

# 풍력터빈 지지구조물의 결함탐지방법

## Fault Detection Method of Wind Turbine Support Structure

이종원\* · 김상렬\* · 김봉기\*

Jong-Won Lee, Sang-Ryul Kim and Bong-Ki Kim

### 1. 서 론

원형 강관의 타워 형식 구조물은 풍력발전기, 플랜트, 건축구조물 등 주요 시설물에 널리 이용되고 있으며, 주로 길이 방향으로 구조특성이 분포되어 있는 변단면 캔틸레버 보의 형태이다. 이러한 타워 구조물이 대형화 될수록 구조적 안전성 확보를 위한 건전성 모니터링 및 결함탐지 기술개발이 요구되고 있다. 또한 진동기반 결함탐지방법을 이용하면 구조물이 속한 시스템의 운용 중 계측되는 진동 데이터를 이용하여 균열의 위치나 크기를 판정할 수 있다.

진동기반 결함탐지방법은 일반적으로 결함으로 인한 구조물의 모드특성 변화를 활용하며, 모델기반 기법을 적용하기 위해서는 구조물의 모드특성을 수치적으로 구해야한다. 즉, 건전상태의 변단면 타워 구조물에 대한 모드특성을 구한 후, 결함이 고려된 구조물에 대한 등가 휨강성 등을 적용하여 손상 후 모드특성을 수치적으로 구할 필요가 있다.

본 연구는 변단면 원형 강관 형태의 풍력터빈 타워에 대하여, 균열이 고려된 타워 구조물의 등가 휨강성을 적용한 모델기반 균열탐지방법을 개발하기 위한 선행연구이다. 즉, 변단면 캔틸레버 보의 모드특성을 구할 수 있는 방법을 연구하고, 5 MW 용량의 풍력터빈 타워에 대하여 고유주파수를 산정하여 결과를 검토한다.

### 2. 변단면 캔틸레버 보의 모드특성

변단면 보의 횡방향 변위를  $w(x,t)$ 라고 정의하면

운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 변수 분리하여 식 (2)와 같이 특성방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] + \rho A(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ EI(x) \frac{d^2 r(x)}{dx^2} \right] - \rho A(x) \omega^2 r(x) = 0 \quad (2)$$

Fig. 1에 보이는 바와 같이  $\xi$ 를 원점으로부터 변단면 보의 임의 위치까지의 거리로써 변단면 삼각형 전체길이( $L_1$ )로 나눈 값으로 설정하면, 임의 위치에 서의 단면적  $A(\xi)$ 와 단면2차모멘트  $I(\xi)$ 를 식 (3)과 같이 구할 수 있고 이들을 식 (2)에 대입하면 식 (4)를 구할 수 있다<sup>(1)</sup>.

$$A(\xi) = A_1 \xi^2, \quad I(\xi) = I_1 \xi^4 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\xi^2} \left[ \frac{d^2}{d\xi^2} \xi^4 \frac{d^2 r(\xi)}{d\xi^2} \right] - \beta^4(\xi) = 0 \quad (4)$$

여기서  $\beta^4 = \frac{\rho A_1 L_1^4 \omega^2}{EI_1}$ 이며  $r(\xi)$ 는 보의 횡방향 변위이다. 식 (4)의 미분방정식 일반해는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$r(\xi) = \xi^{-1} [C_1 J_2(\beta \xi) + C_2 Y_2(\beta \xi) + C_3 I_2(\beta \xi) + C_4 K_2(\beta \xi)] \quad (5)$$

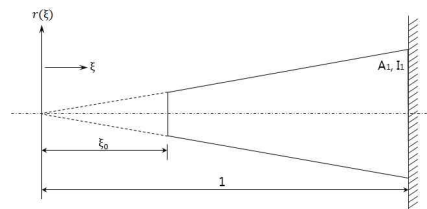


Fig. 1 Non-dimensional tapered beam.

† 교신저자; 정희원, 남서울대학교 건축공학과  
E-mail:jwlee@nsu.ac.kr  
Tel:041-580-2761, Fax:041-580-2929

\* 정희원, 한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실

여기서  $J_2$  및  $Y_2$ 는 각각 2차 제1종 및 제2종 베셀 함수이며,  $I_2$  및  $K_2$ 는 각각 2차 제1종 및 제2종 변형 베셀함수이다. 한편,  $C_1, C_2, C_3, C_4$ 는 임의 상수이며  $Z=2\beta\sqrt{\xi}$ 이다.

타워 구조물은 주로 변단면 켈틸레버 보의 형태이며, 이 경우 자유단( $\xi=\xi_0$ )과 고정단( $\xi=1$ )에서의 경계조건은 각각 식 (6)과 (7)과 같다.

$$\frac{d^2r(\xi)}{d\xi^2} = \frac{d}{d\xi} \left( \xi^4 \frac{dr(\xi)}{d\xi} \right) = 0 \quad (6)$$

$$r(\xi) = \frac{dr(\xi)}{d\xi} = 0 \quad (7)$$

위 경계조건을 적용하면 상수  $C_1, C_2, C_3, C_4$ 에 대한 연립방정식이 유도되고, 자명하지 않은 해를 가지기 위해서는 다음과 같이 행렬식이 영이 되어야 한다.

$$\begin{vmatrix} J_4(Z_0) & Y_4(Z_0) & I_4(Z_0) & K_4(Z_0) \\ J_3(Z_0) & Y_3(Z_0) & I_3(Z_0) & -K_3(Z_0) \\ J_2(2\beta) & Y_2(2\beta) & I_2(2\beta) & K_2(2\beta) \\ J_3(2\beta) & Y_3(2\beta) & -I_3(2\beta) & K_3(2\beta) \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

여기서  $Z_0=2\beta\sqrt{\xi_0}$ 이고, false-position method 등의 방법으로 식 (8)을 만족하는  $\beta$ 를 구할 수 있다. 편의상  $\beta^* = \beta(1-\xi_0)$ 라 하면 다음 식으로 변단면 켈틸레버 보의 고유주파수를 구할 수 있다.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\beta^{*2}}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI_1}{\rho A_1}} \quad (9)$$

### 3. 풍력발전기 타워의 고유주파수

위에서 유도된 변단면 켈틸레버 보의 고유주파수 산정식을 적용하기 위하여 Fig. 2에 나타난 5 MW NREL Reference 풍력발전기 모델<sup>(2)</sup>의 타워에 대한 고유주파수를 추정하였다.

타워 하단의 단면적  $A_1 = 0.5066 m^2$ , 단면2차모멘트  $I_1 = 2.2595 m^2$ ,  $E = 205 \times 10^9 Pa$ ,  $L = 87.6 m$ ,  $\xi_0 = 0.555$ 이며, 식 (8)을 이용하여 1, 2, 3차 모드에 대하여 구한  $\beta^*$ 는 각각 2.109, 4.452, 7.078이다. 이

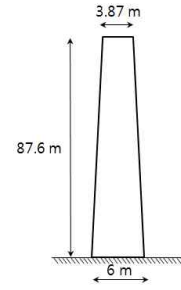


Fig. 2 Example wind turbine tower.

를 식 (9)에 적용하여 3차까지의 고유주파수를 계산하였는데, 1, 2, 3차 고유주파수는 각각 0.996, 4.437, 11.214 Hz이다. 여기서 구한 고유주파수는 나셀 및 블레이드의 질량이 생략되었으며, 정확한 타워의 고유주파수를 계산하기 위해서는 식 (3)을 약간 보완할 필요가 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 변단면 켈틸레버 보의 모드특성을 구할 수 있는 방법을 연구하고 이를 이용하여 5 MW 용량의 풍력터빈 타워에 대한 고유주파수를 산정하였다. 향후 변단면 원형 강관 형태의 풍력터빈 타워에 대한 결함탐지를 위하여, 균열이 고려된 등가 휨강성을 적용한 모델기반 균열탐지기법을 개발할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업(융합원천)인 "서남해 2.5GW 해상풍력을 위한 실증단계 연구"과제의 세부연구 일부 내용임을 밝히는 바이며, 연구수행에 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Gorman, D.J., 1975, Free Vibration Analysis of Beams and Shafts, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G., 2009, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report, NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory.