

풍력발전기 타워와 블레이드 연성계의 진동 해석

Vibration Analysis of the Wind Turbine Tower – Blade Coupled System

김민주* · 강남철†
Minju Kim and Namcheol Kang

1. 서 론

1980년대 들어 세계적 에너지 고갈 문제로 인한 대체에너지 개발의 중요성이 커지고 있다. 이에 바람을 에너지원으로 하는 풍력발전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 우리나라 또한 풍력 발전에 관한 관심이 커지고 있는데, 풍력발전기는 제작 및 설치 시 막대한 비용이 소요되어 설계 시 실제적인 정밀한 예측이 중요시 되고 있다. 따라서 풍력발전기의 블레이드의 회전에 의한 타워의 운동 특성에 관한 연구가 행해져 왔다⁽¹⁾. 본 연구에서는 풍력발전기의 타워 진동과 블레이드의 면외방향(out-of-plane) 진동 간의 연성해석을 수행하였다.

2. 본 론

풍력발전기 타워와 블레이드의 연성 특성을 해석하기 위하여 높이 H , 밀도 ρ_T , 단면적 A_T , 탄성계수 E_T , 단면의 관성모멘트 I_T 인 타워에 질량 M_0 의 너셀(nacelle)이 연결되어 있는 구조물을 고려한다(Fig. 1 참조). 이때, 너셀 부에 길이 L , 밀도 ρ , 단면적 A , 탄성계수 E , 단면의 관성모멘트 I 인 블레이드가 부착되어 각속도 Ω 로 회전한다. 타워와 블레이드는 모두 균일(homogeneous)하고 단면적이 일정한 Bernoulli-Euler 보로 가정하며, 회전에 의한 원심력(centrifugal force), $T(x)$ 를 고려하면 다음과 같이 타워와 연성된 블레이드의 운동 방정식을 얻을 수 있다⁽²⁾.

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} [T(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}] = -\rho A \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2} \Big|_{z=H} \quad (1)$$

이때, 임의의 점 x 에 작용하는 원심력은 x 에서 L 까지 존재하는 블레이드 질량의 회전에 의하여 발생하

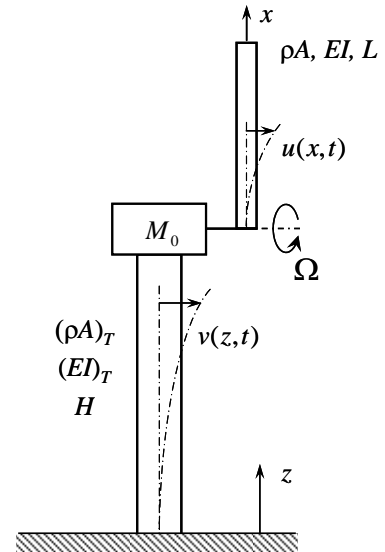


Fig. 1 Coupled wind tower-blade model.

므로 다음과 같이 계산된다.

$$T(x) = \int_x^L \rho A \eta \Omega^2 d\eta \quad (2)$$

이때, 블레이드는 다음과 같은 고정단의 경계조건을 갖는다.

$$x=0 \quad u(x,t) = u'(x,t) = 0 \quad (3)$$

$$x=L \quad u''(x,t) = u'''(x,t) = 0 \quad (4)$$

또한, 타워의 운동방정식과 경계조건은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$(\rho A)_T \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2} + (EI)_T \frac{\partial^4 v(z,t)}{\partial z^4} = 0 \quad (5)$$

$$z=0 \quad v(z,t) = v'(z,t) = 0, \quad (6)$$

$$z=H \quad v''(z,t) = 0 \quad (7)$$

$$EIv'''(z,t) = (M_0 + \rho A L) \ddot{v}(z,t) + \int_0^L \rho A \ddot{u}(x,t) dx \quad (8)$$

† 교신저자; 정회원, 경북대학교 기계공학부
E-mail: nckang@knu.ac.kr
Tel:(053)950-7545, Fax:(053)950-6550
* 경북대학교 대학원 기계공학과

타워와 블레이드가 조화진동을 한다고 가정하고 Galerkin method 를 적용하면 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (m_{11})_{ij} & (m_{12})_{ij} \\ (m_{21})_{ij} & (m_{22})_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{a}_i(t) \\ \ddot{b}_j(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_{11})_{ij} & 0 \\ 0 & (k_{22})_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i(t) \\ b_j(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

여기서, $a(t)$ 와 $b(t)$ 는 각각 블레이드 및 타워의 일반화된 좌표(generalized coordinates)이며, 각 행렬 요소는 다음과 같다.

$$(m_{11})_{ij} = \int_0^L \rho A \phi_i(x) \phi_j(x) dx \quad (10)$$

$$(m_{12})_{ij} = \int_0^L \rho A \phi_i(x) \psi_j(H) dx \quad (11)$$

$$(m_{21})_{ij} = \int_0^L \rho A \psi_i(H) \phi_j(x) dx \quad (12)$$

$$(m_{22})_{ij} = (M_0 + \rho A l) \psi_i(H) \psi_j(H) + \int_0^H (\rho A)_T \psi_i(z) \psi_j(z) dz \quad (13)$$

$$(k_{11})_{ij} = \int_0^L EI \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx + \int_0^L \rho A \Omega^2 x \cdot \phi_i(x) \phi_j'(x) dx \quad (14)$$

$$(k_{22})_{ij} = \int_0^H (EI)_T \psi_i''(z) \psi_j''(z) dz \quad (15)$$

따라서, 식 (9)로 구성된 블레이드-타워 연성계의 고유치 해석을 통하여 시스템의 고유진동수를 구할 수 있다.

3. 해석 결과

블레이드-타워 연성계의 해석결과를 Fig. 2 에 도시하였다. 연성계의 경우 블레이드의 고유치가 타워의 고유치에 근접하면, 모드 일치(mode coalescence) 현상이 발생하며, 그 순간 고유치의 실수부가 양이 되어 연성계가 불안정한(unstable) 상태가 된다. 이러한 연성 효과는 타워, 너셀, 블레이드의 질량과 길이에 따라 상이하게 나타날 수 있으므로, 설계 인자에 대한 정확한 연성해석이 필수적이라 할 수 있다.

4. 결론

풍력발전기 타워와 블레이드의 연성 시 운동 특성을 Galerkin method 를 적용하여 해석하였다. 블레이드의 회전속도가 증가함에 따라 타워와 블레이드의 모드가 일치하고 시스템이 불안정해지는 해석 결과를 도출하였다.

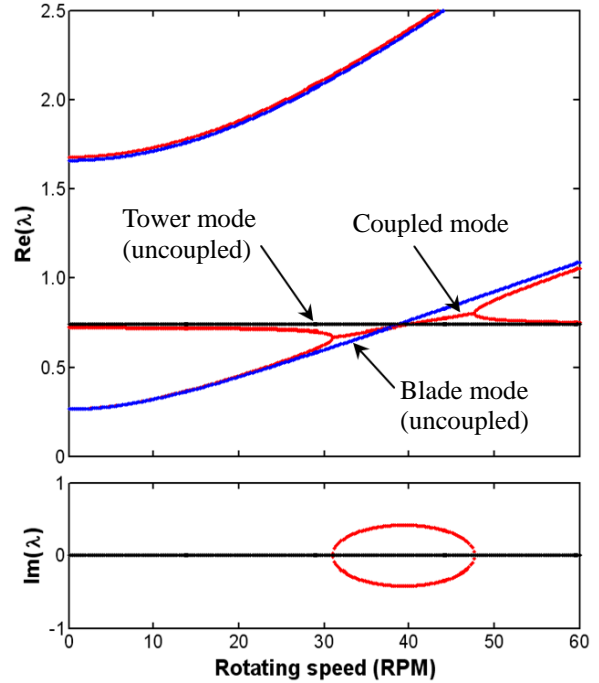


Fig. 2 Real and imaginary parts of eigenvalues of coupled tower-blade system respect to rotating speed.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0006654).

참 고 문 헌

- (1) Murtagh, P. J., Basu, B., and Broderick, B. M., 2005, "Along-Wind Response of a Wind Turbine Tower with Blade Coupling Subjected to Rotationally Sampled Wind Loading," *Engineering Structures*, Vol. 27(8), pp. 1209-1219.
- (2) Chopra, A. K., 1989, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall International, Inc., New Jersey.