

도시형 소형 수직축 풍력 발전기의 형태별 성능에 대한 실험적 고찰

강덕훈* · 신원식* · 이장호**†

Experimental study on the performance of urban small vertical wind turbine with different types

Deok-Hun Kang*, Won-Sik Shin*, Jang-Ho Lee**†

Key Words : Urban small vertical wind turbine(도시형 소형 수직축 풍력 발전기), Hybrid type VAWT(혼합형 수직축 풍력 발전기), Drag and Lift type VAWT(양력형과 항력형의 수직축 풍력 발전기), Vertical wind turbine performance(수직축 풍력 발전기 성능)

ABSTRACT

This paper is intended to provide experimental data for the design of the small VAWT(vertical axis wind turbine). Three types(lift, drag, and hybrid) of the blade of VAWT are tested with digital wind tunnel in this study. From the test, the relation of power coefficient and tip speed ratio for the blades are evaluated and compared each other depending on the blade type. Especially, the characteristics of hybrid blade which is shown to be expanded in the market without any logical data is proposed in the relation of power coefficient and tip speed ratio. It is shown that the hybrid blade can be used to make higher starting torque with trade off of degradation of power coefficient.

1. 서 론

최근 소형 풍력 발전은 가로등, 건물 옥상 등 그 설치 장소나 용도가 다양하게 적용되어 활용되고 있다 이는 대형 풍력터빈과는 다르게 내부 구조나 제품의 설치가 간단하기 때문인데, 최근에는 수직형 풍력 터빈이 도심 환경이나 건물의 구조와 조화롭게 디자인되어 설치되는 사례가 증가하고 있다(Fig. 1).⁽¹⁾

소형 수직축 풍력 발전기는 수평축과 다르게 요잉 제어(바람 방향에 맞추어 회전축의 중심을 움직이는 제어)를 필요로 하지 않는 것이 특징인데, 회전력을 발생시키는 원리에 따라 항력형, 양력형, 그리고 혼합형으로 구분될 수 있다.

수직축 항력형의 대표적 블레이드 형태는 사보니우스형으로 기동 토크는 크지만 회전수가 낮고 끝단속도비 1 전후 영역에서 15~20%정도의 출력계수를 갖는다(Fig. 2).⁽²⁾

수직축 양력형의 대표적 블레이드 형태는 다리우스형이 있으며, 초기 기동토크가 작아 일정 회전속도까지 도달하는데 시

간이 걸리긴 하지만, Fig. 2에 제시된 바와 같이 끝단속도비 5 전후 영역에서 30%이상의 출력계수를 갖는다(Fig. 2).^(2,3)

혼합형 블레이드는 양력형의 높은 출력계수와 항력형의 우수한 기동특성을 동시에 구현할 목적으로 고안된 방식인데, 그 실효성이 검증되지 않은 상태에서 최근 응용사례가 증가되고 있다.

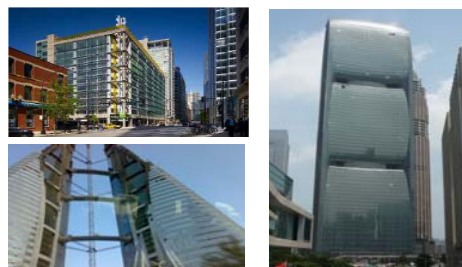


Fig. 1 Utilization of wind turbine in urban building design (left-top) Greenway Self Park, Chicago, USA (left-bottom) World Trade Center, Bahrain (right) The Pearl River Tower, Guangzhou, China

* 군산대학교 일반대학원(Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University)

** 군산대학교 기계자동차 공학부(School of Mechanical and Automotive Engineering, Kunsan National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : jangho@kunsan.ac.kr

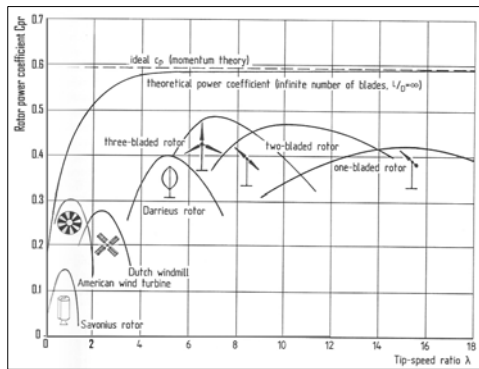


Fig. 2 Output peculiarities of various windmill²⁾

본 연구에서는 수직축 풍력발전기의 대표적인 날개형태인 사보니우스형과 다리우스형, 그리고 이 두 가지 형태를 혼합시킨 혼합형 블레이드에 대한 공력 특성을 실험적인 방법으로 고찰하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험 대상 모델

2.1.1 헬리컬 사보니우스

헬리컬 사보니우스 형태는 Fig. 3(a)와 같이 항력형 블레이드가 수직방향의 나선형으로 부착된 것으로 두 개의 날개임에도 불구하고 회전 각 방향으로 연속적인 토크가 발생되도록 고안된 형태이다: 반면에 Fig. 3(b)와 같은 방식은 회전방향으로 120도 마다 회전토크의 변화가 반복되는 특성을 갖는다.

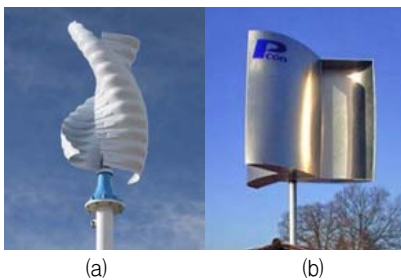


Fig. 3 Drag types of vertical wind turbine:
(a) helical Savonius, (b) cylinder Savonius

이와 같은 항력형 블레이드는 바람의 항력을 받아 회전하면서 발전하는 방식으로 설계가 비교적 용이하지만, 블레이드의 한쪽 면이 바람에 밀리면서 발생하는 정토크와 반대로 회전면적의 50%에 해당되는 다른쪽 블레이드 면은 바람과 마주보며 회전하면서 역토크가 발생하게 되므로 전체적으로 낮은 출력 계수를 나타내는 단점이 있다.

2.1.2 H-다리우스

H-다리우스 형은 양력형 블레이드의 대표적인 형태인 다리우스형 블레이드(Fig. 4 (a))의 단점^(3,4)을 보완하기 위하여 회전날개의 길이방향으로 일정한 받음각과 토크가 발생되도록 개량된 형태로서 Fig. 4(b)와 같은 형태를 가진다. 양력형 블레이드는 바람이 날개 단면을 지나갈 때 날개 단면의 윗면과 아랫면에서 발생하는 압력차에 의해 발생하는 힘을 이용하여 축을 회전시키는 형태로 날개 단면 형상이 성능을 좌우하게 되므로 이에 대한 검토가 필요하며, 풍속과 회전속도가 충분한 정격 운전 점에서의 출력 계수는 우수하지만, 상대풍속(회전속도와 풍속의 합)이 낮은 기동 조건에서는 토크가 작아 기동이 어렵거나 정상적으로 회전하는 데 시간이 걸린다는 단점⁽⁶⁾을 가지고 있다.

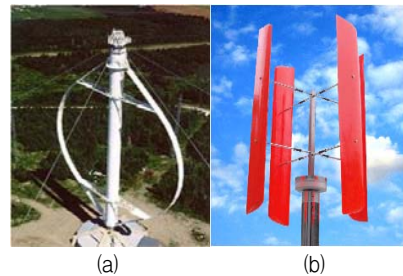


Fig. 4 Lift types of vertical wind turbine:
(a) Darrieus, (b) H-Darrieus

2.1.3 혼합형

혼합형은 항력형 블레이드의 높은 기동 토크와 양력형 블레이드의 높은 출력계수를 조합할 목적으로 고안된 것으로 Fig. 5와 같은 형상을 가진다.

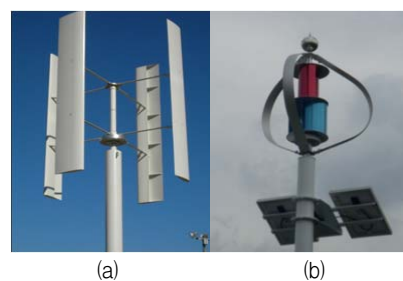


Fig. 5 Hybrid types of vertical wind turbine:
(a) air-pocket include blade, (b) Savonius and Darrieus in same axis

Fig. 5(a)와 같은 방식은 양력형 블레이드 면에 에어포켓(air-pocket)을 적용하여 낮은 풍속 조건에서 항력을 이용하여 기동이 잘 될 수 있도록 한 것이고, Fig.5(b)와 같은 방식은 독립적으로 설계된 항력형 블레이드와 양력형 블레이드를 한 축에 연결되도록 구성하여 작동되는 형태이다.

두 방식 모두 항력이 작용되도록 구성되었기 때문에 풍속

과 회전속도가 낮은 경우에 기동토크가 향상 될 것으로 기대되나, 이와 함께 정격 운전점에서 발생하는 역토크 때문에 출력계수 손실이 일정부분 발생될 것으로 추정된다.

2.1.4 실험 모델

본 연구에서 활용된 실험 모델은 Fig. 6과 같이 헬리컬 사보니우스, H-다리우스, 그리고 양방향 혼합형 블레이드 세 종류이며, 풍동에 설치되었을 때 유동 차폐율이 10% 이하가 되도록, Table 1에 제시된 제원으로 제작되었다.

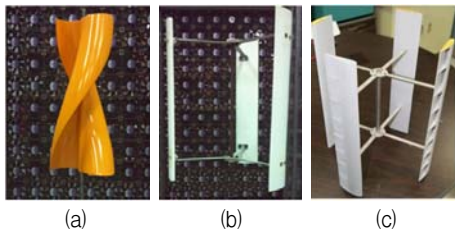


Fig. 6 Test model : (a) helical Savonius-drag type, (b) H-Darrieus-lift type, (c) hybrid type

Table 1 Specifications of test model

Name	Helical Savonius	H-Darrieus	Hybrid
Height [m]	0.295	0.40	0.40
Diameter[m]	0.12	0.35	0.29
Blockage ratio [%]	2.5	10.1	8.3
Blade force type	drag	lift	hybrid

2.2 실험 방법

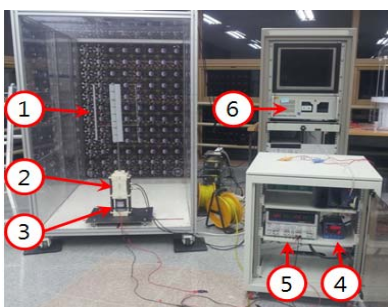


Fig. 7 Measurement equipment of test model



Fig. 8 Schematic diagram of experiment

Fig. 7은 성능 실험을 위해 구성된 실험장치의 모습이다. Fig. 7 좌측 풍동 내부에 시험 모델(①)이 위치하고, 시험모델의 축에는 토크, RPM 센서(②)와 DC모터(③)가 연결되어 있다. DC모터는 풍동 외부에 있는 파워서플라이(⑤)에서 전원을 공급하게 되고 공급되는 파워에 의해 시험 모델은 회전을 하게 된다. 블레이드 이외의 조건에서 발생하는 토크를 제거하기 위해 유동이 없는 상태에서 파워 서플라이의 전압 조절을 통하여 일정 회전수로 시험 모델을 회전시켜 주고 이때의 토크 값을 측정 하였다. 그리고 유동이 있는 상태에서 측정된 토크 값을 측정하고 측정된 두 토크 값의 차를 이용하여 블레이드의 발생 토크를 산출 하였으며 이로서 DC모터는 회전수 제어를 위해 사용할 뿐 측정된 토크 값에는 아무런 영향을 미치지 않는다.^(6,7)

토크 센서와 RPM 센서에서 측정된 신호는 인디게이터(④)에 표시되며 측정되는 신호는 컴퓨터(⑥)에 기록된다. DC모터에 인가되는 전압, 전류 값도 풍동 외부에 있는 파워미터를 통하여 측정이 수행되며 컴퓨터에 기록된다. 시험 모델의 성능에 가장 중요한 측정값인 토크, RPM 계측을 위해 사용한 센서들은 실험 전에 모두 교정(Certificate No. 12-2532-353-1, 표준연구원)되어 측정값에 대한 신뢰성도 높였으며 각 센서의 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specifications of sensor

Torque sensor	Rated capacity	2 kgf.cm
	Rated output (R.O.)	1.5mV/V ± 1%
	Nonlinearity	0.3% R.O.
	Hysteresis	0.2% R.O.
RPM sensor	Measurement range	1 Hz ~ 20kHz (1 ~ 20,000 r/min)
	Detection gear	Strong magnetic materials

전술한 실험방법에 따라 구축된 실험장치 구성의 개략도는 Fig. 8과 같다. 성능 측정을 위해 군산대학교 풍력기술 연구센터에서 개발된 디지털 풍동이 사용 되었으며, 그 대략적인 사양은 Table 3에 제시된 바와 같으며 자세한 사양은 참고문헌 (8)에 제시된 바와 같다.

Table 3 Specifications of digital wind tunnel⁸⁾

Test section	Width	1.45 [m]
	Height	0.96 [m]
Mean Velocity	4.3 [m/s]	
Turbulence intensity	1.2 [%]	
Space deviation	3.8 [%]	

제작 모델의 성능 실험은 동일한 풍속에 대해 회전수 변화에 따른 토크를 측정하고 후 끝단속도비와 출력계수의 관계($\lambda-C_p$)를 도출하는 방식으로 이루어진다.

회전 날개의 출력은 회전축에서 측정된 토크와 회전수를 기준으로 식(1)과 같이 계산된다.

$$P[W] = T\omega \tag{1}$$

여기서, P : 출력 에너지(W)
 T : 토크(Nm)
 Ω : 각속도(rad/s)

시험모델의 끝단 속도비는 측정된 풍속과 회전속도를 이용하여 식(2)와 같이 계산되며, 출력계수는 식(1)에서 산출되는 출력과 측정된 풍속을 이용하여 식(3)과 같이 계산된다.

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_\infty} \tag{2}$$

여기서, λ : 끝단 속도비(Tip Speed Ratio)
 Ω : 각속도(rad/s)
 r : 회전반경(m)
 V_∞ : 풍속(m./s)

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \tag{3}$$

여기서, C_p : 출력계수(Power Coefficient)
 ρ : 공기밀도(kg/m³)
 r : 회전면적(m²)
 V : 풍속(m/s)
 P : 풍력발전기의 출력(W)

실험에서 사용된 적절한 실험 범위와 간격은, 예비실험을 통하여 최대 출력계수를 나타내는 끝단속도비(λ)의 값을 사전에 확인한 뒤, 이 점 전후의 실험값 들이 포함될 수 있도록 결정되었으며, 각 측정 포인트에서 3분 동안 측정된 값들의 평균값을 기준으로 출력계수(C_p)등이 산출되었다.

2.3 출력계수 측정의 불확도

시험을 수행함에 있어 불확도의 분석은 반드시 필요한 과정 중 하나이다. 본 연구에서는 AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics)의 불확도 분석 방법을 적용한 식 (4)를 이용하여 불확도를 산출하였다.⁹⁾ 식 (4)의 우측 첫째 항부터 순서대로 토크 측정값에 대한 불확도, 회전

수에 대한 불확도, 공기 밀도 값에 대한 불확도, 단면적에 대한 불확도, 풍속에 대한 불확도를 나타내며 이들의 합성 불확도가 날개 의 출력계수에 대한 불확도가 된다. 이와 같이 산출된 불확도는 시험 결과 그래프에 실험결과 값과 함께 상하 범위를 나타내는 형태로 표시된다.

$$\frac{U_{C_p}}{C_p} = \left[\left(\frac{U_T}{T} \right)^2 + \left(\frac{U_\omega}{\omega} \right)^2 + \left(-\frac{U_\rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{U_A}{A} \right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \frac{U_V}{V} \right)^2 \right]^{0.5} \tag{4}$$

3. 실험 결과

3.1 블레이드 형상 별 실험 결과

3.1.1 헬리컬 사보니우스

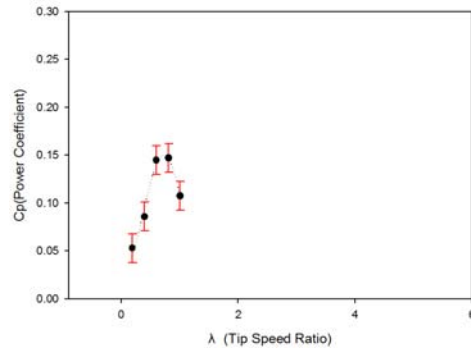


Fig. 9 Helical savonius model test result

헬리컬 사보니우스 모델의 실험 결과는 Fig. 9에서 제시된바와 같이 끝단속도비가 1.5 이하인 영역에서 작동되며, 이 값(λ)이 증가함에 따라 출력 계수가 증가하다가 약 0.8 전후에서 약 0.15 정도의 최대 출력계수를 보이고, 그 이후에는 출력 계수가 감소하는 것으로 나타났다.

3.1.2 H-다리우스

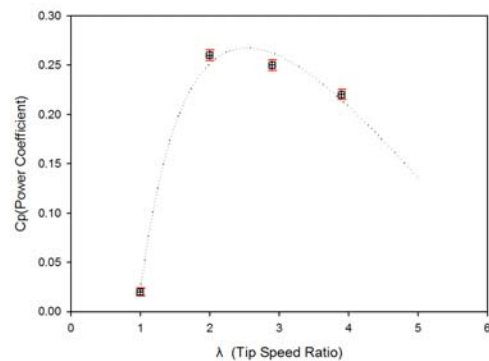


Fig. 10 H-Darrieus test result

H-다리우스 모델의 실험 결과는 Fig. 10에서 제시된바와 같이 끝단속도비가 1.0~5.0 인 영역에서 작동되며, 이 값(λ)이 증가함에 따라 출력 계수가 증가하다가 약 2.0 전후에서 약 0.26 정도의 최대 출력계수를 보이고 그 이후에는 출력 계수가 감소하는 것으로 나타났다.

3.1.3 혼합형

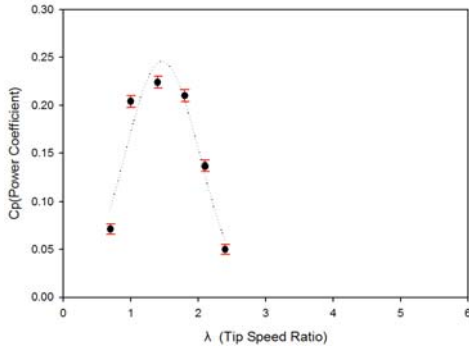


Fig. 11 Hybrid model test result

혼합형 모델의 실험 결과는 Fig. 11에서 제시된바와 같이 끝단속도비가 0.8~2.4인 영역 작동되며, 이 값(λ)이 증가함에 따라 출력 계수가 증가하다가 이 값(λ)이 약 1.4 전후에서 약 0.22의 최대 출력계수를 나타내고 이후에는 출력 계수가 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

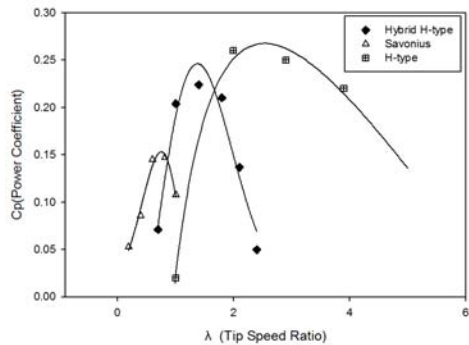


Fig. 12 Test results of power coefficient

본 연구에서는 수직형 소형 풍력발전기의 대표적인 형태인 항력형, 양력형, 혼합형에 대한 공력시험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 사보니우스 형태의 블레이드는 끝단속도비의 값이 1.5 영역 이하에서 작동되며, 최대 출력계수는 이 값(λ)이 약 0.8 인 부근에서 약 0.15 정도 되는 것으로 측정되었다.

- 2) 다리우스 형태의 블레이드는 끝단속도비가 약 1.0~5.0 인 영역에서 작동되며, 이 값(λ)이 약 2.0 인 영역에서 약 0.26 정도의 최대 출력계수가 측정되었다.
- 3) 혼합형 블레이드는 끝단속도비가 약 0.8~2.4인 영역에서 작동되며, 이 값이 약 1.4 될 때 약 0.22 정도의 최대 출력계수를 나타냈다.
- 4) 사보니우스 형태와 다리우스 형태의 블레이드는 기존의 참고문헌에서 알려진 특성과 유사한 경향의 실험 결과가 도출 되었으며, 혼합형 블레이드가 작동되는 끝단속도비의 영역은 사보니우스 형태와 다리우스 형태의 중간 영역에 해당되는 것으로 나타났다 (Fig. 12참조).
- 5) 양력 익형에 항력적 요소를 추가한 혼합형 블레이드의 경우, H-다리우스 형의 작은 기동토크를 개선하는 효과가 있는 것으로 확인되었으며, 최대출력계수의 감소가 일정부분 수반되는 것으로 나타났다 (Fig. 12참조).

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO.20123021020010), (NO.20144030200590)

References

- (1) 문창호, 김용이, 2010. 12, “도시의 건축 디자인에서 풍력터빈의 이용에 대한 사례 연구”, 대한건축학회지회연합회논문집, Vol. 12, No. 4, pp. 23~30.
- (2) Eric Hau, 2005, “Wind Turbines”, Springer, p.101.
- (3) 정진환, 강기원, 김범수, 이장호, 2010. 12, “H-다리우스 블레이드의 형상 변화에 따른 기동특성 해석”, 유체기계저널, Vol. 14, No. 3호, pp. 45~49.
- (4) DuLian, 석사학위 논문, 2008, “다리우스형 수직풍력터빈의 해석방법에 관한 연구”, 군산대학교 일반대학원.
- (5) 이규용, 이우석, 서영택, 오철수, 2003. 07, “다리우스 풍력터빈 발전기의 기동특성”, 대한전기학회 논문집B, pp. 1018~1020.
- (6) Buyung Kosasih, Andrea Tondelli, 2012, “Experimental study of shrouded micro-wind turbine”, Procedia Engineering 49, pp. 92~98.
- (7) Carlo L.Bottasso, Filippo Campagnolo, Vlaho Petrovic, 2014. 2, “Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 127, pp. 11~28.
- (8) 강덕훈, 우영진, 이장호, 2012. 10, “디지털 풍동을 활용한 풍력 발전기 날개 단면 형상 개발에 관한 연구”, 유체기계저널, Vol. 15, No. 5, pp. 42~47.
- (9) 권기정, 2005, “타원 익형 공력 및 유동장 특성에 대한 실험적 연구”, KAIST 박사학위 논문.