수평축 풍력터빈 출력예측 및 극한하중평가

김범석†·김만응*·음학진*

Ultimate Load Assessment and Performance Prediction of a Horizontal Axis Wind Turbine

Bum-Suk Kim, Mann-Eung Kim and Hark-Jin Eum

Key Words: Design assessment(설계평가), Ultimate load(극한하중), Fatigue load(피로하중), Design load case(설계하중케이스), Annual energy yield(연간에너지산출)

Abstract

Design lifttime of a wind turbine is required to be at least 20 years. In the meantime, the wind turbine will experience a lot of load cases such as extreme loads and fatigue loads which will include several typhoons per year and extreme gusts with 50 years recurrence period as well as endless turbulence flow. Therefore, IEC61400-1 specifies design load cases to be considered in the wind turbine design and requires the wind turbine to withstand the load cases in various operational situations. This paper investigates the ultimate loads which the wind turbine will experience for 20 years and their characteristics based on the IEC61400-1 using an aero-elastic software, GH-Blade. And the performance characteristics of a wind turbine such as electrical power generation and annual energy yield are also investigated.

기호설명

α : 경사인자
c : 스케일변수
k : 형상변수
ρ : 공기밀도
A_d : 디스크면적
C_P : 출력계수
$f(V)$: 확률밀도함수
I_{15} : 허브높이에서 10분 평균풍속이 15 m/s 에서 난류강도의 특성 값
V_∞ : 유입풍속
V_{avg} : 평균풍속
V_{ref} : 정격풍속
V_Z : 보정위치에서의 풍속
V_{Zr} : 측정위치에서의 풍속
Z : 보정위치 높이
Z_r : 측정위치 높이

† 회원, (사)한국선급 에너지 · 산업기술센터
E-mail : bskim@krs.co.kr
TEL : (042)869-9506 FAX : (042)862-6031
* (사)한국선급 에너지 · 산업기술센터

1. 서 론

석유파동과 화석연료자원의 유한성에 대한 인식을 계기로 1973년부터 풍력에너지 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 에너지 환경문제의 심각성이 큰 논란이 되고 있는 현재에도 이산화탄소(CO_2) 등 유해물질 방출이 거의 없는 풍력에너지 산업은 지속적인 성장세를 이어가고 있다.

국내 풍력에너지 산업은 국가 신성장 동력원으로써의 그 역할이 점차 확대되어가고 있으며, 또

Table 1 General specification

Type	HAWT	Rotor overhang	3.3 m
Rated power	1.5 MW	Rotor position	Upwind
Class	IIA	Transmission	Gearbox
Rotor Dia.	70 m	Power control	Pitch
No. of blade	3	Fixed/Variable	Variable
Hub height	84 m	Spinner Dia.	3.5 m
Tower height	82 m	Cut-in speed	3.5 m/s
Blade set angle	1°	Cut-out speed	25 m/s

한 한국정부의 저탄소 녹색성장을 통한 국가 경쟁력 확보정책에 부합함으로써 적극적인 정부지원과 함께 관련기업체를 통한 국산화 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

현재 상용화가 가능한 풍력터빈의 크기는 지난 1980년대 개발된 대형 프로토타입(prototype) 풍력터빈의 수준을 넘어서고 있으며, 가변속도 운전(variable speed), 블레이드 전범위제어(full span control), 블레이드 및 타워의 소재개발등과 같은 분야에 있어 많은 연구가 진행되고 있다.[1]

풍력터빈은 경제성을 이유로 20년 이상의 설계수명이 확보되어야 하며, 제조자에 의해 설계 및 생산된 풍력터빈은 인증을 획득하기 위해 설계평가 및 성능평가 절차를 거치게 된다. 설계평가는 시동, 발전, 정상정지, 비상정지, 아이들링 및 정지 상황에 대해 풍력터빈이 수명기간동안 경험하게 될 다양한 외부조건(난류, 극치돌풍, 극치풍향변화, 극치풍속변화) 및 고장(fault) 조건 등을 고려한다.

이러한 풍력터빈 시스템의 안전요구사항은 설치지역 및 풍속과 난류강도에 따라 등급이 구분되고 풍력터빈 운전상태에 따라 고려되어야할 각종 하중조건에 대한 요구사항이 IEC61400-1[2]에 규정되어있다. IEC61400-1 및 이를 반영한 인증기관의 자체 기준에 의한 설계평가는 극한하중(ultimate load), 피로하중(fatigue load)에 의한 강도평가[3] 및 풍력터빈의 출력성능 평가를 목적으로 한다. 본 연구에서는 1.5 MW급 IEC Class IIA(고난류강도) 조건으로 설계된 풍력터빈에 대한 평가가 수행되었으며, 출력특성 및 극한하중특성에 관한 정량적인 결과를 도출하여 풍력터빈의 출력 및 극한강도 특성을 이해하고자 한다.

2. 설계하중평가 일반사항

Table 2 Detailed input data

General specification	Transformation
Blade geometry	Generator
Blade mass distribution	Power loss&efficiency
Blade mass integral	Pitch actuator
Blade stiffness	Power control system
Hub mass and inertia	Gain schedule
Tower geometry	PI torque control speed
Tower mass & stiffness	PI power control speed
Tower material property	Rotor modes (0°, 10°, 20°, 90°)
Lift&drag coeff.(airfoils)	Tower modes
Nacelle geometry	Drag coeff. (tower)
Nacelle mass	Drag coeff. (nacelle)

Table 3 IEC class IIA - basic parameter

V_{ref}	42.5 m/s
V_{avg}	8.5 m/s
I_{15}	0.18
a	2

2.1 풍력터빈 모델

본 연구에 사용된 풍력터빈 모델은 1.5MW 급의 IEC Class IIA 고난류강도 조건에 의해 설계된 모델이며, 수평축 풍력터빈이다. 3 블레이드 전방향(upwind) 시스템이며, 로터 블레이드 직경은 70 m, 허브는 지상으로부터 84 m 지점에 위치하고 중공 원통형 강재타워구조이다. 출력제어방식으로 전 범위 피치제어방식을 사용하며, 각각의 블레이드는 독립적인 피치 구동시스템에 의해 제어된다. Table 1에 풍력터빈모델 정보를 나타내었다.

2.2 설계하중평가 요구사항

IEC 61400-1은 풍력터빈이 20년의 설계수명 동안 각종 극한하중과 피로에 대해 구조적으로 안전한지에 대한 평가를 요구한다. 평가의 종류는 풍력터빈의 운전상태와 외부조건이 결합된 설계하중케이스(DLC)로 구분된다. 설계평가기관은 설계하중평가를 위해 제조업체로부터 풍력터빈 시스템에 대한 도면 및 table 2에 나타낸 항목 등에 대한 상세정보를 제공받아야한다.[4]

2.3 하중조건

극한하중평가를 위한 하중데이터 취득지점은

Table 4 Safety system trip mode

Conditions	Action
Generator over power at 1800 kW	E-Stop
Generator over speed at 1980 rpm	E-Stop
Yaw error greater than 30° for 5 sec	E-Stop
Pitch error: 3° different between largest and smallest pitch angle	E-Stop
Pitch error between demanded and actual of greater than 2° for 1sec	E-Stop
Grid loss	E-Stop

블레이드 루트부, 로터 중심, 요베어링, 타워상부, 타워기저부이다. Wind shear 모델로써 standard power law model을 적용하였으며, 난류모델로써 비등방성 von karmann 모델을 적용하였다. 정상풍속 조건에 대해 수행된 설계하중케이스를 제외한 모든 케이스에 대해 dynamic wake 모델을 적용하였다. 본 설계하중조건은 IEC Class IIA를 적용하며 Class IIA 조건은 table 3과 같다.

안전시스템 작동모드는 table 4와 같이 정의되며 이를 만족하는 경우 비상정지 모드가 작동된다. 블레이드 피치율의 변화가 초당 10°를 초과하는 경우에 블레이드는 페더링(feathering) 위치로 제어되고 또한 비상정지 버튼이 작동하는 순간 블레이드가 페더링 위치로 제어되며 비상정지되는 상황이 고려되었다. 풍력터빈의 정상정지 상황에 대한 모델링 또한 필요하며, 정상정지 상황에서 피치율의 변화는 초당 4°, 최종피치각도는 94°, 로터 블레이드 회전속도가 2 rpm에 도달하는 경우 기계적 브레이크 장치의 작동이 시작되도록 모사하였다. 아이들링(idling) 운전상황에서 블레이드 피치각도는 모두 94°로 고정된다.

2.4 설계하중케이스

풍력터빈의 극한하중 평가시 고려되어야하는 설계하중케이스는 풍력터빈의 운전상황에 따라 table 5와 같이 구분될 수 있다. Table 5에서 피로하중에 대한 고려사항은 포함되어있지 않으며, 발전, 발전 중 고장발생, 시동, 정상정지, 비상정지, 아이들링, 정지 및 고장발생 조건에 대한 상황이 고려되었다.

DLC1.1은 정상난류모델(NTM) 조건으로써, 10

Table 5 Design load case (DLC)

Design situation	DLC	Wind conditions		Type
Power production	1.1	NTM	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	1.3	ECG	$V_{hub}=V_r$	U
	1.4	NWP	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	1.5	EOG1	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	1.6	EOG50	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	1.7	EWS	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	1.8	EDC50	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	1.9	ECG	$V_{hub}=V_r$	U
Power production plus occurrence of fault	2.1	NWP	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	2.2	NWP	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
Start up	3.2	EOG1	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
	3.3	EDC1	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
Normal stop	4.2	EOG1	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
Emergency stop	5.1	NWP	$V_{hub}=V_r$ or V_{out}	U
Idling	6.1	EWM	$V_{hub}=V_{e50}$	U
Parked and fault conditions	7.1	EWM	$V_{hub}=V_{e1}$	U

분간의 비정상해석이 진행되고 3차원 및 3방향 비등방성 von karmann 난류모델을 적용한다. 평균풍속이 11.5 m/s 및 25 m/s 인 경우에 대해 각각 요에러(-10°, 0°, 10°) 변화를 적용한다.

DLC1.3은 극치 코히어런트 돌풍(ECG) 조건으로써, 11.5 m/s 풍속조건에 돌풍속도 V_{cg}=15 m/s, 풍향변화 ±62.6°를 적용하고 요에러 변화를 적용한다.

DLC1.4는 정상풍속프로파일(NWP) 모델을 적용하며, 외부 전기적 고장조건을 구현한다. 시스템에서 외부 전기적 고장상황은 계통상실(grid failure)에 해당하며 이는 DLC1.5에서 고려되는 상황이므로 추가로 적용하지 않았다.

DLC1.5는 계통상실에 관한 상황을 모사하며, 연간발생 극치운전돌풍(EOG1) 조건을 적용한다.

초기 풍속범위는 11.5 m/s와 25 m/s이며, 8.2 m/s와 14 m/s의 돌풍이 10.5초간 지속되도록 모델링 한다. 돌풍이 불어오는 시점에서 특정 시간간격을 두고 안전 및 제어시스템에 의해 계통이 분리되는 현상이 고려되어야 하고, 요에러 또한 고려되어야 한다.

DLC1.6은 50년 주기의 극치운전돌풍(EOG50) 조건을 적용한다. 초기 풍속범위는 11.5 m/s와 25 m/s이며, 10.9 m/s, 18.7 m/s의 돌풍이 14초 동안

지속되도록 모델링한다. 요에러 또한 고려되어야 한다.

DLC1.7은 극치풍속변화(EWS)에 대한 상황이며, 11.5 m/s와 25 m/s의 초기 풍속조건에 대해 풍속변화(수평, 수직)가 요에러 변화에 따라 적용되어야 한다.

DLC1.8은 11.5 m/s와 25 m/s의 초기 풍속에 대해 돌풍의 방향변화에 대한 상황이며, 50년 주기의 극치 풍향변화(EDC50)를 반영한다. 돌풍의 방향변화는 ±54.1°, ±42.7°가 요에러에 따라 적용된다.

DLC1.9는 극치코히어런트 돌풍 모델을 적용하며, 11.5 m/s의 풍속조건에 대해 15 m/s의 돌풍이 10초간 지속되는 상황이다. 마찬가지로 요에러에 대한 고려가 요구된다.

DLC2.1과 DLC2.2는 발전 중 고장발생 상황에 따른 비상정지 절차에 관한 내용을 말하며, 정상풍속모델(NWP)을 적용한다. 발전 중 고장발생 조건으로써 요에러, 블레이드 피치제어에러, 블레이드 피치제어가 불가능한 상황 등이 고려되었다.

DLC3.2와 DLC3.3은 풍력터빈 시동특성에 관한 내용이며, 1년 주기의 극치운전돌풍(EOG1) 조건과 극치풍향변화(EDC) 조건을 반영한다.

DLC4.2는 재현주기 1년의 극치운전돌풍 조건 하에서의 정상정지 상황을 구현하며, 11.5 m/s와 25 m/s의 초기 풍속조건을 고려한다. 돌풍이 불어오기 시작하는 시점부터 특정시간 후에 풍력터빈이 정상정지 되는 상황을 구현한다.

DLC5.1은 정상풍속프로파일 모델을 적용하며, 비상정지 버튼이 작동된 상황에서 풍력터빈의 비상정지 상황을 구현하며, 고속 샤프트에 장착된 과속센서(over speed transducer)의 고장에 의한 비상정지 상황 또한 고려되어야한다.

DLC6.1은 아이들링(idling) 상황에서 극치풍속 모델을 적용하며, 모든 블레이드는 페더링(94°) 위치에 놓여있는 것으로 모사된다.

DLC7.1은 극치풍속모델을 적용하고 정지 및 고장상황을 모델링한다. 블레이드 피치제어 시스템의 고장으로 인해 피치각도가 특정각도로 고정되는 고장상황을 고려하며, 요 베어링의 고장에 의해 요 각도가 특정각도로 고정된 상황을 모델링한다. 이때 풍속조건은 44.63 m/s를 적용하고, 로터의 azimuth 각도 변화에 따른 하중해석을 수행한다.

3. 출력성능예측

3.1 출력성능예측

극한하중 및 피로하중 평가와 더불어 풍력터빈 시스템의 출력성능평가 또한 중요한 설계평가 과정의 일부이다. 설계된 풍력터빈의 출력특성 예측은 설계하중케이스 해석과 마찬가지로 풍력터빈 시스템의 상세 하드웨어 정보 및 제어시스템 등의 정보입력을 바탕으로 수행된다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 1.5 MW 풍력터빈의 풍속변화에 따른 출력예측 결과를 나타낸다.

해석대상 풍력터빈은 시동풍속이 3.5 m/s이므로 풍속 3.5 m/s부터 발전을 시작해서 정격풍속 12 m/s에서 1.5 MW의 출력을 발생한다. 12 m/s 이후로 1.5 MW의 출력이 지속적으로 유지되고 있으며, 이는 피치제어에 의한 최대 출력제어 방식을 적용하기 때문에 정격풍속 이후의 과출력

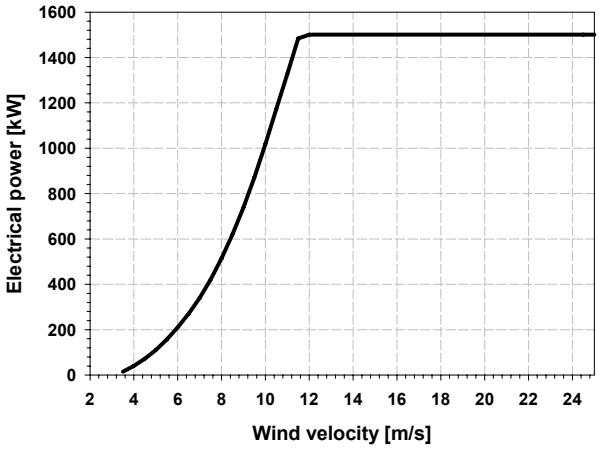

Fig. 1 Electrical power

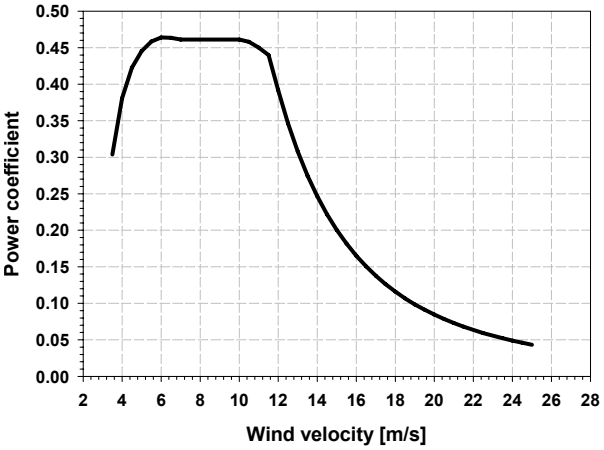

Fig. 2 Power coefficient

및 저출력제어가 가능하다.

Fig. 2는 풍속변화에 따른 출력계수(power coefficient) 변화를 나타낸다. 출력계수는 풍력터빈 시스템의 발전효율을 의미하며, 최대출력계수는 6 m/s에서 약 0.47 정도로 나타났다. 풍속구간 5.5 m/s에서 10 m/s까지 0.46 ~ 0.47 구간의 비교적 높은 출력계수 값을 일정하게 유지한다. 풍력터빈 출력계수는 식 1과 같이 정의되며, 분모 항에 기술한 바와 같이 전기에너지로 변환 가능한 바람 에너지의 양은 풍속의 세제곱에 비례하므로, Fig. 2에서 풍속 10 m/s 이후의 출력계수 값이 급격히 감소하는 특징을 보인다.

$$C_P = \frac{Power\ extracted}{Power\ available} = \frac{Power}{\frac{1}{2}\rho\, V_\infty^3\, A_d} \qquad (1)$$

4. 극한하중평가

4.1 극한하중평가

각각의 하중요소에 대한 극한하중의 계산 및 평가를 위해 GH-Bladed v3.8을 사용하였다. 2.4절의 설계하중케이스에 기술된 하중조건에 따라 수행된 해석결과는 공력(aerodynamic), 자중(self-weight), 회전관성(rotational inertia), 동적관성(dynamic inertia)에 대한 영향을 모두 고려한다.[5]

동하중(dynamic load)에 대한 부분은 타워, 블레이드, 구동장치계, 전기 및 제어 시스템의 영향을 포함하며, 기계적제동장치(mechanical brakes)에 의한 하중 또한 기능적 하중(functional load)으로 고려되었다. 극한하중해석을 위해 table 5에 나타낸 바와 같은 하중해석케이스를 따라 해석을 수행하였다.

본 연구에서 수행된 극한하중 해석은 IEC IIA에서 요구하는 모든 요구사항을 포함하며, 각각의 하중해석케이스에 대해 최대 및 최소하중을 발생시키는 하중케이스를 구하여 table 7~9에 각각 나타내었으며, table 6을 참조하여 안전계수 값을 적용하였다.

블레이드 루트부(1.75 m), 정지 허브부(stationary hub), 회전 허브부(rotating hub), 타워 기저부(0 m) 및 타워 최상단부(84 m)에 대해 각각 Mx, My, Mxy, Mz, Fx, Fy, Fxy, Fz의 해석 결과를 얻었으며, 대표적으로 블레이드 루트부, 회전 허브부, 타워 최상단부에 대한 결과만을 나타내었다. 각 조건별 최대 · 최소값은 테이블에 굵은 실선테두리를 사용하여 표시되었으며, Fig. 3에 시스템좌표계를 나타내었다. 예를 들어 각 하중케이스 해석결과 중 x 방향 최대모멘트가 발생하는 설계하중조건을 살펴보면, 블레이드 루트로부터 1.75 m 지점의 경우 DLC 1.5b에서 최대값이 나타난다.

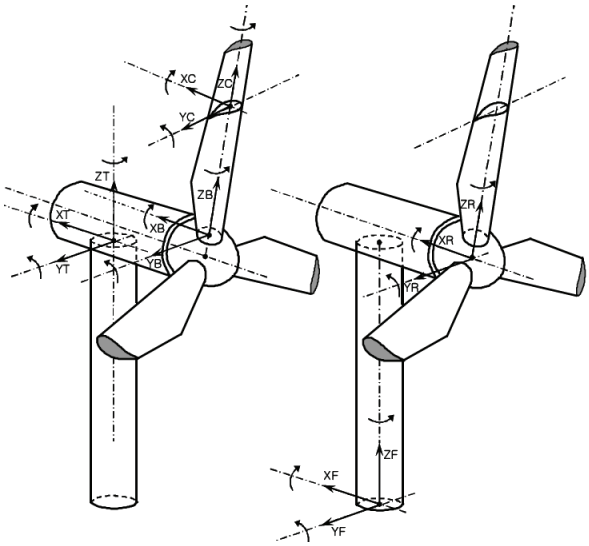

Fig. 3 Coordinate system for the wind turbine[6]

Table 6 Partial safety factors for loads

Type	PSFL
Abnormal safety factor, Load case 2.2, 7.1	1.10
Normal and extreme safety factor, All other load cases	1.35
Transport and erection safety factor, Load case 8.1	1.50

Table 7 Ultimate load-blade root station (1.75 m)

			My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz	Mx
		Load case	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN	kNm
My	Max	1.5b	6561.3	6608.3	-64.9	416.1	-63.5	421.0	1682.6	786.7
My	Min	1.5o	-2298.7	2300.8	-42.6	-89.6	-26.2	93.4	912.3	-99.3
Mxy	Max	1.5b	6553.2	6613.9	-71.5	416.4	-70.6	422.4	1697.8	893.9
Mxy	Min	6.1m	0.056	0.63	-4.37	10.0	-15.9	18.8	23.6	-0.63
Mz	Max	7.1j	110.8	1396.9	47.8	7.98	95.6	96.0	51.1	-1392.5
Mz	Min	1.5b	6513.9	6582.2	-79.4	414.9	-71.5	421.0	1732.9	945.9
Fx	Max	1.5b	6556.6	6613.0	-69.3	416.4	-68.6	422.1	1693.0	861.8
Fx	Min	2.1d	-2113.0	2113.9	-19.7	-101.5	-12.5	102.2	370.8	-60.2
Fy	Max	6.1a	325.6	2683.0	23.8	31.4	168.8	171.7	-55.7	-2663.2
Fy	Min	6.1e	-1331.0	3433.3	-19.1	-80.9	-206.2	221.5	-62.7	3164.8
Fxy	Max	1.5b	6543.5	6610.3	-75.2	416.2	-72.9	422.5	1708.8	937.3
Fxy	Min	6.1k	-139.5	481.5	-11.2	-0.007	-0.035	0.036	-18.4	460.9
Fz	Max	1.5b	3542.8	3543.0	-63.5	245.4	-2.21	245.4	2553.1	37.1
Fz	Min	6.1c	-5.36	310.3	-20.5	10.3	9.41	14.0	-64.3	310.3
Mx	Max	6.1e	-279.6	3367.8	-5.64	-22.8	-206.2	207.5	-61.4	3356.2
Mx	Min	6.1a	330.8	2695.1	24.1	32.2	168.6	171.6	-55.6	-2674.7

Table 8 Ultimate load-rotating hub

			Mx	My	Mz	Myz	Fx	Fy	Fz	Fyz
		Load case	kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max	7.1c60	3342.4	681.9	118.7	692.1	59.9	-247.1	-251.4	352.5
Mx	Min	7.1b0	-1230.9	1675.0	-67.1	1676.4	148.4	297.9	18.2	298.5
My	Max	2.1g	518.3	4246.9	-597.3	4288.7	163.3	-440.5	-124.5	457.8
My	Min	1.1f	1043.4	-3323.4	-92.8	3324.7	81.7	-124.9	371.4	391.8
Mz	Max	1.1f	1023.0	936.5	2969.4	3113.6	77.0	386.2	-7.69	386.3
Mz	Min	1.5o	-168.6	112.0	-3401.3	3403.1	6.90	-369.1	-71.4	376.0
Myz	Max	2.1g	-296.5	4133.0	-1355.7	4349.7	51.1	258.4	-265.7	370.6
Myz	Min	6.1k	18.2	0.48	-0.15	0.50	41.8	387.5	60.0	392.1
Fx	Max	1.5b	498.4	-584.8	1.85	584.8	1044.2	409.0	-51.1	412.2
Fx	Min	2.1h	828.4	-1428.0	781.9	1628.1	-193.9	-327.3	-184.0	375.4
Fy	Max	6.1j	-3.80	-185.0	-200.4	272.8	-15.1	491.4	-105.4	502.6
Fy	Min	6.1o	-19.4	-824.2	-111.9	831.7	-23.3	-505.8	-177.1	535.9
Fz	Max	6.1j	158.9	607.3	524.4	802.4	8.14	-62.2	494.7	498.6
Fz	Min	6.1a	60.3	223.0	-477.9	527.4	36.2	-102.1	-502.4	512.6
Fyz	Max	6.1o	-19.4	-824.2	-111.9	831.7	-23.3	-505.8	-177.1	535.9
Fyz	Min	6.1n	-29.4	868.4	-1108.5	1408.2	-6.27	70.8	145.4	161.7

Table 9 Ultimate load-tower station height=82 m

			Mx	My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz
		Load case	kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max	7.1a60	3687.3	-848.6	3783.7	407.4	52.5	-46.6	70.2	-989.0
Mx	Min	7.1h	-2515.7	879.5	2665.0	-233.4	44.0	3.47	44.1	-889.9
My	Max	1.5o	555.0	2478.3	2539.7	-595.7	190.9	-76.1	205.5	-1102.9
My	Min	2.1g	838.6	-4732.2	4805.9	1068.4	65.1	57.9	87.2	-1124.4
Mxy	Max	2.1g	838.6	-4732.2	4805.9	1068.4	65.1	57.9	87.2	-1124.4
Mxy	Min	6.1b	-0.17	-0.57	0.59	-241.7	44.7	-15.7	47.3	-1076.3
Mz	Max	2.1g	1176.4	1232.3	1703.6	3808.6	190.6	-121.1	225.8	-1171.4
Mz	Min	2.1g	390.2	-1173.2	1236.4	-4057.4	91.0	63.4	110.9	-1079.1
Fx	Max	1.5b	-143.3	1133.1	1142.1	486.5	1035.6	-0.036	1035.6	-1201.0
Fx	Min	2.1h	863.2	-2901.4	3027.1	-889.7	-407.0	-27.8	407.9	-1053.6
Fy	Max	6.1a	-626.9	36.1	627.9	-872.0	47.1	435.1	437.6	-1044.4
Fy	Min	6.1j	1056.1	-1198.5	1597.5	558.5	-34.2	-534.8	535.9	-1036.2
Fxy	Max	1.5b	-143.3	1133.1	1142.1	486.5	1035.6	-0.036	1035.6	-1201.0
Fxy	Min	4.2d	94.1	-980.0	984.5	129.9	0.049	0.028	0.057	-1094.3
Fz	Max	7.1c70	2714.9	-366.2	2739.5	-25.7	46.8	9.58	47.8	-789.9
Fz	Min	1.5b	-135.7	785.4	797.0	921.7	997.7	12.8	997.7	-1215.0

회전하는 허브에서의 경우 DLC 7.1c60에서 최대값이 확인되었으며, 타워 최상단부의 경우 DLC 7.1a60에서 x 방향 최대모멘트가 작용하고 있다.

DLC 1.5b는 요에러가 0°이고, 재현주기 1년의 극치운전돌풍이 불어오는 상황에서 제어 및 안전 시스템에 의해 계통이 분리되는 조건을 모사하며, DLC 7.1c60은 극치풍속이 불어오는 조건에서 블레이드 1번 피치각도가 60°, 블레이드 2, 3번은 94°로 고정되고 요에러가 15°로 고정된 상황을 모사한다. DLC 7.1a60은 요에러가 -15°로 고정된 상황을 제외하고 DLC 7.1c60과 동일하다.

이상과 같이 풍력터빈 블레이드, 허브, 타워 등 특정요소의 특정위치에 작용하는 극한하중 해석을 수행하고 최대하중(힘, 모멘트 등)이 작용하는 설계하중조건을 파악한 후 구조 건전성 평가 및 풍력터빈 요소 설계시 이를 반영한다.

5. 결론

본 연구에서는 1.5 MW급 풍력터빈에 대한 출력특성 및 극한강도평가를 수행하였으며, 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

1. 해석모델 풍력터빈은 풍속 12 m/s에서 1.5 MW의 출력을 발생시키며, 최대 출력계수는 0.47이다.

2. IEC 61400-1에서 요구하는 극한하중 해석을 위한 설계하중케이스를 충분히 고려하여 블레이드 루트, 허브, 타워에 대한 극한강도 평가를 수행하였으며, 최대 · 최소 하중특성을 정량적으로 분석하였다.

참고문헌

(1) Korean Resister of Shipping, 2008, "Technical Guidelines for Wind Turbines," *Korean Resister of Shipping,* pp. 4~5.

(2) IEC 61400-1, 1999, "Wind Turbine Generator Systems-Part 1: Safety Requirements," *IEC.*

(3) Hark-Jin Eum, Mann-Eung Kim, Bum-Suk Kim, Jong-Bum Won, 2008, "Characteristics of Fatigue Load in a Wind Turbine," *Proc, of the 2008 Spring Conference of KWEA*, pp.33~37.

(4) Hark-Jin Eum, Mann-Eung Kim, Bum-Suk Kim, Jong-Bum Won, 2007, "Conformity Evaluation of The Wind Turbine System Design," *Proc, of the 2007 Autumn Conference of KWEA*, pp.72~76.

(5) E.A. Bossanyi, 2007, "GH Bladed Theory Manual", *Garrad Hassan and Partners Ltd.*

(6) Korean Resister of Shipping, 2008, "Technical Guidelines for Wind Turbines," *Korean Resister of Shipping.* pp.123~124.