

고효율 소형 수직형 풍력터빈의 공력성능에 관한 실험적 연구

박준용* · 이명재* · 이승진* · 이승배†

(2009년 3월 6일 접수, 2009년 6월 30일 수정, 2009년 7월 1일 심사완료)

An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of High-efficient, Small-scale, Vertical-axis Wind Turbine

Jun-Yong Park, Myeong-Jae Lee, Seung-Jin Lee and Seungbae Lee

Key Words: Inlet Guide Vane(입구 안내익), Side Guide Vane(측후면 안내익), Angle of Attack(받음각), Power Coefficient(동력계수), Vertical Axis Wind Turbine(수직형 풍력터빈)

Abstract

This paper summarizes the experimentally-measured performance of small-scale, vertical-axis wind turbine for the purpose of improving the aerodynamic efficiency and its controllability. The turbine is designed to have a Savonius-Type rotor with an inlet guide-vane and an side guide-vane so that it achieves a higher efficiency than any lift- or drag-based turbines. The main design factors for this high-efficient, vertical wind turbine are the number of blades (Z), and the aspect ratio of Height/Diameter (H/D) among many. The basic model has the diameter of 580mm, the height of 464mm, and the blade number of 10. The maximum power coefficient of 0.50 was experimentally measured for the above-mentioned specifications. The inlet-guide vane ensures the maximum efficiency when the angle of attack to the rotor blade lies between 15° and 20° . This experimental results for the vertical-axis wind turbine can be applied to the preliminary design of turbine output curve based on the wind characteristics at the proposed site by controlling its aerodynamic performance given as a priori.

기호설명

P_W : 공기 동력
 P_T : 로터의 축 동력
 ρ : 공기 밀도
 A : 터빈의 투영 면적
 T : 로터의 축 토크
 ω : 로터의 회전 각속도
 C_P : 동력 계수
 u_∞ : 로터로 유입되는 유속
 u_{tip} : 익단 회전 속도

λ : 주속비
 D : 로터의 직경
 r : 로터의 반지름
 H : 로터의 높이
A.O.A.: 받음각(Angle of Attack)
 A_2/A_1 : 입구 안내익의 출구/입구 면적비
 Z : 로터의 날개 수
 H/D : 로터의 높이와 지름의 비
 α : 입구 안내익의 출구각
 β : 로터 날개의 입구각
 ϕ_1 : 측후면 안내익의 입구 설치각
 ϕ_2 : 측후면 안내익의 출구 설치각
 C : 익단으로 유입되는 유동의 절대 속도
 W : 익단으로 유입되는 유동의 상대 속도

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : sbaelee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7325 FAX : (032)868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

수년 전 기후변화협약 및 교토의정서 비준 등 환경적인 문제에서 가속되기 시작한 풍력에너지 등 신재생에너지 개발에 대한 관심은 현재 계속적으로 상승하는 유가 불안정으로 인해 더욱 전 세계적으로 고조되고 있다. 특히, 신재생에너지 중 태양에너지와 더불어 풍력에너지의 개발은 폭발적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 2007년 기준 전 세계 풍력발전용량은 2006년보다 27% 증가해 94.1 기가와트(GW)를 넘었던 바 있다.⁽¹⁾ 이는 EU와 미국, 중국의 발전설비 확충에 따른 것으로, 특히 EU는 2008년 1월 에너지·기후법안을 통과시킨 후 재생에너지 시장에서 독주를 지속하고 있다. 주요 선진국들은 현재 전체 전력소비의 6%를 담당하는 풍력발전을 2030년까지 25%로 확대하려는 등 풍력에너지 활용기술 개발에 주력하고 있다. 이에 따라 향후 수십년간 풍력시장은 성장세를 지속해 나갈 것으로 판단된다.

우리나라의 경우 2006년 말 기준으로 풍력발전 설치용량은 177MW이며, 2011년까지 총 에너지의 5%를 신재생에너지로 공급한다는 계획을 갖고는 있으나, 현재 우리나라의 풍력발전 설비의 높은 수입의존도를 극복하기 위해서는 자체적 기술로 상용화하는 것이 무엇보다 중요하다고 여겨지고 있다.⁽²⁾ 이와 더불어 수평축 터빈의 선 개발 주자인 EU국가들 주도의 G-L 인증⁽³⁾도 세계시장으로 나가기 위한 큰 장벽이 되고 있다.

풍력터빈은 가장 많이 보급된 수평축 방식과 소형 중심의 수직축 방식, 그리고 이들이 조합된 하이브리드 방식으로 구분되며, 수직축 풍력터빈은 양력을 이용한 다리우스(Darrius)방식⁽⁴⁾과 항력을 이용한 사보니우스(Savonius)⁽⁵⁾ 방식으로 나눌 수 있다. 다리우스 풍력발전 효율은 최대 0.40의 동력계수(C_p)를 나타내며⁽⁶⁾ Blackwell 등⁽⁵⁾이 제안한 사보니우스(Savonius)⁽⁵⁾ 터빈의 경우 동력계수는 최대 0.2로 알려져 있다.

수직축 풍력터빈은 수평축 터빈에 비해 절반가량으로 효율이 낮은 반면, 풍향에 관계없이 작동이 가능하며 수평축 발전기보다 낮은 시동풍속설정이 가능하다. 또한 약한 풍속에서도 풍력 발전이 가능하며 이에 따른 로터 회전 속도가 상대적으로 낮아 높은 정밀도를 요구하지 않으므로 소

형 터빈으로 많이 활용된다. 그리고 동력전달장치, 발전기 등의 주요 부품들의 지면 부근 설치가 가능하여 구조적으로 안정적이며 도시경관을 고려한 신재생 에너지 활용에도 기여하고 있다. 그러나 터빈의 고효율화, 설치/운반의 용이성, 수평축에 비해 상대적으로 날개 수가 많아서 발생하는 무게의 증가 극복 및 가격 경쟁력이 요구된다 하겠다.

본 연구에서는 이승배 등⁽⁷⁾이 고안한 제트-휠-터보형 수직축 터빈을 바탕으로 최적 설계되어 김병국 등⁽⁸⁾에 의해 성능 및 효율이 검증된 바 있는, 사보니우스 방식의 로터에 입구 안내익(Inlet Guide Vane; I.G.V.)과 측후면 안내익(Side Guide-Vane; S.G.V.)이 장착된 형태의 터빈에 대하여 설계변수 변경에 따른 공력성능 특성을 파악한다. 즉, 입구 안내익 통과 후 유동에 의한 로터 날개의 받음각(Angle of Attack; A.O.A.)과 입구 안내익 입출구 면적비(A_2/A_1) 변화에 따른 성능 시험 결과를 바탕으로 입구 안내익의 최적 설계를 수행하였고, 날개 수(Z)와 로터 높이와 직경의 비(H/D)의 변화에 따른 공력성능 변화 시험 등의 결과를 기초로 주어진 풍질에서 원하는 성능을 갖도록 터빈의 다양한 설계가 가능토록 하였다.

2. 풍력터빈 특성 및 원리

2.1 풍력터빈의 특성

터빈으로 입사되는 공기동력 P_w 와 터빈에 의해 발생하는 축동력 P_T 는 아래의 식과 같이 나타낸다.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u_\infty^3 \tag{1}$$

$$P_T = T \times \omega \tag{2}$$

여기서 ρ 는 공기밀도(kg/m^3), A 는 터빈 로터의 투영면적(m^2), u_∞ 는 풍속(m/s)을 의미하고, T 는 터빈 축에서 발생하는 토크($N \cdot m$), ω 는 터빈의 회전 각속도(rad/s)이다.

공기동력 P_w 가 터빈로터에 의해 기계적인 동력으로 변환되는 효율을 동력계수 C_p 라고 한다.

따라서 풍력터빈의 공기역학적 동력계수인 C_p 는 터빈 축동력과 공기동력의 비의 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} \quad (3)$$

수평축 터빈주위로의 이상적인 유동의 경우 동력계수 C_p 는 이론적으로 0.593⁽⁹⁾이나, 실제로 점성의 영향과 회전자 끝단 와류 및 이차유동에 의한 손실 등 실제로는 매우 달라진다. 그리고 터빈의 작동 상태를 나타 낼 때 사용하는 무차원 수인 주속비 λ 는 아래와 같다.

$$\lambda = \frac{r\omega}{u_\infty} \quad (4)$$

여기서 r 은 터빈 로터의 회전 반지름(m)이다.

수평축의 경우 주속비가 6.0~8.0 사이에 위치하며, (주)에어로네트에서 개발된 수직축의 경우에는 0.4~0.6 사이의 저속회전 구간에서 작동하게 된다. Garrad-Hassan 보고서⁽¹⁰⁾의 수직축 터빈의 저속회전 장점들은 여기서 비롯된다.

2.2 제트-휠-터보형-수직축 풍력터빈의 특성

Fig. 1과 같이 수평축 터빈에서는 로터의 회전에 의한 유선튜브 상류 면적(A_1)과 로터로의 유입 면적 (A_2)의 면적 차이로 발생하는 미활용 에너지에 의한 효율 감소가 존재한다. 본 연구에서 대상으로 한 제트-휠-터보형 수직축 풍력터빈 시스템은 상기 문제점을 해결하고 발전효율을 높이기 위해 로터 상류 바람 면적 (A_1)과 로터 유입 면적 (A_2)을 최대한 같아지도록 하며 토출되는 풍속을 감소시켜 최대한 풍력에너지를 회수하도록 개발된 시스템이다.

제트-휠-터보형 수직축 풍력터빈은 Fig. 2와 같이 입구 안내익과 측후면 안내익 그리고 로터부로 구성되어 있다. 즉, 사보니우스 형태의 터빈에 입구 안내익을 설치하여 양의 토크를 받는 부분을 최대한 크게 하고, 입구 안내익 후류방향에 놓인 음의 토크를 발생시키는 영역에서는 와류 유동이 발생토록 하여 음의 토크를 줄여 성능을 높일 수 있도록 하였다. Fig. 3의 전산유동해석의

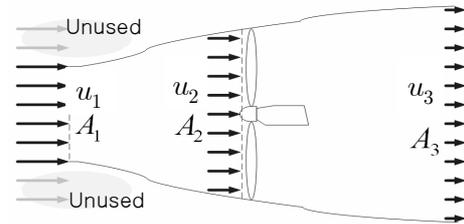


Fig. 1 Streamline patten in a typical horizontal-axis wind-turbine

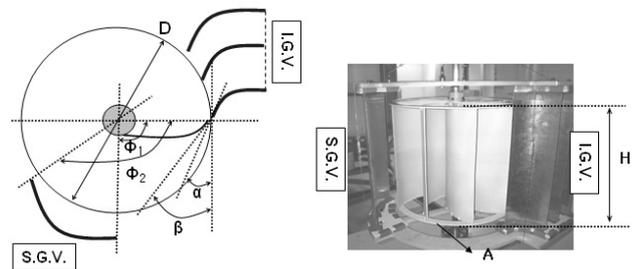


Fig. 2 Definitions of design parameters

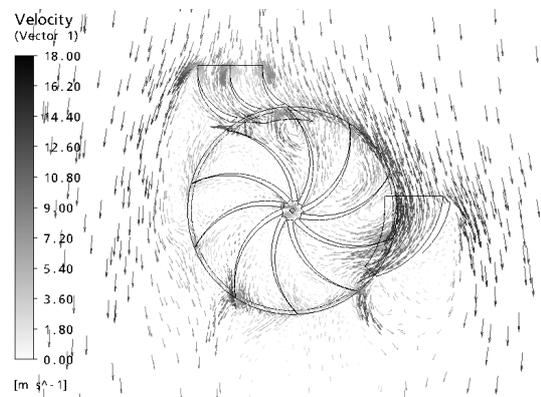


Fig. 3 Schematic of velocity vectors around small-scale vertical-axis wind turbine simulated by CFD technique at $u_\infty=12m/s$

속도벡터 결과는 이 원리를 잘 보여주고 있다.

또한, 사보니우스 터빈이 상류 날개에서 항력으로 토크를 발생한 후 하류 블레이드를 통과하도록 한 반면에 본 수직축 터빈은 입구 안내익과 측후면 안내익을 통한 에너지 전환이 용이하도록 고속의 입사조건을 구비하였고 터빈 상하면을 개방하여 유입된 공기가 날개 축 방향으로 이동하면서 토크를 발생하도록 설계되었다.

3. 수직축 풍력터빈 설계 및 성능 시험

3.1 소형 수직축 터빈의 설계 변수

제트-휠-터보형-수직축 풍력터빈의 설계 인자로는 Fig. 2에서와 같이 로터 직경 $D(m)$ 와 터빈 높이 $H(m)$ 로 이루어진 형상비(Aspect ratio) H/D 와 입구 안내익의 출구각 α , 로터 날개의 입구각 β , 측후면 안내익의 설치내각 ϕ_1 , 측후면 안내익의 설치외각 ϕ_2 , 로터 날개 수 Z 로 구성된다. 본 연구에서 사용된 소형 제트-휠-터보형 수직축 풍력터빈의 기본 시제품은 곧은 형태의 날개 10매와 직경(D)과 높이(H)가 각각 $0.58m \times 0.464m$ 이며 $H/D=0.80$, $\beta=41^\circ$ 이며 축 직경은 로터 직경의 1/10인 $0.1D$ 의 형상을 갖는다. 이에 대한 모델은 상기 시제품인 1kW급 소형 터빈의 약 10% 축소모형으로 개발하였다. 모형 터빈의 날개는 3mm 두께의 ABS 재질로 가공 하였고 날개의 구조적 강도를 위해 로터 상하의 날개 끝단부에 로터 상면 또는 하면 면적의 10% 면적의 원형 지지 판(Fig. 2의 A부분)을 설치하였다.

입구 안내익의 경우 입구 안내익 통과 후 유동에 의한 로터 날개의 받음각과 입구 안내익의 입출구 면적비(A_2/A_1) 변화에 따른 성능 실험 결과로부터 3단의 입구 안내익을 설계하였다. 로터 날개의 받음각은 로터의 회전 접선과 입구 안내익 출구 부분의 외접선이 이루는 각인 출구각(α)에 따라 달라지므로, 최종적인 입구 안내익의 설계 인자는 출구각(α)과 입출구 면적비가 된다. 그리고 측후면 안내익의 경우는 기존 설계(이승배 등⁷⁾이 고안한 수직축 터빈에서 사용된 형태를 채택하여 사용하였다. 실험 시 사용된 안내익은 3mm 폼보드 (Form board)에 0.1mm 두께의 알루미늄 판을 양 면에 썩은 곡면 형태로 유동이 부드럽게 흘러갈 수 있도록 제작 하였다.

3.2 실험 장치 및 성능 시험 방법

본 연구에서 수행한 소형 수직축 풍력터빈의 공력성능 실험은 (주)에어로네트 내에 설치된 개방형 풍동 시험 장치를 이용하여 이루어졌다. 본 풍동 시험 장치는 Fig. 4에서와 같이 송풍기(Vane-axial fan), 확대부(Diffuser), 대각 확대부 (Large angle diffuser) 등으로 구성되고 확대부는 소음기(Silence)로 감싸여 있다. 시험부는 가로 2.3m, 세로 2.1m이며, 제어장치를 통하여 0m/s ~ 16.67m/s 사이의 연속적인 유속

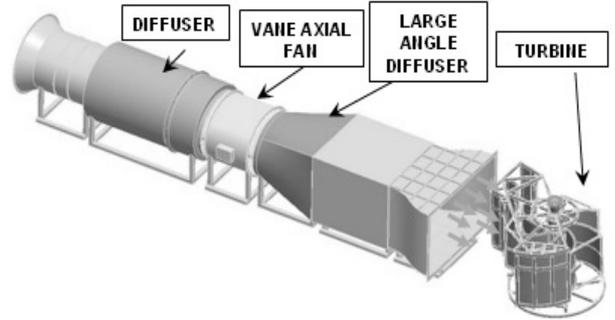


Fig. 4 Schematic of open-type, wind tunnel and proto-type wind turbine (1kW)

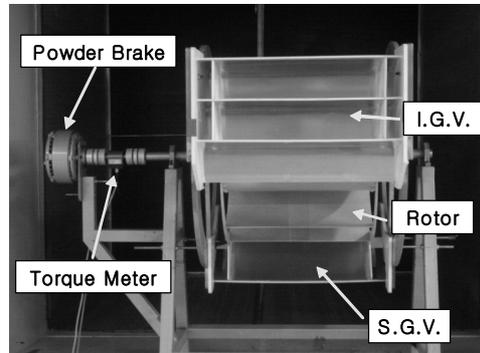


Fig. 5 Schematic of model set-up in the wind tunnel test-section for performance measurement

변화가 가능하다. 난류 강도는 0.5% 이하를 유지한다. 풍속은 풍동 자체에 설치된 피토판과 디지털 마이크로 마노미터를 이용하여 측정되며 온도, 습도 변화에 따른 밀도보정을 자동으로 수행한다.

본 모형의 성능 테스트를 위하여 Fig. 5에서와 같이 터빈 로터에 회전수(RPM)가 동시에 측정되는 10N·m 용량의 토크미터(Torque meter)와 부하를 적용하기 위한 파우더 브레이크(Powder brake)를 결합하였다. 상기 측정값 들은 RS-232 통신으로 연결된 데이터 로거를 통해 저장되도록 구성되어 있다.

본 연구에서는 기준 풍속(u_∞)을 7m/s로 하여 실험을 수행하였다. 성능 실험 방법은 우선 풍속을 설정 후 무부하 상태에서 시작하여 주속비(λ)가 0.05씩 감소하도록 파우더 브레이크의 입력 전압 조절을 통해 로터에 부하를 가하면서 주속비(λ)가 0이 될 때까지 각 주속비에 대한 토크 효율을 측정하여 성능곡선으로 나타내었다. 풍동 조작반의 Measure 버튼을 누르면 풍동 장치에 연결된 컴퓨터 프로그램이 풍동 가동 순간의 온도,

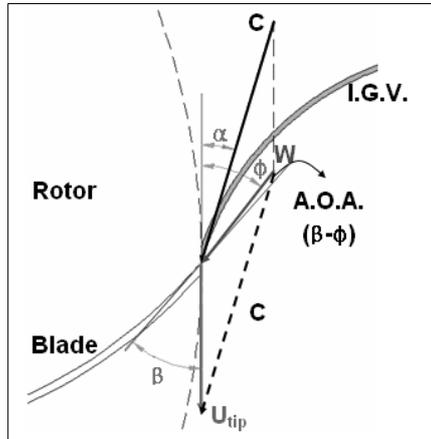


Fig. 6 Definition of 'Angle of Attack' to the rotor blade

습도, 풍동의 입구 압력과 출구 압력 등을 바탕으로 공기 밀도와 유속을 계산하여 공기 동력을 계산하며 풍력터빈에 연결된 토크미터로부터 로터의 토크와 회전수가 입력된다. 이 자료를 바탕으로 컴퓨터는 주속비와 축 동력을 계산하여 최종적으로 식 (3)의 동력계수를 계산하게 된다.

3.3 입구 안내익에 의한 로터 받음각 변화에 따른 성능 비교

본 연구에서는 수직축 터빈의 최적 입구 안내익을 설계하기 위해 입구 안내익 통과 후 유동에 의한 날개의 받음각에 대한 성능변화를 추적하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 입구 안내익의 출구각 (α) 변화에 따라 안내익 통과 후 안내익 끝에서의 접선방향으로 로터로 유입되는 유동의 절대속도(C)가 달라진다. 그리고 로터 회전 중에 날개 끝에서의 팁속도(u_{tip})와 절대속도에 의한 상대속도(W)가 날개로 들어오는 유동이 되므로 상대속도와 로터 날개 끝단에서의 접선이 이루는 각을 받음각으로 정의했다.

받음각 변화에 대한 성능 실험에서 입구 안내익은 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 3단 날개로 구성된 2개의 채널 형태이고 입구 면적(윗면 날개에서 아랫면 날개까지)은 로터 지름의 절반인 $0.5D$, 입구 안내익의 입구 면적(A_1)과 출구 면적(A_2)의 비는 평균적으로 0.33 으로 하였다. 실험 방법은 로터 날개의 형상을 최대한 유지하고 각 단의 입구 안내익의 출구각(α)을 8° , 13° , 17° , 23° 로 약 5° 간격으로 변경하면서 성능 실험을 수행하였다. 또한, 입구 안내익의 각 채널 (Fig. 7의 ①,

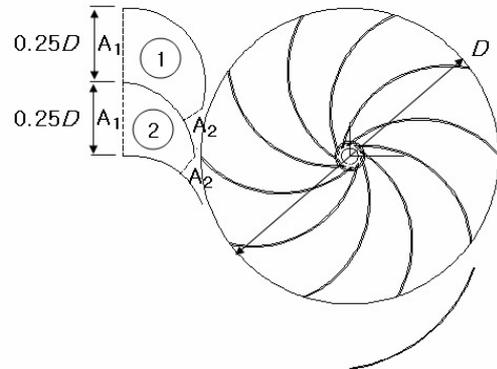


Fig. 7 Definition of inlet channel area ratio, A_2/A_1 for I.G.V.

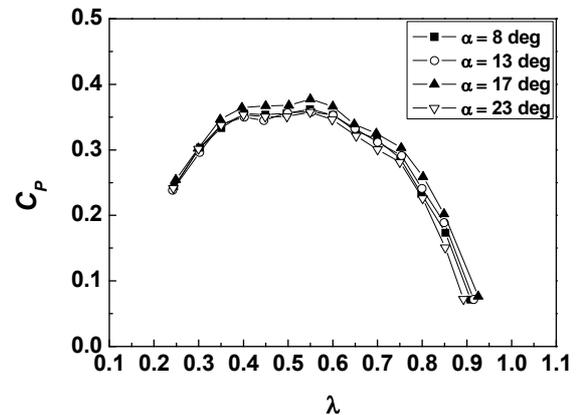


Fig. 8 Performance with respect to guide-vane exit angle α (tangential angle of flow from I.G.V. toward rotor) for the case of $H/D=0.8$, $Z=10$, straight-blade type at $u_\infty=7\text{m/s}$

②) 별로 입구의 평균 속도를 측정하고 면적비를 적용하여 계산된 출구 유속을 기준으로 최대 동력계수가 나타날 때 로터로 유입되는 상대속도로부터 받음각을 계산하였다. 그리고 출구 면적 부분은 전산유동 해석의 속도 벡터를 참조하여 윗면 날개에서 아랫면 날개에 수직으로 연결된 선으로 정의하였다.

입구 안내익의 출구각(α)에 대한 동력계수 C_p 의 변화는 Fig. 8과 같이 나타나며 $\alpha = 17^\circ$ 의 경우 동력계수가 가장 크게 나타난다. Table 1은 입구 안내익 출구각 변화에 따른 입구 안내익의 채널 ①, ②번 통과 후 유동에 의한 받음각, 두 채널의 평균 받음각(Mean A.O.A.), 최대 동력계수(Maximum C_p)에 대하여 정리하고 있다.

Table 1 A.O.A. and maximum C_p with respect to α (tangential angle of flow from I.G.V. toward rotor)

α (deg.)	Channel	A.O.A. (deg.)	Mean A.O.A. (deg.)	Max. C_p
8	①	30.4	30.0	0.362
	②	29.6		
13	①	23.9	23.1	0.358
	②	22.3		
17	①	18.0	17.5	0.377
	②	16.9		
23	①	7.8	6.5	0.356
	②	5.2		

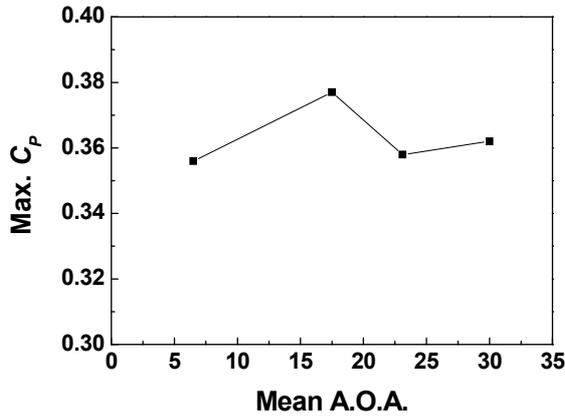


Fig. 9 Variation of maximum C_p 's with respect to mean A.O.A.'s for the rotor for the case of $H/D=0.8$, $Z=10$, straight-blade type at $u_\infty=7\text{m/s}$

평균 받음각에 대한 최대 동력계수는 각 경우 모두 주속비(λ) 0.55에서 발생하며 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 평균 받음각이 17.5° 일 때 0.377로 최대치를 나타내고 있고 그 전후로는 낮아지는 경향을 보인다. 따라서 입구 안내익은 작동점에서 로터 날개에 대한 받음각이 15° 와 20° 사이가 되도록 설계 시 최적의 효율을 나타낸다고 할 수 있다.

3.4 입구 안내익의 입출구 면적비에 따른 성능 비교

입구 안내익의 또 다른 설계 변수인 입구 안내기 위해 입구 안내익의 출구각(α)을 8° 로 고정된 상태에서 면적비 A_2/A_1 의 변화에 대한 성능 실험

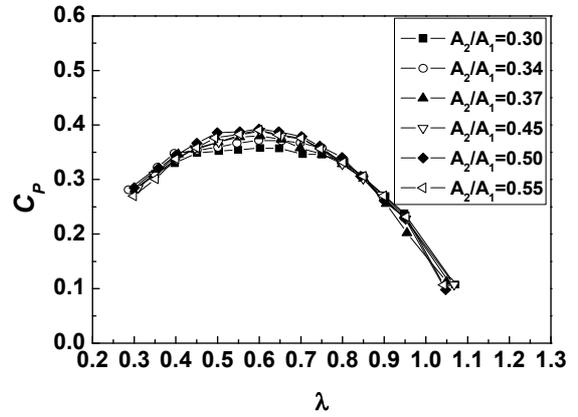


Fig. 10 Performance with respect to inlet channel area ratio A_2/A_1 for the case of $H/D=0.8$, $Z=10$, straight-blade type at $u_\infty=7\text{m/s}$

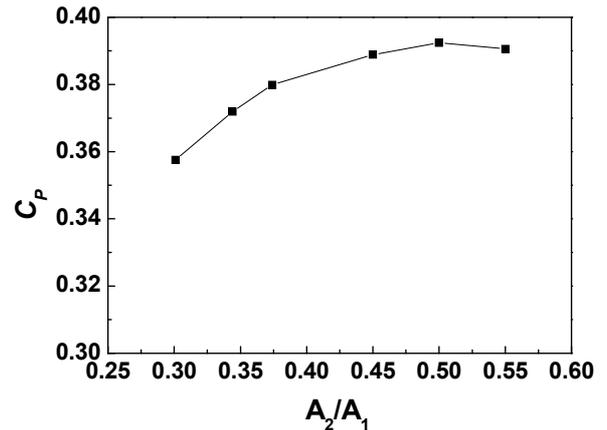


Fig. 11 Variation of maximum C_p 's with respect to A_2/A_1 at $u_\infty=7\text{m/s}$

을 수행하였다. 면적비의 변화를 위해 입구 면적 A_1 을 3가지 경우로 나누어 제작하였다. Fig. 10과 Fig. 11에서의 결과를 보면 A_2/A_1 이 증가함에 따라 최대 동력계수도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 면적비가 증가함에 따라 최대 동력계수는 계속 증가하지는 않고 A_2/A_1 이 0.50 이상 되면 면적비에 따른 유속 증가의 비율이 감소함으로써 인해 최대 동력계수는 다시 떨어지는 것으로 관찰되었다. 따라서 본 로터형상에 대한 입구 안내익의 최적 면적비는 0.45와 0.55 사이가 된다고 하겠다.

3.5 입구 안내익 설계 및 안내익에 의한 로터 성능 향상 검증

최적의 입구 안내익을 설계하기 위해 상기 실험 결과를 바탕으로 받음각이 15°에서 20°사이가 되도록 입구 안내익의 출구각을 17°로 결정하고, 입구 안내익의 입출구 면적비 A_2/A_1 을 평균적으로 0.50에 가깝도록 설계 후 전산 유동 해석을 진행하였다. 그 결과 바깥쪽 안내익에서 안쪽 안내익으로 갈수록 평균적으로 유동의 입사되는 각도가 입구 안내익의 출구각(α)보다 점점 더 큰 각도로 들어오는 현상을 발견하였다. 이를 고려하여 각 채널 통과 후 유동에 의한 받음각이 약 15°~20°정도로 일정하도록 입구 안내익의 출구각(α)은 바깥쪽 안내익에서 아래쪽 안내익으로 갈수록 점점 작아지게 하였다. 또한, 제작성을 고려하여 한 개의 원호가 되도록 입구 안내익을 설계하였다. Fig. 12에서는 최종 설계된 입구 안내익에 대한 전산유동해석 결과를 보여주고 있다. 이 결과에서 보면 입구 안내익 통과 후 로터 날개로 들어가는 유동의 방향이 입구 안내익의 출구각에서 벗어나는 것이 확인된다. 결과적으로 이 유동에 의한 각 날개의 받음각은 15°에서 20°사이에 있다. Table 2는 Fig. 12의 각 안내익에 대한 설계 변수의 값을 나타내고 있다.

설계된 안내익에 대한 성능 증가의 효과 검증을 위한 실험 결과 최대 동력계수는 Fig. 13에 나타난 것과 같이 안내익이 장착되지 않았을 때($C_p=0.02$)와 측후면 안내익만 장착 했을 때($C_p=0.14$), 입구 안내익만 장착 했을 때($C_p=0.28$), 입구 안내익과 측후면 안내익을 모두 장착 했을 때($C_p=0.50$)의 순으로 성능이 향상됨을 알 수 있다. 따라서 안내익이 본 수직축 풍력터빈의 성능에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 입구 안내익을 설계하기 전 수행했던 기초 실험의 최대 동력계수의 최대값(0.392)보다 최종 설계된 입구 안내익을 사용했을 때 최대 동력계수가 0.50으로 더욱 높다. 이승배 등⁽⁷⁾이 고안한 제트-휠-터보형 수직축 터빈에서는 날개 수 12매 터빈의 로터면적 기준의 최대 동력계수가 이론상 최대 동력계수인 0.59에 가깝고, 날개 10매일 경우 최대 동력계수는 0.50으로 예상되므로 상기 실험 결과에 비추어 볼 때 입구 안내익이 최적 설계되었다고 할 수 있다.

3.6 날개 수 변경에 대한 성능 변화

입구 안내익 설계 후 로터의 형상에 대한 공력 성능 변화를 알아보기 위한 첫 단계로 로터의 날

Table 2 Optimal geometric parameters of I.G.V.

I.G.V.	A.O.A. (deg.)	A_2/A_1
①	17.5	0.45
②		
③		0.53

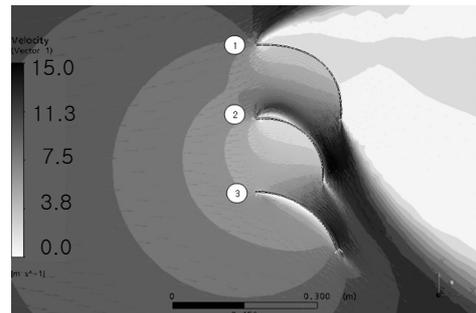


Fig. 12 Velocity vectors around I.G.V. by CFD at $u_\infty=12\text{m/s}$

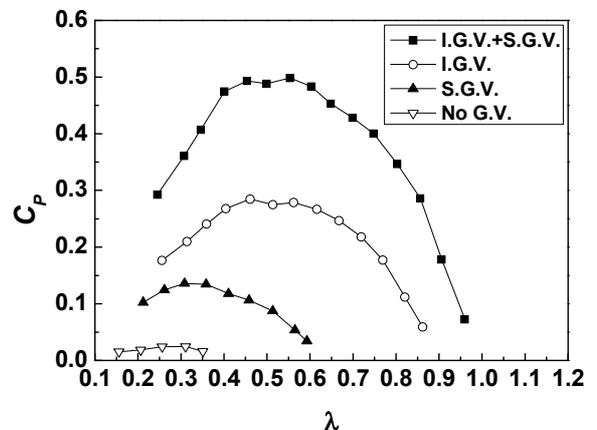


Fig. 13 Performances for the cases of with and without guide-vanes for the case of $H/D=0.8$, $Z=10$, straight-blade type at $u_\infty=7\text{m/s}$

개 수 변화에 대한 성능변화 측정 시험을 수행하였다. 각 날개 수에 대한 성능 곡선은 Fig. 14에 나타나 있으며, 이때 각 경우의 최대 동력계수는 Fig. 15에서와 같이 날개 수 3매 일 때 0.25, 6매 시 0.41, 10매 일 때는 0.50으로 로터의 날개 수가 증가 할수록 증가하는 경향이 나타난다. 이는 날개 수(Z)가 풍력터빈 성능을 결정하는 중요한 설계 인자임을 보여준다.

이 결과를 바탕으로 본 개발된 수직축 풍력터

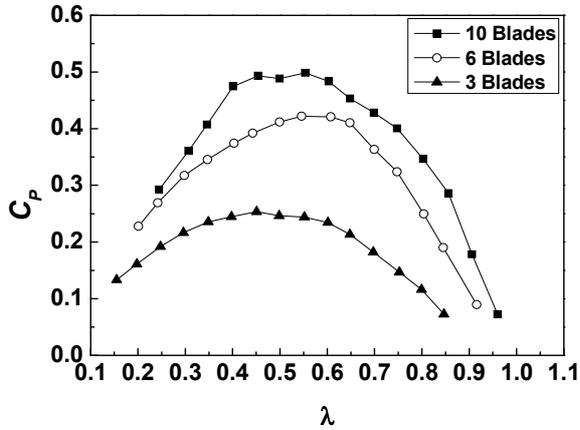


Fig. 14 Performance changes by the number of blade (Z) for the case of $H/D=0.8$, straight-blade type at $u_\infty=7\text{m/s}$

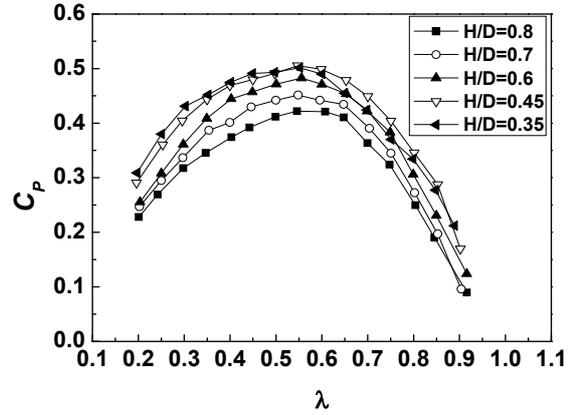


Fig. 16 Performance changes by the aspect ratio (H/D) for the case of straight-blade type at $Z=6$, $u_\infty=7\text{m/s}$

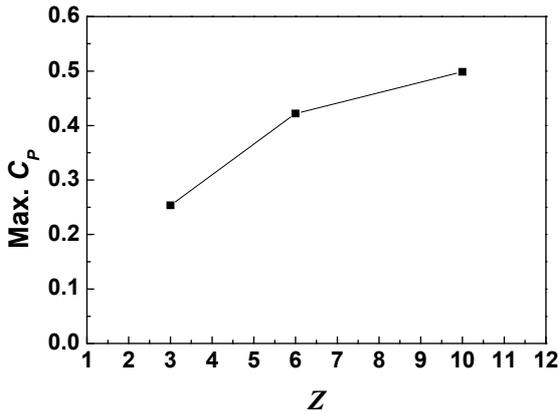


Fig. 15 Variation of maximum C_p 's with respect to the number of blade (Z) for the case of $H/D=0.8$, straight-blade type at $u_\infty=7\text{m/s}$

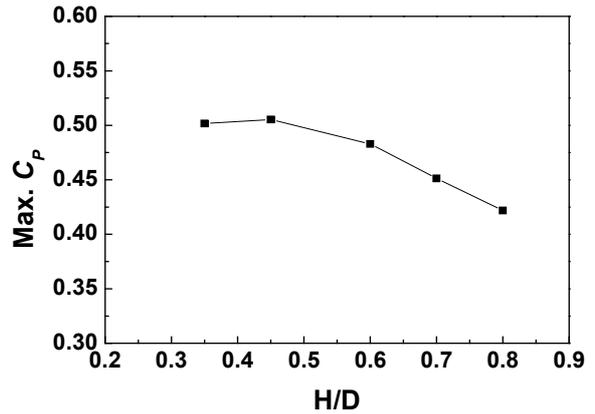


Fig. 17 Variation of maximum C_p 's with respect to H/D for the case of straight-blade type at $Z=6$, $u_\infty=7\text{m/s}$

빈의 날개 수(Z)가 12개가 되면 최대 동력계수는 0.55 이상까지 나타날 것으로 예측된다.

3.7 H/D에 대한 성능 변화

로터 형상에 관한 또 다른 설계 변수는 로터 직경 $D(m)$ 과 터빈 높이 $H(m)$ 의 비인 형상비 H/D 이다. 본 실험에서 사용된 모형은 각 H/D 에 따라 각각 터빈 로터를 제작해야 하기 때문에 각 실험 경우별 제작의 수월함을 위해 날개 수는 6 매로 고정하고 H/D 를 변화시키며 시험을 수행하였다.

H/D 변화에 대한 성능 곡선 Fig. 16과 H/D 변화에 대한 최대 동력계수를 비교한 Fig. 17을 살펴

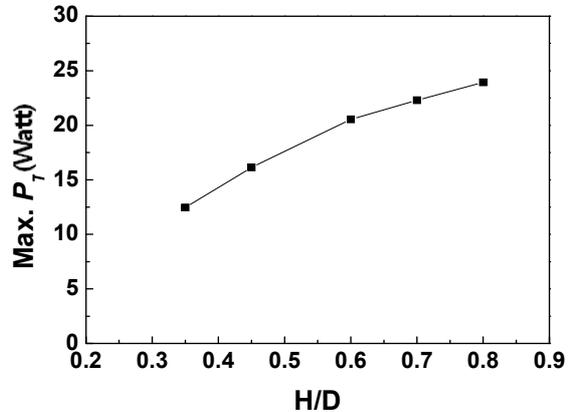


Fig. 18 Maximum output power (P_T) Vs. H/D for the model of 6 straight blades at $u_\infty=7\text{m/s}$

보면 H/D가 0.80에서 0.45까지 감소함에 따라 최대 동력계수 Maximum C_p 는 증가하다가 0.45 이하로 H/D가 감소하면 최대 동력계수는 다시 감소하는 경향을 보인다. 그러나 H/D가 0.45 까지 감소함에 따라 최대 동력계수가 증가를 하여도 로터에 입사되는 유동의 단면적이 감소함으로 인해 최대 출력 곡선은 Fig. 18에 나타난 것과 같이 감소하므로 설치 운용되는 곳의 풍질과 요구되는 터빈용량 등을 고려하여 H/D를 설계 변수로 사용할 수 있다. 즉, 같은 직경의 터빈로터의 길이에 정비례하여 출력이 증가하지 않으며 또한 제작비는 터빈로터의 길이 증가율보다 더욱 증가하게 되므로 적절한 H/D의 선정이 요구된다 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 이승배 등⁽⁷⁾이 고안한 제트-휠-터보형 수직축 터빈을 바탕으로 한 소형 수직축 풍력터빈의 공력성능 향상을 위해 여러 설계 인자를 실험적으로 검증하였다. 또한 요구되는 성능을 갖도록 터빈의 다양한 설계를 위한 연구를 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 사용된 소형 수직축 터빈의 기본 형태는 10개의 날개매수 및 0.8의 형상비(H/D)의 로터와 안내익을 갖춘 터빈으로서 최대 동력계수(Maximum C_p)는 0.50으로 측정되었다.

(2) 입구 안내익에 대한 설계 인자인 입구 안내익의 출구각(α) 변화에 따른 성능 시험 결과로부터 입구 안내익 통과 후 로터로 유입되는 유동의 최적의 받음각은 15°~20°이다.

(3) 본 형태의 터빈에 대한 입구 안내익의 최적 입출구 면적비 A_2/A_1 은 0.45~0.55이다.

(4) 날개 수(Z)와 로터 지름과 높이의 비인 형상비 H/D를 변화시키면 다양한 성능을 갖는 소형 수직축 풍력터빈의 설계가 가능하다.

따라서 본 연구 결과는 제트-휠-터보 방식의 소형 수직축 터빈의 출력 설계 시 구조물 강성 및 재료비를 고려한 H/D와 날개 수를 변화시키는 설계의 기초자료로 사용 될 수 있으리라 사료된다.

후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Sawin, J. L., 2008, *Wind power continuous Rapid Rise*, World Watch Report, March/April, VST108.
- (2) Korean Wind Energy Development Organization, 2006, *Project Research Report*, pp. 29~31.
- (3) Germanischer Lloyd, 2003, *Guideline for the Certification of Wind Turbines*.
- (4) Kim, K. H. and Lee, J. O., 1979, "About Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Generator," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 3, No. 2, pp. 60~67.
- (5) 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 *AIAA Journal of Energy*, Vol. 29, pp. 1843~1862.
- (6) Wilson, R. E. and Lissaman, P. B. S., 1974, *Applied Aerodynamics of Wind Power Machines, Research Applied to National Needs*, Oregon State University, GI-41840.
- (7) Lee, S. and Nam, S. K., 2007 "Wind Power Generating System with Vertical Axis Jet Wheel Turbine," *PCT/KR2007002902*.
- (8) Kim, B. K., Kim, Y. H., Song, W. S., Lee, S., Nam, S. K. and Kim, S. M., 2007, "An Experimental Study on the Performance of the Vertical-Axis Wind Turbine," *Trans. of the Journal of Fluid Machinery*, Vol. 10, No. 5, pp. 17~24.
- (9) Bergey, K. H., 1979, "The Lanchester-Betz Limit," *AIAA Journal of Energy*, Nov.-Dec., Vol. 3, pp. 382-384.
- (10) Bell, B., 2007, *A Technical Opinion on A Novel Vertical-Axis Wind Turbine Concept*, Garrad-Hassan Report.