

회전 및 풍하중 가진 효과를 고려한 대형 풍력발전 로터의 구조 및 진동해석

Structural and Vibration Analysis of Large Windturbine Rotor Considering the Rotational and Aero Load Effect

김동만*·김동현†·박강균*·김유성*

Dong-Man Kim*, Dong-Hyun Kim†, Kang-Kyun Park*, Yu-Sung Kim*

Key Words : Super-Element(등가요소) 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 the non-linear finite element method for composite laminates and multi-body dynamic simulation tools. Various numerical results for aerodynamic load, dynamic analyses are presented and characteristics of structural behaviors are investigated herein.

1. 서론

현재 화석연료의 지나친 사용으로 인류는 지구온난화로 인한 많은 재난을 받고 있으며, 앞으로 더 큰 재난을 받을 것으로 예상되고 있다. 이를 막기 위하여 세계 각 국가들은 특히 선진국가들은 신재생에너지 생산에 많은 관심과 투자를 하고 있어 현재 상당한 성과를 거두고 있다. 특히 현재 가장 쉽게 실용가능하며, 화석에너지를 대체할 에너지는 풍력에너지이다. 풍력에너지는 우리 주위에서 쉽게 접할 수 있으며, 오랫동안 이용해온 에너지이다. Fig. 1은 06년 현재까지 전 세계에 설치된 지역별 풍력발전기 설치량을 나타내고 있다. 또한, 현재 풍력발전기는 발전 단가를 낮추기 위해 발전기의 크기(발전용량)를 계속 증가시키고 있다. 현재 세계적으로 2MW급 이상의 풍력발전기가 설치되고 있으며, 현재 6MW급 이상의 풍력발전기가 시험 작동하고 있다. 국내에서도 3MW급 이상의 대형풍력발전기를 2012년까지 실용화를 목표로 하고 있다.

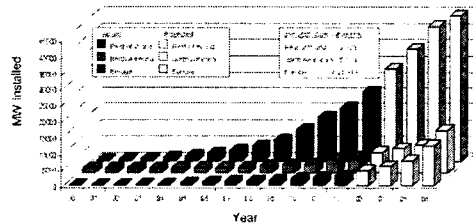


Fig. 1 Growth of wind energy capacity worldwide (Reproduced from windpower monthly)

현재 풍력발전기의 발전량이 증대되고 있는 상황이지만, 아직 화석연료보다 발전단가가 높아 전체 발전량에서 풍력발전이 차지하고 있는 비율이 낮아 발전효율을 높이기 위해 많은 연구 중이다. 베츠계수에 따르면 풍력발전기를 통해 풍력에너지를 전기로 발전하는 과정 중 가장 손실이 높은 부분이 로터부분의 공기역학적 손실이다. 이를 개선하기 위해서 각 블레이드의 공기역학적 특성뿐만 아니라 동적 구조특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 블레이드의 동적 구조특성을 파악하기 위하여 CFD와 CAE를 연계하여 해석을 수행하였다.

3차원 유동해석을 CFD를 통하여 주어진 환경에서 풍력발전기 블레이드에 작용하는 공력을 계산하였으며, 이 하중을 블레이드 동적유한요소모델에 추가하는 기법을 사용하여 작동 상태에서의 블레이드 동적 구조특성을 파악하였다. 3차

† 교신저자; 국립경상대학교 기계항공공학부 부교수
E-mail : dhk@gnu.ac.kr
Tel : (055) 755-2083, Fax : (055) 755-2081
* 국립경상대학교 기계항공공학부

원 유동해석을 위해 CFD 전문해석 프로그램인 Fluent (Ver 6.3)을 사용하였으며, 동적유한요소모델의 구조 및 진동해석을 위해 CAE 전문해석 프로그램 SAMCEF (Ver. 6.3)을 활용하였다. 특히 3차원 유한요소 블레이드를 활용한 동적 구조해석은 많은 시간과 어려움이 있어, SAMCEF에서 지원하는 Super-Element기법을 활용하여 블레이드의 동적 특성이 등가된 요소를 생성하여 동적 구조특성을 파악하였다. 블레이드와 같은 길이가 긴 형상의 경우 등가법기법을 슈퍼 요소기법을 대신하여 사용하여 왔다⁽³⁾.

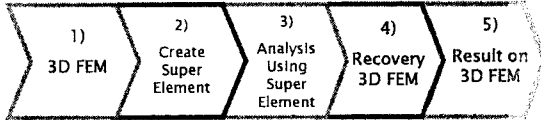


Fig. 2 Process of Analysis Using S.E.

슈퍼 요소를 활용한 동적구조해석과 후처리 과정은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 1) 3D 유한요소모델을 생성한다. 2) 3D 유한요소모델을 활용하여 슈퍼 요소 생성한다. 3) 슈퍼 요소를 활용하여 동적 구조해석을 수행한다. 4) 후 처리 과정을 통하여 3D 유한요소를 재생성한다. 5) 3D 유한요소 에 대한 결과를 확인한다. 1)~5)의 일련의 과정으로 구조물의 동적해석을 수행하게 된다.

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.

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

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

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

$$F(Q) \cdot \vec{n} = \begin{Bmatrix} \overline{\rho u} \\ \rho u \overline{u} + p n_x \\ \rho v \overline{u} + p n_y \\ \rho w \overline{u} + p n_z \\ e_0 \overline{u} + p V_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

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

$$V_n = \vec{n} \cdot V \quad (5)$$

위 식에서 Q , u_g , e_0 , \vec{n} 은 각각 보존변수, 격자의 이동 속도, 단위체적당 전에너지(total energy) 및 물체 표면에 수직인 단위벡터를 의미한다. 또한 이상기체 가정을 적용하면 다음과 같은 압력관계식을 얻을 수 있으며, 공기의 경우 비열비 γ 는 1.4 이다.

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

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⁽⁴⁾.

2.2 Super-Element

식(7)은 변위, 속도 q 와 고유진동수 ω 의 고유치 문제이다.

$$Kq - \omega^2 Mq = 0 \quad (7)$$

변위 벡터 q 가 압축된 자유도(q_C)와 잔류자유도(q_R)로 분류된다면, 식 (7)은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{CC} & K_{CR} \\ K_{RC} & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_C \\ q_R \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_{CC} & M_{CR} \\ M_{RC} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_C \\ q_R \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

q_C 를 포함하는 식이 오른쪽 항에 남아 있음을 알 수 있으며, 이 시스템은 자연적으로 풀 수 없다. 그러나 근사값으로

$$q_C \approx -K_{CC}^{-1} K_{CR} q_R \quad (9)$$

식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이 관계는 ω 가 0 또는 적당히 작은 값으로 정의된 것이다.

$$\frac{1}{2} (q^T K q - \omega^2 q^T M q) \quad (10)$$

식 (7)은 함수의 최소값으로 식(10)으로 나타내면, 문제는 개선되고, 모든 q 가 더 이상 독립적이지 않지만 관계식 (9)와 연결된 같은 함수의 최소를 찾는다.

$$\bar{q}_C = -K_{CC}^{-1} K_{CR} \bar{q}_R \quad (11)$$

$$\frac{1}{2}(\bar{q}_R^T \bar{K} \bar{q}_R - \omega^2 \bar{q}_R^T \bar{M} \bar{q}_R) \quad (11a)$$

이렇게 구속조건 식(11)과 함께 함수 (11a)의 최소값을 구한다.

$$\frac{1}{2}(\bar{q}_R^T \bar{K}_{RR} \bar{q}_R - \omega^2 \bar{q}_R^T \bar{M}_{RR} \bar{q}_R) \quad (12)$$

$$\bar{K}_{RR} = (K_{RR} - K_{RC} K_{CC}^{-1} K_{CR}) \quad (12a)$$

물론, 더 이상 초기문제와 일치하지 않는다. 이 문제는 식 (12)와 (12a)같이 독립적으로 정의된 q_R 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{M}_{RR} = & M_{RR} - M_{RC} K_{CC}^{-1} K_{CR} - K_{RC} K_{CC}^{-1} M_{CR} \\ & + K_{RC} K_{CC}^{-1} M_{CC} K_{CC}^{-1} K_{CR} \end{aligned} \quad (12b)$$

한 번 이 문제가 풀리면, 식(9) 또는 (8)을 이용하여 쉽게 재계산된다. 식 (10)의 경우, 첫 번째 과정이라 한다. 근사값의 정확도는 진동수와 모드 형상에 달려있다(q). 물리적으로 q_R 이 모드와 비슷하면 결과는 정확해지게 된다⁽⁵⁾.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 공력하중해석

본 연구에서는 회전하는 로터 블레이드에 작용하는 공력 하중해석을 비교적 정확하게 해석하기 위해 3차원 전산유체 역학(CFD) 기법을 적용하였다. 3MW급 블레이드에 대한 공력해석에 앞서 우선 기존에 풍동시험 결과가 있는 풍력발전 로터 블레이드에 대한 해석을 수행하고 결과를 비교하여 CFD 3차원 유동해석 기법 MRF(multiple rotating reference frames)기법을 검증해 보았다⁽⁶⁾.

공력검증에 이어 실제 대형 블레이드 모델에 대한 하중해석을 수행하였다. 로터 블레이드 모델의 기본 형상은 Fig. 3과 같으며 3차원 유한요소모델에 하중을 부가하기 위하여 블레이드를 11개의 섹션으로 구분하였다. 스펠 길이는 44m이고 허브 연결부의 길이는 1.65m이며, 유동 해석조건은 25 m/s의 풍속을 가정하였다. 또한 로터 블레이드의 회전속도는 20 rpm인 경우를 고려하였다. Fig. 4에는 3차원

블레이드 형상에 대해 생성된 CFD 공력해석 격자의 예를 보여주고 있으며, 이 경우 격자의 총 체적(volume) 수는 약 86만개이다.

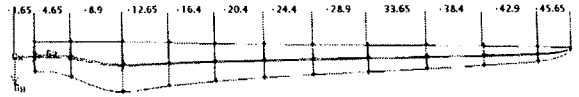


Fig. 3 Wind turbine blade model

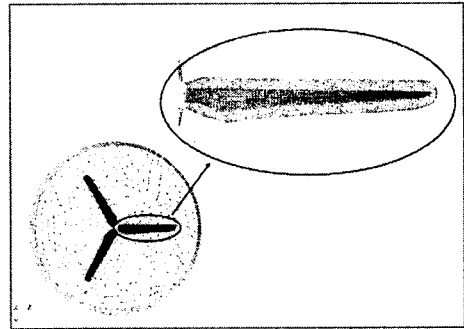


Fig. 4 Computational grid of turbine rotor blade

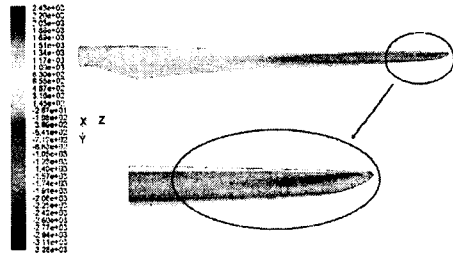


Fig. 5 Pressure contour on the blade surface

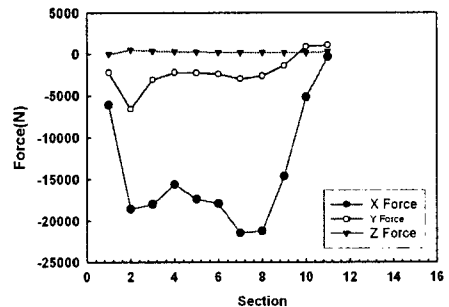


Fig. 6 Computed aerodynamic sectional forces induced by rotating blades

Fig. 5는 해석조건에 대한 블레이드 면에서의 압력분포를 보여주고 있다. 블레이드의 반경이 커서 끝단에서의 속도분포가 상대적으로 크기 때문에 다소 심한 압력분포 차이를 나타내고 있으며, Fig. 6은 각 섹션별 하중을 나타낸 그래프이다. X 방향은 유동방향을 나타내며, Y 방향은 회전 방향을 나타내고, Z 방향은 블레이드 길이 방향이다. 공력의 방향에서 알 수 있듯이 하중이 블레이드가 회전하는 방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

3.2 3차원 블레이드 유한요소모델

본 연구에 고려된 블레이드는 복합재료로 설계되어 되어 있고 적층 순서 및 두께는 하중에 의한 응력분포에 따라 차이를 두어 고려되었다. 블레이드는 주로 UD 복합재가 적용되었고 부분적으로 shear web에는 UD와 발사를 섞어 적용되었다. 블레이드에 적용된 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical material properties

UD				
E11(GPa)	E22(GPa)	G12(GPa)	ν_{12}	ρ (kg/m ³)
43.1	13.2	3.62	0.241	1,939
S1T(MPa)	S2T(MPa)	S1C(MPa)	S2C(MPa)	SS(MPa)
916	41	759	124	38
Balsa				
E(GPa)	ν	ρ (kg/m ³)		
3.72	0.1	151		

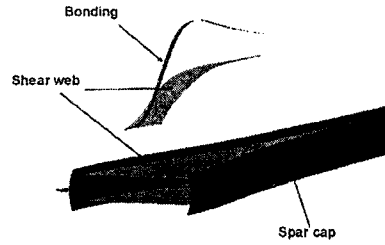
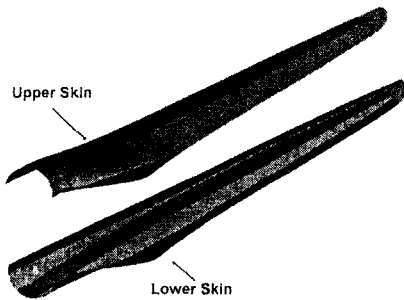


Fig. 7 Configuration of present composite blade

Fig. 7은 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.

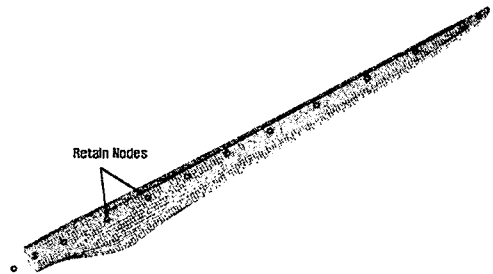


Fig. 8 3D Blade Finite Element Model

Fig. 8은 슈퍼 요소(Super element) 생성을 위한 3D 블레이드 유한요소모델이다. 전체 유한요소 모델의 노드 수는 8,908 개 이고, 요소 수는 9,245 개 이다.

3.3 Super-Element 생성 및 동적 구조해석

생성된 3차원 블레이드 유한요소모델을 사용하여 블레이드의 특성을 같은 몇 개의 슈퍼 요소모델을 생성하였다. Fig. 8에서 표시된 12개의 노드가 3차원 블레이드 전체의 동적 구조특성을 갖는 것이다. 이 기법은 SAMCEF(Ver. 6.3)에서 지원되는 기법으로 3차원 유한요소모델을 대신하여, 구조해석, 동적구조해석, 구조진동해석 등을 하는데 사용된다. 이 기법은 해석 시간과 해석 파일의 크기를 줄이는데 효과적이다. 생성된 슈퍼 요소를 이용한 동적구조해석 전에 슈퍼 요소를 사용한 모델에 대한 동적 구조적 특성을 고유진동수를 통하여 3차원 유한요소모델과 비교하였다.

Table 2 Comparison of natural frequencies

Mode	3D FEM (Hz)	Super Element (Hz)
1st	1.10	1.10
2nd	1.76	1.76
3rd	3.30	3.30
4th	5.82	5.82
5th	6.69	6.70
6th	10.48	10.53
7th	10.95	11.04
8th	12.54	12.62
9th	14.59	14.73
10th	15.73	16.04

또한 Table 3과 같이 3D 유한요소모델과 슈퍼 요소의 방향별 강성을 비교하기 위하여 각 방향별로 등하중을 가하여 변위를 비교하였다. 그 결과 고유진동수 변위를 비교했을 때 값의 오차가 상당히 적은 것을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of static displacements

Direction	3D FEM	Super Element
X-Displacement	70.83 mm	70.84 mm
Y-Displacement	17.59 mm	17.59 mm
Z-Displacement	0.033 mm	0.032 mm
Z-Rotation	0.025 rad	0.025 mm

이런 일련의 과정을 통하여 슈퍼 요소의 구조적 특성이 3D 유한요소와 잘 일치하는 것을 검증 후 풍력발전기의 작동환경에 따른 블레이드의 구조적 특성을 파악하였다. CFD 해석을 통해 계산한 공력을 Fig. 9와 같이 각 섹션의 중심 노드에 부가한 후 허브를 중심으로 20rpm의 속도로 회전시켰다. 로터가 4바퀴 회전하는 동안 동적 구조특성을 계산하였다.

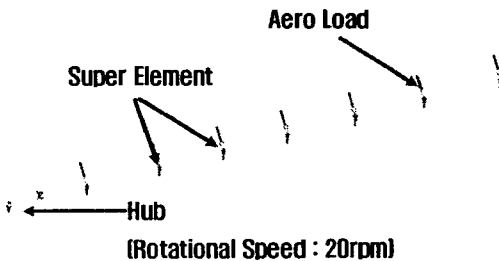
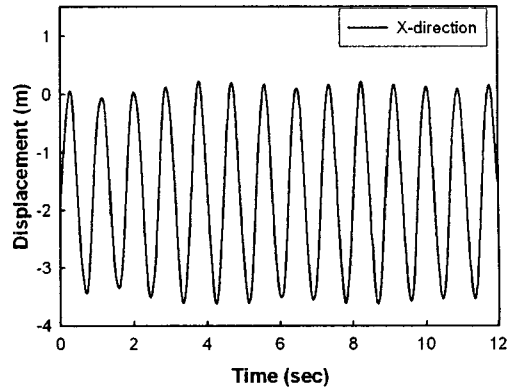
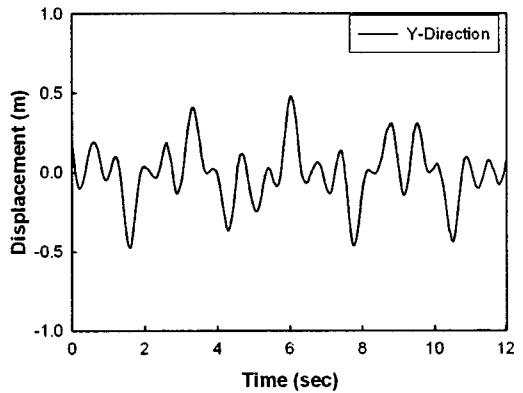


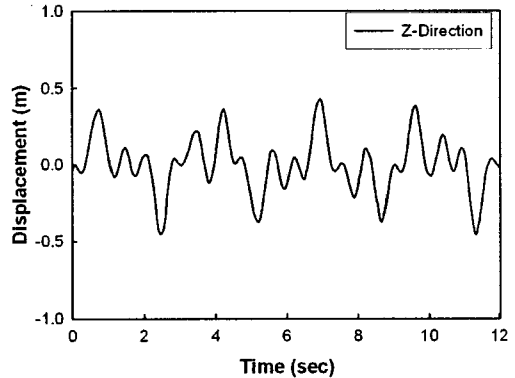
Fig. 9 Super element and applied load positions



(a) X-Direction Deformation



(b) Y-Direction Deformation



(c) z-Direction Deformation

Fig. 10 Displacement of Blade Tip

Fig. 10은 블레이드 tip의 각 방향별 기준 좌표로부터의 변형량을 나타낸다. 각 변형을 살펴보면 제한적인 진동폭을 가지고 반복적인 운동을 하는 것을 알 수 있다. X-축방향 변위는 최고 3.5m의 변위가 나타났으며, Y,Z-축방향 변위는 $\pm 0.5m$ 의 변위가 나타났다. 이와 같은 변위는 기존의 정적구조해석 결과보다 2배 큰 변위로서 우리가 정적구조해석

을 통해 예상하지 못한 점을 동적 구조해석을 통하여 알 수 있었다. 또한 계산된 슈퍼 요소를 사용하여 3D 유한요소 모델에 결과를 복원하였다. 이 과정을 통해 블레이드 각 부분에 나타나는 응력, 변형률 등을 알 수 있다. Fig. 13은 3D로 복원된 결과이다. 변형 전과 변형 후를 비교하였으며, 변형률 분포로 나타낸 것이다.

지금까지 슈퍼 요소모델을 활용하여 풍력발전기 블레이드의 정적동적 구조적 특성을 알아보았다. 3차원 유한요소모델을 사용한 해석과 슈퍼요소를 사용한 해석을 비교했을 때 3차원 유한요소모델을 사용한 동적 구조해석에서 1/3회 회전하는 과정을 해석한 시간은 대략 24시간이 걸린 반면, 슈퍼 요소를 이용한 해석에서는, 슈퍼 요소를 생성 시간 20분, 동적 구조해석 시간 1분, 3차원 복원 과정 1시간의 시간이 걸렸다.

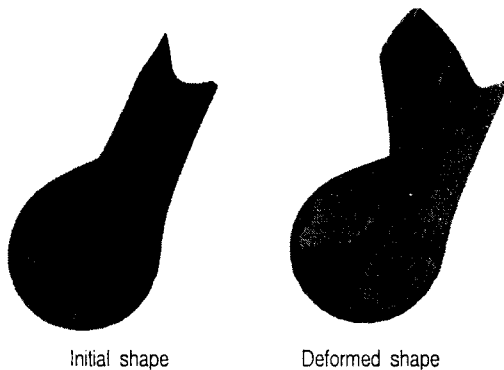


Fig. 13 Recovery super element

4. 결 론

이 논문에서는 구조적으로 가장 불안정한 조건에서 대형 풍력발전기 블레이드의 정적동적 구조특성을 파악하였다. 동적 구조특성을 파악하는 과정에서 슈퍼 요소 기법을 사용하였는데 슈퍼 요소 기법을 통하여 상당한 계산 시간을 줄일 수 있었다. 슈퍼 요소 기법을 활용할 때, 비교적 정확한 해석 결과를 빠른 시간 내에 얻을 수 있어, 본 연구에서의 해석기법을 대형 풍력발전용 블레이드의 설계 단계에서 유용하게 활용될 수 있다. 향후 기어박스, 낫셀 및 타워를 포함하는 풍력발전기 전체 구조를 고려하여 동적 구조해석 수행을 통하여 블레이드의 변형으로 인한 타워와의 충돌 가능성을 확인해 보고자 한다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (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," 대한 기계학회 기타 간행물 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄 장연 및 논문집, pp. 650 ~ 660.
- (3) 김동현, 박효근, 김동만 2008, "대형 풍력발전용 복합재료 블레이드의 개선된 등가 모델링 기법", 유체기계저널, 제 11권, 제 4호, pp. 32 ~ 37.
- (4) Fluent User's Manual Ver. 6.3, Fluent Inc., 2006.9.
- (5) SAMCEF ver 11.1, User's Manual, SAMTECH Co., 2006.
- (6) 김요한, 박효근, 김동현, 김동만, 황병선, 박지상, 정성훈 2008, "CAE 기법을 활용한 3MW급 풍력발전기 로터의 구조 및 진동해석", 유체기계저널, 제 11권, 제 4호, pp. 22 ~ 31.