

# 실험계획법을 이용한 2kW급 풍력발전용 블레이드에 대한 구조설계

이승표\*, 강기원<sup>+</sup>, 장세명<sup>++</sup>, 이장호<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2010. 7. 30, 심사완료일 2010. 11. 10)

## Structural Design for 2kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment

Seung-Pyo Lee\*, Ki-Weon Kang<sup>+</sup>, Se-Myong Chang<sup>++</sup>, Jang-Ho Lee<sup>+++</sup>

### Abstract

In this paper, structural design for 2kW class composite blade is performed by using design of experiment(DOE). A full factorial design is applied to meet the design specifications at the manufacturing process. The analysis of variance(ANOVA) is made in order to determine the significance of effects in an analysis. Structural analysis by using of commercial software ABAQUS is performed to compute the displacement and safety factor of filament wound composite blade. The results show that the proposed method is suitable to analyze the factors at the design of wind turbine blade.

**Key Words** : Filament wound composite blade(필라멘트 와인딩 복합재 블레이드), Design of Experiment(실험계획법), Structural Design(구조설계)

## 1. 서론

풍력발전기(wind turbine)는 바람의 운동에너지를 기계적 운동을 거쳐 최종적으로 전기에너지로 변화하는 장치를 말하며 최근 신재생에너지로 각광을 받고 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 풍력발전기는 블레이드(blade), 허브(hub), 주축(main shaft), 발전기, 제어장치 및 타워 등의 구성기기로 이루어져 있다. 풍력발전기의 구성부품 중에서 바람의 운동 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 블레이드는 풍력발전기의 가장 특징적인 요소로서 이의 특성에 따라 시스템의 성능 및 수명이 결정된다. 블레이드는 바람의 공력에 의한 다양한 하중을 받으며 이러한 하중조건하에서 설계수명동안 운영될 수 있도록 설계되어야 한다<sup>(1)</sup>. 이러한 요구조건의 만족을 위하여 초기 블레이드 재료로는

금속, 목재 등이 사용되었으나, 최근에는 비강도, 비강성, 내부식성, 내마멸성, 내환경성 및 진동특성이 우수한 복합재료<sup>(2)</sup>가 주로 사용되고 있다. 이러한 복합재료에 사용되는 보강섬유(fiber)로는 경제성 등을 고려한 E-glass 계통의 유리섬유가 주로 사용되고 있으며, 모재(matrix)는 폴리에스터, 비닐에스터 또는 에폭시 등이 사용되고 있다<sup>(3)</sup>. 복합재료를 이용하여 설계 및 제작된 블레이드는 이의 종류 및 용량에 따라 상이하지만 크게 스킨(skin), 스파(spar) 및 내부 충전재인 폼(foam) 등의 구성요소로 이루어진다. 따라서 복합재료 블레이드의 구조설계를 위해서는 이러한 구성요소의 적절한 배치 및 설계가 요구된다.

블레이드 강도설계에 관한 연구로는 복합재료 블레이드에 대한 구조해석, 피로해석 및 좌굴해석 등이 있다. 예를 들어, 강수

\* 한양대학교 기계공학과 대학원  
+ 교신저자, 군산대학교 도시형풍력발전원천기술연구센터 (kwkang68@kunsan.ac.kr)  
주소: 전북 군산시 미룡동 산68번지 군산대학교 기계자동차공학부  
++ 군산대학교 기계자동차공학부  
+++ 군산대학교 도시형풍력발전원천기술연구센터

춘 등<sup>(4)</sup>은 20kW급의 길이 7m인 GFRP 복합재료 풍차날개에 대하여 구조설계 및 구조해석을 수행하였다. 이충훈 등<sup>(5)</sup>은 반경 25m의 750kW급 풍력 발전기용 Glass/ Epoxy 복합재 터빈 블레이드에 대한 비선형 해석과 국부 좌굴 해석을 수행하였다. 상기의 연구들에서 알 수 있듯이 대부분의 연구들이 블레이드의 전체적인 반응을 고려한 구조설계와 해석에 집중되어 있으며, 복합재료 블레이드의 적층에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 그러나 복합재료 블레이드의 강성, 강도 및 구조적 안정성 등은 복합재료의 적층각도, 적층순서, 두께 등에 의하여 결정되므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다<sup>(6)</sup>.

본 연구에서는 2kW급의 풍력발전기에 사용되는 초소형 복합재료 블레이드를 대상으로 이의 내부 적층각도 최적화에 대하여 고찰하였다. 블레이드 최대 변형량 및 안전계수의 최적화를 위하여 스킨 및 스파의 적층각도에 대하여 실험계획법(Design of Experiment, DOE)을 적용하였고, 유의성을 검증하기 위하여 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 사용하였다. 실험계획법의 수행을 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 제작 공정을 고려한 최대 변형량과 안전계수를 최적화하는 복합재료 블레이드의 적층 각도를 설계하였다. 설계된 적층각도를 갖는 블레이드에 대하여 진동해석을 수행하여 공진 여부를 검토하였다.

## 2. 블레이드 공력설계 및 하중

### 2.1 블레이드 공력설계

본 연구의 블레이드는 정격풍속 10m/s, 정격 용량 2kW의 독립형 3엽식 초소형 풍력발전기에 사용될 예정이다. Table 1은 이러한 요구조건하에서 블레이드 요소법(Blade Element Method Theory, BEMT) 및 운동량 이론(momentum theory)을 접목한 공력해석<sup>(7)</sup>과 이에 대한 역설계 방법의 적용을 통하여 도출된 블레이드의 기본 설계 자료를 나타낸 것이다. 블레이드의 익형은 NREL S822 익형을 기본으로 하여 4도의 기준 피치와 18도의 선형 비틀림 각을 부여하였다. Fig. 1은 깃 끝 속도비(Tip Speed Ratio, TSR)와 동력계수를 이용하여 정격풍속인 10m/s에서 2.0kW의 출력을 가지도록 설계된 블레이드의 최종 형상을 나타낸 것이다. 자세한 공력설계 관련 내용은 이전 연구<sup>(7)</sup>에 제시되어 있다.

### 2.2 하중

블레이드의 구조 설계 및 해석을 수행하기 위해서는 블레이드에 작용하는 하중에 대한 계산이 요구된다. 블레이드에 작용하는 하중은 작용하는 풍속 및 이에 따른 회전수에 따라 변화한다. 이를 계산하기 위하여 공력해석(aerodynamic analysis)을 수행하였고, 계산된 풍속 변화에 따른 블레이드의 하중을 Table

2에 나타내었다.

## 3. 실험계획법을 적용한 구조해석

### 3.1 실험계획법

일반적인 풍력발전기용 블레이드는 굽힘 모멘트, 비틀림 모멘트, 좌굴, 전단력 등의 여러 종류의 하중이 동시에 작용된다. 스킨, 스파, 톱의 각 부분은 각각 하나의 하중을 주로 담당하도록 설계하여 전체적으로 볼 때 블레이드에 작용하는 모든 하중에 대하여 안전하도록 설계하여야 한다. 이러한 블레이드의 하중지지 특성을 고려하여 실험계획법의 인자를 스킨 각도, 상부 스파 각도 및 하부스파 각도로 선정하였다. 또한, 각 인자의 수준은 2수준으로 결정하였다. 이러한 인자의 수와 수준에 대하여 실험 계획법의 일종인 완전요인배치법(full factorial design)을 적용하여 총  $2^3=8$ 회 실험횟수를 산출하였다<sup>(8)</sup>. 블레이드 적층은 필라멘트 와인딩 공법(filament winding technique)으로 제작하므로 0°를 와인딩하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따

Table 1 Basic performance of the designed blade

Rated power	2kW
Rated wind speed	10m/s
Rated RPM	200rpm
Rotor diameter	3.48m
Number of blades	3
Cut-in speed	3.0m/s
Cut-out speed	22.4m/s
Base airfoil	NREL S822

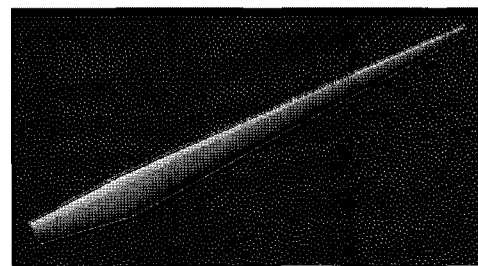


Fig. 1 Geometry of small wind turbine blade

Table 2 Aerodynamic forces according to wind speed

Wind Speed	Thrust	Bending Moment	Twisting Moment
4.9m/s	138.3N	55.7Nm	13.4Nm
10m/s	336.3N	132.1Nm	95.3Nm
14.8m/s	381.6N	139.5Nm	97.2Nm
20.2m/s	517.7N	177.2Nm	93.7Nm
22.4m/s	591.1N	198.1Nm	101.0Nm

라서 0° 대신에 와인딩이 가능한 각도인 15°로 대치하였다. Table 3은 이러한 과정을 거쳐 산출된 인자와 각 인자별 수준을 정리한 것이다.

실험의 기준이 되는 특성치는 블레이드의 최대 변형량과 Tsai-Wu 파손조건<sup>(11)</sup>에 따른 안전계수로 설정하였으며, 각 특성치의 설계 목표 값은 각각 0.15m, 4.00이다. 한편 실제 블레이드의 경우는 블레이드 끝단으로 갈수록 두께가 얇아지는 적층순서를 가지므로 본 연구에서도 블레이드 뿌리의 두께(±45° : 1mm, ±15° : 2mm, 90° : 1mm)를 기준으로 끝단까지 72%의 두께가 선형적으로 감소한다고 가정하였다.

Table 4는 실험의 순서를 나타낸다. 실험 순서는 난수표를 이용하여 임의의 순서를 결정하고, 결정된 순서대로 진행하여 고려하고자 하는 인자 외에 기타 원인들의 영향이 실험 결과에 편향(bias)되는 것을 방지하였다. 이러한 실험 계획법은 상용 소프트웨어인 MiniTap<sup>(9)</sup>을 이용하였다.

### 3.2 구조해석

Table 4에 언급된 실험은 상용 소프트웨어인 ABAQUS<sup>(10)</sup>를 이용하여 결과를 도출하였다. 구조해석에 사용된 절점(node)의 개수는 6,840이고, 요소(element)의 개수는 7,085이다. 사용된 요소들은 S3 요소와 S4R 요소이다<sup>(7)</sup>.

블레이드에 사용된 섬유는 Advanced E-glass의 일종인 Advantex이며, 기지재는 HTS-665C Epoxy를 사용하였다. Advantex와 HTS-665C Epoxy의 기본 물성치<sup>(7)</sup> 및 혼합법칙(Rule-of-Mixture, ROM)을 이용하여 복합재료 블레이드의 등가 물성치를 구하였다.

Table 3 Factors and levels of the experiment

Factors	Levels	
	1	2
Angle of skin	±45°	90°
Upper spar angle	±15°	90°
Lower spar angle	±15°	90°

Table 4 Run order and stacking sequence

Run	Order	Angle of skin	Upper spar angle	Lower spar angle
1	2	90°	±15°	±15°
2	7	±45°	90°	90°
3	4	90°	90°	±15°
4	3	±45°	90°	±15°
5	1	±45°	±15°	±15°
6	8	90°	90°	90°
7	6	90°	±15°	90°
8	5	±45°	±15°	90°

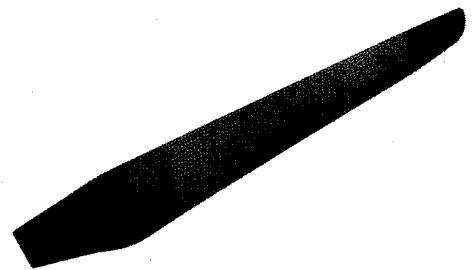
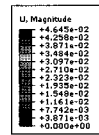
구조해석 시 경계조건은 블레이드와 허브의 체결조건을 고려하여 허브 부분에서 6개의 모든 자유도를 구속하였다. 또한 하중조건은 Table 2의 조건 중에서 가장 가혹한 22.4m/s의 하중조건을 사용하였다. 자세한 유한요소해석 관련 내용은 이전 연구<sup>(7)</sup>에 제시되어 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 최대 변형량

공력하중에 의한 블레이드의 변형이 과다하면 타워와 블레이드의 간섭 발생 가능성이 존재하므로 이에 대한 평가가 필요하다. Fig. 2는 Table 4의 run no. 5에 대한 변형량 결과를 나타낸다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 블레이드의 최대 변형량이 46.5mm로써 설계 목표 값인 150mm보다 작다. 따라서 run no. 5의 블레이드는 타워와 블레이드의 간섭 발생 가능성이 없다고 예상할 수 있다.

Table 5는 Table 4의 실험순서에 따라 수행한 유한요소해석을 통하여 도출된 최대 변형량 값을 나타낸 것이다. 이러한 최대 변형량에 대한 실험결과의 타당성을 분석하기 위하여 이의 평균값에 대한 잔류치(residual)를 정규분포곡선으로 평가하였다. Fig. 3은 그 결과로서 모든 데이터가 직선 주변에 분포하므로 이는 잔류치가 정규분포에 근사하는 것을 의미한다. 즉, 본 실험의 가설은 기각될 수 없고 의미 있는 실험이라 판단할 수 있다.



ODB: Blade1\_variableThickness.odb Abaqus/Standard Version 6.7-1 Sat Nov 07 23:47:22 GMT+09:00 2009

Step: Static\_Load  
Increment: 4 Step Time = 1.000  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +3.626e+00

Fig. 2 Displacement plot at run no. 5

Table 5 Analysis results for displacement [mm]

Run	1	2	3	4	5	6	7	8
max. displ.	53.4	104.4	83.9	63.0	46.5	152.4	85.9	64.0

최대 변형량 해석의 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시하여 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 여기서 인자 A, B 및 C는 각각 스킨 각도, 상부스파 각도 및 하부스파 각도를 나타낸다.

Table 6에서 알 수 있듯이 상부스파 각도와 하부스파 각도의  $F_0$ 값이  $F_{\text{expected}}(95\%)$  값보다 크다. 따라서 최대 변형량에 대하여 상부스파 각도와 하부스파 각도는 수준의 변화에 따라서 유의(significant)한 차이가 있다. 즉 상부스파 각도와 하부스파 각도는 최대 변형량에 대하여 상당한 영향을 끼침을 예상할 수 있다.

인자 수준에 따른 최대 변형량의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 4에 주작용 선도(main effect plot)를 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 스킨 각도는 45°보다 90°가 최대 변형량이 크다. 또한 상부스파 각도 및 하부스파 각도의 경우는 15°보다 90°가 최대 변형량이 큰 것으로 평가되었다. 각 선도의 기울기를 분석한 결과 상부스파 각도와 하부스파 각도의 기울기가 스킨 각도에 비하여 급하므로 상부스파 각도와 하부스파 각도가 스킨 각도에 비하여 최대 변형량에 대한 영향이 큼을 예상할 수 있다. 주작용 효과를 분석한 결과 스킨 각도는 45°, 상부스

파 각도와 하부스파 각도는 15°로 설계하는 것이 안전함을 알 수 있다. 그러나 주작용 효과 외에 교호작용 효과와 제작 공정을 모두 고려하여 최적의 적층 각도를 선정하여야 한다. 따라서  $[\pm 45/\pm 15/\pm 15]$ 의 적층순서가 가장 우수하고, 그 다음으로  $[90/\pm 15/\pm 15]$ ,  $[\pm 45/90/\pm 15]$  및  $[\pm 45/\pm 15/90]$ 의 적층순서가 우수하다고 판단되며 이를 Fig. 5의 큐브 선도(cube plot)에서 확인할 수 있다.

#### 4.2 안전계수

Strength ratio는 이방성 재질(anisotropic material)에 대하여 파손의 정도를 표시하기 위한 방법으로 안전계수와 역수의 관계를 갖는다<sup>(11)</sup>. Table 7은 Table 4의 실험순서에 따라서 실시한 유한요소해석을 통하여 도출된 안전계수 값을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 6은 Table 4의 run no. 5에 대한 strength ratio 결과를 나타낸다. Fig. 6으로부터 알 수 있듯이 안전계수의 최대값이 4.73으로 설계 목표값인 4.00보다 크다. 따라서 run no. 5의 복합재료 블레이드는 파손에 대하여 안전함을 예상할 수 있다. Table 7의 해석결과를 이용하여 파레토 차트(Pareto

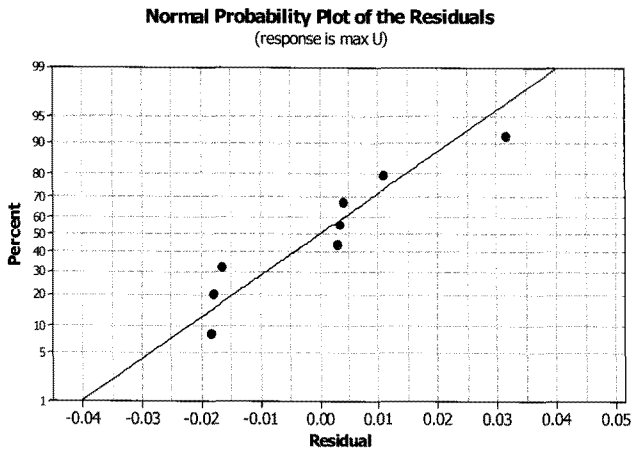


Fig. 3 Normal probability plot for displacement

Table 6 Analysis of Variance for displacement

SV	DF	MS	$F_0$	$F_{\text{expected}, 95\%}$
A	1	0.0012	65.30	161.00
B	1	0.0030	161.99*	161.00
C	1	0.0032	175.44*	161.00
AB	1	0.0002	10.97	161.00
AC	1	0.0002	12.16	161.00
BC	1	0.0004	24.43	161.00
Residual	1	0.0002		
Total	7			

SV: Source of Variation, DF: Degree of Freedom, MS: Mean Square

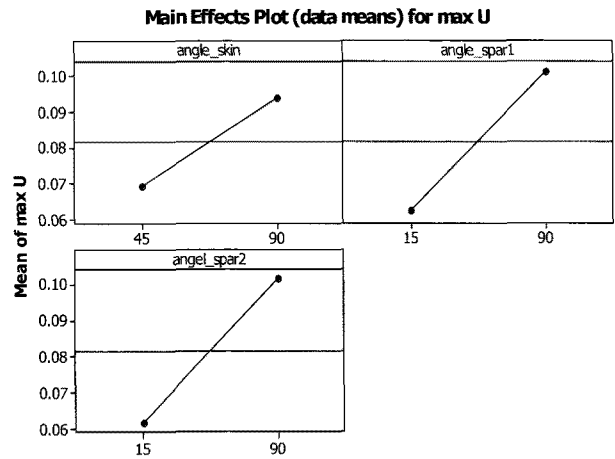


Fig. 4 Main effect plot for displacement

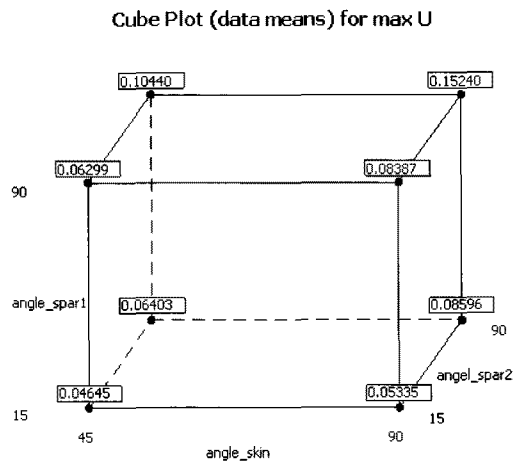


Fig. 5 Cube plot for displacement

Table 7 Analysis results for safety factor

Run	1	2	3	4	5	6	7	8
S.F.	2.89	3.18	2.15	4.38	4.73	1.24	2.53	4.32
	Fail	Fail	Fail	Safe	Safe	Fail	Fail	Safe

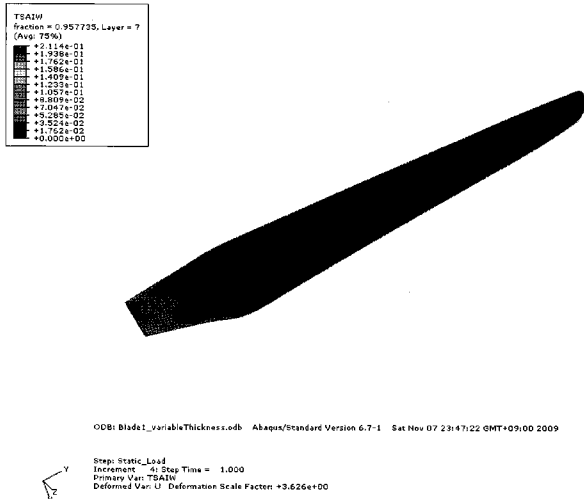


Fig. 6 Strength ratio plot at run no. 5

Pareto Chart of the Standardized Effects  
(response is Safety Factor, Alpha = .05)

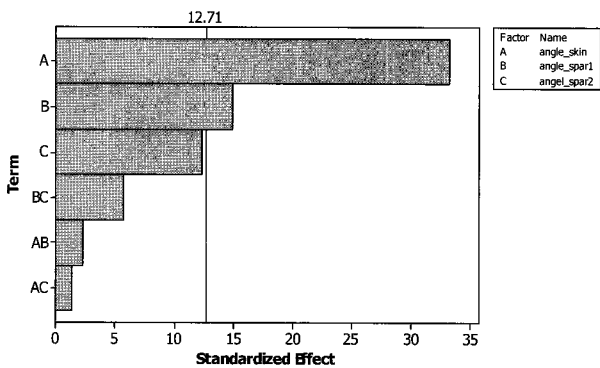


Fig. 7 Pareto chart for safety factor

Interaction Plot (data means) for Safety Factor

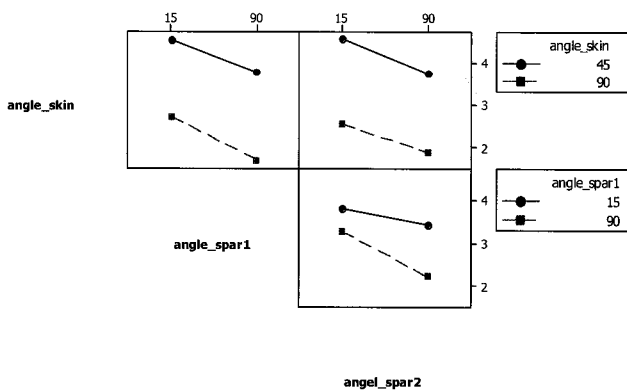


Fig. 8 Interaction plot for safety factor

chart)를 그리면 Fig. 7과 같다. 파레토 차트에서 나타나는 빨간 색 수직선은 유의 수준을 의미한다. Fig. 7로부터 알 수 있듯이 스킨 각도와 상부스파 각도가 유의 수준 95%에서 유의하다. 즉 스킨 각도와 상부스파 각도를 변경함으로써 안전계수에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 안전계수에 대한 교호작용의 효과를 나타낸 것이다. Fig. 8로부터 알 수 있듯이 스킨 각도가 90°인 경우에 상부스파와 하부스파는 각도에 상관없이 안전계수가 낮으므로 스킨 각도는 45°로 설계하는 것이 바람직하다. 또한, 상부스파의 각도는 안전계수에 크게 영향이 없으나, 하부스파의 각도는 15°인 경우가 90°인 경우에 비해서 안전계수가 크다. 이들 결과를 종합하면 스킨 각도는 45°, 상부스파와 하부스파의 각도는 15°로 설계하는 것이 안전계수 관점에서 가장 좋은 설계이다.

### 4.3 진동해석

4.1절 및 4.2절을 통하여 최대 변형량 및 안전계수 설계 조건을 만족시키는 적층순서의 후보를 선정하였다. 그러나 질량과 강성을 가진 모든 물체는 고유주파수(natural frequency)를 가지며 이러한 고유주파수가 외란 주파수와 일치하게 될 경우 구조물의 응력 또는 변형이 급격하게 증가하는 공진(resonance)이 발생하여 치명적인 상황에 노출될 수 있다. 이의 가능성을 평가하기 위하여 4.1절 및 4.2절에서 선정된 적층순서 후보를 대상으로 진동해석을 수행하였다. 해석은 Lanczos 법을 사용하여 수행되었으며 Table 8에 각 적층순서에 대한 고유주파수를 정리하여 나타내었다. Table 8에서 알 수 있듯이 가장 중요한 1차 모드는 세 종류의 적층순서 모두 플랩방향(flapwise direction) 모드이며 이의 주파수는 각각 12.285, 10.746 및 10.586Hz로 평가되었다. 이러한 고유주파수 해석결과를 풍력발전기의 정격 회전수(200rpm, 3.33Hz)와 비교 검토한 결과, 블레이드의 운용주파수에서 공진이 발생하지 않음을 알 수 있다.

4.1절과 4.2절의 결과를 종합하고, 필라멘트 와인딩 공법의 특성을 고려하여 볼 때  $[\pm 45/\pm 15/\pm 15]$ 로 설계하는 것이 가장 좋다. 그러나 기존의 연구 결과<sup>(4,5)</sup>에서 알 수 있듯이 본 연구에서 적용한 하중 이외의 다른 하중이 작용할 경우를 위하여 스파의 적층 각도를 0°, 90°로 할 필요가 있다.

Table 8 Natural frequencies of small wind turbine blade

Mode No.	Frequency, Hz		
	$[\pm 45/\pm 15/\pm 15]$	$[\pm 45/90/\pm 15]$	$[\pm 45/\pm 15/90]$
1	12.285	10.746	10.586
2	47.437	41.542	41.414
3	61.556	54.473	54.050
4	124.42	119.31	118.43
5	141.92	129.96	129.07

Table 9 Lay-up sequence of composite blade

Name	No	Ply angle(°)	Thickness at Each Section (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Skin	1	±45	2	1.8	1.8	1.6	1.4	1.4	1.2	1.0	0.8	0.8
	2	90	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
Spar	3	±15	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
	4	90	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
	5	±15	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2

따라서 블레이드의 최종 적층순서는 [±45/90/±15]로 결정하였으며 이를 Table 9에 표시하였다.

### 5. 결론

2.0kW급 풍력발전기용 블레이드의 적층순서 최적화를 위하여 실험계획법을 바탕으로 한 구조설계를 실시하였으며 이에 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 복합재 블레이드의 최대 변형량과 안전계수를 특성치로 하여 스킨, 상부스파 및 하부스파의 적층각도를 인자로 하는 완전배치법 기반 실험계획법을 수립하였다.
- (2) 완전배치법에 따른 실험순서에 따라 유한요소해석을 수행하였으며 이를 이용하여 각 인자의 중요도, 각 인자 수준의 영향 및 교호작용을 분석하였다.
- (3) 완전배치법 기반 구조해석 실험결과 및 진동해석 결과를 동시에 고려하여 복합재로 블레이드의 최적 적층순서를 결정하였다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- (1) Dong, K. M., Chung, S. N., and Shin, C., 2001, "Performance Prediction and Structural Analysis of Counter-Rotating Turbine Blades," *Proceeding of Society of Korean Aeronautical and Space Science*, pp.708~711.
- (2) Won, C. J., Lee, J.S., and Hong, S. J., 1998, "Buckling Analysis of Laminated Composite Plates," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 7, No. 2, pp. 23~28.

- (3) Hwang, B. S., Kim, B. G., Kim, S. K., Kim, J. B., Nam, Y. Y., Moon, S.J., Park, S. B., Park, Y. J., Park, J. H., Park, J. K., Park, J. S., Euam, M. K., Yeom, J. T., Lee, K. H., Lee, J. S., Lee, J. W., Lee, H. G., Lee, H. W., Lim, C. H., Jeong, J. K., Cho, H. W., and Hong, E. S., 2009, *An Understanding of Advanced Wind Turbines*, A-Jin, Seoul, pp. 387~389
- (4) Kang, S. C., Kim, D. M., and Jun, W. J., 1992, "Structural Design of FRP Wind Turbine Blade," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 162~174.
- (5) 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.
- (6) Kim, J. S., 2005, "Stacking Sequence Optimization of Composite Laminates for Railways Using Expert System," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 8, No. 5, pp. 411~418.
- (7) Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., 2010, "Structural Design and Analysis for Small Wind Turbine Blade," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 288~294.
- (8) Koo, B. K., Lee, C. H., Shin, Y. D., and Cho C. T., 2006, "An Study on Efficient Analysis Method of Vehicle Pull Using Design of Experiments," *Proceeding of the Korean Society for Automotive Engineers Autumn*, pp. 956~961.
- (9) MiniTap, 2009, *MiniTap Version 15.0*, MiniTap Inc.
- (10) ABAQUS, 2009, *ABAQUS Version 6.7-1*, Dassault Systemes Simulia, Inc.
- (11) Tsai, S. W., and Hahn, H. T., 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic, USA.