

풍력발전기용 복합재 윈드터빈 블레이드의 설계 개발 시험

이충훈* · 정성훈* · 박지상* · 김태욱*†

Design Development Test for Composite Wind Turbine Blade

Chung-Hun Lee, Sung-Hoon Jung, Ji-Sang Park and Tae-Wook Kim

Abstract

This paper describes method and procedure for DDT (Design Development Test) of composite wind turbine blade composites. The test type of DDT is bending test, such as cantilever beam, based on the rated wind speed of wind power generation system. DDT was carried out in order to compare with the result of FEM analysis, characterize structural stability, verify manufacturing process and review test method of full scale blade.

Key Words: Wind Turbine Blade, Design Development Test(DDT), Finite Element Method(FEM), Glass Fiber/Epoxy Composites,

기호설명

ρ_i : 분포하중	M : 모멘트
L : 집중하중까지 거리	p : 집중하중
I : 관성모멘트	Z_i : 분포하중까지 거리
σ : 응력	V_f : 섬유체적율

1. 서론

풍력발전은 블레이드의 회전을 이용하여 바람의 운동에너지를 발전기에서 전기적 에너지로 변환을 하여 전력을 발생시키는 장치이다. 블레이드는 1891년 최초의 풍력발전이 시작된 이후 재료와 구조의 큰 변화를 거쳐 현대의 복합재료 블레이드로 발전되어왔다.

특히 풍력발전의 핵심은 블레이드 부분이며, 블레이드의 회전면적은 얼마나 많은 에너지를 바람으로부터 얻을 수 있는지를 결정해주는 요소이다. 따라서 최근 들어 블레이드의 회전면적을 크게 하기 위하여 대형 블레이드를 사용하는 대용량 발전 시스템이 선호되는 추세이다. 이러한 대형 블레이드는 재료, 해석, 설

험, 제작 등 해결해야 할 부분이 많다.

본 논문은 지난 학술대회 때 발표한 블레이드의 구조해석 결과[1]를 축소시제를 이용하여 검증한 시험 결과 보고서이다. 이를 위하여 1/7 크기의 proto type 축소시제 블레이드를 2기 제작하였으며, 설계 개발 시험(Design Development Test)은 해석 결과, 재료에 대한 검증, 제작과정의 확립 및 Full Scale 시제 시험의 Simulation을 목적으로 시행하였다.

2. 하중의 선정

설계개발시험을 위해 선정한 하중은 정격출력 풍속인 12.7m/s 이며, Fig. 1과 같은 외팔보에 분포하중이 가해지는 형태의 굽힘 시험이다. 시험 구조물이 실물의 1/7로 축소되었기 때문에 시험에 적용할 하중은 다음과 같은 방법으로 산출하였다.

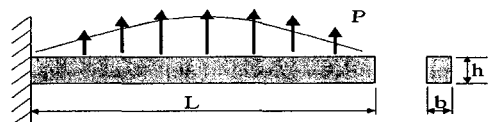


Fig. 1 Approximated Blade as Cantilever beam

* 한국기계연구원 복합재료그룹

$$M=PL, L=7L', b=7b', h=7h' \quad \textcircled{1}$$

$$\sigma = \frac{M y}{I} \quad \textcircled{2}$$

$$\frac{6P'L'}{bh^2} = \frac{6PL}{bh^2} \quad \textcircled{3} \leftarrow \textcircled{1}$$

$$\therefore P' = (1/7)^2 P \quad \textcircled{4}$$

식 ④의 결과에 의하여 축소시체에 적용한 하중은 실제 크기의 Blade의 적용하중의 (1/7)²배가 된다. 축소시체의 하중분포는 Fig. 2와 같다.

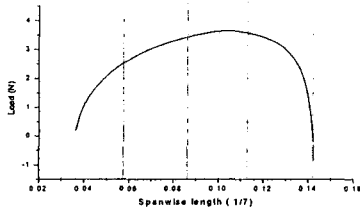


Fig. 2 Distribution of load

축소시체시험에 분포하중을 적용하기는 기술적으로 어렵다. Fig. 2와 같이 4등분된 집중하중으로 변환을 위해서 Fig. 3을 이용하여 식을 정리하면,

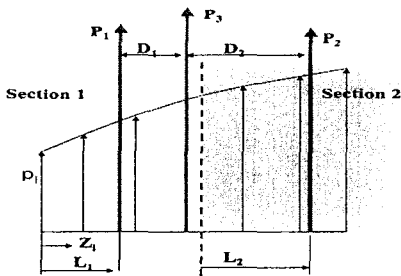


Fig. 3 Substitution concentration load of distribution load

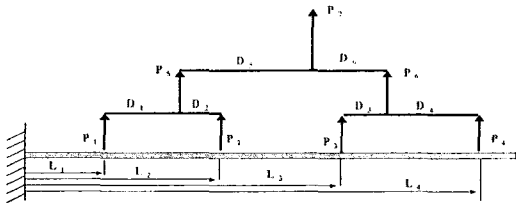


Fig. 4 Positions of Concentration Load

$$M = PL = \sum p_i Z_i$$

$$\therefore P = (\sum p_i Z_i) / L \quad \textcircled{5}$$

$$P_3 = P_1 + P_2$$

$$P_1 D_1 = P_2 D_2 \quad \textcircled{6}$$

⑤, ⑥식을 이용하여 집중하중 P와 거리 D를 구하면 Fig. 4 / Table. 1 과 같다.

Table. 1 Values of Concentration Load

	P _i (unit: N)	D _i (unit: mm)	L _i (unit: mm)
1	69.49	399	1189
2	161.92	171	1759
3	193.42	264	2440
4	140.47	363	3066
5	233.41	663	
6	333.89	459	
7	565.31		

3. 시험장비 구성 및 설정



Fig. 5 Multi-axis structural testing system

시험장비는 Multi-Axis Structural Testing System 을 사용하였으며, 1기는 250kN, 2기는 100kN, 250mm 의 사양이며 전체적인 형상은 Fig. 5와 같다.

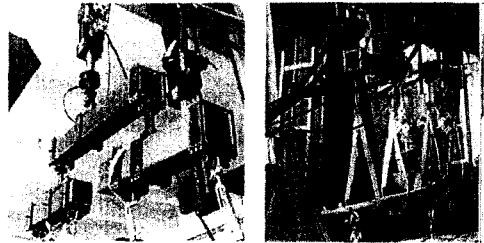


Fig. 6 Whiffle-tree and test set-up

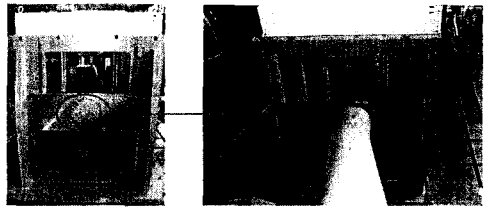


Fig. 7 Blade fixture

블레이드에 분포하중을 가하는 방법은 휘플트리 (Whiffle-tree)를 사용하였으며[2-4] 형상은 Fig. 6과 같다. 블레이드의 지지시스템은 Fig. 7처럼 36개의 볼트로 루트부에서 외팔보처럼 고정하였다.

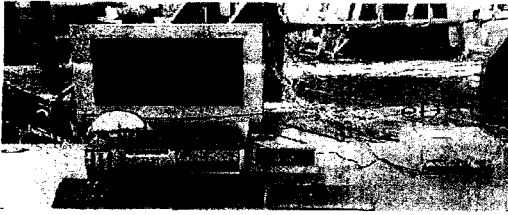


Fig. 8 Load control and data acquisition system

하중/변위제어 시스템은 MTS의 Flex Test GT를 사용하고, 기록/저장 시스템은 SOMAT의 eDAQ을 이용하였다. 전체 시스템의 형상은 Fig. 8과 같다.

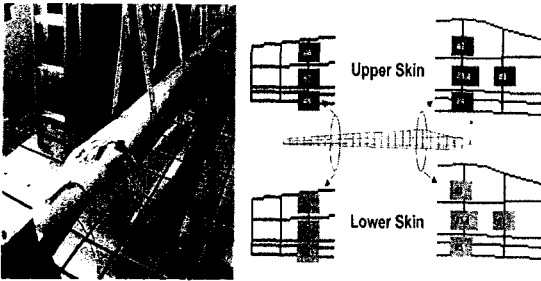


Fig. 9 Locations of strain gage

Fig. 9는 블레이드에 부착하여 실제 변형율을 알아보는 스트레인 게이지의 부착 위치를 나타내며, 위/아랫면 스킨에 각각 8채널씩 총 16채널을 사용하였다.

4. 시험 과정 및 결과

시험에 적용된 기준하중은 Table. 1의 P_7 인 57.6 kgf이다. 시험은 한계하중시험과 극한강도시험의 2가지를 수행하였으며 Fig. 10은 한계하중법의 과정을 설명하고 있으며, 극한강도법이란 구조물의 파단까지 하중을 가하는 방법이다.

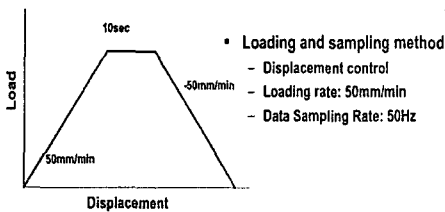


Fig.10 Limit load test procedure

Fig. 11은 한계하중시험으로 300%의 하중을 가했을 때의 변형상태를 보여주며, Fig. 12는 극한강도시험으로 블레이드가 파단 했을 때를 보여주고 있다. 극한강도시험 결과 파단하중은 364kgf로 기준하중의 632%에

해당한다. 실제크기에 대한 하중으로 환산하면 17836 kgf이며, 파단발생시 팁(Tip)의 변위는 630 mm로 실제 크기라면 약4400mm 정도가 된다.



Fig.11 300% ref load Fig.12 After failure

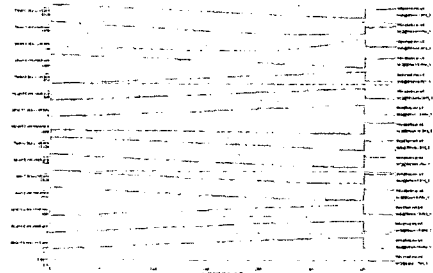


Fig.13 Strain data

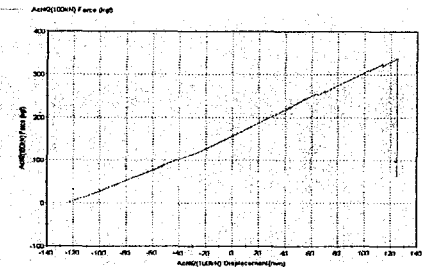


Fig. 14 Load / Displacement curve

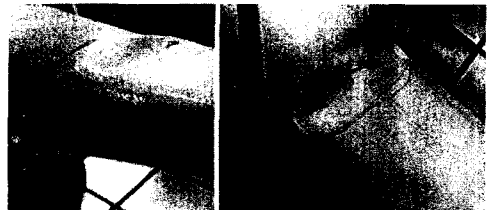


Fig. 15 Fracture and buckling on upper skin



(a) Debonding (b) Crack
Fig. 16 Debonding and crack of web

Fig. 13은 16개 채널의 스트레인 데이터이며, Fig.

14는 극한 하중범 으로 블레이드가 파단 될 때까지의 하중 / 변위 그래프를 보여주고 있다. Fig. 15는 블레이드가 파단하중 도달 시 발생한 좌굴 형상과 앞전의 파단을 보여준다. Fig. 16은 파단부위의 단면을 보여준다. 파단위치는 블레이드 허브 끝단으로부터 1230mm 떨어진 곳이었다. (a)는 웹과 스킨의 접합부에서 분리 (Debonding)가 발생하였음을 보여주며, (b)는 전단력에 의해 웹에 균열이 발생한 것을 보여준다.

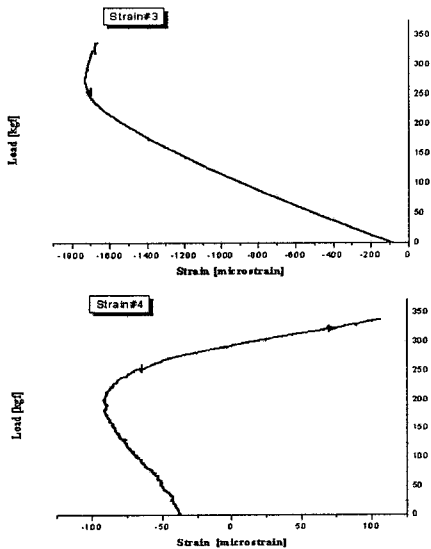


Fig. 17 Strain value of gage #3 and #4

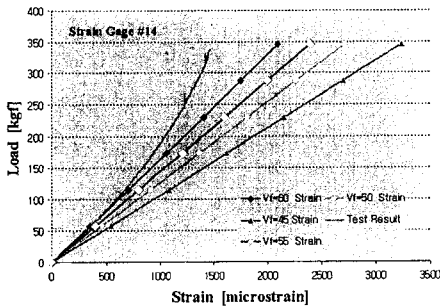


Fig. 18 Comparison of strain values

Fig. 17은 게이지 3번, 4번의 스트레인 측정값을 나타낸다. 이 값으로부터 루트와 스킨의 연결부위에서 국부좌굴이 발생했음을 확인하였다. Strain #3은 블레이드 스펠방향의 스트레인 값이며, 좌굴하중은 280 kgf 이며, Strain #4는 블레이드 코드방향 스트레인 값이며 좌굴하중은 204kgf 이다. 고정된 블레이드를 X축(Spanwise)에서 볼 때 웹은 작용하중에 의한 Z방향(블레이드 두께 방향)으로 전단력(V_z), X축을 중심으로 비틀림 모멘트가 작용하게 된다. 이러한 힘에 대하

여 블레이드 접합 분리는 결함 요소가 된다. 따라서 앞전의 파열과 국부좌굴을 발생시키는 직접적인 원인이 되었다. Fig. 18은 시험결과 값과 FEM 해석 값을 비교한 그래프이다. 시험 값은 시험 기준하중의 약 200% 까지는 선형거동을 보이며 Vf=60%의 해석 결과 값과 근사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 시험결과와 FEM 해석결과가 차이를 보이는 이유는 축소시제의 제작과정에서 웹과 스킨의 접합부위에 과도한 덧붙임으로 구조물이 해석결과에 비해 강성이 높아진 것으로 판단된다. 이 결과로부터 실물시제의 프리프레그는 Vf= 50~55%를 선택하는 것이 현실성이 있다고 생각되며, 웹과 스킨의 접합부위의 덧붙임 보강을 이용하여 스킨을 최적화 할 수 있다고 판단된다.

5. 결론

본 시험은 풍속 조건의 공력 하중, 하중안전계수, 설계하중 등을 IEC 규격에 맞추어 시행하였다. 본 시험의 결과를 FEM 해석 결과와 비교해 보면서 해석만으로는 예측하기 힘든 파손의 형태를 확인 하였으며, 블레이드의 강도와 강성을 파악하였고, 실제로 제품을 제작할 때의 발생이 가능한 문제점을 예측 하였다. 또한 이번 시험을 토대로 한층 최적화된 블레이드에 대한 자료를 정립하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지 관리공단의 '750 kW급 Geared Type 풍력발전 시스템 개발' 의 일환으로 수행된 연구임

참고문헌

- (1) 이충훈, 박진무, 홍순곤, 박지상, 김태욱, "풍력 발전기용 대형 복합재 블레이드에 대한 구조해석 및 사이징에 관한 연구", 한국복합재료학회 추계학술대회논문집, pp. 5-9, 2002
- (2) M. C. Cheney, T. Slsen, G. Quandt, P. Arcidiacono, 1999, Analysis and Tests of Pultruded Bladees for Wind Trubine Rotors, NREL subcontractor report, NREL/SR-500-25949, pp.20-37
- (3) IEC TECHNICAL SPECIFICATION, 2001, Wind turbine generator systems Part23: Full-scale structural testing of rotor blade, IEC TS 61400-23, pp.38-49, 56-62
- (4) TPI Composite, Inc., 2001, Blade Manufacturing Improvements Development of the ERS-100 Blade, Sandia Unlimited Release, SAND2001-1381, pp.34-39