

한국형 소형 풍력 블레이드 개발에 관한 연구

이 장호¹⁾, 장 세명²⁾, 김 상진³⁾

Development of the Small Size Wind Blade Optimized for Korean Wind

Jang-Ho Lee, Se-Myong Chang, Sang-Jin Kim

Key words : wind turbine blade, 10kW, low air-velocity

Abstract : To get the better efficiency in Korean type wind characteristics, a new wind turbine blade was developed with some structural, vibrational, and aero-elastic analysis for the design of the full-scale blade. A series of full domestic technology from design to manufacturing was created and used in the middle of the development of new wind blade. And it was equipped and measured at the wind test side in the Jeju island. After test, it is verified that the blade has the regular capacity of 10kW at the air velocity of 10m/s. And it shows better capacity in the low air-velocity compared to the imported blade. Therefore it can be made by only domestic technology, and used for the domestic wind distribution with the better power generation.

Nomenclature

R : rotor radius, m
Ω : rotational velocity, radian/s
V : air velocity, m/s
TSR : tip speed ratio
C : coefficient
ρ : air density, kg/m³

subscript

∞ : free stream
p : power

1. 서 론

풍력 발전 시스템에서 바람에너지를 발전축의 회전운동으로 변환하는 장치가 터빈 블레이드이다. 이 부품은 전체 생산 단가의 약 20 % 이상을 차지하고 전체 발전기의 효율과 내구성을 좌우하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 이러한 핵심부품은 외국에서 도입한 것보다 한반도 지형의 바람특성에 적합한 풍력 블레이드를 국내 기술로 생산하는 게 바람직하다. 이때 한반도 지형의 바

람은 일반적으로 유럽보다 풍속이 작고 시간에 따른 변화가 빈번하다는 것으로 알려져 있다.

이를 위해 보다 효율적인 풍력 터빈 블레이드의 설계 및 제작을 프로세스를 정립하고, 소음, 구조 및 공-탄성 설계가 포함된 종합적인 해석 방법을 구축이 필요하며, 이를 토대로 실물 도면을 작성하고 블레이드 제작을 위한 목형을 제작하는 등 전체 과정에 대한 단계적이고 체계적인 프로세스 정립이 요구된다.

이에 따라 본 연구에서는 10 kW급 소형 풍력 발전 시스템에 설치되는 터빈 블레이드에 대한 신속하고 효율적인 기초 공력 설계와 1/7 스케일 모형의 풍동 시험에 대한 방법론을 확립하였고⁽¹⁾, 복합 재료의 적층 방법과 구조 동역학 해석을 바탕으로 기존 설계의 타당성을 검토하고 허브 등

-
- 1) 국립군산대학교 기계공학부
E-mail : jangho@kunsan.ac.kr
Tel : (063)469-4869 Fax : (063)469-4727
 - 2) 국립군산대학교 기계공학부
E-mail : smchang@kunsan.ac.kr
Tel : (063)469-4724 Fax : (063)469-4727
 - 3) (주)준마엔지니어링
E-mail : junma65@yahoo.co.kr
Tel : (042)934-9400 Fax : (042)935-9405

탕으로 기존 설계의 타당성을 검토하고 허브 등 주변부와의 연결 관계를 고려한 종합적 설계 방법을 확립하였으며, 블레이드의 목형 제작을 비롯하여 실 제품의 제작에 관련한 프로세스를 정립하였다⁽²⁾. 또한 이렇게 제작된 10kW급 풍력 블레이드는 제주도 월령에 위치한 풍력실증단지에서 그 성능 측정을 계측하여 전술한 바와 같이 정립한 설계프로세스를 검증하였다⁽³⁾.

2. 풍력블레이드의 개발

2.1 공력설계⁽¹⁾

본 연구에서는 손쉽게 기저 설계값 없이 역설계 (inverse design) 방법을 통하여 1 차 설계안을 제시하는 방법을 선택하였다. 이 방법은 기존의 방법에 비하여 시간과 비용을 단축 및 절감시키는 장점을 가지고 있어서, 좀 더 경제적인 설계가 가능하도록 한다. 본 연구에서 채택한 블레이드의 기초 설계 값은 다음과 같다.

- ▶ 정격 출력 : 10 kW (풍속 10 m/s)
- ▶ 최대 출력 : 12.5 kW (풍속 12.5 m/s)
- ▶ 기동 풍속 : 3.2 m/s
- ▶ 최대 풍속 : 50 m/s
- ▶ 속도 제어 : 실속 제어 (stall control)
- ▶ 정격 회전수 : 173 rpm (풍속 10 m/s)
- ▶ 날개 직경 : 7.08 m (2R)
- ▶ 날개 수 : 3매

역설계의 입력 값으로는 블레이드 스펜 방향의 양력 계수 (lift coefficient)와 운동량 이론으로부터 이상적인 유도 계수 (axial induction factor)를 주었다. 설계 결과는 비틀림 각 (twist angle)과 시위 길이 (chord length)의 분포로 나타나고, 이를 바탕으로 기초 도면을 상용 공학 설계 프로그램인 CATIA 를 이용, *.igs 파일 형식으로 출력하였다.

2.2 풍동시험⁽¹⁾

역설계 (inverse design) 방법을 통하여 공력 설계 결과는 풍동 시험을 통하여 상호 검증되었다. 공군사관학교의 중대형 풍동 (측정단면 크기는 3.5 m x 2.45 m)이 사용되었다. 실험 방법은, 주어진 풍속에서 모터를 사용하여 원하는 회전수를 얻은 다음 발전기 모드로 전환하여 회전수, 토크, 전력 (전압과 전류값을 측정하여 곱한 값) 등을 측정하여 1/7 축소 모델 (재질은 알루미늄)에 대해 다음과 같은 두 개의 무차원 수-동력 계수(Cp)및 끝단 속도비 (TSR)를 추출하였다.

$$TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^3 \pi R^2} \quad (2)$$

이 두 무차원 수의 관계를 구한 결과 원래의 설계안과 유사한 동작 특성을 보여 주었다 (효율 80 % 내외).

2.3 날개 끝단의 형상설계⁽¹⁾

회전하는 블레이드의 끝단에서는 강한 깃 끝 와류가 발생하며, 이 와류의 영향으로 터빈의 후류에서는 공력 소음이 발생 한다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 세 가지 끝단 형상에 대한 전산유체역학 해석을 통하여 광범위한 풍속에 대해 가장 우수한 성능을 가지는 형상을 채택하였다⁽⁵⁾.

3 차원 공력 해석에 사용한 도구는 상용 코드인 CFXTM (ver. 5.6)이다. 이 코드는 사면체 (tetrahedral)인 비정렬 격자계를 이용하여 계산을 수행한다. 계산 결과 끝단 와류의 강도 (중심기압, 회전속도 등)를 측정할 수 있고, 간략화 시킨 모델에 대해 Lighthill의 음향 상사법을 이용하여 원방 (far field)에서의 소음 강도를 간접적으로 예측할 수 있다⁽⁶⁾. 이상의 공력 설계 및 시험, 수정 결과, 최종 형상 설계안을 완성할 수 있었다⁽³⁾.

2.4 구조해석 및 재질선정⁽³⁾

복합 재료의 적층 방법에 대해서는 3-4 가지의 설계 안을 가지고 주어진 형상과 회전수에 대해 응력 해석 및 구조 동역학적인 상호 비교 및 검토를 실시하여 가장 나은 성능을 보이는 안을 선택하였다. 이러한 해석에는 공탄성 해석이 가능한 상용 코드인 ADINATM를 사용하였다.

구조 해석 방법을 통하여 주어진 복합재료의 적층 형태에 대하여 회전수에 따른 안정성을 분석한 결과, 실제 풍력 터빈의 정격 회전수는 블레이드의 공진 주파수에 비해 상당히 낮게 나타나 구조물에 대해 동적인 안정성이 보장된다고 이해할 수 있었다.

2.5 제작성 검토

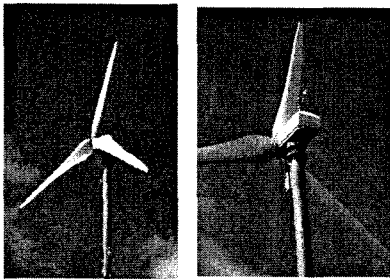
제작되는 루트부의 플렌지와 함께 발전기 축의 허브에 장착되게 된다. 허브 (터빈 블레이드와 회전축과의 연결부)는 앞에서 보았을 때 삼각형 형상이다. 이러한 허브를 블레이드를 설치 작업이 좀 더 용이하도록 나사 구멍의 위치를 이동시켜 개발하였으며 플렌지도 강도 해석과 루트부 보강을 통해 회전 중에 목이 부러지지 않도록 하였다. 이와 같은 작업들은 가공 전에 3차원으로 조립성

과 가공성이 확인되었다.

3. 성능측정

3.1 성능측정방법⁽³⁾

제작된 풍력 블레이드의 성능측정은 제주도 월령의 풍력 실증 단지에서 이루어졌다. Fig. 1은 제작된 블레이드가 장착된 모습을 나타낸다. 공기 풍속은 Fig. 1 (b)에서 보이는 바와 같이 풍력 블레이드 후단에 설치된 풍속계에서 측정된다. 이와 같이 풍력 블레이드의 후면에서 계속된 풍속은 블레이드에 의한 에너지 흡수로 실제속도 보다 낮게 측정된다. Fig. 2는 블레이드가 회전 중에 계속된 풍속과 블레이드를 정지시키고 바람방향에 직각으로 틀어놓고 계속한 풍속을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 약 2.5 m/s 정도의 편차가 있는 것으로 나타났다. 에 따라 본 연구에서는 타워 상에서 측정된 풍속 값에 2.5 m/s의 값을 더하여 블레이드 입력 풍속으로 환산하였다.



(a) 전면 (b)후면
Fig. 1 풍력 블레이드 장착 모습

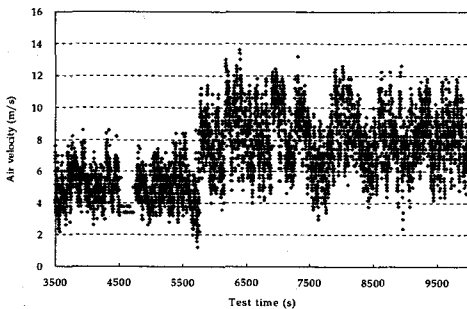
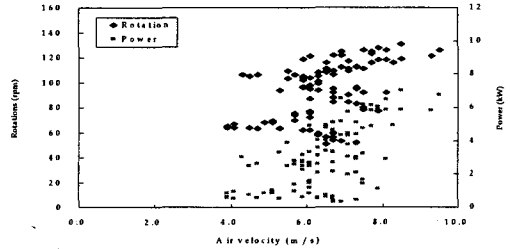
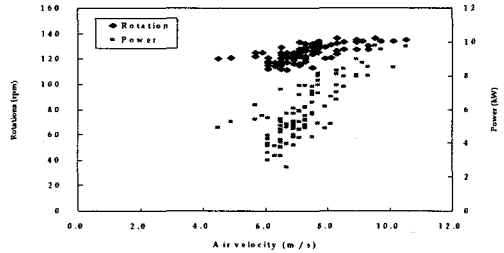


Fig. 2 타워 상에서 측정된 풍속

성능 계측 시 측정되는 데이터는 풍속, 회전수, 전류 세 가지로 1초 간격으로 측정된다. 전류는 전력변환기에서 검출하는데 전력변환기의 전압이 400V로 일정하게 유지되기 때문에 전류가 계속되면 출력으로 환산될 수 있다.



(a) 기동초기



(b) 정상운전

Fig. 3 측정된 운전성능

3.1 성능측정결과

개발된 풍력 블레이드를 발전기에 설치하고, 측정된 성능데이터는 Fig. 3과 같다. 그림에서 (a)는 기동초기 데이터로 이 영역에서는 전력변환기가 정격회전수 (120rpm)로 회전수를 상승시키는 제어를 주로하기 때문에 풍속에 대한 출력이 매우 넓은 폭의 변동을 갖는다. Fig. 3(a)에서 개발품이 풍속 3m/s 이하에서 기동하고 있음을 추측할 수 있다.

정상 운전 시 성능은 Fig. 3(b)에 보는 바와 같이 풍속 10m/s에서 정격출력이 나타나는 것으로 확인되었다. 회전수는 전력 변환기의 알고리즘으로 제어될 수 있는 부분으로 풍력 블레이드의 회전이 정격회전수에 넘게 되면 출력 전류를 증가시키는 방법으로 출력을 제한한다. 따라서 정격회전수 부근에서는 바람속도에 따라 Fig. 4와 같이 넓은 범위의 출력 범위를 나타내게 된다.

Fig. 5는 독일 Feldman 블레이드의 출력성능과의 비교를 나타낸다. 새로운 개발품이 저 풍속에서의 발전성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

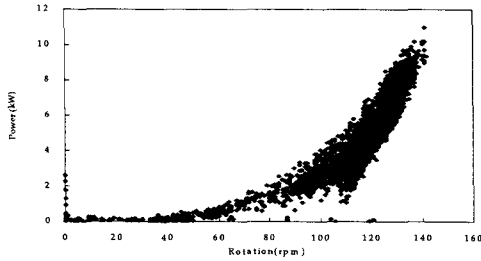


Fig. 4 풍력발전기의 회전수와 출력 특성

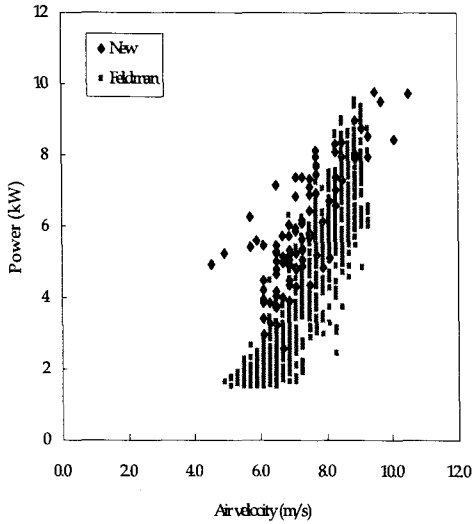


Fig. 5 Feldman 블레이드와의 성능비교

4. 결론

한국의 바람지형에 맞는 소형 풍력 블레이드를 국내 기술을 이용하여 개발하였다. 이를 위해 이론설계, 모형시험, 3차원도면 검토, 목형제작, 복합재료를 사용한 실 블레이드 제작등과 같은 일련의 체계적인 개발 프로세스를 개발하고 적용시켰다. 순수 국내 기술로 만들어진 풍력 블레이드의 성능을 시험한 결과, 개발 목표로 했던 정격 성능이 확인되었으며, 저 풍속 기동성능과 발전 성능이 도입품 보다 우수한 것으로 나타났다. 향후, 본 기술의 확대 적용과 현장 실증 시험을 통한 문제점 도출과 개선작업이 요구된다.

후기

본 연구는 “10 kW급 소형 풍력발전기 표준형 블레이드의 설계 및 개발 (2004-N-WD12-P- 02-3-010-2004)” 과제의 일부분으로서 산업자원부의 재정 지원으로 수행되었습니다. 저자들은 이러한 학술 지원에 감사드립니다.

References

- [1] 이장호, 장세명, 정형석, 김상진, “10 kW급 풍력 터빈 블레이드의 공력 설계 및 시험,” 한국 풍력에너지 학회 총회 및 국제학술대회, 2005. 12.9-10
- [2] 이장호, 장세명, 오일권, 김상진, “10kW급 풍력 발전시스템의 블레이드 설계 및 제작,” 2006 한국풍력에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp. 173-179, 2006.6.15
- [3] 이장호, 장세명, 김상진, “10kW급 풍력 발전시스템의 블레이드 개발 및 성능측정,” 한국풍력에너지학회 춘계 학술대회 논문집, pp.113-118, 2006.
- [4] 신형기, “수평축 풍력 발전기 블레이드의 공력 성능 및 하중과 소음 예측을 위한 수치 및 실험적 연구,” 서울대학교 박사학위 논문, 2005.
- [5] S. M. Chang, “Effect of Blade Tip Shape in the Noise of Small Wind Turbines,” NOVEM 2005, Saint Raphael, France.
- [6] 장세명, 이기재, 김필진 외, “환경친화적 풍력 시스템 구현을 위한 파동공학 문제들의 연구,” 최종보고서 (학술진흥과제), 산업자원부, 2004.