

# 공력해석 및 구조시험을 통한 소형 복합재 블레이드의 구조 안전성 평가

장윤정\* · 정진환\*\* · 이장호\* · 강기원\*

## Structural Integrity through Aerodynamic Analysis and Structural Test for Small Wind Turbine Composite Blade

Yun Jung Jang\*, Jin Hwan Jeong\*\*, Jang Ho Lee\*, Ki Weon Kang\*

*Key Words* : Aerodynamic analysis(공력해석), Full scale structural testing(실규모 구조시험), Small wind turbine blade(소형풍력발전용 블레이드), Structural integrity(구조 안전성)

### ABSTRACT

This paper deals with the aerodynamic analysis and structural test under estimated loading condition for small composite blade, which is utilized in dual rotor wind turbine system. Firstly, the front and rear blades of dual rotor wind turbine system were modeled using reverse engineering method. And using finite volume method, the aerodynamic forces were analyzed at the rated and cutout wind speed to identify the pressure distribution on blades. And then, the full scale structural tests were conducted according to load and strength based methodology in IEC 61400-2 to identify the structural integrity of composite blade.

### 1. 서론

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. 복합재료를 이용한 블레이드의 구조설계는 각 부분별로 적용된 적층 방향 및 두께를 선정하는 것으로 주로 유한요소법(Finite element method)을 이용한 구조해석을 통하여 수행되고 있다. 그러나 구조해석은 기본적으로 수치해석적 방법이며 또한 해석 수행 시 일정 부분 도입된 가정으로 인하여 이의 정확성에 대한 검증이 요구된다. 이에 따라 소형 풍력발전시스템 관련 국제 규격인 IEC 61400-2<sup>(1)</sup>에서는 블레이드 구조설계의 정확성 및 구조적 건전성 검증을 위한 실규모 구조시험(Full scale structural test)을 요구하고 있다.<sup>(2)</sup>

블레이드에 대한 실규모 구조시험을 수행하기 위해서는 이에 작용하는 공력하중(Aerodynamic force)을 산출하고 이에 일정한 안전계수를 도입한 시험하중을 블레이드에 부

하하여야 한다. 여기서 원천 데이터에 해당되는 블레이드 공력 하중의 경우, 블레이드의 익형(Airfoil)에 대한 공력특성이 평가된 경우에는 블레이드 요소법(Blade element momentum theory, BEMT) 등을 이용하여 용이하게 산출될 수 있다. 그러나 신규 개발된 익형을 사용하는 블레이드는 적절한 공력 특성 데이터가 없으므로 신뢰성 있는 대규모 풍동(Wind tunnel) 실험을 통한 유동특성 및 성능특성 결과가 확보되어야 하나, 많은 비용과 시간이 소요되는 문제로 인해 쉽게 접근할 수 없다. 이의 해결을 위해 보다 효율적인 블레이드의 유동 및 성능특성 파악을 위하여 전산유체역학 기법을 이용한 다양한 수치해석적 연구가 시도되고 있다.<sup>(3-5)</sup> 그러나 이러한 연구들은 블레이드의 공력 특성 평가를 주된 목적으로 하고 있으며 공력해석을 통한 공력하중 산출과 이를 토대로 한 실규모 구조시험 및 블레이드의 구조적 건전성 평가는 매우 드문 상황이다.

본 논문에서는 양방향로터(Dual rotor) 소형풍력발전시스템에 사용되는 복합재 블레이드를 대상으로 이의 공력하중 해석 및 이를 이용한 구조시험을 실시하였다. 먼저 CFD 해석 코드를 사용하여 정격(Rated) 및 극한 풍속(Cut-out wind speed)하에서의 공력 및 설계하중을 결정하였다. 이러한 설계하중을 토대로 IEC 61400-2의 구조시험관련 요구조건에 따라 플랩방향(Flapwise)과 에지방향(Edgewise)에 대

\* 군산대학교 도시형풍력발전원기술센터

\*\* DACC wind

† 교신저자, E-mail : kwkang68@kunsan.ac.kr

한 실규모 구조시험을 수행하여 복합재 블레이드의 구조적 건전성을 평가하였다.

## 2. 해석 및 시험 방법

본 연구의 대상이 되는 복합재 블레이드는 정격풍속 10 m/s, 정격용량 2 kW의 3엽 블레이드 양방향 풍력발전기에 사용될 예정이다. Table 1은 이러한 요구 조건하에서 선단(Front) 및 후단 블레이드(Rear blade)의 사양을 나타낸 것이다.

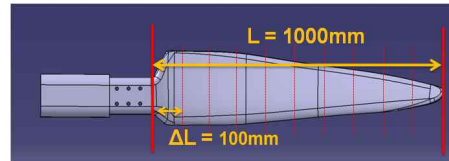
Table 1 Specification for blade wind turbine

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

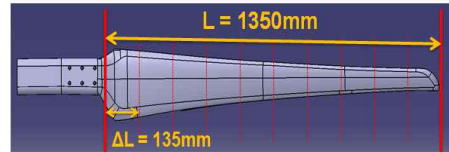
### 2.1 공력해석 방법

본 연구의 대상인 블레이드는 양방향로터 풍력발전용으로 신규 개발된 익형을 사용하고 있다. 이러한 블레이드의 공력 특성 및 구조시험 하중을 평가하기 위해서 상용 CFD 코드인 SC/Tetra<sup>(6)</sup>를 이용하여 공력해석을 수행하였다. 해석은 고정 및 회전 조건하에서, 정격 및 극한풍속에 대한 해석을 수행하였다.

블레이드의 허브 장착 형태는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 실제 장착 조건을 고려하여 각각 45° 및 39°로 선단 및 후단 블레이드를 부착하였다. 또한 구조시험 시 부하하중을 구하기 위하여 블레이드를 길이(Span) 방향으로 10등분하여 각 구간에 대한 모멘트를 구하였다.



(a) Front blade attached to a 45°



(b) Rear blade attached to a 39°

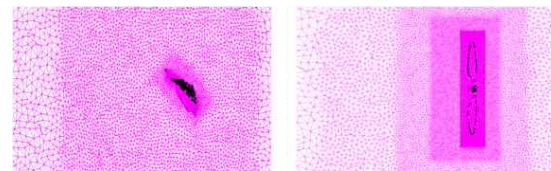
Fig. 1 Model geometry for aerodynamic analysis

블레이드 표면 형상은 블레이드 형상 CAD 데이터에서 surface 데이터를 입력 받아 생성하였으며 해석 정확도를 높이기 위하여 해석형상 주변에 0.1 mm의 두께를 가진 프리즘 레이어(Prism layer)를 3겹 넣었다. 격자 개수와 mesh 사이즈는 Table 2에 제시되어 있으며, Fig. 2에 격자 생성 상태를 제시하였다.

Table 2 Mesh generation

Condition	Blade	# of grid(millions)	Mesh size(m)
Fixed condition	Front blade	13.03	0.0039~1
	Rear blade	9.93	
Rotating condition	Front blade	27.88	0.0078~1
	Rear blade	37.77	

단, 본 연구의 대상은 양방향로터 풍력발전기이므로 이의 작동 시 선단 및 후단블레이드는 서로에게 영향을 미치지만 본 해석은 발전기에 대한 유동의 변화를 보는 것이 아니라 각각 블레이드에 미치는 하중을 얻는 것이 목적이므로 선단 블레이드와 후단블레이드에 대해 개별적 해석을 수행하였다.

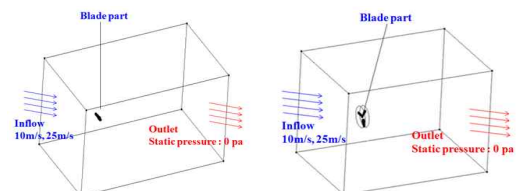


(a) Fixed condition

(b) Rotating condition

Fig. 2 Grid system

공력 해석은 정상상태(Steady state) 조건하에서 수행하였으며 이에 사용된 난류모델은 SST(Shear stress transport)  $k-\omega$  이다. Fig. 3은 고정 및 회전상태에서의 해석 조건을 나타낸 것으로써, 고정 및 회전 상태 모두 입구영역에는 10 m/s 와 25 m/s의 강제유동 조건을 주었고, 출구영역에는 정압(Static pressure) 조건을 부여하였다. 유동구간



(a) Fixed condition

(b) Rotating condition

Fig. 3 Boundary condition

의 물성은 상온에서의 비압축성 공기의 물성으로 밀도와 점성도는 1.206 kg/m<sup>3</sup>, 1.83x10<sup>-5</sup> kg/m · s로 지정하였다.

### 2.2 구조시험 방법

블레이드의 구조적 건전성 평가를 위한 구조시험은 산출

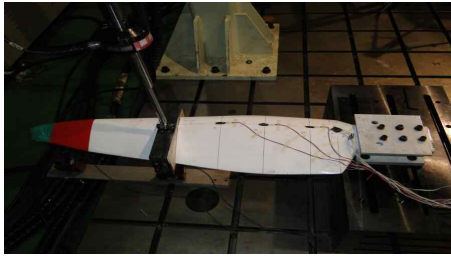


Fig. 4 Test setup in flapwise condition

된 공력하중을 기반으로 하여 IEC 61400-2의 규정된 절차에 따라 플랩 및 에지방향에 대하여 수행하였다. 이 때 하중은 하중 기반(Load based method) 및 강도 기반(Strength based method)에 따라 가하였다. 또한 블레이드의 루트(Root)를 고정시킨 상태에서 루트부분을 제외한 블레이드 길이의 55% 지점에 폭  $\pm 25$  mm의 하중부하장치를 장착하여 하중을 가하였다. 이 때 사용된 계측기는 부하하중 측정용 로드셀(Loadcell) 및 블레이드의 변위를 측정하기 위한 LVDT(Linear variable displacement transducer)이다. 여기서 2개의 LVDT는 하중 작용점>Loading point)과 블레이드의 끝단(Tip)에 설치하였다. Fig. 4는 플랩방향의 시험 준비를 마친 상태를 나타낸 것이다. 구조시험을 통하여 하중-시간 곡선과 하중 작용점 및 블레이드 끝단에 대한 변위-시간 곡선을 얻을 수 있다. 그러므로 두 곡선을 통하여 하중-변위 곡선을 도출할 수 있고, 최대파손하중을 얻을 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 공력해석

Fig. 5는 고정 상태에서 25 m/s의 극한풍속을 가했을 때, 선단 및 후단 블레이드의 압력 분포(Pressure distribution)를 나타낸 것으로서, 회전방향이 서로 반대인 선단 및 후단 블레이드의 압력분포의 특성을 잘 나타내고 있다. 이러한 블레이드에 가해지는 압력분포를 이용하면 정격 및 극한풍속 조건을 모사한 구조시험 시 부하해야 하는 시험하중(Test load)을 산출 할 수 있다. 이러한 압력분포를 이용한 시험하중 산출에는 식 (1)을 사용하였다.

$$M_i = \sum_{j=1}^{10} m_j - \sum_{j=1}^i m_j \quad (i, j = 1, 2, 3 \dots 10) \quad (1)$$

여기서  $m_j$ 는 각 구간에서의 모멘트이며  $M_i$ 는 블레이드 길이에 따른 모멘트를 나타낸다.

먼저 루트부위를 제외한 블레이드를 10개 구간(Segment)으로 분할한 후, 블레이드 전체에 작용하는 압력으로 인한 모멘트의 총합과 각 구간별 압력에 의한 모멘트를 이용하면 Fig. 6 및 7과 같이 블레이드 길이에 따른 모멘트의 변화량을

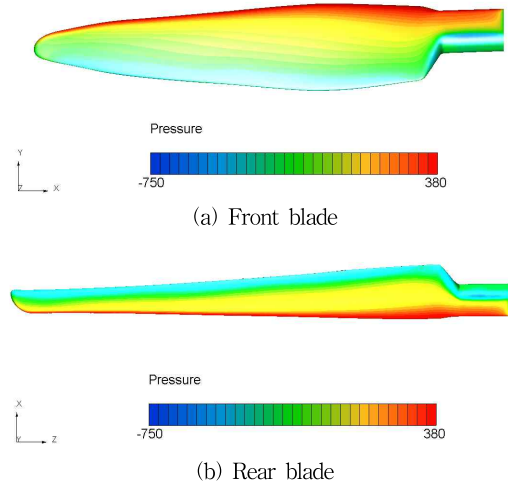


Fig. 5 Pressure distribution at fixed condition and  $v=25$ m/s

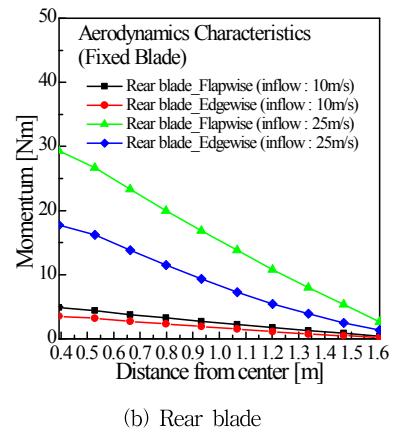
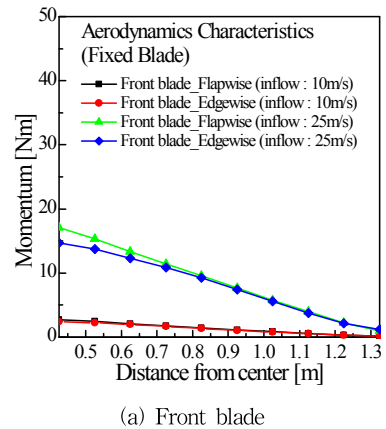
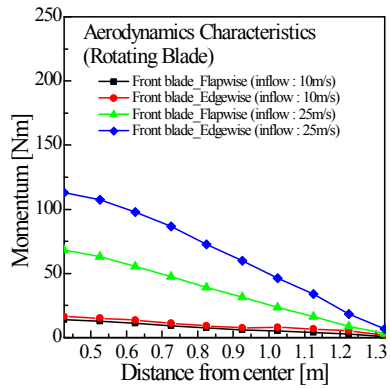
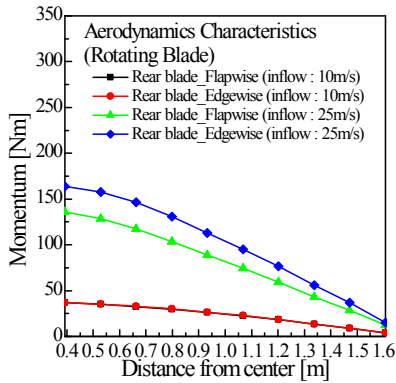


Fig. 6 Moment curve of fixed condition

계산할 수 있다. Fig. 6은 고정 상태에서 선단 및 후단 블레이드의 플랩 및 에지방향 모멘트를 풍속별로 나타낸 것이며 Fig. 7은 회전상태에서의 선단 및 후단 블레이드에 작용하는 플랩 및 에지방향의 모멘트를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 고정 조건하에서는 후단 블레이드에 가해지는 모멘트의 크기가 선단 블레이드의 모멘트보다 큼을 알 수 있으며 이



(a) Front blade



(b) Rear blade

Fig. 7 Moment curve of rotating condition

Table 3 Maximum moment by blade condition

Condition	Blade & velocity	Flapwise moment(Nm)	Edgewise moment(Nm)
Fixed	Front 10m/s	2.73	2.42
	Front 25m/s	17.05	14.72
	Rear 10m/s	4.88	3.47
	Rear 25m/s	29.34	17.73
Rotating	Front 10m/s	13.78	16.28
	<b>Front 25m/s</b>	<b>68.17</b>	<b>113.15</b>
	Rear 10m/s	36.67	36.64
	<b>Rear 25m/s</b>	<b>135.86</b>	<b>163.84</b>

러한 경향은 플랩 및 에지방향 모두가 나타나고 있다.

또한 회전 조건하에서도 선단 블레이드의 모멘트보다 후단 블레이드에 가해지는 모멘트의 양이 큼을 알 수 있다. 그러나 회전 조건하에서 플랩 및 에지방향 모멘트를 비교하면 고정 조건의 경우와는 반대로 에지방향 모멘트가 상당히 큰 경향을 보이고 있으며 이러한 현상은 블레이드의 회전으로 인한 토크(Torque)때문인 것으로 판단된다.

Table 3은 이러한 경향을 보다 면밀히 검토하기 위하여 각 조건별 최대 모멘트의 크기를 정리한 것으로서, 플랩방향의 선단블레이드는 68.17 N·m, 후단블레이드는 135.86 N·m의

Table 4 Moment and load applied to the test

Blade	Direction	Length(m)	Moment(Nm)	Load(N)
Front blade	Flapwise	0.545	74.99	137.59
	Edgewise	0.545	124.47	228.39
Rear blade	Flapwise	0.737	149.45	202.79
	Edgewise	0.737	180.23	244.54

Table 5 Test load for load based method at front blade

Blade	%	Load(N)	
		Flapwise	Edgewise
Front blade	40	55.03	91.35
	60	82.55	137.03
	80	110.07	182.71
	100	137.59	228.39

모멘트를 가지고, 에지방향의 선단블레이드는 113.15 N·m, 후단블레이드는 163.84 N·m를 가진다. 즉, 회전상태인 블레이드에 25 m/s의 극한 속도를 가했을 때의 모멘트가 가장 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 구조시험

극한풍속인 25 m/s의 조건에서 블레이드가 바람에 의한 하중을 직접적으로 받는 플랩방향과 회전에 의한 하중을 받는 에지방향에 대하여 수행하였다. 루트 부분을 제외한 블레이드 길이의 55% 지점에 ±25 mm 폭의 하중부하장치를 장착하고 하중을 가하였다. 이때의 하중은 공력해석을 통해 구한 최대 모멘트에 안전계수 및 하중 부하점의 모멘트 암(Moment arm)을 고려하여 산출하였으며 Table 4는 이를 정리한 것이다. 이와 같은 하중 조건을 가지고 블레이드에 Fig. 8에서 보는 바와 같이 하중 기반 방법에 따라 시험 하중의 40, 60, 80 및 100%까지 하중을 작용한 후 변위-시간 곡선을 통하여 블레이드의 파손 유무를 관찰하였다. 이 때 하중 부하속도는 2 N/s를 유지하였으며 각 하중레벨에서 하중의 유지시간은 IEC 61400-23<sup>(7)</sup>에 따라 10초를 유지하였다. 파손이 발생하지 않은 경우 제하(Unloading) 후 강도 기반 방법에 따라 파손 시까지 하중을 작용하였다.

#### 3.2.1 선단블레이드

하중 기반 방법에 따른 구조시험은 Table 5의 조건에 의해 수행되고, 이의 실험을 통해 얻은 Fig. 8의 변위-시간 곡선으로 설계하중의 100% 수준까지 부여하여도 파손이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 최대파손하중 평가를 위하여 강도 기반 방법에 따른 구조시험을 통하여 플랩방향에 대한 하중-변위 곡선을 얻었다(Fig. 9 (a) 참조). 이때의 곡선에서 하중이 계속 증가하다가 약 5,600 N에서 갑작스럽게 하중

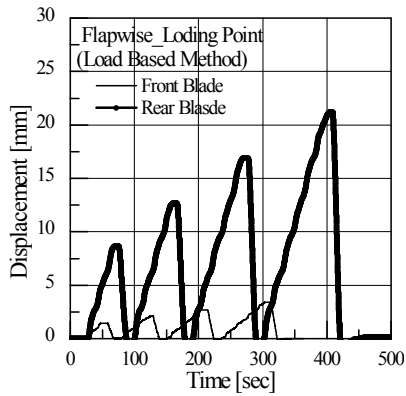
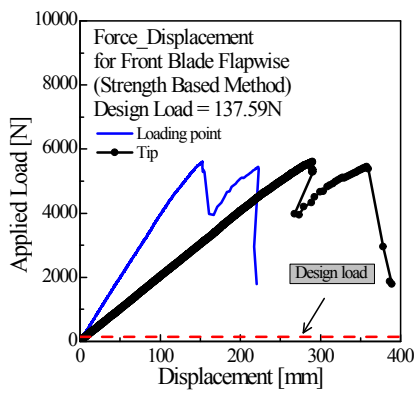
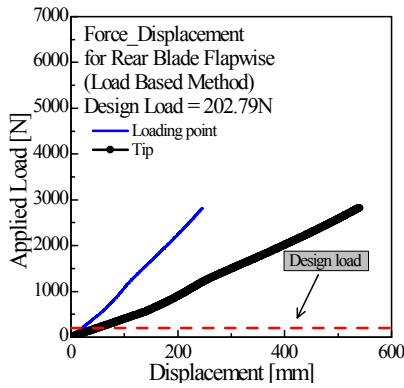


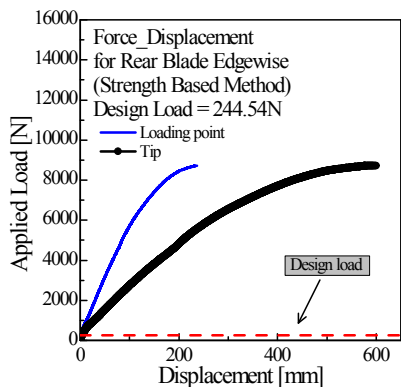
Fig. 8 Displacement under load based method



(a) Flapwise of front blade



(b) Flapwise of rear blade



(c) Edgewise of rear blade

Fig. 9  $\sigma$ - $\delta$  curve by Strength based method test

Table 6 Test load for load based method at rear blade

Blade	%	Load(N)	
		Flapwise	Edgewise
Rear blade	40	81.11	97.81
	60	121.67	146.72
	80	162.23	195.63
	100	202.79	244.54

Table 7 Comparison with design load and failure load

Name	Direction	Design load(N)	Failure load(N)	%
Front blade	Flapwise	137.59	5,600.54	4,070.45
	Edgewise	228.39	>288.39*	-
Rear blade	Flapwise	202.79	2,821.28**	1,391.23
	Edgewise	244.54	8,765.90	3,584.64

\* : Load based method 에 의한 시험만 수행

\*\* : 변위 계지 측정 범위 초과



(a) Flapwise of front blade



(b) Edgewise of rear blade

Fig. 10 Fatigue condition

이 저하되는 팝인(Pop-in) 현상이 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 블레이드에 손상이 발생했다는 것을 알려주며 Fig. 10(a)에서 선단 블레이드의 파손 상태를 확인할 수 있다. 따라서 Table 7에 나타냈듯이 선단블레이드의 파손하중은 설계하중의 4,000%로 구조적 안전성이 있다고 판단된다. 이 연구에서 구조시험은 플랩방향과 에지방향에 대한 시험을 수행하기로 하였으나 시험재료의 부족으로 선단블레이드의 에지방향은 하중 기반 방법에 따른 구조시험만 수행하였다.

### 3.2.2 후단블레이드

하중 기반 방법에 따른 구조시험은 Table 6의 조건에 의해 수행되었고, 선단블레이드와 마찬가지로 설계 하중의 100 % 수준까지 부여하여도 파손이 발생하지 않았다. 또한 최대파손하중 평가를 위한 강도 기반 방법 즉, 하중을 블레이드 파손 시까지 단조증가(Monotonic increase)시킨 경우, 플랩 및 에지방향에 대한 하중-변위 곡선을 Fig. 9(b) 및 (c)에 제시하였다. 플랩방향의 하중-변위 곡선인 Fig. 9(b)를 보면 구조물 내부에 손상이 발생할 경우 하중지지능력(Load bearing capacity)이 저하되어 하중이 순간적으로 저하되는 현상인 팝인이 발생하지 않음을 알 수 있으며 이로부터 LVDT의 측정 범위 초과로 인하여 시험을 중지한 2,812N의 하중에서도 블레이드 내부에 특별한 손상이 발생하지 않는다고 판단할 수 있다. 그리고 에지방향의 하중-변위 곡선을 나타낸 Fig. 9(c)를 살펴보면 플랩방향과 유사하게 하중이 지속적으로 증가하여도 팝인 현상이 발생하지 않고 있으며 단, 작용하중이 약 8,000 N 이상일 경우에는 이에 비선형 특성이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이로부터 약 8,000 N 이상에서 블레이드 내부에 손상 발생 가능성이 농후하다고 판단되며 설계하중과 파손하중의 비를 나타낸 Table 7에서 볼 수 있듯이 3,500 %로의 설계 여유를 가짐이 확인되었다. 또한, 이때의 후단블레이드의 파손 상태를 Fig. 10(b)에서 타나낸다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 SC/Tetra를 이용한 공력해석을 통해 얻은 설계하중을 부여한 소형 풍력발전용 블레이드의 구조시험을 IEC 61400-2의 요구 조건에 의하여 수행하였으며 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 공력해석을 통하여 회전상태에서의 25 m/s의 극한풍속 일 때 최대모멘트를 가짐을 알 수 있었고, 이 때 선단블레이드의 플랩방향은 68.17 N·m, 에지방향은 113.15 N·m의 모멘트를 가지고, 후단블레이드의 플랩방향은 135.86 N·m, 에지방향은 163.84 N·m의 모멘트를 가짐을 알 수 있었다.

2) 공력해석을 통해 얻은 하중을 가한 블레이드 구조시험 결과, 플랩방향과 에지방향에 대한 설계하중에서 블레이드에 손상이 발생하지 않았다. 또한 최대지지하중에 따른 시험을 수행하였을 때 선단블레이드의 플랩방향은 약 4,000 %, 후단블레이드의 플랩방향은 약 1,300 %, 에지방향은 약 3,500 %의 설계 여유를 가짐이 확인되었다.

## 후 기

본 논문은 2011년도 한국에너지기술평가원(No. 2009T100100576) 및 한국연구재단의 일반연구자지원사업(No. 2011-0007012)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

## 참고문헌

- (1) International Standard, IEC 61400-2, 2006, "Design requirements for small wind turbine," Second edition.
- (2) 김홍관, 이장호, 장세명, 강기원, 2010, "1.5kW급 풍력발전기용 블레이드의 구조해석 및 구조시험," 유체기계저널, 제13권, Vol. 4, pp. 51~57.
- (3) 김범석, 음학진, 원종범, 김만응, 2008, "난류모델 변화에 따른 수평축 풍력터빈 유동해석 및 출력성능 예측," 대한기계학회 2008년도 에너지 및 동력공학 부문 춘계학술대회 논문집, pp. 1~239.
- (4) 김정환, 김범석, 김진구, 남청도, 이영호, 2003, "CFD에 의한 수평축 풍력발전용 터빈의 유동해석 및 성능예측에 관한 연구," 한국마린엔지니어링학회지, 제27권, Vol. 7, pp. 906~913.
- (5) 이준용, 최낙준, 윤한용, 김일수, 최영도, 2010, "도시지역에 적합한 1kW급 수평축 풍력터빈 설계 및 유동해석," 유체기계공업학회 2010 유체기계 연구개발 발표회, pp. 472~473.
- (6) SC/Tetra(version 8), User's Guide, Soft-ware Cradle Co., Ltd.
- (7) International Standard, IEC 61400-23, 2001, "Full-scale structural testing of rotor blades," First edition.