

# 공탄성 제어를 위한 MW급 풍력발전기 피로 하중 해석

## MW class wind turbine for the control of aeroelastic fatigue load analysis

\*#박동식<sup>1</sup>, 남윤수<sup>2</sup>, 김경기<sup>1</sup>, 최명현<sup>3</sup>

\*#J. S. Park(pjsqwerty@nate.com)<sup>1</sup>, Y. S. Nam<sup>2</sup>, J. G. Kim<sup>1</sup>, M. H. Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스 공학과, <sup>2</sup> 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부, <sup>3</sup> 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학과

Key words : Aeroelastic, Fatigue load, Design load case, Design lifetime

### 1. 서론

세계경제 불안으로 인하여 고유가, 화석연료를 이용한 화력발전소가 배출하는 온실가스 및 원자력발전소의 방사능 누출 위험성 등의 처리문제가 사회적 이슈로 떠오르면서 친환경적인 신 재생 에너지 연구개발이 대두되고 있다. 그 중 풍력발전은 다른 친환경에너지에 비해 상대적으로 우수한 경제성으로 연간 20%이상의 급속한 성장을 보이고 있는 산업분야 중의 하나이며 그 규모가 대형화 되면서 발전 효율을 높이고 기계적 스트레스를 감소시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 특히, 풍력발전기는 경제성을 이유로 설계수명이 20년 이상 확보되어야 한다. 고가(高價)의 거대 구조물인 풍력발전기를 설치하기 위해서는 설치지역 및 풍속과 난류강도에 대한 풍력발전기 운전 상태를 고려해야 한다. 이러한 각종 하중조건에 대한 요구사항이 IEC61400-1[2]에 규정 되어있다. 본 연구에서는 MW급 IEC Class IIA(고난류강도)의 풍력발전기에 대해 풍력발전기 해석 프로그램 GH Bladed(ver. 3.81)[3]와 바람모델 생성 프로그램 TurbSim(ver. 1.40)[4]을 활용하여 풍력발전기에 작용하는 하중 특성을 분석하였다.

### 2. 풍력발전기 진동 특성

IEC61400-1은 풍력발전기가 20년의 설계수명 동안 겪게 될 각종 피로에 대해 구조적으로 안전할지에 대한 평가를 요구하며 특히 발전, 시동, 정상정지, 긴급정지, 아이들링과 같은 풍력발전기의 운전 상태에 대해 난류, 돌풍, 풍향변화, 풍속변화 등이 발생할 경우 20년 동안 이러한 피로를 계산하여 안전할 것인지에 대해 알아보게 된다. 특히, 풍력발전기에서 피로가 상대적으로 큰 곳은 블레이드 루트(root), 로터(rotor), 요베어링(yaw bearing), 타워상단(top), 타워기저(base) 부분들이 되며 본 연구는 정상난류모델에서의 MW급 풍력발전기의 블레이드 루트와 타워기저 부분만을 고려하였다. 블레이드 루트에서의 피로하중으로 Fig. 1의 왼쪽 그림에서  $M_{XB}$ 와  $M_{YB}$ 을 그리고 타워기저(base)에서의 피로하중으로 Fig. 1의 오른쪽 그림에서  $M_{XT}$ 와  $M_{YT}$ 의 모멘트를 고려하게 된다.  $F_{XT}$  방향은 바람에 의하여 발생하는 추력으로 타워를 앞뒤로 흔드는 모멘트가 되며  $F_{YT}$  방향의 모멘트는 바람에 수직인 횡 방향의 모멘트이다.

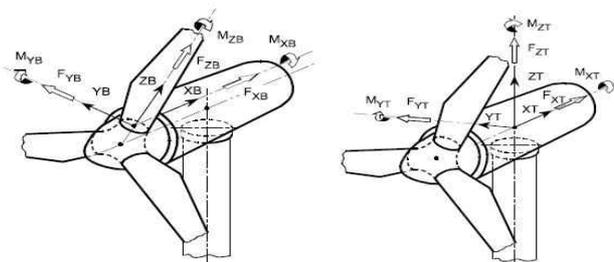


Fig. 1 Co-ordinate for system loads and deflections at blade, tower

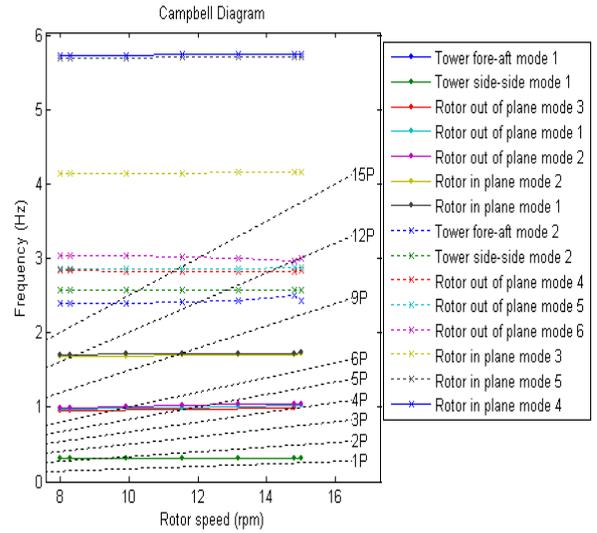


Fig. 2 MW-class Wind turbine Campbell diagram

풍력발전기의 피로하중 평가에 앞서 풍력발전기의 진동 특성에 대해 아는 것은 매우 중요하다. Fig. 2는 GH Bladed 프로그램을 이용하여 MW급 풍력발전기의 진동 특성을 표현한 캠벨선도(Campbell diagram)이다. 로터의 회전수 변화에 따른 각각의 진동특성을 확인할 수 있다. P는 가진력인 로터 블레이드의 통과주파수(passing frequency)를 나타낸다. 로터의 회전속도 9.2rpm 일 때 가진력 2P에 의해 타워의  $F_{XT}$  방향(fore-aft)의 1차 진동모드와  $F_{YT}$  방향(side-side)의 1차 진동모드가 발생한다. 블레이드의 out-of-plane 방향(플랩(flap)방향 진동)의 1차, 2차, 3차 진동모드는 6P, 5P, 4P에 의해 가진되며 그때의 로터 속도는 순서대로 9.8rpm, 11.8rpm, 14.8rpm 이고 주파수(frequency)는 약 0.9Hz이다. 그리고 블레이드의 in-plan 방향(에지(edge)방향 진동)의 1차, 2차 진동모드는 각각 12P와 9P에 의해 가진되며 각각 11.3rpm, 8.5rpm 이고 약 1.7Hz의 주파수를 보인다. Fig. 3은 N.R.E.L (National Renewable Energy Laboratory)에서 공개 제공 하는 Turbsim 프로그램을 이용하여 만든 실제 바람과 유사한 12.4m/s의 정상난류풍속 모델이다. 특히, IEC61400-1에서 제시하는 Class IIA 모델의 난류강도( $I_{15}$ ) 18%와 식(1)에서의 a는 2 값을 함께 적용하였다.

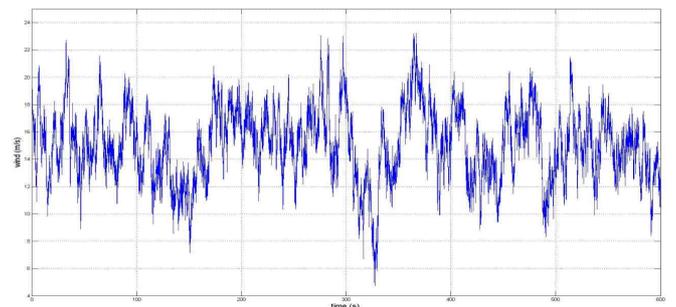


Fig. 3 12.4m/s normal turbulence wind speed using Turbsim

$$\sigma_1 = I_{15}(15m/s + aV_{hub})/(a+1) \quad (1)$$

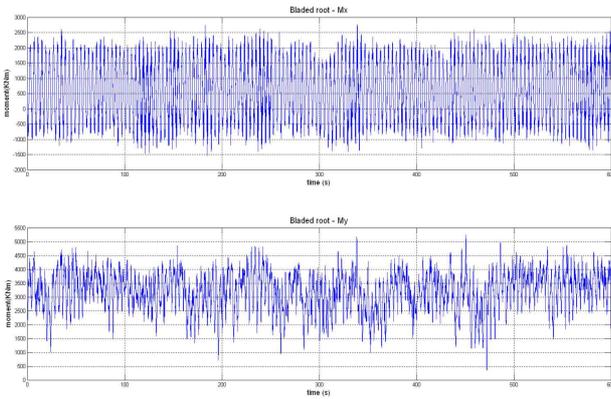


Fig. 4 Moment at the blade root  $M_{XB}$ ,  $M_{YB}$

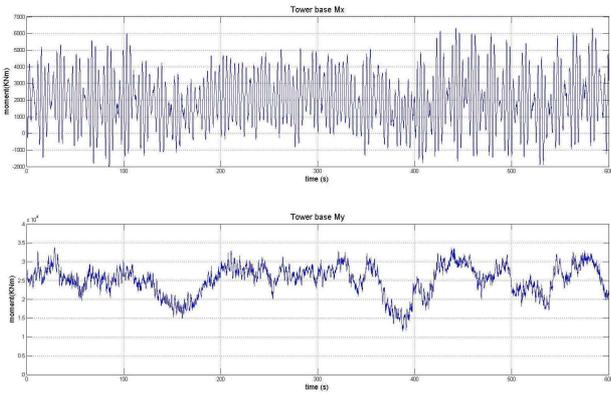


Fig. 5 Moment at the tower base  $M_{XT}$ ,  $M_{YT}$

### 3. 타워 기저와 블레이드 루트에서의 피로 특성

Fig. 4는 정상난류풍속에서 1번 블레이드 루트 모멘트를 Fig. 5는 타워 기저 모멘트를 시간분포에서 나타낸 것이다. 비록 위 두 데이터는 600초(10분)동안의 MW급 풍력 발전기에 작용하는 피로 특성이지만 이러한 피로가 만일 20년간 지속된다면 그 피로의 누적은 구조물에 큰 영향을 주게 된다. 피로하중은 이러한 랜덤하중에 대해 하중과형의 크기나 반복회수를 결정하는 레인플로우 계산법(rainflow counting)을 사용한다. Fig. 6은 블레이드 루트에 발생하는 굽힘 모멘트에 대한 레인플로우 사이클을 나타낸다. 그림에서 (1)은  $M_{XB}$ 을 (2)는  $M_{YB}$ 을 나타내며,  $M_{YB}$ 에 비해  $M_{XB}$ 에 대한 하중크기가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

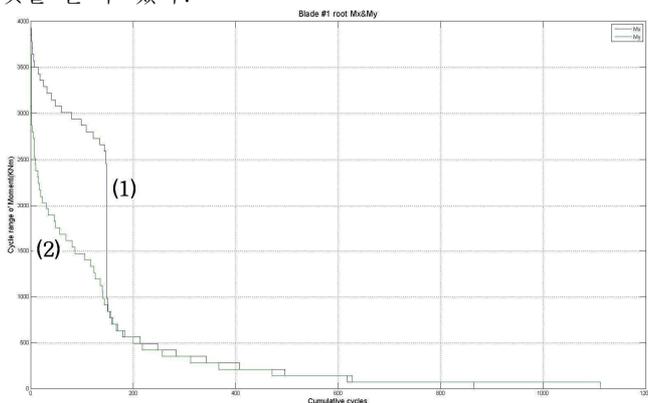


Fig. 6 Rainflow cumulative cycle of moment at blade root

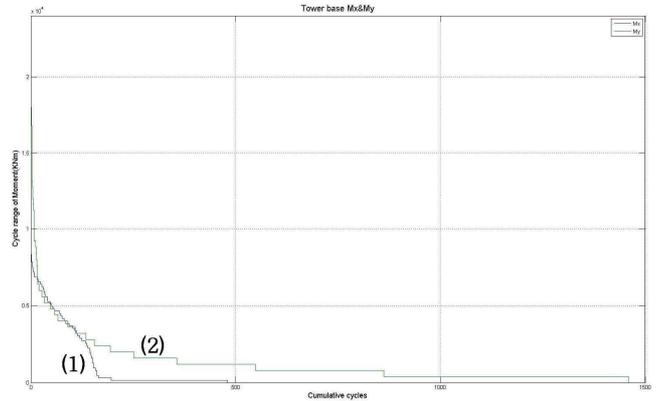


Fig. 7 Rainflow cumulative cycle of moment at tower base

한편, 타워 기저부분의  $M_{XT}$ (1)와  $M_{YT}$ (2)를 보게 되면, 초기에는  $M_{XT}$ 의 모멘트 성분이 지배적이지만 점차적으로  $M_{YT}$ 의 모멘트 량이 더욱 누적되어 타워에 미치는 하중에 지대한 영향을 보여주고 있는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

지금까지 공탄성 제어를 위해 MW급 풍력발전기의 원형(raw) 데이터에 정상난류풍속 모델을 적용하였을 때 블레이드 루트와 타워 기저의 피로 특성들이 어떻게 되는지를 알아보았다. 설계수명 또는 그 이상 동안 풍력발전기의 안전성을 확보하기 위해서는 작용하는 피로하중을 정확하게 예측 및 제어하는 것이 매우 중요하겠다. 현재 효과적인 파워생산과 정격풍속(rated wind speed)이상의 바람이 불어올 때 정밀한 피치제어를 위해 이 MW급 풍력발전기의 데이터들을 이용하여 피치 제어 알고리즘을 개발 중에 있으며 제어 시스템 설계가 끝나면 본격적으로 IEC61400-1에 제시되어 있는 설계 하중 조건(Design load case)에 맞추어 더욱 세밀한 하중 계산을 할 계획에 있다.

### 후기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 에너지자원 인력양성(학술진흥) 사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. E. Hau, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics," Springer, 2<sup>nd</sup> Edition, 2005
2. IEC61400-1, "Wind Turbine Generator Systems – Part 1: Safety Requirements", IEC, 1999
3. E. A. Bossanyi, "GH Bladed User Manual," Garrad Hassan and Partners Ltd, 2009
4. B. J. Jonkman and M.L. Buhl, Jr, "Turbsim User's Guide for Version 1.40" National Renewable Energy Laboratory, 2008