

타워강성 효과를 고려한 소형 수직축 풍력발전기 운전 진동실험 및 해석

Operational Vibration Experiment and Analysis of a Small Vertical-Axis Wind Turbine Considering the Effect of Tower Stiffness

추현호* · 심재박* · 류경중* · 김동현† · 김봉영**

Heon Ho Choo, Jae Park Sim, Gyeong Joong Ryu, Dong Hyun Kim,
and Bong-Yung Kim

Key Words: Vibration Experiment (진동실험), Vertical-Axis Wind-Turbines(수직축 풍력발전기), Lab-VIEW System (랩뷰시스템), Computational Structural Dynamics(전산구조동역학)

ABSTRACT

In this study, operational vibration experiment and analysis have been conducted for the 4-blade small vertical-axis wind turbine (VAWT) including the effect of tower elastic behavior. Computational structural dynamics analysis method is applied to obtain Campbell diagram for the VAWT with elastic tower. An open type wind-tunnel is used to change and keep the wind velocity during the ground test. Equivalent reduced elastic tower is supported to the VAWT so that the elastic stiffness effect of the tower can be reflected to the present vibration experiment. Various excitation sources with aerodynamic forces are considered and the dominant operating vibration phenomena are physically investigated in detail.

1. 서 론

현재 세계적으로 나타나고 있는 지구온난화 등의 이상기상현상에 대한 우려 속에 가장 실용적인 대안으로 인정받고 있는 분야는 풍력발전이다. 화석연료와 같이 기존에너지원과는 다르게, 무한 무공해 에너지인 바람을 동력원으로 한다는 장점을 가지고 있다. 독일 등 유럽 선진국을 선두로 발전하고 있는 풍력 발전 사업은 미국의 환경 친화적인 그린뉴딜 정책과 맞물린 유망사업으로 부각되어 연구와 개발이 더욱더 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 국내에서도 이러한 흐름에 맞춰 저탄소 녹색 성장 정책 등 풍력 발전에 대한 개발과 지원이 국가차원에서 진행되고 있으며, 풍력발전기에 대한 연구개발 중에서 대기업을 중심으로 한 대형풍력발전 분야 또한 급성장하고 있다.⁽¹⁾

풍력발전시스템의 상업적 보급은 1990년대 중반 이후 본격적으로 이루어지게 되었고, 2008년 말 세계 누적 풍력설비용량은 대략 122 GW에 달하고 있다. 풍력시장의 확대와 함께 유사한 추이로 상업용 풍력발전시스템의 단위 용량 규모도 1980년대 초의 50 kW 급에서 현재 6 MW 급으로 120배 커졌다. 이러한 국제시장의 확대와 신규설비 교체 수요에 따른 리파워링(Repowering), 해상용 풍력발전

(Offshore Wind Power) 설비가 증가할 것이라는 예측과 함께 풍력발전기의 개발형태도 다양해지고 있다. 풍력발전기가 점점 대형화됨에 따라 이를 제작하는 비용도 급격히 증가하고 있는 상황이다. 어떻게 저비용 고성능 풍력발전기를 제작할 수 있을지에 대한 고민은 모든 풍력발전기를 개발하는 모든 국가, 기업들의 숙제와 같다. 그리고 국내의 경우, 풍력발전기를 실제 성능 테스트 검증은 통해 시행착오를 겪으면서 설계 제작할 수 있는 연구비가 충분하지 않다. 이에 최대한 적은 시행착오를 겪기 위해서 FEM 해석의 정확성은 확실히 검증되어야 한다.

본 논문에서는 풍력발전기 타워를 소형풍력발전기에 체결한 후 지상 풍동 베이스에 설치하고 송풍기를 이용하여 가진 응답 실험을 수행하였다. FEM 진동해석결과를 바탕으로 공진 RPM에서의 가속도와 변형률을 분석하고 전산 다물체 동역학 해석 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용한 소형 풍력발전기 모델은 본 연구실에서 직접 설계 및 제작한 것으로 4개의 블레이드를 가지는 400W급 모델이다. 수직축 풍력발전기에 대한 가속 성능시험은 차량장착시험 시스템(Vehicle Mounted Testing System)을 이용하여 기 수행한 사례가 있다.⁽²⁾ 본 논문에서는 탄성 타워효과를 고려하여 오픈형 풍동의 풍속을 변화시켜 바람 가진 조건을 부가하였다. 진동해

석은 유한요소법 기반의 다물체동역학 기법을 적용하였으며, Campbell 선도의 이론적인 공진특성과 공기역학 적인 가진 특성을 고려한 진동응답 특성을 파악해 보고자 한다.

2. 해석 및 실험기법

FEM 기법으로 SAMCEF 를 활용하여 진동해석 (Vibration Analysis)을 수행하였다. Fig. 1 (a) 은 CATIA 로 모델링한 450W 소형 수직축 풍력발전기 모습이다. Fig. 1 (b)는 SAMCEF 에서 진동해석하기 위해 풍력발전기를 Shell Modeling 한 모습이다.

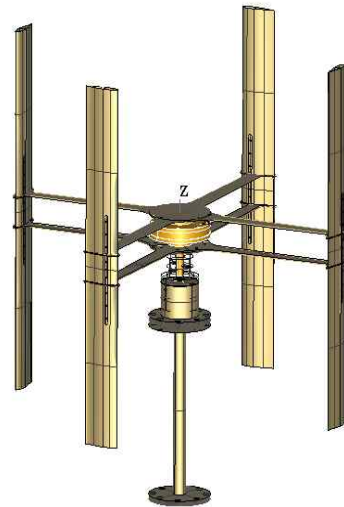
본 모델의 경계조건은 블레이드, 블레이드 가이드 구조물, 암 구조물 사이에는 면 접촉을 가지는 glue 조건을 부여하였으며, 암 구조물과 상하단 플레이트 구조물 사이에는 bolt 체결구조로써 암 구조물 root 부분과 상하단 플레이트 체결부만 선택하여 fixed 조건을 사용하였다. 전기발전기와 타워 상단부 역시 fixed 조건을 사용하였다. 타워 하부 플랜지 부분에는 6 자유도를 구속시켜 단단히 고정하는 clamp 조건을 추가하였다. 하중조건은 Table 1 에 나오는 정보를 활용하여 풍력발전기 부품 별로 질량을 부가하였고, 중력효과를 고려하기 위해 구조물 전체에 9.81 m/s^2 의 중력가속도를 부가하였다. 회전효과를 rotation speed 로 풍력발전기 구조물에 부가하여, 각 50 rpm 별로 해석을 수행하였다.

Table 1 4-blade small vertical-axis wind turbine mass information

Generator	11.3 kg
Blade (4 EA)	7.1 kg
Arm-Upper (4 EA)	8.7 kg
Arm-Lower (4 EA)	8.7 kg
Plate-Upper	2.1 kg
Plate-Lower	2 kg
Guide (16 EA)	0.3 kg
Tower (D=50.1 mm)	15.5 kg
Generator-Tower Flange	9.4 kg



(a) CATIA modeling



(b) FEM modeling

Fig. 1 450W small VAWT modeling

가진 응답 실험은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 풍력발전기 타워의 가속도를 모니터링 할 수 있는 랩뷰 시스템(Lab-VIEW System)과 스트레인 게이지 (Strain Gage)를 이용하여 변형률을 모니터링 할 수 있는 스트레인 인디케이터(Strain Indicator)로 구성되어 있다. 이 장비들을 이용하여 가속도 및 변형률을 측정하는 기법으로, 지상 풍동 베이스에 타워를 체결하여 고정시켰으며 RPM 을 조절하면서 가속도와 변위응답을 측정하였다.



Fig. 2 Excitation-response experiment equipment



Fig. 3 Wind turbine installation on the tunnel Ground Base

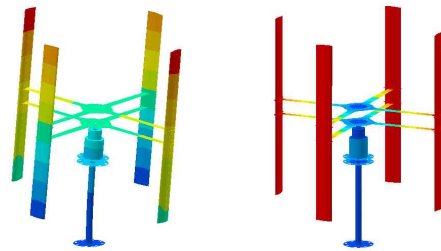
Fig. 3 은 직경 50.1 mm 인 타워를 풍력발전기에 체결시켜 지상 풍동 베이스에 설치한 모습이다. 타워의 가진 응답 결과를 가시화시키기 위해서 직경이 작은 타워를 선정하였다. 풍력발전기 아래에 있는 엔지니어링 플라스틱 부품에 RPM 측정기를 부착하여 풍력발전기의 회전수를 측정하였고, 타워 축소모델 중간 플랜지 결합 부위에 가속도계를 부착하여 회전수에 따른 가속도를 측정하였다. 그리고 타워 가장 아래 부분에 스트레인 게이지를 부착하여 회전수에 따라 변형률을 측정할 수 있다.

풍력발전기 뒤에 보이는 송풍기에서 나오는 풍속으로 RPM 을 증감시키는 방법을 활용하여 20 rpm 씩 증가시키면서 가속도(g)를 측정하였고, 50 rpm 씩 증가시키면서 변형률(ϵ)을 측정하였다.

3. 결과 및 검토

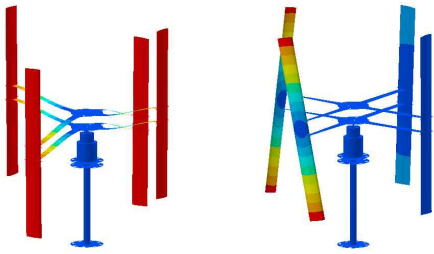
전술한 바와 같이 본 연구에서는 4-블레이드 소형 수직축 풍력발전기의 풍속에 따른 가진 특성 분석에 대해 수행하였다.

Fig. 4 에서는 고유진동수가 증가함에 따라 반복되는 모드를 제외한 대표적인 모드들을 나타내고 있다.



(a) 1st mode(4.44 Hz) (b) 3rd mode(7.63 Hz)

Fig. 4 Natural vibration mode shape



(c) 4th mode(11.9 Hz) (d) 8th mode(19.3 Hz)

Fig. 4 Continued.

이를 토대로 Fig. 5 와 같이 회전효과에 따른 전체 구조물의 Campbell Chart 를 도출 하였으며, 풍력 발전기가 220 rpm 으로 회전 시 1 차 고유모드가 발생할 수 있음을 확인하였다. 또한 이를 통하여 추가적인 공진 회피설계로 이 부근에서는 제어기 설계로 지속적인 작동이 되지 않도록 약간의 조치가 필요함을 확인하였다.⁽³⁾

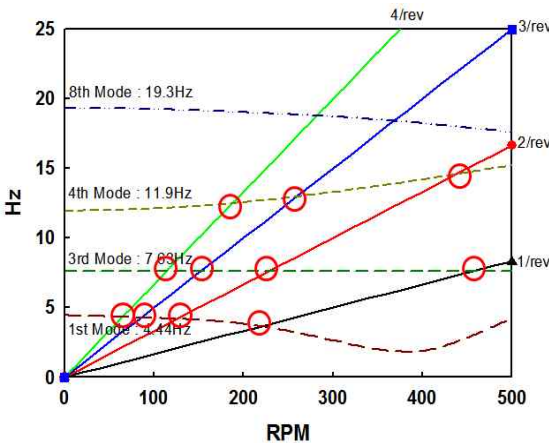


Fig. 5 Campbell chart according to the rotational speed

Fig. 6 은 가속도계를 이용하여 회전수에 대해 가속도 변화를 나타낸 그래프이다. 60 rpm 과 252 rpm 에서 주변보다 심한 가속도가 측정되었다. 그리고 300 rpm 에서부터 가속도가 선형적으로 증가하는데, 풍력발전기의 편심력에 의한 것임을 알 수 있다. 인력으로 제작한 풍력발전기는 정확한 좌우대칭으로 제작하기에 한계가 존재하기 때문에 높은 편심력이 발생하는 것은 불가피하다.

Fig. 5 와 Fig. 6 을 비교해보면 1 차 고유진동모드가 4/rev 에 걸리는 60 rpm 에서 공진에 의한 가속도가 증가하는 것을 볼 수 있으므로, FEM 해석결과가 정확하다는 것을 입증할 수 있다. 하지만 1/rev 에 걸리는 220 rpm 지점에서는 공진에 의한 가속도가 측정되는 RPM 보다 약 30 rpm 정도 낮은 결과가 도출되었다. 본 연구실은 이러한 원인으로 SAMCEF 에서 모델링한 타워의 재질 특성과 실제 타워의 재질 특성이 정확하게 동일하지 않아 가상 타워가 실제 타워보다 유연하게 모델링 되었다는 결과이다. 그리고 실제 타워에서의 damping 작용으로 인해 해석결과와 실험결과의 오차가 발생했다고 판단된다.

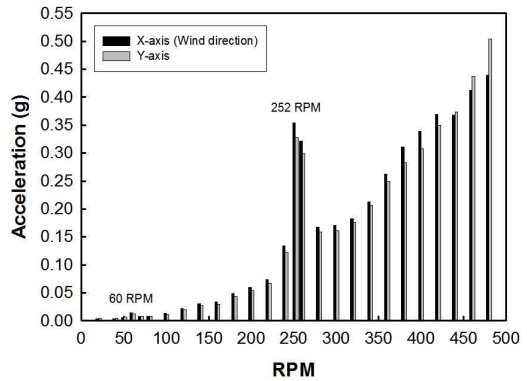


Fig. 6 Induced acceleration level vs. rpm.

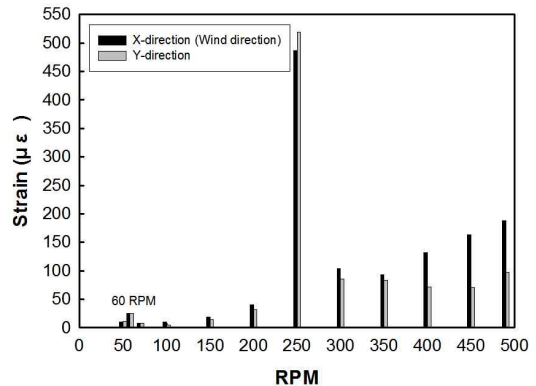


Fig. 7 Induced dynamic strain vs. rpm.

Fig. 7 의 실험결과를 보면 1/rev 과 1 차모드의 교차점 부근인 250 rpm 에서 519.1 $\mu\epsilon$ 정도로 상당히 큰 공진 변형률이 발생함을 볼 수 있다. 4/rev 과 교차하는 60 rpm 의 경우 주변 RPM 보다 높은 25.5 $\mu\epsilon$ 의 동적 변형률 수준을 보이며, 2/rev 및

3/rev 가진 조건의 경우는 이보다 낮은 수준으로 250 rpm 에서의 1 차 공진조건에 비하면 무시 가능한 수준임을 볼 수 있다. 그러므로 풍력 시스템 및 타워설계 시 최우선적으로 1/rev 과 1 차 고유 모드가 교차하는 공진회전 조건은 절대적으로 회피할 필요성이 있다. Fig. 7 에서 X 축 방향의 변위는 350 rpm 을 시작으로 전형적으로 증가한다. 또한 X 축 방향이 바람방향과 동일하며 회전속도의 증가는 풍속의 증가를 의미하고 있다. 풍속이 증가하면 x 축 방향으로 동적 풍하중 증가에 따른 진동변위 증가로 타워의 x 축 상에 위치한 스트레인 게이지에 보다 큰 변형률이 측정되는 것을 확인할 수 있다. 본 논문의 풍동시험에서 비록 축소형 타워 모델을 적용하였지만, 실제 10~20m 정도의 전용타워 설계가 이루어진 경우에는 이에 대한 등가 강성수준을 반영하여 실제 타워 설치조건과 유사하게 가속 평가하는 것이 가능함을 중요하게 파악할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 타워의 강성효과를 고려하여 4 개의 블레이드를 가지는 소형 수직축 풍력발전기 모델에 대해 운전진동실험과 전산해석을 수행하였다. 실험 및 해석을 통하여 전형적으로 회전 공진안정성을 확인하는 Campbell 선도에서 1/rev 과 1 차 모드의 교차점이 가장 지배적인 공진현상을 유발함을 실험을 통해 입증하였다. 이론 해석결과에서는 Campbell 선도상에 전형적으로 다양한 공진 가능성이 나타나게 된다. 하지만, 실제 실험을 수행해본 결과 1 차 주요 공진조건 이외에는 바람 방향으로의 풍속 및 회전속도 증가에 따른 동적 풍하중 증가가 시스템 진동 불안정성의 주요 원인으로 작용하게 됨을 중요하게 보였다. 본 연구 결과는 복잡하고 난해한 수직축 풍력발전기 및 타워의 최적 구조설계 과정에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후기

본 논문은 2011 년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구내용의 일부이며, 지원에 감사를 표하는 바입니다 (No. 20114010203070).

참고문헌

- (1) Kim, D. H., Park, K. K., Lee, J. W., Choi, H. C., Kim, D. M., and Kim, Y. H., 2009, "Development of 800W Class Life-Type Vertical-Axis Wind Turbine", Korea Wind Energy Association.
- (2) Lee, J. W., Kim, D. H., Park, K. K., Choi, H. C., and Kim, D. R., 2010, "Performance Evaluation of Small Wind Power System Using Vehicle Mounted Testing System (VMTS)", Korea Wind Engineering Association.
- (3) Kim, D. H., Ryu, G. J., Kim, Y. H., Kim, S. B., Kim, K. W., Nam, H. W., and Lee, M. G., 2011, "Structure Dynamic Analysis of 6kW Class Vertical-Axis Wind Turbine with Tower", Korea Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, P 304, pp. 662~670.