

# IEC 61400-1 DLC1.1과 DLC1.3에 대한 풍력터빈의 극한하중 특성

김충옥\*, 남현우\*\*, 음학진\*\*, 김귀식\*\*\*

\*제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정(okwind@jejunu.ac.kr),  
\*\*한국선급 녹색산업기술원(namhw@krs.co.kr), (hjeum@krs.co.kr),  
\*\*\*제주대학교 기계시스템공학부(kimgusi@jejunu.ac.kr)

## Characteristics of Ultimate Load in a Wind Turbine for IEC 61400-1 DLC1.1 and DLC1.3

Kim, Chung-Ok\* Nam, Hyun-Woo\*\* Eum, Hark-Jin\*\* Kim, Gui-Shik\*\*\*

\*Multidisciplinary Graduate School for Wind Energy, Jeju National University(okwind@jejunu.ac.kr),  
\*\*Green & Industrial Technology Center, Korean Register(namhw@krs.co.kr), (hjeum@krs.co.kr),  
\*\*\*Faculty of Mechanical System Engineering, Jeju National University(kimgusi@jejunu.ac.kr)

### Abstract

IEC 61400-1 requires design lifetime of wind turbines at least 20 years, thus wind turbine should be assured for structural safety through load assessment. DLCs have been defined with respect to the load assessment in IEC 61400-1. In addition, if the extreme design values for DLC1.3 are equal or exceed the extreme design value for DLC1.1, DLC1.1 may be omitted. To omit DLC1.1, scale factor (c) will be increased in DLC1.3. However, this particular adjustment is not specified guidelines. Thus, this study was conducted. DLC1.1 was calculated for extrapolation of 50 years-extreme events using several probability distribution functions and fitting methods. And DLC1.3 was calculated for up to seven different values of scale factor (c) with  $2 \leq c \leq 5$  in steps of 0.5. Finally, in this study, scale factor (c) that was the value of 4.51 was determined.

Keywords : 풍력터빈(Wind turbine), 설계하중케이스(DLC; Design load case), 극한설계치(Extreme design value), 극한하중(Ultimate load), 겐벨(Gumbel), 3-파라미터 와이불(3-parameter weibull)

### 기 호 설 명

$V_{in}$	: Cut-in wind speed	$V_{out}$	: Cut-out wind speed
$V_{hub}$	: Hub height wind speed	TI	: Turbulence Intensity
		$I_{ref}$	: Reference turbulence intensity

투고일자 : 2011년 11월 18일, 심사일자 : 2011년 12월 1일, 게재확정일자 : 2012년 2월 28일  
교신저자 : 남현우(namhw@krs.co.kr)

$\sigma_1$	: Standard deviation
$c$	: Scale factor for $\sigma_1$
$V_{ave}$	: Annual average wind speed
$V_{ref}$	: Reference wind speed
3PW	: 3-Parameter Weibull

## 1. 서 론

국제 기준인 중·대형 풍력터빈에 대한 설계 요구사항 IEC 61400-1 ed. 3에서는 풍력터빈이 최소한 20년 이상의 설계수명을 확보할 것을 요구하고 있다.<sup>1)2)</sup>

따라서 발전, 발전 중 고장발생, 시동, 정상정지, 긴급정지, 파킹, 파킹 중 고장발생, 수송·조립·정비 및 수리 등의 여러 상태를 겪게 되는 풍력터빈은 정상 및 극치 혹은 기타 외부조건 하에서 하중평가를 통한 구조적 안전성이 보장되어야 하며, 이에 대한 내용은 IEC 61400-1 ed. 3에서 설계하중케이스(DLC; Design load case)로 정의하고 있다.<sup>1)</sup>

이 DLC들 중에서, 50년 재현주기 하중을 예측해야하는 DLC1.1은 불확도가 너무 크고, 통계적 방법으로 계산하기 때문에 정확도의 향상을 위해서는 수많은 해석결과가 요구된다. 또한 DLC1.1 하나만으로도 계산에 상당한 시간이 소요되는 등의 어려움이 많아 실제 GL 가이드라인에서는 채택을 하지 않고 있는 실정이며, 논란이 많은 부분이다. 따라서 하중케이스를 줄일 수 있는 대안으로 제시된 DLC1.3에 대한 연구가 필요하다.

특히, 이 DLC1.3의 경우, 극치난류모델(ETM; Extreme turbulence model)의 난류표준편차( $\sigma_1$ )에 대한 척도계수  $c$ 를 적절히 증가시켜, DLC1.3의 극한설계치(Extreme design value), 즉 극한하중(Ultimate load)을 DLC1.1의 극한하중보다 크거나 같도록 조절하여, DLC1.1을 생략할 수 있다고 명시되어 있으나, 이 척도계수  $c$ 를 어느 정도 크기로, 얼마만큼 조절해야 하는지에 대한 가이드라인은 미비한 실정이다.<sup>1)</sup>

따라서 본 연구에서는 5MW tripod 해상용

풍력터빈을 대상으로, DLC1.1의 통계적 접근 방법과 DLC1.3의 결정론적 접근방법을 통하여 계산된 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수  $c$ 의 값을 제시하고자 한다.

## 2. 일반 사항

DLC1.1을 생략하기 위한 DLC1.3의 척도계수  $c$ 를 추정하기 위해서는 먼저 대상 풍력터빈 모델 선정이 이뤄진 다음, DLC1.1의 50년 재현주기 하중을 예측한 후, DLC1.3의 척도계수  $c$ 를 적절히 증가시켜가며 DLC1.3의 극한하중이 DLC1.1의 극한하중보다 크거나 같게 되는 경우를 찾아야 하는데, 이에 대한 각 내용은 다음과 같다.

### 2.1 풍력터빈 모델

본 연구에 사용된 풍력터빈은 Bladed 4.1 소프트웨어에서 제공하는 5MW tripod 해상용 풍력터빈이다. 그림 1과 표 1에 풍력터빈의 형상과 주요제원을 각각 나타내었다.



그림 1. 5MW tripod 해상용 풍력터빈의 형상

표 1. 5MW tripod 해상용 풍력터빈의 주요제원

Rotor diameter	118m
Number of blades	3
Hub height	80m
Rotational sense of rotor, viewed from upwind	Clockwise
Position of rotor relative to tower	Upwind
Transmission	Gearbox
Aerodynamic control surfaces	Pitch
Fixed / Variable speed	Variable
Cut in wind speed	3.5m/s
Rated wind speed	12.3m/s
Cut out wind speed	25m/s

표 2. 발전상태의 DLC1.1과 DLC1.3<sup>1)</sup>

DLC	Wind condition	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factor
1.1	NTM, $V_m < V_{hub} < V_{out}$	For extrapolation of extreme events	Ultimate strength	Normal
1.3	ETM, $V_m < V_{hub} < V_{out}$		Ultimate strength	Normal

## 2.2 설계하중케이스

IEC 61400-1 ed. 3에서는 DLC에 대한 안전요구사항을 총 8가지 설계 상태에 대해 제시하고 있으며, 본 연구에서는 표 2와 같이 발전상태의 풍력터빈에 대하여 DLC1.1과 DLC1.3을 계산하였다.<sup>1)</sup>

DLC1.1은 풍속조건에 따라 보수적인 하중 값을 적용하기 위해 Improved von Karman 난류모델을 적용하여 10분간의 난류 랜덤 풍속데이터를 생성하였으며, 정상난류모델(NTM; Normal turbulence model)에서의 난류강도(TI; Turbulence intensity)를 식 (1), (2)로 계산하고, 바람 유입경사를 8°로 설정하였다.<sup>2)</sup>

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75 V_{hub} + b) \quad (1)$$

$$b = 5.6, I_{ref} = 0.16$$

$$TI = \frac{\sigma_1}{V_{hub}} \quad (2)$$

여기서, 상수 b는 IEC 61400-1 ed. 3에 5.6으로 제시되어 있으며, 기준난류강도  $I_{ref}$ 는 풍력터빈 클래스에서 난류특성에 따라 결정되는 값이다. 본 연구에서는 클래스IIA 사이트에 적용시키고자 0.16으로 설정하였다.<sup>1)</sup>

표 3. DLC1.1 해석조건 상세정의

DLC 1.1	Wind speed, m/s	TI, %	Yaw error, °
a	3.5	37.60	-8
b			0
c			8
d	5.5	28.29	-8
e			0
f			8
g	7.5	23.95	-8
h			0
i			8
j	9.5	21.43	-8
k			0
l			8
m	11.5	19.79	-8
n			0
o			8
p	13.5	18.64	-8
q			0
r			8
s	15.5	17.78	-8
t			0
u			8
v	17.5	17.12	-8
w			0
x			8
y	19.5	16.59	-8
z			0
aa			8
ab	21.5	16.17	-8
ac			0
ad			8
ae	23.5	15.81	-8
af			0
ag			8
ah	25	15.58	-8
ai			0
aj			8

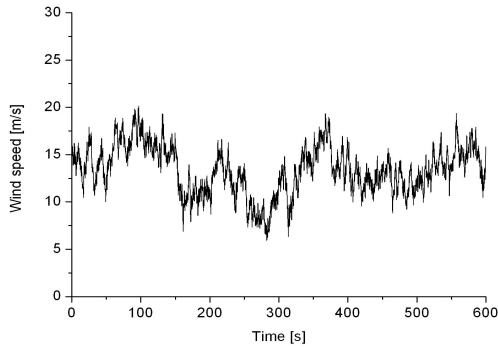


그림 2. 정상난류모델에 대한 풍속데이터(13.5m/s)

표 3은 DLC1.1의 풍속, 난류강도, 요 에러에 대한 상세정의를 나타내며, 특히, 요 얼라인먼트 이탈과 같은 이론적 최적운전조건에 벗어나는 편차들을 운전하중의 평가에 고려해야하므로, 요 에러를  $-8^\circ$ 에서  $8^\circ$ 까지, 간격은 8로 나누었다. 그림 2는 DLC1.1 중에서, 대표적으로  $V_{hub}$ 가 13.5m/s일 때, 생성된 풍속을 나타낸다.<sup>1)</sup>

DLC1.3은 풍속조건에 따라 DLC1.1과 같이 Improved von Karman 난류모델을 적용하여 10분간의 난류 랜덤 풍속데이터를 생성하였으며, TI를 ETM에 따라 식 (2), (3)으로 계산하고, 바람 유입경사를  $8^\circ$ 로 설정하였다.<sup>1)</sup>

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left( 0.072 \left( \frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left( \frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right) \quad (3)$$

$$c = 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5$$

$$I_{ref} = 0.16, V_{ave} = 8.5 \text{ m/s}$$

여기서, ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수  $c$ 를 증가시키며 ETM 풍속조건에 해당하는 DLC1.3의 극한하중이 NTM 풍속조건 및 50년 재현주기에 해당하는 DLC1.1의 극한하중보다 크거나 같도록 조절할 수 있다. IEC 61400-1 ed. 3에서 제시하는 척도계수  $c$ 의 기본 값인 2부터 2008년 GL의 연구를 참조하여 5까지, 간격은 0.5로 나누어 척도계수  $c$ 를 추정하였다.<sup>1)3)</sup>

한편, 연평균풍속  $V_{ave}$ 는 식 (4)에 의해 결정된다. 앞서 DLC1.1에서 풍력터빈 클래스를 IIA로 선택하였으므로, 기준풍속  $V_{ref}$ 는 42.5m/s가 되어  $V_{ave}$ 는 8.5m/s가 된다.

$$V_{ave} = 0.2 V_{ref} \quad (4)$$

표 4. DLC1.3 해석조건 상세정의

DLC 1.3	Wind speed, m/s	TI, %							Yaw error, °
		c=2	c=2.5	c=3	c=3.5	c=4	c=4.5	c=5	
a	3.5	80.69	100.6	120.8	141.2	161.7	182.4	203.1	-8
b									0
c									8
d	5.5	54.39	66.70	79.33	92.15	105.1	118.1	131.2	-8
e									0
f									8
g	7.5	42.11	50.88	59.97	69.25	78.64	88.12	97.64	-8
h									0
i									8
j	9.5	35.00	41.72	48.76	55.99	63.33	70.75	78.23	-8
k									0
l									8
m	11.5	30.37	35.74	41.45	47.34	53.34	59.43	65.56	-8
n									0
o									8
p	13.5	27.11	31.54	36.30	41.25	46.31	51.46	56.65	-8
q									0
r									8
s	15.5	24.69	28.42	32.49	36.73	41.10	45.54	50.04	-8
t									0
u									8
v	17.5	22.82	26.02	29.54	33.25	37.08	40.98	44.94	-8
w									0
x									8
y	19.5	21.34	24.10	27.20	30.48	33.88	37.36	40.89	-8
z									0
aa									8
ab	21.5	20.13	22.55	25.29	28.23	31.28	34.41	37.59	-8
ac									0
ad									8
ae	23.5	19.13	21.26	23.71	26.36	29.12	31.96	34.85	-8
af									0
ag									8
ah	25	18.48	20.42	22.69	25.15	27.73	30.38	33.08	-8
ai									0
aj									8

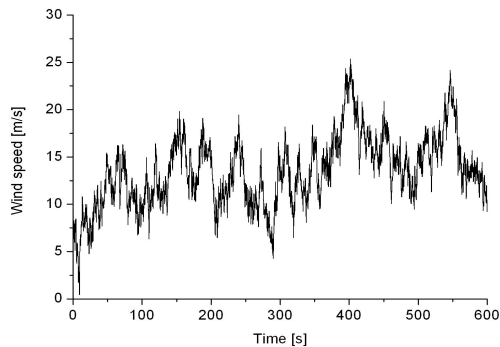
그림 3. 극치난류모델에 대한 풍속데이터(13.5m/s,  $c=2$ )

표 4는 DLC1.3의 풍속, 난류강도, 요 에러에 대한 상세정의를 나타내며, DLC1.1과 마찬가지로, 요 에러를  $-8^\circ$ 에서  $8^\circ$ 까지, 간격은 8로 나누었다. 표 4와 같이 시동풍속 부근의 저풍속에서는 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수  $c$ 의 증가로 인하여, 난류강도가 100%를 넘는 경우가 발생하였다. 이는 물리적으로 존재할 수 없으며, 대부분의 하중이 시동풍속 부근에서는 거의 발생하지 않고, 정격풍속이나 그 이상의 풍속에서 발생한다는 점에 비추어, 난류강도가 100%이상일 때, 하중의 최대치가 발생하였다면, 이를 필터링하였다. 그림 3은 DLC1.3 중에서, 대표적으로  $V_{hub}$ 가 13.5m/s, 척도계수  $c$ 는 2일 때, 생성된 풍속을 나타낸다.

### 2.3 50년 재현주기 하중예측

DLC1.1의 50년 재현주기 하중을 예측하기 위하여, 총 12개의 풍속과 3개의 요 에러를 때 풍속마다 서로 다른 시드를 적용한 후, 10분간의 난류 랜덤 풍속데이터를 5회 반복 계산하여 총 180개의 데이터를 확보하였다. 또한 Peak over threshold를 설정하여, 피팅 시, 부족할 수 있는 데이터 수를 보완하였다.

확률분포함수로는 검벨(Gumbel) 분포함수와 3-파라미터 와이블(3PW; 3-parameter weibull) 분포함수 2가지를, 피팅방법으로는 MOM(Method of Moments) 피팅방법, MOLS(Method of Least

Square) 피팅방법, MLE(Maximum Likelihood Estimate) 피팅방법의 3가지를 모두 사용하였으며, 구체적인 확률분포함수와 피팅방법에 대한 자세한 사항은 본 논문에서는 생략하였다.

### 3. 척도계수 $c$ 의 추정

이상의 자료를 바탕으로 DLC1.1과 DLC1.3에 대한 블레이드 루트에 작용하는 하중( $M_x$ ,  $M_y$ )과 팁의 처짐(x-deflection)을 계산하였으며, DLC1.1에서는 50년 재현주기 하중을, DLC1.3에서는 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수  $c$ 를 2부터 5까지, 간격은 0.5로 증가시켜가며 하중을 각각 계산하였다. 본 연구에서 계산한 3가지 하중요소는 IEC 61400-1 ed. 3에서도 기본적으로 요구하는 설계사항으로, NTM 조건 하에서 50년 재현주기 하중을 계산하는 DLC1.1과 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수  $c$ 를 변수로 하여 하중을 계산하는 DLC1.3을 비교하기 위해서는 적어도 이 3가지의 극한하중에 대한 고려가 필요하다.<sup>1)</sup>

#### 3.1 블레이드 좌표계

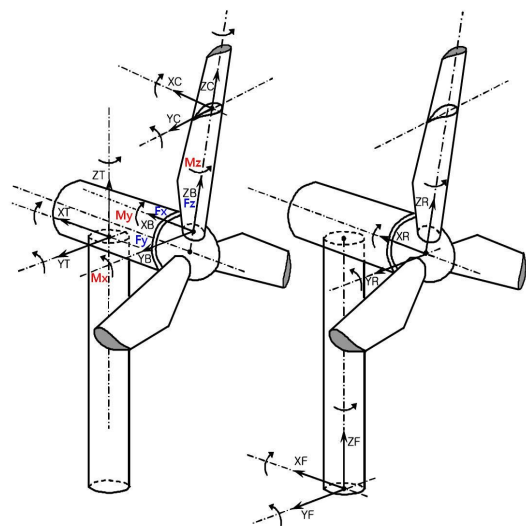
그림 4. 풍력터빈의 좌표계<sup>5)</sup>

그림 4는 풍력터빈 전체 좌표계를 나타내며, 이 중에서, Flap방향 XB, Edge방향 YB, Span방향 ZB가 블레이드 좌표계이다.

블레이드 루트에 작용하는 하중요소에는 모멘트( $M_x, M_y, M_z$ )와 힘( $F_x, F_y, F_z$ )이 있다.  $M_x$ 는 Edge방향 모멘트,  $M_y$ 는 Flap방향 모멘트,  $M_z$ 는 Span방향 모멘트를  $F_x$ 는 Flap방향 힘,  $F_y$ 는 Edge방향 힘,  $F_z$ 는 Span방향 힘을 각각 나타낸다.

### 3.2 50년 재현주기 하중예측 결과

DLC1.1의 10분 하중데이터를 토대로, 50년 재현주기 하중을 예측한 결과를 표 5와 같이 나타내었다. 이 표 5는 10분 하중데이터에서 각 하중요소의 최대치를 기준으로 정규화한 자료이며, 10분 하중데이터의 최대치에 비해 50년 재현주기 하중의 최대치가 각 하중요소별로 최소 17% 이상, 대략 30~50%정도 증가함을 알 수 있다.

본 연구에서처럼 풍속데이터의 수가 적을 때에는 겐벨 분포함수를 사용할 경우, 그림 5~7과 같이 어떤 피팅방법이라도 원활히 피팅이 가능하고, 그림 8~10과 같이 3-파라미터 와이블 분포함수를 사용할 경우, MOM 피팅방법이나 MLE 피팅방법이 적합하며, 기존 연구들에서도 이를 추천하고 있다.<sup>2)4)</sup>

본 연구에서는 각 풍속별로 5개의 시드를 사용하여 계산하였다. 정확도의 향상을 위해서는 랜덤하게 시드를 달리하여 수십내지 수백번이상 계산하여야 한다.

따라서 표 5의 결과에서 다소 큰 값들이 발생하였으며, 그림 9~10과 같이 3-파라미터 와이블 분포함수와 MOLS 피팅방법을 사용 시, 블레이드 루트  $M_y$ 와 팁의 처짐 x-deflection이 원활히 피팅이 되지 않음을 알 수 있다. 또한 이로 인해 본 연구에서 최종적으로 추정된 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수  $c$  역시 다소 크게 계산되었다.

본 연구에서는 2가지 확률분포함수와 3가지 피팅방법을 이용하여 계산한 50년 재현주

기 하중의 최대치로부터, DLC1.1을 생략하기 위한 DLC1.3의 척도계수  $c$ 를 추정하였다.

표 5. 10분 하중과 50년 재현주기 하중의 최대치 비교

Probability distribution functions	Gumbel			3-parameter weibull			
	Fitting methods	MOM	MO LS	MLE	MOM	MO LS	MLE
Loads	Blade root $M_x$	1.30	1.31	1.27	1.17	1.45	1.27
	Blade root $M_y$	1.39	1.39	1.34	1.33	<b>1.69</b>	1.36
	x-deflection	1.53	1.55	1.47	1.51	<b>1.92</b>	1.58

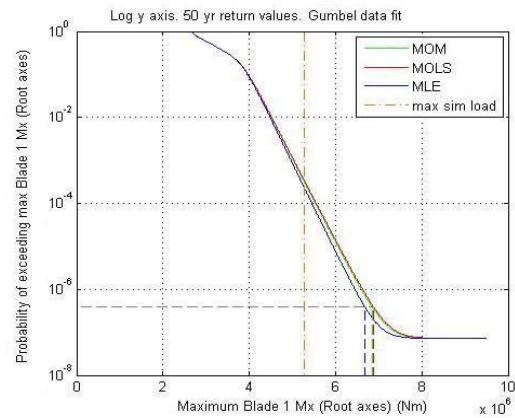


그림 5. 블레이드 루트  $M_x$ 의 50년 재현주기 하중(Gumbel)

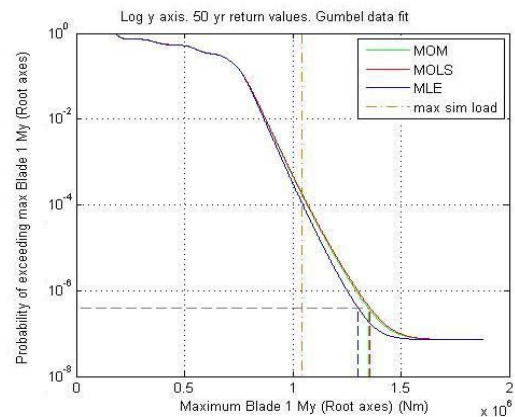


그림 6. 블레이드 루트  $M_y$ 의 50년 재현주기 하중(Gumbel)

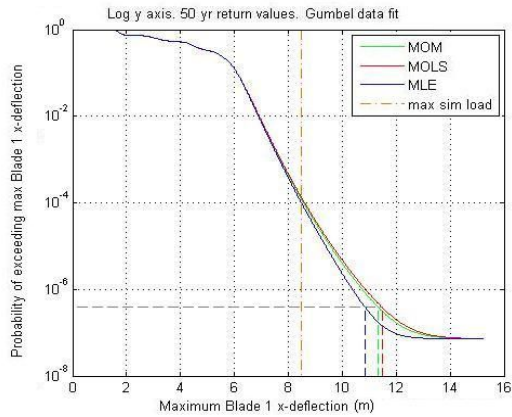


그림 7. 팁의 처짐 x-deflection의 50년 재현주기 하중(Gumbel)

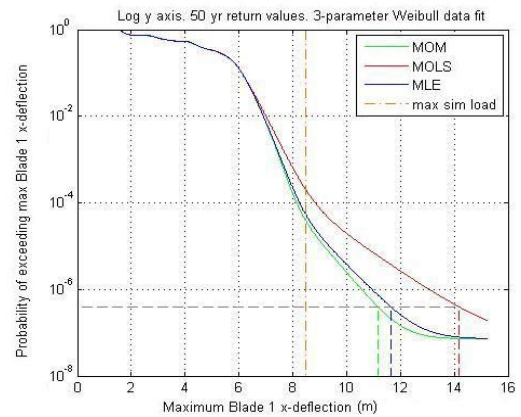


그림 10. 팁의 처짐 x-deflection의 50년 재현주기 하중(3PW)

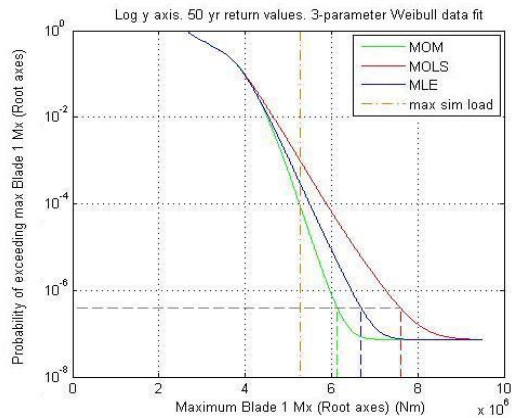


그림 8. 블레이드 루트 Mx의 50년 재현주기 하중(3PW)

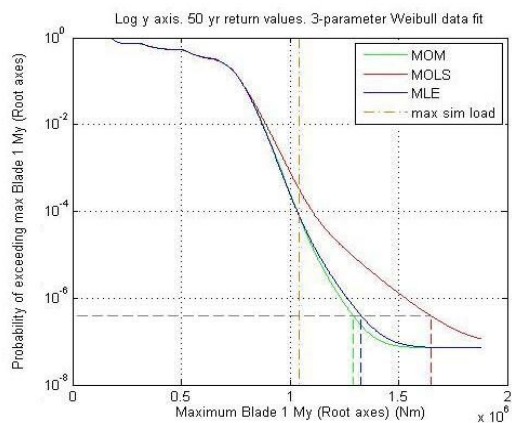


그림 9. 블레이드 루트 My의 50년 재현주기 하중(3PW)

### 3.3 척도계수 c의 예측

검별 분포함수의 경우 어떤 피팅방법이라도 원활히 피팅이 가능하여, 50년 재현주기 하중을 비교적 정확하게 예측할 수 있었으나, 3-파라미터 와이블 분포함수로는 MOM 피팅방법과 MLE 피팅방법만이 하중을 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

DLC1.1의 50년 재현주기 하중데이터를 기준으로, DLC1.3의 척도계수 c의 변화에 따른 하중을 계산하여 표 6~8과 같이 나타내었다. 이 표 6~8은 50년 재현주기 하중데이터에서 각 하중요소의 최대치를 기준으로 정규화한 자료이며, 정규화 된 하중데이터의 수치가 1이 될 때의 값이 본 연구에서 제시하고자하는 DLC1.1을 생략하기 위한 DLC1.3의 척도계수 c가 된다. 즉, 이 때 DLC1.3의 극한하중은 DLC1.1의 극한하중과 같다.

확률분포함수로 3-파라미터 와이블 분포함수를, 피팅방법으로 MOLS 피팅방법을 사용한 결과는 피팅에러로 인해 제외하고, 나머지 결과들을 종합해 보면, ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수 c의 크기는 블레이드 루트 Mx의 경우 3~5, 블레이드 루트 My의 경우 3~4 그리고 팁의 처짐 x-deflection의 경우 3~4.5로 각각 예측되며, 모두 처음 예측했던 범위인 2~5를 만족함을 알 수 있다.

표 6. 척도계수 c에 따른 블레이드 루트 Mx의 변화

Blade root Mx						
Probability distribution functions	Gumbel			3-parameter weibull		
	MOM	MOLS	MLE	MOM	MOLS	MLE
Scale factor c						
2	0.82	0.82	0.84	0.92	0.74	0.84
2.5	0.84	0.83	0.86	0.93	0.75	0.86
3	0.89	0.88	0.91	<b>0.99</b>	0.80	0.91
3.5	0.90	0.90	0.93	<b>1.01</b>	0.81	0.92
4	0.92	0.92	0.95	1.03	0.83	0.94
4.5	<b>0.96</b>	<b>0.95</b>	<b>0.98</b>	1.07	<b>0.86</b>	<b>0.98</b>
5	<b>1.13</b>	<b>1.12</b>	<b>1.16</b>	1.26	<b>1.02</b>	<b>1.15</b>

표 7. 척도계수 c에 따른 블레이드 루트 My의 변화

Blade root My						
Probability distribution functions	Gumbel			3-parameter weibull		
	MOM	MOLS	MLE	MOM	MOLS	MLE
Scale factor c						
2	0.80	0.80	0.83	0.84	0.66	0.81
2.5	0.85	0.85	0.88	0.89	0.70	0.86
3	0.92	0.92	<b>0.96</b>	<b>0.97</b>	0.76	0.94
3.5	<b>0.97</b>	<b>0.97</b>	<b>1.01</b>	<b>1.02</b>	0.80	<b>0.99</b>
4	<b>1.03</b>	<b>1.02</b>	1.07	1.08	0.84	<b>1.04</b>
4.5	1.13	1.12	1.17	1.18	0.92	1.15
5	1.13	1.12	1.17	1.18	0.92	1.15

표 8. 척도계수 c에 따른 팁의 처짐 x-deflection의 변화

Blade tip x-deflection						
Probability distribution functions	Gumbel			3-parameter weibull		
	MOM	MOLS	MLE	MOM	MOLS	MLE
Scale factor c						
2	0.72	0.71	0.75	0.73	0.57	0.70
2.5	0.81	0.80	0.84	0.82	0.64	0.78
3	0.86	0.85	0.90	0.87	0.69	0.84
3.5	<b>0.93</b>	0.92	<b>0.97</b>	<b>0.94</b>	0.74	0.90
4	<b>1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>1.05</b>	<b>1.01</b>	0.80	<b>0.97</b>
4.5	1.10	<b>1.08</b>	1.15	1.11	0.87	<b>1.06</b>
5	1.06	1.05	1.11	1.08	0.85	1.03

### 3.4 척도계수 c의 결정

상기 결과를 바탕으로 보다 상세한 DLC1.3의 척도계수 c를 추정하기 위하여, 그림 11~13과 같이 분산형 그래프를 그려 선형 추세선 및 수식을 구하였다. 그림 11~13의 각 그래프에 나타난 수식에서 y가 1일 때의 x값을 구하면, 확률분포함수 및 피팅방법별 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수 c가 된다. 이 값들을 표 9에 다시 정리하여 나타내었으며, 확률분포함수로 3-파라미터 와이블 분포함수를, 피팅방법으로 MOLS 피팅방법을 사용한 결과를 제외한 값 중에서, 보수적인 하중 값을 적용하기 위하여, 최대치인 4.51이 본 연구에서 최종적으로 구한 척도계수 c의 값이 된다. 이 척도계수 c는 확률분포함수, 피팅방법, 하중요소, 풍력터빈 모델, 풍속조건, 계산 횟수 등이 변수로 작용하며, 불확도가 크다는 점에 유의해야 한다.

표 9. ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수 c

Probability distribution functions	Gumbel			3-parameter weibull			
	MOM	MOLS	MLE	MOM	MOLS	MLE	
Fitting methods							
Scale factor c	Blade root Mx	4.42	<b>4.51</b>	4.14	3.22	5.76	4.15
	Blade root My	3.71	3.78	3.42	3.35	5.59	3.57
	x-deflection	4.10	4.22	3.78	4.02	6.18	4.36

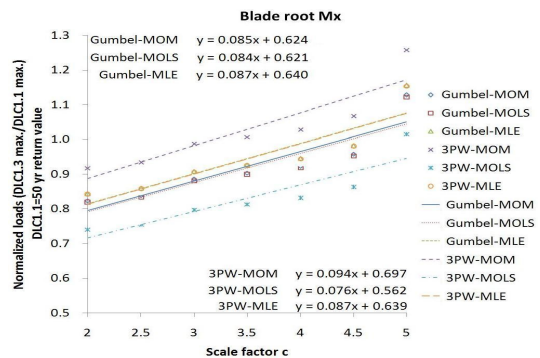


그림 11. 척도계수 c에 따른 블레이드 루트 Mx의 변화



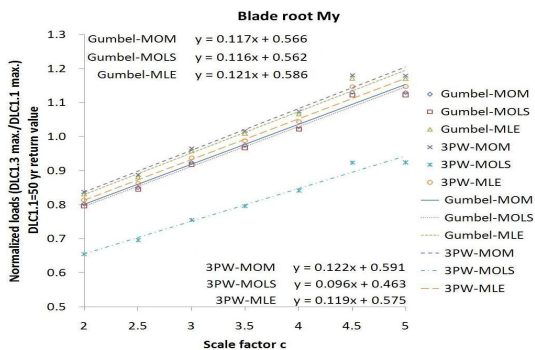


그림 12. 척도계수 c에 따른 블레이드 루트 My의 변화

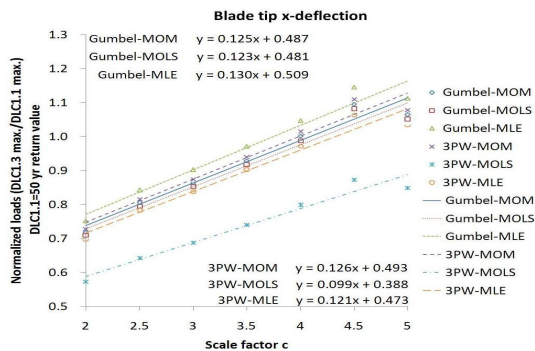


그림 13. 척도계수 c에 따른 팁의 처짐 x-deflection의 변화

#### 4. 결 론

5MW tripod 해상용 풍력터빈을 대상으로, DLC1.1의 통계적 접근방법과 DLC1.3의 결정론적 접근방법을 통하여 ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수 c의 값을 추정본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 50년 재현주기 하중예측 시, 풍속데이터의 수가 적을 경우에는 검벨 분포함수가 피팅방법에 관계없이 비교적 정확한 예측이 가능하다.
- (2) 3-파라미터 와이블 분포함수를 사용할 경우에는 MOM 피팅방법, MLE 피팅방법이 적합하며, MOLS 피팅방법은 풍속데이터 수에 영향을 크게 받는다.
- (3) 50년 재현주기 하중을 예측한 결과, 10분 하중데이터의 값에 비해 50년 재현주기

- 하중의 최대치가 각 하중요소별로 최소 17%이상, 대략 30~50%정도 증가하였다.
- (4) ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수 c를 증가시킴에 따라, 시동풍속 부근의 저풍속에서 난류강도가 100%를 넘는 경우가 발생하는데, 이는 물리적으로 존재할 수 없으며, 필터링해야 한다.
  - (5) DLC1.1을 생략하기 위한 DLC1.3의 척도계수 c를 추정본 결과, DLC1.1의 50년 재현주기 하중을 예측하면서 사용한 확률분포함수와 피팅방법에 따라 척도계수 c의 값이 차이가 있었으며, 최종적으로 4.51의 값을 구하였다. 단, 이 값은 분명 불확도를 포함하고 있음에 유의해야 한다.

본 연구에서는 개념설계된 5MW급 단일 풍력터빈을 사용하고, 풍속조건 및 반복계산 횟수 등을 제한하여, Bladed 4.1 소프트웨어를 통한 시뮬레이션 해석을 실시하였다. 따라서 결과 정확도에 대한 한계를 갖고 있으며, IEC 61400-1의 실험식들로부터 계산된 난류강도의 값들은 실제 측정결과와 차이가 있으므로, 이에 대한 비교검증이 이뤄져야 할 것이다.<sup>6)</sup>

또한 향후 타 풍력터빈 모델, 난류모델 등의 풍속조건, 반복계산 횟수 등을 변수로 고려하여, ETM의 난류표준편차에 대한 척도계수 c에 따른 풍력터빈의 극한하중 특성을 다각적으로 분석하는 연구가 더 진행 될 필요가 있다.

#### 후 기

이 논문은 지식경제부 한국에너지기술평가원 “풍력특성화대학원 인력양성사업”의 지원을 받아 연구한 논문임.

#### 참 고 문 헌

1. IEC, IEC 61400-1 ed. 3 Wind Turbines - Part 1: Design Requirements, IEC, 2005.

2. 남현우, 음학진, 김만응, 풍력 터빈의 난류 모델별 극한 하중 예측에 관한 연구, 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 논문집, 2010, pp.3642~3647.
3. Kai Freudenreich and Kimon Argyriadis, Wind Turbine Load Level Based on Extrapolation and Simplified Methods, Wind Energ. 11, 2008, pp.589~600.
4. 음학진, 남현우, 김만응, IEC61400-1 DLC1.1에 따른 풍력터빈의 극한하중, 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 논문집, 2010, pp.3648~3653.
5. (사)한국선급, 풍력발전 시스템의 기술 기준, (사)한국선급, 2008.
6. 김현구, 정태운, 장문석, IEC 61400 풍력표준을 적용한 제주도 김녕 난류강도 특성분석, 한국태양에너지학회 논문집 제30권 제6호 2010년도 12월호, 2010, pp.59~65.