

# 개별 블레이드 피치 제어 방식을 이용한 수직축 풍력발전기의 성능 해석 및 시스템 구현

정인오† · 이윤한\* · 황인성\*\* · 김승조\*\*\*

## Aerodynamic Analysis and System Implementation of Vertical Axis Wind Turbine using Individual Blade Pitch Control Method

In Oh Jeong, Yun Han Lee, In Seong Hwang and Seung Jo Kim

**Key Words:** Vertical Axis Wind Turbine(수직축 풍력발전기), Individual Blade Pitch Control(개별 블레이드 피치 제어), CFD Analysis(CFD 해석)

### Abstract

This paper describes a research for the performance improvement of the straight-bladed vertical axis wind turbine. To improve the performance of VAWT, the individual blade pitch control method is adopted. For the wind turbine, CFD analysis is carried out by changing blade pitch angle according to the change of wind speed and wind direction. By this method, capacity and power efficiency of VAWT are obtained according to the wind speed and rotating of rotor, and could predict the overall performance of VAWT. It was manufactured to verify performance of the experimental system that consists of rotor including four blades and base. Furthermore, torque sensor and power generator were installed. Also, active controller which can change the pitch angle of the individual blade according to the wind speed and direction was used.

### 1. 서 론

21세기에 접어들면서 에너지 소비의 급증으로 인한 화석에너지 고갈과 지구 온난화가 인류가 해결해야 할 문제로 떠오르고 있다. 풍력발전은 기존의 화석에너지를 대체할 수 있는 대표적인 신재생 에너지로서 회전축의 형태에 따라 수평축 풍력발전기와 수직축 풍력발전기로 나눌 수 있다. 수평축 풍력발전기는 바람의 방향과 회전하

는 로터 축이 서로 평행하고 수직축 풍력발전기는 로터 축이 바람의 방향과 수직을 이루어서 회전한다. 수직축 풍력발전기는 풍향에 무관하고 소음 발생이 적으며 유지 및 보수에 용이한 장점을 가지고 있다.

### 2. 개별 블레이드 피치 제어 방식

#### 2.1 기본개념

각각의 블레이드의 피치각을 제어하는 방식을 이용한 수직축 풍력발전기는 Fig. 1과 같이 바람이 불어 로터가 회전할 때 풍향, 풍속 변화에 따라서 각 방위각  $\phi$  위치에서의 블레이드 피치각  $\theta$  이 개별적으로 변화되는 것이다. 이러한 피치각 변화를 통해 로터의 토크를 최대로 유지할 수 있다는 점에서 기존의 고정 피치 방식의 풍력발전기보다 우수한 효율을 갖는다.

---

† 정회원, 서울대학교, 기계항공공학부 대학원  
(현재 : 한국항공우주연구원)  
E-mail : sjkim@snu.ac.kr  
TEL : (02)880-7388 FAX : (02)880-1918

\* 서울대학교, 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교, 기계항공공학부, 박사과정

\*\*\* 서울대학교, 기계항공공학부, 교수  
비행체특화연구센터, 소장

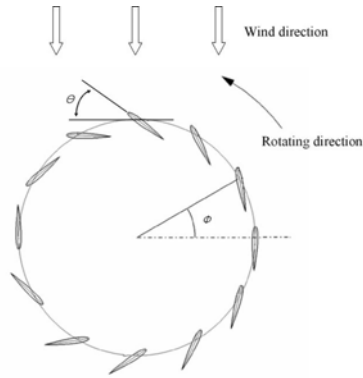


Fig. 1 Basic concept of rotor rotation

## 2.2 최적 피치 경로 계산

개별 블레이드 피치 제어 방식에 따른 로터의 성능 해석을 위해서는 로터가 회전할 때 각각의 블레이드가 방위각이 변함에 따라 최대의 토크를 낼 수 있는 최적의 피치각을 구해야 한다. 블레이드의 최적 피치 경로를 찾기 위해 정지된 상태에 있는 하나의 블레이드를 대상으로 풍속과 받음각  $\alpha$ 을 변화시키면서 CFD 해석을 수행한다. 이를 통해 블레이드에 작용하는 x 방향과 y 방향의 힘을 얻을 수 있다.

Fig. 2와 같이 블레이드가 회전축을 중심으로 로터 반경  $r$ 만큼 떨어져서 각속도  $\omega$ 로 회전하고 있을 때 방위각  $\phi$ 의 위치에서 갖는 바람의 합속도  $v_r$ 을 구할 수 있다. 블레이드는 접선 방향으로  $V_t$ 만큼의 속도를 내고 바람은  $V_w$ 의 속도로 불어온다면 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_t = -r \sin \phi \hat{i} + r \cos \phi \hat{j} \quad (1)$$

$$V_w = -v_w \hat{j} \quad (2)$$

$$V_r = V_w - V_t = r \sin \phi \hat{i} - (r \cos \phi + v_w) \hat{j} \quad (3)$$

$$v_r = \sqrt{(r \sin \phi)^2 + (r \cos \phi + v_w)^2} \quad (4)$$

이로부터  $V_r$ 과  $V_w$ 의 사이각  $\phi$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{(v_r)_x}{v_r} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{-r \sin \phi}{v_r} \right) \quad (5)$$

이 때 블레이드의 피치각이  $\theta$ 만큼 된다면 블레이드의 받음각  $\alpha$ 은 식 (6)으로 표현된다.

$$\alpha = \psi - (\phi - \theta) \quad (6)$$

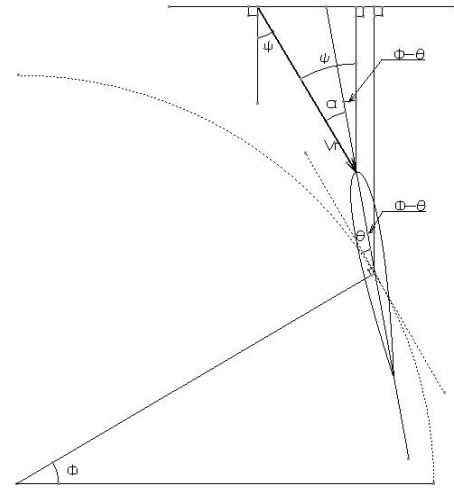


Fig. 2 Vector diagram of blade

풍속과 블레이드의 회전 속도를 알면 블레이드가 특정 방위각  $\phi$ 에 위치에서 피치각  $\theta$ 를 가질 때 받음각  $\alpha$ 를 구할 수 있고 그에 따라 블레이드에 작용하는 공력 하중이 얻어진다. 이 힘들을 이용해 각각의 피치각에 대한 접선 방향의 힘 (tangential force)을 구하면 최대의 힘이 나오는 경우에 대한 받음각을 정하고 식(7)을 통해서 최적의 피치각을 구할 수 있다.

$$\theta_{opti} = \alpha_{opti} - \psi + \phi \quad (7)$$

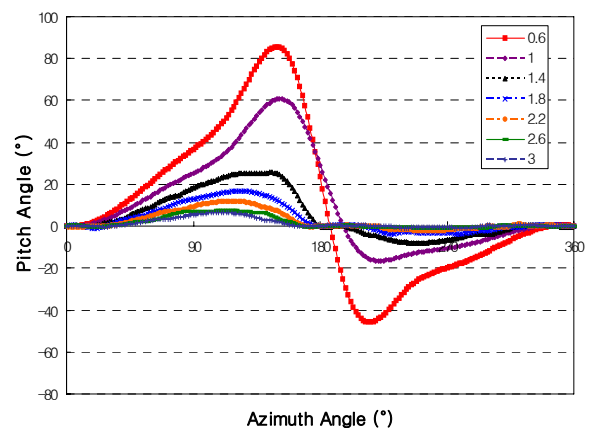


Fig. 3 Optimal pitch angle path according to TSR

개별 블레이드의 최적 피치 경로는 풍속과 TSR에 따라 로터가 방위각을 1.8도씩 회전한다고 가정하고 구하였다. 따라서 블레이드 피치각을

1.8도마다 나타낸다. TSR(tip speed ratio)은 바람의 속도와 블레이드의 접선 방향 속도의 비를 나타낸 것으로 로터가 풍속에 비해 얼마나 빨리 회전하는가를 알 수 있다.

$$TSR = \frac{rw}{V_w} \quad (8)$$

Fig. 3에서 낮은 TSR에서 피치각의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 초기 회전에서 접선 방향 힘과 토크를 크게 함으로써 로터의 자가 구동(self-starting)을 가능하게 한다. TSR이 증가하면 즉, 로터의 회전이 빨라지게 되면 피치각의 변화가 줄어든다.

### 3. 성능 해석

로터의 출력 및 효율을 구하기 위해서 상용 전산 유체 해석 프로그램인 STAR-CD를 이용하였다. 최적 피치각 데이터를 CFD 해석에 이용하고 풍속 및 TSR에 따라서 로터의 성능을 해석한다. CFD 계산을 통해 얻는 결과는 블레이드 하나가 매 time step마다 받는 힘이다. 이 데이터로부터 로터 출력은 식(9)를 통해 구할 수 있다.

$$P(\text{power}) = T \times w = N_b \sum_{i=1}^{N_{tsr}} (F_t r \times w) \quad (9)$$

$P$ 는 로터의 출력이고  $T$ 는 로터의 토크로서 블레이드의 접선 방향 힘과 로터 반경을 곱한 값이다.  $N_b$ 는 블레이드의 개수이다. 각속도  $w$ 는 풍속과 TSR이 주어지면 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

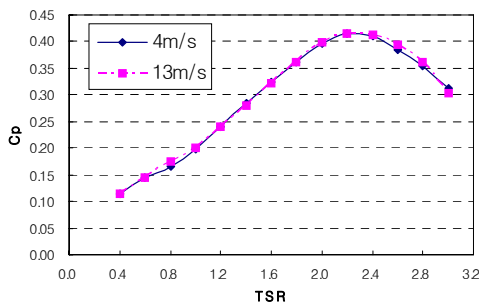


Fig. 4 Cp variations according to TSR

Fig. 4는 TSR 변화에 따른 출력계수(Cp)의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 Cp는 바람 에너지에 대한 로터 출력의 비로 정의되며 식(10)으로 나타

낸다.

$$C_p = \frac{P}{1/2 \rho V_w^3 A} \quad (10)$$

$\rho$ 는 공기 밀도이고  $A$ 는 로터 단면적이다.

그림에서 보면 풍속 4m/s와 13m/s에서 TSR 2.2일 때 효율이 가장 높게 나오고 두 경우에서 Cp 최대는 0.41 정도로 거의 비슷하다. 위 결과처럼 최대의 효율을 낼 수 있는 최적의 로터 회전 속도를 찾을 수 있으면 각각의 풍속에 대해 그러한 로터 회전을 이끌어낼 수 있는 시스템의 구현이 중요하다.

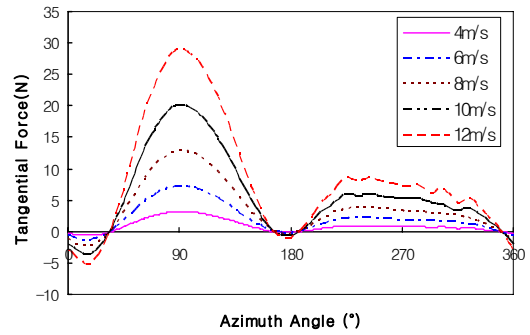


Fig. 5 Blade tangential force variations according to azimuth angle

Fig. 5는 블레이드 하나가 로터의 회전에 의해 0도에서 360도까지 회전하면서 각 방위각에 위치했을 때의 블레이드 접선 방향 힘을 나타낸 것이다. 출력이 가장 높게 나온 TSR 2.2에서의 결과로서 모든 풍속에서 방위각 90도 지점에서 접선 방향 힘이 가장 크게 나왔다. 이는 바람이 유입 방향에 대하여 방위각이 90도인 지점이 로터의 상단부에 위치하여 블레이드에 입사되는 바람의 방향과 크기가 공기역학적으로 최대의 접선 방향 힘을 낼 수 있는 조건을 만족하고 있기 때문이다. 반면 방위각이 270도인 지점에서는 90도인 지점에 비해 그 값이 크게 작아지는 것을 볼 수 있는데 이 지점이 로터의 하단부에 위치하고 있어서 블레이드가 받는 유동이 로터 상단부를 거쳐 속도가 감소된 상태에서의 유동의 흐름이 되고 따라서 블레이드가 내는 힘이 작다. 한편 방위각 180도 부근에서 작지만 음의 접선 방향 힘이 발생했고 특히 방위각 0~30도 지점에서 힘의 손실이 크게 나왔는데 로터의 블레이드가 전진하는 면(advancing side)으로 회전에 의한 속도 방향이 바람의 방향과 평행해 지면서 항력이 증가

했기 때문이다.

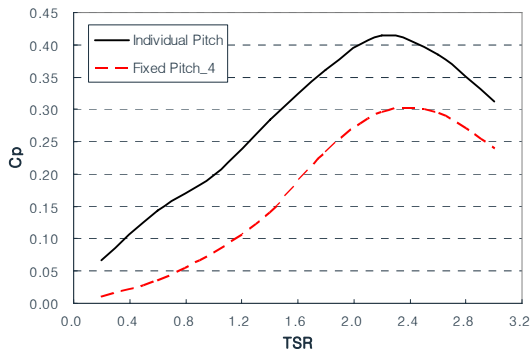


Fig. 6 Comparing individual pitch control with fixed pitch

CFD 해석으로 개별 블레이드의 피치각이 변화되는 것이 고정 피치 방식보다 효율이 좋음을 보인다. Fig. 6은 풍속 4m/s에서 Cp를 비교한 것으로 고정 피치 방식은 피치각을 4도로 고정한 상태에서 해석을 하였다. 결과로는 고정 피치 방식이 모든 TSR 영역에서 효율이 떨어진다. 앞서 구한 최적 피치 경로를 보면 각 방위각 위치에서 블레이드 피치각을 다르게 변화시키면서 로터의 회전력이 최대가 될 수 있게 하였지만 고정 피치 방식에서는 로터 상단부와 하단부에서 계속적으로 양의 피치각을 유지하면서 토크가 작아지게 된다.

#### 4. 로터 solidity의 영향

Solidity는 블레이드의 면적과 바람을 받는 로터의 면적과의 비를 나타낸 것으로 직선형 블레이드에서는 식 (11)로 표현한다.

$$\sigma = \frac{N_b d}{d} = \frac{N_b c}{d} \quad (11)$$

c는 블레이드 코드 길이, l은 블레이드 스패 길이, d는 로터의 지름을 각각 나타낸다. 전반적으로 solidity가 증가하면 로터가 천천히 돌고 높은 시동 토크를 발생시키며 자가 구동 능력을 향상시킨다. 하지만 시스템을 구성하는데 많은 재료가 드는 단점도 있다. 본 논문에서는 시스템 구성을 위한 재료비나 증속 기어 문제를 떠나서 로터의 성능 해석 면에서 solidity를 고려하고자

한다. 블레이드 개수를 조절해서 solidity를 변화시킨다. 코드 길이는 0.22m로 고정시킨 상태에서 블레이드의 개수를 4, 5, 6, 8개로 정하고 풍속 5m/s일 때를 기준으로 해석을 하였다. Fig. 7에서 전체적으로 최대 Cp는 비슷한 값을 갖는다. 하지만 블레이드 개수가 많을수록 즉, solidity가 클수록 보다 작은 TSR에서 최대 Cp가 나타난다. solidity가 큰 로터가 작은 로터보다 천천히 돌면서 더 좋은 성능을 낼 수 있다. 또한 블레이드 코드 길이 변화에 따라서도 solidity의 차이가 있음을 예상 할 수 있고 적절한 코드 길이 변화를 통한 해석이 필요하다.

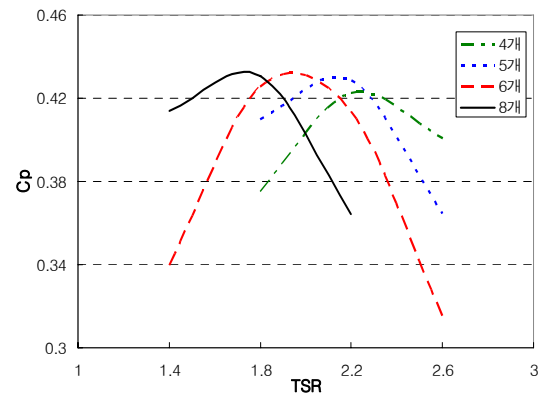


Fig. 7 Cp variations according to number of blades

#### 5. 시스템 구현

CFD 해석에 이용한 해석 모델을 바탕으로 실제 실험 및 운용을 위한 시스템을 제작한다. table 1은 로터 설계 변수로서, 이것을 바탕으로 실제 해석할 기하학적 형상을 모델링 하였다. 3D CAD 프로그램인 CATIA V5를 이용해서 설계 및 모델링을 하고 가상공간에서 조립을 해서 외부 형상을 생성하고 가공, 조립하여 최종적으로 1KW급의 고효율 수직축 풍력발전기를 제작하였다.

Table 1 Rotor design parameter

parameter	value
number of blades	4
airfoil type	NACA 0018
radius of rotor	1m
span length of blade	1m
chord length of blade	0.22m

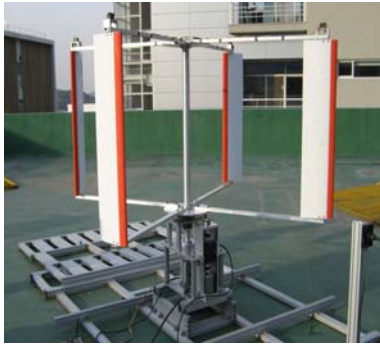


Fig. 8 Assembled VAWT

블레이드 피칭 모션 특성을 구현하기 위해서는 풍향과 풍속, 로터 회전수의 변화에 따라 각 블레이드의 피치각을 자유롭게 변화시킬 수 있는 제어 메커니즘이 필요하다. Fig. 9에서는 제어 메커니즘의 흐름을 나타내었다. 먼저 센서부를 구성하고 있는 풍향 풍속계는 각각 아날로그 전압과 펄스 형태로 신호를 출력하며 이를 제어부의 주 구성원인 마이크로컨트롤러에서 입력 받는다. 또한 로터리 인코더는 로터 축을 중심으로 회전하는 각 블레이드의 방위각을 신속히 측정하여 특정 방위각에서 요구되는 블레이드의 최적 피치각을 계산할 수 있도록 한다. 풍속 및 TSR에 따라 구한 최적 피치각을 데이터화해서 마이크로컨트롤러에 미리 입력한다. 마이크로컨트롤러는 측정된 방위각 데이터로부터 개별 블레이드의 최적 피치각을 계산하고 이를 PWM(Pulse Width Modulation) 신호로 변환하여 구동부로 출력한다. 구동부는 각 블레이드의 피치각을 제어하는 4개의 서보모터로 구성되어 있으며 블레이드 바로 위에 부착되어 있어 서보모터의 회전각을 그대로 블레이드에 전달하여 피치각을 변화시킨다.

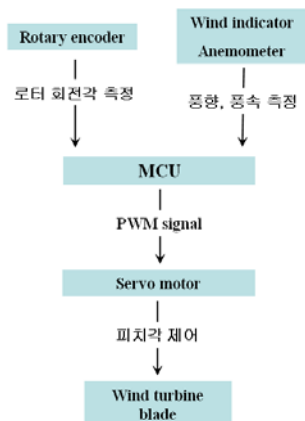


Fig. 9 Control mechanism



Fig. 10 Control devices

## 6. 수직축 풍력발전기 실험

풍력발전기의 실험에 있어서 자연 바람은 풍속이 일정하지 않고 바람이 장시간 불어주지 않기 때문에 임의적으로 원하는 풍속의 바람을 만들어 줄 수 있고 풍동 실험을 대체할 수 있는 송풍 장치를 제작하였다. 32마력 엔진에 프로펠러를 장착하고 Fig. 11과 같이 설치하였다. 또한 일반 직류 모터를 이용한 발전기를 설치하고 로터 토크를 측정하기 위한 토크센서를 로터와 발전기 사이에 연결하였다. 로터가 회전할 때 발전기에 전기적인 부하를 연결하면 로터의 토크를 측정할 수 있다. 측정된 값은 Labview 장비를 이용해서 나타내고 데이터를 기록한다.

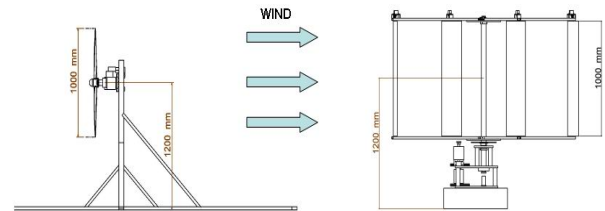


Fig. 11 Experimental system

로터는 풍속 3~4m/s에서 피치각 제어로 회전을 시작하고 풍속이 증가하면 로터의 회전도 점차 빨라지면서 유효한 출력을 내는 자가 구동 단계에 이른다. 풍속과 로터 회전수(rpm)의 센싱에 의해서 TSR이 크게 나타나면 즉, 풍속에 비해 로터 회전이 빠르면 피치각 변화는 작아지고 이러한 피치각 변화가 로터 토크를 증가시키는 요인이 된다. 실험에서는 풍속의 변화가 심하고 바람이 로터 면적 전체에 균일하게 불어주지 못해서 로터 회전에 방해 요인으로 작용하였고 그것으로 인해 출력이 성능 해석 결과에 미치지 못하였다. 하지만 발전기에 적절한 부하를 연결해서 Fig. 12

와 같이 60rpm 전후의 연속적인 로터 회전수와 로터의 토크를 구하였다. 또한 측정된 토크와 로터의 회전수로 구한 각속도를 서로 곱해 Fig. 13 과 같이 로터 출력을 구하였고 시스템의 운용 가능성을 확인하였다.

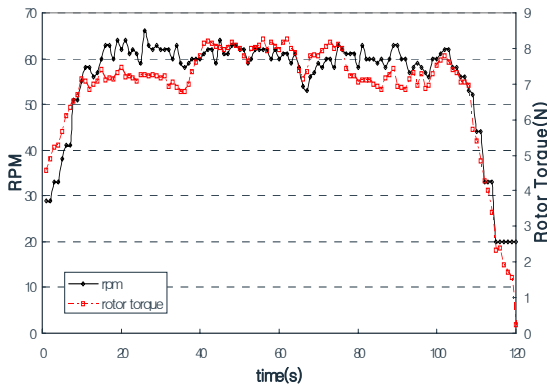


Fig. 12 Measurement of rpm and rotor torque

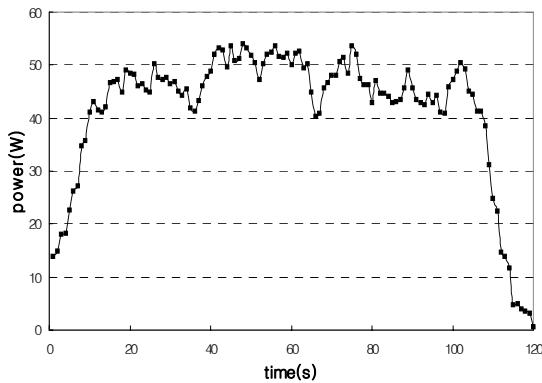


Fig. 13 Measurement of rotor power

## 7. 결론

본 논문에서는 수직축 풍력 발전기의 성능 향상을 위해서 고정 피치 방식의 수직축 풍력발전기에 개별 블레이드의 피치 제어 방식을 적용해서 공력 해석 및 제어 장치를 포함한 전체적인 수직축 풍력 발전 시스템의 설계, 제작 등을 수행하였다. 풍향과 풍속, 로터 회전수의 변화에 따라 최적의 피치각 변화 경로를 찾아 성능을 향상시켰으며 실험을 통해 피치각 제어로 낮은 TSR에서의 자가 구동과 함께 실제 전기를 생산하고 로터 출력을 구함으로써 운용 가능성을 확인하였다. 향후 본 논문에서 다룬 주요 설계 변수 이외에 공기역학적, 구조적, 전력 생

산, 형상 최적화, 실험 환경 개선 등이 고려된다면 더 효율적인 풍력 발전기의 설계, 제작이 가능할 것이다.

## 후 기

이 논문은 서울대학교 두뇌한국 21사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- (1) <http://www.knrea.or.kr>
- (2) B.K. Kirke, 1998, "Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications," Ph.D thesis, Griffith University, Australia.
- (3) Ion Paraschivoiu, 2002, "Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept", Polytechnic International Press, 2002. Ion Paraschivoiu, "Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept", Polytechnic International Press.
- (4) R. Gasch, J. Twele, 2002, "Wind Power Plants", Solarpraxis AG.
- (5) P. Cooper, O. Kennedy, 2004, "Development and Analysis of a Novel Vertical Axis Wind Turbine", Australian and New Zealand Solar Energy Society.
- (6) Hwang, I.S., Min, S.Y., Jeong, I.O., Lee, Y.H. and Kim, S.J., 2006, "Efficiency Improvement of a New Vertical Axis Wind Turbine by Individual Active Control of Blade Motion", SPIE's 13th Annual Symposium on Smart Structures and Materials.
- (7) CD-adapco group, 2004, "Star-CD Version 3.20 User Guide,"