[2008-09-WD-005]

풍력발전기용 복합재 블레이드의 구조 해석 및 인증시험

박선호*, 한경섭**

Structural Analysis and Proof Test of Composite Rotor Blades for Wind Turbine

Sunho Park* and Kyungseop Han

Abstract GFRP based composite rotor blades were developed for 750 kW & 2 MW wind turbines. The blade sectional geometry was designed to have a general shell-spar and shear web structure. For verifying the structural safety under all relevant extreme loads specified in the GL guidelines, the structural analysis of the rotor blades was performed using commercial FEM codes. The static load carrying capacity, blade tip deflections and natural frequencies were evaluated to satisfy the strength and stability requirements. Full-scale proof tests of rotor blades were carried out with optical fiber sensors for real-time condition monitoring. Finally, the prototype of each rotor blade passed all proof tests for GL certification.

Key words Composite rotor blade(복합재 로터 블레이드), Structural Analysis(구조해석), FEM(유한요소법), Optical fiber sensor(광섬유센서), GFRP(유리섬유복합재료)

(접수일 2008. 9. 3, 수정일 2008. 9. 11, 게재확정일 2008. 9. 12)

* 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : suno@postech.ac.kr Tel : (054)279-8216 Fax : (054)279-5209

** 포항공과대학교 풍력특성화대학원
E-mail : kshan@postech.ac.kr Tel : (054)279-2163 Fax : (054)279-5209

1. 서 론

대형 풍력발전기용 블레이드는 경량화가 절실히 요구되므로 복합재료가 구조재료로 주로 사용되고 있다. 로터 블레이드에는 나무 복합재(wood composites), 유리섬유 복합재(glass fiber reinforced plastics), 탄소섬유 복합재(carbon fiber reinforced plastics) 가 주로 사용된다. 나무 복합재는 소형 풍력블레이드에 주로 사용되며, 탄소섬유 복합재는 우수한 물성을 갖고 있으므로 대형화, 경량화에 가장 적합한 재료이나 높은 가격으로 인해 수 MW 이상의 블레이드에 유리섬유 복합재료와 같이 조합하여 제한적으로 사용되고 있다. 현재는 유리섬유 복합재를 사용한 블레이드가 가장 일반적인 추세이다. 풍력 블레이드의 구조는 초기에 항공기용 날개에 사용된 구조를 차용하여 사용했으나, 현재는 표피(skin)—스파(spar)—웹(web) 구조가 가장 일반적이다.

풍력발전용 블레이드의 수명은 통상 20년 정도이고 회전

중에는 원심력 및 바람의 항력(drag)이 작용하므로 풍속에 따른 지속적인 정하중이 작용하게 된다. 또한 블레이드는 굽힘성이 있으므로 풍속의 변화와 요잉(yawing) 등의 움직임에 따라 진동이 발생하게 되고 이 진동은 블레이드의 고유진동수에 따라 진폭이 감쇄되거나 증폭되게 된다. 따라서 블레이드의 구조적 안정성을 확인하기 위해서는 정하중 특성과 동특성을 고려한 구조 해석이 필요하다.[1]

본 연구에서는 750kW 및 2MW급 유리섬유 복합재 블레이드의 구조 해석을 위해, 상용유한요소 패키지(I-DEAS & ABAQUS)를 사용하여 극한 하중에 대한 응력해석과 고유진동수해석을 수행하였다. 아울러, 블레이드의 구조적 안정성을 증명하기 위한 구조 인증시험을 시행하였으며, 이 때 광섬유 센서의 일종인 FBG(Fiber Bragg Grating)센서를 삽입하여 구조시험 동안의 블레이드 상태를 모니터링 하였다.

2. 블레이드

2.1 구조 및 재료

전형적인 풍력발전용 로터 블레이드의 기본 단면 구조는 Fig. 1과 같이 표피(skin), 스파(spar), 웹(web)으로 이루어져 있다. 표피는 전체 공력형상을 유지하며 비틀림과 전단력을 받는다. 표피는 2축 또는 3축 유리 직조섬유(biaxial or triaxial glass fabric)와 코어재(core material)로 이루어진 샌드위치 구조(sandwich structure)를 갖는다. 코어재는 가벼우면서도 좌굴현상을 방지하도록 적용되었으며, PVC 또는 PUR 폼(foam), 발사나무(Balsa wood)가 사용되었다. 스파는 대부분의 굽힘 하중을 받기 때문에 두꺼운 일 방향 유리 직조섬유(unidirectional glass fabric)를 사용하였으며, 전단력을 받는 웹은 2축 유리 직조섬유와 코어재로 이루어진 샌드위치 구조를 갖는다. 허브와 블레이드를 연결하는 루트(root) 부분은 가장 큰 응력이 가해지는 부분으로 100~150mm의 적층 두께를 가진다. 750kW 블레이드는 프리프레그(prepreg) 적층 방식으로, 2MW 블레이드는 RIM(resin injection molding) 공법으로 제작되었다.

3. 구조 해석

3.1 유한요소 모델

유한요소 프로그램은 모델링에 I-DEAS, 해석에 ABAQUS를 사용하였다. 유한요소 해석에 사용된 물성은 Table 1과 같으며, Fig. 2는 3차원 블레이드 유한요소 모델을 나타낸다. 블레이드에 두께 분포를 주기 위해, 길이 방향으로 200개 이상의 S4 쉘 요소(shell element) 그룹으로 나눠지며, 코드(chord)방향으로 6개의 요소 그룹으로 나눠진다. 특히, 2MW 로터 블레이드는 타워(tower)와 블레이드 끝단(tip)과의 충분한 공간을 확보하기 위해 굽어진(pre-bended) 형상을 갖

Table 1. Material properties for FE analysis

	UD	± 45°	3Ax
E1 (MPa)	41600	11,500	29,600
E2 (MPa)	7300	11,500	10,300
G12 (MPa)	4000	9700	6856
Poisson ratio	0.3	0.5	0.46
Specific weight (kg/m^3)	1,880	1,880	1,880

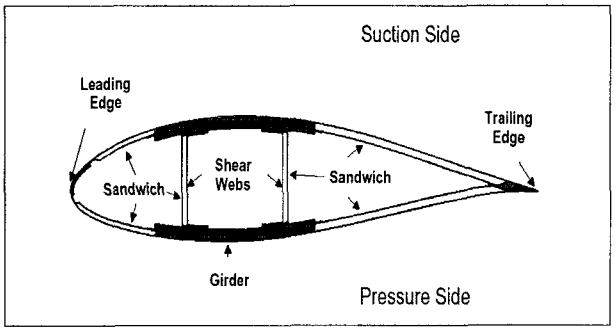


Fig. 1 Cross-sectional view of a rotor blade.

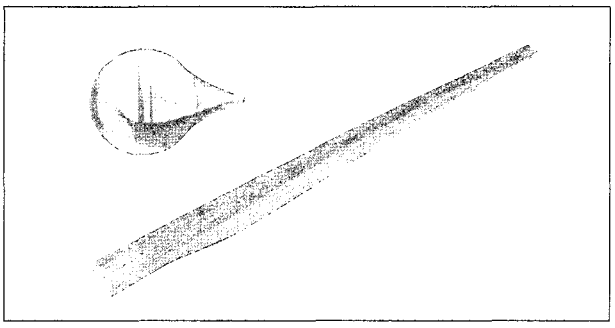


Fig. 2 Meshed model of 2MW rotor blade.

Table 2. Total length, total mass and center of gravity of rotor blades

	750kW	2MW
Total length	27.75m	42.65m
Total mass	2,533kg	7,940kg
Center of gravity	8.93m	14.57m

는다. Table 2는 각각의 블레이드 모델의 길이, 무게, 무게 중심을 나타낸다. 본 연구의 대상인 750kW 및 2MW 블레이드는 각각 클래스 III 및 II에 속하며, 그에 해당되는 설계 하중 및 안전 계수를 기반으로 해석되었다.[2,3]

3.2 고유진동수 해석

블레이드는 전단풍(wind shear), 타워의 영향 및 풍속의 변화 등에 따라 진동을 하게 되므로 공진을 피하도록 설계되어야 한다. 저속 회전체인 로터 블레이드 해석에서 원심력에 의한 강성 변화는 무시한다. Table 3은 고유진동수 해석 결과를 나타낸다. 30m가 넘는 블레이드는 GL 인증규격에 따라 2차 고유진동수가 언급되어야 한다(Fig. 3).

Table 3. Calculated natural frequency

	750kW	2MW
1st flapwise	1.02Hz	0.83Hz
1st chordwise	1.66Hz	1.52Hz
2nd flapwise	3.14Hz	2.51Hz

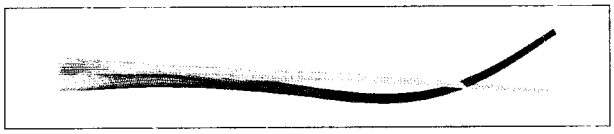


Fig. 3 2nd flapwise mode shape of the 2MW blade.

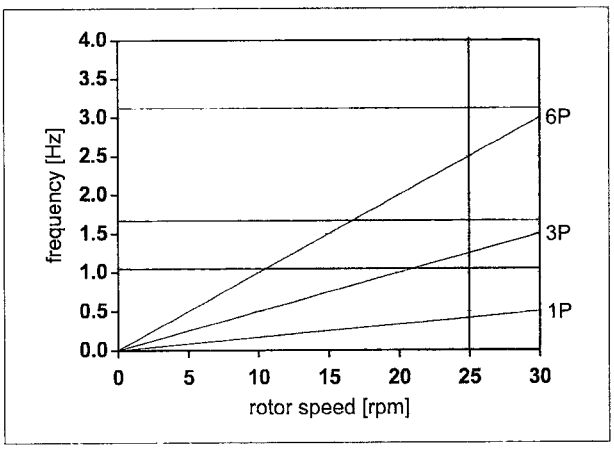


Fig. 4 Campbell diagram (750kW)

회전하는 블레이드에 대해서 가진 주파수(excitation frequency)는 회전주기의 정수비의 형태로 발생한다.[4] Fig. 4는 750kW 블레이드의 회전수에 따른 고유진동수 변화를 캠벨 선도(campbell diagram)로 표시한 것이다. 블레이드가 3개이기 때문에 1P, 3P, 6P가 중요한 가진 주파수이다. 공진을 방지하기 위해서는 블레이드의 고유진동수가 공칭회전수(nominal rpm)인 25rpm에서 가진 주파수와 차이가 나야한다. 그림에서 보듯이 운용구간에서 공진가능성은 없는 것으로 확인되었다.

3.3 정하중 해석

정하중 해석은 극한하중조건에서 각각의 블레이드 구간에 적용되는 최대 굽힘 모멘트와 같아지도록 총 4개의 구간에 코드 방향(chordwise)과 플랩 방향(flapwise)으로 하중을 적용하여 수행하였다. 설계 하중에 대한 안전계수는 1.35이며,

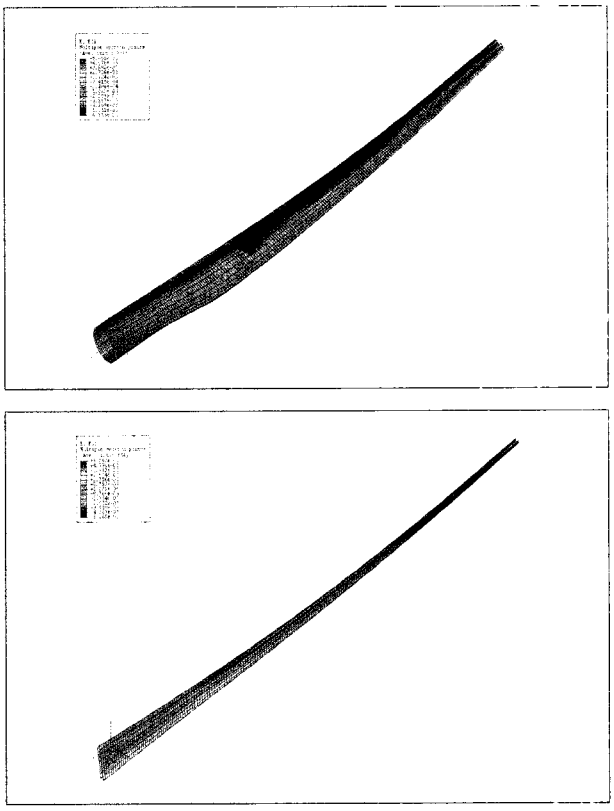


Fig. 5 2MW flapwise static analysis results

Table 4. Calculated stress and strain of 2MW rotor blade

	Stress (MPa)		Strain (%)	
	Max.	Min.	Max.	Min.
Max. chordwise	8.34	-24.25	0.026	-0.079
Min. chordwise	24.46	-7.93	0.080	-0.025
Max. flapwise	146.8	-145.3	0.477	-0.474
Min. chordwise	163.9	-165.8	0.535	-0.539
Allowable	332	-205	0.84	-0.59

재료에 대한 안전계수는 750kW의 경우 2.45, 2MW의 경우 2.2를 사용하였다.[2] Fig. 5는 플랩 방향으로 최대 하중이 가해질 때, 2MW 로터 블레이드의 표피와 웹의 변형률 분포를 나타낸다. Table 4는 2MW 블레이드의 응력 및 변형률 해석 결과를 정리한 것이며, 허용치와 비교하면 극한하중조건하에서도 블레이드가 안전함을 알 수 있다.

4. 구조 인증시험

4.1 인증시험 준비

Fig. 6은 광섬유 상태 모니터링 시스템과 함께 750kW 로터 블레이드 구조 인증시험 준비가 완료된 모습을 나타낸다. 크레인이 블레이드를 들어 올리면, 각 휘플 트리(whiffle tree)의 로드 셀(load cell)이 하중을 측정하고, 줄자를 이용하여 변형을 측정한다. 시험을 시작하기 전에 블레이드와 지그(jig)의 자중에 의한 처짐을 보정해준다. 750kW 블레이드의 경우, 2개의 FBG센서가 블레이드 내부에 삽입되어 졌으며, 이는 프리프레그 적층 방식으로 제작될 경우 광섬유 삽입이 용이하기 때문이다. FBG센서는 센서 구간을 보호하기 위해 아

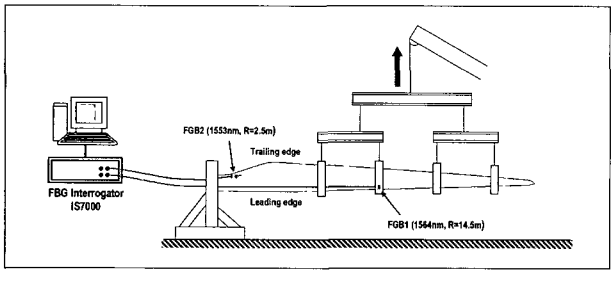


Fig. 6 Test set-up of the 750kW rotor blade.

크릴레이트(acrylate)로 코팅되었으며, 센서 측정구간 길이는 약 15mm, 지름은 약 250㎛이다. FBG센서에서 반사된 스펙트럼은 FBG Interrogator, IS7000(fiberpro Inc.)을 사용하여 측정된다.[5~7]

4.2 고유진동수 시험

750kW 로터 블레이드의 각 구간에 부착된 가속도계(accelerometer)와 FBG센서를 이용하여 블레이드의 고유진동수를 측정하였다. FFT해석을 통한 측정결과와 유한요소 해석결과를 Table 5에 비교하였으며, 가속도계와 FBG센서를 통해 측정된 결과는 비슷한 반면, 유한요소 해석결과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 실제 제작된 블레이드와 블레이드 해석 모델의 차이에서 발생한 것으로 사료되며, 유한요소 모델의 경우, 낙뢰유도장치, 페인트, 기타 액세서리 등이 고려되지 않았기 때문이다.

4.3 정하중 시험

Fig. 7~Fig. 8은 각 하중방향에 따른 2MW 블레이드 정하중 구조시험 사진을 나타낸다. 전체 시험 중 블레이드 파손이나, 좌굴 현상은 발생하지 않았다. 측정 및 해석 결과는 Table 6에 정리하였다. 인증규격에 의하면, 변형의 경우 ± 7%, 고유 진동수의 경우 ± 5%, 변형률의 경우 ± 10%의 오차가 허용된다. Table 7에 각 시험에 따른 오차를 정리하였다.

Table 5. Modal test results

	Accelerometer	FBG sensor	FEM
1st flapwise	1.05Hz	1.07Hz	1.02Hz
1st chordwise	1.72Hz	1.78Hz	1.66Hz

Table 6. Measurements and calculations

	Measurement / Calculation			
	Max. flap	Min. flap	Max. chord	Min. chord
Tip deflection (m)	6.712 / 7.274	8.306 / 8.692	1.360 / 1.129	1.252 / 1.012
Max. strain (%)	0.397 / 0.439	0.464 / 0.511	0.231 / 0.229	0.201 / 0.157
Min. strain (%)	-0.385 / -0.423	-0.449 / -0.496	-0.236 / -0.180	-0.205 / -0.200

Fig. 7 2MW flapwise proof test.

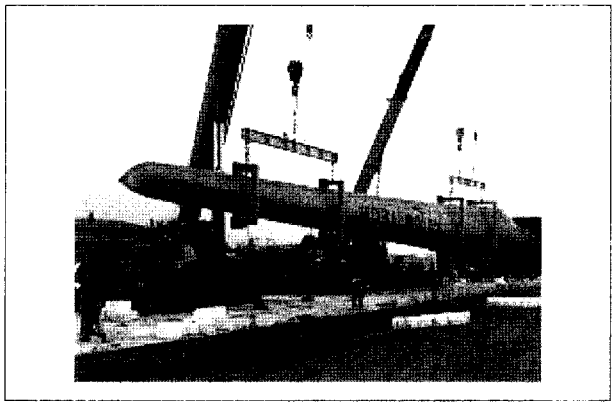
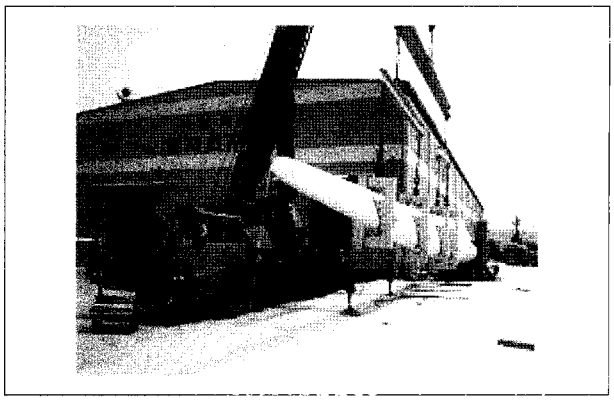


Fig. 8 2MW chordwise proof test.

Table 7. GL deviations and test errors

%	Natural frequency		Deflection		Strain	
	Flap	Chord	Flap	Chord	Flap	Chord
GL	±5	±5	±7	±7	±10	±10
Test	-0.4~2.4	-1.3	-4~-6	20~24	-7~-9	28~31

플랩 방향 시험(flapwise test)의 경우 해석 결과와 측정 결과는 허용 오차 내에서 만족스러운 결과를 보였으나, 코드 방향 시험(chordwise test)은 20%이상의 오차를 보였다. 이는 코드 방향 시험의 경우, 2MW 블레이드의 굽어진 형상특성(pre-bended) 및 시험방법상 각 단면의 전단중심에 하중의 가하기 매우 어려워, 하중 적용 시 블레이드의 비틀림 변위가 발생하여 해석 결과보다 측정 결과가 비교적 크게 측정된 것으로 사료된다. 그러나 코드 방향 정하중 시험의 기본 목적은 블레이드가 하중을 받았을 때 표피에 발생하는 윙클(wrinkle)이나 좌굴(buckling)을 확인하는 것으로서 플랩 방향



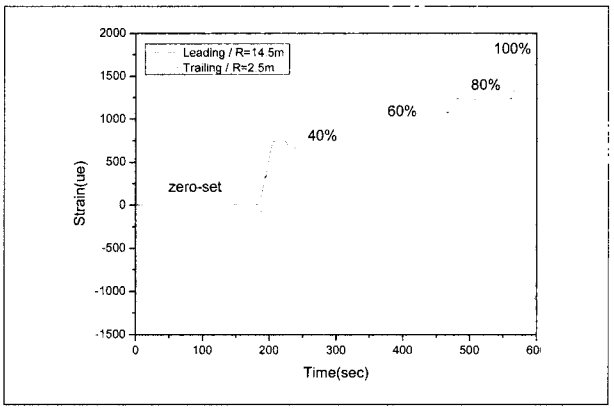


Fig. 9 750kW chordwise proof test and strain changes from FBG sensors.

시험과 달리 하중과 변위의 관계는 크게 중요시 되지 않았다.

Fig. 9는 750kW 블레이드의 코드 방향 시험 및 FBG센서로부터 얻은 변형률 변화를 나타내며, FBG센서는 정확하게 모든 시험 과정을 모니터링 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 GL 인증규격에 따라 750kW 및 2MW급 풍력발전기용 블레이드의 구조설계 및 해석을 수행하였으며, 인증 구조시험을 통하여 설계 방법 및 결과에 대한 검증이 이루어졌다. 또한, 광섬유 센서의 일종인 FBG센서를 블레이드 내부에 삽입하여 전체 구조 인증시험 과정을 모니터링 하는데 성공하였으며, 향후 회전하는 로터 블레이드 실시간 모니터링에 적용 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 예산 지원으로 수행한 '저풍속형 고효율 풍력발전기 요소기술 개발 및 현장 실증' 및 '2MW PMSG형 풍력발전 시스템 개발'사업의 일환이며, 에너지관리공단의 지원에 감사드립니다.

References

[1] L. R. McKittric, et al., 2001, "Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using Finite Element Model", SAND2001-1441.

[2] Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2003, Germanischer Lloyd.

[3] C. K. Jung, S. H. Park and K. S. Han, 2004, "Structural Design of a 750kW Composite Wind Turbine Blade", the Spring Conference of KSCM, pp. 18-21,

[4] D. A. Spera, 1994, "Wind Turbine Technology Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering", ASME Press.

[5] A. D. Kersey, et al., 1997, "Fiber grating sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463.

[6] S. H. Park, J. C. Yun and K. S. Han, 2007, "Monitoring of rotor blade structural test using fiber Bragg grating sensors", the Autumn Conference of KWEA, pp. 139-142.

[7] K. Schroederl, et al., 2006, "A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade", Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 1167-1172.

박 선 호

2003년 포항공과대학교 기계공학과 공학사
2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학석사

현재 포항공과대학교 기계공학과 공학박사과정
(E-mail : suno@postech.ac.kr)

한 경 섭

1974년 서울대학교 금속공학과 공학사
1977년 서울대학교 금속공학과 공학석사
1980년 Case Western Reserve University 금속재료공학과 공학박사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 주임교수
(E-mail : kshan@postech.ac.kr)