

풍력발전기 축소 구조 모델의 진동특성 연구

A Study on the Vibration Characteristics of the Reduced Structure Model of Wind Turbine Generator

박 무 열* 은 성 용* 김 석 현**
Park, Moo-Yeol Eun, Sung-Yong Kim, Seock-Hyun

Abstract

A reduced structure model of a wind turbine generator is designed and manufactured. Mode data are obtained by modal testing and analytical method. Vibration response is measured and investigated under various speed condition by using a waterfall plot. Possibility of severe resonance is observed and the mechanism is explained by using the mode data. Simplified theoretical model gives the 1st resonance frequency of wind turbine structure model. The theoretical model can be applied in the design stage of the wind turbine structure to avoid the severe resonance problem.

키워드 : 풍력발전기 구조 축소 모델, 타워 지배 모드, 블레이드 지배 모드, 진동 응답
Keywords : *Reduced structure model of wind turbine generator, tower dominated mode, blade dominated mode, vibration response*

1. 서론

최근 기상 데이터에 근거한 연구에서[1], 강원도 백두대간 주변의 풍부한 바람 자원이 상업용 풍력 발전을 위한 충분한 경제성을 가지고 있음이 확인되었다. 이에 따라 현재 국내 최대 규모의 100MW급 상업용 풍력 발전 단지가 추진 중에 있으며[2], 강원대학교 주관으로 풍력발전기의 성능을 실증하는 대관령 풍력발전 실증연구단지가 조성되었다[3]. 그 결과 외산 및 국내 개발 풍력발전기를 도입하거나 개발할 때, 내륙 산간지역의 풍황 및 기후 환경 하에서 그 성능을 실증할 수 있는 기반이

구축되었다. 풍력발전기의 실증 연구와 관련하여, 본 논문에서는 구조 안정성 측면에서 중요한 현안인 발전기 구조의 진동문제에 관련하여 연구한다. 발전기의 타워 구조는 발전기 중량에 의한 정하중(static load)은 물론, 동하중(dynamic load)으로서 블레이드(blade) 및 발전기의 회전에 의한 주기적 불평형력, 블레이드에 작용하는 공기역학적인 하중, 그리고 타워 주변에서 시시각각 변하는 풍 하중을 받는다[4]. 동적 하중의 주파수 성분이 발전기 구조의 1차 굽힘 고유진동수에 근접하면 공진으로 심한 진동이 발생되고 이는 구조 안정성에 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 그러나 풍력발전기 구조는 대형 구조물이므로 실물을 대상으로 진동 관련 실험을 수행하고 동특성 규명을 위한 충분한 데이터를 확보하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 실험실 단위에서 이러한 문제를 다루기 위하여 수평축 3-블레이드형 풍력 발전기 구조의 축소 모델을 제작하고, 실험 및 해석적 연구를 수행

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 석사과정
** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

한다. 그 결과로부터 발전기 국산화 과정에서 필요한 구조 설계 정보를 얻고자 한다. 구조계의 고유진동수와 모드를 해석적으로 구하고 모드시험 결과와 비교한다. 해석을 위한 모델링 기술은 풍력발전기의 국산화 개발 시 구조 설계의 기반 구축을 위하여 반드시 필요하다. 또한, 단계별 회전 속도 하에서의 구조계의 주파수응답을 구하여 발전기 구조의 진동 응답을 파악하고, 그 결과가 모드 데이터와 어떠한 관계를 갖는지를 규명한다.

2. 풍력 발전기 축소 모델의 제원

실제 풍력발전기의 주요 부분인 타워(tower), 허브(hub) 및 발전기, 블레이드 구조를 고려하여 축소 모델을 제작하였다. 대관령 실증단지에 도입된 J48 750kW급 풍력발전기와 같은 수평축 3-블레이드형으로 제작 하였다. 타워 및 블레이드의 길이는 실물의 약 1/48이며, 나셀(nacelle), 블레이드 및 허브 사이의 질량비도 실물과 가깝도록 제작하였다. 실물과 다른 점으로, 블레이드 부분은 제작상의 어려움 때문에 단순한 판재로 제작하였고, 실험실에서의 구동을 위하여 발전기 대신 모터를 장착시켰다. Fig. 1은 축소 모델의 치수 및 실험 장치를 보인다. 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 측정 센서로 UGS3120(Hall Effect Sensor)을 사용하였다.

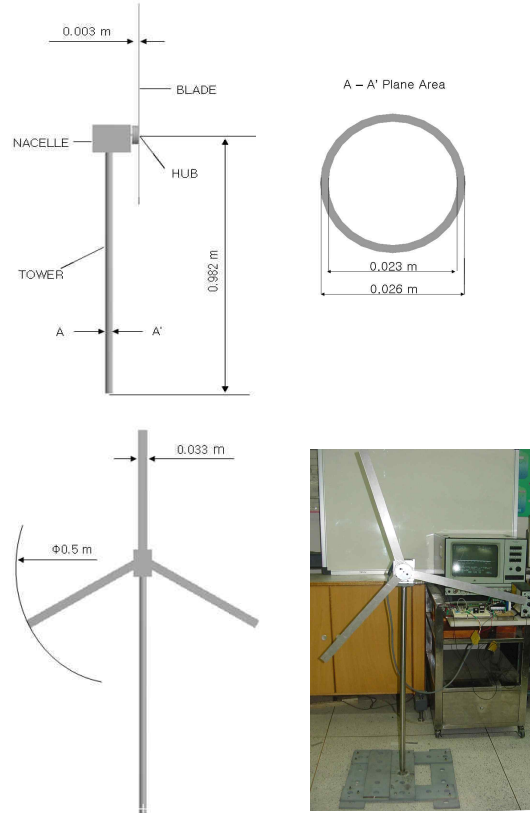


Fig. 1 Reduce structure model of wind turbine.

Table 1 Specification of the reduced turbine model

Model	Specification
Hub height	0.982 m
Rotor diameter	1.0 m
Tower length	0.917 m
Tower in-diameter	0.026 m
Tower out-diameter	0.023 m
Number of blades	3
Weight	Tower : 0.82 kg Nacelle : 2.165 kg Hub : 0.25 kg Blade(3EA) : 0.39 kg

Table 2 Specification of blade driving device

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

3. 구조 모드 해석

3.1 집중 질량 해석

발전기 구조가 작동 중, 동하중의 주파수와 발전기 구조물이 가지는 고유진동수가 가까워지면 공진에 의한 심한 진동이 발생된다. 따라서 발전기 구조의 설계 과정에서 구조물의 고유진동수와 진동 모드를 사전에 파악하여 진동응답 특성을 예측하고 구조 안정성 문제에 대비하는 것은 매우 중요하다. 풍력 발전기 구조의 고유진동수는 그 구조적 복잡성 때문에 이론적으로 예측하기가 쉽지 않다. 그러나 허브-나셀 및 블레이드 부분을 Fig.2에서와 같이 타워 상단에 집중된 질량으로 단순화시켜 모델링 한다면, 레일레이 에너지 방법(Rayleigh's Energy Method)으로 1차 고유진동수를 다음과 같이 구할 수 있다[5].

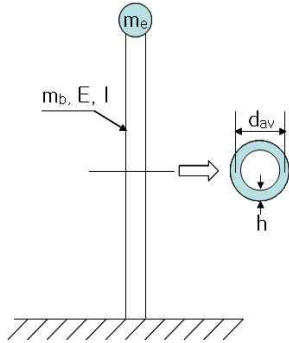


Fig.2 Simplified tower model for theoretical analysis

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

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

여기서, l, m_b, d_{av} 는 타워의 길이와 질량 및 평균직경을, m_e 는 상단에 집중된 것으로 간주한 허브, 나셀 및 블레이드의 총질량을 의미한다. 제작된 모형에 대한 Fig.2의 설계치는 다음과 같다.

$$m_e = 2.675kg$$

$$m_b = 0.82kg$$

$$d_{av} = 0.0245m$$

$$h = 0.0015m$$

$$l = 0.917m$$

$$E = 200Gpa$$

식 (1)을 이용하여 1차 고유진동수 f_1 은 7.4 Hz로 계산된다. 계산 결과에 대한 검토는 다음의 유한요소해석과 실험에서 언급한다.

3.2 유한 요소 해석

허브 및 나셀 부분은 집중 질량으로 보아도 무방하나, 블레이드는 3개의 날개가 긴 관재 형 구조이므로 집중 질량에 포함시키는 데는 한계가 있다. 여기서는 ANSYS 8.0을 사용하여 타워와 블레이드는 쉘 및 판 요소로, 허브 및 나셀 부분은 고체 요소로 모델링 하였다. 또한, 전술한 집중 질량 이론 모델과의 비교를 위하여 블레이드까지 포함된 상

층부를 고체요소로 모델링한 유한요소해석도 병행하였다. 한편, 블레이드 모델링에서 회전면상에서의 위상이 진동수에 미치는 영향을 보기 위하여 블레이드 하나가 수직, 수평 및 45° 각도로 위치한 세 가지 위상에 대한 구조계의 진동모드를 구해보았는데, 블레이드의 위치에 따른 고유진동수의 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다. 해석결과, 풍력발전기 구조 모드의 특징으로 타워 지배 모드 (tower dominated mode)와 블레이드 지배 모드 (blade dominated mode)로 진동 모드가 구분되는 것으로 나타났다. 타워 지배 모드는 Fig. 3 및 Fig.4에서와 같이 타워의 굽힘 변형이 전체 시스템의 진동을 지배하는 모드이다. Fig.3은 블레이드까지 타워 상단에 집중시킨 모델이고 Fig.4는 블레이드를 판 요소로 고려한 모델이다. Fig.3과 Fig.4를 비교할 때, 1차 고유진동수는 근접하게 나오나 2차부터는 블레이드의 굽힘 변형이 고유진동수에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 한편, 전술한 집중 질량 모델에 의한 결과와 유한요소 해석에 의한 1차 고유진동수를 비교할 때, 간단한 이론 모델을 사용해도 어느 정도 예측이 가능함을 알 수 있다. 블레이드 지배 모드는 Fig.5에서와 같이 타워 변형은 거의 없고, 블레이드의 굽힘만이 현저하게 나타나는 모드이다. 블레이드 지배 모드는 비교적 고유진동수가 근접한 여러 개의 모드가 나오는데, 블레이드를 얇은 판재로 제작하여 강성이 많이 낮아진데 기인한다.

4. 구조 모드 시험

해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 모드시험을 수행하였다. 모드시험은 통상적인 충격시험법을 사용하였다[7]. 입력신호로 충격해머(B&K8202)로 충격력을 측정하고, 가속도계(B&K4391)로 가속도 응답을 출력신호로 측정 후, 신호분석기(B&K2035)를 사용하여 다음의 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)를 구하였다.

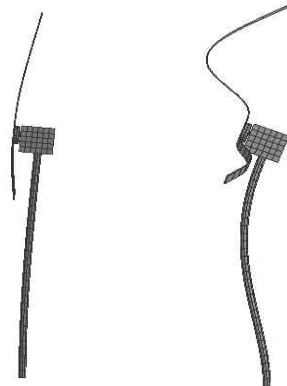
$$H(f) = \frac{A_{xy}(f)}{A_{xx}(f)} \quad (3)$$

여기서, $A_{xy}(f)$ 는 충격신호와 가속도 응답신호의 교차스펙트럼(cross spectrum)이고 $A_{xx}(f)$ 는 충격신호의 자기스펙트럼(auto spectrum)이다. Fig.6 (a)는 허브를 축 방향으로 가진 하고 동일지점에서 측정된 주파수응답을 보인다. 측정 결과 1차 모드의 고유진동수는 6.0Hz로 확인되었다. 이는 타워의 1차 굽힘 모드(Fig.4 (a))의 고유진동수에 해당한다. 실험에서도 유한요소해석에서와 마찬가지로 블레이드의 회전면 상에서의

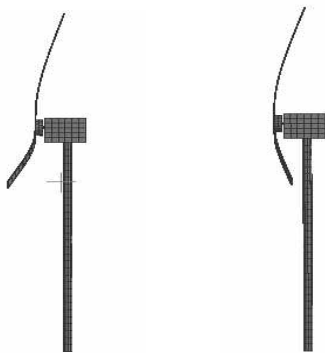
위치는 이 고유진동수에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 밝혀졌다.



a) 1st mode (7.2Hz) b) 2nd mode (115.3Hz)
Fig. 3 Natural modes of the lumped mass model.

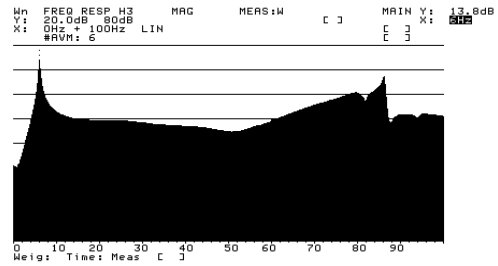


a) 1st mode (6.8Hz) b) 2nd mode (95.7Hz)
Fig. 4 Tower dominated modes.

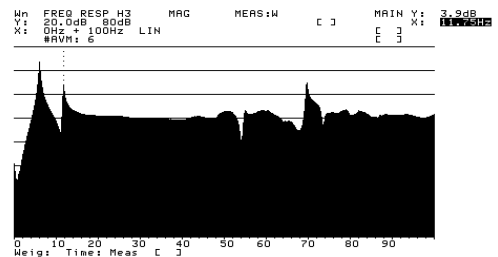


a) 12.7Hz b) 13.7Hz
Fig. 5 Blade dominated modes.

Fig.6 (b) 는 블레이드 지배 공진 주파수가 나타나는 주파수 응답 함수를 측정 한 결과이다. 정지 상태에서 허브를 가진 하고 블레이드 상에서 측정 한 결과 11.75Hz에서 가장 낮은 블레이드 지배 모드가 발생하는 것으로 확인되었다. 유한요소 해석 결과를 볼 때, 타워 지배나 블레이드 지배의 1차 고유진동 모드는 예측이 가능한 것으로 보인다. 또한, 집중 질량의 간단한 이론 모델로도 가장 중요한 1차 고유진동수를 예측할 수 있다. 이론 모델은 풍력발전기 구조설계 과정에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 실험에서 측정된 고유진동수가 해석치보다 낮은 것은, 해석에서는 하단에 완전 고정 경계조건을 적용하였으나, 실제로 완전 고정이 어려운 데 기인한다. 실제적으로는 완전 고정보다는 약간 헐거운 고정 상태가 되고 이는 구조계의 진동수를 낮추는 효과를 발생시킬 것이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Frequency response function of the reduced turbine structure.

5. 구조물의 진동 응답

전술한 바와 같이 풍력발전기는 회전에 의하여 주기적인 동하중을 받게 된다. 가장 지배적인 주기적 하중은 회전수 성분의 구조적 불평형력과 회전수에 날개수를 곱한 주파수 성분의 공력 변동

하중이다. 후자는 날개에 작용하는 바람의 속도가 타워 높이에 따라 다른데 기인하는데, 실험실 단위에서는 이러한 가진 조건을 만들기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 회전 불평형력에 의한 진동 응답만을 검토한다. 120rpm ~ 420rpm 범위에서 40 단계별 회전수 하에서 진동응답을 측정하여 각각의 주파수 스펙트럼을 구한다음 3차원 스펙트럼선도(waterfall plot)를 구성하였다.[8] Fig.7은 회전속도별 주파수응답을 보인다. 120rpm ~ 250rpm 사이에서는 뚜렷한 피크성분이 관찰되지 않는다. 이후 회전속도가 증가 하면서 회전주파수의 조화성분들(harmonics)이 관찰된다. 두드러진 특징으로 270rpm 이후 회전수 1차 성분의 레벨이 점차 증가하여 342rpm에서 최고의 피크레벨을 보인다. 이 피크의 주파수 성분은 5.75Hz로 확인되었다. 이는 342rpm 회전 불평형력의 1차 성분으로 앞에서 확인되었던 정지 상태의 1차 고유진동수(6Hz)에 매우 근접하다. 약간 낮은 주파수에서 공진이 발생하는 것은 블레이드의 회전이 공진현상에 미세한 변화를 주는 것으로 추정되며, 추후 이에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

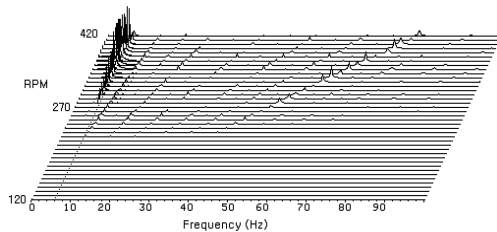


Fig.7 Waterfall plot of the vibration response.

6. 결론 및 토론

풍력발전기 구조 진동응답 특성을 파악하기 위하여 축소 모델을 제작하여 모드 해석 및 속도별 진동 응답을 검토하였다. 구조 모드는 타워 지배 모드와 블레이드 지배 모드의 2가지 형태로 나타났다. 블레이드의 위상에 따른 고유진동수 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 경계조건을 정확하게 맞추기가 어려움에도 불구하고 유한요소 해석치는 실험치에 근접하는 것으로 나왔다. 가장 중요한 타워 지배 1차 진동 모드는 간단한 집중 질량 이론 모델이 유한요소 해석 및 실험치에 매우 근접한 값을 주므로, 설계과정에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다. 회전속도별 주파수응답은 정지 상태에서의 1차 고유진동수인 6.0Hz 보다 약간 낮은 5.75Hz에서 최대 피크를 보이는 것으로 나타났다. 축소된 풍력발전기 구조 모델에 대한 해석적 실험적 연구를 통하여 작업속도에 따른 공진 현상

을 명확하게 관찰하고 원인을 규명할 수 있었다. 그 결과는 추후 풍력발전기의 국산화 개발과정에서 구조 안정성 해석 및 설계에 활용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] 이동현 외, “강원도 풍력자원 조사결과 및 풍력발전 시스템 운전효율의 분석”, 풍력기술연구회 2001년 추계학술발표회 초록집, 2001.
- [2] <http://www.unison.co.kr/>
- [3] 유능수 외, “대관령 풍력발전 실증연구”, 풍력기술연구회 2002년 하계학술발표회 초록집, 2002.
- [4] T. Burton, *Wind Energy Hand Book*, John Wiley and Sons, Ltd., 2002.
- [5] P. K. Sarkar, “Approximate Determination of the Fundamental Frequency of a Cantilevered Beam with Point Masses and Prestraining Springs”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.195(2), pp.229-240, 1996.
- [6] D. J. Ewins, *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd., 1986.
- [7] B&K, Technical Documentation : Multichannel Analysis System Type 3550, B&K, 1992.