

풍력발전기용 3점 지지 드라이브 트레인의 지지 강성이 기어박스 입력하중에 미치는 영향

남주석^a, 남용운^{a*}

The Influence of Suspension Stiffness on the Gearbox Input Loads in a 3-Point Suspension Wind Turbine Drive Train

Ju Seok Nam^a, Yong Yun Nam^{a*}

^a Department of System Reliability, Korea Institute of Machinery & Materials,
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	August	2015
Revised	31	August	2015
Accepted	31	August	2015

Keywords:

Drive train
Gearbox
Main bearing
Non-torque loads
Stiffness
Wind turbine

ABSTRACT

The effects of suspension stiffness on the reaction load of the gearbox suspension for a three-point suspension wind turbine drive train were investigated by finite element analysis. The reaction forces of the gearbox suspension appear to increase as the gearbox suspension stiffness increases; however, the main bearing stiffness has a reverse effect on the reaction forces. The influence of the gearbox suspension stiffness is greater than that of the main bearing. Since the suspensions must provide the gearbox with proper support, it is not practical to use soft gearbox suspension for small reaction forces. It is more feasible to use stiff main bearings. As a guideline for the main bearing stiffness in the present study, we propose a relative stiffness of 100-150% of the reference.

1. 서론

풍력에너지를 효율적으로 이용하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있으며^[1,2] 중국, 미국, 독일, 스페인, 인도를 포함한 많은 국가들에서 누적 설치 용량이 해마다 증가하고 있다^[3]. 그리고 설치 부지가 육상으로부터 해상으로 옮겨지고 있는 추세인데 해상은 육상에 비해 접근성이 좋지 않아 유지보수가 힘들어 풍력발전기의 신뢰성이 중요한 문제로 대두되고 있다^[4].

풍력발전기의 구성품 중 기어박스는 로터축으로부터 전달된 저속 고토크의 동력을 발전에 적합한 고속 저토크의 동력으로 변화시

켜주는 핵심 부품이다. 그러나 고장이 나면 정지기간이 길어 풍력발전기의 가동률을 낮추는 주요 요소이기도 하다^[5,6]. 풍력발전기용 기어박스의 고장에 대해 다양한 원인들이 지목되고 있지만 기어박스에 작용하는 하중 예측의 부정확성, 특히 비토크 하중(non-torque loads)의 영향에 대한 과소평가가 주요 원인으로 거론되어 이를 구명하기 위한 연구가 진행 중에 있다^[7-9].

비토크 하중은 토크를 제외한 5개의 하중 성분을 의미하며 로터의 자중 및 불균일한 풍하중으로 인해 필연적으로 생겨난다. 이상적으로는 기어박스 이전에 위치한 메인 베어링이 비토크 하중을 모두 흡수하여 기어박스로는 토크 하중만 입력되어야 한다. 그러나

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7413

Fax: +82-42-868-7418

E-mail address: yynam@kimm.re.kr (Yong Yun Nam).

실제로는 일부 비토크 하중이 메인 베어링을 거쳐 기어박스로 전달되며, 전달량은 메인 베어링 및 기어박스의 강성에 따라 달라진다. 선행 연구^[10]를 통해 풍력발전기용 3점 지지 드라이브 트레인에서 메인 베어링의 강성이 기어박스로 전달되는 비토크 하중에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 메인 베어링 강성에 따른 기어박스 입력하중의 경향을 확인할 수 있었으나 기어박스 강성의 영향에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구는 그 후속 연구로서, 3점 지지 드라이브 트레인의 주요 지지 요소인 메인 베어링과 기어박스의 지지 강성이 기어박스 입력하중에 미치는 종합적인 영향을 분석하였다. 강성 범위를 500%까지 확장하여 메인 베어링과 기어박스의 지지 강성이 미치는 영향을 분석하였으며, 실제 3점 지지 드라이브 트레인의 적용에 있어 적절한 지지 강성 수준에 대해 고찰하였다.

2. 본 론

선행 연구에서와 동일한 하중조건 및 해석모델을 사용하여 지지 강성의 영향을 분석하였다^[10]. 즉, 유연체 해석이 가능한 상용 다물

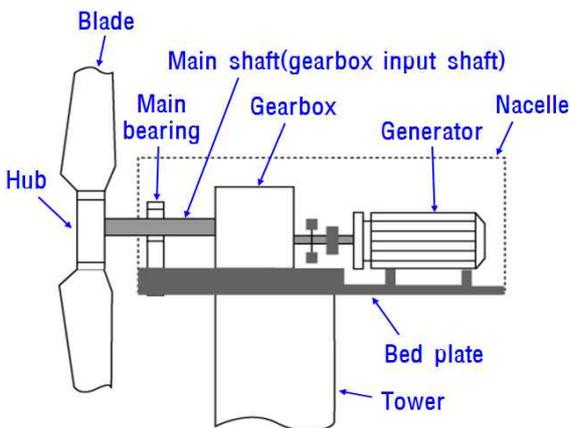


Fig. 1 Configuration of 3 point suspension drive train Main shaft (gearbox input shaft)

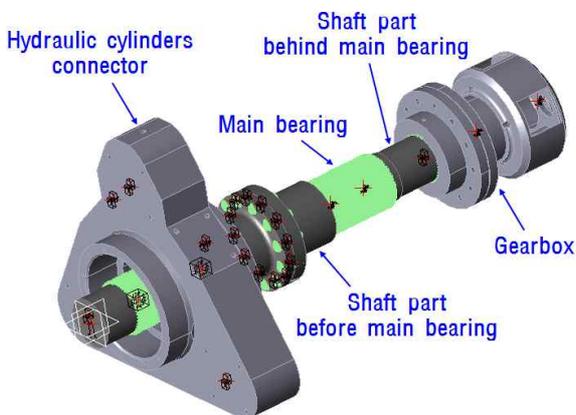


Fig. 2 Feature of the 3D analysis model

체 동역학 해석 프로그램을 사용하여^[11] 풍력발전기용 3점 지지 드라이브 트레인(Fig. 1)을 모사한 3D 해석모델을 구성하고 그를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 해석모델에는 유압실린더 연결체, 축, 메인 베어링, 기어박스가 포함된다 (Fig. 2). 기어박스는 2 MW급 풍력발전기용 기어박스의 1/4 축소모형으로 두 개의 유성 기어단(LSPG와 HSPG)과 하나의 평행축 기어단(PSG)으로 구성된다 (Fig. 3). 해석모델의 유압실린더 위치에 40 kN의 수직 전단력을 입력해 준 상태에서 기어박스와 메인 베어링의 지지 강성에 따른 기어박스 입력하중의 크기를 분석하였다.

2.1 보-스프링 모델을 이용한 경향 분석

보-스프링 모델은 비교적 간단하고 빠르게 해석이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 3D 해석모델을 이용한 해석에 앞서 보-스프링 모델로 구조해석을 수행하여 비토크 하중이 메인 베어링과 기어박스로 전달되는 경향을 파악하였다.

해석 대상 드라이브 트레인의 축은 보로 모델링하고 메인 베어링(MB)과 기어박스(GB)의 서스펜션은 보의 양쪽 끝을 지지하는 스프링으로 모델링하였다 (Fig. 4). $V_{1(2)}$, $M_{1(2)}$, $v_{1(2)}$, $\theta_{1(2)}$ 은 각각 메인 베어링(기어박스) 위치에서의 수직 하중, 모멘트, 수직 변형, 굽힘 변형을 의미하며 L은 메인 베어링과 기어박스 사이의 거리를 의미한다. 작용하는 수직 하중 및 모멘트에 의해 메인 베어링과 기어박스 위치의 스프링요소에 반력이 발생한다. 이 반력들은 하중에 의한 변형과 그 강성으로 크기가 결정되며, 곧 메인 베어링과 기어박스에 작용하는 입력하중을 의미한다.

Fig. 4의 보-스프링 모델에 대한 보 요소의 강성 행렬은 식 (1)과 같다^[12,13]. 이를 이용하여 메인 베어링과 기어박스의 강성을 포함

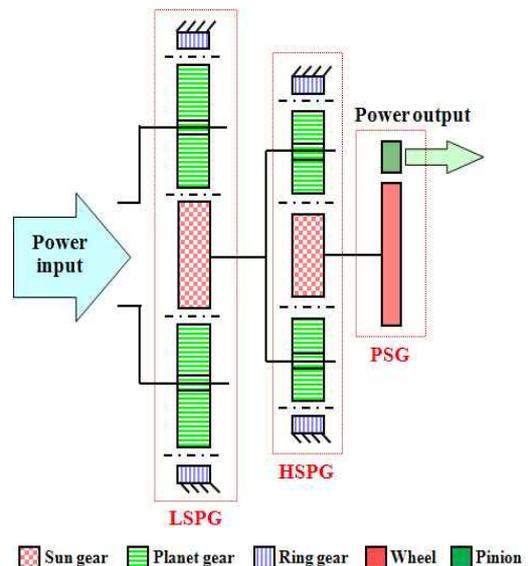


Fig. 3 Gear train of the gearbox



Fig. 4 Beam-Spring model for drive train

한 전체 모델의 강성 행렬을 구성할 수 있으며, 그 역행렬을 적용하여 식 (2)와 같이 변형량을 얻을 수 있다.

$$\frac{EI}{L^3} \begin{pmatrix} 12 & -6L & -12 & -6L \\ -6L & 4L^2 & 6L & 2L^2 \\ -12 & 6L & 12 & 6L \\ -6L & 2L^2 & 6L & 4L^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, E 는 축의 탄성계수, I 는 축의 관성 모멘트를 의미한다.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{12EI}{L^3} + k_{f1} & -\frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} + k_{m1} & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} + k_{f2} & \frac{6EI}{L^2} \\ -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} + k_{m2} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_1 \\ M_1 \\ V_2 \\ M_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, k_{f1} 은 메인 베어링의 전단 강성, k_{m1} 은 메인 베어링의 굽힘 강성, k_{f2} 는 기어박스의 전단 강성, k_{m2} 는 기어박스의 굽힘 강성을 의미한다.

메인 베어링은 복열 테이퍼 롤러 베어링으로 앞쪽 열과 뒤쪽 열에 위치한 두 개의 베어링으로 구성된다. 앞쪽 열과 뒤쪽 열 베어링은 그라운드를 기준으로 병렬로 연결된 형태이므로 메인 베어링의 대표 강성은 식 (3)을 이용하여 도출하였다.

$$k_{f(m)1} = k_{f,f(m)1} + k_{r,f(m)1} \quad (3)$$

여기서, $k_{f,f(m)1}$ 은 앞쪽 베어링의 전단(굽힘) 강성, $k_{r,f(m)1}$ 은 뒤쪽 열 베어링의 전단(굽힘) 강성을 의미한다.

메인 베어링과 기어박스의 반력은 도출된 변형과 지지 강성을 이용하여 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} R_{F1} \\ R_{M1} \\ R_{F2} \\ R_{M2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{f1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{m1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{f2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{m2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, R_{F1} 과 R_{M1} 은 각각 메인 베어링의 수직 반력 및 굽힘 모멘트 반력, R_{F2} 와 R_{M2} 는 각각 기어박스의 수직 반력 및 굽힘 모멘트 반력을 의미한다.

식 (2)~(4)를 사용하여 메인 베어링과 기어박스의 반력을 도출하

Table 1 Parameters for matrix structural analysis

Length (L), mm	565
Modulus of elasticity (E), N/mm ²	205000
Moment of inertia (I), mm ⁴	24850489
Main bearing shear stiffness (k_{f1}), N/mm	7078144
Main bearing bending stiffness (k_{m1}), Nmm/rad	8166528500
Gearbox shear stiffness (k_{f2}), N/mm	30000
Gearbox bending stiffness (k_{m2}), Nmm/rad	30000000

Table 2 Reaction loads under pure shear force at main bearing

Component	Main bearing	Gearbox	Ratio, %
Vertical force, N	39933	67	0.17
Moment, Nmm	37775	201	0.53

Table 3 Reaction loads under pure moment at main bearing

Component	Main bearing	Gearbox	Ratio, %
Vertical force, N	20266	-20266	-100
Moment, Nmm	13274858	29601	0.12

였다. 식에서 적용된 주요 변수들의 크기는 Table 1과 같으며, Table 2 및 3은 각각 메인 베어링 위치에 40 kN의 순수 전단력이 작용하는 경우($V_1=40$ kN, $M_1=0$ kNm)와 24.8 kNm의 순수 모멘트가 작용하는 경우($V_1=0$ kN, $M_1=24.8$ kNm)에 대한 메인 베어링과 기어박스의 반력을 보여준다.

40 kN의 전단력은 원본인 2 MW급 풍력발전기의 메인 베어링에 작용하는 전단력의 크기와 해석모델 구성 시의 축소비를 이용하여 결정된 값이다^[14]. 또한 24.8 kNm의 모멘트는 해석모델의 유압 실린더 위치에 40 kN의 수직 전단력이 작용할 때 메인 베어링이 받게 되는 굽힘 모멘트의 크기이다. 수직 반력의 경우 상방향이 양으로 정의되었다.

하중 전달의 경향성을 살펴보면, 순수 전단력이 작용할 때는 기어박스의 반력이 메인 베어링 반력에 비해 매우 작게 나타난다. 하중 성분별로 수직 반력의 경우 0.17%, 굽힘 모멘트 반력의 경우 0.53% 수준이다. 이는 순수 전단력은 메인 베어링에서 대부분 지지되고 기어박스로는 일부만이 전달됨을 의미한다. 순수 모멘트가 작용하는 경우의 굽힘 모멘트 반력도 동일한 경향을 보인다. 메인 베어링에 비해 기어박스 반력은 0.12% 수준이다. 그러나 순수 모멘트가 작용하는 경우의 수직 반력은 메인 베어링과 기어박스에서 크기가 동일하고 방향만 변화된다. 이는 메인 베어링에 작용하는 순수 모멘트에 의해 메인 베어링에 수직 반력이 발생하며, 이를 상쇄하기 위해 기어박스에도 반대 방향의 수직 반력이 생성되기 때문이다. 이와 같이, 양단 지지 시스템의 경우 지점들의 상호작용에 의해 순수 전단력 또는 순수 모멘트만이 작용하더라도 반력은 수직

전단 성분과 굽힘 모멘트 성분이 모두 존재한다.

2.2 3-D 해석모델을 이용한 분석

2.2.1 100% 강성조건

메인 베어링의 강성은 베어링 제조사로부터, 기어박스의 강성은 시험결과를 이용한 해석모델의 튜닝을 통해 얻었으며 크기는 Tables 4, 5와 같다. 본 연구에서는 Tables 4, 5의 강성을 메인 베어링과 기어박스의 100% 강성조건으로 정의하며, 이 때 기어박스 및 메인 베어링에서 발생하는 수직 및 굽힘 모멘트 반력의 크기는 Table 6과 같다. 수직 반력의 경우 상방향이 양으로 정의되었다.

메인 베어링의 경우 앞쪽 열 베어링이 뒤쪽 열 베어링보다 더

Table 4 Stiffness matrix of main bearing (unit: N, mm)

(a) front row

	dx	dy	dz	dpx	dpy	dpz
dF _x	292655	-1082625	0	0	0	34403210
dF _y	-1082625	4115335	0	0	0	-128883031
dF _z	0	0	1416688	0	50161546	0
dM _x	0	0	0	0	0	0
dM _y	0	0	50161546	0	2245711034	2
dM _z	34403210	-128883031	0	0	2	5809362852

(b) rear row

	dx	dy	dz	dpx	dpy	dpz
dF _x	577086	-767162	0	0	0	-37062665
dF _y	-767162	5247131	0	0	0	139698724
dF _z	0	0	5661456	0	-147749645	0
dM _x	0	0	0	0	0	0
dM _y	0	0	-147749645	0	5920817508	1
dM _z	-37062665	139698724	0	0	1	6132894558

Table 5 Stiffness matrix of gearbox (unit: N, mm)

	dx	dy	dz	dpx	dpy	dpz
dF _x	6000	0	0	0	0	0
dF _y	0	30000	0	0	0	0
dF _z	0	0	30000	0	0	0
dM _x	0	0	0	30000000	0	0
dM _y	0	0	0	0	30000000	0
dM _z	0	0	0	0	0	30000000

Table 6 Reaction loads at 100% stiffness condition

Component	Main bearing			Gearbox
	Front bearing	Rear bearing	Sum	
Vertical force, N	43533	16697	60230	-26510
Moment, Nmm	1776934	1351686	3128620	49702

큰 수직 및 굽힘 모멘트 반력을 발생시킨다. 이는 하중의 전달 경로 상 앞쪽 열 베어링이 먼저 하중을 지지하고 이후 앞쪽 열 베어링을 통과한 하중을 뒤쪽 열 베어링이 지지하기 때문이다. 메인 베어링 대비 기어박스가 지지하는 반력의 크기는 수직 반력의 경우 44%, 굽힘 모멘트 반력의 경우 1.6% 수준이다. 기어박스의 수직 반력은 메인 베어링의 수직 반력과 반대 방향이며, 굽힘 모멘트 반력에 비해 상대적으로 전달되는 양이 큰데 이는 입력 하중 중 모멘트 성분에 의한 영향이다. 또한 기어박스에 전달되는 수직력이 모멘트에 비하여 큰데 이를 줄이기 위해서는 메인 베어링의 회전 강성을 증가시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.

2.2.2 메인 베어링 강성의 영향

기어박스의 강성을 100%로 고정시킨 상태에서 메인 베어링 강성을 50%에서 500%까지 50% 간격으로 증가시키며 기어박스 및 메인 베어링에서 발생하는 반력의 크기를 도출하였다. 앞쪽 열과 뒤쪽 열 베어링 강성 행렬의 모든 성분을 동일한 비율만큼 변화시켰으며, 반력의 크기는 100% 강성조건인 반력(Table 6)에 대한 백분율로 나타내었다.

메인 베어링 강성에 따른 기어박스의 반력은 Fig. 5, 메인 베어링의 반력은 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 FB는 앞쪽 열 베어링, RB는 뒤쪽 열 베어링을 의미한다.

기어박스의 경우 메인 베어링 강성이 증가할수록 수직 및 굽힘 모멘트 반력이 감소하는 경향을 보인다. 이는 메인 베어링 강성이 증가하면 메인 베어링에서 더 많은 하중을 지지하게 되므로 기어박스로 전달되는 하중은 감소하기 때문이다. 500%의 강성 범위 내에서 반력의 변화폭은 4~5% 수준이며, 강성이 증가하면 반력의 변화율은 감소하는 경향을 보인다.

메인 베어링 강성이 증가하면 앞쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력, 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 및 수직 반력은 증가하고 앞쪽 열 베어링의 수직 반력은 감소하는 경향을 보인다. 뒤쪽 열 베어링

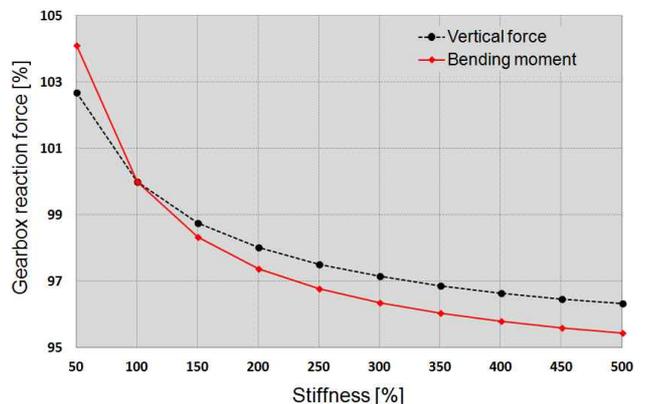


Fig. 5 Gearbox reaction forces with the main bearing stiffness

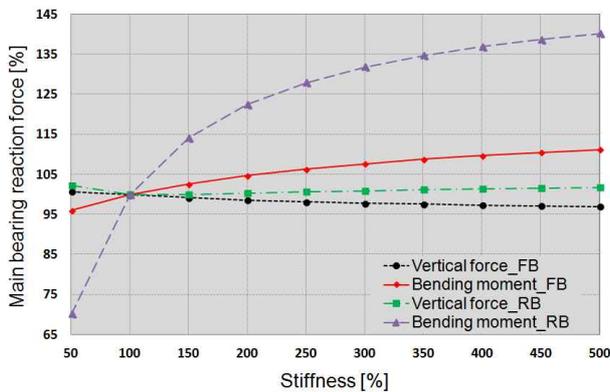


Fig. 6 Main bearing reaction forces with the main bearing stiffness

에서 굽힘 모멘트 반력 및 수직 반력이 증가하는 이유는 베어링의 강성이 커지면 앞쪽 열 베어링과 뒤쪽 열 베어링 사이의 축에서 굽힘 변형이 증가하여 뒤쪽 열 베어링의 반력을 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 하중별로는 굽힘 모멘트 반력의 변화폭이 수직 반력보다 더 크게 나타난다. 메인 베어링 강성이 50%에서 500% 까지 변화할 때 수직 반력의 변화폭은 앞쪽 열 베어링과 뒤쪽 열 베어링의 경우 모두 3% 범위로 상대적으로 크지 않았으나, 굽힘 모멘트 반력의 변화폭은 앞쪽 열 베어링의 경우 12%, 뒤쪽 열 베어링의 경우 40%로 특히 뒤쪽 열 베어링에서 큰 변화가 발생한다. 따라서 메인 베어링 강성에 대해 가장 민감한 변화를 보이는 반력 성분은 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력임을 알 수 있다. 앞쪽 열 베어링과 뒤쪽 열 베어링 모두 강성이 증가하면 반력의 변화율은 감소한다.

2.2.3 기어박스 강성의 영향

메인 베어링의 강성을 100%로 고정시킨 상태에서 기어박스 강성을 50%에서 500%까지 50% 간격으로 증가시키며 기어박스 및 메인 베어링에서 발생하는 반력의 크기를 도출하였다. 강성 행렬의 모든 성분을 동일한 비율만큼 변화시켰으며, 반력의 크기는 100% 강성조건의 반력에 대한 백분율로 나타내었다. 기어박스 강성에 따른 기어박스의 반력은 Fig. 7, 메인 베어링의 반력은 Fig. 8과 같다.

기어박스 강성이 증가하면 기어박스에 작용하는 수직 반력과 굽힘 모멘트 반력은 증가하는 경향을 보인다. 500% 강성 범위 내에서 수직 반력의 경우 11%의 증가폭에서 수렴하는데 반해, 굽힘 모멘트 반력의 경우 계속해서 증가하는 경향을 보인다. 굽힘 모멘트의 증가폭이 큰 이유는 기어박스의 강성이 증가하면 기어박스가 축을 견고하게 지지하여 기어박스 입력축에서의 굽힘 변형이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

기어박스와 메인 베어링의 양단 지지 특성에 의해 기어박스의 강성 변화는 메인 베어링의 반력에도 영향을 미친다. 기어박스 강성이 증가하면 앞쪽 열 베어링의 수직 및 굽힘 모멘트 반력, 뒤쪽

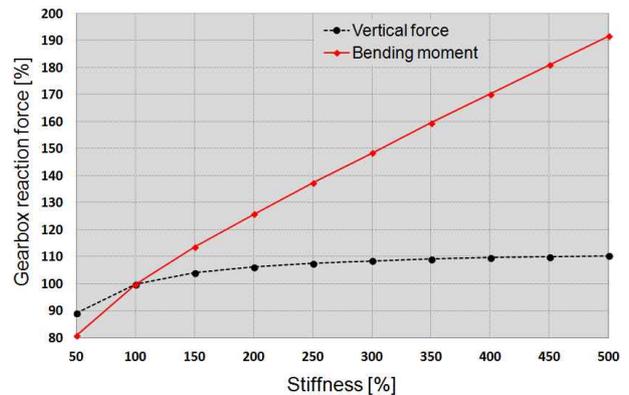


Fig. 7 Gearbox reaction forces with the gearbox stiffness

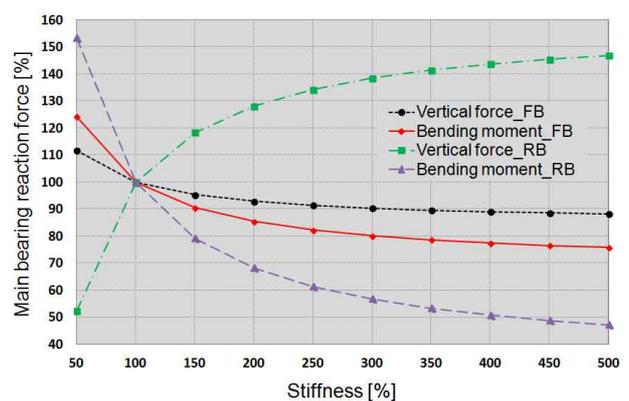


Fig. 8 Main bearing reaction forces with the gearbox stiffness

열 베어링의 굽힘 모멘트 반력은 감소하고 뒤쪽 열 베어링의 수직 반력은 증가하는 경향을 보인다. 뒤쪽 열 베어링의 수직 및 굽힘 모멘트 반력 변화폭이 앞쪽 열 베어링보다 크게 나타나는데, 이는 상대적으로 기어박스와 가까운 위치에 있는 뒤쪽 열 베어링이 기어박스 강성 증가에 의한 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 기어박스 강성이 50%에서 500% 까지 변화할 때 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력의 변화폭은 53%, 수직 반력의 변화폭은 47%, 앞쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력의 변화폭은 25%, 수직 반력의 변화폭은 12%로 나타났다. 특히 기어박스 강성이 증가하면 앞쪽 열과 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력이 모두 감소하는데 이는 기어박스의 굽힘 모멘트 반력 증가와 연관된다. 즉, 기어박스의 강성이 증가하면 메인 베어링에 작용하는 굽힘 모멘트 반력은 감소하는 대신 기어박스에 작용하는 굽힘 모멘트 반력이 증가하게 된다. 강성이 증가할수록 메인 베어링의 굽힘 모멘트 반력의 변화율이 감소하여 수렴하는 경향을 보이므로 기어박스의 굽힘 모멘트 반력도 강성이 더 증가하면 수렴할 것으로 생각된다.

2.2.4 메인 베어링과 기어박스 강성의 상호 영향

메인 베어링과 기어박스 강성을 모두 50%에서 500%까지 50% 간격으로 증가시키며 기어박스 및 메인 베어링에서 발생하는 반력

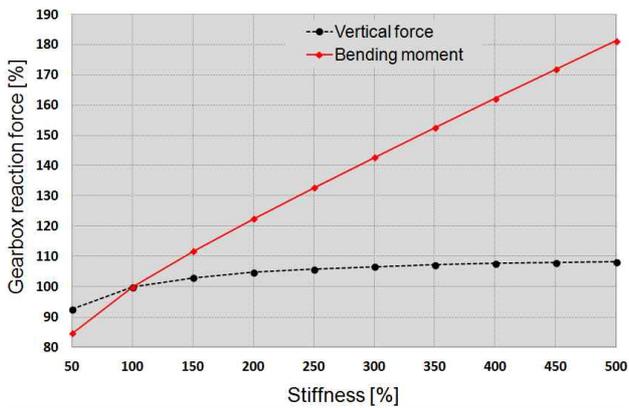


Fig. 9 Gearbox reaction forces with the both stiffness

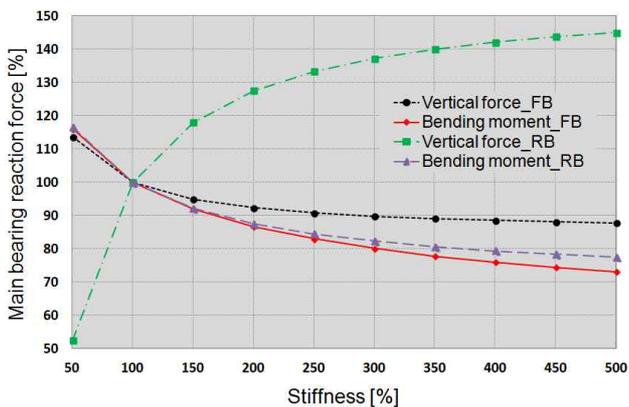


Fig. 10 Main bearing reaction forces with the both stiffness

의 크기를 도출하였다. 메인 베어링은 앞쪽 열과 뒤쪽 열 베어링 강성 행렬의 모든 성분을 동일한 비율만큼 변화시켰으며, 기어박스도 강성 행렬의 모든 성분을 동일한 비율만큼 변화시켰다. 반력의 크기는 100% 강성조건에 대한 백분율로 나타내었다. 강성의 변화에 따른 기어박스의 반력은 Fig. 9, 메인 베어링의 반력은 Fig. 10과 같다.

기어박스 반력은 기어박스 강성만 변화시킨 경우(Fig. 7)와 동일한 경향을 보이며 반력의 변화폭만 소폭 감소한다. 500% 강성 범위 내에서 수직 반력은 9%의 증가폭에서 수렴하는 경향을 보인다.

메인 베어링 반력도 기어박스 강성만 변화시킨 경우(Fig. 8)와 거의 유사한 경향을 보인다. 차이점은 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력의 변화폭이 크게 감소하는 것이다. 이는 Fig. 6과 8에서 볼 수 있듯이, 메인 베어링 강성이 증가하면 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력이 증가하고 기어박스 강성이 증가하면 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력이 감소하는데 두 영향이 합쳐져서 변화폭이 감소한 것으로 생각할 수 있다. 강성이 50%에서 500% 까지 변화할 때 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력의 변화폭은 23%, 수직 반력의 변화폭은 55%, 앞쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력의 변화폭은 27%, 수직 반력의 변화폭은 14%로 나타났다.

뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력을 제외하면 기어박스과 메인

Table 7 Gearbox reaction loads with stiffness conditions

Component	100% GB stiffness & 100% MB stiffness	50% GB stiffness & 500% MB stiffness
Vertical force, N	-26510	-22383
Moment, Nmm	49702	37999

베어링에서 발생하는 반력의 크기는 기어박스 강성만 변화시킨 경우와 큰 차이가 없었다. 특히 앞쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력은 메인 베어링 강성만 변화시킨 경우와 기어박스 강성만 변화시킨 경우에 서로 다른 특성을 보이는데, 두 강성을 동시에 변화시킨 경우에는 기어박스의 강성만 변화시켰을 때의 경향을 따른다. 즉, 앞쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력은 메인 베어링 강성이 증가하면 증가하고 기어박스 강성이 증가하면 감소하는데 메인 베어링과 기어박스의 강성을 동시에 증가시켰을 때에는 감소하는 경향을 보인다. 이는 기어박스의 강성이 메인 베어링과 기어박스에서 발생하는 반력에 큰 영향을 미치는 요소임을 의미한다.

2.2.5 지지 강성이 기어박스 수명에 미치는 영향

풍력발전기용 3점 지지 드라이브 트레인에 수직 전단력이 작용할 때 메인 베어링의 강성이 증가하면 기어박스에 작용하는 수직 및 굽힘 모멘트 반력은 감소한다. 반면, 기어박스 강성이 증가하면 기어박스에 작용하는 수직 및 굽힘 모멘트 반력이 증가한다. 따라서 기어박스의 수명 측면에서는 메인 베어링의 강성은 증가시키고 기어박스의 강성은 감소시키는 것이 좋다. Table 7은 서로 다른 강성 조건에서 기어박스의 반력을 도출한 결과를 보여준다. 메인 베어링 강성(MB stiffness)과 기어박스의 강성(GB stiffness)이 모두 100%인 경우와 비교하여 메인 베어링 강성이 500%이고 기어박스 강성이 50%인 경우 수직 반력은 약 16%, 굽힘 모멘트 반력은 약 34% 감소하는 것을 확인할 수 있다.

기어박스의 지지 강성은 기어박스 마운팅의 견고함과 연관되며 메인 베어링의 지지 강성은 메인 베어링 조립 시의 축방향 및 반경 방향 틈새에 의해 결정된다. 실제 드라이브 트레인에서 기어박스는 단단하게 고정해야 하므로 기어박스의 지지 강성을 낮추는 것은 현실적이지 못하다. 따라서 기어박스의 지지 강성은 고정하고 메인 베어링의 지지 강성만을 증가시켜야 한다. 강성이 작을수록 강성의 변화에 따른 반력의 변화율이 크므로 작은 범위에서 강성을 조정하는 것이 가장 효과적이며 본 연구의 대상 시스템에서는 100~150%가 적절한 것으로 생각된다. 메인 베어링의 일부 반력성분은 메인 베어링 강성이 증가할수록 커지는데 이 경우 강성의 증가폭이 작으므로 반력의 증가폭도 제한되어 메인 베어링의 수명 측면에서도 유리하다.

3. 결론

본 연구에서는 풍력발전기용 3점 지지 드라이브 트레인에 수직 전단력이 작용할 때 메인 베어링과 기어박스의 지지 강성이 기어박스 입력하중에 미치는 영향을 분석하였다. 유연체 해석이 가능한 상용 다물체 동역학 해석 프로그램을 사용하여 3점 지지 드라이브 트레인을 모사한 해석모델을 구성하고, 해석모델에서 메인 베어링과 기어박스의 강성을 변화시키며 발생하는 반력의 크기를 분석하였다.

해석 결과, 기어박스의 강성이 증가하면 기어박스에 작용하는 수직 및 굽힘 모멘트 반력이 증가한다. 하중 성분별로는 굽힘 모멘트 반력의 증가율이 수직 반력보다 더 크게 나타난다.

메인 베어링 강성은 기어박스 강성과 반대의 경향으로 기어박스 반력에 영향을 미친다. 즉, 메인 베어링 강성이 증가하면 기어박스의 수직 및 굽힘 모멘트 반력은 감소한다. 반력의 변화율은 메인 베어링 강성을 변화시킨 경우보다 기어박스 강성을 변화시킨 경우에 더 크게 나타난다.

기어박스와 메인 베어링의 양단 지지 특성으로 인해 기어박스의 강성 변화는 메인 베어링의 반력에도 영향을 미친다. 기어박스의 강성이 증가하면 앞쪽 열 베어링의 수직 및 굽힘 모멘트 반력, 뒤쪽 열 베어링의 굽힘 모멘트 반력은 감소하고 뒤쪽 열 베어링의 수직 반력은 증가하는 경향을 보인다.

메인 베어링 강성과 기어박스 강성을 동시에 변화시킨 경우 기어박스에서 발생하는 반력의 크기 및 경향은 기어박스 강성만 변화시킨 경우와 유사하게 나타난다. 즉, 기어박스에서 발생하는 반력은 기어박스 강성에 주도적인 영향을 받는다.

기어박스의 수명 측면에서는 메인 베어링 강성은 증가시키고 기어박스의 강성은 감소시키는 것이 가장 유리하다. 그러나 실제 적용에 있어 기어박스의 지지 강성은 기어박스 마운팅의 견고함과 연관되므로 이를 낮추는 것은 현실적이지 못하며 메인 베어링의 강성만을 증가시켜야 한다. 강성이 작을수록 강성의 변화에 따른 반력의 변화율이 크므로 작은 범위에서 강성을 조정하는 것이 가장 효과적이며 본 연구의 대상 시스템에서는 100~150%가 적절한 것으로 생각된다.

References

[1] Zahidi, A., 2012, Current Status and Future Prospects of the Wind Energy, Proc. of Power & Energy Conference, 54-58.
 [2] Thresher, R., Robinson. M., Veers. P., 2008, Wind Energy Technology:

Current Status and R&D Future, Conference Paper NREL/CP-500-43374, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
 [3] GWEC, 2014, Global Wind Energy Report, Annual Market Update 2014, Global Wind Energy Council, London, UK.
 [4] Kaldellis, J. K., Kapsali, M., 2013, Shifting Towards Offshore Wind Energy – Recent Activity And Future Development, Journal of Energy Policy, 53 136-148.
 [5] Ribrant, J., Bertling, L. M., 2007, Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005, IEEE Transactions on Energy Conversion, 22:1 167-173.
 [6] Tegen, S., Lantz, E., Hand, B., Maples, B., Smith, A., Schwabe, P., 2013, 2011 Cost of Wind Energy Review, Technical Report NREL/TP-5000-56266, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
 [7] Link, H., LaCava, W., VanDam, J., McNiff, B., Sheng, S., Wallen, R., McDade, B., Lambert, S., Butterfield, S., Oyague, F., 2011, Gearbox Reliability Collaborative Project Report: Findings from Phase 1 and Phase 2 Testing, Technical Report NREL/TP-5000-51885, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
 [8] Link, H., Keller, J., Guo, Y., McNiff, B., 2013, Gearbox Reliability Collaborative Phase 3 Gearbox 2 Test Plan, Technical Report NREL/TP-5000-58190, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
 [9] Nam, J. S., Park, Y. J., Kim, J. K., Lee, G. H., Han, J. W., Nam, Y. Y., 2014, Effect of Non-torque Loadings on the Load Sharing Characteristics of Planetary Gearbox, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 2014:9 119-119.
 [10] Nam, J. S., Nam, Y. Y., 2015, The Influence of Main Bearing Stiffness on the Gearbox of 3 Point Suspension Wind Turbine Drive Train, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 24:3 278-286.
 [11] DAFUL, 2013, DAFUL User's Manual Version 4.2, Virtual Motion Inc.
 [12] Kassimali, A., 2011, Matrix Analysis of Structures, Second Edition, Cengage Learning Inc., Boston, USA.
 [13] Gere, J. M., 2004, Mechanics of Materials, Sixth Edition, Thomson Learning Inc., Connecticut, USA
 [14] Nam, J. S., 2014, Effect of Non-torque Loadings on the Life of 3 Point Suspension Gearbox for Wind Turbine, A Thesis for a Doctorate, Seoul National University, Republic of Korea.