

풍력발전기용 나셀외장부의 경량화 및 강도향상에 관한 수치해석

강지웅 · 권오현^{†*} · 정우열^{**}

부경대학교 방재연구소 · ^{*}부경대학교 안전공학부 · ^{**}부경대학교 대학원 안전공학과
(2010. 4. 27. 접수 / 2010. 8. 20. 채택)

A Numerical Analysis for Light Weight and Strength Improvement of Wind Power System Nacelle Cover

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

The Institute of Disaster and Accident Prevention, Pukyong National University

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

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

(Received April 27, 2010 / Accepted August 20, 2010)

Abstract : Wind power system is composed by 3 major parts, rotor blade, nacelle and tower. Especially, the nacelle cover has an important role to prevent the component of nacelle and rotor from an extreme external circumstance. Therefore it is necessary to analyze and evaluate the stress distribution and deformation for them in the design level. There are two major points in nacelle cover analysis. The one is nacelle cover itself and the other is cover support structure. According to GL specification, this study shows the result that CFRP nacelle cover of wind turbine satisfies the strength and deformation through numerical analysis using the commercial finite element analysis program.

Key Words : wind power, nacelle, CFRP, strength, composite, stress analysis

1. 서론

화석연료의 지속적인 사용으로 인해 발생하는 지구온난화 및 연료고갈 등의 이유로 최근 들어 신재생에너지에 관한 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 이 중 자연의 바람을 이용한 풍력발전의 경우 무한한 자원으로 이용할 수 있어 양질의 풍황에 기술력의 조건만 부합이 될 경우 지속적인 에너지자원으로써 인류가 영위할 수 있다. 이러한 이유로 미국과 유럽의 경우는 화석자원의 풍부한 보유량에도 불구하고 오래전부터 풍력발전 산업에 관심과 투자를 집중하여 관련 기술산업분야를 전 세계적으로 주도하고 있다. 아시아의 경우, 중국은 풍력발전단지 설치 시 자국 내 기술의 70%가 포함되지 않을 시는 단지 설치의 허가를 내주지 않음으로써 자국의 기술력보유를 유도하고 있으며 이미 아시아에서는 풍력발전기술력 및 그 규모가 1위를 차지하고 있다. 반면에 현재 국내 기술

력은 너셀 내부의 발전설비분야에 집중되고 있으며 블레이드설계 및 너셀 외장부 설계에 있어서는 해외기업으로 부터의 구조설계가 완료된 도면대로 생산하는 소극적인 외주제작형태로 이루어지고 있어 풍력발전설비의 설치조건이 우수함에도 불구하고 국내기술력보유가 상당히 미비한 실정이다. 블레이드 및 너셀 외장부에 있어서 유럽의 경우는 풍력발전용량 및 외형의 규모가 대형화 됨에 따라 경량화와 구조적 강도향상을 동시에 만족시킬 수 있는 방안에 대한 각종 연구가 진행 중에 있다. 특히 너셀 외장부의 경우는 급변하는 외부환경으로부터 내부 발전설비를 보호하는 역할을 하기 때문에 자중을 고려한 경량화 및 강도향상에 관한 연구는 필수적이다¹⁻³⁾.

따라서 본 연구의 목적은 너셀 외장부의 경량화와 강도향상에 있다. 이를 위해 너셀 외장부 구조재료의 일부 층을 우수한 강도를 보유한 CFRP로 대체하고 그에 따른 두께를 감소시켜 경량화를 도모하고자 한다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

2. 재료특성평가

2.1. 시험편 및 실험방법

수치해석에 사용될 너셀 외장부 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. 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 성형한 후 자연냉각시켜 최종 두께가 1±0.1mm가 되게 제작하였다. 성형된 탄소섬유 복합재료 적층판은 ASTM D 3039⁴⁾를 참조하여 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 절단·가공하였다. 평직 CFRP 복합재료의 탄성계수, 프와송비 및 인장강도 등 기본적인 기계적 재료 물성치 측정은 중형 2방향 변형률 게이지를 부착한 인장 시험편으로 상온에서 만능동적 시험기(H사, 50kN)를 사용하여 구하였으며 ASTM D 3039⁴⁾를 참고하여 0.2mm/min의 변위제어로 수행하였다. 변형률은 V사의 스캐너(model 5100)를 사용하여 측정하였다.

2.2. 재료특성평가 결과

평직CFRP의 인장실험을 수행한 결과 응력-변형률 선도는 거의 파단 시까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주었으며, 최대하중에서 급작파괴가 발생하였다. 탄성계수는 149.3GPa로 얻어졌으며, 인장강도와 프와송비는 각각 1,546MPa, 0.1로 얻어졌다.

3. 수치해석

3.1. 해석모델

해석대상인 너셀 외장부는 3MW급의 대형풍력 발전기에 사용되는 모델의 규모를 대상으로 하였다. 전장길이는 10.5m, 폭은 5.374m 그리고 높이는 3.8m로 현재 실증을 위해 국내 G사에서 양산중인 너셀 외장부의 규모를 참고하였다. Fig. 1에 해석 모델의 규모를 간략히 나타내었다.

현재 소수의 국내기업에만 생산 중에 있는 너셀 외장부에 사용되는 재질은 GFRP를 주재료로 사용하고 있다. 세부적으로는 유리섬유로 직조한 로빙

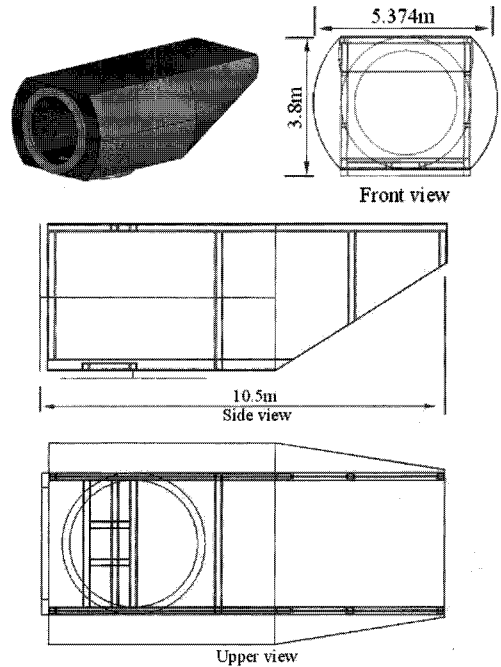


Fig. 1. A drawing of the nacelle cover and frame.

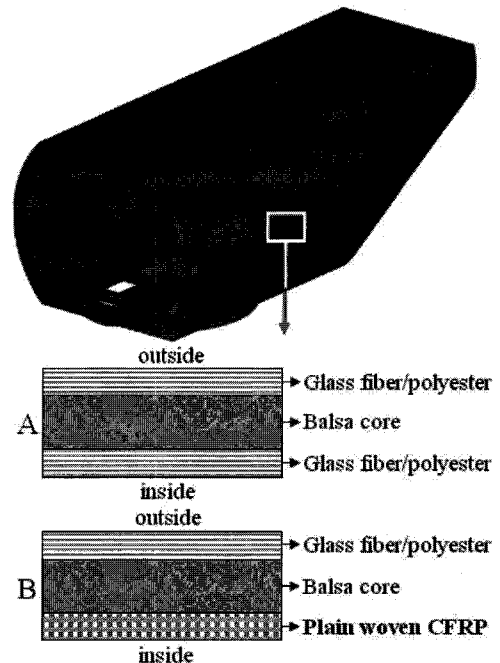


Fig. 2. Finite element model and structure material of nacelle cover.

클로스과 GFRP소재 그리고 중간에 발사코어(Balsa core)를 삽입하여 형틀을 유지하고 다시 GFRP소재를 사용한 샌드위치(Sandwich)형 구조를 사용하고

Table 1. Material property of nacelle cover

	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile ultimate strength (GPa)
Frame (H/R)	210	0.3	0.245
Unidirectional GFRP	11.89	0.2	0.33
Balsa Core	3.518	0.3	0.013
Plain Woven CFRP	149.3	0.1	1.546

있다. 이러한 형태는 Fig. 2의 A단면에서 나타내고 있다.

본 연구에서는 재료특성시험에서 확인한 결과를 토대로 나셀 외장부의 내부 층을 평직CFRP로 대체하여 강도향상을 도모하였고 이를 바탕으로 층의 두께를 감소시켜서 경량화를 동시에 실현하고자 하였다. 또한 현재 양산 중인 모델에 대한 해석을 수행하여 두 모델에 대한 결과를 비교·검토하였다. 제시한 모델의 내부 층 구조는 Fig. 2의 B 단면과 같다. Table 1에 해석에 사용된 재료의 물성치를 나타내었다.

3.2. 해석조건

본 연구에서는 다음과 같은 하중 조건을 나셀 외장부에 작용하는 하중 조건으로 정의하였다.

Load Case : 자중 + 정면 70m/s 바람

여기서 자중은 나셀 외장부 뿐만 아니라 나셀 내부의 프레임 자중을 합한 값이다. 사용된 요소는 solid 10절점 요소를 사용하였으며 요소 수는 1,544,881 개이다. 해석경계조건은 Fig. 3에 도식화하여 설명하였다. 바람에 의해 나셀 외장부가 받는 풍하중에 대한 식은 GL Wind 2003에 따라 다음의 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

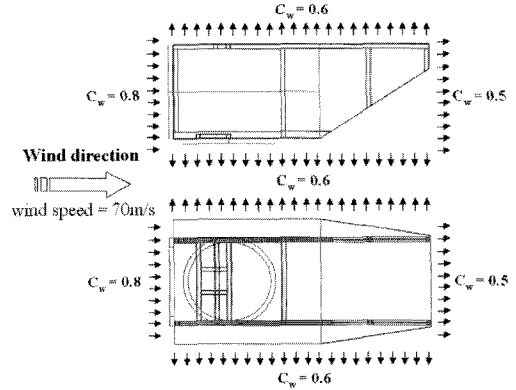


Fig. 3. Air load distribution.

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 A c_w \tag{1}$$

여기서 각 변수들은 다음과 같다.

- ρ : 1.225 공기의 밀도(kg/m³)
- v : 70 바람의 속도(m/s)
- A : W와 cw에 대한 참조 평면(m²)
- c_w : Fig. 3 참조

유한요소법을 이용한 구조해석을 위해 본 연구에서는 상용해석프로그램인 ANSYS 9.0을 사용하였다. 3D CAD를 이용하여 나셀 외장부를 모델링하였으며 이를 ANSYS 9.0에서 격자분할 및 해석을 수행하였다.

4. 해석결과

자중 및 정면에서 70m/s의 바람이 부는 극한상황을 고려하여 해석을 수행한 결과에 대한 응력등고선 분포를 Fig. 4의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다.

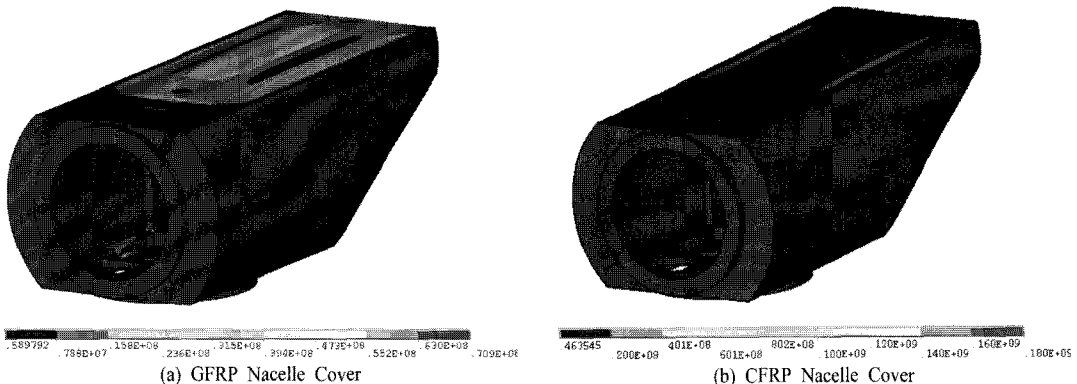
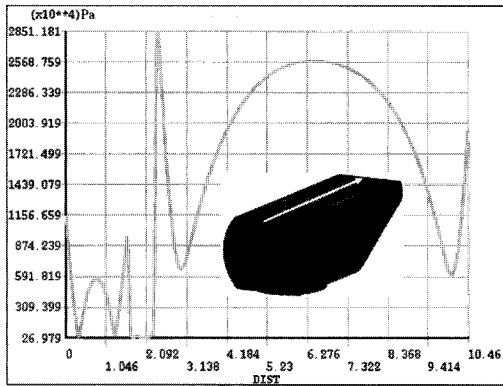
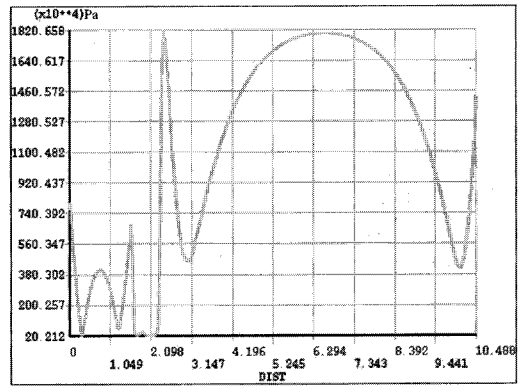


Fig. 4. The comparison of stress contours for the Nacelle cover.



(a) GFRP Nacelle Cover



(b) CFRP Nacelle Cover

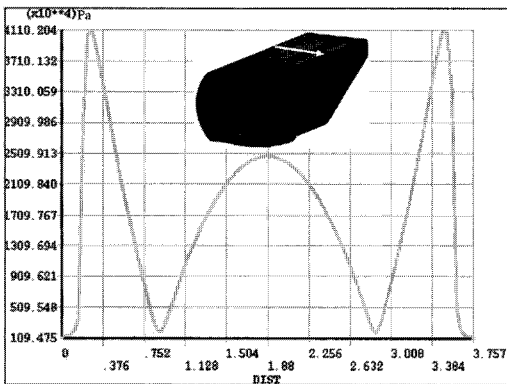
Fig. 5. The von Mises stress distribution along the longitudinal direction of the roof of Nacelle cover.

두 모델을 비교한 결과 CFRP가 적용된 너셀 외장부의 경우 내부 구조재료 중 대체한 CFRP층에 의한 하중 부담으로 인해 너셀 외장부의 전체적인 응력 등고 분포의 변화단계가 GFRP모델에 비해 작게 나타났으며 낮은 응력값을 나타냄을 알 수 있다. 또한 GFRP모델의 경우 참고문헌에서와 같이 프레임과 너셀 외장부의 연결부에서 최대응력이 발생하였으나 CFRP모델의 경우는 CFRP층이 프레임과 접해 있어서 구조적 취약점이 보완되어 최대값은 너셀 외장부의 윗 면에서 낮은 응력치로 발생하였다.

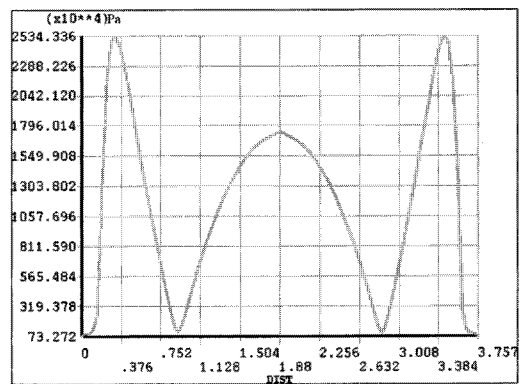
Fig. 5는 너셀 외장부 윗면의 종방향을 따라서 발생하는 응력분포의 변화를 나타낸다. 처음에 불규칙한 응력분포의 변화를 보이는 이유는 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 너셀 외장부 내부에 위치하는 프레임구조에 접합된 부분은 낮은 응력값을 나타내고 그 이외의 부분은 높은 응력값을 나타내 불규칙한 응력분포를 보이고 있다. 종방향을 따라서 응력분포가 증가와 감소를 반복하다 2.3m지점에서 GFRP

모델은 28.51MPa, CFRP모델은 18.21MPa로 최대응력이 발생했다. 이 후 급격한 감소를 나타내다 다시 선형적인 증가를 보이면서 6.29m지점에서 GFRP모델은 대략 25.68MPa, CFRP모델은 18.20MPa로 나타난 값의 분포를 비교해 볼 때 너셀 외장부 내부의 한층만 CFRP로 대체하여도 구조적인 강도 측면에서 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다.

Fig. 6은 너셀 외장부 윗면의 횡방향을 따라서 발생하는 응력분포의 변화를 나타낸다. 윗면을 따라서 횡방향의 양 끝부분에 프레임이 위치하기 때문에 응력분포의 급격한 증가와 감소 이후에 선형적인 증가를 보이는 대칭적인 그래프의 형태를 나타내고 있다. 프레임의 폭이 20cm이므로 이 후에 급격한 증가를 나타내어 최대값에 도달한다. 최대응력은 GFRP모델의 경우 41.10MPa, CFRP모델은 25.34MPa로 나타났으며 이 후에 급격한 감소를 보이다 다시 선형적으로 증가하는데 GFRP모델의 경우 25.10MPa, CFRP모델은 16.78MPa로 나타났다.



(a) GFRP Nacelle Cover



(b) CFRP Nacelle Cover

Fig. 6. The von Mises stress distribution along the transverse direction of the roof of Nacelle cover.

풍력발전기용 나셀외장부의 경량화 및 강도향상에 관한 수치해석

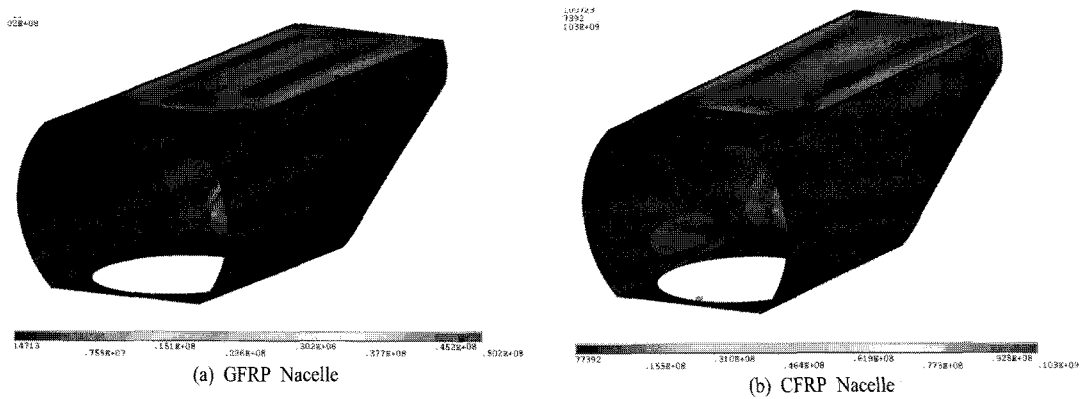


Fig. 7. The comparison of stress contours for the inter-layer in the Nacelle cover.

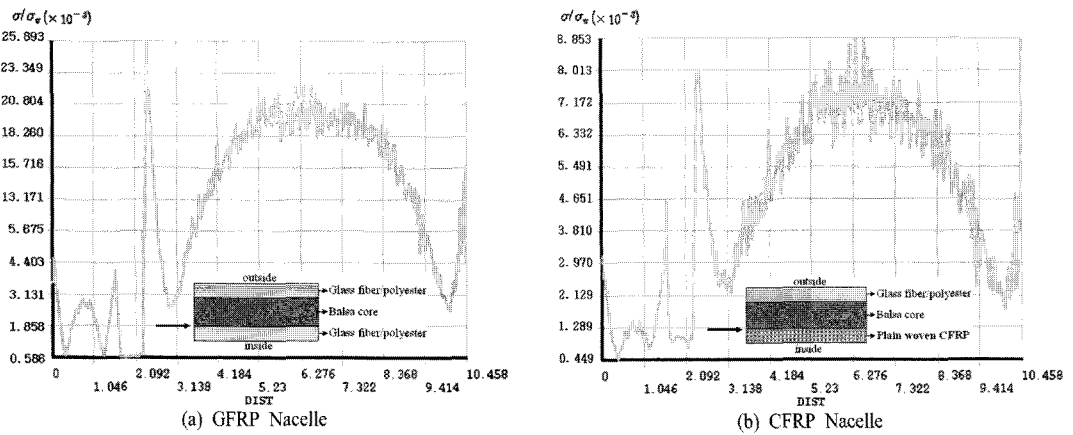


Fig. 8. The normalized von Mises stress distribution along the longitudinal direction of the roof in the inter-layer.

Fig. 7의 (a)와 (b)에 각각 블레이드 내부의 GFRP 층과 대체된 재료인 CFRP층에 대한 응력등고선을 나타내었다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 각각 너셀 외장부 층 내부의

GFRP층과 대체된 재료인 CFRP층 윗면의 종방향 을 따라서 발생하는 무차원 등가응력분포를 나타 낸다. 무차원 등가응력분포의 경향은 Fig. 6에서 나 타낸 바와 유사한 경향을 보이고 있지만 발사코어

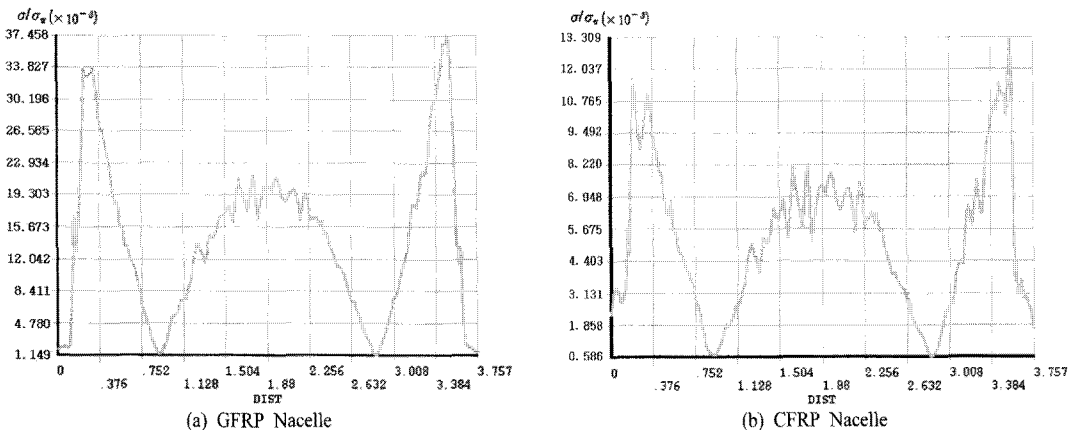


Fig. 9. The normalized von Mises stress distribution along the transverse direction of the roof in the inter-layer.

와 접한 경계면에서의 응력분포를 나타내었기 때문에 진동하는 경향을 보이고 있다. 전체적인 무차원 등가응력치는 GFRP모델이 0.0259, CFRP모델은 0.0085로 나타나 GFRP모델이 CFRP모델 보다 대략 3배 정도 높은 값을 나타내었으며 발생위치는 GFRP모델의 경우 프레임의 지지를 받는 부근에서 발생하였으며 CFRP모델은 프레임의 지지로부터 자유로운 중앙 부근에서 최대값이 발생하였다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 각각 너셀 외장부 층 내부의 GFRP층과 대체된 재료인 CFRP층 윗면의 횡방향을 따라서 발생하는 무차원 등가응력분포를 나타낸다. Fig. 7에서와 같이 윗면을 따라서 횡방향의 양 끝부분에 프레임이 위치하기 때문에 응력분포의 급격한 증가와 감소 이후에 선형적인 증가를 보이는 대칭적인 그래프의 형태를 나타내고 있다. 종방향의 응력분포에서와 같이 발사코어와 접한 경계면에서의 응력분포를 나타내었기 때문에 진동하는 경향을 보이고 있으며, 최대 무차원 등가응력은 GFRP모델의 경우 0.0037, CFRP모델은 0.0013으로 나타나 GFRP모델이 CFRP모델 보다 대략 3배 정도 높은 값을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 풍력발전설비의 대형화에 대비하여 너셀 외장부의 경량화와 구조적 강도향상에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

1) 두 모델을 비교한 결과 평직 CFRP가 적용된 너셀 외장부의 경우 내부 구조재료 중 비강도와 비강성이 우수한 CFRP로 대체한 결과 CFRP층에 의한 하중 부담으로 인해 너셀 외장부의 전체적인 응력등고 분포의 변화단계가 GFRP모델에 비해 작게 나타났으며 낮은 응력값을 나타내어 구조적인 안전성을 확보할 수 있었다.

2) GFRP를 주재료로 생산되는 너셀 외장부는 프레임과 너셀 외장부의 연결부가 취약점이었으나 너셀 외장부의 내부 층을 CFRP로 대체한 결과 취약점을 보완할 수 있었다.

3) GFRP모델의 경우 너셀 외장부의 무게만 3~4톤에 달하여 발전용량이 대형화됨에 따라 자중에 대한 문제를 간과할 수 없는 실정이다. 이에 본 연구에서 시도한 내부 층을 평직CFRP로 대체한 해석 결과를 바탕으로 CFRP층의 단면두께를 감소시키는 방안에 관한 연구를 수행한다면 추가적인 경량화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

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

참고문헌

- 1) 홍혁수, 방조혁, 박진일, 류지윤, 김두훈, “2MW너셀 외장부 및 지지 구조물 설계”, 한국신·재생에너지학회지, 2007년도 추계학술대회 논문집, pp. 331~334, 2007.
- 2) Germanischer Lloyd. Guideline for the Certification of wind turbin, 2003.
- 3) Christian Masson and Arezki Smaïli, “Numerical Study of Turbulent Flow around a Wind Turbine Nacelle”, Wind Energy. Vol. 9 pp. 281~298, 2006.
- 4) Standard test method for “Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, ASTM D 3039, 2000.