

750kW급 수평축 풍력발전용 복합재 회전날개의 구조 시험을 통한 설계개선에 관한 연구

공 창 덕* · 정 종 철*

Improvement of Design by Structural Test for 750kW HAWT Composite Blade

C. D. Kong* · J. C. Jeong*

ABSTRACT

In this study, the 750kW scale composite blade for the horizontal axis wind turbine system was designed and manufactured, and it was tested and evaluated by the specific structural test rig. In the test, it was found that local bucklings at the trailing edge of the blade and excessive deflections at the blade tip were happened. In order to solve these problems, the design of blade structure was modified. After improving the design, the abrupt change of deflection at the blade tip was reduced by smooth variation of the spar thickness and the local buckling was removed by extending the web length. The modified design was analyzed by the FEM, the safety and stability of the blade structure.

초 록

본 연구에서는 750kW급 수평축 풍력발전용 복합재 회전날개를 설계, 제작하여 구조시험을 수행하였다. 시험시 발생된 후연부위의 국부좌굴과 날개 끝 부위에서 과도하게 증가하는 처짐문제를 해결하기 위하여 개선설계를 수행하였다. 설계개선 내용으로는 스파의 두께를 점차적으로 변화시켜 과도한 처짐을 감소시켰으며, 웨브의 길이를 연장하여 국부좌굴현상을 방지하도록 하였다. 개선설계결과는 유한요소해석을 수행하였으며 회전날개 구조의 안전성 및 안정성이 확인되었다.

1. 서 론

풍력발전 시스템에는 크게 수평축풍력터빈과 수직축풍력터빈으로 구별되며 이중 성능 및 구조적 효율

성으로 인해 수평축 형태가 많이 쓰인다.^[1] 풍력터빈의 구성품중 회전날개는 풍력을 기계적 힘으로 변화시키는 부분으로, 동적인 균형 및 피로효과를 최소로 하기위해 보통 3개의 회전날개를 사용하며, 대

*조선대학교 항공우주공학과(Chosun University, Dept. of Aerospace Engineering)

형화 함에 따른 구조적 강도, 강성, 및 피로수명의 만족과 경제성을 위해 복합재료를 이용하여 경량화 하는 것이 일반적이다. 회전날개에 사용되는 복합재료는 E-glass/Epoxy, E-glass/Polyester, S-glass/resin, Kelvar/resin, Graphite or Carbon/Epoxy 및 Wood/Epoxy등이 최근 많이 사용되고 있는데 이중 Carbon/Epoxy는 높은 비강도와 비강성 및 긴 수명을 가진 고가이기 때문에 경제적이면서 성능 또한 우수한 E-glass/resin이 일반적으로 많이 사용되고 있다.^[2] 회전날개의 공력형상은 종래의 NACA 4xxx계열로부터 최근 NACA 65-xxx, NACA 63-xxx등이 사용되고 있으며, 외형은 뿌리에서 끝까지 테이퍼져 있는 것이 일반적이다. 구조적 형상은 셸-스파로 이루어진 상자형 형식이 일반적이며, 로타 허브에 연결하는 부위는 높은 하중에 견딜수 있도록 프렌지 방식, T볼트 방식, 삽입볼트 연결방식등이 사용된다.^[3] 회전날개의 설계절차는 설계/제작회사에 따라 약간씩 차이는 있지만 공력형상을 결정하고 이를 구조설계하여 동/정적하중해석을 하고, 정적응력해석을 통해 구조강도를 확보하며 랜덤하중 스펙트럼으로부터 피로수명을 예측하고, 공진을 방지 하기위한 모달해석을 하는 순으로 진행된다. 구조적 하중계산으로는 개발 초기 준-정적공력하중 계산방법으로부터 1983년 A. D. Garrad의 동적모델링 기법 적용, 1986년 Shirketal의 Aeroelastic Tailoring을 이용한 로타 블레이드 개발, 1989년 O.A.Bauchau의 유한요소법의 이용등을 거쳐 최근 VESTAS사, Wind Energy Group사, Enercon사, Zone사 Bonus사등 많은 회사에서 나름대로의 구조설계절차를 개발 확립하여 실용화하고 있다.^{[4][5]}

본 연구에서의 750kW급 풍력발전용 회전날개는 국내업체에서 제조되며 그 물성이 입증된 E-glass/Epoxy를 이용하였으며, 익형은 시동성능 및 공력성능이 양호한 NACA 63-218을 사용하였고, 구조 형상은 스킨-스파-폼의 샌드위치 구조를 이용한 상자형 단면이며 로타허브 연결부위는 경량화를 위해 삽입볼트 연결방식을 채택하였다. 1차 설계단계에서는 준 정적 극한하중 및 관성하중을 계산한 다음 기본 구조강도를 만족하는 구조적 치수를 결정하여, 유한요소법을 이용 적절한 변형량과 비틀림각을 해석하

여 설계요구조건의 적합여부를 확인하였으며, 모달 해석을 통해 회전날개의 고유진동수와 진동모우드를 구하여 공진여부를 검토하였다. 이 결과로부터 실제 회전날개를 제작하여 구조시험을 수행하였고, 구조 시험시 나타난 국부좌굴, 접착면의 분리, 날개끝의 과도한 처짐등의 문제점을 보완한 개선설계가 수행되었다.

2. 설계절차 및 공력설계결과

회전날개의 설계란 공력성능, 구조강도 및 경제성에 관한 설계요구조건을 만족하는 회전날개의 형상, 구조형식, 사용재료 등을 결정하는 일을 말한다. 설계절차는 Fig. 1의 흐름도와 같다. 먼저 풍력발전시스템이 운용되어질 곳의 풍황조건과 요구되는 출력으로부터 회전날개의 직경, 에어포일의 형상, 비틀림 각, 깃끝 속도 비등을 구하고 이를 이용하여 공력형상 설계를 한다.^[1] 공력형상 설계결과는 성능해석프로그램을 이용하여 요구조건을 만족하는지 검토하였다. 설계된 공력형상으로부터 여러 가지 운용조

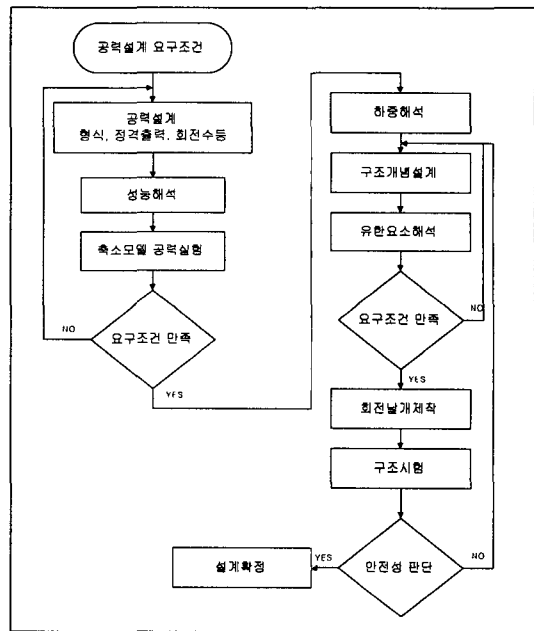


Fig. 1. Flow chart for blade design

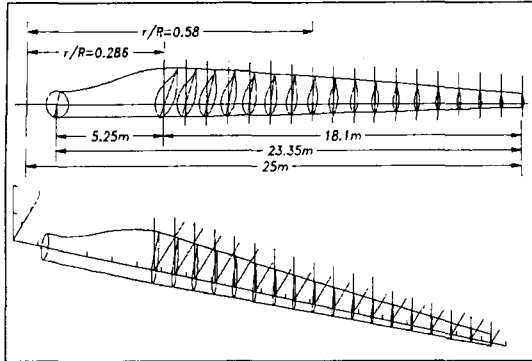


Fig. 2. Result of Aerodynamic Design

Table. 1. Specification of HAWTS

Rated Power	750kW
Cut-In Wind Speed	3.0m/s
Rated Wind Speed	12.5m/s
Cut-Out Wind Speed	25m/s
Rotor Speed	15-35RPM
Number of Blades	3 Blades
Blades Length	23.3m
Airfoil	NACA 63-218

전에 따른 공력하중을 계산하고 이 하중에 충분히 견디고 안전하게 운용되어질 수 있도록 구조설계를 수행하였다. 구조설계결과는 여러 가지 해석을 통해 타당성 여부를 검토하였다.

공력형상 설계는 정격회전수, 정격풍속, 정격출력, 시동풍속, 설계 최대풍속 등을 Strip 이론에 적용하여 날개의 수, 익형, 두께, 시위길이, 비틀림 각 분포, 직경 등을 결정하여 설계하였다.^[6] 공력형상 설계를 위한 풍력발전기의 제원은 Table. 1과 같고 공력형상 설계결과는 Fig. 2와 같다.

3. 구조설계 및 해석

구조설계의 요구조건은 최소한의 무게로 공력형상 설계결과를 유지하면서 작용되어지는 모든 하중에 견디는 것이다.

3.1 하중 해석

풍력발전 시스템에 작용하는 하중은 공력하중, 회전날개의 무게와 움직임등에 의한 하중, 적설에 의한 하중 그리고 회전중 원심력에 의한 하중등으로 나눌 수 있다.^[7] 이들 하중들은 서로 연계되어 작용하기 때문에 해석함에 있어서 상당한 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 회전날개에 주로 작용하는 공력하중을 중심으로 해석하였다. 고려된 풍속은 12.5m/s, 20m/s, 25m/s 등이며 돌풍조건을 추가로 고려하였다. 그리고 정지상태에서 고려한 풍속으로는 190년만에 한번 일어날 수 있는 풍속인 55m/s를 고려하였다.^[8] Table. 2에 풍속 20m/s에서의 하중해석결과를 나타내었다.

Table. 2. Result of load analysis for 20m/s wind speed

Station	FN[KN] (Nomal Force at Chord)	FT[KN] (Tangential Force at Chord)	MN[KNm] (Flapwise Bending Moment)	MT[KNm] (Chordwise Bending Moment)
1.00	8.148	1.460	16.297	2.919
0.92	9.800	1.778	52.195	9.396
0.84	10.765	1.982	109.624	19.838
0.76	11.233	2.063	189.477	34.406
0.68	11.108	2.067	291.546	53.110
0.60	10.520	1.952	414.655	75.719
0.52	9.606	1.801	556.976	101.930
0.44	8.455	1.578	716.207	131.298
0.36	7.030	1.326	889.499	163.319
0.29	5.751	1.069	1074.296	197.478

3.2 날개단면의 기본구조

앞서 설명한 여러 가지 하중들은 회전날개에 굽힘 하중, 비틀림 하중 그리고 전단력의 형태로 작용하게 된다. 따라서 날개단면의 기본구조는 Fig. 3과 같이 상자형으로 하여 일방향 섬유(UD)로 제작되는 스파에서는 주로 굽힘하중을, 웹브로 이루어진 상자형 단면과 Angle ply($\pm 45^\circ$)로 제작되는 스킨에서는 주로 비틀림 하중을 그리고 웹브에서는 주로 전

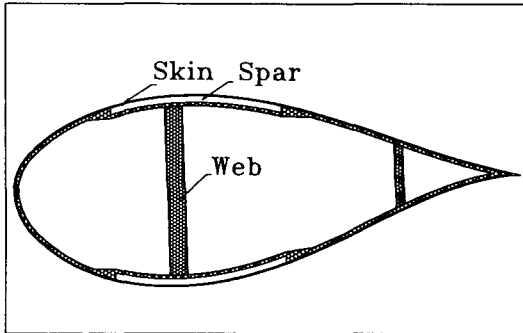


Fig. 3 Sectional configuration

Table. 3. Material property

	Fabric	UD	Foam
Density (kg/m ³)	1750	1850	52.06
Ex[GPa]	24.8	31	0.07
Ey[GPa]	11	11	0.07
G[GPa]	4.14	4.14	0.019
Poisson's Ratio	0.27	0.27	0.2
Fxc[MPa]	174.6	620	0.896
Fxt[MPa]	313.7	777.8	1.896
Fyc[MPa]	138	138	0.896
Fyt[MPa]	31	31	1.896
Fs[GPa]	7.17	7.17	0.0008
Thickness [mm/ply]	0.445	0.49	12.5

단력을 받도록 설계하였다. 또한 굽힘 하중에 의한 좌굴 현상을 방지하고자 후연 부근에 웨브를 추가하였다. 본 연구에서 사용된 재료의 물성치는 Table. 3에 나타내었다.

3.3 날개허브부분

복합재료로 이루어진 회전날개와 강철로 이루어진 로터허브와의 효율적인 연결을 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있다. 그중 수평축 풍력발전기에 주로 쓰이는 것으로는 플렌지 볼트 연결형, T 볼트 연결형 등이 있다.^{[9],[10]} 본 연구에서는 경량화를 위해 특

별히 고안하여 부품시험을 통해 안전함을 확인한 삽입볼트 연결방식을 사용하였다.

3.4 유한요소해석결과

설계된 회전날개를 Fig. 4와 같이 모델링 하여 앞서구한 하중들을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석코드는 상용 유한요소 해석코드인 NISA II를 사용하였으며 해석내용으로는 선형정적해석, 고유치 해석, 주로 하중을 받는 부재인 스파의 좌굴 해석을 하였다. 해석결과 전체 무게는 2.63ton이다. 응력분포는 스파 끝단부에서 응력집중 현상이 나타나며 이 부분의 스킨에 최대응력 63.5Mpa이 걸

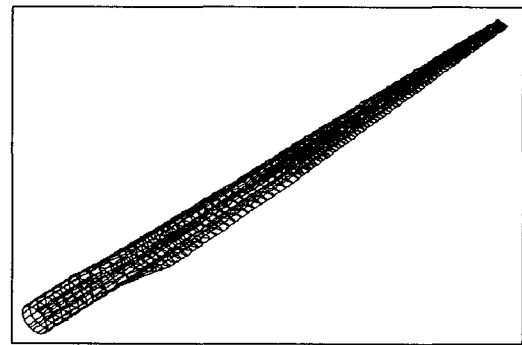


Fig. 4 Mesh generation of the blade

Table. 4. Result of FEM analysis for first structural design

Weight [ton]		2.63	
Max. Stress [MPa]	12.5m/s	39	
	20m/s	63.5	
	55m/s	127	
Max. Displacement [m]	12.5m/s	1.089	
	20m/s	1.685	
	55m/s	3.318	
Eigen Value [Hz]	Flap Mode	1th	2.25
		2nd	8.24
	Lead-Lag Mode	1th	2.32
		2nd	5.47

린다. Tsai -Wu 이론에 의한 안전율은 3.5이상으로 안전함을 확인하였다.^[11] 스파의 좌굴해석결과 $0.5r/R \sim 0.7r/R$ 사이의 후연쪽에서 좌굴이 발생하지만 좌굴안전계수는 10 이상으로 안전함을 확인하였다. 후방웨브가 없는 후연부분의 스킨에 대한 좌굴해석은 촉박한 연구일정으로 인해 수행되지 못하였다. Table. 4에 해석결과를 정리하였다.

4. 구조 시험

회전날개의 내부분으로 나누어 제작하였다. 길이가 긴 상면부, 하면부 그리고 웨브는 이에맞는 크기의 오토클레이브가 없기 때문에 섬유를 깔고 그 위에 수지를 함침하여 적층하는 Hand Lay-up 방식으로 제작하였는데, 앞서 언급한 대로 길이가 길어 단번에 적층 할 수가 없었고 수지의 함침도중 경화가 진행되는 문제점이 있었다. 로타허브 부분은 오토클레이브에서 제작하였다. 제작된 각 부분의 조립은 하면부에 웨브와 로타허브를 고정하고 여기에 상면부를 올려 접착하는 방법으로 하였으며 상면부와 하면부의 접착부분에는 강도확보를 위해 패치를 덧 붙여 접착면적을 늘렸다.

제작된 회전날개를 Fig. 5와 같은 치구에 장착하여 20.2m와 17.6m에서 하중을 가하여 변형량과 처짐량을 측정하였다. 변형측정장치는 CAS사의 AI 1600을 사용하였으며 4개의 변위 게이지와 22개의 스트레인 게이지 그리고 한 개의 로드셀을 사용하였다. 적용하중은 풍속 20m/s에서의 하중해석결과를 바탕으로 하였으며 이를 9.8kN 간격으로 하중을 적용한 유한요소해석 결과와 비교하였다. 비교결과 Table. 5와 같이 해석값과 시험값은 전체적으로 비슷한 경향을 보이거나 해석값이 10%정도 큰 값을 갖는다. 하중은 Fig. 6과 같이 회전날개의 20.2m와 17.6m에 집중하중으로 작용하였다. 20.2m 지점에 하중을 작용하였을 경우 25.48kN 근방에서 접착부위의 분리가 발생하여 시험을 중단하였고 17.6m의 경우에는 49kN 하중에서 $0.65r/R$ 부근의 후연부분에 국부좌굴이 발생하여 더 이상의 하중증가는 어려웠다. Fig. 7에 시간에 따라 작용되어진 하중의 크기를 나타내었다. 회전날개의 처짐 형태는 Fig. 8과

Table. 5. Comparison between analysis and test results

Load [kN]		Measurement Position (from Root)	
		6.0	10.0
9.8	Analysis	3.25	3.93
	Test	3.07	3.65
19.6	Analysis	6.3	7.77
	Test	5.77	7.27
29.4	Analysis	9.76	11.6
	Test	8.37	10.53
39.2	Analysis	13.02	15.6
	Test	12.06	14.28

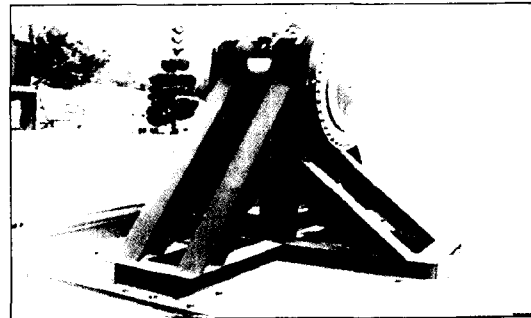


Fig. 5. Test rig for blade structural testing

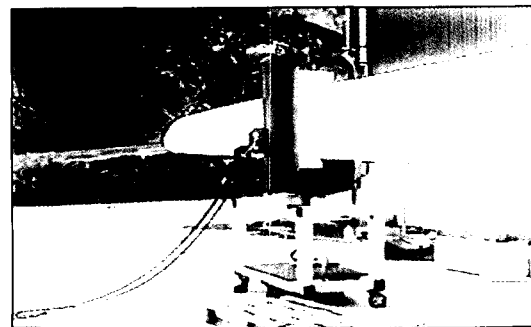


Fig. 6. Loaded configuration by chain block

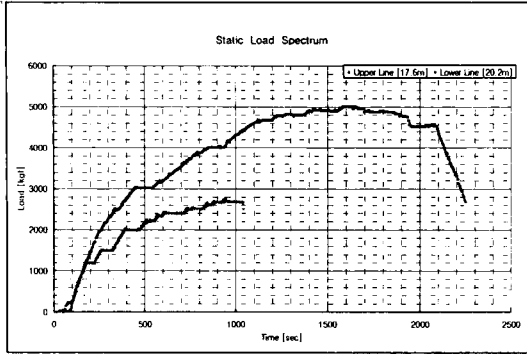


Fig. 7. Load spectrum for structural test



Fig. 8. Deformed shape of the blade under testing

같고 41.16kN이 작용할 때 1.74m 처짐량을 나타냈다.

구조시험 결과 발생한 주요 문제점은 다음과 같다. 먼저 제작된 회전날개의 무게가 3.2ton으로 설계무게보다 0.4ton정도 무겁다. 이는 회전날개의 상면부와 하면부를 접착함에 있어서 접착면적을 늘려 강도를 확보하기 위해 패치를 덧붙인 것이 무게증가의 주요 원인으로 판단된다. 다음으로 스파가 끝나는 부근의 응력 집중이 원인으로 판단되는 갑작스런 처짐형태이다. 이러한 과도한 처짐은 공력성능에 상당한 영향을 주기 때문에 개선설계시 고려되어야 한다. 또한 0.65r/R 부근의 후연부분에서 국부좌굴이 발생하였다.

5. 설계 개선 방안

5.1 개선설계

앞서 설명한 문제점중 과도한 처짐과 국부좌굴 문

제점을 중심으로 설계개선을 수행하였다. 처짐의 원인으로 판단되는 응력집중의 해결은 Spar의 과도한 두께변화를 줄이도록 적층방법을 개선하는 것으로 시도 하였고 이에대한 설계결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 국부 좌굴을 방지하기 위해 전연부분에 UD 1ply를 추가로 적층 하였으며 후방 웨브를 0.678r/R까지 연장하였다. Fig. 11은 로타허브와 회전날개의 접합부분으로 접착제와 전단핀을 사용하여 안전성을 확보하였다.^[12]

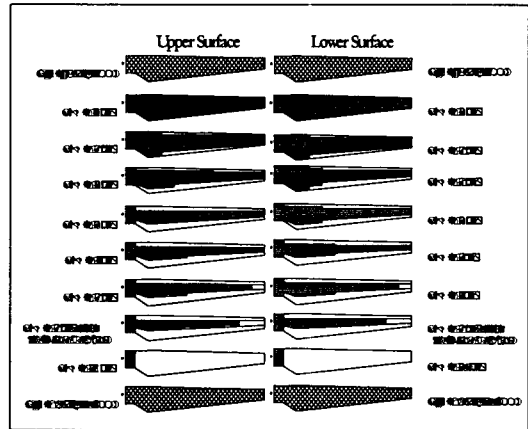


Fig. 9. Lay-up sequence

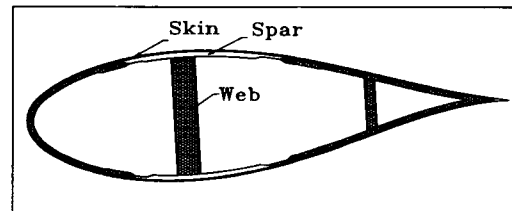


Fig. 10. Sectional configuration by modified design

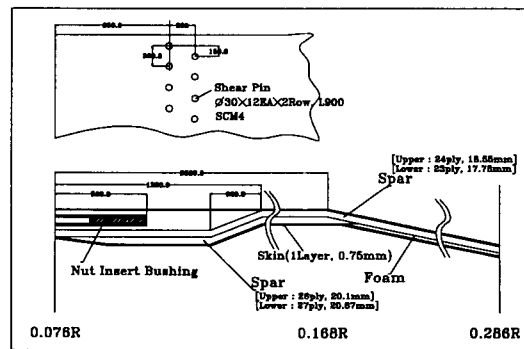


Fig. 11. Hub configuration of the blade

5.2. 개조설계에 대한 구조 해석

해석결과 전체 무게는 0.3ton정도 감소하였다. 응력의 크기는 전체적으로 다소 증가하였으나, 문제시 되었던 응력집중부분을 제거함에 따라 최대응력이 걸리는 부분이 0.286r/R 부근으로 옮겨지면서 이 부분의 스파에 최대응력이 걸리게 되었다. 기존설계에서는 스킨에 최대응력이 걸렸지만 개조설계에서는 스파에 걸리게 되어 응력이 다소 증가하였다 하더라도 안전율은 9이상으로 훨씬 안전한 구조임을 확인하였다. 처짐량은 기존설계에 비해 10%정도 증가하였으나 공력성능에 영향을 줄 수 있는 급격한 처짐 형태를 완만한 형태의 처짐으로 바꾸어 결과적으로 더 효율적인 설계임을 확인하였다. 스파의 좌굴해석 결과 0.286r/R부근에서 좌굴이 일어나며 안전율은 3 이상임을 확인하였고 후연에서의 좌굴해석결과는 안전율 2이상으로 좌굴에 대해 안전함을 확인하였다. 고유진동수 해석결과 개조설계는 좀더 유연한 구조로서 기존설계보다 15%정도 낮은 고유진동수를 가지며 운용중의 공진은 일으키지 않음을 확인하였다. 위의 해석결과는 Table. 6에 정리하였다.

Table. 6. Result of FEM analysis for modified design

Weight [ton]		2.36	
Max. Stress [MPa]	12.5m/s	44.9	
	20m/s	72.2	
	55m/s	144	
Max. Displacement [m]	12.5m/s	1.2	
	20m/s	1.834	
	20m/s	3.387	
Eigen Value [Hz]	Flap Mode	1th	1.89
		2nd	5.43
	Lead-Lag Mode	1th	2.33
		2nd	7.5

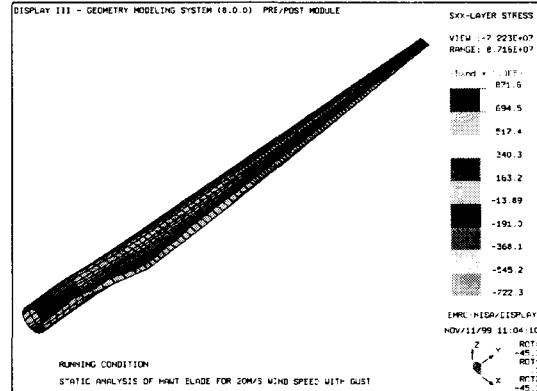


Fig. 12. Stress distribution at 20m/s wind speed

6. 결 론

본 연구에서는 750kW급 풍력발전용 복합재 회전날개를 제작하여 구조시험을 수행하였고 시험 시 발생한 문제점을 파악하여 이를 해결하기 위한 설계개선을 수행하였다.

개조설계결과로는 전체무게를 감소하였고, 스파의 적층방법 개선을 통해 응력집중 부분을 제거하여 회전날개의 안전율을 높이고 급격히 변하는 과도한 처짐 형태를 완만한 형태로 바꾸어 공력성능 및 효율성을 높였으며, 웨브의 길이를 연장하여 후연부분의 좌굴을 방지하였고, 로타허브 연결부분과 회전날개의 접착부위에 전단판을 사용하여 안전성을 확보하였다.

참 고 문 헌

1. D. A. Spera, "Wind Turbine Technology" ASME Press., 1994.
2. G. E. Dieter, "Assessment of research needs for wind turbine rotor materials technology", National academy press., 1991
3. Garad.A.D. "Dynamics of wind turbine", IEEE Vol. 130, 1983.
4. H. Snel, "Program for HAWT analysis and simulation", 12th ASME Wind Energy

- Symposium.
5. A.D.Wright, "The use of ADAMS to model the AWT-26 prototype", 1994
 6. Gourieres, "Wind Power Plants" Pergamon Press., 1982.
 7. D. M. Eggleston, "Wind Turbine Engineering Design", 1987.
 8. Thom, H.C.S., "New distributions of extreme winds in the united states", ASCE structural division, No. 6038.
 9. S.W.Tsai and H.T.Hahn, "Failure analysis of composite materials, inelastic behavior of composite materials", ASME New York, pp73, 1975.
 10. HALD,H., and KENSCH, "Development and test of a light weight GRP rotor blade", Proceedings Wind Power '85., 1985.
 11. R. M. Mayer, "Design of Composite Structures Against Fatigue", 1996.
 12. 공창덕 외, "대용량 풍력발전 시스템용 수평축 복합재 풍력터빈 날개의 공력 및 구조설계에 관한 연구", 3차년도 중간보고서, 1999.