

# MW급 풍력터빈의 공기역학적 특성 분석

## Aeroelastic Characteristic Analysis of a Multi-MW Wind Turbine

\*#조장환<sup>1</sup>, 남윤수<sup>2</sup> 최한순<sup>2</sup> 김정기<sup>2</sup>

\*J. H. CHO<sup>1</sup>, (deadlaw@kangwon.ac.kr)<sup>1</sup>, Y. S. Nam<sup>2</sup> H. S. Choi<sup>2</sup> J. G. Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스공학과, <sup>2</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

Key words : wind turbine, aeroelastic model, modal analysis

### 1. 서론

풍력 터빈은 바람에너지를 전기에너지로 전환하는 하나의 에너지 변환 장치라 말할 수 있다. 최근 들어 대체 에너지의 중요성이 대두 화 되면서 풍력 터빈도 더 많은 에너지를 생산하기 위해 바람에너지를 보다 더 많이 회수 할 수 있도록, 풍력터빈의 용량이 커지고 이에 따라, 구조물이 거대화해지고 경량화 되는 추세이다. 풍력 터빈의 작동에 중요한 관점은 바람에너지의 효율을 높이고, 운전 시 구조물 거동의 안전성 여부이다. 풍력 터빈에 인가되는 주된 하중은 공기 역학적인 관계에 의해 발생되어지는 반복 피로 하중이다.

MW급 풍력 터빈의 날개는 그 직경이 100m 내외에 달하는 거대한 기계 구조물이다. 이에 따라, 회전날개가 1회전하면서 겪는 풍속의 변화(wind shear)와 타워와의 간섭효과(tower effect), 로 인해 날개에는 균등하지 않은 기계적 하중이 발생한다. 이러한 하중은 풍력 터빈의 전체 구조물을 가진시키고, 수명주기를 단축시키는 직접적인 원인이 된다.

본 논문에서는, 구조적인 안정성 제어를 위하여 풍력터빈의 공기역학적 특성을 분석 하여, 풍력터빈의 작동 영역에 따라 공탄성 모델의 동적 운동 특성을 분석 하였다.

### 2. 풍력터빈의 구조 운동 모드 해석

풍력 터빈의 주요 기계요소 는 회전 날개(blade), 주축(low speed shaft), 그리고 타워(tower) 이다. 풍력 터빈의 거대화 짐에 따라, 3가지 주요 기계요소 중 경량화의 목적으로 유연구조물로 설계 되어 지는 구조는 3개 블레이드로 구성된 회전 날개와 타워 부분이다. Fig.1 은 풍력 터빈의 좌표계 를 나타낸 그림이다. 왼쪽은 블레이드 위에 고정된 좌표계로서 날개의 회전속도로 회전하는 회전 좌표계이다. 오른쪽은 타워의 중심에 위치한 좌표계로서 고정된 좌표계이다. Fig.1 좌표계에서 정의 되듯이, 회전 날개의 진동 모드는 날개의 회전평면(rotor disc)을 기준으로 평면 외 방향  $M_{yB}$  (out of plane) 진동과 평면 내 방향  $M_{xB}$  (in plane) 진동으로 구분되어진다. 또한, 타워의 운동은 바람이 풍력 터빈의 허브(hub)의 정면으로 불어올 때 전후  $M_{yT}$  (fore-aft) 방향 과 좌우  $M_{xT}$  (side-side) 방향 진동으로 분리하여 해석 한다. 풍력 터빈이 작동하면서 발생하는 날개와 타워의 진동방향의 패턴을 해석한 행 하였다. 모드 형상(mode shape)은 각 모드에 해당하는 계의 공간적인 운동 형상을 나타낸 것으로 각각의 모드에서 물리적으로 진동하는 모양에 대하여 알아 볼 수 있다. Fig.2,3 는 각각, 날개 평면 외(out of plane)진동의 형상과 날개 평면 내(in plane)형상의 1차진동, 2차진동의 모드 형상(mode shape)을 나타내었다. X축은 날개반경의 위치, Y축은 각각의 날개의 상대적인 처짐을 나타 내었다.

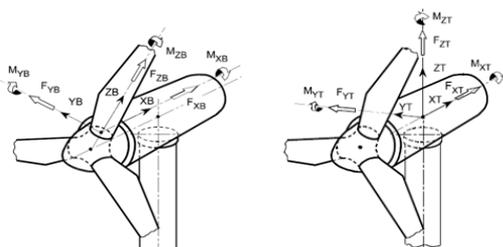


Fig.1 wind turbine (left :blade, right : tower) coordinate system

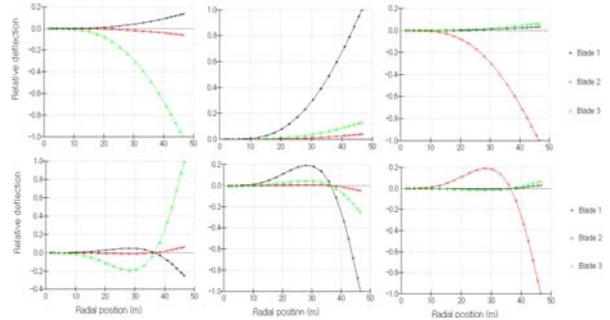


Fig. 2 mode shape of out of plane

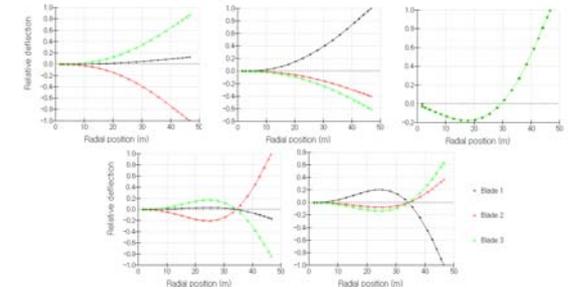


Fig. 3 mode shape of in plane

$M_{yB}$   $M_{xB}$ 의 모드 형상을 비교 하면, 날개 평면 외(out of plane) 방향은 터빈의 운동방향, 즉 로터(rotor)의 회전 방향과 수직인 방향이기 때문에 모드형상에 영향을 끼치는 주된 인자는 바람 성분이다. 따라서, 아주 급격히 변하지 않은 바람성분이 아닐 경우 지속적으로 불어오는 바람의 예압 효과로 인하여, 3개의 날개의 상대적인 처짐의 량이 크지 않음을 볼 수 있다. 그에 비해 날개 평면 내 방향은 로터의 회전 방향과 동일한 방향과, 중력의 효과로 인하여, 3개의 날개의 상대적인 처짐의 량이 커짐을 볼 수 있다. 이러한 영향은 타워의 전후(fore-aft)방향과 좌우(side-side)방향의 모드형상에서도 해석 할 수 있다. Fig. 4 의 첫 행의 2개의 그림은 타워의 좌우 방향의 1차,2차 진동 모드 형상 이고, 두 번째 행은 전후 방향의 모드 형상을 보여준다. 1차 모드 형상은 두 개의 방향성과 크기가 동일함을 확인 할 수 있다. 하지만, 2차 모드 형상부터는 처짐의 크기가 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 타워의 모드 형상을 해석할 시에는 고정 좌표계를 사용함으로써, 중력의 효과를 고려하지 않아도 되기 때문에 타워의 진동에 영향을 끼치는 인자는 바람의 방향 이므로 영향을 많이 받는 타워의 전후 방향의 모드 형상의 처짐의 크기가 좌우 방향 보다 상대적으로 큰 것을 확인 할 수 있다.

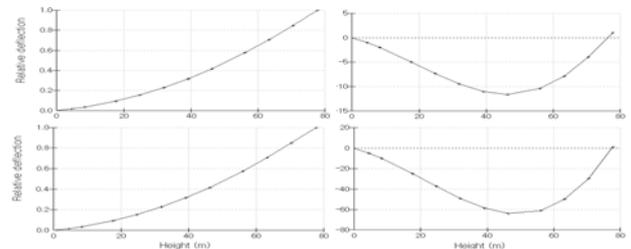


Fig. 4 mode shape of tower

### 3. 풍력 터빈의 동적 특성 해석

Fig. 5는 MW 급 풍력터빈에 대한 Campbell 선도 이다. 이 그림에서 X 축은 날개의 회전속도[rpm] 이고, Y 축은 진동모드 주파수 이다. 그림의 범례를 살펴보게 되면 전 절에서 정의하고 설명하였던 타워(tower)와 날개(blade)의 모드들이 차례대로 Campbell 선도에 그려져 있는 순서대로 적혀 있다. Campbell 선도는 각각의 진동모드에 대하여 주파수들이 날개의 회전 속도에 따라 어떻게 변화 되는 가를 나타낸다. 점선으로 표시된 사선방향의 선들은 날개의 회전속도를 나타낸다. 제일 하단의 선은 날개의 회전속도를 나타내는 1P 조건, 두 번째 사선방향의 실선은 회전속도의 2배인 2P 성분 이후 표시된 뒤로 3P, 4P, 5P, 6P, 9P, 12P, 15P 의 운동 조건을 나타낸다. 이 성분들은 풍력 터빈 구조물을 가진 시키는 가진 주파수(excitation frequency)로 이해 할 수 있다. 따라서 풍력터빈의 각 모드의 진동 모드의 주파수가 가진 주파수와 만나게 되면 기계 구조물의 심각한 영향을 끼치는 공진 현상을 야기 시킬 수 있음을 의미한다.

Campbell 선도를 해석해 보면 먼저, 0.3 Hz 근처에 있는 타워의 전후,좌우 방향 공진은 9.2rpm일 때, 2p 운동조건에서 발생 할 수 있다. 1 Hz 근처의 로터 평면 외 방향 1차 진동 모드는 9.8 rpm에서 6p, 12rpm에서 5p 조건에서 공진이 발생할 수 있다. 그 다음 진동 모드들도 그림을 보면 공진 발생 조건을 알 수 있다. 하지만 실제적인 공진 현상은 일어나지 않는다. 그 이유는 회전체인 날개 구조물의 경우 1회전 성분의 정수 배인 1p 2p 3p...이고, 고정되어 있는 타워 구조물은 날개수의 정수배인 3p, 6p, 9p...의 주파수들이 주된 성분이기 때문이다.

그렇다면 풍속변화에 대하여 회전날개와 타워의 동적 특성은 어떠한 경향을 보이는지 알아보자. Fig. 6 는 풍속변화에 따라 회전 날개 평면 외 진동 특성 변화를 보여준다. 'x'는 1차 진동 모드, 'o'는 2차 진동 모드를 나타낸다. 모드 주파수와 댐핑 계수를 살펴보게 되면 풍속이 증가할수록 주파수가 커지는 이유는 원심력 효과로 인하여 회전 날개의 강성이 증가되기 때문이다. 또한 1차 진동 모드의 댐핑 계수는 2차 진동 모드보다 큰 0.4 부근에 위치하게 되는데 이 이유는 회전 날개의 구조적인 댐핑 보다는 공기역학적 댐핑 효과로 인하여 생겨나는 것이다. Fig. 7 은 회전 날개 평면 내 진동 특성 변화를 풍속 변화에 따른 변화를 보여준다. 전 절에서 모드형상에 대해 논의 하였듯이, 1차 진동 모드와 2차 진동 모드가 존재하게 되는데, 평면 내 진동 특성은 또한 집단 운동 모드와 대칭/비대칭 운동모드로 표현될 수 있다. 이번 해석에서 1차 집단 진동모드가 나타나지 않는 이유는 날개 회전축의 회전을 뜻하는 강제모드이기 때문에 모드 주파수와 댐핑이 0이 되어 나타나지 않는다. 또한 25r/s(3.97Hz)근처의 2차 집단 운동 모드의 주파수는 36r/s(5.7Hz)의 대칭/ 비대칭 주파수 보다 작게 되는데 회전축 과 연결에 있어서 날개의 기계적 구속 조건이 완화된 것으로 해석 된다.

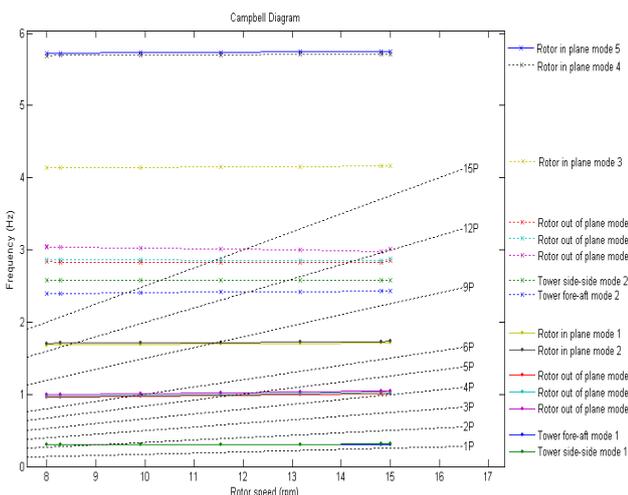


Fig. 5 campbell diagram

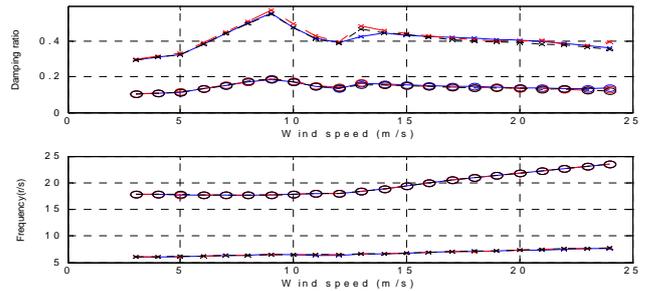


Fig. 6 Out of plane modal frequency and damping

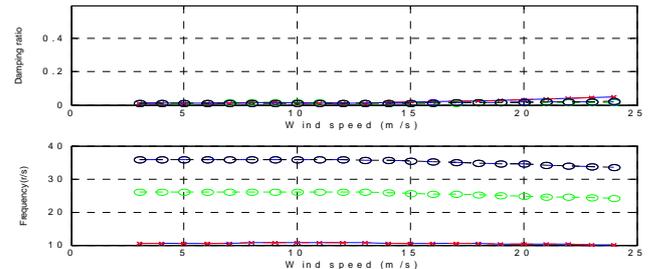


Fig. 7 In plane modal frequency and damping

### 4. 결론

구조물을 제어하기 위해선 그 구조물의 특성을 해석해야하는 선행 연구가 필요하다. 따라서, 풍력 터빈의 구조적 안정 제어 즉 공탄성 제어를 하기 이전에 풍력터빈의 운동 모드 특성 해석을 진행하였다. 풍력 터빈의 유연 구조물로 설계되어지는 회전 날개 (blade)와 타워(tower)의 운동 거동에 대하여 해석하였다. 설계수명 동안 풍력터빈의 안전성을 확보하기 위해서는 풍력터빈의 작용하는 피로하중 성분을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 해석된 풍력터빈의 거동을 바탕으로 피로하중 파괴를 절감시키기 위한 제어 알고리즘이 수행되어야 할 것이다. 하중을 절감시키는 여러 가지 방법이 있겠지만, 현재는 개별피치제어 IPC (Individual pitch control)을 이용하여, 블레이드의  $M_{yB}$ ,  $M_{xB}$ , 타워의  $M_{xT}$ ,  $M_{yT}$  모멘트를 최소화 시키는 연구가 진행 중에 있다.

### 후기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 에너지자원인력양성(학술진흥) 사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. E. Hau, "Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics," Springer, 2<sup>nd</sup> Edition, 2005.
2. Tony Butron, "Wind Energy Hand Book," WILEY, 1947
3. 남윤수, "풍력터빈의 제어," GS인터비전, 2009.