

## IEC1400-1 규격을 고려한 중형 수평축 풍력발전용 회전날개의 설계개선 연구

공창덕\* · 정석훈\* · 장병섭\* · 방조혁\*

### Design Improvement on Wind Turbine Blade of Medium Scale HAWT by Considering IEC 1400-1 Specification

C. D. Kong\* · S. H. Jeong\* · B. S. Jang\* · J. H. Bang\*

#### ABSTRACT

Because the previous design procedure for the composite wind turbine blade structure using trial and error method takes long time, a improved design procedure by using the program based on classical laminate theory was proposed to reduce the inefficient element. According to the improved design procedure, limitation of strains, stresses and displacements specified by international standard specification IEC1400-1 for the composite wind turbine blade were applied to sizing the structural configuration by using the rule of mixture and the principal stress design technique with a simplified turbine blade. Structural safety for strength and buckling stability was confirmed by the developed analysis program based on the laminate theory to minimize the design procedure. After modifying the preliminary design result with additional structural components such as skin, foam sandwich and mounting joints, stresses, strains, displacements, natural frequency, buckling load and fatigue life were analyzed by the finite element method. Finally these results were confirmed by comparing with IEC1400-1 specification.

#### 초 록

풍력 터빈회전날개의 설계시 구조적 형상을 결정하는 예비설계 단계에서 종전에는 여러 가지 다양한 경우의 설계를 수행하여 이중 적합한 경우를 채택하는 시행착오 방법은 많은 설계시간을 요하였으나, 본 연구에서는 이 같은 설계시의 비효율적 요소를 배제하고자 적층판 이론을 기초로 한 설계 프로그램을 이용하는 설계기법을 개발함으로써 설계절차를 개선하였다. 개선된 설계절차에 따라 국제표준 설계규격 IEC1400-1에서 규정한 각 경우의 하중해석과 응력, 변형을 및 변형한계를 설정한 후, 단순화한 복합재 회전날개 구조에 혼합법칙과 주 응력 설계기법을 이용하여 복합재 구조의 형상을 정하였다. 설계된 구조는 본 연구를 통해 개발된 적층판 이론을 기초로 한 프로그램을 이용하여 강도 및 좌굴에 대한 구조의 안정성을 확인하여 상세설계 과정시 소요되는 시간을 최소화 하였다. 설계된 구조는 표피 등을 고려하여 수정 설계한 후 유한요소법을 이용하여 응력, 변형을, 변위, 고유진동수, 좌굴안정성, 피로수명 등을 해석하여 국제 표준규격의 만족 여부를 확인하였다.

\* 조선대학교 항공우주공학과 (Chosun Univeristy, Dept. of Aerospace Engineering)

## 1. 서 론

최근의 전 세계적인 에너지위기로 인하여 대체에너지 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 본 연구는 1997년 대체에너지개발의 일환으로 중형 풍력발전기에 대한 개발을 시도하였으며, 이중 풍력에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있는 핵심 부품인 회전날개의 개발을 수행 하여왔다. 풍력터빈 회전날개의 개발 역시 여타 항공우주 관련 구조물과 유사하게 초기설계단계부터 시제품제작 및 시험평가에 이르기까지 수많은 반복설계 및 수정작업을 통해 안전하면서도 경량의 구조물을 설계하여야한다.<sup>(1)</sup> 이러한 일련의 과정 중 설계 단계에서는 공력설계 후 결정되어진 공력형상을 기초로 하여 여러 가지 경우의 하중해석을 수행하고 이중 구조에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 경우의 하중을 대표적인 설계하중으로 선정한다. 그 다음, 이 설계하중을 기초로 재질은 선정하고 예비설계과정을 통해 구조적 형상을 결정한 다음 하중해석 시 고려한 여러 가지 경우의 하중에 대한 구조의 안정성 검토를 유한요소 해석을 통해 수행하게 된다. 설계단계에서 재질의 선택과 구조적 형상 분포의 결정과정은 제품의 제작용이성 및 무게를 결정하는 중요한 요소라 할 수 있다. 이전의 연구에서는 이 같은 구조적 형상을 결정할 때 여러 가지 경우의 형상을 해석하여, 그중 구조물의 중량, 응력의 집중상태나 변위, 변형률, 안전계수 등을 비교하여 설계요구조건에 적합한 경우를 채택하는 시행착오 방법을 사용하여 많은 설계시간이 소요되었었다. 따라서 본 연구에서는 이 같은 설계시의 비효율적 요소를 배제하기 위하여 고전 적층판 이론을 기초로 한 해석 프로그램을 이용하여 예비설계를 함으로서 설계시간을 단축시킬 수 있었다.<sup>(2)</sup> 예비설계단계에서 얻어진 결과는 상세설계 및 해석을 수행하기 위해 유한요소법이 이용되었다. 설계요구조건에 대한 적합성여부는 개발된 블레이드가 해외로 수출되어질 경우를 대비하여 국제규격인 IEC1400-1 및 이를 바탕으로 한 GL인증 규격을

기준으로 하였다. 상세 설계단계에서는 정적구조해석, 고유진동수 해석, 좌굴해석, 피로수명 해석 등을 수행하여 국제규격을 만족하는 구조형상을 얻을 수 있었다.

## 2. 국제규격에 명시된 제한조건

국제규격 GL에 명시된 풍력발전시스템의 등급은 설계풍속에 따라 I, II, III, IV, S의 5개 등급으로 구분되며, 등급에 따른 규정풍속은 Table 1과 같고, 본 연구의 목표는 등급 III이다. 국제규격에 명시된 제한 조건은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 블레이드에 해당하는 요구조건만을 고려하였으며 관련요구조건들은 다음과 같다.

### 2.1 제한조건

#### 2.1.1 변형의 제한

회전날개와 타워와의 최소간극 확보를 위하여 회전날개의 변형은 회전시 초기 간극의 50% 이내, 정지시 초기 간극의 5% 이내로 유지되어야 한다.

Table. 1 Type Class of WECS

Class	I	II	III	IV	S
$\overline{V}_E$	50m/s	42.5m/s	37.5m/s	30m/s	user
$\overline{V}_M$	10m/s	8.5m/s	7.5m/s	6m/s	define

where,  $\overline{V}_E$  : 50년에 한번 발생확률의 10분 평균 풍속  
 $\overline{V}_M$  : 연간 평균 풍속

#### 2.1.2 안전계수

구조해석에 적용되어야 할 안전계수는 일반적인 강도해석시 (1)식을 적용하고 피로해석시 (2)식을 적용하여야 한다.<sup>(3,4)</sup>

$$\gamma_{Mx} = \gamma_{Mo} \cdot IIC_{ix} \quad (1)$$

where,  $\gamma_{Mx}$  = 일반적인 강도해석 시 안전계수  
 $\gamma_{Mo} \approx 1.35$  일반적인 안전계수

- $C_{2a} = 1.5$  노화현상
- $C_{3a} = 1.1$  온도효과
- $C_{4a} = 1.1$  수작업(hand lay-up)복합재료
- $C_{5a} = 1.1$  후 경화 복합재료

$$\gamma_{Mb} = \gamma_{Mo} \cdot IIC_{ib} \quad (2)$$

where,  $C_{2b} = N^{\frac{1}{K}}$

- $N = 1 \times 10^8$  cycle
- $K = 10$  에폭시 모재 복합재료
- $C_{3b} = 1.1$  온도효과
- $C_{4b} = 1.1$  일 방향 섬유나 직조섬유를 사용한 복합재료
- $C_{5b} = 1.1$  후경화 없는 복합재료

### 2.1.3 변형률 제한

섬유방향에 설계하중이 가해질 때의 변형률은 다음과 같이 제한된다.

$$\text{인장변형률} \leq 3500 \mu\epsilon, \quad \text{압축변형률} \leq 2500 \mu\epsilon$$

### 2.1.4 응력제한

섬유방향의 응력이 표피에서 100MPa을 초과하여서는 안 된다.

## 3. 구조설계하중

본 연구에서는 국제규격에 명시된 하중조건<sup>(3,4)</sup>들을 모사하기 위하여 Table 2 와 같은 공력하중 조건을 고려하였다.

Table. 2 Aerodynamic Load Case

Load case	Wind condition	Order conditions	Remark
Case1	12.5 m/s	normal plus centrifugal load	rated wind speed
Case2	20 m/s	gust( $0^\circ \sim \pm 45^\circ$ )	max load in operation
Case3	25 m/s	gust( $0^\circ \sim \pm 45^\circ$ )	cut-out wind speed
Case4	55 m/s	storm	limit load

## 4. 예비설계

본 연구에서 사용한 예비설계 방법은 기본구조 형상을 선택한 다음, 형상을 단순화하여 회전날개 단면별 크기와 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 하중을 고려하여 해석을 수행하게 되며 이 같은 결과로 하중에 대하여 안전한 두께분포를 구하게 된다. 설계과정은 Fig 1과 같다.

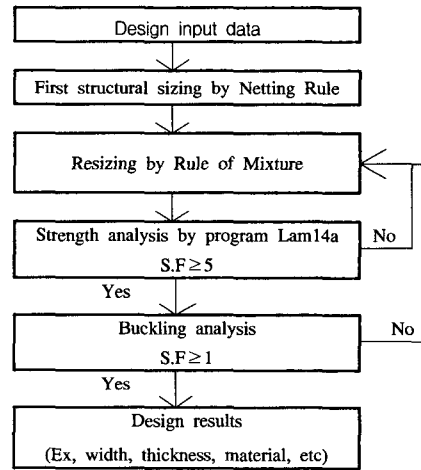


Fig. 1 Preliminary Design Proceeding for Composite Wind Turbine Blade

### 4.1 예비설계 시 적용할 단면 형상 및 하중

회전날개 구조의 단면형상은 Fig 2와 같이 표피(Skin), 스파(Spar), 웹(Web)으로 구성되어있다. 비틀림 하중을 주로 담당하는 표피에는  $\pm 45^\circ$ -GFRP를 사용하였으며 굽힘 하중을 담당하는 스파에는 하중방향으로 UD -GFRP를 사용하였으며 전단력을 담당하는 진후방의 웹에는  $\pm 45^\circ$ -GFRP와 Foam을 이용한 Foam sandwich구조를 적용하였으며 각 재료의 물성치는 Table 15에 표기하였다. 설계과정에 사용 할 공력설계 형상의 대표적인 단면은 Fig 2와 같다. 이 같은 개념설계 중 주요하중을 담당하는 주 스파(Main Spar)를 Fig 3과 같이 스파프렌지(Spar Flange)와 웹(Web)로 단순화하였으며 각 단면별 치수는 Table 3과 같다. 예비설계에 적용되는 하중은 가

장 큰 공력하중 경우인 25 m/s의 돌풍을 고려한 하중이며 작용방향은 Fig 3에 도시하였고 크기는 Table 4와 같다.

Table. 3 Sectional Dimensions of Blade for Preliminary Design

Station R	0.286	0.368	0.449	0.51	0.592	0.674	0.755	0.837
$b_f$ [mm]	1031	941	851	783	692	602	512	421
$b_w$ [mm]	803	661	526	465	363	273	214	158

Table. 4 Force and Moment Acting on Blade Section

Station	0.286	0.368	0.449	0.51	0.592	0.674	0.755	0.837
$F_z$ [kN]C.F	325.7	307.4	268.6	239.9	213.7	173.2	131.4	84.8
$F_y$ [kN] Shear force	90.4	82.8	77.0	71.3	65.1	57.2	44.2	31.1
$M_z$ [kN·m] Moment	1083.4	902.7	737.1	583.1	440.5	310.2	195.8	107.4

4.2 Netting Analysis에 의한 구조설계

Netting Analysis은 하중방향의 적층섬유만이 이 방향의 하중을 담당한다는 이론하에 설계를 수행하게 된다. 요구피로수명인 20년 이후의 E-glass/Epoxy 복합재료의 강도는 대략 초기강도의 20%정도로 저하되므로 안전계수 5를 고려하여 다음과 같은 조건을 만족하도록 설계하였다.<sup>(5)</sup>

4.2.1 프렌지 설계

스파프렌지 설계시 주요하중은 공력하중에 의한 모멘트와 원심하중이 되며 다음과 같은 식을 이용하여 기본구조 치수를 결정한다.

$$\sigma_x \text{ (actual stress)} \leq \sigma_x^* \text{ (allowable stress)} = \frac{X_{t,c}}{5}$$

$$\left| \frac{F_x}{A} + \frac{M_z(\pm y)}{I_z} \right| \leq \left| \frac{X_t}{5}, \frac{X_c}{5} \right| \quad (3)$$

where, A : Section Area

$X_t$  : Tension Strength

$X_c$  : Compressible Strength

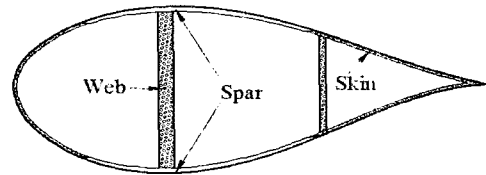


Fig. 2 Conceptual Sectional Configuration by Structural Design

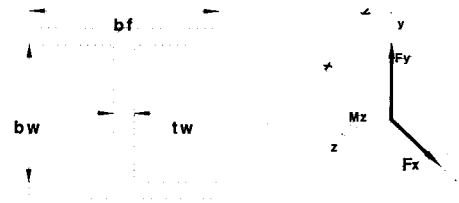


Fig. 3 Basic Configuration of Blade Main Spar and Forces Acting on Blade Section

4.2.2 웨브 설계

스파 웨브의 주요하중은 전단력으로 다음식을 이용하여 기본구조 치수를 결정한다.

$$\tau_{xy} = \frac{F_y}{A} \leq \tau_{xy}^* \quad (4)$$

where,  $\tau_{xy}$  : Actual stress

$\tau_{xy}^*$  : Allowable stress

4.3 Rule of Mixture에 의한 구조설계

혼합법칙(Rule of Mixture)에 의한 구조설계는 하중방향과 다른 방향으로 적층된 섬유도 원래 강도의 10%가 하중방향에 기여한다는 이론으로서 보다 경량화 된 구조설계결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 복합재료구조 설계에서는 하중의 연계효과(Coupling Effect)를 피하기 위해 QI (Quasi-Isotropic)설계가 일반적이나 보다 경량화를 위해 본 연구에서는 Netting Rule에 의한 설계 결과를 토대로 주 응력 방향으로 섬유를 적층 하는 PS(Principal Stress)설계를 수행하였으며 설계결과는 Table 5와 같다.

Table. 5 Conceptual Design Results for Spar

Station	Spar Flange	Spar Web
0.286R	( 0° ) <sub>14</sub>   s 16.24t	( ± 45° ) <sub>9</sub>   s 10.8t
0.368R	( 0° ) <sub>14</sub>   s 16.24t	( ± 45° ) <sub>9</sub>   s 10.8t
0.449R	( 0° ) <sub>15</sub>   s 17.4t	( ± 45° ) <sub>10</sub>   s 12t
0.51R	( 0° ) <sub>15</sub>   s 17.4t	( ± 45° ) <sub>10</sub>   s 12t
0.592R	( 0° ) <sub>15</sub>   s 17.4t	( ± 45° ) <sub>10</sub>   s 12t
0.674R	( 0° ) <sub>16</sub>   s 18.56t	( ± 45° ) <sub>12</sub>   s 14.4t
0.755R	( 0° ) <sub>15</sub>   s 17.4t	( ± 45° ) <sub>11</sub>   s 13.2t
0.837R	( 0° ) <sub>15</sub>   s 17.4t	( ± 45° ) <sub>11</sub>   s 13.2t

4.4 하중강도(Load Intensity)해석

PS 설계결과로 얻어진 적층판의 안전성여부를 검토하기 위하여 하중강도 해석을 수행하였으며 계산과정 및 순서는 다음과 같다.

4.4.1 스파프렌지의 하중강도(  $N_{xf}$  ,  $N_{xyf}$  )계산

스파 프렌지의 응력상태는 Fig 4와 같고 각각의 응력에 대한 수직 및 전단하중강도  $N_{xf}$ ,  $N_{xyf}$  를 계산한 결과는 Table 6과 같다.

$$N_{xf} = \sigma_{xf \text{ total}} \cdot t_f \tag{5}$$

$$N_{xyf} = \frac{F_y}{I_z} \cdot t_f \cdot \frac{b_w}{2} \cdot \int_0^{\frac{b_w}{2}} ds \cdot \frac{E_{xf}}{E_x} \tag{6}$$

$$= \frac{F_y}{I_z} \cdot t_f \cdot \frac{b_w}{2} \cdot \frac{b_f}{2} \cdot \frac{E_{xf}}{E_x}$$

where,  $E_{xf}$  : Individual Flange Modulus

$\overline{E_x}$  : Equivalent Isotropic Modulus

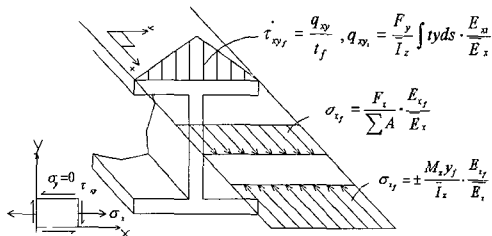


Fig. 4 Stresses Acting on Spar Flange

Table. 6 Load Intensity Distribution on Spar Flange

Station R	0.286	0.368	0.449	0.51	0.592	0.674	0.755	0.837
$N_{xf}$ (N/m)	-1141	-1278	-1478	-1439	-1590	-1733	-1651	-1506
$N_{xyf}$ (N/m)	55	62	72	76	89	104	102	97

4.4.2 스파 웹의 하중강도(  $N_{xw}$  ,  $N_{xyw}$  )

웹의 응력상태는 Fig 5와 같고 각각의 응력에 대한 하중강도  $N_{xw}$  ,  $N_{xyw}$  를 계산한 결과는 Table 7과 같다.

Table. 7 Load Intensity Distribution on Spar Web

Station R	0.286	0.368	0.449	0.51	0.592	0.674	0.755	0.837
$N_{xw}$ (N/E)	-98.7	-110.5	-132.6	-129.1	-142.6	-174.8	-162.9	-148.6
$N_{xyw}$ (N/E)	113.2	125.9	147	154.2	180.4	210.5	207.4	197.7

웹브가 받는 수직하중강도는 다음과 같다.

$$N_{xw} = \sigma_{xw \text{ total}} \cdot t_w \tag{7}$$

만약, 웹브가 스파의 모든 전단력을 받는다면, 웹브에서의 전단 하중강도는 다음과 같다.

$$N_{xyw} = 2 \times N_{xyf} + \frac{F_y}{I_z} \cdot t_w \cdot \frac{b_w^2}{8} \cdot \frac{E_{xw}}{E_x} \tag{8}$$

where,  $E_{xw}$  : Individual Web Modulus

$\overline{E_x}$  : Equivalent Isotropic Modulus

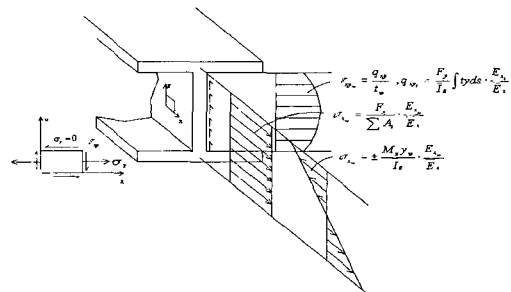


Fig. 5 Stress Acting on Web

4.4.3 강도해석결과

적층판 해석 프로그램을 이용한 구조해석결과는 Table 8과 같고, Table 9는 좌굴해석에 이용되는 골곡강성 항을 계산한 값이다.

Table. 8 Laminate Analysis Results by Lam14a

Station	RF(Spar Flange)		RF(Web)	
	1st Ply Failure	Last Ply Failure	1st Ply Failure	Last Ply Failure
0.286R	6.77	17.0	5.03	13.8
0.368R	6.05	15.2	4.50	12.4
0.449R	5.60	14.1	4.16	11.7
0.51R	5.75	14.5	4.28	11.4
0.592R	5.21	13.1	3.87	9.9
0.674R	5.10	12.9	3.79	10.0
0.755R	5.02	12.6	3.73	9.5
0.837R	5.50	13.9	4.09	10.0

4.5 좌굴해석

좌굴해석은 Table 9의 결과와 ESDU 80023<sup>(2)</sup>에 의해 좌굴 임계하중을 계산한 후 작용하중이 이 값을 초과하는지를 검토하여 안전율을 계산하였다.

Table. 9 Useful Derived Values for Buckling Analysis

Station	Flange		Web	
	$(D_{11}D_{22})^{0.5}$	$D_{12} + 2D_{66}$	$(D_{11}D_{22})^{0.5}$	$D_{12} + 2D_{66}$
0.286R	7.097E6	3.050E6	0.762E6	1.564E6
0.368R	7.097E6	3.050E6	0.762E6	1.564E6
0.449R	8.729E6	3.751E6	1.046E6	2.145E6
0.51R	8.729E6	3.751E6	1.046E6	2.145E6
0.592R	8.729E6	3.751E6	1.046E6	2.145E6
0.674R	1.059E7	4.552E6	1.807E6	3.707E6
0.755R	8.729E6	3.751E6	1.392E6	2.856E6
0.837R	8.729E6	3.751E6	1.392E6	2.856E6

4.5.1 스파 플렌지의 좌굴해석

스파 플렌지의 좌굴하중 상태는 Fig 4와 같고

다음 조건의 만족여부를 검토하였다.

$$N_{xf} \leq N_{x \text{ critical}} \quad (9)$$

$$N_{x \text{ critical}} = \frac{K_0(D_{11}D_{22})^{0.5}}{b^2} + \frac{C\pi^2(D_{12} + 2D_{66})}{b^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{b_f}{2}$$

여기서  $K_0$ 의 값은 ESDU 80023(참고)에 의해 계산되며 좌굴 임계하중에 대한 작용하중의 안전계수는 Table 10과 같다.

Table.10 Buckling Reduction Factor for Spar Flange

Station R	0.286	0.368	0.449	0.51	0.592	0.674	0.755	0.837
R.F.	1.3	1.4	1.8	2.2	2.5	3.7	4.4	7.2

4.5.2 스파 웹의 좌굴해석

웹의 좌굴상태는 Fig 5와 같은 하중상태를 고려하여 다음 조건의 만족여부를 검토하였다.

$$N_{xyw} \leq N_{xy \text{ critical}} \quad (11)$$

ESDU 80023<sup>(2)</sup>에서  $\frac{N_{xy \text{ critical}} a b}{(D_{11}D_{22})^{0.5}}$  값을 이용하여  $N_{xy \text{ critical}}$ 을 다음과 같이 계산하였다.

$$N_{xy \text{ critical}} = \frac{135 \cdot (D_{11}D_{22})^{0.5}}{a \cdot b} \quad (12)$$

Table. 11 Buckling Reduction Factor for Web

Station R	0.286	0.368	0.449	0.51	0.592	0.674	0.755	0.837
*	0.066	0.072	0.103	0.120	0.140	0.261	0.276	0.409
**	0.165	0.180	0.258	0.300	0.350	0.653	0.910	0.858

\* : R.F (S.S.B.C), \*\* : Modified B.R.F(Fixed B.C)

Table 11은 좌굴 임계하중에 대한 작용하중의 안전계수를 계산한 것으로서 전반적으로 좌굴강도를 만족하지 못함을 알 수 있다. 그러나 이 경우의 좌굴 임계하중은 모든 경계가 단순지지

된 경우로서 실제의 웹은 상변과 하변이 고정되며 개념 설계시에는 웹에 들어가는 폼(62.5t)을 고려하지 않았으므로 이때의 좌굴 임계하중은 이보다 상당히 클 것으로 판단된다. (보통의 금속재질인 경우 단순지지 조건을 고정조건으로 바꾸면 2.5 배정도 임계 하중이 증가함) 또한 장력장 설계이론에 의하면 전단 좌굴의 경우 압축 하중을 받는 방향으로 좌굴이 일어나더라도 인장을 받는 방향은 하중을 지지할 수 있기 때문에 최근 항공기 날개 구조물 등을 설계하는데 경량화를 위해 전단 좌굴을 일부 허용하는 설계가 이루어지고 있다.<sup>(6)</sup>

5. 상세구조해석

개념설계단계에서 안전함이 확인된 Table 5의 PS 설계 결과를 기본으로 적층두께 및 분포를 적용하여 상세구조해석을 수행하였다. 상세구조해석은 잘 알려진 상용 유한요소 해석프로그램인 NISA II<sup>(7)</sup>를 이용하였으며 복합재료의 파괴이론으로는 최대응력파괴이론<sup>(6)</sup>과 Tsai-Wu 파괴이론<sup>(8)</sup>이 적용되었다. 수행된 해석은 Table 2에 표시된 4가지 경우의 하중에 대한 선형정적해석 및 고유진동수해석, 좌굴해석, 피로수명해석 등이다. 해석결과는 다음과 같다.

5.1 선형정적해석결과

Table 14는 Table 2에 표시된 4가지 경우의 하중구조해석 결과를 비교한 것이며, 제한조건에 명시된 표면응력, 강도, 변형률, 변위 등의 모든 제한조건을 만족함을 알 수 있으며 Fig 6은 25m/s 돌풍하중을 고려한 하중상태에서의 응력 분포이다.

5.2 고유진동수해석 결과

고유진동수 해석은 회전날개의 운용 중 공진 여부를 검토하기 위해 수행되었으며, 3개의 회전날개를 가진 경우 1, 3, 6E.O.가 중요하다. 그림 12의 Campbell선도를 검토한 결과 운용회전

수 25rpm~35rpm 범위에서는 공진이 발생하지 않음을 확인하였으며, Fig 7은 첫번째 플랩(Flap) 모드의 고유진동수 해석 결과이다.

5.3 좌굴해석결과

좌굴해석은 상대적으로 좌굴에 취약한 압축을 받는 블레이드의 상면에 대하여 수행되었으며 전방 웹브를 기준으로 나누어 2가지 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Case 1은 전방웹을 기준으로 전연부위를 모델링한 것이며 Case 2는 후연부위를 모델링한 것이다. 이 같은 각각의 해석 모델에 대하여 단위하중을 적용하여 해석된 좌굴하중계수, 즉 임계좌굴하중은 Table 12와 같다.

Table. 12 Critical Buckling Load

Case	Case 1	Case 2
Critical Buckling Load	1.043E6 N	5.74E5 N

이 같은 임계좌굴 하중을 각각의 해석모델에 적용하여 선형정적해석을 수행하고, 이 결과를 최대 공력하중인 25m/s의 하중을 적용한 선형정적 해석결과와 비교하여 좌굴에 대한 안전성 검토하였다. 해석결과 후방웹이 상대적으로 좌굴에 취약함을 보였으나 두가지 경우 모두 좌굴에 안전함을 확인하였다.

Fig 8과 Fig 9는 각 해석 모델별 좌굴 모드 형상을 도시한 것이고 Table 13은 좌굴하중에 대한 안전율을 나타내었다.

Table. 13 Comparison of Stress Analysis between Critical Buckling Load and 25m/s Load

Case	Buckling Rocation	Buckling Stress	Max. stress at Max. load	S.F.
Case 1	0.72 r/R	355.5MPa	61MPa	5.83
Case 2	0.76 r/R	133.4MPa	68.03MPa	1.96

#### 5.4 피로해석 결과

일반적으로 풍력발전용 회전날개의 수명은 20년 이상으로서 약  $1 \times 10^8$  cycle의 반복하중이 적용된다. 이 기간 동안의 강도는 E-glass/Epoxy에 대한 S-N선도<sup>(5)</sup>에서 계산되며, 초기강도의 20%로 저하됨을 알 수 있다. 즉 20년 이상의 피로수명을 확보하기 위해서는 최소한 안전계수 5 이상이 되어야 한다. 그러나, 여기에 온도효과, 경화조건 등을 고려하여 국제규격에서는 안전계수 11.34 이상으로 규정하고 있다.<sup>(4)</sup> 피로해석에서는 돌풍조건을 고려하지 않으므로 Fig 14의 정상상태 하중해석 결과를 고려하면 안전계수 21 정도로서 국제규격을 만족함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 설계를 수행할 때에 발생하였던 시행착오 방법으로 인한 비효율적인 요소를 배제하기 위해 수정된 설계절차를 제안하였으며 예비설계단계에서 신속하고 신뢰성이 있는 해석결과를 얻을 수 있었다. 이 같은 예비설계결과를 가지고 상세설계를 수행한 결과 선형정적해석, 고유진동수 해석, 좌굴해석, 피로수명 해석시 양호한 설계결과를 얻을 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부, 에너지자원 기술개발 지원센터와 (주)한국화이바의 위탁연구용역에 의해 수행되었으며, 연구수행에 적극 지원해 주신 (주)한국화이바에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 김광수 외, '항공우주비행체 동체 주 구조물 최적화연구', 한국항공우주학회지, 제28권5호, 2000
2. I.R. Farrow, 'An Introduction to Composite Material', Design case study, 1997
3. IEC 1400-1, 'Wind Turbine Generator System Part I', Safety Requirement, First Edition, 1994
4. Germanischer Lloyd, 'Regulations for the Certification of WECS', Chapter 4-5, 1999
5. Dieter, G.E. et al., 'Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology', National Academy Press, pp. 25-65, 1991
6. Gibson, R.F., 'Principles of Composite Material Mechanics', McGraw-Hill, Inc., PP. 103-106, 1994
7. EMRC, 'NISA II. User's Manual', Version 5.2, 1992
8. Chang, F.K. et al., 'Strength of Mechanically Fastened Composite Joint', J. of Composite Materials, 1982
9. Miner, M.A., 'Cumulative Damage in Fatigue', Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, PP. A-159-164, 1945

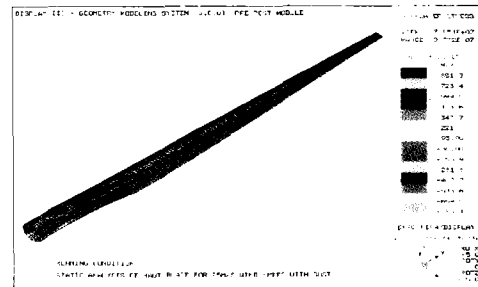


Fig. 8 Stress contour of 25m/s wind speed

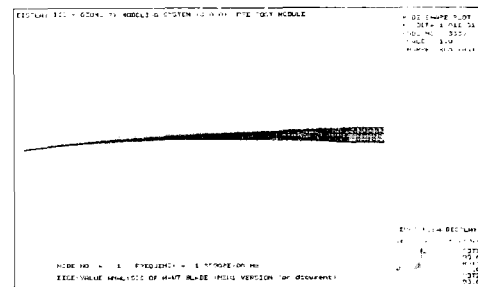


Fig. 9 First flapwise mode



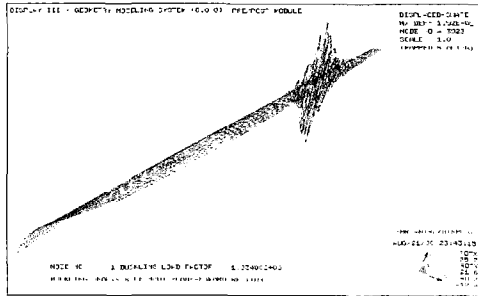


Fig.10 Buckling analysis result for case1

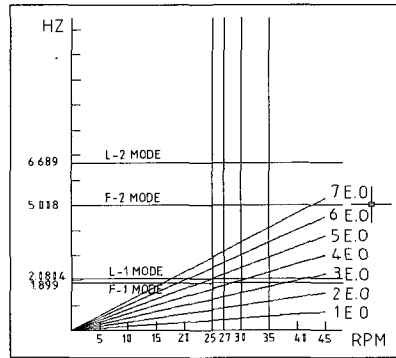


Fig. 12 Campbell diagram

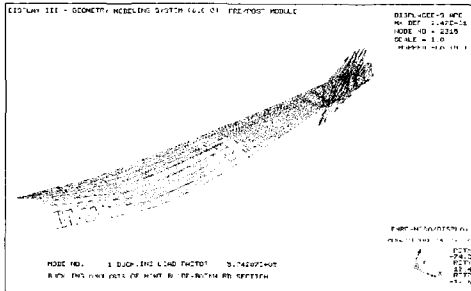


Fig. 11 Buckling analysis result for case2

Table. 15 Material Property

	UD-GFRP	± 45 °-GFRP	Foam
$E_1$ ( N/mm <sup>2</sup> )	35700	20000	70
$E_2$ ( N/mm <sup>2</sup> )	10600	2000	70
$G_{12}$ ( N/mm <sup>2</sup> )	2810	1450	19
$\nu$	0.27	0.27	0.2
$X_t$ ( N/mm <sup>2</sup> )	711	367.3	1.896
$X_c$ ( N/mm <sup>2</sup> )	1200	411	0.896
$Y_t$ ( N/mm <sup>2</sup> )	38	135.5	1.896
$Y_c$ ( N/mm <sup>2</sup> )	183	141	0.896
$S$ ( N/mm <sup>2</sup> )	65.7	23	0.8
$\rho$ ( g/cm <sup>3</sup> )	1.8	1.87	0.052
Ply thick' $t_p$ (mm)	0.58	0.3	12.5
$\epsilon_{1t}$	0.0199	0.0184	-
$\epsilon_{1c}$	-0.0336	-0.02055	-
$\epsilon_{2t}$	0.0036	0.06775	-
$\epsilon_{2c}$	-0.0173	-0.0705	-
$\gamma_{12}$	0.0234	0.01586	-

Table. 14 Result of static analysis

Analysis Result		Load Case				
		12.5 m/s	20 m/s	25 m/s	55 m/s	
Max. Stress [MPa] (-:압축/+:인장)	Skin	-14.49/ 15.83	-21.46/ 23.58	-21.75/ 24.2	-12.6/ 13.4	
	Spar	-41.07/ 54.7	-72.56/ 80.82	-73.7/ 82.9	-43.3/ 52.3	
Max. Displacement on Tip [m]		1.31	1.96	1.99	1.15	
Clearance from Tower		67%	51%	50%	71%	
Spar	Tsai-Wu Failure Criteria (S.F.)	21.2	14.3	14.1	22.2	
	Max. Stress Failure Criteria (S.F.)	Sxx	25.5	16.5	16	28.4
		Syy	162	105.5	97.9	167.4
Sxy		83.3	59.6	56.2	95.6	
Strain [ $\mu\epsilon$ ]	Tensile	1656	2413	2518	1195	
	Compressive	1422	2191	2274	1041	