

풍력발전기용 복합재 블레이드의 강도향상을 위한 수치해석

권오현 · 강지웅^{*†} · 정우열^{**}

부경대학교 안전공학부 · ^{*}부경대학교 방재연구소 · ^{**}부경대학교 대학원 안전공학과
(2010. 4. 27. 접수 / 2010. 8. 12. 채택)

A Numerical Analysis for the Strength Improvement of Composite Wind Turbine Blade

Oh-Heon Kwon · Ji-Woong Kang^{*†} · Woo-Yul Jeong^{**}

Division of Safety Engineering, Pukyong National University

^{*}The Institute of Disaster and Accident Prevention, Pukyong National University

^{**}Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received April 27, 2010 / Accepted August 12, 2010)

Abstract : The average growth in the wind power energy market during the past five years has been 26% per year. Renewable energy resources, of which wind energy is prominent, are part of the solution to the global energy problem. Wind power system and the rotor blade concepts are reviewed, and loadings by wind and gravity as important factors for the mechanical performance of the materials are considered. So, the mechanical properties of fiber composite materials are discussed. In addition, it is necessary to analyze and evaluate the stress distribution and deformation for them in the design level. This study shows the result that CFRP rotor blade of wind turbine satisfies the strength and deformation through numerical analysis using the commercial finite element analysis program.

Key Words : carbon fiber reinforced plastics(CFRP), wind power, rotor blade, tensile specimen, maximum flap wise test, minimum flap wise test

1. 서론

3면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라에서 무한 청정에너지자원을 이용하는 풍력발전은 향후 신 성장 동력산업분야에서 큰 비중을 차지 할 것임은 자명한 사실이다.

풍력발전시스템은 크게 로터블레이드, 나셀 그리고 타워로 나뉘질 수 있다. 이중 타워부분의 현재 국내 기술력은 세계적으로 인정을 받아 해외 메이저기업으로 수출을 하고 있는 실정이다. 또한 나셀 내부의 발전 터빈 시스템 구축 능력은 유럽이나 미국 등과 같은 풍력발전 선도국에 비해서는 기술수준이 떨어지는 실정이지만 1990년대부터 지속적인 투자와 수많은 연구가 진행 중에 있어 기술수준은 크게 떨어지지 않으며 기술력 향상속도 또한 빠르다는 평가를 받고 있다. 하지만 발전효율에 크게

영향을 미치는 로터블레이드는 나셀내부의 발전시스템구축에 드는 비용에 비해 개발 및 설치비용이 낮기 때문에 개발을 미루고 해외기술력에 의존해왔다. 때문에 유럽에서는 발전설비 주요부분에 대해 순수 자국기술력으로 7MW급의 대형풍력발전 시스템을 개발하여 시험 중에 있는 반면에 국내 기술력으로는 3MW급을 개발하여 시험 중에 있는 실정이다. 또한 풍력발전시스템 전부분에 있어 자국 기술력 보유에 박차를 가하고 있는 인근의 중국에 비해 국내의 기술력에 대한 투자는 발전기주요부분에 고르게 이루어지지 않는 실정이다. 풍력발전의 대형화는 발전용량 뿐만 아니라 그 규모의 대형화를 의미한다. 때문에 유럽에서는 이미 블레이드의 경량화와 구조적 강도향상을 동시에 만족시킬 수 있는 방안에 대한 각종 연구가 진행 중에 있다. 특히 최근 들어 지구온난화로 인해 태풍의 규모가 커지고 외부환경이 급변하고 있는 실정에 블레이드의 자중을 고려한 경량화 및 강도향상에 관

[†] To whom correspondence should be addressed.
slashjw@paran.com

한 연구는 필수적이다¹⁻³⁾. 따라서 본 연구의 목적은 로터블레이드의 경량화와 구조적 강도향상에 있다. 이를 위해 경제성 등을 고려하여 블레이드 구조재료의 일부 층을 재료의 우수성이 입증된 CFRP로 대체하여 발전설비의 대형화에 대비한 경량화 및 강도향상을 도모하고자 한다.

2. 재료특성시험

2.1. 시험재료 및 시험편

수치해석에 사용될 블레이드의 CFRP에 대한 재료특성평가를 위해 국내 한국카본(주)에서 생산되는 CF 3327 EPC(두께 : 0.27mm)인 평직 탄소섬유 강화 프리프레그(plain woven carbon prepreg)를 이용하였다. 프리프레그의 섬유와 수지의 함유량은 Table 1에 나타내었다. 프리프레그는 폭 1m의 원단으로 생산·시판되기 때문에 가로·세로 각각 250×250mm로 절단하였다. 평직 CFRP 복합재료의 기계적 특성치를 평가하기 위해 사용되는 인장 시험편은 6플라이로 적층 하였다. 적층된 프리프레그는 열 성형기에서 초기 온도를 135℃까지 상승시킨 이후 대략 2분 간격으로 1℃씩 상승시켜 최종 성형온도를 140℃로 하였다. 또한, 압력은 열 성형기의 게이지압력 57.7MPa로 하여 60분간 압력을 유지하면서 1차 성형하였다. 1차 성형된 적층판은 잔류응력 완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 설정 압력을 유지하면서 대기 중에 최소 2시간 이상 자연냉각시켜 최종 두께가 1±0.1mm가 되게 제작하였다.

Table 1. Composition of the fiber and resin in prepreg

CF 3327 EPC prepreg	
Fiber Wt(gr/m ²)	205
Resin Wt(gr/m ²)	148
Resin Content(%)	42±2
Total Wt(gr/m ²)	353
t(mm)	0.27

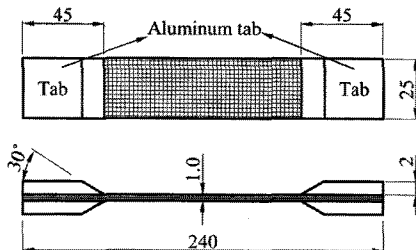


Fig. 1. Tensile specimen configurations.

또한, 인장시험 시 시험편의 그림으로부터 손상을 방지하기 위하여 시험편 양 끝단에 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로서 주재료인 폴리폴리머와 무수프탈산계인 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하여 알루미늄 탭(두께 : 2.0mm)을 부착하였다. 인장시험을 할 경우에 탭 부위는 응력집중에 의한 파손 및 박리가 발생하기 쉽기 때문에 이것을 방지하기 위해 탭에 30°의 테이퍼 각을 주었다. 시험편은 알루미늄 탭을 부착한 후 전기로(국내 K사, HY-8000S)에서 100℃로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시켜 시험편의 슬립을 최소화하였다.

2.2. 시험방법

평직 CFRP 복합재료의 탄성계수, 포아송비 및 인장강도 등 기본적인 기계적 재료 물성치 측정은 종횡 2방향 변형률 게이지를 부착한 인장 시험편으로 상온에서 만능동적 시험기(H사, 50kN)를 사용하여 구하였으며 ASTM D 3039를 참고하여 0.1mm/min의 변위제어로 수행하였다. 세로 가로방향 변형률을 측정하기 위하여 Model 5100B Scanner(V사)를 이용하였으며, 이 때 얻어진 결과는 PC에 입력되고, 전용 데이터 처리 프로그램을 사용하여 신호를 분석하고 획득하였다.

2.3. 재료특성평가 결과

평직 CFRP 적층 복합재료의 전형적인 인장시험에 대한 결과로서 응력-변형률 선도를 Fig. 2에 나타내었다. 응력-변형률 선도는 거의 파단 시까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있으며, 최대

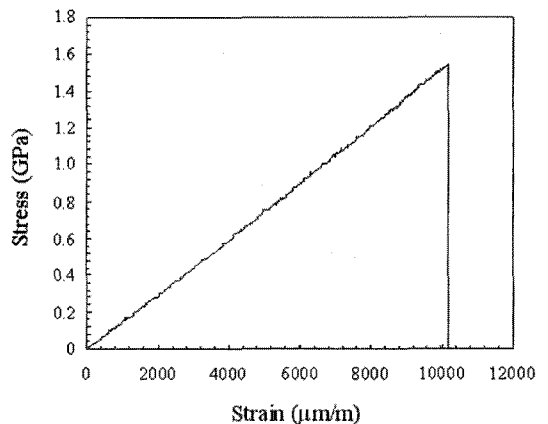


Fig. 2. A typical stress-strain curve acquired for a plain woven CFRP composite under uniaxial tensile test.

Table 2. Mechanical properties of tensile specimen

Tensile modulus, E	149.3GPa
Ultimate strength, σ_u	1,546MPa
Poisson ratio, ν	0.1

응력 1,546MPa에서 급작파괴가 발생하였다. 얻어진 기계적 재료 특성치는 Table 2에 나타낸다.

3. 수치해석

3.1. 해석모델

해석대상인 블레이드는 3MW급 대형풍력발전기에 사용되는 모델의 규모를 대상으로 하였다. 블레이드의 전장길이는 42.65m이며 최장폭이 3.456m인 Neck지점에서부터 Shell부분을 거쳐 블레이드의 끝부분으로 가면서 회전각을 주었다. Fig. 3(a)-(b)에 해석모델의 형상을 간략히 나타내었다. 현재 국내 소수기업에서 생산 중에 있는 블레이드에 사용되는 재질은 일방향섬유를 이용한 GFRP를 주재료로 사용하고 있다. 세부적인 적층 순서는 외부

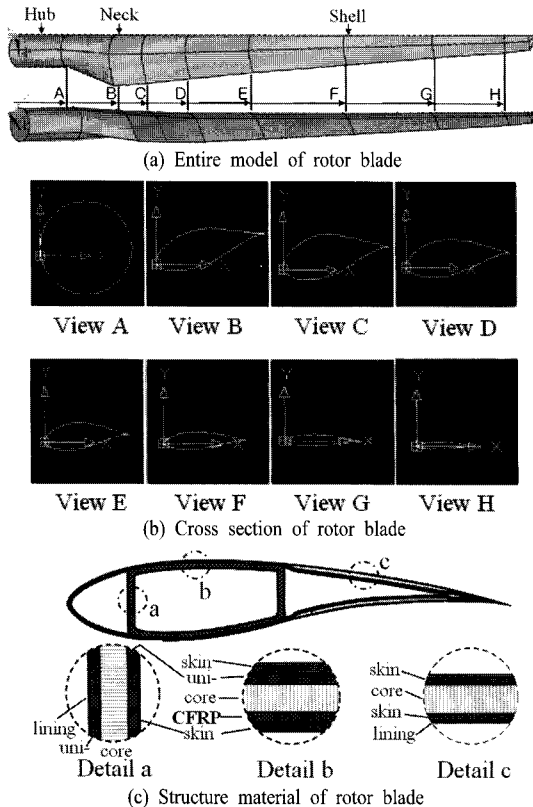


Fig. 3. The entire model and cross section structure of the rotor Blade,

Table 2. Material property of the rotor blade

	Elastic Modulus(GPa)	Poisson's ratio	Tensile ultimate strength(GPa)
Skin	10.3	0.3	0.151
Lining	10.3	0.3	0.151
Unidirectional fiber	37	0.31	0.986
Balsa Core	3.518	0.3	0.013
Plain Woven CFRP	149.3	0.1	1.546

표면에서부터 skin-lining-일방향GFRP-balsa core-일방향 GFRP-skin의 순서로 적층된다. Fig. 5(c)에 블레이드의 단면구조를 나타내어 사용 되는 재료의 적층순서를 설명하였다.

본 연구에서는 재료특성시험에서 확인한 결과를 토대로 블레이드 구조재료에 사용되는 일부의 GFRP층을 평직CFRP로 대체하여 경량화 및 강도향상을 도모하였다. 또한 현재 양산 중인 모델에 대한 해석을 수행하여 두 모델에 대한 결과를 비교·검토하였다. Table 3에 해석에 사용된 재료의 물성치를 나타내었다.

3.2. 해석조건

블레이드 구조시험 시에 사용하는 실험방법으로는 Maximum Flap Wise test와 Minimum Flap Wise test가 있는데 일반적으로 블레이드가 이러한 구조 시험을 통과하게 되면 그 블레이드의 강도는 이미 충분히 입증된 것으로 여겨진다. 따라서 본 연구에서 사용된 해석조건은 Minimum Flap Wise test조건을 부여하였다. 또한 현재 양산 중인 모델에 대한 해석을 수행하여 그 결과와 제시한 모델의 해석결과를 비교하였다. 사용된 요소는 solid 10절점 요소를 사용 하였으며 요소 수는 1,278,841만개이다. 유한요소법을 이용한 수치해석을 위해 본 연구에서는 해석경계조건은 Fig. 4에 도식화 하여 설명하였다. 상용해석프로그램인 ANSYS9.0을 사용하였다. CATIA를 이용하여 블레이드를 모델링하였으며 이를 ANSYS 9.0에서 격자분할 및 해석을 수행하였다.

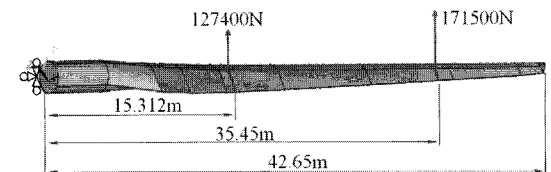
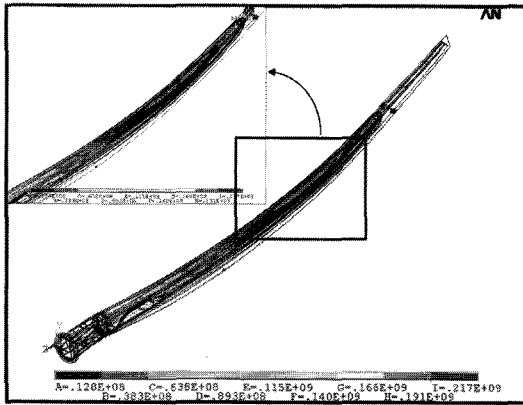
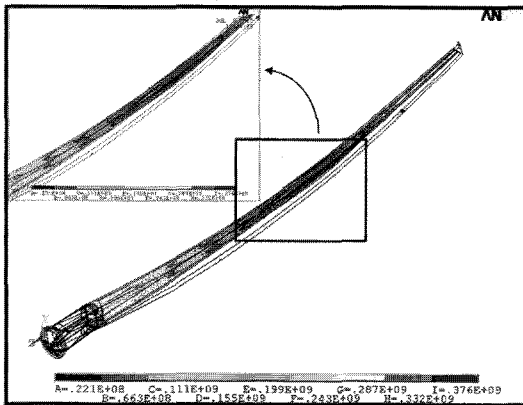


Fig. 4. Boundary condition of numerical analysis model for the flap-wise test,



(a) GFRP blade



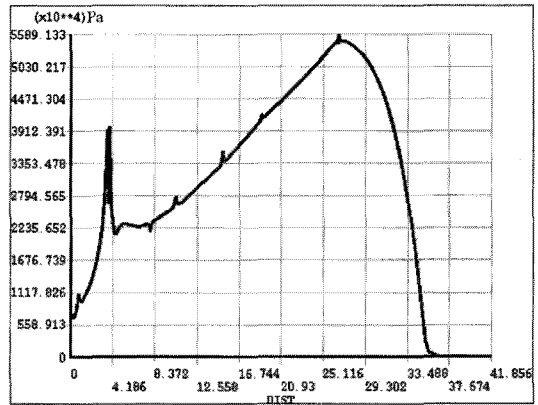
(b) CFRP blade

Fig. 5. The comparison of stress contours for the rotor blade.

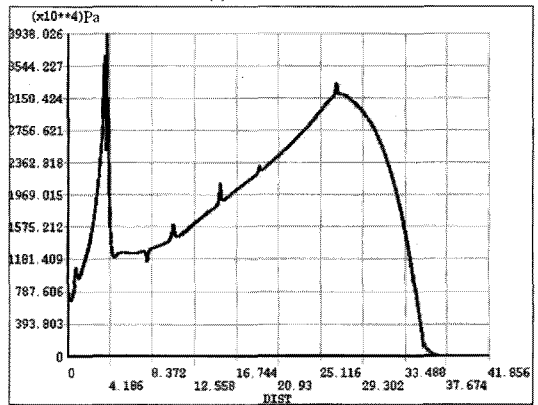
4. 해석결과 및 고찰

Minimum Flap Wise test 조건을 부여하여 해석한 결과에 대한 응력등고선 분포를 Fig. 5의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 두 모델을 비교한 결과 CFRP가 적용된 블레이드의 경우 내부 구조재료 중 대체한 CFRP층에 의한 하중 부담으로 인해 블레이드 전체적인 응력등고 분포의 변화단계가 GFRP모델에 비해 작게 나타났으며 낮은 응력값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 블레이드 표면의 종방향을 따라서 발생한 von Mises 응력값을 나타내었다. 두 모델 다 블레이드의 Flap Wise test 시에 가장 취약 부분인 Hub와 Neck의 연결부에서 높은 응력값이 나타났다. 이 후 선형적인 증가를 나타내다 대략 26.5m 지점에서 최대응력이 발생하였는데 GFRP 블레이드의 경우 55.89MPa, CFRP 블레이드의 경우는 32.4MPa로 나타나 블레이드의 구조재료 중 한 층만



(a) GFRP blade



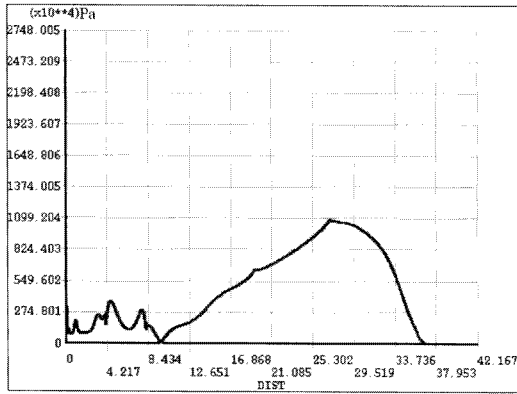
(b) CFRP blade

Fig. 6. The von Mises stress distribution along the longitudinal direction of the rotor blade.

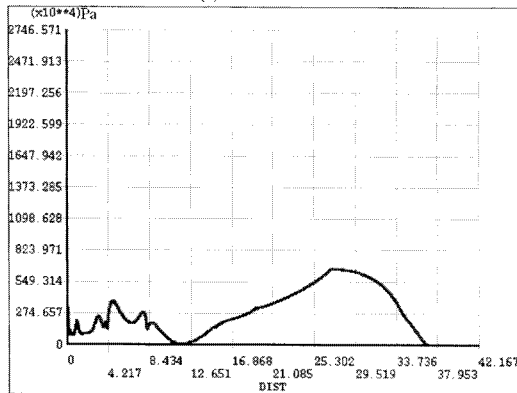
CFRP로 대체하여도 구조적인 강도 측면에서 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다. 또한 취약부분인 Hub와 Neck 연결부의 구조 및 구조재료의 변경을 통한 강도향상에 관한 연구가 추가적으로 필요함을 확인하였다.

블레이드의 경우 극한 외부환경에서는 Hub와 Neck 연결부파손이 되어 지기 때문에 Flap Wise test와 같은 실험을 수행한다. 하지만 사용 중에는 twisted tip 부분에서 균열이 발생하고 성장하여 유지보수비용이 발생하는 경우가 대부분이다.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 블레이드의 twisted tip을 따라서 발생한 von Mises 응력값을 나타내었다. Hub와 Neck 연결부에서 불규칙한 응력분포형태를 나타내었으며 twisted tip이 시작되는 8.434m에서 부터 선형적인 증가를 나타내다 26.5m 지점에서 GFRP 블레이드의 경우 최대값이 약 10.99MPa, CFRP 블레이드의 경우는 6.45MPa로 나타났다.



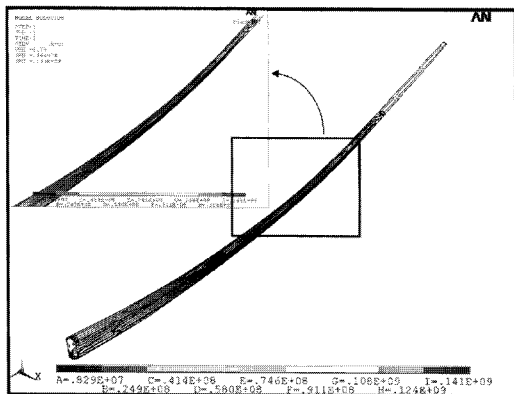
(a) GFRP blade



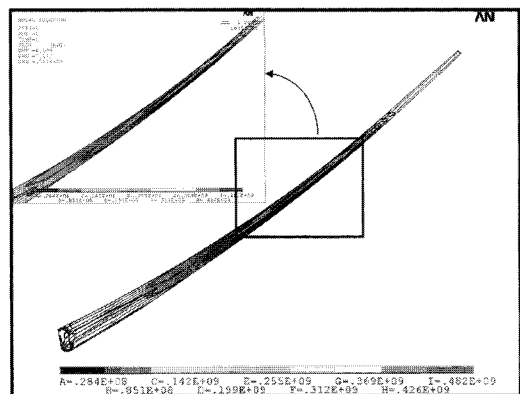
(b) CFRP blade

Fig. 7. The von Mises stress distribution along the twisted tip of the rotor blade.

Fig. 8의 (a)와 (b)에 각각 블레이드 내부의 GFRP 층과 대체된 재료인 CFRP층에 대한 응력등고선을 나타내었다. 두 모델을 비교한 결과 CFRP모델이 GFRP모델에 비해 응력등고 분포의 변화가 규칙적으로 나타났음을 알 수 있다.



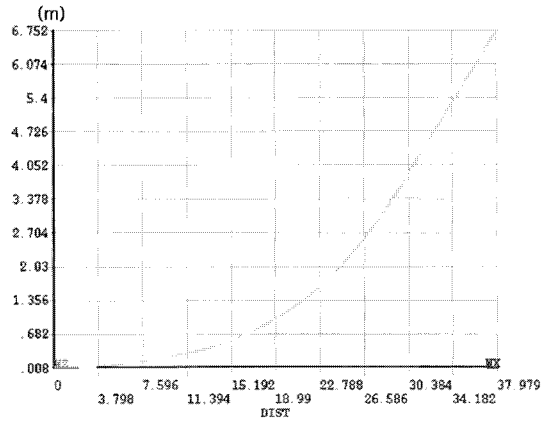
(a) GFRP blade



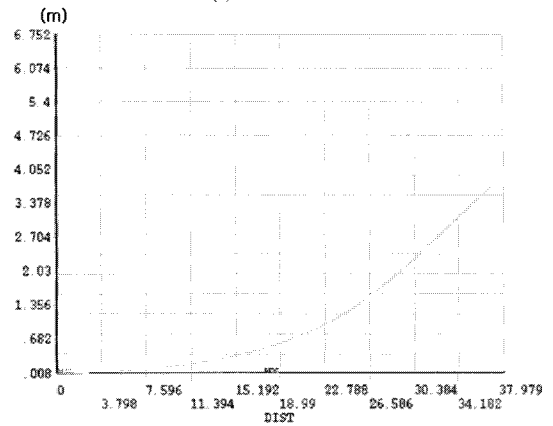
(b) CFRP blade

Fig. 8. The comparison of stress contours for the inter-layer in the rotor blade.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 블레이드 내부의 GFRP층과 대체된 재료인 CFRP층에 대한 변위분포를 나타낸 그래프이다. GFRP블레이드의 경우 최대변위는 6.752



(a) GFRP blade



(b) CFRP blade

Fig. 9. The displacement distribution along the longitudinal direction of the inter-layer in the rotor blade.

m로 CFRP블레이드의 경우는 3.994m로 각각 나타나 블레이드의 구조재료 중 한 층만 CFRP로 대체하여도 전체적인 변형발생을 억제하는데 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전설비의 대형화에 대비하여 블레이드의 경량화 및 구조적 강도향상을 위해 블레이드 구조 성능실험 중 하나인 Minimum Flap Wise test조건을 부여하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 블레이드 구조재 중 내부 한층을 일방향 유리섬유에서 평직CFRP로 대체하여 해석한 결과 블레이드 전체적인 응력등고 분포가 GFRP모델에 비해 규칙적이고 낮은 응력값을 나타내었으며 또한 twisted tip부분에서도 낮은 응력값을 나타내 구조적 성능향상을 확인할 수 있었다.

2) 평직CFRP로 대체한 모델의 경우 GFRP모델에 비해 변위발생이 현격히 줄어든 것으로 나타나 블레이드 전체의 변형발생을 억제할 수 있음을 확인하였다. 또한 GFRP와 평직CFRP는 같은 단면두께를 가지는 모델에 대해 해석을 수행하였으므로 강도향상이 증명된 CFRP모델의 단면두께를 감소시켜 추가적인 경량화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

3) Hub와 Neck 연결부에서는 두 모델 다 높은 응력값을 나타내었다. 이는 본 연구에서 시도한 평직CFRP 적용을 Neck과 Shell부분에 대하여서만 시도하였고 해석결과를 바탕으로 연결부에 까지 적용을 넓힐 경우 블레이드 취약부인 Hub와 Neck 연결부에 대한 보강이 충분히 이루어 질 것으로 사료된다.

감사의 글 : 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구자(기본연구) 사업임(No. 2009-0074308).

참고문헌

- 1) 방조혁, 김양수, 류지윤, 김두훈, 박선호, 박병준, "2MW 로터 블레이드 구조설계 및 인증시험", 한국신·재생에너지학회지, 2007년도 추계학술대회 논문집, pp. 349~352, 2007.
- 2) Gunjit S.Bir, P.Migliore, "Computerized Method for Preliminary Structural design of Composite for Two-and Three-Blade Rotors", NREL/TP-500-31486, 2004.
- 3) 이창수, "1MW급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 최적 외형 설계 및 공력하중 해석," 전북대학교, 석사 학위 논문, 2005.
- 4) Standard test method for "Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", ASTM D 3039, 2000.