

## 원호형상의 멀티 블레이드를 가진 풍력터빈 설계

추권철\* · 김동건\*\* · 윤순현\*\*\*

### Design for a circular arc shaped multi-blade windmill

Choo Kwon Chul\*, Kim Dong Keon\*\*, Yoon Soon Hyun\*\*\*

Key Words : Vertical axis wind turbine(수직축 풍력터빈), Drag force(항력)

#### ABSTRACT

The characteristics of the circular arc shaped multi-blade windmill are investigated. The prototypical windmill was tested in the laboratory at wind tunnel speeds of 5.5, 9.4m/s. and the model windmill was also tested in the laboratory. The power and torque coefficients were studied as functions of the blade section, the aspect ratio for blade diameter and windmill radius( $M = 0.3, 0.5, 0.7$ ), the number of blades and finally the tip-speed ratio. The analysis of the experimental results for the model windmill showed that there is the highest revolutions per minute(R.P.M) at the circular arc shaped multi-blade windmill having the blade number 10, aspect ratio( $M = 0.7$ ). and the results for the prototypical windmill showed that the power coefficient increased to a maximum value and then decreased again with an increase in the tip speed ratio, while the torque coefficient decreased directly with an increase in the tip speed ratio. Finally, the experimental results were compared with the Savonius blade. the maximum power coefficient for the arc shaped blade was greater than for the Savonius blade and occurred at a lower tip speed ratio..

기호 설명

$P_T$  = 터빈동력

$P_W$  = 풍력

$C_P$  = 동력계수

$C_T$  = 토크계수

TSR = 익단속도비(Tip speed ratio)

$M = \frac{d}{R}$  (형상비) d=블레이드 지름, R=터빈 반지름)

N = 터빈의 회전수

n = 블레이드 개수

#### 1. 서론

최근에 대두된 에너지 파동과 관련하여 대체 에너지 연구에 대한 중요성인식이 점점 가중화 되어 가고 있는 이 시점에 전세계적으로 활발히 연구중에 있는 대체에너지중의 하나가 풍력에너지이다.

국내에서는 1970년 유류 파동 이후, 풍력발전 연구를 시작하였는데, 1975년에 KIAST가 경기도 화순군에 설치한 2kW급 풍력 발전기가 국내 풍력발전기의 효시이며, 1990년대 이전까지 약 20여대의 소형 풍력 발전용 터빈이 설치되었으나, 풍력자원 부족이나 관리 소홀등으로 대부분 철거되어 뚜렷한 성과를 거두지 못하였다.

현재 국내의 전력수급 상태와 풍황 조건, 여러 가지 지리적 조건을 고려해볼 때, 새로운 대체 에너지 발전 방식으로써 풍력발전은 충분한 가능성을 가지고 있다.

\* 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

email : chookc@emapl.com

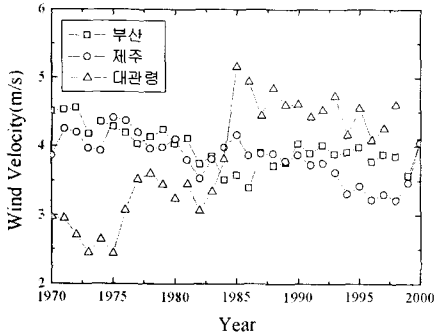


Fig. 1 Variation of the Mean wind speed

우리나라의 연대기별 평균 바람의 풍속변화를 Fig. 1에 나타내었다. 바람의 운동에너지를 이용하여 전력을 생산하는 풍력발전기의 핵심적인 요소는 블레이드이며, 블레이드의 공력설계(Aerodynamic design)는 전체 시스템의 성능을 좌우하는 아주 중요한 부분이므로 신중하게 설계하여야만 한다. 이러한 블레이드에 대한 설계가 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며 그 설계 모양은 아주 다양하다.

본 실험에서는 Fig. 2와 같은 형상을 가진 멀티 블레이드(blade)를 이용한 풍력 터빈을 설계, 제작, 성능평가를 하고자 한다. 풍력발전용 블레이드를 설계할 때 사용되는 블레이드는 다양한 종류가 제시되어 있으며 이러한 블레이드의 전반적인 선행연구는 수평식 풍력발전기(HAWT)에 대해 이루어져 있다. 본 연구에서는 수평식 풍력발전기(HAWT)보다 구조적으로 좀더 간단하고 바람의 방향에 관계없이 작동되며 좀더 높은 에너지와 효율을 낼 수 있는 수직축 풍력발전기(VAWT)에 대한 이론적 해석을 수행하고 이것을 토대로 하여 수직축 풍력발전기에 대한 신빙성 있는 설계 자료를 마련하는데 있다.

수직축 풍력발전기(VAWT)의 설계에 기인하는 두 가지 인자(parameter)가 있는데, 하나는 항력(Drag)을 이용하는 것이고, 또 다른 하나는 양력(Lift)을 이용하는 것이다. 전자의 경우 대표적인 풍력발전기는 핀란드에서 기원하는 것으로 사보니우스(Savonius)식이며 이 발전기의 특징은 비교적 느린 속도로 회전하고 큰 회전우력을 발생할 수 있는 장점이 있으나, 전기 발생 장치로서는 그다지 좋지 못하다. 후자의 대표적인 형태는 프랑스인인 Darrieus에 의해 고안된 Darrieus식 풍력발전기이다. 두 종류의 수직축 터빈에 대한 연구가 전 세계적으로 행해지고 있으며, Okamoto(1)등은 기동토크가 커 높은 기동풍속이 요구되는 다리우스 터

빈을 보완하기 위하여 사보니우스 터빈을 추가한 하이브리드(Hybrid)형을 제안하고, 풍동시험을 하여 저회전수에서 하이브리드 방식이 더 높은 동력을 내며 최대 동력도 약간 더 높음을 확인하였다. Morcos와 Abdel-Hafez(2)는 arrow-head rotor라는 수직축 터빈을 고안, 제작하여 로터(rotor) 날개의 형상비, 각도 변화 등에 따른 성능을 연구하였고, Moutsoglou와 Weng(3)는 기동풍속이 낮은 특성에도 불구하고 효율이 낮은 사보니우스 터빈의 단점을 해결할 대안으로 Benesh 터빈의 효과를 풍동시험으로 입증하였다. 본 논문에서는 익형형상을 가진 수직축 풍력터빈의 설계, 성능평가를 주목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

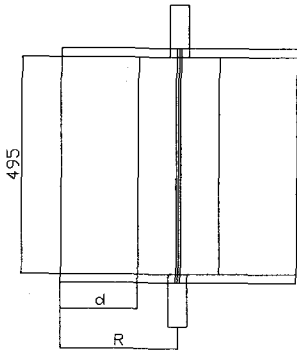
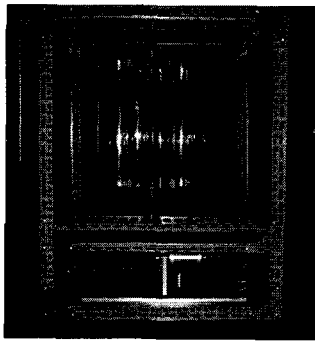
### 2.1. 풍동

본 실험에서 사용된 풍동은 유동의 흐름으로 볼때 2차원 벨마우스, 그리고 honeycombs, 경계층 발달을 위한 시험구간, 측정이 이루어지는 시험구간, 확산부, 저소음 축류팬 그리고 소음기로 구성되어 있다. 그리고 풍동의 구동을 위한 제어장비가 풍동의 바깥에 설치되어 있다. 측정이 이루어지는 시험구간의 크기는 경계층 발달을 위한 시험구간을 포함하여 폭 2.1m×높이 2.1m×길이 20m이며, 유동의 가시화 및 PIV 측정을 위해 두께 15mm의 강화유리가 측정이 이루어지는 시험구간에 설치되어있으며, 경계층 발달구간 및 주요 구조물을 두께 6mm의 철판(재질:SS400)과 채널을 이용하여 제작하였다. 풍동의 구동은 185kw의 3상 440V 가변 직류전동기에 의해 구동되며, 직류전동기의 최대 분당 회전수 1750rpm이다. 직류전동기에서 생성된 회전력은 V-belt(8개)를 이용하여 축류 팬으로 전달된다. 이때 축류팬의 회전에 의한 swirl을 방지하기 위하여 시험부의 끝에 swirl 방지를 위한 격자가 제작되어 설치되었다. 격자의 크기는 폭 30cm×높이 30cm×길이 30cm로 제작되어 설치하였다. 풍동의 최대 유량은 5.040m<sup>3</sup>/min이며, 이때 최대속도는 23.5m/s이다. 풍동의 풍속을 측정하기위해 풍동 천장부에 pitot tube를 설치하였으며, 풍동에 의해 발생될 수 있는 진동을 최소화하기위해 바닥면에 방진 고무등을 설치하였다. 풍동의 하류에 축류 팬과 직류전동기를 위치시켰다. 축류 팬의 용량은 5.040m<sup>3</sup>/min이며 이때 최대 분당회전수는 1,160rpm이다. 풍동의 운전은 별도의 운전 패널을 이용하여 운전할 수 있다. 직류전동기의 회전수와

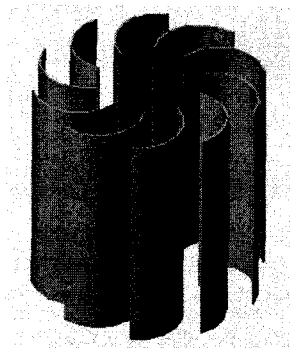
유량은 선형 관계에 있으므로, 운전 패널에서는 직류 전동기 회전수의 조절을 통하여 풍동의 속도를 조절할 수 있도록 하였다.

## 2.2. 터빈 블레이드 형상

본 터빈은 실제 터빈을 제작하기 전에 시험한 모델로서 터빈의 원활한 회전을 위해 강철 ㄱ형강을 이용하여 터빈 외부의 틀을 제작하였으며 대기경계층 풍동 내에 설치하여 시험하였다.



(a) Wind turbine model apparatus



(b) Blade shape

Fig. 2 Wind turbine model and blade shape

본 실험에 사용된 블레이드는 아크릴로 제작되었으며, 터빈의 반지름에 대해 각각의 형상비  $M=0.3, 0.5, 0.7$ 를 두어 제작하였다. 그리고, 블레이드 길이  $L$ 은 495mm이며 터빈 축에 베어링을 설치하여 회전축의 저항을 최소화하였다.

## 2.3. 실험방법

본 실험의 시험부는 풍동을 통해 들어오는 풍속을 check하기 위해 터빈 전방 500mm에 피토관을 설치한 후 micro-manometer를 설치하였다. 터빈의 블레이드 형상은 동일한 길이에 대해, 각각 지름  $d$ 를 변화하여 터빈의 반지름  $R$ 과 블레이드 지름  $d$ 의 비(比)에 따른 터빈의 회전수 평가를 수행하였다.

일반적인 풍력터빈의 특성식에서 알 수 있듯이 터빈의 회전수는 터빈 동력을 가능케하는 하는 인자 (factor)이기 때문에 터빈의 회전수를 측정하였다. 또한 Fig. 2와 같이 유입되는 유체의 에너지가 블레이드 마찰에 따른 손실을 최대한 줄이기위해 블레이드를 접선 방향으로 설치하였다. 그리고, 블레이드 개수변화에 따른 회전수 변화를 측정하기위하여 블레이드 개수를 10개, 9개, 8개, 6개, 5개, 4개, 3개로 변화를 주어 실험을 하였으며, 형상비에 따른 최고의 회전수를 측정하기위하여  $M=0.7, 0.5, 0.3$ 으로 변화를 주어 실험을 하였다. 형상비  $M$ 의 최대를 0.7로 정한 것은 유체의 유동이 회전축의 중심을 통과하고 유입되는 유체의 접선 방향으로 설치할 수 있는 블레이드의 최대 형상비이기 때문이다. 좀더 간략하게 실험방법을 서술하자면,

- ① 블레이드 지름의 변화
- ② 블레이드 개수변화에 따른 회전수변화

풍동의 풍속은 7m/s에서 실험하였다. Mojola와 Onasnaya(4)는 균일유동과 대기 경계층 유동에 따른 터빈 동력계수를 조사한 바, 경계층에 의한 동력계수의 저하보다 바람의 비정상성(Unsteadiness)에 의한 손실이 훨씬 더 심각함을 지적하였다. 이에따라 본 연구는 균일 유동을 이용하여 시험을 하였다. 터빈의 성능평가에 요구되는 토크, 회전수와 동력은 Speed Encoder(Model : HD-705-7NA)와 Dynamometer Controller(Model : DSP6001)을 사용하여 실시간으로 데이터(data)를 측정하였고, Fig. 3는 Dynamometer Controllerr의 Calibration과정이다.

Calibration의 절차는 다음과 같다.

- ① Dynamometer 축에 Calibration beam을 설치한다.

② Fig. 3과 같이 일정한 거리에 추를 설치한다

③ Dynamometer 뒤편에 설치되어 있는 zero trim point를 조절하여 액정에 표시된 값이 "0"이 나오도록 한다. 이때  $\pm 1$ 값의 범위내에 들도록 조절한다.

④ CW방향에 추를 설치하여 Dynamometer 액정에 표시된 토크 값과 설치된 추의 무게와 거리에 따른 토크 계산 값이 일치하는지 조사한다.

⑤ CCW방향에 추를 설치하여 ④과 같은 방법으로 토크의 일치여부를 파악한 후 값이 일치하지 않을 경우 조절나사를 통하여 값을 조절한다.

⑥ Dynamometer에 표시된 값과 실제 계산된 토크 값이 일치하면 축에서 Calibration beam를 제거한다.

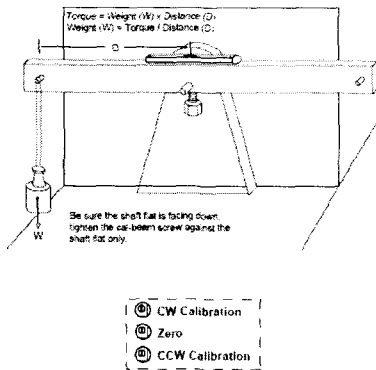


Fig. 3 Calibration for the Dynamometer

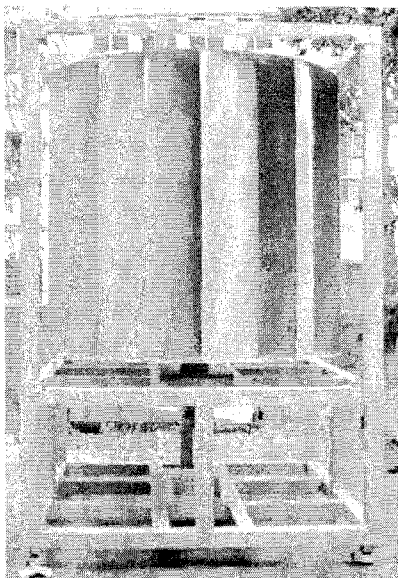


Fig. 4 The photograph of the wind turbine prototype

본 연구의 터빈 형상 결정에 있어 사각형과 원호형상에 대해 Euler의 터보기계방정식을 적용하여 계산한 결과 원호형상의 블레이드에 더 큰 축토크가 작용하는 것을 알 수 있다. 펌프에 유입되는 유체의 방향과 실제 터빈에 유입되는 유체의 유동이 정확히 일치할 수는 없지만 에너지 흡수율면에서 볼때 원호형상의 블레이드가 좀더 높은 에너지 흡수를 한다는 것을 기초로 블레이드를 설계하였다. Fig. 4는 Fig. 2의 실험에 의한 결과를 기초로 실제 제작한 풍력터빈이다. 터빈의 지름은 2m이고 블레이드 길이는 1.8m이다. 블레이드 개수는 10개로 제작되었으며 블레이드 재질은 SS400이다. 실제 터빈의 동력을 측정하기위하여 터빈 축의 하단부에 증속기(CNV-6090-21)을 설치하였다.

본 연구에서 시험한 터빈과 1975년에 Sandia Lab.에서 Blackwell에 의해 시험한 Savonius와 결과를 비교하였다(7). Blackwell는 시험결과에서 2개의 날개를 가지고 형상비( $S/d=0.15$ )인 터빈이 가장 좋은 효율을 나타낸다고 말한 바 현재 시험의 결과를 위의 조건과 비교하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 5는 실제 터빈을 제작하기전 최적의 회전수를 가지는 풍력터빈의 인자를 찾기위한 실험으로서 풍속 7m/s에서의 블레이드 개수변화와 형상비에 따른 터빈의 회전수 분포이다. Fig. 5의 결과로 형상비가 가장 크고 블레이드의 개수가 가장 많은 경우 더 높은 회전수를 가진다는 것을 알 수 있다. 즉, 형상비가 0.7이고 블레이드 개수가 10개인 것이 가장 빠른 회전수를 나타냄을 알 수 있다. 한편 형상비 0.5에서는 블레이드 개수가 6까지 급격한 회전수 증가를 보이다가 그 기울기가 완만해지고 형상비 0.7인 경우는 블레이드 개수가 4개인 부분부터 완만한 회전수 증가를 가진다. 이에반해 형상비 0.3의 기울기는 블레이드 개수가 10개까지 계속 증가함을 알 수 있다. 이에따라 형상비 0.3의 블레이드 개수증가에 따른 기울기를 좀더 알아보기 위해 블레이드 개수를 16개까지 늘려서 형상비 0.7와 비교 시험을 해본 결과 형상비 0.3인 경우 블레이드 개수가 12개 이후부터 완만한 회전수 증가를 가지고 그 최고값은 역시 형상비 0.7 블레이드 10개의 최고 회전수 값에는 미치지 못함을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 형상비 0.7, 블레이드 개수 10개를 가지고 실제 풍력 터빈을 제작하여 동력( $P_T$ )과 동력계수( $C_P$ ), 토크계수( $C_T$ )값을 측정하였다.

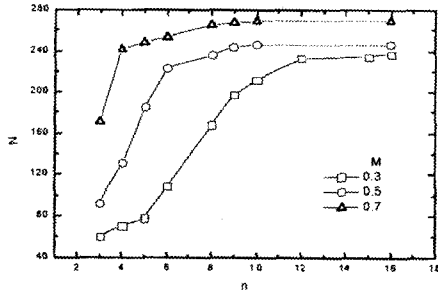


Fig. 5 Distribution of rpm for variation of blade numbers and aspect ratio at  $U = 7\text{m/s}$

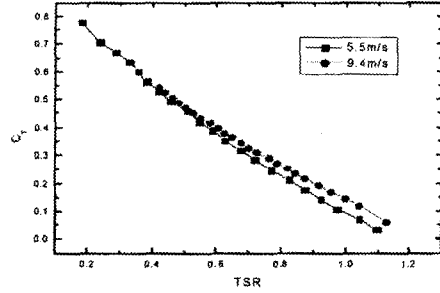


Fig. 9 Torque coefficients for tip speed ratio while changing the torque

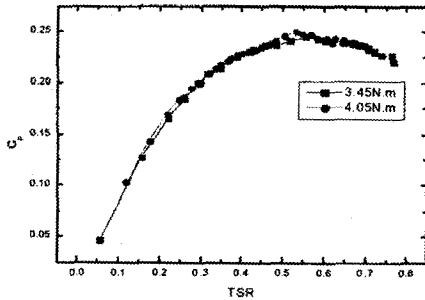


Fig. 6 Power coefficients for tip speed ratio while changing the velocity

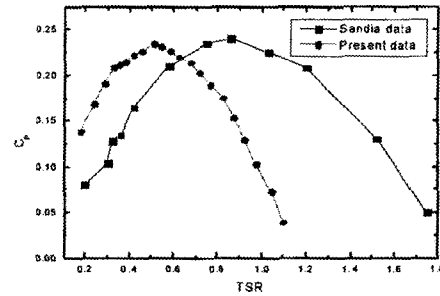


Fig. 10 A comparison of power coefficients for Savonius blades

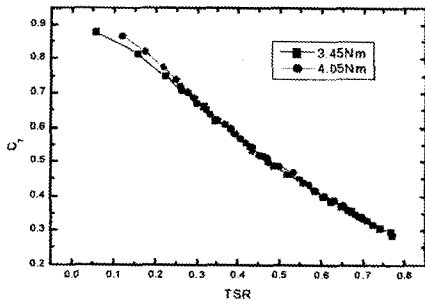


Fig. 7 Torque coefficients for tip speed ratio while changing the velocity

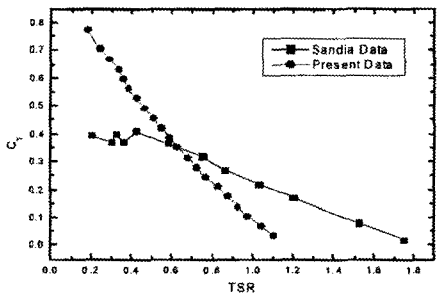


Fig. 11 A comparison of torque coefficients for Savonius blades

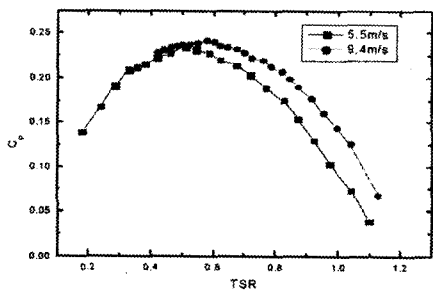


Fig. 8 Power coefficients for tip speed ratio while changing the torque

터빈에 대한 선행연구의 결과를 볼때 주로 익단속도비에 대한 동력계수와 토크계수 값을 측정하였다. 하지만, 익단속도비는 풍속의 변화 뿐만아니라 토크의 변화에 따라 터빈의 회전수에도 영향을 미치므로 본 연구에서는 토크에 따른 익단속도비와 속도에 따른 익단속도비로 나누어 동력계수 값과 토크계수 값의 차이를 보고자 하였다.

Fig. 6는 토크를 기준으로 풍속을 변화시켰을 때 동력계수 값의 변화를 보여주는 것이다. 익단속도비 0.45에서 0.7사이일 때 가장 높은 동력계수 값을 나타

남을 알 수 있다. 동력계수는 본 터빈이 가지고 있는 효율로써 약 24%이다. 또한, 토크의 변화에 따른 동력계수 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고, 익단속도비가 증가함에 따라 동력계수 값은 다시 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 Blackwell(7)의 결과와 잘 부합한다.

Fig. 7는 토크를 기준으로한 익단속도비에 따른 토크계수 값의 분포이다. 익단속도비가 증가함에 따라 토크계수 값은 점점더 감소한다는 것을 알 수 있으며 익단속도비가 0.8부근에서 토크계수는 거의 0의 값을 가진다. 토크계수 값이 0이라는 것은 익단속도비가 0.8이상 이 되면 본 터빈은 더이상 회전하지 않는다는 것을 말한다.

Fig. 8는 속도를 일정하게 두고 토크 값의 변화를 봤을 때 동력계수 값의 변화를 나타낸 결과이다. 각각의 실험 기준 풍속은 5.5m/s, 9.4m/s이다. 위의 결과에서 최고 동력계수 값을 가지는 TSR영역은 0.45에서 0.7사이에 나타난다는 것을 알 수 있다. Fig. 6의 결과와 거의 유사한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9은 속도를 일정하게 두고 토크 값의 변화를 봤을 때 토크계수 값의 변화를 나타낸 결과이다. TSR의 증가에 따라 토크계수 값은 계속적인 감소를 나타내는 것을 알 수 있다. 역시 Fig. 7의 값과 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 그리고 낮은 TSR값에 대해 높은 토크계수 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이것은 낮은 풍속에서 본 터빈의 시동토크가 크다는 것을 알 수 있으며 터빈이 설치될 지역의 평균풍속이 5m/s인 점을 감안 할 때 우리나라 풍환경에 잘맞는 터빈임을 알 수 있다.

Fig. 10은 Blackwell의 동력계수 시험 결과와 비교한 것이다. Blackwell 터빈과 비교했을 때 본 터빈은 익단속도비(TSR)가 훨씬 낮은 값에서 높은 동력계수가 나온다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과 역시 본 터빈은 속도가 낮은 풍속에서 이용가치가 훨씬 더 높다는 것을 나타내는 자료이다.

Fig. 11은 Blackwell의 토크계수 시험 결과와 비교를 나타낸 것으로써 본 시험에 사용된 터빈이 Savonius의 터빈에 비해 시동토크면에서 상당한 높다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서 원호형상을 가진 풍력터빈을 제작, 시험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 원호 형상의 멀티 블레이드를 가진 수직축 풍력 터빈은 블레이드 개수가 10개 형상비가 0.7인 경우 가장 높은 회전수를 가진다는 것을 알 수 있다.
- 2) 본 터빈은 익단속도비가 0.45에서 0.7사이에 가장 높은 동력계수 값을 갖고 효율은 약 24%에 달한다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-515)주관으로 수행된 과제임.

#### 참고문헌

- (1) Okamoto, N., Ushiyama, I., and Makino, A., 1993, "Experimental Studies for the Hybrid Wind Turbine," ENERGEX 93-The 5th International Energy Conference.
- (2) V. H. Morcos and O. M. E. Abdel-Hafez March 1996, "Testing of an arrow-head vertical-axis wind turbine model Renewable Energy", Vol.7 issue3, Pages 223-231.
- (3) Moutsoglou, A. 1995., "Performance Tests of a Benesh Wind Turbine Rotor and a Savonius Rotor" WIND ENGINEERING LONDON-, Vol.19 No.6.
- (4) Mojola, O.O. and Onasanya, O.E., 1982 "Performance Testing of a Savonius Windmill Rotor in Shear Flows".
- (5) Tood, F. H. and Taylor, D. 1991, "Principles of Naval Architecture - Propulsion", Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- (6) J. L. Menet 11. september 2004, "A double-step Savonius rotor for local production of electricity : a design study Renewable Energy", Vol.29, issue, Pages 1843-1862
- (7) Blackwell, B.B., Sheldahl, R.E. and Feltz, L.V., 1978. "Wind-tunnel Performance Data for Two and Three-Bucket Savonius Rotors," Sandia Laboratories Energy Report, SAND76-0131, also Journal of Energy, Vol 2, Pages 160-164