

물성치 적용 기법에 따른 하이브리드 풍력 블레이드 동적특성 해석에 관한 연구

강병윤* · 한정영** · 홍철현** · 문병영***†

A Study on Dynamic Characteristics Analysis of Hybrid Wind Power Blades according to Material Properties Method

Byong-Yun Kang*, Jeong-Young Han**, Cheol-Hyun Hong**, Byong-Young Moon***†

Key Words : FEM(유한요소해석), Dynamic Analysis(동적 해석), Buckling Analysis(좌굴 해석), Wind-Turbine(풍력발전기), Hybrid Blade(하이브리드 블레이드), FSI(유동구조연성해석), Pressure(압력영향)

ABSTRACT

In this paper, the heat transfer coefficient measurement techniques using TSP(temperature sensitive paint) were introduced and the results of a comparative study on the heat transfer coefficient measurement by steady state and transient TSP techniques were discussed. The distributions of heat transfer coefficient by a single 60° inclined impingement jet on a flat surface were measured by both techniques. Tested Reynolds number based on the jet diameter (d) was 30,000 and the distance between jet exit and target plate (L) was fixed at 10d. Results showed that the measured Nusselt number by both techniques indicated significant difference except near the center of impingement jet. Also, the heat transfer coefficients measured by the transient TSP technique were affected by the reference temperature of the jet. Based on the measured data, characteristics of both TSP techniques were analyzed and suggestions for applying them were also given.

1. 서 론

최근 신재생에너지로 각광받고 있는 풍력 발전은 주로 유럽을 중심으로 발전되어왔으며 전 세계적으로 수요가 확대되고 있는 추세이다. 그리고 풍력에 의한 발전량이 점점 증가함에 따라 대용량 MW급 풍력발전시스템에 대한 연구가 활발해지고 있다. 또한, 풍력발전시스템 설계의 핵심 부품인 블레이드의 크기와 중량의 증가로 인하여, 대형화 설계에 많은 제약을 가져오게 되어 경량화, 고강도, 내부식성, 내환경성 등에 우수한 특성을 가지고 있는 복합재의 사용이 요구되게 되었다. 이러한 이유로 복합재 블레이드에 대한 연구가 현재까지 꾸준히 진행되고 있다^[1,2,3].

한편, 복합재 블레이드 시장을 선점하고 있는 선진 국외

업체의 경량화된 블레이드 기술은 복합재료의 성형방법과 제조업체에 따라 나눌 수 있는데, 섬유형태의 고분자인 Polyester(LM Glassfiber), Epoxy resin을 원재료로 하는 Epoxy infusion(All other manufactures), 그리고 섬유강화 복합재료용의 중간기재로서 Prepreg (Vestas and Gamesa)가 있다.

특히, Prepreg 복합재는 우수한 물성치로 인하여, 풍력 블레이드를 대상으로 한 적용기술과 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 전세계 풍력 블레이드의 35%가 Vestas와 Gamesa에 의해 제작되고 있어 그 수요가 점점 증가하는 추세이다. 그리고 웨어 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.

기존 연구에 따르면, 복합재의 유한요소해석을 위해서, 일반적으로 복합재의 물성치를 입력하는 방법에 따라 등가 물성치를 사용하는 방법과 적층 물성치를 사용하는 방법으로

* (주)도하인더스터리 기술개발연구소
 ** 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터
 *** 군산대학교 조선공학과
 † 교신저자, E-mail : moonby20@gmail.com

나누어 적용되고 있다^[4,5,6,7]. 그리고 복합재 실린더 셸만을 대상으로 획일적 방법의 구조해석에 관한 국내의 연구논문은 많으나 아직 풍력 블레이드를 대상으로 재질에 따른 다양한 동적 구조해석을 수행한 논문은 찾아보기가 힘들다.

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 동시에 적용함으로써 복합재 블레이드의 해석 적용성과 두가지 기법의 효율성을 논의하였다. 또한 블레이드에 실제 적용을 통해 웨어 웹과 스파 캡의 물성치 적용 기법과 재질에 따른 모달 해석의 차이를 비교 분석하였고 좌굴해석을 통해 정도 높은 해석결과를 획득하여 분석함으로써 복합재 풍력 블레이드 모델에 대한 동적 특성을 분석하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 복합재 블레이드 구성 모델

블레이드의 기본 구성은 외부의 스킨(Skin), 내부의 웨어 웹(Shear web), 스파 캡(Spar Cap) 등으로 구성되며, Fig. 1에 블레이드의 기본 구조를 나타내었다.

2.2 복합재 물성치 적용기법

물성치 적용기법 중 우선 등가 물성치 방법은 복합재료를 구성하는 섬유(Fiber) 및 기지(Matrix)의 강성이나 컴플라이언스(Compliance)를 통하여 하나의 플라이(Ply)로 구성되어 있다고 가정하는 것이고, 적층 물성치 방법은 망상구조의 복합재가 섬유방향이 대칭인 플라이(Ply)들이 적층된 적층판과 같다고 가정하여 플라이의 방향과 적층수를 고려하여 해석하는 방법이다.

그리고 복합재료의 응력상태를 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 필요로 한다. 하나의 플라이는 거시적으로 균질하고, 선형탄성이며, 직교이방성의 성질을 가진다. 또한 초기에는 응력이 없는 상태이며, 섬유는 균질하고, 선형탄성이다. 그리고 공간상에 규칙적으로 잘 배열되어 있고, 기지도

균질하고 등방성이다. 기공은 존재하지 않으며, 섬유와 기지는 완전히 결합되어 있다. 이와 같은 가정을 이용하여 복합재료의 여러 가지 상태를 해석할 수 있다^[8].

2.3 복합재 셸 좌굴 이론

일정한 두께(h)와 축 길이(L_x), 반지름(R)과 호길이(L_s)를 가진 셸에 대하여 다음과 같이 이론을 전개할 수 있다. 판 이론의 동력학적 평행 방정식을 기초로 하여 식(1)과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta x}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{xr}}{\partial r} + \frac{\partial r_x}{r} &= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u \\ \frac{\partial \sigma_{x\theta}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial r_\theta}{r} &= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} v \\ \frac{\partial \sigma_{rx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial r_r - \sigma_{\theta\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} w \end{aligned} \quad (1)$$

원통형 셸의 재질을 선형적인 탄성 직교이방성(Orthotropic) 재료로 가정하면 식(2)와 같이 응력-변형률 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{rr} \\ \sigma_{r\theta} \\ \sigma_{rx} \\ \sigma_{x\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{r\theta} \\ \epsilon_{rx} \\ \epsilon_{r\theta} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

변위-변형률 관계식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{\theta\theta} = \frac{w}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}, \quad \epsilon_{rr} = \frac{\partial w}{\partial r} \\ \epsilon_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}, \quad \epsilon_{rx} = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \epsilon_{x\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 유한요소해석

3.1 연구 개요

본 연구에서는 2MW급 풍력발전기 블레이드를 대상으로 하였다. 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 사용되

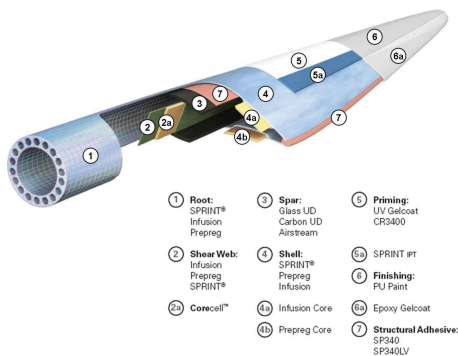


Fig. 1 Structure of Wind-turbine Blade

있으며, 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 각 계수들에 있어서, 각 층 주축방향으로 개별적인 재료탄성계수 E_{11} , E_{22} , E_{33} 와 전단탄성계수 G_{12} , 두 방향에 대한 포아송비 ν_{12} 그리고 면 외 방향으로의 전단탄성계수 G_{23} , G_{13} 으로 표현된다. ν_{ij} 는 i 방향으로의 축변형률에 대한 j 방향으로의 횡변형률의 비를 의미한다.

3.3 블레이드 복합재 적층 방법

3.3.1 적층 물성치 방법

일반적으로 블레이드의 두께는 바람에 의한 모멘트 영향을 감소시키기 위해 블레이드의 뿌리 부분은 두꺼워지고 끝단으로 갈수록 얇아지는 구조이다. 따라서 블레이드 스킨의

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
ν_{12}	0.24	0.28	0.27
ν_{23}	0.45	0.47	0.46
ν_{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
ρ (kg/m ³)	1,939	2,100	1,580

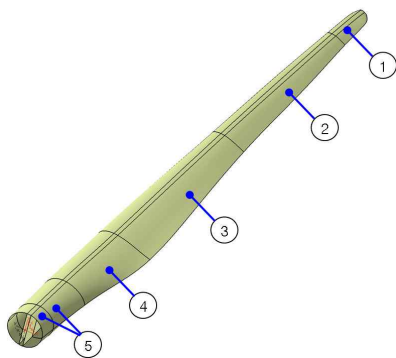


Fig. 2 Blade Regions according to Variable Lay-up Pattern & Thickness

Table 2 Lay-up Pattern & Thickness of Blade Skin

	Thickness[mm]				Region
	$\pm 45^\circ$	0°	$0^\circ/90^\circ$	Total	
[$\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ$] _s	4×0.9 ⁽¹⁾	52×0.9	4×0.9	54	⑤
	4×0.9	40×0.9	4×0.9	43.2	④
	4×0.9	28×0.9	4×0.9	32.4	③
	4×0.9	12×0.9	4×0.9	18	②
	4×0.9	8×0.9	4×0.9	14.4	①

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

위치별 적층 순서 및 적층 두께를 Fig. 2과 Table 2에 나타내었다.

쉐어 웹과 스파 캡의 재료 물성치는 Glass-Epoxy와 Carbon-Epoxy 두 가지의 경우로 각각 적용하여 비교하고자 하였다. 쉐어 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[9]. 블레이드 스킨과 쉐어 웹과 스파 캡의 등가 물성치

Table 3 Lay-up Pattern & Thickness of Shear Web & Spar Cap

	Thickness[mm]			Remarks
	$\pm 45^\circ$	0°	90°	
[$\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ$] _s	6×0.9	3×0.9	3×0.9	Shear Web
	6×0.9	3×0.9	3×0.9	Spar Cap

Table 4 Effective Material Properties of Blade Skin

	Region①	Region②	Region③	Region④	Region⑤
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
ν_{12}	0.260	0.256	0.247	0.245	0.244
ν_{23}	0.496	0.489	0.474	0.468	0.465
ν_{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
ρ (kg/m ³)	1,939	1,939	1,939	1,939	1,939

Table 5 Effective Material Properties of Shear Web & Spar Cap

	Glass-Epoxy	Carbon-Epoxy
E_{11} (MPa)	8,070	13,800
E_{22} (MPa)	8,070	13,800
E_{33} (MPa)	8,670	10,500
ν_{12}	0.229	0.131
ν_{23}	0.376	0.472
ν_{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
ρ (kg/m ³)	2,100	1,580

를 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

3.4 유한요소모델

복합재 블레이드 유한요소해석을 수행하기 위하여 유한요소 전용 S/W인 ANSYS Classic 12를 사용하였다. 해석에 적용된 요소(Element Type)는 복합재 적층 능력과 비선형성, 두께 방향 감소가 고려되는 4 Node Finite Strain Shell 인 Shell181을 사용하였다. 유한요소 모델의 요소의 개수는 총 3,970개이다.

복합재의 유한요소모델은 요소의 적층 순서와 적층 방향이 제대로 설정되었는지 확인하는 것이 아주 중요하다. Fig. 3 에는 블레이드 스킨의 요소의 적층 순서를 프로그램 상에서 확인을 할 수 있다. 그리고 Fig. 4에 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

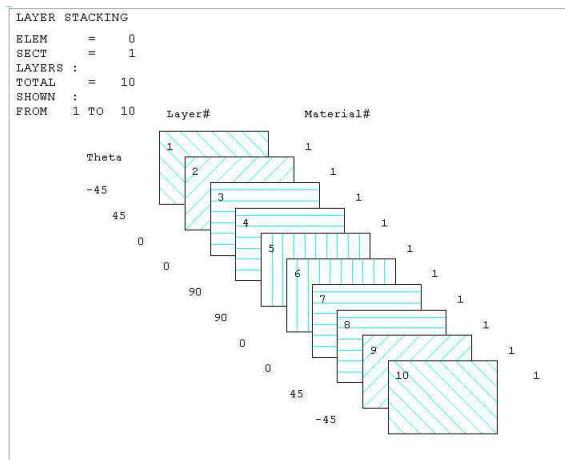


Fig. 3 Stacking Sequence of Skin(Region①)

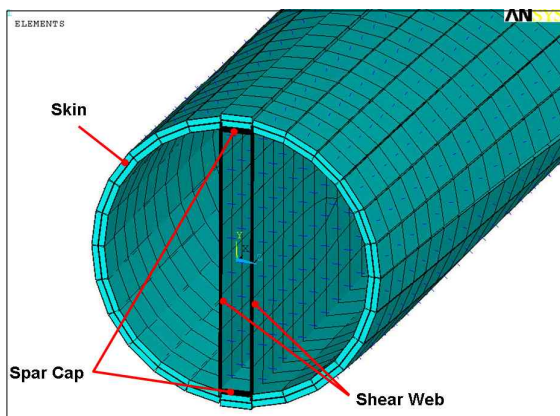


Fig. 4 Details of FE Model

부분의 노드(Node)들의 모든 병진 및 회전 자유도(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)를 구속하였으며 Fig. 5에 블레이드에 적용된 변위 경계 조건을 나타내었다.

3.6 모달(Modal) 해석

블레이드의 고유 진동수와 모드 형상을 파악함으로써 공진 여부나 진동에 의한 변형을 예측할 수 있는 모달(Modal) 해석을 수행하였다. 그리고 복합재 물성치 적용 방법과 재질에 따른 모달 해석 타입을 Table 6에 나타내었다.

3.7 좌굴(Buckling) 해석

블레이드의 좌굴 하중과 좌굴 모드 형상을 예측하기 위해 좌굴 해석을 수행하였다. 좌굴 해석을 수행하기 위해 유동-구조 연성 해석을 수행하였으며, 좌굴 해석 절차를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 유동해석을 수행하여 블레이드의 압력 분포를 획득하였다. 그 다음 구해진 압력 분포를 적용하여 정해석을 수행하였다. 최종적으로 정해석 해석 결과를 초기 하중조건으로 설정하여 선형 좌굴해석을 수행하였다.

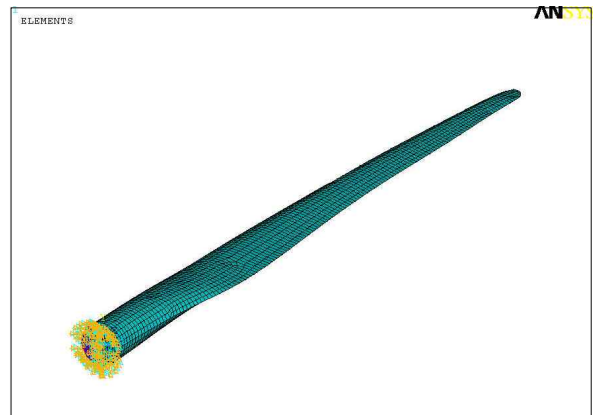


Fig. 5 Boundary Condition for blade

Table 6 Types of Modal Analysis

Type	Skin		Shear Web		Spar Cap	
	Method	Material	Method	Material	Method	Material
Type 1	S ⁽¹⁾	UD	S	G/E ⁽³⁾	S	G/E
Type 2	S	UD	S	C/E ⁽⁴⁾	S	C/E
Type 3	E ⁽²⁾	UD	E	G/E	E	G/E
Type 4	E	UD	E	C/E	E	C/E

- (1) Stacking Property Method
- (2) Equivalent Property Method
- (3) Glass-Epoxy
- (4) Carbon-Epoxy

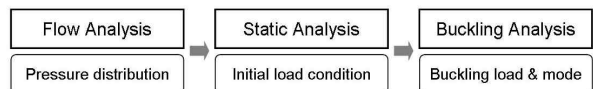


Fig. 6 Procedure of buckling analysis for blade

3.7.1 재료 물성치

쉐어 웹과 스파 캡의 재료 물성치는 Glass-Epoxy와 Carbon-Epoxy 두 가지의 경우로 각각 적용하였으며, 모달 해석 결과를 바탕으로 물성치 적용이 쉬운 적층 물성치 방법을 적용하였다.

3.7.2 경계조건

유동해석을 수행하기 위해 ANSYS CFX를 사용하였으며 Fig. 7에 경계조건 및 유한요소모델을 나타내었다. 극한 풍속조건인 60 m/s를 설정하여 블레이드의 압력분포를 구하였으며 Fig. 8에 나타내었다.

유동해석에서 얻어진 압력 분포를 적용하여 정해석을 수행한 후, 초기 하중조건으로 설정하여 선형 좌굴해석을 수행

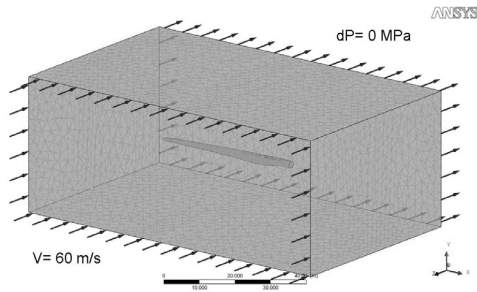


Fig. 7 Boundary condition for flow analysis

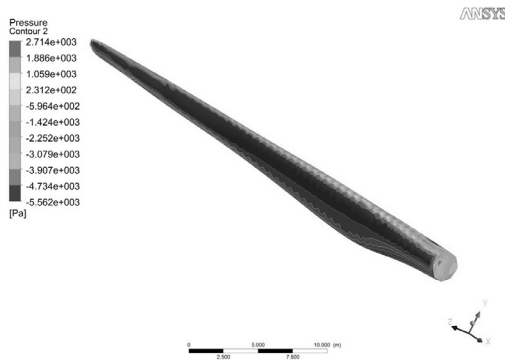


Fig. 8 Boundary condition for flow analysis

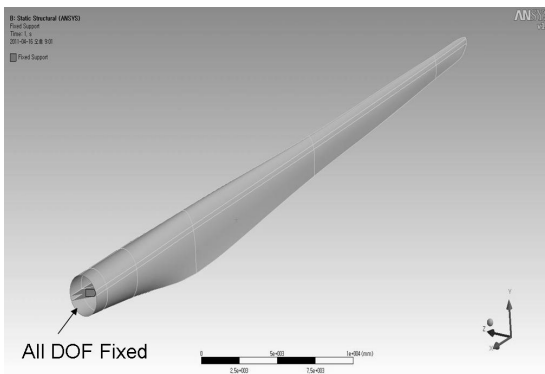


Fig. 9 Boundary condition for flow analysis

하였다. 정해석 및 좌굴해석의 경계조건을 Fig. 9에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

블레이드의 모달 해석 결과를 Table 7과 Fig. 10에 나타내었다. 그리고 적층 물성치 방법과 Glass-Epoxy를 적용한 Type 1에 대한 모드 형상을 Fig. 11에서 응력분포와 함께 4

Table 7 Results of Modal Analysis

Mode	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
	S, G/E (Hz)	S, C/E (Hz)	E, G/E (Hz)	E, C/E (Hz)
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

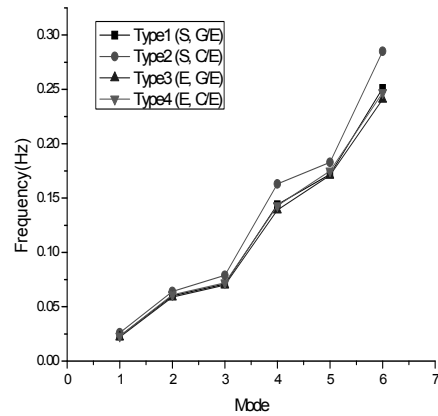
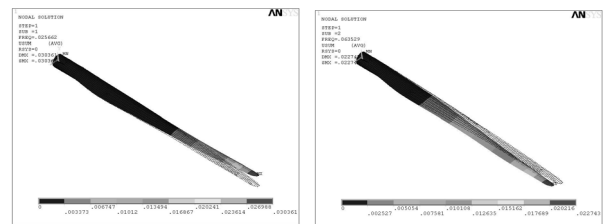
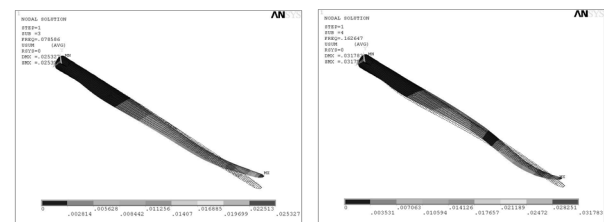


Fig. 10 Results of Modal Analysis



(a) 1st Mode

(b) 2nd Mode



(c) 3rd Mode

(d) 4th Mode

Fig. 11 Mode Shapes of Type 1 (S, G/E)

Table 8 Results of Buckling Analysis

Mode	Type 1	Type 2	Difference (%)
	S, G/E (Hz)	S, C/E (Hz)	
1	5.6448	5.8902	4.3
2	5.6452	5.8964	4.4
3	6.0052	6.3305	5.4
4	6.007	6.3353	5.5
5	6.4006	6.9043	7.9
6	6.4045	6.9092	7.9

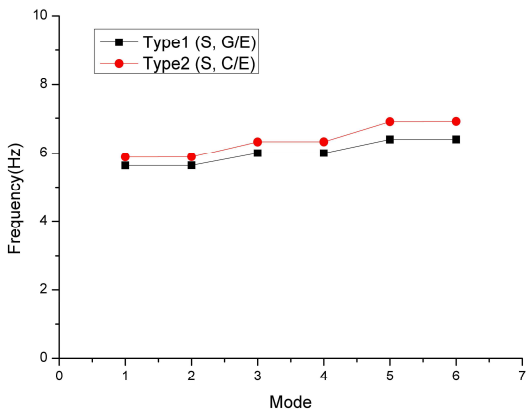


Fig. 12 Results of Buckling Analysis

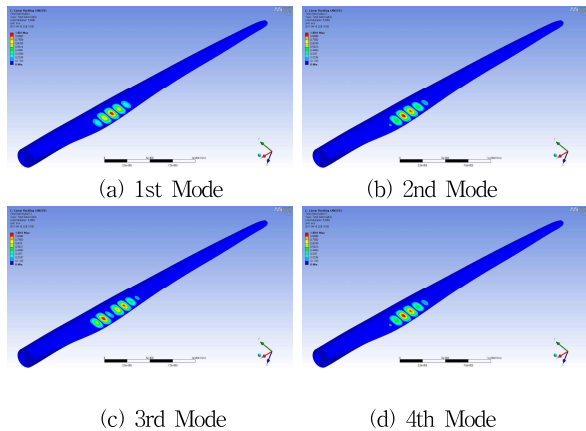


Fig. 13 Buckling Mode Shapes of Type 1(S, G/E)

차 모드까지 나타내었다.

적층 물성치와 등가 물성치의 모달 해석 차이는 1~6차 모드의 값을 비교해 볼 때, Glass-Epoxy의 경우 0.6~4.3%, Carbon-Epoxy의 경우 4.4~13.3%의 차이로 나타났다. 따라서 적층 물성치와 등가 물성치의 모달 해석 결과 값은 최소 0.001 Hz에서 최대 0.038 Hz의 매우 낮은 차이로써 좋은 일치를 보이며, 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있다.

블레이드의 구조 특성상 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 적층된 플라이(Ply)별로 응력 정보를 알 수 있는 적층 물성치를 적용하는 방법이 훨씬 효율적이라고 생각된다.

블레이드의 좌굴 해석 결과를 Table 8과 Fig. 12에 나타내었다. 또한 좌굴 모드 형상을 Fig. 13에 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 풍력 블레이드의 복합재 물성치 적용 방법과 재질에 따른 동적 거동 해석 결과를 비교 분석하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있다.

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

(2) 블레이드의 모달 해석을 수행한 결과, 적층 물성치 방법과 등가 물성치 방법을 이용한 모달 해석 결과를 비교하였을 경우 양호한 일치를 보이고 있었다.

(3) 블레이드의 좌굴 해석을 수행한 결과, Carbon-Epoxy는 Glass-Epoxy 모두 1차 모드 값이 5.6~5.8로 나타났으며, 이것은 좌굴설계에 위한 비교적 높은 안전율로 평가된다. 또한 Carbon-Epoxy는 Glass-Epoxy 보다 좌굴 모드값이 4.3~7.9% 향상되어 좋은 결과를 보였다.

따라서 본 연구의 결과는 대형 해상 풍력 등의 블레이드 설계와 개발에 기여할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20113040020010).

참고문헌

- (1) Jørgensen, E. R., Borum, K. K., McGugan, M., Thomsen, C. L., Jensen, F. M. and Debel, C. P., Full scale testing of wind turbine blade to failure-flapwise loading. Risø-R-1392(EN) ISBN 87-550-3184-6; ISBN 87-550-3185-4 (Internet) ISSN 0105-2840.
- (2) Jensen, F. M., Compression strength of a fibre composite main spar in a wind turbine blade. Risø-R-1391(EN) ISBN 87-550-3184-6; ISBN 87-550-3185-4 (Internet) ISSN 0105-2840.
- (3) M. Jureczko, M. Pawlak and A. Mezyk, 2005, "Optimisation of wind turbine blades," JMPT J., Vol. 167, pp. 463~471.

- (4) Kweon, J. H., Hong, C. S. and I. C. Lee, 1995, "Postbuckling Compressive Strength of Graphite/Epoxy Laminated Cylindrical Panels Loaded in Compression," AIAA J., Vol. 33, No. 2, pp. 217~222.
- (5) Y. S. Lee, B. H. Jun and J. M. Oh, 1997, "A Study on the Design Optimization of Composite Cylindrical Shells with vibration, Buckling Strength and Impact Strength Characteristics," KSME, Vol. 5, No. 4, pp. 48~69.
- (6) NASA SPACE VEHICLE DESIGN CRITERIA, 1968, "BUCKLING OF THIN-WALLED CIRCULAR CYLINERS," No. 4.3.3, pp. 19~21.
- (7) Myung-Hun Kim and Jong-Rae Cho, 2010, "Buckling analysis of Filament-Wound Thick composite Cylinder under Hydrostatic Pressure," KSPE, Vol. 11, No. 6.
- (8) Jones, R. M., 1975, "Mechanics of composite material," McGraw-Hill Book Company, Chapter 3.
- (9) MSC/PATRAN User Manual, MSC Software.