

풍력발전용 대형 복합재 회전날개의 구조시험 및 평가에 관한 연구

공장덕* · 정종철* · 장병섭* · Y. Sugiyama**

Test and evaluation of a large scale composite rotor blade for wind turbine

C. D. Kong* · J. C. Jeong* · B. S. Jang* · Y. Sugiyama**

ABSTRACT

A structural test of the wind turbine rotor blade is to evaluate the uncertainty of design due to selection of material, design concepts, production processes and so on, and their possible impacts on the structural integrity.

In the full-scale static strength test, the measuring parameters are strain and displacements vs. loads, weight and the center of gravity. In order to simulate the aerodynamics load, the three-point loading method is applied. There is slight difference between the measured results and the predicted results for the reference fiber volume fraction of 60%. However, the agreement between the measured results and the predicted results with the actual fiber volume fraction of 52.5% is good. Even though a slightly non-linearity from 80% loading to 100% loading exists, a linear static solution is sufficient for the design purpose due to the small amount of non-linearity. Comparison between measured and predicted strain results at the maximum thickness positions of the blade profile for 0.236R(5.56m), 0.493R(11.59m) and 0.574R(13.43m), under 20%, 40%, 60%, 80% and 100% loadings for the upper part of the blade. The predicted values are in good agreement with the measured values.

1. 서론

본 연구에서는 복합재료로 설계 제작된 대형 풍력발전기용 회전날개의 구조시험을 통해 대형 복합재 구조물의 설계 시 나타났던 여러 가지 불확실한 오차 요인들 즉, 사용재질, 설계개념 및 생산공정 등에 대한 평가와 전체적인 구조 안전성의 평가를 수행하였다.[1][2][3]

구조시험은 쿠폰 단위, 시편 단위, 구성품 단위 및 전기시험 등 여러 단계의 시험이 있다.^[4]

보통 대부분의 시험은 표준 시험 장비를 사용하여 여러 가지 하중과 신속한 시험 수행을 할 수 있는 쿠폰 단위의 시험이 이루어진다. 그러나 전술한 바와 같이 실제 제작되어 사용할 회전날개의 구조적 안정성의 입증을 위해서는 전기 시험이 반드시 이루어져야 한다. 전기 시험은 정적강도시험과 피로시험으로 분류되는데 피로시험의 경우 고가의 시험설비가 필요하고 장기간의 시험 기간이 요구되므로 본 연구에서는 정적 강도 시험만이 수행되었다. 측정된 시험

* 조선대학교 우주항공공학과 (Chosun Univ., Dept. of Aerospace Eng.)

** Osaka prefecture univ.

값은 유한요소 해석으로 예측한 값과의 비교를 통해 설계 시 사용한 해석 결과의 타당성을 확인하였으며 시험 결과로부터 본 회전날개의 구조적 안전성이 확보되었음을 확인하였다.

2. 설계 결과

회전날개의 기본 구조는 Fig. 1과 같이 셀-스파-폼 샌드위치로 하여 날개에 작용하는 여러 하중들을 적절하게 배분할 수 있도록 설계하였으며, 정적강도해석, 모달해석, 좌굴해석, 피로수명해석 등을 통하여 20년 이상동안 사용하는데 충분한 안전율을 가지는 구조로 설계하였다.

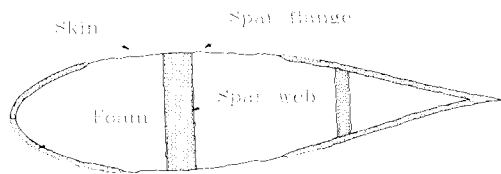


Fig. 1 Sectional airfoil configuration

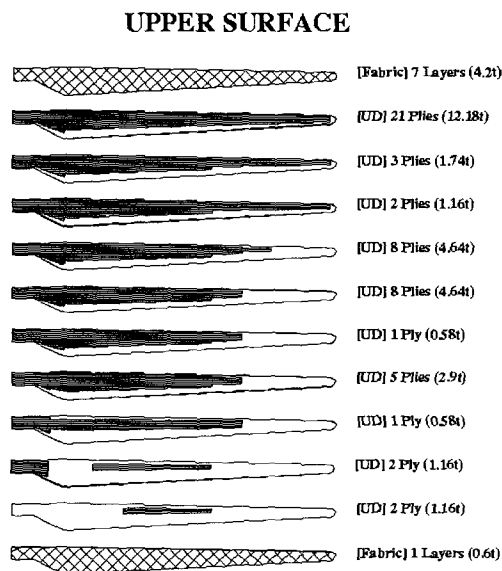


Fig. 2 Lay-up sequence for the skin and the spar flange of upper blade part

LOWER SURFACE

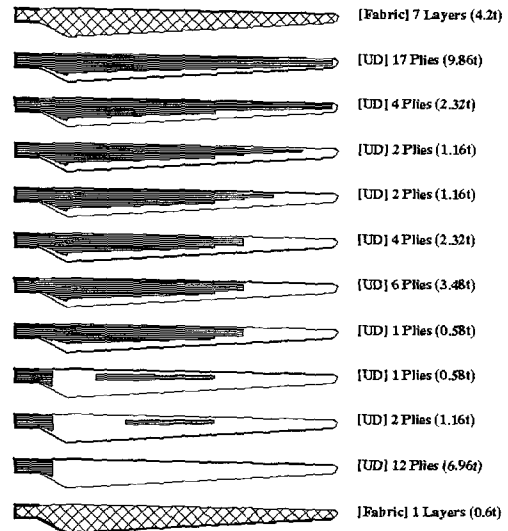


Fig. 3 Lay-up sequence for the skin and the spar flange of lower blade part

Table 1 Results of linear static stress analysis for the rotor blade

Analysis Result		Load Case			
		Case1	Case2	Case3	Case4
Max. Stress [MPa]	Skin	-16.42	-22.64	-23.85	-14.56
	Spar	18.20	24.36	26.98	14.74
		-53.03	-74.91	-82.12	-39.66
		73.56	97.62	105.3	63.11
Max. displacement at tip (m)		1.21	1.639	1.771	1.025
Clearance from tower		69%	57%	55%	74%
Tsai-Wu Failure Criteria (S.F.)		4.56	3.44	3.04	7.12
Max. Stress Failure Criteria (S.F.)	Sxx	8.55	6.43	5.98	10.14
	Syy	4.96	3.87	3.41	8.23
	Sxy	78.43	58.75	49.85	67.75
Strain [με]	Tens.	2345	3120	3355	1976
	Comp.	1633	2274	2474	1293

예비설계를 통해 스파의 두께를 각 단계별로 조절하여 경량화를 꾀하였으며 레이업 패턴은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

해석 및 안전율의 확인은 유한요소 프로그램을 사용하였으며 기본적인 해석결과를 Table 1에 나타내었다. 최대 하중에서 3이상의 안전율이 확보되었으며 GL에서 제시하는 변형율도 만족하였다. 좌굴에 대해서도 3.43이상의 안전율을 가짐을 확인하였으며, 첫 번째 Flapwise 고유진동수는 1.856Hz로 운용범위 내에서 공진이 일어나지 않음을 확인하였다.^{[5][6][7]}

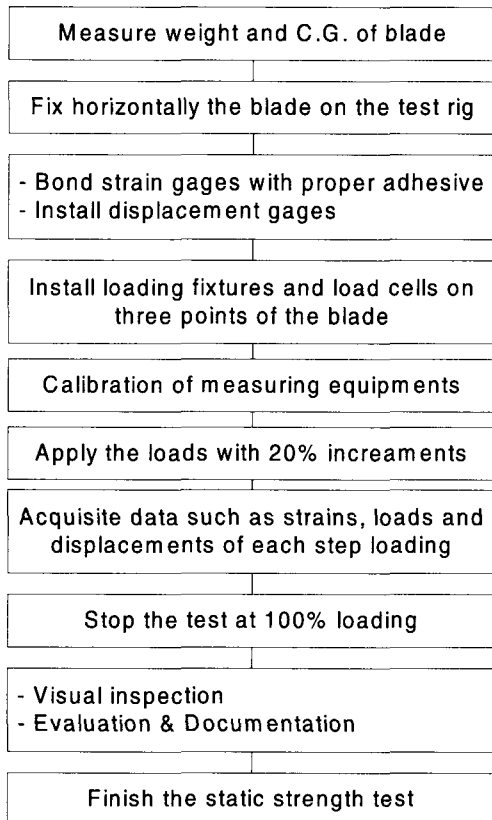


Fig. 4 Test procedure for the static strength test

3. 구조시험 절차

본 연구에서의 구조시험은 전술한 바와 같이 회전날개의 전기 정적강도시험으로 진행되었으며 이에 대한 시험 절차를 Fig.4에 나타내었다.

4. 시험 장비 및 치구

시험 시 측정값은 회전날개의 전체 무게 및 무게중심, 그리고 회전날개에 작용하는 하중과 그에 따른 변형량, 처짐량 등이다. 이러한 데이터를 측정하기 위해 사용된 장비들을 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Measuring sensor and test equipments for the static strength test

Name of sensor or equipment	Type & specification
Strain gage	CEA-00-250UW-120, 30 ea
Load cell	5000-DSCK, 5tonf, 3ea
Displacement transducer	PT101-0100, 5ea
Data acquisition system	system 4000, AI1600 40 channels

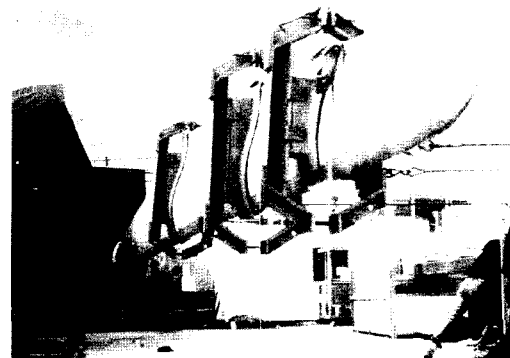


Fig. 5 Show loading view by the three loading fixture

Fig. 5는 회전날개에 하중을 작용시키기 위한 치구로서 세 점의 하중을 동시에 가할 수 있도록 하였고, Fig. 6은 회전날개를 고정하기 위해 제작된 치구이다.

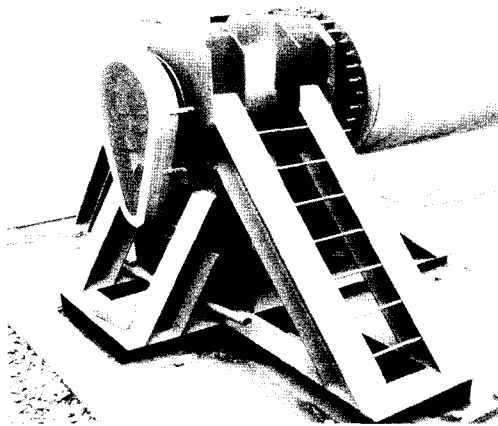


Fig. 6 Test rig for structural test

5. 시험 하중

정적 강도 시험에 이어서 품질보증 전기 구조 시험을 수행하여야 하므로 시험 하중은 Case 1 하중을 사용하였다.⁶⁾ 각각의 하중 작용점에 대한 하중의 크기는 이들의 합성 모멘트가 Fig. 7과 같이 공력하중의 모멘트 선도와 일치하도록 결정하였다. 각각의 하중 작용점 위치와 하중의 크기를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Load values and loading points for the static strength test with case 1 load.

Loading points(m)	17.1	20.6	21.85
Loads(KN)	27.44	17.64	9.8
Measuring range for strain gages	4m ~ 15m		

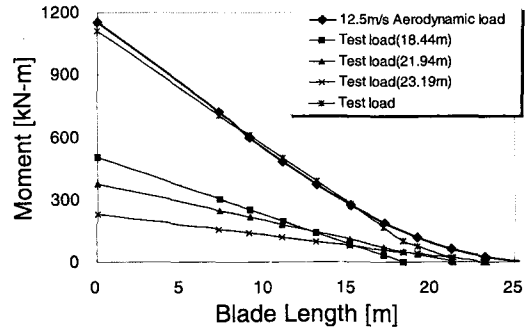


Fig. 7 Simulated flapwise bending moment distribution from the load case 1.

6. 시험

단계적으로 시험 하중의 20%씩 증가시키면서 회전날개의 각 부분에 대해 국부적인 파괴 유무, 좌굴 발생 유무, 접착부위의 파괴 및 층간 분리 현상의 유무 등을 확인하였다. 먼저 회전날개의 무게와 무게중심의 위치를 측정 한 결과 측정값이 다소 높게 측정 되었으나 무게의 경우 3%미만으로 잘 일치함을 확인하였다. Table 4에 예측치와 측정치를 비교하였다.

Table 4 Measured and predicted structural blade performance

	Mass of blade	Center of mass
Measured	2.95 ton	8.451 m
Predicted	2.883 ton	8.786 m
error	2.27%	3.81%

대형 구조물에서 나타날 수 있는 대변형에 의한 비선형성을 확인하기 위해 하중의 크기변화에 따른 처짐량을 Fig. 8과 같이 나타내었다. 회전날개 팁에서의 처짐은 예측치보다 16%정도 크게 측정되었으며 100%하중에서 약간의 비선형성이 보이지만 전체적으로 선형적인 경향을 나타냄을 확인하였다.

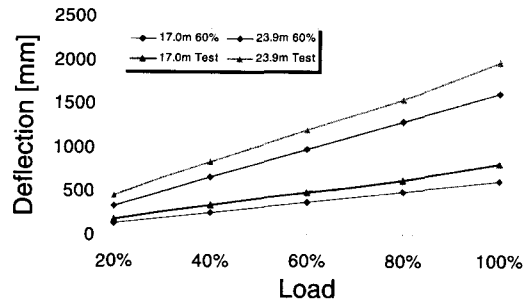


Fig. 8 Comparison between measured and predicted deflections along the blade at maximum load

변형량의 경우 측정값의 오차를 줄이기 위하여 측정 부분에 4개의 일축 스트레인 게이지와 한 개의 로켓을 부착하여 측정된 값을 평균하였다. 측정값과 예측값을 비교하여 본 결과 100% 하중에 대하여 10%미만의 오차를 나타냄을 확인하였다. Fig. 9에 측정치와 예측치의 변형량을 하중증가에 따라 비교하였다.

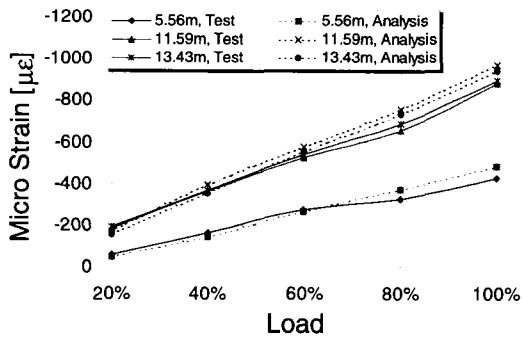


Fig. 9 Comparison between measured and predicted strain results for the blade

7. 결과 고찰

최대하중 까지 적용하여 시험 한 결과 회전날개에는 아무런 파괴가 일어나지 않음을 확인하였다. 그러나 처짐량에 있어서 측정치와 예측치

의 차이가 있음을 확인하였는데 이러한 차이는 여러 가지 원인이 있겠지만 가장 큰 원인으로서는 물성치의 변화라 할 수 있다. 특히 복합재료를 사용하는 구조물의 경우 섬유가 차지하는 양에 따라서 물성치의 값이 변하므로 설계와 일치하는 강도를 가지는 구조물을 제작하기 위해서는 이를 정확히 조절하여 하여야 한다. 본 연구에서는 60%의 섬유 함유량을 갖는 시편을 제작하고 이를 시험하여 물성치를 구하였다. 그러나 실제 회전날개의 제작은 시편제작과는 제작방법이나 환경 등이 다르기 때문에 섬유함유량이 시편보다 낮게 제작 되는 것이 일반적이다. 이러한 섬유 함유량의 차이는 섬유방향의 탄성계수, 인장 및 압축강도에 영향을 주게 되며 섬유함유량의 변화에 따른 물성치의 변화는 다음 식으로부터 구할 수 있다.^{[8][9]}

$$r_f = \frac{V_{fa}}{V_{fr}} \quad (1)$$

여기서 V_{fr} 은 기준 섬유함유량(60%)이고 V_{fa} 는 제작된 회전날개의 섬유함유량이다. 실제 제작된 회전날개의 섬유함유량을 계산하고 해석을 다시 수행하여 이론치와 측정치를 비교한 결과를 Fig. 10에 도시하였으며, 100%하중에서 3%미만의 오차율로서 잘 일치함을 확인하였다.

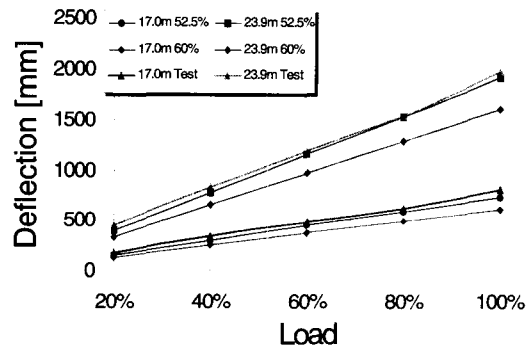


Fig. 10 Comparison between measured and predicted deflections along the blade at maximum load

8. 결론

본 연구에서는 풍력발전기용 대형 복합재 회전날개를 설계, 제작하고 정적강도시험을 수행하였다. 회전날개는 유한요소 해석을 통해 충분한 안전율을 가지며, 운용 범위 내에서 공진 및 좌굴이 발생하지 않도록 설계되었다. 설계된 회전날개를 실제 제작하고 정적구조시험을 수행하였다. 이를 통해 회전날개 구조적 안전성을 확인하고, 유한요소 해석을 통해 예측된 값과 시험 측정값의 비교를 통해 유한요소 해석을 이용한 설계방법에 대한 신뢰성을 확인하였다.

9. 후 기

본 논문은 (주)한국화이바의 위탁연구과제인 "대용량 풍력발전 시스템용 복합재 회전날개의 공력 및 구조설계에 관한 연구"에 대한 내용의 일부이며, 2001년 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Robert T. Reese., "Handbook on structural testing", SEM co., 1992.
2. Habali S. M., Saleh I. A., "Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastic", Energy Conversion & Management, Vol. 41, 2000.
3. Johansen B. S., Lilholt H. and Lystrup A., "Wingblades of glass fiber reinforced polyester for a 630kW wind turbine", International Conference on Composite Materials, 1980.
4. Rayner M. Mayer, "Design composite structures against fatigue", MEP co., 1996.
5. Bechly M. E., Clausent P. D., "Structural design of a composite wind turbine blade using finite element analysis", Computer & Structures, Vol.63, No.3, 1997.
6. Kong C. D., Kim J. S., "Structural design of medium scale composite wind turbine blade", KSAS International Journal, Vol. 1, 2000.
7. Germanischer Lloyd, "Regulations for the certification of wind energy conversion system", 1999.
8. Nawang R., Danjaji I. D., and Ismail H., "Mechanical properties of sago starch-filled linear low density polyethylene composites", Polymer Testing, Vol. 20, 2001.
9. Mallick P. K., "Fiber-reinforced composites", Marcel Dekker Inc., pp. 80-84, 1993.