

2MW 풍력발전시스템 너셀커버의 강도해석에 대한 연구

고우식* · 이형우†

(원고접수일 : 2007년 8월 20일, 심사완료일 : 2007년 11월 6일)

A Study of Strength Analysis for Nacelle Cover of 2MW Wind Turbine System

Woo-Sik Ko* · Hyoung-Woo Lee†

Abstract : The nacelle cover and nosecone are made of composite materials, especially the stiffener is added in the nacelle cover in order to enhance it's stiffness. The nacelle cover consists of all three covers of left, right side cover and upper cover and each cover is connected with bolts. Also, the nacelle cover and nacelle frame are connected with bolts. The nacelle cover and nosecone have a important role to prevent the components of nacelle and rotor from external circumstances such as snow, rain and wind. Therefore, it is necessary to analyze and evaluate the strength and deformation for them in the design level. According to GL Wind Specifications, this paper shows the results that nacelle cover of 2MW wind turbine satisfy the strength and deformation throughout analysis using Patran/Nastran programs.

Key words : Wind turbine(풍력터빈), Nacelle cover(너셀커버), Composite material(복합재료), Stiffener(보강재), Strength(강도)

1. 서 론

근래에 세계경제 불안으로 인한 고유가, 화석 연료를 이용한 화력발전소가 배출하는 온실가스 및 원자력발전소의 방사능 누출 위험성과 핵폐기물 처리문제가 사회적 이슈로 떠오르면서 친 환경에너지에 대한 관심이 빠르게 증가하고 있다. 또한 친 환경에너지가 국가적인 온실가스 배출저감을 위한 국제기후협약에 대처하는 가장 확실한 대응방안으로 활용되고 있다. 그 중 풍력에너지는 다른 친 환경

에너지에 비해 상대적으로 우수한 경제성으로 인하여 화석연료를 이용한 전력 생산 방식을 대체할 수 있는 에너지원으로 각광받고 있으며, 연간 20% 이상의 급속한 성장을 보이고 있는 산업분야 중의 하나이다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

풍력에너지를 전기에너지로 변환하는데 사용되는 풍력터빈은 크게 너셀(Nacelle)과 로터(Rotor) 및 타워(Tower)로 구성되어있다. 너셀커버(Nacelle Cover)와 노즈콘(Nosecone)은 풍력터빈의 주요 구성품인 너셀과 로터의 기기를 눈,

† 교신저자(부산대학교 기계공학부), E-mail: leehwoo@pusan.ac.kr, Tel: 051) 510-2598

* 효성중공업

바람 등의 외부환경으로부터 보호하는 중요한 역할을 한다.

너셀 커버와 노즈콘은 복합재로 이루어져 있으며, 특히 너셀 커버는 강성을 높이기 위하여 내부에 보강재(Stiffener)가 추가된다. 너셀 커버는 상부, 좌우 측면부에 총 3개의 커버로 구성이 되며 각 부분의 연결은 볼트에 의해 체결이 되고, 너셀 프레임과의 지지부에서도 볼트에 의해 체결이 된다. 이러한 구성 및 지지조건 하에서 GL 규정^[5] Class I인 50m/s 이상의 바람에 대해 너셀 커버의 강도와 변형을 평가하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 GL 규정^[5]에 따라 자중 및 바람 하중을 고려하여 H사에서 개발 중인 2MW 풍력시스템 너셀 커버의 강도를 상용 해석 프로그램 Nastran^[6]을 활용하여 해석 후 평가하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 재료 물성치

너셀 커버 제작에 주로 사용되는 재료는 복합재료로 같은 강도의 Al 합금에 비해 5배 가볍고 내부 식성이 뛰어나며 Tapered 단면과 임의의 형상을 쉽게 제작할 수 있는 특징이 있기 때문이다. 본 연구에서는 2MW 너셀 커버 제작에 사용된 Fabric 과 Chop Mat에 대해 시편 제작 후 KIMM에서의 물성시험을 통해 얻은 물성치를 사용하며, 물성치는 Table 1과 같다. 실시한 물성시험 종류는 인장 시험(ASTM D3039), 압축시험(ASTM D3410), 평면/횡 전단시험(ASTM D5379), 조인트시험(MIL-STD-1312B), 비중시험(ASTM D792)이 있다.

너셀커버 보강재의 경우 적층구조에 맞게 등방성 재료로 가정하여 'GIBRID' 프로그램으로 탄성계수를 구하였고, 밀도는 'Rule-of-Mixtures' 방법으로 구하였다. 허용강도는 Chop Mat의 인장, 압축강도의 평균값을 이용하였는데, 이는 Chop Mat의 기계적 특성이 더 안 좋기 때문이다.

Table 1 Material properties of composite material

Mechanical Properties	Chop Mat	Fabric
Elastic modulus, E_1, E_2 (kg/mm ²)	769	1889
Shear modulus, G_{12} (kg/mm ²)	567	432
Poisson ratio	0.353	0.154
Allowable tensile strength (kg/mm ²)	8.0	25.5
Allowable compressive strength (kg/mm ²)	20.8	22.7
Density (kg/mm ³)	1.51E-6	1.77E-6

Table 2 Material properties of nacelle stiffener

Mechanical Properties	Nacelle Stiffener
Elastic modulus (kg/mm ²)	1304
Shear modulus (kg/mm ²)	534
Poisson ratio	0.22
Allowable strength (kg/mm ²)	14
Density (kg/mm ³)	1.63E-6

2.2 하중의 조건 및 계산

2.2.1 적용 하중 조건

본 연구에서는 다음의 2가지 하중 조건을 너셀커버에 작용하는 하중 조건으로 정의하였다.

Load Case 1: 자중 + 정면 70m/s 바람

Load Case 2: 자중 + 측면 70m/s 바람

2.2.2 너셀커버가 바람에 의해 받는 하중

바람에 의해 너셀커버가 받는 풍하중에 대한 식은 GL Wind 2003에 따라 다음의 식에서 구할 수 있다.

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

여기서, ρ : 1.225 공기의 밀도(kg/m³)

v : 70 바람의 속도(m/s)

A : W와 C_w 에 대한 참조 평면(m²)

c_w : Fig. 1 참조

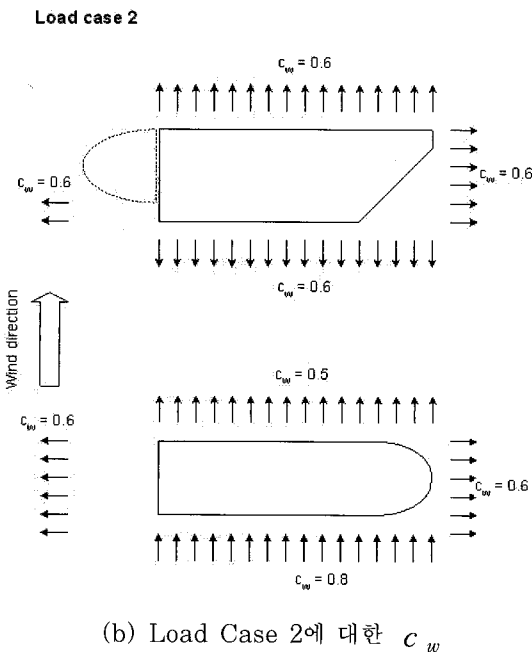
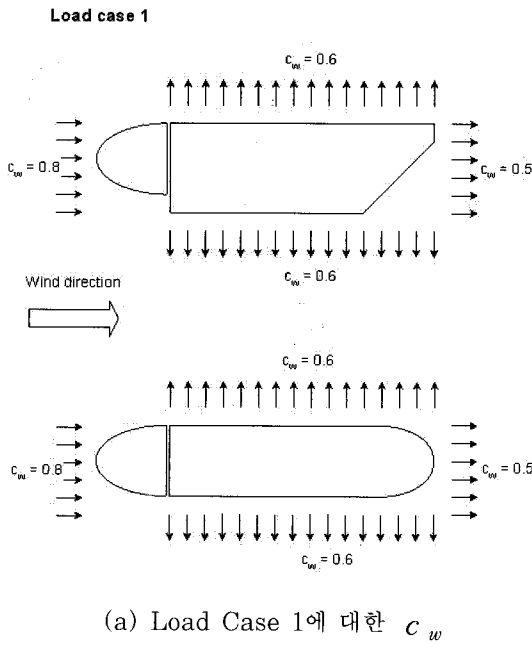


Fig. 1 Air load distribution

2.3 복합재 강도평가 방법

복합재료에 대한 강도 평가 방법으로는 Tsai-Hill 기준, Tsai-Wu 기준 등 다양한 방법이 있지만, 본 논문에서는 시험 결과와 평가 기준을 비교

하여 가장 적합하다고 판단된 Mises-Hill-Tsai Failure Criteria를 이용하여 해석 결과를 판단한다. 이 기준은 다음의 2차식을 기반으로 한다.

$$\left(\frac{\sigma_1}{F_1^u}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{F_2^u}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{F^{su}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{F_1^u{}^2} = 1 \quad (2)$$

여기서,

$$F_1^u = \begin{cases} F_1^{tu} & \text{if } \sigma_1 \geq 0 \\ F_1^{cu} & \text{if } \sigma_1 < 0 \end{cases}$$

$$F_2^u = \begin{cases} F_2^{tu} & \text{if } \sigma_2 \geq 0 \\ F_2^{cu} & \text{if } \sigma_2 < 0 \end{cases}$$

σ_1 : normal stress in 1 - direction

σ_2 : normal stress in 2 - direction

τ_{12} : shear stress in 1 - 2 plane

F^{tu} : allowable tensile strength

F^{cu} : allowable compressive strength

F^{su} : allowable shear strength

그리고 안전여유(Margin of Safety)는 다음의 식으로 구한다.

$$M.S. = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} - 1 \quad (3)$$

여기서,

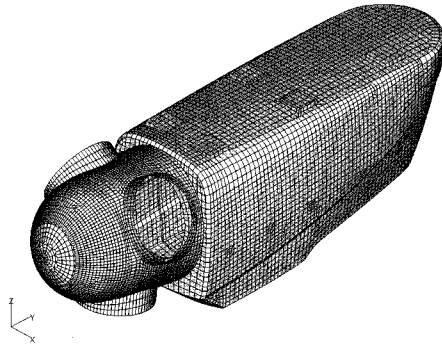
$$\alpha = \left(\frac{\sigma_1}{F_1^u}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{F_2^u}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{F^{su}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{F_1^u{}^2}$$

3. 너셀커버의 강도해석

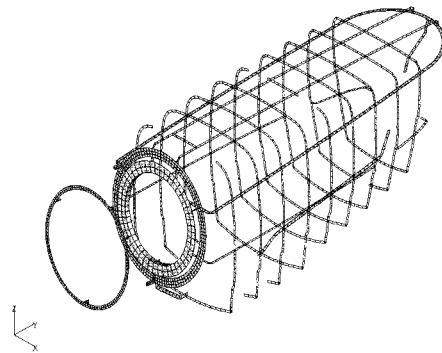
3.1 해석 모델링

유한 요소법(Finite Element Method)을 이용한 구조해석을 위해 본 연구에서는 상용 해석 프로그램인 MSC Patran/Nastran을 사용하였다. 2MW 너셀 커버와 노즈콘에 대해 SolidEdge에서 만들어진 3D CAD모델을 기반으로 Patran에서 Fig. 2와 같이 Shell 요소와 Beam 요소를 이용하여 FE 모델링을 하였다.

또한 Shell 요소에 재료 물성치를 각 ply별로 적용하였으며, 이때 복합재료는 등방성 재질과 달리 재료의 방향성(Material Orientation)을 정확히 적용하는 것이 중요하다.



(a) Total view



(b) 내부지지 및 보강재 구조

Fig. 2 Finite element model

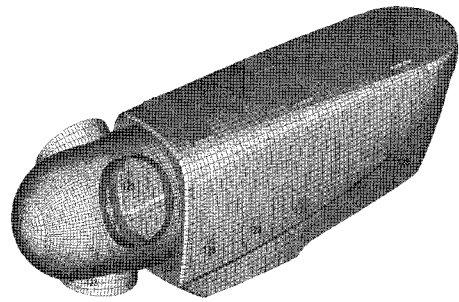
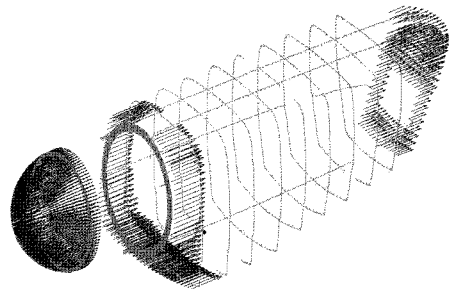
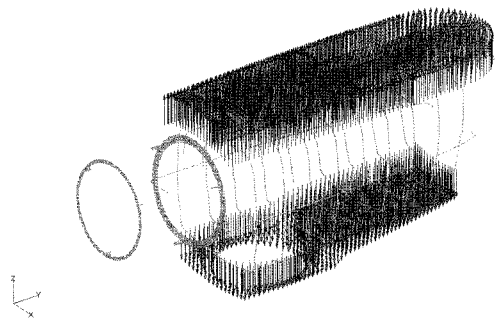


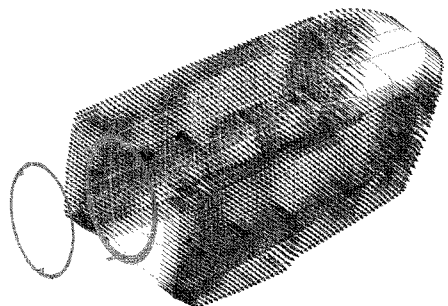
Fig. 3 Boundary Conditions



(a) In Y direction



(b) In Z direction



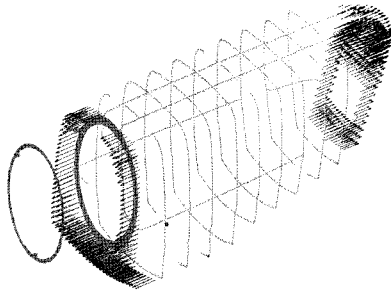
(c) In X direction

Fig. 4 Air Load for Load Case 1

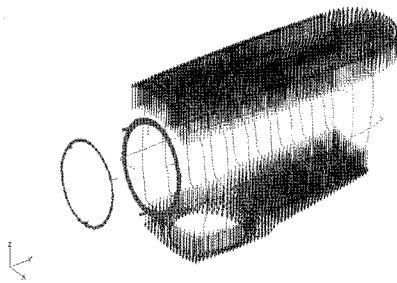
3.1 경계조건 및 하중조건

너셀 커버와 노즈콘이 내부 프레임과 고정되는 위치에 x, y, z 병진방향의 구속을 하였으며, Fig.3과 같이 너셀 커버 10개, 노즈콘 12개 노드점(Node)을 구속하였다.

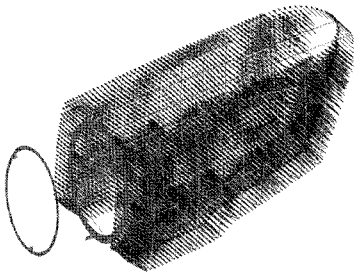
또한 해석 모델에 적용한 하중은 2.2절에 따라 각 방향에 대한 6면의 면적을 적용하여 Load Case 1, 2에 대한 풍하중을 구하여 해석에 적용하였다. 이 때 라운드된 곳을 고려한 C_w 축소는 하지 않았다. 각 Load Case에 따른 하중 분포는 Fig. 4, 5와 같다.



(a) In Y direction



(b) In Z direction



(c) In X direction

Fig. 5 Air Load for Load Case 2

3.3 해석결과

3.3.1 구조의 변형 값

Load Case에 따라 너셀 커버와 노즈콘에 대한 FE 해석을 실시한 결과 Load Case 1, 2에 대한 최대 변형값은 각각 8.9mm, 21.1mm를 나타내며 Fig.6, 7의 Contour와 같이 모두 너셀 커버의 지붕면에서 발생한다.

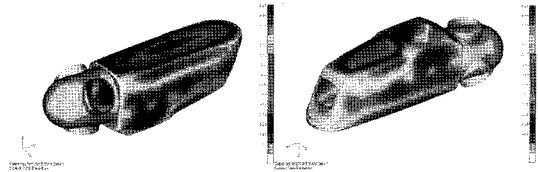


Fig. 6 Deflection for Load Case 1

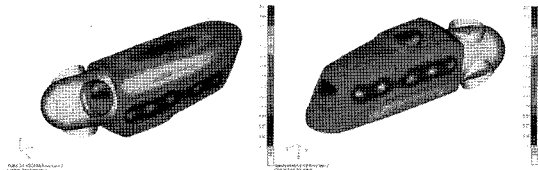
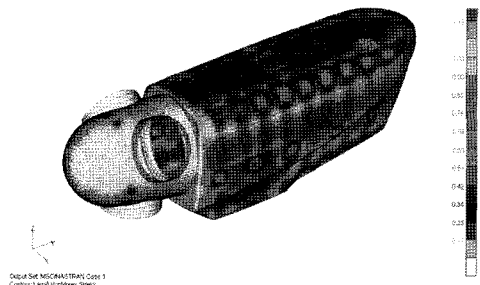


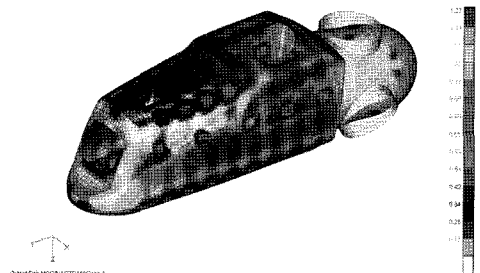
Fig. 7 Deflection for Load Case 2

3.3.2 너셀커버의 강도

Load Case에 따라 너셀 커버와 노즈콘에 대한 FE 해석을 실시하여 각 Ply별 해석 결과를 검토한 결과 Load Case 1의 경우 너셀 커버의 앞에서 두 번째 지지부 근처 격자요소의 내부 Ply에서 최대값 1.35kgf/mm²이 발생하였다. Load Case 2의 경우 70m/s의 바람을 맞는 너셀 커버면의 앞에

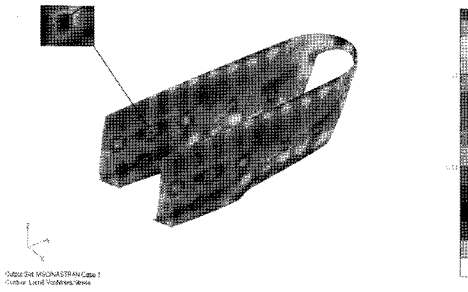


(a) Upper View



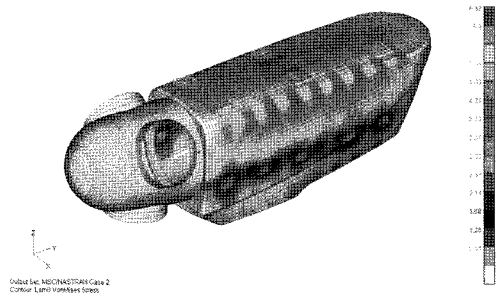
(b) Below View

Fig. 8 Mises Stress Contour for Load Case 1

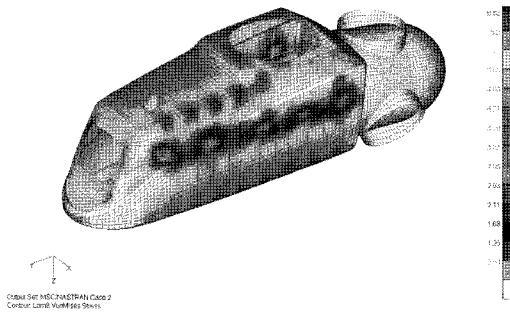


(c) Side Group View

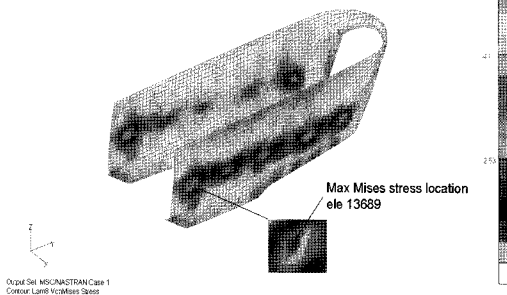
Fig. 8 To be continued



(a) Upper View



(b) Below View



(c) Side Group View

Fig. 9 Mises Stress Contour for Load Case 2

서 첫 번째 지지부 근처 격자요소의 내부 Ply에서 최대값 6.74kgf/mm²이 발생하였다. Load Case 1, 2에 대한 Mises Stress Contour는 Fig. 8, 9와 같다.

3.3.3 보강재의 강도

너셀 커버의 강성을 보완하기 위해 삽입된 보강재의 Stress Contour는 Fig. 10, 11과 같으며, Load Case 1, 2 각각에 대해 1.2kgf/mm², -3.63kgf/mm²이다.

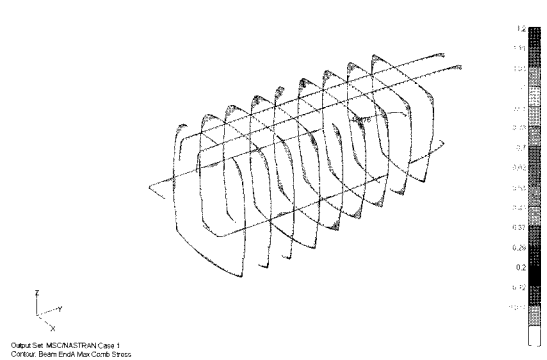


Fig. 10 Mises Stress in stiffener for Load Case 1

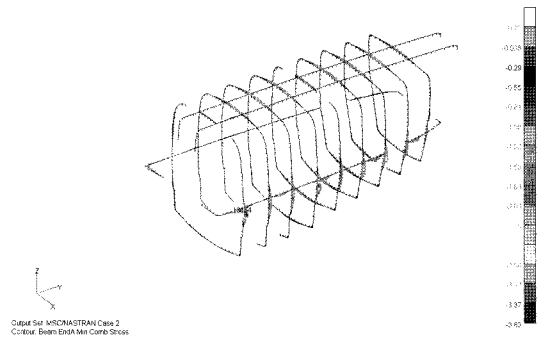


Fig. 11 Mises Stress in stiffener for Load Case 2

3.4 해석평가

3.4.1 너셀커버

GL 규격에 따라 하중에 대한 부분 안전 계수 γ_F 는 1.35이며, 재료에 대한 부분 안전 계수 γ_{MO} 도 1.35로 전체 안전 계수(γ) 1.83에 대해 해석 결과를 평가한다.

해석 결과를 통해 Load Case 2에 대한 너셀 커버의 격자요소 13689에서 응력이 최대가 되었으므로 이 격자요소에 대한 복합재 강도 평가 방법을 이용하여 안전여유를 계산한 결과 최 외곽 Ply에서 M.S.가 0.11이었다. 따라서 너셀 커버의 강도는 충분하다는 것을 알 수 있었다.

3.4.2 보강재

앞의 3.4.1절에서 정한 전체 안전 계수(γ) 1.83에 대하여 보강재의 해석 결과를 평가함에 있어 너셀 커버와 마찬가지로 Load Case 2에 대한 해석 결과를 가지고 다음의 식으로 강도 평가를 한 결과 M.S.가 1.1이 되어 보강재의 강도 역시 충분하다는 것을 알 수 있었다.

$$M.S. = \frac{F^u}{\gamma \cdot \sigma_{\max}} - 1 \quad (4)$$

여기서, σ_{\max} : 최대 응력 값 (kgf/mm²)

4. 결 론

본 논문에서는 GL규정에 따라 자중 및 바람 하중을 고려하여 H사에서 개발 중인 2MW 풍력시스템 너셀 커버의 강도를 상용 해석 프로그램 Nastran을 활용하여 해석 후 평가하여서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2MW 풍력발전시스템 너셀 커버의 강도와 보강재의 강도를 만족함을 알 수 있었다.

2) 풍력발전시스템 너셀 커버의 복합재료 물성치를 확보할 수 있었으며 너셀 커버의 복합재 강도해석 방법 및 평가 방법을 정립하였다.

3) 해석결과 너셀커버를 프레임에 고정하는 부위에서 구조적으로 가장 취약한 것으로 나타났다. 이 취약 부위에 복합재 ply를 추가하거나 금속 plate를 ply 중간에 삽입하는 방법을 적용한다면 응력을 크게 저감 시킬 수 있을 것이다.

4) 향후 풍력발전시스템 너셀 커버의 해석 기술로 설계 단계에서 강도를 평가하여 신뢰성 있는 제품을 개발 하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Hau, "Wind turbines". Springer, 2000.
- [2] Y. J. kim, Y. S. Ryou, G. C. Kang, Y. Paek, J. H. Yun, Y. K. Kang "An Experimental Study on a Winndheat Generation System with a Savonius Wind turbine", Springer, Agri. & Biosys. Eng. Vol. 6, No. 2, pp. 65~69, 2005.
- [3] "Rules and regulations, IV-Non-marine, Part 1 - Wind Energy, Regulation for the certification of the Wind Energy Conversion Systems", Germanisher Lloyd, Chapter 1-11, 2003.
- [4] 정명화, 고권성, 유광택, "해상용 풍력발전 시스템에 대한 소개", 한국동력기계공학회지, 제 7권 제2호, pp. 5~10, 2003.
- [5] "GL Wind Guidelines Rules and Guidelines VI Industrial Services 1 - Guideline for Certification of Wind Turbine", Germanischer Lloyd, chap. 4 ~ chap. 6, 2003.
- [6] "MSC.Nastran 2005 Quick Reference Guide", MSC Software, 2006

저 자 소 개



고우식(高佑植)

1971년생, 1994년 부산대학교 생산기계공학과 졸업, 2006년 부산대학교 대학원 기계설계공학과 졸업(공학박사), 1996년 (주)효성 중공업연구소 풍력발전 기술팀 수석연구원



이형우(李炯佑)

1966년생, 1991년 부산대학교생산기계공학과 졸업, 1999년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(공학박사) 2007년 부산대학교 기계공학부 NURI BEAM 사업단 교수