

풍력발전시스템의 기계적 하중 데이터 분석 프로그램 개발과 시뮬레이션 데이터 적용 사례[§]

방제성^{*†} · 한정우^{*} · 길계환^{**}

* 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부, ** 포항공과대학교 포항가속기연구소

Development of Programs to Analyze Mechanical Load Data of Wind Turbine Generator Systems and Case Studies on Simulation Data

Je-Sung Bang^{*†}, Jeong-Woo Han^{*} and KyeHwan Gil^{**}

* Mechanical Systems Safety Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials,

** Pohang Accelerator Laboratory, Pohang Univ. of Science and Technology

(Received May 11, 2013 ; Revised June 27, 2013 ; Accepted June 27, 2013)

Key Words: Mechanical Load(기계적 하중), Type Certification(형식인증), Fatigue Load(피로하중), Equivalent Load(등가하중), Sensor Sensitivity(센서감도), Zero Point Offset(영점편차), Capture Matrix(수집행렬), Rainflow Counting Method(우수집계법), Turbulence Intensity(난류강도)

초록: 형식인증시험을 통해 획득된 풍력발전기의 기계적 하중 데이터를 분석하기 위한 관련 프로그램 개발과 절차가 수행되었다. IEC 61400-13 규격을 기반으로 하는 측정 데이터에 대한 검증, 하중유형에 따른 분류, 시계열 및 통계 데이터 분석, 파워 스펙트럼 밀도함수 및 피로하중 스펙트럼 계산, 등가하중 계산 등의 절차가 본 프로그램을 통해 수행되었다. 수집된 데이터들이 피로하중을 산정하기에 충분한가를 판단하기 위해 정상전력생산의 경우에 대한 수집행렬을 구성하였다. 50 개의 하중 범위 분할 개수를 사용하는 우수집계법을 통해 피로하중 스펙트럼이 얻어지며, 사용된 재료에 따라 다르게 S-N 선도의 기울기를 적용하여 최종적으로 등가하중을 산출하였다. 모노파일 하부구조를 가지는 NREL 5MW 풍력발전기의 공탄성 시뮬레이션 데이터에 이용하여 위의 전반적인 절차를 수행하였다.

Abstract: The procedures and relevant programs developed for analyzing mechanical load data of wind turbine generator systems, which are obtained through type certification tests, are verified. The following issues according to IEC 61400-13 are covered in the developed programs: data validation, time series analysis, summary load statistics, generation of fatigue load spectra, and estimation of equivalent loads. A capture matrix for normal power production is generated to determine whether the collected data sets are sufficient to carry out fatigue analysis. Fatigue load spectra are obtained through the rainflow counting method using 50 load ranges; finally, equivalent loads are calculated using different S-N curve slopes, m , according to the relevant materials. Case studies are performed using aero-elastic simulation data of the NREL 5 MW baseline wind turbine with a monopile foundation.

- 기호설명 -

B_s : 측정기압

β : 온도구배(= -6.5 K/m)

T_s : 측정온도

H_s : 압력센서 설치 높이

B : 압력센서 설치 높이

H : 허브 높이

g : 중력가속도(= 9.807 m/s^2)

Γ_{site} : 풍속보정계수

α : 방위각

$M_{\text{tilt,rotor}}$: 로터 기울기 모멘트

$M_{\text{yaw,rotor}}$: 로터 편각 모멘트

$M_{\text{parallel,shaft}}$: 샤프트 평행 모멘트

[§] 이 논문은 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 31., 영흥에너지파크) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, jsbang@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $M_{normal,shaft}$: 샤프트 수직 모멘트
 $M_{fore-aft,tower}$: 타워 앞-뒤 방향 굽힘 모멘트
 $M_{side-side,tower}$: 타워 좌-우 방향 굽힘 모멘트
 B_{10min} : 10 분 평균 기압
 T_{10min} : 10 분 평균 절대기온
 ρ_{10min} : 10 분 평균 공기밀도
 R : 가스 상수(= 287.05 J / KgK)
 R_{eq} : 등가 하중
 R_i : 피로 하중 스펙트럼의 i 번째 부류에 해당하는 하중
 n_i : 피로 하중 스펙트럼의 i 번째 부류에 해당하는 사이클 수
 n_{eq} : 등가 사이클 수
 m : 관련 재료에 대한 $S-N$ 곡선의 기울기

1. 서론

풍력발전시스템을 설치·운영하기 위해서는 인증을 받아야 한다. 인증을 받기 위한 과정에는 설계평가, 제조평가, 부품인증 등이 있으며, 실제 운영을 통해 성능에 대한 측정 및 검증 등을 수행하는 형식인증 및 이를 위한 성능평가가 수행되어야 한다. 성능평가의 주요 측정 분야로서는 출력성능, 기계적 하중, 소음, 전력품질이 있다.

풍력 선진국들은 자국 내에 인증기관, 성능평가 기관 및 실증단지를 구축하고 활발한 연구와 교류를 통해 인증시스템을 발전시켜 나가는 한편, 국제 표준 및 인증 요구 조건을 지속적으로 확대해 나가고 있어, 국내 풍력발전시스템 개발업체 및 풍력발전단지 사업체들은 인증 및 성능평가의 기준과 절차를 지속적으로 숙지하여 인증을 획득하여야 한다.

2001 년도에 처음 출시된 IEC 61400-13⁽¹⁾ 규격은 2014 년에 개정될 것으로 보이며, 내용면에서 하중을 측정하는 절차에 그치지 않고 동일 풍력발전시스템 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하여 비교하는 내용이 포함될 예정이다. 또한 풍력발전기가 점점 대형화 되어감에 따라 블레이드와 타워 중간 부분에서도 데이터를 획득하는 것을 요구할 것으로 보인다.

IEC 61400-12-1⁽²⁾ 규격에서도 wind shear 및 turbulence intensity 효과를 고려하기 위해 허브 높이가 이상에서의 바람데이터도 요구될 예정이며, 기

존의 허브 높이의 풍속 대신에 remote sensing device(RSD)를 이용하여 rotor equivalent wind speed⁽³⁾라는 개념을 도입할 것으로 보인다.

본 연구는 형식시험에서 계측된 하중 관련 데이터를 대상으로 일단 현 IEC 61400-13 규격에서 요구하는 데이터 분석 절차를 수행하여 성능평가 보고서 작성 등에 필요한 데이터, 도표, 그림 등을 산출하는 프로그램을 구현하는 것에 관한 것이며, 향후 변경되는 규격에 맞추어 변경할 예정이다.

구현된 하중분석 프로그램을 실제 풍력발전시스템에 적용하기에 앞서 먼저 모노파일 기초를 가지는 NREL 5 MW 모델에 대해 공탄성 시뮬레이션을 수행하여 얻은 가상의 시계열 하중 데이터들에 대해 적용하였으며, 이를 통해 향후 계측 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해야 하는 업무에 대응하고자 한다.

2. 개요

본 연구에서 수행한 하중 데이터 분석 절차 및 하중분석 프로그램 구현 시 참조한 관련 규격으로는 IEC 61400-13, IEC 61400-12-1 등이 있으며, 입력 데이터로는 계측 장비를 통해 얻은 다수의 10 분 데이터와 풍속보정계수(wind correction factor), 센서 감도(sensor sensitivity), 영점편차(zero point offset) 등을 사용하게 된다.

주요 기능으로는 측정 데이터에 대한 검증, 하중유형(load case)에 따른 분류, 시계열 및 통계 데이터 분석, 파워 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function) 및 피로하중 스펙트럼 계산, 등가 하중 계산 등이 있다.

출력 결과로는 기계적 하중 성능평가 보고서가 요구되는 각종 데이터, 도표, 그림 등이 있다.

3. 입력 데이터

3.1 수집 대상 물리량

형식시험에 있어 하중의 특성을 파악하기 위해 수집해야 하는 물리량은 하중 관련 물리량, 기상 관련 물리량, 작동 관련 물리량이 있다.

하중 관련 물리량에는 블레이드 뿌리에서의 플랩(flap) 및 에지(edge) 방향 굽힘 모멘트, 로터 기울기(tilt) 및 편각(yaw) 모멘트와 토크, 타워 상부의 수직(normal) 및 측면(lateral) 굽힘 모멘트와 비틀림 그리고 타워 하부의 수직 및 측면 굽힘 모멘트 등이 있다.

기상 관련 물리량에는 풍속, 풍향, 기온, 기압 등이 있다.

작동 관련 물리량에는 전력, 회전속도, 피치(pitch) 각도, 편각 위치, 로터 방위각(azimuth angle), 계통 연결 상태, 브레이크 작동 상태, 풍력발전기의 작동 상태, 강수 상태, 데이터수집시스템(DAQ) 연결 상태 등이 포함된다. 본 프로그램에서는 계통에 연결된 경우, 브레이크가 작동하지 않은 경우, 풍력발전기가 정상적으로 작동한 경우, 강수가 발생하지 않은 경우, 데이터 수집 시스템에 정상적으로 연결된 경우에는 '1'의 값을, 아닌 경우에는 '0'의 값이 저장되도록 하였다.

이러한 데이터들은 추출률 100 Hz로 10 분간 수집되어 저장되며, 본 프로그램에서는 다음과 같은 후처리를 수행하였다.

로터 기울기 및 편각 모멘트는 직접 측정되지 않고 샤프트에 부착된 두 쌍의 스트레인 게이지에 의해서 측정되는 샤프트 평행(parallel) 및 수직(normal) 굽힘 모멘트와 방위각을 이용하여 다음과 같이 식 (1)을 통해 계산된다.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} M_{tilt,rotor} &= M_{parallel,shaft} \cos \alpha - M_{normal,shaft} \sin \alpha \\ M_{yaw,rotor} &= M_{parallel,shaft} \sin \alpha + M_{normal,shaft} \cos \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

수집된 기상 관련 데이터 중 기압은 ISO 2533⁽⁵⁾에 근거하여 식 (2)와 같이 허브 높이로 교정을 수행하였다.

$$B = B_s \left(1 + \frac{\beta}{T_s} (H - H_s) \right)^{-\frac{g}{\beta R}} \quad (2)$$

또한 10 분 평균 기압과 10 분 평균 절대기온을 이용하여 식 (3)과 같이 10 분 평균 공기밀도를 계산하였다.

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{RT_{10min}} \quad (3)$$

3.2 풍속보정계수

형식시험에 있어 부지보정(site calibration)의 목적은 풍력발전시스템 허브 높이에서의 풍속과 풍향을 정확히 산정하는데 있다. 즉, IEC 61400-12-1이 요구하는 조건에 따라 풍력발전시스템이 설치될 위치에 임시계측타워와 영구계측타워를 설치하여 상호간의 지형·지물에 따른 풍속의 왜곡을 검토하고, 풍속·풍향의 상관관계를 규명하여 풍력발전기 허브 높이에서의 풍속을 정확하게 산정하는데 있다. 향후 개정될 내용에서는 전단층격

(shear impact)과 유동박리(flow separation) 효과도 고려될 것으로 보인다.

주풍향을 기준으로 $\pm 10^\circ$ 에 대한 풍속 계측을 수행하여 10° 마다 풍속보정계수(Γ_{site})를 산출하도록 되어있으나 임시계측타워와 영구계측타워의 데이터 간 편차가 2% 이상 발생할 경우에는 5° 마다 풍속보정계수를 산출하는 것이 보편적이다.⁽⁶⁾ 본 프로그램에서는 5° 마다 산정된 풍속보정계수를 입력 데이터로 사용하도록 하였다.

모든 10 분 데이터의 풍속에 대하여 식 (4)와 같이 해당 풍향분류영역(wind direction sector)에 해당하는 풍속보정계수를 반영하여 최종 풍속으로 고려하였다.

$$V_{cor} = \Gamma_{site} V \quad (4)$$

3.3 영점편차와 센서감도

풍력발전시스템에 부착된 스트레인 게이지에는 온도 효과 등에 의한 영점편차가 내재하게 되므로 이를 구하여 보정해 주어야 한다. 각 스트레인 게이지의 영점편차는 로터와 너셀을 회전시키며 구한 정현 파형의 굽힘 모멘트 신호의 평균값으로부터 결정할 수 있다.⁽¹⁾ 이때 회전 시험은 풍속이 시동 풍속 미만일 경우에 수행하여야 한다.

센서감도는 모멘트(kNm)와 센서출력(mV/V) 사이의 비례계수로서 보편적으로 센서감도는 다음과 같은 세 번의 기계적 보정 작업을 통해 구해지게 된다.⁽⁶⁾

- ① 블레이드 에지 방향 굽힘 모멘트 및 샤프트 토크 동시 보정
- ② 블레이드 플랩 방향 굽힘 모멘트 및 로터 기울기 모멘트 및 편각 모멘트 동시 보정
- ③ 타워 상부의 굽힘 모멘트 및 비틀림, 타워 하부의 굽힘 모멘트 보정

본 연구에서 구현한 하중분석 프로그램은 이러한 과정을 통해 얻은 영점편차(v_0), 센서감도(α), 실제 스트레인 게이지 신호값(v)을 이용하여 식 (5)와 같이 실제 외부 모멘트(M) 값을 구할 수 있는 보정식을 사용한다.

$$M = \alpha(v - v_0) \quad (5)$$

4. 하중분석 프로그램의 주요 기능

4.1 측정 데이터에 대한 검증

획득된 10 분 데이터 중에는 향후 수행하는 여

러 절차에서 배제되어야 할 데이터가 포함되어 있을 수 있다.

데이터수집시스템이 정상적으로 작동하지 않은 경우, 풍력발전시스템이 비정상 상태인 경우, 장애물로 인한 유효하지 않은 측정 결과인 경우 그리고 강수 시 측정된 경우에 대해서는 프로그램에 의해 자동적으로 배제되도록 하였다.

하지만 기준 데이터에 비해 비현실적인 격차가 발생한 경우, 영점편차나 센서감도가 적용되지 않거나 적용에 오류가 발생한 경우, 작동한계를 벗어나는 측정 결과가 발생한 경우 그리고 잡음이 발생한 경우에는 프로그램적으로 배제하도록 구현하기가 어려워 기준이 되는 데이터와 해당 데이터의 시계열 그래프를 육안으로 비교하여 수동으로 분류하도록 하였다.

4.2 하중유형에 따른 분류

IEC 61400-13에서 제시하는 측정 하중유형에 따라 정상상태작동(steady-state operation)과 과도사건(transient event)으로 분류할 수 있도록 프로그램을 구현하였다.

작동관련 물리량 중 데이터수집시스템 연결 상태, 풍력발전시스템의 작동 상태, 계통 연결 상태, 브레이크 작동 상태가 해당 데이터 안에서 일정한 경우에만 정상상태작동의 하중유형으로 분류하고, 위의 값이 모두 '1'인 경우에는 '전력생산(power production)'의 하중유형으로 분류하며, 데이터수집시스템 연결 상태는 '1'이나 계통 연결 상태는 '0'인 경우에는 '정지·공회전(parked or idling)'으로 분류한다.

위의 물리량들이 해당 10 분 데이터 안에서 항상 일정하지 않은 경우에는 모두 과도사건의 하중유형으로 분류한 후, 시계열 그래프를 보면서 수동으로 작동개시(start-up), 정상가동중단(normal shut-down), 비상가동중단(emergency shut-down), 계통 연계 상실(grid failure) 그리고 과속으로 인한 보호시스템 가동(over-speed activation of protection system)으로 분류하도록 되어 있다.

여러 하중유형 중 '전력생산'의 하중유형에 해당되는 10 분 데이터들만 하중분석의 주요 대상이 된다.

4.3 시계열 및 통계 데이터 분석

각 10 분 데이터에 대한 시계열 및 통계 데이터 분석의 목적은 바람 유입 특성(풍속, 공기 특성, 난류 강도)을 파악하고, 정상조건 하에서의 풍력

발전시스템의 정적 및 동적 하중 특성을 파악하기 위해서이다.

IEC 61400-13에서 요구하는 각종 시계열 데이터를 그래프로 출력할 수 있도록 하였으며, 방위각의 변화에 따른 하중 변화 그래프도 출력할 수 있도록 하였다.

또한 평균값, 최대값, 최소값, 표준편차와 같은 통계적 정보를 산출하여 측정 결과의 일관성, 변화 범위를 검토할 수 있도록 하였다.

4.4 파워 스펙트럼 밀도함수 및 피로하중 스펙트럼 계산

동적 거동 특성을 파악할 수 있도록 주파수 영역으로의 변환을 통해 각 하중의 파워 스펙트럼 밀도함수를 계산한다. 이를 풍력발전시스템 설계시의 고유진동수와 비교함으로써 설계 검증에 사용할 수도 있다.

또한 각 10 분 데이터로부터 전처리-사이클 집계-후처리 단계를 거쳐 피로하중 스펙트럼을 산출한다.

전처리 단계에서는 각 국부적 극치를 둘러싸는 세 데이터들을 포물선으로 근사하여 극치를 추출한다.

사이클 집계 단계에서는 ASTM 표준의 우수집계법⁽⁷⁾을 사용하였으며, 폐쇄되지 않은 사이클은 절반 사이클로 취급하였다.

후처리 단계에서는 범위(range) 스펙트럼과 평균(mean) 스펙트럼으로 피로 사이클을 집계하며, 이때 충분한 해상도를 확보하기 위하여 하중 범위 분할 개수(the number of divisions of the load range)를 50 개로 하였다.

4.5 등가하중 계산

등가 하중은 우수집계법으로 계산된, 서로 다른 모든 하중 진폭의 합과 동일한 피로피해를 주는, 주어진 주파수(주로 1 Hz)를 갖는 단일 진폭의 하중을 의미한다.

등가하중의 개념으로부터 다양한 풍속이나 작동 조건에서 발생하는 피로 피해를 직접적으로 비교하는 것이 가능하며, 계산된 피로하중과 측정된 피로하중 간의 직접적인 비교도 가능하다.

소재 피로 특성은 식 (6)과 같이 가정하며, 본 연구에서는 m 값에 대하여 블레이드는 8 과 12 의 값을, 샤프트는 6 과 10 의 값을, 타워는 4 와 8 의 값을 적용하였다.

$$N = CS^{-m} \quad (6)$$

등가하중은 식(7)과 같이 정의될 수 있다.

$$R_{eq} = \left(\sum R_i^m n_i / n_{eq} \right)^{1/m} \quad (7)$$

4.6 수집행렬 구성 및 최소수집조건 그래프

측정된 시계열 데이터들을 이용하여 피로분석을 수행하기 위해서는 수집행렬을 구성하여 최소한의 수집조건을 만족하여야 한다.⁽¹⁾

수집행렬에서 각 10 분 데이터는 풍속과 난류강도에 따라 구간(bin)별로 분류되며, 풍속은 1m/s, 난류강도는 2% 간격으로 분할하였다.

풍속이 느리게 지속적으로 변화하는 경우에는 의미없는 높은 난류강도가 나타나므로 풍속 데이터에 대해서 추세제거(detrending)를 수행하거나 고역 필터링(high pass filtering)을 수행한 뒤 수집행렬을 구성하도록 하였다.

‘전력생산’ 하중유형에서 각 풍속 구간 별로 요구되는 최소 데이터 수집 조건은 IEC 61400-13 을 기준으로 하였으며,⁽¹⁾ 만족여부는 그래프를 이용하여 확인할 수 있도록 하였다.

이렇게 3 장과 4 장에서 언급한 일련의 절차를 수행할 수 있도록 MATLAB⁽⁸⁾을 이용하여 구현하였다.

5. 적용사례 및 결과

5.1 모노파일 기초를 가지는 NREL 5 MW 모델

본 연구에서 구현한 하중분석 프로그램을 실제 설치된 풍력발전시스템에 적용함에 앞서 우선 공탄성 시뮬레이션을 통해 얻은 가상 하중 데이터에 적용해 보았다. 대상체는 Fig. 1 과 같이 수심 20 m 깊이에 모노파일 기초를 가지는 NREL 5 MW 모델이며,⁽⁹⁾ 상부 모델의 대략적인 사양은 Table 1 과 같다.

하부 구조물에 가해지는 해양하중 조건은 Table 2 와 같으며, 다양한 풍속 조건을 생성하기 위해 TurbSim⁽¹⁰⁾ 프로그램을 사용하였다. 사용된 바람 모델과 입력값은 Table 3 과 같으며, 특히 허브 높이의 평균 풍속은 시동풍속인 3.0 m/s 부터 종단풍속인 25.0 m/s 까지 1 m/s 간격으로 23 가지, 난류강도는 A, B, C 인 3 가지 경우를 고려하였다.

이들 경우의 수를 조합하여 총 69 가지 경우의 바람 데이터를 생성하여 FAST⁽¹¹⁾에서 공탄성 시뮬레이션을 수행하였고, 결과물로 본 연구에서 구현한 하중분석 프로그램이 필요로 하는 하중 관련 물리량, 기상 관련 물리량 그리고 작동 관련 물리량을 갖는 69 개의 10 분 데이터를 획득하였다.

타워 하부의 수직 및 측면 굽힘 모멘트는 타워와 모노파일의 연결 부위에서의 값을 고려해야 하

나, Fig. 2 와 같이 타워와 모노파일의 연결 부위로 부터 해양 바닥면(mud line)으로 내려갈수록 더 큰 굽힘 모멘트가 가해짐을 전산모사 수행 결과 확인할 수 있었기 때문에, 본 연구에서는 보수적으로 해양 바닥면에서의 수직 및 측면 모멘트를 타워 하부의 그것으로 고려하였다.

수집행렬의 최소수집조건을 만족하기 위하여 위에서 획득한 69 개의 확정론적(deterministic) 10 분 데이터를 기반으로 각 채널 물리량의 최대값과 최소값 차이의 10%를 분산 값으로 갖는 확률론적(stochastic) 데이터 690 개를 생성하였고, 이들을 이용하여 하중 분석 전체 절차를 수행해 보았다.

5.2 시계열 및 통계 데이터 분석 결과

본 결과는 하나의 10 분 데이터 단위로 생성되

Table 1 Gross properties for NREL 5 MW baseline wind turbine

Rating	5MW
Rotor orientation, Configuration	Upwind, 3 blades
Generator	3 phase induction model using Thevenin equivalent circuit
Control	Variable speed, Collective pitch
Rotor, Hub diameter	126 m, 3 m
Hub height	90 m
Cut-in, Rated, Cut-out wind speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-in, Rated rotor speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated tip speed	80 m/s

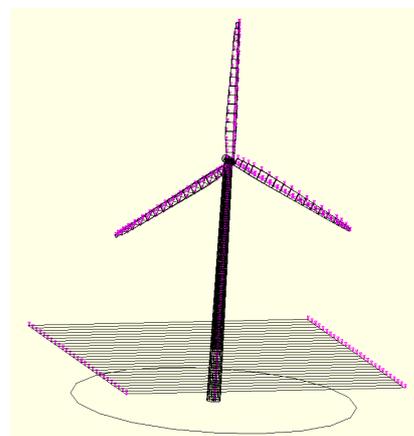


Fig. 1 NREL 5 MW baseline model with a monopile foundation

Table 2 Wave loadings acting on sub-structure with monopile foundation

Platform loading model	Morison's equation
Tower diameter in Morison's equation	6.0 m
Water depth	20.0 m
Incident wave kinematics model	JONSWAP/Pierson-Moskowitz spectrum(irregular)
Significant wave height of incident waves	5.0 m
Peak spectral period of incident waves	12.4 sec
Incident wave propagation heading direction	0.0 deg

Table 3 Properties for wind data generation in the TurbSim

Grid height	150 m
Grid width	150 m
Vertical grid-point matrix dimension	13
Horizontal grid-point matrix dimension	13
Turbulence model	Kaimal
IEC turbulence type	NTM
Mean wind speed at the reference height	3.0 ~ 25.0 m/s
Turbulence intensity	A, B, C

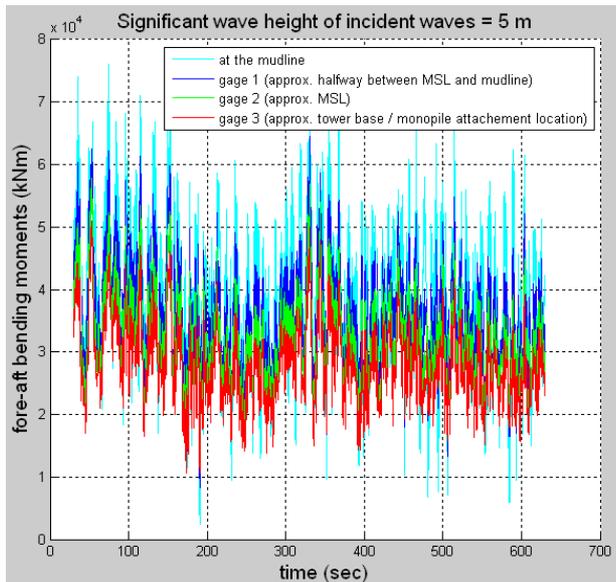


Fig. 2 Front-rear bending moments at several strain gage points of sub-structure

는 결과로서 Fig. 3 은 풍속과 풍향을, Fig. 4 는 나셀 위치, 전력과 RPM 을, Fig. 5 는 블레이드 플랩 방향 굽힘 모멘트, 블레이드 에지 방향 굽힘 모멘트, 샤프트 평행 굽힘 모멘트, 샤프트 수직 굽힘 모멘트와 샤프트 토크를 보여주고 있다.

Fig. 6 은 로터 편각 모멘트, 로터 기울기 모멘트, 타워 하부 수직 모멘트, 타워 하부 측면 모멘트와 타워 비틀림을 보여주고 있다.

Fig. 7 은 방위각 변화에 따른 블레이드 플랩 방향 굽힘 모멘트, 블레이드 에지 방향 굽힘 모멘트, 샤프트 평행 굽힘 모멘트 그리고 샤프트 수직 굽힘 모멘트의 평균값, 최대값, 최소값 및 표준편차를 보여주고 있고, Fig. 8 은 하나의 10 분 데이터에 대한 통계적 결과를 텍스트 파일 형태로 보여주고 있다.

5.3 파워 스펙트럼 밀도함수 및 피로하중 스펙트럼 산출

본 결과 또한 하나의 10 분 데이터 별로 생성되는

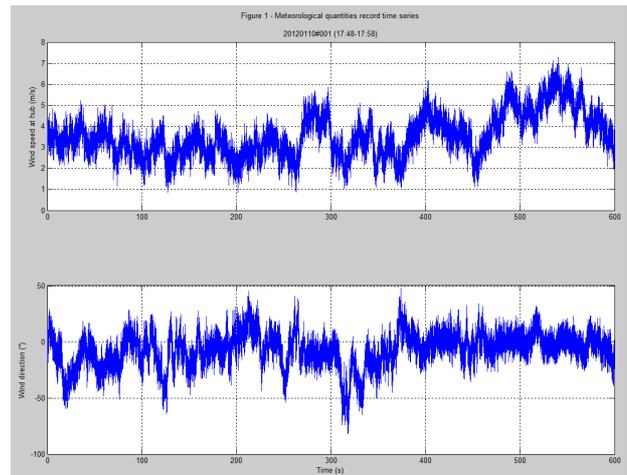


Fig. 3 Meteorological quantities record time series

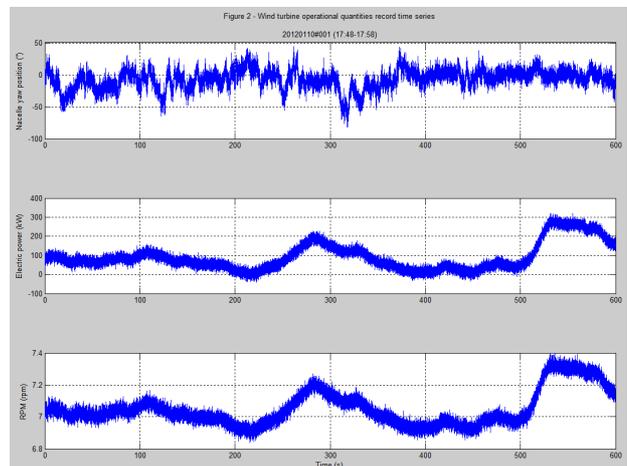


Fig. 4 Wind turbine operational quantities record time series

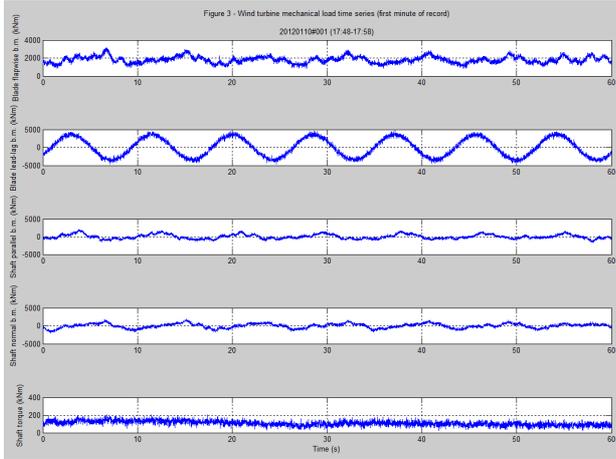


Fig. 5 Wind turbine mechanical load time series (first minute of record)

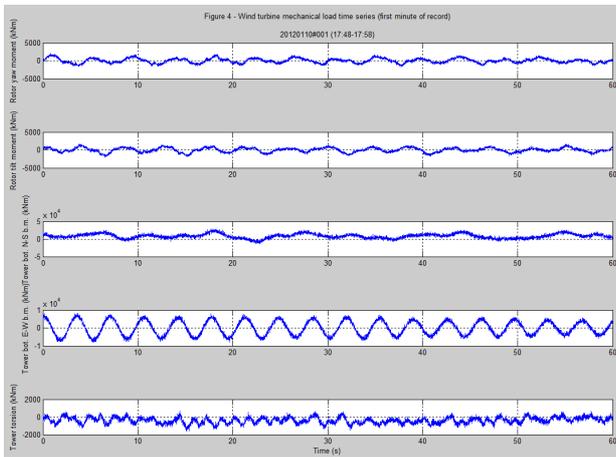


Fig. 6 Wind turbine mechanical load time series (first minute of record)

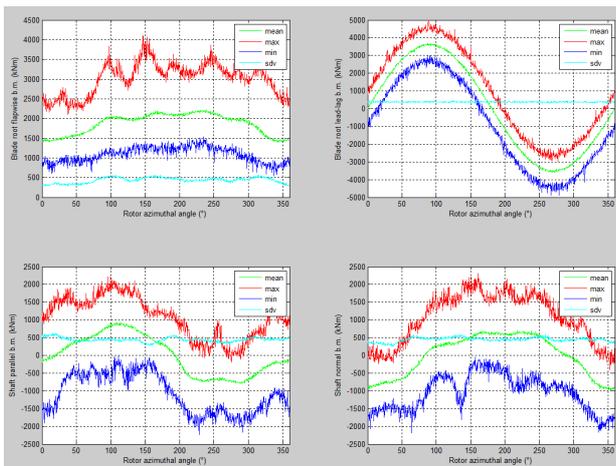


Fig. 7 Azimuthal variation of blade and shaft loads

결과로서 Fig. 9 는 블레이드 플랩 방향 굽힘 모멘트, 블레이드 에지 방향 굽힘 모멘트, 샤프트 평행 굽힘 모멘트, 샤프트 수직 굽힘 모멘트, 로터 편각 모멘트, 로터 기울기 모멘트, 샤프트 토크, 타워 하부 수직

Record brief statistical description

Record ID: 20120110#001 (17:48-17:58)

Wind turbine status: Normal operation

Measured quantity	Mean	Sdv	Min.	Max.	1 Hr equivalent load
Wind speed (m/s)	3.53	1.03	0.86	7.29	-
Wind direction (°)	-7.22	15.37	-81.76	47.59	-
Air temperature (°C)	7.03	0.02	6.98	7.08	-
Air pressure (hPa)	1012.95	0.26	1011.93	1014.40	-
Air density (kg/m ³)	1.23	-	-	-	-
Nacelle yaw position (deg)	-7.26	15.41	-81.94	43.84	-
Electric power (kW)	91.02	72.21	-40.89	321.86	-
RPN (generator axle)	7.05	0.11	6.84	7.40	-
Blade root flapwise b.m. (kNm)	1664.06	509.55	539.80	4113.71	1700.14 (n=12)
Blade root lead lag b.m. (kNm)	52.19	2550.81	-4882.09	4971.87	6627.58 (n=12)
Shaft parallel ¹⁾ b.m. (kNm)	3.05	711.62	-2227.58	2321.55	2299.03 (n= 8)
Shaft normal ¹⁾ b.m. (kNm)	2.68	721.11	-2188.98	2306.00	2258.01 (n= 8)
Rotor yaw moment (kNm)	6.21	714.81	-2413.27	2265.77	2357.88 (n= 8)
Rotor tilt moment (kNm)	0.05	717.93	-2455.10	2184.84	2380.82 (n= 8)
Rotor torque (kNm)	129.27	100.24	-83.31	452.61	123.71 (n= 8)
Tower base bending N-S ²⁾ (kNm)	8985.17	8004.39	-24257.99	41038.15	30501.54 (n= 4)
Tower base bending E-W ²⁾ (kNm)	1.50	1730.12	-7934.00	8161.75	5492.43 (n= 4)
Tower torsion (kNm)	-149.62	496.20	-2163.62	1751.76	1394.89 (n= 4)

¹⁾ Denotes the orientation of the sensors on the rotating axis with respect to the master blade.
²⁾ Denotes the orientation of the sensors, for example, N-S stands for north-south direction.

Fig. 8 Record brief statistical description

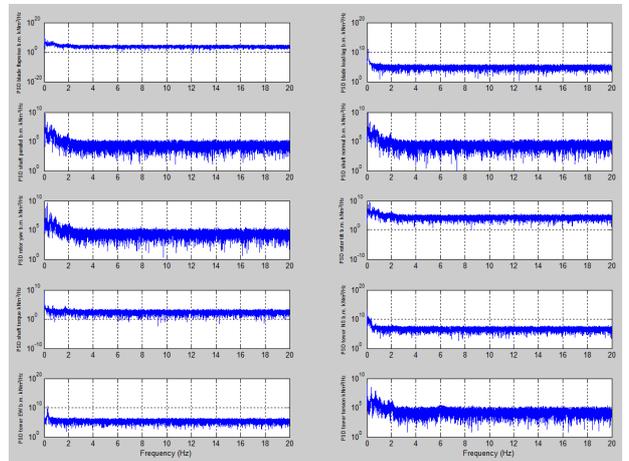


Fig. 9 Power spectral density functions for blade, rotor and tower loads

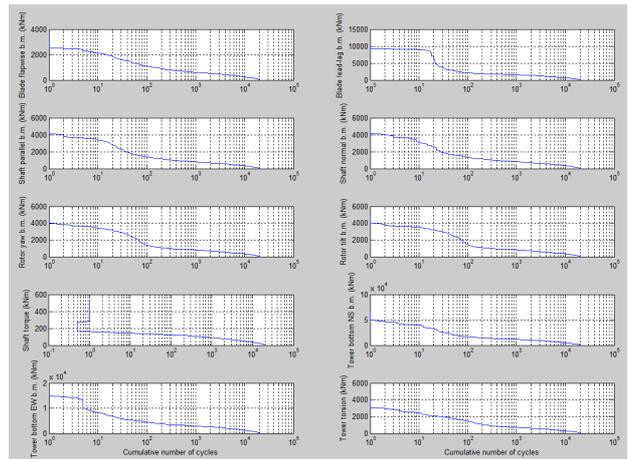


Fig. 10 Fatigue spectra for blade, rotor and tower loads

굽힘 모멘트, 타워 하부 측면 굽힘 모멘트와 타워 비틀림에 대한 파워 스펙트럼 밀도함수를 보여주고 있다.

Fig. 10 은 블레이드 플랩 방향 굽힘 모멘트, 블레이드 에지 방향 굽힘 모멘트, 샤프트 평행 굽힘 모멘트, 샤프트 수직 굽힘 모멘트, 로터 편각 모멘트,

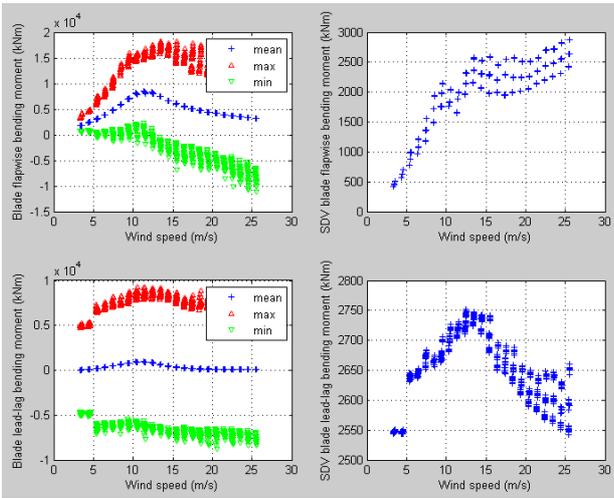


Fig. 15 Blade-root flapwise and edgewise bending moment statistics

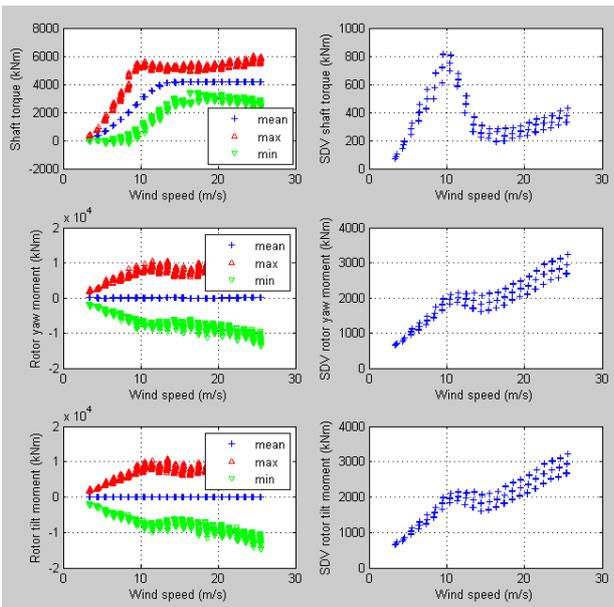


Fig. 16 Rotor mechanical load statistics

Fig. 17 은 풍속 변화에 따른 타워 비틀림과 그의 표준편차, 타워 하부 수직 굽힘 모멘트와 그의 표준편차, 타워 하부 측면 굽힘 모멘트와 그의 표준편차를 보여주고 있다.

Fig. 18 은 m 이 8 과 12 일 때 블레이드 플랩 방향 굽힘 모멘트의 증가하중과 블레이드 에지 방향 굽힘 모멘트의 증가하중 그리고 m 이 6 과 10 일 때 샤프트 토크의 증가하중을 보여주고 있으며, Fig. 19 는 m 이 6 과 10 일 때 로터 편각 모멘트의 증가하중과 로터 기울기 모멘트의 증가하중 그리고 m 이 4 와 8 일 때 타워 비틀림의 증가하중의 변화를 보여주고 있다.

마지막으로 Fig. 20 은 m 이 4 와 8 일 때 타워 하부

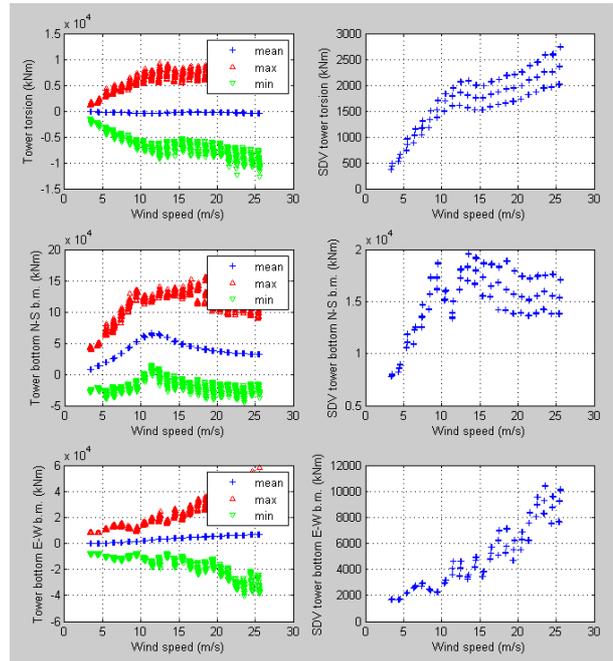


Fig. 17 Tower load statistics

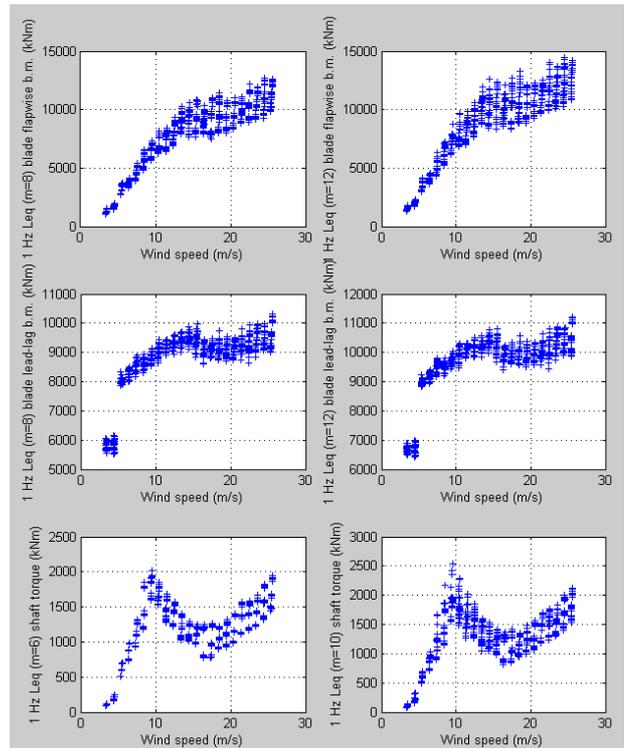


Fig. 18 Fatigue equivalent loads for blade root bending moments and shaft torque

굽힘 모멘트의 증가하중 변화를 보여주고 있으며, 이 때 식 (8)과 같이 앞-뒤 방향과 좌-우 방향 굽힘 모멘트의 합력으로 고려하였다.

$$M_{tower} = \sqrt{M_{fore-aft,tower}^2 + M_{side-side,tower}^2} \quad (8)$$

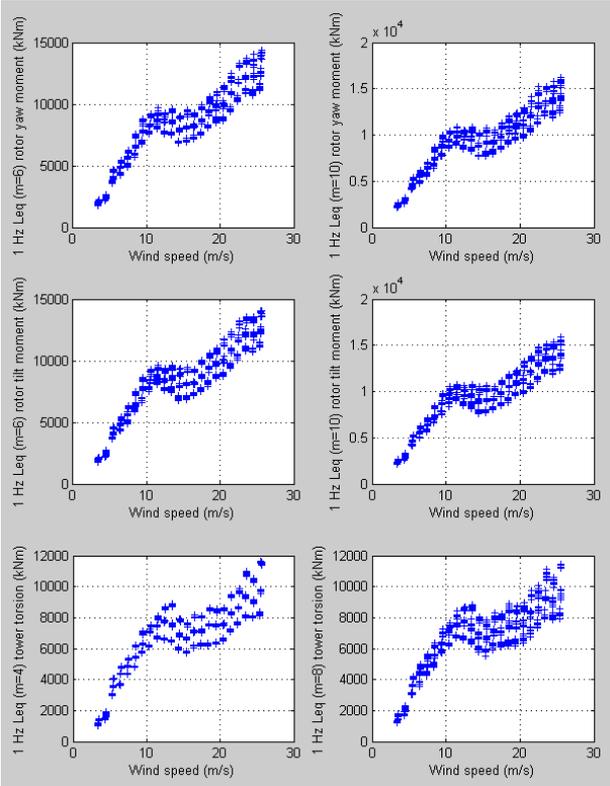


Fig. 19 Fatigue equivalent loads for rotor yaw and tilt moments and tower torsion

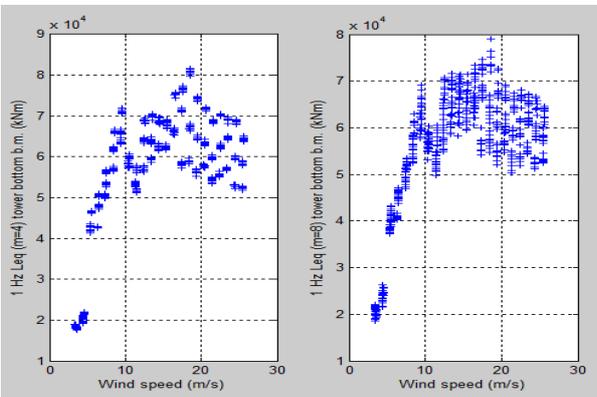


Fig. 20 Fatigue equivalent loads for tower base bending moments

6. 결론

본 연구에서는 IEC 61400-13 과 IEC 61400-12-1 규격을 바탕으로 형식시험 중 기계적 하중 분야의 성능평가 보고서 작성 등에 필요로 되는 데이터, 도표, 그림 등을 산출하는 하중분석 프로그램을 구현하였으며, 이를 모노파일 기초를 갖는

NREL 5 MW 모델의 가상 하중 데이터에 적용해 보았다. 본 프로그램은 IEC 61400-13 의 데이터 처리 부분에서 요구하는 측정 데이터에 대한 검증 - 하중유형에 따른 분류 - 시계열 및 통계 데이터 분석 - 파워 스펙트럼 밀도함수 및 피로하중 스펙트럼 분석 - 등가하중 분석과 같은 일련의 절차를 수행할 수 있으며, 각 절차에서 요구하는 데이터를 얻을 수 있다. 향후 실제 풍력발전시스템에 적용할 예정이며, 해상용 풍력발전시스템으로 확장 적용되기 위해서는 IEC 61400-3 과 연계되어 해양 하중도 고려되어야 할 것이다. 또한 개정되는 IEC 61400-13 규격과 IEC 61400-12-1 규격에 맞추어 수정될 예정이다.

참고문헌

- (1) IEC/TS 61400-13 ed. 1, 2001, "Wind Turbine Generator Systems - Part 13: Measurement of Mechanical Loads," IEC.
- (2) IEC 61400-12-1 ed. 1, 2005, "Wind Turbines - Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines," IEC.
- (3) Wagner, R., 2010, Accounting for the speed shear in wind turbine power performance measurement, PhD thesis, RisØ National Laboratory for Sustainable Energy.
- (4) Cho, J., Hong, H., Bang, J., Park, J. and Ryu, J., 2007, "The Study of Load Measurement on U50 Wind Turbine," *Journal of The Korean Society for New and Renewable Energy*, Vol. 3, No. 4, pp.114~122.
- (5) International Standard ISO 2533 ed. 1, 1975, "Standard Atmosphere."
- (6) Ryu, J., et al., 2007, A Study on Field Test for 750kW Gearless Type Wind Turbine, final report, Unison Co. Ltd..
- (7) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, pp. 184~196.
- (8) MATLAB R2012a Programming Fundamentals.
- (9) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G., 2009, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," NREL/TP-500-38060.
- (10) <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim/>.
- (11) <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>.