

대형 풍력발전용 복합재료 블레이드의 개선된 등가 모델링 기법

김동현* · 박효근** · 김동만**

Improved Equivalent Beam Element Modeling Technique for Large Scale Wind-Turbine Composite Blade

Dong-Hyun Kim*, Hyo-Geun Park**, Dong-Man Kim**

Key Words : *Equivalent Beam Element* (등가 보 요소), *Wind-turbine Composite Blade* (풍력발전용 복합재료 블레이드), *Modal Analysis* (모드해석)

ABSTRACT

In this study, we have introduced an improved equivalent modeling technique for large scale composite wind-turbine blade. Conventional or general equivalent modeling procedure may give critical error in the analysis results because of geometric coupling effects. For the analyses of structural vibration and aeroelastic problems, the accuracy of equivalent structural models is very important since it can have high numerical efficiency and various practical applications. Three-dimensional realistic composite wind-turbine blade model is practically considered for numerical study. In order to validate the effect of the mass and the stiffness of the equivalent beam model, comparison study based on the natural vibration analysis has been conducted, and the accuracy levels of the conventional and modified equivalent modeling techniques are presented.

1. 서론

풍력발전 시스템은 주로 유럽을 중심으로 발전해 왔으며, 무한한 무공해 자원으로서 전 세계적으로 그 활용량이 크게 증가하고 있다. 특히 점차 고갈되어가는 석유자원에 대한 유력한 대체 에너지원으로써 현재는 한국을 포함한 아시아권에서도 MW급 풍력발전 시스템의 설치가 활발히 추진되고 있다. Fig. 1은 2003년도에 조사 및 예측된 자료로서 풍력발전기 설비가 기하급수적으로 늘어날 것으로 예상되고 있다. 풍력발전

기는 대기 중 바람에 의한 운동에너지를 이용하여 로터 블레이드를 회전시킨 후 이를 기계적 에너지로 변환시키고, 다시 기계적 에너지는 발전기를 통해 전기적 에너지로 변환되게 된다. 따라서 로터 블레이드는 풍력발전기 설계에 있어 핵심적인 부분이 되며, 블레이드의 크기나 무게는 대형화 설계에 있어 제약을 가하게 된다. 최근에는 발전기의 대형화 및 경량화 요구로 인해 풍력발전기의 블레이드는 복합재료로 설계 및 제작되는 경우가 대부분이다.

일반적으로 고성능 풍력 발전기 블레이드를 설계하기 위해서는 반복적인 재설계 과정을 거쳐야 하므로 효율적이면서도 정확도가 높은 해석기법의 구축이 요구된다. 구조 부분에서는 특히 등가 블레이드 모델의 활용도가 매우 높은 실정이다. 국내에서도 다양한 용

* 국립경상대학교 기계항공공학부 교수 (교신저자)

** 국립경상대학교 기계항공공학부 대학원생

E-mail : dhk@gnu.ac.kr

량의 풍력발전용 로터 블레이드를 설계 및 제작한 경험이 있으며, 관례적인 방법으로 등가 모델링을 수행하여 왔다. 하지만, 다수의 연구원들이 구축한 등가모델의 검증과정에서 어느 정도의 오차를 경험하였을 것이다. 이러한 오차는 대형 블레이드와 같이 블레이드의 구조가 복잡하고 복합재료의 적층에 따른 연성효과가 큰 경우 고차 모드에서 심화될 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 저자들의 다양한 해석경험에 근거하여 기존 등가 모델링 기법^[1]의 오차를 더욱 최소화 할 수 있는 해석절차를 제시하고자 한다. 이를 위해 매우 실제적인 3MW급 복합재 블레이드를 해석 모델로 선정하였다. 구체적인 모델링 및 해석절차와 함께, 3차원 유한요소모델과 등가모델의 고유진동 특성을 비교하여 등가모델링 기법에 따른 정확도를 객관적으로 제시하였다.

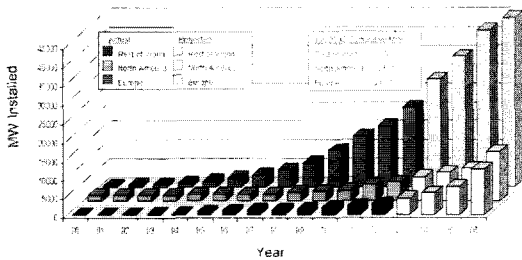


Fig. 1 Growth of wind energy capacity worldwide (Reproduced from Windpower Monthly)

2. 등가모델링 기법

실제적인 3차원 유한요소 블레이드 모델을 다양한 해석과정에 모두 적용하는 것은 방대한 계산시간을 요구하게 비효율적이다. 또한 풍력발전기 설계에 많이 활용하고 있는 Bladed 프로그램^[3]의 경우도 등가 블레이드 모델을 적용하고 있는데, 해석과정에서 등가질량 및 강성 분포 물성치 입력을 요구하고 있다. 적절한 등가 모델링 기법을 활용하면 상대적으로 매우 적은 자유도로 실제 3차원 유한요소 모델과 거의 동일한 구조변위 및 진동해석 결과를 얻을 수 있기 때문에 매우 효율적인 해석을 수행할 수 있으며, 구조설계 변수 변화에 유연한 대처가 가능하다.

전형적인 등가 보 모델링 기법은 탄성축 상에 질량을 무시한 탄성 보 요소를 사용한 등가강성 모델링 과정과 집중질량 요소를 사용하여 관성 특성을 모델링하

는 등가질량 모델링 과정으로 구성되며, 등가 보 모델의 개념도는 Fig. 2에 제시하였다. 보다 세부적인 내용과 등가모델링 검증결과에 대해서는 Ref. 1을 참고하기 바란다.

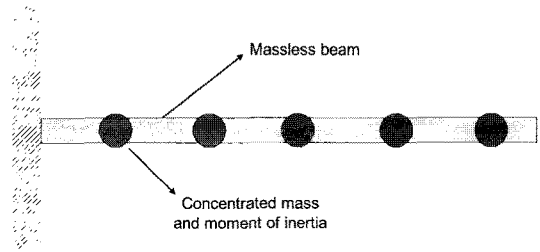


Fig. 2 Equivalent beam modeling concept

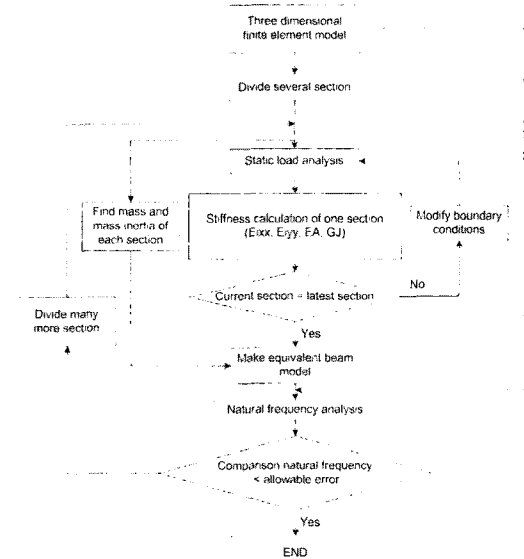


Fig. 3 Computational road map for the present equivalent beam modeling technique

Fig. 3에는 본 연구에서 적용한 등가모델링 기법의 해석 흐름도를 나타내었다. 이전의 기법들은 대부분 구조물의 끝단에만 하중을 가해 각 섹션의 등가 강성을 결정하였으나, 이런 경우는 경우에 따라 오차가 매우 증가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 원래 모델을 여러 개의 구간으로 나누고, 임의의 구간에서 각각에 대해 구속조건 및 하중조건을 부가하여 등가 강성을 구하는 방법을 적용하였다. 이전의 방법은 등가모델링 과정에 블레이드의 루트에서부터 끝단까지 일방

적으로 선형특성을 가정하고 있으나, 본 논문의 방법은 나누어진 각 구간 내에서만 선형특성을 가정하는 방식이다. 후자의 방법으로 하면 등가모델에도 shear, warping 및 flap-twist coupling 등과 관련된 기하학적 비선형 특성을 보다 충실하게 고려할 수 있게 된다.

등가 빔 요소 모델을 생성하기 위해서는 먼저 등가 모델링을 위해 설정한 각 구간에서의 질량, 질량 관성 모멘트와 강성 분포를 결정해야 한다. 구조 강성 요소에는 비틀림 강성, 플랩(수직) 및 리드-레그(수평) 방향 굽힘강성과 축 방향 강성으로 구성된다. 또한 임의의 i -번째 구간에서의 등가강성은 구조역학 및 유한요소 해석을 병용하여 용이하게 결정할 수 있다.

우선 비틀림 강성은 구간이 시작되는 지점에 모든 자유도를 구속시키고 끝나는 지점에 길이 방향으로 회전 모멘트를 부여하여 구한다. 구간이 끝나는 지점에 회전 모멘트 T 를 가했을 때 i -번째 단면에서의 비틀림 강성은 다음과 같은 관계를 가진다.

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

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

식 (2)에서 구간이 시작하는 부분은 모든 자유도를 구속하였으므로 ϕ_z^{i-1} 는 0이 된다.

$$GJ^i = \frac{TL^i}{\phi_z^i} \quad (3)$$

플랩 방향 굽힘강성은 구간이 시작되는 지점에 모든 자유도를 구속시키고 구간의 끝 지점에 플랩 방향으로 굽힘 모멘트(M_x)를 부여하여 구할 수 있다. 구간이 끝나는 지점에 굽힘 모멘트 M_x 를 가했을 때 임의의 i -구간에서 플랩 방향 굽힘강성을 구하는 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_y^i = \delta_y^{i-1} + \phi_x^{i-1} \cdot L^i + \frac{M_x(L_i)^2}{2EI} \quad (4)$$

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

마찬가지로 식 (5)에서 구간이 시작하는 부분은 모든

자유도를 구속하였으므로 ϕ_x^{i-1} 는 0이 된다. 따라서 식 (6)은 다음과 같이 보다 간단히 나타낼 수 있다.

$$EI_x^i = \frac{M_x(L_i)^2}{2\delta_y^i} \quad (7)$$

리드-레그 방향 굽힘강성도 플랩 방향 굽힘강성의 경우와 유사하게 구할 수 있으며, 관련 식은 아래와 같다.

$$EI_y^i = \frac{M_y(L_i)^2}{2\delta_x^i} \quad (8)$$

블레이드 축 방향으로의 등가강성을 구하기 위해 구간의 끝단에 길이 방향의 인장 하중을 가하고 정하중 해석을 수행한다. 단면에서 길이방향의 변형량을 구하여 아래의 식을 통해 인장 강성을 구할 수 있다.

$$EA^i = \frac{PL^i}{\delta_z^i} \quad (9)$$

Table 1 Equivalent mass data for divided sections

Section	Mass(kg)
1	1,162.2
2	1,234.8
3	1,416.2
4	869.8
5	737.7
6	677.1
7	621.3
8	590.9
9	569.2
10	475.1
11	391.4
12	204.8
13	210.4
14	145.3
15	61.0
16	50.8
Total	9,418

등가 질량은 등가강성 결정을 위해 나누어진 구간에 대해 각각 계산하면 된다. 참고로 본 연구에서 고려한 3MW급 복합재료 블레이드에 대한 각 구간별

등가질량 정보를 Table 1에 나타내어 보았다. 또한 질량과 함께 질량 관성모멘트도 부여되어야 하며 등가 요소 모델의 고유진동 해석 결과가 3차원 요소 모델의 고유진동 해석 결과와 오차가 크게 나타난다면 구간을 더욱 세분화하여 나누고 등가 모델을 재구성할 필요성이 있다.

3. 해석결과 및 검토

본 연구에서는 제안한 등가모델링 기법의 정확도를 보이기 위해 실제적인 3MW급 복합재 블레이드 모델을 대상 모델로 정하였다. 3차원 유한요소 모델 및 등가 유한요소 모델의 구축 및 해석은 유럽에서 개발된 범용 상용 유한요소프로그램인 SAMCEF (Ver.6.1)를 활용하였다. 이는 유럽지역에서 풍력발전기 모델링 및 해석에 활발히 적용되고 있는 프로그램이다. 등가 모델은 3차원 모델에서 구해진 탄성축을 따라 등가 빔 형태로 모델링 하였다.

본 연구에서 고려한 풍력발전기용 블레이드 모델은 3MW급으로 총 길이가 약 40m, 전체 무게는 9.4ton이다. 블레이드는 부분적으로 2~3개의 스파가 보강되어 있으며, 스펀 방향으로 적층판의 구성 및 두께가 변화하는 형태이다. 참고로 블레이드 뿌리부분에서의 최대 구조 두께가 약 9cm에 달하는 부분도 있다. Fig. 4는 고려된 블레이드의 3차원 유한요소 모델을 보여주고 있다. 참고로 본 모델은 사각형 요소로 구성되어 있으며 전체 요소 수는 9,245 개이고, 노드 수는 8,900 개 정도 이다.

등가 모델링 기법에 대한 해석의 정확도를 보이기 위해 서로 다른 기법에 대한 해석결과를 제시 및 비교하여 보았다. Case #1은 Refs.1-2에서와 유사하게 블레이드

이트 루트에 모든 자유도를 구속하고 끝단에만 하중을 가하여 각 구간의 등가강성을 계산한 것이다. Case #2는 본 연구에서 개선하여 제시한 기법을 따른 것이며, Case #3은 동일한 방법으로 등가모델링을 위한 구간을 보다 세밀하게 나누어 적용한 경우이다.

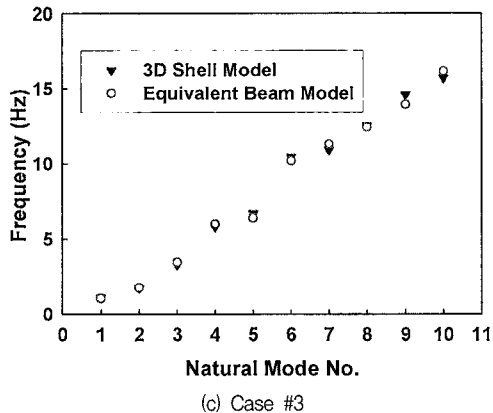
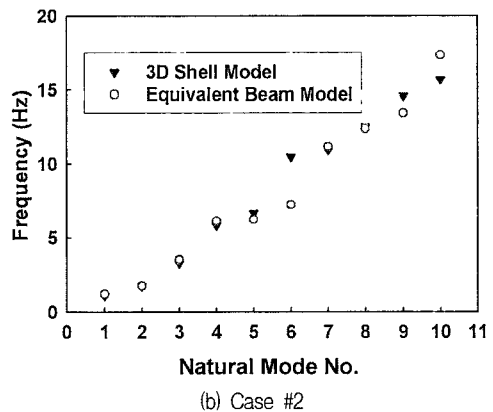
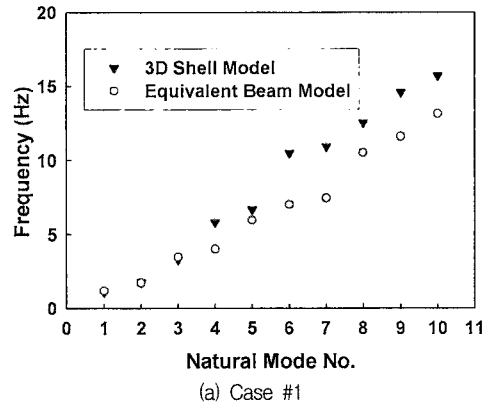


Fig. 5 Comparison of calculated natural frequencies between the 3D FE model and the equivalent beam model

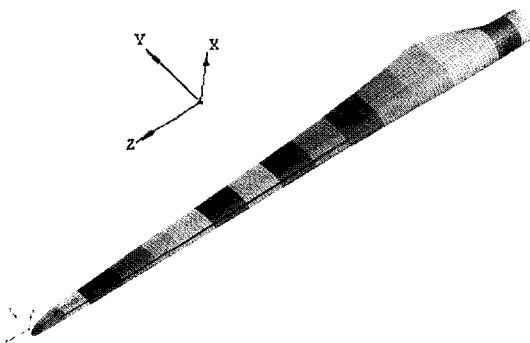


Fig. 4 Three dimensional finite element

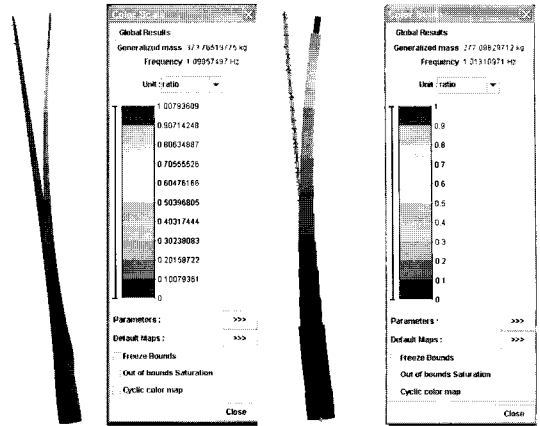
Fig. 5는 각 모델링 경우에 대해 원래 3차원 모델에 대한 고유진동해석 결과와 비교한 그래프이다. 그림을 보면 Case#1과 2의 경우 첫 번째, 두 번째, 세 번째 고유진동수는 잘 일치하는 것으로 보이나 고차 모드라면 Case#1의 경우는 상당한 오차를 보이며, Case#2의 경우는 보다 잘 일치하나 특정 모드에서 큰 오차를 나타낼 수 있음을 볼 수 있다. 하지만, Case#3의 경우는 본 논문에서 제안한 방법을 충분히 많은 구간을 나누어 적용한 경우로 등가모델의 정확도가 매우 향상되어 고차모드까지 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. Table 2에는 각 경우에 대한 고유진동해석 결과를 나타내었는데, Case#3의 경우는 1차에서 10차까지의 고유진동수 비교결과가 5% 이내로 정확함을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 Case#1과 같은 기존방식은 대형 복합재 블레이드 구조와 같이 적층각 및 기하학적 연성효과에 민감할 수 있는 3차 이상의 고차모드에서는 등가모델의 해석결과에 큰 오차가 유발될 수 있음에 유의하여야 한다. 또한 어떤 방식으로 등가모델링을 수행하던지 간에 원래 모델과 해석결과를 비교하여 등가모델에 대한 검증은 반드시 수행하여야 할 것이다.

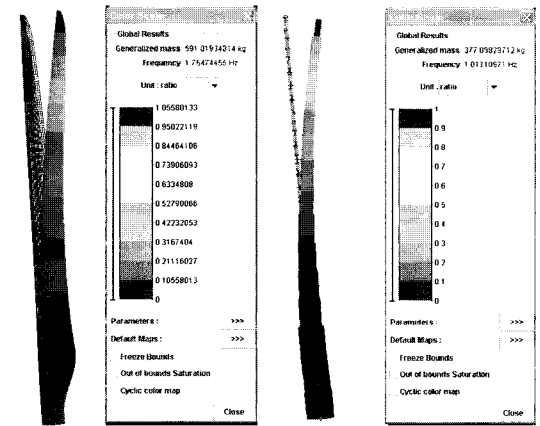
Table 2 Natural frequency and error of each case

Mode No.	3D (Hz)	Case #1 (Hz)	Error #1 (%)	Case #2 (Hz)	Error #2 (%)	Case #3 (Hz)	Error #3 (%)
1	1.10	1.18	7.28	1.18	7.27	1.05	4.54
2	1.76	1.73	1.71	1.77	0.57	1.77	0.57
3	3.30	3.46	4.85	3.53	6.97	3.47	5.15
4	5.82	4.02	30.93	6.12	5.15	6.01	3.30
5	6.69	5.98	10.61	6.22	7.03	6.42	4.17
6	10.48	7.01	33.11	7.22	31.1	10.22	2.48
7	10.95	7.45	31.96	11.17	2.01	11.33	3.47
8	12.54	10.52	16.11	12.37	1.36	12.44	0.79
9	14.59	11.62	20.36	13.43	7.95	13.96	4.32
10	15.73	13.15	16.40	17.35	10.3	16.17	2.79

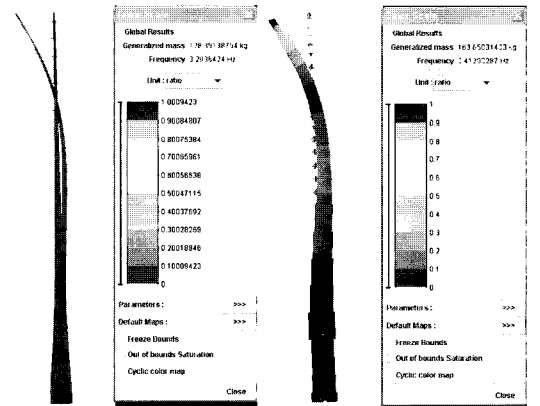
Fig. 7에서는 3차원 모델과 등가모델의 고유모드 형상을 비교해 보았다. 1차부터 3차까지의 고유모드를 제시하였으며, 등가모델의 고유모드 결과는 Case#3의 경우를 제시한 것이다. 여기서 1차는 플랩방향 굽힘모드이고, 2차는 리드래그 방향 굽힘모드를, 3차는 플랩방향으로의 2차 굽힘모드를 전형적으로 나타내고 있다. 그림에 제시하지는 않았지만 4차 고유모드는 리드래그 방향으로 2차굽힘 모드를 나타내었다.



(a) Mode 1 (3D vs. Equivalent)



(b) Mode 2 (3D vs. Equivalent)



(c) Mode 3 (3D vs. Equivalent)

Fig. 6 Comparison of natural vibration mode shapes.

4. 결론

본 연구에서는 대형 풍력발전용 복합재 블레이드의 정확한 등가모델링을 위한 개선된 기법을 제안하였다. 실제 3MW급 대형 복합재 블레이드를 해석모델로 고려하였으며, 몇 가지 모델링 기법에 대해 3차원 유한요소 모델과 등가 모델에 대한 고유진동해석 결과를 비교하여 등가모델의 정확도를 검증하였다. 본 연구에서 제안한 개선된 등가 모델링 기법은 실제 3차원 모델의 구조진동 특성을 매우 정확하게 묘사할 수 있음을 확인하였으며, 향후 풍력발전기의 설계 및 해석과정에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 김동현, 한지훈, 이인, 김승호, 1999, "등가 구조모델을 이용한 항공기 날개의 천음속 플러터 해석," 한국항공우주학회지, 27권 1호, pp. 20~30.
- (2) 박영근, 배재성, 황재혁, 김석우, 장문석, 2006, "풍력발전기 로터 블레이드의 등가 구조모델 수립," 한국항공우주학회지, 14권 4호, pp. 11~16.
- (3) GH Bladed : Wind Turbine Design Software, User Manual