

## 수직축 풍력터빈에 관한 연구

박정철\*

### A Study of Vertical Axis Wind Turbine

Jung-Cheul park\*

**요약** 본 논문은 주 블레이드 각도와 보조 블레이드 각도를 변화 주어서 ANSYS 유동해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 최적의 조건을 찾고자 하였다. 45°로 주 블레이드 각도를 변경한 Shape 4는 주 블레이드 각도를 0°로 한 Shape들 보다 효율은 110% ~ 250% 증가하고, 출력은 157.2% ~ 263.2% 증가했다. 그리고 주 블레이드의 Fin 크기를 2배 크게 변경한 Shape 5의 출력은 Shape 4에 비해 27.5%, Shape 1에 비해 70.8% 증가하였다. Case 구조에서 주 블레이드 형상이 Shape 1로서 동일한 경우에는 Case 1은 Case 2보다 효율은 15.4%, 출력은 13.3% 증가하였다. 그리고 45°로 보조 블레이드 각도를 한 경우, 주 블레이드 형상이 핀 형태보다 밴디드 형태가 우수하였다. Case 4는 Case 1보다 47%, Case 3보다 13.6% 출력이 증가하였고, 효율은 Case 1보다 46.7%, Case 3보다 15.8% 증가하였다.

**Abstract** This paper showed the difference in the optimum conditions by using the ANSYS CFX simulation program with the changes of the main-blade angle and sub-blade angle. Main-blade Shape 4, which had angle 45° while other Shapes with angle 0°, was increased to 157.2[%] to 263.2[%] in the power and was increased to 110[%] to 250[%] in the power coefficient. Moreover, when the Shape 5 Fin length of main-blade doubled, the power was 70.8[%] when compared with Shape 1 and 27.5[%] with shape 4. If the main-blade geometry equals shape 1 in the case structure, The power of Case1 was increased to 13.3[%] when compared with Case2. Also, the power coefficient was increased to 15.4[%]. When sub-blade angle was 45°, main-blade was better than the Fin type than the Bended type. The power of Case4 was increased to 47[%] when compared with Case1 and increased to 13.6[%] with Case 3. Also, the power coefficient was 46.7[%] when compared with Case 1 and 15.8[%] with Case 3.

**Key Words** : ANSYS CFX, main-blade, power coefficient, power output, sub-blade

#### 1. 서론

현재 사용되는 대부분의 에너지는 화력이나 원자력 등의 자원이 고갈되는 에너지를 이용하여 전기에너지를 사용하고 있다. 에너지원들은 극히 제한적이고 점차 고갈되므로 언젠가는 다른 에너지원을 찾아야 한다. 온난화 현상 및 고유가와 같은 여러 환경문제로 인해 대체에너지 개발은 필수적인 요소가 되었다. 재생에너지 중 풍력에너지는 무한정이며 무공해인 바람을 이용하므로 우리 환경에 미치는 영향이 미비하고 국토를 효율적으로 사용할 수 있다. 또한, 풍력에너지는 유해물질이 발생

되지 않으므로 대체에너지원으로 주목받는 에너지 중의 하나이다. 풍력 발전기는 공기의 운동에너지를 이용하여 회전자를 회전시켜 회전운동에너지를 변환시키는 역할을 하는 것이다. 회전자 축의 방향에 따라 수직축 터빈(VERTICAL Axis Wind Turbine : VAWT) 방식과 수평축 터빈(HORIZONTAL Axis Wind Turbine : HAWT) 방식으로 나눌 수 있다[1,2].

수직축 풍력 터빈은 수평축 풍력터빈에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있다. 수직축 풍력터빈은 바람의 방향과 무관하게 운전 가능하기 때문에 구조적

\*Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Gachon University (jcpark@gachon.ac.kr)

Received September 21, 2017

Revised October 17, 2017

Accepted October 19, 2017

으로 간단하고 설치비용 또한 저렴하다. 또한 수직축 풍력터빈의 경우 낮은 회전속도에서도 정격출력으로 발전하기 때문에 미풍에서도 풍력발전이 가능하며 소음 역시 더 적다는 장점이 있다[3]. 현재까지 수직축 풍력터빈의 출력상승을 위해 많은 연구가 이루어지고 있으며 아크형 날개를 이용한 항력식 수직축 소형 풍력터빈 발전 형상 변화 및 피치각 변화에 따른 유동해석을 통해 최적 설계에 대한 방향을 제시했다[4,5] 본 논문에서는 주 블레이드 각도와 핀 길이 및 보조 블레이드각도를 변화주어서 ANSYS 유동해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 최적의 조건을 제시하고자 한다.

## 2. 본론

본 논문에서 사용된 ANSYS CFD Modeling 주요절차를 그림 1에 나타냈다.

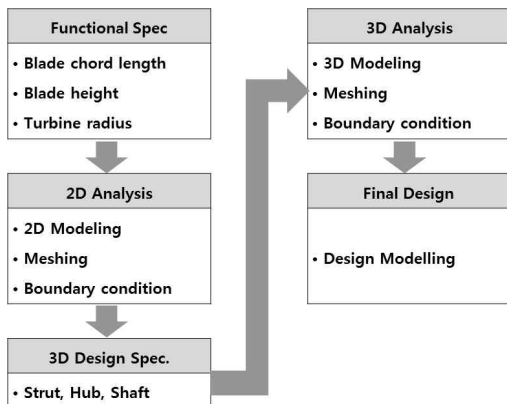


그림 1 ANSYS CFD Modeling 절차  
Fig. 1 ANSYS CFD Modeling procedure

그림 2는 주 블레이드와 보조 블레이드의 형상을 표현한 것이다. 터빈 직경(D)은 7[m]이고 Open angle은 90°이며 핀 크기는 0.2[m]로 설계하였다. 표 1에 나타낸 것과 같이 주, 보조 블레이드의 설계값을 토대로 시뮬레이션을 하였다.

그림 3은 속도분포를 나타낸 것으로 빨간색은 최고 풍속을 나타낸 것이고, 파란색은 최저 풍속을 의미한다.

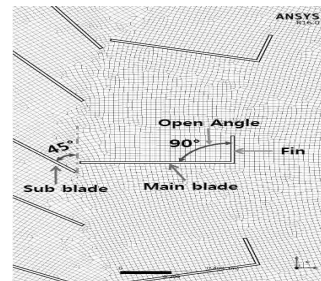


그림 2. 주, 보조 블레이드 형상  
Fig. 2. Image of main and sub-blade.

표 1. 주, 보조 블레이드 설계값  
Table 1. Design values of main blade and sub-blade

	main blade				sub-blade
	length [cm]	angle	Fin length [cm]	Open angle	angle
Shape 1	60	0°	20	90°	45°
Shape 2	60	0°	20	135°	45°
Shape 3	60	0°	20	45°	45°
Shape 4	60	45°	20	90°	45°
Shape 5	60	0°	40	90°	45°

이때, 최저값은 0이며, 속도값에 대하여는 음의 값이 존재하지 않는다. 결론적으로, 높은 속도는 높은 에너지를 전달하므로 주 블레이드와 보조 블레이드에 풍속이 증가되면 높은 에너지를 전달할 수 있다. 그림 3에서 속도변화가 유사하여 차이를 구별하기가 쉽지 않다. Shape 1, Shape 2, Shape 3, Shape 5는 입구 측 주 블레이드 후단부에서 공기 방향이 위로 진행하였으나, Shape 4의 경우는 주 블레이드 후단부에서 공기 방향이 아래로 진행되는 것을 알 수 있었다. 결론적으로 토크값이 가장 높은 것은 Shape 5 이며 가장 낮은 것은 Shape 4 이다. 즉 Shape 4는 블레이드에 힘이 전달하고 통과되는 것을 알 수 있으나, Shape 5는 블레이드에 힘이 전달하는 것을 확인 할 수 있다.

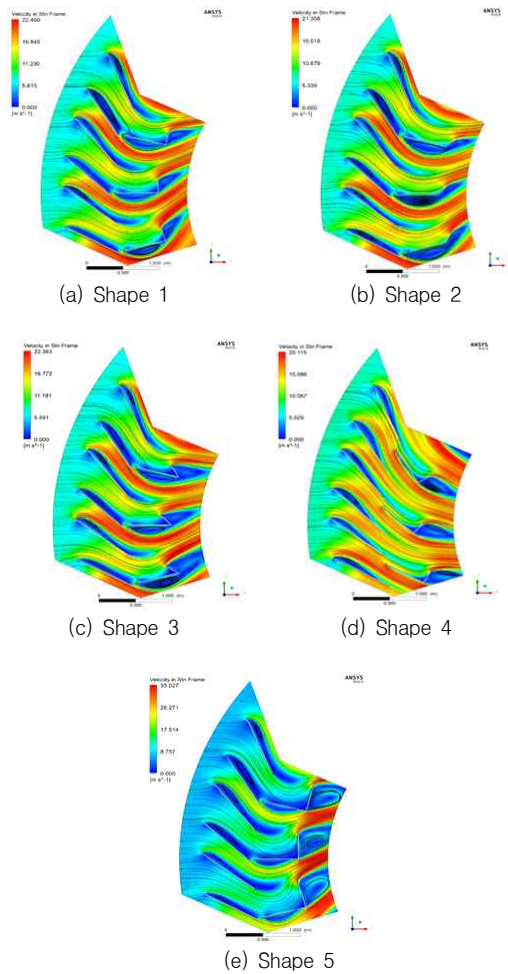


그림 3. 속도분포해석  
Fig. 3. Analysis of velocity distribution

그림 4는 토크를 측정된 것으로 주 블레이드 입구측 토크의 크기는 안정화 시점인 40초를 기준으로 할 경우, Shape 5가 8,400[Nm] 으로 가장 높게 나타났다.

표 2는 주 블레이드와 보조 블레이드 형상이 모두 갖춰진 수직축 풍력터빈의 상태에서 shape 1, shape 4, shape 5에 대해서만 시뮬레이션 한 토크 결과값을 나타냈다. 풍속은 7[m/s]조건에서 실시하였다.

그림 5는 유동해석을 실시한 것을 나타냈다. 그림 5에서 Shape 4는 보조 블레이드를 통과한 공기

가 Shape 1, Shape 5에 비하여 주 블레이드에 힘을 많이 전달한 것을 알 수 있었다. 왜냐하면, 풍력터빈 유동해석에서 중요한 변수는 공기가 블레이드를 통해 나가는 주 블레이드 출구 측의 저항을 감소시키는 것이다.

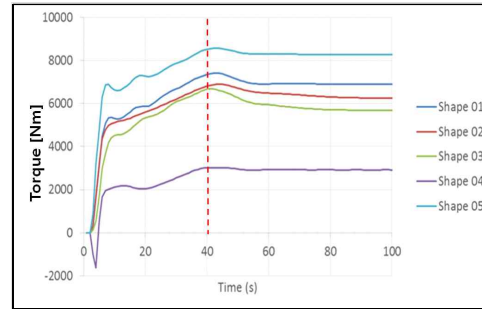


그림 4. 토크값 결과  
Fig. 4. Results of torque value

표 2. 토크 결과  
Table 2. Torque results

		TSR			
		0.2	0.3	0.4	0.5
Torque [Nm]	Shape 1	1701.8	1436.6	1205.7	966.1
	Shape 4	4258.2	3497.4	2973.8	2354.6
	Shape 5	1876.2	1434.1	1093.7	486.4

그림 3의 결과처럼 주 블레이드 입구 측 토크가 높아도 그곳을 제외한 나머지 블레이드에서 저항이 많이 생성하거나 회전력이 적게 발생되어 결과값이 나쁜 경향으로 예측할 수 있다.

Shape 1은 공기가 회전자를 부드럽게 안정적으로 통과하지 못하며 회전자 좌측 아래 부분의 여러 곳에서 회절이 발생되었다. 즉 공기가 입구측 주 블레이드를 통과하면서 공기 방향이 회전자 윗쪽으로 향하여 공기역학적 손실이 발생되었고, 출구측 주 블레이드도 입구측 공기 방향에 의해 공기흐름이 불안정적으로 분산되어 음의 회전 모멘트를 발생시킨다. Shape 5는 회전자 아래 부분에서 난기류가 발생되어 Shape 1의 경우보다 공기흐름이 불안정적이며 회전자 위쪽으로 공기방향이 형성되어 회전자에 음의 회전 모멘트로 작용하여 저항을 발생시키고 공기역학적 손실을 야기시킨다. Shape 4는 Shape 1과 Shape 5에 비하여 공기가

회전자를 부드럽게 안정적으로 통과된다. 그리고 입구 측 주 블레이드를 통과한 공기는 출구 측 주 블레이드를 부드럽게 밀고 보조 블레이드로 통과하여 회전자에 양의 회전 모멘트로 작용하고 있다.

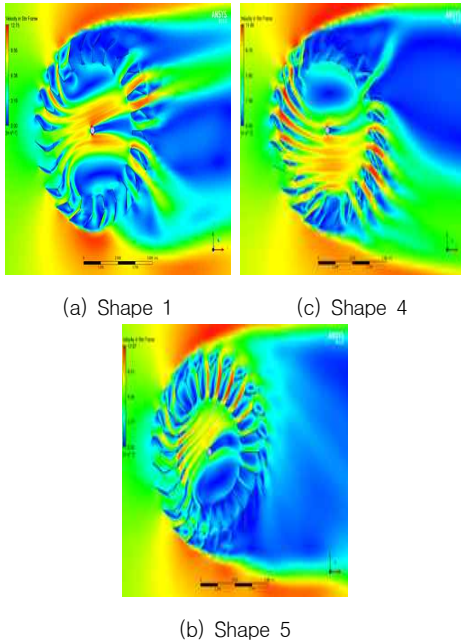
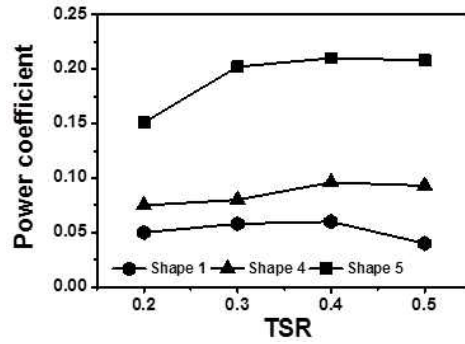


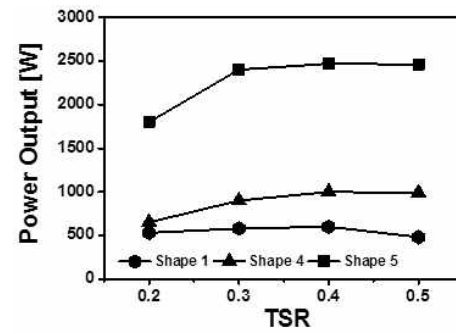
그림 5. 유동해석의 결과  
Fig. 5. Results of air flow analysis

그러므로, Shape 4의 주 블레이드가 기존 형상보다 힘을 많이 받고 출구 측에서는 저항이 적기 때문에 Shape 1, Shape 5와 비교하면 효율은 0.21, 출력은 2.47[kW]로 가장 크게 측정된 것을 그림 6에서 확인되었다.

결론적으로 주 블레이드 형상이 기본형상의 각도 0° 보다는 각도 45°로 변경한 핀 형태 블레이드에서 효율과 출력이 더 상승했다. 즉 주 블레이드 각도를 45°로 변경된 Shape 4는 주 블레이드 각도를 0°로 한 Shape들 보다 효율은 110% ~ 250%, 출력은 157.2% ~ 263.2% 증가되었다. 그리고 주 블레이드 핀 크기를 기본 길이보다 2배 크게 변경하여도 출력은 Shape 1의 70.8%이고 Shape 4의 27.5%이며, 효율은 Shape 1의 60%, Shape 4의 28.6%로 출력 및 효율이 감소되었다.



(a) power coefficient (Cp)



(b) power(P)

그림 6. 효율, 출력 결과  
Fig. 6. Results of power coefficient and power

주 블레이드의 Open angle을 90°로 하고 주 블레이드와 보조 블레이드 각도가 45°로 하였을 때 Shape 4의 출력은 2.47[kW], Shape 1은 0.96[kW], Shape 5는 0.68[kW]로 측정되었다. Shape별 출력 전류 및 출력 전압은 식(1)과 식(3)을 이용하여 표 3에 나타냈다[6,7].

$$i_p = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{p \lambda_{pm} \cdot \lambda(v)} C_p(v) \cdot v^2 [A] \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ (공기밀도) = 1.22[kg/m<sup>3</sup>],  $v$ (풍속) = 7[m/s], R=터빈로터의 반지름.  $p \cdot \lambda_{pm}$  = Back EMF constant = 71.5,  $C_p(v)$ =효율,  $\lambda(v)$ =TSR 이다.

$$P_{(T-c)} = \frac{3E_p \times I_p}{\eta} [W] \quad (2)$$

$$E_p = \frac{\eta P_{(T-G)}}{3I_p} [V] \quad (3)$$

일반적으로 발전기 효율( $\eta$ )은 92%인데 기계효율 2%를 더하여 94%로 적용하였다.

표 3. 출력전류와 출력전압 결과  
Table 3. Results of output current and output voltage

	power coeff ident	power [kW]	output current [A]	output voltage [V]
Shape 1	0.10	0.96	9.42	31.93
Shape 4	0.21	2.47	19.78	39.12
Shape 5	0.06	0.68	5.65	37.71

위 결과를 바탕으로 풍속 및 보조 블레이드 각도를 변화시켜서 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션의 설계 적용값에 대한 내용은 표 4에 나타내었다.

표 4. Case 1 ~ Case 4 시뮬레이션 설계값  
Table 4. Simulation design application values for Case 1 ~ Case 4

	turbine diameter	sub-blade angle	mane blade image
Case 1	9	45°	Shape 1
Case 2	9	60°	Shape 1
Case 3	9	45°	Shape 4
Case 4	9	45°	Bended Type

Case 1 ~ Case 4의 유동해석을 한 결과를 그림 7 (a) ~ (d)에 나타내었다. 그림 7의 결과를 분석할 때 공기 역학적 특성에 대하여 최적의 디자인 조건에 해당하는지를 살펴보는 것이다. Case 3과 Case 4의 디자인이 가장 좋은 공기 흐름 패턴, 즉 방향 변경이 적고 손실이 적었기 때문에 가장 우수한 디자인이라고 할 수 있다. 그림 7에서 Case 1과 Case 2는 회전자 아래 부분에서 회절이 많이 발생되었고 회전에 음의 회전 모멘트로 작용하여 Case 2가 회절이 더 많이 발생되었다고 할 수 있다. 그리고 입구 측과 출구 측 주 블레이드에서 난기류가 발생되어 공기역학적 손실이 발생된 것이

다고 할 수 있다. Case 3과 Case 4는 유동해석 패턴이 아주 유사한 것으로 관찰되었고 회절 없이 회전자를 부드럽게 안정적으로 통과되고 입구 측 및 출구 측 주 블레이드에서 손실은 있지만 양호한 유동 패턴으로 나타났다. 그러나 Case 4는 공기역학적 손실이 적고 안정적으로 출구 측 주 블레이드와 보조 블레이드를 통과한 것을 알 수 있었다.

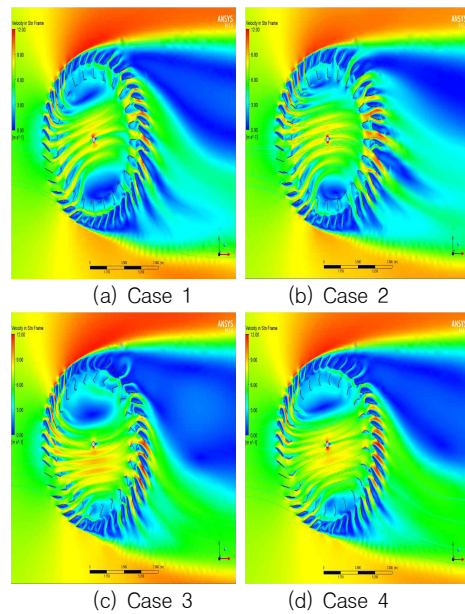


그림 7. 유동해석  
Fig. 7. Air flow analysis

그림 8 (a)에서 TSR 0.4를 기준으로 Case 1의 출력은 1.7[kW], Case 2는 1.5[kW], Case 3는 2.2[kW], Case 4는 2.5[kW]로 측정되었다. 주 블레이드 형상이 Shape 1과 동일한 경우 보조 블레이드 각도가 45° 일때 60° 보다 효율과 출력에서 더 우수하였다. 즉 Case 1를 Case 2와 비교했을 때 효율은 15.4% ,출력은 13.3%로 증가하였다. 그리고 보조 블레이드 각도를 45°로 변경하였을 때, 주 블레이드 형상이 편 형태보다 벤디드 형태가 우수하였다. 즉 Case 4는 Case 1보다 47%, Case 3보다 13.6%로 출력이 증가되었고, 효율은 Case 1보다 46.7%, Case 3보다 15.8% 증가되었다.

Case 1~ Case4의 출력전류 및 출력전압을 표 5에 나타냈다. 표 5에서 출력전류는 Case 4가 44.06[A], Case 2가 26.03[A]로 측정되었고 출력전압은 Case 3이 18.12[V], Case 1은 17.73[V]로 측정되었다.

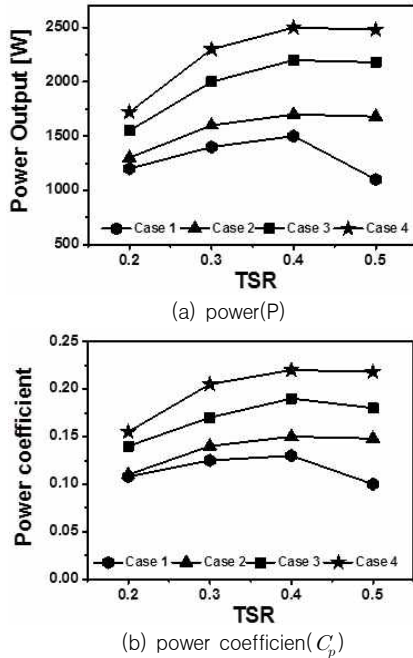


그림 8. 출력 및 효율 결과  
Fig. 8. Results for power and power coefficient

표 5. 출력전류 및 전압 결과  
Table 5. results of output current and voltage

	power coefficient	power output [kW]	output current [A]	output voltage [V]
Case1	0.15	1.7	30.04	17.73
Case2	0.13	1.5	26.03	18.05
Case3	0.19	2.2	38.05	18.12
Case4	0.22	2.5	44.06	17.78

본 논문에서 주 블레이드 형상이 핀 형태보다 벤디드 형태가 우수하다는 것을 알 수 있었는데 시뮬레이션에서는 벤디드 형태를 다양한 형태로 설계할 수 있으나 실제 현장에서는 제작하는 것은 쉽지 않고 경제성이 떨어지므로 이를 대체할 수

있는 방안이 필요하다고 생각된다.

### 3. 결론

본 논문은 수직축 풍력터빈에 대해 기초 연구 하였으며 즉 주 블레이드 각도와 Fin 길이를 변화 주어서 ANSYS 유동해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 최적의 조건을 찾고자 하였다.

1. 주 블레이드 각도가 45°인 Shape 4는 주 블레이드 각도를 0°로 한 Shape들 보다 효율은 110% ~ 250%, 출력은 157.2% ~ 263.2%로 증가했다. 그리고 주 블레이드의 핀 크기를 기본길이 보다 2배 크게 변경하여도 효율은 Shape 1보다 60%, Shape 4보다 28.6%로 감소되었고 출력은 Shape 1보다 70.8%, Shape 4보다 27.5% 감소되었다.

2. 주 블레이드 Open angle를 90°, 주 블레이드 각도와 보조 블레이드 각도를 각각 45°로 한 경우, Shape 4는 2.47[kW]로 출력이 가장 높았다.

3. Case 구조에서 주 블레이드 형상이 Shape 1과 동일한 경우에는 보조 블레이드 각도 45°일 때가 60°보다 출력 및 효율에서 더 우수하였다. 즉 Case 1은 Case 2보다 효율은 15.4%, 출력은 13.3%로 증가하였다.

4. Case 구조에서 보조 블레이드 각도를 45°로 하였을때 주 블레이드 형상이 핀 형태보다 벤디드 형태가 성능이 우수하였다.

5. Case 4는 효율이 Case 1보다 46.7%, Case 3보다 15.8% 증가하였고, 출력은 Case 1보다 47%, Case 3보다 13.6%로 증가하였다.

본 논문에서 제시한 최종 설계 사양의 시뮬레이션 시험 결과를 풍력발전시스템을 개발하는데 기초 연구로써 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

### REFERENCES

[1] Shin, J. Y., Son, Y .S., Cha, D. G., Lee, C.H.Hwang, I.C. " Aerodynamic characteristics of a vertical axis wind turbine blade" Journal of the Korean

- Society of Marine Engineering Vol.30, No.8, pp.877-884 Procedia 61, pp. 1275-1278. 2006,
- [2] Kim, D. K., Kim, M. K., Cha, D. K., Yoon, S. H., Yang, C. J., "Design of Drag-type Vertical Axis Miniature Wind Turbine Using Arc Shaped Blade" The KSFM Journal of Fluid Machinery Vol.9, No.2, pp.7-12, 2006
- [3] Park, C., Park, G. S., W. G., S. H., "Numerical Analysis of Wind Turbine of Drag Force Type with change of Blade Number and Pitch Angle" Journal of the Korea Society of Computational Fluids Engineering Vol.10, pp. 61-64, 2004
- [4] Ryu I.H., Kim J.H., Kim B.G., Lee K. S., Yang C.J., "A Study on Vertical Axis Wind Turbine Performance in Different Blade Shapes, Korean Society for Fluid Machinery, summer symposium, pp.29-33, 2016
- [5] Kim, J. H., Kim, J. B., Oh, Y. L., "Performance Prediction of Wind Power Turbine by CFD Analysis" Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers Vol.37, No.4, pp.423-429, 2013
- [6] Magdi Ragheb and Adam M. Ragheb, "Wind Turbines Theory The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio", Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, pp.27-33, 20, June, 2011.
- [7] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Development and Implementation of Optimal Design System for Electric Machines and Power Apparatus. (400kVA power transformer, 500kW wind generator, 5MW PM type electric machine)", Dong-A University, Korea

Electrical Engineering & Science  
Research Institute, R-2007-2-060,  
pp.75-82, 3,2010

---

## 저자약력

---

### 박정철(Jung-Cheul Park)



- 1992년 2월 : 명지대학교 전자공학과(공학석사)
- 2000년 2월 : 명지대학교 전자공학과(공학박사)
- 2007년 3월~현재 : 가천대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

신재생에너지