풍력 발전기 블레이드의 동특성 해석 프로그램 개발

Development of Dynamic Analysis Program for Wind Turbine Blade

서 영 수* • 박 일 주** • 정 성 남*** • 신 의 섭****

Seo, Young-Su • Park, Il-Ju • Jung, Sung Nam • Shin, Eui-Sup

요 약

본 논문에서는 풍력 발전기에 사용되는 블레이드의 동특성을 해석하기 위한 프로그램을 개발하였다. 복잡한 형상의 풍력 발전기 블레이드의 모델을 단순화시키기 위하여 보 이론을 이용하였다. 블레이드의 회전 운동은 Hamilton 원리를 유한요소 보 모델을 이용하여 정식화를 수행하였다. 회전 속도에 따라 블레이드에 적용되는 원심력과 검증된 단면 물성치를 이용하여 복합재료 블레이드의 고유치 해석을 수행하였다. 기존의 상용 소프트웨어의 해석 결과와 비교를 통하여 검증 연구를 수행하였으며, 이를 토대로 본 해석 프로그램의 타당성을 보였다.

keywords : 풍력 발전기 블레이드, 동특성 해석, 복합재료, 보 요소

1. 서 론

풍력 발전은 태양광 발전과 더불어 대체에너지의 큰 축을 이루고 있는 대체에너지 시스템이다. 풍력 발전 시스템은 주로 유럽을 중심으로 지속적인 기술 개발이 이루어져 왔지만 고갈되어가는 석유 자원에 대한 대체 에너지원으로써 현재는 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 다른 신·재생에너지원에 비해 경제성이 탁월하기 때문에 풍력 발전기의 개발 및 보급이 증가하고 있다. 풍력 발전용 블레이드는 운전 중 원심력과 바람의 항력 등에 의해 지속적인 정하중을 받게 되며, 풍속의 변화와 요잉 등의 영향에 따라 진동이 발생하게 된다. 이 진동은 블레이드의 고유진동수에 따라 진폭이 감쇄되거나 증폭되게 된다. 따라서 블레이드가 구조적 안정성을 가지기 위해서는 정하중 특성뿐만 아니라 동특성을 고려해야 한다. 이에 따라 풍력 발전기에 적용되는 정하중 특성과 동특성에 관하여 다양한 연구들이 수행되었다(Rachid *etal.*, 2001). 그렇지만 풍력 발전기 블레이드는 형상이 매우 복잡하고 복합재료의 사용으로 인해 해석을 수행하는 데 많은 어려움을 가지고 있으며, 해석 결과의 오차가 만족스럽지 못하기 때문에 이를 만족할 수 있는 프로그램 개발이 필요하다.

본 논문에서는 풍력 발전기에 사용되는 블레이드의 동특성을 해석하기 위한 프로그램 개발에 대한 연구로서 검증된 단면 물성치를 이용하여 해석을 수행하였다. 기존의 유한요소 상용 소프트웨어인 MD Nastran의 해석 결과와 비교를 통하여 검증 연구를 수행하였으며 복합재료의 적층각도와 회전 속도에 따른 고유진동수를 나타내었다.

* 전북대학교 항공우주공학과 석사과정 zerowater@jbnu.ac.kr
** 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 박사과정 ijpark@konkuk.ac.kr
*** 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 교수 snjung@konkuk.ac.kr
**** 정회원 • 전북대학교 항공우주공학과 부교수 esshin@jbnu.ac.kr

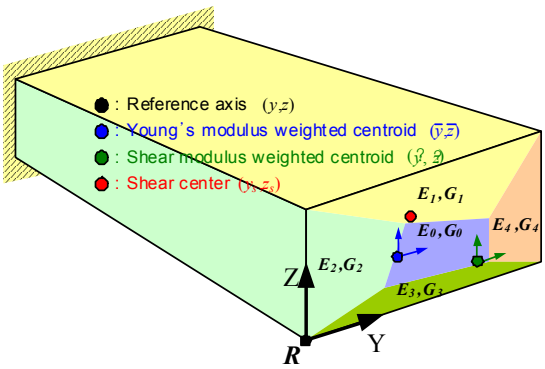

그림 1 Modeling of inhomogeneous cross sections

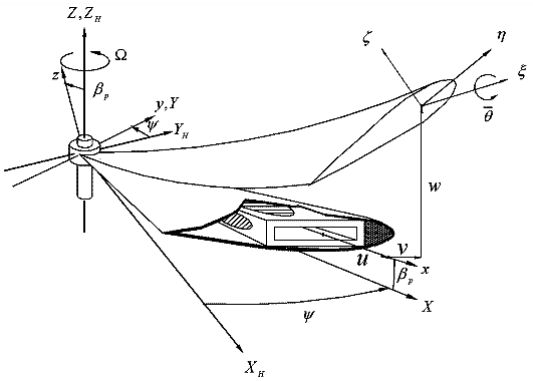

그림 2 Blade coordinate systems and deflections

2. 이 론

2.1 보 이론

그림 1에서는 복합재료 단면의 좌표축과 가중 계수 중심, 전단 중심을 나타내고 있다. 축 방향 강성치는 탄성계수와 단면의 면적을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$EA = E_0 \iint_A d\bar{A} = E_0 A \tag{1}$$

굽힘 강성치와 비틀림 강성치는 가중 계수 중심(weighted-modulus centroid)을 기준으로 계산된 값으로서, 탄성 계수가 고려된 1차 관성 모멘트로부터 구하고 이를 이용하여 가중 계수 중심을 구한다.

$$EI_Y = E_0 \bar{I}_{\bar{Y}} = E_0 \iint_A \bar{z}^2 d\bar{A} \tag{2}$$

$$EI_Z = E_0 \bar{I}_{\bar{Z}} = E_0 \iint_A \bar{y}^2 d\bar{A} \tag{3}$$

$$GJ = G_0 \hat{J} = G_0 \left[\hat{I}_{\hat{y}} + \hat{I}_{\hat{z}} - \iint_A \left(\hat{z} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \hat{y} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) d\hat{A} \right] \tag{4}$$

보의 변형은 인장(u), 수직 및 수평 방향 변위(v, w), 회전 성분인 비틀림 변형 ϕ로 구분한다. 2차원 각 변형 성분은 기하학적 고찰에 의거하여 다음과 같이 1차원 보의 변형성분으로 나타낼 수 있다.

$$v_t^0 = vy_{,s} + wz_{,s} + r\phi, \quad v_n^0 = vz_{,s} - wy_{,s} - q\phi \tag{5}$$

여기서 r과 s는 보의 탄성 축으로부터 단면 내 임의의 지점에 대한 s, n 좌표상의 이격 거리를 나타낸다.

2.2 블레이드 운동 방정식

그림 2는 블레이드의 지배 운동 방정식을 유도하기 위해 사용된 좌표계 및 변위 성분을 나타내고 있다. 회전익의 운동은 Hamilton 원리에 기초한 유한요소 보 모델을 이용하여 정식화를 수행하였다. 회전익에 대한 동역학적 거동을 기술하는 지배 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\delta\Pi = \int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta T) dt = 0 \tag{6}$$

여기서 t_1, t_2는 임의의 시간을 나타내며, $\delta U, \delta T$ 는 각각 변형도 에너지의 변분, 운동 에너지의 변분을 나타낸다(Jung과 Kim, 1994). 고유치 해석을 통해서 복합재료 블레이드의 고유치를 계산할 수 있다.

3. 프로그램 해석 결과 및 검토

본 논문에서 개발한 블레이드 동특성 해석 프로그램인 DCA1D는 FORTRAN 언어를 기반으로 21개의 서브루틴으로 구성되어 있다. 블레이드의 동특성 해석을 위하여 블레이드의 형상을 그림 3과 같이 보 이론을 고려하여 1D로 가정하였으며 회전 속도에 따라 달라지는 원심력을 포함하였다. 2차원 단면 해석 프로그램인 KSec2D는 복합재료 블레이드 단면의 강성치와 비틀림 상수, 전단 중심 등을 계산하는 프로그램으로 이를 통해 얻어진 단면 물성치를 동특성 해석을 위한 입력 값으로 사용하였다.

개발된 프로그램의 검증을 위해 상용 소프트웨어인 MD Nastran을 이용하여 결과를 비교하였다. 해석 결과 비교의 용이성을 위해 블레이드의 스킨만을 고려하여 해석을 수행하였다. 사용된 복합재료의 물성치는 E_1=131 GPa, E_2=9.3 GPa, G_{12}=5.86 GPa, ν_{12}=0.40으로 적용하였다. MD Nastran 해석의 경우 9,487개의 절점과 42,612개의 QUAD4 쉘 요소와 TETRA4 솔리드 요소로 구성되어 있으며, 복합재료의 적층각을 [0/±45/90]s로 적용하여 해석을 수행하였다. 복합재료 블레이드의 2차원 단면 해석 프로그램인 KSec2D를 이용하여 그림 4에서 나타내고 있는 NACA0012 에어포일에 대하여 블레이드의 단면 물성치를 계산하였다(Park *etal.*, 2009). 784개의 절점과 1,439개의 삼각형 요소를 사용하였고 계산된 단면 물성치는 EA = 5.02×10^9 N, EI_Y = 1.33×10^6 N·m^2, EI_Z = 6.11×10^7 N·m^2, GJ = 1.71×10^6 N·m^2 이다. 같은 형상을 이용하여 복합재료의 적층각도가 $[0/\pm\theta/90]_s$일 때 θ에 따른 굽힘 강성치와 비틀림 강성치의 경향을 그림 5와 6에서 나타냈다. 빔 요소를 사용하여 해석을 수행한 DCA1D의 결과와 MD Nastran의 결과를 비교하여 표 1에 정리하였다. 이를 기반으로 회전속도가 0인 경우 복합재료의 적층각도에 따른 고유진동수와 회전속도에 따른 고유진동수를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

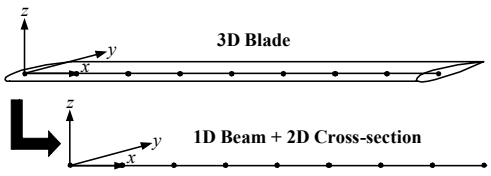

그림 3 Concept of 1D beam from 3D blade

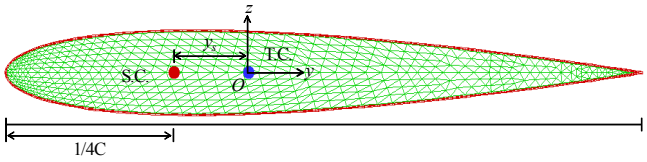

그림 4 Cross-section of NACA0012 airfoil

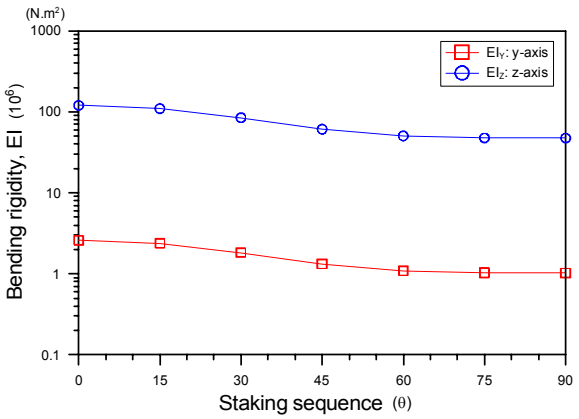

그림 5 Bending rigidity vs. staking sequence

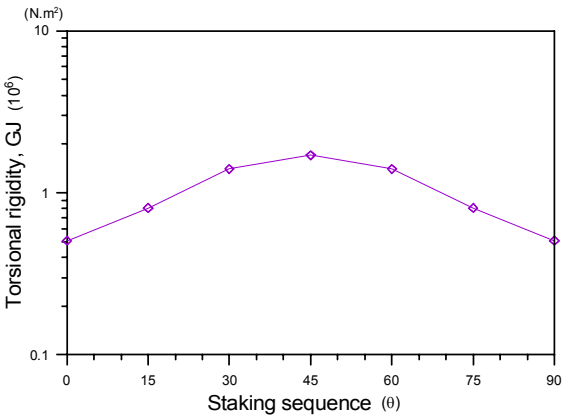

그림 6 Torsional rigidity vs. staking sequence

표 1 Comparison of naturan frequency for composite blade with NACA0012 airfoil

$[0/\pm45/90]_s$		DCA1D	MD Nastran	Difference(%)
ω (Hz)	1st mode	0.093373	0.09497	1.68
	2nd mode	0.58361	0.59305	1.59
	3rd mode	0.63372	0.62863	-0.32
	4th mode	1.6358	1.6467	0.66

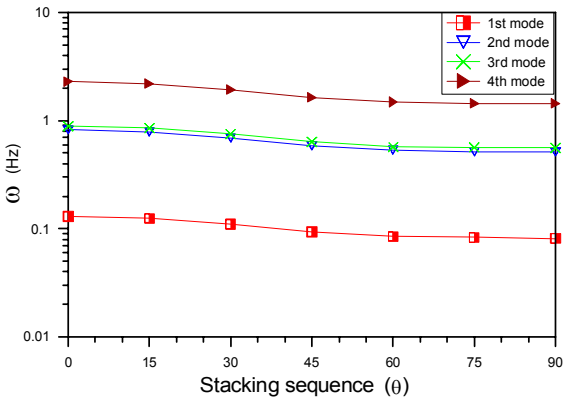

그림 7 Natural frequency vs. stacking sequence

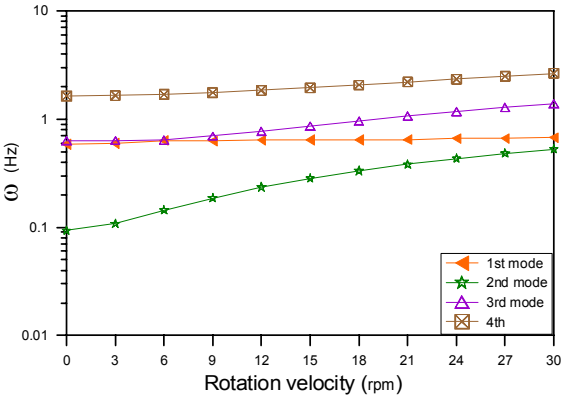

그림 8 Natural frequency vs. rotation velocity

4. 결 론

본 논문에서는 풍력 발전기 블레이드의 동특성을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 검증을 위해 상용 프로그램인 MD Nastran을 이용하여 복합재료 블레이드의 동특성 해석 결과를 비교하였다. 비교 결과 최대 약 2%의 오차로 매우 정확한 결과를 예측할 수 있음을 보였다. 본 연구 결과 개발된 프로그램은 향후 풍력 발전기 블레이드뿐만 아니라 항공기 날개, 회전익 블레이드 등의 동특성 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 부분적으로 호남 광역경제권 선도산업 육성사업의 연구비 지원으로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

Jung, S. N., Kim, S. J., (1994) Aeroelastic response of composite rotor blades considering transverse shear and structural damping, *AIAA Journal*, 32(4), pp.820-827.

Park, I. J., Jung S. N., Kim, D. H. Yun, C. Y., (2009) General purpose cross-section Analysis Program for composite rotor blades, *KSAS International Journal*, 10(2), pp.77-85.

Rachid, Y., Ismail, E.B., Jeur-Bernard, T., Hassan, N., Bernard, L., (2001) Dynamic study of a wind turbine blade with horizontal axis, *European Journal of Mechanics-A/Solids,* 20(2), pp.241-252.