

2MW 로터 블레이드 구조설계 및 인증시험

방 조혁¹⁾, 김 양수¹⁾, 류 지윤¹⁾, 김 두훈¹⁾, 박 선호²⁾, 박 병준³⁾

Structural Design and Proof Test of a 2MW Wind Turbine Blade

Johyug Bang, Yangsoo Kim, Jiyune Ryu, DooHoon Kim, Sunho Park, Byoungjun Park

Key words : Structural Design(구조설계), Finite Element Method(유한요소법), Wind Turbine Rotor Blade(풍력발전기 로터 블레이드), Proof Test(인증시험)

Abstract : A GFRP based composite blade was developed for a 2MW wind energy conversion system of type class IIA. The blade sectional geometry was designed to have a general shell-spar and shear web structure. The load cases specified in the IEC61400-1 international specification were considered. For withstanding all relevant extreme loads, the structural analysis for the complete blade was performed using a commercial FEM code. The static load carrying capacity, blade tip deflection and natural frequencies were evaluated to satisfy the strength and stability requirements in accordance with the IEC61400-1 and GL Regulations. The prototype blade was passed the structural proof test for GL certification.

1. 서 론

풍력발전기용 블레이드의 재료는 초기에 금속이나 목재를 주로 사용하였던 것에 비해, 최근에는 대형화로 인해 경량화가 절실히 요구되므로 복합재료가 주 구조재료로 사용되고 있다. 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 MW이상의 블레이드에 나무나 유리섬유 복합재료와 같이 조합하여 제한적으로 사용되고 있다. 현재는 유리섬유복합재료를 사용한 블레이드가 가장 일반적이다. 풍력 블레이드의 구조도 많은 변화를 거쳐 발전되어 왔다. 초기에는 항공기용 날개와 유사한 구조를 사용하였으나, 현재는 풍력발전기용 블레이드에 최적화된 shell-spar-shear web 구조가 가장 일반적이다.

풍력발전기용 블레이드의 수명은 통상 20년이고 회전중에는 원심력 및 공력이 작용하므로 풍속에 따른 지속적인 하중이 작용하게 된다. 또한 블레이드는 풍속의 변화와 요잉등의 움직임에 따라 진동이 발생하게 되고 이 진동은 블레이드의 고유진동수에 따라 진폭이 감쇄되거나 증폭되게 된다. 따라서 블레이드가 구조적 안정성을 가지기 위해서는 하중 특성을 고려한 구조설계가 필

요하다⁽¹⁾.

본 연구에서는 2MW급 유리섬유 복합재료 블레이드의 설계와 해석을 위해, 상용유한요소 패키지를 사용하여 극한 하중에 대한 응력해석 및 고유진동수해석을 수행하였으며 시제품 블레이드 제작 및 GL 인증 구조시험을 통해 그 결과를 검증하였다.

2. 블레이드 구조설계

2.1 구조설계 제한조건

IEC61400-1 규격 및 이에 준하는 GL 인증규격에 따라 풍력발전시스템은 설계 풍속에 따라 5개의 type class로 구분된다. 본 연구의 대상인 블레이드는 적용대상지역의 풍황조건에서 구조적 안전성을 확보하면서도 에너지생산량을 최대화할 수 있도록 TC IIA로 선정되었으며, 이에 상응하는 설계하중 및 안전계수 등이 적용되었다⁽²⁾.

- 1) 유니슨(주) 기술연구소
E-mail : bjhzone@uniosn.co.kr
Tel : (041)620-3417 Fax : (041)552-7416
- 2) 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : suno@postech.ac.kr
Tel : (054)279-8216
- 3) (주)에드컴텍 기술연구소
E-mail : lapjoint@empal.com
Tel : (063)262-3674 Fax : (063)262-9622

2.2 기본구조 및 재료물성

블레이드의 총 길이는 42.65m이며, resin infusion 방식으로 제작된 유리섬유 복합재로 구성되어진다. 기본 단면 구조는 Fig. 1과 같이 표피(skin), 스파 캡(spar cap), 웹(web)으로 이루어져 있다. 표피는 전체 공력형상을 유지하면서 비틀림과 전단력을 지지한다. 스파 캡은 대부분의 굽힘하중을 받기 때문에 두꺼운 UD fabric으로 제작되며, 전단력을 주 하중으로 하는 웹은 샌드위치 구조로 되어있으며 두 개의 스파 캡을 연결시켜 준다. 허브와 블레이드를 연결하는 루트(root)부분에는 가장 큰하중이 작용되므로 가장 두껍게 보강되어진다. 스파 캡 이외의 표피에서 좌굴현상이 일어나는 것을 방지하기 위해 PVC foam과 Balsa wood를 샌드위치 구조 내부의 코어(core)로 사용한다.

일반적으로 설계초기에는 로터블레이드의 설계를 위한 재료의 물성을 이론적으로 계산한 값을 적용하며 추후에 시편시험을 통해 이를 검증하여야 한다⁽³⁾. 본 연구에 적용된 각 재료의 물성은 Table 1과 같고 이는 독일의 시험기관은 IMA사에 시편시험을 의뢰하여 모두 검증되었다.

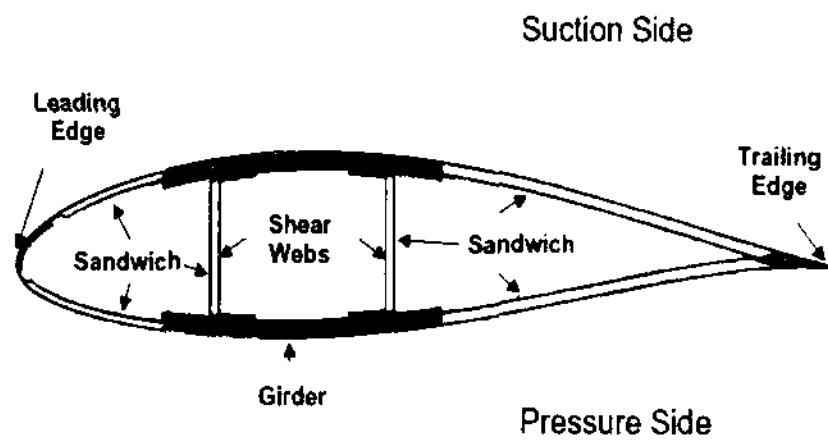


Fig. 1 Configuration of wind turbine blade

Table 1 Material properties

	UD	±45°	3Ax
E ₁ (MPa)	39300	11500	29600
E ₂ (MPa)	8600	11700	10300
G ₁₂ (MPa)	3845	11288	6856
ν	0.25	0.56	0.46
ρ (kg/m ³)	1880	1880	1880
σ _L (MPa)	730	-	560
ε _L (%)	1.85	1.85	1.85

3. 블레이드 구조해석

3.1 유한요소 모델

유한요소 프로그램은 모델링에 I-DEAS, 해석에는 ABAQUS를 사용하였다. 요소는 12300개의 S4 shell element를 사용하였다. 재료 두께의 변화를 주기위해 블레이드 길이방향으로 176개의 요소그룹과 코드(chord)방향으로 6개의 요소그룹으로 나누었다. 기본적으로는 루트(root)가 가장 두껍고 끝단으로 갈수록 감소하는 분포이다. 블

레이드 설계 무게는 약 7940kg이고, 무게중심은 허브 중심에서 14.4m이다.

3.2 고유진동수 해석

블레이드는 wind shear, 타워의 영향 및 풍속의 변화등에 따라 진동을 하게 되므로 공진을 피하도록 설계되어야 한다. 고유진동수 해석결과 Edgewise와 Flapwise 1차 고유진동수는 각각 1.52Hz와 0.83Hz이다. 30m가 넘는 블레이드는 GL 인증규격에 따라 Flapwise 2차 고유진동수가 언급되어야 하며, 해석 결과 2.51Hz이다. Fig.2는 Flapwise 2차 진동모드를 나타낸다.

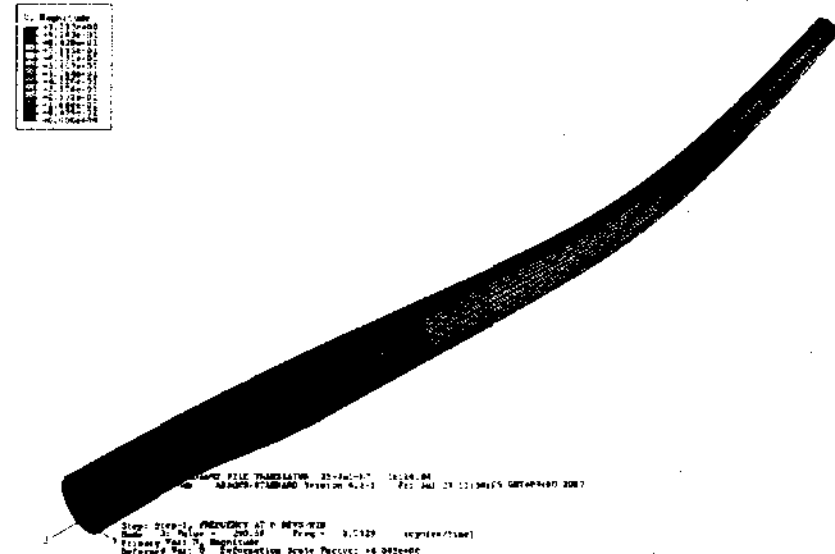


Fig. 2 2nd flapwise mode shape

3.3 정적 해석

정적 해석은 극한하중조건에서 각각의 블레이드 구간에 적용되는 최대 굽힘 모멘트와 같아지도록 총 4개의 구간(R=11.85m, 17.85m, 31.85m, 37.85m)에 Edgewise/Flapwise 방향으로 하중을 적용하여 수행하였다. 블레이드 끝단의 변형과 스파 캡 UD에서의 최대응력, 최대변형을 해석결과는 Table 2와 같다. UD의 허용응력과 비교하면 극한하중조건에서도 블레이드가 안전함을 알 수 있다. Fig. 3은 웹의 Minimum Flapwise 방향 응력해석 결과이다. 웹과 스파 캡의 연결부에서 최대응력이 나타났으며 허용응력과 비교해서 안전한 것으로 해석되었다.

Table 2 FEM analysis results

	Deflection (m)	Stress (MPa)	Strain (%)
Max.chord	1.129	8.34 -24.25	0.026 -0.079
Min.chord	1.012	24.46 -7.93	0.080 -0.025
Max.Flapp	7.574	146.8 -145.3	0.477 -0.474
Min.Flapp	8.692	163.9 -165.8	0.535 -0.539

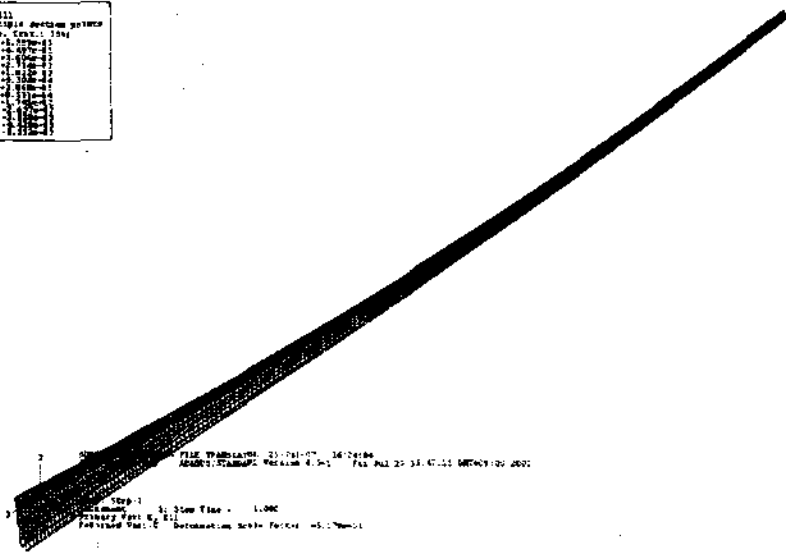
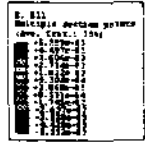


Fig. 3 Strain contour(web)

4. 구조시험

4.1 인증 구조시험의 종류

GL 인증을 위한 로터 블레이드의 구조시험은 기본적으로 블레이드 무게 및 무게중심을 측정하며 Table 3과 같이 크게 고유진동수 측정과 정하중 시험으로 나뉘어진다. 이를 세부적으로 분류하면 블레이드의 방향에 따라 Flapwise와 chordwise로 분류되고 좌표계 정의에 의한 하중 부호에 따라 Maximum과 Minimum으로 구분된다.

Table 3 Blade structure proof test cases of GL regulation

Eigenvalue Test	Static Test	
	Flapwise	Chordwise
1 st Flapwise mode	Maximum (+)	Maximum (+)
2 nd Flapwise mode	Minimum (-)	Minimum (-)
1 st Chordwise Mode		

4.2 무게 및 고유진동수 측정

Table 4 는 무게 및 무게중심 측정결과이며 측정무게가 설계 무게보다 다소 가벼운 결과를 얻었다. 이는 시제품에는 아직 낙뢰유도장치, 페인트, 기타 액세서리 등이 장비되지 않았기 때문이며 설계 단계에서 RIM으로 제작하는 블레이드의 RC(resin content) 값을 다소 높게 예측하였기 때문이다. 한편 Table 5는 충격해머와 FFT 해석기를 이용하여 측정한 고유진동수 측정 결과로서 설계 값과 매우 유사함을 확인하였다.

Table 4 Blade mass and COG

Measurement	7735 kg	R=14.2m
Design	7940 kg	R=14.4m

Table 5 Eigenvalue test

Measurement		
Mode	Chordwise	Flapwise
First	1.5Hz	0.85Hz
Second	-	2.5Hz
Design		
First	1.52Hz	0.83Hz
Second	-	2.51Hz

4.3 정하중 시험

Fig. 4~ Fig. 11은 정하중 구조시험 사진 및 그 결과를 하중 단계별로 예측 값과 비교한 것이다. Flapwise test의 경우 해석에 의한 예측결과와 측정결과는 최종하중단계에서 5%이내의 오차를 보여 매우 만족스러운 결과를 보였다. 한편 Chordwise test는 블레이드의 형상특성 및 시험방법상 각 단면의 전단중심에 하중의 가하기 매우 어렵다. 이러한 결과로 하중적용시 블레이드의 비틀림 변위가 발생하여 예측결과보다 측정결과가 비교적 크게 측정되었다. 그러나 Chordwise 정하중 시험의 기본 목적은 블레이드가 하중을 받았을 때 표피에 발생하는 웅크리나 좌굴을 확인하는 것으로서 Flapwise test와 달리 이러한 하중과 변위의 관계는 크게 중요시 되지 않았다.

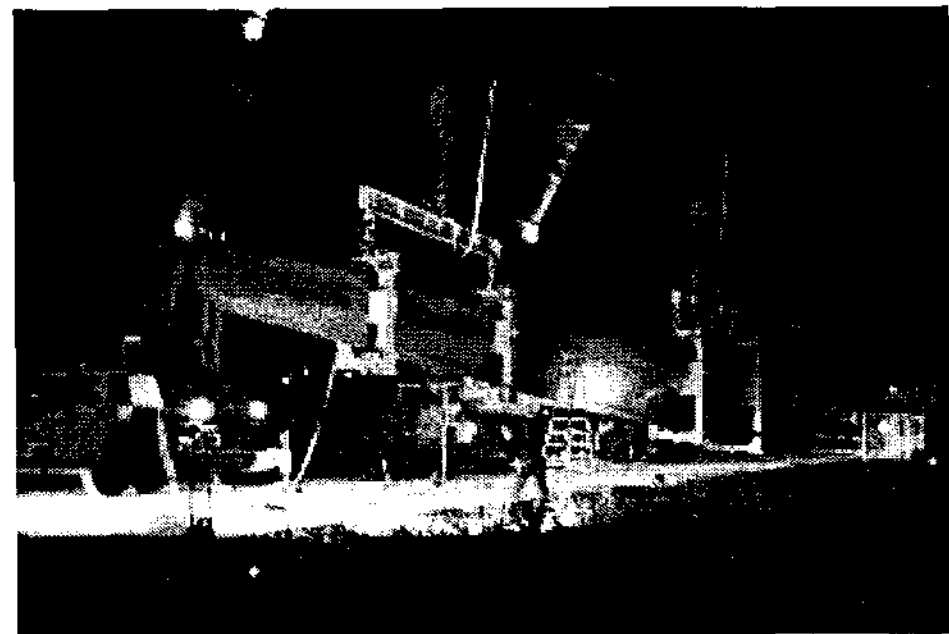


Fig. 4 Maximum chordwise test

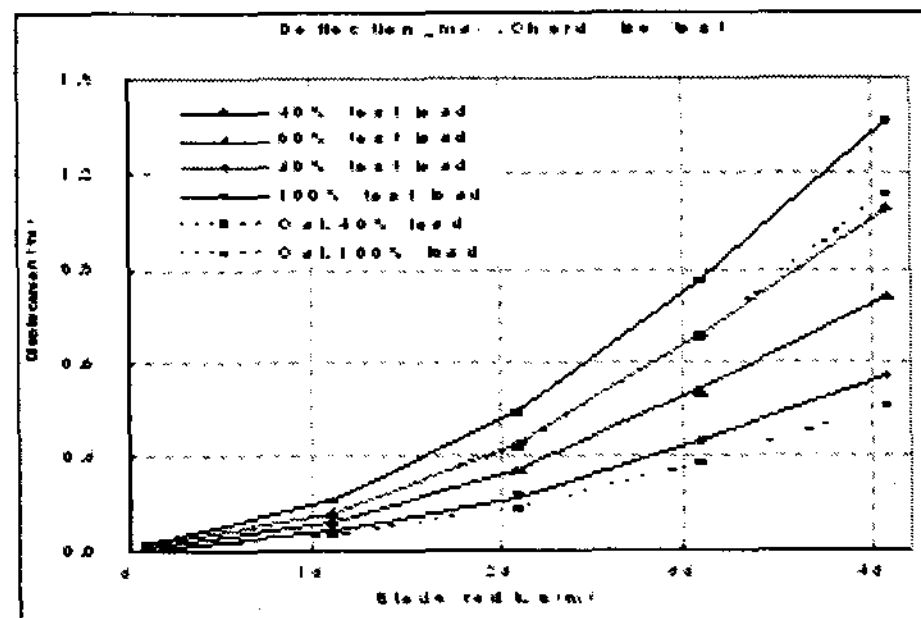


Fig. 5 Maximum chordwise test result.

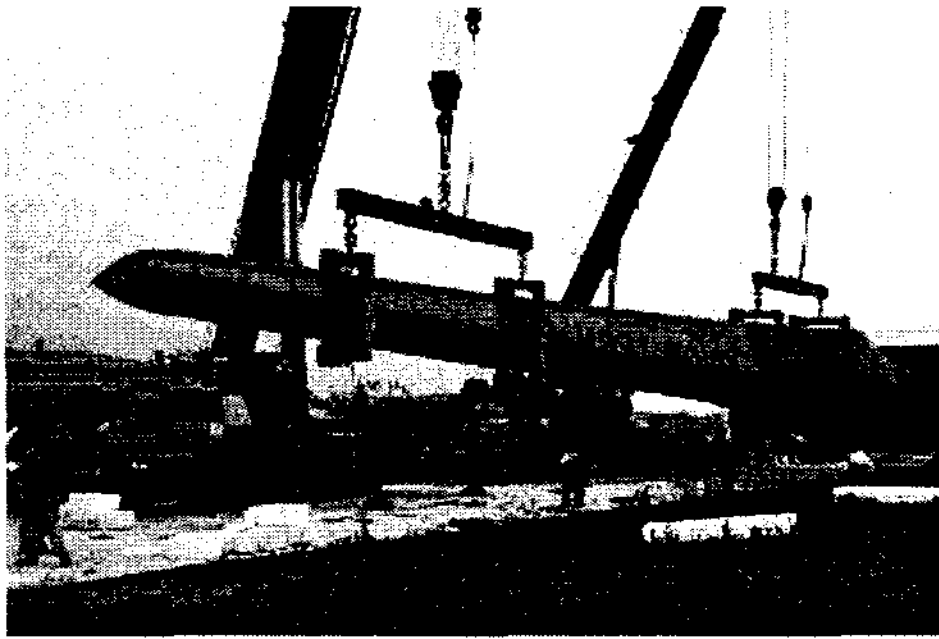


Fig. 6 Minimum chordwise test

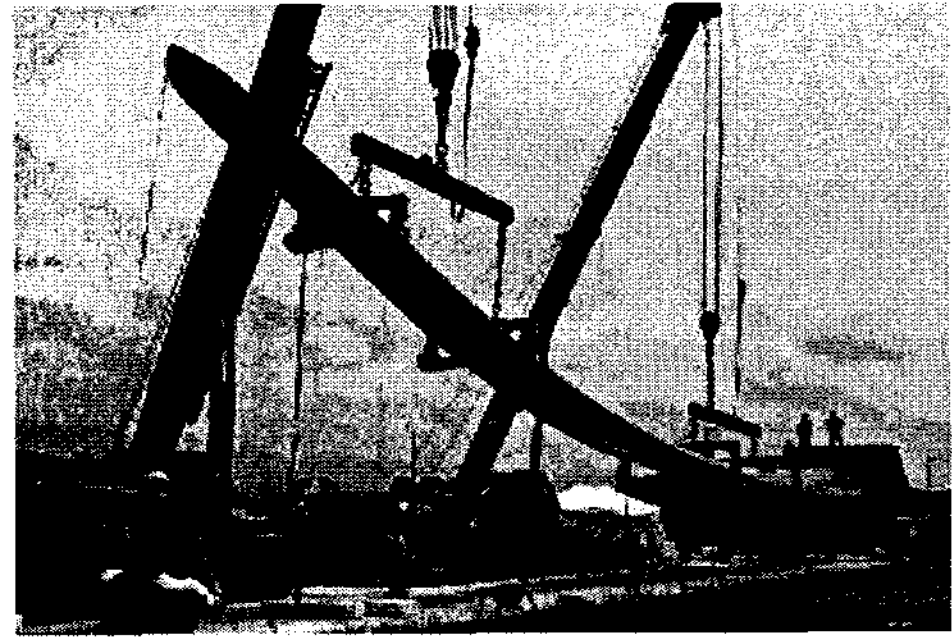


Fig. 10 Minimum flapwise test

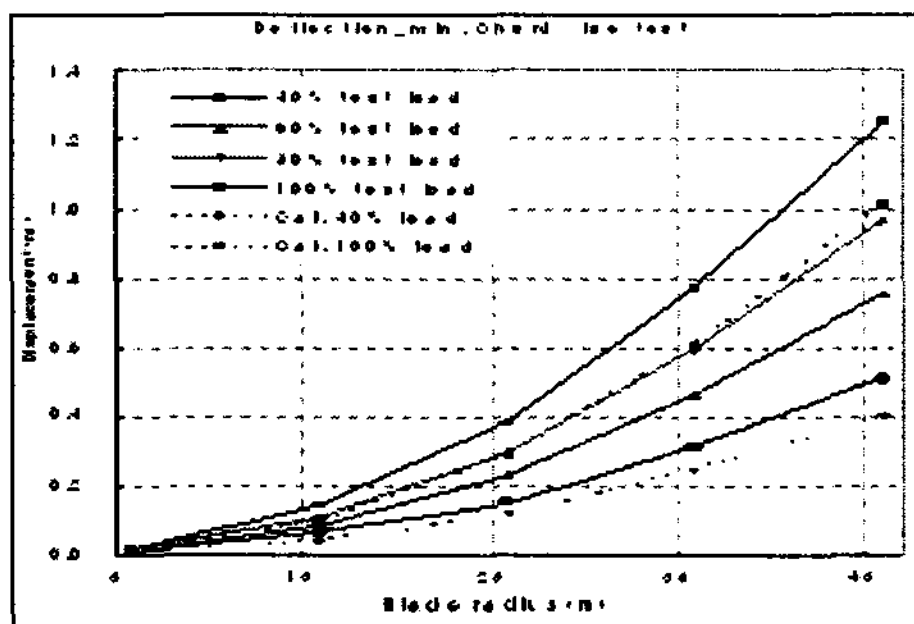


Fig. 7 Minimum chordwise test result

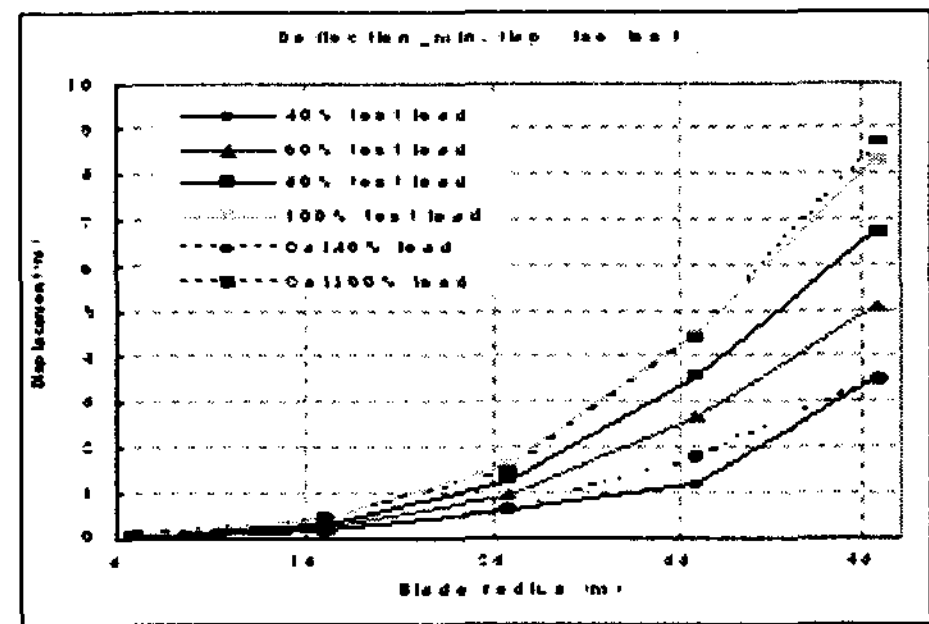


Fig. 11 Minimum flapwise test result



Fig. 8 Maximum flapwise test

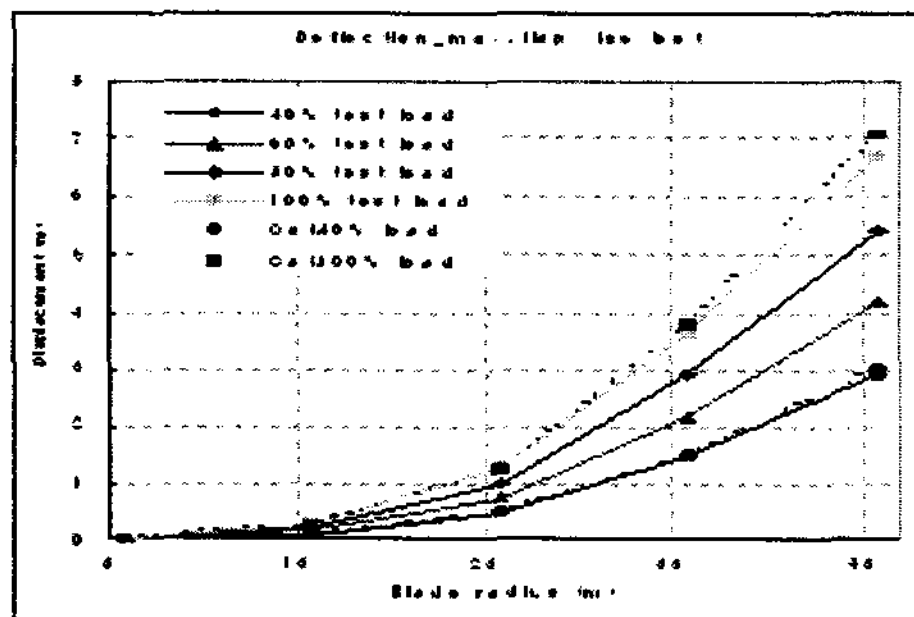


Fig. 9 Maximum flapwise test result

5. 결론

본 연구에서는 2MW급 풍력발전기용 블레이드의 구조설계 및 해석을 수행하였으며, IEC type class IIA에 따른 하중조건을 적용한 유한요소 모델을 사용하여, 선형 정적해석 및 고유진동수 해석을 수행하여 구조적 안정성을 확보하였다. 또한 시제품 인증 구조시험을 통해 설계 방법 및 결과에 대한 검증이 이루어졌다.

후기

본 연구는 산업자원부의 예산 지원으로 수행중인 '2MW PNSG형 풍력발전 시스템 개발' 사업의 일환이며, 에너지관리공단의 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Ladean R. McKittrick, 2001, "Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using Finite Element Model", SAND2001-1441
- [2] The International Electrotechnical Commission, 1999, IEC Standard 61400-1 Part I : Safety Requirements
- [3] Germanischer Lloyd, 2003, Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems