

IEC 61400-2에 의거한 소형 풍력발전용 블레이드 축소모델의 단순 하중 계산 및 구조 시험

장윤정¹, 강기원^{2*}

¹군산대학교 풍력기술연구센터, ²군산대학교 기계공학과

Simplified Load Calculation and Structural Test for Scale Down Model of Small Wind Turbine Blade according to IEC 61400-2

Yun-Jung Jang¹, Ki-Weon Kang^{2*}

¹Research Center for Urban Wind Energy Systems, Kunsan National University

²Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

요약 본 연구에서는 소형풍력발전용 블레이드의 축소모델을 대상으로 단순 하중 계산 및 구조 시험을 수행하였다. 먼저, 연구 대상인 블레이드의 초기 모델의 0.2 비율만큼 축소하여 설계 및 제작하였다. 그리고 소형 풍력발전 국제 규격인 IEC 61400-2에 의거한 단순 하중 계산식을 이용하여 모멘트를 획득하였다. 또한, 추를 이용한 구조 시험을 수행하여 최대 모멘트를 획득하였다. 이를 통하여 계산 및 시험에 따른 최대 모멘트를 비교하였다.

• **주제어** : 아이씨코드, 축소모델, 소형 풍력발전용, 구조 분석, 구조시험

Abstract This study deals with simplified load calculation and structural testing for scale down model of small wind turbine blade. First, the blade was designed and produced scale down to 0.2 ratio of initial blade. And moments were acquired by simplified load calculation equations according to IEC 61400-2 standard. Also, structural test using weight was conducted to obtain the maximum moment. Therefore maximum moments were compared at calculation and test.

• **Key Words** : IEC code; Scale down model; Small wind turbine blade; Structural analysis; Structural test

1. 서론

풍력발전기(Wind turbine)는 바람의 운동에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 전기를 얻는 장치로서 공해물질 배출이 없어 청정성 및 친환경적인 특성을 지니며, 광범위한 지역에서 활용이 가능하고 에너지원이 풍부하므로 과거에 비해 많아진 전기 사용량과 환경 문제에 대처할 수 있는 신재생에너지로 각광받고 있다[1]. 이러한 풍력

발전기는 크게 형태에 따른 수직축과 수평축 및 출력에 따른 대형과 소형으로 분류되며, 블레이드(Blade), 허브(Hub) 및 타워(Tower) 등으로 구성되어있다. 이 중 전체 단가의 약 20%를 차지하고, 19.8%라는 가장 높은 파손율(Failure ratio)을 가진 블레이드는 풍력발전기의 핵심 부품으로, 이의 파손 시 시스템의 기능정지뿐만 아니라 파괴된 파편이 외부로 흩어져 떨어질 경우 인명피해 발생

본 논문은 지식경제부, 한국산업기술진흥원, 호남광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구(R0001595) 결과임.

*교신저자 : 강기원(kwkang68@kunsan.ac.kr)

접수일 2013년 7월 10일 수정일 2013년 8월 23일 게재확정일 2013년 8월 26일

가능성이 존재하므로 블레이드의 구조적 안전성 평가가 필요하다[2].

블레이드의 구조 안전성 평가를 위해서는 하중 산출 및 이에 따른 구조 해석과 구조 시험이 수행되어야하며, 이러한 연구는 다양한 영역에서 수행되고 있다. 공창덕 등[3]은 공력 해석을 통해 설계된

블레이드를 대상으로 구조 설계 및 해석을 수행하여 구조적 안전성을 판단하였다. 김홍관 등[4]은 공력해석을 통해 얻은 하중을 적용한 구조 시험을 수행하여 블레이드의 구조적 안전성을 판단하였다. 이상의 연구들은 공력 해석을 통하여 최대 하중을 획득하였으며 이를 적용한 구조 해석 및 구조 시험을 수행하여 구조적 안전성을 평가하였다. 이는 해석프로그램을 사용할 수 있는 연구자만 하중 획득이 가능하며, 실제 블레이드를 대상으로 구조 시험을 수행하였기 때문에 블레이드 제작 및 시험의 고비용으로 인하여 보편화의 어려움이 있다. 그러나 블레이드가 받는 하중은 공력 해석뿐만 아니라 풍동 실험[5] 및 풍력발전시스템 국제 규격인 IEC 61400-2[6]에 정의된 단순 하중 계산식을 이용하여도 획득할 수 있다. 또한, 구조적 안전성을 판단하는 지표가 되는 구조 시험에 쉽게 접근할 수 있는 방법을 제시하는 연구가 지속되어야 한다.

본 연구에서는 소형 수평축 풍력 발전기에 사용되는 블레이드의 축소 모델(Scale down model)을 대상으로 하중 산출 및 구조 시험을 수행하였다. 이를 위하여 실제 블레이드의 0.2 비율로 축소하여 설계 및 제작하였으며, 국제 규격인 IEC 61400-2에 의거한 단순 하중 계산식을 이용하여 모멘트를 산출하였다. 또한, 추를 이용한 구조 시험을 수행하여 축소 모델의 최대지지모멘트를 획득하였다.

2. 연구 방법

본 연구의 대상인 소형 풍력발전용 블레이드의 사양을 Table 1에 나타내었다.

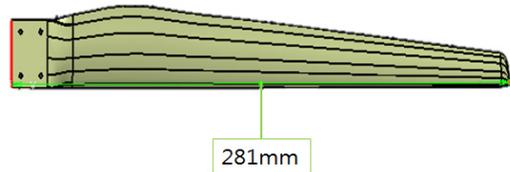
[Table 1] Specifications for scale down small wind turbine

| | |
|------------------------|----------|
| Number of Blade | 3 |
| Aerodynamic Profile | S-813 |
| Rated Wind Speed | 10.5 m/s |
| Rated Rotational Speed | 1462 rpm |

| | |
|--------------------|----------|
| Rated Power | 1.5 kW |
| Rated Wind Speed | 10.5 m/s |
| Cut-in Wind Speed | 3.2 m/s |
| Cut-out Wind Speed | 22.5 m/s |

2.1 축소 모델 설계

구조 시험의 대상을 제작하기 위하여 CATIA V5[7]를 이용하여 재설계하였다. 이는 실제 모델의 0.2의 비율로 축소하였으며 281mm의 길이를 가진다(Fig. 1 참조). 이러한 축소 모델을 Fig. 2와 같은 3D Printer인 알피 테크사의 INSPIRE D290을 이용하여 제작하였다. 이 프린터는 ABS B601을 고온에서 녹는 열경화성 플라스틱 실의 형태로 제작하여 사용하는 쾌속조형 방식으로 실의 한쪽 부분을 노즐로 뽑아낼 수 있게 연결한다. 이 때 노즐 끝 부분에는 순간적으로 700~800℃의 열이 가해지며, 이로 인하여 플라스틱 실이 녹으면서 그림을 그리고 말리는 반복 작업을 통해 층층이 쌓아 제품을 완성한다.



[Fig. 1] Scale down model



[Fig. 2] Inspire D290

2.2 단순 하중 계산

소형 풍력발전시스템 국제 규격인 IEC 61400-2에 정리된 하중 조건들을 Table 2에 나타내었으며, 블레이드에 관련된 모멘트 관계식만 정리하여 하중을 산출하였다.

또한, 주속비(Tip speed ratio) 및 정격풍속일 때의 토크(Torque)는 식(1) 및 식(2)와 같이 정의하며, 변수는 Table 3에 나타내었다.

$$\lambda_R = \frac{B \times n_R \times \pi}{V_R \times 30} \quad (1)$$

$$Q_R = \frac{P_R \times 30}{n_R \times \pi \times \eta} \quad (2)$$

블레이드의 최대지지하중을 획득하기 위한 구조 시험은 블레이드에 과손이 발생할 때까지 하중을 부하하는 시험이다. 이 시험은 블레이드의 루트(Root)를 고정시키고, 루트부를 제외한 블레이드 길이의 55%지점에 추걸이를 설치하여 추의 무게를 증가시키는 방식으로 수행하였다. 이 때, 축소 모델의 무게를 감안하여 대체적으로 가벼운 노끈을 이용하여 추걸이를 설치하였다(Fig. 3 참조).

[Table 2] Simplified load calculation method

| Load cases | | Equations |
|---------------------|----------|---|
| Normal operation | | $\Delta M_{xB} = \frac{Q_R}{B} + m_B \cdot g R_{egB}$ |
| | | $\Delta M_{yB} = \lambda_R \frac{Q_R}{B}$ |
| Yawing | | $M_{B,max} = m_B \omega_{max}^2 e R_{egB} + 2\omega_{max} I_B \frac{\pi n_R}{30} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-shaft}$ |
| Yaw error | | $M_{yB,max} = \frac{1}{8} \rho A_{proj} c_{t,max} R^3 \left(\frac{\pi n_R}{30}\right)^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_R} + \left(\frac{1}{\lambda_R}\right)^2\right]$ |
| Parked wind loading | stopping | $M_{yB} = \frac{1}{4} c_d \rho (1.4 V_{exr})^2 A_{proj} R$ |
| | spinning | $M_{yB} = \frac{1}{6} c_{t,max} \rho (1.4 V_{exr})^2 A_{proj} R$ |



[Fig. 3] Structural test setup

3.3 구조 시험 방법

[Table 3] Specifications of wind turbine for the simplified load calculation method

| Variable name | Definition | Unit | Value |
|---------------|---|----------|-----------|
| A | section area | m^2 | 0.00044 |
| A_{proj} | area projected to a plane perpendicular to the wind direction | m^2 | 0.006 |
| B | number of blades | - | 3 |
| c_d | drag coefficient | - | 1.5 |
| $F_{x-shaft}$ | force on the rotor shaft at the rotor attachment point | N | 0.8526 |
| I_B | blade moment of inertia | kgm^2 | 0.0000516 |
| m_B | mass of a blade | kg | 0.01715 |
| n_{max} | maximum speed of the rotor | rpm | 1475 |
| n_R | rotor speed at rated wind speed | rpm | 1462 |
| Q_R | rotor shaft torque at rated wind speed | Nm | 12.24 |
| R | radius of the rotor | m | 0.281 |
| R_{egB} | distance from the center of gravity of a blade to the blade root-hub junction | m | 0.1048 |
| V_{exr} | reference extreme wind speed | m/s | 50 |
| η | efficiency | - | 0.8 |
| ρ | density of air | kg/m^3 | 1.2 |

3. 결과 및 토론

3.1 단순 하중 계산

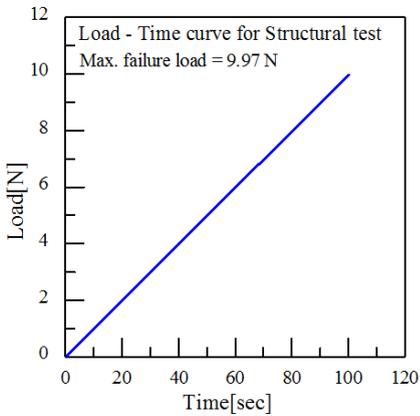
국제 규격인 IEC 61400-2에 정의된 단순 하중 계산식에 표 2에 나타난 변수를 이용하여 하중 조건에 따른 하중 및 모멘트를 산출하였으며, Table 4에 결과를 나타내었다. 이를 통하여 플랩방향에서는 case H 중 정지상태의 조건에서 3.71Nm의 최대 모멘트를 획득하였다. 또한, 예지방향에서는 case A에서 4.09Nm의 최대 모멘트를 획득하였다.

[Table 4] Load and moment about load cases

| Load cases | M[Nm] | |
|------------|----------|----------|
| | M_{xB} | M_{yB} |
| A | 4.09 | 1.72 |
| B | 7.09 | |
| C | - | 1.29 |
| H | stopping | 3.71 |
| | spinning | 3.3 |

3.2 구조 시험

구조 시험은 바람에 의한 하중을 직접적으로 받는 플랩방향에 대하여 수행하였으며, 루트 부를 제외한 55% 지점에 설치한 추걸이를 이용하여 추 무게를 증가시키는 방식으로 하중을 가하여 시험을 수행하였다.



[Fig. 4] Load-time curve

이때 증가시킨 추 무게는 축소 모델의 블레이드에 큰 무리가 가지 않도록 하기 위하여 최소 11g에서 최대 36g 까지 소량의 무게만을 증가시켜 블레이드에 파손이 발생할 때까지 시험하였다.

이러한 시험을 통해 얻은 결과를 Fig. 4에 하중 - 시간 곡선으로 나타내었으며, 이 때 최대 파손 하중은 9.97N을 가진다. 또한, Fig. 5는 블레이드의 파손된 부분을 나타내며, 이는 블레이드에서 최대 하중을 받는 부분이 루트부와 날개부가 연결되는 지점, 즉 변형이 가장 심한 곳에서 발생한 것을 볼 수 있다.



[Fig. 5] Break region

3.3 단순 하중 계산식과 구조 시험의 비교

단순 하중 계산식 중 플랩방향에 대한 극한 하중 조건인 case H 경우 정지상태의 식을 이용하여 구조 시험 시 하중을 부하한 지점에서의 모멘트를 산출하여 구조 시험 결과와 비교하였다. 여기서, 식 (3)은 단순 하중 계산식을 이용한 모멘트이고, 식 (4)는 구조 시험 시 획득한 하중과 부하지점의 길이를 이용하여 구한 모멘트이다.

$$M_c = \frac{1}{4} \times 1.5 \times 1.2 \text{kg/m}^3 \times (1.4 \times 50 \text{m/s})^2 \times 6E-3 \text{m}^2 \times 0.163 \text{m} = 2.15 \text{Nm} \quad (3)$$

$$M_c = 9.97 \text{N} \times 0.163 \text{m} = 1.62 \text{Nm} \quad (4)$$

이를 비교하였을 때, 하중 계산식의 모멘트는 2.15Nm, 구조 시험의 모멘트는 1.62Nm를 획득하였으며 하중 계산식을 통한 결과값이 약 1.3배정도 크게 산출되었다. 이는 제조 시 사용된 3D printer의 원재료의 기계적 강도가 제한되기 때문으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 수평축 풍력발전기 블레이드의 축소 모델을 대상으로 IEC 61400-2에 의거한 단순 하중 계산 및 구조 시험을 수행하였다.

- 1) CATIA V5를 이용하여 실측 블레이드의 0.2 비율로 축소한 모델을 설계하였고, 이를 이용하여 3D Printer로 제작하였다.
- 2) IEC 61400-2의 단순 하중 계산식을 이용하여 각 조

건에 대한 하중 및 모멘트를 산출하였다.

- 3) 구조 시험을 통하여 축소 모델의 최대지지응력이 9.97N임을 알 수 있었다.
- 4) 같은 조건에서의 하중 계산식과 구조 시험의 모멘트를 비교하였을 때, 계산식의 모멘트가 2.15Nm이고, 구조 시험의 모멘트가 1.62Nm로써 약 1.3배 정도의 차이를 보인다.

REFERENCES

- [1] Kim, et al., "Trend and Prospect of Overseas Wind Turbine Technique", KIEE, Vol 50, No. 6, pp. 19-24, 2001.
- [2] Hwang, et al., "An Understanding of Advanced Wind Turbines", A-JIN, 2009.
- [3] Kong, et al., "Aerodynamic and Structural Test on 1kW Class Small Wind Turbine Blade", KSAS conference, No. 4, pp. 460-463, 2004.
- [4] Kim, et al., "Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade", KFMA, Vol 13, No. 4, pp. 51-57, 2010.
- [5] Chang, et al., "Aerodynamic Design of 10 kW-level HAWT Rotor blades", KSAS, Vol 35, No. 10, pp. 884-890, 2007.
- [6] International Standard, IEC 61400-2, 2006, "Design requirements for small wind turbines", Second edition.
- [7] CATIA Version 5 R18, Dassault Systemes Simulia.

저자소개

강 기 원(Ki-Weon Kang)

[비회원]



- 1991년 ~ 1996년 : 대우자동차 안전시험 주임연구원
 - 1993년 2월 : 한양대학교 한양대학원 기계설계학과(기계설계학석사)
 - 2001년 2월 : 한양대학교 한양대학원 기계설계학과(기계설계학박사)
 - 2001년 ~ 2008년 : 스포츠과학연구원 책임연구원
 - 2004년 ~ 2008년 : 두원공과대학 겸임교수
 - 2008년 ~ 현재 : 국립 군산대학교 부교수
- <관심분야> : 복합재료, 피로

장 윤 정(Yun-Jung Jang)

[비회원]



- 2011년 2월 : 국립 군산대학교 기계자동차공학부(기계디자인전공)
 - 2013년 2월 : 국립 군산대학교 기계공학과(기계공학석사)
 - 2013년 3월 ~ 현재 : 국립 군산대학교 풍력기술연구센터 연구원
- <관심분야> : 복합재료, 피로