

# 1MW급 풍력 터빈 블레이드의 허브 및 드라이브 트레인 공력 하중 해석

조봉현,<sup>1)</sup> 이 창수,<sup>2)</sup> 최 성옥,<sup>3)</sup> 유기완<sup>4)</sup>

## Aerodynamic Load Analysis at Hub and Drive Train for 1MW HAWT Blade

Bong-Hyun Cho, Chang-Su Lee, Sung-Ok Choi, Ki-Wahn Ryu

**Key words :** Horizontal Axis Wind Turbine(수평축 풍력터빈) Aerodynamic Load(공력하중), FAST(Fatigue, Aerodynamics, Structure and Turbulence), Blade(블레이드), Wind Profile(바람형상)

**Abstract :** The aerodynamic loads at the blade hub and the drive shaft for 1MW horizontal axis wind turbine are calculated numerically. The geometric shape of the blade such as chord length and twist angle can be obtained from the aerodynamic optimization procedure. Various airfoil data, that is thick airfoils at hub side and thin airfoils at tip side, are distributed along the spanwise direction of the rotor blade. Under the wind data fulfilling design load cases based on the IEC61400-1, all of the shear forces, bending moments at the hub and the low speed shaft of the drive train are obtained by using the FAST code.

It shows that shear forces and bending moments have a periodic trend. These oscillating aerodynamic loads will lead to the fatigue problem at both of the hub and drive train. From the load analysis the maximum shear forces and bending moments are generated when wind turbine generator system operates in the case of the extreme speed wind condition.

### 1. 서론

풍력 발전 시스템에서 공기역학적인 하중해석은 구조물의 건전성 확보에 매우 중요한 정보를 제공하는 절차라 할 수 있다. 특히 블레이드의 하중 전체가 집중적으로 작용하는 허브와 동력전달축의 설계는 정하중 및 피로수명 평가를 위한 동하중 해석이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 1MW급 풍력 터빈용 블레이드를 다양한 두께비를 갖는 에어포일을 이용하여 코드 길이 및 비틀림 각 결정 등 최적 설계를 실시하였고, 이 블레이드에 대한 설계 하중 해석을 위하여 IEC61400-1 규격에 제시된 기준을 입력조건으

로 하여 구한자료를 구조 설계용 하중으로 창생할 수 있도록 하였다.

최적의 블레이드 형상은 최대의 동력 효율을 갖도록 블레이드 반경 방향에 대한 코드 길이 및 비틀림 각 그리고 블레이드 익근에서의 cut-off 길이 등을 결정함으로써 얻어질 수 있다. 특히 블레이드의 코드 분포는 블레이드의 공력 특성 중 테이퍼를 주는 효과와 동일하며, 이러한 테이퍼 효과는 삼차원 형상의 블레이드에 대한 유도항력을 감소시키는 효과가 있다.

블레이드와 동력 전달 장치의 구조 설계에 있어서 가장 중요한 사항은 블레이드에 작동하는 공력 하중에 의해서 발생하는 6분력 하중이라 할 수 있다. 여기에는 허브 측에 발생하는 힘과 굽힘 모멘트뿐만 아니라 동력전달장치 (drive train)에서 발생하는 토크 등이 포함된다.

하중 계산은 NREL에서 개발한 FAST code를 이용하였으며, 여기서 구한 시간 영역에서의 하중 이력을 주파수 분석을 통해 빈도와 크기로 나

1) 전북대학교 항공우주공학과 대학원

2) (주)Adcomtech, 연구원

3) 공군사관학교 항공우주공학과

4) 전북대학교 기계항공시스템공학과

E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr

TEL : 063) 270-4286 FAX : 063) 270-2472

누어 해석함으로써, 여러 조건에 대한 가장 극한 하중과 그 빈도를 피로 해석(fatigue analysis)에 적용할 수 있도록 하였다[1].

## 2. 풍력 터빈 블레이드 최적 설계

### 2.1 블레이드 익형의 분포

풍력터빈 블레이드는 허브 축으로는 두꺼우면서 공력특성이 우수하고 팁축으로 가면서 점점 얇아 지면서 양항비가 우수하며 낮은 항력을 갖는 에어포일을 분포시키는 것이 요구된다. 대부분의 항공기용 에어포일의 두께비는 21% 이하가 되며, 풍력터빈 블레이드를 위한 두꺼운 에어포일의 개발이 필요하게 된다. Fig. 1은 본 연구에서 형상화한 블레이드에 6개의 다른 두께비를 갖는 18~40% 두께비의 에어포일을 사용하였으며, 블레이드 안쪽은 Delf 공과대학에서 개발한 DU-에어포일을 분포시켰고, 블레이드 바깥쪽에는 NACA63(4)-421 과 NACA63(3)-418 에어포일을 분포시켰다[1]. Fig. 1와 같이 에어포일을 분포시킨 후 각 위치에 분포된 에어포일의 두께비를 스펀 방향으로 나타내어보면 Fig. 2와 같다.

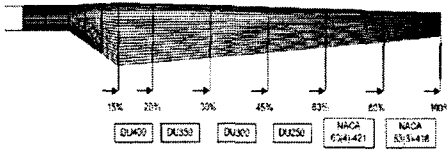


Fig. 1 Airfoils along the spanwise direction

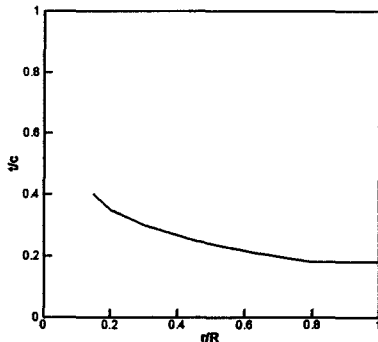


Fig. 2 Thickness distribution

### 2.2 블레이드 직경 결정

로터의 직경은 요구하는 동력 및 설계 풍속과 동력 계수 등의 함수이다. 설계 풍속은 Weibull 분포를 통해 얻어지는 평균 풍속에 의해서 정해진

다. 따라서 평균 풍속이 작을수록 요구 동력을 얻기 위해서는 로터의 직경을 크게 해줘야 할 필요가 있다.

로터의 직경 결정 과정에서 선택하는 동력 계수는 Betz의 한계를 넘을 수 없고 손실을 고려하여 0.3~0.5 사이의 값을 선택하는 것이 적절하다. 발전 시스템의 효율  $\eta$ 를 고려하면 실제 전력 생산 동력은

$$P_{rated} = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta U_{rated}^3 \quad (1)$$

따라서 로터 직경은 다음과 같이 된다.

$$D = \sqrt{\frac{8P_{rated}}{\pi \rho C_p \eta U_{rated}^3}} \quad (2)$$

여기서,  $P_{rated}$  : 정격 동력  
 $U_{rated}$  : 정격 풍속

표준 대기 중 밀도의 변화는 높이 6km 이하에서는 식(3)과 같다.

$$\rho = \rho_0 e^{(-0.297h/3048)} \quad (3)$$

$h$  : 해발 고도 [m]  
 $\rho_0$  : 1.22496 kg/m<sup>3</sup>

본 연구에서 설계  $C_p$ 는 0.4 값을 선정하였으며, 풍력 터빈의 동력 전달장치와 발전기를 포함한 전체적인 시스템 효율은 80%로 한다.

### 2.3 블레이드 최적 형상 결정 과정

공력설계시에는 날개 끝 손실 효과를 고려하여 풍력 터빈 블레이드 길이, 코드 길이 및 비틀림 각을 구하였다. 코드 길이는 아래 식으로 부터 구할 수 있다.

$$c_l bc = \frac{8\pi r a \cos \varepsilon \sin^2 \phi}{(1-a) \cos(\phi - \varepsilon)} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left( \frac{c_l}{c_d} \right)$$

항력 효과가 코드 길이에 미치는 영향은 아래와 같다.

$$c_l bc = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{a}}} \quad (5)$$

위 식(5)에서 항력 효과를 무시한 블레이드가 허브에 가까우면 가까울수록 더 커다란 코드 길이를 요구하게 된다.  $c_l, c_d$ 의 결정은 블레이드의 비틀림각과 유입각도  $\phi$ 에 의해서 결정되는 유효 받음각을 기준으로 에어포일 실험치에 의해서 결정된다[2].

## 2.4 블레이드 최적 형상

날개 끝 속도비가 작은 경우 블레이드의 안쪽 부분의 에어포일은 실속 영역에서 주로 운영이 된다. 따라서 실속 영역에 대한 에어포일의 공력 데이터는 풍력 터빈의 공력 성능을 예측하는데 있어서 반드시 필요하다. 그러나 실제로 항공공학 관점에서는 에어포일의 실속 이후의 공력 데이터는 제공되지 않는 것이 상례이다. 본 연구에서는 에어포일의 실속 이후의 공력 데이터를 획득하기 위하여 Viterna와 Corrigan이 제안한 방법으로 실속 영역에 대한 에어포일의 공력 데이터를 획득하였다[3].

본 연구에서 최적 설계된 1MW급 풍력 터빈 로터 지름은 60.6m인 3개의 블레이드로 이루어지며, 상용화된 1MW급 풍력 터빈 로터 지름과 비교해보면 큰 차이가 존재하지 않는다. 최적 코드 길이와 선형화 시킨 코드 길이의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 실제 비선형 코드 길이 분포의 블레이드는 제작에 어려움이 존재한다. 그래서 본 연구에서는 블레이드 제작의 용이함을 위해 블레이드의 스펠 방향으로 60~90%에 존재하는 코드 길이와 기술기의 평균값을 이용하여 선형화를 실시하였다.

Fig. 4는 블레이드 스펠 방향으로 비틀림 각의 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보이듯이 비틀림 각은 블레이드 안쪽에서 가장 큰 값을 갖으며 블레이드 바깥쪽으로 갈수록 감소하고 블레이드 팁에서는 비틀림 각의 크기가 음의 값을 보인다.

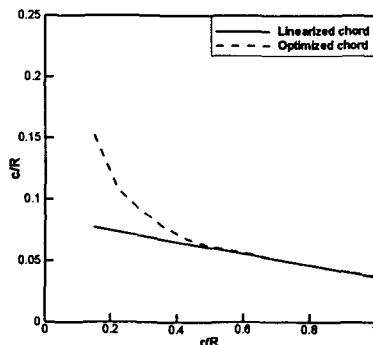


Fig. 3 Distribution of optimal and linearized chord

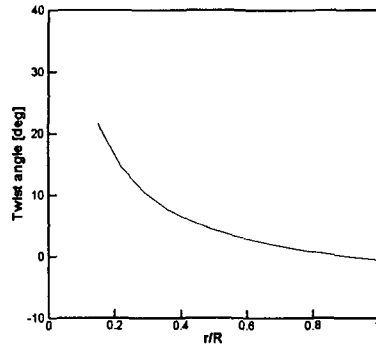


Fig. 4 Distribution of twist angle

## 3. 하중 해석 결과 및 토의

풍력터빈의 하중계산은 대략 20년의 수명기간 동안 풍력발전의 구조적 건전성 및 신뢰성을 확보하기 위한 매우중요한 절차이다. 풍력터빈의 바람조건 IEC61400-1 규격에서 Table 1과 같이 정하고 있다. 본 연구에서는 class III<sub>A</sub>를 선택하였다.

Table 1. Basic parameters for WTGS classes

WTGS class	I	II	III	IV	S	
$V_{rot}$ [m/s]	50	42.5	37.5	30	Values to be specified by the designer	
$V_{ave}$ [m/s]	10	8.5	7.5	6		
A	$I_{15}$ [-]	0.18	0.18	0.18		0.18
	a [-]	2	2	2		2
B	$I_{15}$ [-]	0.16	0.16	0.16		0.16
	a [-]	3	3	3		3

### 3.1 IEC61400-1 규격

IEC61400-1 규격에서는 여러 가지 특성을 갖는 바람 조건을 규정하고 있다. 정상조건과 극한 조건이 있으며, 바람은 일정 시간동안 돌풍이 발생하고, 풍향이 변화하는 등, 바람의 특성이 바뀌는 경우에 풍력터빈 발전 시스템에 작용하는 극한 하중을 예측할 수 있게 한다. 이 하중은 풍력터빈 수명기간 중 구조적 건전성을 갖도록 허브와 드라이브 트레인축의 하중해석 자료로 활용하게된다. 본 연구에서는 크게 10가지 바람 조건에서  $EWM_{01}$ ,  $EOG_{01}$ ,  $EDC_{01}$ 에 대해 중점적으로 하중해석 결과를 보여주고 나머지에 대해서는 표로 종합하여 보이도록 한다.

### 3.2 시간에 따른 바람현상

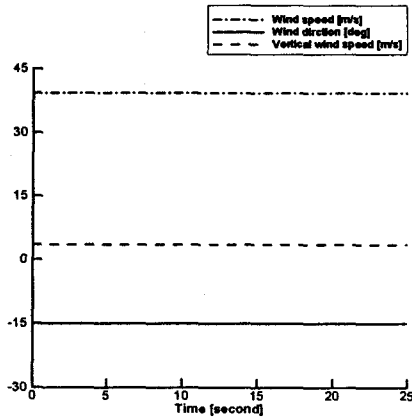


Fig. 5 EWM<sub>01</sub> wind profile

Fig. 5는 EWM<sub>01</sub>의 바람현상을 나타낸 것이다. 풍력 발전기를 1년 동안 운전하면서 극한 바람 조건에서 발생하는 하중을 예측한 것이다. 최대입력 풍속은 39.38m/s이며, 풍향은 -15°이다.

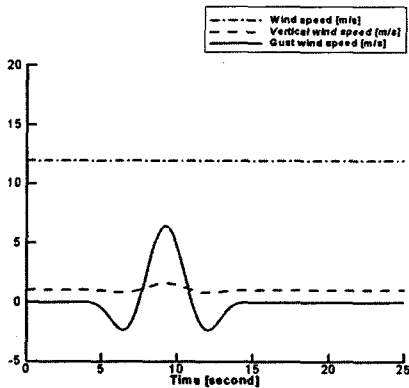


Fig. 6 EOG<sub>01</sub> wind profile

Fig. 6은 1년 동안 1회 발생할 확률을 갖는 EOG<sub>01</sub> 바람조건을 보여주며, 풍력 터빈에 지속적으로 바람이 불어 들어 오고 있는 상태에서 일정 시간동안 돌풍이 발생하여 풍력 터빈에 영향을 주는 경우에 해당된다. 약 10초 동안에 걸쳐 돌풍이 -3~6.5m/s 바

람 변화가 발생하며 풍력 터빈에 입력되는 최대 풍속은 실제 18.3m/s가 된다.

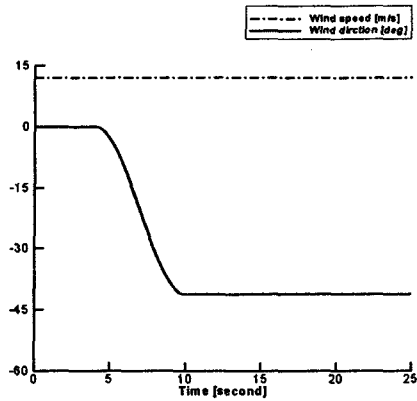


Fig. 7 EDC<sub>01</sub> wind profile

Fig. 7은 입력 풍속(EDC<sub>01</sub>)의 변화 없이 일정하게 불어 들어 오고 있는 조건에서 풍향이 -42.1°의 변화가 생기는 바람조건에 해당하는 경우이다.

### 3.3 하중해석 결과 및 토의

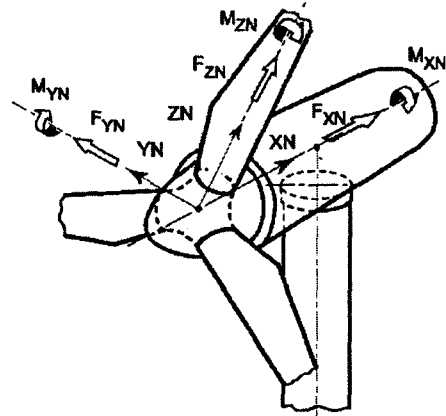


Fig. 8 Coordinate system

Fig. 8은 풍력터빈 블레이드와 드라이브 트레인 축에 작용하는 6분력 하중들을 도시한 것이다. x축은 수평축 방향으로서 downwind 방향이 양의 방향이며, z축은 피치축을 나타내고, y축은 x 축과 z축에 수직인 오른손 법칙을 따른다.

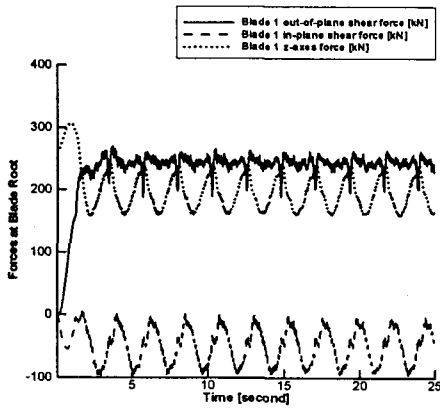


Fig. 9 Forces at blade root (EWM<sub>01</sub> wind condition)

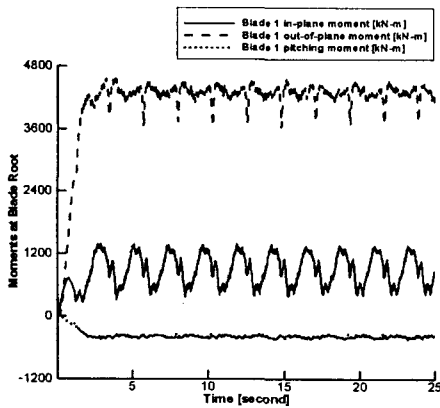


Fig. 10 Moments at blade root (EWM<sub>01</sub> wind condition)

Fig.9~Fig.10은 EWM<sub>01</sub> 바람조건에서 25초간 풍력발전 시스템을 운영하였을 때, 블레이드 허브에서 발생하는 전단력과 굽힘 모멘트를 보여주고 있다. Out-of-plane 전단력은 x축 방향이고, in-plane 전단력은 y축 방향을 나타낸다. 여기서 x축 방향 전단력은 주기성을 보이는데 이는 타워 그림자 효과로 인하여 발생하며, 그 주기는 블레이드 회전 속도와 일치하고, 전단력의 감소의 크기는 발생하는 전단력 크기의 약 25%정도이다. y축과 z축 방향의 전단력 또한 주기성을 가지고 있는데 이것 역시 주기는 블레이드 회전 속도와 일치함을 알 수 있다.

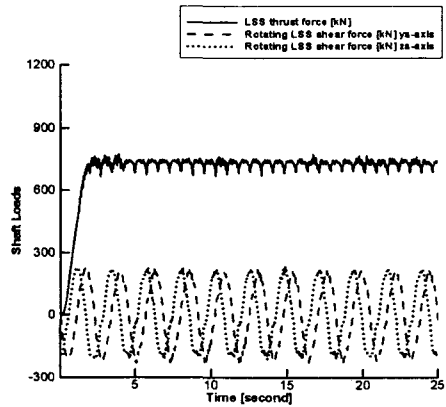


Fig. 11 Forces at LSS(Low Speed Shaft) (EWM<sub>01</sub> wind condition)

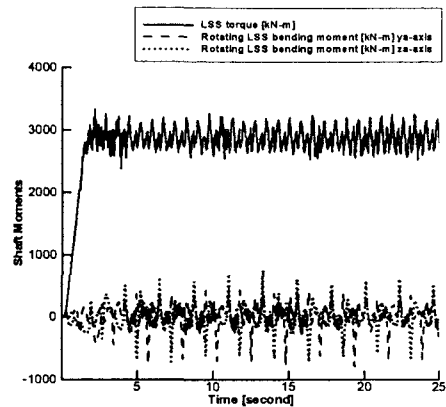


Fig. 12 Moments at LSS (EWM<sub>01</sub> wind condition)

Fig.11~Fig.12는 EWM<sub>01</sub> 바람조건일때 LSS에서 발생하는 전단력과 모멘트로 여기서 추력과 토크는 블레이드에서 발생하는 추력과 토크의 크기와 동일하다. 추력과 토크의 주기는 3-blade이므로 블레이드 주기의 1/3이다. 이는 3개의 블레이드가 타워 그림자 효과를 받는데서 기인한다고 볼 수 있다. 그러나 샤프트에서 전단력과 굽힘 모멘트는 방향이 바뀌어서 양과 음의 값이 반복적으로 나타나며, 주기는 블레이드의 회전 속도와 동일함을 알 수 있다. 특히 y, z 방향의 전단력은 90°의 위상차를 갖는 동일한 amplitude의 결과를 보이고 있다.

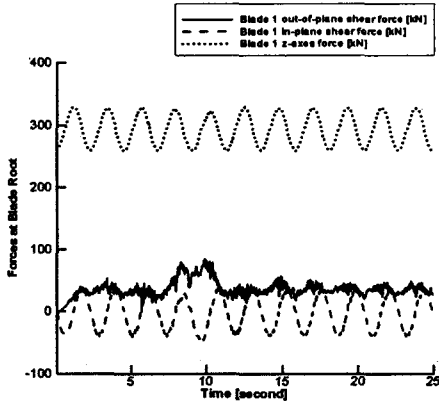


Fig. 13 Forces at blade root (EOG<sub>01</sub> wind condition)

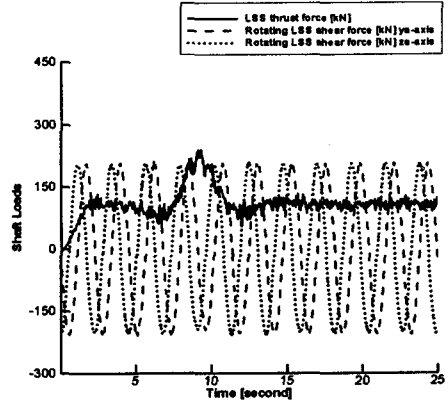


Fig. 15 Forces at LSS (EOG<sub>01</sub> wind condition)

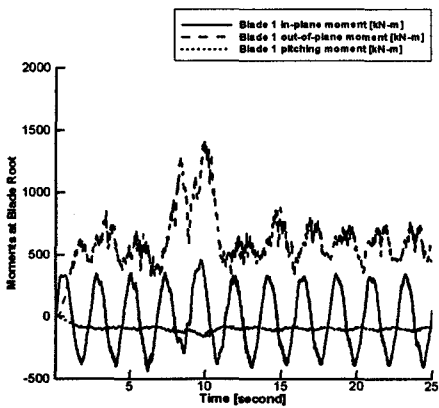


Fig. 14 Moments at blade root (EOG<sub>01</sub> wind condition)

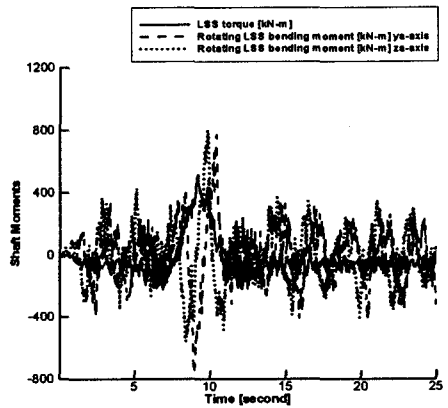


Fig. 16 Moments at LSS (EOG<sub>01</sub> wind condition)

Fig.13~Fig.14는 EOG<sub>01</sub> 바람 조건에서 블레이드 허브에서 발생하는 전단력과 굽힘 모멘트를 보여주고 있다. x축 방향의 전단력은 특별한 주기성을 띠고 있지 않으며 입력 바람 조건의 모양인 돌풍 발생 형태와 비슷한 그래프의 모양을 보이고 있다. y, z 축의 전단력은 풍향의 변화에 크게 영향을 받지 않고 있다. 이는 풍향의 변화는 수평 축 방향의 전단력에 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다.

Fig.15~Fig.16은 EOG<sub>01</sub> 바람 조건일때 LSS에서 발생하는 전단력과 모멘트의 변화를 그래프로 그린 것으로 out-of-plane 방향의 모멘트 역시 입력 바람 조건의 모양과 비슷하게 나타나고 있다. LSS에서 발생하는 토크는 풍속이 강해지면서 그 크기가 커지고 있으며, 이는 풍력 터빈의 발전량이 증가하고 있음을 보여주고 있는 것이다. 피칭 모멘트는 그 크기는 크지 않지만 지속적으로 작용함을 알 수 있다.

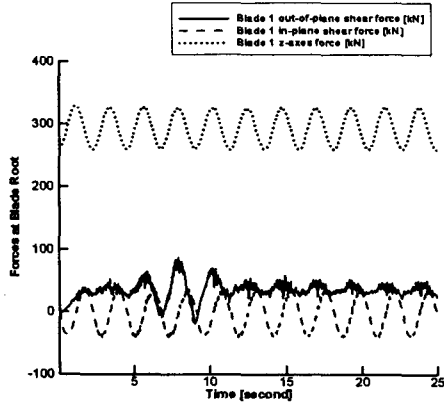


Fig. 17 Forces at blade root (EDC<sub>01</sub> wind condition)

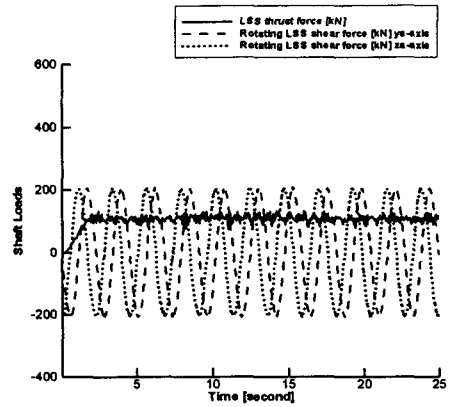


Fig. 19 Forces at LSS (EDC<sub>01</sub> wind condition)

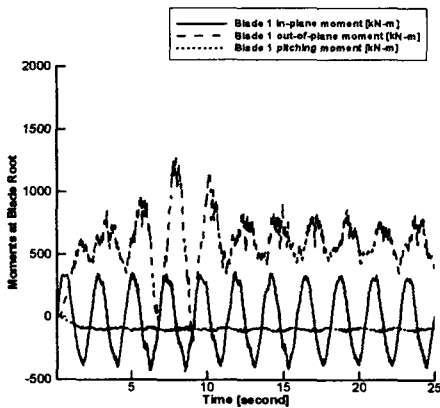


Fig. 18 Moments at blade root (EDC<sub>01</sub> wind condition)

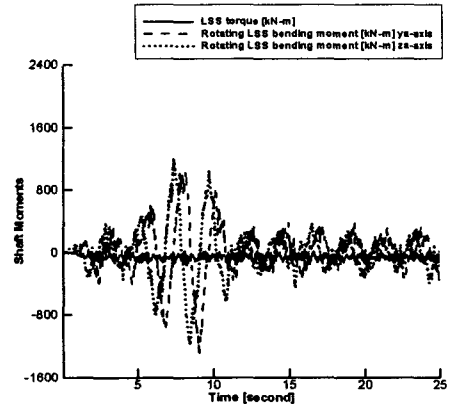


Fig. 20 Moments at LSS (EDC<sub>01</sub> wind condition)

Fig. 17~Fig. 18은 EDC<sub>01</sub> 바람조건에서 블레이드 허브에서 발생하는 전단력과 굽힘 모멘트의 변화를 시간에 따라 도시한 것이다. 우선 전단력의 변화를 살펴보면 풍향의 변화는 전단력의 크기 변화에 크게 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다. 하지만 굽힘 모멘트는 풍향이 변화하는 과정에서 그 크기가 커지지만 풍향의 변화가 이루어진 이후의 굽힘 모멘트는 다시 일정치를 보이고 있다. 이는 풍향의 변화에 따라 나셀의 요각이 변화하면서 입력 풍속 방향과 수평축의 방향이 일치해가기 때문임을 알 수 있다.

Fig. 19~Fig. 20은 EDC<sub>01</sub> 바람조건일 때 LSS에서 발생하는 전단력 및 굽힘 모멘트를 나타내고 있다. 추력과 토크는 거의 일정한 주기적 결과를 보이며, 입력 풍속의 방향변화가 발생하는 시간영역 동안에 y와 z 방향으로의 모멘트는 변동함을 나타내고 있다.

Table 2. Extreme load data for IEC61400-1 wind condition

(Force unit : kN, Moment unit : kN·m, T : thrust, Q : torque)

	Average value					Amplitude					Period(Hz)				
	$F_z$	$M_y$	$M_z$	T	Q	$F_z$	$M_y$	$M_z$	T	Q	$F_z$	$M_y$	$M_z$	T	Q
EWM <sub>01</sub>	195.4	4293.3	-389.2	729.9	2875.7	37.1	209.7	13.0	29.7	127.7	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EWM <sub>50</sub>	128.4	5783.2	-455.1	1006.0	1117.2	32.6	351.7	89.3	41.1	90.2	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EOG <sub>01</sub>	292.1	634.4	-97.8	113.1	-31.7	33.50	130.45	8.02	4.68	12.58	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EOG <sub>50</sub>	291.6	672.1	-100.7	119.2	7.4	33.2	144.5	9.3	5.5	17.2	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EDC <sub>01</sub>	292.5	608.3	-95.6	107.7	-63.0	33.5	217.6	7.2	4.4	10.3	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EDC <sub>50</sub>	292.6	601.1	-95.2	107.3	-64.1	33.4	241.6	6.7	4.7	202.0	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
ECG	271.1	2045.6	-196.3	354.1	1420.5	275.2	1790.2	15.1	14.4	71.0	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
ECD	271.3	2037.5	-195.9	352.6	1410.3	28.0	342.3	13.9	13.3	65.8	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EWS <sub>H</sub>	292.4	595.0	-95.0	107.3	-61.5	33.7	128.8	8.1	4.4	11.2	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32
EWS <sub>V</sub>	292.4	605.8	-95.5	109.0	-58.7	34.1	59.5	5.6	4.5	12.0	0.44	0.44	0.44	1.32	1.32

4. 결론

본 연구에서는 최적형상을 갖는 1MW급 수평축 풍력터빈 블레이드에 대해서 IEC61400-1의 바람조건에 따른 블레이드 허브 축과 드라이브 트레인에 작용하는 6분력 하중을 수치해석을 통하여 예측하였다. 본 예측결과를 통해 허브 및 드라이브 트레인 축의 정적 및 피로 하중 해석을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 보며, 이를 위해 주기적인 변동하중을 갖는 시간해석 결과를 주파수 분석하여 변동하중의 amplitude와 주기를 분석하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 시간에 따른 하중은 주기성을 띠는데 이는 블레이드의 회전 때문에 생기는 원심력과 자중에 의한 것이며, 블레이드 허브에서 발생하는 전단력의 주기는 블레이드의 회전 속도와 동일하게 나타남을 알 수 있다.
- (2) LSS에서의 x축 하중은 블레이드 허브에서 발생하는 하중의 주기보다 3배 크게 나타나는데 이는 3개의 블레이드를 사용하고 있어 타워 그림자 효과가 1회전에 3회 발생하기 때문이다.
- (3) LSS에서는 좌표계가 회전하고 있으므로 y, z

축 방향의 전단력은 크기는 같고 90°의 위상차를 갖는 주기적인 하중변동 결과를 보인다.

References

- [1] 이창수, "1MW급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 최적 외형 설계 및 공력하중해석," 전북대학교, 석사 학위 논문, 2005.
- [2] I.H. Abbott and A. von Doenhoff, "Theory of wing section," Dover publication, 1958.
- [3] L.A. Viterna and R.D. Corrigan, "Fixed Pitch Rotor and Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines," Proceedings Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, NASA, P-2203, DOE Publication, CONF-810752, Cleveland, OH: NASA Lewis Research Center, pp. 69-85, 1981.
- [4] IEC61400-1 - Wind Turbine Generator systems, IEC, 1999.