석하기 위한 계산영역은 $8.4\text{ m} \times 5.6\text{ m} \times 2.8\text{ m}$ 이며 계산영역의 입구경계조건은 Dirhictet 경계조건으로 12 m/s 의 바람

을 고려하였으며 출구경계조건은 일정 압력 조건 ($p = \text{atmospheric pressure}$)을 고려하였다. 계산영역의 주변 벽면은 Free-shear 조건으로 블레이드 주변 유동에 영향을 주지 않도록 설정하였다. 자세한 제원 및 계산영역 정보는 아래 Fig. 1과 같다.

2. 수치해석

블레이드 주변 유동해석을 풀기 위해 비정상 비압축성 3-D Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)을 지배 방정식으로 고려하였으며, Reynolds stress를 상사하기 위한 난류 모사는 k- ω 모델을 적용하였다. 아래 (1), (2) 지배 방정식은 유체의 연속방정식과 모멘텀 보존 방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i u_j'}) \tag{2}$$

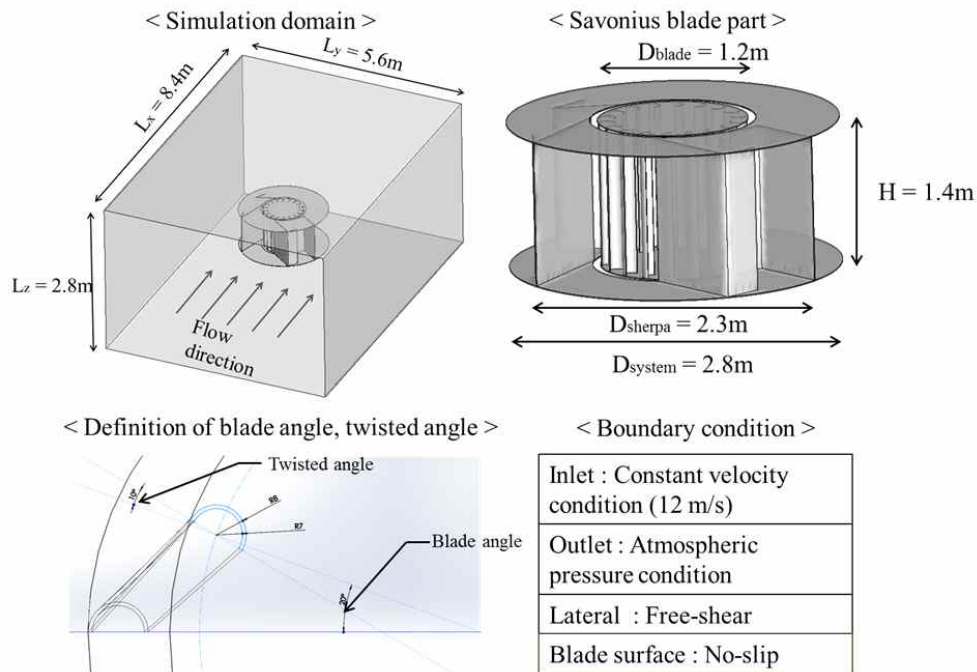


Fig. 1. Simulation domain, blade information

여기에서 ν 는 kinematic viscosity, overbar는 시간평균을 나타낸다.

k- ω 모델은 난류운동에너지와 와류방정식을 고려함으로써 난류 viscosity를 계산하는 방식으로써 블레이드 주변의 속도 감소 및 와류를 계산하기 적합한 방법이다. 상기 지배방정식을 유한체적법으로 차별화하였으며 블레이드의 회전 운동을 모사하기 위하여 Immersed Boundary Method를 통해 블레이드를 구현하였고 운전상태의 일정한 각속도에 의해 회전하도록 하였다. 격자는 정사면체 격자 약 160만개를 구성하였다.

2.3 시뮬레이션 케이스 선정

본 논문에서는 사보니우스 형태 블레이드의 효율 최적화를 위해, 블레이드가 앞으로 기울어지는 블레이드 각과 윗단과 아랫단의 각도 차이인 비틀림 각을 조정함으로써 최적화를 진행하였다. 블레이드 각만을 독립적으로 실험한 후 가장 좋은 효율 및 유동 특성을 보이는 블레이드 각에서 비틀림 각을 변화시켰다. 블레이드 각과 비틀림 각의 조정 범위는 Table 1과 같으며 총 9가지 케이스에 대한 수치해석이 수행되었다.

Table 1. Simulation case for optimization of blade

	블레이드 각 (°)	비틀림 각 (°)
Case_1	0	0
Case_2	10	0
Case_3	20	0
Case_4	0	10
Case_5	10	10
Case_6	20	10
Case_7	0	20
Case_8	10	20
Case_9	20	20

3. 결 과

3.1 효율 최적화 블레이드

Fig 2는 블레이드 각에 따른 효율 및 유동 특성 분석을 위한 블레이드 주변 진행방향 속도 및 Vorticity magnitude contour를 나타낸다. 블레이드의 각도가 앞으로 더 기울어질수록 블레이드 내외부의 속도 감소 현상 및 wake가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 블레이드 각이 증가할수록 블레이드 tip에서 발생하는 wake가 감소함으로써 wake의 유동방해효과를 억제한다는 것을 의미한다.

이는 블레이드가 기울어짐에 따라 바람이 블레이드에 집중적으로 접촉하는 부분이 형성되며 바람과 블레이드 간의 상대적인 접촉면적을 감소시킴으로써 tip vortex 및 내부의 rotor vortex를 감소시킨 것으로 생각할 수 있다. Fig 3은 블레이드 각의 변화에 따른 압력의 분포 및 변화를 나타내며 대기압 101325Pa를 기준으로 압력 분포를 나타내었다. 사보니우스 블레이드의 특성 상 회전하는 블레이드의 앞면에는 양의 압력이, 뒷면에는 음의 압력이 작용하며 반대편 블레이드에는 음의 압력이 작용함으로써 vortex 및 separation을 발생시킨다. Case_1에서는 압력이 위아래로 고르게 분포하는 반면, 블레이드 각을 증가시킨 경우 끝단으로 압력의 집중, 중심에서는 압력의 감소가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 끝단의 압력 증가와 중심부분의 vortex 및 separation 감소로 토크가 증가하여 효율이 향상되는 것을 볼 수 있으며 아래 식 (3)을 통해 효율을 계산하면 각각 26.3%, 27.8%, 28.9%으로써 블레이드 각의 증가를 통해 약 2.6% 효율 증가를 보였다.

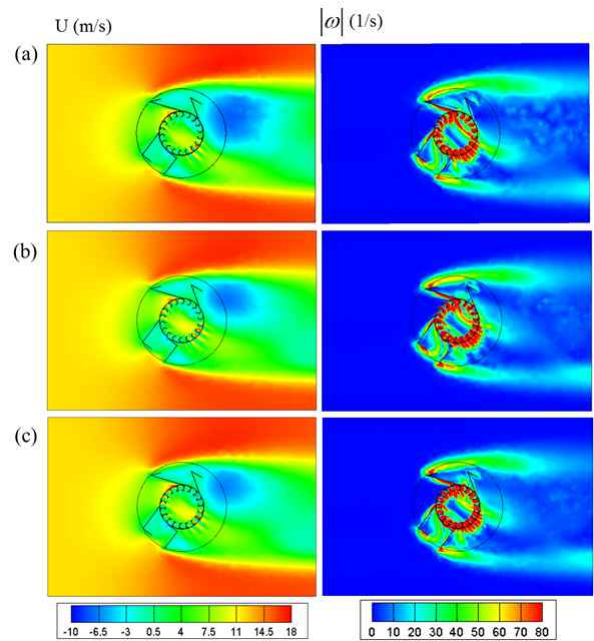


Fig. 2. Stream-wise velocity and vorticity magnitude, (a) Case_1 (b) Case_2 (c) Case_3

$$C_p = \frac{\text{Mechanical power}}{\text{Wind energy density}} = \frac{Tw}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (3)$$

최적화된 블레이드 각 (Case_3)을 기준으로 비틀림 각의 민감도 실험을 진행하였으며 Case_6과 Case_9의 유동 특성 및 압력 분포를 관찰하였다(Fig 4). 블레이드 각에서

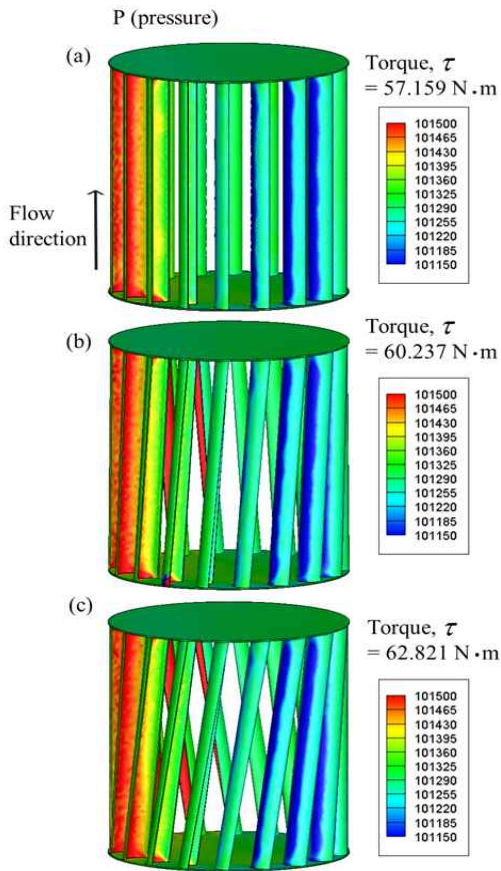


Fig. 3. Total pressure distribution of blade, (a) Case_1 (b) Case_2 (c) Case_3

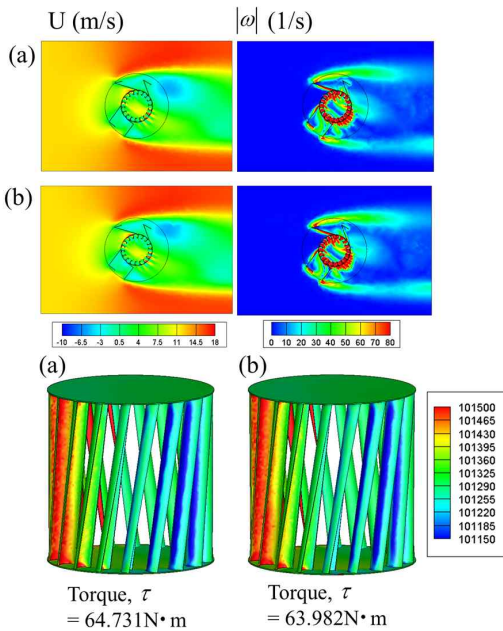


Fig. 4. Stream-wise velocity, vorticity magnitude and total pressure, (a) Case_6 (b) Case_9

와 유사하게, 비틀림 각의 변화 또한 속도의 감소 현상과 Vortex 형성에 영향을 주었지만 20도 이상 비틀릴 경우 토크가 오히려 감소하는 경향을 보였다. Case_6의 경우 셀파로 인해 바뀐 바람의 방향과 비틀림 각이 마주보면서 토크가 증가하는 반면, Case_9의 경우 오히려 감소하였다. 큰 차이를 보이지 않았지만 속도의 감소 및 압력의 분포 측면에서, Case_6이 좋은 효율에 적합한 유동 특성과 압력 분포를 가짐을 관찰할 수 있다. 아래 식 (4)에 따르면 시뮬레이션 상에서 설정된 15.7 rad/s의 tip speed ratio (TSR)은 0.78에 해당하는 값으로 최적화된 블레이드 (Case_6)가 TSR 범위 내에서 가장 좋은 효율을 보이는 값이다.

$$\lambda = \frac{r\omega}{U_0} \tag{4}$$

TSR 범위 내의 효율을 구하기 위해 RPM을 조정하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 최적화 블레이드가 기존의 블레이드(Case_1)에 비해 모든 TSR구간에서 높은 효율을 가짐을 관찰할 수 있다. 특히 약 TSR = 0.8부근에서는 약 4% 정도의 효율 향상이 있음을 알 수 있다(Fig.5).

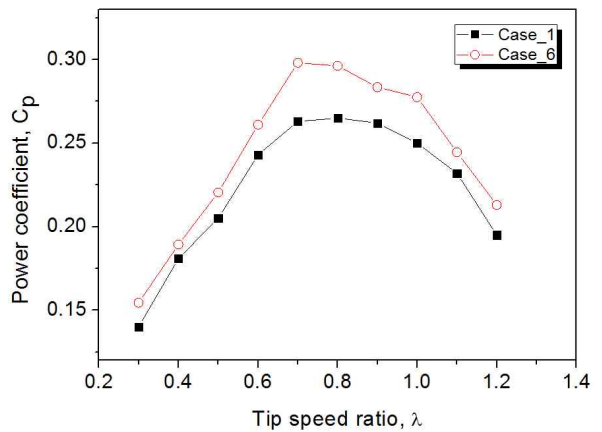


Fig. 5. Power coefficient versus tip speed ratio in Case_1 and Case_6

3.2 Vortex 구조 분석

Vorticity magnitude만으로는 3차원으로 분포하는 vortex 구조를 관찰하기 어려우며 따라서 본 논문에서는 swirling strength method라는 vortex identification 방법을 적용하여 vortex 구조를 관찰하였다⁷⁾. 속도의 gradient로 계산된 특성 방정식의 complex eigenvalue 허수부를 통해 얻어지는 swirling strength 방법은 회전하는 물체 주

면의 vortex structure를 보기에 적합하다고 알려져있다. Fig 6은 최적화를 거치지 않은 블레이드 (Case_1)와 최적화 블레이드 (Case_6)의 vortex structure를 나타낸다. 두 경우 모두 블레이드 주변에 강한 vortex가 형성이 되며 내부의 rotor vortex 또한 관찰되었다. 최적화되지 않은 블레이드는 앞쪽에서 형성되는 vortex와 rotor vortex, 뒤편의 vortex가 합쳐지며 큰 structure를 형성하는데 반해, 최적화 블레이드의 경우 뒤편에 생기는 vortex structure를 억제함으로써 유동 흐름이 원활하게 진행될 수 있도록 하는 것을 관찰할 수 있다.

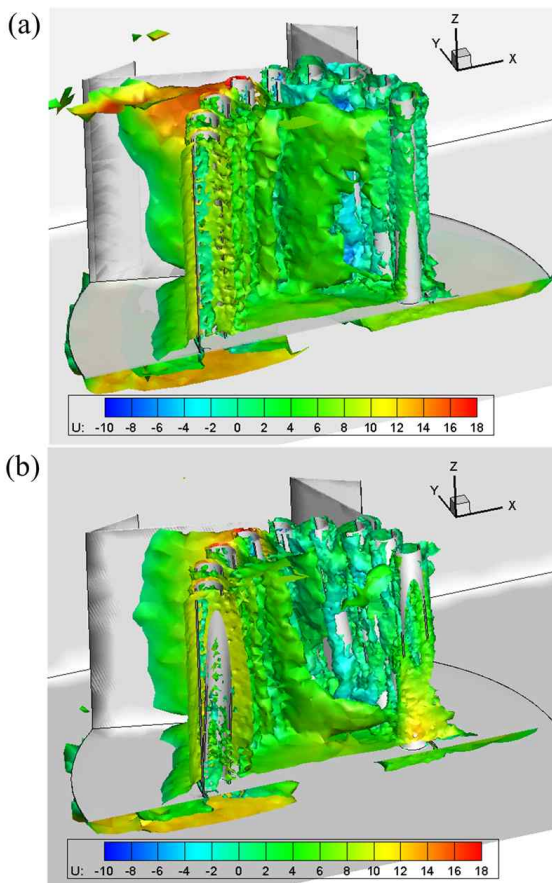


Fig. 6. Vortex structure obtained from isosurface of swirling strength (=80). Color represents streamwise velocity

3.3 출력곡선 및 에너지 생산량

본 절에서는 제시된 최적화 블레이드의 풍속 별 출력곡선 및 연간에너지 생산량, 가동률(CF)을 논의한다. 정해진 각속도를 설정하는 시뮬레이션의 한계로 인해 풍속 별 출력곡선을 직접 구할 수 없음에 따라 12m/s에서 1016W라는 최대 출력을 기준으로, 출력곡선의 경향이 일반적인 출

력곡선과 유사할 것이라는 가정을 통해 출력곡선을 구하였다. Fig 7은 최적화 블레이드의 출력곡선과 Rayleigh probability density function (PDF)을 도시한 것으로 출력곡선은 12 m/s의 풍속에서 가장 높은 효율을 보였으며 Rayleigh PDF는 4.5m/s부근에서 가장 높은 분포를 가졌다. 아래 식 (5)에 의하면 연간 에너지 생산량(AEP)는 각각 속도에 대응되는 에너지 밀도와 효율, 그리고 그 속도의 빈도를 통해 구해질 수 있으며 그 값은 4442.2kWh이다.

즉 각각의 속도, U_i 에서의 에너지 밀도와 U_i 에서의 효율, 그리고 U_i 가 발생하는 빈도의 곱으로써 각각의 속도에서 발생하는 에너지를 구할 수 있고 이를 속도에 대해 적분하면 연간에너지 생산량을 구할 수 있다.

$$AEP = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^N U_i^3 C_{p,i} f_i t_i \quad (5)$$

여기에서 A는 swept area, f_i 는 Reyleigh PDF값, t_i 는 해당풍속이 발생하는 시간을 의미하며 i 의 범위는 3.8~25m/s이다.

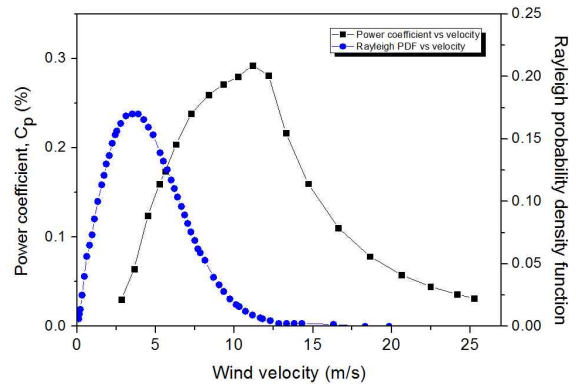


Fig. 7. Power curve of optimized blade and Rayleigh probability density function

또한 현재 블레이드의 가동률은 아래 식 (6)으로 부터 계산될 수 있으며 cut-in velocity를 3.8m/s로 가정한다면 Rayleigh PDF의 적분 계산에 의하면 가동률은 53%가 된다.

$$CF = \frac{\text{실제발전량(kWh)}}{\text{정격출력(kW)} \times \text{시간(h)}} \quad (6)$$

4. 결 론

본 논문에서는 수직축 풍력터빈에 사용되는 사보나우스 블레이드의 기하학적 설계에 의해 최적화되는 과정을 수치해석 실험을 통하여 수행하였다. 블레이드 각이 커질수록 속도 감소 및 vortex 형성이 억제됨을 관찰할 수 있었으며, 20도에서 가장 높은 토크와 좋은 효율을 보였다. 또한 비틀림 각을 조절하는 경우, 셀파에 의해 바뀐 풍향이 크지 않음에 따라 10도 비틀린 경우에서 가장 높은 토크와 좋은 효율이 발생함을 관찰하였다. 최적화 블레이드의 vortex structure를 관찰하였을 때, 블레이드 내부와 뒷편에 발생하는 vortex가 억제됨에 따라 유동의 흐름이 원활하게 되는 것을 볼 수 있었고 이에 따라 효율이 증대됨을 확인하였다. 본 논문에서의 블레이드는 연간 4442.2kW의 에너지 생산량을 기대할 수 있으며 풍속의 빈도가 Rayleigh PDF를 따른다고 가정하였을 때 53%의 가동률이 기대된다.

후 기

1. 이 연구는 중소기업청 2013년 산학협력력 기술개발 사업(C0151226)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- 1) Gupta, R., Biswas, A. and Sharma, K. K., 2008, "Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius-three-bladed Darrieus rotor," RENEW ENERG., Vol.33(9), pp. 1974~1981.
- 2) Yoon, D. J. and Yim, H. C., 2012, "Wind Power Generation Market and R&D Trend," ISBN; 979-89-98456-01-6
- 3) Savonius, S. J., 1931, "S-Rotor and its Applications," Mech. Eng., Vol.53, pp.333~338.
- 4) Kamoji, M. A., Kedare, S. B. and Prabhu, S. V., 2009, "Performance tests on helical Savonius rotors," RENEW ENERG., Vol.34(3), pp.521~529.
- 5) Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E and Thevenin, D., 2010, "Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade," RENEW ENERG., Vol.35, pp.2618~2626.
- 6) Saha, U. K. and Rajkumar, M. J., 2006, "On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades," RENEW ENERG., Vol.31(11), pp.1776~1788.
- 7) Chakraborty, P., Balachandar, S. and Adrian, J. R., 2005, "On the relationships between local vortex identification schemes," J. Fluid Mech, Vol 535, pp. 189-214