

타워를 포함한 6kW급 수직축 풍력발전기 구조진동해석

Structure Dynamic Analysis of 6kW Class Vertical-Axis Wind Turbine with Tower

김동현† · 류경중 · 김요한* · 김성복 · 김광원 · 남효우 · 이명구**

Dong-Hyun Kim, Gyeong-Joong Ryu and Yo-Han Kim

Sung-Bok Kim and Kwang-Won Kim and Hyo-Woo Nam and Myoung-Goo Lee

Key Words : Vertical-Axis Wind Turbine(수직축 풍력발전기), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Finite Element Method(유한요소법), Computational Structural Dynamics(전산구조동역학)

ABSTRACT

In this study, the design and verification of 6 kW class lift-type vertical-axis wind turbine (VAWT) has been conducted using advanced CAE technique based on computational fluid dynamics (CFD), finite element method (FEM), and computational structural dynamics (CSD). Designed aerodynamic performance of the VAWT model is tested using unsteady CFD method. Designed structural safety is also tested through the evaluation of maximum induced stress level and resonance characteristics using FEM and CSD methods. It is importantly shown that the effect of master eccentricity due to rotational inertia needs to be carefully considered to additionally investigate dynamic stress and deformation level of the designed VAWT system.

1. 서 론

세계적으로 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 kW급에서 현재 6 MW급으로 120배 커졌다. 이러한 국제시장의 확대와 신규설비 교체 수요에 따른 리파워링(repowering), 해상용 풍력발전(offshore wind turbine) 설비가 증가 할 것이라는 예측과 함께 풍력발전기의 개발 형태도 다양해지고 있다.

풍력발전기는 일반적으로 회전축방향에 따라 Fig.

1과 같이 수평축과 수직축으로 나눌 수 있다. 수직축 풍력터빈(VAWT, vertical-axis wind turbine)은 바람의 방향에 관계없이 운전이 가능하기 때문에 요잉(yawing) 장치가 불필요한 장점이 있다.



(a) HAWT (b) VAWT

Fig. 1 Two kind of wind turbine according to the rotate axis

† 경상대학교 기계항공공학부 및 공학연구원
E-mail : dhk@gnu.ac.kr

Tel : (055)755-2083, Fax : (055)755-2081

* 국립경상대학교 기계항공공학부 대학원

** 헵시바(주)

또한 수평축 보다 비교적 낮은 회전속도에서 정격 출력으로 발전을 하기 때문에 저소음 전력 생산이 가능하며 풍향변화에 둔감하기 때문에 유동패턴이 불규칙적인 도심 건물 등에 운용하기가 유리하다.



Defra, Weybourne
Four turbines installed on a roof top at Defra

Fig. 2 The example case for installation of international urban vertical axis wind turbine

본 연구에서는 기존의 800 W급 수직축 풍력발전기의 성공적인 개발⁽¹⁾과 축적된 관련 기술을 기반으로 6 kW급 양력형 수직축 풍력발전기를 개발하였다. 이를 위해 기존의 특허등록된 기술을 활용하였으며, 3차원 CAD 및 CAE 정밀해석 기술⁽²⁾을 적용하여 다양한 특수환경에 대한 풍동 및 차량실험을 수행하면서 설계 개선 과정을 거쳤다. 하지만 본 논문에서는 지면관계상 설계 개선을 거친 최종 모델에 대한 연구내용을 기술 하고자 한다.

2. 설계 모델

본 개발과제에서 개발된 풍력발전기는 크게 허브와 블레이드를 합한 상부 구조물, 전기 발전기와 연결조인트의 중간 구조물, 풍력발전기 타워와 베이스 프레임의 하부구조물로 나누어진다. Fig. 3은 본 연구에서 고려한 6 kW급 양력형 수직축 풍력발전기의 형상 전체 구조물을 보여주고 있다. 상부 구조물은 바람의 에너지를 기계적 에너지로 전환 하는 역할을 하며, 풍력발전기의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 중간구조물의 전기발전기는, 상부에서 발생된 기계적 에너지를 이용하여 전기적 에너지로 전환 하는

역할을 수행한다. 타워 구조물은 옥상 설치형과 필드(Field) 설치형으로 나뉘서 설계 되었으며, 필드 설치형의 경우 타워 높이 15m로 되어있고, 옥상 설치형의 경우 타워 높이 6m로 되어있다.

본 연구에서는 타워 구조물을 포함한 풍력발전기 모델에 대한 공력 해석 및 구조 진동해석을 수행 하였다.

본 모델은 수직축 풍력 발전기의 분류상 자이로밀형(gyromill type)으로 수직으로 체결된 에어포일 단면의 블레이드가 풍향에 대하여 자동적으로 최적의 받음각(angle of attack)을 얻는 구조를 갖는다. 다른 형태의 수직축 발전기인 다리우스형(darrieus type)이나 사보니우스형(savonius type)보다 구조적으로 복잡하여 설계하기가 힘든 단점이 있지만 효율이 높은 것이 특징이다. Hau⁽³⁾는 수평축과 관련하여 낮은 공력효율, 불리한 공력하중, 블레이드의 높은 가격은 다른 부품을 단순화해서 보상해야 경쟁력이 있다고 설명하고 있다. 본 연구에서는 다년간의 대형 풍력발전기의 정밀해석 연구에서 축적된 전문적인 CAE 해석기술을 활용하여 공력해석 및 구조/진동 해석을 수행하여 운용하중에 대한 안전성을 검증하였고 현재 실제 크기의 시제품을 제작하여 성능 및 안정성의 검증을 수행하고 있다.



Fig. 3 Geometry configuration of 6 kW VAWT full model

3. 공력하중 및 성능해석

일반적으로 출력계수(power coefficient)와 토크 계수(torque coefficient)는 TSR(tip-speed ratio)에 따라 변화하게 되며 블레이드의 코드길이를 증가시키면 저속에서 기동 특성은 개선할 수 있으나 과도할 경우 이는 제한된 크기에서 solidity를 너무 증가시키게 되어 고속회전을 방해하게 되어 중속 및 고속에서 전체 출력특성은 오히려 나빠지게 되는 단점이 있을 수 있다.

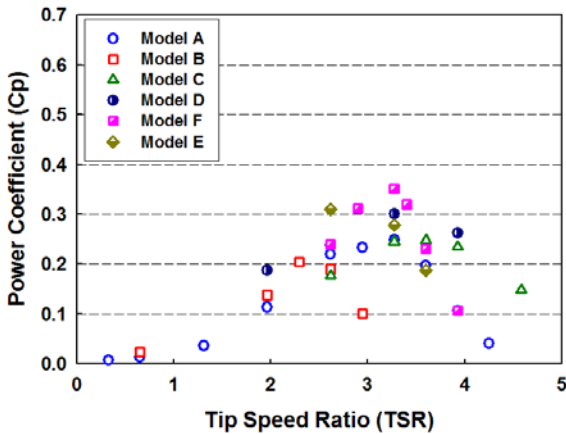


Fig. 4 Comparison of power coefficient for various design condition

본 연구에서는 정밀 CFD 유동해석 기법을 적용하여 다양한 모델에 대해 TSR 변화에 따른 파워계수 최적화 연구를 수행하였으며, Fig. 4는 이번 연구에서 사용된 TSR에 따른 출력계수 비교 예를 보여주고 있다.

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho V^3 A n_g \quad (1)$$

Fig. 4의 결과와 식 (1)을 이용한 예상 출력은 C_p 가 0.3, ρ 가 1.225 kg/m^3 , 정격 풍속 14 m/s 에서 유효단면적 A 가 18 m^2 이고 전기발전기 및 컨트롤러의 통합 효율을 약 0.67 정도 가정했을 때 약 6.08 kW 정도이다. 이때의 풍력발전기의 회전 반경은 1.8 m , 블레이드의 길이는 5 m 의 설계치를 적용한 경우이

다. 본 논문에는 제시하지 않았지만 다리우스 타입 수직축 풍력발전기의 경우 본 연구팀에서는 약 0.4 정도의 파워계수를 도출할 수 있게 설계개념을 확보하고 있다. 하지만, 실제 양산성 및 제작단가를 고려한 실무설계에서는 파워계수만 극대화 할 수 없으며 적정선에서 설계의 타협점이 필요하다.

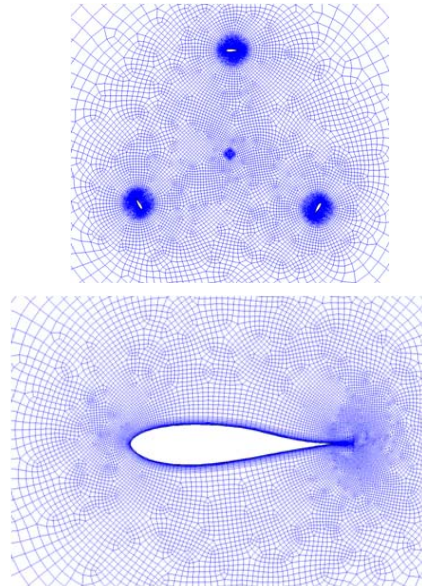
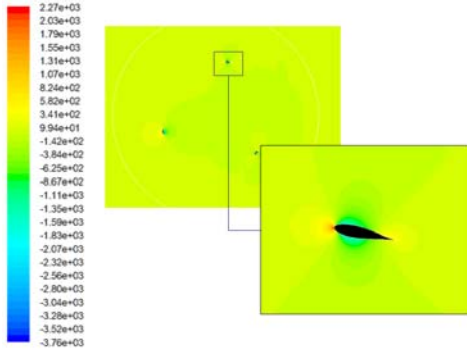


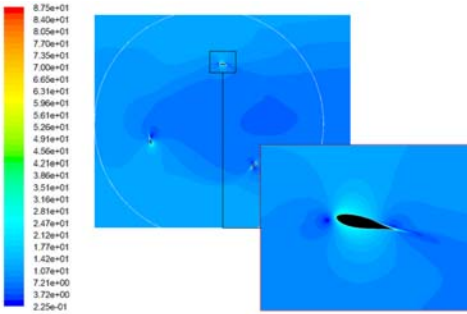
Fig. 5 Computational fluid grid

로터 블레이드 모델의 유한요소 격자는 Fig. 5와 같으며, 활용된 총 격자수는 49,784 개이며, 총 노드의 수는 50,138 개 이다. 유동해석 조건은 3개의 블레이드에 x-축 방향으로 극한 풍속(ultimate speed) 25 m/s 를 부여하였고, 로터 블레이드의 회전속도는 정격 회전속도(rated rotation speed)보다 높은 300 rpm 을 고려하였다. 블레이드와 블레이드 유동영역간의 상대운동을 비정상 공력해석에 반영하기 위해서 MRF(multiple rotating reference frames)조건을 이용하여 회전조건을 적용하였다. Fig. 6은 유동해석 결과 블레이드에 작용하는 유동의 압력과 속도 분포도를 나타내고 있다. 회전하는 블레이드는 바람이 불어오는 방향에 대해 항상 방위각이 변하기 때문에 비정상유동해석이 반드시 요구된다. 다양한 유동조건에 대해 해석이 수행되었으며, 각 블레이드에 유발되는 최대 하중을 산출하여 적용하였다. Fig. 7은 유동해석에서 블레이드에 작용하는 하중을 구하기 위하여 블레이드의 위치를 방위각(azimuth angle)에

따라 나타낸 것이다. 각 블레이드에 작용하는 하중은 블레이드의 방위각에 따라 회전속도와 풍속의 합벡터 차이로 인한 상대 받음각 변화 때문에 방위각에 따라 변화하게 된다. 본 연구에서는 각 블레이드에 작용하는 하중을 방위각에 따라 구한 후 최대 하중이 되는 조건들을 구하여 구조해석에 반영하였다.



(a) Pressure contour distribution



(b) Velocity contour distribution

Fig. 6 Pressure and velocity contours distribution

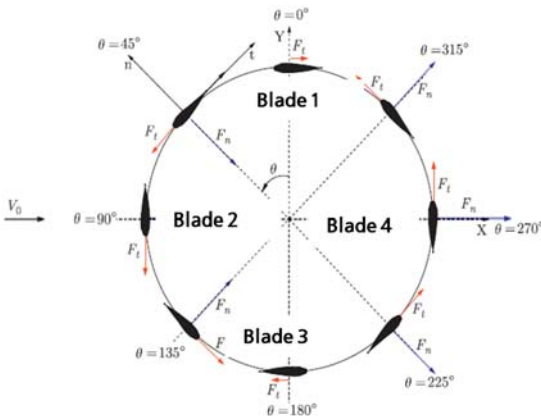
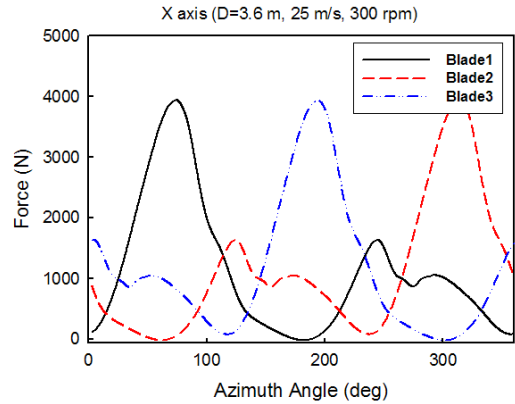


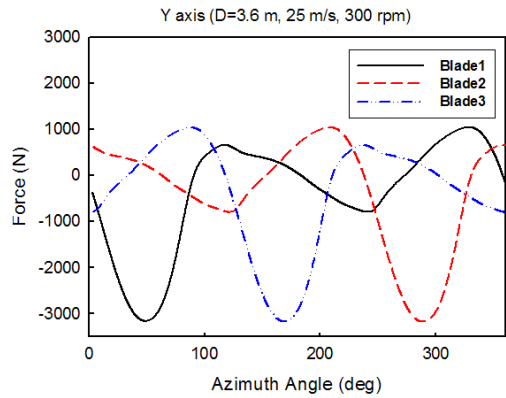
Fig. 7 Definition of azimuth angle

Fig. 8은 회전방위각에 따라 블레이드에 작용하는

풍하중을 나타내고 있다. 회전방위각(azimuth angle)이 90° 일 때 블레이드에 가장 큰 하중이 걸리며 이때에 블레이드의 하중 값은 F_x 가 약 3935.0 N, F_y 가 약 -1800.0 N, F_z 의 경우에는 F_y 와 F_x 에 비하여 미소하여 무시할 만한 수준이다. 여기서 x -방향이 바람이 흘러가는 방향이며 y -방향은 바람의 수직방향, z -방향은 풍력발전기의 높이 방향이다.



(a) X-direction



(b) Y-direction

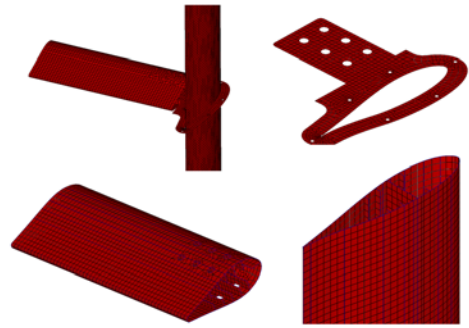
Fig. 8 Dynamic wind load according to azimuth angle

4. 구조 및 진동해석

풍력발전기 모델에서 마스트는 1차원 beam 요소를 사용하였으며, 블레이드와 블레이드 고정 구조물 및 타워와 같이 일정한 두께를 가지는 부분은 4절점 shell 요소를 사용하였다. 유한요소모델링에 사용된 총 절점(node) 수는 266,834 개 이며, 총 요소

(element) 수는 277,887 개 이다. 또한 마스트와 발전기의 연결 조인트의 경우에는 3차원 solid 요소를 사용하였으며 Fig. 9에서는 풍력발전기에 대한 유한 요소 격자모델을 보여주고 있다.

본 모델의 경계조건은 블레이드와 블레이드 고정 구조물 사이에는 면 접촉을 가지는 glue 조건을 부여하였으며, 블레이드 고정 구조물과 블레이드 압 결합은 bolt 체결구조로써 블레이드 압 끝단과 블레이드 고정 구조물 체결부만을 선택하여 fixed 조건을 사용하였다. 전기발전기와 타워 상단부 역시 fixed 조건을 사용하였다. 그리고 타워의 하단부에 6 자유도를 구속하여 단단히 고정하는 clamp 조건을 부가하였다. Fig. 10은 구조해석에 적용된 하중조건으로 풍력발전기 운용 중 회전에 따른 관성력, 구조물 자체의 자중, 바람에 의한 풍하중의 복합적인 하중이 작용하는 것을 나타내었다. 이와 같은 하중을 장기간에 걸쳐 반복적으로 지지해야 하며, 이로 인한 풍력발전기가 작동 중 나타낼 수 있는 구조적 불안정성을 차단하기 위하여 사전에 진동해석 및 구조해석을 수행하였다. 유동해석에서 구한 공력하중을 3개의 블레이드에 모두 적용하였고, 중력 효과를 고려하기 위해 구조물 전체에 9.81 m/s^2 의 가속도를 부가하였다. 그리고 정격회전속도인 250 RPM의 회전 관성력을 전체 모델에 대하여 적용하였다.



(b) Major part
Fig. 9 Finite element structure analysis model

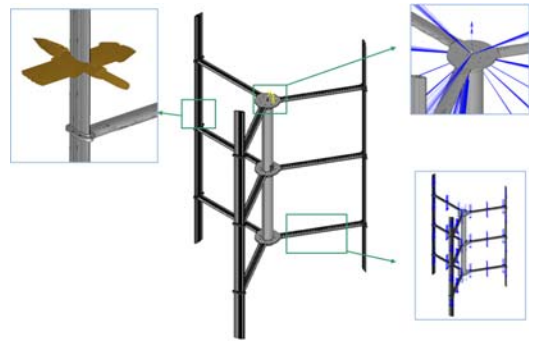
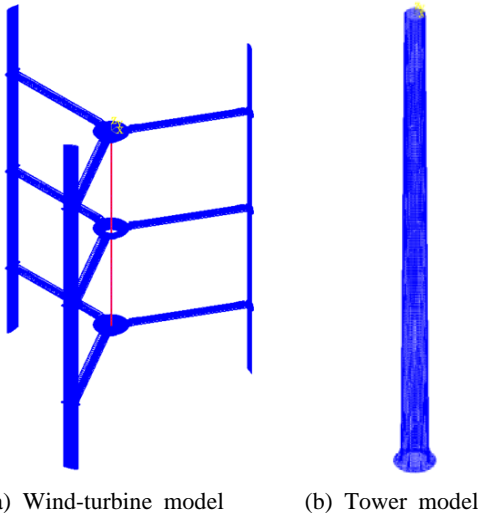
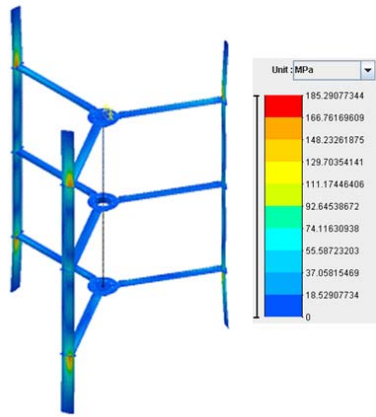


Fig. 10 Load conditions on the wind turbine

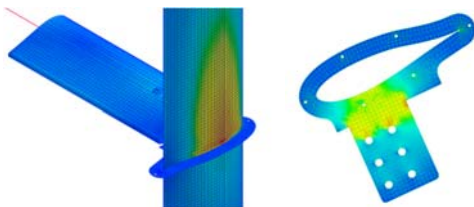
Fig. 11은 극한 하중 조건에 대한 풍력발전기의 구조해석의 결과를 나타내고 있다. Fig. 11(a)은 전체 모델의 응력분포를 나타내고 있으며 블레이드와 블레이드-암 조인트에서 주로 응력이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 11(b)은 풍력발전기의 주요 부분에 대한 응력해석 결과 값의 예를 보여주고 있다. 해석결과 일체형 암-허브 구조, 블레이드-암 체결부, 블레이드 등 각 부위에서 발생한 응력 모두 각 재질에 따른 허용응력보다 낮게 나타남을 확인할 수 있었으며, 이 해석결과를 토대로 각재질의 허용응력과 비교하여 M.S(Margin of Safety)를 계산하였다. 블레이드의 경우 해석결과 188.0 MPa의 응력이 나타나며 0.3의 안전여유를 가지고 있다. 그리고 블레이드-암 조인트는 177.0 MPa, 암은 49.0 MPa로 충분한 안전여유를 확보하고 있음을 알 수 있었다.



(a) Wind-turbine model (b) Tower model



(a) Stress distribution of blade system



(b) Maximum stress part

Fig. 11 Result of structure stress analysis

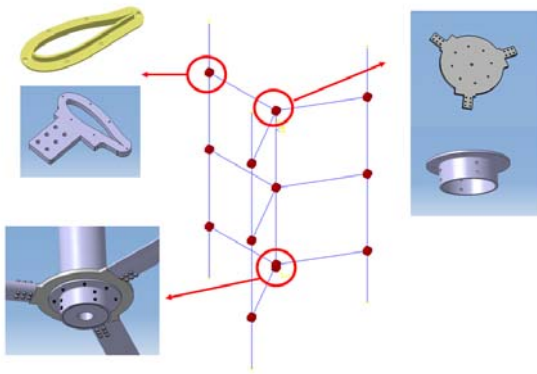
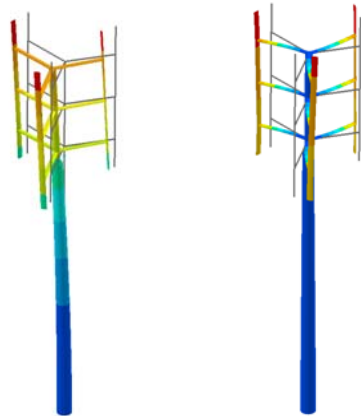


Fig. 12 Boundary conditions of finite element models

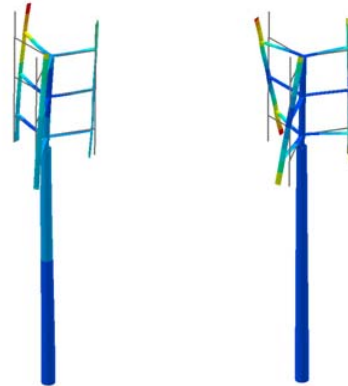
전산구조진동해석은 구조물의 국부적인 응력수준이나 진동수준에 관심 있는 것이 아니라 구조물 전체의 진동특성 및 공진안전성을 효과적으로 파악하는데 있다. 특히, 풍력발전기의 경우 블레이드가 회전하는 효과를 반드시 반영하여야 하기 때문에 응력 해석수준에 상세 유한요소모델을 적용하게 되면 해석시간이 방대해져서 설계 변경 안에 대한 진동안전성 결과를 조기에 도출 할 수 없다. 그래서 Fig. 12에서와 같이 상세유한요소모델에 준하는 등가 보

소를 이용한 진동모델을 구축 하였으며 이를 이용한 진동해석을 수행하였다.⁽⁴⁾



(a) 1st mode(1.8 Hz)

(b) 4th mode(6.6 Hz)



(c) 6th mode(8.4 Hz)

(d) 9th mode(13.3 Hz)

Fig. 13 Natural vibration mode shape

등가 보 모델을 제외한 허브 및 조인트 등의 주요 파트에 대해서는 집중질량으로 모델링하였다. Fig. 13에서는 고유진동수가 증가함에 따라 반복되는 모드를 제외한 대표적인 모드들을 나타내고 있다. 이를 토대로 Fig. 14와 같이 회전효과에 따른 전체 구조물의 Campbell Chart를 도출 하였으며, 풍력발전기가 108 RPM으로 회전 시 1차 고유모드가 발생할 수 있음을 확인하였다. 또한 이를 통하여 추가적인 공진 회피설계로 이 부근에서는 제거기 설계로 지속적인 작동이 되지 않도록 약간의 조치가 필요함을 확인하였다.

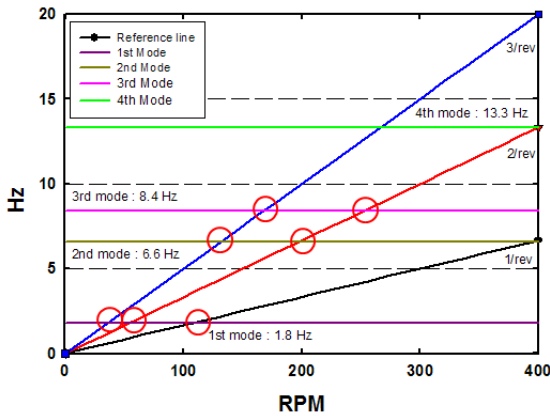


Fig. 14 Vibration safety according to the rotational speed

추가 해석으로 Fig. 15와 같이 마스트 끝단에서의 변위가 3 cm 발생하도록 편심도 0.57°를 적용하여 수행 하였으며 Campbell Chart에서 표시된 공진 가능영역으로 판단된 교차점 부근인 50, 108, 120, 150, 200, 250, 300 RPM에 대하여 수행 하였으며, 이에 대한 해석결과 값은 Fig. 16과 같다. Fig. 16(a)는 회전수에 따른 마스트 상단 지점에서의 변위 응답 결과를 나타내고 있으며, 초기 변형 길이 6 cm를 감안했을 때 108 RPM의 기준으로 17 cm의 추가 동적 변위수준을 확인 할 수 있었다.

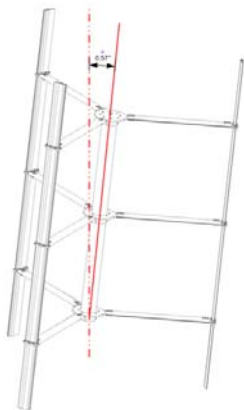
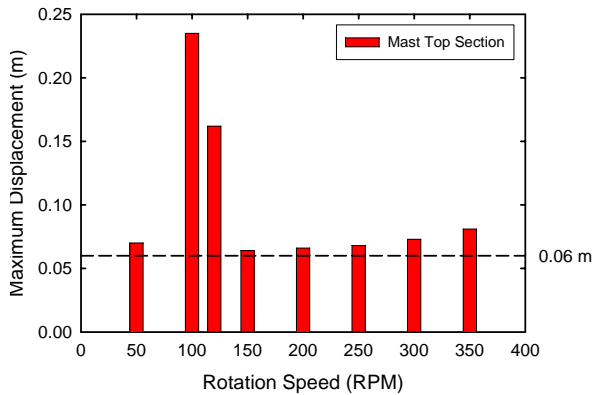


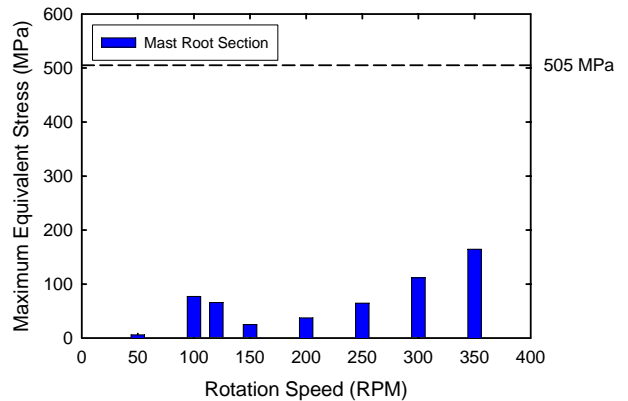
Fig. 15 Manufacturing tolerances on the vertical axis wind turbine

Fig. 16(b)는 회전수에 따른 마스트 하단의 응력 결과를 나타내고 있으며, 정격 회전수 이상인 350 RPM선까지 165 MPa로 편심을 고려한 진동응답 해석에서 안정성을 확보하였음을 보였다. Fig. 16(c)는

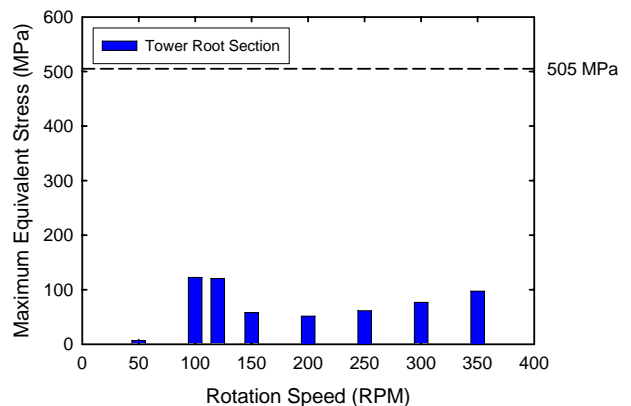
타워 하단의 응력결과를 나타내고 있으며 이 역시 350 RPM까지 121MPa로 안정성을 확보하였음을 보여준다.



(a) Displacement(mast top)



(b) Dynamic stress response(mast root)



(c) Dynamic stress response(tower root)

Fig. 16 Comparison results of the eccentric effects according to rotational speed

Fig. 17에서는 6 kW급 수직축 풍력발전기의 최종 조립형상을 보여주고 있다. 현재 설치된 모델에 대해서 제품으로서의 신뢰성을 확보하기 위하여 장기간의 성능평가기간을 가질 예정이며, 이 성능평가 기간 중에 발생할 수 있는 여러상황에 대하여 조치와 구조개선 등을 통하여 보다 안정적이고 고성능의 제품을 개발 할 계획이다.



Fig. 17 Final assembly of 6 kW class VAWT model

5. 결 론

본 연구에서는 6 kW급 수직축 CFD 기법을 이용한 성능해석 및 FEM 기법을 이용한 구조 건전성 해석을 수행하였다. 그리고 회전하는 블레이드의 풍하중, 관성력, 중력이 복합적으로 작용하는 하중조건을 모두 고려하였으며, 실제 실험이 불가능한 극한 풍하중 조건에 대해서는 정밀해석 결과로 설계 시스템의 안전성을 검토하였다. 정격 회전수 300 RPM 수준까지 진동안전성을 확보하였다.

후 기

본 논문은 지식경제부 기술혁신사업 중 6 kW급 고효율 양력형 수직축 풍력발전기 개발(웹시바(주)와 공동수행) 및 에너지자원인력양성사업의 일환으로

수행되었다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, D. H., Park, K. K., Lee, J. W., Choi, H. C., Kim, D. M., Kim, Y. H., 2009, "Development of 800W Class Lift-Type Vertical-Axis Wind Turbine", Korea Wind Energy Association.
- (2) Kim, D. M., Kim, D. H., Park, K. K., Kim, Y. S., 2009, "Efficient Super-element Structural Vibration Analyses of a Large Wind-turbine Rotor Blade Considering Rotational and Aerodynamic Load Effects", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No 7, pp. 651 ~ 658.
- (3) E. Hau, WIND TURBINE, 2nd ed, 2006, Springer, Berlin Heidelberg.
- (4) Kim, D. H., Park, H. G., Kim, D. M., 2008, "Improved Equivalent Beam Element Modeling Technique for Large Scale Wind-Turbine Composite Balde", Korean Fluid Machinery Association, Vol. 11, No 4, pp. 32 ~ 37.