

풍력발전기의 풍하중특성에 관한 연구

A study on wind load characteristics of wind turbines

김정수†·박노길*·김영덕**·김수엽***

Jung Su Kim, Noh Gill Park, Young duk Kim, Su Hyub Kim

Key Words : wind load, rotor blade, wind turbine, gear box vibration

ABSTRACT

Wind load characteristics is investigated for vibration analysis of wind turbine gearbox. A normal wind model assumed, of which the wind velocity is increased according to the height from ground. A blast wind model is assumed, of which the maximum velocity is located at the center and the velocity profile is normally distributed. The periodical torque and bending moments transmitted to the main shaft of wind turbine are investigated. The average values and the harmonic terms of the transmitted moments are studied on the wind direction of range $-45^\circ \sim 45^\circ$ and the bending moment characteristics are examined, which is regarded as the main source of the misalignment of gear train.

기 호 설 명

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$: 블레이드 중심에서의 고정 좌표
 $\vec{i}_w, \vec{j}_w, \vec{k}_w$: 바람이 입사하는 좌표
 $\vec{i}_b, \vec{j}_b, \vec{k}_b$: 블레이드가 회전하는 좌표
 n_L, n_D : 블레이드 에어포일에서의 양력, 항력 좌표
 h_w : 지면에서 돌풍 중심까지의 높이
 h_0 : 블레이드 중심까지의 높이
 v_{wind} : 블레이드에 입사하는 바람의 속도
 v_{blade} : 블레이드가 회전하는 선속도
 v_{rev} : 블레이드가 맞아 들이는 바람의 상대속도
 v_{max} = 돌풍 중심부의 최대 풍속
 v_∞ = 돌풍 중심에서 무한대로 떨어진곳의 풍속
 v_x : 입사된 바람의 x 방향 성분
 v_z : 입사된 바람의 z 방향 성분

p : 비틀림각(pitch angle)
 α : 입사각(angle of attack)
 δ : 상대속도 방향각
 Φ_w : 입사각도
 c_L : 양력계수
 c_D : 항력계수
 q : 미소 면적의 위치 좌표
 R : 블레이드 전체 길이
 r_b : 블레이드 길이
 r_w : 돌풍 중심에서 블레이드 미소 면적까지의 거리
 r : 돌풍 반경
 a : 돌풍 설계 계수
 λ : Tip speed ratio

1.서론

풍력 에너지원은 에너지 부족으로 인한 대체 자원으로 각광을 받고 있다. 풍력 발전의 주요한 요소 중에는 블레이드, 기어박스등이 있다. 블레이드가 바람으로 받아들이는 힘을 이용하여 토크를 얻어 내어 이를 이용하여 에너지를 발생한다. 에너지를 발생하는데 있어서 바람의 영향이 크게 작용을 하는데 바람의 형태는 다양하다.

국내에서는 바람이 블레이드에 수직하게 들어올 때의

† 김정수 : 부산대학교 기계공학부
 E-mail : kimjs87@pusan.ac.kr

* 부산대학교 기계공학부

** (주)S&T중공업

*** (주)S&T중공업

simulation한 것이 대부분이며, 몇몇의 자유흐름에서 해석한 것들은 주로 force coefficient, pressure coefficient같은 블레이드의 성능에 대해서 다루었다. Dong Ok Yu[5]은 비정상 공력 특성을 예측하였지만 이는 로터블레이드의 특성을 파악한 것이었다.

본 연구는 정상풍속과 돌발풍속을 간단하게 수학적으로 모델링하고 풍향에 따라 전달되는 메인축에서의 전달모멘트를 조사하여 기어박스에 전달되는 풍하중의 특성을 파악하는데 목적이 있다. 풍속 모델은 고도에 따라 속도분포가 변하는 정상풍속모델과 바람중심에서 정규분포로 속도가 변화되는 돌발풍속모델 둘로 나누었다. 날개 익의 형상 및 양력/항력계수는 Siegfried Heier[1]에서 제시된 일반적인 경우를 채택하였다. 풍향에 따른 메인축에 전달되는 풍하중을 토크와 굽힘모멘트에 대하여 계산하여 주파수 스펙트럼을 통하여 그 특성을 살펴보고 블레이드에서 발생하는 굽힘 및 토크 모멘트와 기어박스의 진동 가진원을 파악하여 풍력 발전기 설계에 필요한 기초자료로 삼고자 한다.

2. 풍속 모델링

바람은 랜덤특성을 가지는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 메인축에 전달되는 굽힘모멘트의 특성을 검토하기 위하여 풍속을 정상풍속모델과 돌발풍속 모델 둘로 설정하였다. 일반적으로 정상적인 바람은 지면에서 고도에 따라 변한다. 정상풍속모델에 대하여는 Hellmann exponent의 관계식[1]을 채택하였다. 높이에 따른 바람 속도는 다음 식과 같다.

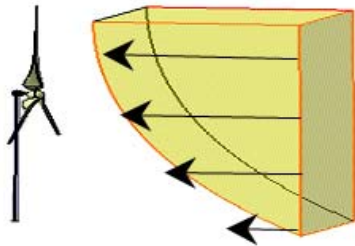


fig.1 Normal wind profile

$$v_w(h) = v_{10} \left(\frac{h}{h_{10}} \right)^a \quad (0.14 \leq a \leq 0.17) \quad (1)$$

돌발풍속은 바람 중심으로부터 속도분포가 정규분포로 변한다고 가정하였다. 바람의 중심은 블레이드 중심을 기준으로 설정된다. 바람의 중심에서 무한거리에서의 바람속도를 13m/s로 하였고 바람중심에서 최대속도 25m/s이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

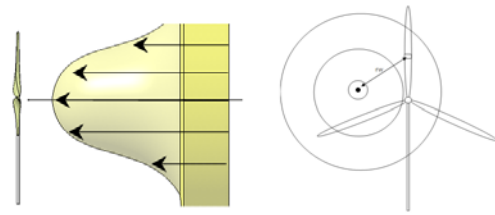


fig.2 Blast wind profile

$$v = (v_{\max} - v_{\infty}) \exp \left\{ \left(\frac{r_w}{r} \right)^2 \ln \left(\frac{av_{\infty}}{v_{\max} - v_{\infty}} \right) \right\} + v_{\infty} \quad (2)$$

3. 풍하중에 의한 메인축에 걸리는 모멘트

Siegfried Heier[1]에 의한 블레이드의 형상은 날개 반경에 따른 비틀림각(pitch angle) p 와 그 위치에서의 날개폭 t_b 로 정의된다. 피치각은 날개익에 불어오는 상대속도 방향각 δ 와 입사각 α 의 차로 정의된다.

$$p = \delta - \alpha \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \delta = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{R}{r_b \lambda} \right)$$

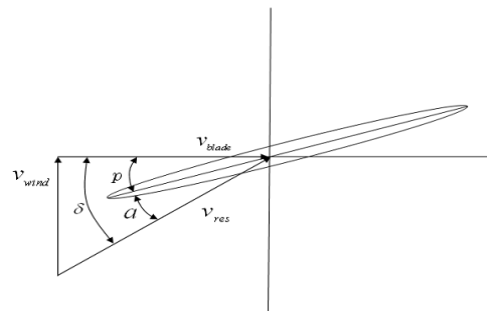


fig.3 Pitch angle and wind direction

블레이드 chord 길이는 블레이드의 길이로부터 다음과 같은 식으로 얻을 수 있다.[1]

$$t_b(r_b) = \frac{16\pi R}{9z c_p \lambda} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\lambda}{R} r_b \right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (4)$$

본 연구에서 사용한 rotor blade의 형상이 그림 4에 보여 주고 있다.

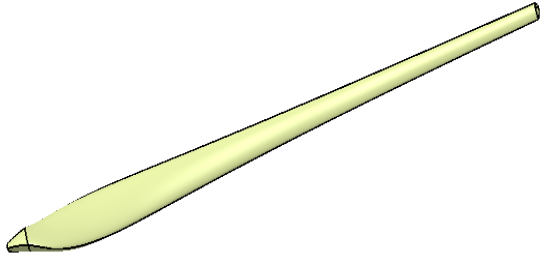


fig.4 Blade model

rotor blade 상의 임의의 위치에 전달되는 바람의 상대속도 \vec{v}_{rev} 와 입사각(α)에 따라 날개에 작용하는 양력과 항력이 정의된다. 그림 5 참조

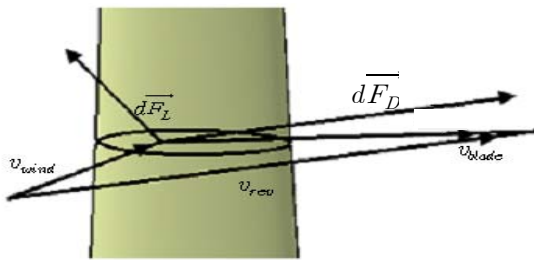


fig.5 Coordinate of lift, drag force

바람의 날개에 작용하는 입사속도는 바람속도와 날개 원주속도의 합으로 정의된다. 항력은 바람의 입사속도와 같은 방향으로 작용된다. 양력 곧 항력방향 및 날개 길이방향에 수직이다. 따라서 항력방향은 바람의 입사속도 방향과 같이

$$\vec{n}_D = \frac{v_x \vec{i}_b + v_z \vec{k}_b}{|v_{rev}|} \quad (5)$$

이고 여기서 방향벡터 \vec{i}_b, \vec{k}_b 는 각각 날개좌표계의 x, z 축 방향벡터이다. 날개는 기준좌표계의 z 축 기준으로 양의 방향으로 θ_t 만큼 회전한다.

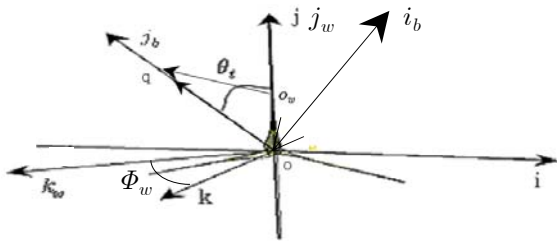


fig.6 Coordinate of main component

그러므로

$$\vec{i}_b = \cos\theta_t \vec{i} + \sin\theta_t \vec{j} \quad (6)$$

$$\vec{j}_b = -\sin\theta_t \vec{i} + \cos\theta_t \vec{j} \quad (7)$$

$$\vec{k}_b = \vec{k} \quad (8)$$

또한 양력방향은 날개방향(\vec{j}_b)과 항력방향(\vec{n}_D)의 수직이므로

$$\vec{n}_L = \vec{j}_b \times \vec{n}_D \quad (9)$$

이다.

따라서 임의의 위치 $\vec{oq} = r_b \vec{j}_b$ 에서 바람에 의해 발생하는 미소 양력 및 미소 항력은 다음과 같다.

$$d\vec{F}_L = \left(\frac{1}{2} \rho v_{rev} c_L t_b dr_b \right) \vec{n}_L \quad (10)$$

$$d\vec{F}_D = \left(\frac{1}{2} \rho v_{rev} c_D t_b dr_b \right) \vec{n}_D \quad (11)$$

여기서 미소힘의 크기는 양력 및 항력계수 c_L, c_D 의 함수이다. 항력/양력계수는 입사각의 크기에 따라 변한다. 본 연구에서는 양력, 항력계수를 Siegfried Heier[1]을 인용하였다. 그림 7은 본 연구에서 사용한 계수데이터이다.

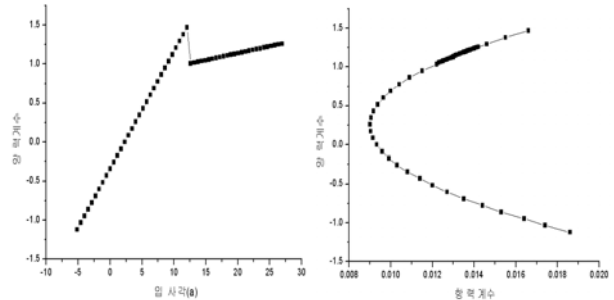


fig.7 Lift & Drag coefficients

블레이드로 입사되는 바람의 방향(δ)이 변하므로 날개 익의 입사각 α 도 바람에 따라 변한다. 바람의 방향각은

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{v_z}{v_x} \right) \quad (12)$$

이다. 방향각은 풍속모델에 따라 위치에 따라 그리고 바람의 방향에 따라 달라진다. 이를 통하여 얻은 α 값을 통하여 블레이드의 미소면적에 작용하는 양력계수, 항력계수를 구할 수 있다.

결국, 블레이드의 미소 면적에 걸리는 힘을 구할 수 있다.

로터블레이드의 날개는 3개로 하였다. 따라서 각각 날개 사이의 위상차는 120° 이므로 각각에서 발생하는 모멘트를 합하여 총 풍하중 모멘트를 구한다.

$$\vec{M}_t = \sum_{i=1}^3 \int_0^R \rho q \times \left\{ \left(\frac{1}{2} \rho v_{rev} c_{Ltb} \right) \vec{n}_L + \left(\frac{1}{2} \rho v_{rev} c_{Dtb} \right) \vec{n}_D \right\} dr_b \quad (13)$$

식(13)에서 산출된 풍하중 모멘트는 로터 블레이드가 등속도 Ω_i 로 회전하는 경우에, 주기적으로 변함을 알 수 있다. 총모멘트의 z방향성분은 메인축에 전달되는 토크이며 x방향성분은 수평방향 굽힘모멘트로서 메인축과 기어박스를 상하로 변형시키는 역할을 한다. y축방향성분은 수직방향 굽힘모멘트로서 메인축과 기어박스를 좌우방향으로 변형시키는 역할을 한다. 토크의 평균값은 전기를 생산하는 주 에너지원이며 하모닉항들은 풍력발전시스템의 비틀림 진동을 유발시키는 가진원이다. 굽힘모멘트의 평균값은 기어박스-회전축 라인을 수직 혹은 좌우로 변형시키는 요인이 된다. 그리고 하모닉항들은 상하 혹은 좌우 진동을 일으키는 진동원이 된다. 바람의 특성에 따라 굽힘모멘트가 과도하게 작용할 경우에는 기어열의 축정렬오차가 설계범위를 넘어서게 되며 그로 인하여 치면손상을 유발할 수 있어서 굽힘모멘트 해석이 중요하게 작용된다.

4. 풍속 모델 및 풍향에 따른 전달 모멘트 특성

일반적으로 풍력발전시스템에서는 제어장치가 구비되어 있어서 바람의 방향이 감지되면 블레이드의 방향을 바람에 정면을 향하도록 한다. 그러나 갑작스러운 바람이 불거나 그 제어하는 시간이 지연될 경우 항상 풍향의 방향이 블레이드의 정면에 놓여있을 수는 없다. 본 연구에서는 여러 가지 운전 조건과 돌발상황을 고려하여 바람의 방향을 블레이드 방향 기준으로 좌우로 45도 범위로 한정하여 모사실험하고자 한다. 모사실험은 정상풍속모델과 돌발풍속 모델에 대하여 수행하였다. 정상풍속 모델에서 사용한 계수는 높이가 30m일 때 풍속이 11m/s이고 계수 a는 0.16이다. 돌발 풍속에서 최대풍속은 25m/s이고 무한 풍속은 13m/s이다. 유효 반경은 10m이다.

식 (13)에 의거하여 풍하중 모멘트의 주기적인 특성을 정리하면 Table.1과 같다. 표에는 DC항(평균값)과 1차 2차 하모닉항을 수록하였다. 풍향 방향각 -45도, -22.5, 0, 22.5, 45도 에 대한 결과가 수록되어 있다. 이 때 1st 하모닉의 기본주파수는 블레이드 회전주파수(1X)에 날개 수를 곱한 값과 같다. 날개수가 3이면 3X가 기본주파수이다. 날개의 직경은 45m, 날개 수는 3개, 블레이드 중심까지의 고도는 70m이고, 돌발풍속모델의 바람 중심위치는 상향방향으로 블레이드 중심에서 20m 만큼 떨어진 곳에 있다고 보았다.

Table .1 DC and harmonics of total moment

(a) horizontal bending moment [단위 : kNm]

wind dir.(°)	Normal wind load			Blast wind load		
	D.C	1ST	2ND	D.C	1ST	2ND
-45	-775	500.4	33.6	-149	242	17.9
-22.5	166	509.1	34	478	72.8	30.3
0	-185	324.0	21.7	-24.5	36.1	13.0
22.5	-1282	90.0	5.85	-502	75.3	65.1
45	-767	264.7	17.3	-250	401	83.2

(b) vertical bending moment [단위 : kNm]

wind dir.(°)	Normal wind load			Blast wind load		
	D.C	1ST	2ND	D.C	1ST	2ND
-45	-0.53	484	21.6	0.252	196	9.0
-22.5	-0.50	462	20.6	-0.31	33.0	2.26
0	-0.38	50.4	1.1	-0.12	7.3	6.1
22.5	-0.08	55.4	2.2	0.58	31.2	12.8
45	-0.30	251	10.9	1.4	102.4	12.5

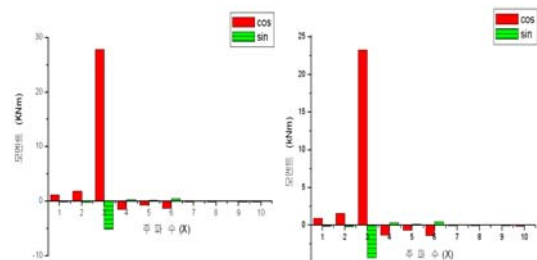
(c) torque moment [단위 : kNm]

wind dir.(°)	Normal wind load			Blast wind load		
	D.C	1ST	2ND	D.C	1ST	2ND
-45	973	5.9	0.28	814	28.2	9.0
-22.5	1892	14.3	0.89	1840	62.6	18.9
0	2159	27.8	1.83	2142	112	53.7
22.5	2010	23.6	1.5	1867	121	66.0
45	1002	11.3	0.7	932	177	29.5

4.1 정상풍속모델

(a) torque (Table.1-(c))

일반풍속 모델에서 전달토크의 하모닉항은 평균값에 비해 상대적으로 1% 내외로 매우 적은 것으로 나타났다. 그러나 돌발모델에서는 하모닉항의 크기가 상대적으로 상승한다. 바람이 블레이드에 정면으로 향할 때(fig10 (a) 참조)는 대략 5~10% 수준이다. 바람의 방향각이 +22.5° 인 경우는 가진토크의 크기는 증가한다.(fig10 (b) 참조). 즉, 상황에 따라서 회전속도(3X)를 가진주파수로 하는 토크가 진의 크기는 정격토크의 10% 수준 혹은 그 이상으로 메인토크와 비슷한 크기로 상승할 수 있음을 시사한다. 따라서 기어상자의 진동특성에서 비틀림진동은 일차적인 중요성을 가지고 있다.

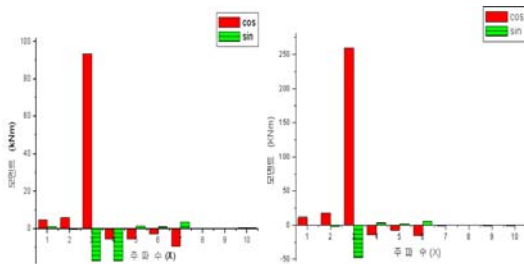


(a) wind direction 0° (b) wind direction 22.5°
fig.8 Spectral Diagram of Torque on Normal wind load

(b) Bending moments (Table.1-(a),(b))

굽힘모멘트는 축과 기어박스의 케이스의 변형을 유발시킨다. 기어 물림에 쏠림이 일어나면 모서리 접촉이 일어날 수 있어서 마이크로피팅, 스키핑 등의 치접촉 손상을 가져오기 때문에 수명시간이 줄어들 수 있다. 따라서 굽힘모멘트 분석은 기어상자 신뢰성 제고 설계에 필수적이다.

정상풍속모델의 경우, 수평방향 굽힘모멘트의 평균값(DC 항)이 주축 전달토크의 50% 수준인 경우가 바람의 방향 +22.5° 일 때 보여주고 있다.(Table 1 참조) 하모닉항의 크기는 평균값에 비해 크지 않다. 이것은 전체적으로 풍력시스템의 동력계를 수평방향으로 탄성 축 휘임을 유발시키며 기어열의 치물림에서 치접촉이 모서리에 일어나게 할 수 있다. 따라서 풍력시스템 기어상자 설계에서 치형수정 기술이 매우 중요함을 시사한다.

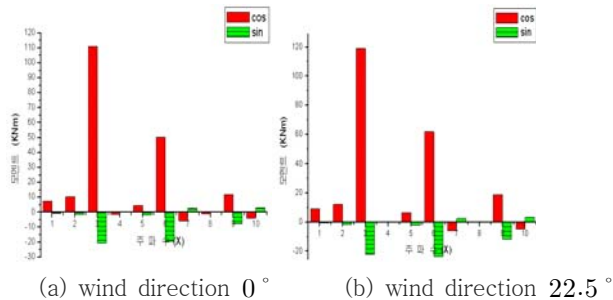


(a) wind direction +22.5도 (b) wind direction +45도
fig.9 Spectral Diagram of horizontal bending moment on Normal wind load

4.2 돌발풍속모델

(a) Torque (Table.1-(c))

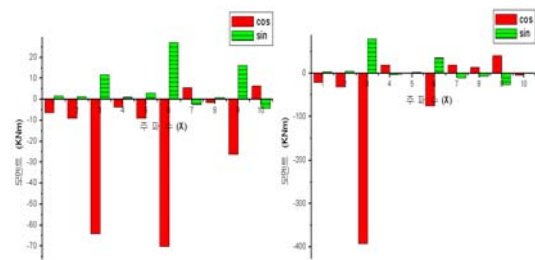
돌발풍속모델에서는 전달토크의 하모닉항의 평균값에 대한 상대비율은 정상풍속모델의 경우에 비해 상승함을 알 수 있다. Table.1-(c)에서 1차하모닉항의 가진토크의 상대비율이 대략 5 ~ 20 % 임을 알 수 있다. 바람의 방향각도가 +방향으로 커질수록 하모닉항의 상대비율은 증가하는 경향을 보여준다.



(a) wind direction 0° (b) wind direction 22.5°
fig.10 Spectral Diagram of Torque on Blast wind load

(b) Bending Moments (Table.1-(a),(b))

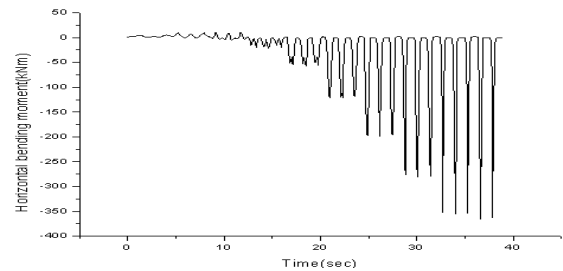
돌발풍속모델의 경우, 수평방향 굽힘모멘트의 평균값(DC 항)은 주축 전달토크의 25% 이하 수준이다. 바람의 방향 +22.5° 일 때 가장 크게 나타남을 보여주고 있다. 하모닉항의 크기는 평균값과 비슷한 수준이다. 이것은 전체적으로 풍력시스템의 동력계를 수평방향으로 모멘트 가진시키는 진동원으로 작용하므로 기어열의 치물림에서 치접촉 메카니즘이 더욱 복잡하게 거동함을 시사한다. 따라서 풍력시스템 기어상자 설계에서 굽힘진동해석이 요구된다. 수직방향 굽힘모멘트가 전체적으로 적게 나타나는 것은 돌발풍하중의 중심이 블레이드 중심에서 상향 방향에 위치해 있기 때문이다.



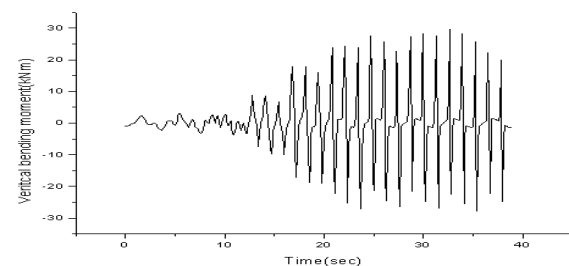
(a) wind direction +22.5도 (b) wind direction +45도
fig.11 Spectral Diagram of horizontal bending moment on Blast wind load

(c) 바람 중심의 이동에 따른 변화

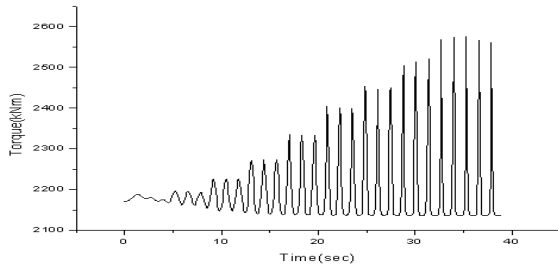
돌발풍하중에서 바람의 중심이 블레이드 중심에서 날개의 끝 방향으로 변화되는 경우 산출되는 풍하중 모멘트를 시간역에서 살펴보았다.



(a) Horizontal bending moment



(b) Vertical bending moment



(c) Torque

fig.12 Torque and Bending moments with moving wind center

그림 12에서 돌풍의 중심이 날개의 끝 방향으로 갈수록 평균값과 하모닉항의 크기가 증가함을 알 수 있다. 이것은 바람 중심이 날개 끝으로 이동하면서 대칭으로 빠진 블레이드에서의 모멘트 상쇄효과가 줄어드는 이유인 것으로 사료된다. 결과적으로 돌발풍하중은 그 중심이 블레이드 중심에서 벗어날 수록 토크와 굽힘모멘트의 하모닉 항을 증대시키는 결과를 낳는다.

5. 결론

본 연구에서는 블레이드, 바람의 profile을 설계한 후, 항력, 양력의 원리에 의해서 풍하중 moment를 해석하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1)정상풍속모델

3X를 가진주파수로 하는 토크의 가진 크기는 정격 토크의 10% 혹은 그 이상으로 발생할 수 있다. 이는 기어상자의 비틀림 진동이 일차적으로 중요성을 띄고 있음을 시사한다.

바람의 방향이 +22.5° 일 때 수평방향의 굽힘 모멘트가 주축으로 들어가는 토크의 50%수준으로 발생하는데 이는 수평방향으로의 탄성 축 휘임을 유발하여 치가 모서리에서 물림이 발생하게 하는 원인을 제공한다. 따라서 이는 풍력시스템 기어상자 설계에서 치형 수정의 중요성을 시사한다.

(2)돌발풍속모델

바람의 방향이 + 방향으로 커질수록 하모닉항의 상대 비율이 증가하였다. 1차 하모닉항은 가진토크에 대한 상대비율이 5~20%이다.

수평방향으로의 굽힘모멘트 하모닉항 크기는 평균값에 비슷한 수준으로 발생하는데, 이는 풍력시스템의 동력계를 수평방향으로 가진하는 진동원이므로 기어

열의 치물림에서 치접촉 메카니즘이 더욱 복잡하게 거동함을 시사한다.

바람의 중심이 날개의 끝 방향으로 이동할수록 대칭으로 상쇄된 모멘트 효과가 줄어들어 평균값과 하모닉항의 크기가 증가한다.

사사

본 연구를 수행하는데 재정적 지원을 한 (주) S&T 중공업에게 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Siegfried Heier, 2006, Grid of Wind energy Conversion System, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Park ji sang, Jung sung hun, Hwang bung chun, 2007, 풍력터빈 블레이드의 설계/해석 및 시험 평가 기술, 기계와 재료 제19권 제2호 통권72호 (2007년 여름) pp.28-47 1226-9077
- (3) Dong-hyun kim, Mi hyun hwang, Yo han kim, Dong man kim, Soo hyun kim, 2010, 공탄성 변형 효과를 고려한 5MW급 풍력 발전기 블레이드의 성능해석, (사)풍력에너지 학회(2010 춘계학술대회)
- (4)Berthold Schlecht, Dipl.-Ing. Sascha Gutt, 2002, Multibody-System-simulation of Drive Trains of Wind Turbines, WCCMV
- (5)Dong Ok Yu, Oh Joon Kwoon, 2010, RANS 및 VTM 기법을 이용한 풍력 터빈 블레이드의 비정상 공력 특성 예측, (사)풍력에너지 학회(2010 춘계학술대회)