

750kW 풍력발전기 타워 구조의 진동 특성 Vibration Characteristics of the Tower Structure of a 750kW Wind Turbine Generator

김석현[†] · 남윤수* · 은성용**

Seockhyun Kim, Y.S.Nam, Sungyong Eun

Key Words : Wind Turbine Generator(풍력발전기), Tower Resonance(타워 공진), Blade Passing Frequency(블레이드 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 750kW wind turbine generator is investigated by measurement and analysis. Acceleration response of the tower under various operation condition is monitored in real time by vibration monitoring system using LabVIEW. Resonance state of the tower structure is diagnosed in the operating speed range. 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 wind turbine 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 성장률은 무려 40%에 이르고 있다.⁽¹⁾ 아시아권에서도 인도, 중국, 일본 등이 풍부한 풍력 자원을 바탕으로 상업용 풍력단지를 조성에 박차를 가하고 있다. 국내 풍력 시장은 아직 미미한 수준이나, 대관령 및 영덕에 98MW급 및 48MW급 상업용단지가 조성 중에 있으며⁽²⁾, 수입 또는 국산화 개발된 발전기의 성능을 국제적 기준으로 평가하기 위한 대관

령 풍력발전 실증 연구단지가 조성되었다.⁽³⁾ 본 연구에서는 실증용으로 도입된 프랑스 Jeumont 사의 J48 무기어형 (gearless type) 풍력발전기를 대상으로 발전 상태에서의 타워구조의 진동 상태를 평가한다. 타워 구조는 발전기 중량에 의한 정 하중 (static load)은 물론, 날개 및 발전기의 회전에 의한 주기적인 기계적 불평형력과, 회전 날개에 작용하는 공기역학적인 변동 하중을 받는다. 따라서 회전수의 조화 성분이 주요 가진력으로 작용하게 된다. 특히, 블레이드 통과 주파수(blade passing frequency) 성분은 타워 진동에 지배적인 가진 항으로 알려져 있다. 수백 kW 이상의 중대형 풍력발전기의 경우, 블레이드 통과 주파수 성분이 타워의 1차 굽힘 고유진동수를 공진시키는 상황이 작업 속도 범위 내에서 발생할 수 있다.^(4,5) 이 경우, 구조 안전성 문제가 발생하거나, 발전에 유리한 풍황 조건을 제대로 활용하지 못하게 된다. 이에 관련하여 Negm 과 Maalawi는 안정성을 고려한 타워 구조의 최적 설계 방법을 제시하고 있으며⁽⁶⁾, Koss 와 Melbourne는 제작 후의 공진 대책을 제시한 바 있

† 책임저자 : 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail : seock@kangwon.ac.kr
Tel : (033) 252-2595, Fax : (033) 257-4190

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 발전기 타워의 공진 예측을 위한 해석 모델을 제시하고 실험적으로 검증한다. 블레이드를 포함한 발전기 부분의 상세한 구조적 데이터가 제작사로부터 제공되지 않는 현실에서, 입수 가능한 기본 데이터와 타워 구조물의 도면 자료에 근거하여 풍력발전기 구조계의 동특성을 예측한다. 구조계의 고유진동수 예측을 위하여 타워를 등가 보로, 상단의 발전 부분을 집중 질량으로 모델링하여 레일리 에너지법(Rayleigh Energy Method)을 적용한다. 다양한 풍향 및 작업 속도 하에서 타워 구조의 진동 응답 상태를 측정하여 공진 상태를 진단한다. 구조 안정성 및 발전 효율과 관련하여, 향후 풍력발전기의 국산화 개발 단계에서 필요한 타워 구조의 설계 정보를 제공하는 것이 본 연구의 목표이다.

2. 풍력발전기 및 타워의 제원

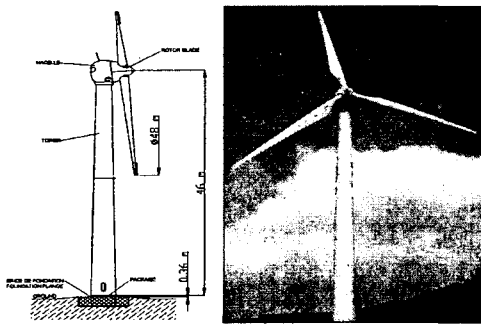


Fig. 1 750kW wind turbine generator

Table 1 Specification of 750kW 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 : 9000kg nacelle: 30000kg tower : 40000kg

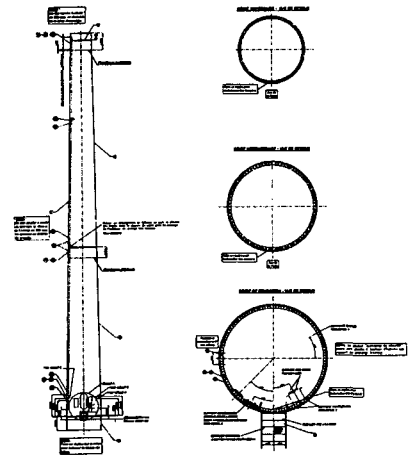


Fig. 2 Drawing of the manufactured tower structure

Fig.1과 Table 1은 J48 풍력발전기의 제원이다. 지반의 앵커에 고정 지지된 원통 쉘 구조의 타워 상단에 3-블레이드 발전기가 장착된다. 타워는 Fig.2에서와 같이 하부에서 상부로 올라가면서 원통 쉘의 직경과 두께가 감소하는 형태이고, 상, 하단 및 중간에 원형의 플랜지를 갖는다.

3. 타워 구조계의 공진

Fig.3은 3-블레이드형 발전기의 공진 선도(resonance diagram)에서 타워 구조의 유형을 보인다. 수평축은 정격속도(rated rotor speed, n_R)에 대한 회전속도(n)의 비이고, 종축 값은 조화 가진 성분들이 정격 회전 주파수의 몇 배가 되는지를 의미한다. 풍력발전기의 초기 개발단계에서는 타워의 1차 굽힘 고유진동수가 블레이드 통과 주파수인 3P 성분보다 높도록 설계하였으나, 현재는 비용을 고려하여 고유진동수를 낮춘 유연 구조물이 주종을 이룬다.⁽⁵⁾ 연구 대상 발전기는 속도 제어형으로 발전 속도범위는 8rpm~25.6rpm이다. 따라서 회전 주파수 대역은 0.13Hz ~ 0.43Hz이고, 블레이드 통과 주파수 대역은 0.40Hz ~ 1.28Hz 가 된다. 따라서 이 범위에 구조계의 고유진동수가 존재하게 되면 공진의 위험성이 있다. 해석을 위해서는 상세한 구조 데이터가 필요하나, 블레이드는 외형적인 치수와 중량만이 제공된다. 국내에서 제작된 타워는 상단의 나셀 연결부, 하부 기초 및 출입문에서 부분적으로 복잡한 구조로 되어 있으나 전반적으로는 원통 쉘의 형상을 기본 골격으로 한다.

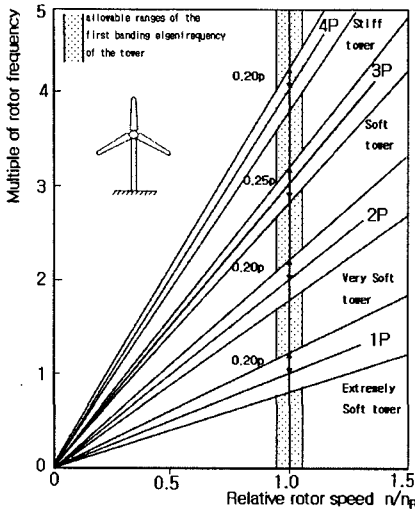


Fig.3 Tower stiffness in the resonance diagram of 3-bladed wind turbine.

원통형 타워의 중대형 발전기의 경우, 2차 이후의 타워 굽힘 진동모드는 작업 범위에서의 가진 주파수보다 훨씬 높게 위치하므로, 타워 모드는 1차 진동수의 설계가 가장 중요하다. 한편, 블레이드를 집중질량으로 모델링하는 경우, 2차 이상의 고차 모드로 가면 오차가 발생하나, 구조계의 1차 진동 모드에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.⁽⁹⁾ 이러한 현실을 감안하여 본 연구에서는 Fig.4에서와 같이 타워를 제외한 모든 부분을 상단의 집중 질량으로, 또한 원통 셀을 동일한 굽힘 강성과 질량을 갖는 등가 보로 모델링하여 공진 주파수를 예측하였다.

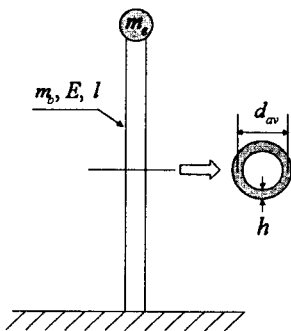


Fig. 4 Concentrated mass model of W/T.

이 경우 레일레이 에너지 방법을 사용하여 다음과 같이 1차 고유진동수를 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾

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

여기서 m_b 는 타워 질량, m_e 는 상단의 총 집중 질량, l 은 타워 길이이다. l 은 등가 보요소의 단면의 면적 관성 모멘트로 식 (2)로 구한다.

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

타워와 상부 발전 부분의 질량은 제작사의 제공치를 사용하였다. 타워 상하단의 직경과 두께는 상부로 올라가면서 약간씩 증가하는데, 높이에 대하여 균일하다고 보고 상하단의 평균치를 다음과 같이 사용하였다.

$$\begin{cases} m_e = 39000 \text{ kg} , m_b = 40000 \text{ kg} \\ d_{av} = 2.98 \text{ m} , h = 0.0115 \text{ m} \\ E = 210 \text{ Gpa} , l = 43.5 \text{ m} \end{cases}$$

계산 결과 타워 1차 굽힘 모드의 고유진동수는 0.69Hz로 나왔다. 이 결과는 3P 성분을 주 가진 원으로 볼 때, 13.8rpm으로 회전할 때 공진이 발생하는 것을 의미한다.

4. 타워 구조의 진동 측정

4.1 진동 모니터링 시스템

풍력 타워는 야외에 설치된 대형 구조물이므로 고유진동수와 모드를 실험적으로 구하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 작동 상태에서 풍하중과 기계적 변동 하중이 타워 고유진동수를 가진 하는 것으로 보고, 진동 응답 스펙트럼을 관찰하여 공진점을 확인하였다. 다양한 작업 조건하에서 장시간의 실시간 모니터링을 위하여 구축된 대관령 풍력실증 연구단지의 모니터링 시스템을 사용하였다.⁽¹¹⁾ 진동은 지면으로부터 43.5m 높이의 타워 상단 플랜지 부분에서 측정되었다. Fig.5에 보이는 일체형 IC칩 가속도계(Analog Devices 사, 모델명 ADXL105)를 사용하여 Fig.6의 X,Y 두 방향으로 각각 측정하였다. 발전하는 동안, 센서로부터의 신호는 Fig.7의 장치도에 표시된 바와 같이 LabVIEW를 사용하여 풍속 및 회전속도와 함께 실시간으로 모니터링 되었다.

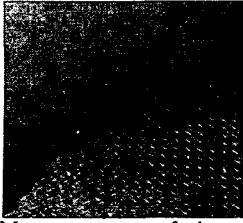


Fig. 5 Measurement of the acceleration

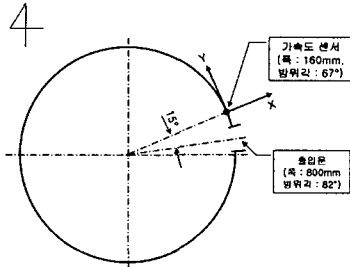


Fig. 6 Position of the acceleration on the tower circumference.

10Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하여 매 100초 구간의 신호에 대하여 Matlab을 사용하여 푸리에 변환을 수행하였다. 풍속과 풍향은 1Hz로 샘플링 하여 매 100초 구간의 평균치를 취하였다. 측정은 기준 풍향 관측대 (reference metreoro-logical mast) 상 46m 높이에서 측정되었으며 풍력 실증 단지 교정법을 통하여 타워 상단 동일 높이에서의 풍속으로 교정되었다.⁽¹²⁾

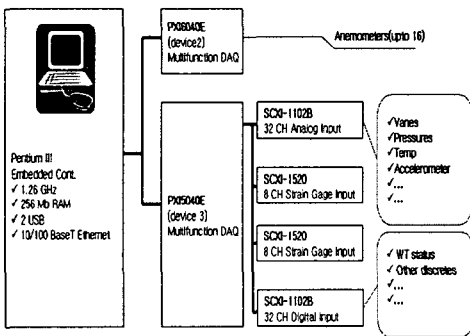
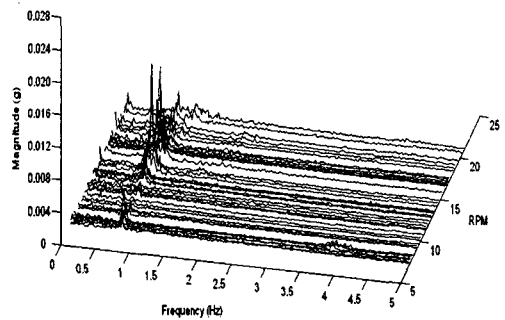


Fig. 7 Block diagram of the acceleration and wind condition measurement.

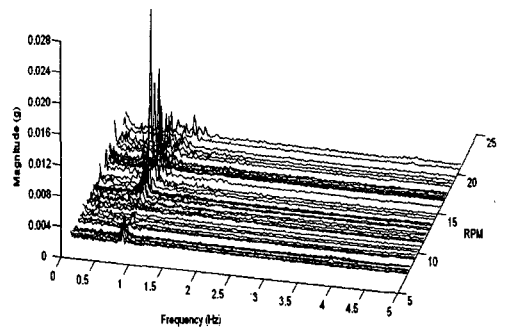
4.2 측정 결과

Fig.8은 X,Y 방향에서 측정된 응답 스펙트럼을

회전 속도별로 그린 결과이다. 가장 특징적인 점은 풍속이나 회전속도에 무관하게 진동이 0.72Hz ~ 0.76Hz의 주파수성분에 의하여 지배되는 점이다. 이 주파수 성분의 피크는 전 작업 속도에서 지속적으로 발생되고 있다. 그 레벨은 회전속도에 따라 차이가 있었으나 주파수 값이 일정하게 유지되는 점과 해석에 의한 예측치를 고려하면 풍력 발전기 구조계의 1차 고유진동수임을 알 수 있다. 0.72Hz ~ 0.76Hz의 미세한 주파수 변화는 타워 구조가 정확하게 축대칭이 아닌데서 발생하는 1차 굽힘 모드 쌍의 존재를 의미한다. Fig.9는 회전속도에 따른 1차 피크 주파수 성분의 레벨을 보인다. 모니터링 시스템을 사용하여 취득한 데이터 가운데서는 14.8rpm의 속도에서 최대 피크가 발생하였다. 14.8rpm에서의 블레이드 통과 주파수는 0.74Hz로, 이 성분이 구조계의 1차 고유진동수를 공진시키고 있음을 알 수 있다. 2P성분이 고유진동수에 일치하는 22rpm 이나, 4P성분이 고유진동수에 가까운 11rpm 부근에서는 피크 레벨이 별로 크지 않다. 이로부터 3P성분이 가장 지배적인 가진 성분임을 확인할 수 있다.



(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig. 8 3-dimensional spectrum under operation.

앞에서 집중 질량 이론 모델로 예측한 공진 작동 범위가 13.8rpm임을 감안할 때, 단순한 이론 모델과 기본적인 데이터만으로도 공진 대역을 예측할 수 있음은 매우 고무적이다. Fig.10은 가속도와 함께 측정된 풍속대비 회전속도 관계를 보인다. 그림에서 데이터 한 개(*표시점)는 100초 동안의 평균 풍속과 회전속도를 의미한다. 그림에서 발전 가능한 풍속은 3.5m/s 이상으로 그 이하는 전력을 소모하는 상태이다. 풍속 12m/s 이후에는 일정한 속도로 작업하며, 컷오프 속도보다 약간 아래인 22rpm 이내에서 작업하는 것을 볼 수 있다. 주목할 점으로 공진이 발생하는 15rpm 부근은 데이터가 거의 존재하지 않는 것으로 보아, 이 지점을 철저히 피하도록 속도 제어됨을 재차 확인할 수 있다. 정격 속도를 22rpm 으로 보면, 고유진동수는 3P 성분 아래에 위치하므로 연구대상 풍력발전기는 유연한 타워(soft tower) 구조로 설계되었음을 알 수 있다. 또한, 공진이 발생하는 풍속은 5m/s 정도로 정격 풍속 14m/s 보다 현저히 낮다. 따라서 공진 점의 위치는 발전 효율 측면에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 보인다.

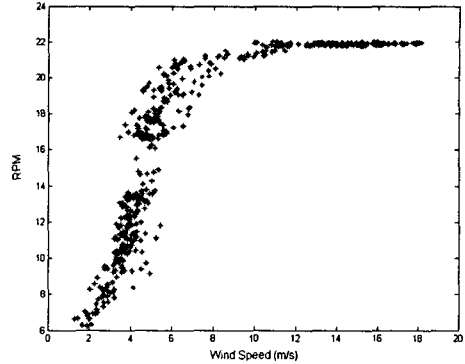


Fig. 10 Wind speed and rotor speed.

5. 결론 및 토론

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

- 1) 로타의 회전속도에 무관하게 0.72Hz ~ 0.76Hz의 피크 주파수 성분이 타워의 진동을 지배하는 것으로 확인되었다. 이 성분은 타워의 1차 굽힘 모드 고유진동수로 밝혀졌다.
- 2) 15rpm 부근에서 작업 시, 블레이드 통과 주파수가 고유진동수에 일치하면서 피크 레벨은 급격히 증가하였다. 이는 블레이드 통과 주파수가 가장 지배적인 가진 성분임을 의미한다.
- 3) 연구 대상 발전기에서는 안정성을 고려하여 15rpm 부근의 공진대역을 신속히 피하도록 속도제어 하는 것으로 확인되었다.
- 4) 블레이드를 포함한 발전기 부분을 집중 질량으로 모델링 한 등가 보 이론을 사용한 결과, 타워 1차 고유진동수는 0.69Hz로, 공진 속도는 13.3rpm으로 측정 결과에 매우 가깝게 계산되었다. 이는 단순 모델로 설계 단계에서 공진 대역을 효과적으로 예측할 수 있음을 보인다.
- 5) 풍속대비 로터 회전수 관계를 측정된 결과, 정격 풍속(14m/s)에 비해 공진 풍속은 5m/s 정도로 낮게 나왔다. 이는 공진 점 위치가 발전 효율 측면에 문제가 되지 않음을 의미한다. 향후 풍력발전기의 국산화 개발 시, 발전 단지의 연간 풍향 데이터를 고려하여 발전기 구조계의 공진 대역을 설계하는 것이 필요할 것이다.

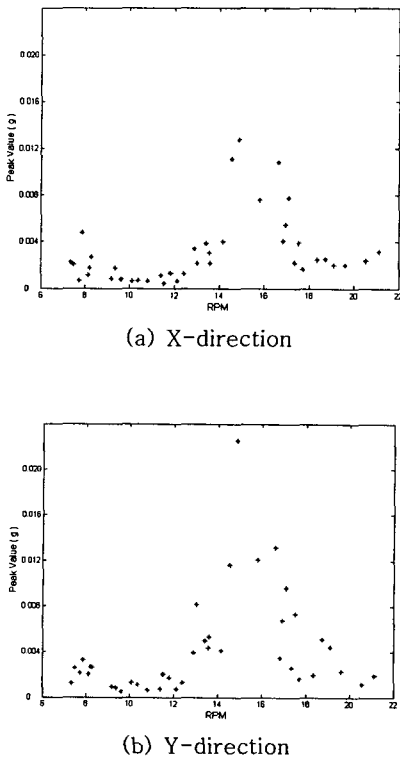


Fig. 9 Level of the peak vs. rotating speed.

후 기

풍력발전기의 진동 모니터링을 지원해준 강원대학교 풍력발전시스템연구센터에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Wind Force 12, European Wind Energy Association and Green Peace.
- (2) <http://www.unison.co.kr>
- (3) 유능수외, 2002, "대관령 풍력발전 실증연구", 풍력기술연구회 2002년 하계학술발표회 초록집.
- (4) T.Burton, 2002, Wind Energy Hand Book, John Wiley and Sons, Ltd.
- (5) E.Hau, 2000, "Wind Turbines", Springer Verlag.
- (6) H.M.Negm and K.Y.Maalawi, 2000, "Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers", Computers and Structures, Vol. 74, pp. 649-666.
- (7) L.L.Koss and W.H. Melbourne, 1995, "Chain Dampers for Control of Wind-induced Vibration of Tower and Master Structures", Engineering Structures, Vol.17 (9), pp. 622-625.
- (8) D.A.Spera, 1994, Wind Turbine Technology, ASME Press.
- (9) S.H.Kim, 2004, "Vibration Analysis of the Tower Structure of a Wind Turbine Generator", Proceedings of WWEC 2004.
- (10) P.K.Sarkar, 1996, "Approximate Determination of the Fundamental Frequency of a Cantilevered Beam with Point Masses and Prestraining"
- (11) 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, 2003, "LabVIEW를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발", 한국정밀공학회 논문집 제 20권 5호, pp. 92-97.
- (12) 남윤수, 유능수, 이정완, 2002, "풍력발전기 성능 실증을 위한 단지 교정 방법", 강원대학교 산업기술연구 제 22권 A호, pp. 49-57.