

풍력발전시스템의 블레이드에 작용하는 극한하중에 대한 난류의 영향 연구

현승건*, 김건훈**

*한국에너지기술연구원(sghyun82@kier.re.kr),
**한국에너지기술연구원(kkh4417@kier.re.kr)

A Study on the Effects of Turbulence to Ultimate Loads Acting on the Blade of Wind Turbine

Hyun, Seung-Gun* Kim, Keon-Hoon**

*Korea Institute of Energy Research(sghyun82@kier.re.kr),
**Korea Institute of Energy Research(kkh4417@kier.re.kr)

Abstract

This study has analysed the ultimate loads acting on a wind turbine which is operating in a high turbulent flow condition because the ultimate loads are critical factors on the safe design of wind turbine. Since wind flow on the most parts of Korean mountainous are strongly influenced by complex configurations of the topography, turbulence intensity on somewhere is so stronger than an international design standard. For this reason, the characteristics of turbulent wind data collected from actual sites were analyzed and used for the ultimate load evaluation of the wind turbine. With the 270 design load cases on the international standards, the differences of ultimate loads on the wind turbine operating in the standard or high turbulent wind condition are calculated and compared for the an enhanced knowledge of the safe design basis. As a result, it is revealed the specific ultimate loads are strongly affected by the high turbulent wind conditions, thus the characteristics of turbulent flow must be considered during the design of wind turbine.

Keywords : Wind Turbine(풍력발전시스템), Wind conditions(풍황), Turbulence Intensity(난류강도), Ultimate Load(극한하중), DLC(Design Load Case : 설계하중조건)

기 호 설 명

M : moments for each direction x,y,z
F : forces for each direction x,y,z
TI : Turbulence intensity

Submit date : 2012. 9. 4, Judgment date : 2012. 9. 16, Publication decide date : 2013. 2. 10
Communication author : Kim, Keon-Hoon(kkh4417@kier.re.kr)

- V_{hub} : Wind speed of hub height
- V_{in} : Cut in wind speed
- V_r : Rated wind speed
- V_{out} : Cut out wind speed
- V_{ref} : Reference wind speed
- $V_{r\pm 2m/s}$: Sensitivity to all wind speeds in the range shall be analysed
- DLC : Design load case
- ECD : Extreme coherent gust with direction change
- EDC : Extreme direction change
- EOG : Extreme operating gust
- EWM : Extreme wind speed model
- EWS : Extreme wind shear
- NTM : Normal turbulence model
- ETM : Extreme turbulence model
- NWP : Normal wind profile model

1. 서 론

풍력발전시스템의 보급증가 및 국산 풍력발전시스템 개발 목표 용량의 증가에도 불구하고, 아직 국내에서는 풍력발전시스템에 대한 독자적인 설계나 해석에 관한 기술이나 경험이 매우 부족한 상태로서, 세부적인 설계 및 해석 조건 등과 같은 것에 대해 접근이 매우 어려운 상황이다.

기존의 연구는 현장에서의 실험을 통한 부분적인 연구가 진행되었으나 이러한 실험도 하중의 동적 변화를 반영하지 못하고 평균적인 개념에서의 풍속 대비 하중의 변화를 측정하는 정도에 불과하다¹⁾. 이는 실험적인 방법의 필연적인 한계로서, 동적인 하중의 변화나 극한하중의 크기와 방향을 세밀하게 분석할 수 있는 해석적인 방법이 필요한 이유가 된다.

따라서, 해석적인 방법으로서 운전 하중의 해석 및 설계에 대한 기술적 경험의 축적이 매우 필요한 상황이며, 아울러 우리나라의 풍

속특성²⁾에 대한 풍력발전시스템의 극한하중 변화에 대한 많은 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있으며, 독일 풍력 인증기관에 의해 인정된 풍력시스템의 설계 및 해석 분야의 해석tool(BLADED)을 이용하여 실제 측정된 풍속자료에 따른 난류 강도별 극한하중 특성을 분석 비교하였다. 우리나라에서 많은 풍력자원을 가지고 있는 지역은 대부분이 복잡한 지형을 갖는 산악지형으로서 난류강도의 크기가 IEC 규격^{3), 4)} 보다 높은 지역이 많다. 다음의 Table 1과 같이 태백지역의 연 평균 풍속은 6.8m/s, 풍력에너지 밀도는 434 W/m²로서 제주도 한수 지역보다 우수한 풍력자원을 갖고 있지만 제주도 한수지역에서의 난류강도는 풍속 15m/s에서 평균 난류강도인 TI mean은 11.9%정도로 IEC 난류특성 C 카테고리인 지역이고 강원도 태백지역의 난류강도는 풍속 15m/s에서 평균 난류강도인 TI mean은 17.2%로 IEC 난류특성 A를 상회하여 특별한 설계가 요구되는 S 등급인 지역이다.

이와 같이 우리나라는 산악지역이 많은 복잡지형으로서 지역에 따라 난류강도의 크기는 각각 다르므로 우리나라의 실제 사이트에서 측정된 난류특성에 따라 풍력발전시스템에 작용하는 극한하중의 분석이 매우 필요한 상황이다.

Table. 1 Measured wind data of the each site

		Teabak	Hansu
Location (WGS 84 UTMZone: 52)	Latitude	4,132,476	3,701,664
	Longitude	500,909	245,199
Yearly Average Wind Speed at 60m[m/s]		6.8	6.3
Wind Power Density at 60m [W/m ²]		434	313
Turbulence Intensity Mean Value[%]		17.2	11.9

2. 적용 풍력발전시스템의 사양

풍력발전시스템에서 가장 중요한 요소 중의 하나인 회전자 블레이드는 38.75P 모델(덴마크 LM Glassfiber)이 적용된, 블레이드 직경 80m이고 허브 높이가 61.5m인 2MW급 풍력발전시스템에 대해 하중해석을 수행하였다. 다음의 Table 2에서는 적용된 풍력발전시스템의 사양을 보이고 있다. 그리고 Fig. 1에서는 하중해석에 적용된 풍력발전시스템의 BLADED 입력창의 일부분을 보이고 있다. 하중해석을 위해서는 풍력발전시스템 블레이드, 익형, 로터, 지지철탑, 구동계, 낫셀 및 제어기의 특성치에 대한 정확한 자료가 적용되어야 한다.

Table 2 General characteristics of rotor and turbine

Rated Power	2MW
Rotor diameter	80m
Hub height	61.5m
Total rotor Mass	33640.2kg
Total rotor inertia	6.029E+06kgm ²
Tower height	60m
Tilt angle of rotor to horizontal	4deg
Maximum generator torque	14400Nm
Gearbox ratio	83.33
Generator inertia	60kgm ²
Rotor overhang	3.7m
Rotational sense of rotor, viewed from upwind	Clockwise
Position of rotor relative to tower	Upwind
Aerodynamic control surfaces	Pitch
Fixed / Variable speed	Variable
Diameter of spinner	2.5m
Radial position of 뿌리 station	1.25m
Extension piece diameter	1.9m
Extension piece drag coefficient	0.8
Cut in windspeed	4m/s
Cut out windspeed	25m/s

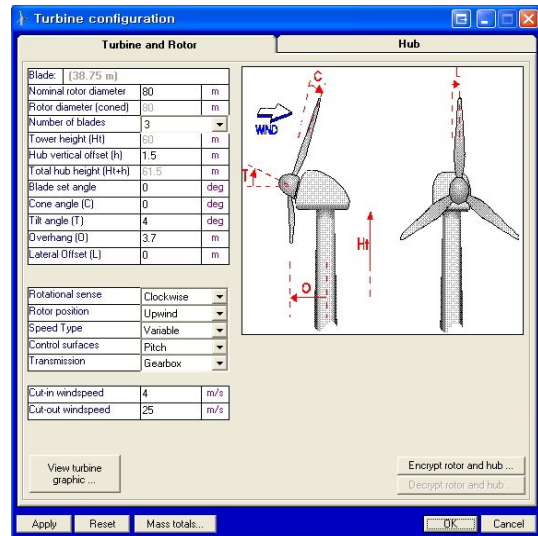


Fig. 1 Turbine configuration for BLADED

3. 풍력발전시스템 설계 하중 조건(DLC)

풍력발전시스템 설계를 위해 풍력발전시스템의 수명기간 중에 노출될 수 있는 가장 심각한 상황을 포함하는 일련의 상태를 설계 하중 조건이라 하며, 하중 조건은 특정 부품의 조합, 조립, 정비 및 운전모드 또는 외부조건 등에 좌우 될 수 있고, 제어 및 보호시스템의 동작 및 이로 인해 발생할 수 있는 조건 등도 함께 고려해야 한다.

본 논문에서는 IEC 61400-1 3ed³⁾에서 규정하고 있는 외부조건을 적용하였고 Table 3에서 나타낸 최소한의 설계 하중조건을 기반으로 풍력발전시스템의 극한 하중 해석을 위해 새롭게 설계한 270가지의 극한 하중 설계 조건을 각각의 난류강도에 대해 극한하중을 해석하였다. 극한 하중 계산 지점은 풍력발전시스템의 블레이드에 가장 큰 하중이 작용하는 지점으로 선정하여 다음의 Table 4와 같이 허브 중심에서 1.25m 떨어진 블레이드와 허브가 연결되는 지점에서의 극한하중과 블레이드의 변위가 가장 큰 블레이드 끝단에서의 변위로서 정하였다.

Table 3 Analysis conditions for design load cases (DLC)

Design situation	DLC	Wind condition	Other conditions	DLC parameters	Number of cases
1. Power Production	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	For extrapolation of extreme events	Wind Speed Yaw error	36
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		Wind Speed Yaw error	36
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2m/s, V_r, V_r + 2m/s$		Wind Speed Yaw error	9
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		Wind Speed Yaw error Shear direction	36
2. Power production plus occurrence of fault	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Control system fault or loss of electrical network	Wind Speed Yaw error Grid loss	6
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Protection system fault or preceding internal electrical fault	Wind Speed Yawing Pitch fault Yaw error	12
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}	External or internal electrical fault including loss of electrical network	Wind Speed Gust speed Grid loss Yaw error	27
3. Start up	3.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		Wind Speed Gust speed Yaw error	12
	3.3	EDC $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		Wind Speed Direction change Yaw error	12
4. Normal shut down	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		Wind Speed Yaw error gust speed Shut down time	27
5. Emergency shut down	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		Wind Speed Yaw error Emergency stop	9
6. Parked (standing still or idling)	6.1	EWM 50-year recurrence period		Parked type Yaw error	6
	6.2	EWM 50-year recurrence period	Loss of electrical network connection	Parked type Grid loss Yaw error	6
	6.3	EWM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	Extreme yaw misalignment	Parked type Yaw angle	26
7. Parked and fault condition	7.1	EWM 1-year recurrence period		Fault Yaw error	10

Table 4 Calculation position for extreme characteristics

Unit	Location	Types of analysis
Blade	1.25m	extreme loads
	40m	extreme deflection

4. 난류 강도의 변화에 대한 극한 하중 해석

난류강도의 변화에 대한 블레이드의 극한 하중 해석의 결과로서, 허브와 연결지점인 블레이드 뿌리에 작용하는 절대 값의 극한하중을 난류강도에 대해 Table 5 및 Table 6에서 보이고 각각 하중의 크기와 비교 기준인 IEC I A 조건에 대한 증감율을 백분율(%)로서 표시하고 있다.

또한 다음의 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에서는 주축의 중심점으로부터 거리 1.25m의 지점의 모멘트 및 힘, 그리고 블레이드 끝단에서의 변위에 대해 각각 극한 값의 증감량을 백분율을 표시하였다.

극한 모멘트는 난류강도의 증가에 대해서 M_{xy} 가 가장 민감하게 8.4% 증가하고 있으며 난류강도가 작아지면 M_z 가 가장 민감하게 -12.3% 감소하고 있다. 즉 블레이드 뿌리 부분인 1.25m 지점에서는 난류강도의 변화에 대해 M_{xy} , M_z 가 민감하게 변화하는 극한하중의 성분임을 알 수 있다.

극한 힘의 경우 F_y 의 난류강도에 따른 변화가 -18.4% ~ 29.7%로 가장 민감한 극한하중의 성분임을 알 수 있다.

또한 극한 모멘트와 극한 힘을 Flapwise방향과 Edgewise방향에 대해 벤딩모멘트와 전단력으로 구분하여 보면 난류강도의 크기 변화에 따라 Edgewise 방향의 벤딩모멘트와 전단력 모두 민감하게 변화하는 요소임을 알 수 있다.

다음의 Table 7과 Fig. 4에서 날개 끝단의 변위에 대해 보이고 있는데 날개 끝단에서의 변위는 난류강도의 변화에 따라 y방향의 변위가 가장 큰 것을 알 수 있다.

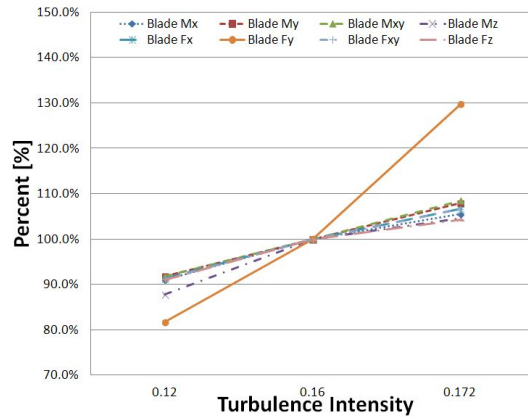


Fig. 2 Sensitivity of extreme loads at blade1.25m radius(1)

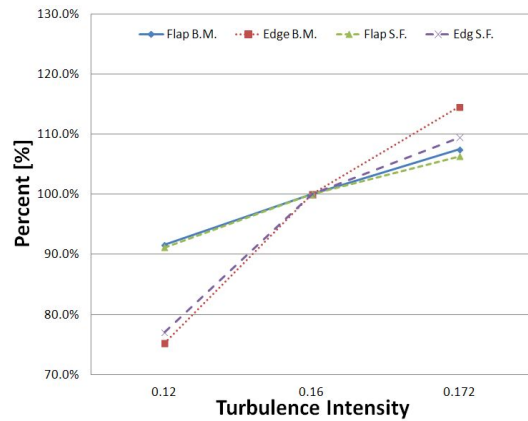


Fig. 3 Sensitivity of extreme loads at blade1.25m radius(2)

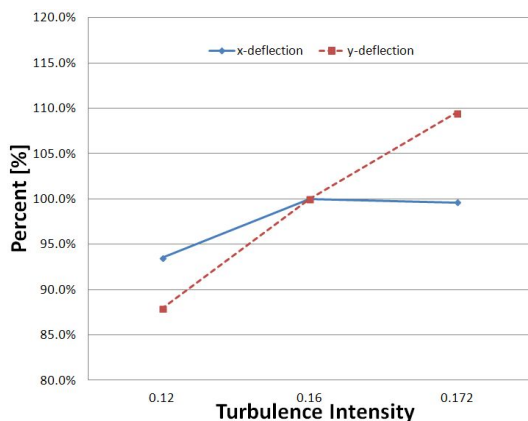


Fig. 4 Sensitivity of extreme blade tip deflection

Table 5 Ultimate load with turbulence intensity : blade at 1.25m radius

	난류강도 0.12			난류강도 0.16(IEC IA)			난류강도 0.172		
	Load cass	kNm, kN	%	Load cass	kNm, kN	%	Load cass	kNm, kN	%
Blade Mx	6.1_a	8095.9	-9.1	6.1_a	8904.9	-	6.1_f	9390.5	5.5
Blade My	7.1_i	67381	-8.2	7.1_i	73401	-	7.1_h	79205	7.9
Blade Mxy	7.1_i	67435	-8.2	7.1_i	73436	-	7.1_h	79604	8.4
Blade Mz	7.1_i	2026.8	-12.3	7.1_h	2311	-	7.1_h	2418	4.6
Blade Fx	7.1_h	6354.4	-8.8	7.1_g	6966.5	-	7.1_h	7428.9	6.6
Blade Fy	7.1_i	485.8	-18.4	7.1_g	595.2	-	7.1_h	772	29.7
Blade Fxy	7.1_h	6357.4	-8.8	7.1_g	6972.3	-	7.1_h	7437.7	6.7
Blade Fz	7.1_h	51715	-9.1	7.1_h	56900	-	7.1_h	59331	4.3

Table 6 Ultimate load with turbulence intensity : blade at 1.25m radius

	난류강도 0.12			난류강도 0.16(IEC IA)			난류강도 0.172		
	Load cass	kNm, kN	%	Load cass	kNm, kN	%	Load cass	kNm, kN	%
Flap B.M.	7.1_i	67245	-8.4	7.1_i	73435	-	7.1_h	78880	7.4
Edge B.M.	7.1_h	7096.5	-24.7	7.1_g	9426.6	-	7.1_h	10796	14.5
Flap S.F.	7.1_h	6357.3	-8.8	7.1_g	6972.2	-	7.1_h	7411.7	6.3
Edg S.F.	7.1_i	438.8	-23.0	7.1_g	569.8	-	7.1_h	623.5	9.4

Table 7 Ultimate load with turbulence intensity : blade deflection at 40m radius

	난류강도 0.12			난류강도 0.16(IEC IA)			난류강도 0.172		
	Load cass	m	%	Load cass	m	%	Load cass	m	%
x-deflection	7.1_h	7.2	-6.5	7.1_g	7.7	-	7.1_h	7.67	-0.4
y-deflection	6.1_a	-6.11	-12.1	6.1_a	-6.95	-	6.1_f	-7.61	9.5

Table 8 Equivalent ultimate load with turbulence intensity : blade at 1.25m radius

	난류강도 0.12		난류강도 0.16(IEC IA)		난류강도 0.172	
	EQ [kNm, kN]	[%]	EQ [kNm, kN]	[%]	EQ [kNm, kN]	[%]
EQ_M_max	95672.69	-8	104210.9	-	112687.5	8
EQ_M_min	7594.186	-17	9203.824	-	11184.56	22
EQ_F_max	52492.59	-9	57750.41	-	60260.03	4
EQ_F_min	475.0314	-13	548.1419	-	600.1011	9

5. 등가 극한 하중 해석

앞서 해석된 난류 강도의 변화에 대한 극한 하중은 각 방향의 성분을 독립적으로 해석하여 절대적인 극한 하중의 크기를 비교하기가 어렵다. 따라서 다음과 같은 극한 하중의 등가치를 구하여 비교하였다.

$$\text{등가 극한 모멘트} = \sqrt{\sum M_i^2}$$

$$\text{등가 극한 힘} = \sqrt{\sum F_i^2}$$

여기서, i 는 x, y, xy, z 이다.

난류강도의 변화에 대한 블레이드 뿌리부분에서의 등가 극한 하중 해석의 결과를 다음의 Table 8과 Fig. 5에서 보이고 있다. 블레이드 뿌리지점에서 난류강도의 변화에 따라 등가 극한 하중은 (+)방향의 모멘트의 경우 -8% ~ 8% 변화 하였고 (-)방향의 모멘트는 -17% ~ 22% 변화 하였다. 또한 (+)방향의 힘의 경우 -9% ~ 4% 변화 하였고 (-)방향의 힘은 -13% ~ 9% 변화 하였다.

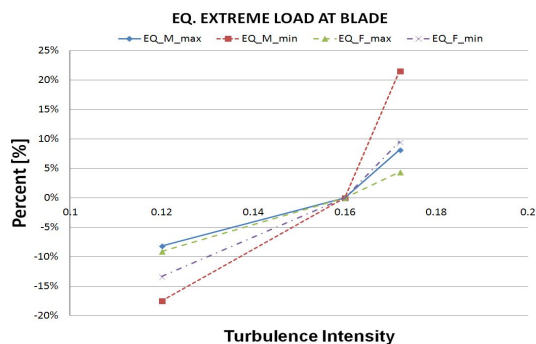


Fig. 5 Equivalent extreme load at blade

6. 결 론

본 연구는 고안된 설계조건 하에서, 난류강

도의 변화와 극한 하중간의 상관관계를 밝혀서, 풍력발전시스템 설계에 반영할 수 있도록 함을 목적으로 하며, 그 결과는 다음과 같다.

우리나라의 특성상 난류강도가 높은 운전 조건을 감안하여 극한 하중 해석을 위해 난류 강도별 극한하중의 변화를 해석하고자, 외부 조건과 운전조건의 조합에 의해 총 270개의 세부 설계 하중 조건을 새롭게 설계하여 하중 해석에 적용하였다.

IEC C등급인 낮은 난류강도 12%, IEC S등급에 해당하는 고 난류강도 17.2% 및 IEC A 등급인 난류강도 16%상태에서 분석결과 블레이드에서 난류강도 변화에 따라 Mz방향 모멘트가 가장 민감하게 -12.3% ~ 4.6% 변화하였고, 등가 극한 하중 역시 블레이드에서 (-)방향의 모멘트가 -17% ~ 22% 변화 하는 것으로 분석 되었다. 그리고, 등가 극한 모멘트와 등가 극한 힘으로 비교하여 보면 난류강도가 증가하면서 등가 극한 모멘트와 등가 극한 힘이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다.

결국 고 난류강도 특성이 풍력발전시스템의 특정 극한하중을 크게 증가시키는 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 풍력발전시스템의 구조적 안전성에 큰 영향을 미치게 되므로, 설계단계(ambient TI) 또는 풍력시스템 운전 단계(wake TI)에서 난류강도에 대한 충분한 고려가 반드시 필요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(신재생에너지기술 개발사업)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

1. Kim, K. H, 2009, "A Study on the Formulation of Extreme Load and

- Sensitivity Analysis of Blade Stiffness Distribution of Wind Turbine System”, In Ha University
2. Ko, K. N., Huh, J. C., 2006, "Wind power engineering guide", munundang, pp.39~52
 3. IEC, 2005, "IEC 61400-1 3rd Ed. Wind turbines-Part 1 : Design requirements", International Electro- technical Commission, pp.21 ~ 45
 4. IEC, 2006, "IEC 61400-2 2nd Ed. Wind turbines-Part 2 : Design requirements for small wind turbines", International Electrotechnical Commission, pp.43 ~ 65
 5. Ervin Bossanyi, 2009, "GH Bladed - Theory Manual", Garrad Hassan and Partners Ltd.
 6. Ervin Bossanyi, 2009, "GH Bladed - User's Manual", Garrad Hassan and Partners Ltd.
 7. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jwnkins, Ervin Bossanyi, 2001, "WIND ENERGY HANDBOOK", JOHN WILEY & SONS,LTD
 8. Landers Randermakers and Reef Hunter, 1998, "European Wind Turbine Standards II", EC, Brussel.
 9. David A. Spera, 1994, "Wind turbine technology", ASME Press pp. 487-506.
 10. J. C. Kaimal, J. C. Wyngaard, Y.Izumi, and O. R. Cote, 1972, "Spectral characteristics of surface-layer turbulence", Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 98, pp. 563-598.