

구조시험 및 유한요소해석을 통한 소형풍력발전용 복합재 블레이드의 구조 안전성 평가[§]

장윤정* · 이장호* · 강기원*†

* 군산대학교 기계자동차공학부

Structural Integrity of Small Wind Turbine Composite Blade Using Structural Test and Finite Element Analysis

Yun Jung Jang^{*}, Jang Ho Lee^{*} and Ki Weon Kang^{*†}

^{*} School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

(Received April 23, 2012 ; Revised June 14, 2012 ; Accepted June 22, 2012)

Key Words: Wind Turbine Blade(풍력발전용 블레이드), Structural Test(구조 시험), Structural Analysis(구조 해석), Structural Integrity(구조적 안전성)

초록: 본 논문에서는 구조 시험과 유한요소해석을 통하여 소형 풍력발전용 복합재 블레이드의 구조적 안전성을 평가하였다. 먼저, 선행연구에서 공력해석을 수행하여 정격 및 극한 풍속일 때의 블레이드가 받는 굽힘 모멘트를 산출하였다. 이를 이용하여 소형풍력발전기 관련 국제 규격인 IEC 61400-2 에 따른 실규모 구조 시험을 수행하여 구조적 안전성을 평가하였다. 그리고 유한요소법을 이용한 구조 해석을 수행하여 구조 시험 결과와 비교하여 이의 정확성을 판단하였다. 또한, 구조 시험을 통해 블레이드에 대한 과잉 설계가 확인되었으며 이의 해결을 위하여 블레이드의 적층 순서 및 두께를 재선정하여 구조적 안전성을 평가하였다.

Abstract: This study deals with structural analysis and testing under loading conditions calculated by computational fluid dynamics for a small composite blade that is utilized in a dual rotor wind turbine system. First, the aerodynamic forces were analyzed at the rated and cutout wind speed to identify the bending moment distribution along the blade length in previous research. Then, full-scale structural tests were conducted according to IEC 61400-2 to evaluate the structural integrity of the composite blade. These results were compared with finite element analysis to identify the accuracy of the structural analysis. Based on these results, it was revealed that the existing blade has a very high safety margin. Then, the layup of the composite blade was redesigned and analyzed using finite element analysis to achieve structural integrity and economic efficiency.

1. 서 론

풍력발전용 블레이드(Wind turbine blade)는 바람의 운동에너지를 기계적 회전에너지로 변환하여 발전기를 구동시키는 부품이다. 이러한 블레이드의 구조재료는 비강도(Specific strength), 비강성(Specific stiffness) 및 피로특성 등이 우수한 복합재료가 주로 사용되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 복합재료를 이용한 블레이드의 구조 설계는 각 부분별로 적용된 적층 방

향 및 두께를 선정하는 것으로 주로 유한요소법(Finite element method)을 이용한 구조 해석이 수행되고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 그러나 구조 해석은 기본적으로 수치해석적 방법이며 또한 해석 수행 시 일정부분 도입된 가정으로 인하여 이의 정확성에 대한 검증이 요구된다. 이에 따라 소형 풍력발전시스템 관련 국제 규격인 IEC 61400-2⁽⁶⁾에서는 블레이드 구조설계의 정확성 및 구조적 안전성 검증을 위한 실규모 구조 시험(Full scale structural test)을 요구하고 있다.

블레이드에 대한 실규모 구조 시험을 수행하기 위해서는 먼저 적용 대상 익형(Airfoil)에 블레이드 요소법(Blade element momentum theory, BEMT)⁽⁷⁾ 또는 전산유체역학(Computational fluid dynamics)을 적용한

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2012. 4. 5.-6., 영남대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, kwkang68@kunsan.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

공력해석(Aerodynamic analysis)⁽⁸⁾을 통하여 공력하중(Aerodynamic force)의 산출이 요구된다. 이러한 과정을 통하여 획득된 설계 하중에 일정 수준의 안전계수를 고려하여 블레이드에 가해지는 시험 또는 부하하중을 산출하게 된다. 블레이드의 구조적 건전성을 확인하기 위해서는 이러한 부하하중을 이용한 구조 시험을 통해 구조적 안전성을 판단하는 과정 및 구조 해석을 통해 얻은 블레이드의 실제 거동에 대한 이론적 결과와 일치하는지 확인이 필요하다.⁽⁴⁾ 이러한 절차를 통하여 복합재 블레이드의 제작이 가능하나 이의 상용화를 위해서는 안전성뿐만 아니라 경제성도 확보되어야 한다. 따라서 복합재 블레이드의 안전성과 경제성을 확보할 수 있는 구조설계 조건을 찾는 것이 필요하다.

본 연구에서는 소형풍력발전시스템에 사용되는 복합재 블레이드를 대상으로 공력하중을 이용한 구조 시험과 구조 해석을 수행하여 구조설계의 정확성 및 안전성을 평가하였다. 그리고 블레이드 구조의 과잉 설계 가능성 최소화를 위하여 복합재 블레이드의 적층 방향 및 두께를 재선정하는 구조 개선을 수행하였다.

2. 해석 및 시험방법

본 연구의 대상이 되는 복합재 블레이드는 정격 풍속 10m/s, 정격용량 2kW 의 3엽 블레이드 양방향 풍력발전기(Dual rotor wind turbine)에 사용될 예정이다. Table 1 은 이러한 요구 조건하에서 선단(Front) 및 후단 블레이드(Rear blade)의 사양을 나타낸 것이다.

2.1 구조 시험 방법

블레이드의 구조적 건전성 평가를 위한 구조 시험은 산출된 공력하중을 기반으로 하여 IEC 61400-2 및 IEC 61400-23⁽⁹⁾의 규정된 절차에 따라 굽힘 시험(Bending test)과 모달 시험(Modal test)을 수행하였다.

굽힘 시험은 플랩방향(Flapwise) 및 에지방향(Edgewise)에 대하여 블레이드에 파손이 발생할 때까지 하중을 부하하는 시험이다. 이 시험은 블레이드의 루트(Root)를 고정시키고, 루트부를 제외한 블레이드 길이의 55%지점에 폭 $\pm 25\text{mm}$ 의 하중부하장치를 장착하여 하중을 부하한다. 이 때 사용된 계측기는 부하하중 측정용 로드셀(Loadcell) 및 블레이드의 변위를 측정하기 위한 LVDT(Linear variable displacement transducer)이다. 여기서 2 개의 LVDT 는 하중 작용점>Loading point)과

Table 1 Specification for blade wind turbine

	Front blade	Rear blade
Rated power	2 kW	←
Cut-in wind speed	2.5 m/s	←
Rated wind speed	10 m/s	←
Cut-out wind speed	25 m/s	←
Rated rotational speed	225 rpm	←
Number of blade	3	←
Rotor length	2,750 mm	3,350 mm
Weight	4.55 kg	4.62 kg

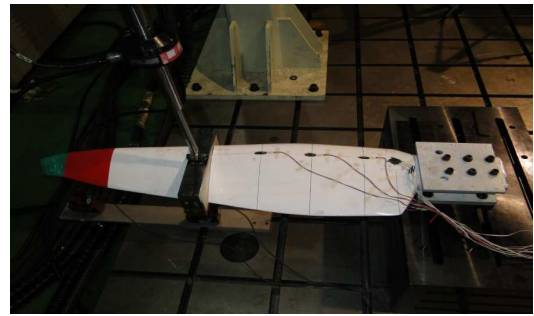


Fig. 1 Test setup

블레이드의 끝단(Tip)에 설치하였다. Fig. 1 은 플랩 방향의 시험 준비를 마친 상태를 나타낸 것이다. 이 시험을 통하여 하중-시간 곡선, 하중 작용점 및 블레이드 끝단에 대한 변위-시간 곡선과 변형률-시간 곡선을 얻을 수 있다. 이를 이용하여 하중-변위 곡선을 도출할 수 있으며 최대파손하중을 얻을 수 있다.

모달 시험은 블레이드 임의의 위치에 가속도 센서(Accelerometer)를 부착한 후 임팩트 해머(Impact hammer)로 블레이드 표면을 타격하여 가속도 및 변형률을 측정하는 시험이다. 이 시험을 통하여 가속도-시간 곡선 또는 변형률-시간 곡선을 얻어 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)을 이용하여 고유진동수(Natural frequency)를 산출할 수 있다.

2.2 구조 해석 방법

소형 풍력발전용 복합재 블레이드의 구조 해석의 타당성을 검토하기 위하여 상용 소프트웨어인 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 이용하여 정지(Fixed) 및 회전조건(Rotating condition)하의 해석을 수행하였다. 블레이드의 형상은 두께 방향의 치수가 다른 치수에 비하여 상당히 작기 때문에 Fig. 2 와 같은 쉘 요소(Shell element)를 적용하였다. 메쉬(Mesh)는 S4R 과 S3R 을 사용하였으며 요소(Element)의 개수는 선단

블레이드의 경우 11,621 개, 후단 블레이드의 경우 12,253 개이고, 절점(Node)의 개수는 선단 블레이드의 경우 11,648 개, 후단 블레이드의 경우 12,289 개이다. 또한, 경계조건(Boundary condition)은 루트 부분의 X, Y, Z 방향 및 X, Y, Z 회전방향(Rotation direction)의 자유도를 구속하였다. 하중은 블레이드 각 요소에 작용하는 하중을 절점의 개수로 나누어 절점하중(Nodal force)을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

블레이드의 구조 안전성 평가를 위한 기준을 설정하기 위하여 선행연구⁽¹¹⁾에서는 각 블레이드를 10 개의 구간으로 나누어 정지 및 회전조건하에서 정격(Rated) 및 극한풍속(Cutout wind speed)에 대해 공력해석(Aerodynamic analysis)을 수행하였다.⁽⁸⁾ 이에 대한 결과로 플랩 및 에지방향의 모멘트를 회전 중심으로부터의 길이에 따라 산출하였다. Fig. 3 은 후단 블레이드의 회전조건하에서의 모멘트 분포를 나타낸 그래프이다.

3.1 구조 시험

3.1.1 굽힘 시험

선행 연구⁽¹¹⁾에서 산출된 모멘트를 이용하여 안전계수를 적용한 최대 모멘트를 결정하고 하중부하지점의 길이를 고려한 시험 하중을 산출하였다. 산출된 하중을 이용하여 블레이드에 파손이 발생할 때까지 하중을 가하는 굽힘 시험을 통해 최대 파손하중을 획득하였다(Table 2 참조).

Fig. 4(a)에서 나타내듯이 선단 블레이드의 경우 하중이 계속 증가하다가 약 5,600N 에서 급격히 하중이 저하되는 팝인(Pop-in) 현상을 볼 수 있으므로 블레이드에 손상이 발생했다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 후단 블레이드의 경우 LVDT 의 측정 범위 초과로 인하여 시험을 중지했을 때의 하중인 2,812N 까지 팝인 현상이 나타나지 않은 것으로 보아 블레이드 내부에 특별한 손상이 발생하지 않음을 판단할 수 있다. 그러므로 설계하중에 대한 최대파손하중의 비는 선단 블레이드의 경우 40.70 배, 후단 블레이드의 경우 35.94 배를 가지므로 구조적 안전성이 있다고 판단되었다. 그러나 너무 높은 파손하중을 가지는 것으로 보아 과잉 설계의 가능성이 있음을 나타내므로 블레이드의 구조 설계의 개선이 필요하다고 판단된다. 이 때, Tip 은 블레이드 끝단을 나타낸다.

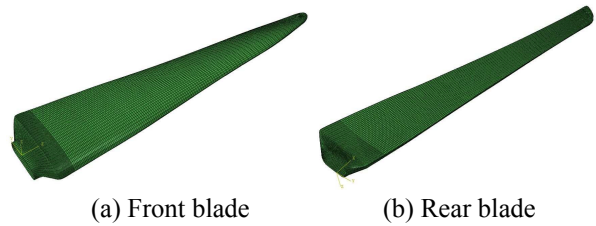


Fig. 2 Element of blade

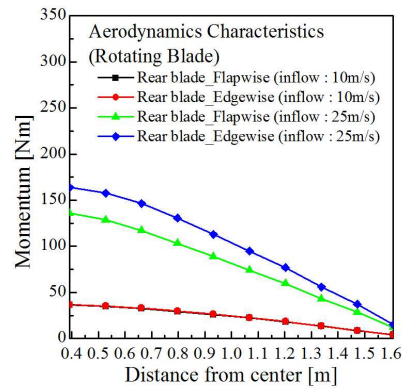
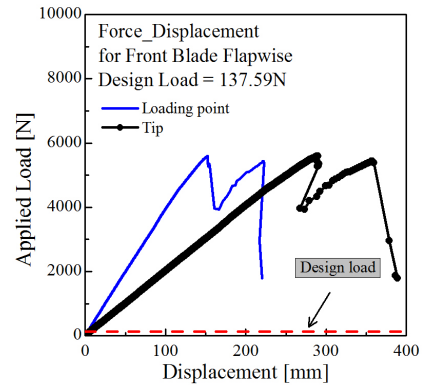
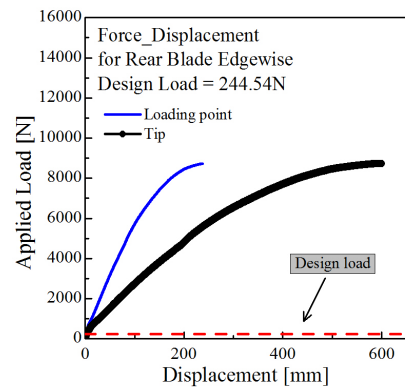


Fig. 3 Moment of rear blade under rotating condition



(a) Front blade



(b) Rear blade

Fig. 4 P-δ curve

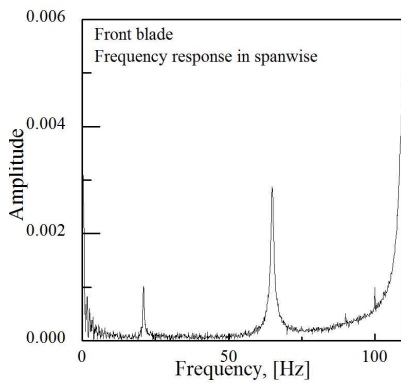
Table 2 Design and failure load

Blade	Direction	Design load (N)	Failure load (N)	Ratio
Front blade	Flapwise	137.59	5,600.54	40.70
	Edgewise	228.39	> 299.39*	-
Rear blade	Flapwise	202.79	> 2,821.29**	13.91
	Edgewise	244.54	8,765.90	35.94

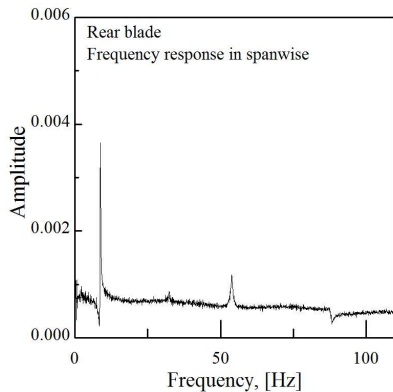
* : 시험재료 부족으로 인한 파손 시험 미이행
 ** : 변위 게이지 측정 범위 초과

Table 3 Natural frequency

Mode	Front blade (Hz)	Rear blade (Hz)
1 st	20.94	8.75
2 nd	64.91	32.94
3 rd	90.00	53.88
4 th	100.00	88.00



(a) Front blade



(b) Rear blade

Fig. 5 fast Fourier transform curve

3.1.2 모달 시험

가속도계를 부착한 블레이드의 표면을 임팩트 해머로 타격하였을 경우 발생하는 가속도를 측정하는 모달 시험을 수행하였다. 가속도계를 통해 도출된 결과를 고속 푸리에 변환을 통해 Fig. 5와 같은 진동에 따른 진폭의 그래프로 도출하였다.

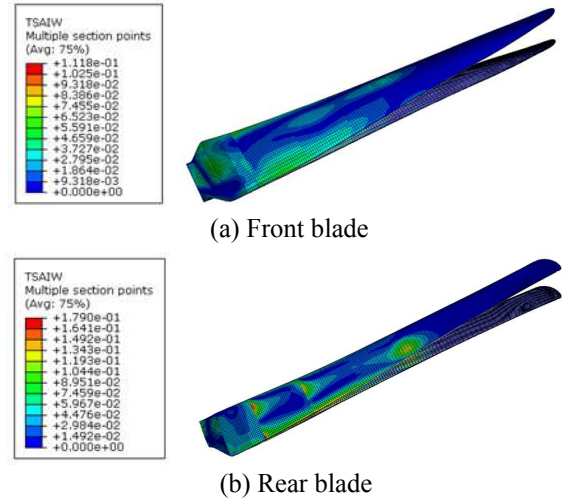


Fig. 6 Strength ratio distribution of flapwise

고속 푸리에 변환을 이용한 그래프에서 갑자기 진폭이 커진 지점, 즉 가장 진동모드를 많이 일으키고 선명한 값을 가진 가속도가 고유진동수이다. 그러므로 이 그래프를 통해 1 모드(mode)에서 4 모드까지의 각 블레이드에 대한 고유진동수를 얻을 수 있다(Table 3 참조).

3.2 구조 해석

해석의 타당성을 검토하기 위하여 구조 시험과 동일조건에서 굽힘 해석(Bending analysis)과 모달 해석(Modal analysis)를 수행하였다.⁽³⁾

3.2.1 굽힘 해석

구조 시험 시 하중을 부과하였던 위치, 즉 루트부를 제외한 블레이드의 55% 지점에 플랩 및 에지방향의 시험 하중을 절점의 개수로 나누는 절점 하중방식을 적용하여 정적 해석(Static analysis)을 수행하였다. 이와 같은 해석을 통하여 복합재료와 같은 이방성 재질에 대한 안정성 평가 방법인 Tsai-Wu 파손 조건 식의 결과로서 강도비(Strength ratio) 분포인 Fig. 6에 이의 대표적인 결과를 나타내었다. 안전계수(Safety factor)와 역의 관계를 가지는 강도비는 파손 여부를 나타내는 지표로써, 1보다 크거나 같으면 파손이 발생함을 의미하고, 1보다 작으면 안전함을 의미한다. 본 연구에서는 IEC 61400-2의 조건을 반영하여 허용 강도비를 0.245로 설정하였다.⁽³⁾ 해석의 결과로서 선단 블레이드의 플랩방향은 0.1, 에지방향은 0.09, 후단 블레이드의 플랩방향은 0.17, 에지방향은 0.13의 강도비를 가진다. 이의 결과 값은 기준 이내에 포함되므로 선단 및 후단 블레이드 모두 안전성이 있

Table 4 Natural frequencies of analysis and test

Blade	Analysis (Hz)	Test (Hz)
Front blade	20.34	20.94
	62.12	64.91
Rear blade	9.08	8.75
	32.41	32.94

Table 5 Lay-up thickness of re-layup blade

		Section 1 (mm)	Section 2 (mm)	Section 3-8 (mm)
Front blade	Initial	9.14	7.84	5.24
	Re-layup	6.54	5.24	5.24
Rear blade	Initial	14.34	9.14	5.24
	Re-layup	9.14	5.24	3.94

다고 판단할 수 있다.

3.2.2 모달 해석

모든 물체는 고유진동수를 가지고 있으며, 물체 특유의 특성이므로 같은 상태에서의 물체의 고유진동수는 변화하지 않는다. 그러므로 구조 시험과 해석을 통해 얻은 고유진동수를 비교하여 해석의 타당성을 증명할 수 있다. Table 4 를 통하여 선단 및 후단 블레이드의 고유진동수 값을 비교한 결과 $\pm 5\%$ 이내의 오차를 가지는 것으로 보아 해석의 정확성이 있다고 판단할 수 있다.

3.3 구조 설계 개선

구조 시험과 해석을 통해 얻은 블레이드의 강도비를 이용하여 역의 관계인 안전계수를 산출할 수 있다.⁽³⁾ 선단 블레이드의 플랩방향은 10, 에지방향은 10.30, 후단 블레이드의 플랩방향은 5.58, 에지방향은 7.57 을 가진다. IEC 61400-2 의 기준은 4.05 이므로 안전성은 충분하지만 과잉 설계로 인한 블레이드의 높은 무게 및 가격으로 인해 낮은 효율성을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 구조 설계의 개선이 요구되어 복합재료의 적층 두께 및 방향을 재설정하였다. 이 때 가장 큰 모멘트를 받는 루트부에서 끝단으로 갈수록 얇아지도록 적층 두께를 선정하여 이에 대한 해석을 반복 수행하였다. 여기서 해석 조건 중 강도비가 기준에 가까운 값을 갖는 조건을 최종 조건으로 선정하였다. 따라서 8 개의 구간으로 적층 되어있는 선단 및 후단 블레이드의 두께를 Table 5 와 같이 수정하였다. 이러한 설계가 경제성 향상과 안전성을 포함하고 있는지를 확인하기 위하여 정적, 모달 및 좌굴 해석을 수행하였다.

Table 6 Strength ratio of initial and re-layup blade (front blade)

	Initial	Re-layup
0RPM	0.01	0.13
100RPM	0.02	0.15
225RPM	0.06	0.21
250RPM	0.07	0.22

Table 7 Strength ratio of initial and re-layup blade (rear blade)

	Initial	Re-layup
0RPM	0.10	0.22
100RPM	0.11	0.22
225RPM	0.12	0.23
250RPM	0.13	0.24

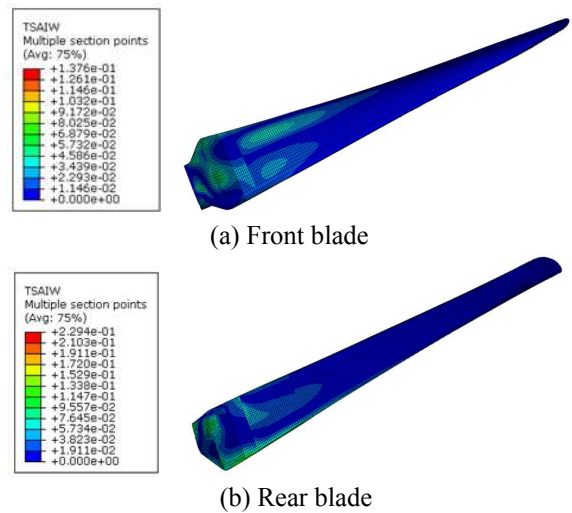


Fig. 7 Strength ratio of re-layup blade

3.3.1 정적 해석

Fig. 7 은 선정된 적층으로 해석을 수행하였을 경우, 각 블레이드의 강도비 분포를 나타낸 그림이다. 이에 따른 초기 조건의 강도비와 개선 후의 강도비를 비교한 것을 Table 6 및 7에서 나타내었다. 강도비가 초기보다 증가하였지만 안전성 기준에서 벗어나지 않았으므로 안전성 및 효율성을 모두 포함하고 있다고 판단할 수 있다. 또한 블레이드는 회전하는 물체이므로 실제와 같은 조건을 부여하기 위하여 블레이드의 회전에 따른 각속도를 부여하여 회전에 따른 블레이드의 강도비 역시 평가하였다. 회전속도가 높아질수록 강도비가 증가하여 안전성이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 블레이드 설계 시 회전상태도 고려해야 된다는 것을 알 수 있다.

Table 8 Natural frequencies of initial and re-layup front blade under rotating condition

	Initial (Hz)	Re-layup (Hz)
0RPM	20.34	19.50
	62.12	58.30
100RPM	20.44	19.60
	62.22	58.40
200RPM	20.76	19.93
	62.51	58.71
225RPM	20.86	20.05
	62.61	58.82
250RPM	20.98	20.17
	62.73	58.94

Table 9 Natural frequencies of initial and re-layup rear blade under rotating condition

	Initial (Hz)	Re-layup (Hz)
0RPM	9.08	8.70
	32.41	30.65
100RPM	9.33	8.95
	32.63	30.87
200RPM	10.04	9.67
	33.28	31.51
225RPM	10.28	9.91
	33.50	31.73
250RPM	10.54	10.18
	33.74	31.97

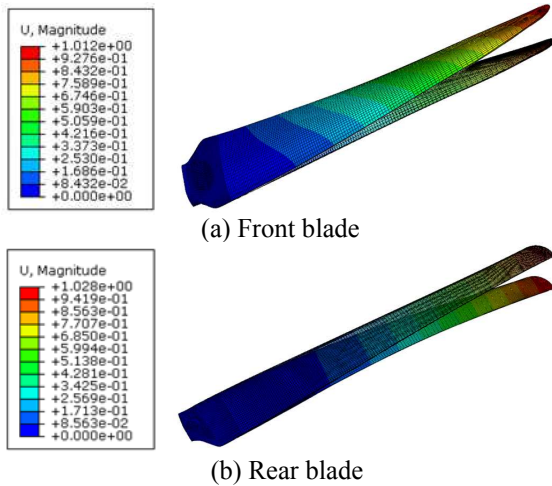
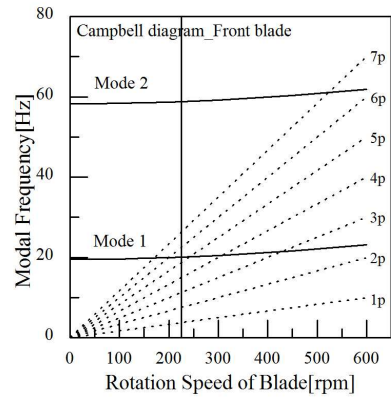


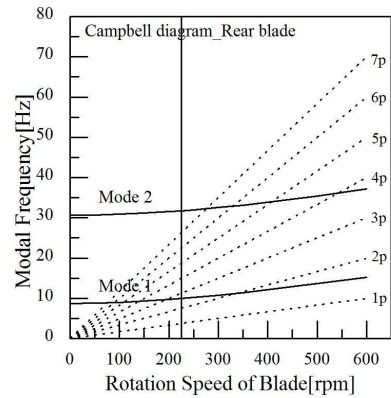
Fig. 8 1st mode shape of re-layup blade

3.3.2 모달 해석

회전구조물인 풍력발전기의 공진 가능성을 평가하기 위하여 블레이드의 회전에 따른 각속도를 부여하여 회전속도에 따른 고유진동수를 산출하였다. Fig. 8은 정지조건에서 각 블레이드의 1번째 모드 형상(Mode shape)을 나타낸 그림으로, 이에 대한



(a) Front blade



(b) Rear blade

Fig. 9 Campbell diagram

고유진동수는 Table 8 및 9에 정리하였다. 이 표는 0~250RPM까지 회전 속도를 부여하였을 경우의 진동수를 나타낸 것으로 회전속도가 증가하면서 주파수도 증가하는 것을 볼 수 있다.

일반적으로 Campbell diagram^(12,13)은 고유진동수와 외부진동수가 일치하는 부분이 있는지를 알아보는 지표로서 공진의 유무를 판단하는데 사용된다. 이를 이용하여 회전속도에 따른 고유진동수 변화와 블레이드 회전속도의 배수와와의 관계를 Campbell diagram으로 나타내었다(Fig. 9 참조). 본 연구의 대상인 블레이드는 3엽이므로 1 배수(1P) 및 3 배수(3P) 등에 대하여 공진 가능성이 검토되어야 한다. 즉, 제일 중요한 1 차 고유진동수의 경우 3 배수 선과 약 14% 이상의 차이를 가지므로 공진이 발생하지 않음을 알 수 있다.

3.3.3 좌굴 해석

구조물의 가로에 비해 길이가 긴 블레이드는 축 방향으로 가해진 압축력의 크기가 작은 경우 하중을 받는 봉과 같이 수축을 하게 되나, 압축력의 크기가 어느 값을 초과하면 가로 방향으로 국부변

Table 10 Comparison with initial and re-layup blade

		Weight (kg)	Strength ratio	Displacement (mm)
Front blade	Initial	4.85	0.06	1.67
	Re-layup	3.46	0.13	2.00
Rear blade	Initial	4.62	0.10	19.01
	Re-layup	3.67	0.22	20.11

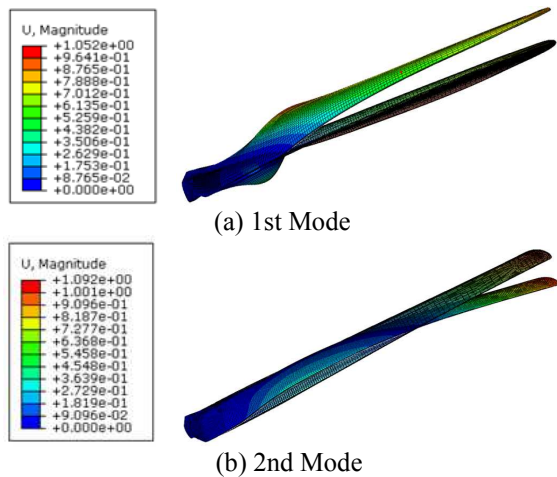


Fig. 10 Buckling mode shape of front blade

형이 발생한다. 이러한 좌굴(Buckling) 현상은 블레이드 특성상 발생할 수 있는 대변형 상황이 가장 심각한 파손의 결과를 가져온다. 그러므로 좌굴 현상을 예방하기 위해서 좌굴 해석(Buckling analysis)을 수행하였다. IEC 61400-2 에 안전계수가 정해져 있다.⁽³⁾ 블레이드의 좌굴 해석을 통하여 얻은 결과로써 Fig. 10 에서 좌굴 모드 형상을 나타내었다. 이에 대한 블레이드의 좌굴 계수(Buckling factor)는 선단 블레이드의 경우 -85.00, 후단 블레이드의 경우 -19.37 으로 안전성이 있는 것을 알 수 있다.

상기와 같이 개선된 적층에 대한 해석을 수행하여 블레이드의 안전성을 확인할 수 있는 인자를 Table 10 에 나타내었다. 개선된 후의 무게는 초기보다 선단 블레이드의 경우 40%, 후단 블레이드는 25%만큼 감소한 것을 볼 수 있으므로 경제성이 증가하였다고 보여진다. 한편, 개선 후의 강도비는 초기보다 증가하였지만 관련 규격의 안전성 기준 이내에 포함되므로 적절하다고 보여진다. 또한, 개선 후의 변위는 초기보다 증가하였지만 그 값이 미미하여 큰 영향은 없다고 보여진다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 풍력발전기용 블레이드를

대상으로 IEC 61400-2 에 의거한 구조 시험과 구조 해석을 수행하여 구조 안전성을 평가하였으며 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 구조 시험을 수행한 결과 설계 하중에 비해 선단 블레이드는 40.70 배, 후단 블레이드는 35.94 배 크기 때문에 안전성이 있다고 판단되었지만, 과잉 설계의 가능성이 보여지므로 구조 개선이 필요하다는 것을 검증하였다.

(2) 구조 해석을 통하여 선단 블레이드는 0.09 이하, 후단 블레이드는 0.17 이하의 강도비를 가지므로 관련 규격에서 요구하는 기준대비 필요 이상의 안전계수를 가짐이 확인되었다.

(3) 적층 설계 개선을 통해 수정된 결과 블레이드 중량의 경우, 선단 블레이드는 40%, 후단 블레이드는 25%만큼 감소하였다. 그리고 정적 해석을 통하여 0.22 이하의 강도비를 가진다는 것을 알 수 있었으며, 또한 모달 및 좌굴 해석을 통하여 공진 및 좌굴의 발생 가능성이 없음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국연구재단의 일반연구자지원사업 (NO. 2011-0007012)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

참고문헌

- (1) Hwang, B. S., 2009, "An Understanding of Advanced Wind Turbines," A-JIN, Korea.
- (2) Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M. and Lee, J. H., 2010, "Structural Design and Analysis for Small Wind Turbine Blade," *KSMTE*, Vol. 19, No. 2, pp. 288~294.
- (3) Kim, H. K., Lee, J. H., Chang, S. M. and Kang, K. W., 2010, "Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade," *KFMA*, Vol. 13, No. 4, pp. 51~57.
- (4) Kong, C. D., Park, H. B. and Choi, S. H., 2008, "A study on Structural Test Method of Blade for Small Wind Turbine System," *KSAS*, pp. 81~84.
- (5) Kim, H. K., Kim, T. S., Lee, J. H., Moon, B. Y. and Kang, K. W., 2011, "Full Scale Structural Testing of Small Wind Turbine Composite Blade," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1407~1413.
- (6) International Standard, IEC 61400-2, 2006, "Design Requirements for Small Wind Turbine," Second edition.
- (7) Kim, B. S., Kim, M. E. and Lee, Y. H., 2008, "Basic Configuration Design and Performance Analysis of a 100kW Wind Turbine Blade Using Blade Element

- Momentum Theory," *KOSME*, Vol. 32, No. 6, pp. 827~833.
- (8) Kim, J. H., Kim, B. S., Kim, J. G., Nam, C. D. and Lee, Y. H., 2003, "A Study on Flow Analysis and an Estimate of Performance for HAWT by CFD," *KOSME*, Vol. 27, No. 7, pp. 906~913.
- (9) International Standard, IEC 61400-23, 2001, "Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades," First edition.
- (10) ABAQUS version 6.10, Dassault Systemes Simulia, Inc. 2010.
- (11) Jang, Y. J., Jung, J. H., Lee, J. H. and Kang, K. W., 2011, "Structural Integrity Through Aerodynamic Analysis and Structural Test for Small Wind Turbine Composite Blade," *KFMA*, Vol. 15, No. 2, pp. 63~68.
- (12) Kim, S. M., Yang, I. C., Kim, D. G. and Kim, H. C., 2007, "Stress and Modal Analysis for the Rotor System of a Medical Centrifuge Using Finite Element Method," *KSPE*, Vol. 24, No. 6, pp. 78~85.
- (13) Kong, C. D., Park, H. B., Choi, S. H., Kim, S. H. and Seo, Y. T., 2008, "Structural Investigation of Composite Wind Turbine Blade Considering Fatigue Life," *KSAS*, pp. 330~333.