

풍력발전용 소형복합재 블레이드의 실규모 구조시험§

김홍관* · 김태성** · 이장호*** · 문병영**** · 강기원***†

* 군산대학교 기계공학부, ** LS Cable, *** 군산대학교 도시형풍력발전원천기술연구센터,
**** 군산대학교 조선공학과

Full Scale Structural Testing of Small Wind Turbine Composite Blade

Hong Kwan Kim*, Tae Seong Kim**, Jang Ho Lee***, Byung Young Moon****
and Ki Weon Kang***†

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

** Production Engineering Center, CAE Technology Group, LS Cable Ltd.

*** Break-through technology Center for Urban Wind Energy System, Kunsan Nat'l Univ.,

**** Dept. of Naval Architecture, Kunsan Nat'l Univ.

(Received April 18, 2011 ; Revised August 24, 2011 ; Accepted September 8, 2011)

Key Words : Wind Turbine(풍력발전기 블레이드), Composite material(복합재료), Full scale structural test (실규모 구조시험)

초록 : 소형풍력발전시스템의 복합재 블레이드에 대한 실규모 구조시험 및 이를 모사한 구조해석을 통하여 설계 타당성을 검증하였다. 먼저 IEC 61400-2 에 규정된 설계 요구조건의 만족을 위하여 정격 풍속 및 IEC 61400-2 Case H 의 최악 조건에 대한 구조해석을 수행하고 이를 통하여 적층 순서 및 적층 두께를 결정하였다. 또한 이러한 구조해석의 타당성 검증을 위하여 IEC 61400-23 에 따라 구조해석과 동일한 하중조건에서의 실규모 구조시험을 실시하였다. 이러한 실규모 구조시험을 통한 구한 블레이드의 하중-변위 선도 및 표면의 변형률 특성을 이용하여 블레이드의 구조적 안전성을 평가하였다.

Abstract: In this paper, the structural design for composite blade was performed and full scale structural test was conducted to verify the structural design and integrity of composite blade. Firstly, FE analysis was performed using commercial software ABAQUS under conditions of rated wind speed and Case H in IEC 61400-2. Lay-up sequence and ply thickness were designed based on FE results. And to verify the structural design, full scale structural test was conducted according to IEC 61400-2 under identical loading conditions of FE analysis. Finally, the force-deflection and local strain behavior of composite blade were evaluated.

1. 서 론

풍력 발전기의 여러 부품들 중에 블레이드는 풍력 에너지를 회전에너지로 변환시켜서 발전기를 구동하는 주요 부품으로서, 바람에 의한 공력하중에 대한 저항성 및 20 년 이상의 설계 수명 등의 요구조건을 만족시키기 위하여 비강도, 비강성, 내부식성 및 진동 특성이 우수한 복합 재료가 주로

사용되고 있다.^(1,2) 이러한 복합재료를 이용한 블레이드의 구조설계는 스파 및 표피 등의 블레이드 구성요소에 적용되는 복합재료의 적층 순서 (stacking sequence)를 결정하는 것으로써 주로 유한요소법(finite element method)을 이용한 구조 해석을 이용하여 수행되고 있다.^(3,4) 이러한 유한요소법을 이용한 구조설계는 설계변수의 변화를 고려한 블레이드의 구조적 건전성 평가가 가능하므로 설계 단계에서는 매우 유용한 방법이다. 그러나 이는 기본적으로 수치해석적 방법으로서 실제 복합재 블레이드의 구조적 건전성에 대한 정확한 평가는 곤란한 관계로 이의 해결을 위해서 소형풍력발전 시스템 국제 규격인 IEC 61400-2⁽⁵⁾에서는 블레이드

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, kwkang68@kunsan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 대한 구조시험을 요구하고 있다.

본 연구에서는 소형 복합재 블레이드의 구조적 건전성 평가를 위하여 기존 연구를 통하여 설계된 블레이드를 대상으로 실규모 구조시험시의 경계 및 하중 조건을 모사한 구조해석을 실시하였다. 또한 이러한 구조해석의 타당성 평가 및 IEC 61400-2 의 구조시험 요구조건에 대응하기 위해 플랩방향(flapwise)으로의 실 규모 구조시험(full scale structural testing) 을 수행하였다.

2. 해석 및 시험

본 연구의 대상이 되는 블레이드가 사용되는 소형 풍력발전기는 정격 풍속 10.5 m/s 및 정격 용량 1.5 kW 의 3엽 블레이드 소형 풍력발전기(3-bladed small wind turbine)이다. Table 1 은 이의 기본 설계사양을 나타낸 것이다.

2.1 Blade 구조설계 및 하중조건

본 연구의 블레이드는 DBL600E 삼축(triaxial) Glass/Epoxy 복합재료를 기본으로 블레이드 루트 부위에 폴리우레탄 폼을 이용하여 제작 되었으며 이들의 물성치는 Table 2 와 같다. 제조공법은 진공 성형 핸드 레이업(vacuum assisted hand layup)을 사용하였으며 상온에서 경화하였다.

실 규모 구조시험은 바람에 의해 하중을 받는 방향인 블레이드 플랩 방향으로 공력 설계에 의하여 산출된 공력하중 및 IEC 61400-2 의 극한 하중 조건인 Case H(parked wind loading)의 경우를 적용하여 수행되었다. 이 경우 작용 하중은 시험하중의 40, 60, 80 및 100 %의 하중을 가하였다. 또한 100 %의 하중을 가한 경우에도 블레이드에 파손이 발생하지 않는 경우에는 파손 시까지 단조 증가(monotonic increase) 하중을 부하하였다. 이와 같은 하중조건을 가지고 허브 부분을 제외한 블레이드 길이의 55 % 지점에 폭 ±25 mm 의 하중 부하

장치(load saddle)를 장착하여 하중을 가하였다. 이때 사용된 계측기는 부하하중 측정용 로드셀(loadcell) 및 블레이드의 변위를 측정하기 위한 LVDT(linear variable displacement transducer)를 사용하였다. 특히 2 개의 LVDT 는 하중 작용점과 블레이드의 끝단에 설치하였다. Fig. 1 은 이의 시험준비 상태를 나타낸 것이다. Fig. 2 는 변형을 측정을 위하여 스트레인 게이지 부착한 위치를 나타내며 전면부 및 후면부 모두 부착위치를 동일하게 하였다.

Table 2 DBL600E material properties

Longitudinal Elastic modulus	E_x	17.80 GPa
Transverse Elastic modulus	E_y	8.50 GPa
Shear modulus	G_{xy}	5.04 GPa
Longitudinal Poisson's ratio	ν_{xy}	0.25
Fiber Volume Fraction	V_f	36.5

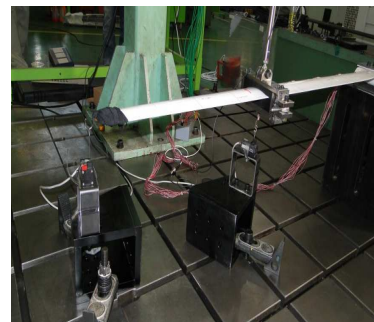


Fig. 1 Flapwise test condition

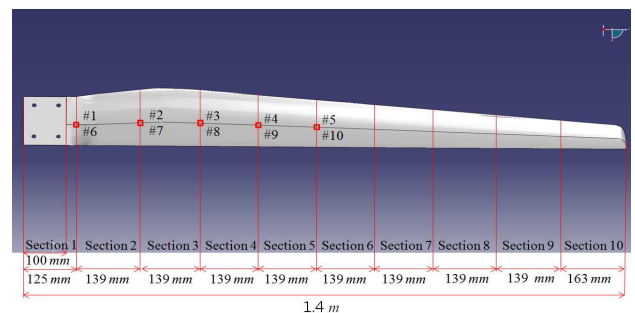


Fig. 2 Blade section & strain gage position



Fig. 3 Mesh of small wind turbine blade

Table 1 Wind turbine specification

Rated power	1.5 kW
Cut-in / Cut-out wind speed	3.0 m/s / 22.5 m/s
Rated wind speed	10.5 m/s
Rated rotational speed	300 rpm
Number of blade	3
Rotor length	1.42 m
Aerodynamic profile	NREL-S813

2.2 해석방법

초소형 풍력 발전기용 복합재료 블레이드가 주어진 설계 목적을 만족하는지 평가하기 위해 상용 소프트웨어인 ABAQUS⁽⁶⁾를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 전체 유한요소 모델은 쉘 요소(shell element)의 4 절점을 가진 S4R 과 3 절점의 S3R 을 사용되었으며 요소의 개수는 19035 개 이고, 절점(node)의 개수는 19074 개이다. Fig. 3 은 이의 메쉬 결과를 나타낸 것이다.

이와 같이 구성된 복합재 블레이드의 유한요소 모델을 이용하여 2.1 절의 실규모 구조시험 조건에 대한 구조해석을 실시하였다. 여기서 경계조건은 허브(hub) 부분의 X, Y, Z 방향 및 Y, Z 회전방향의 자유도를 구속하였다. 구조시험의 기계적 부하 조건의 모사를 위하여 허브 부분을 제외한 1.3 m 의 55 % 지점에 ±25 mm 폭을 주어 상부표피(upper skin) 에 절점하중으로 부여하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Blade 구조설계 및 하중조건

복합재 블레이드 구조설계의 건전성 및 신뢰성을 평가하기 위해서는 구조시험 하중조건하에서의 구조적 반응(structural response) 파악을 위한 구조

Table 3 Lay-up sequence and thickness of blade

Name	Section 1		Section 2		Section 3,4		Section 5,6,7		Section 8,9,10	
	t	θ	t	θ	t	θ	t	θ	t	θ
Foam	13	0								
Spar	0.6	0	0.6	0						
	0.6	0	0.6	0						
	0.6	0	0.6	0						
	0.6	0	0.6	0	0.6	0				
	0.6	0	0.6	0	0.6	0				
	0.6	0	0.6	0	0.6	0				
	0.6	0	0.6	0	0.6	0	0.6	0		
	0.6	-45	0.6	-45	0.6	-45	0.6	-45	0.6	-45
Skin	0.6	45	0.6	45	0.6	45	0.6	45	0.6	45
	0.6	0	0.6	0	0.6	0	0.6	0	0.6	0

Table 4 Test loading condition

ID	Class	Bending moment	Twisting moment
Bending I	$V_w = 22.4 \text{ m/s}$	89.1 Nm	17.1 Nm
Bending II	Case H	532.0 Nm	-

시험 모사 구조해석 및 동일 조건에서의 구조시험을 수행하여야 한다. 이의 수행을 위한 첫 번째 단계는 복합재 블레이드의 구조설계를 도입하고 이에 가해지는 하중조건을 설정하는 단계이다.

본 연구에서는 기존 연구⁽⁷⁾를 통하여 도출된 혼합법칙에 의한 기계적 물성치 및 구조설계 결과를 도입하였다. Table 3 은 이러한 구조설계의 적층 순서 및 적층 두께를 나타낸 것으로서 해석의 편이성 및 제작 공정의 현실을 고려하여 블레이드 길이를 10 개의 섹션으로 분할하여 각 섹션에 적층 순서 등을 적용하였다. 특히 블레이드의 경량화를 고려하여 끝단(tip) 부분으로 갈수록 두께가 얇아지도록 설계하였다.

또한 이러한 복합재 블레이드에 작용하는 하중 조건은 공력학적 해석 방법(aerodynamic analysis)⁽⁸⁾ 및 IEC 61400-2 의 단순 하중 계산(simple load calculation) 방법에 의하여 결정되었다.

공력학적 해석 방법은 Table 1 의 풍력발전기 사양에 대하여 블레이드 요소법(blade element method, BEM) 및 운동량 이론(momentum theory)을 접목한 공력해석을 통하여 블레이드에 가해지는 하중을 산출하였다. 또한 IEC 61400-2 에 따른 단순 하중 해석은 동 규격에 명시되어 있는 하중 케이스(load case)에 대하여 수행되었으며 이 중 최악조건에 해당하는 Case H (parked wind loading) 조건하에서 하중 해석을 수행하였다. Table 4 는 이러한 공력학적 해석 및 IEC 61400-2 Case H 에 따른 하중 해석 결과를 이용하여 블레이드 루트 부위에 작용하는 굽힘 및 비틀림 모멘트 값을 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 Bending I 및 Bending II 는 각각 공력학적 해석 및 IEC 61400-2 의 Case H 에 의한 결과를 의미한다. 표에서 볼 수 있듯이 공력학적 해석 결과에 비하여 IEC 61400-2 Case H 하중 조건의 경우가 5 배 이상의 굽힘 모멘트 결과가 산출되었다.

3.2 실규모 구조시험 모사 구조해석

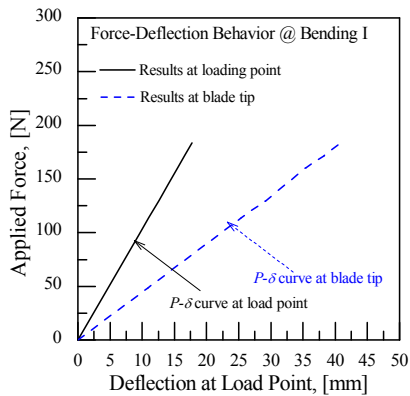
복합재 블레이드 구조설계의 건전성 및 이의 구조적 반응 평가를 위하여 Table 4 의 시험하중을 기준으로 40, 60, 80, 100 및 110 %까지 하중을 부과한 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 4 은 이의 결과로서 공력하중에 의한 Bending I 및 IEC 61400-2 Case H 에 따른 Bending II 에 대한 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 하중-변위 곡선은 하중 작용점 및 블레이드 끝단의 변위에 대하여 각각 나타내었다. 그림에서

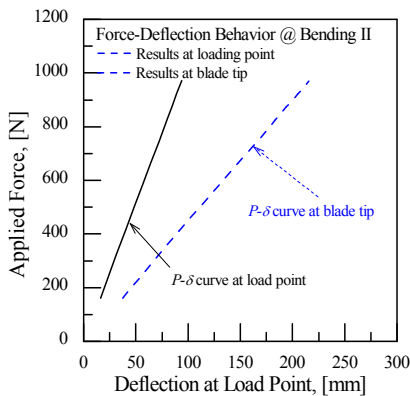
알 수 있듯이 블레이드의 하중-변위 곡선은 작용 하중의 크기와 관계없이 매우 선형적인 거동을 나타내고 있으며 이는 복합재료의 선형적인 하중-변형 거동에 기인한 것으로 판단된다. 또한 변위 측정 위치에 따른 하중-변위 선도의 경우 블레이드 끝단에서의 변위가 매우 크므로 하중-변위 곡선의 기울기가 변화하는 결과를 나타내었으며 하중조건이 상이한 경우에도 유사한 경향임이 확인되었다. 단, 작용하중이 보다 큰 Bending II 하중 조건인 경우 하중이 매우 큰 경우라도 선형적인 변형 거동을 보이고 있다. 이는 파손 해석(failure analysis)이 불가능한 유한요소해석의 특성에 기인하며 따라서 블레이드의 구조적 건전성 및 파손 저항성(failure resistance)를 평가하기 위해서는 이에 대한 실험 규모 구조시험이 요구됨을 알 수 있다.

한편, 복합재 블레이드는 면내 제원에 비하여 두께가 얇은 구조물로서 국부 좌굴(local buckling)의 위험성이 존재한다. 이의 확인을 위해 유한요소해석을 통하여 구한 블레이드 길이방향

(spanwise)의 국부 변형률(local strain)의 변화 거동을 Fig. 5에 제시하였다. 단, 여기서 최악하중 조건인 Bending II에 해당하는 국부 변형률만을 제시하였다. 국부 변형률 평가를 위해 Fig. 2의 스트레인 게이지 부착 위치와 동일하게 하였다. 그림에서 국부 변형률은 공력하중을 전면에서 받게 되는 전면부는 굽힘에 의한 인장(positive strain), 후면부는 이와 반대로 압축(negative strain)이 발생함을 알 수 있다. 또한 루트부에 최근 접한 위치 #1에서의 변형률 값이 가장 크며 전반적으로 블레이드 끝단으로 갈수록 작아지는 거동을 보이고 있다. 단, 일부의 경우 블레이드 길이에 따라 변형률이 비례하지는 않는 것으로 평가되었으며 이는 블레이드의 표면 형상에 기인한다고 판단된다. 이와 반면에 압축응력이 발생할 것으로 판단되는 후면부에서의 국부 변형률은 하중 작용점 근접 위치인 #9에서 최대가 되어 전면부와 상이한 거동이 나타나고 있으며 이는 흡입부(suction side) 및 압력부(pressure side)의 상이한 공력 형상에 기인한다고 판단된다.

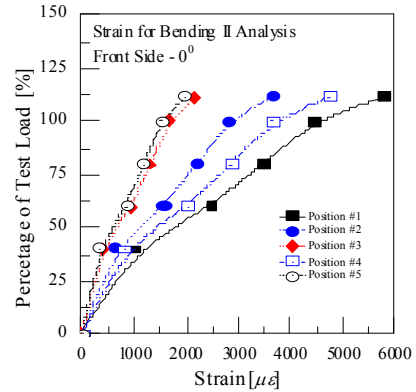


(a) Bending I

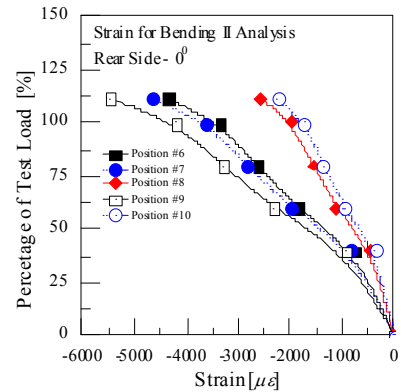


(b) Bending II

Fig. 4 Analyzed force deformation behavior



(a) Front Side



(b) Rear Side

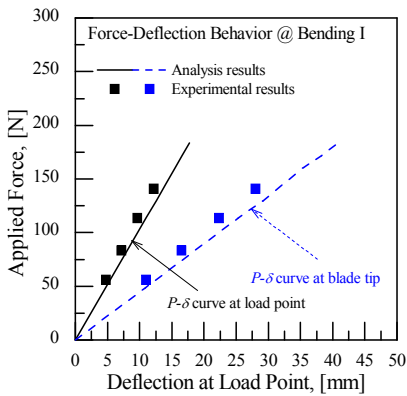
Fig. 5 Strain behavior analyzed by FEA

3.3 실규모 구조시험

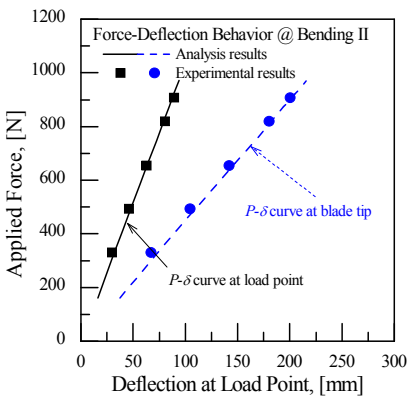
복합재 블레이드 구조설계의 정확성, 파괴 저항성 및 국부 변형률 거동 평가를 위하여 실규모 블레이드에 대한 구조시험을 실시하였다. Fig. 6 은 이를 통하여 구한 하중-변위 거동으로써 구조설계의 정확성 평가를 위하여 Fig. 4 의 유한요소해석 결과와 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 구조시험결과는 유한요소해석 결과와 잘 일치하고 있으며 이로부터 구조설계의 건전성을 확인할 수 있었다. 또한 최악 하중조건인 Bending II 의 경우 시험하중의 약 110 %에서 최초 파손이 발생하는 결과를 얻어 복합재 블레이드의 파괴 저항성을 확인할 수 있었다.

또한 국부 변형률을 통한 구조설계의 정확성 및 국부 변형 거동을 평가하기 위하여 국부 변형률 측정(해석) 위치별 변형률(블레이드 길이방향)을 Fig. 7 에 제시하였다. 그림에서 루트부 인접 위치인 위치 #1/#6 의 경우, 실험 및 해석 결과의 경향은 유사하나 절대값에서 상당한 차이가 나타나고

있으며 이는 해당 위치에서의 블레이드 공력형상이 매우 급격하게 변화하는 기하학적 제한조건과 구조시험 및 유한요소해석에 의한 변형률 자료의 획득 면적 차이 등이 중첩되어 발생한다고 판단된다. 또한 이러한 오차는 블레이드 루트부에서만 발생하고 그 외의 위치에서는 해석과 실험결과는 상당히 유사한 결과를 보이고 있다. 이로부터 구조설계시 적용된 유한요소모델의 정확성 및 블레이드 끝단으로 이동할수록 인

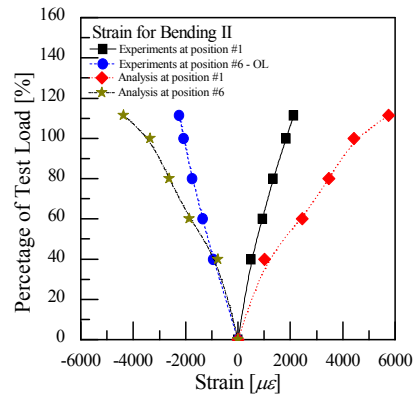


(a) Bending I

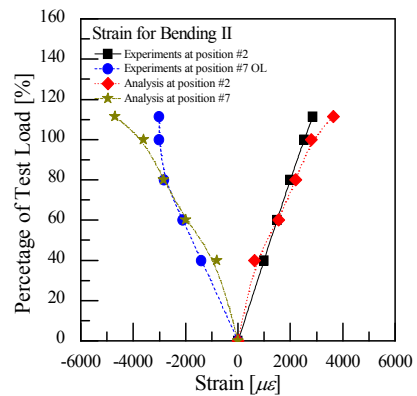


(b) Bending II

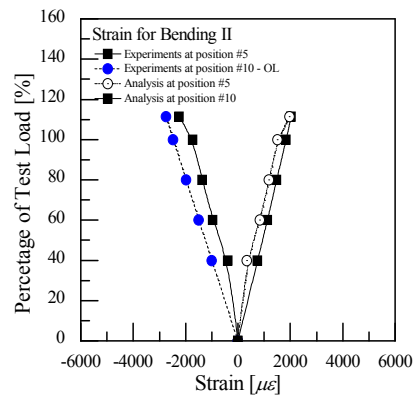
Fig. 6 Experimental and analyzed force deformation behavior



(a) Results at position #1/#6

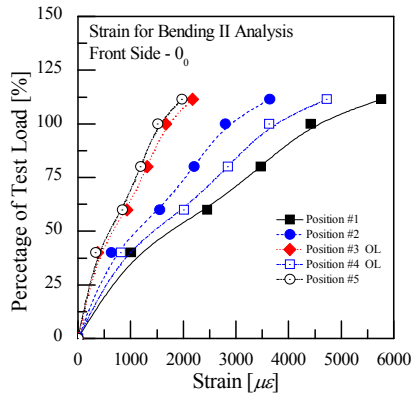


(b) Result at position #2/#7

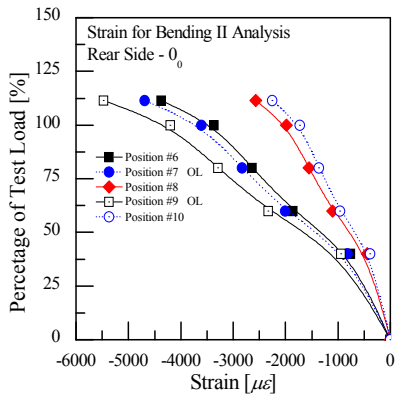


(c) Result at position#5/#10

Fig. 7 Test and analysis results (strain) under Bending II (IEC 61400-2 Case H) loading condition



(a) Front Side



(b) Rear Side

Fig. 8 Experimental strain behavior according to measuring position

장 변형률보다는 압축 변형률이 상대적으로 점차 증가하는 현상을 알 수 있다

이러한 측정 위치에 따른 국부 변형률의 변화 거동을 보다 면밀히 관찰하기 위하여 구조시험을 통하여 구한 변형률을 블레이드 전면부 및 후면부로 구분하여 Fig. 8에 제시하였다. 먼저 공력하중을 직접적으로 받는 전면부의 경우 모든 위치에서 인장 변형률이 발생하고 있으며 최대 변형률 발생 지점은 루트부가 아닌 하중작용점 인근임을 알 수 있으며 이러한 현상은 압축 변형률이 발생하는 후면부에서도 동일하였다. 이는 블레이드의 공력형상과 적층 순서에 기인한 것으로 판단된다.

한편 복합재 블레이드의 경우, 인장 파손과 더불어 가장 위험한 좌굴 파손의 상대적 발생 가능성을 평가하기 위하여 Fig. 8의 압축 변형률을 보다 면밀히 검토하였다. 결과 루트부와 하중 작용점 중간 부위에서 국부 좌굴 현상이 발생할 가능성이 타 위치보다 상대적으로 높은 것으로 판단된다. 이러한 현상은 루트부 후면부가 전면부에 비

하여 상대적으로 볼록한 형태의 공력 형상을 가지므로 국부좌굴 현상의 발생이 어려운 기하학적 특성에 기인한다고 판단된다. 단, 국부 변형률 크기 자체만으로 좌굴의 절대적 발생 가능성을 평가하는 것은 곤란하고 유한요소해석 등의 자료와 종합적으로 평가해야 하며 이를 위하여 기존 연구⁽⁷⁾와 함께 판단한 결과 좌굴 현상의 발생 가능성은 매우 낮은 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 소형 복합재 블레이드의 구조적 건전성 평가를 위하여 구조시험시의 경계 및 하중조건을 모사한 구조해석 및 실규모 구조시험을 실시하였다.

(1) 블레이드 요소법 및 운동량 이론을 접목한 공력해석을 통하여 블레이드에 가해지는 하중을 산출하였다. 또한 IEC 61400-2 규격에 따른 최악조건에서의 하중 해석을 수행하였다.

(2) 실규모 구조시험을 모사한 유한요소해석을 수행한 결과, 블레이드의 최대 인장 응력 및 압축 변형률은 각각 루트부 및 중간부위에서 발생하는 것으로 평가되었다.

(3) 복합재 블레이드에 대한 실규모 구조시험 결과, 좌굴과 관련된 압축변형률은 블레이드 중간부위에서 최대값으로 평가되었지만 실제 좌굴의 발생가능성은 매우 낮은 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009T100100576)

참고문헌

- (1) Dong, K.M., Jung, S.N. and Shin, C., 2001 "Performance Prediction and Structural Analysis of Counter-Rotating Wind Turbine Blade," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2001, Autumn, pp.708~711
- (2) Kang, C.S., Kim, D.M., and Jun, W.J, 1992, "Structural Design of FRP Wind Turbine Blade," *Joint Symposium of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.16, No 1, pp. 162~174
- (3) Lee., C.H, Park, J.M., Kim, T.W. and Park, J.S., 2002, "Structural Design and Analysis of a Composite Wind Turbine Blade," *Joint Symposium of the Korean*

- Society of Mechanical Engineers*, pp. 558-562
- (4) Cotrell, J., Musisal, W. and Hughes, S., 2006, "Necessity and Requirements of a Collaborative Effort to Develop a Large Wind Turbine Blade Test Facility in North America," Technical Report NREL/TP-500-38044,
- (5) International Standard, IEC 61400-2, 2006, "Design Requirements for Small Wind Turbines," Second edition
- (6) ABAQUS Version 6.8-1, Dassault Systems Simulia.Inc., 2008
- (7) Kim, H.K., Lee, J.H., Jang, S.E. and Kang, K.W., 2010, "Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade," *Journal of Korean Fluid Machinery Association*, Vol. 13, No. 4, pp. 51-57
- (8) PROPID Version 5.1, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007