

## 750 kW 풍력발전기 타워 구조의 진동 특성<sup>#</sup>

### Vibration Characteristics of the Tower Structure of a 750kW Wind Turbine Generator

김 석 현\* · 남 윤 수\* · 은 성 용\*\*

Seockhyun Kim, Y. S. Nam and Sungyong Eun

(2004년 12월 3일 접수 ; 2005년 1월 25일 심사완료)

**Key Words** : Wind Turbine Generator(풍력발전기), Tower Resonance(타워 공진), Blade Passing Frequency(날개 통과 주파수), Vibration Monitoring System(진동 모니터링 시스템), Tower Lumped Mass Model(타워 집중 질량 모델)

#### ABSTRACT

Vibration response of the tower structure of a 750 kW wind turbine (W/T) generator is investigated by measurement and analysis. Acceleration response of the W/T tower under various operation condition is monitored in real time by the vibration monitoring system using LabVIEW. Resonance state of the tower structure is diagnosed in the operating speed range. Resonance frequency range of the test model is investigated with the wind speed data of the test site. To predict the tower resonance frequency, tower is modeled as an equivalent beam with a lumped mass and Rayleigh energy method is applied. Calculated tower bending frequency is in good agreement with the measured value and the result shows that the simplified model can be used in the design stage of the W/T tower.

#### 1. 서 론

최근 석유가의 불안정과 환경 문제의 심각성은 청정 대체 에너지원으로서 풍력발전에 대한 관심을 고조시키고 있다. 서구의 경우, 독일을 선두로 미국, 스페인, 덴마크 등이 풍력 발전 산업을 주도하면서, 1996년 이후 세계 풍력 시장의 최근 연평균 신장률은 무려 40%에 이르고 있다.<sup>(1)</sup> 아시아권에서도 인도, 중국, 일본 등이 풍부한 풍력 자원을 바탕으로 상업

용 풍력단지의 조성에 박차를 가하고 있다. 국내 풍력 시장은 아직 미미한 수준이나, 최근 대체에너지 보급에 대한 정부의 적극적 지원으로 산, 학, 관, 연 공동 연구 개발 사업이 활발히 진행되고 있다. 대관령 및 영덕에 98MW급 및 48MW급 상업용 단지가 조성 중에 있으며,<sup>(2)</sup> 구 대관령 휴게소 위치에는 수입 또는 국산화 개발된 발전기의 성능을 국제적 기준에 근거하여 종합적으로 평가하기 위한 '대관령 풍력발전 실증 연구 단지'가 조성되었다.<sup>(3)</sup> 그러나, 최근 에야 중/대형 급 풍력발전기의 국산화 개발이 이루어지고 있는 관계로, 현재까지 국내에서는 발전 성능이나 구조 안전성 및 전력품질 등에 대한 체계적인 연구가 매우 미흡한 상황이다.

풍력발전기 시스템 설계 시 고려하는 많은 요소 중에서도 발전기의 구조 진동 문제는 발전기의 구조 안전성뿐만 아니라 발전 성능에 관련해서 중요한 현안 이 된다.<sup>(4-6)</sup> 이에 관련하여 Negm과 Maalawi는 안정

† 책임저자 : 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부  
E-mail : seock@kangwon.ac.kr

Tel : (033) 252-2595, Fax : (033) 257-4190

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

\*\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

# 이 논문은 2004추계학술대회 우수발표논문으로 추천되었음.

성

을 고려한 타워 구조의 최적 설계 방법을 제시한 바 있으며,<sup>(7)</sup> Koss와 Melbourne는 제작 후의 공진 대책을 제시하였다.<sup>(8)</sup> 타워 구조는 날개를 포함하는 발전 부분의 회전에 의한 기계적 불평형력과, 날개에 작용하는 공기역학적인 변동 하중을 받는다. 따라서 회전수의 조화 성분으로 가진되는 점은 다른 회전기계에서와 동일하다. 중대형 풍력발전기의 경우, 고도에 따른 풍속의 차이로 날개의 위치에 따른 추력의 변동이 불가피하고, 그 결과 날개 통과 주파수(blade passing frequency)가 지배적인 가진 성분이 된다. 작업 속도 범위 내에서 타워 구조의 저차의 굽힘 고유진동수가 날개 통과 주파수에 의하여 공진될 때, 구조적으로 불안전해지므로 공진 속도를 피하여 운전하여야 하며, 풍력에너지를 제대로 활용하지 못할 수도 있다.<sup>(5,6)</sup>

이 연구에서는 국산화 개발에 앞서 실증용으로 도입된 750 kW급 풍력발전기(J48, 프랑스 Jeumont사)를 대상으로 다양한 발전 조건 하에서 타워 구조의 진동을 모니터링 한다. 모니터링 된 가속도 응답 신호를 분석하여 발전기의 진동특성을 파악하고, 발전 성능과의 관계를 검토함으로써 향후 중대형 풍력발전기의 국산화 개발 및 운영에 필요한 정보를 제공하고자 한다. 공진 속도의 예측을 위하여 타워를 등가 보로, 날개를 포함한 상단의 발전기 부분을 집중 질량으로 모델링하여 레일레이 에너지법(Rayleigh energy method)을 적용하는 방법의 실효성도 검토한다. 향후 국산화 개발 단계에서 필요한 타워의 진동 설계 정보를 제공하는 것이 이 연구의 궁극적인 목표이다.

## 2. 풍력발전기 및 타워의 제원

Fig. 1과 Table 1은 J48 풍력발전기의 제원이다. 지반의 앵커에 고정 지지된 원통 셀 구조의 타워 상단에 3-날개 발전기가 장착된다. 타워는 Fig. 2에서와 같이 하부에서 상부로 올라가면서 원통 셀의 직경과 두께가 약간씩 감소하는 형태이다. 타워는 상, 하 2개의 부분으로 구조용 강관을 사용하여 각각 제작된 후, 중간 플랜지에서 볼트로 체결된다. 중간 및 상단, 하단의 플랜지는 타워 구조의 굽힘 강성을 증가시키는 효과를 가져온다.

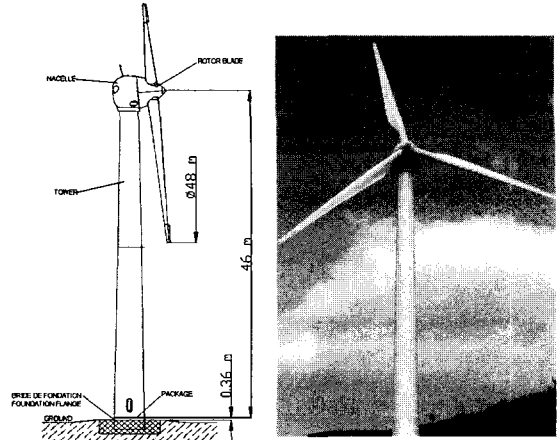


Fig. 1 750 kW wind turbine generator

Table 1 Specification of 750 kW W/T

Model	J48(JEUMONT)
Rotor shaft	Horizontal
Hub height	46 m
Rotor diameter	48.2 m
Number of blades	3
Operation speed	8-26.5 rpm
Rated wind speed	14 m/s
Cut-in wind speed	4 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Survival wind speed	59.5 m/s During 5 seconds
Power control system	Stall
Rotor-generator coupling	Direct-gearless
Weights	Rotor with blades: 9000 kg Nacelle: 30000 kg Tower : 40000 kg

## 3. 타워 구조계의 공진 주파수

풍력발전기의 초기 개발 단계에서는 타워의 1차 굽힘 고유진동수가 날개 통과 주파수보다 높도록 견고하게 설계되었으나, 현재는 제작 비용을 고려하여 고유진동수를 낮춘 유연 구조물이 주종을 이룬다.<sup>(6)</sup> 연구 대상 발전기의 날개 회전 속도 범위는 8 rpm~25.6 rpm이고, 3-날개 형 이므로 날개 통과 주파수 대역은 0.40 Hz~1.28 Hz가 된다. 따라서 이 범위에 구조계의 고유진동수가 존재하게 되면 공진의 위험성이 있다. 중대형 발전기의 경우, 보통 2차 이후의 타워 굽힘 진동모드는 작업 범위에서의 가진 주파수보다 높게 위치하므로, 타워 모드는 1차 진동

수의 설계가 매우 중요하다. 발전기 전체 구조계의 고유진동수는 유한요소해석을 통하여 예측해 볼 수 있다. 그러나 이 연구 모델은 날개 및 발전 부분의 상세한 구조 데이터가 제공되지 않는 외산 풍력 발전기이다. 여기서는 단순화된 모델을 적용하여 그 실효성을 검토해본다. 타워를 균일 외팔보로 처리하고 날개를 포함하는 발전 부분을 타워 상단의 집중 질량으로 단순화시킨다. Fig.3은 상단에 집중 질량을 갖는 타워 모델이다.

이 경우 레일레이 에너지 방법을 사용하여 다음의 1차 고유진동수를 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{3EI/l^3 (0.2357m_b + m_e)} \quad (1)$$

여기서  $m_b$ 는 타워 질량,  $m_e$ 는 날개를 포함하는 발전 부분의 총 집중 질량,  $l$ 은 타워 길이이다.  $I$ 는 균일 보의 면적 관성 모멘트로 다음 식으로 구해진다.

$$I = \frac{\pi \cdot d_{av}^3 \cdot h_{av}}{8} \quad (2)$$

타워와 상부 발전 부분의 질량은 제작사의 제공치를 사용하였다. 균일보의 면적 관성모멘트를 구하기 위하여 다음과 같이 타워 상/하단의 평균 직경 및 평균 두께를 사용하였다.

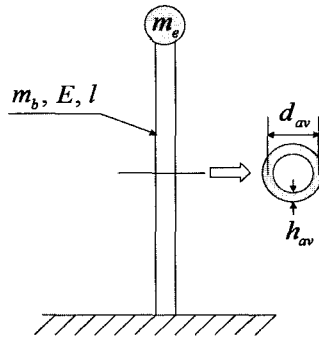


Fig. 3 Concentrated mass model of W/T

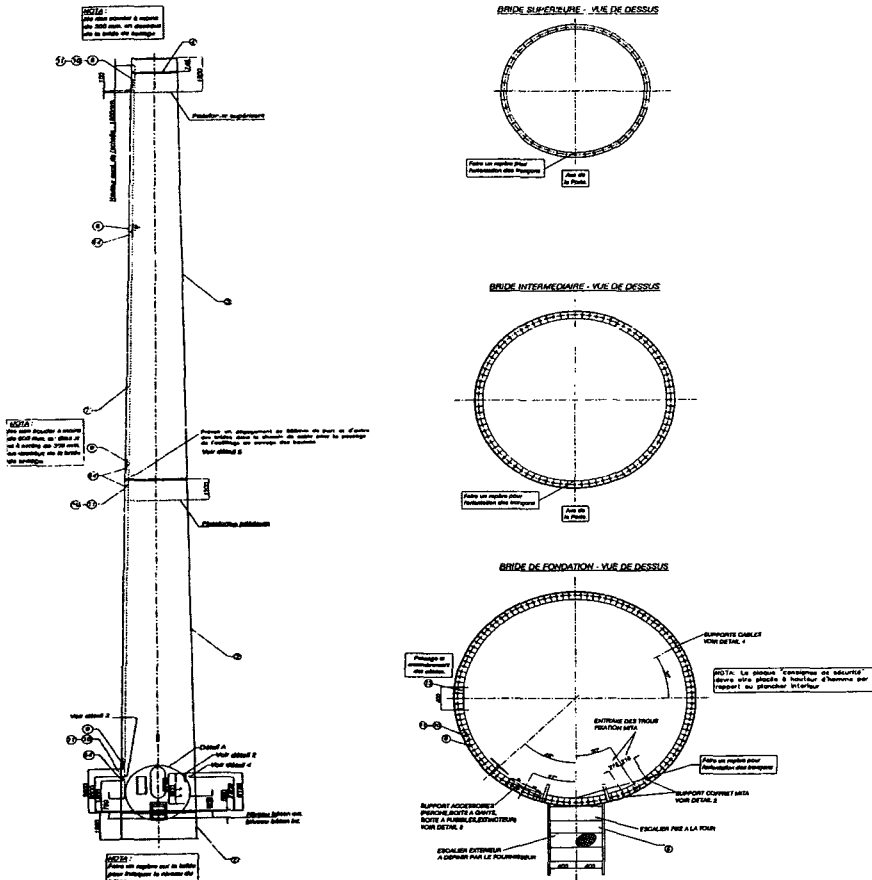


Fig. 2 Drawing of the tower structure

$$m_e = 39000 \text{ kg}, m_b = 40000 \text{ kg}$$

$$d_{av} = 2.98 \text{ m}, h_{av} = 0.0115 \text{ m}$$

$$E = 210 \text{ Gpa}, l = 43.5 \text{ m}$$

계산 결과 타워 1차 굽힘 모드의 고유진동수는 0.69 Hz로 나왔다. 이 결과는 날개통과 주파수 성분을 가진항으로 볼 때, 13.8 rpm에서 공진이 발생하는 것을 의미한다. 단순 모델에서 사용한 평균 직경 및 평균 두께는 추후 상세 모델을 사용하여 추가적인 검토가 필요할 것이다.

#### 4. 타워 구조의 진동 모니터링

##### 4.1 모니터링 방법

이 연구에서의 풍력타워는 46m가 넘는 대형 구조물이므로 가진기를 사용하는 모드시험법으로 고유진동수와 모드를 구하는 것이 쉽지 않다. 이 연구에서는 다양한 작업 조건하에서의 진동 응답 스펙트럼을 모니터링 하여 공진점을 확인한다. 다양한 풍속 조건하에서 장기간에 걸쳐 데이터를 취득하기 위하여 대관

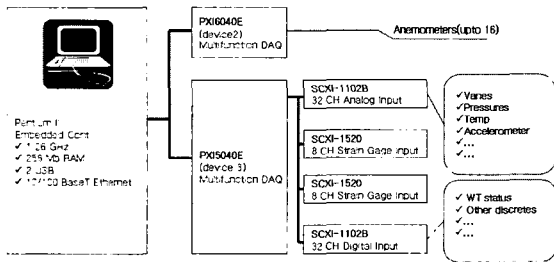


Fig. 4 Block diagram of the acceleration and wind condition measurement

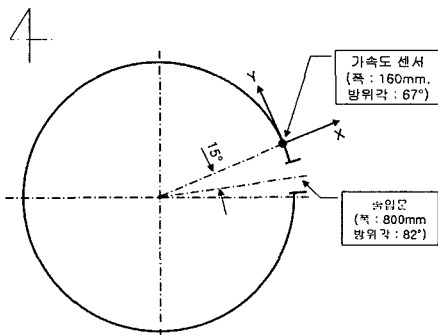
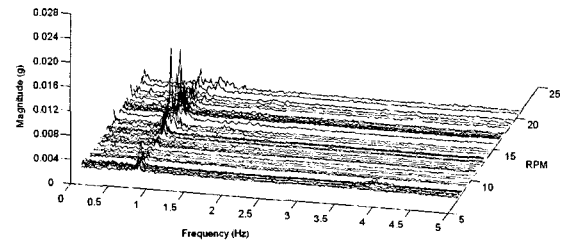


Fig. 5 Position of the acceleration on the tower circumference

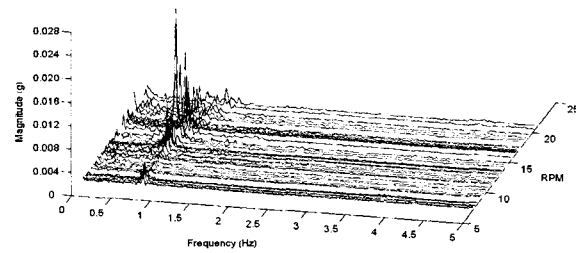
령 풍력실증 연구단지의 실시간 모니터링 시스템을 사용하였다. 모니터링 시스템은 LabVIEW를 사용하여, 진동 신호 외에 풍속, 풍향 등의 풍황과, 작업속도, 요각도 등의 발전 상태 신호도 동시에 실시간으로 취합할 수 있도록 Fig. 4와 같이 구성되었다.<sup>(10)</sup> 진동은 일체식 IC칩 가속도계(ADXL105, Analog Devices 사)를 사용하여 지면으로부터 43.5m 높이의 타워 상단 플랜지상에서 Fig. 5의 X,Y 수직 방향으로 측정하였다. 저주파수의 진동을 감안하여 10 Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하였고, 매 100초 구간의 신호에 대하여 Matlab을 사용하여 푸리에 변환을 수행하였다. 풍속과 풍향은 1 Hz로 샘플링 하여 매 100초 구간의 평균치를 취하였다. 풍속은 실증 연구단지내의 기준 풍황 관측대(reference meteorological mast) 상 46 m 높이에서 측정되었으며 풍력 실증 단지 교정법을 통하여 타워 상단 동일 높이에서의 풍속으로 교정되었다.<sup>(11)</sup>

##### 4.2 모니터링 결과

Fig. 6은 X,Y 방향에서 측정된 가속도 스펙트럼을 날개 회전 속도별로 그린 결과이다. 다양한 작업 속도 하에서 모니터링 한 결과, 풍속이나 회전 속도에 무관하게 0.72 Hz~0.76 Hz의 주파수 성분에 의하여 진동이 지배되는 것으로 나타났다. 이 성분의 피크



(a) X-direction



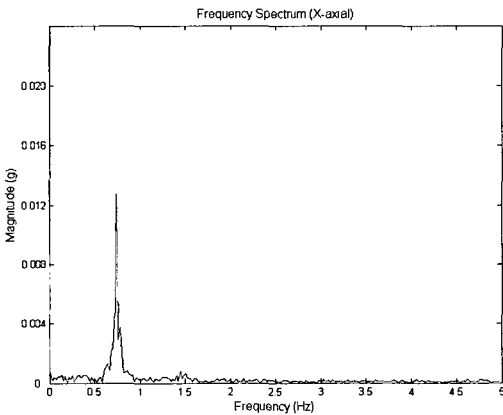
(b) Y-direction

Fig. 6 3-dimensional spectrum under operation

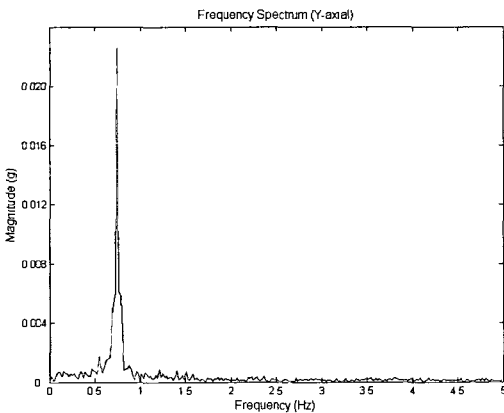
레벨은 회전속도에 따라 다르나, 피크의 주파수 값이 일정하게 유지되는 점과 이론에 의한 예측치(0.69 Hz)를 고려할 때, 풍력 발전기 구조계의 1차 고유진동수임을 알 수 있다.

피크 주파수 성분이 0.72 Hz~ 0.76 Hz의 범위에서 미세하게 변하는 이유는 타워 구조가 정확하게 축대칭이 아닌데 기인한다. 원통 셀 구조의 미세한 비대칭성은 굽힘 진동에서 미세한 진동수의 차이를 갖는 모드 쌍을 발생시키는 것으로 알려져 있다.<sup>(12)</sup> 피크 레벨은 15 rpm 부근에서 X, Y 방향 모두 급격히 증가하여 최대가 것으로 확인 되었다. Fig. 7은 14.87 rpm에서 측정된 가속도 스펙트럼을 보인다. X, Y 두 방향 모두에서 0.74 Hz의 높은 피크 성분을 확인할 수가 있다. 0.72 Hz~0.76 Hz의 타워지배 1차 공진 모드를 고려할 때, 3차 성분에 의한 공진 속도 범위는

14.4 rpm~15.2 rpm이 된다. 따라서 14.87 rpm 부근에서의 높은 피크 성분은 회전 속도의 3차 성분에 의하여 타워 1차 굽힘 진동수가 공진되어 발생하는 것이 분명하다. 모니터링 과정에서 이 속도 부근에서는 데이터를 얻기가 매우 힘들었는데, 이 부근에서 공진을 피하기 위하여 속도 제어되는 것으로 확인 되었다. Fig. 6에서 타워의 1차 고유진동수가 회전수 2차 성분에 의하여 공진 되는 22 rpm이나, 4차 성분으로 공진 되는 11 rpm 부근에서는 피크 레벨이 별로 크지 않다. 이는 회전부의 기계적 불평형보다는 풍하중의 변동(날개통과주파수 성분)이 더 지배적인 가진 성분임을 의미한다. 앞에서 집중 질량 이론 모델로 예측한 공진 속도 범위가 13.8rpm이었음을 감안할 때, 발전 부분의 총질량만을 고려한 외팔보 모델로도 설계 단계에서 공진 대역을 어느 정도 예측할 수 있을 것으로 보인다.



(a) X component



(b) Y component

Fig. 7 Acceleration spectrum at 14.87 rpm

### 5. 풍력현황과 진동의 관계

Fig. 8은 가속도와 함께 측정된 풍속-회전속도 관계를 보인다. 그림에서 데이터 한 개(\*표시점)는 100 초 동안의 평균 풍속과 회전속도를 의미한다. 그림에서 발전 가능한 풍속은 3.5 m/s 이상으로 그 이하는 전력을 소모하는 상태이다. 풍속 12 m/s 이후에는 일정한 속도로 작업하며, 컷오프 속도보다 약간 아래인 22 rpm 이내에서 작업하는 것을 볼 수 있다.

공진이 발생하는 15 rpm 부근에서 데이터가 거의 존재하지 않는 것은 이 속도를 피하여 작업하도록 제어되는 것을 의미한다. 정격 풍속하의 작업 속도

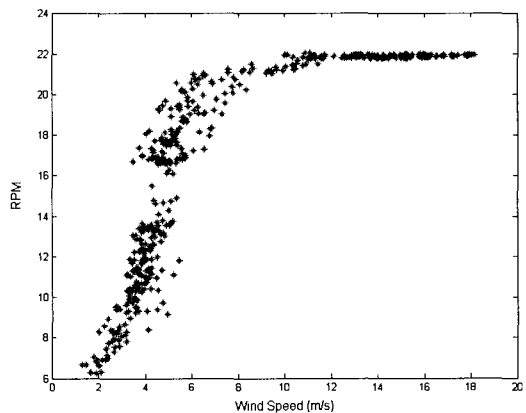


Fig. 8 Wind speed and rotor speed

가 22 rpm 임을 감안하면, 타워 1차 고유진동수 (0.72 Hz~0.76 Hz)가 정격 작업 상태에서의 날개 통과주파수 성분(1.1 Hz) 아래에 위치하므로 연구대상 풍력발전기는 유연한 타워(soft tower) 구조로 설계 되었음을 의미한다. 그러나 22 rpm의 2차 조화성분인 0.73 Hz는 공진 대역에 위치한다.

이 연구 모델의 경우, 2차 가진 성분에 의한 진동이 크지 않은 것으로 보아 회전부의 밸런싱이 잘 된 상태로 추정된다. 이는 향후 국산화 개발 시 충분한 밸런싱 기술의 필요성을 의미한다. 날개 통과 가진 주파수에 의한 공진이 발생하는 풍속은 5 m/s 정도로 정격 풍속 14 m/s 보다 현저히 낮다. 따라서 공진 점의 위치는 발전 효율 측면에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 보인다.

## 5. 결론 및 토론

대관령 풍력실증연구단지의 750 kW급 풍력발전기 (J48)의 진동을 모니터링 하고 해석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 로타의 회전속도에 무관하게 0.72 Hz~0.76 Hz의 피크 주파수 성분이 타워의 진동을 지배하며, 이 성분은 타워의 1차 굽힘 모드 고유진동수로 밝혀졌다.

(2) 15 rpm 부근에서 작업 시, 날개 통과 주파수에 의한 공진으로 피크 레벨은 급격히 증가하였다. 이는 날개 통과 주파수가 가장 지배적인 가진 성분임을 의미한다.

(3) 연구 대상 발전기에서는 안정성을 고려하여 15rpm 부근의 공진 대역을 신속히 피하도록 속도 제어되는 것으로 확인되었다.

(4) 날개를 포함한 발전기 부분을 집중 질량으로 모델링 한 균일 보 이론을 사용한 결과, 타워 1차 고유진동수는 0.69 Hz로, 공진 속도는 13.3 rpm으로 측정 결과에 매우 가깝게 계산되었다. 이는 단순 모델로 설계 단계에서 공진 대역을 어느 정도 예측할 수 있음을 보인다.

(5) 풍속대비 로터 회전수 관계를 측정한 결과, 정격풍속(14 m/s)에 비해 공진 풍속은 5 m/s 정도로 낮게 나왔다. 이는 공진 대역이 발전 효율 측면에서 별 문제가 되지 않음을 의미한다. 향후 풍력발전기의 국산화 개발 시, 발전 단지의 연간 풍황 데이터를 고

려하여 발전기 구조계의 공진 대역을 설계하는 것이 필요할 것이다.

## 후 기

풍력발전기의 진동 모니터링을 지원해준 강원대학교 풍력발전시스템연구센터에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- (1) Wind Force 12, European Wind Energy Association and Green Peace.
- (2) <http://www.unison.co.kr>
- (3) 유능수 외, 2002, "대관령 풍력발전 실증연구", 풍력기술연구회 2002년 하계학술발표회 초록집.
- (4) Burton, T., 2002, Wind Energy Hand Book, John Wiley and Sons, Ltd.
- (5) Hau, E., 2000, Wind Turbines, Springer Verlag.
- (6) Spera, D. A., 1994, Wind Turbine Technology, ASME Press.
- (7) Negm, H. M. and Maalawi, K. Y., 2000, "Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers", Computers and Structures, Vol. 74, pp. 649~666.
- (8) Koss, L. L. and Melbourne, W. H., 1995, "Chain Dampers for Control of Wind-induced Vibration of Tower and Master Structures", Engineering Structures, Vol. 17(9), pp. 622~625.
- (9) Sarkar, P. K., 1996, "Approximate Determination of the Fundamental Frequency of a Cantilevered Beam with Point Masses and Prestraining", Journal of Sound and Vibration, Vol. 195 (2), pp. 229~240.
- (10) 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, 2003, "LabVIEW를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발", 한국정밀공학회는문집, 제20권, 제 5 호, pp. 92~97.
- (11) 남윤수, 유능수, 이정완, 2002, "풍력발전기 성능 실증을 위한 단지 교정 방법", 강원대학교 산업기술연구, 제 22 권, A호, pp. 49~57.
- (12) Soedel, W., 1993, Vibration of Shells and Plates, Marcel Dekker, Inc.