

대형 풍력발전용 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 좌굴 해석

한정영* · 홍철현*

*부산대학교 기계설계전산화인력양성센터

Buckling Analysis of Filament-wound Composite Towers for Large Scale Wind-Turbine

Jeong-Young Han* and Cheol-Hyun Hong*

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

KEY WORDS: Composite 복합재, Filament-wound 필라멘트 와인딩, Tower 타워, Wind-turbine 풍력, Buckling 좌굴

ABSTRACT: The purpose of this study was to investigate the buckling load of filament-wound composite towers for large scale wind-turbines using the finite element method (FEM). To define the material properties, we used both the effective property method and stacking properties method. The effective properties method assumes that a composite consists of one ply. The stacking properties method assumes that a composite consists of several stacked plies. First, a linear buckling analysis of the tower, filament-wound with angles of $[\pm 30]$, was carried out using the two methods for composite material properties: the stacking method and effective method. An FE analysis was also performed for the composite towers using the filament winding angles of $[\pm 30]$, $[\pm 45]$, and $[\pm 60]$. The FE analysis results using the stacking properties of the composite were in good agreement with the results from the effective properties method. The difference between the FEM results and material properties method was approximately 0~2.3%. Above the angle of $[\pm 60]$, there was little change in the buckling load.

1. 서 론

풍력발전시스템의 대형화에 따라, 타워 또한 대형화되고 있다. 풍력발전시스템에서 타워는 블레이드의 추력, 나셀 및 블레이드의 무게에 의한 자중을 지지하고, 풍하중, 지진하중 등과 같은 외부의 하중에 대한 안정성을 유지해야 한다. 또한 작업자 및 전력선의 이동 통로 등의 부가적 역할을 수행한다. 타워의 구조는 다른 기계요소와 비해 간단하지만 전체 풍력발전기 비용의 20~25% 정도를 차지할 정도로 단가 비용이 매우 높기 때문에 가격 경쟁력과 구조적 안정성이 있는 타워의 개발이 무엇보다 중요하다. 타워의 대형화에 따라, 기존의 스틸 타워, 스틸과 콘크리트를 혼용한 하이브리드 타워, 복합재 타워 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Uys et al., 2007; Polyzios et al., 2009). 대형 풍력발전용 타워의 제작을 위해 생산성 및 가격 경쟁력 측면에서, 필라멘트 와인딩 복합재 타워에 대한 관심이 많아지고 있다. 국외에서는 필라멘트 와인딩 공법을 이용한 복합재 타워 개발이 일부 국가에서 진행되고 있다(손충렬 등, 2008). 그러나 최근 국내에서는 필라멘트 와인딩 복합재를 이용하여 중형급 타워의 고유진동수 해석을 수행한 것을 제외하고는 연구가 미비한 실정이다(원종범 등, 2006). 또한 최근 국내 해상 풍력발전에 대한 연구가 많이 진행됨에 따라, 풍력발전의 대형화에 따른 복합재 타워에 대한 기초 연구가 필요하다.

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여, 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 선형 좌굴 해석을 수행하였다. 첫 번째 단계로, 필라멘트 와인딩 각도 $[\pm 30]$ 인 복합재 타워의 좌굴 해석을 수행하기 위해 복합재 물성치 적용 방법 중 등가 물성치와 적층 물성치, 두 가지 물성치 입력 방법을 적용하였다. 그 다음 단계로, 필라멘트 와인딩 각도 $[\pm 30]$, $[\pm 45]$, $[\pm 60]$ 에 따른 선형 좌굴해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 좌굴해석

기둥, 압축력을 받는 부재, 진공 탱크 등의 구조물은 압축 응력보다 낮은 상태에서 좌굴이 발생한다. 이러한 형태의 구조물들은 구조적 불안정성 때문에, 하중이 변동이 크지 않음에도 불구하고 매우 큰 변위가 발생하여 좌굴이 발생하게 된다. 고유치 또는 선형 좌굴해석은 이상적인 탄성 구조물에 대한 이론적인 좌굴 강도를 예측하는 해석이다. 선형 좌굴해석에서 고유치와 좌굴 모드를 얻게 된다(ANSYS Inc., 2011).

$$([K] + \lambda_i [S])\Psi_i = 0 \tag{1}$$

$[K]$: Stiffness matrix, $[S]$: Stress stiffness matrix,

λ_i : ith eigen value, Ψ_i : ith eigen vector of displacement

2.2 복합재 물성치 적용기법

필라멘트 와인딩 복합재 제작공정을 Fig. 1에 나타내었다. 필라멘트 와인딩 공정에 의한 복합재는 대부분 망상구조로 이루어져 있으며, 이러한 망상구조를 유한요소해석에 적용하기 위해, 물성치 입력 방법으로 등가 물성치 방법과 적층 물성치 방법으로 적용되고 있다(강병윤 등, 2010). 먼저 등가 물성치 방법은 복합재가 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).

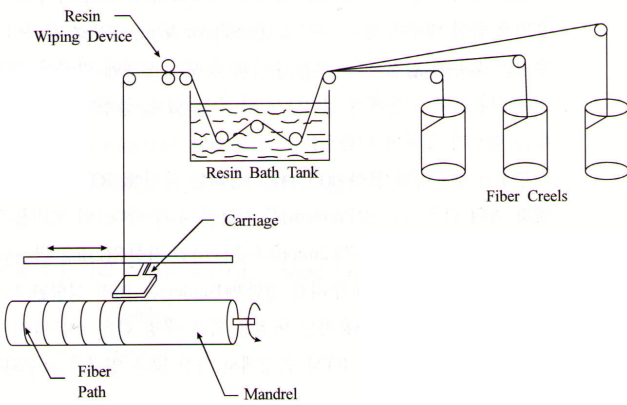


Fig. 1 Filament winding process

필라멘트 와인딩 복합재의 등가 물성치 계산을 위해, 고전 적층판 이론의 복합 적층판의 면강성과 공학적 상수를 적용하였다(Jones, 1975). 복합 적층판의 면강성(Extensional stiffness) $A_{\alpha\beta}$ 를 다음과 같은 관계식을 만족하는 항으로 정의한다.

$$\{N\} = [A]\{\epsilon\} \text{ 또는 } N_a = A_{\alpha\beta} \epsilon_\beta \quad (2)$$

와 같이 표시할 수 있다. 여기서 $A_{\alpha\beta}$ 와 $a_{\alpha\beta}$ 는 서로 역행렬의 관계이므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$[a] = [A]^{-1} \text{ 즉, } \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= (A_{22}A_{66} - A_{26}^2)/|A|, & a_{22} &= (A_{11}A_{66} - A_{16}^2)/|A|, \\ a_{12} &= (A_{16}A_{26} - A_{12}A_{66})/|A|, & a_{66} &= (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)/|A| \\ a_{16} &= (A_{12}A_{26} - A_{22}A_{16})/|A|, & a_{26} &= (A_{12}A_{16} - A_{11}A_{26})/|A|, \\ |A| &= (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)A_{66} + 2A_{12}A_{26}A_{16} - A_{11}A_{26}^2 - A_{22}A_{16}^2 \end{aligned}$$

식 (2)는 적층판의 두께 h 로 N_β 로 나누어서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_a = (ha_{\alpha\beta})\left(\frac{1}{h}N_\beta\right) = (ha_{\alpha\beta})\bar{\sigma}_\beta \quad (3)$$

식 (3)에서 복합 적층판의 평균 공학적 상수는 식 (4)와 같이 표시된다. 여기서 아래첨자 L과 T는 각각 복합 적층판의 종(Longitudinal) 및 횡(Transverse)방향을 나타낸다.

$$\begin{aligned} E_L &= \frac{1}{ha_{11}} = \frac{|A|}{h(A_{22}A_{66} - A_{26}^2)} \\ E_T &= \frac{1}{ha_{22}} = \frac{|A|}{h(A_{11}A_{66} - A_{16}^2)} \\ \nu_{LT} &= -\frac{a_{12}}{a_{11}} = -\frac{A_{16}A_{26} - A_{12}A_{66}}{A_{22}A_{66} - A_{26}^2} \\ \nu_{TL} &= -\frac{a_{12}}{a_{22}} = -\frac{A_{16}A_{26} - A_{12}A_{66}}{A_{11}A_{66} - A_{16}^2} \\ G_{LT} &= \frac{1}{ha_{66}} = \frac{|A|}{h(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)} \\ E_L\nu_{TL} &= E_T\nu_{LT} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 유한요소해석

3.1 타워 모델

현재 국내에서는 MW급 대형 복합재 타워에 대한 제작 및 설치 사례가 없는 관계로, 기존 연구보고서(산업자원부, 2007)의 2MW급 대형 풍력발전기용 스틸 타워를 적용하였으며, 타워의 형상과 치수를 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 첫 번째와 두 번째 구간은 경사각 없이 원통형으로 되어 있으며, 세 번째와 네 번째 구간은 약 0.6°의 경사각을 가지며 줄어드는 형상이다.

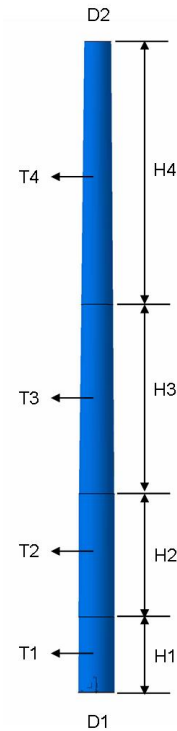


Fig. 2 Geometry of the tower

Table 1 Dimensions of the tower

Dimension	Symbol	Value (mm)
Height	H1	8900
	H2	14600
	H3	22400
	H4	31000
Thickness	T1	45
	T2	30
	T3	20
	T4	15
Diameter	D1	4200
	D2	3000

3.2 유한요소모델

유한요소 좌굴해석을 수행하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 12 Classic을 사용하였다. 타워의 유한요소 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 타워 셀의 경우 요소의 타입은 복합재 적층 능력과 비선형성이 고려되는 셀(Shell)요소인 4 Node Finite strain shell인 Shell181을 사용하였다. 타워의 상부에는 나셀부와 고정되는 부위에는 강체 거동을 유지하도록 강성이 큰 빔(Beam) 요소를 사용하였다. 총 요소의 개수는 11041개이다.

3.3 재료 물성치

유한요소해석을 수행하기 위해, 필라멘트 와인딩 공법에 많이 사용되고 있는 카본 에폭시(Carbon-epoxy) 소재인 T700을 사용하였으며 물성치는 Table 2에 나타내었다.

복합재 물성치 적용 방법에는 각 층마다 플라이들의 적층 각도와 적층 두께를 고려하는 적층 물성치 방법과 하나의 플라이로 구성되어 있다고 가정하는 등가 물성치 방법이 있다. 적층 물성치 방법은 대부분의 유한요소해석 프로그램에서 지원하는 방식으로서 적층 각도와 적층 두께를 각 층마다 일일이 입력하는 방식이다. 등가 물성치 방법의 경우, 이론적 수계산에 의해 매번 직접 계산을 해야 하는 번거로움이 있다. 그러나 복합재 구조 해석에 널리 사용되고 있는 MSC. PATRAN의 경우, 복합재의 등가 물성치 계산 기능을 제공하고 있다. 본 연구에서는

MSC. PATRAN에서 등가 물성치를 계산하여 적용하였으며, 필라멘트 와인딩 각도 $[\pm 30]$, $[\pm 45]$, $[\pm 60]$ 에 따른 등가 물성치를 Table 3에 나타내었다.

3.4 경계조건

유한요소해석을 위한 변위 경계 조건은 타워 하단 부분의 노드(Node)들의 모든 병진 및 회전 자유도(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)를 구속하였으며, 선형 좌굴 하중을 구하기 위해, 타워 최상단의 중심 노드에 단위 하중인 1[N]을 적용하였다. 그리고 RBE3 명령어를 사용하여 타워 최상단 셀의 노드에 하중이 고르게 적용되도록 하였다. 타워에 적용된 경계 조건을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2 Material properties of T700

Material		T700
Elastic modulus (GPa)	E1	120.7
	E2	8.5
	E3	8.5
Shear modulus (GPa)	G12	3.4
	G23	2.7
	G13	3.4
Poisson's ratio	v12	0.253
	v23	0.421
	v13	0.253

Table 3 Material properties of $[\pm 30]$, $[\pm 45]$, $[\pm 60]$ by the effective method

Angle		$[\pm 30]$	$[\pm 45]$	$[\pm 60]$
Elastic modulus (GPa)	E1	37.90	12.20	8.28
	E2	8.28	12.20	37.9
	E3	9.33	10.00	9.33
Shear modulus (GPa)	G12	24.4	31.4	24.4
	G23	2.85	3.02	3.18
	G13	3.18	3.02	2.85
Poisson's ratio	v12	1.47	0.82	0.32
	v23	0.29	0.07	-0.22
	v13	-0.22	0.07	0.29

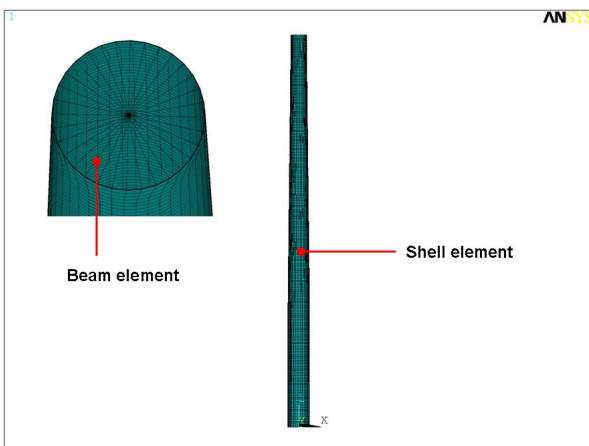


Fig. 3 FE model of the tower

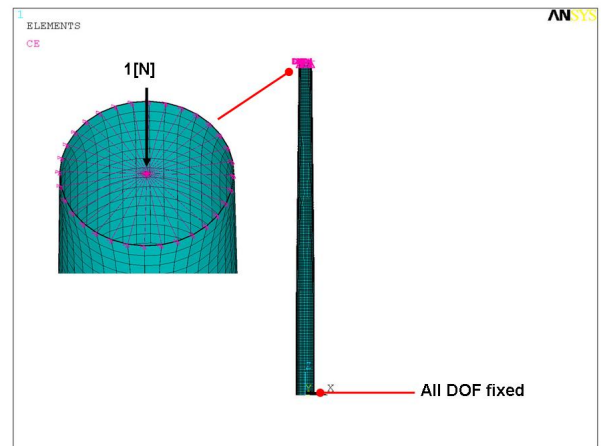


Fig. 4 Boundary conditions of the tower for FE analysis

3.5 해석방법

3.5.1 복합재 물성치 방법에 따른 좌굴해석

복합재 물성치 적용 방법에 따른 좌굴 해석을 분석하기 위해, 등가 물성치 방법과 적층 물성치 방법을 적용하여 필라멘트 와인딩 각도가 $[\pm 30]$ 인 타워의 좌굴 해석을 수행하였다. 적층 물성치 방법은 $[-30]$ 와 $+[30]$ 각도의 적층 횟수를 2회, 4회, 8회 교대로 반복하여 물성치를 적용하였다. 타워의 좌굴 해석 Case를 Table 4에 나타내었다. 여기서, Case 1은 등가 물성치를 적용하였으며, Case 2 ~ Case 4는 적층 횟수에 따라 적층 물성치를 적용하였다.

3.5.2 필라멘트 와인딩 각도에 따른 좌굴해석

다양한 필라멘트 와인딩 각도에 따른 좌굴 해석을 분석하기 위해, 필라멘트 와인딩 각도가 $[\pm 30]$, $[\pm 45]$, $[\pm 60]$ 일 때 좌굴 해석을 수행하였다. Table 5에 적층 각도에 따른 해석 경우를 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 복합재 물성치 방법에 따른 좌굴해석

$[\pm 30]$ 의 적층 각도를 가진 타워의 복합재 물성치 적용 방법에 따른 좌굴 하중(고유치)을 Table 6과 Fig. 5에 나타내었다. 그리고 좌굴 모드 형상을 Fig. 6에 나타내었다. Table 6에서 보이는

Table 4 Cases of buckling analysis according to number of layers

Case	$[-30]$	$+[30]$	$[\pm 30]$	Remarks
1	-	-	1	Effective
2	1	1	-	Stacking
3	2	2	-	Stacking
4	4	4	-	Stacking

Table 5 Cases of buckling analysis of $[\pm 30]$, $[\pm 45]$, $[\pm 60]$ according the property method

Case	Angle	No. of layers	Remarks
1		1	Effective
2	$[\pm 30]$	8	Stacking
3		1	Effective
4	$[\pm 45]$	8	Stacking
5		1	Effective
6	$[\pm 60]$	8	Stacking

Table 6 Results of buckling analysis according to number of layers

Angle	$[\pm 30]$						
	Method Effective		Stacking				
Number of stacking	1	2	4	8			
	Buckling load[kN]	Value	Value	Error (%)	Value	Error (%)	Value
1st	9256	9189	0.7	9254	0.01	9260	0.06
2nd	16079	11654	27.5	15533	3.4	15967	0.7
3rd	19141	11659	39.1	18203	4.9	18935	1.1

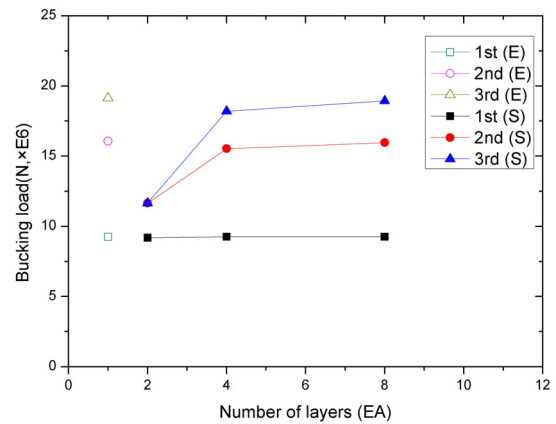
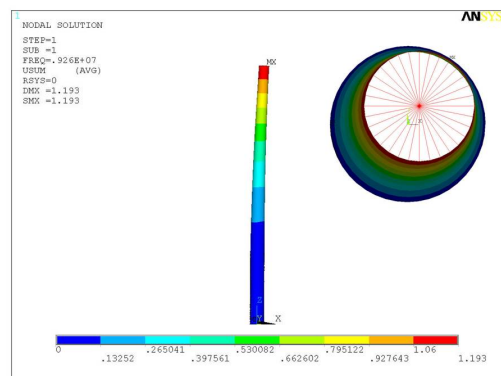
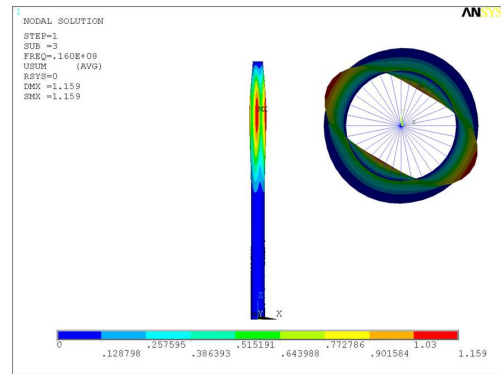


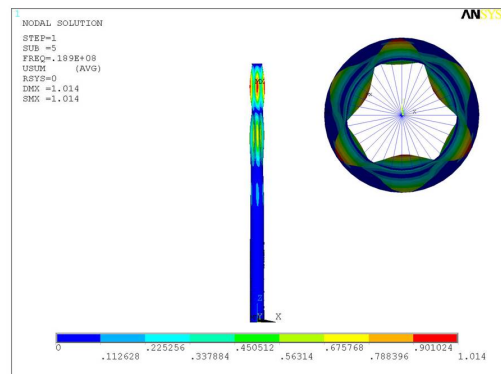
Fig. 5 Variation of buckling load according to number of layers



(a) 1st mode



(b) 2nd mode



(c) 3rd mode

Fig. 6 Buckling modes of the tower

것처럼 타워의 선형 좌굴 해석에서, 좌굴 하중 값은 적층 물성치 방법에서 적층 횟수가 많아질수록, 등가 물성치에 의한 좌굴 하중 값에 근접해간다는 것을 알 수 있다.

4.2 필라멘트 와인딩 각도에 따른 좌굴해석

필라멘트 와인딩 각도에 따른 타워의 선형 좌굴 해석 결과를 Table 7과 Fig. 7에 나타내었다. Table 7에 보이는 것처럼 등가 물성치와 적층 물성치에 의한 좌굴 해석값이 거의 유사한 결과를 보이며, 필라멘트 와인딩 적층 각도에 따라 좌굴하중 값은 달라진다. 이것은 적층 각도에 따라 복합재의 강성이 달라지기 때문이다.

필라멘트 와인딩 각도에 따른 타워의 선형 좌굴 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이론적으로 적층각도가 [0]에 가까울수록 좌굴하중은 급격히 증가하며 [±60]이상에서는 좌굴하중의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 타워의 좌굴 설계 관점에서는, 실제 필라멘트 와인딩 공정이 가능한 각도인 [±20]~[±40] 부근에서 설계하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

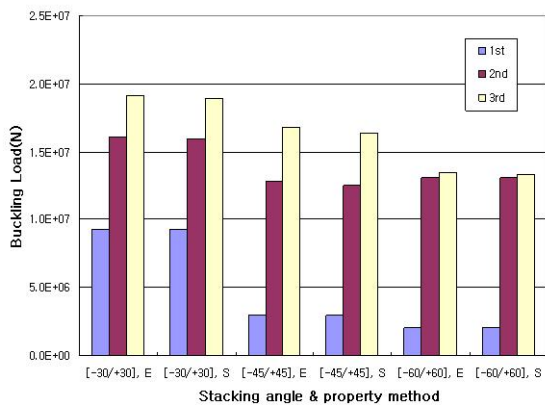


Fig. 7 Results of buckling analysis according to stacking angle

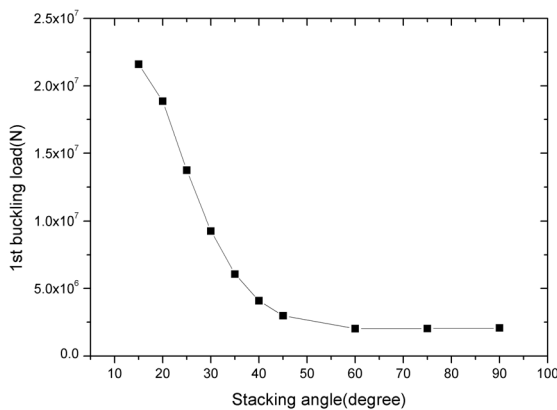


Fig. 8 1st buckling load according to stacking angles

Table 7 Results of buckling analysis according to stacking angle of [±30], [±45], [±60]

Material	Method	[±30]			[±45]			[±60]		
		E(*)	S(**)	Error(%)	E	S	Error(%)	E	S	Error(%)
Pcr (kN)	1st	9256	9260	0.06	2986	2985	0.04	2023	2022	0.06
	2nd	16079	15967	0.70	12781	12535	1.92	13096	13092	0.03
	3rd	19141	18935	1.08	16787	16413	2.23	13505	13331	1.29

(*): Effective method, (**): Stacking method

5. 결 론

본 연구에서는 대형 풍력발전용 타워에 대한 기초 연구로서, 유한요소해석을 이용하여 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 선형 좌굴 해석을 수행하였다. 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합재 물성치 적용 방법에 따른 타워의 좌굴 해석 결과, 좌굴 하중값은 적층 물성치 방법에서 적층 횟수가 많아질수록 등가 물성치 방법에 의한 좌굴 하중값에 근접하였다. 적층 횟수가 많아질수록 실제 필라멘트 와인딩의 물성치를 더 잘 반영하기 때문이다.

(2) 필라멘트 와인딩 각도에 따른 타워의 좌굴 해석 결과, 필라멘트 와인딩 적층 각도에 따라 좌굴 하중값은 달라진다. 이것은 적층 각도에 따라 복합재의 강성이 달라지기 때문이다. 이론적으로 적층각도가 [0]에 가까울수록 좌굴하중은 급격히 증가하며 [±60]이상에서는 좌굴하중의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

(3) 복합재의 선형 좌굴해석의 경우, 매번 이론적 수계산에 의한 등가 물성치를 적용하는 것보다 직관적으로 쉽게 물성치 적용이 가능한 적층 물성치를 적용하는 것이 더 효율적이라고 판단된다.

참 고 문 헌

강병윤, 김도완, 김명훈, 한정영, 홍철현, 김윤해 (2010). “대형 풍력 발전기용 하이브리드형 블레이드 구조해석”, 한국해양공학회, 춘계학술대회발표논문집, pp 2437-2442.

산업자원부, 에너지·자원기술개발사업 최종보고서 (2007). 2MW PMSG형 풍력발전 시스템개발.

손충렬, 이강수, 이정탁 (2008). “부가수 질량을 고려한 실린더형 풍력발전기타워의 동적응답연구”, 한국태양에너지학회, 춘계학술대회발표논문집, pp 61-66.

원종범, 이강수, 손충렬 (2006). “해상풍력발전용 Tower의 고유진동 해석에 관한 연구”, 한국소음진동공학회, 춘계학술대회발표논문집, pp 1296-1301.

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

ANSYS Inc. (2011). ANSYS Workbench-Mechanical Introduction 12.0.

Polyzios, D.J., Raftoyiannis, I.J. and Ungkurapinan, N. (2009). “Static and Dynamic Characteristics of Uuli-cell Jointed GFRP Wind Turbine Towers”, Composite structures, Vol 90,

No 1, pp 34-42.

Uys, P.E., Farkas, J., Jarmai, K. and van, Tonder, F. (2007).

“Optimization of a Steel Tower for a Wind Turbine Structure”, Engineering structures, Vol 29, No 7, pp 1337-1342.

Jones, R.M. (1975). Mechanics of Composite Material, McGraw-Hill

Book Company, Chapter 3.

2011년 2월 24일 원고 접수

2011년 3월 31일 심사 완료

2011년 4월 22일 게재 확정