

750kW 풍력발전기 현장시험을 통한 하중 비교

*방 조혁¹⁾, **홍 혁수¹⁾, 박 진일¹⁾, 류 지윤¹⁾

Load comparison of 750kW WTGS by field test

*Johyug Bang, **Hyeoksoo Hong, Jinil Park, Jiyune Ryu

Key words : Load comparison(하중비교), Type test(형식시험)

Abstract : This study proposes an essential process of type certificate, which is load comparison for proving the calculated design load. The load measurement was carried out according to IEC 61400-13 standard and the load calculation was performed with same condition using FLEX 5 code. For more accurate load simulation, the controller parameter of original model at the design stage was modified to site optimized value and some node points are added to coincidence with measurement. The load comparison was performed with various wind parameter, turbulence intensity and wind shear. As a result, simulated loads were good agreed with the measured load. Therefore, the calculated design loads according to IEC 61400-1 standard were proved to valid.

Nomenclature

TI : turbulence intensity

subscrip

WTGS : wind turbine generator system

DLC : design load case

MLC: measurement load case

SO: steady-state operation

TE: transient events

1. 서론

본 연구는 풍력발전기 형식인증의 필수 절차로서 수행되어지는 하중측정 및 비교에 관한 것으로서 풍황조건의 주요 변수인 TI 및 Wind shear 등이 하중에 미치는 영향을 검토하였다. 하중은 IEC 61400-13¹⁾에서 규정하는 방법에 따라 측정되었으며 동일조건의 하중 계산에는 상용 코드인 FLEX 5를 이용하였다. 하중해석 모델은 기본 데이터는 설계하중 계산에 적용되었던 모델과 동일하며 제어기 모델은 현장 튜닝을 통해 최적화된 값을 적용하였다. 또한 실제 하중 측정 센서가 부

착된 위치에 절점을 추가하여 이점에 6자유도의 하중이 계산되도록 하였는데 이는 측정된 하중과 동일한 조건의 하중계산을 위해 필수적으로 요구되어진다. 이상과 같은 방법으로 측정된 하중과 계산된 하중을 비교한 결과 상호 유사한 결과를 도출하여 설계하중 계산의 타당성이 검증되었다.

2. 하중 측정

2.1 Measurement Load Case

IEC 61400-13에 규정된 측정 하중 조건(MLC)은 크게 SO와 TE로 구분되어지며 각각의 MLC는 IEC 61400-1²⁾에 규정된 DLC와 서로 연관되어 있다. 이중 SO와 관련된 MLC는 크게 3가지이며 각각에 대한 측정조건, 풍속조건 관련 DLC는 Table 1과 같다. 또한 TE와 관련된 MLC는 크게 5가지로 구분되며 세부조건은 Table 2와 같다.

본 논문에서는 형식인증의 Load comparison을 수행하면서 가장 많은 시행착오를 겪었던 MLC 1.1에 관한 내용만을 다루었다.

1) 유니슨 풍력연구소
E-mail : bjhzone@unison.co.kr
Tel : (042)360-1122 Fax : (042)360-1119

Table 1 MLCs during steady-state operation

MLC	Measurement Condition	related DLC	Wind condition
1.1	Power production	1.2	$V_{in} < V_{nub} < V_{out}$
1.2	Power production plus occurrence of fault	2.3	$V_{in} < V_{nub} < V_{out}$
1.3	Parked, idling	6.2	$V_{in} < V_{nub} < 0.75V_{e1}$

Table 2 MLCs of transient events

MLC	Measurement Condition	related DLC	Wind condition
2.1	Start-up	3.1	V_{in} and $> V_r + 2m/s$
2.2	Normal shut-down	4.1	V_{in} , V_r and $> V_r + 2m/s$
2.3	Emergency shut-down	5.1	V_{in} and $> V_r + 2m/s$
2.4	Grid failure	1.5	V_r and $> V_r + 2m/s$
2.5	Overspeed activation of the protection system	5.1	$> V_r + 2m/s$

2.2 Capture Matrix

다음의 Table 3은 블레이드 edgewise moment 하중에 대한 capture matrix를 예시한 것으로서 모든 측정하중에 대하여 기록되어야 한다. 이와 같은 Capture matrix는 측정된 풍속을 1m/s 단위로 구분한 풍속 bin과 TI를 2% 단위로 구분한 TI bin으로 구성되어있다. 수집된 풍속 data는 모두 10분 평균값이다.

Table 3 Capture matrix for blade moment

bin	Turbulence Intensity (TI) [%]																	total
	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	
1	0.0	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
2	2.5	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
3	3.5	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
4	4.5	5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
5	5.5	6.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
6	6.5	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13
7	7.5	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24
8	8.5	9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
9	9.5	10.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
10	10.5	11.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
11	11.5	12.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11
12	12.5	13.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
13	13.5	14.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
14	14.5	15.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
15	15.5	16.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
16	16.5	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
17	17.5	18.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
18	18.5	19.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	19.5	20.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	20.5	21.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	21.5	22.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	22.5	23.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	23.5	24.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	24.5	25.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	25.5	26.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	26.5	27.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	27.5	28.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	28.5	29.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	29.5	30.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	30.5	31.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.3 측정 하중 성분 및 위치

하중 측정은 스트레인 게이지를 부착하여 수행되었으며 측정된 하중 성분 및 위치는 Table 4와 같다.

Table 4 Load component and position

Load Component	Sensor Position	Notation
Main shaft bending 1	93mm from front end	MxR1
Main shaft bending 2	93mm from front end	MyR1
Main shaft torsion	93mm from front end	MzR1
Main shaft yaw moment	93mm from front end	MxN
Main shaft tilt moment	93mm from front end	MyN
Tower bending bottom	6.95m form tower bottom	MyT MzT
Tower top torsion	47.3m from tower bottom	MxT
Blade flapwise moment	1.39m form hub center	Mys
Blade edgewise moment	1.39m form hub center	Mzs

3. 측정조건 하중해석

하중해석을 위해 FLEX 5 Code를 이용하였으며 설계하중 계산시 적용된 해석모델에 측정위치와 동일한 하중점을 추가하여 같은 조건의 하중이 산출되도록 하였다. 피치 및 토크 제어기의 게인 값 또한 현장에서 튜닝된 값을 적용하였다. Table 5는 해석 모델에 적용된 초기값으로서 실제 측정조건과는 다소 차이가 있을 수 있지만 결과에 큰 영향을 미치지 않는 공기밀도, yaw error, flow inclination angle 등은 IEC 61400-1에 규정된 값을 적용하였다. 그러나 wind shear는 경우에 따라 하중에 미치는 영향을 무시할 수 없기 때문에 값을 변화 시키며 그 효과를 확인하였다.

Table 5 Initial parameters for load calculation

Air density	1.225kg/m ³
Yaw error	10 °
Flow inclination angle	8 °
Wind shear exponent	0.2

3.1 Turbulence Intensity

풍황 조건중 풍력발전기 하중에 가장 큰 영향을 주는 요소는 TI이며 계산된 하중과 측정하중을 비교하기 위해서는 반드시 이러한 TI에 대한

명확한 분석이 필요하다. IEC 61400-1에서 정하는 풍력발전기의 난류강도는 Class A인 경우 15%이지만 Table 3의 capture matrix에 보인바와 같이 실제 측정된 TI는 동일풍속 범위 내에서도 다양하게 분포되어 있다. 따라서 특정 TI를 고정하여 계산된 하중을 측정 하중과 비교하면 잘 일치하지 않은 결과가 도출 될 수 있다. 그렇다고 capture matrix의 모든 TI에 대하여 하중해석을 수행한다면 그 계산 및 분석에 매우 많은 시간을 소비하게 된다. 더구나 각 측정하중 성분별로 capture matrix가 동일하지 않기 때문에 더욱 많은 시간이 소요될 것임은 분명하다. 본 연구에서는 이와 같은 계산시간을 줄이기 위해 동일 풍속 범위의 TI가 증가함에 따라 수집된 data를 더하여 계산된 accumulated data 수의 75%에 해당되는 TI를 해당 풍속대를 대표하는 값으로 선정하여 하중해석에 적용하였다. Table 6은 이러한 TI를 선정하는 과정을 예시한 것이다.

Table 6 TI selection for load simulation

Wind speed [m/s]	TI ₁	TI ₂	TI ₃	TI ₄	acc.	75% covered
2.5~3.5	-	20	30	15		
accumulated	0	20	50	65	65	48.8
3.5~4.5	8	3	15	28		
accumulated	8	11	26	54	54	40.5

* slected TI:
 at wind speed 3.0m/s : TI₃
 at wind speed 4.0m/s : TI₄

3.2 Coordinate System

하중 계산에 적용된 좌표계는 FLEX 5 좌표계이며 Fig. 1 ~ Fig. 4에 도시하였다. 특히 로터와 관계되는 좌표계중 R1-좌표계와 N-좌표계의 차이점은 R1 system은 블레이드에 X축을 고정하고 로터의 회전과 함께 회전하는 좌표계 이며 N system은 X축이 타워와 고정되어 로터회전과 무관한 좌표계 이다.

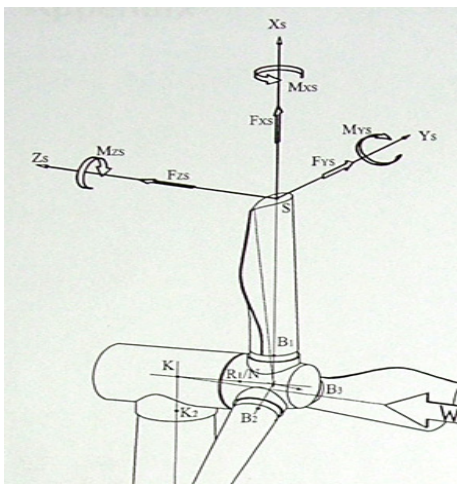


Fig. 1 S-Coordinate System

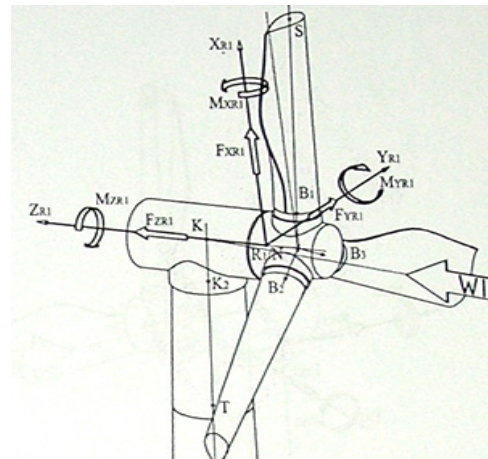


Fig. 2 R1-Coordinate System

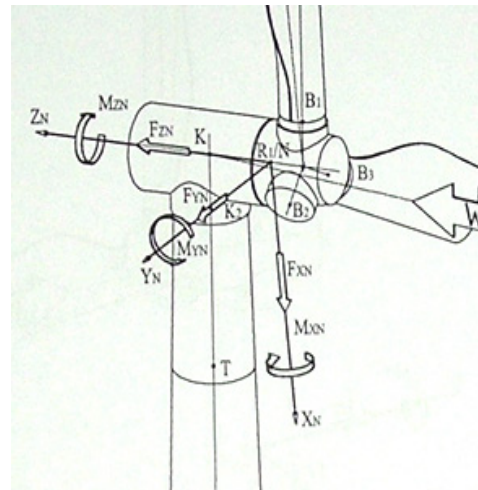


Fig. 3 N-Coordinate System

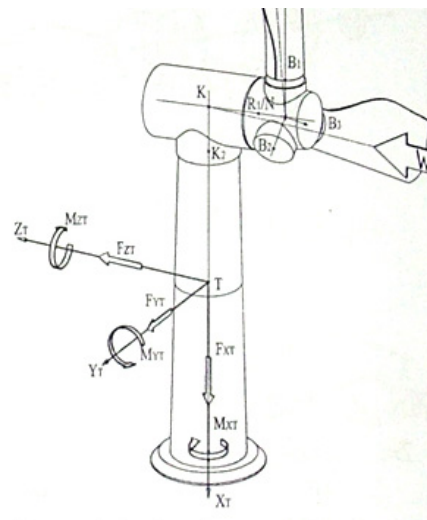


Fig. 4 T-Coordinate System

4. Load Comparison

Table 1에 표시한 바와 같이 MLC 1.1은 DLC 1.2와 관련되며 DLC 1.2는 풍력발전기의 설계 피로하중을 산출하는 DLC이다. 따라서 하중평가는 피로하중을 나타내는 damage equivalent load spectra를 비교하는 방법으로 수행되었으며 설계 하중의 최대값을 기준으로 Normalize하여 직접 비교하였다.

피로하중은 10분 동안 측정 또는 계산된 하중의 load range별 cycle 수를 계산하고 이를 풍력발전기가 수명인 20년으로 확장하여 계산하였다. 본 연구에서는 이와 같은 damage equivalent load spectra 계산을 위해 잘 알려진 rain-flow count 방법을 적용하였으며 10분 data를 20년으로 확장하기 위해 풍속 확률분포 함수인 Weibull wind speed distribution(A=9.59, K=2)를 사용하였다.

Fig. 5는 Main shaft bending load(MxR1)을 비교한 것으로서 측정값은 모든 측정데이터를 이용하여 피로하중을 계산한 것이고, 계산 값은 75% covered TI, 95% covered TI의 두 가지를 계산하였다. 추가적으로 TI의 변화에 따른 하중의 추이를 비교하기 위해 모든 풍속대에서 TI=0.1인 경우를 계산하여 비교하였으며 또한 wind shear의 영향을 검토하기 위해 95% covered TI인 경우에 Wind shear exponent=0.45인 경우를 추가적으로 계산하였다. 계산 결과 측정값은 75% covered TI를 적용한 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, Shaft bending 하중에는 Wind shear 효과는 큰 영향을 미치지 않으며 TI의 변화에 크게 달라짐을 확인하였다.

Fig. 6은 블레이드 flapwise bending load를 비교한 것으로서 측정값은 75% covered TI를 적용하여 계산된 결과와 잘 일치하며 main shaft 하중과는 다르게 wind shear의 영향을 무시할 수 없음을 확인하였다.

Fig. 7은 Tower bottom bending load를 비교한 것으로서 측정값은 다른 하중과 유사하게 75% covered TI를 적용하여 계산한 결과와 잘 일치하였으며 wind shear의 영향은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

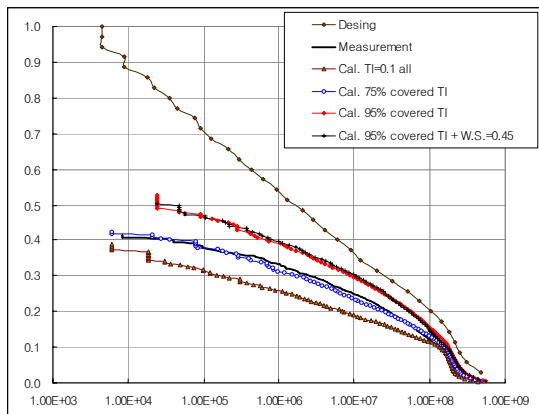


Fig. 5 Load comparison of shaft bending(MxR1)

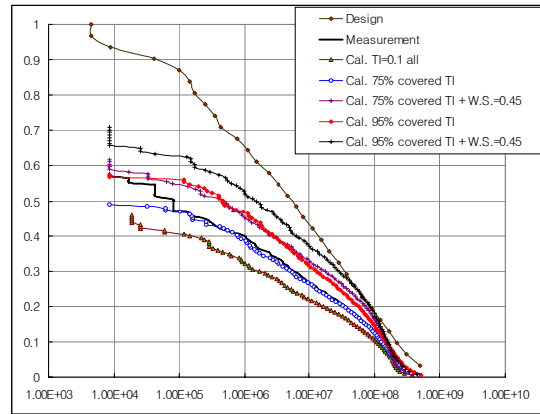


Fig. 6 Load comparison of blade flapwise bending shaft bending (MyS)

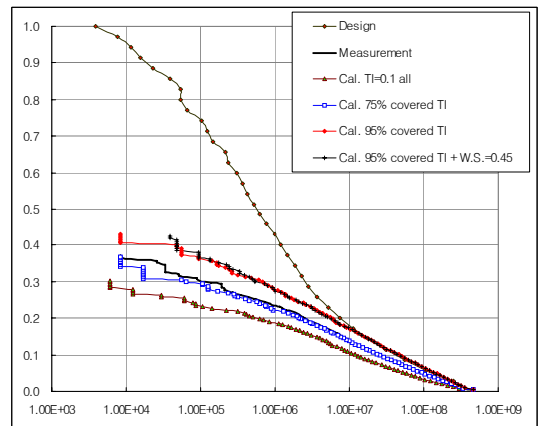


Fig. 7 Load comparison of Tower bending (MyT)

결론

본 연구를 통해 실제 측정된 하중과 동일조건으로 계산된 하중 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 풍력발전기의 하중은 TI의 변화에 따라 크게 달라진다.
- (2) 특히 블레이드 하중은 TI 뿐만아니라 wind shear의 영향도 무시할 수 없다.
- (3) Accumulated 측정 데이터의 75%에 해당하는 TI를 적용하여 계산한 damage equivalent spectra는 측정결과를 모두 적용하여 계산한 결과와 잘 일치 하였다.
- (4) 현장시험 조건과 동일하게 계산된 하중은 실제 측정하중과 잘 일치함으로써 설계하중 계산에 적용된 방법 및 계산 결과는 타당함이 입증 되었다.

References

- [1] IEC TS 61400-13 Technical specification, "Part 13:Measurement of mechanical loads"
- [2] IEC 61400-1 International standard, "Part 1:Design requirements"