

다구찌 기법을 이용한 윈드실드 수직축 풍력 터빈의 기초 실험 연구

홍철현* · 서성호**

*부산대학교 기계설계전산화인력양성센터

**한국과학기술정보연구원

Basic Experiment Using Taguchi method for Vertical Wind Turbine with Wind-shield

Cheol-Hyun Hong* and Seong-Ho Seo**

*Pusan Educational Center for Computer Aided Machine Design, Pusan National University, Busan, Korea

**Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Taguchi method 다구찌 기법, Optimal design 최적설계, Wind turbine 풍력 터빈, Wind-shield 윈드실드

ABSTRACT: This study aimed to develop a wind turbine system for the domestic wind environments. The Taguchi method was applied to obtain the optimal design for a wind turbine with a wind-shield. The design parameters were defined to look for the shape of the wind turbine. Optimal parameters were determined on the basis of the analyzed level averages of the characteristics. According to the test results to which the optimal parameters were applied, the rpm improved. It was also found that a windshield 3/4 the size contributes to improving the efficiency of existing turbines.

1. 서 론

최근 석유에너지의 가격 폭등으로 인한 대체 에너지 개발에 대한 관심과 이산화탄소 및 기타 여러 대기 오염 물질을 줄이기 위한 일환으로 국내에서도 태양광발전과 더불어 중형 풍력 발전시스템의 개발과 함께 소형 풍력 발전시스템의 개발에 활기를 띄고 있다. 국내의 경우 2006년 말 기준으로 풍력발전 설치용량은 177MW이며, 2011년까지 총 에너지의 5%를 신재생에너지로 공급한다는 계획을 갖고는 있으나, 풍력발전 설비의 높은 수입 의존도를 극복하기 위해서는 자체적인 기술의 상용화가 무엇보다 중요하다(박준용 등, 2009).

소형 수평축(Horizontal-axis) 풍력 터빈(Wind Turbine)은 구조가 간단하고 설치하기 편리하지만 바람의 방향에 영향을 많이 받는다. 반면, 소형 수직축(Vertical-axis) 터빈은 낮은 시동 풍속 설정이 가능하고, 약한 풍속에서도 풍력 발전이 가능하다. 또한, 로터 회전 속도가 상대적으로 낮아 높은 정밀도를 요구하지 않으므로 소형 터빈으로 많이 활용되고 있다. 수직축 풍력 터빈은 바람의 방향에 그다지 영향을 받지 않는다는 장점이 있으나 항력식이나 양력식에 무관하게 발전 효율이 수평축 풍력 터빈에 비해 효율이 떨어지는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 수직축 풍력 터빈의 효율을 개선하기 위하여 기존 풍력 터빈에 윈드실드(Wind-shield) 부착여부에 따른 상대적인 특성 비교와 향후 상세설계를 위한 기초자료로 활

용하기 위한 기초 실험을 다구찌 실험계획법(Taguchi method)에 따라 터빈 로터의 회전수(rpm, N)를 측정하여 검증하였다.

2. 수직축 풍력 터빈의 제작

2.1 항력식 수직축 풍력 터빈

풍력터빈은 가장 많이 보급된 수평축 방식과 소형 중심의 수직축 방식, 그리고 2가지가 조합된 하이브리드 방식으로 구분된다. 양력을 이용한 다리우스(Darrieus) 방식과 항력을 이용한 사보니우스(Savonius), 베네쉬(Benesesh) 방식 그리고 복합형의 방식이 있다. 특히, 사보니우스 터빈은 대표적인 항력식 수직축 터빈으로 날개의 개수에 따라 2-블레이드와 3-블레이드 등으로 구분할 수 있다(Menet, 2004; Morcos and Abdel-Hafez, 1996; Moutsoglou and Weng, 1995).

사보니우스 로터의 경우 2-블레이드가 3-블레이드보다 더 높은 터빈 효율을 갖는다고 알려져 있으며(Blackwell et al., 1978), 베네쉬 로터의 경우에는 2-블레이드 사보니우스에 비해 20% 향상된 효율을 가지는 것으로 알려져 있다(Moutsoglou and Weng, 1995). 그리고 김동건 등은 다수의 원호(Circular arc)형 날개를 부착한 로터 실험에서 높은 토크 계수를 구함바 있다. 최근 박준용 등은 이승배 등이 고안한 제트-휠-터보형 수직축 터빈의 실험적 검증에서 최대 동력계수(Maximum Cp) 0.5의 성

능을 확인하였다(Fig. 1).

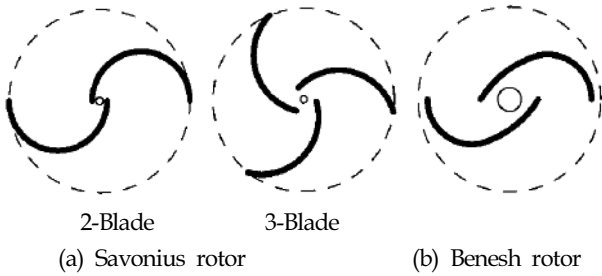


Fig. 1 Drag-type vertical axis turbine rotor(김동근 등, 2006)

2.2 윈드실드 수직축 풍력 터빈

본 연구에 사용된 수직축 풍력 터빈 모형은 Fig. 2에서와 같이 터빈의 입구 부분에서 유입되는 유체의 에너지가 축을 중심으로 터빈의 회전력에 장애가 되는 영역에서의 유입은 최소화하도록 하기 위하여 원호(Circular arc)형 날개 주위에 유입공기의 흐름을 차단하는 1/4, 3/4의 윈드실드를 부착하여 설계하였다. 그리고 축과 직접 연결되어 구동되는 발전기를 설치하여 실험하였고, 실제 실험에 사용된 윈드실드가 부착된 터빈의 형상은 Fig. 3과 같다.

그리고 적용된 터빈의 형상은 원호형이며, 외곽 직경(D)은 673mm, 높이 795mm로 유동에 대한 투영면적(A)은 0.1876m²

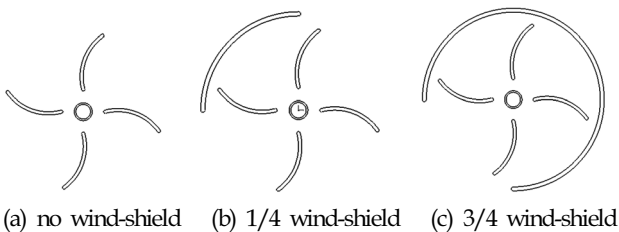


Fig. 2 Drag-type vertical axis turbine rotor(4-blade) with wind-shield top-view



Fig. 3 An appearance of wind-shield vertical axis turbine rotor

이다. 풍력 터빈을 설계함에 있어서 효율을 증대할 수 있는 인자는 터빈 날개의 개수(B), 윈드실드의 형상 등의 조건을 변수로 하여 실험을 수행하였고, 수직축 풍력 터빈의 제원 및 변수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Configuration and experimental conditions

Blade type	Circular arc
Diameter(D)	673mm
Hight(H)	795mm
Number of blade(B)	2, 4, 8
Area of reflection(A)	0.1876m ²
Chord of blade(a)	236mm
Wind speed(L)	3 ~ 18m/s

3. 다구찌 기법의 적용 및 실험

3.1 다구찌 기법

다구찌 기법(Taguchi method)은 기술개발, 제품설계, 공정설계 및 공정관리 등을 최적화하기 위하여 사용되는 통계적 실험 계획법으로서, 제품설계에 적용하면 사용 환경을 고려하여 우수한 기능이 발휘되도록 설계변수를 최적화시킬 수 있다(이부윤과 이현우, 2007). 실험계획법은 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 실험 수행에 있어서 최소의 노력과 비용으로 실험의 배치와 실시, 데이터의 통계적 분석 방법을 통하여 최대의 정보를 얻기 위한 방법이다.

다구찌 기법은 Robust design의 직교 배열(Orthogonal arrays)이라는 수학적인 도구를 이용하며, 품질특성을 측정하기 위하여 에 의한 요인과 수준(Level)의 조합에 의한 적은 수의 실험을 통한 실험설계 방법이라 할 수 있다. 측정을 위하여 S/N 비(Signal-to-noise Ratio) 기법(식 (1))에 의한 제품 혹은 공정상 다양한 변수들의 값을 변화시켜 가면서 행하는 일련의 실험들을 직교 배열이라 부르는 특수한 행렬을 이용한 행렬 형태의 실험을 행하면 여러 변수들의 효과를 효율적으로 결정할 수가 있다. 즉, 직교 배열에서 각 요인이 다른 모든 요인들과 독립적으로 평가될 수 있으므로 다양한 환경을 고려한 최소의 실험으로 최대의 정보를 얻을 수 있다. 따라서 다른 실험계획법에 비하여 시간과 비용 면에서 효율적이며, 설계변수를 최적화시킬 수 있는 장점이 있다(박동규, 2008).

$$S/Nratio = \eta(dB) = \frac{power\ of\ signal}{power\ of\ noise}$$

$$= -10\log_{10}\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right] \quad (y_i, measurement)$$

(1)

3.2 실험계획법 적용

본 장에서는 윈드실드형 수직축 풍력 터빈의 풍동시험 조건에 대하여 앞서 언급한 다구찌 기법을 활용한 실험계획법에 의해 기본적인 터빈 형상에 대한 최적설계 문제를 정의하고 실험적 방법을 통해 문제를 해석하고자 한다.

먼저, 다구찌 기법을 적용하려면 제품 성능의 기준이 되는 특성치를 평가특성으로 선정하게 된다. 본 연구에 적용될 수 있는 윈드실드형 수직축 풍력 터빈의 설계를 위한 평가특성은 회전수, 동력계수, 토크계수, 익단 선속비 등을 고려할 수 있고, 설계인자(Design parameters)로는 풍속, 터빈의 날개 수, 윈드실드의 부착여부 및 형상 등을 고려할 수 있다. 그리고 각 설계인자는 각각의 인자가 가질 수 있는 값의 범위를 분할하여 여러 개의 수준(Level)으로 정의할 수 있다.

설계인자와 수준을 선정 한 후에는 실험을 실시하여 평가특성을 구하게 된다. 이 때 설계인자와 수준의 수를 고려하여 적절한 직교 배열 표(Orthogonal array)를 선정하고, 직교 배열 표에 배치한 경우에 대하여만 우선하여 실험을 실시한다.

이와 같이 구한 평가특성으로부터 각 설계인자의 수준별 평균값을 계산할 수 있으며, 이를 통하여 각 설계인자에 대한 평가특성의 민감도와 영향도를 평가하여 최적의 설계인자를 결정할 수 있다(김병민 등, 2008; 이부윤과 이현우, 2007).

Table 2에 다구찌 실험계획법을 위한 설계변수 및 수준을 나타내었다. 본 실험에서 적용한 다구찌 실험계획법을 위한 주요 설계인자는 3개로 풍속, 날개 수, 윈드실드 부착여부 및 형상이다. 각 변수의 수준을 3에서부터 6까지 지정하였고, 이 변수를 바탕으로 $L_{18}(6^1 \times 3^2)$ 의 직교 배열 표(Table 2)를 작성하고 각 설계인자가 터빈의 회전에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험을 수행하였다.

Table 2 Levels of design parameters

Design parameters	Level					
	1	2	3	4	5	6
A Wind speed(U , m/s)	3	6	9	12	15	18
B Number of blade(B , ea)	2	4	8	-	-	-
C Wind-shield	0	1(1/4)	3(3/4)	-	-	-

3.3 실험

Fig. 4와 같이 실제 실험에 사용된 풍동은 2차원 벨마우스, 허니컴, 확산부, 저소음 웬 그리고 소음기로 이루어져 있다. 그리고 풍동의 구동과 유속을 제어하기 위한 제어장비인 인버터가 풍동의 외부에 설치되어 있다. 풍동의 직접적인 구동은 185kW의 3상 440V 가변 직류 전동기에 의해 구동되며, 직류전동기의 최대 분당 회전수는 1,750N이다. 풍동의 최대 유량은 $5,040\text{m}^3/\text{min}$ 이며, 이 때 최대속도는 30m/s 이다. 그리고 풍동 출구부의 크

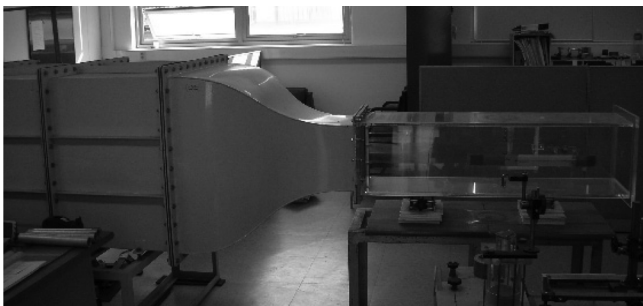


Fig. 4 Open-type wind tunnel view

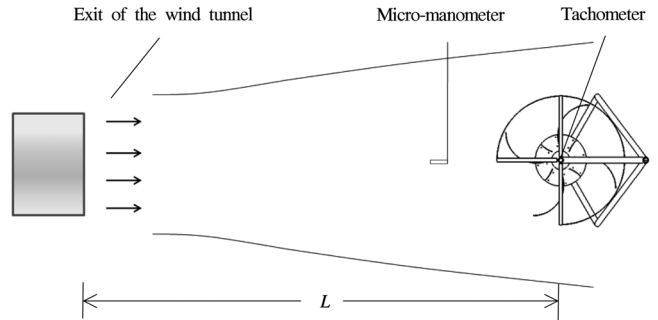


Fig. 5 Schematic appearance of the experimental arrangement

기는 가로 30cm, 세로 30cm이다.

Fig. 5에서와 같이 터빈의 각 유속에 대한 회전수 측정을 위하여 터빈의 상층부에 회전 속도계(Tachometer) 부착하여 회전수를 측정하였고, 풍동 출구부와 터빈까지 약 5m의 거리(L)를 두어 터빈 전면부에 공기가 유입되도록 하였다. 이때의 풍속은 피토관(Pitot tube)과 디지털 마이크로 마노메타 (Digital micro manometer)를 이용하여 측정하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 수직축 풍력 터빈의 윈드실드 부착여부에 따른 상대적인 특성 비교와 향후 상세 설계를 위한 기초자료로 활용하기 위한 기초 실험을 목적으로 하고 있어, 평가특성은 단순히 발전기가 부착된 상태에서 터빈 로터의 회전수만을 고려하였다.

윈드실드형 수직축 풍력 터빈 설계 시 필요한 최적의 설계변수를 결정하기 위하여 회전 중심축을 기준으로 하는 회전수를 목적함수로 선정하였다. 앞서 언급한 Table 2의 설계인자인 풍속(U), 날개 수(B), 윈드실드와 각 수준을 모두 평가하기 위해서는 54번(61×32)의 실험이 필요하나, $L_{18}(6^1 \times 3^2)$ 직교 배열을 이용하면 Table 3과 같이 18가지의 조합수가 결정되고, 이에 해당하는 실험만 수행하면 된다. 이와 같은 순서로 추출된 18가지의 경우에 대한 실험을 Table 3과 같이 수행하였고, 그 결과로 평가특성인 터빈의 회전수(rpm, N) 측정 결과(Experiment results)를 Table 3에 같이 정리하였다.

실험결과에 의한 설계인자의 수준별 평가특성 평균값은 다음 식에 의하여 구할 수 있다. 여기서 y_i 는 i 번째 경우의 평가특성 해석결과, n 은 해당 수준에 대한 각 인자별 경우의 수를 나타낸다(이부윤과 이현우, 2007).

$$Level\ average = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \tag{2}$$

식 (2)를 사용하여 각 설계인자의 평가특성에 대한 요인효과와 수준별 평균값을 계산하여 Fig. 6에 다구찌 실험계획법에 의한 각 변수 조합의 영향도를 그래프로 나타내었다.

4. 실험 결과 및 해석

Fig. 6의 평가특성 영향도에서 터빈의 회전수 분포에서 풍속이 가장 영향도가 크다는 것을 알 수 있으며, 풍속에 거의 선형적으로 비례한 결과를 보였다. 날개 수가 회전수 분포에 미치는 영향도에서는 날개 2개의 경우 89.3, 4개의 경우 108.8, 8개의 경

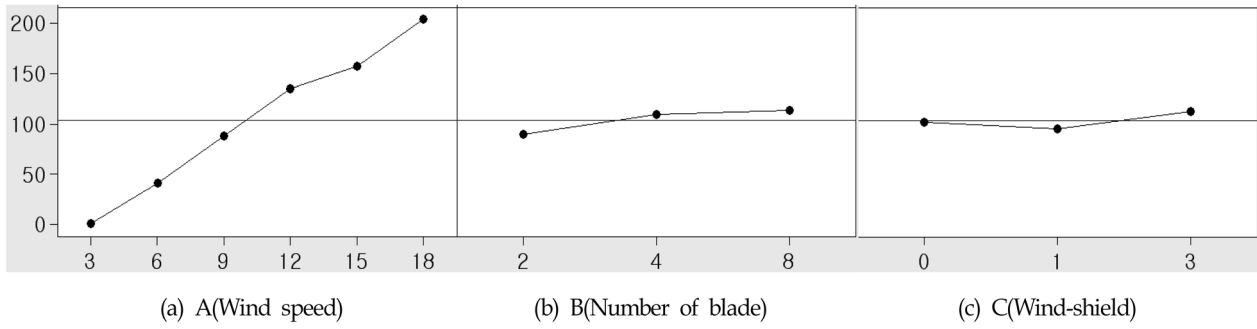


Fig. 6 Level average values of design parameter characteristics on the rpm

Table 3 Results of $L_{18}(6^1 \times 3^2)$ orthogonal array and characteristics

No.	Design parameters			Experiment results rpm(N)
	A, Wind speed(U, m/s)	B, Number of blade(B, ea)	C, Wind-shield	
1	3	2	0	0
2	3	4	1(1/4)	0
3	3	8	3(3/4)	0
4	6	2	0	16
5	6	4	1(1/4)	48
6	6	8	3(3/4)	57
7	9	2	1(1/4)	62
8	9	4	3(3/4)	101
9	9	8	0	100
10	12	2	3(3/4)	134
11	12	4	0	130
12	12	8	1(1/4)	139
13	15	2	1(1/4)	118
14	15	4	3(3/4)	179
15	15	8	0	174
16	18	2	3(3/4)	206
17	18	4	0	195
18	18	8	1(1/4)	210

Table 4 Results of previous and improved characteristics

	Design parameters			Experiment results rpm(N)
	A, Wind speed(U, m/s)	B, Number of blade(B, ea)	C, Wind-shield	
Previous 1	18	2	3(3/4)	206
Previous 2	18	8	1(1/4)	210
Improved 1	18	4	3(3/4)	214
Improved 2	18	8	3(3/4)	216

우 113.3으로 8개의 경우에서 영향도가 높음을 보였다. 그리고 윈드실드가 회전수에 미치는 영향도에서는 윈드실드가 없는 경우 102.5, 1/4의 경우 96.2, 3/4의 경우 112.8로 3/4의 형상에서 높은 영향도를 나타내었다.

이상의 평가특성 해석결과에 따라 윈드실드 수직축 풍력 터빈의 회전에 영향을 미치는 최적의 설계인자 3개의 수준을 풍속 18m/s, 날개 수의 수준은 4개와 8개 그리고 윈드실드 3/4으

로 결정하여 2가지의 경우에 대한 추가 실험을 수행하였다.

그 결과 Table 4에서와 같이 앞선 실험에서 얻은 최적의 회전수에 대한 결과와 비교할 때 개선된 1차 실험(풍속 18m/s, 날개 수 4개, 윈드실드 3/4)에서는 약 2%의 개선효과를 나타내었으며, 2차 개선 실험(풍속 18m/s, 날개 수 8개, 윈드실드 3/4)에서는 약 3% 정도의 개선효과가 나타났다. 그리고 앞서 언급한 날개 수와 윈드실드에 대한 영향도가 가장 높았던 날개 수 8개인

경우, 윈드실드 3/4의 경우와 잘 일치하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 윈드실드 수직축 풍력 터빈의 출력 및 성능시험에 앞서 윈드실드 부착에 따른 형상별 효과에 대한 기초 실험을 수행하였고, 다구찌 실험계획법을 사용한 최적화 실험 방법에서 다음의 결론을 얻었다.

기존의 원호의 형상을 가진 풍력 터빈의 날개 구조에 대한 윈드실드의 효과를 다구찌 실험계획법을 통해 간소화된 실험방법과 최적화된 실험결과를 보다 효율적으로 도출할 수 있었다. 일반적으로 변수들의 영향을 모두 알기 위해서는 많은 실험이 요구되지만, 다구찌 기법은 적은 양의 실험을 통해서도 여러 설계 인자들의 영향을 밝힐 수 있는 보다 효율적인 방법임을 알 수 있었다. 또한 3/4 형상의 윈드실드가 기존 터빈의 효율개선에 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다.

그리고 본 연구에서 적용된 윈드실드형 수직축 풍력 터빈이 가지는 단점인 능동적인 방향성을 부여하기 위해서는 바람의 방향에 따라 윈드실드의 방향이 자동 연동되어 조정될 수 있도록 하는 꼬리날개 등의 부수적인 기구를 부착한다면 이러한 단점을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김동건, 김문경, 차득근, 윤순현 (2006). "아크형 날개를 이용한 항력식 수직축 소형 풍력 터빈 설계", 유체기계저널, 제9권, 제2호, pp 7-12.
 김병민, 최홍석, 장명진, 배재호, 김동환, 고대철 (2008). "기계식 프레스에 의한 자동차 시트 리클라이너의 고정밀 플레이트

홀더 개발(II) : 버 형성 제어", 한국정밀공학회지, 제25권, 제7호, pp 64-71.

박동규 (2008). Minitab을 활용한 실험계획법, 기전연구사, pp 391-398.

박준용, 이명재, 이승진, 이승배 (2009). "고효율 소형 수직형 풍력터빈의 공력성능에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, B권 제33권, 제8호, pp 580-588.

이부운, 이현우 (2007). "다구찌 기법을 이용한 자동차 페달 압의 형상 최적설계", 한국정밀공학회지, 제24권, 제3호, pp 76-83.

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, pp 160-164.

Menet, J.-L. (2004). "A Double-Step Savonius Rotor for local Production of Electricity: a Design Study", Renewable Energy, Vol 29, pp 1843-1862.

Moutsoglou, A. and Weng, Y. (1995). "Performance Tests of a Benesh Wind Turbine Roter and a Savonius Rotor", Wind Engineering London-, Vol 19, No 6, pp 349-362.

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

2010년 2월 8일 원고 접수

2011년 5월 13일 심사 완료

2011년 6월 20일 게재 확정