

## 케이블 지지된 풍력발전기 타워 구조 모델의 진동해석 Vibration Analysis of a Cable Supported Wind Turbine Tower Model

김 석 현\*      박 무 열\*\*      최 승 훈\*\*\*  
Kim, Seock-Hyun   Park, Mu-Yeol   Cui, C.-X.

### Abstract

A theoretical model based on Rayleigh-Ritz method is proposed to predict the resonance frequency of a W/T(Wind Turbine) tower structure supported by guy cables. In order to verify the validity of the theoretical model, a reduced W/T tower system is manufactured and tested. Frequency response and mode data are determined by modal testing and finite element analysis is performed to calculate the natural frequency of the tower model. Numerical and experimental results are compared with those by the theoretical analysis. Parametric study by the theoretical model shows how the cable tension and cable elasticity influence the resonance frequency of the W/T tower structure. Finally, vibration response under various rotating speed is investigated to examine the possibility of severe resonance.

키워드 : 풍력발전기 구조 축소 모델, 진동모드, 레일레이\_리츠 방법, 유한요소법, 모드시험  
Keywords : *Reduced structure model of wind turbine generator, vibration mode, Rayleigh Ritz method, Finite Element Analysis, Modal testing*

### 1. 서론

최근 수행된 소형 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 결과에 따르면[1], 풍력발전기 타워의 과도한 진동은 발전기 시스템의 안전 문제뿐만 아니라 발전 효율에도 악영향을 미치는 것으로 확인되고 있다. 소형 풍력발전기는 강관형 타워 상단에 발전기 및 날개를 설치하고, 타워 상부에 연결된 3~4개의 가이 케이블(Guy Cable)이 타워를 지지하는 구조로 되어 있다[2]. 구조적 특성 및 운전속도에 따라 타워 구조계의 1차 고유진동수가 운전 범위 내에서 회전수의 1/2차나 1차 조화성분에 의

하여 공진 되는 경우가 빈번하다. 그러나 국내 소형 풍력발전기의 시장은, 중소기업이 외국의 모델을 벤치마킹하는 개발 초기 단계로 이러한 문제에 대처하지 못하는 실정이다. 본 연구에서는 케이블 지지된 풍력발전기 타워 구조의 공진 주파수를 예측하는 이론 모델을 제시한다. 타워 상단의 발전기 및 날개를 집중 질량으로 모델링하고, 타워-케이블 구조계의 고유진동수를 레일레이-리츠법(Rayleigh-Ritz Method)을 사용하여 해석적으로 결정한다. 이론 모델의 신뢰도를 검증하기 위하여 ANSYS를 사용한 유한요소해석을 수행하고, 풍력발전기 타워 구조의 축소모델을 제작하여 주파수 응답 및 운전 속도에 따른 응답, 공진 여부를 검토한다. 소형 풍력발전기의 국산화 개발 과정에서 심각한 공진 문제를 예방하기 위한 이론 모델을 제시하는 것이 본 연구의 목표이다.

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수  
\*\* 영신정공(주) 기술연구소 연구원  
\*\*\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정

2. 실험 모델의 제원

실제 풍력발전기의 주요 부분인 타워(tower), 허브(hub) 및 발전기, 가이 케이블, 날개 구조를 고려하여 축소모델을 제작하였다. 대관령 실증단지에도 도입된 6kW급 독립형 소형 풍력발전기 INVENTUS 6 모델[3]과 같은 4-날개형으로 제작하였다. 축소모델의 타워 및 날개의 길이는 실물의 약 1/10이며, 나셀(nacelle), 날개 및 허브 사이의 질량비도 실물과 가깝도록 제작하였다. 또한 4개의 가이 케이블로 지지하였고, 타워의 하단 지지 부분도 실물과 같이 핀 구조물로 하여 한쪽 방향으로 회전할 수 있게 하여 구조 특성이 최대한 가깝도록 제작하였다. 실물과 다른 점으로, 날개 부분은 제작상의 어려움 때문에 단순한 판재로 제작하였고, 실내에서 구동시키기 위하여 발전기 대신 모터를 장착하였다.

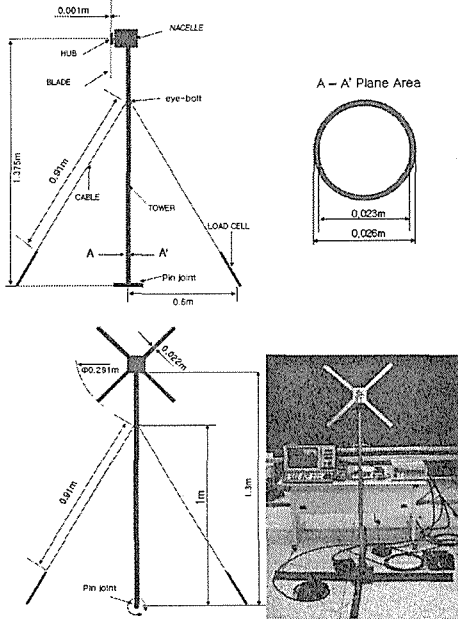


Fig. 1 Wind turbine tower model

Fig.1과 Table 1은 축소모델의 치수와 사진이다. 발전기 모형을 구동시키기 위하여 모형의 나셀부에 24V 범용 직류 모터를 장착하였으며, PB-3B 마이크로프로세서를 사용하여 모터를 구동하였다. 회전 속도의 제어는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 사용하였고, 회전 속도 측정센서로 UGS3120(Hall Effect Sensor)을 사용하였다. Table 2는 구동장치의 제원이다.

Table 1 Specification of the reduced model.

Model	Specification
Hub height	1.375 m
Rotor diameter	0.582 m
Eye bolt height	1 m
Tower length	1.3 m
Cable length	0.91 m
Tower in-diameter	0.023 m
Tower out-diameter	0.026 m
Number of blades	4
Weight	Tower : 1.135kg Nacelle : 2.48kg Hub : 0.145kg Blade(4EA) : 0.24kg Eye bolt(4EA) : 0.2kg cable : 6.94g/m

Table 2 Specification of blade driving devices

Devices	Specification
Microprocessor	PB-3B Micom
Driver	L298N, IRF540
Motor	24V DC Motor
Sensor	UGS3120 Hall Effect Sensor

3. 타워-케이블 계의 고유진동수 해석

3.1 이론해석

발전기-나셀 및 날개를 Fig. 2 와 같이 타워 상단에 집중된 질량으로 단순화 시키고, 레일리-리츠 방법(Rayleigh-Ritz Method)[4] 으로 타워-케이블 계의 고유진동수 및 고유모드를 구한다.

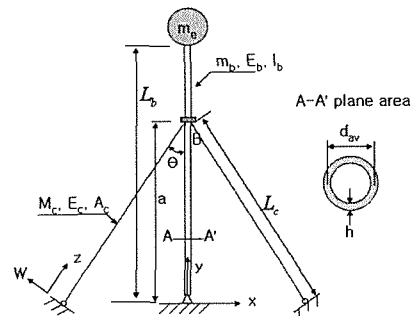


Fig. 2 Simplified model for the theoretical analysis

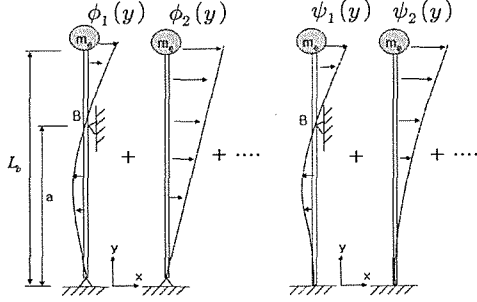
타워의 횡변위  $x(y)$ 와 케이블의 횡방향 처짐,  $W(z)$ 를 다음과 같이 경계조건을 만족시키는 허

용함수(admissible function)  $\phi_i(y), \psi_i(y), \omega_i(z)$ 를 사용하여 표시한다.

$$x(y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^5 C_i \phi_i(y) ; \text{pin-axis rotation} \\ \sum_{i=1}^5 C_i \psi_i(y) ; \text{pin-axis fixed} \end{cases}$$

$$W(z) = \sum_{i=1}^3 q_i \omega_i(z) \quad (1)$$

타워 횡 진동모드는 타워 하단이 1축 핀 지지된 관개로, 타워가 핀축 주위로 회전 가능한 모드와 핀축으로 회전이 억제되는 모드로 구분된다. 이를 고려하여 각 모드를 Fig. 3의 허용함수를 사용하여 표시하였다. 그림에서 B점은 케이블로 지지되는 지점이다.



a) pin-axis rotation      b) pin-axis fixed  
Fig. 3 Admissible functions of the tower.

Fig. 3 a)에서 모드  $\phi_i$ 에는 케이블 지지점에서 단순지지 조건을 고려한 보 굽힘 변형식[5], 핀축 회전에 의한 강제 운동항, 그리고 고차 변형항을 다음과 같이 허용함수로 사용한다.

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

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

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

Fig.3 b)의 핀축 비회전 모드에는 핀 지지점에서 고정단 조건을 고려한 굽힘변형식과 고차항을 다음과 같이 허용함수로 사용한다.

(5)

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

$$\psi_2(y) = y^3 - 3L_b y^2 \quad (6)$$

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

Fig.4의 케이블 횡변위에는 다음과 같이 양단 단순지지된 케이블의 진동 모드를 사용한다.

$$w_n(z) = \sin(n\pi \frac{z}{L_c}) ; n = 1, 2 \quad (8)$$

$$w_3(z) = \frac{z}{L_c} \quad (9)$$

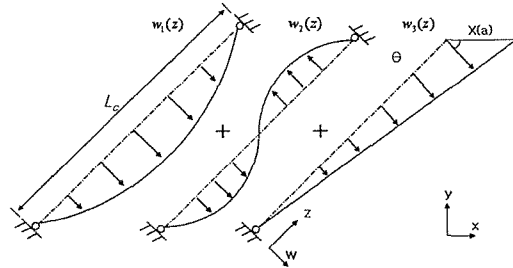


Fig. 4 Admissible functions of the guy cable.

최종적으로 타워-케이블 연결점에서 연속조건을 만족시키려면  $q_3 = x(a) \cos \theta$  이어야 한다. 그러므로 케이블의 횡 방향 처짐식은 다음과 같이 표시된다.

$$W(z) = q_1 w_1(z) + q_2 w_2(z) + x(a) \cos \theta w_3(z) \quad (10)$$

레이레이-리쯔법에 근거하여 레일레이 정수(Rayleigh quotient)를 허용함수의 계수에 대하여 최소화시키는 조건[4]으로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial U_{\max}}{\partial C_i} - \omega^2 \frac{\partial T_{\max}}{\partial C_i} = 0 \quad (11)$$

여기서  $U_{\max}$  와  $T_{\max}$  는 구조계의 최대 위치에너지와 운동에너지로, 구조계가 보(타워), 케이블, 상단 집중질량 및 아이볼트(타워-케이블 연결부)로 구성되므로 다음과 같이 표시된다.

$$U_{\max} = U_{\text{beam}} + U_{\text{cable}} \quad (12)$$

$$T_{\max} = T_{\text{beam}} + T_{\text{cable}} + T_{\text{mass}} \quad (13)$$

$U_{\text{beam}}$  와  $T_{\text{beam}}$ ,  $U_{\text{cable}}$  와  $T_{\text{cable}}$  는 보 및 케이블의

위치 및 운동에너지이고,  $T_{mass}^*$ 는 상단 집중질량의 운동에너지이다. 보의 굽힘 변형을 고려한 위치에너지는 다음과 같다

$$U_{beam} = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} E_b I_b (x''(y))^2 dy \quad (14)$$

$I_b$ 는 강관 보의 면적 관성 모멘트로 다음과 같이 주어진다.

$$I_b = \frac{\pi d_{av}^4 h}{8} \quad (15)$$

4개 케이블의 초기 장력은 동일한 것으로 간주한다. 케이블의 자중에 의한 처짐을 무시한다면 케이블의 위치에너지는 다음과 같다.

$$U_{cable} = \frac{1}{2} \int_0^{L_c} 2T_0 (W'(z))^2 dz + \frac{1}{2} (2 \frac{E_c A_c}{L_c}) x^2(a) \sin^2 \theta \quad (16)$$

$T_0$ 는 케이블 초기장력이다.  $E_{c,eff}$ 는 케이블의 자중에 의한 처짐을 고려한 유효 탄성계수[6]로 다음과 같다.

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \frac{(w_c L_c \sin \theta)^2 E_c A_c}{12 T_0^3}} \quad (17)$$

식(17)에서  $E_c$ 는 케이블의 탄성계수,  $A_c$ 는 케이블의 단면적,  $w_c$ 는 단위 길이당 케이블의 하중이고,  $L_c$ 는 케이블의 길이이다. 한편, 각 부분의 운동에너지는 다음과 같다.

$$T_{beam}^* = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} \frac{m_b}{L_b} x^2(y) dy \quad (18)$$

$$T_{mass}^* = \frac{1}{2} m_c x^2(L_b) \quad (19)$$

$$T_{cable}^* = \frac{1}{2} \int_0^{L_c} \frac{2m_c}{L_c} W^2(z) dz + \frac{1}{2} (\frac{2m_c}{3}) x^2(a) \sin^2 \theta \quad (20)$$

여기서  $m_c$ ,  $m_b$ ,  $m_c$ 는 상단 집중질량, 보 및 케이블의 질량이다. 전술한 위치 및 운동에너지를 식 (11)에 대입하면 다음의 특성 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} (k_{11} - \omega^2 m_{11}) & (k_{12} - \omega^2 m_{12}) & \dots & \dots & (k_{17} - \omega^2 m_{17}) \\ (k_{21} - \omega^2 m_{21}) & (k_{22} - \omega^2 m_{22}) & \dots & \dots & (k_{27} - \omega^2 m_{27}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (k_{n1} - \omega^2 m_{n1}) & (k_{n2} - \omega^2 m_{n2}) & \dots & \dots & (k_{n7} - \omega^2 m_{n7}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_5 \\ q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (21)$$

식 (21)에서 행렬식이 영이 되는 조건으로부터  $\omega^2$ 를 구할 수 있고, 각 고유 진동수에 대하여 구해진 계수 관계를 식(1)에 대입하면 진동 모드가 구해진다.

### 3.2 유한요소해석

ANSYS 9.0[7]을 사용하여 상단의 질량  $m_c$ 를 집중질량요소로, 타워를 보요소로 모델링하였다. 본 연구의 풍력발전기 모델은 4개의 케이블이 타워를 지지하는 구조로 되어 있으므로, 케이블 거동의 모델링이 중요하다. 본 해석에서는 봉 요소(Link 2D Spar)를 이용하여 케이블을 모델링 하였다. 케이블의 거동을 표시하기 위해서는 장력 조건과 영의 굽힘 강성 조건이 필요하다. 장력 조건은 봉 요소에 장력에 상당하는 초기 인장변형률로 만족시켰고, 케이블 축 강성 EA를 만족시키되, 영의 굽힘 강성 조건을 위하여 EI를 영으로 만들어 주었다. 즉, 인장시험을 통하여 탄성계수 E를 측정하고, 그 값에 케이블 횡단면적을 곱한 결과 실제 케이블의 EA값이 85079N으로 구해졌다. 봉 요소의 단면을 매우 작게 하되, 탄성계수를 크게 하여 EA값은 동일하나 EI값은 거의 영이 되도록 만들었다. 6kW 풍력발전기 실물의 1/10로 제작된 축소 모델의 해석에 사용된 제원은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_c &= 2.865kg, m_b = 1.135kg, m_i = 0.2kg, m_c = 0.0063kg \\ L_b &= 1.3m, a = 1m, L_c = 0.91m, d_{av} = 0.0245m, h = 0.0015m \\ E_b &= 210Gpa, E_c A_c = 85079.48N \end{aligned}$$

### 4. 해석결과

케이블의 장력을 변화시키면서 구한 편축 회전 및 편축 고정 1차 횡진동 모드의 고유진동수를 Fig. 5에 보인다. 케이블 장력치 0.6kgf 이상에서는 고유진동수가 일정한 값을 유지한다. 편축 회전모드와 고정 모드 사이의 고유진동수 차이는 거의 없다. 장력 0.2kgf 아래에서는 편축 고정 모드가 회전 모드보다 다소 높은 고유진동수를 보인다. 장력이 영인 경우 편축 회전 모드는 영의 진동수, 즉 강제운동을 하는데 이는 이론상 쉽게 예측되는 결과이다. 장력이 낮은 경우 편축의 고정효과가 진동수에 영향을 주나 장력이 높아지면서 그 효과는 작아져 진동수는 비슷해진다. 이론 해석의 신뢰도를 검증하기 위하여 유한요소해석 및 실험 결과와 비교한다. 고유진동수의 측정은 충격시험[8]으로 구한 주파수응답함수로부터 결정하였다. Fig. 6은 장력을 20kgf로 주었을 때 측정된 주파수응답함수를 보인다. 장력은 케이블을 고정하는 턴버클 부분에 스트레인 게이지형 로드셀을 부착하여 측정하였다.[9] 그림에서 1차 횡진동 모드는 12.25Hz와 12.50Hz의 주파수를 보인다. 2차 모드로 38.75Hz 및 57.5Hz의 편축 회전 및 고정 모드의 주파수 피크를 볼 수 있다. 소형 풍력발전기에서 2차 이상의 모드는 운전범위에서 가진이 안 되는 높은 주파수 대역에

있으므로, 해석에서는 1차 모드만을 검토한다.

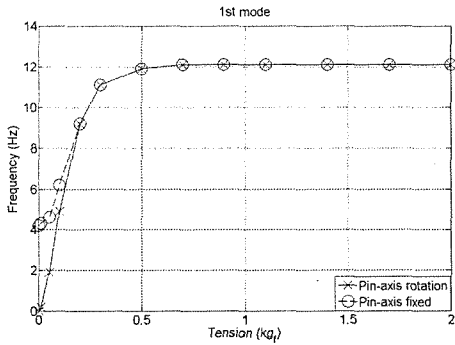
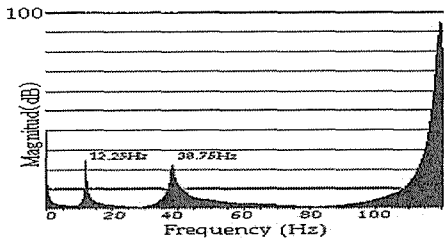
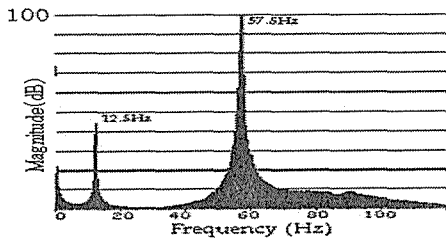


Fig.5 Natural frequency vs. tensional force



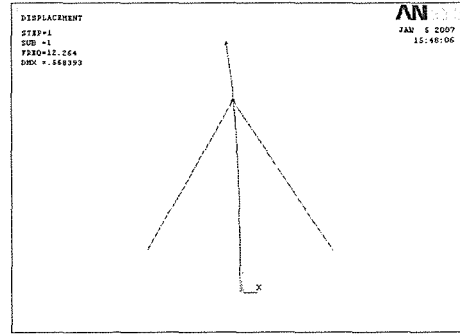
a) pin-axis rotation



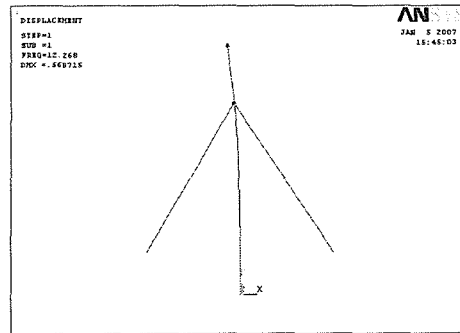
b) pin-axis fixed

Fig. 6 Frequency response function of the reduced tower model(tension : 20Kgf)

12Hz 부근의 모드를 유한요소해석으로 구한 결과를 Fig.7에 보인다. 두 모드는 거의 동일한 모양을 보이나, Fig.7 a)의 편축 회전 모드는 하단 편 지지부를 회전축으로 하는 타워 횡진동 모드이며, b)의 편축 고정 모드는 하단 지지부를 고정단으로 하는 횡진동 모드이다. 두 모드 모두 발전기가 위치한 타워 상단에서 가장 큰 진동을 보인다. 낮은 장력에서는 후자가 전자보다 높은 고유진동수를 가지나, 장력이 높아지면서 그 차이는 무시할 정도로 작아지는 것이 이론, 유한요소해석, 실험 모두에서 확인되었다. 각각의 모드에 대한 이론해석, 유한요소해석 및 측정 결과를 Fig.8에서 비교한다.



a) 1st Pin-axis rotation mode

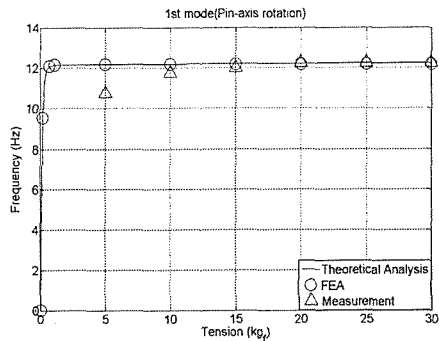


b) 1st pin-axis fixed mode

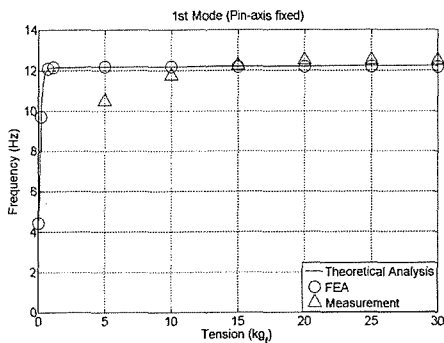
Fig. 7 Pin-axis rotation and pin-axis fixed modes

모든 장력 값에서 이론해석치와 유한요소해석치는 거의 동일한 값을 갖는다. 이는 레일레이-리프법에 근거한 이론모델의 신뢰도를 입증하며, 유한요소 모델링에서 봉요소의 모델링 방법이 적합함을 의미하기도 한다. 해석치를 실험치와 비교할 때는 다소 차이를 보인다. 15kgf 이상의 고장력하에서는 해석과 실험 결과는 거의 일치하나, 낮은 장력에서는 실험치가 상당히 낮게 나온다. 이는 케이블에 부착된 장력 측정 로드셀과 턴버클 효과를 식(17)의 이론 모델에서 고려하지 못하는 데 기인한다. 로드셀과 턴버클의 무게로 케이블의 실제 처짐이 이론 및 유한요소해석에서보다 커지므로 식(17)의 케이블 유효탄성계수가 낮아지고 그 결과 고유진동수가 떨어진다. 또한 장력이 낮아지면 하단 조립부의 헐거움 효과가 더욱 커지는데, 이 문제는 이론이나 해석에서는 다루기 어렵다. 이와 같은 장력에 따른 고유진동수의 변화는 풍력발전기 타워의 조립 설치에 유의할 점을 제시한다. 케이블 장력이 어느 한계 이상을 초과하면 고유진동수는 더 이상 증가하지 않는다. 또한 한계치 아래에서는 고유진

동수가 많이 떨어지게 되므로 운전속도 범위에서 공진 가능성이 높아진다. 따라서 과도한 장력으로 케이블에 과도한 응력을 발생시킬 필요도 없으며, 고유진동수가 낮아져 공진되는 것도 피하여야한다. 타워의 고유진동수를 수렴시키기 위하여 설치시에 케이블의 장력 한계치를 반드시 지키도록 작업 지침서에 명시할 필요가 있다.



a) pin-axis rotation



b) pin axis fixed

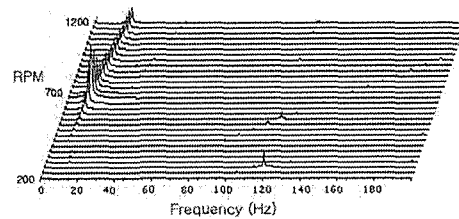
Fig. 8 Comparison of the analytical and measured natural modes

### 5. 타워 구조물의 진동 응답

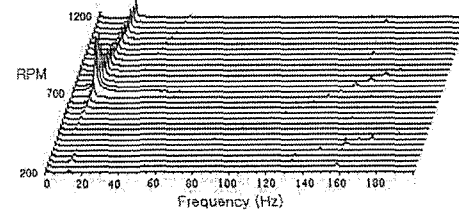
풍력발전기는 회전에 의하여 주기적인 동하중을 받는다. 타워가 높은 수백 kW급 중대형 풍력발전기의 경우는 고도에 따른 풍속의 차이로 주기적인 풍력변동이 발생하여 날개통과주파수(회전수 x 날개수) 성분이 가장 지배적으로 작용한다[10]. 그러나 수 kW 급의 소형 풍력발전기에서는 풍력변동보다는 회전불평형, 헐거움, 부정렬 등의 기계적 요인에 의한 주기적 성분이 지배적이다[11]. 여기

서는 200rpm ~ 1200rpm 범위에서 회전수에 따른 주파수 스펙트럼을 구하여 전술한 고유진동수에서의 공진 여부를 검토하였다.

Fig.9는 케이블 장력 20kgf 하에서 회전수를 변화시키면서 구한 주파수 응답을 보인다. 두 축 방향 모두 200rpm ~ 600rpm에서는 뚜렷한 피크성분이 관찰되지 않는다. 이후 회전속도가 증가하면서 회전주파수의 조화성분들(harmonics)이 관찰된다. 두드러진 특징으로, 650rpm 이후 회전주파수 성분의 레벨이 점차 증가하여 핀 축 회전모드에서는 730rpm에서, 핀 축 고정모드에서는 740rpm에서 최대 피크를 보이다 다시 레벨이 감소한다. 730rpm, 740rpm에 해당하는 주파수 성분은 각각 12.25Hz 와 12.5Hz이다. 두 주파수 성분은 앞에서 확인되었던 정지 상태의 1차 고유진동수(12.25Hz, 12.5Hz)와 일치한다.



a) pin-axis rotation



b) pin-axis fixed

Fig. 9 Waterfall plot (tension: 20kg)

결과적으로 두 회전동 모드의 1차 고유진동수 (12.25Hz, 12.5Hz)가 730rpm, 740rpm에서 회전불평형에 의하여 가진되어 공진을 일으키고 있다. 이와 같은 공진 상태를 피하기 위해서는 운전속도 범위를 730rpm 아래로 낮추거나, 고유진동수를 20Hz(1200rpm) 위로 올려야 한다. 축소모델이 아닌 실물의 경우, 진동수와 운전속도 범위는 다르나, 이러한 조건은 동일하게 적용되므로 본 연구에서 제시된 이론 모델은 케이블 지지된 소형 풍력발전기의 공진 주파수와 운전속도 범위를 정하는 데 효과적으로 사용될 수 있다.

## 6. 결론

케이블 지지된 풍력발전기의 고유진동수를 예측하기 위하여 레일레이-리쯔법에 근거한 이론 해석 모델을 제시하였다. 축소 모델을 대상으로 하는 비교 검증에서 공진에 관계되는 1차 고유진동수의 이론치와 유한요소해석치는 거의 일치하였다. 또한 장력 한계치 이상에서는 실험치와 해석치가 서로 근접함으로써, 제시된 이론 모델의 정당성이 입증되었다. 회전속도에 따른 주파수응답을 측정할 결과, 이론으로 예측된 고유진동수에서 큰 공진이 발생하였다. 고유진동수와 운전속도 범위의 관계 설정이 구조 안전성과 발전 효율 측면에서 매우 중요하며, 제시된 이론해석 모델을 사용하면 설계 변수(타워-케이블의 구조적 제원) 및 설치 변수(장력 조건)를 결정하는 것이 가능하다.

## 참 고 문 헌

- [1] 유능수, 6kW 급 소형 풍력발전기의 실증연구, 산업자원부보고서, 2005.
- [2] 박무열, 은성용, 김석현, “풍력발전기 축소 구조모델의 진동특성 연구”, 산업기술연구 제24권 B호, pp.83~87. 2005.
- [3] <http://www.kgelectric.co.za/PDFfiles>, INVENTUS GmbH.
- [4] Thomson, W.T., 1993, “Theory of Vibration with Applications,” Prentice Hall.
- [5] T. J. Lardner, *An Introduction to The Mechanics of Solids*, 2nd edition, McGraw Hill Book Company, 1972.
- [6] P. H. Wang, T. Y. Tang, and H. N. Zheng, “Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods,” *Computers and Structures*, Vol. 82, pp.329~346, 2004.
- [7] ANSYS Release 9.0 Documentation, ANSYS, Inc.
- [8] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd edition, Research Studies Press Ltd., 2000.
- [9] 박무열, 풍력발전기 타워-케이블계의 진동특성, 강원대학교 공학석사학위논문, 2006.
- [10] 김석현, 남윤수, 은성용, “750kW 급 풍력발전기의 진동특성,” 한국소음진동공학회논문집 제15권 2호, pp. 219~145, 2005.
- [11] W. Victor, *Machinery Vibration : Alignment*, McGraw-Hill Book Company, 2000.