

## 풍력발전기용 증속기 상태 모니터링에 관한 기초 연구

\*박 영준<sup>1)</sup>, 이 재정<sup>2)</sup>, 이 근호<sup>3)</sup>, 남 용운<sup>4)</sup>

### Preliminary study on the Condition Monitoring of Wind-turbine Gearbox

\*Youngjun Park, Jaejeong Lee, Geunho Lee, Yongyun Nam

**Key words** : 기어박스(gearbox), 상태 모니터링(condition monitoring), 마모 입자(wear particle), 진동(vibration), 오일 열화(oil condition), temperature(온도)

**Abstract** : To improve the reliability and extend the life for a wind-turbine gearbox, the gearbox needs to be monitored and analysed exactly. This study was conducted to analyze and detect the gearbox conditions when lubricating oil contaminated by wear particles was used. Characteristics of the gearbox failure by wear particles were monitored simultaneously by the on-line measurement sensor of vibration, oil condition and temperature. For the detail vibration analyses, frequency analysis(FFT) was performed.

The results of the study were summarized as follows: Vibrational signal was found sensitive to abnormal changes of the gearbox conditions when lubricant was contaminated by wear particles. Also, using frequency analysis for the harmonics of gear mesh frequency(GMF), it is found that the failure of gearbox was caused by the damages of meshing gears. However, temperature and oil condition measuring signals were found not so effective to detect any gearbox failure by oil contamination.

### 1. 서론

최근 대체에너지산업으로 각광을 받고 있는 풍력발전산업에서 가장 중요한 요소는 바람에너지를 전기에너지로 변환하는 풍력발전시스템의 성능과 내구수명이다. 풍력발전시스템은 블레이드, 로터, 증속기, 발전기, 타워, 제어시스템으로 구성되어 있으며, 그 중에서도 증속기는 고장 빈도가 높은 구성품으로 알려져 있다. 풍력발전시스템용 증속기는 높은 타워 위 나셀 내부에 좁은 공간에 설치되며 고장 발생 시 교체가 까다롭고 비용이 많이 드는 특징이 있다. 또한, 로터 블레이드 축과 발전기 사이에 위치하면서 저속으로 분당 15에서 40 회전하는 저회전 고투크의 로터 블레이드 입력 동력을 분당 약 1,000에서 1,800 회전하는 속도로 증속하여 고회전 저토크의 출력 동력으로 변환하여 발전기에 전달한다. 이때 급격한 풍력 변화는 큰 변동 부하를 발생시킴으로 증속기를 구성하는 기어 및 베어링 등의 강도 및 수명에 영향을 준다. 또한, 풍력발전시스템용 증속기는 20년 이상의 사용 수명을 요구하고 있다. 그러나 증속기가 설치된 중·대형 발전시스템의 경우 증속기의 잦은 고장으로 인하여 가동 중단 시간이 늘어나면서 국내의 풍력발전시스템 보급 확대에 걸림돌이 되고 있다. 따라서

풍력 발전시스템의 보급을 확대하고 국내 환경에 적합한 풍력발전시스템을 개발하기 위해서는 풍력발전시스템의 고장에 대한 원인을 명확히 분석하고 그에 따른 유지보수 기술의 확보도 중요하지만 고장 이전에 시스템의 고장을 예측할 수 있는 예지보전(predictive maintenance) 기술이 필요하다<sup>[2,3,5]</sup>.

따라서 본 연구에서는 기어박스의 고장원인들 중에서 윤활유 오염에 의한 시스템 손상에 대하여 시험을 통해 특성을 분석하고 이를 풍력발전용 증속기의 상태진단 기술에 적용하기 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

- 
- 1) 저자의 소속: 한국기계연구원  
E-mail : yjpark77@kimm.re.kr  
Tel : (042)868-7994 Fax : (042)868-7186
  - 2) 저자의 소속: 한국기계연구원  
E-mail : leejj126@kimm.re.kr  
Tel : (042)868-7978 Fax : (042)868-7186
  - 3) 저자의 소속: 한국기계연구원  
E-mail : ghlee762@kimm.re.kr  
Tel : (042)868-7161 Fax : (042)868-7186
  - 4) 저자의 소속: 한국기계연구원  
E-mail : yynam@kimm.re.kr  
Tel : (042)868-7413 Fax : (042)868-7186

## 2. 시험장치 및 방법

### 2.1 시험장치

본 연구에서는 상태진단의 대상체로서 증속기 대신 취급이 간편하고 가격이 저렴한 지게차용 기어박스(변속기)를 사용하였다. 지게차용 기어박스에도 진동, 온도 및 오일열화 기술을 이용한 증속기 상태진단 기술의 적용 가능성 여부를 예측하기에 충분하다고 판단하였다.

본 연구에 사용된 시험장치의 구성은 그림 1과 같으며, 기어박스의 상태를 실시간 모니터링할 수 있도록 장치와 센서를 구성하였다. 기어박스를 구성하는 기어 및 베어링의 손상에 따른 상태진단을 위하여 진동, 오일열화, 온도, 압력, 유량 등 다양한 인자를 계측하였다.

그림 2와 같이 진동 모니터링을 위하여 기어박스에서 베어링이 위치하는 곳에 가속도계를 설치하였으며, 오일펌프의 송출포트에 오일열화, 온도, 압력, 유량을 측정하기 위한 센서를 장착하였다.

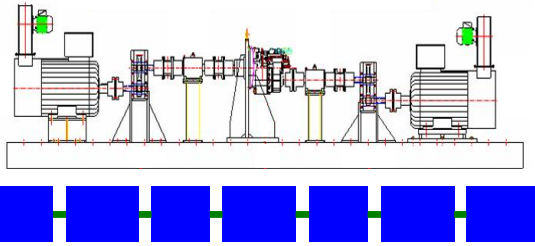


Fig. 1 Structure of test devices used in the study

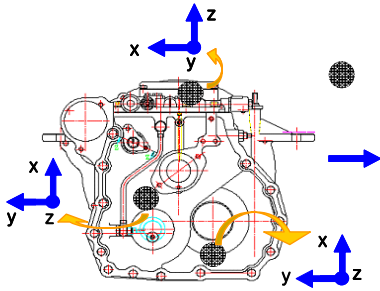


Fig. 2 Location of accelerometers on the gearbox

Table 1 Spec. of sensors used for the measurement

Equipment	Specifications
Pressure	0~35Bar, 1~5V
Temperature	0~120°C, 2~10V
Flow meter	75 l / min, 0~9mA
Oil condition sensor	Oil Quality(0~100) 4~20mA
Accelerometer	Triaxial, 0.1~12kHz

### 2.2 시험 방법

기계시스템에 손상을 일으키는 원인으로는 축정렬불량(misalignment), 불균형(unbalance), 기어/ 베어링 결함 등 여러 요인들이 있으나, 본

연구에서는 윤활유 오염에 의한 기어 및 베어링의 손상에 대하여 고찰하였다<sup>[4,6]</sup>.

윤활유 오염 시험은 시험용 기어박스에 마모 입자(wear particle)를 투입하여 오일을 인위적으로 오염시키는 방법으로 수행하였으며, 최초 기어박스의 신유 상태에서 기어박스 내부에 마모 입자를 투입하여 오염도를 증가시키며 시험하였다<sup>[1,7,8]</sup>.

시험장치의 운전조건은 입력 모터의 속도를 800rpm, 출력 다이내모미터의 부하를 20kg<sub>r·m</sub>과 60kg<sub>r·m</sub>으로 하였으며, 시간에 따른 마모 입자의 투입은 표 2와 3에서와 같다.

Table 2 Class of wear particle for oil contamination

Class	Material	Diameter, $\mu\text{m}$
Class1	Quartz sand	185 to 200
Class2		27 to 31
Class3		6.6 to 8.6

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 윤활유 오염에 따른 진동 분석

시험장치의 입력속도를 일정하게 유지한 상태에서 표 3과 같이 기어박스 내부로 투입하는 오염 입자의 크기 및 양과 출력 부하를 변화시키며 진동을 측정하였다.

Table 3 Vibration value according to oil contamination

no.	시험조건			P1 z방향 진동값, $\text{m/s}^2$
	입자 함유량, ppm	부하, kg <sub>r·m</sub>	particle class	
①	-	20	Class3	20.56
②	200			23.33
③	500			23.33
④	-			32.17
⑤	50		Class1	34.18
⑥	50			35.37
⑦	-			31.29
⑧	50			34.37
⑨	50			34.61
⑩	-			42.48
⑪	100			60

그림 3은 시간에 따른 마모 입자 투입에 의한 진동 시험 결과로서, 기어박스에 부착한 3개의 가속도계 중 Z축 방향의 가속도를 나타낸 것이다. X축과 Y축 방향의 진동은 Z축 방향과 비교하여 진동값이 상대적으로 작게 나타났다. 또한, Z축 방향에서도 출력축 베어링 위치(P3)에서의 진동값이 가장 크게 나타났으며, 오일오염에 가장 민감한 것을 알 수 있었다.

마모 입자의 크기가 class3일 때, 입자 함유량이 200ppm일 때는 초기상태와 비교하여 진동값이 크게 증가하지 않았으나, 500ppm을 추가적으로 넣었을 때는 약  $9\text{m/s}^2$ 의 진동값이 증가하였다.

또한, 마모 입자 크기를 증가시켜 class3의 입자를 50ppm씩 추가적으로 투입함에 따라 진동값이 서서히 증가함을 알 수 있었다.

같은 마모 입자 조건에서 부하에 따른 진동값을 살펴보면, 정격부하인 60kgf·m에서의 진동값이 20kgf·m에서보다 약 8m/s<sup>2</sup>가 증가하였다. 즉, 부하가 커짐에 따라 진동값이 증가함을 알 수 있었다.

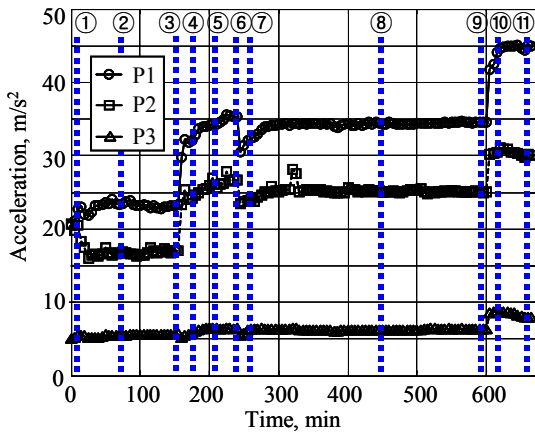


Fig. 3 Trend of vibration according to oil contamination

그림 4는 마모 입자의 투입에 의해 진동값이 가장 크게 나타난 P1 위치에서의 시간에 따른 진동 신호를 주파수 분석(FFT)한 결과이다. 그림의 오른쪽 위에 위치한 숫자는 그림 3에서와 같이 마모 입자의 투입시기를 의미한다. 투입량이 증가함에 따라 전체 진동값뿐만 아니라 1800Hz에서

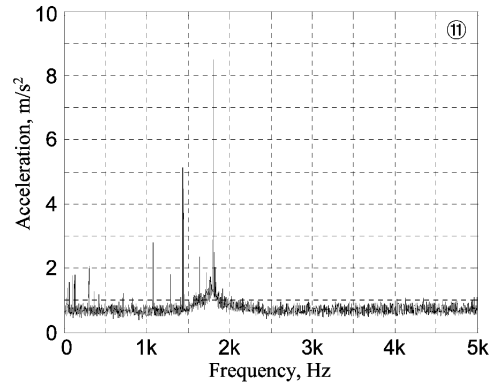
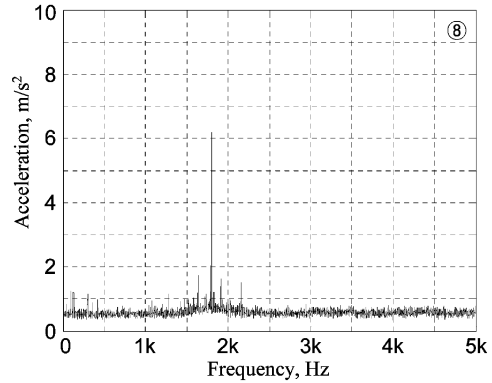


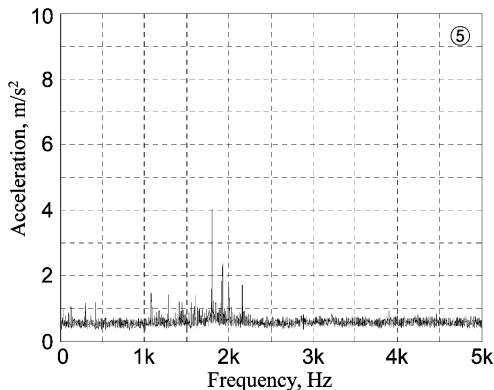
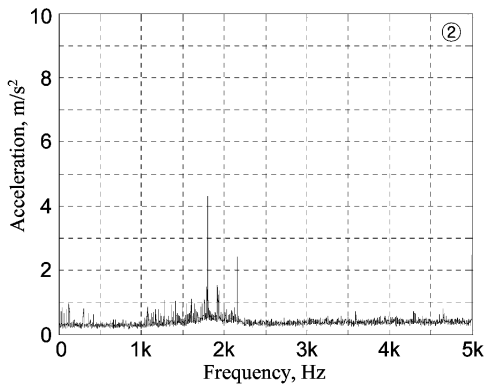
Fig. 4 Frequency analysis of vibration on the gearbox according to oil contamination

의 진동값도 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 즉, 1800Hz에서의 진동값은 ②에서는 4.31m/s<sup>2</sup>, ⑤에서는 4.01m/s<sup>2</sup>, ⑧에서는 6.18 m/s<sup>2</sup>, ⑪에서는 8.48 m/s<sup>2</sup>로 나타났다. 본 연구 대상인 기어박스의 기어물림주파수(gear mesh frequency, GMF)는 360Hz이므로, 1800Hz는 기어물림주파수의 5배에 해당하는 조화 성분이다. 이러한 결과를 토대로 마모 입자 투입으로 맞물림 기어에 손상이 예상되며, 전체 진동값의 증가 원인이 기어 손상인 것으로 판단된다. 마모 입자에 의한 기어의 손상은 진동 데이터의 주파수 분석을 통하여 확인할 수 있었다.

### 3.2 윤활유 오염에 따른 오일 열화 및 온도 분석

그림 5는 시간에 따른 마모 입자 투입에 의한 오일 열화 및 온도 시험 결과를 나타낸 것이다. 오일 열화는 오일 열화 지수(oil condition index)로 표시하며, 0에서 100 사이의 값으로 나타낸다. 그림에서와 같이 오일 열화는 마모 입자를 투입할 때에만 잠시 지수(index)의 변화가 있을 뿐 대체로 윤활유의 상태가 신규일 때와 동일한 지수값을 나타내었다. 즉, 오일 열화는 마모 입자에 의한 오일 오염보다는 윤활유내로 유입된 수분과 오일의 산화 정도를 감지하는데 적당하다고 판단되었다.

또한, 온도는 마모 입자의 투입과는 상관없이 시험장치의 작동 시간과 관계가 있음을 알 수 있



었다. 즉, 작동 초기에는 상온을 유지하며, 작동됨과 동시에 서서히 온도가 상승하여 점점 상승폭이 작아지다가 일정한 온도를 유지하였다. 그러므로 윤활유의 오일 온도를 이용하여 기계 상태를 진단하는 것은 적당하지 않다고 판단되었다.

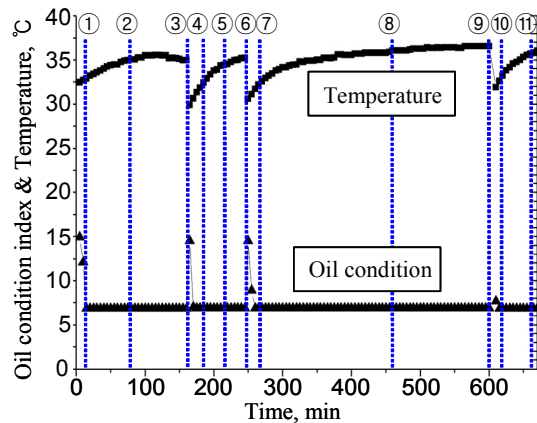


Fig. 5 Trend of oil condition and temperature according to oil contamination

#### 4. 결론

본 연구는 풍력발전기용 증속기의 모니터링을 통한 상태진단에 관한 기초 연구로서, 기어와 베어링으로 구성된 기계시스템의 고장원인 중 마모 입자에 의한 오일 오염에 대한 기계시스템의 상태를 시험을 통하여 시스템 특성을 분석하고자 하였다. 또한 이 결과를 이용하여 풍력발전기용 증속기의 상태진단 기술에 적용하기 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

마모 입자 투입에 의한 진동 시험 결과, 입자 크기와 투입량이 증가할수록 전체 진동값이 증가하였으며, 같은 마모 입자 조건에서 부하가 증가할수록 진동값이 증가하였다. 진동 데이터의 주파수 분석을 통해서 기어박스의 고장원인을 확인할 수 있었다. 주파수 분석을 이용하여 진동값의 경향을 확인할 수 있었으며, 기어물림주파수의 조화성분의 진동값 증가 추세를 통하여 맞물림 기어의 손상을 예상할 수 있었다.

마모 입자 투입에 의한 오일 열화 및 온도 시험 결과, 오일 열화 지수와 온도는 입자 크기와 투입량이 증가하여도 큰 변화를 보이지 않았다. 즉, 오일 열화와 온도는 마모 입자에 의한 오일 오염에 따른 기어박스의 상태진단에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

기어박스의 손상 원인 중 마모 입자에 의한 오일 오염의 경우, 진동값이 손상의 경향을 잘 대변해주고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 후기

본 과제(결과문)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

#### References

- [1] 강기홍, 한양대학교 석사학위 논문, 2001, "마멸과 진동 해석에 의한 저널베어링 파손 특성에 관한 연구".
- [2] 박영준, 이근호, 이종원, 남윤수, 차종환, 2007, "모니터링을 이용한 중형 풍력발전기용 증속기 주축의 부하특성 분석 연구", 한국신.재생에너지학회 춘계학술대회논문집, pp. 378-382.
- [3] 박영준, 이근호, 이기훈, 한승호, 한정우, 2008, "부하 스펙트럼을 이용한 풍력 발전기용 증속기의 피로 수명 평가", 한국풍력에너지학회 춘계학술대회논문집, pp.109-113.
- [4] 양보석, 2006, 기계설비의 진동 상태 감시 및 진단, 인터뷰전.
- [5] 이근호, 박영준, 이기훈, 2007, "중·대형 풍력발전기용 증속기 기술 현황 및 개발 동향" 한국기계연구원, 기계와 재료, 제19권 제2호-통권72호.
- [6] 장석동, 경상대학교 석사 학위 논문, 2005, "회전기계의 고장 진단에 관한 연구".
- [7] S. Ebersbach, Z. Peng, N.J. Kessissoglou, 2006, "The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques", Wear, Volume 260, Issues 1-2, Pages 16-24.
- [8] Z. Peng, N.J. Kessissoglou, M. Cox, 2005, "A study of the effect of contaminant particles in lubricants using wear debris and vibration condition monitoring techniques", Wear, Volume 258, Issues 11-12, Pages 1651-1662.