論文

풍력발전기 로터 블레이드의 등가 구조모델 수립

박영근*, 배재성**, 황재혁† , 김석우‡ , 장문석‡

Equivalent Structural Modeling of Wind Turbine Rotor Blade

Young-Geun Park*, Jae-Sung Bae**, Jai-Hyuk Hwang† , Seok-Woo Kim‡ , Moon-Seok Jang‡

ABSTRACT

The wind turbine rotor blade is faced with various aeroelastic problem as rotor blades become bigger and lighter by the use the composite material. The aeroelastic analysis of a wind turbine rotor blade requires its aerodynamic model and structural model. For effective aeroelastic analysis, it is required the simple and effective structural model of the blade. In the present study, we introduce the effective equivalent structural modeling of the blade for aeroelastic analysis. The equivalent beam model of the composite blade based on its 3D finite element model is established. The free vibration analysis shows that the equivalent beam model of the blade is equivalent to its 3D finite element model.

key Words : Wind Turbine(풍력발전기), Rotor Blade(로터블레이드), Equivalent Structural Model(등가 구조 모델), Modal Analysis(모드 해석)

Ⅰ. 서 론

최근 들어 풍력발전 시스템은 급등하는 유가상승 및 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가하고 있고, 국제적으로 공해물질을 규제해 나가는 시대적인 분위기에서 새로운 천연, 무공해 대체에너지로서 크게 각광받고 있다. 이러한 풍력발전은 대기의 바람, 즉 공기의 유동이 가진 운동에너지를 공기역학적 특성을 이용하여 로터 블레이드를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고, 발전기를 통해 로터의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 것을 의미한다. 풍력 발전 시스템의 주로 구성요소로는 Fig. 1과 같이 블레이드(blade)와 블레이드가 고정되어 있는 허브, 회전축, 로터의 회전을 증속시키는 증속기(gear box), 제어기, 유압브레이크, 전력제어장치 및 기타 주변장치들이 있다.

풍력발전기의 주요 구성요소 가운데, 가장 중요한 요소는 바람의 운동에너지를 로터의 기계적 에너지로 변환시키는 로터 블레이드이다. 블레이드의 설계에 따라서 풍력발전기의 용량과 효율이 결정되며, 풍력발전기 로터 블레이드는 발전기의 구성요소 중 가장 많은 하중을 받게 되므로 풍력발전기의 운용제한은 로터블레이드에 의해서 결정되어진다. 풍력발전기의 블레이드 설계 및 제작은 풍력발전기의 개발에 있어서 가장 중요한 핵심기술이다. 최근 들어서 풍력발전기의 대형화

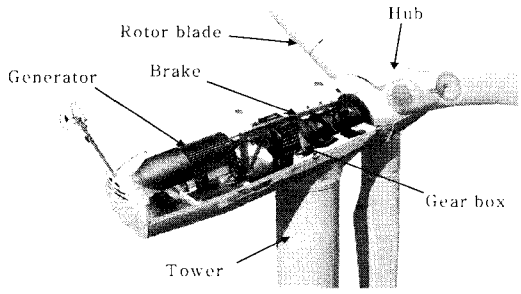


Fig. 1 풍력발전기 시스템

2006년 11월 8일 접수 ~ 2006년 11월 27일 심사완료
* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과
** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락저자, E-mail : jsbae@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1
† 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
‡ 한국에너지기술연구원 풍력연구그룹

와 복합재료 사용으로 인한 경량화로 풍력발전기 로터 블레이드의 공력탄성학적 현상이 매우 중요한 문제로 대두되었으며, 풍력발전기 로터 블레이드 설계 시 필수적으로 고려해야만 한다.

풍력 발전기 블레이드에 있어서 공력탄성학적 현상은 고전적 플러터(classical flutter)와 스톨-유발 진동(stall induced vibration)의 두 가지 중요한 공력탄성학적 연계문제가 있다[2]. 풍력발전기 로터 블레이드의 공력탄성학적 불안정 현상은 구조물의 파괴와 직결되므로, 로터 블레이드의 설계 시 공력탄성학적 안정성 해석이 반드시 수행되어야 한다. 일반적으로 공력탄성학적 해석은 모달 해석(modal approach)이 사용되므로, 블레이드의 공기역학적 모델과 구조모델을 필요로 한다. 그러나 복합재 블레이드의 복잡한 3차원 유한요소모델을 사용하게 되면, 해석의 어려움과 함께 많은 계산시간이 요구된다. 따라서 복합재 블레이드의 간단한 구조모델의 사용이 요구된다.

본 연구에서는 복합재 풍력발전기 로터 블레이드의 공력탄성학적 해석을 위한 구조모델 수립을 위해 등가모델링 기법[1]을 제시하고, 이를 3차원 유한요소모델의 모드 해석 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

II. 복합재 로터 블레이드의 유한요소모델

2.1 복합재 블레이드의 유한요소 모델

본 연구에서는 블레이드의 등가구조모델을 수립하기 위해 100kW급 복합재 풍력발전기 로터 블레이드를 사용하였다[3]. Fig. 2는 100kW급 풍력발전기 로터 블레이드의 개략적인 형상을 보여준다. 복합재 블레이드는 길이방향으로 축과 연결되는 원통모양의 날개뿌리 부분(root), 뿌리 부분을 날개부와 잇는 연결부(junction), 그리고 날개부분(blade)으로 구성되어 있으며, 각각을 Region Ⅰ~Ⅲ로 구분하였다. 그리고 날개 뿌리부터 날개끝단까지 스파(spar)가 들어있다. RegionⅢ의 블레이드 부분은 NACA 에어포일로 이루어져있으며, 사용된 에어포일은 날개 끝단으로부터 NACA4412에서 NACA4424까지의 연속적으로 변하는 단면 형상을 지닌다.

Fig. 3에서와 같이 각 단면에서의 비틀림각과 시위길이에 대한 형상정보와 ABAQUS를 이용하여 복합재 블레이드의 유한요소 모델링을 수행하였다.

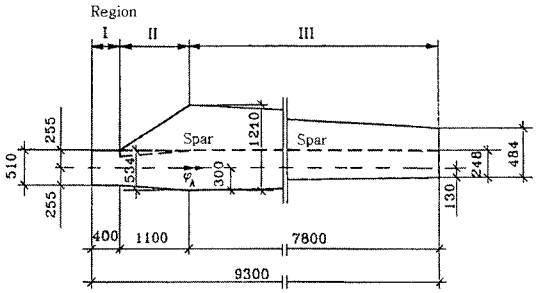
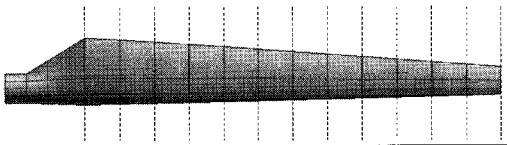


Fig. 2 100kW급 풍력발전기 블레이드 형상



NACA thickness(%)	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12
blade twist(°)	15.60	13.40	11.34	9.46	7.68	6.00	4.60	3.47	2.53	1.86	1.26	0.65	0.00
chord length(mm)	1210	1149.5	1089	1028.5	968	907.5	847	786.5	726	665.5	605	544.5	484

Fig. 3 복합재 블레이드의 단면 형상 정보

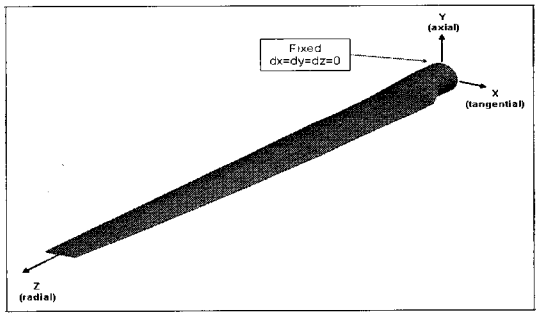


Fig. 4 3차원 유한요소 모델

Fig. 3의 복합재 블레이드 형상 정보와 복합재료 물성치[3]를 이용하여 유한요소모델을 구성하였다. Fig. 4는 복합재 블레이드의 유한요소 모델을 보여준다. 총 760개의 노드(node)와 750개의 요소(element)로 구성되었으며, 2D Shell 요소를 사용하였다. 그리고 블레이드 뿌리 부분에서의 세 방향의 변위를 고정하는 경계조건을 주었다.

2.2 복합재 블레이드의 모드 해석

본 절에서는 Fig. 4의 복합재 블레이드의 유한요소모델을 이용하여 블레이드의 자유진동해석을 수행하였다. Solver로는 상용프로그램인 MSC/

Table 1. 3차원 유한요소모델의 모드해석

모드번호	고유주파수(Hz)	비고
1	2.50	1st FB*
2	6.53	1st LB**
3	12.13	2nd FB
4	28.04	·
5	30.12	·

* FB; flawise bending
**LB; lead-lag bending

ABAQUS를 사용하였으며, post processor로는 MSC/PATRAN을 사용하였다.

자유진동해석으로부터 5차 모드까지의 자유 진동수와 변형 형상을 파악하였다. Table 1은 복합재 블레이드의 고유주파수를 보여준다. 첫 번째 모드형상은 1차의 플랩방향 굽힘(flapwise bending)모양이고, 두 번째 모드형상은 1차의 리드래그 굽힘, 세 번째 모드형상은 2차의 플랩방향 굽힘 모양이다. 네 번째와 다섯 번째 모드형상은 플랩방향과 리드래그 모드가 섞인 모드형상을 가진다. Fig. 5-Fig. 7은 각 모드의 고유모드형상을 보여준다.

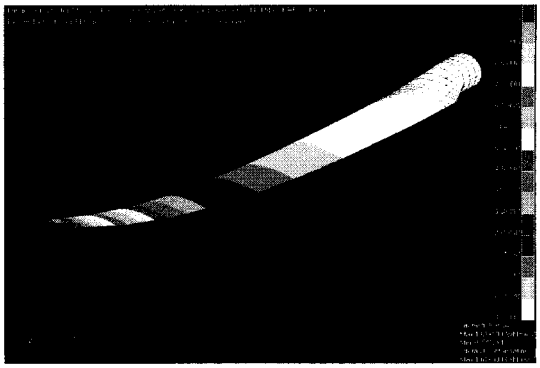


Fig. 5 1차 고유모드형상(FB)

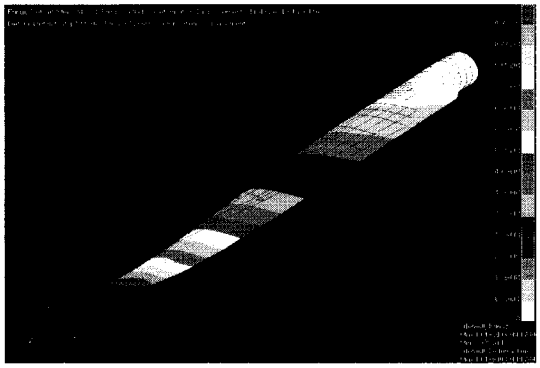


Fig. 6 2차 고유모드 형상(LB)

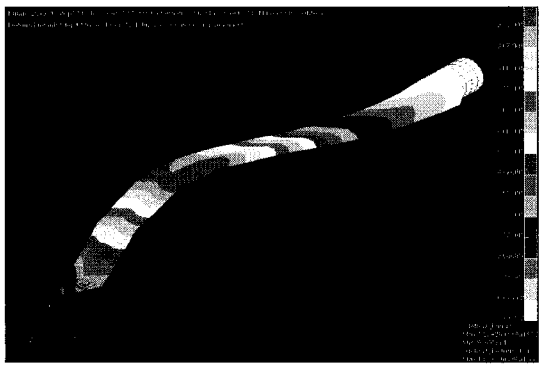


Fig. 7 3차 고유모드 형상(2nd LB)

III. 복합재 블레이드의 등가 빔 모델

3.1 등가 빔 구조모델 수립

등가 모델링은 실제 3차원 블레이드의 거시적인 진동특성을 효율적으로 모사하는 방법으로, 변형 시 탄성 축에 수직인 단면에서는 굽힘이 일어나지 않는다는 가정 하에서 적용이 가능하다. 변형 후에 에어포일 형상 그 자체에는 변형이 없다고 가정하므로, 가로세로비 (Aspect Ratio)가 매우 큰 날개에만 적용이 가능하다. 등가빔 모델링 기법은 3차원 날개의 유한요소 모델을 사용한 공탄성해석의 복잡성과 계산시간 증가의 단점을 줄이고, 3차원 로터 블레이드의 물리적이고 거시적인 특성을 좀 더 단순하고 효과적으로 묘사 할 수 있다는 점에서 매우 큰 장점을 가진다. 요즘 점차적으로 대형화, 경량화 되고 있는 풍력발전기 로터 블레이드는 상대적으로 가로세로비가 매우 크기 때문에, 리드래그 방향의 모드까지 같이 고려를 해 주어야만 한다. 이런 풍력발전기 로터 블레이드의 거시적인 특성을 이해하고, 원활한 구조해석 및 공탄성 해석을 수행하기 위해서 복합재 블레이드의 등가 빔 모델(equivalent beam model)을 수립하였다.

등가 빔 모델링 기법은 자체에 질량을 가지는 보 모델, 질량이 없는 보에 질량관성 모멘트를 가진 집중질량을 탄성축에 주는 모델, 그리고 각 질량 중심에 집중질량을 탄성축과 강체보로 연결하는 모델이 있다. 앞서 언급한 세 가지 방법 중 보 자체에 질량을 부여하는 첫 번째 방법은 실제

로터 블레이드 구조물의 경우, 매우 복잡한 내부 구조 및 기하학적 형상을 가지고 있으므로 그다지 현실적이지 못하다. 참고문헌[1]은 질량이 없는 보에 질량관성 모멘트를 가진 집중질량을 탄성축에 부여하는 모델과, 각 질량중심에 집중질량을 탄성축과 강체보로 연결하는 방법이 3차원 로터 블레이드의 고유진동수 결과와 거의 일치함을 확인하였으며, 특히 질량이 없는 보에 질량관성 모멘트를 가진 집중질량을 주는 모델링 기법이 더욱 효과적임을 보였다.

본 연구에서는 3차원의 복합재 로터 블레이드의 유한요소 모델과 등가 빔 모델에 임의의 동일한 굽힘 모멘트와 비틀림 모멘트를 가하여, 각각의 하중 상황에 대하여 동일한 변형이 일어나도록 등가 강성을 계산하였다. 참고문헌[1]에서 제안한 방법으로 각각의 등가강성을 다음과 같은 가정 하에 계산하였다.

비틀림 상수를 구하는 방법으로 날개 끝단에 z 방향으로의 회전모멘트를 주어 길이방향으로의 비틀림을 가한다. 그리고 각 부분에서 변형량을 계산하게 된다. 날개의 끝단에 회전 모멘트 T를 가했을 때, i번째 단면과 $i-1$번째 단면사이의 비틀림 증가분을 이용하여 고전 역학적으로 비틀림 상수 GJ값을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\phi_z^i = \phi_z^i - \phi_z^{i-1} = \frac{TL^i}{GJ} \qquad (1)$$

$$GJ^i = \frac{TL^i}{\phi_z^i - \phi_z^{i-1}} \qquad (2)$$

굽힘 강성(I_x)을 구하는 방법은 날개 끝단에 x 방향으로의 모멘트를 주어, 수직 아랫방향으로의 처짐을 가하고, 각 부분에서의 변형량을 계산하여 길이방향으로 나눈 10부분의 EI_x^i 값을 얻는다. 굽힘 강성 I_x을 구하기 위해 날개 끝단에 가한 굽힘 모멘트 M_x을 가하면, $i-1$번째 단면과 i번째 단면 사이의 변형은 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\delta_y^i = \delta_y^{i-1} + \phi_x^{i-1} \cdot L^i + \frac{M_x (L_i)^2}{2EI^i} \qquad (3)$$

$$\phi_x^i = \phi_x^{i-1} + \frac{M_x L^i}{2EI^i} \qquad (4)$$

$$EI_x^i = \frac{M_x (L^i)^2}{2(\delta_y^i - \delta_y^{i-1} - \phi_x^{i-1} \cdot L^i)} \qquad (5)$$

굽힘 강성(I_y)을 구하는 방법은 y방향으로의 모멘트를 주어, 수평방향으로의 굽힘을 가하고 각 부분에서의 EI_y^i 값을 각각 계산한다.

$$EI_y^i = \frac{M_y (L^i)^2}{2(\delta_x^i - \delta_x^{i-1} - \phi_y^{i-1} \cdot L^i)} \qquad (6)$$

날개의 축 방향으로 인장 강성 및 유효 단면적을 구하기 위해서 날개 끝단에 z축 방향의 인장하중을 가한다. 그리고 각각의 단면에서 z방향의 변형량 δ_z^i을 구하여 다음과 같이 계산한다.

$$EA^i = \frac{PL^i}{\delta_z^i} \qquad (7)$$

등가 질량을 구하기 위해서 Fig. 8과 같이 10개의 부분으로 나누고, 그 각각의 질량을 구하였으며 그 질량 정보를 Table 2. 에 나타내었다.

등가빔 모델링 기법과 3차원 로터 블레이드의 유한요소 모델로부터 얻어진 각 단면의 형상정보와 물성치를 바탕으로 Fig. 9와 같은 등가 빔 구조 모델을 구성하였다. 본 연구의 대상인 100kW급

Table 2. 등가질량계산

Part	질량 (kg)
1	38.55
2	29.64
3	22.25
4	15.80
5	14.73
6	28.99
7	45.46
8	34.88
9	25.70
10	15.46
point mass 1	86.5
point mass 2	52.0
Total	409.95

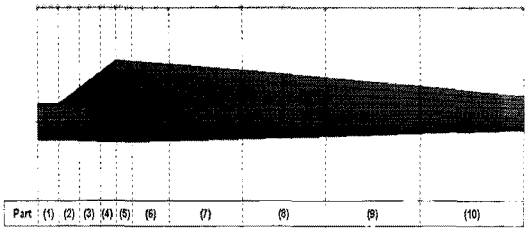


Fig. 8 등가 보 모델의 구성

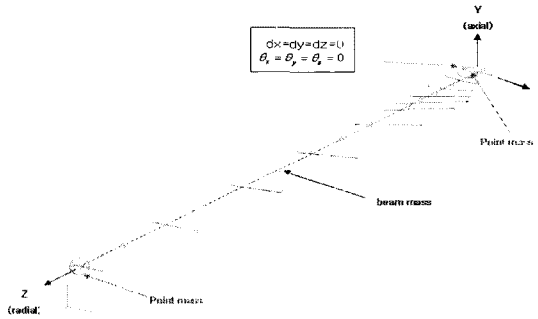


Fig. 9 등가 구조 모델

풍력발전기 로터 블레이드의 기본 형상은 날개에 후퇴각이 존재하지 않으므로 탄성축을 따라 등가 빔 형태로 모델링 하였으며, 탄성축은 시위의 공력중심점을 잇는 선으로 설정하였다.

Fig. 8에서 로터 블레이드의 요소를 10개 부분으로 나눈 것과 같이 전체 길이를 10개 부분으로 나누고 Table 2 에서 구한 각 요소의 등가 질량을 해당 부분의 가운데 절점에 집중질량의 형태로 부과하였다. 그리고 등가 빔 구조는 기본적으로 비틀림 모드를 관찰하기가 어려우므로, 비틀림 모드 형상을 가시화하기 위해 각 단면에서 시위의 앞전에서 뒷전까지 연결한 질량 없는 강체바(rigid bar)요소를 설정하였다.

3.2 등가 구조 모델의 모드 해석 결과

구성된 등가 보 모델에 대해 모드 해석을 수행하여 5차 모드까지의 자유 진동수와 변형 형상을 파악하였다. Table 3은 본 연구에서 수립된 풍력발전기 블레이드의 등가 구조 모델을 이용하여 계산된 자유 진동수 결과를 보여준다. 등가 구조 모델의 고유진동수가 Table 1의 3D 복합재 블레이드의 유한요소모델의 고유진동수와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 10~Fig. 14는 고유진동수에 대한 고유 모드 형상을 보여준다. 1차 모드는 플랩 굽힘 형상이며, 2차모드는 리드래그방향의 굽힘형상임을 알 수 있으며, 3D 유한요소모델의 고

Table 3. 등가구조 모델의 해석결과

mode	Full 3D model(Hz)	Equiv. 1D model(Hz)	Err(%)
1	2.50	2.565	2.6
2	6.53	6.176	5.42
3	12.13	12.353	1.83
4	28.04	28.88	2.99
5	30.12	30.388	0.89

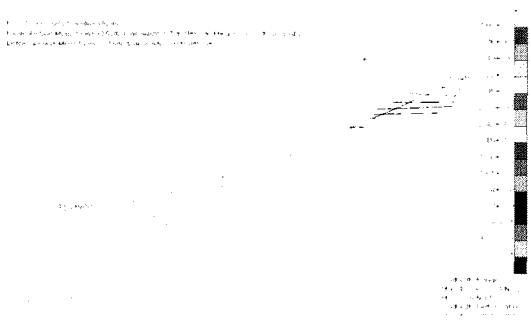


Fig. 10 고유진동 해석 (mode-1, 2.565 Hz)

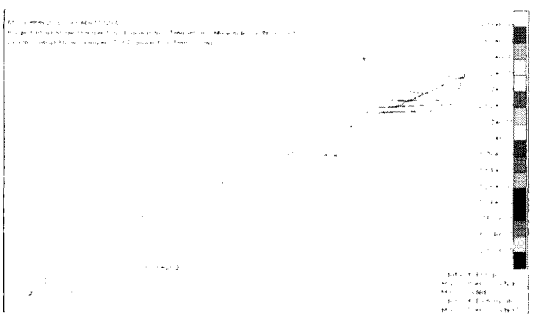


Fig. 11 고유진동 해석 (mdoe-2, 6.176 Hz)

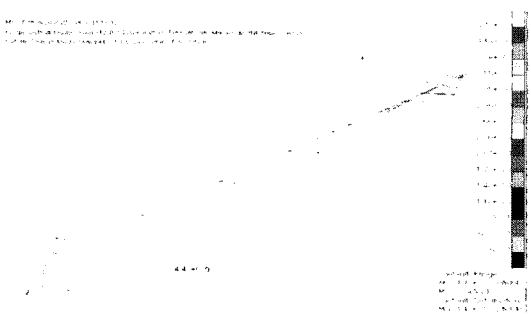


Fig. 12 고유진동 해석 (mode-3, 12.353 Hz)

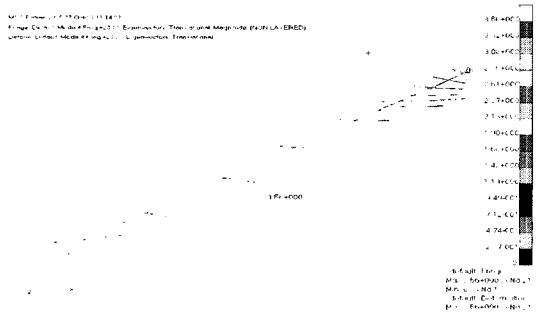


Fig. 13 고유진동 해석 (mode-4, 28.88 Hz)

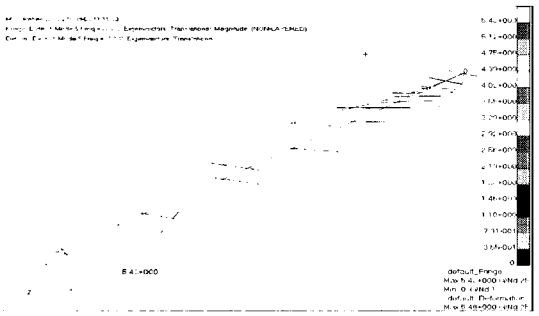


Fig. 14 고유진동 해석 (mode-5, 30.388 Hz)

유 모드형상과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 수립된 블레이드의 등가 구조모델은 복합재 블레이드의 3D 유한요소모델의 진동특성을 잘 표현한다고 할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 100kW급 풍력발전기 로터 블레이드의 진동 특성 및 공력탄성학적 해석의 효과적이고 빠른 계산 수행을 위해 등가 구조 모델링 기법을 제안하고, 복합재 블레이드의 등가 보 모델을 수립하였다.

복합재 블레이드의 유한요소 모델링으로부터 얻은 각 단면의 형상정보와 물성치 토대로 블레이드의 등가 빔 구조를 구성하였다. 등가 빔 구조를 10개 부분으로 나누고, 각 요소의 해당 등가질량을 가운데 절점의 집중질량의 형태로 부과하여, 자유진동해석을 수행하였다. 등가 빔 모델의 결과를 3D 풍력발전기 로터 블레이드의 자유진동해석과 비교하여, 복합재 블레이드의 등가 빔 모델의 타당성을 확인하였다.

본 연구의 풍력발전기 로터 블레이드의 등가 구조 모델링 기법은 블레이드의 공탄성 해석 시, 3차원 모델을 사용하였을 경우에 비교하여 계산 시간 및 해석의 복잡성을 줄일 수 있으며, 로터 블레이드의 세부 설계 변경이 이루어 질 경우, 등가 빔 모델에서 각 설계 변경된 부분을 등가질량으로 변환하여 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비지원으로 수행되었으며, 본 연구의 수행에 있어서 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 김동현, 한지훈, 이인, 김승호, "등가 구조모델을 이용한 항공기 날개의 천음속 플러터해석," 한국항공우주학회지, 27권 1호,1999,pp.20-30.

[2] 배재성, 황재혁, 김석우, 장문석, "풍력발전기 블레인의 공력탄성학적 특성," 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 대전, 2006년 11월 3일, pp. 151-156.

[3] 배재성 외, "풍력발전기 블레이드의 구조해석 및 공탄성 안정성 해석기법 연구," 위탁연구과제 보고서, 2006-06-002, 한국에너지기술연구원, 대전, 2006.