

케이블 지지된 풍력발전기 타워 진동계의 변수 분석

Parametric Study of a Wind Turbine Tower Vibration System Supported by Guy Cables

박무열[†] · 김석현^{*}

Muyeol Park, Seockhyun Kim

Key Words: Cable supported wind turbine tower(케이블 지지된 풍력발전기 타워), Tower-cable resonance(타워-케이블 공진), Rayleigh Ritz method(레이레이-리쯔 방법)

ABSTRACT

Vibration characteristics of a small stand alone W/T(wind turbine) system are experimentally and theoretically investigated. Vibration resonance of the tower-cable system is monitored and the data are analysed with the analytical results. To predict the resonance speed of the cable supported W/T, Rayleigh-Ritz method is applied to the tower-guy cable coupled system. Parametric study on the relation of the cable tension, cable elasticity and resonance frequency is carried out. Results of the study are utilized to design the stable structure of small size wind turbines which consist of a pivoted tower and guy cables.

1. 서 론

태백준령을 중심으로 한 강원 내륙지역과 영덕, 제주 등의 해안 및 섬 지역이 풍부한 풍력자원을 확보하고 있는 것으로 확인됨에 따라 풍력발전에 대한 연구 및 투자가 활발히 이루어지고 있다. 외국에서는 독일을 선두로 미국, 스페인, 덴마크 등이 세계 풍력 발전 산업을 주도하면서, 1996년 이후 세계 풍력 시장의 최근 연평균 성장률은 무려 40%에 이르고 있다.⁽¹⁾ 선진국에 비하여 국내 풍력 시장은 아직 미미한 수준이나, 정부, 민간업체 및 연구기관 간의 적극적인 협조로 현재 750kW급의 개발이 완료되었고, 2MW급 대형 발전기가 개발 중이다.⁽²⁾ 이와 함께 독립형으로 사용되는 6kW, 10kW급 등의 소형 풍력발전기에 대한 개발도 이루어지고 있다.

그러나 최근에는 소형 및 중/대형 급의 국산화 개발이 진행된 관계로, 발전 성능이나 구조 안전성 및 전력품질 등에 대한 체계적인 연구는 미흡한 상황이다. 풍력발전기의 구조 진동 문제는 발전기의 구조 안전성뿐만 아니라 발전 성능에 관련해서 중요한 현안이 된다.^(3,4,5) 본 연구에서는 4개의 가이 케이블로 지지된 수평축 4 날개 6kW 풍력발전기의 모니터링 결과로부터 공진 문제를 검토하고, 공진주파수를 예측하기 위한 해석 모델을 제시한다. 해석에서 상단의 발전기는 집중 질량으로 모델링하고, 타워-케이블 진동계를 레일리-리쯔법(Rayleigh-Ritz Method)을 사용하여 고유진동수를 구한다. 주요 설계변수가 고유진동수에 미치는 효과를 분석하여, 국산화 소형 풍력발전기의 공진 문제에 대비하는 것이 본 연구의 목표이다.

2. 소형 독립형 풍력발전기의 진동 특성

대관령 풍력실증단지에서 시험중인 6kW 독립형 풍력발전기(INVENTUS 6)의 진동 특성을 검토한다. Fig. 1과 Table 1은 그 구조와 제원을 보인다.

[†] 책임저자 : 정회원, 영신정공 기술연구소
해석재료팀

E-mail : moowin96@gmail.com
TEL : (054)770-6946

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수

상단부에 가속도계를 설치하여 로터 속도별로 측정 한 주파수 스펙트럼은 Fig. 2와 같다. 147rpm부근에서 공진으로 인하여 최대의 피크를 보이는 것으로 확인되었다. Fig. 3은 이때의 주파수 스펙트럼인데, 1차 피크 주파수는 1.22Hz, 2차 피크는 2.45Hz로 확인되었다. 1차 피크는 정지 상태에서 타워에 충격을 가하여 측정한 결과, 타워-케이블계의 1차 진동 고유진동수와 일치 하였으며, 회전주파수의 1/2성분에 의하여 공진되고 있다. 2차 피크 2.45Hz 성분은 147rpm에서의 회전 불평형에 기인한 응답이다. 결과적으로, 타워-케이블 계의 1차 고유진동수가 작업 속도의 상한치 부근에서 공진되는 문제가 발생하였다. 공진을 방지하기 위해서는 타워-케이블 계의 1차 고유진동수를 높일 필요가 있다.

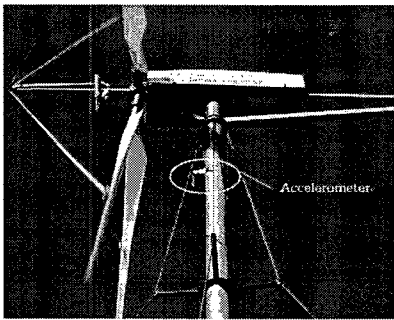


Fig. 1 6kW stand alone type W/T.

Table 1 Specification of 6kW W/T

model	INVENTUS-6
rated power	6kW
hub height	13 m
rotor diameter	6 m
number of blades	4
operation speed	80-145 rpm
rated wind speed	10.5 m/s
cut-in wind speed	3 m/s
cut-out wind speed	30 m/s
survival wind speed	60 m/s
power control system	passive blade pitch change, pole change
yawing control	wind vane
weights	rotor blades : 48kg machine nacelle : 208kg tower : 220kg

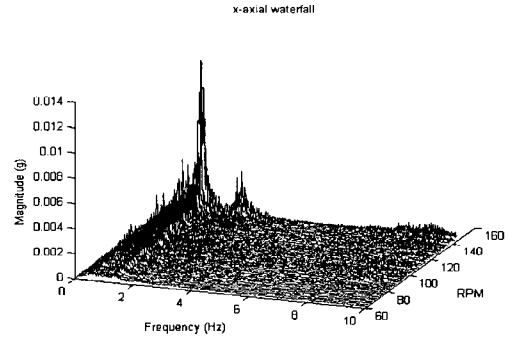


Fig. 2 Water fall plot of W/T vibration.

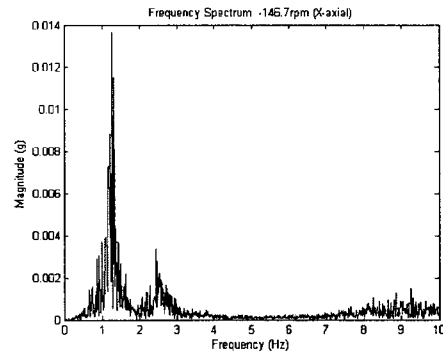


Fig. 3 Frequency spectrum at 146.7rpm.

3. 타워-케이블 계의 진동 해석

발전기-나셀 및 날개를 Fig. 4와 같이 타워 상단에 집중된 질량으로 단순화 시키고, 레일리-리쯔 법 (Rayleigh-Ritz Energy Method) ⁽⁶⁾으로 타워-케이블계의 고유진동수 및 고유모드를 구한다. 타워의 횡 변위 $x(y)$ 을 식(1)과 같이 경계조건을 만족시키는 허용함수(admissible function) $\phi_i(y)$, $\varphi_i(y)$ 를 사용하여 표시한다. 타워 하단이 1축 핀 지지된 관계로 횡 변위는 Fig. 5와 같이 핀 축 방향을 고려하여 2개의 직교하는 변위 성분을 고려하였다. 다음과 같이 타워 횡 변위는 5개의 허용함수를 각각 사용한다.

$$x(y) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^5 C_i \phi_i(y) ; \text{pin-axial transverse} \\ \sum_{i=1}^5 C_i \varphi_i(y) ; \text{pin-axial} \end{array} \right\} \quad (1)$$

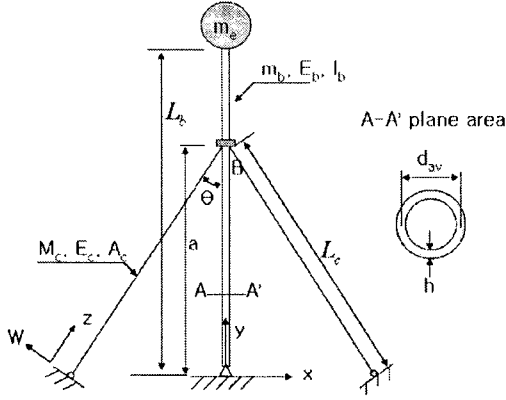


Fig. 4 Simplified tower model for theoretical analysis.

Fig. 5에서 보이는 바와 같이 편 축 횡 변위 ϕ 에 는 편 축 회전에 의한 강제 운동을 포함시킨다. 단 순 지지된 B점은 타워와 케이블의 연결점이다. 경 계조건을 만족시키는 보의 처짐 함수를 다음과 같 이 사용한다.⁽⁷⁾

$$\phi_1(y) = \begin{cases} \frac{(L_b - a)}{a}(y^3 + a^2 y) & ; 0 \leq y \leq a \\ -y^3 + 3L_b y^2 - 4a(L_b - a)y + L_b a^2 & ; a \leq y \leq L_b \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi_2(y) = \frac{y}{L_b} \quad (3)$$

$$\phi_n(y) = \sin\left(\frac{(n-1)\pi}{2} \cdot \frac{y}{L_b}\right) \quad ; n=3, 4, 5 \quad (4)$$

$$\varphi_1(y) = \begin{cases} \frac{3(L_b - a)}{2a}(-y^3 + ay^2) & ; 0 \leq y \leq a \\ y^3 - 3L_b y^2 + \frac{3}{2}a(3L_b - a)y - \frac{a^2}{2}(3L_b - 7a) & ; a \leq y \leq L_b \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi_2(y) = y^3 - 3L_b y^2 \quad (6)$$

$$\varphi_n(y) = \left(\frac{y}{L_b}\right)^2 \left(1 - \frac{y}{L_b}\right)^{(n-1)} \quad ; n=3, 4, 5 \quad (7)$$

레이레이-리쯔범에서는 레이레이 정수(Rayleigh quotient)를 허용함수의 계수에 대하여 최소화시키 는 조건에서 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial U_{\max}}{\partial C_i} - \omega^2 \frac{\partial T_{\max}^*}{\partial C_i} = 0 \quad (8)$$

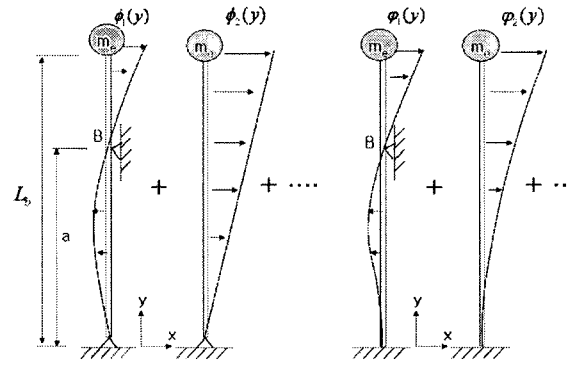
여기서 U_{\max} 와 T_{\max}^* 는 구조계의 최대 위치 및 운 동에너지로, 구조계가 보(타워), 케이블, 집중질량으 로 구성되므로 다음과 같이 표시된다.

$$U_{\max} = U_{beam} + U_{cable} \quad (9)$$

$$T_{\max}^* = T_{beam}^* + T_{cable}^* + T_{mass}^* \quad (10)$$

U_{beam} 와 T_{beam}^* , U_{cable} 와 T_{cable}^* 는 보 및 케이블의 위치

및 운동에너지이고, T_{mass}^* 는 발전기 부분을 집중질량 으로 표시할 때의 운동에너지이다.



a) pin-axis transverse b) pin-axial

Fig. 5 Admissible functions of the tower.

보의 굽힘 변형을 고려한 위치에너지는 다음과 같 다.

$$U_{beam} = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} E_b I_b (x''(y))^2 dy \quad (11)$$

I_b 는 광관 보의 면적 관성 모멘트로 다음과 같이 주어진다.

$$I_b = \frac{\pi d^3 h}{8} \quad (12)$$

4개 케이블의 초기 장력은 동일한 것으로 간주한다. 케이블의 횡 변위가 작다고 할 때, 케이블을 등가 스프링으로 보면, 스프링 탄성에너지는 다음과 같이 결정된다.

$$U_{cable} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{E_c \text{eff} A_c}{L_c}\right) x^2(a) \sin^2 \theta \quad (13)$$

여기서, $E_{c,eff}$ 는 케이블의 자중에 의한 처짐을 고 려한 케이블의 유효 탄성계수로서⁽⁸⁾ 다음과 같이 표 시된다.

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \frac{(w_c L_c \sin \theta)^2 E_c A_c}{12 T_0^3}} \quad (14)$$

식(17)에서 E_c 는 케이블의 탄성계수, A_c 는 케이블의 단면적, w_c 는 단위 길이 당 케이블의 하중이고, L_c 는 케이블의 길이이다. 한편, 각 부분의 운동에너지 는 다음과 같다.

$$T_{beam}^* = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} \frac{m_b}{L_b} x^2(y) dy \quad (15)$$

$$T_{mass}^* = \frac{1}{2} m_e x^2 (L_b) \quad (16)$$

$$T_{cable}^* = \frac{1}{2} \left(\frac{2m_c}{3} \right) x^2 (a) \sin^2 \theta \quad (17)$$

여기서 m_e, m_b, m_c 는 상단 집중질량, 보 및 케이블의 질량이다. 식 (8)로부터 다음의 특성 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} (k_{11} - \omega^2 m_{11}) & (k_{12} - \omega^2 m_{12}) & \cdots & \cdots & (k_{15} - \omega^2 m_{15}) \\ (k_{21} - \omega^2 m_{21}) & (k_{22} - \omega^2 m_{22}) & \cdots & \cdots & (k_{25} - \omega^2 m_{25}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (k_{51} - \omega^2 m_{51}) & (k_{52} - \omega^2 m_{52}) & \cdots & \cdots & (k_{55} - \omega^2 m_{55}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ C_5 \end{Bmatrix} = 0 \quad (18)$$

행렬식이 영이 되는 조건으로부터 ω^2 을 구하고, 각 고유 진동수에 대한 계수를 식(1)에 대입하면 진동 모드를 얻을 수 있다. 타워 횡 변위 모드 진동수는 2개의 허용함수만으로도 충분히 수렴하는 것을 확인하였다.

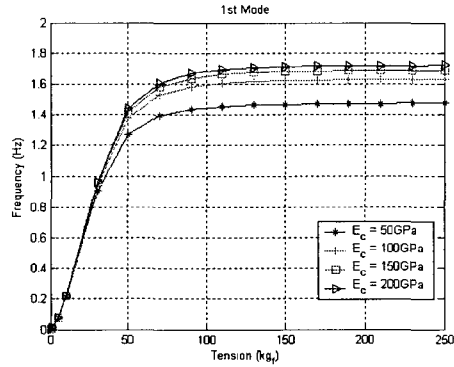
4. 해석 결과

케이블은 가는 강선을 2중으로 꼬아서 제작된 상태로 그 탄성계수와 장력을 구하기가 어렵다. 본 연구에서는 이 두 개의 변수를 제외한 모든 데이터는 실측하였고, 이 두 변수 값을 변화시키면서 1차 고유진동수의 변화를 검토하여 고유진동수 설계에 필요한 정보를 얻었다. 각 부분의 실측 데이터는 다음과 같다.

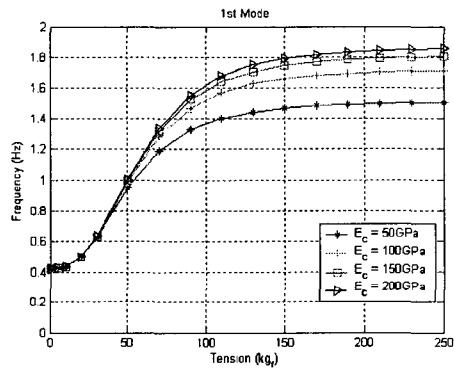
$$\begin{aligned} m_e &= 256kg, m_b = 220kg, m_c = 4.51kg, w_c = 4.022N/m \\ L_b &= 13m, a = 9.87m, L_c = 11m, d_{op} = 0.1635m, \\ h &= 0.0045m, E_b = 200Gpa, A_c = 64.6809mm^2 \end{aligned}$$

케이블 탄성계수를 고정시키고 장력 변화에 따른 1차 고유진동수의 변화를 검토한 결과를 Fig. 6에 보인다. 핀 축에 수직인 횡 변위 모드에서 100kgf 이후에서는 장력이 증가하더라도 진동수에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타난다. 탄성계수가 작아지면 고유진동수는 영으로 수렴한다. 이는 타워가 핀 축 주위로 회전하는 강체 모드를 의미한다. 핀 축 방향 횡 변위 모드에서는 탄성계수가 영이 되어도 외팔보의 1차 진동 주파수를 갖게 된다. 탄성계수의 증가에 따라 진동수는 점차 증가한다. Fig. 7은 150kgf 장력 하에서 케이블 탄성이 진동수에 미치는 효과를 보인다. 케이블 탄성계수의 증가는 위

치에너지를 증가시키므로 진동수도 꾸준히 증가하나, 그 증가율은 고주파수 대역으로 가면시 둔화됨을 보인다.



a) pin axis transverse



b) pin axial

Fig. 6 Tensional force vs. frequency under the consideration of the cable sag.

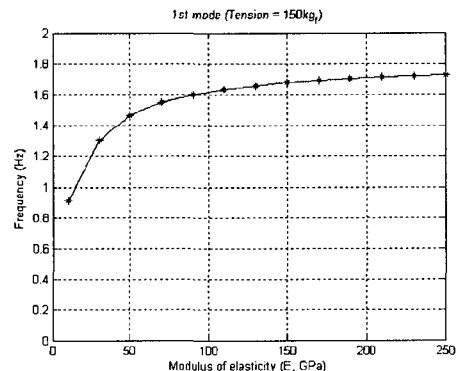


Fig. 7 Cable elasticity vs. frequency (tension:150kgf).

장력은 케이블의 자중에 의한 처짐을 감소시킨다. 유효탄성계수는 케이블의 처짐에 의하여 식(14)로

표시되는 보정된 탄성계수이다. 결과적으로 장력이 커지면 식(14)에서 자중 처짐이 작아지므로 유효탄성계수는 케이블 탄성계수로 수렴된다. Fig. 8은 장력에 대한 유효탄성계수의 변화를 보인다. 탄성계수가 작을수록 낮은 장력에서 유효탄성계수는 탄성계수로 수렴됨을 알 수 있다. 이는 탄성계수가 낮을수록 작은 장력 하에서 자중 처짐이 작아지는데 기인한다.

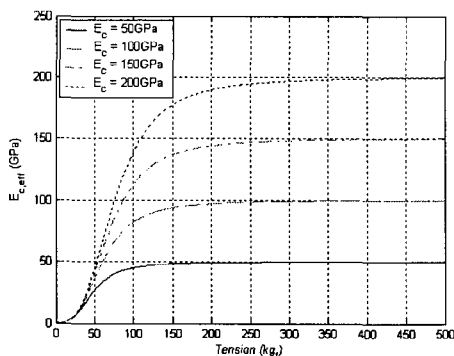


Fig. 8 Effective elasticity vs. tensional force.

5. 결론 및 토론

대관령 풍력실증단지에서 설치된 6kW 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링을 통하여 타워-케이블계의 진동응답 특성으로부터, 작업 범위 내에서 1차 진동모드의 공진 가능성을 확인하였다. 레일레이-리쯔법에 근거한 해석 모델을 사용하여, 케이블의 장력, 자중 처짐, 탄성계수 및 유효탄성계수와 고유진동수 사이의 관계를 분석하였다. 해석 모델을 사용함으로써, 소형풍력발전기의 설계 변수 및 설치 변수(장력)가 공진주파수와 어떠한 관계를 갖는지를 알 수 있었으며, 그 결과는 공진대역을 작업범위 밖으로 위치시키려할 때 유용하게 활용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Wind Force 12, European Wind Energy Association and Green Peace.
- (2) Unison Corp, <http://www.unison.co.kr>
- (3) Burton, T., 2002, "Wind Energy Hand Book," John Wiley and Sons, Ltd.
- (4) Hau, E., 2000, "Wind Turbines," Springer Verlag.
- (5) Kim, S. H., Nam, Y. S. and Enu. S. Y., 2005.

"Vibration Characteristics of the Tower Structure of a 750kW Wind Turbine Generator," *Transactions of the KSNVE*, Vol. 15, No. 2, pp. 219~245.

- (6) Thomson, W.T., 1993, "Theory of Vibration with Applications," Prentice Hall.
- (7) Lardner, T.J., 1972, "An Introduction to The Mechanics of Solids", 2nd Edition with SI units, McGraw Hill Book Company.
- (8) Wang, P. H., Tang, T. Y., and Zheng, H. N., 2004, "Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods," *Computers and Structures*, Vol. 82, pp. 329~346.