

타워 새도우에 의한 2 MW급 풍력터빈의 추력 특성 확인

강문수* · 임채욱**†

An Investigation on Thrust Properties under Tower Shadow for a 2 MW Wind Turbine

Moon Su Kang*, Chae Wook Lim**†

Key Words : Asymmetric Load(비대칭 하중), Thrust(추력), Tower Shadow(타워 새도우), multi-MW Wind Turbine(MW급 풍력터빈)

ABSTRACT

Wind turbines have been getting increasingly larger and multi-MW wind turbines have become mainstream in the market. Due to the very large turbine blades with lengths of more than a few tens of meters, large asymmetric loads are produced. Tower shadow is one of the primary factors that tend to exert asymmetric loads on blades of these large multi-MW wind turbines. This study examines the thrust variations on the three blades and the hub with tower shadow for a 2 MW wind turbine by applying a potential flow model. Thrust variations on the three blades and the hub with tower shadow were calculated using commercial GH Bladed software and the dynamic properties of the thrust variations were then investigated. Results indicated that the amplitudes of the thrust variations on each blade and the hub with tower shadow increased as wind speed increased and 3P frequency component (three times the rotor speed) was dominant in the thrust variations of both the hub and the blades.

1. 서 론

풍력터빈은 바람이 가진 1차 에너지를 블레이드와 발전기를 이용하여 2차 에너지 변환을 통해 전기 에너지를 생산하는 기계 시스템이다. 풍력터빈은 크게 로터, 나셀, 타워로 구분될 수 있고, 로터는 다수의 블레이드와 허브로 구성되어 있다(Fig. 1)⁽¹⁾. 다수의 블레이드는 허브에 연결되어 있고 로터는 회전축과 연결되어 있다. 로터가 회전한다는 것은 다수의 블레이드와 허브와 회전축이 함께 회전함을 의미한다. 나셀 내부에는 기어박스, 발전기, 변압기 등이 있다. 최근 풍력터빈은 보다 더 많은 전기 에너지를 생산하기 위하여 수 MW급으로 대형화되고 있는 추세이다^(2,3). 대형 풍력터빈은 10 MW 이상까지 개발이 진행되고 있지만, 실제 풍력 시장에서는 육상용 풍력터빈은 2~4 MW 정도가 해상용 풍력터빈은 5~8 MW 정도가 주로 설치되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 수 MW급 풍력터빈의 로터 직경은 2 MW의 경우 80 m 이상, 3 MW의 경우 90 m 이상, 5 MW의 경우 120 m 이상, 8 MW의 경우 150 m

이상이다⁽⁴⁻⁷⁾. 풍력터빈이 수 MW급으로 대형화될수록 블레이드의 길이가 길어지고 로터의 회전 면적이 넓어져서, 로터가 회전할 때 다수의 블레이드에 발생하는 비대칭 하중이 점점 증가하고 있다. 다수의 블레이드에 비대칭 하중을 발생시키는 주요 요인들에는 윈드 쉬어(wind shear), 타워 새도우(tower shadow), 난류(turbulence) 등이 있다^(8,9).

풍력터빈의 설계 및 제어에서 출력과 하중 모두 고려해야 한다^(8,10). 전기 에너지를 생산하는 측면에서 출력도 중요하나, 각 부품의 수명을 보장하는 측면에서 하중 또한 중요하다. 풍력터빈이 수 MW급으로 대형화될수록 다수의 블레이드에 발생하는 비대칭 하중이 커져서, 주요 부품(블레이드, 로터, 타워, 베어링, 기어박스 등)에는 대칭 하중뿐만 아니라 비대칭 하중으로 인한 영향이 커지게 된다. 비대칭 하중은 풍력터빈의 안정적 가동 및 수명과 관련이 깊다. 윈드 쉬어, 타워 새도우, 난류 등에 의해 다수의 블레이드에 발생하는 비대칭하중으로 인해 풍력터빈은 주기적인 피로 하중을 받게 되고 이로 인해 20년 이상 요구되는 수명을 보장함에 있

* 한밭대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanbat National University)

** 한밭대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)

† 교신저자, E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

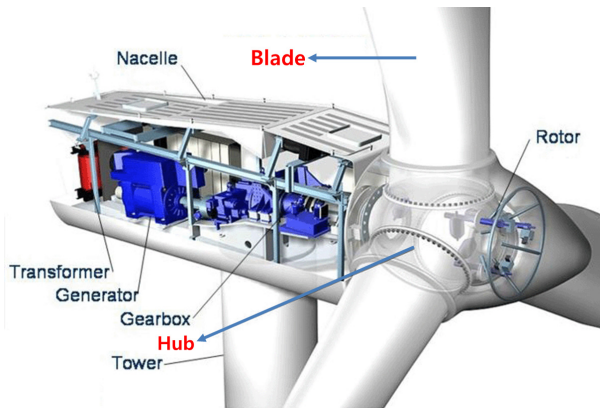


Fig. 1 Wind turbine and its major components⁽¹⁾

어서 큰 영향을 받게 된다.

IEC61400-1의 하중조건에서는 정적 극한 하중뿐만 아니라 동적 하중 조건도 규정하고 있는데⁽¹⁰⁾, 윈드 쉬어와 타워 새도우에 의한 동적 하중도 포함된다. 윈드 쉬어와 타워 새도우에 의해 블레이드와 허브에는 로터의 방위각(azimuth angle)에 따라 변동하는 동적 하중이 발생한다. MW급 풍력 터빈을 대상으로 한 윈드 쉬어의 특성과 영향에 관련된 이전 연구^(11,12)의 결과들은 다음과 같다. 윈드 쉬어에 의해 블레이드에 발생하는 동적 하중은 무시할 수 없는 크기여서 풍력 터빈의 설계 시에 고려해야 한다. 윈드 쉬어에 의한 추력 변동의 크기는 풍속이 커짐에 따라 증가한다. 윈드 쉬어에 의해 블레이드에 발생하는 추력 변동은 로터 방위각의 전 범위(0~360도)에서 영향을 받고 정현파와 유사하여 1P 성분이 가장 지배적이다. 그리고 세 개의 블레이드를 가지는 로터의 경우, 윈드 쉬어에 의해 허브에 발생하는 추력 변동은 세 블레이드에 작용하는 비대칭 추력의 중첩된 결과로 3P 성분을 가지는 정현파와 매우 유사하게 되나 진폭(피크-피크 값)은 블레이드에 작용하는 추력 변동보다 매우 작다.

본 연구에서는 2 MW 풍력터빈을 대상으로 타워 새도우에 의해 블레이드와 로터에 발생하는 추력 변동의 특성을 살펴보고자 한다. 타워 새도우에 의한 풍속의 변동은 포텐셜 흐름 모델(potential flow model)을 적용한다.

GL(Germanischer Lloyd)로부터 인증된 풍력터빈의 해석을 위한 전문적인 상용 S/W인 GH Bladed⁽¹³⁾를 이용하여 타워 새도우에 의해 블레이드와 로터에 발생하는 추력을 계산하고, 그 결과를 분석하여 추력 변동의 크기와 주파수의 특성을 살펴본다.

2. 추력 계산을 위한 수학적 모델링

2.1 풍력 터빈의 추력

바람에 의해 발생하는 풍력터빈의 공력 토크(T_R)는 출력

계수를 이용할 경우 식 (1)과 같이 표현되는데, 풍속뿐만 아니라 주속비와 피치각에 대하여 비선형적으로 표현된다^(8,9).

$$T_R(t) = \frac{\pi \rho R^3}{2} \frac{C_P(\lambda(t), \beta(t))}{\lambda(t)} V^2(t) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도, R 은 로터의 회전 반경, β 는 블레이드의 피치각, V 는 풍속, C_P 는 출력계수, λ 는 주속비이다.

이와 같이 바람에 의해 발생하는 풍력터빈의 추력(F_T)은 추력계수를 이용할 경우 식 (2)와 같이 표현되는데, 이 또한 풍속뿐만 아니라 주속비와 피치각에 대하여 비선형적으로 표현된다^(8,9).

$$F_T(t) = \frac{\pi \rho R^2}{2} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V^2(t) \quad (2)$$

여기서 C_T 는 추력계수이다.

블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 식 (2)의 추력은 각각의 블레이드의 추력($F_{T_1}, F_{T_2}, F_{T_3}$)의 합으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$F_T(t) = F_{T_1}(t) + F_{T_2}(t) + F_{T_3}(t) \quad (3)$$

여기서 $F_{T_1}, F_{T_2}, F_{T_3}$ 는 식 (4)와 같다.

$$F_{T_i}(t) = \frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V^2(t) \quad (4)$$

타워 새도우가 없는 경우에는 세 블레이드에 작용하는 추력은 $F_{T_1} = F_{T_2}(t) = F_{T_3}(t) = F_T/3$ 로 항상 같다. 그러나 타워 새도우가 있는 경우에는 세 블레이드에 작용하는 풍속이 로터의 방위각과 블레이드의 길이에 따라 다르므로 세 블레이드에 작용하는 추력은 서로 다르게 된다.

2.2. 타워 새도우와 추력 변동

타워 새도우는 바람이 풍력터빈으로 불어 올 때 바람과 타워와의 간섭으로 인해 발생한다. 블레이드로 들어오는 바람이 타워를 거쳐 지나갈 때 실린더 형 구조물에 의해 방해되는 경우와 유사하다. 이 경우 풍속에 변화를 주게 되어 그에 따라 블레이드에 발생하는 하중에 변동을 주게 되는데, 이러한 원리로 풍력터빈의 세 블레이드에 비대칭 하중이 발생하게 된다. 타워 새도우에 의해 블레이드에 발생하는 비대칭 하중을 계산하기 위해서는 로터의 방위각과 블레이드의 길이 방향에 따른 타워 새도우에 의한 풍속의 변동을 알아야

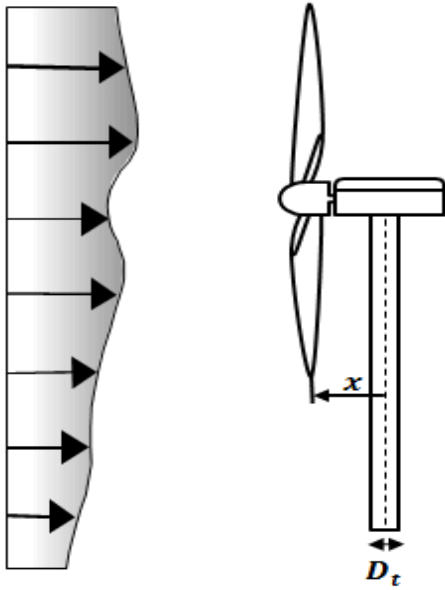


Fig. 2 A schematic of wind turbine for tower shadow

한다. 이를 위한 방법으로 포텐셜 흐름 모델(potential flow model), 타워 새도우 결손 모델(tower-shadow-deficit model), 실증 모델(empirical model) 등이 있다^(8,9,13). 전방향형(upwind) 풍력터빈에 대하여 포텐셜 흐름 모델을 적용하면 더 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있는데, 포텐셜 흐름 모델에서 타워 새도우에 의한 풍속의 변화는 식 (5)와 식 (6)과 같이 표현된다.

$$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x) \tag{5}$$

$$v_{ts}(y,x) = V_h \left(\frac{D_t}{2} \right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} \tag{6}$$

여기서 V_h 은 허브 높이에서의 평균 풍속, v_{ts} 는 타워 새도우에 의한 풍속의 변동, D_t 는 타워 새도우가 계산되는 곳에서의 타워의 지름, x 는 타워 중심선에서부터 타워 앞의 블레이드 중심까지의 거리, y 는 풍속이 통과하는 로터 회전면에서 타워 중심선에서부터 블레이드까지의 횡방향 거리이다.

타워 새도우가 없는 경우에는 블레이드의 길이에 따른 풍속은 일정하고 허브 높이에서의 풍속과 같다. 그러나 타워 새도우가 있는 경우에는 블레이드의 길이와 로터의 방위각에 따라서 거리 y 가 다르기 때문에 풍속의 변동이 발생한다. 이로 인해 타워 새도우가 있는 경우에는 로터가 회전할 때 로터 방위각에 따라 각각의 블레이드에는 풍속 변동에 의한 추력 하중의 변동이 발생한다. 또한 세 블레이드는 120도 만큼 위상차가 있으므로 세 블레이드 각각에는 회전 방위각에 따라 서로 다른 비대칭 하중이 작용하게 된다.

Table 1 Parameter values for the 2 MW wind turbine

Physical parameter	Value
Rotor radius	40 [m]
Tower height	60 [m]
Tower diameter	2.6~3.2 [m]
Number of blade	3
Gear ratio of gearbox	83.33
Overhang	3.7 [m]

3. 2 MW 풍력터빈과 정상상태 추력

3.1 2 MW 풍력터빈 모델

GH Bladed S/W에서는 2 MW 풍력터빈 모델을 제공하고 있다(Fig. 2)⁽¹³⁾. 본 논문에서는 블레이드의 개수는 세 개이고 로터의 위치는 전방향이고 로터의 회전은 시계 방향인 경우를 고려하였다. 로터의 방위각은 블레이드가 하늘을 향하는 방향을 0도로 지면을 향하는 방향을 180도로 정의한다. GH Bladed S/W에서는 블레이드, 로터, 타워 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 표현할 수 있는 창들이 있는데, 거기에서 제시된 2 MW 풍력터빈의 물리적인 파라미터 값들을 정리하면 Table 1과 같다. 로터 반경은 40 m이고 타워는 원형으로 타워의 높이는 60 m이다. 타워 중심선에서부터 타워 앞의 블레이드 중심까지의 거리(x)는 오버행(overhang)이라고 불리는데, 고려된 2 MW 풍력터빈의 오버행(x)은 3.7 m이다. 고려된 2 MW 풍력터빈의 타워는 원형으로 지름(D_t)은 위로 갈수록 조금씩 작아지는데, 지면의 맨 아래에서는 3.2 m이고 허브 중심인 맨 위쪽에서는 2.6 m이다.

2 MW 풍력터빈의 정격 파라미터 값들은 Table 2와 같다. 정격풍속은 11.6 m/s이고 정격 발전기 속도는 1,500 rpm이고 정격 발전기 토크는 13.4 kNm이다.

고려된 풍력터빈은 가변속도-가변피치 형으로, 블레이드와 허브에 발생하는 추력을 확인하기 전에 발전기의 속도와 블레이드의 피치각을 제어하기 위한 토크 제어기와 피치 제어를 우선 설계 및 적용해야 한다⁽⁸⁾. 정격풍속 이하에서 작동되는 토크 제어의 목적은 최대의 출력파워를 생산하도록 하는 것이다. 이를 위해서는 최적주속비 구간에서 주속비를 최적값으로 유지하는 것이 필요한데, 최적모드제어를 이용하는 토크 제어를 설계 및 적용하였다⁽¹²⁾. 정격풍속 이상에서 작동되는 피치 제어의 목적은 정격의 출력파워를 유지하도록 하는 것이다. 이를 위해서 발전기의 회전속도를 정격 회전속도로 유지하도록 블레이드의 피치각을 조절하는 것이 필요한데, PI 제어기와 게인-스케줄러를 이용하는 피치 제어를 설계 및 적용하였다⁽¹²⁾.

Table 2 Rated parameter values for the 2 MW wind turbine

Rated parameter	Value
Rated rotor speed	18 [rpm]
Rated generator speed	1,500 [rpm]
Rated generator torque	13.4 [kNm]
Rated wind speed	11.6 [m/s]
Rated power	2 [MW]

3.2 정상상태 추력 특성

타워 새도우를 고려하지 않는 경우에는 세 블레이드 각각에 작용하는 추력의 크기는 모두 같다. 일정한 풍속이 불어 로터가 회전할 때 타워 새도우가 없는 경우 블레이드에 작용하는 추력은 변동 없이 일정하여 정상상태 값을 가진다. 이는 타워 새도우가 없는 경우 로터 회전 시 로터 방위각이 바뀔 때 동적 하중은 유발되지 않음을 의미한다. Fig. 3은 풍속에 따른 하나의 블레이드에 발생하는 추력의 정상상태 값의 크기를 보여준다.

고려된 2 MW 풍력터빈의 경우 블레이드의 피치각은 Fig. 4와 같이 정격풍속 이하에서는 각도가 0도로 고정되고 정격풍속 이상에서는 피치각이 0도보다 커져 점점 증가한다. 정격풍속 이하에서는 피치각의 변화가 없으므로 풍속이 커짐에 따라 추력의 크기가 풍속 크기의 제곱에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 정격풍속 이상에서는 피치각이 점점 증가함에 따라 추력의 크기가 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 풍속이 증가하여도 정격 출력파워를 유지하기 위하여 피치각이 증가하여 공력 토크뿐만 아니라 추력 또한 감소함을 의미한다. 추력의 크기는 피치각이 변하기 시작하는 정격풍속 근처(약 11~12 m/s)에서 정적 하중의 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 블레이드와 허브 간의 관계를 살펴보자. Fig. 5는 풍속이 16 m/s일 때 타워 새도우가 작용하지 않는 경우 블레이드와 허브에 발생하는 추력의 크기를 보여준다. 하나의 블레이드에 발생하는 추력은 49.8 kN이고, 허브에 발생하는 추력은 149.4 kN이다. 이를 통해 허브에 인가되는 하중은 블레이드 개수 만큼인 세 배의 크기가 인가되는 것을 확인할 수 있다.

4. 타워 새도우에 의한 추력 변동 특성

타워 새도우에 의해 블레이드와 허브에 발생하는 추력 변동 특성을 확인하기 위하여 앞에서 살펴 본 전방향형 2 MW 풍력터빈 모델을 사용하였다. 블레이드와 허브에 발생하는 추력 변동에 대한 동적 하중의 크기 특성을 파악하고, 주파수 분석을 통하여 타워 새도우가 풍력터빈의 추력 변동에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

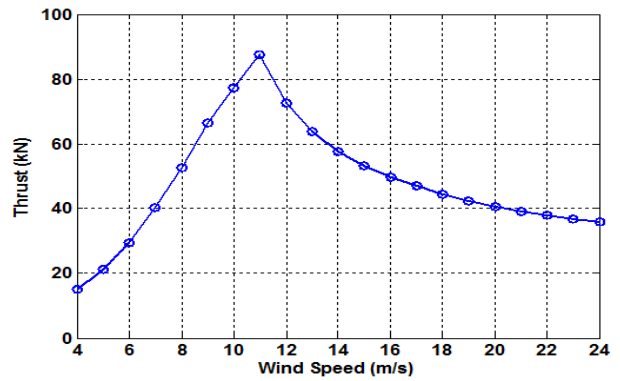


Fig. 3 Steady-state values of thrust on a blade according to wind speed without tower shadow

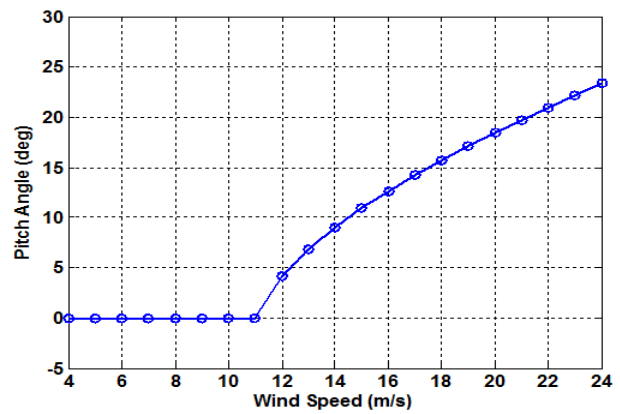


Fig. 4 Steady-state values of pitch angle according to wind speed

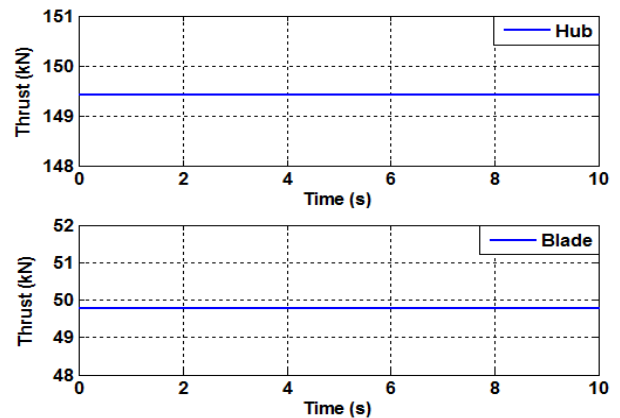


Fig. 5 Steady-state values of thrust without tower shadow at the wind speed of 16 m/s

4.1 추력 변동 크기 특성

일정한 풍속이 불어 로터가 회전할 때 타워 새도우가 작용할 경우 블레이드에 발생하는 추력은 일정하지 않고 로터 방위각이 바뀔 때 따라 크기가 변동한다. Fig. 6은 풍속이 8 m/s일 때 타워 새도우에 의해 하나의 블레이드에 발생하는 추력 변동을 로터 방위각에 따라 보여준다. 이 추력 변동은

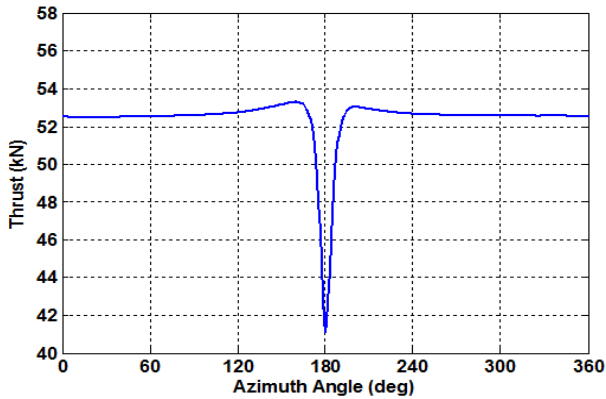


Fig. 6 Thrust variation on a blade with tower shadow with respect to the azimuth angle at the wind speed of 8 m/s

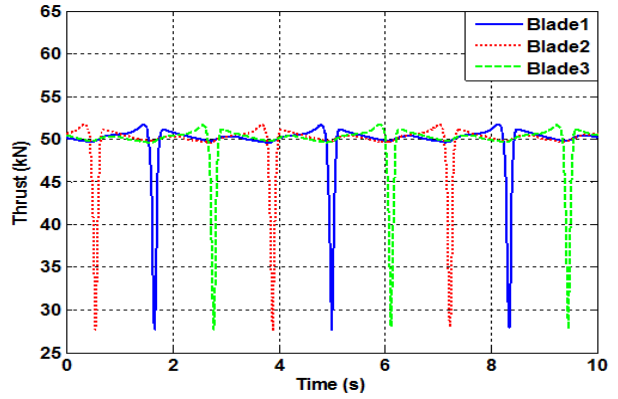


Fig. 9 Thrust variations on each blade with tower shadow at the wind speed of 16 m/s

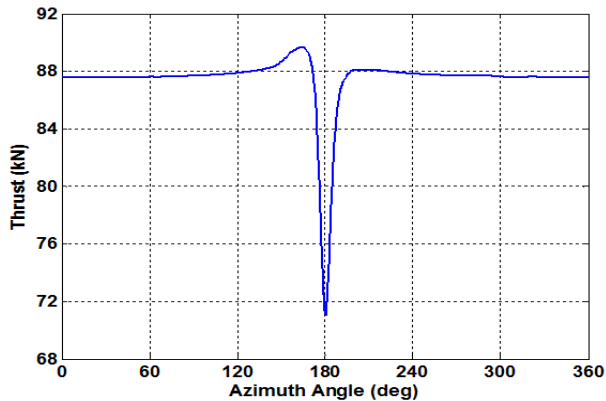


Fig. 7 Thrust variation on a blade with tower shadow with respect to the azimuth angle at the wind speed of 11 m/s

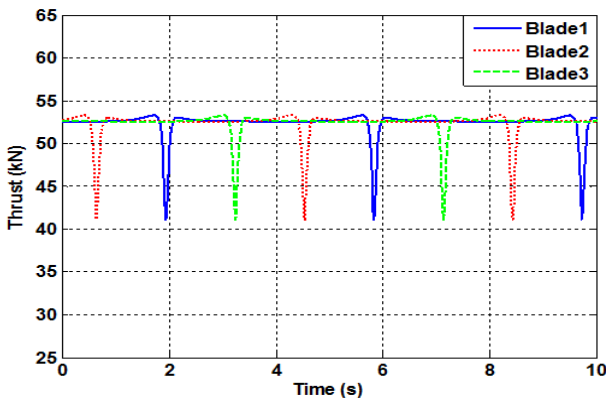


Fig. 8 Thrust variations on each blade with tower shadow at the wind speed of 8 m/s

블레이드와 타워 간의 간섭으로 인해 발생하는데, 로터 방위각이 180 ± 60 도 사이에서 주로 영향을 받음을 확인할 수 있다. 이는 비대칭 하중을 발생시키는 다른 요인 중 하나인 윈드 쉬어에 의한 추력 변동과는 다른 양상이다. 윈드 쉬어의 경우 블레이드에 작용하는 추력 변동은 로터 방위각의 전 범

위(0~360도)에서 영향을 받는다⁽¹²⁾. 타워 새도우에 의한 추력 변동의 최솟값은 로터 방위각이 180도일 때 나타남을 확인할 수 있고, 추력 변동의 최댓값은 최솟값이 일어나는 로터 방위각 180도에서 전후 약 20도(약 160도와 200도)부근에서 발생함을 확인할 수 있다. 풍속 8 m/s일 때 추력 변동의 최댓값은 53.29 kN이고 최솟값은 41.13 kN이므로 피크-피크 값은 12.16 kN이다. 이는 정상상태 값(타워 새도우가 없는 경우의 값)은 52.54kN이므로 타워 새도우에 의한 추력 변동의 최댓값은 1.4% 증가하고 최솟값은 21.7% 감소한 것이다. 이를 통해 타워 새도우는 추력 변동의 최댓값보다 최솟값에 훨씬 크게 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 풍속이 11 m/s일 때의 타워 새도우에 의해 하나의 블레이드에 발생하는 추력 변동을 로터 방위각에 따라 보여준다. 풍력터빈에 미치는 최대의 추력 값은 정격풍속 부근에서 발생한다. 풍속이 8 m/s인 Fig. 6과 비교하면 로터 방위각이 180도 이전(약 160도)의 최댓값이 약간 커지지만, 전체적인 파형 변화는 크게 달라지지 않고 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 풍속 8 m/s와 풍속 16 m/s에서 세 블레이드에서 발생하는 추력 변동을 보여준다. 각 블레이드에서의 추력은 Fig. 3의 정상상태 값을 중심으로 시간에 따라 변동하는 것을 확인할 수 있는데, 풍속 8 m/s와 16 m/s에서 블레이드에 작용하는 추력 변동의 피크-피크 값은 각각 12.16 kN과 23.93 kN이다. 블레이드에서 발생하는 추력 변동의 피크-피크 값은 정격이하의 풍속 8 m/s에서 보다 정격이상의 풍속 16 m/s에서 더 큼을 알 수 있다.

타워 새도우에 의해 허브에 발생하는 추력 변동은 세 블레이드 각각에 작용하는 비대칭 하중이 합쳐져서, 하나의 블레이드에 작용하는 추력 변동이 세 번 반복하여 주기적으로 작용한다. Fig. 10은 풍속이 8 m/s일 때 타워 새도우에 의해 허브에 발생하는 추력 변동을 로터 방위각에 따라 보여준다. 허브에 발생하는 추력 변동의 최솟값은 로터 방위각이 60도,

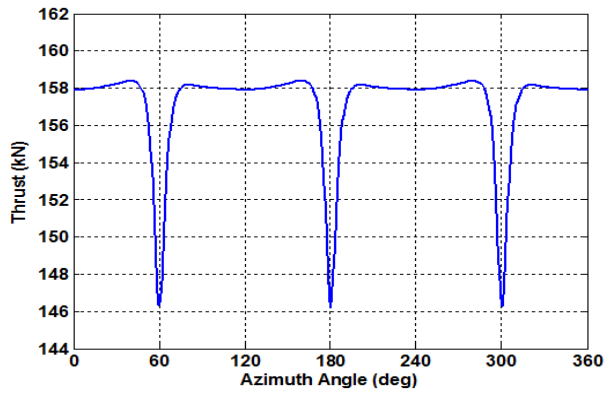


Fig. 10 Thrust variation at the hub with tower shadow with respect to the azimuth angle at the wind speed of 8 m/s

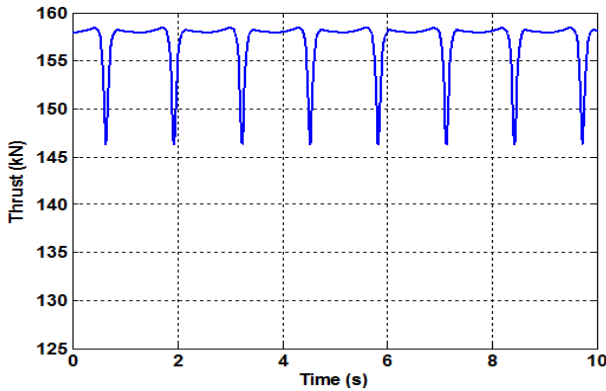


Fig. 11 Thrust variation at the hub with tower shadow at the wind speed of 8 m/s

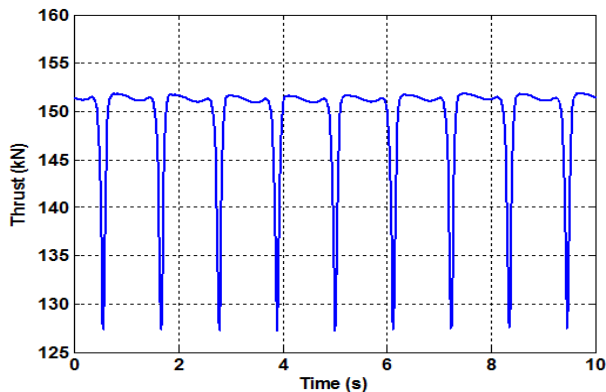


Fig. 12 Thrust variation at the hub with tower shadow at the wind speed of 16 m/s

180도, 300도에서 세 번 발생함을 확인할 수 있다. 로터가 회전할 때 세 블레이드는 120도의 위상차를 가지고 회전한다. 앞에서 살펴본 것처럼 블레이드에 발생하는 추력 변동은 로터 방위각이 120~240도 사이에서 주로 발생한다. 이로 인해 세 블레이드의 추력 변동들이 서로 중첩되는 것이 적고, 특히 추력 변동의 최솟값들은 거의 중첩이 되지 않아 허브에

Table 3 Maximum, minimum and peak-peak values for thrust variations with tower shadow according to wind speed

	Max. [kN]		Min. [kN]		P-P [kN]	
	Blade	Hub	Blade	Hub	Blade	Hub
4m/s	15.39	45.81	11.80	42.22	3.59	3.59
8m/s	53.29	158.40	41.13	146.30	12.16	12.10
12m/s	74.58	220.12	55.38	200.68	19.20	19.44
16m/s	51.71	151.85	27.78	127.30	23.93	24.55
20m/s	43.27	126.03	13.65	94.93	29.62	31.10
24m/s	38.89	113.96	3.65	75.10	35.24	38.86

발생하는 추력 변동의 최솟값은 동일한 크기로 세 번 반복하여 발생하게 된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 풍속 8 m/s와 풍속 16 m/s일 때 허브에서 발생하는 추력 변동을 보여준다. 풍속이 8 m/s와 16 m/s에서 허브에 발생하는 추력 변동의 피크-피크 값은 각각 12.10 kN과 24.55 kN인데, 블레이드에서 발생하는 추력 변동의 피크-피크 값(12.16 kN과 23.93 kN)과 거의 비슷함을 확인할 수 있다. 이는 정상상태 값에서 최솟값으로의 추력 변동의 크기가 허브와 블레이드 둘 다 거의 비슷하기 때문이다. 이는 비대칭 하중을 발생시키는 다른 요소 중 하나인 윈드 쉬어에 의한 추력 변동과는 다른 양상이다. 윈드 쉬어의 경우 세 블레이드에 작용하는 비대칭 추력 변동이 로터 방위각의 전 범위(0~360도)에서 중첩되어, 허브에 작용하는 추력 변동의 피크-피크 값은 블레이드에 작용하는 추력 변동의 값보다 훨씬 작다⁽¹²⁾.

Fig. 8과 Fig. 9, 그리고 Fig. 11과 Fig. 12를 보면 블레이드와 허브 둘 다 풍속이 커질수록 타워 새도우에 의한 추력 변동의 진폭(피크-피크 값)이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이의 경향을 전 풍속(4~24 m/s)에서 확인해 보았는데, Table 3은 풍속의 크기에 따른 블레이드와 허브에서의 추력 변동의 크기(최댓값, 최솟값, 피크-피크 값)를 보여 준다. Fig. 13은 풍속의 크기에 따른 블레이드와 허브에서의 추력 변동의 피크-피크 값을 비교하여 보여 준다. 풍력터빈에 미치는 최대의 추력 값은 정격풍속 부근에서 발생하지만, 추력 변동의 피크-피크 값은 정격풍속 부근이 아닌 정지풍속 24 m/s에서 가장 크게 발생함을 확인할 수 있다. 블레이드와 허브 둘 다 풍속이 커질수록 추력 변동의 진폭(피크-피크 값)이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 정격풍속 근처 12 m/s 대비 정지풍속 24 m/s에서 추력 변동의 피크-피크 값은 블레이드에서는 약 83%, 허브에서는 약 99% 증가함을 알 수 있다. 이는 정격풍속 이상에서 통합 피치 제어를 통하여 각 블레이드에 동일한 명령을 주어 피치각을 증가시킬 때, 블레이드에 작용하는 추력의 정적 하중은 줄일 수 있지만 타워 새도우에 의해 블레이드에 발생하는 추력의 동적 하중은 줄일 수는 없음을 의미한다. 그리고 추력 변동의 피크-피크 값

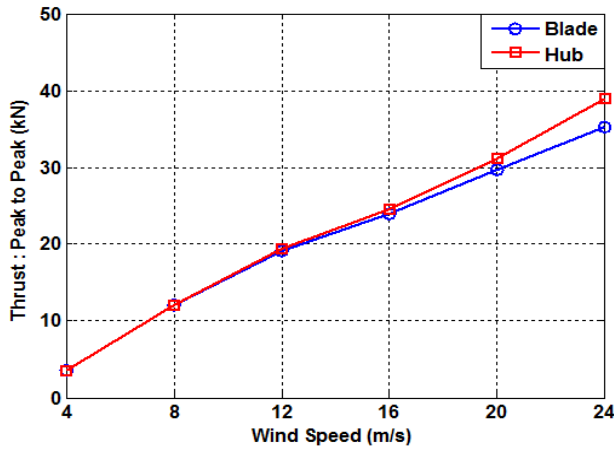


Fig. 13 Peak-peak values for thrust variation with tower shadow according to wind speed

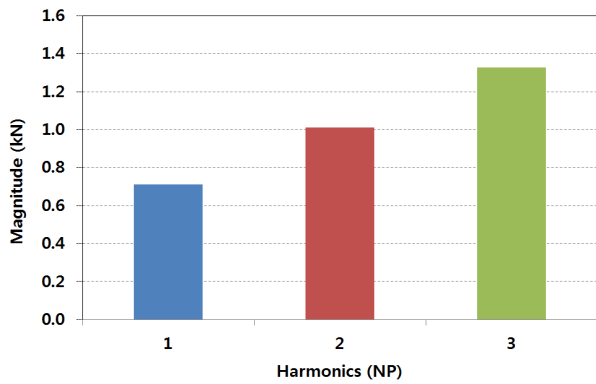


Fig. 14 Frequency components of thrust variation on a blade with tower shadow at the wind speed of 16 m/s

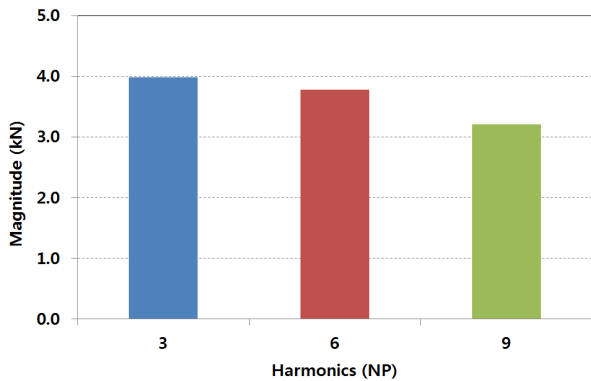


Fig. 15 Frequency components of thrust variation at the hub with tower shadow at the wind speed of 16 m/s

은 블레이드보다 허브에서 조금 컸다. 허브와 블레이드에서의 피크-피크 값의 차이는 정격풍속 이하인 4 m/s와 8 m/s에서는 각각 0%와 0.5%로 거의 차이가 없었고, 정격풍속 이상인 12 m/s, 16 m/s, 20 m/s, 24 m/s에서는 각각 1.2%, 2.5%, 4.8%, 9.3%로 약간의 차이가 있었다. 이는 120도의

위상차를 가지는 세 블레이드에서 발생하는 추력 변동이 합쳐질 때, 추력 변동의 최대값이 발생하는 로터 방위각 약 160도와 200도 근처에서 중첩이 발생하기 때문이다. 이 중첩의 영향은 고풍속이 될수록 조금씩 커져서 정상상태 값에서 최대값으로의 추력 변동의 크기가 허브에서 약간 커져 블레이드와 허브의 피크-피크 값의 차이를 발생시킴을 알 수 있다.

4.2 추력 변동 주파수 특성

앞에서 살펴 본 것처럼 타워 새도우에 의한 추력 변동은 로터 방위각의 전 범위가 아니라 약 40도의 범위에서 진폭이 크게 바뀐다. 이로 인해 타워 새도우에 의한 추력 변동에서는 로터의 회전속도 주파수인 1P 성분뿐만 아니라 2P, 3P, 6P 등의 고조파 성분도 함께 확연히 나타나게 된다. 여기에서는 타워 새도우가 작용할 경우 블레이드와 허브에서 발생하는 추력 변동에 대하여 주파수 분석을 통해 고조파 성분의 특성을 살펴보았다. 주파수 분석은 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 이용하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 타워 새도우가 작용할 경우 풍속 16 m/s에서 블레이드와 허브에 발생하는 추력 변동에 대한 주파수 분석 결과를 각각 보여 준다. 정격풍속 이상인 풍속 16 m/s인 경우 로터의 회전속도는 18 rpm이므로 1P 성분은 0.3 Hz이다.

블레이드의 경우 기준이 되는 주파수 성분은 1P인데, 1P, 2P, 3P 성분의 크기는 각각 0.71 kN, 1.01 kN, 1.32 kN이다. 1P 성분의 크기를 기준으로 2P와 3P의 고조파 성분은 각각 42%와 87% 정도 크를 확인할 수 있다. 블레이드에서는 1P 성분보다 오히려 3P 성분이 가장 크고, 2P와 3P의 고조파 성분의 크기 또한 무시할 수 없을 정도로 크를 확인할 수 있다. 이는 비대칭 하중을 발생시키는 다른 요인 중 하나인 윈드 쉬어에 의해 블레이드에 발생하는 추력 변동의 주파수 특성과는 다른 양상이다. 윈드 쉬어에 의한 블레이드의 추력 변동은 정현파와 유사하므로 1P 성분이 가장 지배적이다⁽¹²⁾.

허브의 경우 기준이 되는 주파수 성분은 3P인데, 3P, 6P, 9P 성분의 크기는 각각 3.98 kN, 3.77 kN, 3.21 kN이다. 3P 성분을 기준으로 6P 성분과 9P 성분은 각각 5.3%와 19.4% 정도 작음을 확인할 수 있다. 허브에서는 3P 성분이 가장 크지만, 6P와 9P 성분의 고조파 또한 3P 성분만큼 크를 확인할 수 있다. 이 또한 윈드 쉬어에 의해 로터에 발생하는 추력 변동의 주파수 특성과는 다른 양상이다. 윈드 쉬어에 의한 허브의 추력 변동은 세 블레이드에 작용하는 비대칭 추력의 중첩된 결과로 3P 성분을 가지는 정현파와 매우 유사하게 된다⁽¹²⁾.

블레이드와 허브 간의 고조파 성분의 관계는 블레이드의 개수가 세 개이므로 3P 성분을 통해 확인할 수 있다. 블레이드에서의 3P 성분의 크기는 1.32 kN이고 허브에서의 3P 성분의 크기는 3.98 kN이다. 그러므로 허브에서의 3P 성분의

크기는 블레이드에서의 3P 성분의 크기의 거의 세 배임을 알 수 있다. 이는 하나의 블레이드의 추력 변동의 3P 성분의 크기가 세 블레이드를 통하여 허브에 각각 인가되고 전혀 상쇄되지 않고 합쳐짐을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 전방향형 2 MW 풍력터빈을 대상으로 타워 새도우에 의해 블레이드와 허브에 작용하는 추력을 풍력터빈 해석용 상용 S/W인 GH Bladed를 이용하여 계산한 후, 추력 변동의 크기와 주파수의 특성에 대하여 분석하였다.

타워 새도우에 의해 블레이드에 발생하는 추력 변동은 정상상태 값 대비 최댓값으로의 변동 크기는 최솟값으로의 변동 크기에 비하여 상대적으로 매우 작았다. 타워 새도우에 의해 허브에 발생하는 추력 변동의 경우, 120도의 위상차를 가지는 세 블레이드에서의 비대칭 추력의 중첩은 추력 변동의 최솟값에서는 영향을 주지 않았으나, 추력 변동의 최댓값에는 약간의 영향을 주었다.

타워 새도우에 의해 발생하는 추력 변동의 진폭(피크-피크 값)은 블레이드와 허브 모두 풍속이 커짐에 따라 점점 증가하였다. 정격풍속 근처 12 m/s 대비 정지풍속 24 m/s에서 추력 변동의 피크-피크 값은 블레이드에서는 약 80%, 허브에서는 약 100% 증가하였다.

타워 새도우가 작용할 때 발생하는 추력 변동의 주파수 특성은 블레이드와 허브 모두에서 로터 회전 주파수의 세 배인 3P 성분이 가장 큼을 확인할 수 있었고, 고조파 성분의 크기 또한 확연히 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

향후 타워의 지름(D_t)과 오버행(x)의 비를 조정하면서 추력 변동 특성을 분석하여 타워 새도우에 의해 발생하는 동하중의 저감을 위한 최적의 비를 찾는 연구를 진행하고자 한다.

후 기

이 논문은 한밭대학교의 ERG 프로그램에 의해 수행된 연구결과입니다.

References

- (1) <https://www.quora.com/What-is-the-working-principle-of-a-wind-turbine>.
- (2) Hansen, A. D. and Hansen, L. H., 2007, "Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years (1995~2004)", *Wind Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 81~97.
- (3) Joselin Herberta, G. M., Iniyamb, S., Sreevalsanc, E. and Rajapandian, S., 2007, "A Review of Wind Energy Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1117~1145.
- (4) Vestas, www.vestas.com.
- (5) MHI Vestas Offshore Wind, www.mhivestasoffshore.com.
- (6) Siemens Market-specific Solutions Wind, www.siemens.com/global/en/home/markets/wind.html.
- (7) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G., 2009, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060.
- (8) Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and Bossanyi, E., 2011, *Wind Energy Handbook*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- (9) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag.
- (10) IEC61400-1, Third Edition, 2005, *Wind Turbines-Part1: Design Requirements*.
- (11) Kim, J., Kang, S. H. and Ryu K. W., 2016, "Comparison of Aerodynamic Loads for Horizontal Axis Wind Turbine (II): with and without Vertical Wind Shear Effect", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 5, pp. 399~406.
- (12) Lim, C. W., 2016, "An Investigation on Thrust Properties under Wind Shear for an On-Shore 2 MW Wind Turbine", *The KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Vol. 19, No. 6, pp. 14~18.
- (13) Bossanyi, E. A., 2009, "GH Bladed Version 3.82 User Manual".