

바람조건에 따른 1MW급 수평축 풍력터빈 블레이드의 하중 해석

김진¹⁾, 유기완²⁾, 이창수³⁾

Aerodynamic Load Analysis for 1MW HAWT Blade According to IEC61400-1

Jin Kim, Ki-Wahn Ryu, Chang-Su Lee

Key words : Horizontal Axis Wind turbine(HAWT, 수평축 풍력 터빈), Load Analysis(하중 해석), Wind Condition(바람 조건), Design Load Case(DLC, 설계 하중 케이스)

Abstract : To assure the structural integrity for the hub and low speed shaft (LSS) of the drive train, it is necessary to obtain the ultimate aerodynamic loads acting on the wind turbine blade. The aim of this study is to predict the time histories of 3 forces and 3 moments at the hub and the LSS based on the design load case of the IEC 61400-1. From the calculated results most of the load components have rotor revolution frequency whereas thrust and torque of the LSS show blade passage frequency. It turns out that the EWM wind condition involves the maximum ultimate loads at both hub and LSS of the horizontal axis wind turbine.

1. 서론

풍력터빈에 대한 하중 계산(load calculation)은 풍력 터빈의 수명기간 동안(최소 20년) 인명 및 시설의 안전은 물론 풍력발전의 효율성과 신뢰성을 확보하기 위한 종합적인 설계 정보를 제공하기 위한 것으로써, 설계 개발 단계에서 매우 중요한 절차이다. 풍력터빈 하중의 대부분은 바람으로부터 발생하는 공기역학적 하중이다. 또한 대부분의 풍력 터빈은 난류가 강한 지역에 설치되기 때문에 난류의 영향까지 고려하여 불규칙한 반복 하중에 대한 검증이 필요하다.

본 연구는 IEC 61400-1의 설계 규정을 기반으로 NREL에서 제공하는 FAST (Fatigue, Aerodynamic, Structure and Turbulence) code를 사용하여 하중과 허브 축에서의 6분력 하중을 제시하도록 하여 이로부터 설계를 위한 극한 정하중의 진폭 및 주기를 제공하기 위함이다 [1].

이를 위해서는 기본적으로 블레이드에 의한 공력 성능 해석을 수행할 수 있는 절차가 선행되어야 한다. Wilson [2]과 Earl [3] 등은 BEM 방법을 이용하여 블레이드에 분포하는 공기력을 계산할

수 있는 연구를 진행하였다.



(a)Blades fracture (b)Support bending

Fig. 1 Accidents of wind turbine

설치장소의 풍황 조건을 고려하여 설치된 풍력터빈이라 해도 경우에 따라서는 Fig. 1과 같은 사고를 유발하게 된다. 이러한 사고는 설치장소의 기후 특성에 따른 돌풍이나 최대 풍속 뿐 만 아니라 이에 따른 공기역학적 하중 획득이 적절하게 이루어 졌는지 확인할 필요가 있게 된다.

1) 전북대학교 항공우주공학과 대학원
2) 전북대학교 항공우주공학과
E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr
Tel : (063)270-4286 Fax : (063)270-2472
3) 에드컴텍(주)

2. IEC 61400-1의 바람조건

IEC61400-1 규격에서는 여러 가지 특성을 갖는 바람 조건을 규정하고 있다. 정상 조건과 극한 조건이 있으며, 바람은 일정 시간 동안 돌풍이 발생하고, 풍향이 변화하는 등 바람의 특성이 변화하는 풍력터빈 발전 시스템에 하중을 예측할 수 있는 경우를 상정하여 방안을 규정하고 있다.

풍력 터빈의 class 분류는 평균 속도에 따라 I~IV등급과 S 등급으로 나누어서 분류하고 있다. 본 연구에서는 Class III에 높은 난류 특성 (A)를 갖는 것으로 정하였다. 이는 10분 평균 풍속이 7.5m/s이고, $V_{ref}=37.5m/s$, 난류 강도는 0.18인 경우에 해당된다.

2.1 정상 풍속 조건

정상적인 바람에서 풍속의 분포는 각각의 하중 조건들의 재현 주기를 결정하므로 풍력터빈 발전 시스템 설계에서 매우 중요하다. 10분 시간주기의 평균 풍속은 Rayleigh 분포를 갖는다고 가정하며, 높이에 따른 지상속도 경계층에 의한 속도 분포는 경험적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V(z) = V_{hub}(z/z_{hub})^\alpha \quad (1)$$

여기에서 α 는 0.2이다. 이 풍속 모델을 NWP (Normal Wind Profile)모델이라고 한다.

2.2 극한 풍속 조건

극한 풍속 조건은 풍력터빈에 작용하는 극한 하중을 정하기 위해서 사용된다. 이 조건은 돌풍에 의한 바람의 최대 피크 풍속, 풍속과 풍향의

Table 1. Extreme wind condition

Wind Condition	Specification	Corresponding value
EWM	Extreme Wind speed Model	$V_{e50, hub} = 52.5m/s$ $V_{e1, hub} = 39.375m/s$
EOG	Extreme Operating Gust	$V_{gust50} = 11.605m/s$ $V_{gust1} = 8.704m/s$
EDC	Extreme Direction Change	$\theta_{e30} = \pm 54.99^\circ$ $\theta_{e50} = \pm 41.245^\circ$
EOG	Extreme Coherent Gust	$V = 27m/s$
ECD	Extreme Coherent gust with Direction change	$\theta_{cg} = 60^\circ$
ENS	Extreme Wind Shear	$V(z,t) = 25.2587m/s$

급격한 변동 등을 포함한다.

이러한 극한 조건은 바람의 난류에 의해서 생길 수 있는 영향을 포함하여 설계하중을 정하기 위한 자료를 제공하게 된다. 극한 풍속 조건에 해당하는 바람조건을 분류하면 Table 1과 같다.

3. 하중조건

풍력 터빈의 설계 하중을 계산하기 위해 풍력 터빈이 수명기간동안 외부 환경과 연계하여 노출되는 다양한 하중 조건들을 IEC 61400-1 규격에 의거 체계적으로 분류하였다. 적용된 하중 조건들은 Table 2와 같이 수명기간에 예상되는 다양한 상황들을 운전조건과 일시조건으로 분류되었다.

Table 2. Design load cases

Design situation	DLC	Wind condition	Type of analysis	Partial safety factors
1) Power production	1.1	NTM $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	F	*
	1.3	EOG $V_{hub} = V_r$	U	N
	1.4	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	1.5	EOG1 $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	1.6	EOG50 $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	1.7	ENS $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	1.8	EDC50 $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	1.9	EOG $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
2) Power production plus occurrence of fault	2.1	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
	2.2	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	A
	2.3	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	F	*
3) Start up	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	F	*
	3.2	EOG1 $V_{hub} = V_{in}, V_r$ or V_{out}	U	N
	3.3	EDC1 $V_{hub} = V_{in}, V_r$ or V_{out}	U	N
4) Normal shut down	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	F	*
	4.2	EOG1 $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
5) Emergency shut down	5.1	NWP $V_{hub} = V_r$ or V_{out}	U	N
6) Parked(standing still or idling)	6.1	EWM $V_{hub} = V_{e50}$	U	N
	6.2	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	F	*
7) Parked and fault conditions	7.1	EWM $V_{hub} = V_{e1}$	U	A
8) Transport, assembly, maintenance and repair	8.1	To be stated by the manufacture	U	T

풍력터빈이 운용되는 동안 바람은 일정 시간 동안 돌풍이 발생하고, 풍향이 변하는 등 수명기간동안 외부 환경과 연계되어 허브와 블레이드에 하중 변화를 일으킨다. 이러한 하중은 회전으로 인한 반복적 특성을 가지고 있다. 이 뿐만 아니라 풍속 및 풍향의 변화와 풍속의 전단에 의해서 하

중의 크기와 특성이 주기적으로 달라진다.

이러한 하중계산을 통해 풍력터빈이 수명기간 동안 노출될 수 있는 하중조건들을 고려하여 풍력터빈이 받게 되는 공력 하중을 구한 후 구조적 건전성을 확보하기 위한 설계 자료로 쓰이게 된다.

4. 결과 및 토의

4.1 바람조건

본 연구에서 모델로 한 풍력터빈의 제원은 Table 3과 같다 [5]. 표에서 제시된 풍력터빈은 공력 최적 설계 과정을 거쳐서 블레이드 비틀림 각과 선형화된 코드길이를 구한 것으로 사용된 에어포일은 총 6개로 스펠방향으로 분포시켰다. 몇 가지 바람 조건에 따른 풍속 변화를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3. Main parameter of HAWT

parameter	value
Diameter (m)	60.6
Number of blade	3
Rated power (MW)	1
Rated wind speed (m/s)	12
Hub height (m)	70
RPM	26.7

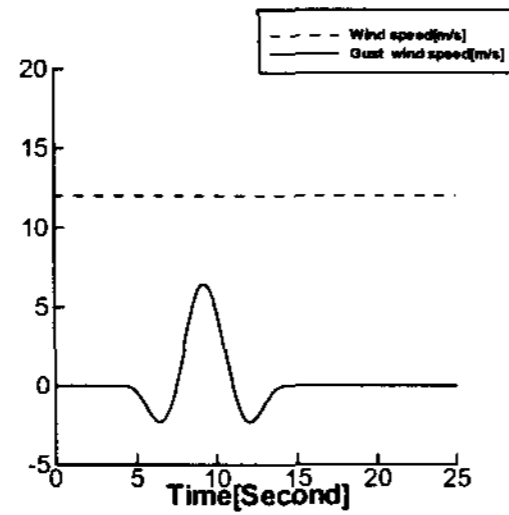


Fig. 2 EOG₀₁ wind profile

Fig. 2는 EOG₀₁에 해당하는 경우로 1년 동안 1회 발생할 확률을 가진 이 바람 조건은 약 10초 동안에 걸쳐 돌풍이 -3 ~ 6.5m/s의 바람이 시간에 따라 변화하는 조건을 말한다.

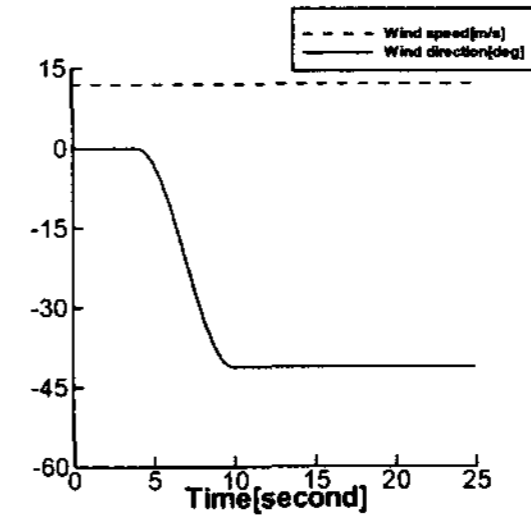


Fig. 3 EDC₀₁ wind profile

Fig. 3은 EDC₀₁에 해당하는 것으로 1년 동안 1회 발생 할 수 있는 확률을 기계적 입력 풍속의 변화 없이 일정하게 불어들어 오고 있는 조건에서 풍향의 변화가 6초 동안에 생기는 바람 조건을 나타낸다.

바람조건은 이 이외에 3가지 종류가 더 있으며 이 바람조건에 의해 다양한 하중해석을 하여 최대와 최소의 하중을 계산할 수 있다.

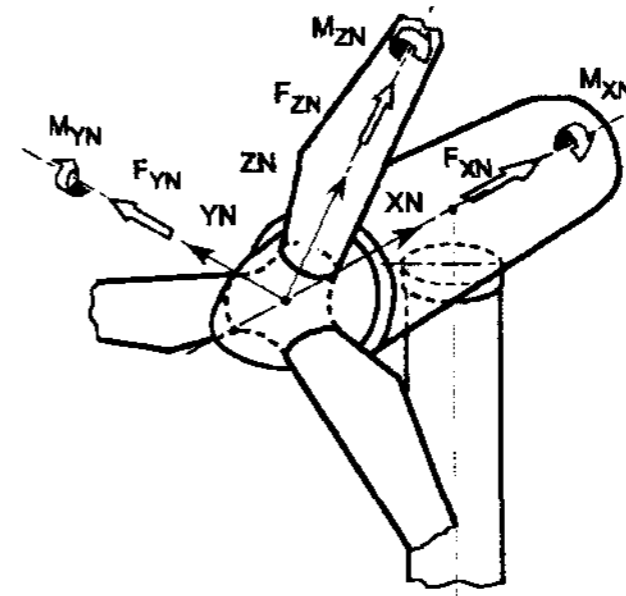


Fig. 4 Coordinate system

이 때 Fig. 4는 풍력 터빈을 간단히 도시한 것으로 하중과 굽힘 모멘트의 방향을 나타낸 것이다. 흐름 방향이 x축이고 블레이드 스펠 방향이 z축이 되도록 설정한다.

4.2 허브측 하중

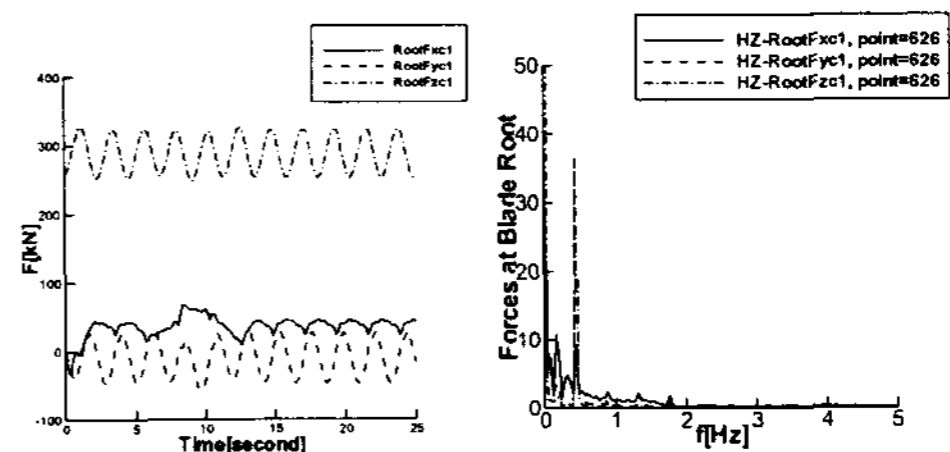


Fig. 5 EOG₀₁에 따른 허브측 하중

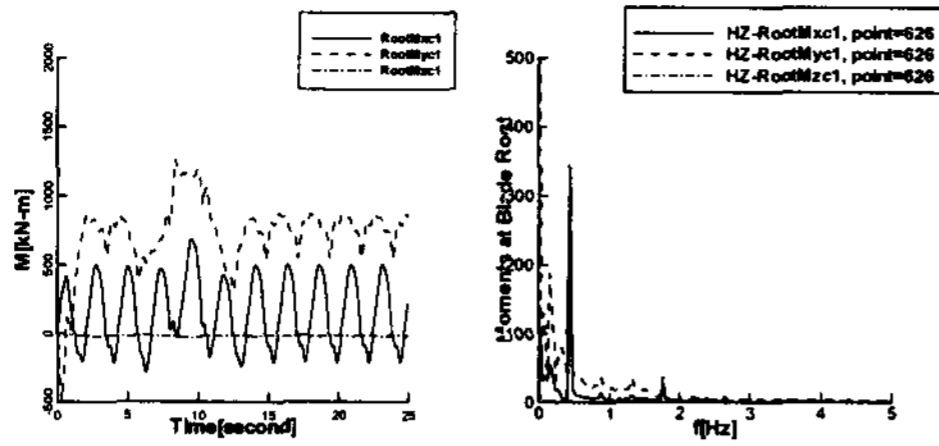


Fig. 6 EOG₀₁에 따른 허브측 모멘트

Fig. 5 - Fig. 6은 EOG₀₁ 바람조건에서 블레이드 허브에서 발생하는 힘과 모멘트를 보여주고 있다. 힘의 경우 최대 327.9kN, 모멘트의 경우 최대 1351kN-m이 작용한다. 이 때, 시간에 따른 하중은 주기성을 띠는데 이는 블레이드의 회전 때문에 생기는 원심력과 자중에 의한 것으로 0.44Hz로 블레이드 회전주기와 동일함을 알 수 있다.

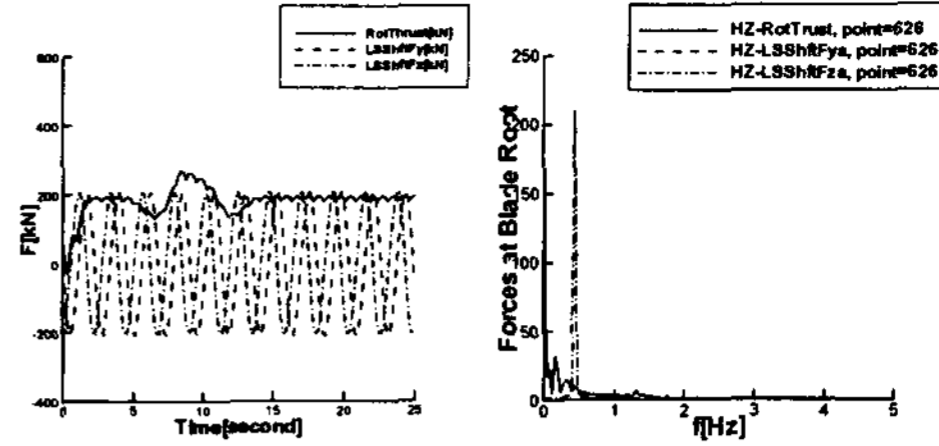


Fig. 9 EOG₀₁에 따른 LSS 하중

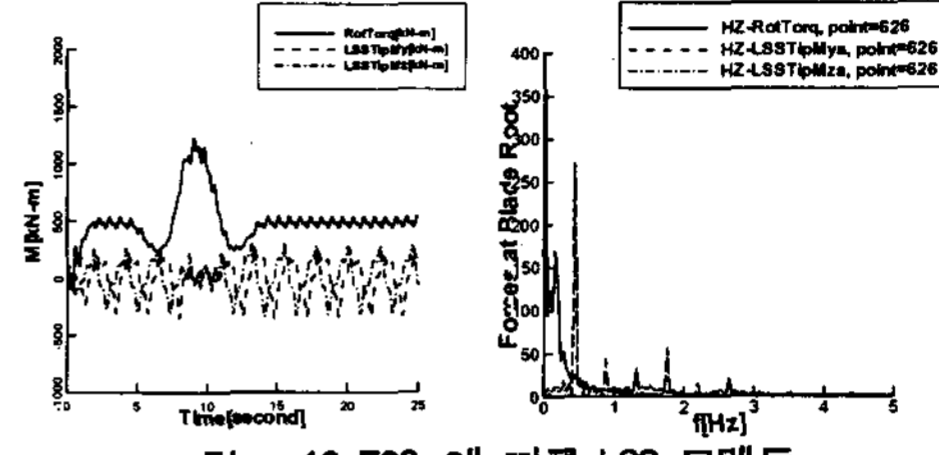


Fig. 10 EOG₀₁에 따른 LSS 모멘트

LSS에서 발생하는 하중과 모멘트는 Fig. 9 - Fig.10에 나타나 있다. 이때, 발생하는 최대 하중은 269kN이고 최대 모멘트는 1237kN-m이다. 이때, 추력과 토크의 주기는 1.32Hz로 허브측에서의 주기와 약 3배의 차이가 난다는 것을 알 수 있다.

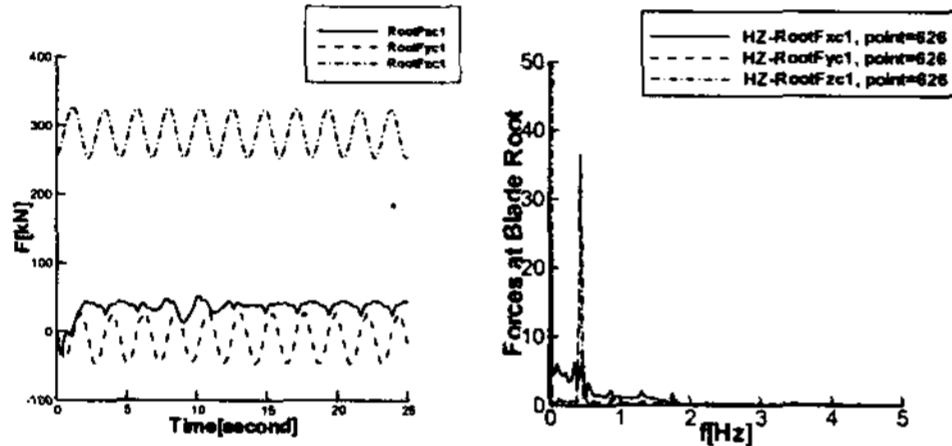


Fig. 7 EDC₀₁에 따른 허브측 하중

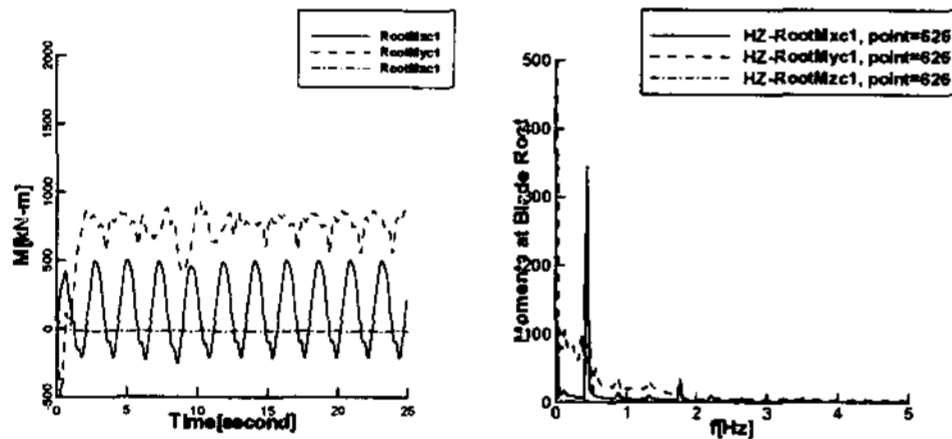


Fig. 8 EDC₀₁에 따른 허브측 모멘트

바람조건 EDC₀₁인 경우도 EOG₀₁의 결과와 유사하지만, 이때, 최대 하중은 328kN, 최대 굽힘 모멘트는 921.9kN-m가 된다.

4.3 LSS측 하중

LSS는 허브에 연결되어있는 블레이드 3개의 합력이 작용하게 되며 상대적으로 저속으로 운용되기 때문에 토크가 크게 작용되어 고속의 경우보다 응력 집중이 더 크게 되어 구조 해석에 주의를 요한다. 그래서 LSS에 작용하는 하중에 대한 해석이 매우 중요하다고 할 수 있다.

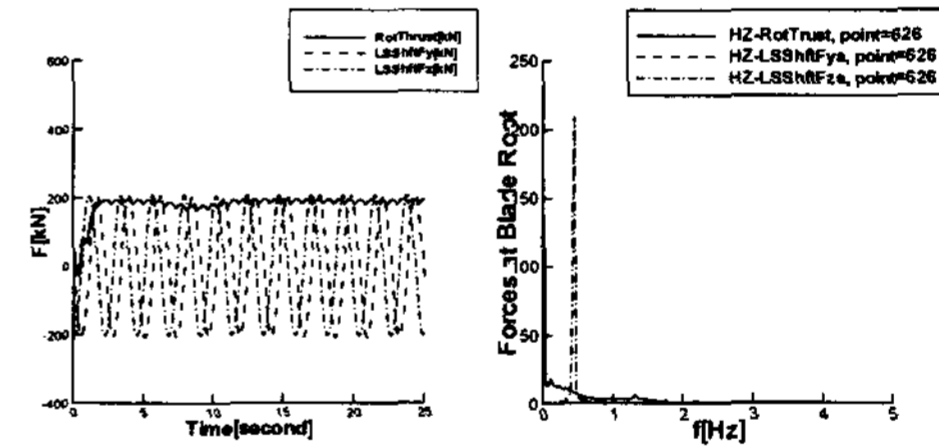


Fig. 11 EDC₀₁에 따른 LSS 하중

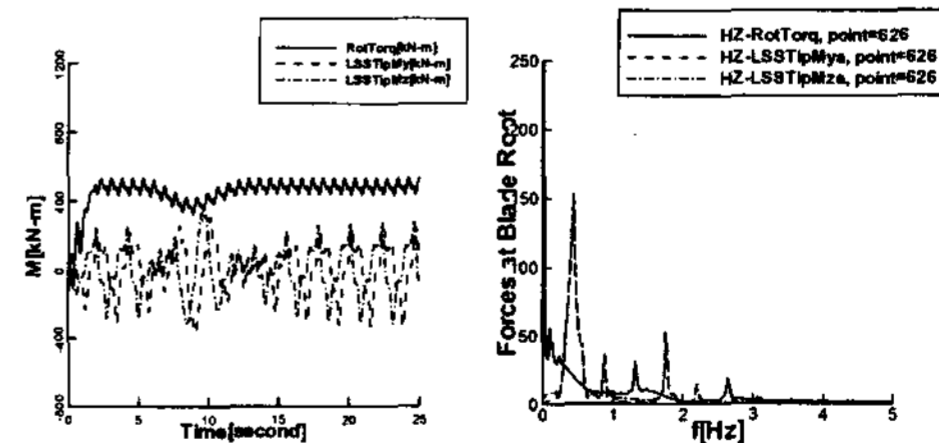


Fig. 12 EDC₀₁에 따른 LSS 모멘트

바람조건 EDC₀₁에서의 최대 하중은 209.5kN이고 최대 모멘트는 622.5kN-m이며 위와 마찬가지로 1.32Hz의 주기를 가지고 있다. 이렇게 주기에 차이가 나는 이유는 3개의 블레이드를 사용하고 있어 타워 그림자 효과가 1회전에 3회 발생하기 때문이다. 또 LSS에서는 좌표계가 회전하고 있으므로

로, y, z축 방향의 하중은 크기가 같고 90°의 위상차를 갖는 결과를 보이고 있다.

Table 1 바람 조건과 Table 2 하중조건에 대한 결과로부터 최대 최소 하중을 정리하면 Table 4와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 4. Calculated loads for DLC

		MAX	MIN
Hub	Fx	176.3kN[EWM ₅₀]	-34.7kN[EDC ₅₀]
	Fy	32.26kN[EOG ₀₁]	-82.92kN[EWM ₅₀]
	Fz	328.6kN[EWM ₀₁]	233kN[EWM ₅₀]
	Mx	980.2kN-m[EWM ₀₁]	-292.2kN-m[EWS _H]
	My	2335kN-m[EWM ₅₀]	-496.1kN-m[EDC ₅₀]
	Mz	0.459kN-m[EWM ₅₀]	-97.95kN-m[EWM ₅₀]
LSS	Thrust	575.5kN[EWM ₅₀]	-29.31kN[EOG ₅₀]
	Fy	237.2kN[ECD]	-225.6kN[ECG]
	Fz	230N[ECD]	-224.1N[ECD]
	Torque	2110kN-m[EWM ₅₀]	-103.6kN-m[EOG ₅₀]
	My	1046kN-m[ECD]	-1092kN-m[EWS _v]
	Mz	1097kN-m[ECD]	-1084kN-m[EWS _v]

5. 결론

본 연구에서는 IEC 61400-1의 바람조건과 하중조건에 의거하여 1MW급 수평축 풍력 터빈에 대해 허브축과 저속 동력 전달 축(LSS)에 대한 6분력 하중을 FAST 코드를 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 추력과 토크를 제외한 나머지 하중들은 블레이드의 회전주기를 기본 주기로 진동한다.
2. 추력과 토크는 블레이드 회전주기에 블레이드 갯수의 곱에 해당하는 주기성을 보인다. 이는 타워 그림자 효과에 기인한 것이다.
3. 허브축에서 최대 극한 하중은 328.6kN이고 최대 굽힘 모멘트는 2,335kN-m의 결과를 보였고, LSS축에서의 최대 극한 하중은 575.5kN이고 최대 굽힘 모멘트는 2,110kN-m의 결과를 보였다.

References

- [1] M. Jonkman, M. L. Buhl Jr., "FAST User's Guide, National Renewable Energy Laboratory, NREL Technical Report NREL/EL-500-29798, 2004
- [2] R. E. Wilson, P. B. S. Lissaman, and S. N. Walker, "Aerodynamic Performance of Wind Turbines," Report No. NSF/RA-760228, NTIS, Chapters I-III, Oregon State Univ., 1976.
- [3] P. N. Earl, "Numerical Prediction of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads for the NREL Phase II Combined Experiment Rotor," Proceedings 2000 ASME Wind Energy Symposium, 38th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA Paper 0038, Reno, NV, 2000.
- [4] 이창수, "1MW급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 최적 외형 설계 및 공력하중 해석," 전북대학교, 석사 학위 논문, 2005