

소형풍력발전기용 블레이드의 구조해석 및 설계

최두순*^{*,#}

*한국교통대학교 기계공학과

Structural Analysis and Design of Small Wind Turbine Blade

Du-Soon Choi*^{*,#}

*Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

Received 12 January 2015; received in revised form 13 February 2015; accepted 17 February 2015

ABSTRACT

Wind turbine blades represent a key component of wind turbines, which extract energy from the wind. In the present study, the structural design of a small wind turbine blade is undertaken using a numerical analysis. The reliability of numerical results is verified through a comparison with the full-scale structural test data of a current blade. To modify the blade design, the blade was divided into several sections and the effect of the thickness of each section was investigated in a numerical analysis. Finally, the modified blade was designed with a lightweight and high-strength.

Key Words : Small Wind Turbine Blade(소형 풍력발전용 블레이드), Structural Analysis(구조해석), Structural Design(구조설계), Composite Blade(복합재료 블레이드)

1. 서 론

풍력발전용 블레이드(wind turbine blade)는 바람의 운동에너지를 기계적 회전에너지로 변환하여 발전기를 구동시키는 핵심 부품이다. 이러한 블레이드의 구조재료로는 비강도(specific strength), 비강성(specific stiffness) 및 피로특성 등이 우수한 복합재료가 주로 사용되고 있으며, 기본 구조는 외부의 표피(skin), 내부의 스파(spar), 폼(foam) 등으로 구성된다. 블레이드는 굽힘 모멘트, 비틀림 모멘트, 좌굴, 전단력 등의 여러 외부 하중을 견디도록 설계되어야 하며, 이를 위하여 유한요소법(finite element method)를 이용한 구조해석이 많이

수행되고 있다^[1-3]. 또한, 설계된 블레이드의 안전성 및 구조적 건정성 검증을 위하여 관련 국제 규격인 IEC 61400-2^[4]에서 규정하는 실규모 구조 시험(full scale structural test)이 수행된다^[5,6].

본 연구에서는 기존의 소형풍력발전기용 블레이드의 구조적 성능 향상을 위한 구조해석을 통한 설계개선을 수행하였다. 먼저 실규모 구조시험 결과와의 비교를 통하여 구조해석 결과의 신뢰성을 검증하였고, 설계개선을 위하여 블레이드의 표피 및 스파를 몇 개의 영역으로 구분하여 각 영역의 두께에 따른 굽힘강도를 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 기존 블레이드보다 경량화되고, 향상된 굽힘강도를 갖는 개선 블레이드를 설계하였다.

Corresponding Author : dschoi@ut.ac.kr

Tel: +82-43-841-5128, Fax: +82-43-841-5120

2. 기존 블레이드 분석

2.1 블레이드 형상

본 연구의 대상 블레이드는 10kW급 수평축 소형 풍력발전용 복합재 블레이드이다. 전체 길이가 약 3700mm이고, 폭은 약 442mm로 자세한 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 각 부의 두께는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 스킨부 기본두께가 6.36mm, 2개의 스파부 두께는 6.00mm, 두 스파부 사이의 하단면 스킨두께는 7.22mm로 이루어져 있다.

2.2 극한 하중 시험

블레이드의 극한 하중 시험을 소형풍력발전시스템 관련 국제 규격인 IEC 61400-2^[4]의 극한 하중 조건인 Case H(parked wind loading)의 경우를 적용하여 수행되었다. 이 시험은 Fig. 3에 나타낸 것처럼 블레이드 뿌리 부분을 고정시키고 풍력발전 시스템의 로터 중심에서 끝단까지 거리의 75% 지점에 시험하중의 40, 60, 80 및 100%의 하중을 가하고, 100%의 하중에도 블레이드의 파손이

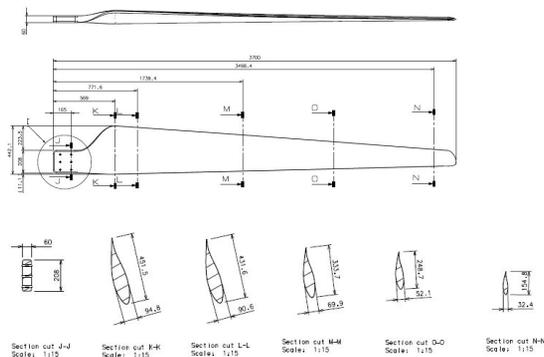


Fig. 1 Geometry of small wind turbine blade

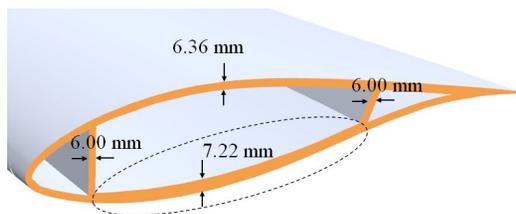


Fig. 2 Thicknesses of small wind turbine blade

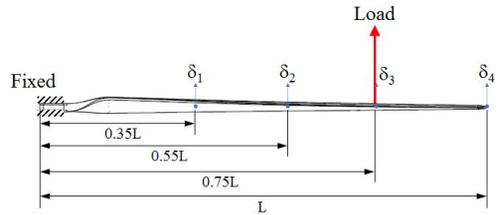


Fig. 3 Schematic diagram of bending experiment

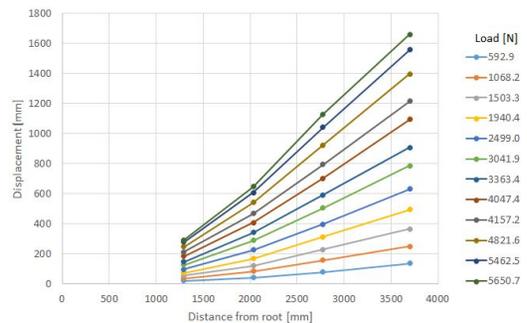


Fig. 4 Deformation of blade under increasing loads

발생하지 않은 경우에는 파손될 때까지 하중을 단조 증가(monotonic increase) 시키는 방법이다. 또한, 뿌리부로부터 35%, 55%, 75%, 100% 지점에 변위센서를 장착하여 변위를 측정하였다. Fig. 4에 변위센서 위치에서의 하중에 따른 블레이드의 변형량을 나타내었다. 시험 결과 하중 4047.4N에서 블레이드 표면에 좌굴 현상이 발생하면서 파괴가 발생하였다.

3. 구조 해석

3.1 기존 블레이드 해석

먼저 기존 블레이드에 대하여 극한 하중 시험과 동일한 조건 하에서 구조해석을 수행하였다. 블레이드의 재질은 유리섬유 복합재료이며, 촛트 스트랜드 매트(chopped strand mat)와 직조로빙(woven roving)이 복합적으로 사용되어 제작되었다. 섬유 강화 복합재료의 경우 적층순서, 적층두께, 적층각

도에 따른 재료의 이방성을 고려하는 것이 일반적이나, 본 블레이드의 경우 칩트 스트랜드 매트와 여러 각도의 직조로빙을 사용하였으므로 면내 등방성(transversely isotropic) 재료로 가정하는 것이 타당하다. 그러나 본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 재료를 등방성(isotropic) 재료로 가정하였다. 블레이드의 두께방향 치수가 다른 치수에 비하여 상당히 작으므로, 평면응력(plane stress) 상태라 볼 수 있고, 이 경우 면내 등방성 재료와 등방성 재료의 차이는 무시할 수 있으므로, 등방성 재료라는 가정도 타당성을 가질 것이다. 해석에 사용된 재료의 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다.

블레이드 형상은 구조해석을 위하여 Fig. 5와 같이 단순화시킨 후, 쉘 요소(shell element)로 모델링하였다. 이 때, 요소(element)수는 23150개, 절점(node)수는 23313개로 구성되었다. 경계 및 하중 조건은 극한하중시험 조건과 동일하게 뿌리 부분에 고정 구속조건을 부여하고 뿌리로부터 전체 길이의 75% 지점에 하중을 부과하여 각 하중에 따른 블레이드의 변형량을 해석하였다.

Table 1 Mechanical properties of FRP

Property	Unit	Value
Young's modulus	GPa	10.6
Poisson's ratio	-	0.3
Tensile strength	MPa	232.8
Density	kg/m ³	2100

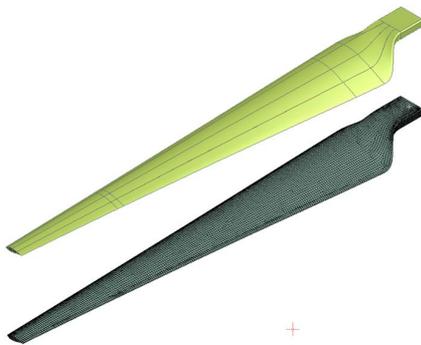


Fig. 5 Simplified geometry and generated meshes of the blade

하중 4047.4N에서의 블레이드의 응력비(stress ratio, σ/σ_y)와 변형량을 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 응력은 블레이드의 뿌리부에 집중되고 있음을 알 수 있고, 이것은 뿌리부에 가장 큰 모멘트가 발생하기 때문으로 분석할 수 있다.

해석 결과의 검증을 위하여 하중 증가에 따른 블레이드 끝단의 변위량을 시험결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 또한 하중 4047.4N에서의 블레이드의 위치별 변위량을 시험결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 8의 경우 해석 결과와 시험 결과의 오차는 15% 이내이고, Fig. 9의 경우에는 3% 이내의 오차를 보였다. 따라서 해석 결과가 시험 결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며, 동일한 해석 방법으로 블레이드의 설계개선을 수행하였다.

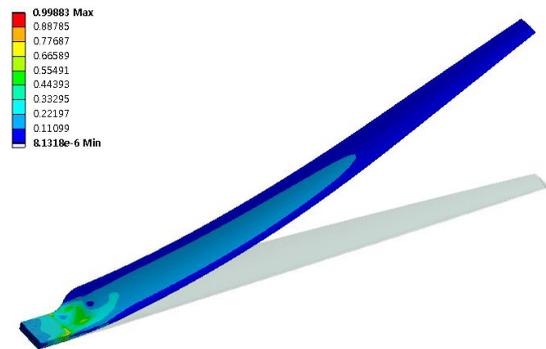


Fig. 6 Stress ratio results of the blade

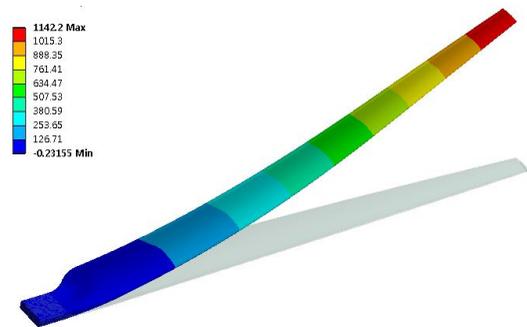


Fig. 7 Deformation results of the blade

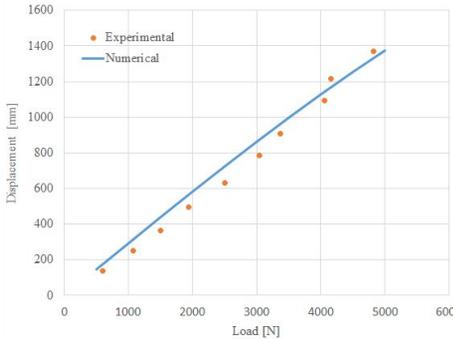


Fig. 8 Comparison of the displacement of blade tip between the numerical and experimental results

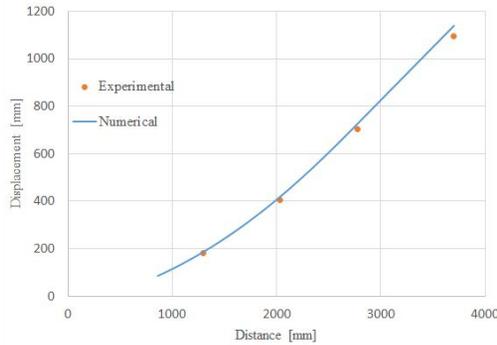


Fig. 9 Comparison of deformation of blade at 4047.4N between the numerical and experimental results

3.2 설계 개선 방법

일반적으로 블레이드의 두께는 바람에 의한 굽힘 모멘트의 영향을 최소화시키기 위하여 뿌리 부분은 두껍고 끝단으로 갈수록 얇아지는 구조를 갖는다. 또한 구조적 보강을 위하여 내부에 몇 개의 스파 구조를 가지고 있다. 본 연구에서는 Fig. 10 과 같이 블레이드의 스킨부를 3개 영역으로 분할하고, 최대 3개의 스파를 갖는 구조를 기본으로 각 부분의 두께를 변화시키며 해석을 수행하였다. 이 때, 각 부의 두께 변화는 기존 블레이드의 두께를 기준으로 실제 적용 가능한 범위 내에서 선정하였다. Table 2은 각 분할 영역의 면적을 나타내었다.

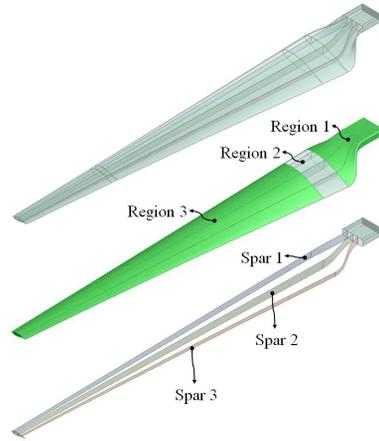


Fig. 10 Segmentation of the blade

Table 2 Area of each segment

Components	Area (m ²)
Region 1	0.366
Region 2	0.240
Region 3	1.679
Spar 1	0.173
Spar 2	0.213
Spar 3	0.110

해석을 통한 설계 목적은 블레이드의 굽힘강도는 증가시키면서, 중량은 감소시키는 것이다. 즉, 식 (1)과 같이 중량당 허용하중을 최대화시키는 것을 설계의 목적으로 하였다. 이 때 허용하중이란 2.2 절의 극한하중시험에서의 허용하중을 의미한다.

$$f = \frac{P_a}{W}, \quad \begin{matrix} P_a: \text{Allowable load} \\ W: \text{Weight of blade} \end{matrix} \quad (1)$$

3.3 해석 결과

1) 스킨두께의 영향

먼저 스킨두께가 블레이드의 굽힘 강도에 미치는 영향을 분석하였다. 스파 1~3은 없는 상태로 가정하고, region 1~3의 두께를 모두 동일한 두께로 적용하여, 스킨 두께의 변화량에 따른 중량당 허용하중의 변화를 계산하였다. Table 3과 Fig. 11에 스킨 두께에 따른 해석 결과를 정리하여 나타내었다.

Table 3 Effect of skin thickness

T _{skin} (mm)	P _a (N)	W (kg)	P _a /W
5.00	1253.76	24.00	95.42
6.00	1601.94	28.80	101.60
7.00	1935.72	33.60	105.23
8.00	2274.12	38.39	108.17

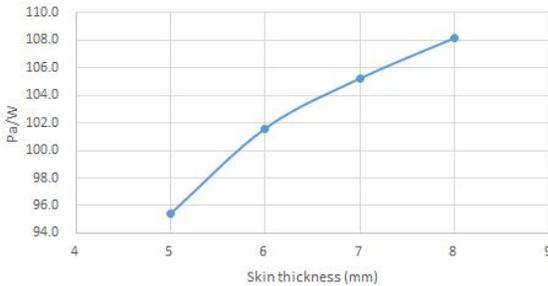


Fig. 11 Effect of skin thickness on the allowable load per weight

Fig. 11에서와 같이 중량당 허용하중은 스킨두께가 증가할수록 증가하였고, 이 때 평균 기울기는 4.25로 계산되었다. 따라서 스킨두께의 영향을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\left(\frac{P_a}{W}\right) = 4.25(\Delta T_{skin}) \quad (2)$$

2) 뿌리부 보강의 영향

굽힘모멘트 하에서 가장 많은 응력이 발생하는 곳은 뿌리부이다. 따라서 뿌리부 보강을 위하여 Region 1, 2의 두께를 증가시키면서 이에 따른 중량당 허용하중의 변화를 계산하였다. 스파 1~3은 없는 상태로 가정하였고, Table 4와 같이 Region 3의 두께는 6mm로 고정된 상태에서 Region 2, 1의 두께를 등간격으로 증가시킨 세 경우에 대한 해석을 수행하였다. 각 경우에 대한 중량당 허용하중을 Fig. 12에 나타내었다.

해석 결과 뿌리부 두께가 증가할수록 중량 대비 허용하중이 증가하였으며, 식 (3)과 같이 표현된다.

Table 4 Effect of reinforcement at root region

ΔT _{region}	T _{region 1}	T _{region 2}	T _{region 3}	P _a (N)	W (kg)	P _a /W
1.00	8.00	7.00	6.00	4157.04	30.57	135.97
2.00	10.00	8.00	6.00	5393.81	32.35	166.72
3.00	12.00	9.00	6.00	6592.33	34.13	193.16

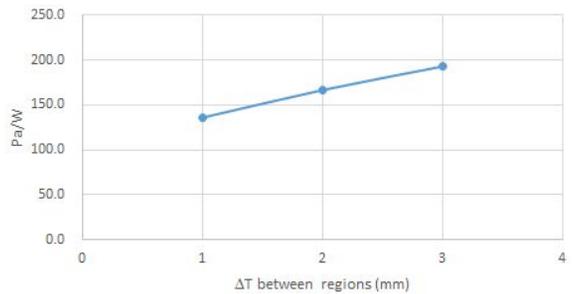


Fig. 12 Effect of reinforcement at root region on the allowable load per weight

$$\Delta\left(\frac{P_a}{W}\right) = 28.60\{\Delta(\Delta T_{region})\} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 비교하면 식 (3)의 평균 기울기가 더 크며, 이는 뿌리부 두께 증가가 전체 블레이드 강도 증가에 더 효율적임을 의미한다.

3) 스파 두께의 영향

각 스파 두께의 영향을 분석하기 위하여 먼저 스킨부(region 1~3)의 두께를 모두 6mm로 고정시키고, 각 스파가 단독으로 존재하는 상태에서 스파 두께를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. Table 5~7에 각 스파 두께에 따른 해석 결과를 정리하여 나타내었고, Fig. 13에 그래프로 나타내었다.

3개의 스파 모두 두께가 증가하여도 중량당 허용하중의 변화는 크지 않았다. 이는 두께가 증가하여 허용하중이 증가하더라도 중량 역시 증가하기 때문이다. 그러나 동일 두께에서의 중량당 허용하중의 값을 비교하면 스파 2의 값이 가장 크고, 이것은 스파 2가 가장 효율적인 보강 역할을 수행한다는 것을 의미한다.

Table 5 Effect of spar 1 thickness

T _{spar 1} (mm)	P _a (N)	W (kg)	P _a /W
4.00	3150.99	30.25	104.16
6.00	3245.70	30.98	104.77
8.00	3317.75	31.71	104.63

Table 6 Effect of spar 2 thickness

T _{spar 2} (mm)	P _a (N)	W (kg)	P _a /W
4.00	3483.34	30.58	113.90
6.00	3584.28	31.47	113.88
8.00	3649.80	32.37	112.76

Table 7 Effect of spar 3 thickness

T _{spar 3} (mm)	P _a (N)	W (kg)	P _a /W
4.00	3263.31	29.72	109.80
6.00	3301.56	30.18	109.39
8.00	3329.78	30.64	108.66

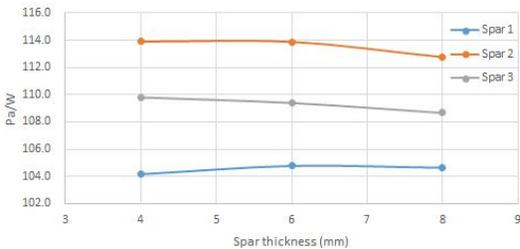


Fig. 13 Effects of spar thicknesses on the allowable load per weight

3.4 설계 개선

윗 절의 결과로부터 블레이드의 강도 증가 및 중량 감소를 위한 설계 개선을 수행하였다. 먼저 전체 중량 감소를 위하여 전체적인 스킨부 두께는 5mm로 감소시키고, 강도 증가를 위하여 뿌리부 두께를 증가시켰다. 또한 좌굴 방지를 위하여 스파는 효율이 가장 좋은 중심부(spar 2)만 추가하였다. 이러한 결과들을 조합하여 Table 8과 같은 영역별 두께를 선정하였다.

Table 8 Modified thickness(mm) of blade

Region 1	Region 2	Region 3	Spar 1	Spar 2	Spar 3
9	7	5	-	6	-

개선된 설계안을 바탕으로 구조해석을 수행하고, 하중 4047.4N에서의 블레이드의 응력비와 변형량을 Fig. 14, 15에 각각 나타내었다.

Fig. 14에서 최대 응력비는 0.716이며, 이를 안전계수로 변환하면 1.40으로 기존 대비 40%의 강도 향상이 이루어졌다고 볼 수 있다. 변형량은 기존과 큰 차이를 보이지 않았다. 블레이드의 중량은 기존 35.14kg에서 32.61kg으로 7.2%의 감소가 이루어졌다. 따라서, 본 연구에서 설계된 블레이드는 기존보다 가볍고, 향상된 강도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

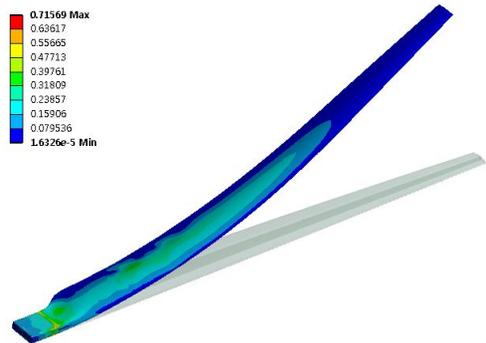


Fig. 14 Stress ratio results of the modified blade

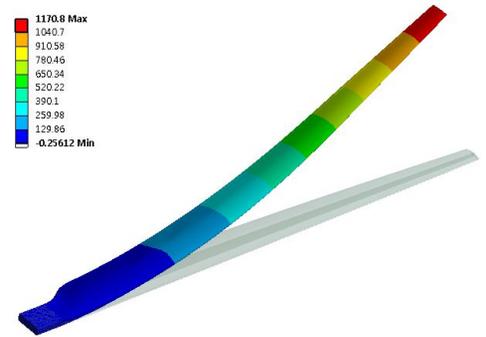


Fig. 15 Deformation results of the modified blade

4. 결론

본 연구에서는 소형풍력발전기용 블레이드의 구조해석을 수행하고, 그 결과를 통해 기존 대비 무게가 감소하고 강도가 증가한 블레이드를 설계하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존 블레이드에 대한 구조해석을 수행하고, 극한하중 시험 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다.
2. 블레이드의 스킨과 스파를 몇 개의 영역으로 구분하고 각 영역의 두께에 따른 중량과 굽힘강도를 구조해석을 통하여 분석하였다.
3. 분석 결과를 통하여 뿌리부 두께를 증가시키고, 스파의 개수, 위치, 두께를 변화시켜 기존 대비 강도가 증가된 경량 블레이드를 설계하였다.
4. 본 연구에서 얻어진 결과는 향후 블레이드의 설계에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Requirements for Small Wind Turbines," Second edition, 2006.

5. Jang, Y. J., Jeong, J. H., Lee, J. H., and Kang, K. W., "Structural Integrity through Aerodynamic Analysis and Structural Test for Small Wind Turbine Composite Blade," J. of KFMA, Vol. 15, pp. 63~68, 2011.
6. Kim, H. K., Kim, T. S., Lee, J. H., Moon, B. Y., and Kang, K. W., "Full Scale Structural Testing of Small Wind Turbine Composite Blade," J of KSME-A, Vol. 35, No. 11, pp. 1407~1413, 2011.

후 기

"이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임."

REFERENCES

1. Kim, H. K., Lee, J. H., Jang, S. M., and Kang, K. W., "Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade," J. of KFMA, Vol. 4, pp. 51~57, 2010.
2. Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., "Structural Design and Analysis for Small Wind Turbine Blade," J. of KSMTE, Vol. 19, No. 2, pp. 28~33, 2010.
3. Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., "Structural Design for 2kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment," J. of KSMTE, Vol. 20, No. 1, pp. 28~33, 2011.
4. International Standard, IEC 61400-2, "Design