

6kW 풍력발전기 타워-케이블계의 고유진동수 해석

Natural Frequency Analysis of the Tower-Cable System of a 6kW Wind Turbine

김 석 현* 박 무 열**
Kim, Seock-Hyun Park, Mu-Yeol

Abstract

Vibration characteristics of a 6kW 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 and compared 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.

키워드 : 케이블 지지된 풍력발전기 타워, 타워-케이블 공진, 레일레이_리츠 방법
Keywords : Cable supported wind turbine tower, Tower-cable resonance, Rayleigh Ritz method

1. 서론

최근 고유가에 따른 에너지 다변화 대책 및 친환경 에너지 개발에 대한 필요성이 커지면서, 국내 산간 및 해안 지역이 가지고 있는 풍부한 풍력 자원을 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 선진국에 비하여 국내 풍력 시장은 아직 미미한 수준이나, 근래 정부, 민간업체 및 연구기관간의 적극적인 협조로 현재 2MW급 대형 풍력발전기의 국산화가 이루어졌고[2], 이와 함께 독립형으로 사용되는 6kW, 10kW급 등의 소형 풍력발전기에 대한 개발도 활발히 진행되고 있다. 그러나 중소형 풍력발전기의 경우, 중소업체 위주로 국산화 개발

이 진행된 관계로, 발전 성능이나 구조 안전성 및 전력품질 등에 대한 체계적인 연구에 어려움이 많은 실정이다. 특히 풍력발전기의 구조 진동 문제는 발전기의 구조 안전성뿐만 아니라 발전 성능 측면에서도 중요한 현안이 된다[3,4]. 수 kW 내지 수십 kW 정도의 중소형 독립형 풍력발전기는 강관형 타워 상단에 발전기 및 날개를 설치하고, 타워 상부에 연결된 3~4개의 가이 케이블(Guy Cable)이 타워를 지지하는 구조로 되어 있다. 그 구조적 특성 및 운전속도에 따라 타워 구조계의 1차 고유진동수가 운전 범위 내에서 회전수의 1/2차나 1차 조화성분에 의하여 공진 되는 경우가 빈번하다[5]. 이러한 상황을 방지하기 위해서는 타워-케이블계의 1차 공진주파수가 작동속도 범위 밖에 있도록 설계하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 4개의 가이 케이블로 지지된 수평축 4 날개 6kW 풍력발전기의 모니터링 결과로부터 공진 상태를 진단한다. 공진에 관련되는 고유진동수의 예측을 위한 해석

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 교신저자

** 영신정공(주) 기술연구소 연구원

모델을 제시한다. 해석에서 상단의 발전기는 집중 질량으로 모델링하고, 타워-케이블 진동계를 레일 레이-리츠법 (Rayleigh-Ritz Method)을 사용하여 고유진동수를 구한다. 주요 설계변수가 고유진동수에 미치는 효과를 분석하여, 국산화 소형 풍력발전기의 공진 문제에 대비하는 것이 본 연구의 목표이다.

2. 6kW 독립형 풍력발전기의 진동 문제

대관령 풍력실증단지에서 시험한 6kW 독립형 풍력발전기(INVENTUS 6)의 진동 특성을 검토한다. Fig. 1과 Table 1은 그 구조와 제원을 보인다. 상단부에 가속도계를 설치하여 로터 속도별로 측정된 주파수 스펙트럼은 Fig. 2와 같다. 그림에서 진동의 최대 피크는 147rpm부근에서 발생하는 것으로 확인되었다. 이 상태에서 주파수 분석한 결과를 Fig. 3에 보인다. 큰 진동은 1차 피크 주파수 1.22Hz에 의하여 지배되며, 2차 피크 2.45Hz 성분이 약하게 가세하고 있다. 타워-케이블계의 고유진동수를 파악하기 위하여, 정지 상태에서 타워에 충격을 가하여 진동을 측정하였다. 그 결과 타워-케이블계의 1차 고유진동수가 1차 피크의 1.22Hz와 동일하게 나왔다. 따라서 회전수 147rpm의 1/2차 성분에 의하여 1차 고유진동수가 공진되는 것을 알 수 있다. 2차 피크의 2.45Hz 성분은 회전수 147rpm에 일치하므로, 회전 불평형에 기인한 응답으로 볼 수 있다. Table 1의 운전속도 범위를 감안할 때, 결과적으로 타워-케이블 계의 1차 고유진동수가 운전속도의 상한치 부근에서 공진되는 것을 알 수 있다. 이러한 공진 위험성을 방지하기 위해서는 타워-케이블 계의 1차 고유진동수를 높여 운전속도에 의한 공진 범위 훨씬 밖에 위치하도록 할 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

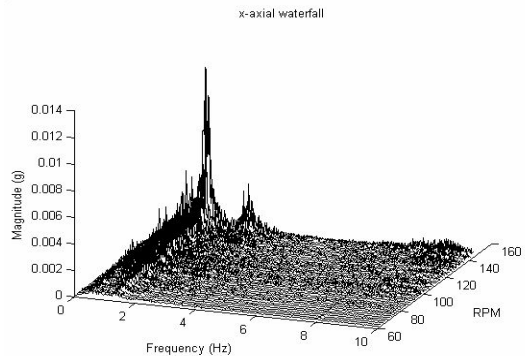


Fig. 2 Water fall plot of W/T vibration.

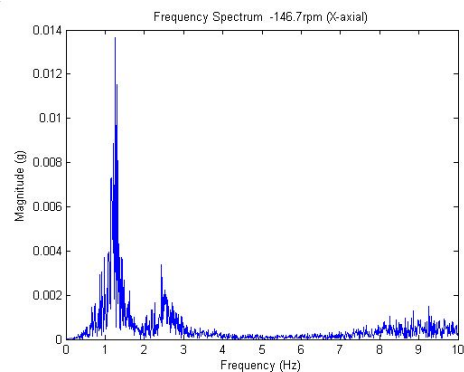


Fig. 3 Frequency spectrum at 146.7rpm.

3. 타워-케이블 계의 고유진동수 해석

6kW 풍력발전기는 타워 상단에 발전기 및 날개가 설치된 구조이다. 복잡한 구조계의 고유진동수를 구하기 위해서는 유한요소해석을 필요로 하나, 공진에 관련되는 저차 진동모드의 고유진동수는 단순한 모델의 이론해석을 통해서도 예측이 가능하다. 즉, Fig. 4 와 같이, 날개와 발전기 부분을 집중 질량으로 단순화 시키고, 레일리-리쯔법[6]으로 타워-케이블계의 고유진동수 및 고유모드를 구할 수 있다. 이 방법은 유한요소해석에 비해 변수 분석을 용이하게 할 수 있는 장점이 있다.

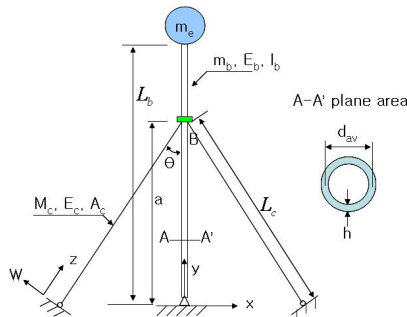


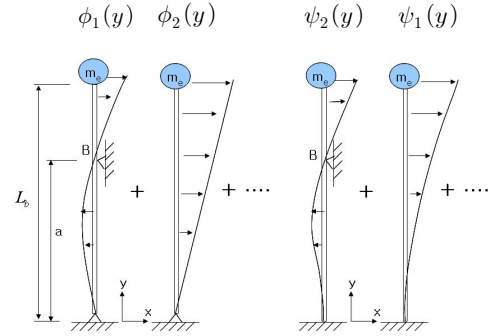
Fig. 4 Simplified model for the theoretical analysis

타워의 횡변위 $x(y)$ 와, 케이블의 횡방향 처짐 $W(z)$ 를 다음과 같이 경계조건을 만족시키는 허용함수(admissible function) $\phi_i(y), \psi_i(y), \omega_i(z)$ 를 사용하여 표시한다.

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

$$W(z) = \sum_{i=1}^3 q_i \omega_i(z) \quad (2)$$

식 (1)에서 타워 횡 진동모드는 타워 하단이 1축 핀 지지되었기 때문에, 타워가 편축 주위로 회전이 가능한 모드와 편축으로 회전이 구속되는 모드로 구분된다. 이를 고려하여 각 모드를 Fig. 5의 허용함수를 사용하여 표시한다. 그림에서 B점은 케이블로 지지되는 지점이다.



a) pin-axis rotation

b) pin-axis fixed

Fig. 5 Admissible functions of the tower.

Fig. 3 a)에서 모드 $\phi_i(y)$ 는 단순지지 조건을 고려한 보의 굽힘 변형항과, 편축 회전에 의한 타워의 강제 운동을 다음과 같이 허용함수를 사용하여 고려한다[7].

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

$$\phi_2(y) = \frac{y}{L_b} \quad (4)$$

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

Fig. 5 b)의 편축 구속 모드는 하단 고정 조건의 굽힘 변형항을 다음의 허용함수를 사용하여 고려한다[7].

$$\psi_1(y) = \begin{cases} \frac{3(L_b - a)}{2a} (-y^3 + ay^2) & ; 0 \leq y \leq a \\ y^3 - 3L_b y^2 + \frac{3}{2}a(3L_b - a)y - \frac{a^2}{2}(3L_b - 7a) & ; a \leq y \leq b \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi_2(y) = y^3 - 3L_b y^2 \quad (7)$$

$$\psi_n(y) = \left(\frac{y}{L_b}\right)^2 \left(1 - \frac{y}{L_b}\right)^{(n-1)} ; n = 3, 4, 5 \quad (8)$$

Fig. 6의 케이블 횡변위에는 다음과 같이 양단 단순지지 된 케이블의 1,2차 진동 모드와, 케이블 강제 모드를 사용한다.

$$w_n(z) = \sin(n\pi \frac{z}{L_c}) \quad ; n = 1, 2 \quad (9)$$

$$w_3(z) = \frac{z}{L_c} \quad (10)$$

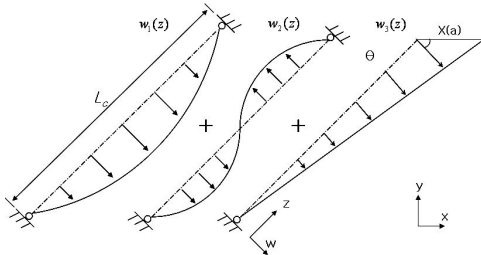


Fig. 6 Admissible functions of the guy cable.

그런데, 타워와 케이블은 연결점에서 연속조건 $q_3 = x(a) \cos \theta$ 를 만족시켜야 하므로, 결국 케이블의 처짐식은 다음과 같이 표시된다.

$$W(z) = q_1 w_1(z) + q_2 w_2(z) + x(a) \cos \theta w_3(z) \quad (11)$$

레이레이-리쯔법에 따라 레일레이 정수(Rayleigh quotient)를 허용함수의 계수에 대하여 최소화시키면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial U_{\max}}{\partial C_i} - \omega^2 \frac{\partial T_{\max}^*}{\partial C_i} = 0 \quad (12)$$

여기서 U_{\max} 와 T_{\max}^* 는 구조계의 최대 위치에너지와 운동에너지로, 구조계가 보(타워), 케이블, 상단 집중질량으로 구성되므로 다음과 같이 표시된다.

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

$$T_{\max}^* = T_{\text{beam}}^* + T_{\text{cable}}^* + T_{\text{mass}}^* \quad (14)$$

U_{beam} 와 T_{beam}^* , U_{cable} 와 T_{cable}^* 는 보 및 케이블의 위치 및 운동 에너지이고, T_{mass}^* 는 상단 집중질량의 운동에너지이다. 보의 굽힘 변형을 고려한 위치에너지는 다음과 같다

$$U_{\text{beam}} = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} E_b I_b (x''(y))^2 dy \quad (15)$$

I_b 는 강관 보의 면적 관성 모멘트로 다음과 같이 주어진다.

$$I_b = \frac{\pi d_{av}^3 h}{8} \quad (16)$$

4개 케이블의 초기 장력은 동일한 것으로 간주한다. 케이블의 위치에너지는 다음과 같다.

$$U_{\text{cable}} = \frac{1}{2} \int_0^{L_c} 2T_0 (W'(z))^2 dz + \frac{1}{2} (2 \frac{E_{c,eff} A_c}{L_c}) x^2(a) \sin^2 \theta \quad (17)$$

T_0 는 케이블 초기장력이다. $E_{c,eff}$ 는 케이블의 자중에 의한 처짐을 고려한 유효 탄성계수로 다음과 같다[8].

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \frac{(w_c L_c \sin \theta)^2 E_c A_c}{12 T_0^3}} \quad (18)$$

식(18)에서 E_c 는 케이블의 등가탄성계수, A_c 는 케이블의 단면적, w_c 는 단위 길이당 케이블의 하중이고, L_c 는 케이블의 길이이다. 한편, 각 부분의 운동에너지는 다음과 같다.

$$T_{\text{beam}}^* = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} \frac{m_b}{L_b} x^2(y) dy \quad (19)$$

$$T_{\text{mass}}^* = \frac{1}{2} m_c x^2(L_b) \quad (20)$$

$$T_{\text{cable}}^* = \frac{1}{2} \int_0^{L_c} \frac{2m_c}{L_c} W^2(z) dz + \frac{1}{2} (\frac{2m_c}{3}) x^2(a) \sin^2 \theta \quad (21)$$

여기서 m_e , m_b , m_c 는 상단 집중질량, 보 및 케이블의 질량이다. 전술한 위치 및 운동에너지를 식(12)에 대입하면 다음의 특성 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} (k_{11} - \omega^2 m_{11}) & (k_{12} - \omega^2 m_{12}) & \cdots & \cdots & (k_{17} - \omega^2 m_{17}) \\ (k_{21} - \omega^2 m_{21}) & (k_{22} - \omega^2 m_{22}) & \cdots & \cdots & (k_{27} - \omega^2 m_{27}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (k_{71} - \omega^2 m_{71}) & (k_{72} - \omega^2 m_{72}) & \cdots & \cdots & (k_{77} - \omega^2 m_{77}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_5 \\ q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (22)$$

식 (22)의 행렬식이 영이 되는 조건으로부터 ω^2 을 구할 수 있고, 각 고유 진동수에 대하여 구해진 계수 조건을 식(1)과 식(2)에 대입하면 진동 모드를 얻을 수 있다.

4. 해석 결과

케이블은 가는 강선을 여러 겹으로 꼬은 구조로, 그 등가탄성계수는 제원상에 공급되지 않은 상태이다. 본 연구에서는 등가탄성계수를 일반적인 구조용 강재의 탄성계수 부근에서 변화시키면서 1차 고유진동수의 변화를 검토하였다. 해석에 사용된 각 부분의 실측 데이터는 다음과 같다.

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

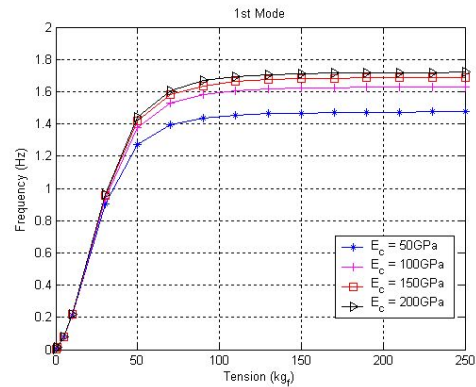
먼저 케이블 장력이 고유진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 주어진 케이블 등가탄성계수 조건 하에서 장력 변화에 따른 1차 고유진동수의 변화를 Fig. 7에 보인다. 1차 진동모드는 타워 상단이

수평 운동하되, 타워 높이에 따른 횡 변위의 위상 변화를 보이지 않는다. 이러한 모드는 핀축 회전 및 핀축 구속의 두 모드로 분리되어 2개의 고유진동수를 갖게 된다. Fig. 7 a)의 핀축 회전 모드는 장력이 영일 때, 핀축 회전 강체 운동으로 0의 고유진동수를 보인다. 장력 증가에 따라 고유진동수는 증가한다. 흥미로운 점은 장력이 어느 정도 이상이 되면 고유진동수의 증가추세가 현저히 둔화되는 현상이다. 100kgf 이후에서는 장력이 증가하더라도 진동수에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타난다. 이러한 현상은 케이블의 등가 탄성계수가 변하더라도 대동소이하다. 다만, 케이블의 등가 탄성계수를 높이면 고유진동수 상한치를 높일 수 있다. 이러한 결과로부터, 타워 설치시 케이블의 장력을 어느 한계 이상 높여도 고유진동수는 잘 증가하지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 핀축 구속모드에서도 유사하게 나타난다. Fig. 7 b)에서 핀축 구속 모드에서는 장력이 영이 되어도, 핀축의 구속으로 외팔보의 1차 진동 주파수를 갖는다. 장력의 증가에 따라 진동수는 점차 증가한다. Fig. 8은 150kgf 장력 하에서 케이블 탄성이 진동수에 미치는 효과를 보인다. 케이블 탄성계수나 어느 정도 이상에서는 고유진동수의 증가가 현저히 둔화된다. 핀축 구속 효과 때문에 핀축 회전모드보다는 고유진동수가 약간 높게 나온다. 따라서 1차 공진이 발생한다면 핀축 회전모드가 먼저 발생된다. 이 결과는 동일한 풍력발전기 모델에 대한 진동 모니터링 연구에서 확인된 바 있다[5].

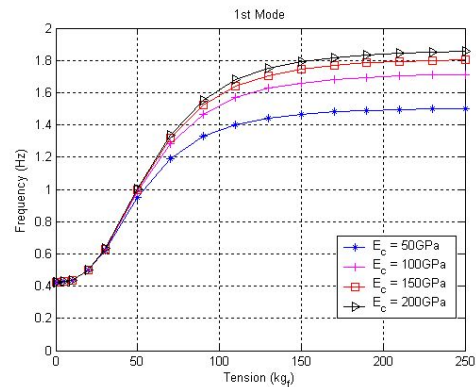
Fig. 7(a)에서, 본 연구모델의 1차 고유진동수 1.22Hz는 장력을 증가시켜 최소한 1.4Hz 이상으로 높일 수 있을 것으로 보인다. 등가탄성계수를 200Gpa로 하는 경우, 1.7Hz 정도까지도 가능함을 알 수 있다.

다음에는 장력을 일정하게 유지하고, 케이블의 등가탄성계수를 변화시키면서 핀축 회전모드의 1차 고유진동수의 변화를 관찰하였다. Fig. 8에서 등가탄성계수의 증가에 따라 고유진동수가 증가하나 그 증가율은 점차 떨어지는 것을 볼 수 있다.

장력은 케이블의 자중에 의한 처짐을 감소시킨다. 유효탄성계수는 케이블의 처짐에 의하여 식(18)로 표시되는 보정된 등가탄성계수이다. 결과적으로 장력이 커지면 식(18)에서 자중 처짐이 작아지므로 유효탄성계수는 케이블 등가탄성계수로 수렴된다. Fig. 9는 장력에 대한 유효탄성계수의 변화를 보인다. 탄성계수가 작을수록 낮은 장력에서 유효탄성계수는 등가탄성계수로 수렴됨을 알 수 있다. 이는 케이블의 등가탄성계수가 낮을수록 작은 장력 하에서 자중 처짐이 작아지는데 기인한다.



a) pin axis rotating mode



b) pin axis fixed mode

Fig. 7 Tensional force vs. frequency under the consideration of the cable sag.

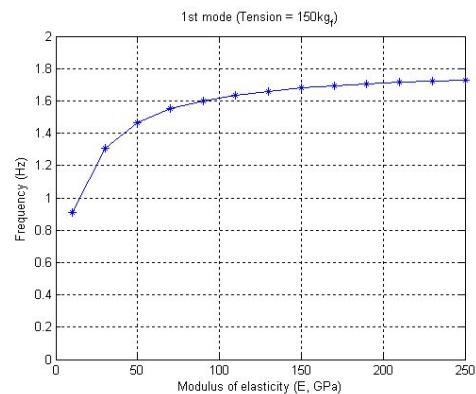


Fig. 8 Cable elasticity vs. frequency (tension:150kgf).

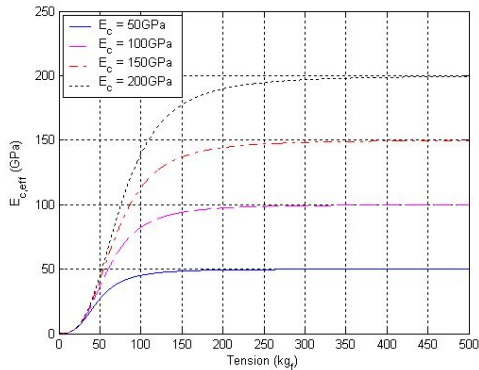


Fig. 9 Effective elasticity vs. tensional force.

5. 결론 및 토론

6kW 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링을 통하여 타워-케이블계의 진동응답 특성을 진단하였다. 이로부터, 작업 범위 내에서 1차 진동 모드의 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.

참 고 문 헌

- [1] N.S.Yoo and etl., "Field Test and Evaluation of 750kW Wind Turbine", *MCIE Research Report* 2001-N-WD11-P-11, 2004.
- [2] Unison Corp, <http://www.unison.co.kr>
- [3] Hau,E., *Wind Turbines*, Springer Verlag, 2000.
- [4] Kim, S. H., Nam, Y. S. and Eun, S. Y., "Vibration Characteristics of the Tower Structure of a 750kW Wind Turbine Generator," *Transactions of the KSNVE*, Vol. 15, No. 2, pp. 219~145, 2005.
- [5] Kim,S.H., Yoo,N.S., Kim,Y.H., "Vibration Monitoring and Power Performance Evaluation of a Small Stand-Alone Wind Turbine Generator", *Transaction of The Korea Society For Noise and Vibration Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp.114~120, 2007.

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