

## 대형 풍력발전기용 하이브리드형 블레이드 구조해석

강병윤\* · 김윤해\*\* · 김도완\*\* · 김명훈\*\*\* · 한정영\*\*\* · 홍철현\*\*\*\*

\*(주)도하인더스트리 기술개발연구소

\*\*한국해양대학교 조선기자재공학부

\*\*\*부산대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*\*\*부산대학교 기계설계전산화인력양성센터

## A Study of the FE Analysis Technique of Hybrid Blades for Large Scale Wind-Turbine

Byong-Yun Kang\*, Yun-Hae Kim\*\*, Do-Wan Kim\*\*, Myung-Hun Kim\*\*\*, Jeong-Young Han\*\*\* and Cheol-Hyun Hong\*\*\*\*

\*Department of R&D, Doha Industry Co. Ltd., Kimhae, Korea

\*\*Department of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

\*\*\*Department of Precision Engineering, Pusan University, Busan, Korea

\*\*\*\*Pusan Educational Center for Computer Aided Machine Design, Pusan University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Finite element(FE) analysis 유한요소해석, Wind-turbine 풍력발전기, Hybrid blade 하이브리드 블레이드

**ABSTRACT:** According to recent figures, 35% of the world's blades are made using prepreg blades, by Vestas and Gamesa. They are the most advanced in the market today. In this study, we investigated the validity of the finite element method (FEM) applied to an FE analysis of a hybrid composite wind-turbine blade. Two methods were suggested for a composite FE analysis: using the equivalent properties of the composite or using stacking properties. FE analysis results using the stacking properties of the composite were in good agreement with results of using the equivalent properties. The difference between FE results was approximately 0.6~13.3%.

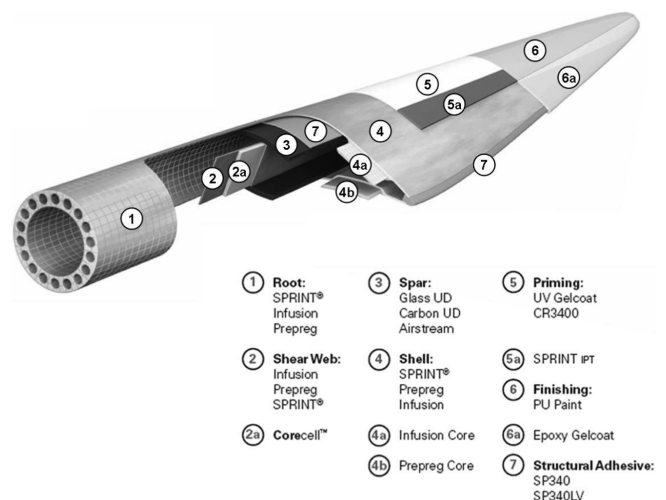
### 1. 서 론

최근 신재생에너지로 각광받고 있는 풍력 발전은 주로 유럽을 중심으로 발전되어왔으며 전 세계적으로 수요가 확대되고 있는 추세이다. 풍력에 의한 발전량이 점점 증가함에 따라 대용량 MW급 풍력발전시스템에 대한 연구가 활발해지고 있다. 풍력발전시스템 설계의 핵심 부품인 블레이드의 크기와 중량의 증가는 대형화 설계에 많은 제약을 가져오게 되어 경량화, 고강도, 내부식성, 내환경성 등에 우수한 특성을 가지고 있는 복합재의 사용을 요구하게 되었다. 이러한 이유로 복합재 블레이드에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다(공창덕과 방조혁, 2002; 김동현 등, 2007; 김범석 등, 2009; 박효근 등, 2007; 이충훈 등, 2002; Jureczko et al., 2005).

복합재 블레이드 시장을 선점하고 있는 선진 국외 업체의 경량화 블레이드 기술은 업체와 적용 방법에 따라 Polyester(LM Glass fiber), Epoxy infusion(All other manufactures), Prepreg (Vestas and Gamesa)로 나눌 수 있다.

특히, 프리프레그 복합재의 우수한 물성치로 인해 풍력 블레

이드 적용에 관해 이전부터 많은 연구가 진행되어 왔으며 (Kweon et al., 1995; Tafreshi and Bailey, 2007), 최근에는 전세



**Fig. 1** Structure of wind-turbine blade

계 풍력 블레이드의 35%는 Vestas와 Gamesa에 의해 제작되고 있으며 그 수요가 점점 증가하고 있는 추세이다.

블레이드의 기본 구성은 외부의 스킨(Skin), 내부의 쉘어 웹(Shear web), 스파 캡(Spar cap) 등으로 구성되며 Fig. 1에 블레이드의 기본 구조를 나타내었다. 쉘어 웹과 스파 캡은 대부분 유리-에폭시(Glass-epoxy)로 사용되고 있지만 외국의 경우 점차 대형화에 따른 경량화의 목적으로 인해 고가의 탄소-에폭시(Carbon-epoxy)로 바뀌고 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 풍력 블레이드의 복합재 물성치 적용 기법 중 등가 물성치 방법(Equivalent property method)과 적층 물성치 방법(Stacking property method)에 대해 제안하였다. 또한 블레이드에 실제로 적용하여 쉘어 웹과 스파 캡의 물성치 적용 기법과 재질에 따른 모달 해석의 차이를 비교 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

복합재는 대부분 망상 구조로 이루어져 있으며. 이러한 망상 구조는 모델링 및 유한요소 해석을 수행하기 어렵다. 이러한 이유로 몇 가지 가정을 전제로 복합재의 물성치를 입력하는 방법에는 등가 물성치를 사용하는 방법과 적층 물성치를 사용하는 방법으로 크게 나누어 적용되고 있다.

먼저 등가 물성치 방법은 복합재료를 구성하는 섬유(Fiber) 및 기지(Matrix)의 강성이나 컴플라이언스(Compliance)를 통하여 하나의 플라이로 구성되어 있다고 가정하는 것이고, 적층 물성치 방법은 망상구조의 복합재가 섬유방향이 대칭인 플라이들이 적층된 적층판과 같다고 가정하여 플라이의 방향과 적층수를 고려하여 해석하는 방법이다(이대길 등, 1998).

그리고 복합재료의 응력상태를 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 필요로 한다(Jones, 1975). 하나의 플라이는 거시적으로 균질하고, 선형탄성이며, 직교이방성의 성질을 가진다. 또한 초기에는 응력이 없는 상태이다. 섬유는 균질하고, 선형탄성이며, 공간상에 규칙적으로 잘 배열되어 있고, 기지도 균질하고 선형탄성이며 등방성이다. 기공은 존재하지 않으며, 섬유와 기지는 완전히 결합되어 있다. 이와 같은 가정을 이용하여 복합재료의 여러 가지 상태를 해석할 수 있다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 3D 모델링

본 연구에서는 2MW급 풍력발전기 블레이드를 대상으로 하였으며 Fig. 2에 블레이드 형상을 나타내었다. 3D 모델링 전용 S/W인 CATIA V5를 이용하여 FE 모델을 위한 곡면(Surface) 모델링을 수행하였다.

### 3.2 재료 물성치

유한요소해석을 수행하기 위한 블레이드의 재료 물성치는 UD(Glass), Glass-epoxy, Carbon-epoxy 재료가 사용되었으며 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다.



Fig. 2 Geometry of hybrid blade

Table 1 Material properties of blade

	UD (Glass)	Glass-epoxy	Carbon-epoxy
$E_{11}$ (MPa)	43,100	39,000	142,000
$E_{22}$ (MPa)	13,200	8,600	10,300
$E_{33}$ (MPa)	13,200	8,600	10,300
$\nu_{12}$	0.24	0.28	0.27
$\nu_{23}$	0.45	0.47	0.46
$\nu_{13}$	0.24	0.28	0.27
$G_{12}$ (MPa)	3,620	3,800	7,200
$G_{23}$ (MPa)	4,550	2,930	3,520
$G_{13}$ (MPa)	3,620	3,800	7,200
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,939	2,100	1,580

### 3.3 블레이드 복합재 적층 방법

#### 3.3.1 적층 물성치 방법

일반적으로 블레이드의 두께는 바람에 의한 모멘트의 영향을 감소시키기 위해 블레이드의 뿌리 부분은 두꺼워지고 끝단으로 갈수록 얇아지는 구조이다. 따라서 블레이드 스킨의 위치별 적층 순서 및 적층 두께를 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다. 적층 순서 및 적층 두께는 기존의 논문(이충훈 등, 2002)을 참고하였다.

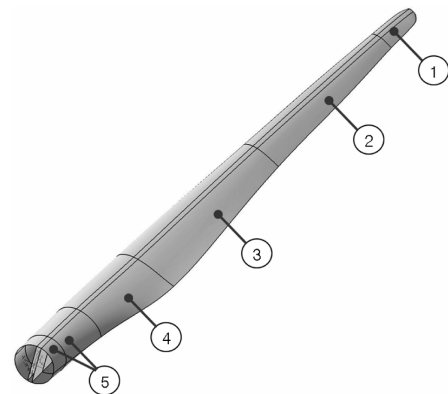


Fig. 3 Blade regions according to variable lay-up pattern & thickness

**Table 2** Lay-up pattern & thickness of blade skin

	Thickness [mm]			Region
	$\pm 45^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ/90^\circ$	
[ $\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ$ ] <sub>s</sub>	$4 \times 0.9^{(1)}$	$52 \times 0.9$	$4 \times 0.9$	⑤
	$4 \times 0.9$	$40 \times 0.9$	$4 \times 0.9$	④
	$4 \times 0.9$	$28 \times 0.9$	$4 \times 0.9$	③
	$4 \times 0.9$	$12 \times 0.9$	$4 \times 0.9$	②
	$4 \times 0.9$	$8 \times 0.9$	$4 \times 0.9$	①

(1) N × T: N=No. of ply, T=Thickness of ply

**Table 3** Lay-up pattern & thickness of shear web & spar cap

	Thickness [mm]			Remarks
	$\pm 45^\circ$	$0^\circ$	$90^\circ$	
[ $\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ$ ] <sub>s</sub>	$6 \times 0.9$	$3 \times 0.9$	$3 \times 0.9$	Shear web
	$6 \times 0.9$	$3 \times 0.9$	$3 \times 0.9$	Spar cap

쉐어 웹과 스파 캡의 재료 물성치는 Glass-epoxy와 Carbon-epoxy 두 가지의 경우로 각각 적용하여 비교하고자 하였다. 쉘어 웹과 스파 캡의 적층 순서 및 적층 두께를 Table 3에 나타내었다.

**3.3.2 등가 물성치 방법**

복합재의 적층 순서와 적층 방향을 고려한 적층 물성치 방법은 해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이러한 이유로 적층 순서와 적층 방향을 하나로 이상화한 등가 물성치 방법이 많이 적용되고 있다. 상용 유한요소프로그램인 MSC.Patran에서 기존의 적층 물성치를 변환하여 등가 물성치를 획득하였다. 블레이드 스킨과 쉘어 웹과 스파 캡의 등가 물성치를 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

**3.4 유한요소모델**

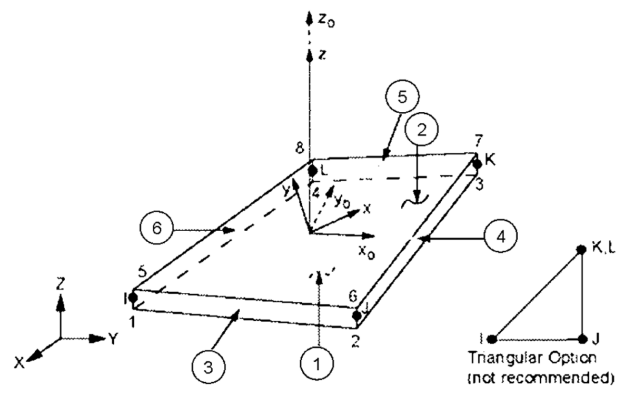
복합재 블레이드 유한요소해석을 수행하기 위하여 유한요소 전용 S/W인 ANSYS Classic 12를 사용하였다. 해석에 적용된

**Table 4** Effective material properties of blade skin

	Region ①	Region ②	Region ③	Region ④	Region ⑤
$E_{11}$ (MPa)	31,100	35,200	38,800	39,900	40,500
$E_{22}$ (MPa)	18,500	17,500	15,700	15,100	14,700
$E_{33}$ (MPa)	13,500	13,500	13,400	13,300	13,300
$\nu_{12}$	0.260	0.256	0.247	0.245	0.244
$\nu_{23}$	0.496	0.489	0.474	0.468	0.465
$\nu_{13}$	0.649	0.677	0.726	0.740	0.749
$G_{12}$ (MPa)	6,120	5,620	4,730	4,450	4,290
$G_{23}$ (MPa)	4,320	4,370	4,450	4,470	4,490
$G_{13}$ (MPa)	3,850	3,810	3,720	3,700	3,680
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,939	1,939	1,939	1,939	1,939

**Table 5** Effective material properties of shear web & spar cap

	Glass-epoxy	Carbon-epoxy	Remarks
$E_{11}$ (MPa)	8,070	13,800	-
$E_{22}$ (MPa)	8,070	13,800	-
$E_{33}$ (MPa)	8,670	10,500	-
$\nu_{12}$	0.229	0.131	-
$\nu_{23}$	0.376	0.472	-
$\nu_{13}$	0.376	0.472	-
$G_{12}$ (MPa)	3,280	6,100	-
$G_{23}$ (MPa)	3,360	5,360	-
$G_{13}$ (MPa)	3,360	5,360	-
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,100	1,580	-



$x_0$  = Element x-axis if ESYS is not provided.  
 $x$  = Element x-axis if ESYS is provided

**Fig. 4** Shell181 geometry

요소(Element type)는 복합재 적층 능력과 비선형성, 두께 방향 감소가 고려되는 4 Node finite strain shell 인 Shell181을 사용하였다. Fig. 4에 Shell181의 형상을 나타내었다.

Fig. 5에 블레이드의 유한요소모델을 나타내었으며 요소의 개수는 총 3,970개이다.



**Fig. 5** FE model of blade

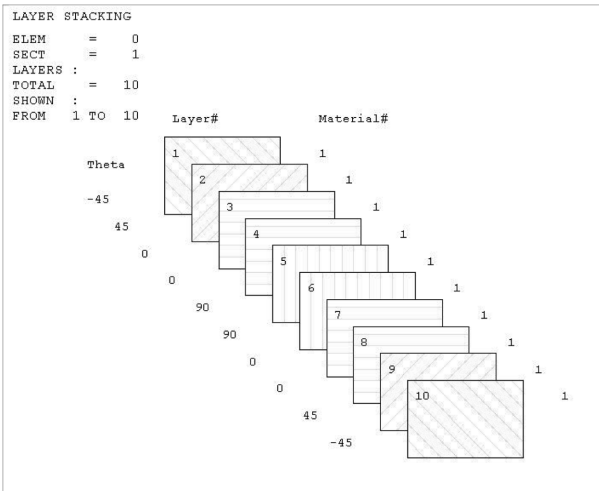


Fig. 6 Stacking sequence of skin (Region ①)

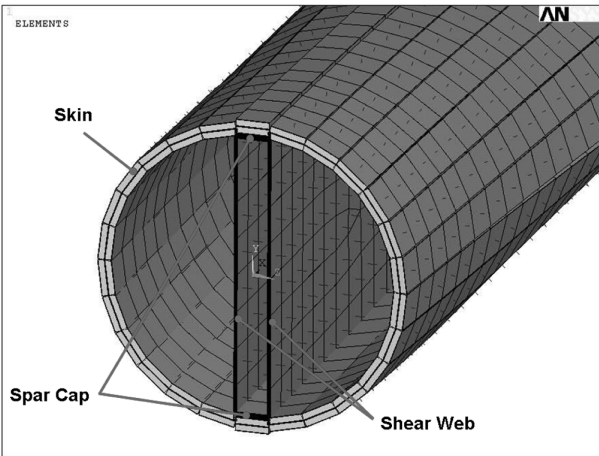


Fig. 7 Details of FE model

복합재의 유한요소모델은 요소의 적층 순서와 적층 방향이 제대로 설정되었는지 확인하는 것이 아주 중요하다. Fig. 6에는 블레이드 스킨의 요소의 적층 순서를 프로그램 상에서 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 7에 나타나 있는 것처럼 요소의 적층 방향 중 섬유 방향(x방향)은 블레이드의 길이 방향으로 설정되고, 두께 방향(z방향)은 블레이드 면의 법선(Normal) 방향으로 바르게 설정되어 있는 것을 알 수 있다.

3.5 경계 조건

유한요소해석을 위한 변위 경계 조건은 블레이드의 뿌리 부분의 노드(Node)들의 모든 병진 및 회전 자유도(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)를 구속하였으며 Fig. 8에 블레이드에 적용된 변위 경계 조건을 나타내었다.

3.6 모달(Modal) 해석

블레이드의 고유 진동수와 모드 형상을 파악하여 공진 여부나 진동에 의한 변형 형상을 예측하기 위해 모달(Modal) 해석을 수행하였다. 복합재 물성치 적용 방법과 재질에 따른 모달

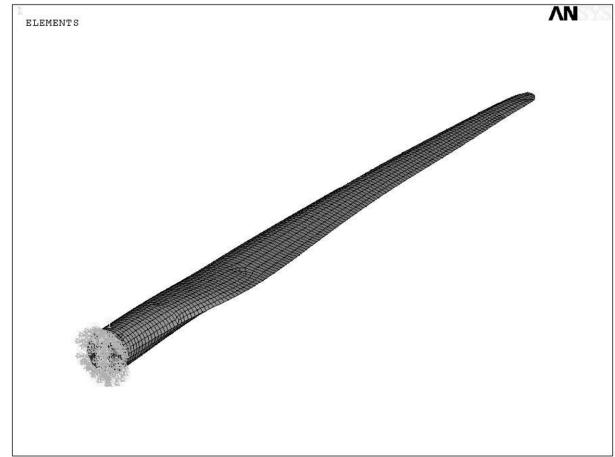


Fig. 8 Boundary condition for blade

Table 6 Types of modal analysis

	Skin		Shear web		Spar cap	
	Method	Material	Method	Material	Method	Material
Type 1	S <sup>(1)</sup>	UD	S	G/E <sup>(3)</sup>	S	G/E
Type 2	S	UD	S	C/E <sup>(4)</sup>	S	C/E
Type 3	E <sup>(2)</sup>	UD	E	G/E	E	G/E
Type 4	E	UD	E	C/E	E	C/E

- (1) Stacking property method
- (2) Effective property method
- (3) Glass-epoxy
- (4) Carbon-epoxy

해석 타입을 Table 6에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

블레이드의 모달 해석 결과를 Table 7과 Fig. 9에 나타내었다. 그리고 적층 물성치 방법과 Glass-epoxy를 적용한 Type 1의 모드 형상을 Fig. 10에 나타내었다.

적층 물성치와 등가 물성치의 모달 해석 오차는 1~6차 모드의 값을 비교해 볼 때, Glass-epoxy의 경우 0.6~4.3%의 오차가 발생하였고 Carbon-epoxy의 경우 4.4~13.3%의 오차가 발생하였다. 따라서 적층 물성치와 등가 물성치의 모달 해석 결과 값

Table 7 Results of modal analysis

Mode	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
	S, G/E	S, C/E	E, G/E	E, C/E
1	0.023	0.026	0.022	0.023
2	0.060	0.064	0.059	0.061
3	0.071	0.079	0.070	0.072
4	0.144	0.163	0.139	0.143
5	0.172	0.183	0.171	0.175
6	0.251	0.285	0.241	0.247

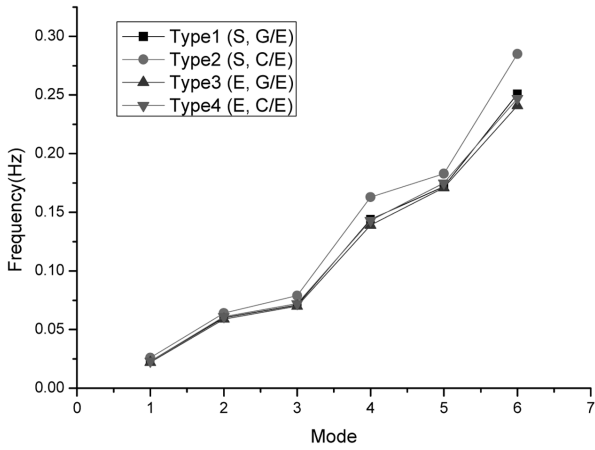


Fig. 9 Results of modal analysis

은 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

블레이드의 구조 특성 상 스킨의 두께가 서로 다른 부분이 많이 있다. 이러한 이유로 두께에 따른 등가 물성치를 매번 계산하는 것은 번거로운 작업이라고 판단된다. 블레이드의 유한요소모델의 요소 개수가 비교적 많지 않을 경우, 유한요소모델의 물성치 적용방법에서 비교적 직관적이고 적용된 플라이(Ply)별로 응력 정보를 알 수 있는 적층 물성치를 적용하는 방법이 훨씬 효율적이라고 생각된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 풍력 블레이드의 복합재 물성치 적용 방법과 재질에 따른 모달 해석 결과를 비교 분석하였으며 다음의 결론

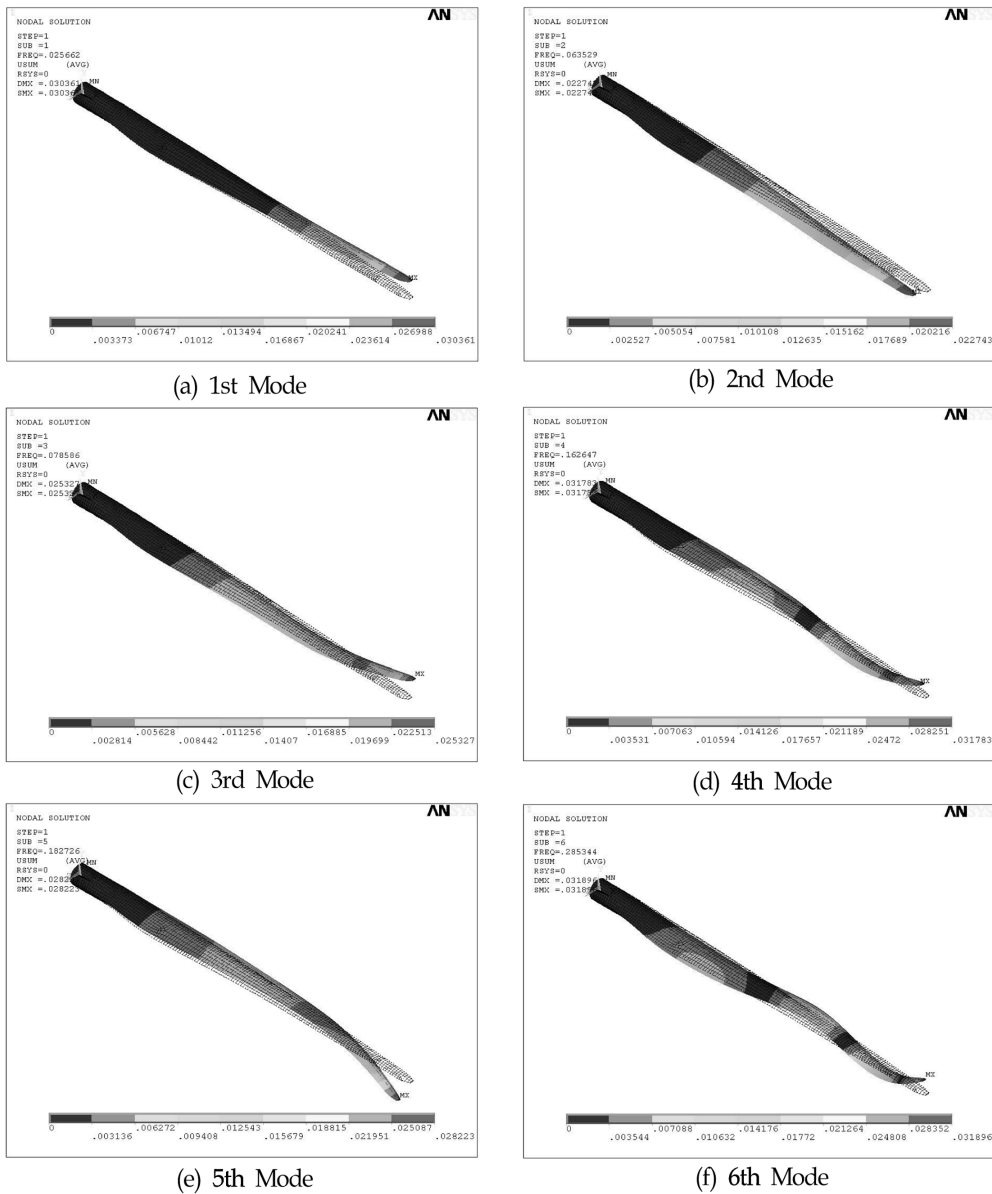


Fig. 10 Mode shapes of type 1 (S, G/E)

을 얻을 수 있다.

(1) 복합재 물성치 적용 방법 중 각각의 플라이들의 적층 순서와 적층 방향을 고려하는 적층 물성치 방법과 하나의 플라이로 가정하여 등가 물성치 방법을 적용하여 풍력 블레이드에의 적용 가능성을 확인하였다.

(2) 블레이드의 모달 해석을 수행한 결과, 적층 물성치 방법과 등가 물성치 방법을 이용한 모달 해석 결과 값은 웨어 웹과 스파 캡의 재료 물성치가 Glass-epoxy의 경우 0.6~4.3%의 오차가 발생하였고 Carbon-epoxy의 경우 4.4~13.3%의 오차가 발생하여 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 블레이드 스킨의 두께가 서로 다른 구조로 인하여 매번 번거롭게 등가 물성치를 계산하는 등가 물성치 방법보다는 입력이 직관적이며 다양한 결과 값(적층별 응력 등)을 확인 할 수 있는 적층 물성치 방법이 더 효율적이라고 판단된다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

### 참 고 문 헌

공창덕, 방조혁 (2002). "피로수명을 고려한 중형 복합재 풍력 터빈 블레이드의 구조설계 및 실험 평가", 한국우주항공학회지, pp 23-30.

김동현, 박효근, 김동만 (2007). "대형 풍력 발전용 복합재료 블레이드의 개선된 등가 모델링 기법", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp 129-134.

김범석, 이강수, 김만웅 (2009). "2MW급 풍력터빈 블레이드 설계 및 단방향 유체-구조연성해석", 대한기계학회논문집 B 권, 제33권, 제12호, pp 1007-1013.

박효근, 김요한, 김동현, 김동만, 황병선, 박지상, 정성훈 (2007). "CAE 기법을 활용한 3MW급 풍력발전기 로터의 구조 및 진동해석", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp 120-128.

이대길, 정광섭, 최진호 (1998). 복합재료 : 역학 및 제조기술, 시그마프레스, pp 19-20.

이충훈, 박진무, 김태욱, 박지상 (2002). "풍력 발전기용 대형 복합재 윈드 터빈 블레이드 구조 설계 및 해석", 기계의 날선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄(대한 기계학회 편).

Jones, R.M. (1975). Mechanics of Composite Material, McGraw-Hill Book Company, Chapter 3.

Kweon, J.H., Hong, C.S. and Lee, I.C. (1995). "Postbuckling Compressive Strength of Graphite/Epoxy Laminated Cylindrical Panels Loaded in Compression", AIAA J., Vol 33, No 2, pp 217-222.

Jureczko, M., Pawlak, M. and Mezyk, A. (2005). "Optimisation of Wind Turbine Blades", JMPT J., Vol 167, pp 463-471.

Tafreshi, A. and Bailey, C.G. (2007). "Instability of Imperfect Composite Cylindrical Shells under Combined Loading", Composite Structures, Vol 80, pp 49-64.

2010년 10월 20일 원고 접수

2010년 11월 8일 심사 완료

2011년 2월 9일 게재 확정