

CAE 기법을 활용한 3MW급 풍력발전기 로터의 구조 및 진동해석

김요한* · 박효근* · 김동현** · 김동만* · 황병선*** · 박지상*** · 정성훈***

Structural and Vibration Analyses of 3MW Class Wind-Turbine Blade Using CAE Technique

Yo-Han Kim*, Hyo-Geun Park*, Dong-Hyun Kim**, Dong-Man Kim*,
Byoung-Sun Hwang***, Ji-Sang Park***, and Sung-Hoon Jung***

Key Words : Composite Wind-Turbine Rotor (복합재 풍력발전 로터), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Finite Element Method (유한요소법), Computer Applied Engineering (전산응용공학)

ABSTRACT

In this study, computer applied engineering (CAE) techniques are fully used to conduct structural and dynamic analyses of a huge composite rotor blade. Computational fluid dynamics is used to predict aerodynamic load of the rotating wind-turbine blade model. Static and dynamic structural analyses are conducted based on finite element method for composite laminates and multi-body dynamic simulation tools. Various numerical results for aerodynamic load, static stress, buckling and dynamic analyses are presented and characteristics of structural behaviors are investigated herein.

1. 서론

현재 인류는 화석연료를 사용함에 있어 두 가지 어려움에 봉착해 있다. 첫 번째가 자원고갈이고, 두 번째는 환경오염과 관련된 문제이다. 이런 문제를 해결하기 위해 다수의 국가에서 친환경적 재생에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 친환경 재생에너지 중 인류의 문명과 함께 발전해온 풍력분야가 있다. 풍력은 인간이 최초로 사용한 원동기(풍차)의 에너지였

으나, 화석연료의 편리성에 의해 인류의 관심에서 멀어졌다. 하지만 근래에는 유가의 급격한 상승과 함께 친환경 재생에너지가 많은 관심을 받고 있다. 유럽에서는 이미 오래전부터 풍력발전기를 활용한 효율적인 전력생산에 많은 연구를 수행하여 왔으며, 국내에서도 다양한 용량의 풍력발전기가 설계, 제작 및 운용되고 있다. 하지만, 개발된 풍력발전기의 실용화를 위해서는 구조 건정성과 함께 고효율화 여부가 매우 중요한 관건이 된다. 또한 풍력발전기의 고효율화를 위해서는 블레이드의 대형화와 경량화를 이루어야 하는데, 이를 위한 활발한 연구가 진행되어 이미 풍력발전기 1기당 설비용량이 1MW급 이상의 실용화가 이루어졌다. 특히, 유럽 선진국을 중심으로 풍력발전기의 대형화가 이루어지고 있는 추세인데, 최근에는 5MW

* 국립경상대학교 기계항공공학부 대학원

** 국립경상대학교 기계항공공학부 교수 (교신저자)

*** 기계기술연구소 풍력핵심기술연구센터

E-mail : dhk@gnu.ac.kr

급 해상용 풍력발전기를 개발 중에 있다. 국내에서도 2012년까지 3MW급 풍력발전기 개발 및 실용화를 목표로 많은 예산이 투입되고 있다. Fig. 1은 MW급의 대형풍력발전기의 실용화를 통계 및 예측한 그래프이다. 유럽을 중심으로 발전을 하던 풍력발전기는 세계적으로 현저히 확산되고 있는 추세이다.

풍력발전기에 있어 로터 블레이드는 발전기의 효율을 결정짓는 핵심부품으로 대형화로 인해 로터 블레이드의 직경이 100m에 이르고, 로터의 무게가 수십 톤에 이르는 구조물로 설계된다. 또한 에어포일(airfoil) 두께는 두꺼워지는 반면 스킨(skin)의 두께는 얇은 구조형상으로 설계하며 복합재를 적용하여 블레이드 경량화를 위한 최적설계 연구에 대한 관심이 높아지고 있다.

기존에도 풍력발전기 시스템의 구조진동 해석에 대한 이론적 기법구축^[1] 및 750kW급 복합재 블레이드 모델에 대한 구조해석에 대한 실용적인 연구사례^[2], 유체 구조 연계해석의 사례^[3]가 존재한다. 본 연구에서는 3MW급 대형 풍력발전기용 복합재 블레이드(길이 47m, 무게 10 ton)에 대하여 CAE 기법을 활용하여 블레이드의 유체, 구조 및 진동특성과 관련된 통합 응용해석 결과를 제시하고자 한다. 이를 위해 정격풍속 25 m/s, 회전 속도 20rpm 조건에서 전산유체역학기법(CFD)을 이용한 3차원 유동해석과 유한요소법(FEM) 기반의 구조/진동해석 결과를 실용적으로 제시하였다. 매우 실제적인 형상을 고려하기 위해 회전효과를 고려한 유동해석은 Fluent (Ver.6.3)^[4]을, 구조 및 진동해석은 유럽에서 활발하게 응용하고 있는 SAMCEF (Ver.6.1)^[5] 프로그램을 활용하였다.

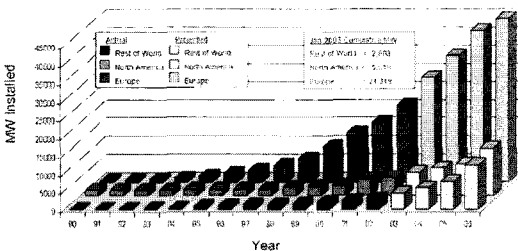


Fig. 1 Growth of wind energy capacity worldwide (Reproduced from windpower monthly)

2. 이론적 배경

2.1 비정상 오일러 방정식

비정상 유동해석은 오일러 방정식에 근거하였으며, 물체의 상대 운동을 고려한 비정상 압축성 유동장에 대한 오일러 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho dV + \oint_{\partial\Omega} F(Q) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (1)$$

여기서, F와 Q는 각각 보존변수 및 비점성 플럭스를 의미하며 아래와 같이 표현된다.

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e_0]^T \quad (2)$$

$$F(Q) \cdot \vec{n} = \begin{Bmatrix} \rho \vec{u} \\ \rho u \vec{u} + p \vec{e}_x \\ \rho v \vec{u} + p \vec{e}_y \\ \rho w \vec{u} + p \vec{e}_z \\ e_0 \vec{u} + p \vec{u} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{u} = \vec{n} \cdot (u - u_g) \quad (4)$$

$$u_n = \vec{n} \cdot u \quad (5)$$

위 식에서 Q, u_g, e₀, n̄ 은 각각 보존변수, 격자의 이동속도, 단위체적당 전에너지(total energy) 및 물체 표면에 수직인 단위벡터를 의미한다. 또한 이상기체 가정을 적용하면 다음과 같은 압력관계식을 얻을 수 있으며, 공기의 경우 비열비 γ는 1.4 이다.

$$p = (\gamma - 1) [e_0 - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2)] \quad (6)$$

공간에 대한 차분은 유한체적법을 적용하였으며, 시간에 대한 차분은 계산효율과 시간정확도 향상을 위해 내재적 방식의 dual-time stepping 기법을 적용하였다. 또한 각각의 셀 표면을 통한 플럭스는 Roe의 flux-difference splitting 기법을 이용하여 계산하였다^[3].

2.2 강도해석

직교좌표계에서 탄성범위 내의 구조요소는 수직응력(normal stress)과 각 면의 접선방향 전단응력(shear stress)성분으로 부하를 받고 있다. 여기서 9개의 응력 성분 중 세 개의 수직응력 성분인 σ_x, σ_y, σ_z 과 여

섯 개의 전단응력 성분인 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{zy}, \tau_{yz}$ 로 구성되게 되고, 관련된 응력 텐서(tensor)는 아래 식과 같다.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

일반적으로 강도해석을 위한 유발 응력계산에는 식 (8)과 같은 Von-Mises 응력기준식을 적용할 수 있다. 또한 복합재 구조의 강도평가에는 Strain 에너지를 이용한 Tsai-Wu criteria를 적용하였다.^[6]

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 고유진동해석

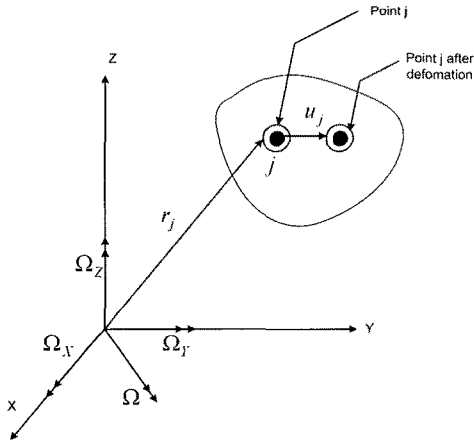


Fig. 2 Flexible structure subjected to arbitrary spinning motion.

Fig. 2는 Ω 의 속도로 회전하는 유연체의 절점 j에서의 탄성 변형을 나타낸다. Ω 는 회전속도를 나타내며, r 은 초기 위치이다. 그리고 변형된 위치, 속도, 가속도 벡터는 식(9)~식(11)과 같이 정의될 수 있다.

$$r = r_j + u_j \quad (9)$$

$$v = \frac{\partial r}{\partial t} + \Omega \times r \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{\partial v}{\partial t} + \Omega \times v \\ &= \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \dot{\Omega} \times r + 2\Omega \times \dot{r} + \Omega \times (\Omega \times r) \end{aligned} \quad (11)$$

위치 r 은 탄성변형 전의 위치 r_j 와 탄성 변형에 의한 u_j 의 합으로 나타나고 속도 v 는 위치를 시간에 대해 미분한 $\frac{\partial r}{\partial t}$ 과 회전속도 벡터와 위치 벡터의 cross product한 $\Omega \times r$ 의 합으로 나타난다. 여기서 식(11)의 $\dot{\Omega} \times r$ 은 정상 회전상태에서는 0이고, $2\Omega \times \dot{r}$ 은 Coriolis 가속도와 관계되며, $\Omega \times (\Omega \times r)$ 은 구심가속도 성분을 의미한다. 헤밀턴의 원리에 의해 회전하는 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{u} + C_c\dot{u} + (K_E + \dot{K})u = f_c \quad (12)$$

식 (14)에서 M 은 질량 행렬이고 C_c 는 회전속도에 따른 감쇠 항으로 $2M\Omega$ 이다. 탄성학 적인 강성 K_E 와 원심력에 의해 나타나는 변위에 대한 강성 \dot{K} 으로 나타낼 수 있다. 외력 f_c 는 원심력 $-M\Omega\Omega r$ 으로 나타난다. 모든 r_j 는 r 로 나타내었고 오른쪽의 항은 원심력 벡터를 나타낸다. 해석은 회전속도에 의해 변형된 위치에서의 정상상태에서 시작된다.

$$(K_E + \dot{K})u = f_c \quad (13)$$

기하학적 강성인 K_G 는 회전속도에 의한 내부 하중을 계산한 다음 단계에서 계산되며, 모든 j 점들의 위치는 갱신된다. 그리고 K_E 와 M 행렬 또한 다시 계산되게 된다. 이러한 조건에 대해 자유진동 지배방정식을 변형하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{u} + C_c\dot{u} + (K_E + \dot{K} + K_G)u = 0 \quad (14)$$

이와 같은 식을 이용하여 고유진동수 및 고유진동 모드를 구할 수 있다.

2.4 좌굴해석

유한요소해석에서 선형좌굴 문제는 선형 강성행렬에 미분강성의 효과들이 포함된 상태로 나타나게 된다. 미분 강성행렬은 형상, 요소형태 및 가진 하중의 함수이다. 전체 시스템의 강성행렬은 식(15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K] = [K_o] + [K_d] \quad (15)$$

여기서 K_o 는 선형 강성행렬을, K_d 는 미분 강성행렬을 의미한다. K 는 전체 강성 행렬로 식 (14)에서 $K_E + \dot{K} + K_G$ 와 같고 좌굴 해석에서는 선형 강성행렬과 미분 강성행렬로 나뉘어 진다. 선형 강성행렬은 재료 상수의 함수로 나타내어 지고, 미분 강성 행렬 K_d 는 형상, 요소 형태, 하중의 함수이며 이들의 영향을 받는다. 시스템의 총 내부에너지는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[U] = 0.5 \{u\}^T [K_o] \{u\} + 0.5 \{u\}^T [K_d] \{u\} \quad (16)$$

위 식을 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[[K_o] + P_a [\overline{K}_d]] \{u\} = \{0\} \quad (17)$$

여기서 $K_d = P_a [\overline{K}_d]$ 이고 P_a 는 예비 하중을 의미한다. 또한 식(18)는 해가 존재하기 위해 다음과 같은 관계식을 만족하여야 한다.

$$|[K_o] + P_a [\overline{K}_d]| = \{0\} \quad (18)$$

위 식에서 아래와 같은 관계식을 적용하여 임계 좌굴하중(critical buckling load)을 구할 수 있다.

$$P_{cr} = \lambda_i \cdot P_a \quad (19)$$

λ_i 값들은 일종의 scale factor들로서 각 좌굴모드에 대해 구해지며, 예비하중 P_a 를 곱하여 물리적인 좌굴하중을 결정하게 된다.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 공력하중해석

본 연구에서는 회전하는 로터 블레이드에 작용하는 공력하중해석을 비교적 정확하게 해석하기 위해 3차원 전산유체역학(CFD) 기법을 적용하였다. 3MW급 블레이드에 대한 공력해석에 앞서 우선 기존에 풍동시험 결과가 있는 풍력발전 로터 블레이드에 대한 해석을 수행하고 결과를 비교하여 보았다. 검증에 사용된 모델의 형상은 직경 20m, 시위길이(chord length) 1m, 허브 연결부(root cutout) 길이 2m를 가진다. 또한 날개 단면 에어포일 형상은 스펠 방향으로 균일하게 NACA 0012로 이루어져 있으며 비틀림 각은 2°이다^[7].

Fig. 3에는 검증용 블레이드 모델에 대한 3차원 유동해석 격자의 예를 보여주고 있는데, 전체 격자는 두 개의 영역으로 나누어져 있다. 로터의 회전을 모사하기 위해 상대운동을 하는 로터부의 안 쪽 원방 격자계를 이동격자영역으로 설정하였고, 외부의 회전하지 않는 유동영역의 격자계를 고정격자영역으로 분리하여 설정하였다. 원방경계는 블레이드 길이의 약 두 배가 되는 지점으로 설정하였다. MRF(multiple rotating reference frames)기법을 이용하여 안쪽의 격자가 회전하는 것과 같은 효과를 줌으로서 안쪽 영역과 바깥쪽 영역의 경계면에 면이 존재하나 마치 없는 것으로 간주하는 interface 조건을 부여하여 두 격자계의 물리적인 정보가 전달될 수 있도록 설정하였다. 계산영역의 바깥쪽 경계면에 대해서는 far-field boundary condition을 적용하였으며, 본 모델의 경우 총 격자 체적 수는 약 44만 개이다.

본 모델에 대해 블레이드의 λ (tip speed ratio, TSR) 값 변화에 따른 C_p (power coefficient) 와 CT (thrust coefficient)를 계산하였는데, C_p 의 경우는 실험치가 제

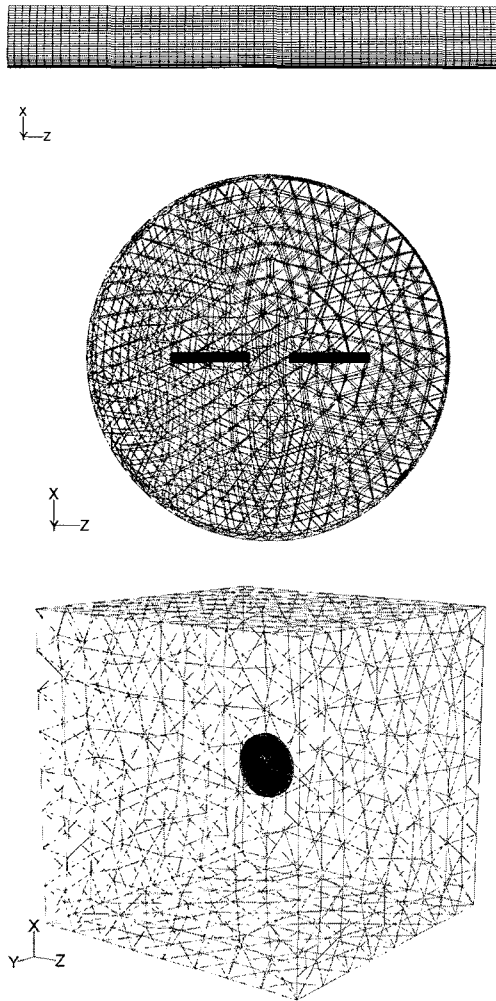


Fig. 3 CFD grid for two-blade wind turbine blade model.

시되어 있어 결과를 비교하여 보았다. 또한 각 계수의 정의는 다음과 같다.

$$\lambda(TSR) = \frac{R\omega}{v_0} \quad (20)$$

$$C_P = \frac{P}{1/2\rho v_0^3 A} \quad (21)$$

$$C_T = \frac{T}{1/2\rho v_0^2 A} \quad (22)$$

위 식에서 R 은 회전면의 반지름을, ω 는 회전속도, v_0 는 유동속도, ρ 는 공기의 밀도, A 는 회전면 면적을 P 는 로터의 파워를 T 는 추력을 의미한다.

Figs. 4~5에는 CFD기법으로 계산한 출력계수 및 추력계수 결과를 제시하였다. 그림을 보면 출력계수의 경우 기존의 실험결과를 전반적으로 잘 예측하고 있음을 알 수 있는데, 본 해석 모델의 경우는 TSR이 8 부근에서 최대 효율을 나타내고 있다. 반면에 추력계수의 경우는 TSR 값이 증가함에 따라 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 하지만, 유동특성상 어느 특정 회전속도 이상에서는 마찬가지로 더 이상의 지속적인 성능 증가를 기대하기는 어렵게 된다.

공력검증에 이어 실제 3MW급 블레이드 모델에 대한 하중해석을 수행하였다. 로터 블레이드 모델의 기본

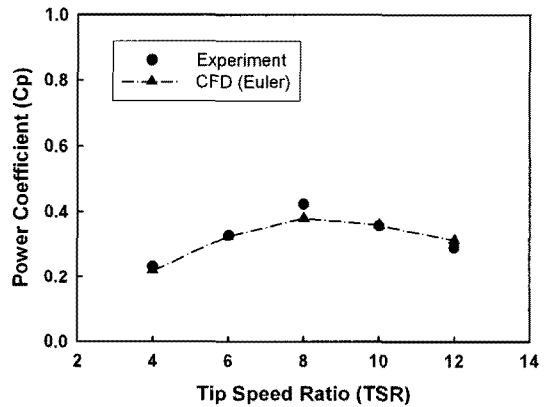


Fig. 4 Comparison of power coefficient

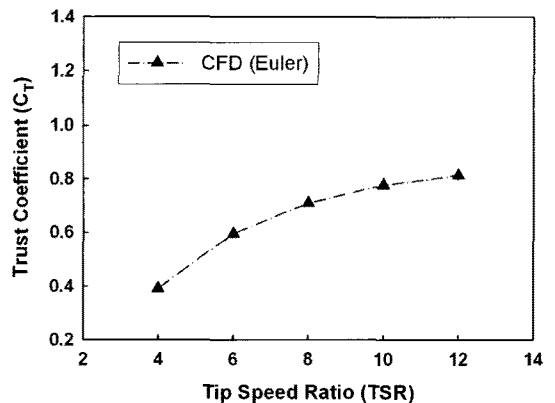


Fig. 5 Calculated trust coefficient using CFD method

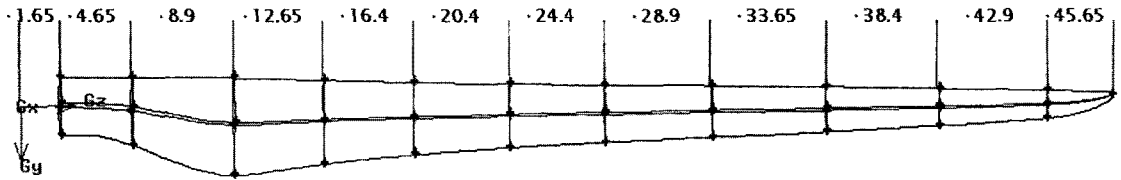


Fig. 6 3MW class wind turbine blade model

형상은 Fig. 6과 같다. 스패ん 길이는 44 m이고 허브 연결부의 길이는 1.65 m이며, 유동 해석조건은 25 m/s의 풍속을 가정하였다. 또한 로터 블레이드의 회전속도는 20 rpm인 경우를 고려하였다. Fig. 7에는 3차원 블레이드 형상에 대해 생성된 CFD 공력해석 격자의 예를 보여주고 있으며, 이 경우 격자의 총 체적(volume) 수는 약 86만개 이다.

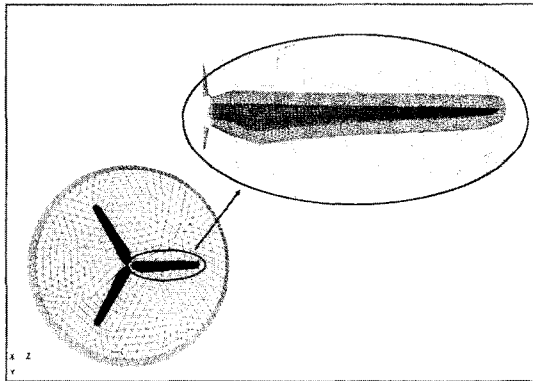


Fig. 7 Computational grid of Turbine Rotor Blade

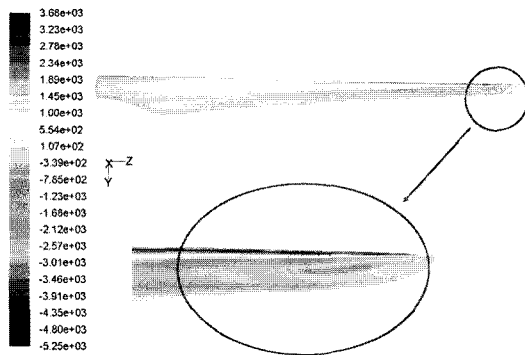


Fig. 8 Pressure contour on the blade surface (Pascal)

Fig. 8은 해석조건에 대한 블레이드 면에서의 압력 분포를 보여주고 있다. 블레이드의 반경이 커서 끝단

에서의 속도분포가 상대적으로 크기 때문에 다소 심한 압력분포 차이를 나타내고 있다.

3.2 정하중 응력해석

본 연구에 고려된 블레이드는 복합재료로 설계되어 있고 적층 순서 및 두께는 하중에 의한 응력분포에 따라 차이를 두어 고려되었다. 블레이드는 주로 UD 재료가 적용되었고 부분적으로 shear web에는 UD 복합재(UniDirectional composite)와 발사를 섞어 적용되었다. 블레이드에 적용된 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다. 본 모델에 적용된 일방향 복합재(UD)는 탄소 섬유로 구성된 재료가 선택되었다. Table 1에서 E는 강성을 뜻하며 ν 는 푸아송비, ρ 는 밀도, S는 항복 강도를 뜻한다. 아래 첨자는 방향을 나타내고 1방향은 Fiber direction, 2방향은 Matrix direction, T는 Tension 방향, C는 Compression 방향을 나타낸다.

Fig. 9는 본 연구에 활용된 대형 복합재 블레이드의 내부 구조형상을 보여주고 있다. 본 모델의 경우 upper skin, lower skin, shear web 및 shear web과 skin을 이어주는 spar cap, upper skin과 lower skin을 붙이는 bonding 부분으로 구성되어 있다.

Table 1 Mechanical material properties

UD				
E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ρ (kg/m ³)
43.1	13.2	3.62	0.241	1,939
S_{1T} (MPa)	S_{2T} (MPa)	S_{1C} (MPa)	S_{2C} (MPa)	S_S (MPa)
916	41	759	124	38

Balsa		
E(GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
3.72	0.1	151

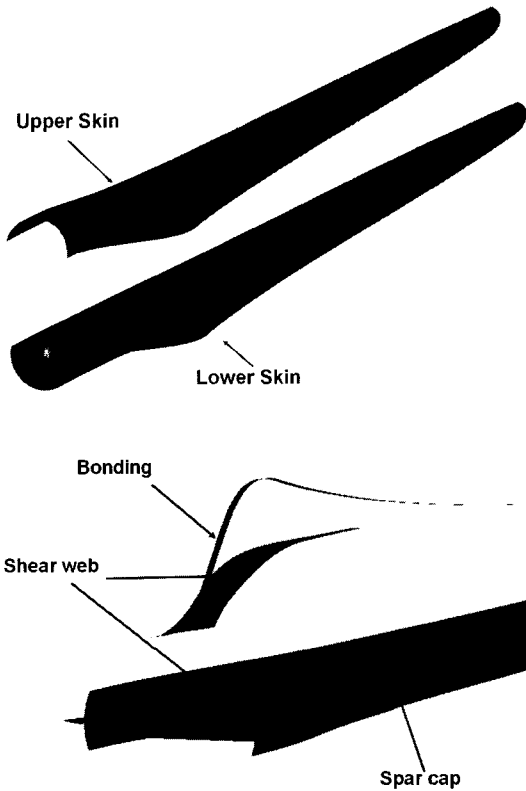


Fig. 9 Configuration of present composite blade

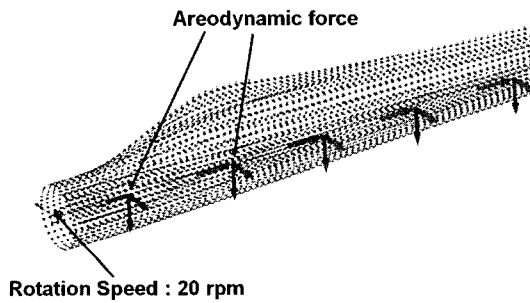


Fig. 10 Finite element model for the 3MW class wind-turbine blade

Fig. 10은 정하중해석을 위한 유한요소 모델의 일부분을 나타내고 있다. 회전효과를 고려한 복합재 블레이드의 유한요소 해석은 SAMCEF (Ver.6.1)을 활용하였으며, 전체 유한요소 모델의 노드 수는 8,908 개 이고, 요소 수는 9,245 개 이다. 또한 블레이드 1개의 총

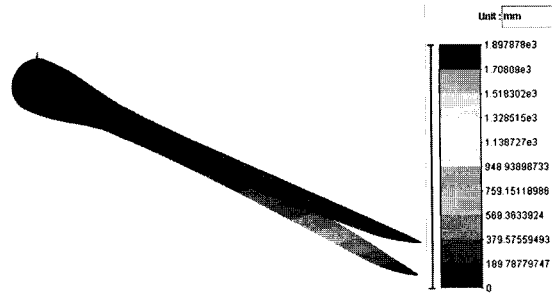


Fig. 11 Structural deformation of the present composite blade model

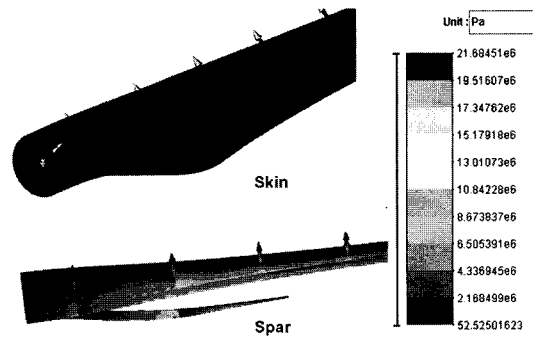


Fig. 12 Major equivalent stress contours

질량은 약 9,420 kg에 달한다. 회전 속도는 본 풍력발전기 모델의 예상 최대 운용 회전속도인 20 rpm을 설정하였다. 또한 CFD 해석에서 계산된 블레이드의 각 섹션별 공력하중을 유한요소 모델에 부가하였다. Fig. 11은 정하중 해석을 통해 예측된 구조 변형형상을 보여주고 있다. 해석 조건에 대한 최대 변위는 1.89 m로 구해졌는데 이는 블레이드 길이(44 m)의 약 4.3%에 해당한다. 이러한 해석결과는 향후 블레이드와 타워의 충돌 간섭문제 검증에 효과적으로 활용될 수 있다. Fig. 12는 회전 및 공력하중에 의해 유발되는 응력 수준을 예측해본 결과이다. Von-mises stress로 나타내었으며 최대 값은 shear web 부분에서 약 34 MPa 정도로 예측되었다. 파손판정과 관련된 Tsai-Wu criteria의 경우 최대 0.22로 예측되어 본 해석조건에서 구조적으로 안정한 것으로 나타났다.

3.2 회전효과를 고려한 고유진동해석

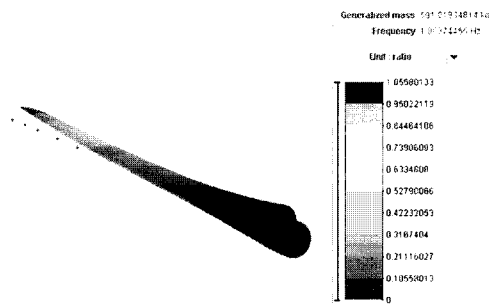
복합재 블레이드의 회전 효과를 고려하여 고유진동 해석을 수행하였다. 이를 위해 회전효과를 고려한 정

적해석을 수행하여 회전에 의한 강성변화 효과를 반영한 후 연속적으로 고유진동해석을 수행하는 과정을 거쳤다. 해석결과로는 우선 회전효과가 없는 경우에 대한 고유모드 형상을 Fig. 13에 제시하였다. 1차 고유모드는 플랩 굽힘모드를, 2차는 리드래그 방향의 굽힘모드를, 3차는 플랩 방향으로 2차 굽힘모드를, 4차는 리드래그 방향으로의 2차 굽힘모드를 나타내고 있다. 풍력발전기 블레이드의 경우 리드래그 모드는 공력탄성학적 안정성 문제와 연관된 피로수명에 매우 민감한 영향을 미치는 고유모드이다.

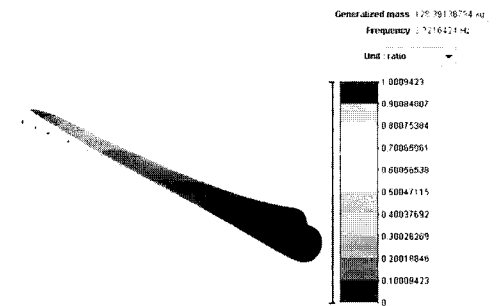
Table 2에는 블레이드 회전속도의 영향을 고려하여 고유진동 해석을 수행한 결과를 제시하였다. 회전수가 증가함에 따라 고유진동수가 약간씩 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 본 해석의 경우는 해석의 가능성을 보이기 위해 블레이드 모델만을 고려한 경우이나, 향후 허브구조, 로터 축, 기어박스 시스템, 낫셀 및 타워 구조를 포함한 진동해석을 수행하여 실제적인 공진 안정성 평가를 수행할 예정이다. 또한 관련 해석결과는 필요시 풍력발전 시스템의 공력탄성학적 안정성 평가에 중요한 기반데이터로 활용되게 된다.

Table 2 Comparison of natural frequencies for different rotational speed

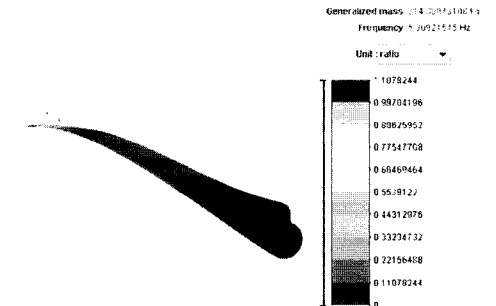
Mode Number	Rotational Speed			
	0 rpm	13 rpm	20 rpm	25 rpm
1	1.106 (Hz)	1.141 (Hz)	1.187 (Hz)	1.230 (Hz)
2	1.804 (Hz)	1.809 (Hz)	1.817 (Hz)	1.824 (Hz)
3	3.322 (Hz)	3.358 (Hz)	3.409 (Hz)	3.457 (Hz)
4	5.909 (Hz)	5.926 (Hz)	5.949 (Hz)	5.970 (Hz)
5	6.820 (Hz)	6.856 (Hz)	6.905 (Hz)	6.952 (Hz)
6	11.16 (Hz)	11.20 (Hz)	11.25 (Hz)	11.30 (Hz)



(b) 2nd mode (1.804 Hz)



(c) 3rd mode (3.322 Hz)

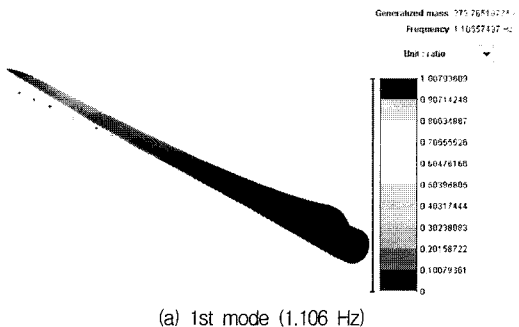


(d) 4th mode (5.909 Hz)

Fig. 13 Natural vibration mode shapes

3.3 좌굴해석

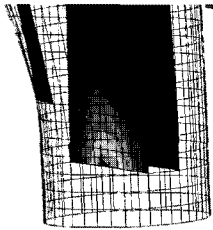
복합재 대형 블레이드는 헬리콥터 블레이드의 경우와 유사하게 운용환경에서 skin 및 관련 구조부분에 인장과 압축력을 동시에 받게 된다. 그리고 shear web에서는 전단력을 지지하며 특히 lower skin과 shear web에서의 좌굴은 재료의 강도보다 낮은 하중에서도 발생할 수 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 좌굴 해석을 위해 블레이드 구조를 각 구간으로 나누고 내력 하중을 추가하여 좌굴해석을 수행하였다. Fig. 14의 결



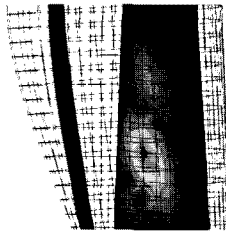
(a) 1st mode (1.106 Hz)

과를 보면 구간 1, 2에서는 shear web에서 좌굴 모드가 예측되었고, 구간 3, 4에서는 lower skin에서 좌굴 모드가 나타났다. 하지만, 모든 경우에서 좌굴계수가 충분히 크게 나타났기 때문에 고려한 해석조건에서는 좌굴 안정성이 충분한 것으로 판단된다. 참고로, 구간 1, 2의 shear web의 경우 값이 공하중의 10배 이상이 나타나므로 안정하다고 판단된다. 블레이드의 루트부분은 큰 하중을 견뎌야 하므로 skin의 두께가 두꺼우

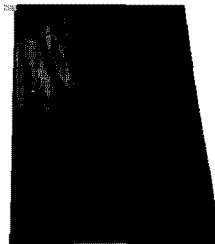
므로 skin보다 shear web에서 좌굴이 예측된 것으로 간주된다. 구간 3, 4에서는 블레이드의 lower skin에서 예측되고 공하중의 4배 이상이 가해질 경우 좌굴이 일어날 것으로 예측되었다. Section은 블레이드의 루트쪽을 0m로 가정했을 때 section 1은 0~4.5m, section 2는 4.5~7m, section 3은 7~10m, section 4는 10~13m로 설정하였다. 좌굴해석에서 부여된 공하중은 정하중 해석을 통해 section의 가장자리에서 나타나는 하중을 구한 후 section을 나눠서 정하중 해석을 통해 구해진 가장자리의 하중을 질점 하나하나에 부여하였다.



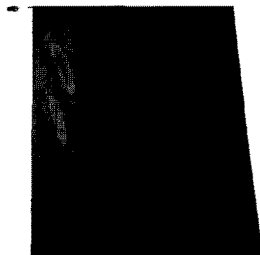
(a) Section 1 (Buckling factor : 27.24)



(b) Section 2 (Buckling factor : 11.42)



(c) Section 3 (Buckling factor : 4.13)



(d) Section 4 (Buckling factor : 7.43)

Fig. 14 Composite blade buckling mode for different structural sections

4. 결 론

본 연구에서는 최근 급격한 발전을 하고 있는 CAE 기술을 통합 활용하여 회전하는 대형 복합재료 풍력발전 로터에 대한 하중, 구조 및 진동해석을 수행하였다. 이를 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics), FEM(Finite Element Method) 및 CSD(Computational Structural and Dynamics) 해석기법에 기반을 두었으며 설계에 필요한 실용적인 해석결과를 기본적으로 도출하였다. 본 연구에서의 기술을 활용하여 향후 블레이드, 허브, 회전축, 기어박스, 낫셀 및 타워 구조를 포함한 통합해석을 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 출연금으로 수행한 풍력핵심기술연구센터 및 2단계 BK21/NURI 사업 연구결과 의 일부이다.

참고문헌

- (1) D. Lee, D. Hodges and M. Patil, 2002, "Multi-flexible-body Dynamic Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines," Wind Energy, Vol. 5, pp. 281~300.
- (2) 이충훈, 박진무, 김태욱, 박지상, 2002, "풍력 발전기용 대형 복합재 윈드 터빈 블레이드 구조 설계 및 해석," 대한기계학회 기타 간행물 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄 강연 및 논문집, pp. 650~660.
- (3) 성태홍, 2006, "유체-구조 연계기법을 통한 복합적

- 층 블레이드의 정적변형 해석,” 전남대 기계공학 대학원 석사논문.
- (4) Fluent User's Manual Ver. 6.3, Fluent Inc., 2006.9.
- (5) SAMCEF ver 11.1, User's Manual, SAMTECH Co., 2006.
- (6) Tsai, S.W. and Wu, E.M., 1971, "A general theory of strength for anisotropic materials," Journal of Composite Materials, 5, pp. 58~80.
- (7) 심호준, 강경민, 이동환, 2007, "풍력발전 블레이드의 공력해석과 풍동 실험 기법," 한국풍공학회지, 제11권, 제1호, pp. 115~120.