〈 기술논문 〉

수직축 항력식 풍력터빈의 구조설계 및 실험평가

김동건* · 금종윤** · 윤순현†

(2005년 5월 31일 접수, 2006년 2월 8일 심사완료)

Structure Design and Experimental Appraisal of the Drag Force Type Vertical Axis Wind Turbine

Dong Keon Kim, Jong Yoon Keum and Soon Hyun Yoon

Key Words: Vertical Axis Wind Turbine(수직축 풍력터빈), Drag Force(항력), Opening-Shutting Rotor (개폐 로터), Blade Geometry(날개형상), Power Coefficient(동력계수), Torque Coefficient (토크계수), Advance Ratio(전진비), Tip Speed Ratio(익단속도비)

Abstract

Experiments were conducted to estimate the performance of drag force type vertical axis wind turbine with an opening-shutting rotor. It was operated by the difference in drag force generated on both sides of the blades. The rotational speed was measured by a tachometer in a wind tunnel and the tunnel wind speed was measured by using a pitot-static tube and a micro manometer. The performance test for a prototype was accomplished by calculating power, power coefficient, torque coefficient from the measurement of torque and rpm by a dynamometer controller. Various design parameters, such as the number of blades(B), blade aspect ratio(W/R), angle of blades(α) and drag coefficient acting on a blade, were considered for optimal conditions. At the experiment of miniature model, maximum efficiency was found at N=15, α=60° and W/R=0.32. The measured test variables were power, torque, rotational speed, and wind speeds. The data presented are in the form of power and torque coefficients as a function of tip-speed ratio V/U. Maximum power was found in case of Ω=0.33, when the power and torque coefficient were 0.14 and 0.37 respectively. Comparing model test with prototype test, similarity law by advance ratio for vertical axis wind turbine was confirmed.

기호설명

A	: 터빈의 투영면적
B	: 날개 수
D	: 터빈의 직경
C_P	: 동력계수
C_T	: 토크계수
H	: 터빈의 높이
N	: 회전수
P_W	: 풍력
P_T	: 터빈동력
R	: 터빈의 반경
T	: 토크
U	: 풍속
V	: 회전 선속도($= R\omega$)
W	: 날개폭
α	: 날개 각도
ρ	: 밀도
Ω	: 익단 속도비(tip-speed ratio) ($= V/U$)
Ω_{max}	: 최대 동력계수일 때의 익단 속도비
ω	: 회전 각속도

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소
** 부산대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : yshyoon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2314 FAX : (051)583-7640

1. 서 론

현재 고유가 시대에 대체에너지의 개발이 절실히 요구되고 있고, 세계적으로 대체에너지 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 풍력은 대기 중에 폐열과 공해물질을 방출하지 않을 뿐만 아니라 환경오염이 없는 무공해 청정에너지를 생산한다. 풍력터빈은 공기의 운동에너지를 회전자의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 회전운동 에너지로 변환시키는 역할을 하는 것으로서, 회전자 축의 방향에 따라 수평축 터빈[1,2](Horizontal Axis Wind Turbine : HAWT) 방식과 수직축 터빈[2~8](Vertical Axis Wind Turbine : VAWT) 방식으로 나눌 수 있다.

일반적으로 수직축 풍력터빈은 수평축 풍력터빈에 비해 효율이 떨어지고 작동범위가 적다는 등의 단점이 있으나, 바람의 방향에 관계없이 운전되는 특징이 있다. 이것은 풍향에 대한 추적장치가 필요 없기 때문에 구조적으로 간단하고, 설치비용이 저렴하다. 또한 시동풍속을 낮게 해줌으로써 미풍에서도 풍력발전이 가능하다. 대표적인 수직축 터빈으로는 Savonius 풍력터빈[3~5]과 Darrieus 풍력터빈[6]이 있다. 전자는 항력을 이용한 것이고, 후자는 양력을 이용한 터빈이다.

수직축 터빈의 연구는 많은 연구자들에 의해 행하여져 오고 있다. Moutsoglou와 Weng[3]은 시동풍속이 낮은 특성에도 불구하고 효율이 낮은 Savonius rotor의 단점을 해결할 대안으로 제시된 Benesh rotor의 효과를 풍동시험에서 입증하였다. Okamoto 등[7]은 시동토크가 커 높은 시동풍속이 요구되는 다리우스 터빈을 보완하기 위하여 Savonius 터빈을 추가한 하이브리드(Hybrid)형을 제안하고, 풍동시험을 하여 저회전에서 하이브리드 방식이 더 높은 동력을 내며 최대동력도 약간 더 높음을 확인하였다. 그러나 고회전수에서는 하이브리드 방식의 동력이 오히려 다리우스 터빈에 비해 낮았다. Morcos와 Abdel-Hafez[8]는 Arrow-head rotor라는 수직축 터빈을 고안, 제작하여 로터(rotor) 날개의 형상비, 각도 변화 등에 대한 성능을 연구하였다.

본 연구에서 개발된 개폐식 풍력 터빈은 회전축이 수직으로 설치됨으로써 유체흐름을 전방위에서 받아들일 수 있는 전유향형 수직축 터빈이고, 유체 흐름을 받을 시 날개의 개폐도어(opening-shutting door)들이 개폐동작을 수행함으로써 회전력을 발생되는 개폐도어식 항력 터빈이다. Fig. 1은 개폐도어의 원리를 나타낸 것으로, 유체의 흐름이 없을 시에는 각 날개의 개폐도어들이 그 도어면을 아래로 떨어뜨린 채로 정지한 상태, 즉 도어가 닫힌 상태로 유지하고 있고, 유체의 흐름이 있을 시에는 회전축을 중심으로 좌측날개부와 우측날개부의 개폐도어들은 서로 상반된 동작을 시작하게 된다. 즉, 우측날개부의 개폐도어들은 닫힘 동작을 수행하고, 좌측날개부의 개폐도어들은 열림 동작을 수행한다. 이 때 터빈의 양측 날개들은 각기 상이한 크기의 항력이 발생하게 되고, 따라서 회전축을 중심으로 양측 날개부의 영역의 항력편차가 발생되는 것이다.

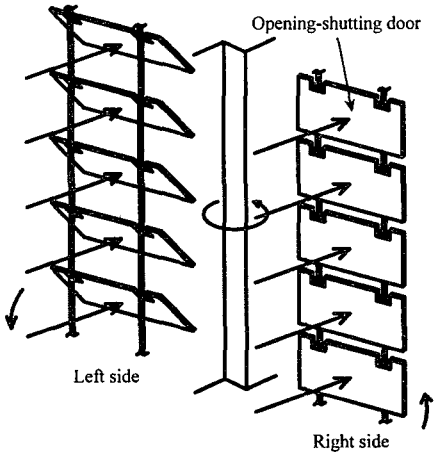


Fig. 1 Principle of opening-shutting door

본 연구에서는 항력식 수직축 터빈의 한 형태로, 회전축 좌우의 항력차를 최대로 해주기 위해 개폐도어를 도입하여 풍향이 일정하지 않은 국내 풍환경에 적합한 항력식 소형 풍력터빈 모델의 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 평판식 터빈

개폐식 풍력터빈을 설계하는데 있어서 날개수, 날개각도, 날개 형상비 등과 같은 인자들을 고려하여야 한다. 하지만, 이러한 설계인자를 모두 고려하여 모형을 제작하여 모든 변수에 대해 실험을 수행하는 것이 너무 힘들기 때문에 본 연구에서는 날개 수와, 날개 형상비에 대한 최적의

조건을 찾는데 있어 평판식 터빈을 도입하여 수행하였다. 개폐식 터빈과 평판식 터빈은 구조뿐만 아니라 회전축을 중심으로 좌우측 날개부에 걸리는 항력의 차에도 분명한 차이를 보인다. 하지만, 두 터빈 모두가 항력을 이용한 터빈이고, Fig. 2와 같이 유동조건에 따른 변수를 추가하면 항력의 차를 고려한 설계가 가능하기 때문이다.

Fig. 2는 평판 터빈에서 좌우측 날개부에 걸리는 항력의 차를 주기 위한 유동 조건에 대한 개략도를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 전유동(all flow)으로, 좌우측 날개부의 항력의 차가 최소로 작용하고 있는 경우이고, Fig. 2(b)는 반유동(half flow)으로, 좌우측 날개부의 항력의 차를 최대로 주기 위하여 회전축을 중심으로 한쪽방향에만 유동을 가하는 형태이다.

Fig. 3은 평판 터빈의 개략도를 나타낸 것이다. 평판 터빈은 아크릴로 제작되었으며, 직경(D)은 205mm, 높이(H)는 190mm이고, 유동에 대한 터빈의 투영면적은 0.038m^{2}이다. 터빈 날개는 60개까지 장착이 가능하고, 날개 각도는 날개 수와 날개 형상비에 의해 장치적으로 제한을 받기 때문에 0°에서 50°까지 수동으로 조절이 가능하도록 제작하였다. 그리고 날개 폭(W)은 20mm, 30mm, 40mm로, 터빈 반경에 대한 날개폭의 비, 즉 날개 형상비(W/R)는 각각 0.193, 0.295, 0.390이다.

평판터빈 실험에 사용된 풍동은 개회로 저속풍동(open circuit low speed wind tunnel)으로 송풍기가 외기를 흡입하여 시험부로 토출하는 방식이다. 풍동의 전체길이는 대략 6m이며, 송풍기(blower)와 확대부(diffuser) 그리고, 수축 노즐(contraction nozzle)로 구성되어 있다. 송풍기는 7.5kW 교류 3상 전동기에 의해 구동되며, 주파수 변환기를 사용하여 시험부 입구의 자유흐름 속도를 0~33m/s로 가변할 수 있다. 수축노즐의 형상은 Morel[9]의 3차 다항식으로 제작하여 노즐 출구에서 균일유동이 나오도록 하였고, 시험부의 크기는 300mm × 300mm × 1000mm이다. 평판 터빈 실험 조건은 풍속(U)을 3m/s ~ 9m/s로, 날개 각도(α)를 0° ~ 50°로, 날개 형상비(W/R)를 0.195, 0.293, 0.390으로, 날개 수(B)를 5 ~ 30개로 변화시키면서 회전계(tachometer)를 통하여 회전수를 측정하였고, 이러한 변수들은 유동조건에 따른 전유동과 반유동에서 동일하게 수행하였다.

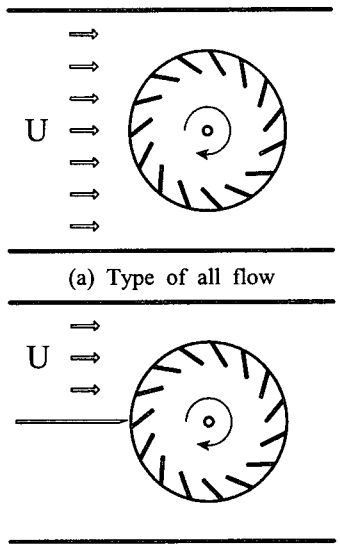


Fig. 2 Schematic diagram of flow condition

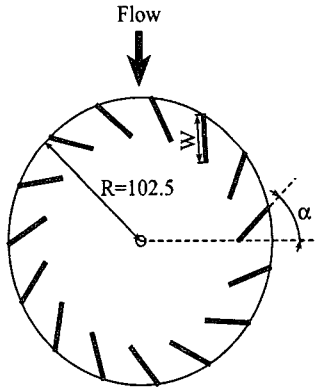


Fig. 3 Schematic diagram of wind turbine using flat plate

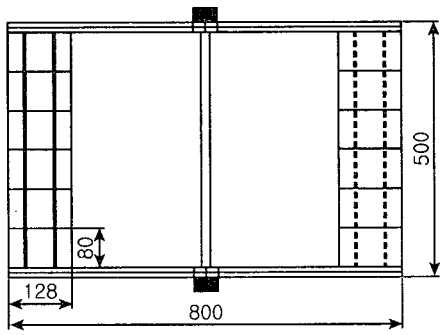


Fig. 4 Schematic diagram of miniature wind turbine using opening-shutting door

2.2 개폐식 모형 터빈

Fig. 4는 평판 터빈 실험에서 최대 회전수를 갖는 조건인 날개수가 15개, 날개 형상비가 0.293을 채택하여 제작된 개폐식 모형터빈의 개략도를 나타낸 것이다. 이 터빈의 직경은 800mm, 높이는 500mm로 제작되었고, 유동에 대한 터빈의 투영면적은 0.4m^{2}이다. 터빈의 날개는 총 15개로 구성되어 있으며, 각각의 날개는 크기가 80mm × 128mm인 사각형 조각이 6개가 조합되어 있다. 날개의 재질은 유체력에 대해 날개가 잘 개폐되도록 밀도가 0.003kg/m^{3}인 폴리스틸렌을 압출 및 평판가공을 통해 제작된 우드락을 사용하였다. 축의 직경은 18mm이고, 날개 각도는 0°에서 70°까지 수동으로 조절이 가능하도록 제작되었다.

개폐 모형의 실험에 사용된 풍동은 유동의 흐름으로 볼 때 2차원 벨마우스, 그리고 허니컴(honeycombs), 경계층 발달을 위한 시험구간, 측정이 이루어지는 시험구간, 확산부, 저소음 축류휀 그리고 소음기로 구성되어 있다. 그리고 풍동의 구동을 위한 제어장비가 풍동의 바깥에 설치되어있다. 측정이 이루어지는 시험구간의 크기는 경계층 발달을 위한 시험구간을 포함하여 2100mm × 2100mm × 20000mm이며, 풍동의 최대 유량은 5,040m^3/min이며, 이때 최대속도는 23.5m/s이다. 풍동의 풍속을 측정하기 위해 풍동 전방부에 피토관(pitot tube)을 설치하였다. 풍동의 운전은 별도의 운전 패널을 이용하여 운전할 수 있다. 직류전동기의 회전부와 유량은 선형 관계에 있으므로, 운전 패널에서는 직류전동기 회전수의 조절을 통하여 풍동의 속도를 가변할 수 있다. 풍속은 피토관과 마노메타를 이용하여 측정하여 2m/s ~ 5m/s로 변화하였고, 날개각도는 0°부터 70°까지 10°씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 터빈의 성능평가에 요구되는 토크, 회전수와 동력은 Speed Encoder(Model : HD-705 -7NA)와 Dynamometer Controller(Model : DSP6001)를 사용하여 실시간으로 측정하였다.

2.3 개폐식 150W급 원형(prototype) 터빈

Fig. 5는 개폐모형 실험에 의한 결과를 기초로 하여 실제 제작한 150W급 풍력터빈 사진이다. 터빈의 크기는 직경이 2.2m, 높이가 1.6m이고, 개폐도어의 크기는 320mm × 160mm로 제작되었고, 한 개의 터빈 날개는 10개의 개폐도어로 구성된다. 터빈의 날개 수는 15개로 제작되었으며, 실제

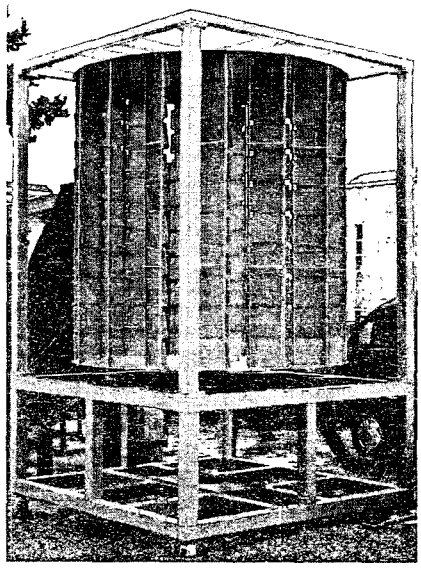


Fig. 5 The photograph of the wind turbine for 150W-class

제 터빈에 부착된 발전기에서의 전기적인 동력을 측정하기 위하여 터빈 축의 하단부에 증속비 21:1의 증속기(CNV-6090-21)를 설치하였다. 그리고 이 증속기와 Dynamometer Controller가 연결되어 기계적인 동력을 측정할 수 있도록 하였다.

2.4 성능분석

실험에 대한 터빈동력(P_T), 풍력(P_W), 동력계수(C_P), 토크계수(C_T), 익단속도비(Ω) 값은 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$P_T = \frac{1}{2}\rho U^3 A C_P = T\omega \tag{1}$$

$$P_W = \frac{1}{2}\rho U^3 A \tag{2}$$

$$C_P = \frac{P_T}{P_W} = \frac{1/2\rho U^3 A C_P}{1/2\rho U^3 A} = \frac{T\omega}{1/2\rho U^3 A} \tag{3}$$

$$\Omega = \frac{V}{U} = \frac{r\omega}{U} \tag{4}$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A R} = \frac{C_P}{\Omega} \tag{5}$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평판식 터빈

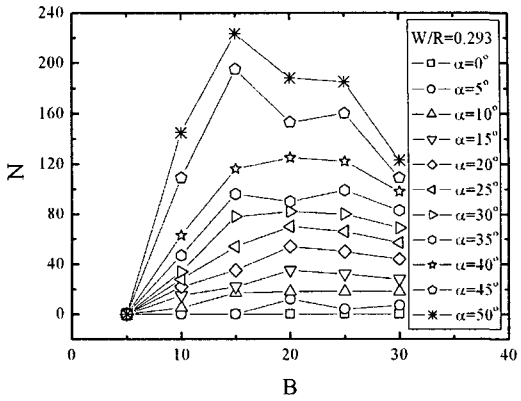
Fig. 6은 유동조건에 따라 평판터빈의 날개 수를 10개에서 30개까지 변화시키면서 날개 각도에 대해 회전수의 분포를 나타낸 것이다. 날개 형상비는 회전 성능이 뛰어난 W/R=0.293이고, 전유동 및 반유동에 대해서 나타내었다. 전유동과 반유동의 두 가지 경우, 모두 날개 각도가 커짐에 따라 회전수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 측정된 데이터의 경우 날개 개수가 15개이고, 날개 각도가 50°인 경우에서 최대 회전수가 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

평판터빈을 이용하여 터빈의 날개 각도, 날개 폭 형상비, 날개 수 등 여러 가지 변수를 유동조건에 따라 실험하여 최대 회전수가 나타나는 조건을 Fig. 7에 제시하였다. 평판 터빈에서 최대 회전수가 나타나는 조건은 날개 형상비는 W/R= 0.293, 날개 개수 15개, 날개각도 50°에서 나타났다. 이 조건은 전유동과 반유동에서 동시에 만족하는 것을 볼 수 있다.

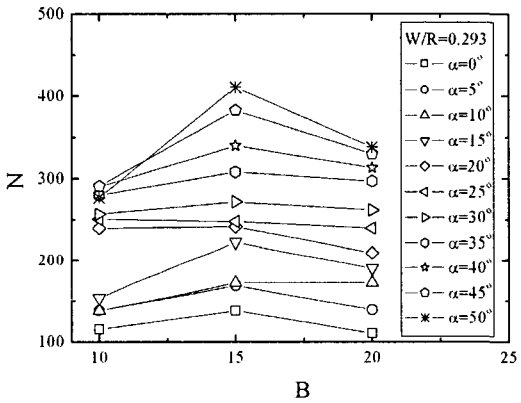
3.2 개폐식 모형 터빈

날개 형상비, 날개 수 등 평판 터빈 모형실험의 결과를 토대로 최적의 설계변수를 고려한 개폐식 터빈 모형을 제작하여 회전수, 동력, 토크를 측정하여 동력계수와 토크계수를 측정하였다.

Fig. 8에서는 날개 각도와 풍속에 따른 회전수의 변화를 비교하여 평판 터빈 모형실험에서 결정된 최적의 날개각도를 확인하였다. 평판 터빈 모형의 경우, 최고 50°까지 밖에 변형이 가능하지 않아 그 이후의 각도에서의 결과를 알 수 없었기 때문에 개폐모형에서는 0°~70° 실험이 가능하도록 하였다. 날개각도가 0°부터 각도가 증가할수록 회전수가 증가하다가 60°에서 가장 높은 회전수를 갖고, 그 이후 각도가 더 증가할수록 회전수는 감소하였다. 이 결과로 개폐식 터빈에서는 최적의 날개각도는 60°임을 확인하였고 블레이드의 각도가 풍력터빈의 성능에 큰 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 평판 터빈과 개폐식 터빈의 성능을 비교하기 위하여 무부하에서 날개각도의 변화에 따른 회전수의 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 날개 각도에 상관없이 개폐식 터빈이 평판식 터빈보다 2배이상 회전수가 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있고, 이 결과로 볼 때 개폐식 터빈이 평판식 터빈보다 회전능력이 훨씬 높다는 것을 알 수 있다.



(a) Type of all flow



(b) Type of half flow

Fig. 6 Distribution of revolution with angle and number of blade at W/R=0.293

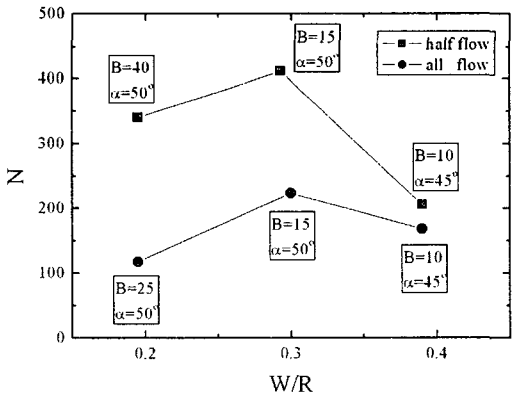


Fig. 7 Distribution of maximum revolution with angle, number and aspect ratio of blade

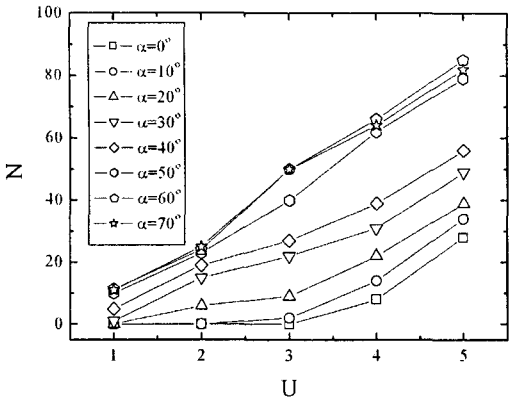


Fig. 8 Distribution of revolution for angel of blade at miniature opening-shutting model

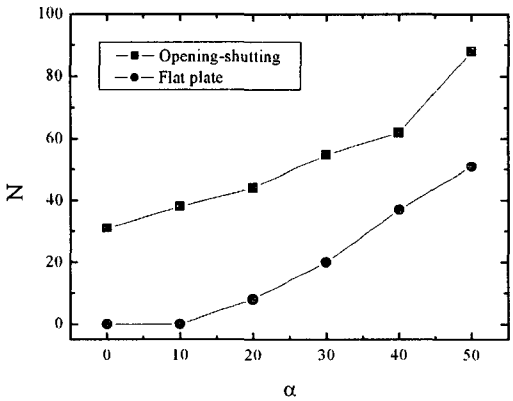
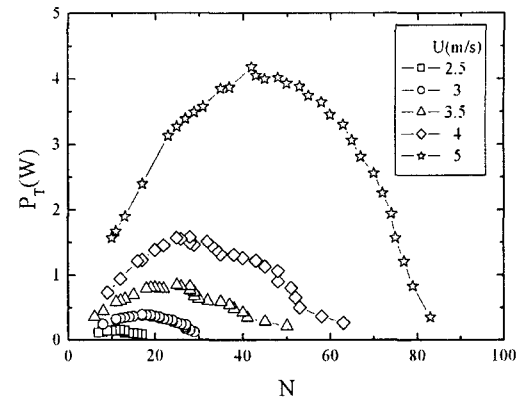
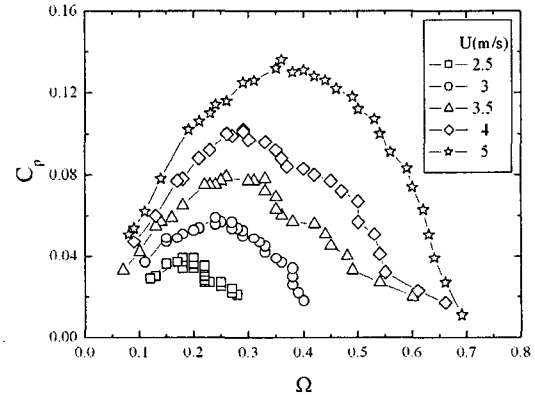


Fig. 9 Comparison of revolution with flat plate and opening-shutting blade

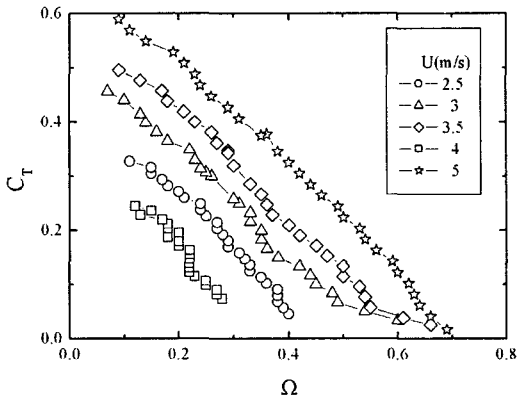
Fig. 10은 풍속을 2.5 ~ 5m/s로 변화시키면서 동력, 동력계수와 토크계수를 회전수와 익단 선속비에 대해 나타내었다. Fig. 10(a)는 회전수에 대한 동력의 관계를 나타낸 것으로, 같은 풍속에도 회전부하에 따라 회전수를 다르게 할 수 있고 각각의 풍속에서 최고 동력이 얻어지는 회전수가 정해져있는 것을 볼 수 있다. 풍속이 증가할수록 풍속의 3승에 비례하는 만큼의 동력 증가를 보였다. Fig. 10(b)는 익단 선속비와 동력계수의 관계를 나타낸 것으로, 풍속이 증가 할수록 동력계수도 증가하였고, 최고 동력계수의 값은 5m/s에서 Ω=0.36일 때 0.136이다. 여기서 터빈의 효율이 약 14%이내에 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 10(c)는 익단 선속비와 토크계수를 나타낸 것으로, 풍속이 증가함에 따라 토크계수가 증가하였



(a) Power



(b) Power coefficient



(c) Torque coefficient

Fig. 10 Distribution of P_T, C_P, C_T and tip speed ratio for variation of wind speed at miniature model turbine

고, 정격 발전시 C_T는 0.3777로 대표적인 수직축 항력식 풍력터빈인 사보니우스 터빈의 정격 C_T값인 0.2764보다 높은 값을 갖는다는 것을 알았다.

본 실험에 사용된 개폐식 터빈이 사보니우스 터빈에 비해 큰 토크를 갖는 것이다.

3.3 개폐식 150W급 원형 터빈

개폐 모형을 이용하여 150W급 터빈을 다음과 같이 전진비(advance ratio)에 의한 상사를 이용하여 설계하고 제작하여 실험하였다.

$$\lambda_D = \frac{D_S}{D_m} \tag{6}$$

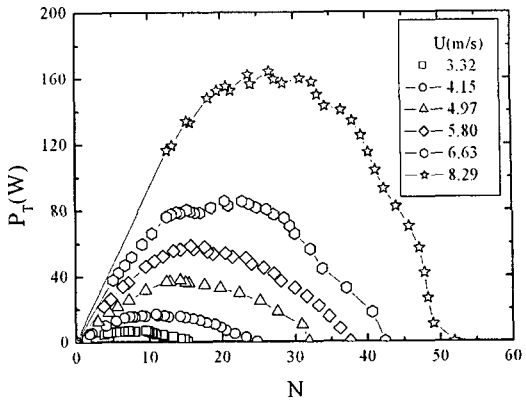
$$U_m = \frac{U_s}{\sqrt{\lambda_D}} \tag{7}$$

$$N_m = N_s \times \sqrt{\lambda_D} \tag{8}$$

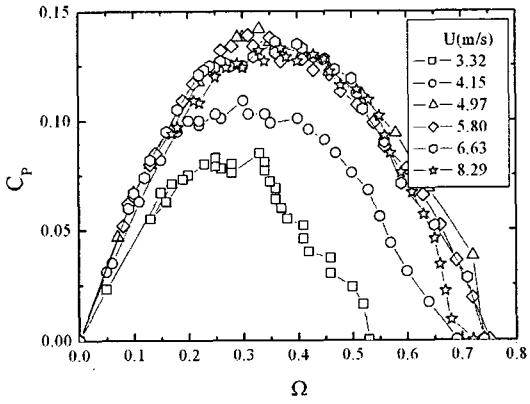
λ_D	: 전진비	
D_s	: 원형 터빈 직경	(m)
D_m	: 모형 터빈 직경	(m)
U_s	: 원형일 때 풍속	(m/s)
U_m	: 모형일 때 풍속	(m/s)
N_s	: 원형 터빈 회전수	(rpm)
N_m	: 모형 터빈 회전수	(rpm)

개폐 터빈 모형의 실험결과와 상사식을 이용하여 150W의 동력을 얻을 수 있는 풍력터빈의 크기를 계산하고 제작하였다. 풍속은 개폐 모형의 실험결과와의 상사를 확인하기 위하여 개폐 모형의 실험에 사용된 풍속과 상사되는 속도인 3.32, 4.15, 4.97, 5.8, 6.63, 8.29m/s를 사용하였다.

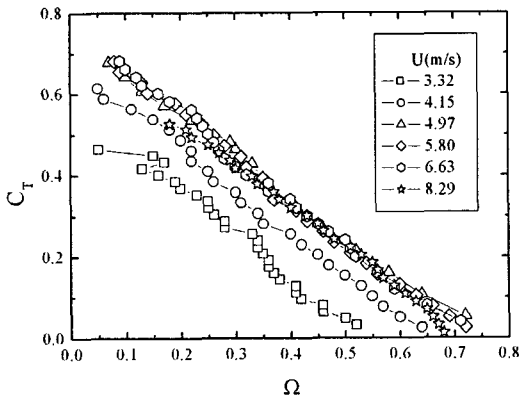
Fig. 11은 풍속의 변화에 대해 동력, 동력계수와 토크계수를 회전수와 익단 선속비에 대해 나타내었다. Fig. 11(a)는 회전수에 대한 동력의 분포를 나타낸 것으로, 풍속이 증가함에 따라 동력이 증가하였고 풍속 8.29m/s, 회전수 26.7에서 최고 164.41W의 동력을 얻었다. Fig. 11(b)는 익단 선속비와 동력계수의 상관관계를 나타낸 것으로, 비교적 저속인 3.32m/s와 4.15m/s를 제외한 나머지 네가지 경우의 풍속에서는 모두 익단 선속비가 0.33부근에서 대체로 0.14의 동력계수를 갖는 것을 관찰할 수 있다. 이 결과는 풍속 4.97m/s이상에서는 일정하게 14%의 효율을 유지하고 4.97m/s이하로 풍속이 낮아질수록 효율이 저하되고 있다는 것을 나타낸다. Fig. 11(c)는 익단 선속비와 토크계수의 상관관계를 나타낸 것으로, 4.97m/s이상의 풍속에서는 토크계수가 일정한 값



(a) Power



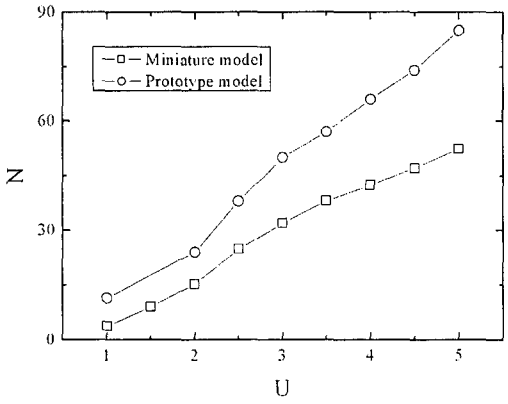
(b) Power coefficient



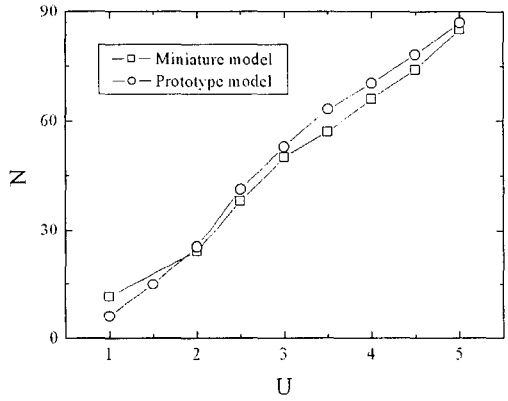
(c) Torque coefficient

Fig. 11 Distribution of P_T, C_P, C_T and tip speed ratio for variation of wind speed at prototype model turbine

을 가지고 있으며, 4.97m/s이하의 풍속에서는 낮은 토크계수를 갖는다.

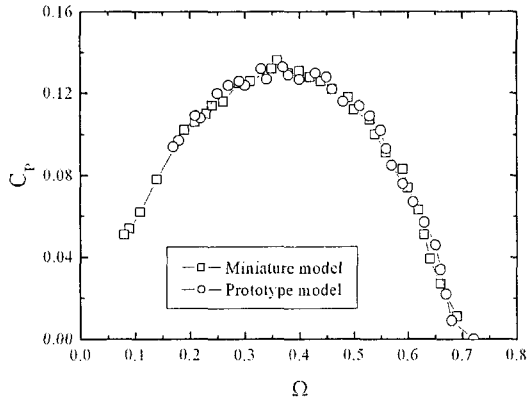


(a) Before similarity

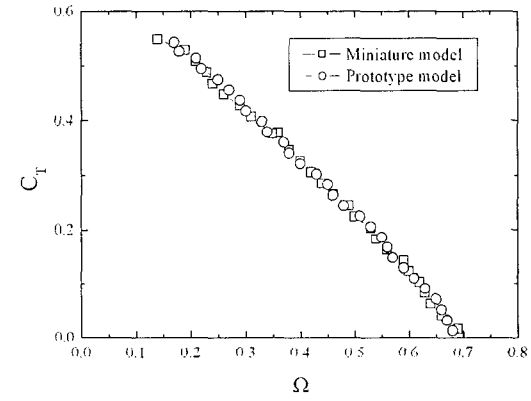


(b) After similarity

Fig. 12 Distribution of revolution with wind velocity for miniature and prototype model



(a) Power coefficient



(b) Torque coefficient

Fig. 13 Comparison of tip speed ratio versus power and torque coefficient for prototype and miniature model

3.4 상사

개폐 축소 모형으로부터 150W급 풍력터빈의 설계유속과 설계회전수는 위의 식 (6)~(8)에 의해 결정된다.[10] 개폐 축소 모형(D_m=0.8m)의 실험에서 사용된 풍속 2, 2.5, 3, 3.5 4, 5m/s는 150W급 풍력터빈(D_s=2.2m)에서 3.32, 4.15, 4.97, 5.8, 6.63, 8.29m/s로 계산되었다.

무부하 상태로 각각의 풍속 5m/s와 8.29m/s에서 두 터빈의 회전수를 비교한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)는 전진비에 의한 상사를 하기전으로, 상대적으로 낮은 풍속인 5m/s에서 개폐 축소 모형(D_m≈0.8m)의 회전수가 8.29m/s에서 150W급 터빈(D_s=2.2m)의 회전수보다 더 많다. 풍속에 대한 익단 선속비가 같다면 지름이 작은 터빈이 빨리 회전하기 때문이다. Fig. 12(b)는 전진비에 의한 상사를 시킨 것으로, 그 결과는 축소 터빈과 150W급 터빈의 회전수가 거의 일치하였다. 이것은 두 터빈에 대한 모형과 실제터빈의 실험풍속 계산이 정확하다는 타당성을 입증한다.

Fig. 13은 개폐 축소 모형과 150W급 터빈의 익단 선속비에 대해 동력계수와 토크계수를 비교한 결과이다. Fig. 13(a)는 동력계수의 분포를 나타낸 것으로, 무부하 회전수가 일치하였던 것과 같이 최고 동력계수는 익단 선속비가 Ω=0.33 영역에서 0.14로 일치하였고 모든 익단 선속비 범위에서 동력계수의 값이 동일하였다. Fig. 13(b)는 토크계수로, 정격 발전시 익단 선속비 0.33에서 토크계수는 0.377의 값을 갖는다. 이 터빈의 익단 선속비은 0~0.7범위에 있으며 0.33부근에서 0.14의 최대 동력계수 값을 갖는다. 이 결과는 본 실험에 사용된 항력식 수직축 풍력터빈의 모형실험

에서 전진비에 의한 상사의 타당성을 입증한다.

4. 결 론

본 연구를 통해 평판 터빈에서 개폐 도어를 채용한 항력식 수직축 풍력터빈의 설계를 시도하였고, 설계변수의 변화에 대한 성능을 분석하였으며, 실험 및 분석을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 개폐식 터빈에서 최대 회전수를 갖는 조건은 날개각도 α=60°, 날개 수 B=15개, 날개 형상비 W/R=0.32,이고, 평판 터빈과 비교하였을 때 2배 이상 높은 회전력을 가진다.

(2) 개폐식 터빈이 작동되는 익단 선속비의 범위는 0 ~ 0.7이고, 이 중 최대 동력 계수가 발생하는 익단 선속비는 0.33 영역에 존재한다.

(3) 개폐식 터빈의 성능은 익단 선속비가 0.33에서 동력계수 0.14를 갖고, 최대 토크 계수는 사보니우스 터빈의 C_T=0.2764보다 높은 C_T=0.3777을 얻었으며, 이것은 같은 풍속에서 더 큰 회전력을 발생할 수 있는 터빈임을 의미한다.

(4) 축소 터빈과 150W급 터빈에서 실험 결과의 비교를 통하여 수직축 항력식 터빈에 있어서 전진비에 의한 상사의 타당성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 2003년도 특정기초과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Yoo, N. S., 1996, "Performance Prediction of Horizontal Axis Turbine in Arbitrary Wind Direction," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 20, No. 1, pp. 255~265.

(2) Jo, C. H., Kim, K. S., Min, K. H., Yang, T. Y. and Lee, H. S., 2002, "Study on HAT Current Generation Rotor," *Journal of the KSOE*, Vol. 16, No. 1, pp. 58~63.

(3) Moutsoglou, A., 1995, "Performance Tests of a Benesh Wind Turbine Rotor and a Savonius Rotor," *WIND ENGINEERING - LONDON-*, Vol. 19, No. 6, pp. 349~362.

(4) Mojola, O. O. and Onasanya, O. E., 1984, "Performance Testing of a Savonius Windmill Rotor in Shear Flows," *Journal of Wind Engineering*, Vol. 8, No. 2, p. 109.

(5) Menet. J. L., 2004, "A Double-Step Savonius Rotor for Local Production of Electricity : a Design Study Renewable Energy," *Fuel and Energy Abstracts*, Vol. 29, issue, pp. 1843~1862.

(6) Yoo, N. S., 1992, "A Study on he Performance Prediction of the Darrieus Wind Turbine," *Journal of KSAS*, Vol. 20, No. 1, pp. 80~94.

(7) Okamoto, N., Ushiyama, I. and Makino, A., 1993, "Experimental Studies for the Hybrid Wind Turbine," *ENERGEX 93-The 5th International Energy Conference.*

(8) Morcos, V. H. and Abdel-Hafez, O. M. E. 1996, "Testing of an Arrow-Head Vertical-Axis Wind Turbine Model," *Renewable Energy,* Vol. 7, issue3, pp. 223~231.

(9) Morel, T., 1975, "Compreshensive Design of Axisymmetic Wind Tunnel Contraction," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 97, pp. 225~233.

(10) Tood, F. H. and Taylor, D., 1991, "Principles of Naval Architecture - Propulsion," *Society of Naval Architects and Marine Engineers.*

(11) Kim, J. M. and Oh, S. J., 1999, "Aerodynamic Optimal Design for Wind Turbine Blades and Its Wind Tunnel Tests," *Journal of the KSAS*, Vol. 27, No. 7, pp. 21~29.