

750kW급 직접구동형 풍력발전기의 부하계산

손영욱*, 박인수*, 권세진*, 김영찬*, 손정봉*, 김경렬*, 정진화*, 전중환*, 류지윤**

Load Calculation of a 750 kW Direct-drive Wind Turbine Generator System

Y.U. Sohn*, I.S. Park*, S.J. Kwon*, Y.C. Kim*, J.B. Son*, K.R. Kim*, C.W. Chung,
J.H. Chun*, J.Y. Ryu**

Key Words: Wind turbine generator(풍력터빈), Load calculation(부하계산), Load cases(부하유형)

ABSTRACT

Load calculation is indispensable for the construction of a large wind turbine generator system (WTGS). In procedures of load calculation, all conditions affecting to WTGS such as environment of site, operation, transport and installation have to be considered systematically. So the certification of WTGS is issued by assuring the load calculation. This work shows the generals of load calculation briefly and introduces the characteristics and results of load calculations for the 750 kW direct-drive WTGS (KBP-750D) which is under development by the consortium of POSTECH and UNISON.

1. 서론

풍력터빈에 대한 부하계산(Load calculation)은 인명 및 시설의 안전은 물론 풍력발전의 효율성과 신뢰성을 위하여 풍력발전장치의 설계에 있어서 매우 중요한 과정이다. 따라서 부하계산은 단순설계부하를 의미하는 것이 아니라 부하계산이라는 과정을 통하여 풍력터빈의 수명기간 동안 예상되는 모든 조건들이 설계에 반영되게 함으로써 상기의 목적들을 달성하여야 한다. 개별의 풍력발전기나 그것이 설치될 지역 또는 부지의 자연환경에 따라 예상되는 운전조건이 모두 다르고 풍력발전 사업자의 요구도 다르기 때문에 일률적으로 부하의 유형을 적용할 수 없다. 또 풍력산업이 확대되면서 신뢰도가 높고 대량생산에 대한 건설비용을 경감하기 위해서 여타 산업과 같이

일관성 있는 설계조건이 도출이 요구되었다. 이를 위해서 산업계의 표준(Standard)이 개발되어 적용되고 있다.

풍력터빈에 대한 대표적인 표준으로 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)의 표준⁽¹⁾(IEC 64100-1, Wind Turbine Generator Systems)과, 독일의 선박인증회사인 Germanischer Lloyd의 GL 규격⁽²⁾(GL Rules and Regulations) 등이 있다. 이러한 규격들은 구체적인 설계기법을 명시하는 것이 아니라 이용되는 설계기법에 대한 일관성을 가진 지침을 제시하고 있다.

본 논문에서는 풍력발전장치의 부하계산에 대한 일반적인 사항을 간략하게 언급하고, (주)유니슨을 주관기관으로 하여 포항공대의 풍력에너지연구센터가 위탁 설계 중인 750 kW급 Gearless 직접 구동형 풍력발전기의 부하계산 사례에 대하여 제시하고자 한다.

* 포항공과대학교 풍력에너지연구센터

** (주) 유니슨

E-mail : younguk@postech.edu

2. 부하계산의 일반

2.1. 부하계산을 위한 조건

부하 계산은 풍력발전장치가 수명기간동안 예상되는 모든 조건에 대하여 충분한 안전여유를 가질 수 있는 가에 대한 검증작업으로 설계의 한 과정이다. 부하유형들(Load cases)은 풍력터빈이 각종 외부조건 (External conditions)에 대하여 적절하게 운전될 수 있는 설계 고려사항들의 조합으로 구성되며, 외부조건은 일상적인 바람조건과 돌풍과 같은 비일상적인 바람조건으로 분류된다. 그 이외 결빙이나 파도 등등과 같은 환경조건도 특정한 부지에서는 반영하여야 한다.

풍력터빈의 수명 기간 중에 예상되는 가장 중요한 조건으로서 운전조건과 일시조건으로 분류하여 설계고려사항을 도출한다. 전력생산을 위한 정상운전의 전과정(cut-in, cut-out 포함)이나 풍력터빈의 무부하 운전 그리고 운전대기 상태 등이 운전조건에 속하고, 수송, 현장의 조립 및 설치, 고장, 유지보수와 시험 등이 일시조건으로 분류된다. 일반적으로 외부조건 즉 바람의 조건은 정상조건과 극한조건으로 분류하는데, IEC61400-1의 규격에는 정상풍, 난류, 극한간섭돌풍, 풍향의 극한변화, 극한운전돌풍, 극한풍속, 극한전단 등으로 세분하여 조건들을 분류한다. 이들 외부조건은 다시 풍력발전장치가 설치되는 부지의 인위적, 자연적 조건들을 반영하여야 한다. 즉 타워 그림자효과에 의한 바람의 교란, 풍차단지에서 인접 풍차의 후류 (Wake)에 의한 교란 그리고 풍차 날개의 방향과 바람의 방향의 불일치 (Yaw error)에 의한 영향 등은 부하에 매우 큰 영향을 줄 수 있다.

위에서 언급한 운전조건들과 외부조건을 조합하면 풍력발전기의 설계과정에서 검증하여야 할 설계 부하유형이 구성된다. 예를 들면 정상 운전조건과 정상 외부조건의 조합, 정상 운전조건과 극한 외부조건의 조합, 풍력터빈의 고장상황과 그것이 노출되는 외부조건(극한 외부조건 포함)의 조합, 수송, 설치 및 유지보수 상태와 외부조건의 조합 등등이 설계부하조건들 (Design load cases)을 구성한다. 이들 설계부하 조건들에 대한 표준으로 IEC61400-1 7장이나 Germanischer Lloyd 4장에 자세하게 분류하고 있다.

대용량 풍력발전장치의 설계지침은 주로 IEC 61400-1과 GL의 규격을 이용하고 있다. 두 종류의 규격사이에 약간의 사소한 차이는 있으나 근본적인 차이는 별로 크지 않다. 다만 일부의 계산 상수나 factor 등의 차이가 있으나 전체적으로 보면 한 부분의 차이를 다른 부분의 차이로 상쇄되고 있다. 예를 들면 허브높이에서 풍속을 예측할 때 높이에 따른 전단계수를 IEC와 GL이 각각 0.2와 0.16을 쓰는 반면 바람의 유입에 대한 경사각은 각각 8° 와 10° 를 쓴다. 그리고 Fig. 1에서 보는 것과 같이 난류강도를 IEC는 풍속에 따라서 약간의 변화를 수반하는 반면 GL의 경우 일정한 값을 이용한다. 극한 돌풍에 대해서 GL 규정은 비교적 단순한 상수값을 사용하여 적용하는 반면에 IEC 61400-1 규정은 보다 자세하게 사인파형의 값을 이용하여 보다 현실적으로 접근하고 있다. 안전율을 고려한 단순한 상수값을 이용하는 GL 규정보다 보다 자세하고 현실적으로 접근하는 IEC규정을 따르는 것이 보다 합리적이다.

IEC 61400-1에서 풍속등급은 중위도 지방의 비교적 평평한 지형을 대상으로 설정된 사항들이다. 우리나라는 산악지역이 많아 약간의 차이가 있지만 중위도 지역에 위치하므로 우리나라의 독자적인 규격이 개발되기 전까지는 이 풍속등급을 그대로 사용하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 실제로 부하계산을 하는데 있어서 표준을 엄격하게 서로 배타적으로 적용하는 것이 아니라 어느 하나를 근간으로 하고 다른 표준이나 대안을 이용하는 유연성이 필요하다.

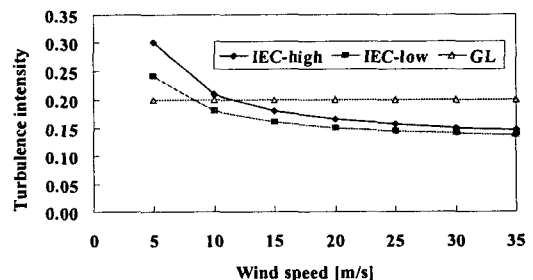


Fig. 1 Turbulence intensities defined by IEC and Germanischer Lloyd

2.2. 설계부하

풍력터빈의 부하는 회전으로 인한 반복적(cyclic)

특성을 가지고 있으며 여기에 풍속, 풍향의 변화와 전단 및 와류에 의해서 부하의 크기와 특성이 달라진다. 즉 설계부하의 대부분은 바람으로부터 발생하는 공기역학적 하중이다. 날개에는 공기역학적 하중에 자중과 회전에 따른 원심력과 관성력이 부가되며, 타워와 나셀에는 날개로부터 전달되는 하중, 공기역학적 항력과 중력이 작용한다. 부하조건에 따른 하중의 특성에 따라서 풍차의 부분품에 대한 분석을 극한하중과 피로하중으로 각각 분류하여 평가하여야 한다. 또 거의 모든 풍력터빈이 난류가 강한 지역에 설치되기 때문에 피로와 같은 불규칙한 반복하중에 대한 검증이 반드시 포함되어야 한다.

위에서 언급한 일반적인 부하에 더하여 특정 부지에 대한 특별한 고려가 필요한 경우가 있다. 예를 들면 해상 (Off-shore)의 풍력발전장치라면 타워에 파도나 간만에 따른 부하를 고려하여야 하며 혹한지역에 설치될 장치라면 날개의 결빙에 대한 고려가 필요하고, 지진의 발생빈도가 높은 부지라면 이에 대한 부하도 고려되어야 한다.

일반적으로 부하계산을 위해서 바람과 구조물의 상호작용을 고려한 구조역학 모델을 개발하여 이용하고 있는데, 바람에 대한 통계적인 모사를 하는 난류모델, 난류가 고려된 바람으로부터 발생하는 공력부하를 예측하는 공력모델, 풍력터빈의 날개피치(pitch), 요(yaw), 브레이크 등을 제어하는 제어알고리즘 등이 포함되어 있다. 대표적인 컴퓨터 코드로는 ADAMS WT (NREL, 미), BLADED (Garrad Hassan, 영)와 FLEX 5 (Uni. of Denmark, 덴마크) 등이 있다. 그 외에도 풍력터빈 설계기관들의 고유한 In-house code들을 직접 개발하여 이용하고 있다.

3. KBP-750D의 주요특성

포항풍력연구센터가 설계중인 750 kW급 풍력발전장치(모델명:KBP-750D)는 고속축과 저속축의 회전비를 조절하는 기어장치를 사용하지 않고 터빈날개의 회전축이 직접 Radial flux 영구자석형 동기발전기에 연결되어 정상상태에서 정격회전수까지 연속적으로 출력운전을 할 수 있다.

Fig. 2에서 보는 것과 같이 정격풍속 이하에서 3-blade형 풍력터빈이 실제적으로 얻을 수 있는

최대의 성능곡선(C_p)을 가지고 출력운전이 되며 정격풍속 이상에서는 모든 공력계수들을 적절하게 제어하여 회전날개에 가해지는 공력을 줄여 실제 Fig. 3과 같이 정격출력에서 운전되는 특성을 가지게 한다. 이러한 특성을 가지게 하기 위해서 익형의 공력변수들을 조절하여 인입풍속에 대한 날개끝 풍속의 비(Tip speed ratio)를 최대 7.5로 유지되게 하여 정격회전수 이상에서 바람에 의한 공력부하가 급격하게 높아지는 것을 억제하였다.

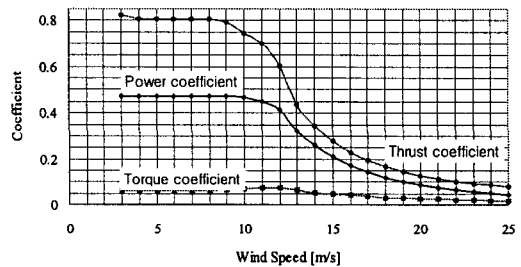


Fig. 2 Aerodynamic coefficients of KBP-750D

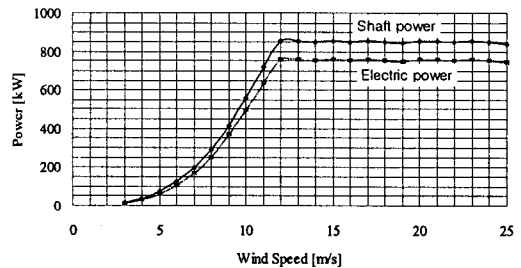


Fig. 3 Power curve of KBP-750D

Fig. 4에서 보는 것과 같이 풍속 3 m/s에서 출력운전이 시작되고 풍속 약 9 m/s에서 정격회전수에 도달되며 약 12 m/s에서 정격출력이 생산된다. 정격풍속 이상에서 날개의 피치각을 제어하여 일정한 회전수를 유지할 수 있게 하고 풍속 25 m/s 이상에서 풍력터빈을 보호하기 위해서 전력계통에서 분리하고 터빈의 운전을 중단한다. 또 능동형 Yawing으로 날개가 풍향을 추종하게 하여 주어진 풍속과 풍향에서 최대의 출력을 얻을 수 있게 하였다.

정상출력 운전 중에는 주어진 바람조건에서 최대 출력을 얻고 돌발 상황에서 풍력터빈을 보호

하기 위해서 날개의 피치각과 발전기의 토크를 제어한다. KBP-750D는 3개의 제어영역을 가지는데 Fig. 5에서 보는 것과 같이 정격출력이하에서 영역 I 과 II에서 제어되며 영역 III에서 정격출력 조건으로 제어 된다. 즉 정격출력이하에서는 최적의 날개 피치각인 0° 로 고정하고 미리 정해진 토크-풍속 그래프 [최적의 Tip-speed ratio를 유지하기 위한]에 따라 토크를 제어한다. 정격회전수 이상에서 일정한 출력을 유지할 수 있도록 날개피치와 토크를 제어하여 발전기의 회전수를 정격회전수의 $\pm 10\%$ 가 유지되게 한다.

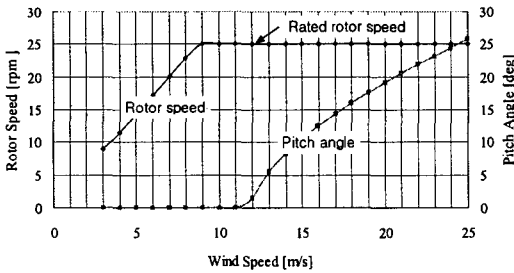


Fig. 4 Rotor speed and controlled pitch angle

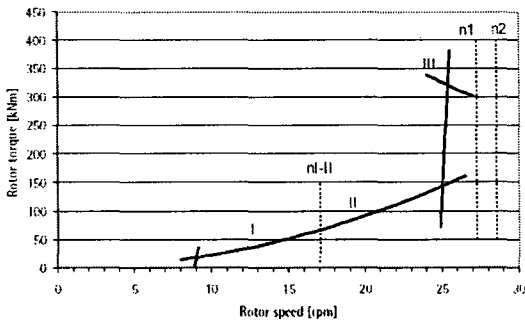


Fig. 5 Control zones and rotor speed - torque curve

Fig. 6는 750 kW의 정격출력을 가진 KBP-750D에서 연간 생산되는 에너지를 연간 평균 풍속에 대한 것으로 평균풍속 6 m/s에서 용량계수가 약 24 %로 상업성이 있음을 알 수 있고 7 m/s에서 용량계수가 약 32 %로 원자력발전이나 화력발전의 효율과 견주어 충분한 경쟁력을 확보할 수 있음을 보여주고 있다. 한편 Table 1에서 KBP-750D의 주요제원을 기술하고 있다.

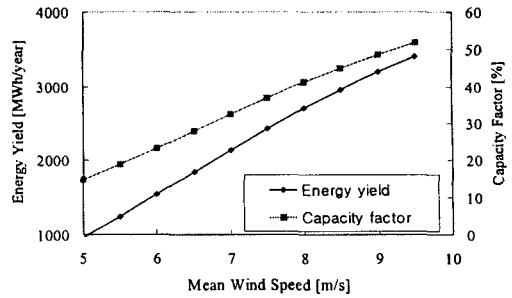


Fig. 6 Energy yield and its capacity factor

Table 1 Design specification of KBP-750D

Item	Specification
Design type class	IEC type 1A
Rated electric power, kW	750
Control	Blade pitch
Rotor diameter, m	50
Tower height, m	50
Rated wind speed, m/s	11.8
Cut-in wind speed, m/s	3
Cut-out wind speed, m/s	25
Generator	
- Rated power, kW	806
- Nominal torque, kNm	325
- Efficiency	94.7

4. 부하의 유형 (Load cases)

KBP-750D의 부하의 유형 및 계산은 IEC Type Class 1A (TC1A)의 규정에 근거하고 있다. 부하를 유형별로 정상, 비정상, 수송/설치 등의 그룹으로 분류하여 극한하중에 대하여 각각 다른 안전계수를 고려하고 피로하중에 대하여는 특별한 안전계수를 고려하지 않는다. 다만 이 값을 근거로 시스템의 설계단계에서 안전계수를 고려한다. 부하는 풍력터빈의 상황에 따라 DLC1.2 (Design Load Case1.2)부터 DLC8.1 까지 [IEC61400-1, Ch. 7, Table 2] 22개의 종류가 있으며 이들 각각에 대하여 종류에 따라서 수십 종의 하부 조건들로 세분되는데 이들 모두에 대한 검증은 하여야 한다. Table 2는 부하유형에 대한 전형적인 예로서 정상 출력운전 [DLC1.2]에 대한 세부 부하를 보여주고 있다.

Table 2 Detail conditions of design load case 1.2

Load case:	DLC1.2		
Operation conditions	Normal power production		
Environment conditions	Normal		
Category	Fatigue, extreme load		
<u>Index</u>	<u>Mean wind</u>	<u>Yaw error</u>	<u>Turb. int.</u>
DLC1.2a1	4 m/s	+10°	34.50 %
DLC1.2b1	6 m/s	+10°	27.00 %
DLC1.2c1	8 m/s	+10°	23.25 %
	~		
DLC1.2j1	22 m/s	+10°	16.09 %
DLC1.2k1	25 m/s	+10°	15.60 %
Comment:	3차원 난류, 10분간 지속, 풍구배-0.2		

위와 같은 부하에 대하여 KBP-750D의 고유한 사양들을 반영하여 부하를 계산하는데 현재 날개 익형과 타워의 형상에 대하여 결정된 데이터와 제어 알고리즘을 반영하였으나 (2차 부하계산 완료) 회전날개를 비롯한 Sub-system 들의 제작설계가 진행 중이어서 최종적인 계산단계에 있다. Fig. 7은 부하계산에 사용된 주요 부분품의 좌표계와 모델을 보여주고 있다.

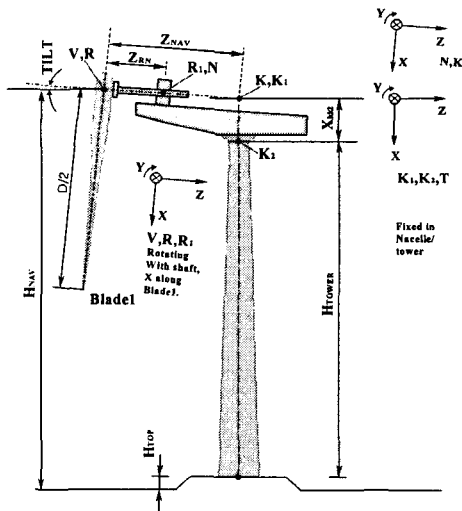


Fig. 7 Model and its coordinate system for load calculations

5. Load simulation 결과

4장에서 기술한 부하유형에 대한 계산을 수행

함으로서 날개, 허브, 축, 나셀(기계구조물), 요 시스템, 타워 등에서 설계에 필요한 각종 설계하중과 정보들이 획득된다. 각 시스템의 설계에 필요한 부하에 따라서 계산결과로부터 얻어진 정보를 바로 이용할 수도 있고, 피로해석과 같이 2차, 3차의 가공이 필요한 경우도 있다. Fig. 8~12은 설계유형 DLC1.2 (Design Load Case 1.2)에 대한 계산결과들 중에서 몇 개의 사례를 보여주고 있다. 이계산은 풍력터빈 설계용 컴퓨터코드인 BLADED⁽³⁾를 이용하였다. 평균풍속 25 m/s에서 Yaw장치의 에러에 의해서 나셀의 축에 대하여 바람이 10° 어긋났을 경우 난류강도 15.6%를 고려한 10분간의 풍속분포를 Fig. 8에 보여주고 있다. 이 풍속분포는 von Karman 난류 모델에 이용된 Auto-spectral & cross-spectral density function을 모델링한 SNWIND⁽⁴⁾을 사용하였다. Fig. 9는 이에 따른 회전축의 순간회전 속도이다.

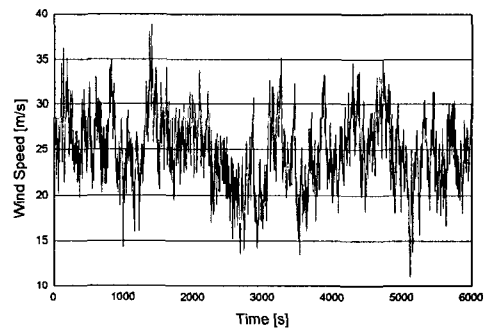


Fig. 8 Wind speed of DLC1.2k1

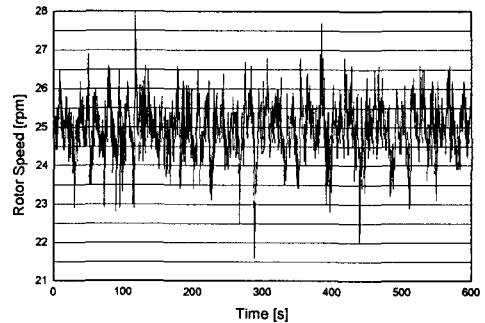


Fig. 9 Rotor speed due to wind condition, DLC1.2k1

Fig 10, 11, 12은 날개뿌리에서 날개축 방향의 하중, Flapwise 모멘트 그리고 날개끝 부위에서의 처짐량을 보여주고 있다.

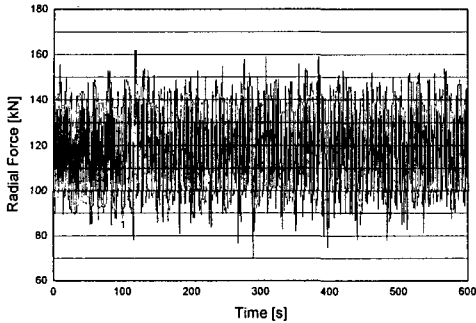


Fig. 10 Radial force on the blade root of DLC1.2k1

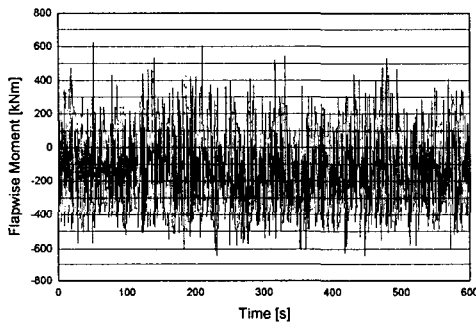


Fig. 11 Flapwise moment on the blade root of DLC1.2k1

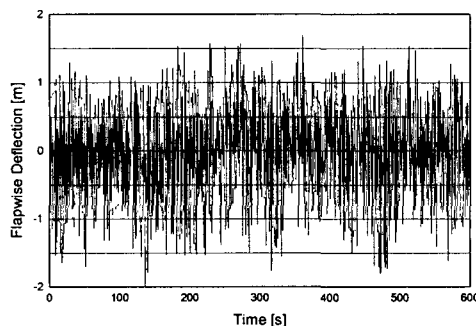


Fig. 12 Flapwise deflection on the blade tip of DLC1.2k1

위와 같은 형태의 모든 Load cases에 대한 계산결과를, 적용하는 시스템별로 정리하고 각각의 시스템이나 시스템 내부의 Element들에 대하여 설계를 위한 극한하중, 피로하중, 처짐 등과 같은 설계하중의 크기를 결정한다. IEC 규정에 의거하여 10분 동안의 계산결과를 통계처리를 통하여 20년 수명기간의 값으로 환산하여 설계하중을 도출한다. Table 3은 날개뿌리에서 발생하는 각종 하중별 최대값을 분류하여 설계하중을 선정하는 예를 보여 주고 있다. 표에서 Flap-wise 모멘트 (My)의 극한 설계하중은 부하유형 DLC1.3e5 (정상 출력운전, 운전한계속도에서 돌풍과 극한 풍향의 변화가 수반, Yaw error + 풍향변화: 38.8°)에서 발생하며 크기는 약 1,474 kNm가 됨을 알 수 있다.

Table 3 Extreme loads and its load cases on the blade root, forces in kN and moments in kNm

Load cases	V	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
DLC1.6a2	21	364	20	-5	-9	239	138
DLC6.1a1-1	50	-16	175	-34	-12	462	2337
DLC7.1b21	52	-22	50	114	-20	-1275	500
DLC6.1a3-1	50	-30	-158	4	52	152	-1802
DLC1.3e5	40	195	-53	-96	-9	1474	-657
DLC6.1a1-1	50	-16	175	-34	12	462	2337

풍력터빈은 특성상 매우 심한 반복하중에 노출되어 있어 이에 대한 정확한 평가가 필요하다. 즉 날개의 회전에 의한 저주파성의 반복하중과 난류에 의한 불규칙적인 고주파성 반복하중이 간섭하여 나타난다. 피로하중도 각각의 부하유형들에 대하여 확률과 통계에 근거한 후처리를 통하여 피로에 대한 설계부하의 크기와 그에 해당되는 부하유형을 추출할 수 있다. Fig. 13은 Fig. 10~12에서 보는 같은 10분주기의 부하계산결과에서 각 부하 Amplitude (ΔF)에 대한 Rain-flow count method⁽⁵⁾를 이용하여 부하 Cycle수를 계산하고 이를 Weibull 확률분포로 20년 수명에 대한 발생주기로 환산한 Cycle 수를 보여 주고 있다. Fig. 13(a)에서 ΔF 이 45 kN에서 약 1.2×10^8 회로 가장 높은 발생빈도수를 나타내고 있으며 Fig. 13(b)에서 ΔF 이 45~160 kN 범위의 누적

Cycle 수는 약 1.65×10^8 회로 풍력터빈의 일반적인 피로수명에 대한 Cycle 수 1.0×10^8 Cycle 수를 초과함을 보이고 있다. Table 4는 날개뿌리의 등가손상부하스펙트럼(Damage equivalent load spectrum)을 1.0×10^8 Cycle에 대한 피로하중을 보여주고 있다.

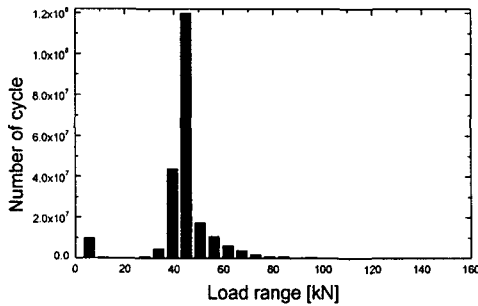


Fig. 13(a) Number of load cycles (rain flow count) on the blade root for axial force (Fx)

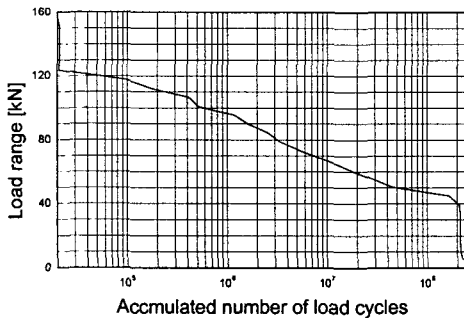


Fig. 13(b) Accumulated number of load cycles (rain flow count) on the blade root for axial force (Fx)

Table 4 Damage equivalent rectangular load spectrum on the blade root, Wöhler curve slope $m=4$ (steel), forces in kN and moments in kNm

Fx	Fy	Fz	My	Mz
122±29	5±29	31±18	-436±268	59±227
No of load cycle $N = 1.0 \times 10^8$				

위에서 부하계산의 사례를 소개하였는데, 고려하여야 할 부하유형은 약 150개 정도로 각각에 대하여 모두 계산을 수행하고 그들의 결과를 사용

목적에 따라서 분류하여 후처리를 하여야 한다. 후처리에는 극한부하를 선정하는 것과 같이 비교적 간단한 것에서부터 시간영역(Time domain)의 계산결과를 주파수영역(Frequency domain)으로 변환하여 부하 스펙트럼을 분석을 통한 피로수명의 예측과 같은 복잡하고 번거로운 작업이 포함되어 있다.

6. 결론

이상과 같이 부하계산에 대한 일반적인 사항과 계산 사례를 소개하였다. 부하계산은 풍력터빈의 설계나 제작 분야에서 폭넓은 지식과 경험이 필요한 종합적 엔지니어링으로 매우 복잡하고 어려운 작업으로 많은 노력과 시간을 필요로 한다.

현재 포항풍력연구센터에서 750 kW급 직접구동형 풍력터빈의 2차 부하계산을 수행하여 각 시스템별 공학설계를 진행하고 있으며 시스템 설계치와 반복적인 피드백 과정 중에 있으며 이것을 토대로 2004년에 독일 GL사로부터 설계인증을 획득할 절차를 진행 중에 있다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단과 (주)유니슨의 위탁연구용역에 의해서 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) IEC 61400-1, Wind turbine generator systems - Part 1: Safety requirements, 2nd edition, 1998
- (2) Germanischer Lloyd, Rules and Regulations, IV-1 Regulations for certification of wind energy conversion systems, 1999-10
- (3) Garrad Hassan, BLADED for Windows V.341, January 2002
- (4) Marshall L. Buhl, Jr, National Wind Technology Center, NREL, April 20, 2001
- (5) Dowling, S.D, and D.F. Socie, Simple rainflow counting algorithms, International Journal of Fatigue, Vol. 4, N. 1 1982