

복합재료 고전적층판 이론을 이용한 MW급 해상풍력 블레이드 구조설계

배성열* · 김범석* · 이상래* · 김우준* · 김윤해**

* (사)한국신급 신성장산업본부
** 한국해양대학교 조선기자재공학부

Structural Design of Multi-Megawatt Wind Turbine Blade by Classical Lamination Theory

Sung-Youl Bae*, Bum-Suk Kim*, Sang-Lae Lee*, Woo-June Kim* and Yun-Hae Kim**

*New Growth Industry Division, Korean Register, Seoul, Korea

**Division of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea

KEY WORDS: Wind Turbine Blade 풍력 터빈 블레이드, Structural Design 구조 설계, Classical Lamination Theory 고전적층판 이론

ABSTRACT: This research presents a method for the initial structural design of a multi-megawatt wind turbine blade. The structural data for a 2-MW blade were applied as the blade structural characteristic data of the reference blade. Ten kinds of blade models were newly designed by replacing the spar cap axial GRRP with a GFRP and CFRP. These terms should be defined at different orientations. The axial stiffness coefficients of the newly designed models were made equal to the coefficient of the reference blade. The required numbers of layers in each section of blades were calculated, and the lay-up designs were based on these numbers. Verification results showed that the design method that used the structural data of the reference blade was appropriate for the initial structural design of a wind turbine blade.

1. 서 론

풍력 블레이드의 설계는 공력설계, 구조설계, 시스템통합하중 해석, 구조건전성 평가의 절차를 통해서 수행되며, 최종적으로 공력 및 구조 성능이 설계 시 설정한 목표사양을 만족한 경우에 설계가 완료된다(Kim et al., 2013; Lago et al., 2013; Lee et al., 2012; Mohamed et al., 2006). 블레이드 공력설계 관점에서는 목표출력 및 효율, 축 하중 및 소음 등이 설계의 핵심인자이며, 구조설계 관점에서는 중량, 변형량, 극한 및 피로파손 안전 여유, 좌굴 하중계수 등이 주요한 설계 고려인자이다. 하지만, 각 설계 인자들이 독립적이지 않고 상호작용을 하는 관계에 있으므로 블레이드 설계 시에 공력설계, 구조설계, 하중해석, 구조건전성 평가의 수많은 반복수행을 통해서 최적의 설계 결과를 얻게 된다. 따라서 블레이드 개발 기간을 최소화하기 위해서는 반복설계 횟수를 줄이는 것이 중요하고, 이를 위해서는 공력 및 구조 초기 설계가 반드시 적절하게 이루어져야 한다. 특히, 구조설계의 경우 상대적으로 많은 시간이 소요되기 때문에 초기 설계에서 타당한 설계가 이루어져야 하고, 이러한 이유로 블레이드

개발 과정에서의 초기 구조설계는 유사한 용량, 길이, 중량, 바람등급(IEC wind class)을 가지는 검증된 모델의 블레이드 적층구조 및 특성값 등을 이용하여 수행되는 사례가 많다(Cox and Echtermeyer, 2012; Song et al., 2011).

본 연구에서는 구조/공력 성능이 검증된 참고용 블레이드의 구조 특성 데이터를 이용하여 블레이드 초기 구조설계를 수행하는 방법에 대해 나타내었다. 참고용 블레이드 구조적 특성 데이터는 기 개발된 2MW 블레이드의 데이터가 적용되었다. 블레이드 초기 구조설계는 참고용 블레이드에서 스파캡에 대한 구조설계만을 변경하여 수행하였으며, 그 이외의 부위에 대해서는 기존 사양과 동일한 적층구조가 적용되었다. 스파캡 구조설계는 기존의 GFRP(Glass fiber reinforced plastics) 재료 및 0° 적층각도를 가지는 참고용 블레이드의 스파캡을 GFRP, CFRP(Carbon fiber reinforced plastics) 재료 및 0°, 5°, 10°, 15°, 20°의 적층각도를 가지도록 각각 재설계하였다. 그 이유는 20° 이상의 적층각도에서는 풍력 터빈의 출력성능을 향상시키고 블레이드의 피로하중을 줄여주는 연계계수가 이미 수렴되었다고 판단(Fig. 5, Fig. 6)하여 총 5가지 적층각도에 대해서 재설계를

Received 2 September 2013, revised 23 October 2013, accepted 10 April 2014

Corresponding author Yun-Hae Kim: +82-51-410-4355, yunheak@kmou.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSME 2013 in Busan.

수행하였다. 구조설계 본 연구에서는 초기 구조설계 단계에서 참고용 블레이드와 유사한 구조특성을 갖는 블레이드를 설계하기 위한 구조설계 방법에 대해서 제시하였고, 그 설계 방법의 타당성을 확인하고자 하였다.

2. 복합재 빔 이론

복합재 중공보에 대한 강성계산은 복합재료 고전적층판 이론을 기초로 하여 다수의 연구자들에 의해 제시되었다(Berdichevsky et al., 1992; Armaniso and Badir, 1995; Libove, 1998). 재료 및 적층 방향이 상이한 다수의 단층으로 구성된 복합재 중공보의 응력 계산은 적층판(Laminate) 단위(Level)에서 계산이 수행된다. 먼저, z와 s평면상에서 적층판을 구성하고 있는 라미나의 응력과 변형률의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_s \\ \sigma_{zs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_s \\ \gamma_{zs} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, ϵ_z, ϵ_s 는 각각 z와 s방향의 변형률을 나타내며, γ_{zs} 는 z와 s가 이루고 있는 평면의 전단 변형률이다. 하중에 의한 복합재 중공보를 구성하고 있는 각각의 라미나의 변형이 동일하다고 가정하면, 복합재 중공보를 균질한(Homogenous) 이방성(Anisotropic) 특성을 가지는 적층판으로 고려하여 응력을 계산할 수 있다. 복합재 적층판의 응력과 변형률의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 좌표계와 응력분포는 Fig. 1과 같다.

$$\begin{Bmatrix} N_z \\ N_s \\ N_{zs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_s \\ \epsilon_{zs} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 복합재 적층판의 응력 합인 N_α 는 적층판의 응력을 두께 방향으로 적분하여 얻은 값이므로 적층판 폭 방향으로의 단위길이 당 힘이 된다. 또한, A 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

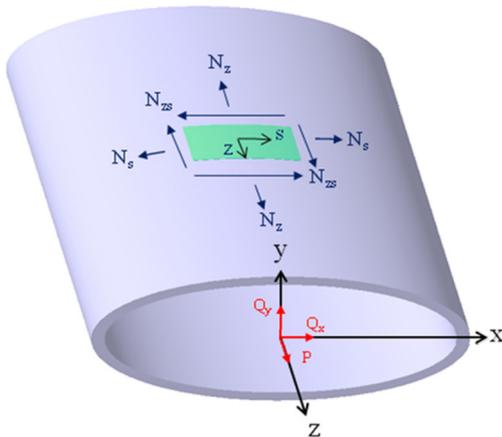


Fig. 1 Coordinate system and stress of composite beam

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (3)$$

식 (3)에서, N은 스파캠의 단층 수를 나타낸다. 또한, 식 (2)에서 압축 하중을 받지 않는 얇은 복합재 구조의 경우 N_s 는 무시할 수 있는 정도이므로 0으로 가정한다. 이 가정을 통해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_s \\ N_{zs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} & A_{16} - \frac{A_{12}A_{26}}{A_{22}} \\ A_{16} - \frac{A_{12}A_{26}}{A_{22}} & A_{66} - \frac{A_{26}^2}{A_{22}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \gamma_{zs} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 아래와 같이 나타내면 행렬의 각 요소를 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_s \\ \gamma_{zs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{21} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ N_{zs} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$H_{22} = \left(A_{66} - \frac{A_{26}^2}{A_{22}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$H_{21} = \left(A_{16} - \frac{A_{12}A_{26}}{A_{22}} \right) H_{22}, \quad (7)$$

$$H_{11} = \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} - \frac{H_{21}^2}{H_{22}} \right) \quad (8)$$

이다.

식 (6)~(8)에서 H_{11} 은 축강성 계수로서 굽힘 강성에 비례하는 값이며, H_{21} 은 비틀림 연계 계수로서 비틀림 변형을 유발하는 정도를 나타낸다. 본 연구에서는 하중에 의한 블레이드의 변형에 비례하는 값인 축강성 계수를 이용하여 블레이드 초기 구조설계를 수행하였으며, 적층 재료 및 각도에 따른 축강성 계수와 비틀림 연계계수의 변화를 관찰하여 두 계수간의 상호 연관성을 밝히고자 하였다.

3. 구조 설계

3.1 베이스라인 블레이드 개발 결과

본 연구에서는 공력/구조 성능이 검증된 2MW급 블레이드 모델을 블레이드 초기 구조 설계를 위한 참고용 모델로 선정하였고, Table 1에 참고용 블레이드 설계에 적용된 터빈 시스템의 사양에 대해서 나타내었다. 이 풍력 터빈은 정격풍속 조건에서 17.47RPM으로 회전하며, 2MW의 전력을 생산할 수 있도록 설계되었다. 또한, IEC(International Electrotechnical Commission)

Table 1 Specification for reference turbine system

Title	Description
Type	3 bladed upwind
Rotor diameter	82.0 m
Rotor swept area	5281 m ²
Hub height	78.0 m
Power regulation	Variable speed, pitch regulated
Rotor speed	17.47 RPM (rated)
Rated power	2,000 kW
Cut-in wind speed	4 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Rated wind speed	11.5 m/s
Design wind class	IIA ($V_{ref}=42.5$ m/s, $I_{ref}=0.16$)
Annual mean wind speed at hub height	8.5 m/s
Required turbine life time	20 years

wind class IIA로 설계되었으며, 40.1m의 길이를 가지도록 설계되었다. 공력 및 구조설계 이후에 시스템통합하중해석을 통하여 극한 및 피로하중을 도출하였고, 팁변형 평가, 라미네이트 파손 평가, 좌굴 안정성 평가, 샌드위치 구조물 파손 평가, 볼트 체결부 평가, 집착 체결부 평가를 통해서 설계된 블레이드의 구조건전성을 평가하였다. 구조건전성 평가를 통해서 설계된 블레이드가 설계수명을 만족하는 것을 확인하였으며, 베이스라인 블레이드의 개발이 완료되었다.

3.2 강성 계수 계산

본 연구에서는 풍력 블레이드 구조적 측면에서 가장 중요하다고 할 수 있는 변형(Deflection)과 직접적인 관계에 있는 블레이드 섹션별 축강성 계수(Axial stiffness coefficient) 데이터를 블레이드 재 설계에 이용하였다. 블레이드 설계는 다음과 같은 절차로 진행되었다.

- ① 스파캡 섹션별 축강성 계수 계산 - 참고용 블레이드 데이터 이용
- ② 스파캡 섹션별 적층수 계산 - 참고용 블레이드와 동일한 축강성 계수를 가지게 하기 위한 적층수 계산
- ③ 도출된 적층수를 이용한 적층 설계
- ④ 참고용 블레이드와 재설계된 블레이드의 섹션별 굽힘강성 비교를 통한 검증

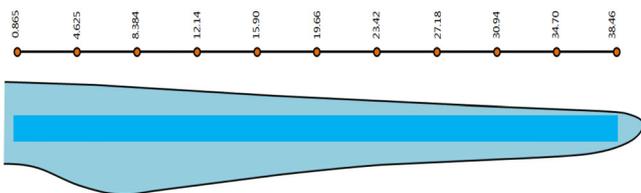


Fig. 2 Stiffness calculation point for structural design

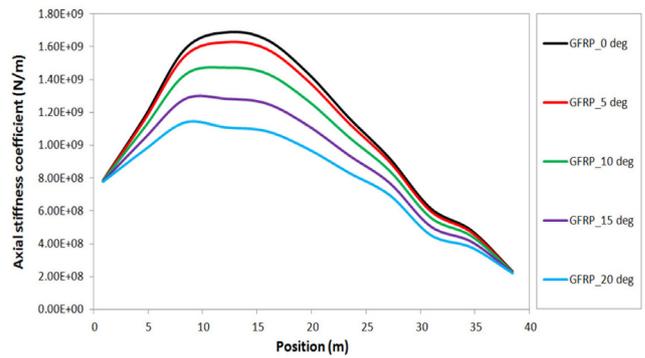


Fig. 3 Axial stiffness coefficient of GFRP model

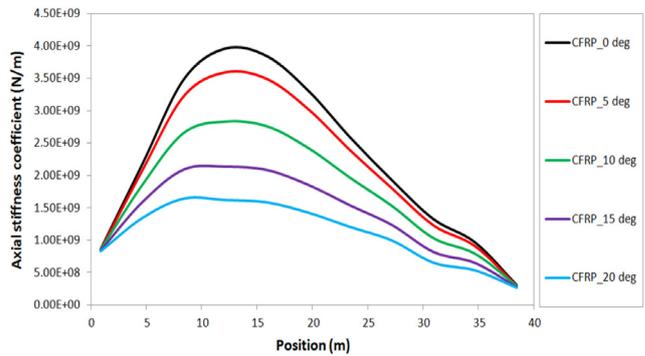


Fig. 4 Axial stiffness coefficient of CFRP model

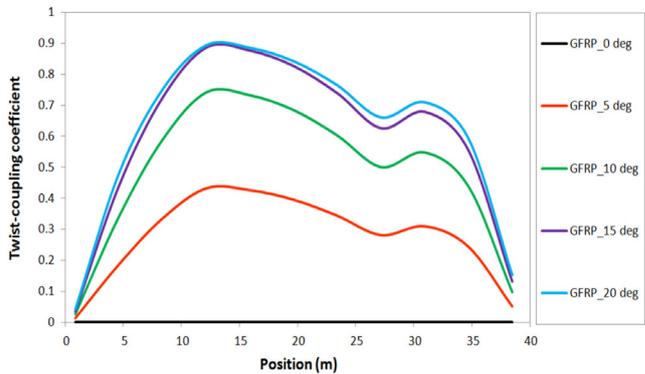


Fig. 5 Twist coupling coefficient of GFRP model

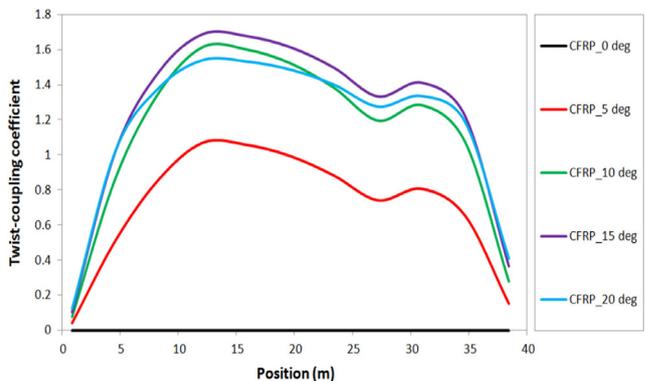


Fig. 6 Twist coupling coefficient of CFRP model

Fig. 2에 블레이드 축강성 계수의 계산 지점을 나타내었다. 축강성 계수의 계산은 참고용 블레이드의 길이 방향의 11개 지점에 대해서 스파캡에 적층되어 있는 일방향 섬유와 다축 섬유의 적층 수, 각도, 개수 데이터를 이용하여 수행되었다.

Fig. 3, Fig. 4에 각각 GFRP와 CFRP 모델에 대한 섹션별 축강성 계수를 나타내었다. 그림을 통해서 일방향 섬유의 적층각도가 커질수록 축강성 계수가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 복합재료 섬유의 적층각도가 블레이드 주축방향인 0°와 차이를 가지게 될 경우에는 그만큼 주축방향의 강성이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5, Fig. 6에 각각 GFRP와 CFRP 모델에 대한 비틀림 연계계수를 나타내었다. 그림을 통해서 일방향 섬유의 각도가 증가할수록 연계계수는 증가하는 경향을 보이고, 일정 각도에서 수렴하여 그 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 결론적으로, 주축방향에 대한 일방향 섬유의 적층각이 증가할수록 축방향 강성이 감소하는 대신 비틀림을 유발시키는 연계 계수가 증가하여 특정 각도에서 수렴되며, 이 경향은 재료마다 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 일부 블레이드 구조설계의 경우 이러한 재료적 특성을 이용하여 하중에 의한 블레이드의 굽힘변형과 비틀림변형을 동시에 유발시키고, 이를 통해서 출력성능을 향상시키고 피로하중을 줄이는 구조설계를 하고 있다(Goeij et al., 1999).

3.3 적층 설계

10가지 케이스에 대한 블레이드 적층설계를 수행하였다. 모든 케이스의 스파캡 섹션별 적층수는 참고용 블레이드의 축강성 계수와 동일한 값으로 설정하여 계산하였다. 축강성 계수의 계산을 통해서 각 섹션별 적층수를 도출하였고, Fig. 7에 나타난 계산 과정을 통해서 스파캡의 적층설계를 완료하였다.

Fig. 8에 구조설계 이후에 도출된 10가지 케이스의 블레이드의 중량을 비교하여 나타내었다. GFRP_0 deg 케이스는 참고용 블레이드와 스파캡 적층각도를 동일하게 하였고, 11개 계산지점의 축강성 계수 또한 동일하게 하였지만, 참고용 블레이드와 미세한 중량 차이를 보였다. 그 이유는 참고용 블레이드의 경우 스파캡에 대해서 50개 이상의 섹션으로 구분하여 각 섹션별 적층수를 다르게 적용하였으나, 초기 설계된 블레이드의 경우는

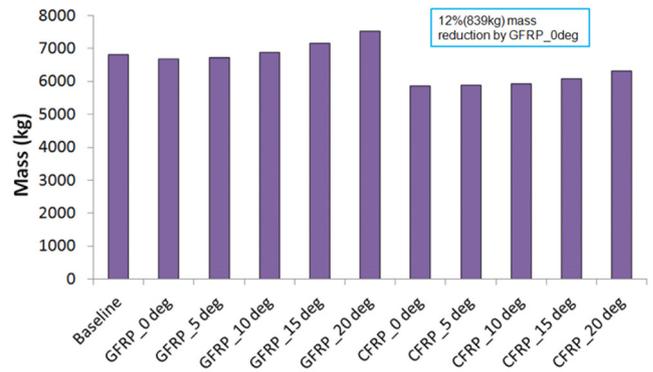


Fig. 8 Mass Comparison

축강성계수 계산 지점이 11개 밖에 되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 또한, CFRP_0 deg 블레이드는 GFRP_0 deg 블레이드에 비해 839kg의 경량설계가 가능한 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 본 연구를 통해 구축한 초기 구조설계 프로세스를 적용하여 다양한 케이스의 적층설계를 완료하였고, 이 방법은 단 시간에 다양한 design case study를 하기에 적절한 방법이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 초기 구조설계 단계에서 참고용 블레이드의 강성 데이터를 이용하여 그와 유사한 구조특성을 가지는 블레이드 구조 설계 방법에 대해 제시하였고, 검증을 통해서 그 방법의 타당성을 확인하고자 하였다. GFRP와 CFRP 각각 5개 케이스에 대한 초기 구조설계를 위해서 블레이드 섹션별 축강성 계수와 연계계수를 계산하였다. 이를 통해서 주축방향에 대한 일방향 섬유의 적층각이 증가할수록 축방향 강성이 감소하는 대신 연계계수가 증가하여 특정 각도에서 수렴되며, 이 경향은 재료마다 차이가 있다는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 구축한 초기 구조설계 프로세스를 적용하여 다양한 케이스의 적층설계를 완료하였고, 이 방법은 단 시간에 다양한 Design case study를 하기에 적절한 방법이라고 판단된다. 참고용 블레이드와 재 설계된 블레이드 간의 굽힘강성 비교를 통해서 예지

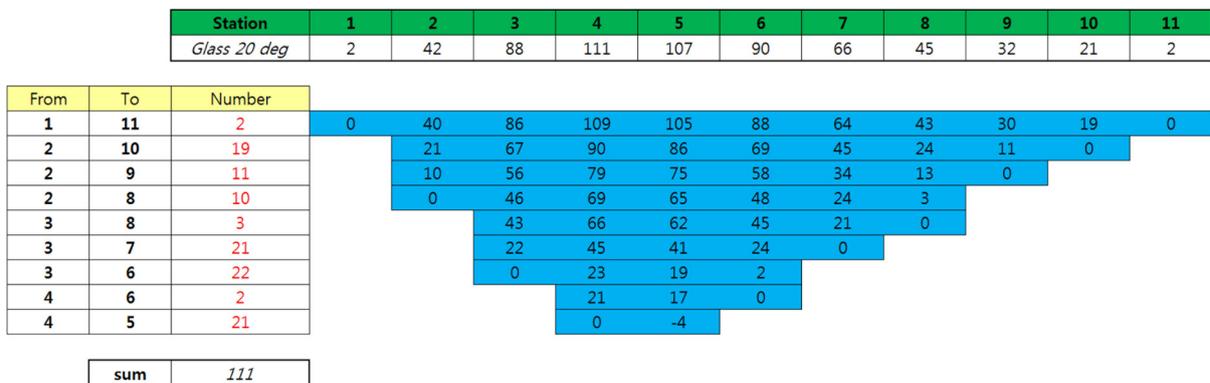


Fig. 7 Lay-up design example(GFRP 20 deg blade)

(Edge) 방향의 굽힘 강성은 참고용 블레이드와 거의 유사하며, 플랩(Flap) 방향의 경우, 루트(Root) 근방에서 다소 차이가 있지만 전체적으로 거의 유사한 강성 분포를 확인할 수 있다. 이를 통해서 본 연구에서 제시한 초기 구조설계 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 2013년도 산학협력기술개발업(CO102098)의 연구수행으로 인한 일부 결과물임을 밝힙니다.

References

- Armanios, E.A., Badir, A.M., 1995. Free Vibration Analysis of Anisotropic Thin-Walled Closed-Section Beams, *AIAA Journal*, 33(10), 1905-1910.
- Berdichevsky, V., Armanios, E., Badir, A., 1992. Theory of Thin-Walled Anisotropic Beams. *Journal of Composite Materials*, 5(2), 411-432.
- Cox, K., Echtermeyer A, 2012. Structural Design and Analysis of a 10MW Wind Turbine Blade. *Energy Procedia*, 24, 194-201.
- Goeij, W., Tooren, M., Beukers, A., 1999. Implementation of Bending-Torsion Coupling in the Design of a Wind-Turbine Roter-Blade. *Applied Energy*, 63, 191-207.
- Kim, B.S., Kim, W.J., Lee, S.L., Bae, S.Y., Lee, Y.H., 2013. Development and Verification of a Performance Based Optimal Design Software for Wind Turbine Blades. *Renewable Energy*, 54, 166-172.
- Libove, C., 1998. Stress and Rate of Twist in Single-Cell Thin Walled Beams with Anisotropic Walls. *AIAA Journal*, 26(9), 1107-1118.
- Lago, L., Ponta, F., Otero, A., 2013. Analysis of Alternative Adaptive Geometrical Configurations for the NREL-5MW Wind Turbine Blade. *Renewable Energy*, 59, 13-22.
- Lee, Y.J., Jhan, Y.h., Chung, C.H., 2012. Fluid-Structure Interaction of FRP Wind Turbine under Aerodynamic Effect. *Composites*, 43, 2180-2191.
- Mohamed, M. and Wetzel. K., 2006. 3D Woven Carbon/Glass Hybrid Spar Cap for Wind Turbine Rotor Blade. *Journal of Solar Energy Engineering*, 128(4), 562-573.
- Song F, Ni Y, Tan Z, 2011. Optimization Design, Modeling and Dynamic Analysis for Composite Wind Turbine Blade. *Procedia Engineering*, 16, 369-375.