

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.4.407>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

정격풍속 이하에서 풍력터빈의 윈드쉬어 추력 동하중 개발

임 채 욱^{*†}

* 한밭대학교 기계공학과

Evaluation of Dynamic Thrust Under Wind Shear in Wind Turbine Below Rated Wind Speed

Chae-Wook Lim^{*†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received October 6, 2015 ; Revised February 16, 2016 ; Accepted March 2, 2016)

Key Words: Wind Turbine(풍력터빈), Blade(블레이드), Wind Shear(윈드쉬어), Thrust Coefficient(추력계수), Coefficient of Thrust Variation(추력변동 계수)

초록: 풍력터빈이 MW급으로 대형화되면서 블레이드의 길이가 40미터 이상으로 길어지게 되어, 로터 블레이드가 회전할 때 블레이드에 발생하는 비대칭하중이 증가하게 되었다. 윈드쉬어, 타워 새도우, 난류 풍속 같은 요소들은 블레이드에 이런 비대칭하중 발생에 영향을 미친다. 본 논문은 윈드쉬어로 인해 블레이드에 발생하는 추력변동에 의한 동하중을 추력계수를 이용하여 모델링하는 방법에 관한 것이다. 이를 위하여 “윈드쉬어 추력변동 계수”를 정의 및 도입하고, 2MW 육상용 풍력터빈을 대상으로 정격이하의 풍속에서 윈드쉬어 추력변동 계수값을 구하여 분석한다. 구해진 “윈드쉬어 추력변동 계수”와 추력계수를 이용하여 Matlab/Simulink에서 윈드쉬어 동하중 모델을 구현하고, 윈드쉬어에 의해 세 블레이드에 작용하는 추력변동을 추력계수와 “윈드쉬어 추력변동 계수”를 동시에 이용하여 표현할 수 있음을 보인다.

Abstract: As wind turbines are getting larger in size with multi-MW capacity, the blades are getting longer, over 40 m, and hence the asymmetric loads produced during the rotation of the rotor blades are increasing. Some factors such as wind shear, tower shadow, and turbulence have an effect on the asymmetric loads on the blades. This paper focuses on a method of modeling the dynamic load acting on a blade because of thrust variation under wind shear. A method that uses thrust coefficient is presented. For this purpose, “wind shear coefficient of thrust variation” is defined and introduced. Further, we calculate the values of the “wind shear coefficient of thrust variation” for a 2 MW on-shore wind turbine, and analyze them for speeds below the rated wind speed. Then, we implement a dynamic model that represents the thrust variation under wind shear on a blade, using MATLAB/Simulink. It is shown that it is possible to express thrust variations on three blades under wind shear by using both thrust coefficient and “wind shear coefficient of thrust variation.”

1. 서 론

바람은 유용하게 이용할 수 있는 재생에너지 중 하나이다. 풍력터빈은 발전기의 기술적인 발전과 블레이드를 이용한 양력기술과 역사를 같이

하고 있다⁽¹⁾. 풍력터빈은 바람이 가진 유용한 에너지를 로터 블레이드의 회전을 통하여 기계적 에너지로 전환하고, 발전기 제어를 통하여 전기를 생산하는 기계이다. 최근 풍력터빈은 대형화되는 추세로 수 MW급이 시장의 주류를 형성하고 있다.⁽²⁻⁴⁾ MW급 대형 풍력터빈은 블레이드, 허브, 회전축, 기어박스, 타워, 베어링, 발전기, 피

† Corresponding Author, cwlim@hanbat.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

치시스템, 요잉시스템 등 다양한 부품들로 구성되어 있다(Fig. 1).

풍력터빈에서는 발전기의 제어를 통하여 생산되는 전기 파워의 질을 높이는 것도 중요하지만, 각 부품에 작용하는 정적 및 동적 하중에 대하여 20년의 내구성을 갖도록 설계 및 제작하는 것도 또한 중요하다. 풍력터빈이 대형화되면서 블레이드의 길이가 40~50미터 이상으로 길어지게 되어, 로터 블레이드가 회전할 때 블레이드에 발생하는 비대칭 하중이 증가하게 되었다. 윈드시어(Wind Shear), 타워 섀도우(Tower Shadow), 난류풍속 등의 영향으로 블레이드에는 비대칭 하중이 발생한다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이 비대칭 하중이 커지면 동적 하중이 증가하여 풍력터빈의 설계 시에 이를 반영해야 하며, 최근에는 이 비대칭 하중을 줄이기 위하여 세 개의 블레이드의 피치각을 독립적으로 제어하는 개별피치제어 방법을 적용하고 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾

본 논문은 윈드시어로 인해 블레이드에 발생하는 추력변동에 의한 동하중에 관심을 가지고 이를 모델링하는 방법에 관심을 둔다. 윈드시어 등에 의해 블레이드에 작용하는 추력의 변동을 구하기 위해서는 양력계수와 항력계수와 같은 공력계수를 이용하여 블레이드의 길이 방향에 대하여 적분하는 BEM(Blade Element Momentum) 방법을 적용하면 된다.^(5-7,12) 블레이드에 작용하는 비대칭 동하중을 계산하기 위하여 지금까지의 연구들에서는 BEM 방법을 주로 적용하였다.^(8-10,13,14) Bladed와 같은 풍력터빈 관련 상용 소프트웨어에서도 BEM 방법을 적용하여 추력변동에 의한 비대칭 동하중을 계산하고 있다.⁽¹⁵⁾

풍력터빈의 추력은 일반적으로 공력계수의 정보를 이용하여 BEM 방법을 적용하여 계산할 수

있지만, 공력계수 정보 대신에 추력계수를 이용하여도 구할 수 있다. 이때 BEM 방법에서의 수식 표현으로부터 추력계수가 정의되는데, 추력계수는 블레이드의 각 단면에서의 익형의 양력계수, 항력계수, 형상 등이 주어져야 계산이 가능하다. 비록 추력계수는 블레이드의 공력계수 정보가 있어야 얻을 수 있지만, 추력계수에는 공력계수의 정보가 직접적으로 보이지 않는 점, 추력계수를 이용하여 추력을 쉽고 빠르게 계산할 수 있는 점, 추력계수를 이용하여 계산한 추력과 BEM 방법에 의한 추력이 동일하다는 점 등의 장점이 있다.

이와 같이 풍력터빈의 추력 계산 시에 추력계수를 이용하는 것이 실용적이고 용이하지만, 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용하면 허브에서의 풍속 변화에 따른 추력의 변화만 표현할 뿐, 윈드시어 등에 의해 블레이드에 작용하는 비대칭 동하중에 의한 추력 변동을 표현할 수 없다. 윈드시어에 의한 추력의 변동은 일반적으로 BEM 방법을 적용하여 계산할 수 있는데, 기존의 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용하여도 동일하게 표현할 수 있다면 추력 변동의 모델이 유용할 것이다. 더 나아가 추력계수를 이용하여 윈드시어의 영향에 의한 추력변동을 표현할 수 있다면, 향후 이를 이용하여 윈드시어를 추정하거나 개별피치제어에 적용하기 위한 기초 기술이 될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용할 때 윈드시어에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 표현하는 방법에 대하여 제시한다. 이를 위하여 “윈드시어 추력변동 계수”를 정의 및 도입하고, 2MW 육상용 풍력터빈을 대상으로 정격이하의 풍속에서 “윈드시어 추력변동 계수”를 구하고 분석한 후 Matlab/Simulink에서 윈드시어 동하중 모델을 구현하고 검증한다.

2. 윈드시어에 의한 추력

2.1 윈드시어

윈드시어는 지면으로부터 높아질수록 바람이 커지는데 식 (1)과 같이 지수함수를 이용하여 표현이 가능하다.

$$V(h) = V_m \left(\frac{h}{Z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

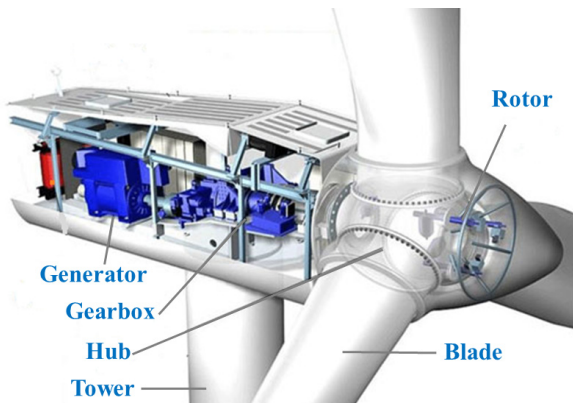


Fig. 1 Wind turbine system

여기서 V_m 은 로터 허브에서의 풍속, Z_0 는 로터 허브의 높이, h 는 지면에서부터의 높이이고, α 는 윈드쉬어 지수값이다.

윈드쉬어 지수값 α 는 지형에 따라서 다른 값을 가지는데, 본 논문에서는 육상용 풍력터빈을 대상으로 GL 규정에서 제시하는 윈드쉬어 지수값인 0.2를 사용하여 계산한다.

풍력터빈의 블레이드의 길이 방향에 대하여 임의의 위치에서의 높이 h 는 식 (2)와 같이 로터 회전각과 블레이드 길이 방향의 거리의 함수로 표현된다.

$$h(r, \theta) = Z_0 + r \cos \theta \quad (2)$$

여기서 블레이드 길이 방향의 거리 r 의 범위는 $0 \leq r \leq R$, R 은 블레이드의 길이, θ 는 로터의 회전 방위각(azimuth angle)으로, 기준이 되는 0도는 블레이드가 타워와 평행하고 하늘을 향하는 방향으로 정의한다.

2.2 공력계수를 이용한 추력 표현

풍력터빈이 바람에 의해 후방으로 밀리는 힘인 추력(F_T)은 BEM(Blade Element Momentum) 방법을 이용하여 계산이 가능하다. 바람이 불어 풍력터빈의 로터-블레이드가 회전할 때 블레이드 단면에 작용하는 공기역학적 힘은 블레이드 익형의 양력계수(C_l)와 항력계수(C_d)의 함수이다. 블레이드 익형의 각 단면에서 발생하는 양력과 항력의 성분은 공기역학적 토크와 추력을 발생시킨다. 블레이드 하나에서 발생하는 전체 추력은 블레이드 각 단면에서 발생하는 추력을 블레이드 길이에 따라 적분함으로 얻을 수 있는데 식 (3)과 같이 표현된다.^(5-7,12)

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

여기서 ρ 는 공기밀도, c 는 익형 시위선의 길이, V_{rel} 는 익형 앞진에서의 상대속도, ϕ 는 익형 받음각과 블레이드 피치각의 합이다.

블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 풍력터빈에 작용하는 전체 추력은 각 블레이드의 추력(F_{Ti})의 합으로 식 (4)과 같이 표현된다.

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

윈드쉬어가 없는 경우에는 블레이드가 세 개인 풍력터빈에 작용하는 전체 추력은 블레이드 하나에 작용하는 추력인 식 (3)을 세 배하면 된다. 윈드쉬어가 없는 경우의 풍속이 블레이드 길이에 따라서 일정하더라도, 윈드쉬어를 고려하면 풍속은 블레이드 길이에 따라 다르고 또한 로터의 회전각에 따라서 다르기 때문에 각 블레이드에는 서로 다른 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.^(5-7,12)

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

여기서 V_m 은 로터 허브에서의 풍속, β 는 블레이드의 피치각, λ 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 등이 주어져야 계산이 가능하다.

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

여기서 Ω_r 은 로터의 회전 각속도이다.

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

블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 풍력터빈에 작용하는 전체 추력은 각 블레이드의 추력(F_{Ti})의 합으로 식 (4)와 같이 동일하게 표현된다. 윈드쉬어가 없는 경우 블레이드가 세 개인 풍력터빈에 작용하는 전체 추력은 블레이드 하나에

Table 1 Physical parameter values for the wind turbine model of 2MW

물리적 파라미터	값
블레이드 길이 (R)	40 [m]
블레이드 개수	3개
로터 관성 모멘트 (J_r)	6.209e6 [kgm^2]
발전기 관성 모멘트 (J_g)	60 [kgm^2]
기어박스 증속비 (N_{gb})	83.33

작용하는 추력인 식 (5)를 세 배하면 된다. 그러나 윈드시어에 있는 경우의 풍속은 블레이드 길이에 따라 다르고 또한 로터의 회전각에 따라서 다르기 때문에, 식 (5)를 이용하여 각 블레이드에 작용하는 서로 다른 하중을 계산할 수 없다.

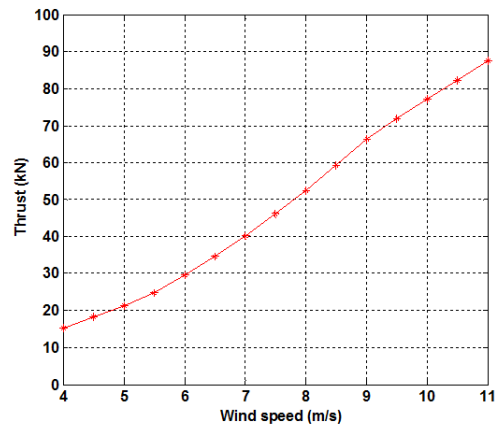
3. 2MW 풍력터빈의 추력

3.1 2MW 풍력터빈 모델 파라미터

GL Garrad Hassan의 Bladed S/W에서는 2MW 풍력터빈 데모 모델을 제공하고 있다.⁽¹⁵⁾ Bladed S/W에서는 블레이드, 로터, 타워, 파워 트레인 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 표현할 수 있는 창들이 있는데, 거기에서 제시된 2MW 풍력터빈 데모 모델의 물리적인 파라미터값들을 정리하면 Table 1과 같다. 최적 주속비 구간의 풍속은 5.3~9.3m/s이고 정격풍속은 11.7m/s이다. 풍력터빈의 출력계수(C_p)는 최적 주속비(λ_{opt})가 8.1일 때 최대값($C_{p,max}$)이 0.4662이다.

3.2 토크 제어기

풍력터빈은 풍속과 블레이드의 상호작용이 비선형적인 특성을 가져 풍속에 따른 작동점이 제어기의 동특성에 영향을 받으므로, 토크 제어기와 피치 제어기의 설계가 우선적으로 고려되어야 한다. 정격풍속 이하에서는 블레이드의 피치각이 일정한 값으로 유지되므로 피치 제어기의 고려는 필요 없으나 토크 제어기의 고려는 반드시 필요하다. 정격풍속 이하에서는 풍력터빈의 응답(로터 속도, 추력 등) 특성은 토크 제어기의 형태에 따라 영향을 받는다. 토크 제어기는 풍력터빈에서 실용적으로 많이 사용되는 최적모드제인을 이용하는 토크제어 방법을 고려하여 적용하였다.^(5,16) 발전기의 토크 크기는 최적모드제인에 발전기의

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

속도를 제어하여 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(Ω_g)는 기어박스의 증속비(N_{gb})와 상관관계가 있다.

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

3.3 윈드시어에 의한 추력 특성

윈드시어가 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(Blade Element Momentum)방법을 이용하여 계산하였다. Fig. 2는 윈드시어가 없는 경우에 대하여 정격 이하의 풍속(4~11m/s)에서 풍속에 따른 블레이드 하나에서의 추력의 정상상태 값을 보여주고 있는데, 풍속이 증가함에 따라 추력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

윈드시어가 있는 경우 풍력터빈의 세 개의 블레이드에 작용하는 추력은 시간에 따라 모두 다르고 각 블레이드에 작용하는 추력에 변동이 발생한다. 윈드시어에 의해서 풍속은 지면에서 높아질수록 커지는데, 이에 따라 로터가 회전할 때 각 블레이드의 추력은 로터의 회전각에 따라서 변동하게 된다. 앞에서 설명한 토크 제어기를 적용하여 로터 허브에서의 풍속에 따른 각 블레이

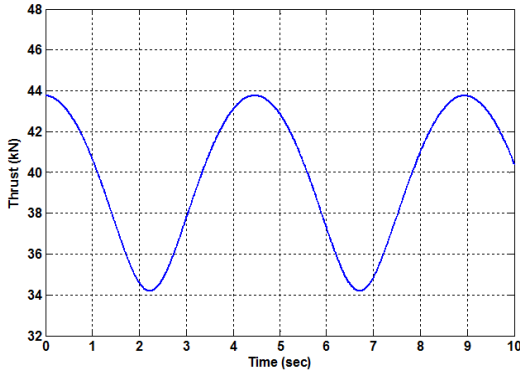


Fig. 3 Thrust variation on a blade under wind shear at the mean wind speed of 7m/s

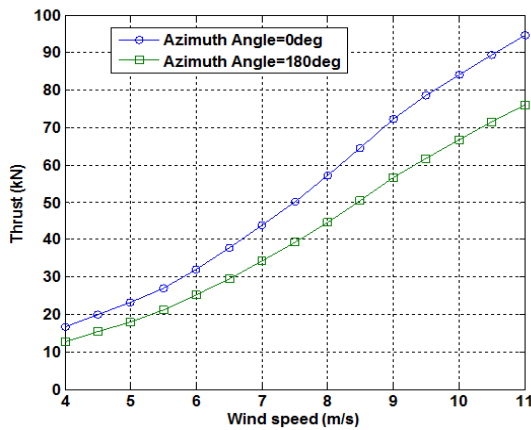


Fig. 4 Steady-state values of thrust on a blade according to wind speed with wind shear

드에서의 추력의 크기를 BEM방법을 이용하여 계산하였다. Fig. 3은 허브에서의 풍속이 7m/s인 경우 윈드쉬어에 의한 추력의 변동을 보여주고 있다. 윈드쉬어의 영향에 의해 블레이드에 발생하는 추력의 변동은 로터의 회전 방위각(θ)이 0° 인 경우 최대값이고 180° 인 경우 최소값을 가진다. 추력의 변동은 정현파가 아님을 확인할 수 있다. Fig. 4는 윈드쉬어가 있는 경우에 대하여 정격 이하의 풍속(4~11m/s)에서 풍속에 따른 블레이드 하나에서의 추력변동의 최대값과 최소값을 보여주고 있는데, 풍속이 증가함에 따라 추력변동의 진폭(Peak-to-Peak)이 커짐을 알 수 있다.

4. 윈드쉬어 동하중 모델

4.1 추력계수와 윈드쉬어 동하중 모델

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 윈드쉬어가 있는 경우 윈드쉬어에 의한 추력의 변동을 표현할 수 없다. 본 논문에서는 추력계수를 이용하는 식 (5)를 기반으로 윈드쉬어에 대한 추력의 변동을 표현하고자 한다. 식 (9)와 같이 무차원 파라미터인 “윈드쉬어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)”를 도입하여 윈드쉬어 동하중 모델을 표현하는 방법을 제안하고자 한다.

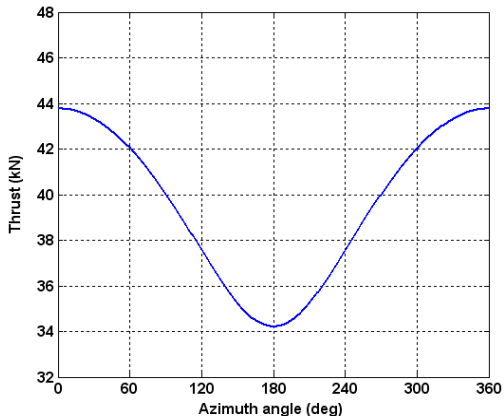
$$F_{T_{i,ws}}(t) = C_{tv_{ws}}(\theta(t), \lambda(t)) \left[\frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V_m^2(t) \right] \quad (9)$$

“윈드쉬어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)”는 식 (10)과 같이 윈드쉬어에 의해 변동하는 추력값($F_{T_{i,ws}}$)을 윈드쉬어가 없을 때의 추력값(F_{T_i})으로 나눈 비로 정의하고자 한다. 피치각이 일정한 정격이하의 풍속인 경우 “윈드쉬어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)”는 로터의 회전 방위각(θ)과 주속비(λ)의 함수로 표현할 수 있다.

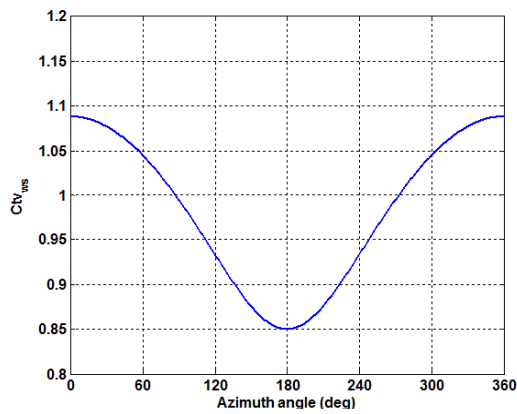
$$C_{tv_{ws}}(\theta, \lambda) = \frac{F_{T_{i,ws}}(\theta, \lambda)}{F_{T_i}(\lambda)} \quad (10)$$

정의된 “윈드쉬어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)”는 윈드쉬어로 인한 추력의 변동이 윈드쉬어가 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, $F_{T_{i,ws}}$ 는 식 (3)으로 구한 값을 이용하면 된다. 예를 들어 평균 풍속이 7m/s일 때, 윈드쉬어가 없는 경우의 추력(F_{T_i})은 40.22kNm이고, 윈드쉬어가 있는 경우의 추력($F_{T_{i,ws}}$)은 Fig. 5(a)와 같이 로터의 회전 방위각(θ)에 따라 변동한다. 식 (10)으로부터 “윈드쉬어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)”를 구하면 Fig. 5(b)와 같이 구할 수 있다.

최적 주속비 구간(풍속 5.3~9.3m/s)에서는 주속비의 값이 최적 주속비($\lambda_o = 8.1$)로 일정하므로, 추력의 변동은 Fig. 5(a)와 동일하고 “윈드쉬어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)” 또한 Fig. 5(b)와 동일함을 확인할 수 있었다. 최적 주속비 구간에서는 윈드



(a) Thrust variation



(b) Coefficients of thrust variation

Fig. 5 Thrust variation under wind shear at the mean wind speed of 7m/s with respect to azimuth angle

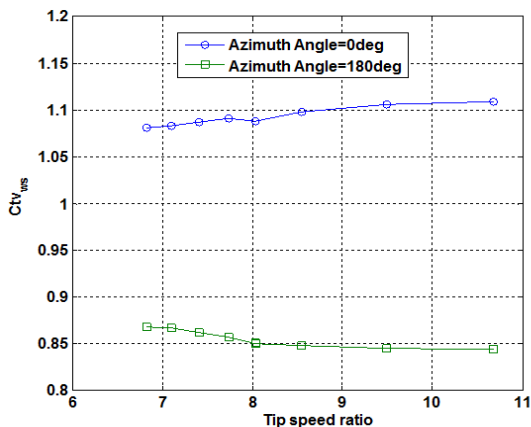


Fig. 6 Values of coefficients of thrust variation under wind shear at azimuth angle of 0° and 180°

쉬어가 있는 경우의 추력은 윈드시어가 없는 경우보다 최대 8.8% 정도($\theta=0^\circ$ 인 경우) 증가하고 최소 14.9%($\theta=180^\circ$ 인 경우) 정도 감소함을 확인

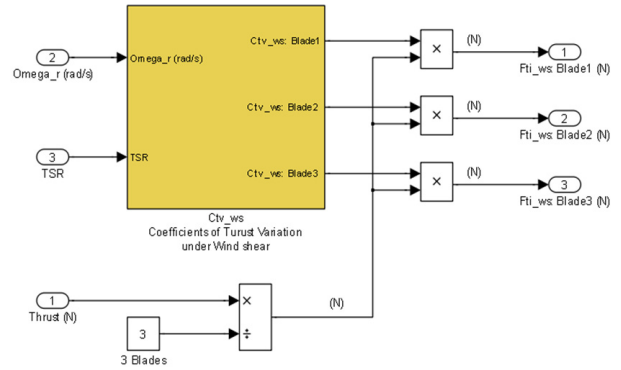


Fig. 7 Simulink model for thrust variations under wind shear

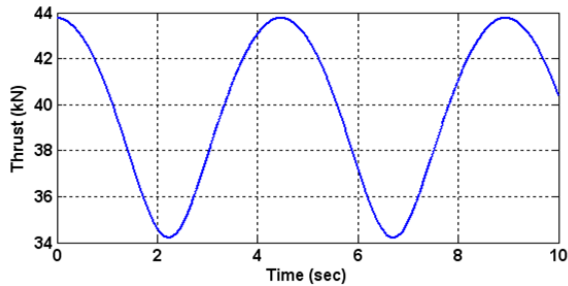
할 수 있었다. Fig. 6은 “윈드시어 추력변동 계수 ($C_{tv_{ws}}$)”의 최대값과 최소값을 보여준다. 최적 주속비 구간보다 작은 풍속에는 주속비가 커지고, 최적 주속비 구간보다 큰 풍속에는 주속비가 작아진다. 주속비가 최적 주속비보다 작아짐에 따라 추력변동 비율이 약간 작아지고(최대값 약 11% 증가, 최소값 약 16% 감소), 주속비가 최적 주속비보다 커짐에 따라 추력변동 비율이 약간 커짐(최대값 약 8% 증가, 최소값 약 13% 감소)을 확인할 수 있다.

4.2 윈드시어 동하중 모델 구현

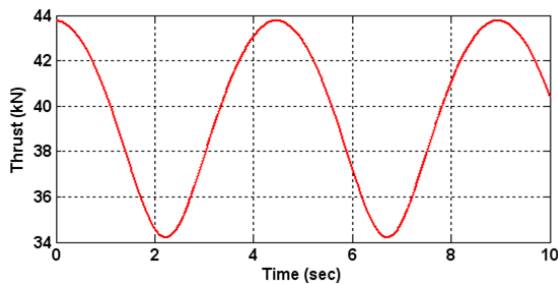
제안된 식 (10)의 “윈드시어 추력변동 계수 ($C_{tv_{ws}}$)”와 추력계수를 이용하는 식 (9)를 이용하여 Matlab / Simulink를 이용하여 윈드시어의 동하중 모델을 구현하였다. Fig. 7은 “윈드시어 추력변동 계수($C_{tv_{ws}}$)”와 추력계수(C_T)를 이용하여 윈드시어에 의한 세 블레이드에서의 추력을 각각 계산하는 모델을 보여준다. 구현된 Matlab / Simulink를 이용하여 풍속에 따른 추력변동을 확인하였다. Fig. 8은 풍속 7m/s인 경우 윈드시어의 영향으로 인해 하나의 블레이드에서 발생하는 추력변동에 대한 수치실험 결과를 BEM 방법과 비교하여 보여주고 있다. 추력계수를 이용하지 않고 공력계수를 직접 이용하는 BEM 방법의 결과와 일치하는 동일한 응답을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 추력계수를 이용하여 윈드시어에 의한 추력변동 동하중을 표현하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 “윈드시어 추력변동 계수”



(a) BEM method



(b) Proposed method

Fig. 8 Comparison of thrust variations on a blade under wind shear at the wind speed of 7m/s

를 도입하였고, 이를 윈드쉬어에 의해 변동하는 추력값을 윈드쉬어가 없을 때의 추력값으로 나눈 비로 정의하였다. 피치각이 일정한 정격이하의 풍속에서 “윈드쉬어 추력변동 계수”를 로터의 회전 방위각과 주속비의 함수로 표현하였다.

2MW 육상용 풍력터빈을 대상으로 “윈드쉬어 추력변동 계수”를 구하였는데, 최적 주속비 구간에서 이의 최대값은 약 0.9이고 최소값은 약 0.85임을 확인하였다. 구해진 “윈드쉬어 추력변동 계수”와 추력계수를 이용하여 Matlab/Simulink에서 윈드쉬어 동하중 모델을 구현하였고, 블레이드에 작용하는 추력변동을 추력계수와 “윈드쉬어 추력변동 계수”를 동시에 이용하여 표현할 수 있음을 보였다.

향후 정격이상의 풍속에서 “윈드쉬어 추력변동 계수”를 구하는 방법과 이를 이용한 윈드쉬어 동하중 모델에 관한 연구를 진행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2012S1A2A1A01031218).

참고문헌 (References)

- (1) Hau, E., 2013, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Third Translated Edition, Springer-Verlag.
- (2) Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S. and Narimani, M., 2015, "High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, No. 5, pp. 740~788.
- (3) Kaldellis, J. K. and Zafirakis, D., 2011, "The Wind Energy (R)Evolution: A Short Review of a Long History," *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 7, pp. 1887~1901.
- (4) Maria, I. B., 2009, "The Economics of Wind Energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 1372~1382.
- (5) Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and Bossanyi, E., 2011, Wind Energy Handbook, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- (6) Manwell, J. F., MCGowan, J. G. and Rogers, A. L., 2009, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- (7) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, Springer-Verlag.
- (8) Bossanyi, E. A., 2003, "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction," *Wind Energy*, Vol. 6, pp. 119~128.
- (9) Selvam, K., Kanev, S., van Wingerden, J. W. and van Engelen, T., 2009, "Feedback-Feedforward Individual Pitch Control for Wind Turbine Load Reduction," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 19, pp. 72~91.
- (10) La, Y. H., Nam, Y. S. and Hoon, S. J., 2012, "Individual Pitch Control of NREL 5MW Wind Turbine Blade for Load Reduction," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 11, pp. 1427~1432.
- (11) Nam, Y. and Choi, H., 2010, "Mechanical Loads Analysis and Control of a MW Wind Turbine," *Journal of the Korean Society for Precision*

- Engineering*, Vol. 27, No. 9, pp. 26~33.
- (12) Hau, E., Langenbrinck, J. and Palz, W., 1993, WEGA Large Wind Turbines, Springer-Verlag.
- (13) Staino, A., Basu, B. and Nielsen, S. R. K., 2012, "Actuator Control of Edgewise Vibrations in Wind Turbine Blades," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, pp. 1233~1256.
- (14) Bang, J. S., Han, J. W. and Gil, K., 2013, "Development of Programs to Analyze Mechanical Load Data of Wind Turbine Generator Systems and Case Studies on Simulation Data," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 8, pp. 789~798.
- (15) Bossanyi, E. A., 2009, GH Bladed Version 3.82 User Manual.
- (16) Lim, C. W. and Seo, K. Y., 2010, "Comparison of Response Properties Determined in Two Torque Control Methods for a 2.75-MW Wind Turbine Under Turbulence Wind Speed," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, pp. 1885~1891.