

## 정격풍속 이하에서 풍력터빈의 타워 섀도 추력 동하중 개발

### Evaluation of Thrust Dynamic Load under Tower Shadow in Wind Turbine below the Rated Wind Speed

임채욱\*

Chae-Wook Lim\*

#### 〈Abstract〉

This paper relates to a method of modeling the thrust dynamic load caused by the thrust variation occurring on the blade due to the tower shadow below the rated wind speed. A method that uses thrust coefficient is presented by introducing “tower shadow coefficient of thrust variation”. For a 2MW wind turbine, the values of “tower shadow coefficient of thrust variation” are calculated and analyzed at wind speeds below the rated. The dynamic load model of thrust under tower shadow is evaluated in Matlab/Simulink using the obtained “tower shadow coefficient of thrust variation” and thrust coefficient. It shows that the thrust variations acting on the three blades by the tower shadow can be expressed using both the thrust coefficient and the introduced “tower shadow coefficient of thrust variation”.

*Keywords : Below the Rated, Blade, Thrust Coefficient, Thrust Variation, Tower Shadow, Wind Turbine*

---

\* 정회원, 교신저자, 한밭대학교 기계공학과, 교수  
E-mail: cwlim@hanbat.ac.kr

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat National University

## 1. 서론

풍력터빈이 대형화되면서 블레이드의 길이가 수십 미터 이상으로 길어지고 있고, 최근에는 10MW 이상의 풍력터빈을 개발하는 추세이다 [1-3]. 풍력터빈의 출력은 블레이드 길이의 제곱에 비례한다. 블레이드의 길이가 길어지면서 바람이 가진 유용한 에너지로부터 전기 에너지를 더 많이 얻어낼 수 있게 되었다. 그러나 블레이드가 길어지면서 로터가 회전할 때 세 블레이드에 발생하는 비대칭 하중이 증가하는 단점이 있다. 이 비대칭 하중을 줄이기 위하여 개별피치제어과 같은 추가적인 제어 방법이 필요하게 되었다[4-6]. 그러므로 MW급 이상의 풍력터빈에서는 블레이드에 발생하는 추력 등의 비대칭 하중을 고려하여 모델링하는 것이 중요하다.

풍력터빈에서 발생하는 비대칭 하중은 윈드시어(Wind Shear), 타워 새도(Tower Shadow), 난류 풍속 등의 영향이 매우 크다. 양력과 항력 등의 공력계수가 주어지면 이들 정보를 이용하여 BEM(Blade Element Momentum) 방법을 적용하면 풍력터빈의 추력을 계산할 수 있다[7]. 블레이드의 공력계수를 모르는 경우에는 추력계수를 대신 안다면 추력계수를 이용하여 추력을 계산할 수도 있다[8,9]. 그러나 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용하면 로터 허브에서 풍속 변화에 따른 추력 변화만 계산할 수 있다. 그러므로 타워 새도에 의해 블레이드에 작용하는 비대칭 동하중에 의한 추력 변동을 추력계수를 이용하는 방법이 필요하다. 풍력터빈의 풍속에 따른 작동 특성으로 인해 비대칭 하중 특성은 정격풍속 이하와 정격풍속 이상으로 구분된다. 풍력터빈의 하중은 정격풍속 이하에서는 풍속과 로터 회전속도에 영향을 받지만, 블레이드의 피치각에는 영향을 받지 않는다. 정격풍속 이하에서 윈드시어에 의해 블레이드에 발생

하는 추력변동 동하중을 추력계수를 이용하여 모델링하는 방법에 대하여 이전 연구에서 제시되었다[10]. 로터의 회전 방위각에 따른 동하중 특성이 윈드시어와는 다른 타워 새도에 관해서도 추력계수를 이용하여 추력변동 동하중을 표현하는 추가 연구가 필요하다.

본 논문은 정격풍속 이하에서 타워 새도에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 모델링하는 방법에 관한 것이다. 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용할 때 타워 새도에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 표현하는 방법을 제시한다. 이를 위하여 “타워 새도 추력변동 계수”를 정의 및 도입하고, 정격풍속 이하에서 “타워 새도 추력변동 계수”를 구하고 분석한 후 Matlab과 Simulink에서 타워 새도 추력 동하중 모델을 구현하고 검증한다.

## 2. 타워 새도에 의한 추력

### 2.1 타워 새도

풍력터빈에서 발생하는 타워 새도는 바람과 타워의 간섭에 의한 것이다. 바람이 풍력터빈으로 불어 들어오면 블레이드를 거친 후에 타워를 거쳐 지나가게 된다. 이때 타워는 바람의 흐름을 방해하게 되고, 타워를 지나는 지점의 풍속에 변화를 주게 된다. 이에 따라 타워 새도에 의해 추력의 변동이 발생하고 블레이드에는 동하중이 발생하게 된다. 로터가 회전할 때 타워 새도에 의해 블레이드에 발생하는 하중은 로터 회전 방위각에 따라 달라진다. 세 블레이드는 로터에 120도 간격으로 결합하여 있으므로 세 블레이드에는 서로 다른 비대칭 하중이 발생하게 된다.

타워 새도에 의한 풍속의 변동을 계산하기 위한

방법으로는 대표적으로 포텐셜 흐름 모델(potential flow model)이 있다[11,12]. 전 방향형 풍력터빈에 대하여 풍속의 변동을 계산할 때 포텐셜 흐름 모델을 적용하여 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 전 방향형 2MW 풍력터빈 대상으로 포텐셜 흐름 모델을 적용하여 수치 실험을 진행하였다.

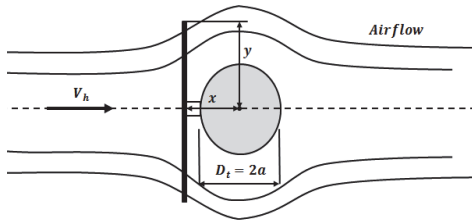


Fig. 1 Potential flow model

Fig. 1은 포텐셜 흐름 모델의 개략도이고, 포텐셜 흐름 모델에서 타워 새도에 의한 풍속의 변동은 식 (1)과 식 (2)로 표현된다. 타워 새도가 고려되지 않은 경우에는 블레이드의 길이에 따라서 풍속은 변동이 없이 일정하며 허브 높이에서의 풍속과 같다. 하지만 타워 새도가 고려된 경우에는 블레이드의 길이와 로터 회전 시 변화하는 로터 방위각에 따라서 거리  $y$ 가 달라지기 때문에 풍속의 변동이 발생한다. 이에 따라서 타워 새도가 고려된 경우에는 로터 회전 시 로터 방위각이 변화함에 따라 각각 세 블레이드에는 풍속 변동에 의한 추력의 변동이 발생하게 된다. 또한 세 블레이드는 서로 120도의 위상차가 존재하기 때문에, 로터 회전 시 로터 방위각이 변화함에 따라 블레이드마다 각기 다른 비대칭 하중이 유발하게 된다.

$$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x) \tag{1}$$

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

여기서  $V_h$ 는 허브 높이에서의 평균 풍속을 뜻하며,  $v_{ts}$ 는 타워 새도에 의해 변동하는 풍속을 뜻하고,  $D_t$ 는 타워의 지름,  $x$ 는 타워의 중심부터 타워 앞에 있는 블레이드 중심까지의 거리를 뜻한다.  $y$ 는 풍속이 통과하는 로터의 회전면에서의 타워 중심부터 블레이드까지의 횡 방향 거리를 뜻한다.

## 2.2 공력계수를 이용한 추력 표현

풍력터빈이 바람에 의해 후방으로 밀리는 힘인 추력( $F_T$ )은 BEM 방법을 이용하여 계산이 가능하다. 바람이 불어 풍력터빈의 로터-블레이드가 회전할 때 블레이드 단면에 작용하는 공력은 블레이드 익형의 양력계수( $C_l$ )와 항력계수( $C_d$ )의 함수이다. 블레이드 익형의 각 단면에서 발생하는 양력과 항력의 성분은 공력 토크와 추력을 발생시킨다. 블레이드 하나에서 발생하는 전체 추력은 블레이드 각 단면에서 발생하는 추력을 블레이드 길이에 따라 적분함으로써 얻을 수 있는데 식 (3)과 같이 표현된다[11,12].

$$F_{T_i} = \frac{\rho c}{2} \int_0^R V_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr \tag{3}$$

여기서  $\rho$ 는 공기밀도,  $c$ 는 익형 시위 선의 길이,  $V_{rel}$ 는 익형 앞에서의 상대속도,  $\phi$ 는 익형 받음각과 블레이드 피치각의 합이다.

블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 로터 허브에 작용하는 전체 추력은 각 블레이드의 추력( $F_{T_i}$ )의 합으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$F_T(t) = F_{T_1}(t) + F_{T_2}(t) + F_{T_3}(t) \tag{4}$$

타워 새도가 없는 경우에는 블레이드가 세 개인 풍력터빈의 로터 허브에 작용하는 전체 추력은 블레이드 하나에 작용하는 추력인 식 (3)을 세 배

로 하면 된다. 타워 새도가 없는 경우에는 풍속이 블레이드의 길이에 따라서 일정하다. 그러나 타워 새도를 고려하면 풍속은 블레이드의 길이에 따라 다르고 또한 로터의 회전각에 따라서 다르기 때문에, 각 블레이드에는 서로 다른 비대칭 하중이 작용하게 된다.

### 2.3 추력계수를 이용한 추력 표현

회전날개의 형상과 블레이드 익형에 관한 공력 특성이 알려져 있다면 식 (3)으로부터 추력계수 ( $C_T$ )를 계산할 수 있다. 바람에 의해 블레이드 하나에서 발생하는 풍력터빈의 추력은 식 (5)와 같이 표현되는데, 풍속뿐만 아니라 주속비와 피치각에 대하여 비선형적으로 표현된다[11,12].

$$F_T(t) = \frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V_m^2(t) \quad (5)$$

여기서  $V_m$ 은 로터 허브에서의 풍속,  $\beta$ 는 블레이드의 피치각,  $\lambda$ 는 주속비로 식 (6)과 같이 정의된다. 그리고  $C_T$ 는 추력계수로 식 (3)과 (4)의 BEM 방법에서의 추력( $F_T$ ) 표현을  $\rho \pi R^2 V_m^2 / 2$ 로 나눔으로 식 (7)과 같이 정의되며, 블레이드의 각 단면에서의 익형의 양력계수, 항력계수, 형상 등을 알아야 계산이 가능하다.

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t)R}{V_m(t)} \quad (6)$$

여기서  $\Omega_r$ 은 로터의 회전 각속도이다.

$$C_T(\lambda, \beta) = \frac{F_T}{\rho \pi R^2 V_m^2 / 2} = \frac{3c \int_0^R V_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr}{\pi R^2 V_m^2} \quad (7)$$

블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 로터 허브에 작용하는 전체 추력은 각 블레이드의 추력 ( $F_{Ti}$ )의 합으로 식 (4)와 같이 동일하게 표현된다. 타워 새도가 있는 경우의 풍속은 블레이드의 길이에 따라 다르고 또한 로터의 회전각에 따라서 다르기 때문에, 식 (5)를 이용하여 각 블레이드에 작용하는 서로 다른 비대칭 하중을 계산할 수 없다.

## 3. 2MW 풍력터빈의 추력

### 3.1 2MW 풍력터빈의 모델 파라미터

풍력터빈의 출력과 하중 해석을 위한 전문 상용 소프트웨어인 Bladed에서는 2MW 풍력터빈 데모 모델을 제공하고 있다[12]. Bladed에서는 블레이드, 로터, 타워, 파워 트레인 등 풍력터빈의 각 구성 요소들을 표현할 수 있는 창들이 있는데, 제시된 2MW 풍력터빈 데모 모델의 물리적인 파라미터값들은 Table 1과 같다. 블레이드의 개수는 3개이고 최적 주속비 구간의 풍속은 5.3~9.3 m/s이고 정격풍속은 11.7 m/s이다. 풍력터빈의 출력계수( $C_p$ )는 최적 주속비가 8.1이고 출력계수 최댓값은 0.4662를 가진다.

Table 1. Physical parameters and values of the 2MW wind turbine

Physical parameter	Value [unit]
Blade length( $R$ )	40 [m]
Rotor inertia( $J_r$ )	6.209e6 [kgm <sup>2</sup> ]
Generator inertia( $J_g$ )	60 [kgm <sup>2</sup> ]
Gearbox gear ratio( $N_{gb}$ )	83.33 [-]

### 3.2 토크 제어기

풍속과 블레이드의 상호작용이 비선형적인 특성

을 가져 풍속에 따른 작동 점이 제어기의 동특성에 영향을 받으므로, 토크 제어기와 피치 제어기의 설계가 먼저 고려되어야 한다. 정격풍속 이하에서는 블레이드 피치각의 변화가 없으므로 피치 제어기의 고려는 필요 없으나 토크 제어기의 고려는 꼭 필요하다. 정격풍속 이하에서는 로터 회전속도와 추력 등 풍력터빈의 응답 특성은 토크 제어기의 형태에 따라 영향을 받는다. 토크 제어기는 풍력터빈에서 실용적으로 많이 사용되는 최적 모드게인을 이용하는 토크제어 방법을 고려하여 적용하였다[9,13]. 발전기의 토크 크기는 최적모드게인에 발전기의 속도를 제공하여 얻게 된다. 토크 제어기의 작동으로 인해 최적 주속비 구간에서는 주속비가 최적 주속비를 유지하게 되고 최대의 출력과워를 얻게 된다.

기어박스가 포함된 풍력터빈인 경우 발전기의 회전 각속도( $\Omega_g$ )는 기어박스의 증속비( $N_{gb}$ )와 상관관계가 있다.

$$\Omega_g(t) = \Omega_r(t) N_{gb} \quad (8)$$

### 3.3 타워 새도에 의한 추력 특성

타워 새도가 없는 경우 풍력터빈의 세 개의 블레이드에 작용하는 추력은 모두 같고 각 블레이드의 추력이 합해져서 로터 허브에 추력을 발생시킨다. 앞에서 설명한 토크 제어기를 적용하여 로터 허브에서의 풍속에 따른 각 블레이드에서의 추력의 크기를 BEM 방법을 이용하여 계산하였다. Fig. 2는 타워 새도가 없는 경우에 대하여 정격 이하의 풍속(4~11 m/s)에서 풍속에 따른 블레이드 하나에서의 추력의 정상상태 값을 보여주고 있는데, 풍속이 증가함에 따라 추력 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

타워 새도가 있는 경우 풍력터빈의 세 개의 블레

이드에 작용하는 추력은 시간에 따라 모두 다르고 각 블레이드에 작용하는 추력에는 변동이 발생한다. 로터가 회전할 때 각 블레이드의 추력은 로터 방위

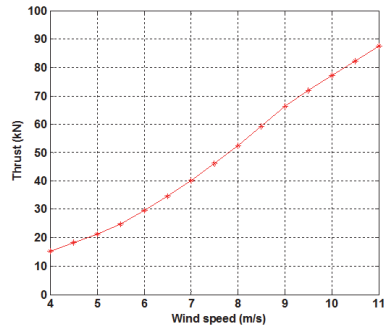
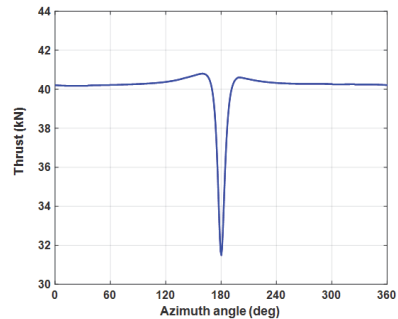
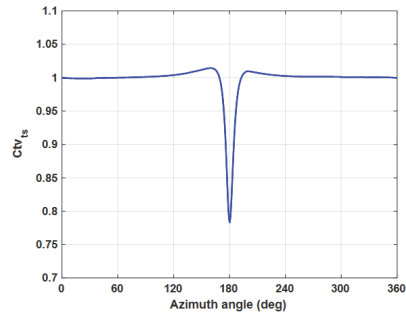


Fig. 2 Steady-state values of thrust on a blade according to wind speed without tower shadow



(a) Thrust variation



(b) Coefficient of thrust variation

Fig. 3 Thrust variation on a blade under tower shadow at the wind speed of 7 m/s with respect to azimuth angle

각에 따라서 변동하게 된다. 앞에서 설명한 토크 제어기를 적용하여 로터 허브에서의 풍속에 따른 각 블레이드에서의 추력의 크기를 BEM 방법을 이용하여 계산하였다. Fig. 3은 허브에서의 풍속이 7 m/s 인 경우 타워 새도에 의한 추력의 변동을 보여주고 있다. 타워 새도에 의한 추력 변동의 최솟값은 로터의 회전 방위각( $\theta$ )이 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.

#### 4. 타워 새도의 추력 동하중 모델

##### 4.1 추력계수와 타워 새도 추력변동 계수

추력계수를 이용하는 식 (5)는 허브에서의 풍속의 변화에 따른 추력의 변화를 표현할 뿐이다. 식 (5)를 사용할 경우 허브에서의 풍속이 일정할 경우 평균 풍속에 대한 블레이드 하나에 작용하는 추력의 정상상태 값을 구할 수 있다. 그러나 추력계수를 이용하는 식 (5)는 타워 새도가 있는 경우 타워 새도에 의한 추력의 변동을 표현할 수 없다. 본 논문에서는 추력계수를 이용하는 식 (5)를 기반으로 타워 새도에 대한 추력의 변동을 표현하고자 한다. 식 (9)와 같이 무차원 파라미터인 “타워 새도 추력 변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”를 도입하여 타워 새도 추력 동하중 모델을 표현하는 방법을 제안한다.

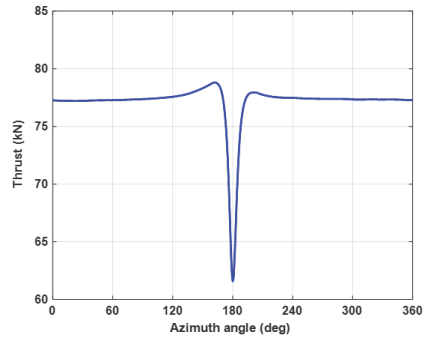
$$F_{T_{i,ts}}(t) = C_{tv_{ts}}(\theta(t), \lambda(t)) \left[ \frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V_m^2(t) \right] \quad (9)$$

“타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”는 식 (10)과 같이 타워 새도에 의해 변동하는 추력값( $F_{T_{i,ts}}$ )을

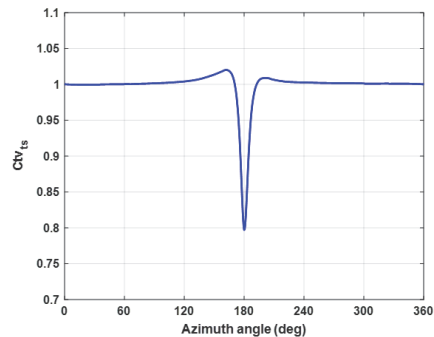
타워 새도가 없을 때의 추력 값( $F_{T_i}$ )으로 나눈 비로 정의한다. 피치각이 일정한 정격풍속 이하인 경우 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”는 로터의 회전 방위각( $\theta$ )과 주속비( $\lambda$ )의 함수로 표현할 수 있다.

$$C_{tv_{ts}}(\theta, \lambda) = \frac{F_{T_{i,ts}}(\theta, \lambda)}{F_{T_i}(\lambda)} \quad (10)$$

정의된 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”는 타워 새도로 인한 추력의 변동이 타워 새도가 없는 경우의 추력보다 어느 정도의 비율로 증가 또는 감소하는지를 알려주는 것이라 볼 수 있다. 식 (10)에서  $F_{T_i}$ 는 식 (5)를 사용하여 구할 수 있고,



(a) Thrust variation



(b) Coefficient of thrust variation

Fig. 4 Thrust variation on a blade under tower shadow at the wind speed of 10 m/s with respect to azimuth angle

$F_{T_{i,ts}}$ 는 식 (3)으로 구한 값을 이용하면 된다. 예를 들어 평균 풍속이 7 m/s인 경우 주속비는 8.1이다. 타워 새도가 없는 경우의 추력( $F_{T_i}$ )은 40.22 kNm이고, 타워 새도가 있는 경우의 추력( $F_{T_{i,ts}}$ )은 Fig. 3(a)와 같이 로터의 회전 방위각( $\theta$ )에 따라 변동한다. 식 (10)으로부터 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”를 구하면 Fig. 3(b)와 같이 구할 수 있다. 평균 풍속이 10 m/s인 경우 주속비는 7.41이고 타워 새도가 없는 경우의 추력( $F_{T_i}$ )은 77.25 kNm이다. 타워 새도가 있는 경우의 추력( $F_{T_{i,ts}}$ )은 Fig. 4(a)와 같고 “타워 새도 추력변동 계수

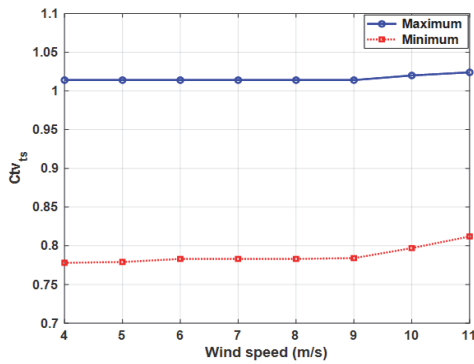


Fig. 5 Values of coefficients of thrust variation under tower shadow with respect to wind speed

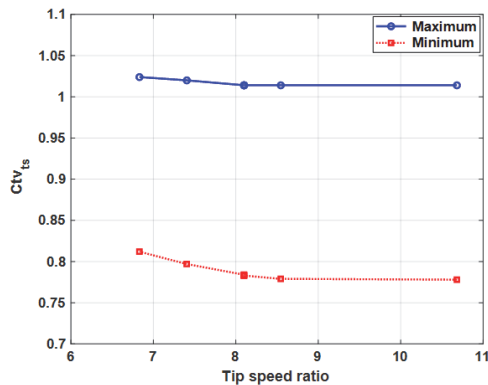


Fig. 6 Values of coefficients of thrust variation under tower shadow with respect to tip speed ratio

( $C_{tv_{ts}}$ )”를 식 (10)을 이용하여 Fig. 4(b)와 같이 구할 수 있다.

Fig. 5는 타워 새도가 있는 경우 정격 이하의 풍속(4~11 m/s)에서 풍속에 따른 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”의 최댓값과 최솟값을 보여주고 있다. 풍속이 증가함에 따라 최댓값과 최솟값 모두 조금씩 커지는 경향임을 알 수 있다. 특히 풍속 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s에서는 최댓값들과 최솟값들은 변하지 않고 동일함을 주목할 필요가 있다. 이는 최적 주속비 구간(풍속 5.3~9.3 m/s)에서는 주속비의 값이 최적 주속비인 8.1로 일정하므로, “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”가 동일함을 의미한다. 최적 주속비 구간에서 타워 새도가 있는 경우의 추력은 타워 새도가 없는 경우보다 최대 1.4% 정도 증가하고 최소 21.7% 정도 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 6은 타워 새도가 있는 경우 정격 이하의 풍속(4~11 m/s)에서 주속비 따른 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”의 최댓값과 최솟값을 보여준다. 최적 주속비 구간보다 작은 풍속에는 주속비가 커지고, 최적 주속비 구간보다 큰 풍속에는 주속비가 작아진다. 주속비가 최적 주속비보다 작아짐에 따라 추력변동 비율이 조금 작아지고(최댓값 약 2.4% 증가, 최솟값 약 18.8% 감소), 주속비가 최적 주속비보다 커짐에 따라 추력변동 비율이 약간 커짐(최댓값 약 1.4% 증가, 최솟값 약 22.2% 감소)을 확인할 수 있다.

## 4.2 타워 새도 추력 동하중 모델 구현

정격풍속 이하에서는 제안된 식 (10)의 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”와 추력계수를 이용하는 식 (9)를 이용하여, 로터의 회전 방위각( $\theta$ )과 주속비( $\lambda$ )에 따라 블레이드에 타워 새도로 인해 발생하는 추력 변동을 구현할 수 있다. 구해진

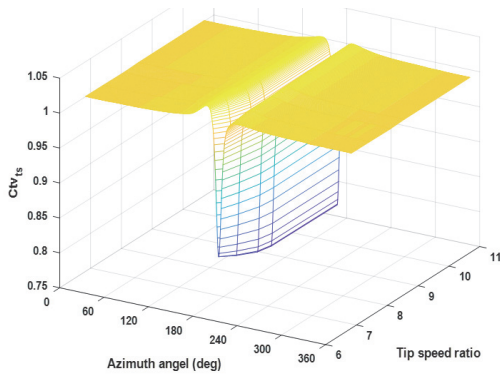
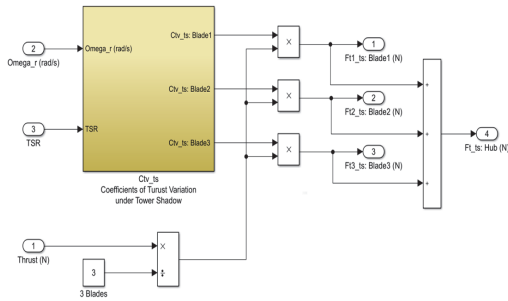
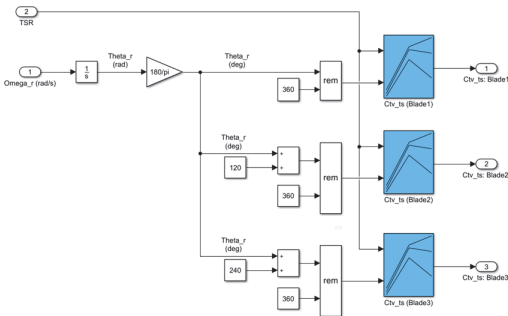


Fig. 7 Coefficients of thrust variation under tower shadow



(a) Thrust variation



(b) Coefficient of thrust variation

Fig. 8 Matlab/Simulink model for thrust variation under tower shadow

“타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”는 Fig. 7과 같은데, 로터의 회전 방위각( $\theta$ )과 주속비( $\lambda$ )의 함수로 표현된다. 세 블레이드는 120도 간격으로 설치되므로, 각 블레이드의 회전 방위각( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )은

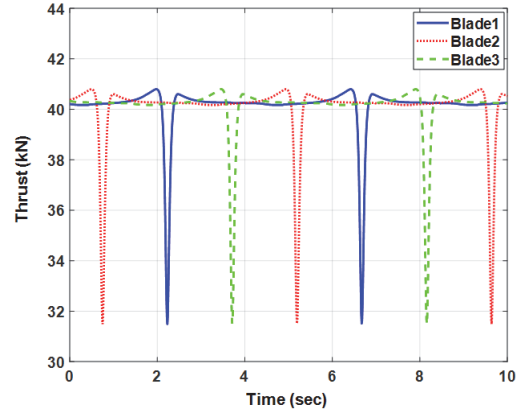


Fig. 9 Thrust variations on the blades under tower shadow at the wind speed of 7 m/s

식 (11)과 같다. 각 블레이드에 발생하는 추력 변동은 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”의 사용 시에 로터의 방위각에 0도와 120도와 240도를 각각 더하여 사용하면 된다.

$$\theta_1 = \theta, \theta_2 = \theta + 120^\circ, \theta_3 = \theta + 240^\circ \quad (11)$$

그리고 타워 새도로 인해 세 블레이드에 발생하는 비대칭 추력 변동으로 인해 로터 허브에 발생하는 추력 변동( $F_{T,ts}$ )은 식 (12)와 같이 세 블레이드의 각 추력을 더하면 된다.

$$F_{T,ts}(t) = F_{T1,ts}(t) + F_{T2,ts}(t) + F_{T3,ts}(t) \quad (12)$$

제안된 식 (10)의 “타워 새도 추력변동 계수( $C_{tv_{ts}}$ )”와 추력계수를 이용하는 식 (9)를 이용하여 Matlab과 Simulink를 이용하여 타워 새도의 동하중 모델을 구현하였다(Fig. 8). 구현된 Matlab과 Simulink를 이용하여 풍속에 따른 추력변동을 확인하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 풍속 7 m/s인 경우 타워 새도의 영향으로 인해 세 블레이드에서 발생하는 추력 변동( $F_{T1,ts}, F_{T2,ts}, F_{T3,ts}$ )과 로터 허



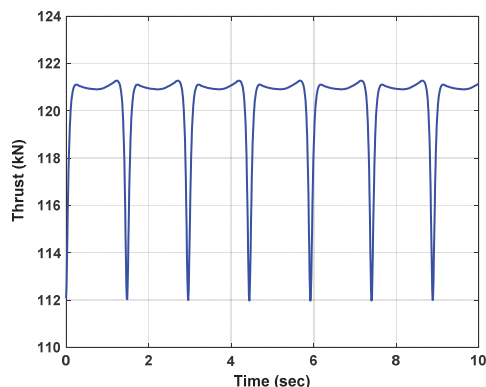


Fig. 10 Thrust variations on the hub under tower shadow at the wind speed of 7 m/s

브에 발생하는 추력 변동( $F_{T,ts}$ )에 대한 수치 실험 결과를 각각 보여주고 있다. 추력계수를 이용하지 않고 공력계수를 직접 이용하는 BEM 방법의 결과와 매우 일치하는 응답임을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 정격풍속 이하에서 추력계수를 이용하여 타워 새도에 의한 추력 동하중을 표현하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 “타워 새도 추력변동 계수”를 도입하였고, 이를 타워 새도에 의해 변동하는 추력 값을 타워 새도가 없을 때의 추력 값으로 나눈 비로 정의하였다. 피치각이 일정한 정격풍속 이하에서는 “타워 새도 추력변동 계수”를 로터의 회전 방위각과 주속비의 함수로 표현할 수 있음을 확인하였다. 타워 새도로 인해 세 블레이드와 로터 허브에 발생하는 추력 동하중을 추력계수와 “타워 새도 추력변동 계수”를 이용하여 표현할 수 있음을 검증하였다.

향후 피치 제어기가 작동하는 정격풍속 이상에서 추력계수를 이용하여 타워 새도에 의한 추력 동하중을 표현하는 방법을 확인하고자 한다.

## 사 사

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2019R1I1A3A01059235)을 받아 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

- [1] U.S. Department of Energy, “2018 offshore wind technologies market report”, DOE/GO-102019-51 92, pp. 41-65, (2019).
- [2] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, and M. Narimani, “High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies”, Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 5, pp. 740-788, (2015).
- [3] J. K. Kaldellis and D. Zafirakis, “The wind energy (r)evolution: a short review of a long history”, Renewable Energy, vol. 36, no. 7, pp. 1887-1901, (2011).
- [4] C. W. Lim, “An Investigation into the effect of gain scheduling of individual pitch controller for MW wind turbine”, Journal of Wind Energy, vol. 12, no. 3, pp. 25-31, (2021).
- [5] E. A. Bossanyi, “Individual blade pitch control for load reduction”, Wind Energy, vol. 6, pp. 119-128, (2003).
- [6] K. Selvam, S. Kanev, J. W. van Wingerden, and T. van Engelen, “Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction”, International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 19, pp. 72-91, (2009).
- [7] E. Hau, J. Langenbrinck, and W. Palz, “Mega large wind turbines”, Springer-Verlag, (1993).
- [8] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, and A. L. Rogers, “Wind energy explained: theory, design and application (2nd ed.)”, Jonh Wiley & Sons, Ltd., (2009).
- [9] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E.

- Bossanyi, "Wind energy handbook (2nd ed.)", John Wiley & Sons, Ltd., (2011).
- [10] C. W. Lim, "Evaluation of dynamic thrust under wind shear in wind turbine below rated wind speed", Transactions of the KSME(A), vol. 40, no. 4, pp. 407-414, (2016).
- [11] F. D. Bianchi, H. D. Battista, and R. J. Mantz, "Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design", Springer-Verlag, (2007).
- [12] Bladed User Manual Version 4.9, (2018).
- [13] C. W. Lim, "A study on the effect of low pass filter and drive train damper for the NREL 5MW wind turbine control", Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol. 24, no. 4, pp. 443-451, (2019).

---

(접수: 2022.10.04. 수정: 2022.11.14. 게재확정: 2022.11.17.)