J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(12), 841-847(2019)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.12.841
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

요 상태에서 NREL Phase VI 로터의 허브 중심 하중 예측

유기완[1]

Loads of NREL Phase VI Rotor at Hub in Yawed Conditions

Ki-Wahn Ryu[1]
Department of Aerospace Engineering, Jeonbuk National University

ABSTRACT

Time series data of 6-component loads were computed for a horizontal axis wind turbine rotor in yawed operating conditions with both rotating and non-rotating coordinate systems fixed at a center of a rotor hub. In this study, a well-known 20 kW class of the NREL Phase VI rotor was used for a model wind turbine, and this paper focuses on the yaw moments and over-turning moments for the operating wind speed range between 6 to 25 m/s. Unsteady blade element momentum theorem was adopted to get the aerodynamic loads acting on the wind turbine rotor. Computed 6-component loads using the developed UBEM code were compared with those using the NREL FAST program. From the computed results, both yaw and over-turning moments would be basic inputs to determine not only the specification of yawing mechanism but also the design condition of foundation.

초 록

본 연구에서는 요 오차가 있는 상태에서의 수평축 풍력터빈 로터에 작용하는 시간에 따른 6분력 하중변동을 로터 허브에 중심을 둔 회전 및 비회전 좌표계에 대해서 수치해석 하였다. 수치해석을 위한 모형은 설계 사양이 상세히 공개된 20 kW급의 NREL Phase VI 로터로 선택하였으며, 설계 풍속 구간에 대해 요 및 전도 모멘트를 중점적으로 분석하였다. 해석을 위한 방법은 비정상 블레이드 요소이론을 적용하였으며, 그 방법을 이용하여 개발된 프로그램의 6분력 하중에 대한 수치해석 결과는 NREL의 FAST 프로그램의 해석 결과와 비교하여 검증을 완료하였다. 하중 해석 결과를 토대로 요 작동 상태인 수평축 풍력터빈 시스템의 요 및 전도 모멘트는 요 부속 장치의 사양 결정 및 지지부위의 기초 설계를 위해 중요한 기본 정보로 활용될 것으로 기대된다.

Key Words : Horizontal Axis Wind Turbine(수평축풍력터빈), Unsteady Blade Element Momentum(비정상 블레이드 요소 모멘텀), NREL Phase VI Rotor(NREL 6단계 로터), Yaw Error(요 오차), Yaw Moment(요 모멘트), Over-Turning Moment(전도 모멘트)

Ⅰ. 서 론

수시로 풍향과 풍속이 시간에 따라 변동되는 바람의 특성상 풍력터빈 로터의 요 정렬(Yaw Alignment)을 완벽하게 풍향과 일치시키는 것은 불가능하다. 또한 풍향을 계측하기 위해서 나셀 풍향 풍속계(Nacelle

† Received : October 9, 2019 Revised : November 26, 2019 Accepted : November 27, 2019
[1] Professor
[1] Corresponding author, E-mail : kwryu@jbnu.ac.kr
ⓒ 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Wind Vane)나 이보다 더 좋은 기술을 적용한 나셀 LIDAR가 있긴 하지만 정확한 풍향을 계측하는 데에는 여전히 어려움이 있다. 설령 요 오차(Yaw Error)를 정확히 계측하였다 해도 로터의 요 정렬을 위한 거동과 요 오차의 시간 평균값을 구하는 과정에는 시간 차이가 있어서 이에 따른 요 오차도 존재한다. 따라서 수평축 풍력터빈은 대부분의 작동 시간에서 요 오차가 있는 상태로 운전된다고 볼 수 있다. 요 오차에 따른 풍력터빈의 출력은 이론적으로 방향여현(Directional Cosine)의 3승에 비례[1]하나, 실제 계측되는 출력은 방향여현에 대해 2승에서 3승 사이의 지수에 해당[2]하는 것으로 알려져 있다. 수평축 풍력터빈은 요 모터와 요 브레이크[3]가 장착되어 있으며, 풍향을 몇 분 동안 시간평균하여 기준치 이상의 오차가 발생하면 요 모터를 이용하여 요 오차를 줄이기 위한 거동을 한다.

미국의 NREL, 네덜란드의 Delft 공대와 ECN, 그리고 덴마크 DTU 등, 해외 선진 연구기관은 블레이드 요소이론(Blade Element Momentum Theorem)의 개념을 바탕으로 이를 보완하는 연구를 진행하면서 신뢰도 높은 해석결과를 제공하는 소프트웨어를 개발하기 위한 기초 연구를 꾸준히 진행해 오고 있다. 대표적으로 Bladed[4]나 FAST[5]를 포함하여 수많은 풍력터빈의 공탄성 해석 프로그램들은 블레이드 요소이론을 근간으로 개발된 해석 코드들이다. 블레이드 요소이론은 축대칭 흐름을 근간으로 하며, 요 오차가 있는 경우에는 보정식을 적용해 해석하기도 한다. 그러나 비정상 블레이드 요소이론(Unsteady Blade Element Momentum Theorem)을 적용한다면 요 오차가 있는 경우에 대해서 보다 더 쉽게 해석적인 접근이 가능하다. 국내에서도 여러 기관에서 로터 하중 해석에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 일례로 블레이드가 회전하는 경우에 대해 요 오차가 있는 상태에서 비정상블레이드 요소이론을 이용하여 NREL의 Phase VI 로터에 대한 해석 사례와, 5 MW 기준 풍력터빈 모형에 대해 블레이드가 회전하지 않는 경우 하중 해석 사례를 찾아볼 수 있다[6,7].

본 연구에서는 로터에 작용하는 하중으로 공기력뿐 만 아니라 블레이드의 회전에 따른 관성력과 자중을 함께 고려하기로 한다. 공력 수치해석을 위해서 비정상 블레이드 요소 이론을 이용하여 개발한 프로그램의 결과를 FAST 결과와 비교검증하며, 요 오차에 따른 추력과 요 모멘트를 검토한다.

II. 수치해석 절차

2.1 블레이드 요소 이론

우리가 흔히 접하는 블레이드 요소이론이라 함은 축대칭 흐름의 가정 하에 블레이드를 유한개의 토막으로 나눈 후 각각의 블레이드 요소에 대해서 2차원 에어포일의 받음각에 따른 양력 및 항력계수로부터 얻어진 추력과 토크가 로터를 포함하는 제어체적에 대해 각운동량 보존 법칙으로 구한 추력과 토크가 서로 같게 하는 블레이드 요소 모멘텀 이론(Blade Element Momentum Theorem)[8]을 이야기 한다. 그러나 축대칭 유동의 가정을 기반으로 한 이론은 요 오차가 있는 로터에 대한 공력해석에 한계가 있다.

비정상 블레이드 요소이론(Unsteady Blade Element Method, UBEM)[9]은 요 오차가 있는 경우뿐만 아니라 IEC61400-1[10]에 해당하는 바람조건에 대해서도 시간에 따른 6분력 하중을 구하는데 적용할 수 있다. 이 방법은 전진 비행하는 헬리콥터 로터에서의 공력해석 방법을 풍력터빈 로터에 적용한 것이다. UBEM을 이용한 해석의 주요 골자는 블레이드 각 요소에서의 유도속도를 구하는 것이며, 이 유도속도가 구해져야만 각 블레이드 요소에서의 받음각을 구할 수 있고, 그 받음각에서 에어포일에 대한 순람표(Look-up Table)를 통해 양력과 항력을 구할 수 있다.

블레이드 반경방향 위치에서의 유도속도는 한 블레이드에 대해서 다음과 같이 표현할 수 있다[9].

$$W_n = W_z = \frac{-bL\cos\phi}{4\pi\rho rF|\vec{V}+f_g\vec{n}(\vec{n}\cdot\vec{W})|} \tag{1}$$

$$W_t = W_y = \frac{-bL\sin\phi}{4\pi\rho rF|\vec{V}+f_g\vec{n}(\vec{n}\cdot\vec{W})|} \tag{2}$$

여기서 f_g는 Glauert 후류 보정계수이며, 축 간섭계수 $a=(V-V')/V$에 따라서 다음과 같이 정한다.

$$f_g = \begin{cases} 1 & \text{for } a \le a_c \\ \dfrac{a_c}{a}\left(2-\dfrac{a_c}{a}\right) & \text{for } a > a_c \end{cases} \tag{3}$$

여기서 $a_c = 0.2$이다.

Figure 1은 흐름방향에 대해 요 오차를 갖는 풍력터빈 로터의 평면도를 개략적으로 나타낸다. 요 각이 존재하면 블레이드의 방위각에 따라 유도속도가 변하게 되며 블레이드가 가장 후방에 있을 때보다 가장 전방에 있을 때의 유도속도가 더 작다. 따라서 전방에 있는 블레이드가 후방에 있는 블레이드보다 더 큰 속도 조건에 놓이게 되어 이에 따라 발생되는 하중도 더 크다. Upwind 형식의 수평축 풍력터빈은 Downwind 형식과는 반대로 로터 허브 중심에 집중된 추력에 의하여 발생되는 요 모멘트가 요 각도를 더 크게 하는 요 불안정성(Yaw Instability)을 일으킨다. 따라서 Upwind 형식은 Downwind 형식과 달리 요 브레이크가 필수적이다. 이러한 요 모멘트를 정확

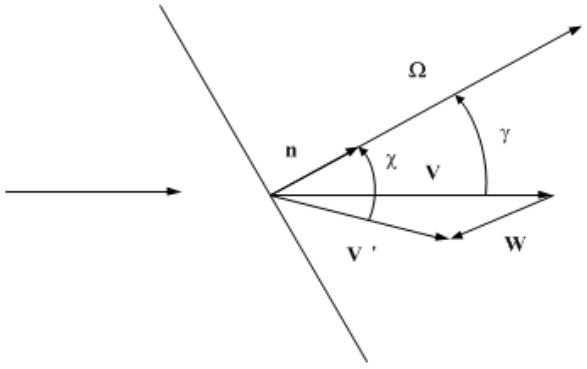


Fig. 1. Skewed wake for yawed rotor

히 해석하기 위해서는 적절한 요 모델이 필요하다. 아래 식은 Glauert에 의해 제안된 요 모델이다[9].

$$\overrightarrow{W} = \overrightarrow{W_0}\left(1 + \frac{r}{R}\tan\frac{\chi}{2}\cos(\psi - \psi_0)\right) \tag{4}$$

$$\cos\chi = \frac{\vec{n} \cdot \vec{V'}}{V'} \tag{5}$$

여기서 χ는 $r/R = 0.7$에서 후류의 처짐 각도로 정하며, ψ는 블레이드 방위각, ψ_0는 블레이드가 가장 하류 위치에 있을 때의 블레이드 방위각을 나타낸다.

Figure 2에 블레이드 요소에서의 각 속도 성분들을 표시하였으며, $\overrightarrow{W}$는 블레이드 요소에서의 유도속도이다. 에어포일과의 상대속도 $\overrightarrow{V_{rel}} = \vec{V} + \overrightarrow{V_{rot}} + \vec{W}$는 다음과 같이 성분별로 표현할 수 있다.

$$V_{rel,y} = V_y + W_y - \omega x \tag{6}$$

$$V_{rel,z} = V_z + W_z \tag{7}$$

여기서 ω는 로터의 각속도, x, y, z는 블레이드에 고정된 회전 좌표계의 성분으로 x 방향이 로터 회전면에 수직한 흐름 방향, z방향은 블레이드 스팬 방향이다. 에어포일 면에서의 받음각 α와 유입각 ϕ는 다음과 같다.

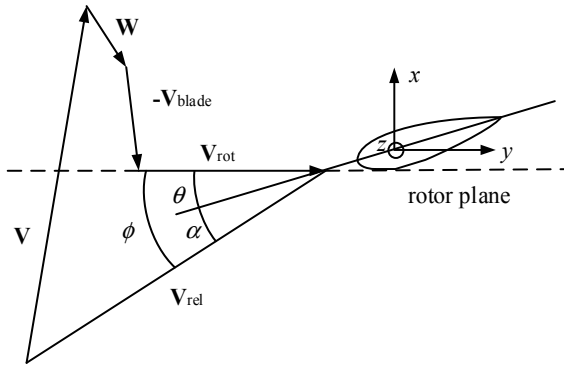


Fig. 2. Velocity polygon at a blade element

$$\alpha = \phi - (\theta + \theta_p) \tag{8}$$

$$\phi = -\tan^{-1}\frac{V_{rel,z}}{V_{rel,y}} \tag{9}$$

여기서 θ와 θ_p는 블레이드 요소 중심에서의 비틀림각과 피치각을 각각 나타낸다. 이로부터 블레이드 요소에서의 추력 성분과 토크 성분은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$dT = B\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2(c_l\cos\phi + c_d\sin\phi)cdr \tag{10}$$

$$dQ = rdH = B\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2(c_l\sin\phi - c_d\cos\phi)crdr \tag{11}$$

여기서 r은 허브에서 블레이드 단면까지의 거리, c는 코드길이. B는 블레이드 개수, ρ는 공기 밀도, c_l과 c_d는 주어진 받음각에서 에어포일의 양력 계수 및 항력계수를 각각 나타낸다.

Figure 3은 UBEM을 이용한 공력해석 절차를 나타낸다. 삼차원 실속지연 효과(3D stall delay effect)를 반영하기 위해 본 연구에서는 Du & Selig 모델[11]을 적용하였으며, Prandtl 팁 손실 효과[12]도 반영하였다. 에어포일의 공력자료는 작동 레이놀즈 수 범위에서의 받음각에 따른 실험 자료를 사용하여 Viterna-Corrigan 방법[13]으로 외삽하였다. 안쪽 루프는 블레이드 요소 증가를 나타내고, 바깥쪽 루프는 방위각(시간) 변동을 표현한다. 순서도에서 a는 축방향 간섭계수(Axial Induction Factor)이다. 순서도에 나타낸 것과 같이 UBEM에서는 순차적 시간 전진기법(Time Marching Method)을 적용한다. 본 연구에서는 FAST의 공력해석 모듈인 AeroDyn이 갖는 저풍속에서의 수치적 불안정성을 해소하기 위해 Øye[14]의 동적후류 알고리즘을 적용하여, 수치해석 과정 중에 발산현상이 없이 우수한 수렴특성이 확인되었다.

2.2 비회전 좌표계의 하중

풍력터빈 로터에서 주로 사용하는 3가지 좌표축에 대해서 기술하면, 첫 번째는 블레이드 좌표계로 원점은 블레이드와 허브 연결부에 놓이고 축의 하나는 블레이드 피치축을 향한다. 다음은 저속 회전축(Low Speed Shaft, LSS) 좌표계로서 원점이 로터의 허브 중심에 놓이며, 좌표축의 한 방향은 저속 회전축 방향과 일치하고, 로터와 같은 방향과 속도로 회전하는 회전좌표계(Rotational Coordinate System)이다(Fig. 4(a)). 마지막으로 좌표축 원점이 로터의 허브 중심에 놓이면서 회전하지 않는 비회전 좌표계(Non-rotational Coordinate System)로 좌표축의 한 방향은 저속 회전축 방향을 향한다(Fig. 4(b)). 비회전 좌표계의 x-축은 회전축 상에 놓이면서 하류 방향을 향하

며, y-축은 로터 앞에서 로터를 보았을 때 왼쪽을 향하고, z-축은 오른손 좌표계를 따라 x-축과 y-축에 직교하는 위 방향을 따른다. 본 연구에서는 이 3가지 좌표축을 사용하여 하중 결과를 보이도록 한다.

Figure 3의 순서도와 같이 회전하는 블레이드 각각에 대해서 블레이드 요소 이론으로부터 시간에 따른 축력과 토크, 자중, 원심력에 대한 힘과 모멘트 벡터를 구한 후, 이를 로터 허브에 중심을 둔 비회전 좌표계로 변환하는 과정은 Rodrigues의 회전행렬식을 이용하여 쉽게 처리가 가능하다. 만일 로터가 틸트 각도를 가지고 있지 않다면 요 각도가 없는 경우 로터의 회전축의 방향과 바람의 방향은 서로 일치한다.

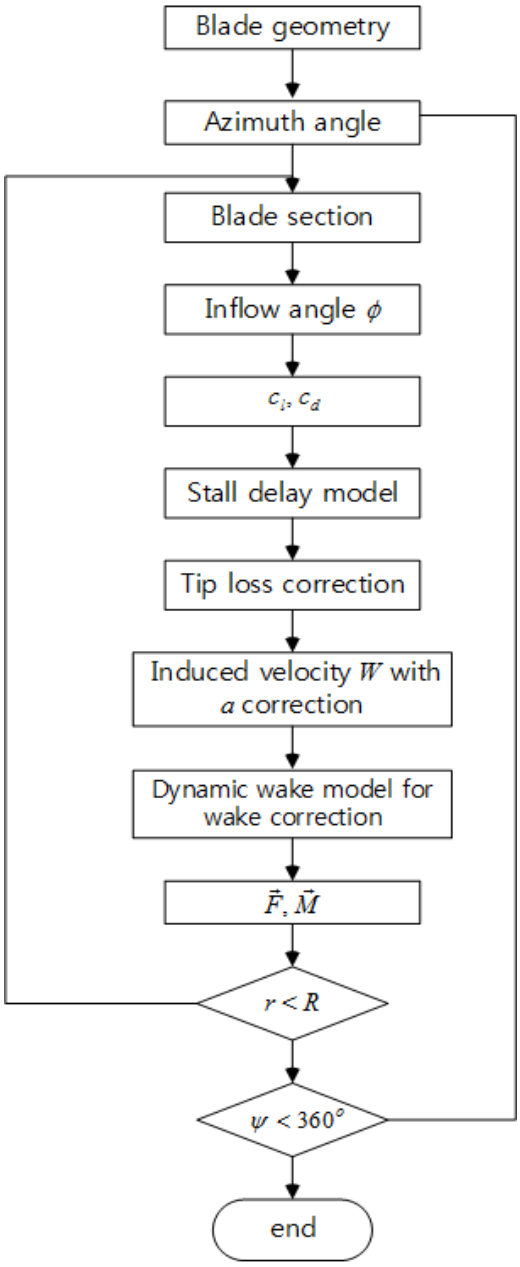
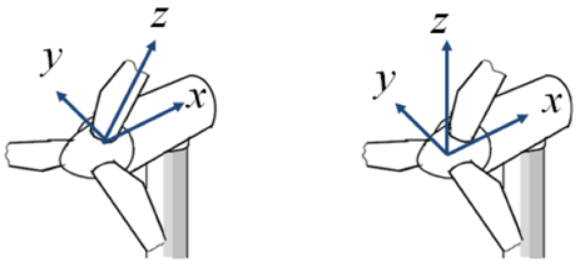


Fig. 3. Flow chart for UBEM analysis



(a) Rotating (b) Non-rotating

Fig. 4. Coordinate systems of turbine rotor

추가적으로 본 연구에서는 여러 각도의 요 오차를 가지고 있는 상태에서 비회전 좌표계에 대한 추력과 요 모멘트를 얻어내어 요 시스템 설계나 타워 지지부에 해당하는 기초에서의 전도 모멘트에 주는 영향을 파악하기로 한다.

III. 결과 및 토의

3.1 풍력터빈 모형

NREL Phase VI 로터는 비정상 공력 실험(Unsteady Aerodynamic Experiments, UAE)[15]을 목적으로 한 풍동시험 모형이다. 이 모형은 비틀림각과 테이퍼 비를 갖는 2개의 블레이드로 이루어져 있으며, S809 에어포일 하나를 블레이드 전체에 적용한다. 풍동실험은 NASA Ames 연구센터에 있는 24.4m × 36.6m 시험부를 갖는 대형 아음속 풍동에서 수행되었다. Fig. 5는 NREL Phase VI 로터가 NASA Ames 연구센터의 대형 아음속 풍동 시험부에 설치된 장면이다[16]. NREL Phase VI 로터에 대한 자세한 사양과 운전 조건은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 풍속 10m/s에서 요 각도 30°에 대해서 로터 허브 중심 및 블레이드 허브 연결부에 대한 시계열 하중 해석 결과를 FAST 해석 결과와 상호 비교 검증한 후 요 각도를 변경하면서 본 연구의 관심 대상 중 하나인 추력과 요 모멘트의 최대값이 변동하는 양상을 파악하는 그래프를 얻어내기로 한다.

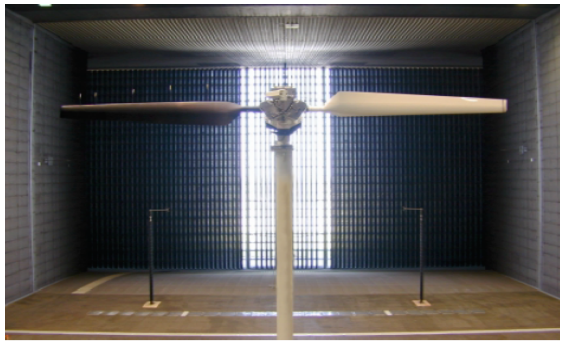


Fig. 5. NREL phase VI rotor at NASA Ames research center[16]

Table 1. Specification of NREL Phase VI rotor [15]

Descriptions	Value
Rated power [kW]	19.8
Cut-in wind speed [m/s]	6
Number of blades	2
Rotor and hub diameter [m]	10.058, 0.864
Rotational speed [rpm]	71.63
Yaw moment arm [m]	1.401
Hub height [m]	12.192
Blade mass [kg]	60.2

Figure 6은 S809 에어포일의 형상과 레이놀즈 수 1.5×10^6에서 받음각에 따른 양력 항력 및 모멘트 계수의 풍동실험 결과를 나타낸다[17]. 제한된 받음각 범위의 공력자료로부터 실속 이후의 받음각 영역에 대한 자료는 Viterna-Corrigan 외삽법을 적용하였다.

3.2 해석 결과

Figure 7은 풍속 10 m/s에서 NREL Phase VI 로터에 대해서 블레이드의 허브 결합부에서 6분력 하중의 시간에 따른 변동을 회전좌표계에 대해서 나타낸 결과이다. UBEM을 통해 얻어진 결과는 FAST를 수행하여 얻어낸 결과와 상호 비교하였다. 비교 결과는 매우 만족스러운 일치 경향을 확인할 수 있다.

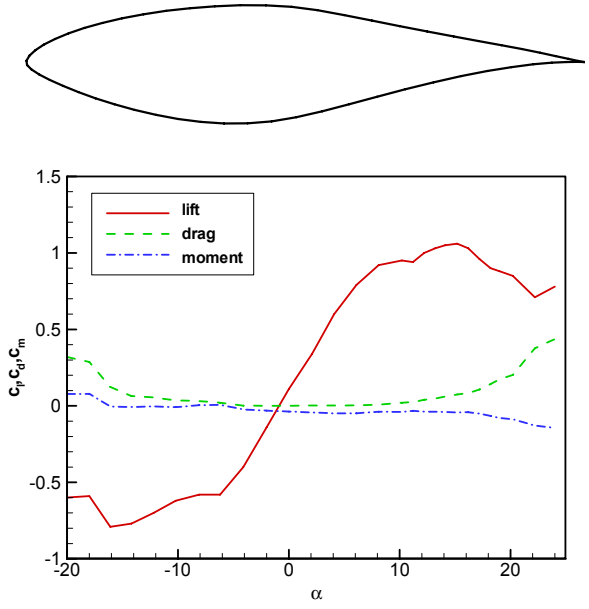
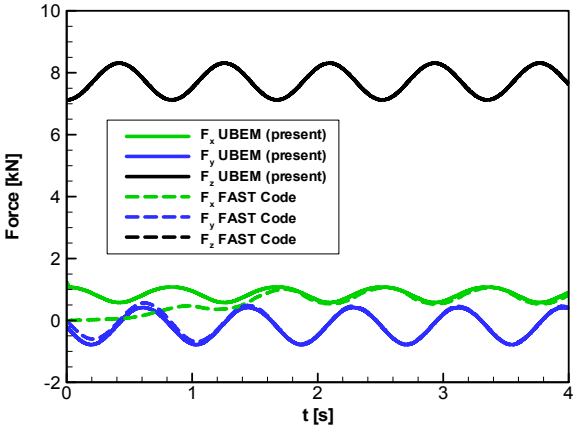
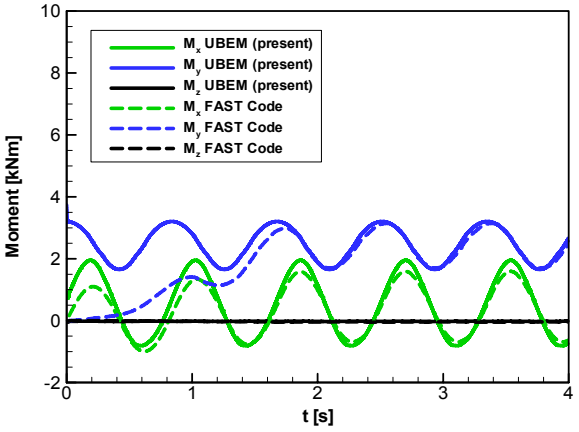


Fig. 6. S809 airfoil and its aerodynamic data [16]



(a) Force components

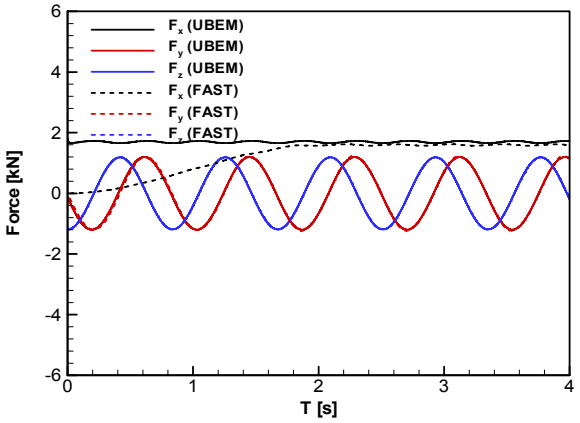


(b) Moment components

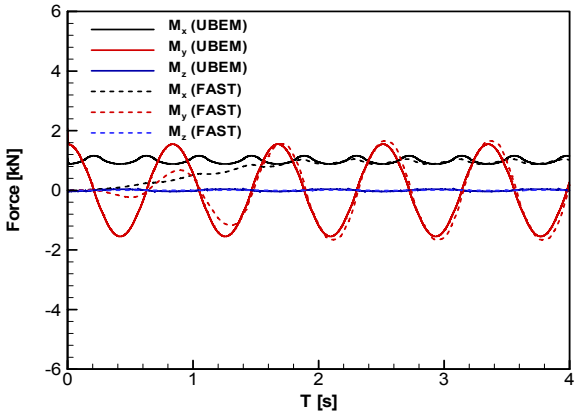
Fig. 7. Loads at a blade root in rotating coordinate system

FAST V4.4 해석결과 x, y방향 힘과 모멘트에 대해 처음 2초간 공력자료를 서서히 증가시키는 천이효과(Start-up Transient)가 반영되어 시간에 따른 하중 증가가 확인된다(V5.1 이상에서는 이 현상을 제거함).

Figure 8(a)와 Fig. 8(b)는 풍속 10 m/s에서 시간에 따른 UBEM 및 FAST의 3축 하중과 3축 모멘트의 해석결과를 로터 허브의 중심에 원점을 둔 회전 좌표계에 대해서 상호 비교한 것이다. 그림에서 실선은 UBEM을 이용하여 얻어낸 결과를, 그리고 점선은 FAST 해석결과를 보여주고 있다. 로터의 요 오차에 의해서 블레이드에 작용하는 하중이 방위각에 따라 주기적인 진동 특성을 보인다. 본 비교를 통해서 저속회전축의 하중에 대한 UBEM 해석 결과는 FAST 해석 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(a)의 y 및 z 방향 하중은 회전에 의한 원심력에 자중 성분이 방위각에 따라 더해지거나 빼지면서 주기적인 변동을 나타내며, 로터의 회전 속도에 해당하는 0.84 s의 주기를 보인다. 그러나 추력에 해당하는 x 방향 하중은 블레이드 2개에 작용하는 합력이

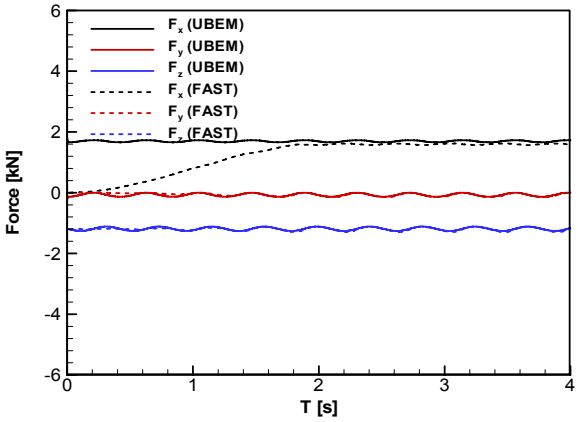


(a) Force components

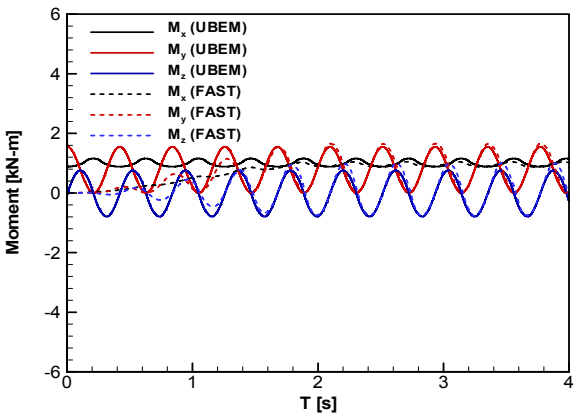


(b) Moment components

Fig. 8. Loads at rotor hub in rotating coordinate system for V = 10 m/s



(a) Force components



(b) Moment components

Fig. 9. Loads at rotor hub in non-rotating coordinate system for V = 10 m/s

저속 회전축에 합해지면서 0.41 s의 주기를 확인할 수 있다. Fig 8(b)의 3축 모멘트 역시 각 성분별로 변동하는 주기는 힘의 경우와 동일한 양상이다.

Figure 9(a)와 Fig. 9(b)는 풍속 10 m/s에서 시간에 따른 UBEM 및 FAST의 3축 하중과 3축 모멘트의 해석결과를 로터 허브의 중심에 고정된(축과 회전하지 않는) 좌표계에 대해서 상호 비교한 것이다. 그림에서 실선은 UBEM을 이용하여 얻어낸 결과를, 그리고 점선은 FAST 해석결과를 보여주고 있다. 요 오차가 없다면 6분력 하중의 시간에 따른 변화는 존재하지 않지만 요 오차가 있는 경우는 하중의 변동 주파수는 블레이드 회전 주파수에 블레이드의 개수를 곱한 값에 해당하는 2.39 Hz에 해당하는 변동 하중이 수치해석 결과에서 확인된다. Fig. 9(a)에서 x와 y방향의 힘의 합력은 타워 기초의 전도 모멘트에 영향을 주는 성분이며, Fig. 9(b)에서 z 방향 성분의 모멘트는 로터에 의해서 발생되는 요 모멘트를 나타낸다.

Figure 10은 요 오차에 따른 x, y 방향의 힘과 z 방향의 모멘트의 최대 절대값을 비회전 좌표계에 대해서 25 m/s의 풍속에 대해 수치해석한 결과이다. 힘의 변화는 요 각도가 40°보다 작은 경우에는 그 변화는 그리 크지 않는 양상이다. 그러나 요 모멘트는 요 각도에 따라서 변동하는 값이 매우 크고, 60°

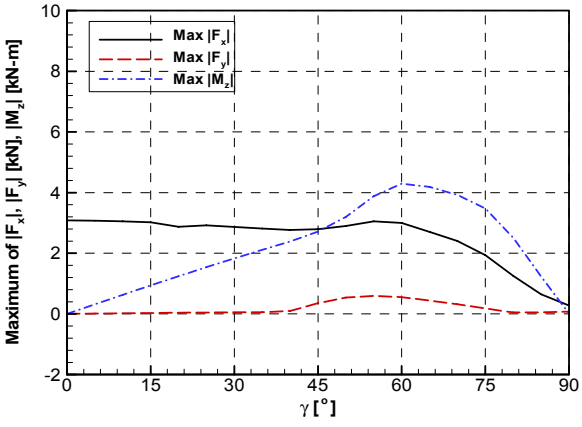


Fig. 10. Maximum absolute values of F_x, F_y and M_z according to yaw angle at rotor hub in non-rotating coordinate system for V = 25 m/s

근방에서 최대를 보이고 있다. 타워 지지부의 전도모멘트는 기둥의 높이와 축력(F_x, Axial Force or Thrust) 및 측력(F_y, Side Force)으로부터 구할 수 있으며, 요 모멘트는 M_z에 나셀의 회전 중심에서부터 허브 고정좌표계 중심까지의 거리와 요 모멘트 거리를 감안하여 추가적인 계산이 필요하지만 본 연구에서는 이 부분은 다루지 않기로 한다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 비정상 블레이드 요소이론을 이용하여 20 kW급 수평축 풍력터빈으로 설계된 NREL Phase VI 로터에 대한 허브 중심에서의 3가지 좌표계에 대한 6분력 하중을 수치 해석하여 FAST의 결과와 비교 검증하였다. Øye의 동적후류 알고리즘을 수치해석에 적용함으로써 요 오차가 있는 경우 후류의 수렴 과정에서 안정된 비정상 하중변동 해석 결과를 얻을 수 있었다. 로터의 허브에 중심을 둔 비회전 좌표계에서 6분력 하중은 로터의 회전수에 블레이드의 개수를 곱한 값의 하중 변동 주기를 갖는다. 또한 요 각도에 따른 타워 지지부의 전도모멘트의 변동은 그리 크지 않지만 나셀을 회전시키려는 요 모멘트는 큰 변동율을 보인다. 본 해석을 통해 얻어낸 요 모멘트와 전도 모멘트는 풍력터빈 요 시스템의 브레이크 사양 결정과 타워의 기초 설계를 위한 입력 자료로 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1) Bakhshi, R., and Sandborn, P., “The effect of yaw error on the reliability of wind turbine blades,” *Proceeding of the ASME 2016 Power and Energy Conference*, PowerEnergy 2016-59151, June 26-30, 2016, Charlotte, North Carolina, USA.

2) Mamidipudi, P., Dakin, E., Hopkins, A., Belen, F. C., and Leishman, Jr. G., Yaw control: the forgotten controls problem, Catch the Wind Inc. Manassas, Virginia, USA, Mar. 8, 2011.

3) Kim, M. G., and Dalhoff, P. H., “Yaw systems for wind turbines – overview of concepts, current challenges and design methods,” *Journal of Physics: Conference Series* 524, 2014, pp. 1~10.

4) Bossanyi, E. A., GH Bladed theory manual, Garard Hassan and Partners, 2003.

5) Jonkman, J. M., and Buhl Jr., M. L., *FAST user's guide*, NREL/EL-500-29798, NREL, March, 2004.

6) Ryu, K. W., Kang, S. H., Seo, Y. H., and Lee, W. R., “Prediction of aerodynamic loads for NREL Phase VI wind turbine blade in yawed condition,” *International Journal of Aeronautical and Space Sciences,* Vol. 72, No. 2, 2016, pp. 157~166.

7) Ryu, K. W., and Seo, Y. H., “Wind loads of 5 MW horizontal-axis wind turbine rotor in parked condition,” *Journal of Wind Enineering Institute of Korea*, Vol. 22, No. 4, 2018, pp. 163~169.

8) Glauert, H., *The elements of airfoil and airscrew theory*. Cambridge University Press, New York, 1926.

9) Hansen, M. O. L., Sorensen, J. N., Vousinas, S., Sorensen,, N., and Madsen, H. Aa., “State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 42, 2006, pp. 285~330.

10) IEC 61400-1: *Wind turbine generator systems – Part 1: safety requirements*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Swiss, 2005.

11) Du, Z., and Selig, M. S., “A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction,” AIAA-98-0021, 1998.

12) Prandtl, L., and Betz, A., “Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik,” Göttinger Nachr. Göttingen; 1927, pp. 88~92.

13) Viterna, L. A., and Corrigan, R. D., “Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines,” *Proceedings, Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbine*, NASA, P-2203, DOE Publication, CONF-810752, Cleveland, OH: NASA Lewis Research Center, 1981, pp. 69~85.

14) Øye, S., “Unsteady wake effects caused by pitch-angle changes,” IEA R&D WECS Joint Action on Aerodynamics of Wind Turbines, Technical University of Denmark, October 1986.

15) Schepers, J. G., ”Final Report of IEA Annex XX: Comparison between calculations and measurements on a wind turbine in yaw in the NASA-Ames wind tunnel,” ECN-E-07-072, 2007.

16) Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D. W., Cotrell, J. R., Schreck, S., and Larwood, S. M., Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns, NREL/TP-500-29955, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, December 2001.

17) Ramsay, R. R., Hoffmann, M. J., and Gregorek, G. M, “Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S809 airfoil,” Revised (12/99), NREL/TP-442-7817, 1995.