한국소음진동공학회 2012년 춘계학술대회논문집, pp.144~149

전달 매트릭스를 이용한 풍력 터빈 블레이드의 회전속도에 따른 동특성 변화 해석

Analysis of Dynamic Characteristics by Rotational Speed of Wind Turbine Blade using Transfer Matrix

이정우*·신동호*·오재응**·이정윤†

Jung woo Lee, Dong Ho Shin, Jae-Eung Oh and Jung Yoon Lee

Key Words : Wind Turbine Blade(풍력 터빈 블레이드), Dynamic Characteristic(동특성), Chordwise bending (면내 굽힘), Flapwise bending(면외 굽힘), Airfoil(익형), pre-twisted angle(초기 비틀림각), Transfer Matrix(전달행렬)

ABSTRACT

The transfer matrix method is used to determine the dynamic characteristics(natural frequencies and mode shapes) by rotational speed of wind turbine blade. The problems treated on this study is coupled flapwise bending and chordwise bending of pre-twisted nonuniform wind turbine blade. The orthogonality relations that exist between the vibrational modes is derived and the algorithm for determination of the natural vibrational characteristics is suggested.

1. 서 론

현대 산업사회의 발전과 국제 고유가 환경 하에서 재생에너지의 보급에 노력을 기울이고 있는 우리나라의 현실을 고려할 때 경제성이 높은 풍력자원을 이용한 발전시스템의 지속적인 증가가 예상된다.

하지만, 풍력발전에 양질의 자원을 이용하는 독일 등 유럽 여러 나라들의 풍력자원에 비하면 일부지역을 제외하고 산악지대가 많고 풍속과 풍향의 변화가 많은 우리나라의 경우 풍력발전은 다양한 형태의 변속운전을 통한 발전이 이루어고 있어 풍력 터빈 블레이드(Wind Turbine Blade)의 개발을 통한 회전 블레이드의 동특성(Dynamic Characteristic)에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

원심력을 받는 회전 블레이드의 동적 안정성을 확보하기위한 구조물의 동특성 해석은 일찍이 우주항공학, 기계공학 등 다양한 분야의 전문가들에 의하여 연구 되었고 현재에도 지속적인 연구가 진행되고 있다. 1970년대를 거치면서 연산속도를 높일 수 있는 전산 장비의 개발로 기존의 해석평가에 의한 연구를 벗어나 좀 더 정확한 회전 구조물의 동특성을 연구하기 위하여 수치 해석적인 방법들이 적용되었다.

회전하는 구조물 중에서도 풍력 터빈이나 헬리콥터 블레이드의 익형(Airfoil)은 불규칙한 단면형상과 초기 비틀림각(pre-twisted angle)을 가지고 있으며 구조물이 회전을 하게 되면 회전속도에 따라 동특성이 변화하게 된다. 이러한 조건들을 포함한 회전 블레이드의 동특성에 관한 다양한 선행연구들이 항공분야에서 활발히 진행되었고 Murthy는 전

† 교신저자; 경기대학교 기계시스템공학과
E-mail : jylee@kgu.ac.kr
Tel : 031-249-9811 , Fax :031-244-6300
* 경기대학교 기계공학과 대학원
** 한양대학교 기계공학부

달 행렬법을 이용하여 회전 블레이드의 동특성해석을 수행하였다.[1] 또한 Park 등은 초기 비틀림각, 각속도를 갖는 테이프진 회전 외팔보의 동특성 해석을 위하여 연속방정식을 이용한 유한요소해석을 수행하였다.[2] 그리고 Kim등은 저속형 풍력 터빈 블레이드의 개발을 위하여 해석적 방법을 이용한 풍력 터빈 블레이드의 동특성 연구를 수행하였다.[3]

본 논문에서는 불규칙적인 단면형상, 초기 비틀림각과 회전속도를 고려한 풍력 터빈 블레이드를 전달행렬을 이용하여 동특성의 변화를 예측하였다. 이를 검정하기 위하여 선행된 연구과제의 결과를 전달 행렬을 이용한 회전하는 블레이드의 동특성 변화 예측 결과와 비교 하였다.

2. 이 론

2.1 전달 행렬법

(1) 선형 구조물의 전달 행렬법

선형 시스템에서의 상태 벡터는 다음과 같은 미분방정식의 형태를 가진다.

$$\frac{d}{dx}\{Z(x)\}=[A(x)]\{Z(x)\} \tag{1}$$

전달 행렬은 다음과 같이 정의 된다.

$$\{Z(x)\}=[T(x)]\{Z(0)\} \tag{2}$$

x에 대하여 식(2)를 미분하면 식(3)이 된다.

$$\frac{d}{dx}\{Z(x)\}=\frac{d}{dx}[T(x)]\{Z(0)\} \tag{3}$$

또한, 식(2)는 다음과 같이 바꿀수 있다.

$$\{Z(0)\}=[T(x)]^{-1}\{Z(x)\} \tag{4}$$

전달행렬은 [I]이기 때문에 전달행렬의 역행렬은 항상 존재하며 식(4)를 식(3)에 대입하면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{d}{dx}\{Z(x)\}=\frac{d}{dx}[T(x)][T(x)]^{-1}\{Z(x)\} \tag{5}$$

식(1)을 식(5)로 나타내면 다음과 같다.

$$\{A(x)\}\{Z(x)\}=\frac{d}{dx}[T(x)][T(x)]^{-1}\{Z(x)\}$$
$$\text{or}\left(\{A(x)\}-\frac{d}{dx}[T(x)][T(x)]^{-1}\right)\{Z(x)\}=0 \tag{6}$$

식(6)에서 x의 모든 값에 대하여 Z의 값이 만족하기 위해서는 다음과 같아진다.

$$\{A(x)\}=\frac{d}{dx}[T(x)][T(x)]^{-1} \tag{7}$$

식(7)의 양쪽변에 $[T(x)]$를 곱하면 식(8)이 된다.

$$\frac{d}{dx}[T(x)]=\{A(x)\}[T(x)] \tag{8}$$

전달행렬의 해는 식(8)로부터 구할 수 있고 식(2)에서 초기조건 값으로 $x=0$이 된다고 가정하면 초기 조건 에서의 전달행렬은 다음과 같이 된다.

$$[T(0)]=[I],\ \text{단위 행렬} \tag{9}$$

면외 굽힘, 면내 굽힘과 비틀림 진동이 조합된 운동방정식의 미분 형태는 다음과 같다.

$$-(GJ\phi')'+\Omega^2 mxe(-v'\cos\beta+w'\sin\beta)+\Omega^2 me\sin\beta v+\Omega^2 m(k_{m2}^2-k_{m1}^2)\cos 2\beta\,\phi-\omega^2 me(v\sin\beta-w\cos\beta)=0 \tag{10}$$

$$[(EI_x\cos^2\beta+EI_y\sin^2\beta)w''+(EI_y-EI_x)\sin\beta\cos\beta v'']''-(Tw')'-(\Omega^2 mxe\phi\sin\beta)'-\omega^2 m(w+e\phi\cos\beta)=0 \tag{11}$$

$$[(EI_y-EI_x)\sin\beta\cos\beta w''+(EI_x\sin^2\beta+EI_y\cos^2\beta)v'']''-(Tv')'+(\Omega^2 mxe\phi\sin\beta)'+\Omega^2 me\phi\sin\beta-\omega^2 m(v-e\phi\sin\beta)-\Omega^2 mv=0$$

(13)

$\{Z\}$ 는 상태벡터를 나타내며 상태 벡터는 식(14)와 같다.

$$\{Z\}=\begin{Bmatrix} w \\ v \\ \psi \\ \nu \\ \phi \\ M_x \\ M_z \\ M_y \\ -V_y \\ -V_z \end{Bmatrix} \tag{14}$$

여기서 w, v, ψ는 y, z방향의 변위, 면외 변형 곡선 기울기를 나타내며 ν, ϕ는 면내 변형 곡선 기울기와 비틀림 변형의 크기이다. 또한, M_x, M_z, M_y는 x방향 비틀림 모멘트와 z, y 방향 굽힘 모멘트 이고 V_y, V_z는 y, z방향의 전단력이다.

방정식의 경계조건은 고정단에서 식(15)과 같고

$$w = v = \psi = \nu = \phi = 0 \tag{15}$$

자유단에서 식(16)와 같다.

$$M_x = M_z = M_y = V_y = V_z = 0 \tag{16}$$

고정단에서의 경계조건으로 상태 벡터 $x=0$으로 자유단에서의 경계조건을 $x=1$로 치환 한다면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{Bmatrix} w \\ v \\ \psi \\ \nu \\ \phi \\ M_x \\ M_z \\ M_y \\ -V_y \\ -V_z \end{Bmatrix}_{x=1} = [T_{ij}] \begin{Bmatrix} w \\ v \\ \psi \\ \nu \\ \phi \\ M_x \\ M_z \\ M_y \\ -V_y \\ -V_z \end{Bmatrix}_{x=0} \tag{17}$$

여기서 $[T_{ij}]$는 식(18)과 같다.

$$[T_{ij}]=\begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega^2 Md\cos\beta & (\omega^2+\Omega^2)Md\sin\beta & 0 & 0 & (-\omega^2+\Omega^2\cos 2\beta)Md^2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega^2 Md\sin\beta\, x & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega^2 Md\cos\beta\, x & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & (\omega^2+\Omega^2)M & 0 & 0 & -(\omega^2+\Omega^2)Md\sin\beta & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \omega^2 M & 0 & 0 & 0 & \omega^2 Md\cos\beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \tag{18}$$

2.1 적용 예

(1) 적용 모델

제안된 전달행렬을 이용한 풍력 터빈 블레이드의 회전속도에 따른 동특성변화를 검증하기 위하여 선행 연구된 연구결과[3]를 이용하였으며 Fig. 1은 블레이드의 익형을 나타낸 것으로 x, y, z 축은 비틀림이 발생하기전의 좌표이고 회전 블레이드의 익형은 β만큼의 초기 비틀림 각을 가지며 O는 익형의 전단 중심점이다.

풍력 터빈 블레이드의 초기 비틀림 각은 날개 끝단에서의 0도 이고 날개 뿌리 부분에서의 15.6도를 가진다.

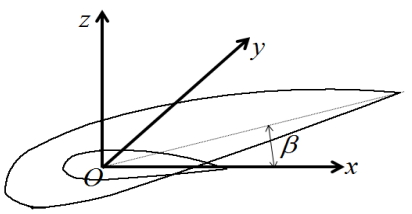

Fig. 1 Airfoil cross-section

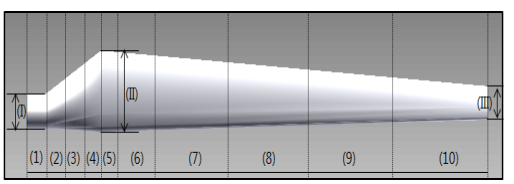

Fig. 2 Equivalent Model of Wind Turbine Blade

Fig. 2는 풍력 터빈 블레이드의 등가 모델로서 전체 길이는 9300mm이고 (I)는 510mm이며 익형의 시위 길이(Chord length)는 뿌리 부분에서 (II)는 1210mm이며 날개의 끝부분에서 (III)는 484mm 이다.

Table 1 the Properties of Wind Turbine Blade (I)

Part	Length	ΔL	EIx	EIy	GJ
1	400	400	3.969E+13	3.309E+13	8.439E+12
2	800	400	2.543E+13	2.229E+13	5.135E+12
3	1200	400	1.432E+13	1.683E+13	2.255E+12
4	1500	300	2.769E+13	3.797E+13	2.709E+12
5	1800	300	1.006E+13	2.854E+13	1.835E+12
6	2500	700	1.745E+13	5.174E+13	3.368E+12
7	3900	1400	6.464E+12	3.519E+13	2.398E+12
8	5500	1600	2.476E+12	3.289E+13	1.016E+12
9	7300	1800	1.091E+12	1.422E+13	3.228E+11
10	9300	2000	1.781E+11	5.341E+12	8.070E+10

Table 1은 검증을 위하여 사용된 풍력 터빈 블레이드의 물성치 값이다. 등가 모델로 전체를 10등분 하였으며 Length는 등가모델의 길이이고 ΔL은 Part의 길이 이다.

또한, EIx는 Flap 방향의 굽힘 강성 값이고, EIy는 Chord 방향의 굽힘 강성 값이며 GJ는 비틀림 강성 값으로 단위는 N · ㎟이다.

Table 2 the Properties of Wind Turbine Blade (II)

Part	Length	ΔL	Mass	Twist Angle
1	400	400	38.55	0
2	800	400	29.64	0.1
3	1200	400	22.25	1.3
4	1500	300	15.80	3.5
5	1800	300	14.73	5.3
6	2500	700	28.99	8.6
7	3900	1400	45.46	11.6
8	5500	1600	34.88	12.8
9	7300	1800	25.70	14.2
10	9300	2000	15.46	15.6

Table 2는 등가 블레이드 모델의 Part별 등가 질량[kg]과 초기 비틀림각을 나타낸 것이다. 날개 뿌리부분에서의 비틀림각 15.6도를 0도로 보면 날개 끝단에서의 비틀림각은 15.6도가 된다.

2.3 적용 결과

(1) 풍력 터빈 블레이드의 고유진동수

회전 속도에 따른 풍력 터빈 블레이드의 동특성 변화 해석으로 7차 까지의 고유진동수를 구하였으며 회전 속도는 0 ~ 60rpm까지 20rpm씩 증가 시켜서 4가지 회전 속도에 대한 고유진동수 값을 도출 하였다.

Table 3 Natural Frequencies considering Rotational Speed of Wind Turbine Blade

Part	Natural Frequencies(Hz)					
	advenced result[3]		rpm			
	2D	3D	0	20	40	60
1	2.632	2.500	2.113	2.153	2.266	2.441
2	5.870	6.530	5.715	5.746	5.837	5.985
3	12.679	12.130	9.180	9.200	9.262	9.364
4	30.970	28.040	13.871	13.909	14.022	14.208
5	31.180	30.120	24.670	24.697	24.791	24.940
6	-	40.481	27.822	27.848	27.835	28.080
7	-	-	41.470	41.389	41.541	41.867

Table 3은 고유진동수의 결과로 선행연구과제에서 수행한 2D, 3D 해석결과와 비교한 값들이다. 선행 연구에서 3D 시뮬레이션을 통하여 구한 고유진동수 값과 제안한 방법을 통하여 구한 고유진동수의 값은 비교적 잘 일치 하는 경향을 보였지만 선행 연구에서는 보이지 않던 9.18Hz의 성분이 나타는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4는 제안된 방법으로 구하여진 모드 벡터 값들이다. 각각의 고유진동수에서의 모드 벡터는 Flap 방향과 Chord 방향으로 구분되어 구하여 졌다. 모드 벡터의 값을 분석한 결과 1차 고유진동수는 Flap 방향의 진동모드를 나타내었고 2차고유진동수는 Chord 방향의 진동 모드를 보였으며 3차고유진동수는 Flap방향의 진동모드를 보였다.

Fig. 3 ~ 6은 각각 풍력 터빈 블레이드의 1차, 2차 , 3차, 4차 진동 모드형상을 Flap 방향과 Chord 방향으로 표현 한 것이다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 4차에서는 동시에 Flap방향과 Chord 방향의 진동 모드를 보였다.

Table 4 the Generalized Mode Vectors of Wind turbine blade

Part	Generalized Mode Vectors					
	1st Natural Frequency		2st Natural Frequency		3st Natural Frequency	
	Flap	chord	Flap	chord	Flap	chord
1	0	0	0	0	0	0
2	0.0002	0.003	0.0011	-0.0165	-0.0302	-0.0033
3	0.0008	0.006	0.0043	-0.0328	-0.0601	-0.0128
4	0.0019	0.009	0.0095	-0.0487	-0.0893	-0.0276
5	0.0034	0.012	0.0168	-0.0642	-0.1172	-0.0457
6	0.0054	0.015	0.0266	-0.0789	-0.1431	-0.0724
7	0.0082	0.0181	0.0391	-0.0928	-0.1660	-0.1021
8	0.0117	0.021	0.0549	-0.1056	-0.1849	-0.1359
9	0.0159	0.0239	0.0732	-0.1176	-0.2002	-0.1720
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31	0.2986	0.0211	0.5142	-0.1196	-0.3866	0.1748
32	0.3232	0.0156	0.5089	-0.0966	-0.3784	0.2111
33	0.3492	0.0095	0.4986	-0.0701	-0.3648	0.2467
34	0.3765	0.0026	0.4824	-0.04	-0.3453	0.2812
35	0.4051	-0.0049	0.4608	-0.0064	-0.3197	0.3144
36	0.435	-0.0131	0.4335	0.031	-0.2875	0.3462
37	0.4661	-0.0219	0.4005	0.0722	-0.2485	0.4044
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	0.8761	-0.1552	-0.3301	0.7635	0.6524	0.5566
49	0.9173	-0.1694	-0.4204	0.8417	0.7670	0.5605
50	0.9586	-0.1838	-0.5117	0.9207	0.8832	0.5637
51	1	-0.1981	-0.6035	1	1	0.5665

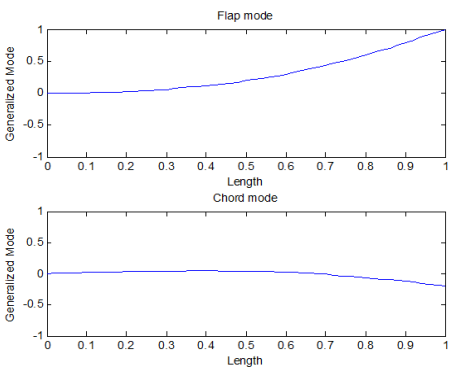

Fig. 3 1st Mode shape of Wind Turbine Blade

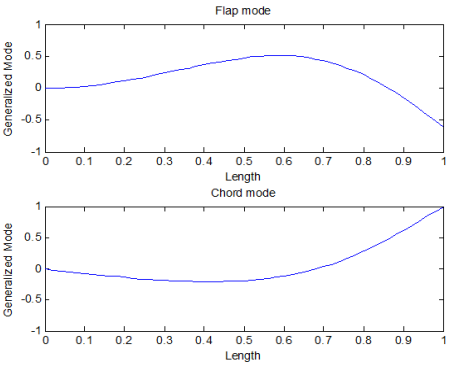

Fig. 4 2nd Mode shape of Wind Turbine Blade

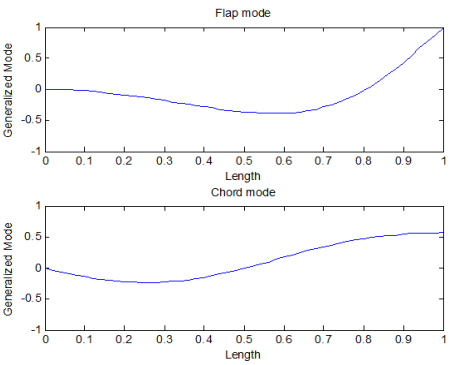

Fig. 5 3rd Mode shape of Wind Turbine Blade

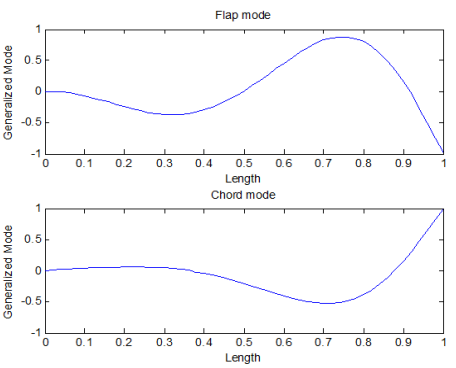

Fig. 6 4th Mode shape of Wind Turbine Blade

3. 결 론

제안된 방법인 전달 행렬을 이용한 터빈 풍력 블레이드의 회전속도에 따른 동특성변화 해석은 선행연구와 비교 하여 비교적 잘 일치 하는 경향을 보였으며 진동 모드측면에서는 선행연구에서 확인되지 않았던 모드 벡터 값이 정확하게 구현되었다.

1. 전달 행렬을 이용하여 원심력을 고려한 풍력 터빈 블레이드의 회전속도에 따른 동특성 변화를 예측할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. Flapwise bending 과 Chordwise bending의 연성문제를 다루어 Flap 방향과 Chord 방향의 진동모드를 구현할 수 있는 방안을 제시하였다.

참 고 문 헌

(1) V.R. Murthy, 1976, Dynamic Charateristics of Rotor Blades, Journal of Sound and Vibration, 49, pp. 483-500

(2) Lee, J. H. and Yoo H. H., 2009, Vibration analysis of rotating Blades considering the cross section taper, the pre-twist angle and the setting angle, Proceedings of the KSNVE Annual Spring conference, pp. 585~591

(3) Kim, S. W., Jang, M. S., Low Speed Wind Turbine Blade Development (I), Korea Institute of Energy Research

(4) Tse, F. S., Morse, I. E. and Hinkle, R. T., 1978, Mechanical Vibration, Allyn and Bacon.