

# 풍력발전기 운전환경에 따른 진동신호 분포

## Distribution of vibration signals according to operating conditions of wind turbine

신성환<sup>†</sup>, 김상렬<sup>\*</sup>, 서윤호<sup>\*</sup>

(Sung-Hwan Shin,<sup>†</sup> SangRyul Kim,<sup>\*</sup> and Yun-Ho Seo<sup>\*</sup>)

국민대학교 자동차공학과, \*한국기계연구원 음향소음팀  
(Received February 23, 2016; accepted March 31, 2016)

**초 록:** 풍력발전설비는 접근성의 문제로 주기적인 구조건전성 검사를 수행하기 어렵고, 기상상태를 포함한 주위 환경변화 때문에 예기치 못한 고장발생 가능성이 높아 이에 대한 보완책으로 상태감시시스템(Condition Monitoring System, CMS)을 운영하고 있다. 본 연구에서는 CMS의 이상감시 성능 향상을 위하여 풍력발전기 주요 기계시스템에서 장기간 측정된 진동신호 분포를 통계적으로 분석하고, 운전 조건에 따른 진동 변화 경향을 파악한다. 이를 위하여, 풍력발전기 동력전달 및 전력생성부의 진동, 풍속, 주축회전수 등을 약 2년동안 측정된 데이터를 기반으로 운전 환경 및 조건에 따른 각 신호의 경향분석을 수행하고, 기계시스템 구조에 따른 신호별 상호연관성을 분석하였다. 결과적으로 풍력발전기 기계시스템별 진동은 주축회전수, 발전여부에 영향을 받고, 특정 주축회전수에서는 웨이블(Weibull) 분포에 해당하는 진동분포가 나타남을 확인하였다. 이런 결과는 풍력발전기 CMS 시스템에서 기계적 이상발생 여부를 조기에 판단하는 기준을 제시할 수 있다.

**핵심용어:** 풍력발전기, 상태감시, 진동신호, 경향분석, 웨이블분포

**ABSTRACT:** Condition Monitoring System (CMS) has been used to detect unexpected faults of wind turbine caused by the abrupt change of circumstances or the aging of its mechanical part. In fact, it is a very hard work to do regular inspection for its maintenance because wind turbine is located on the mountaintop or sea. The purpose of this study is to find out distribution patterns of vibration signals measured from the main mechanical parts of wind turbine according to its operation condition. To this end, acceleration signals of main bearing, gearbox, generator, wind speed, rotational speed, etc were measured through the long period more than 2 years and trend analyses on each signal were conducted as a function of the rotational speed. In addition, correlation analysis among the signals was done to grasp the relation between mechanical parts. As a result, the vibrations were dependent on the rotational speed of main shaft and whether power was generated or not, and their distributions at a specific rotational speed could be approximated to Weibull distribution. It was also investigated that the vibration at main bearing was correlated with vibration at gearbox each other, whereas vibration at generator should be dealt with individually because of generating mechanism. These results can be used for improving performance of CMS that early detects the mechanical abnormality of wind turbine.

**Keywords:** Wind turbine, Condition monitoring, Vibration signal, Trend analysis, Weibull distribution

**PACS numbers:** 43.40.Le, 43.40.Yq

### 1. 서 론

신재생 에너지의 중요성이 부각되면서 상대적으로

로 경제성을 인정받은 풍력발전 분야에서는 대규모 해상풍력단지 조성이 추진되고 있다. 하지만 풍력발전설비는 구조와 접근성의 문제로 주기적인 구조건전성 검사를 수행하기 어렵고, 기상상태를 포함한 주위 환경변화 때문에 예기치 못한 고장이 발생할 수

<sup>†</sup>Corresponding author: Sung-Hwan Shin (soulshin@kookmin.ac.kr)  
Department of Automotive Engineering, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea  
(Tel: 82-2-910-5743, Fax: 82-2-910-4839)

있다. 이러한 설비 운영 및 관리 문제를 보완하기 위하여 현재 풍력발전설비에는 상태감시시스템(Condition Monitoring System, CMS)이 설치되었고, 이를 활용하여 풍력발전기 주요 기계시스템의 이상징후 감시를 통한 예지보전단계의 설비운영체계<sup>[1]</sup>를 적용하고 있다.

예지보전은 데이터 취득을 통한 상태감시, 상태진단, 예측진단, 정비계획 수립의 과정을 통하여 수행된다. 이중 상태진단은 모니터링 시스템을 통하여 취득된 데이터를 처리하여 발전설비 구성 기기별 결함을 조기에 발견하여 이상 유형을 진단하는 것이고, 예측진단은 현재 기기상태의 진단을 바탕으로 향후 해당 기기의 기계건전성에 대한 예측을 수행하여 확률적인 방법으로 기기의 잔여수명을 제공하는 것이다. 이러한 상태진단 및 예측진단 기술 정도에 따라 예지보전 설비운영체계의 성능 및 효율성이 결정된다. 실제로, 미국 EPRI(Electrical Power Research Institute)의 자료<sup>[2]</sup>에 의하면, 예지보전에 기반한 설비 운영체계를 적용하여 기기 및 설비의 고장을 조기 진단할 수 있는 체계가 확보될 경우, 육안검사로 이상징후가 발생했을 때 수행하는 유지보수 비용과 비교하여 최소 5배, 기기 및 설비 이상이 발생한 이후 수행하는 비용에 비해서는 최소 10배의 이득을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 풍력발전설비의 예지보전 운영체계 중 상태진단 성능향상을 위한 기본 단계로, 풍력발전기 주요 기계시스템에서 측정된 진동신호 분포를 통계적으로 분석하고, 운전환경 및 조건에 따른 경향을 파악하고자 한다. 이를 위하여, 3 MW급 풍력발전기에 설치된 CMS를 통하여 각 기계시스템에서 발생하는 2년 이상의 진동신호, 풍속, 주축회전수, 발전량을 취득하였다. 이 데이터 및 풍력발전기 운전 단계의 특징을 기반으로 풍속-주축회전수-진동사이의 관계를 파악하고, 각 기기별 진동신호 사이의 상관도를 계산하였다.

## II. 풍력발전기 운전 및 CMS

### 2.1 풍력발전기 운전단계

풍력발전은 주 에너지원인 바람에 의해서 로터블레이드 및 주축이 회전하고, 기어박스에 의하여 회전속도를 증가시켜 발전기를 가동함으로써 전력을

생산한다. 안정적인 전력 생산을 위하여 풍력발전기의 제어시스템은 다음과 같이 운전상태를 제어한다.<sup>[3]</sup> 초기화 단계(initializing step)에서는 운전시작을 준비하기 위하여 시스템을 점검하고, 로터 및 요(yaw) 위치를 결정한다. 운전 준비단계(preparing step)는 발전기 및 계통 연결을 모니터링하고, 풍향 및 풍속을 관찰해서 적당한 운전 조건을 파악한다. 고정단계(checking step)는 바람의 변동특성을 파악하여 운전 가능 여부 및 바람의 지속 예상시간 등을 검토한다.<sup>[3]</sup>

시동단계(start-up step)는 풍속 조건 충족 후, 제동장치가 풀리면서 풍력발전기의 운동이 시작되고, 발전은 계통 연결이 완벽하고 올바른 운전 속도에 이르렀을 때 시작된다. 발전단계(generating step)는 계통으로 전류를 발생시켜 전력을 정상적으로 생산한다. 자유운동단계(free running step)는 바람이 별로 없을 때 발전을 할 수 있을 정도로 풍속이 될 때까지 로터가 자유운동 하도록 허용한다. 이 때 요 발전기에서는 자유운동 중에 로터가 바람의 방향을 유지하도록 작동한다. 마지막으로 정지단계(stopping step)는 공기역학적 항력 장치 및 로터블레이드 피칭 조절로 로터를 정지시키기 위하여 감속시키고, 대기 제동장치를 작동하여 로터를 정지한다.

풍력발전기 제어시스템에 의한 각 운전단계에서 운동하는 기계시스템은 Table 1과 같다. 실제 로터블레이드가 회전하는 것은 시동단계, 발전단계, 자유운동단계, 정지단계이고, 이 중 발전기가 작동하는 단계는 시동단계와 발전단계이다.

Table 1. Summary on whether mechanical parts of wind turbine work or not according to its operating step (O: moving, X: stopping).<sup>[3]</sup>

Operating steps	Mechanical part				
	Blade	Yaw	Main shaft (bearing)	Gearbox	Generator
Initializing	×	×	×	×	×
Preparing	×	×	×	×	×
Checking	×	×	×	×	×
Start-up	○	○	○	○	○
Generating	○	○	○	○	○
Free running	○	○	○	○	×
Stopping	○	○	○	○	×

### 2.2 풍력발전기 상태감시시스템 (CMS)

중대형 풍력발전설비의 경우 타워의 높이가 최소 50m 이상으로 접근성이 용이하지 않아 주기적인 검사에 한계를 갖는다. 이러한 풍력발전 유지보수 문제를 해결하기 위하여, 로터블레이드, 주축, 주베어링, 기어박스, 발전기와 같은 기계시스템의 진동신호를 포함한 제어변수 및 환경변수를 상시 측정하고 모니터링할 수 있는 CMS를 운영하고 있다. 현재 적용되어 있는 CMS는 예지보전 기술의 측정, 상태감시, 상태진단초기 기능을 보유하고 있다.

본 연구의 대상이 되는 풍력발전기에 설치된 CMS는 구성 기계시스템의 구조건전성을 파악하기 위하여 여러 위치에 다종의 센서를 설치하여 진동신호, 풍속, 온도, 오일량, 발전량 등을 종합적으로 측정한다. 각 센서에서 측정된 데이터는 1s 간격으로 평균화하는 신호처리를 거쳐 풍력발전기의 상태를 나타내는 변수로 활용된다.

진동신호의 경우, IEC(International Electrotechnical Commission) 6140-25<sup>[4,5]</sup>에 따라 각 기계시스템에서 측정된 가속도가 두 개의 값으로 구분된다. 첫째는 측정된 신호 1kHz 이하 가속도 성분의 1s간 실효값(Root Mean Square, RMS)이고, 둘째는 1kHz 이상 가속도 성분의 1s간 실효값 High Frequency BandPass, HFBP로 표기한다. Table 2는 CMS에서 측정되는 주요 진동신호를 정리한 것이다. 여기서, X, Y, Z는 지면과 수평방향, 지면과 수직방향, 로터회전축 방향을 각각 의미한다. 참고로, 본 연구에서 분석되는 데이터

는 2년 동안 측정된 것으로, 채널당 45,711,540개에 해당한다.

### III. 진동신호 분포 및 상호연관성

#### 3.1 풍속, 주축회전수 및 발전량 사이의 관계

풍력발전에서 가장 중요한 환경변수는 풍속이다.<sup>[6]</sup> 2.1절에서 언급한 것과 같이 풍속 및 지속시간에 따라 풍력발전기의 운전상태 및 전력생산을 위한 발전기 동작시간이 결정된다. 따라서 풍력발전기 설치위치에서 풍속분포 파악이 진동신호 분포 분석에 앞서 선행되어야 한다.

Fig. 1은 대상 풍력발전기에서 측정된 풍속분포를 나타낸다. 여기서, 빈도수(Frequency)는 1m/s 간격에서 풍속의 빈도수를 의미하며 다음과 같이 계산된다.

$$Frequency(\%) = \frac{No. of data at each wind speed}{No. of all data} \times 100. \quad (1)$$

측정기간 동안 풍속의 최대 빈도수는 3m/s에서 나타나고 있으며, 18m/s 이상의 풍속은 거의 존재하지 않는다. 이러한 분포를 모사하기 위하여 정규분포를 적용한 결과, 평균풍속은 5.0 m/s, 표준편차  $\sigma$ 는 3.0 m/s로 계산되었다. 결과적으로 최대 빈도수를 갖는 풍속과 평균풍속 사이에는 2 m/s의 차이를 갖는다. 또한 표준편차를 고려할 경우, 저속으로의  $2\sigma$ 에 해당하는 범위는 풍속이 존재하지 않는 부분을 포함한다

Table 2. Measured vibration signals on CMS.

Mechanical part		Acceleration direction		
		X (horizontal)	Y (vertical)	Z (axis)
Main bearing		RMS	RMS	RMS
		HFBP	HFBP	HFBP
Gearbox	Low-speed part	-	RMS	RMS
	High-speed part	-	HFBP	HFBP
Generator	Input part	-	RMS	-
		-	HFBP	-
	Output part	-	RMS	-
		-	HFBP	-

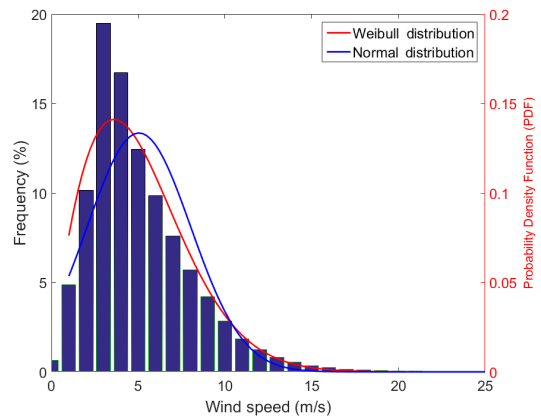


Fig. 1. Frequency of wind speed and its distributions based on two statistical functions: normal and Weibull.

다. 이런 결과는 평균은 빈도의 중앙을, 표준편차는 값의 분포가 평균에 대해 양쪽으로 일정하게 분포를 갖는 정규분포의 대칭성에 의한 것이다. 따라서, 양수 값만 존재하고, 저속이 고속에 비해 상대적으로 많이 나타나는 풍속의 분포를 모사하기에는 부족함이 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 일반적으로 풍속 분포를 모사에 사용되는 베이블분포(Weibull distribution)를 적용하였다.<sup>[3]</sup> 베이블분포<sup>[7]</sup>는 신뢰도 데이터를 모형화하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 분포<sup>[7]</sup>로 주로 부품의 수명예측, 날씨예보, 실패분석 등에 적용되고, 다음과 같이 정의된다.

$$f(x|a,b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, \quad x > 0, \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 분포모수(scale factor)이고,  $b$ 는 형상모수(shape factor)이다. Fig. 1에서 풍속에 대한 베이블분포를 적용한 결과를 볼 수 있다. 이 경우, 베이블분포의 분포모수  $a$ 는 5.69, 형상모수  $b$ 는 1.79로 나타나고 있으며, 풍속의 분포와 유사한 확률밀도함수가 나타남이 확인되었다.

일반적으로 풍속이 증가하고, 바람 지속시간이 길어질 경우 주축이 회전할 확률이 높아진다. Fig. 2는 풍속과 주축회전수의 관계를 보인다. 주축회전수 분포를 보면 블레이드가 정지해 있는 경우(0 r/min)와 8 r/min 및 16 r/min에서 높은 빈도수를 가지고 있음이 확인가능하다.

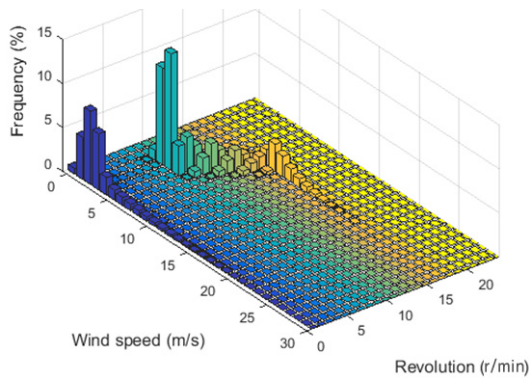


Fig. 2. Relation between wind speed and revolution of main shaft.

풍속 빈도가 가장 높은 3 m/s에서 회전수가 0 r/min인 때는 풍력발전기가 초기화, 운전준비 단계, 고정 단계인 경우이고, 회전수가 8 r/min인 경우는 풍력발전기가 시동단계, 발전단계, 자유운동단계에 있음을 의미한다. 즉, 풍속이 동일하더라도 풍력발전기의 상태는 다를 수 있음을 확인시켜준다. 풍속이 5 m/s ~ 8 m/s 범위에서는 풍속 증가에 따라 회전수가 증가하지만, 9 m/s 이상에서는 회전수가 16 r/min으로 일정하게 유지된다. 이는 9 m/s 이상일 경우, 제어계통에서 블레이드의 과도한 회전을 방지하는 시스템을 작동시키기 때문이다.

Fig. 3은 주축회전수와 발전량 사이의 관계를 나타낸다. 주축회전수가 8 r/min 이하인 경우에는 발전량이 매우 적음을 알 수 있다. 회전수가 0 r/min인 경우 발전이 없는 것은 당연하다. 하지만 8 r/min으로 주축이 회전하고 있음에도 발전량이 0 MW인 경우도 상당시간 존재한다. 이는 시동단계 일부와 자유운동단계에서 발전기가 작동하지 않기 때문이다. 10 r/min에서 15 r/min까지 주축회전수가 증가함에 따라 발전량도 0.5 MW 이상 생산되면서 증가함을 볼 수 있고, 16 r/min에서 발전기 최대 발전용량인 3 MW가 생산되는 것이 확인된다. 10 r/min 이상에서는 동력전달 계통이 모두 연결되어 동작함을 의미하고, Fig. 2와 비교를 통하여 풍속이 5 m/s 이상 유지될 때 안정적인 전력 생산이 가능함을 알 수 있다.

풍속-주축회전수 및 주축회전수-발전량 분포를 비교하면, 풍속 증가에 의해서 주축회전수가 증가하고, 이에 따라 발전량도 증가하는 경향을 명확하게

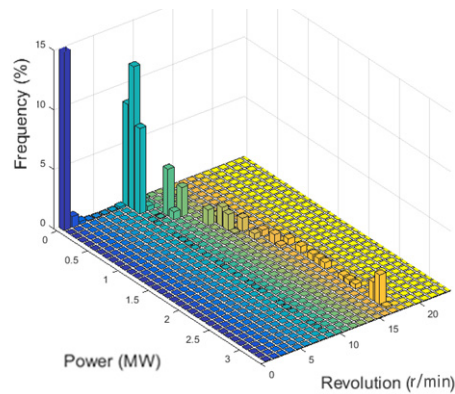


Fig. 3. Relation between generated power and revolution of main shaft.

보인다. 이는 주축회전수가 풍력발전기 상태를 설명하는 주요 매개변수로 활용될 수 있음을 뜻한다.

### 3.2 진동신호의 경향 분석

풍력발전기 운전 중 동력전달계통 주축, 기어박스, 발전기와 같은 회전체의 구조건전성은 진동신호의 측정으로 파악 가능하다. 3.1절의 분석 결과에서 풍속과 발전량이 주축회전수와 밀접한 관계를 가지기 때문에 본 절에서는 각 기계시스템에서 측정된 진동신호 분포를 주축회전수를 기준으로 분류하여, 주축회전수에 따른 진동신호 변화 및 특정 주축회전수에서의 진동분포를 분석한다(Fig. 4).

먼저, 시간-가속도 형식의 진동신호를 주축회전수-가속도 형식으로 변환하고, 각 주축회전수에 속한 가속도 신호의 평균 및 표준편차를 계산하였다. Fig. 5는 주축베어링에서 측정된 회전수에 따른 가속

도 평균치의 변화 경향을 보인다. 7 r/min까지는 가속도의 크기가 매우 작고, 회전수가 증가함에도 가속도 평균값은 거의 변화가 없다. 하지만 8 r/min 이상 영역에서는 가속도가 회전수와 함께 증가한다. 이는 8 r/min부터 발전이 시작되면서 계통과 발전기가 연결되면서 하중 증가로 진동이 증가하는 것으로 예측된다. 16 r/min 초과되는 영역에서 진동이 감소하는 것은 풍력발전기 발전단계에서 고속돌풍 발생시 발전기와 계통이 분리되면서 주축의 정지 또는 자유운동모드를 결정하는 천이 영역이 발생하기 때문이다.

수평 X, 수직 Y 방향으로의 진동이 로터축 Z 방향보다 큰 이유는 블레이드 및 주축 회전에 따른 질량 불평형 또는 회전체 정렬에 의한 영향이다. 이러한 원인을 알기 위해서는 회전체에 대한 궤도분석 또는 차수분석이 추가되어야 한다. 하지만, 이러한 분석 방법은 본 연구에서 다루는 데이터에 적용할 수 없

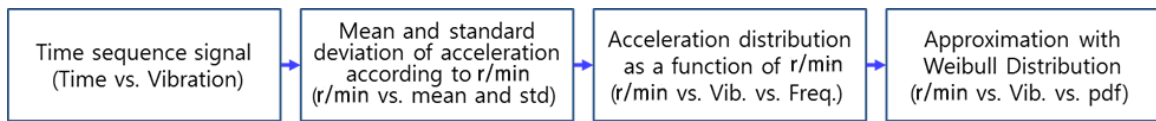


Fig. 4. Procedure of trend analysis on vibration signal.

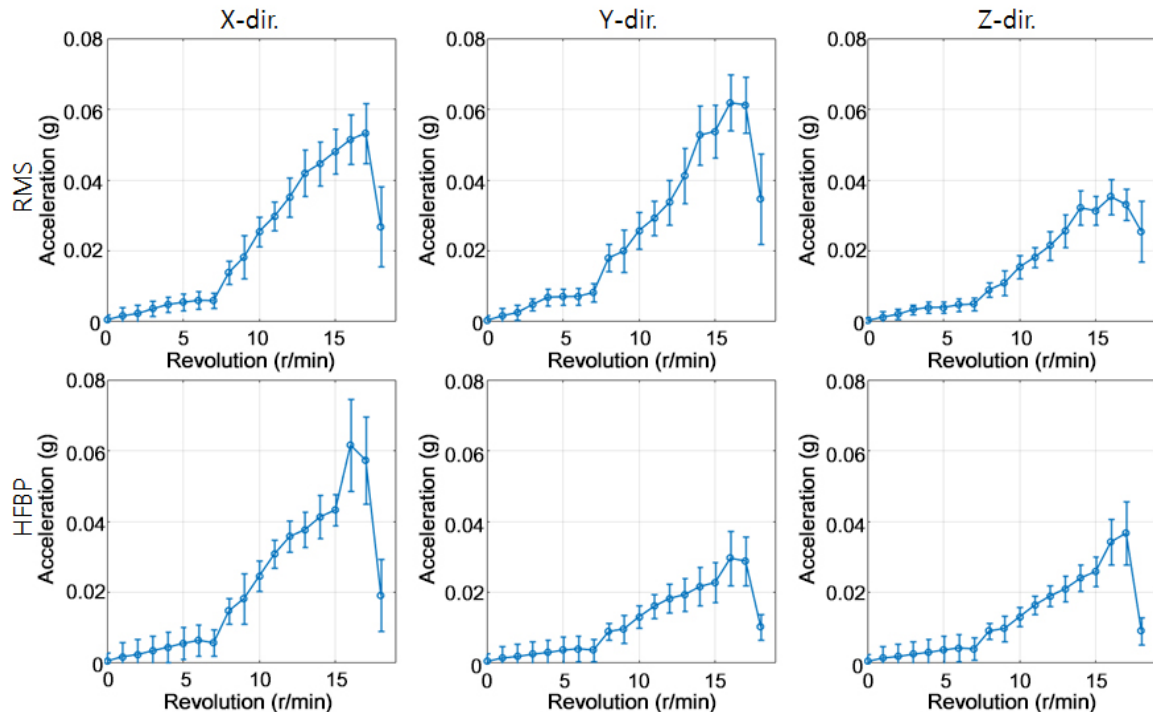


Fig. 5. Mean (dot) and standard deviation (error bar) of acceleration measured at main bearing according to r/min.

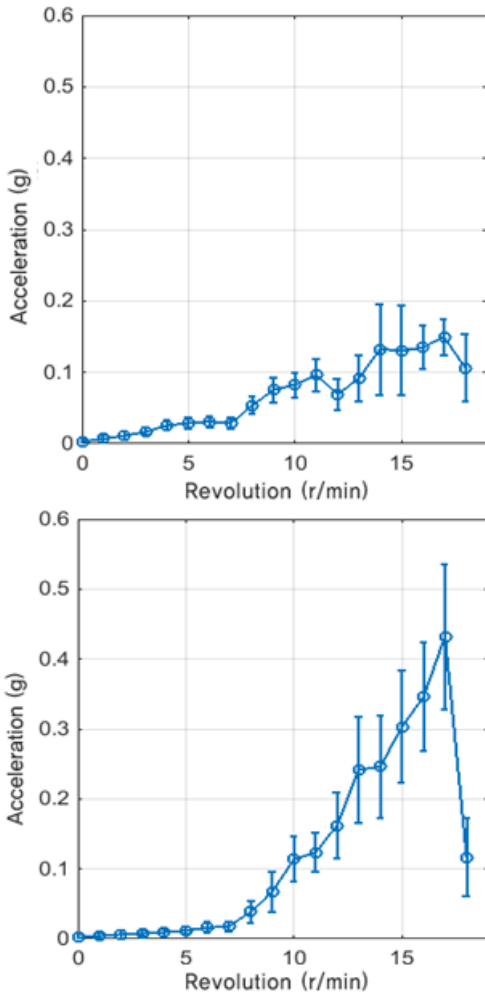


Fig. 6. Mean (dot) and standard deviation (error bar) of acceleration measured at high speed part of gearbox (upper: RMS and lower: HFBP of y-direction).

어 눈외로 한다. 주축베어링 진동의 경우, 저속 운전을 하기 때문에 RMS 값이 HFBP 값보다 크거나 비슷한 경향을 보인다.

Fig 6은 기어박스에서 측정된 Y 방향 진동신호의 주축회전수에 따른 가속도 평균치 변화 경향을 보인다. 주축회전수에 따른 가속도 평균치의 변화는 주축베어링과 같은 경향을 보이고 있다. 특히, 발전기와 연결되어 전력이 생산되는 영역인 8 r/min 이상에서 진동이 선형으로 증가하는 것이 동일하다. 하지만 모든 측정 위치에서 HFBP 값이 RMS 값보다 크게 나타나고 있다. 이는 기어박스가 기어비에 따라 회전수를 증가시켜 고주파수 진동 성분이 발생하기 때문이다.

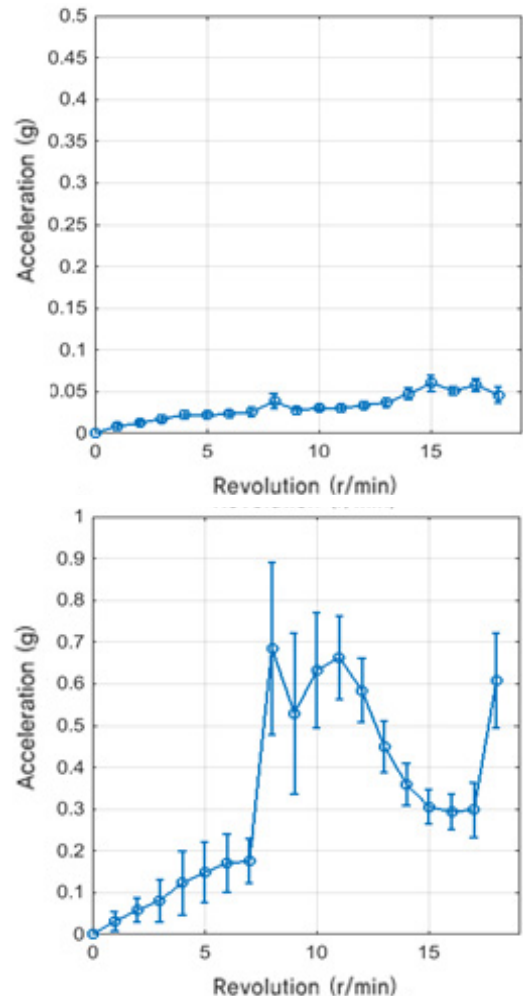


Fig. 7. Mean (dot) and standard deviation (error bar) of acceleration measured at generator (upper: RMS and lower: HFBP of y-direction).

Fig 7은 발전기에서 측정된 Y 방향 진동신호의 주축회전수에 따른 가속도 평균치 변화 경향을 보인다. 발전기는 고속으로 회전하기 때문에 HFBP 값이 RMS 값에 비해 8 r/min 이상 영역에서는 10배 정도 크게 나타난다. 주축회전수에 따른 HFBP의 변화를 볼 때, 주축베어링과 기어박스와는 다르게 8 r/min에서 값의 급한 상승이 나타나고, 그 이상 회전수에서는 8 r/min에서의 HFBP값과 비슷하거나 감소하는 경향을 보인다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 8 r/min에서 발전기가 계통과 연결될 때, 진동이 발생하기 때문이다. 또한 16 r/min 이상에서 진동값이 증가하는 이유도 풍속 증가에 따라 과도한 회전을 막고, 발전기의 안전을 위해 계통과 분리되면서 충격이 발생하

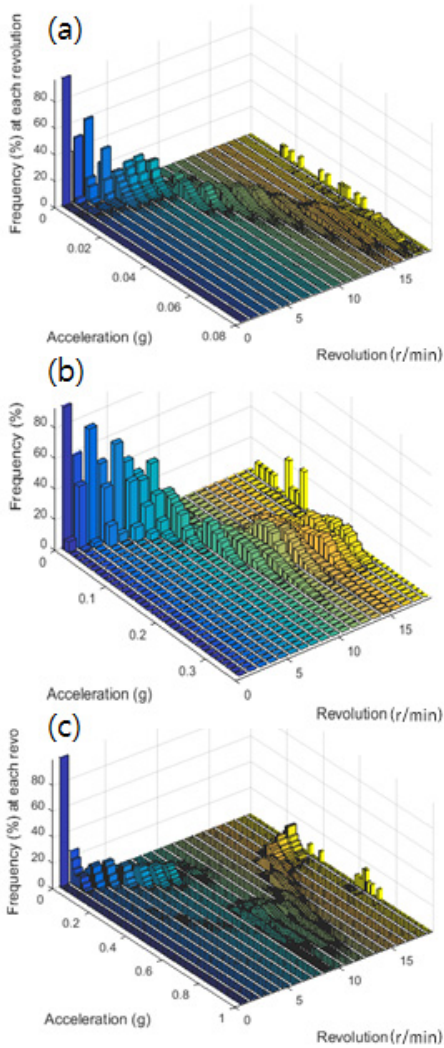


Fig. 8. Frequency distributions as a function of acceleration and r/min for y-direction (a) at main bearing, (b) at high speed part of gearbox, and (c) at input part of generator.

기 때문에 판단된다.

다음으로 각 기계시스템에서 회전수 및 가속도별 데이터 빈도 분포를 분석하였다. Fig. 8(a)는 주축베어링의 회전수에 따른 가속도 빈도분석 결과를 보인다. 특정 회전수에서 가속도 발생 빈도의 분포는 최대 빈도가 발생하는 가속도까지 증가하다가, 그 이상에서는 지수적으로 감소한다. 이러한 경향은 Fig. 8(b)와 (c)에서 보이는 기어박스 및 발전기의 회전수 및 가속도별 진동신호의 빈도 분포에서도 동일하게 나타난다. 따라서, 회전수에 대한 풍속의 분포처럼 특정 회전수에서 진동신호의 분포도 베이불분포로

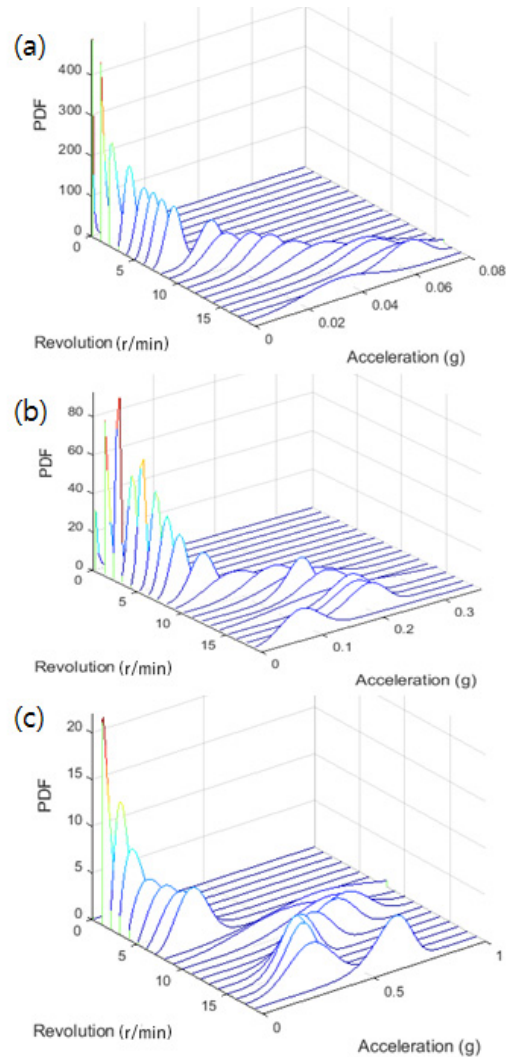


Fig. 9. Approximated Weibull distributions as a function of acceleration and r/min: for y-direction (a) at main bearing, (b) at high speed part of gearbox, and (c) at input part of generator.

모사 가능한 것으로 판단된다.

이 결과로 부터 회전수에 따른 가속도 발생 분포를 베이불함수로 모사하였고, 그 결과는 Fig. 9와 같다. 앞서 언급한 것처럼 풍력발전설비 운전 중 발생하는 진동의 크기는 특정 기계시스템의 고장여부를 판단하는 주요인자로 사용된다. 따라서 진동 분포를 특정 확률함수로 모사할 경우, 고장여부를 판별할 수 있는 기준값을 보다 정확히 얻을 수 있다.

일반적으로 다수 데이터의 분포 특성은 정규분포 (normal distribution)로 설명되고, 풍력발전기의 상태 감시 분야에서도 진동신호를 정규분포로 근사하여

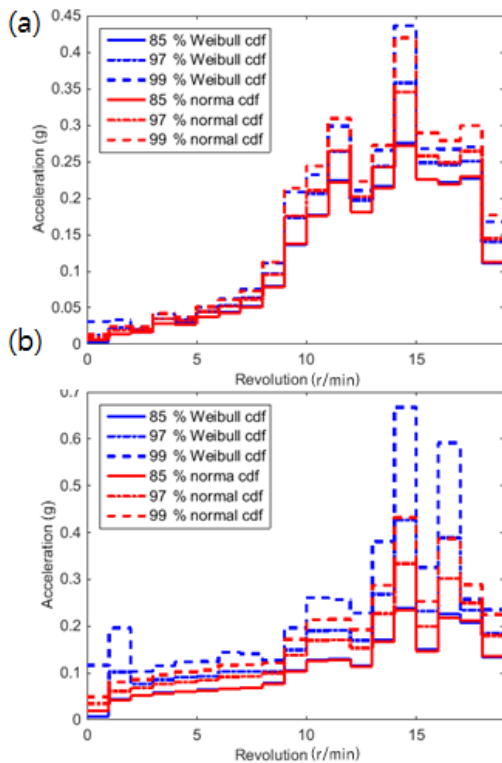


Fig. 10. Comparisons of reference values obtained from normal and Weibull distributions. The reference values are coincident with 85 %, 97 %, and 99 % cumulative distribution of each function. (a) Y-direction and (b) z-direction of high speed part of gearbox.

기계시스템의 고장여부를 판별하는 기준값을 설정한 선행연구도 있다.<sup>[8]</sup> 따라서 기준값 선정을 위하여 베이불분포를 이용할 경우, 기존 정규분포와 어떤 차이가 나타나는지를 비교하는 것이 필요하다.

진동신호의 경우 그 값이 클 경우에만 이상이 발생한다. 따라서, 평균을 기준으로 하위 50%는 정상치로 인정하고, 상위부분에 대해서만 고려하는 단측 신뢰구간을 적용하여 고장유무 판별에 사용될 기준값을 산출하는 것이 타당하다. 여기서, 기준값은 정규분포의  $1\sigma(85\%)$ ,  $2\sigma(97\%)$  및  $3\sigma(99\%)$ 에 해당하는 누적분포를 기준으로 하였다.

Fig. 10은 기어박스 고속부분의 Y방향 및 Z방향으로 발생하는 진동신호에 대한 분포 특성에서 세 누적분포에 해당하는 가속도 값을 정규분포 및 베이불분포를 이용하여 구하고, 이를 회전수의 함수로 비교한 예를 보인다. Y방향의 경우 두 확률함수로부터 구한 기준값의 차이가 매우 작은 반면, Z방향에서는

최대 1.6배 이상의 차이가 나타남을 볼 수 있다. 이러한 결과는 적용되는 확률함수에 따라 특정 회전수 영역에서 진동 허용범위에 차이가 있을 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 차이에 대한 물리적인 의미는 향후 고장이력에 대한 조사 또는 고장 모의 실험을 통해서 확보할 수 있을 것이다.

### 3.3 진동신호 사이의 상호 연관성

CMS에서는 데이터 취득 시 전기노이즈 등 기계시스템과는 관계없는 환경조건에 의하여 특정 채널이 영향을 받는 경우가 종종 발생한다. 이러한 현상은 입력신호에 영향을 미쳐, 기 설정된 기준값을 초과할 수 있고, 이 때문에 해당 기계시스템이 고장으로 인지되는 오류를 만들 수 있다. 따라서, 최근에는 관련 기계시스템 사이의 물리적 연관성을 나타내는 대표 인자들을 추출하여 상호 비교를 통하여 이러한 문제를 해결하려는 노력이 진행되고 있다.<sup>[9,10]</sup>

본 절에서는 풍력발전설비의 주요 기계부품 방향별 진동신호 사이의 상관성을 파악하기 위하여 각 진동신호사이의 상관계수를 계산하였고, 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 주축베어링의 경우, X, Y, Z 방향에서의 진동신호가 측정되고, 각 진동신호는 RMS와 HFBP로 계산되어 저장된다. 즉, 총 6개의 시간-진동 데이터를 가진다. 이 6개 데이터 사이의 상관계수를 계산한 결과, 모두 0.9 이상으로 신호별 높은 상관성을 나타낸다.

기어박스의 경우, 총 8개의 시간-진동데이터를 가지는데, 데이터들 사이의 상관계수가 모두 0.7 이상의 값을 가져 상관성이 높음을 알 수 있다. 특히, RMS-RMS 사이의 상관성 및 HFBP-HFBP 사이의 상관성이 더 강한 것으로 나타나고 있다. 이는 기어박스의 기능에 따라 저주파수와 고주파수 진동성분의 차이가 발생하기 때문으로 보인다.

발전기의 경우, 총 4개의 시간-진동데이터를 가진다. 앞에서 언급한 것과 같이 발전기의 고주파수 진동성분은 저주파수 진동성분에 비해 상대적으로 크기 때문에 RMS값과 HFBP값 사이의 차이가 크다. 따라서, RMS-RMS 또는 HFBP-HFBP 데이터 사이의 상관성은 높으나, RMS-HFBP 데이터 사이의 상관성은 매우 약하게 나타나고 있다. 또한 발전기의 진동신



Table 3. Correlation coefficients among vibration signals measured from main bearing, gearbox and generator.

Dir.	Main bearing						Gearbox								Generator			
							Low speed				High speed				Input		Output	
	X		Y		Z		Y		Z		Y		Z		Y		Y	
Vib	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP	RMS	HFBP
Ch.	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
4	1.00	0.96	0.94	0.94	0.97	0.94	0.80	0.91	0.81	0.87	0.83	0.91	0.83	0.86	0.69	0.30	0.63	0.62
5		1.00	0.92	0.97	0.94	0.96	0.77	0.89	0.80	0.85	0.79	0.90	0.81	0.84	0.67	0.32	0.60	0.63
6			1.00	0.92	0.97	0.93	0.82	0.87	0.82	0.84	0.79	0.87	0.82	0.82	0.76	0.32	0.71	0.61
7				1.00	0.94	0.98	0.77	0.87	0.79	0.83	0.78	0.88	0.80	0.82	0.70	0.32	0.63	0.62
8					1.00	0.95	0.83	0.90	0.82	0.87	0.82	0.90	0.83	0.85	0.72	0.28	0.65	0.60
9						1.00	0.77	0.87	0.79	0.83	0.77	0.88	0.80	0.82	0.71	0.31	0.65	0.61
10							1.00	0.78	0.74	0.76	0.87	0.78	0.80	0.75	0.66	0.32	0.61	0.57
11								1.00	0.77	0.93	0.81	0.97	0.81	0.90	0.60	0.18	0.54	0.50
12									1.00	0.80	0.75	0.78	0.82	0.71	0.73	0.40	0.69	0.64
13										1.00	0.79	0.93	0.78	0.84	0.60	0.18	0.55	0.50
14											1.00	0.82	0.80	0.76	0.55	0.35	0.51	0.62
15												1.00	0.81	0.91	0.61	0.20	0.55	0.52
16													1.00	0.81	0.65	0.34	0.58	0.59
17														1.00	0.60	0.23	0.54	0.51
18															1.00	0.50	0.95	0.64
19																1.00	0.48	0.81
20																	1.00	0.59
21																		1.00

호는 주축베어링 및 기어박스 진동신호와 낮은 선형성을 보인다.

정리하면, 각 기계시스템에서 측정된 진동신호 사이에서는 높은 상관성을 보이고, 특히 진동 방향이 다르더라도, 해당 주파수 대역이 같으면 데이터들 사이의 상관계수가 크게 나타났다. 구조상 주축과 기어박스는 주축회전에 따라 연동하여 운전되기 때문에 두 기계시스템에서 측정된 진동신호 사이의 상관계수는 대부분 0.7 이상을 나타내면서 높은 상관성을 보인다. 하지만 발전기의 진동신호와 주축베어링과 기어박스 관련 진동신호 사이의 상관계수는 높지 않다. 이는 발전기의 경우, 풍력발전기 운전 특성상, 주축이나 기어박스와 같이 로터블레이드 회전과 함께 항상 회전하지 않고, 특정 조건에서만 동작하기 때문이다. 이러한 결과는 현재 운영되고 있는 풍력발전기 CMS의 기계시스템 고장유무 판단의 신뢰도 향상을 위한 기본 자료로 활용가능하다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기에 설치 운영되고 있는 CMS에서 측정된 주요 기계시스템의 진동, 풍속, 주축회전수, 발전량 등의 장기데이터를 통계적으로 분석하여 분포 특성을 파악하였다. 먼저 주축회전수가 풍속 및 발전량 등 풍력발전기의 상태를 설명하는 주요 매개변수임을 확인하였다. 또한 주축베어링, 기어박스, 발전기에서 발생하는 진동을 주축회전수에 따라 분리한 후, 특정 회전수에서 진동 분포를 베이블분포로 근사하였다. 이를 바탕으로 기계시스템의 고장판별을 위한 기준치 설정에서 정규분포를 이용한 경우와의 차이를 비교하였다. 마지막으로 주축베어링과 기어박스에서 발생하는 진동이 연동되어 있음을 확인하였다. 그러나 발전기의 진동 특성은 풍력발전기 발전 체계에 따라 주축베어링 또는 기어박스와 선형적인 관계를 가지지 않았다. 이러한 결

과는 향후 풍력발전기 CMS를 이용한 기계시스템의 초기 고장진단을 위한 데이터 융합 기술 적용에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 2015년도 한국기계연구원 주요사업 연구개발 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제 결과 중 일부이다.

### References

1. R. Gulati, *Maintenance and Reliability: Best Practices* (Industrial Press, Inc., New York, 2009), pp. 46-67.
2. Anon., "Improving Maintenance Effectiveness Guidelines: An Evaluation of Plant Preventive and Predictive Maintenance Activities," EPRI TR-107042 Final Report, 1998.
3. B. S. Hwang, B. K. Kim, S. J. Moon, and K. H. Lee, *An Understanding of Advanced Wind Turbines* (in Korean), (A-JIN, 2010).
4. IEC 61400-25-6: *Communications for monitoring and control of wind power plants - Logical node classes and data classes for condition monitoring* (2007).
5. IEC 61400-25-1: *Communications for monitoring and control of wind power plants - Overall description of principles and models* (2006).
6. E. Muljadi, C. P. Butterfield, B. Parsons, and A. Ellis, "Characteristics of variable speed wind turbines under normal and fault conditions," in Proc. Power Engineering Society General Meeting of IEEE, 1-7, (2007).
7. <http://support.minitab.com/ko-kr/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/reliability/distributions-in-reliability-analysis/weibull-distribution/>, 2016.
8. S. R. Kim, B. K. Kim, J. S. Kim, H. S. Kim, and S. H. Lee, "Application of statistical technique for condition monitoring variables of wind turbines" (in Korean), Proceedings of the 2012 Autumn Meeting of the KSNVE, 502-503 (2012).
9. Y. Lei, J. Lin, Z. He, and D. Kong, "A method based on multi-sensor data fusion for fault detection of planetary gearboxes," *Sensors*, **12**, 2005-2017 (2012).
10. B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, and N. Razavi, "Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art," *Information Fusion*, **14**, 28-44 (2013).

### 저자 약력

▶ 신 성 환 (Sung-Hwan Shin)



1997년 2월: KAIST 기계공학과 학사  
 1999년 2월: KAIST 기계공학과 석사  
 2004년 8월: KAIST 기계공학과 박사  
 2004년 9월 ~ 2005년 8월: KAIST 기계기술 연구소 BK21 연수연구원  
 2005년 9월 ~ 2008년 12월: 일본 Seikei University Post Doc.  
 2008년 12월 ~ 2013년 1월: 한국원자력연구원 선임연구원  
 2013년 3월 ~ 현재: 국민대학교 자동차공학과 부교수  
 <관심분야> 소음/진동제어, 음질평가 및 설계, 패턴인식, 기계건전성 예측

▶ 김 상 렬 (SangRyul Kim)



1993년 2월: 부산대학교 학사  
 1995년 2월: KAIST 기계공학과 석사  
 2006년 2월: KAIST 기계공학과 박사  
 1995년 3월 ~ 현재: 기계연구원 책임연구원  
 <관심분야> 소음/진동제어, 상태감시 및 고장진단, 신호처리 및 분석

▶ 서 윤 호 (Yun-Ho Seo)



2003년 2월: 연세대학교 기계공학과 학사  
 2009년 2월: KAIST 기계공학과 박사  
 2012년 6월: 현대중공업  
 2012년 7월 ~ 현재: 한국기계연구원 선임연구원  
 <관심분야> 소음/진동제어, 상태감시 및 고장진단, 신호처리 및 분석