

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.7.665>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

## 풍력발전기 유성기어박스의 진동 변조 특성을 고려한 진동기반 고장 진단 기법 고찰<sup>§</sup>

하종문\* · 박정호\* · 오현석\* · 윤병동\*<sup>†</sup>

\* 서울대학교 기계항공공학부

### A Vibration-based Fault Diagnostics Technique for the Planetary Gearbox of Wind Turbines Considering Characteristics of Vibration Modulation

Jong M. Ha\*, Jungho Park\*, Hyunsoek Oh\* and Byeng D. Youn\*<sup>†</sup>

\* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received November 5, 2014 ; Revised April 27, 2015 ; Accepted May 1, 2015)

**Key Words:** Wind Turbine(풍력발전기), Planetary Gearbox(유성 기어박스), Fault Diagnostics(고장진단), Vibration Modulation(진동 변조)

**초록:** 유성 기어박스의 진동기반 고장진단 기법은 조립 및 제작공차와 하중조건에 의해 결정되는 진동 변조특성에 따라 성능을 달리하는 특성을 갖는다. 이 논문에서는 풍력발전기에 장착되어 있는 유성 기어박스의 고장을 효과적으로 진단하기 위해 진동 변조특성을 고려한 고장진단기법을 제안하고자 한다. 리샘플링된 진동신호에 대한 대역 필터링을 사용함으로써 유성기어박스의 진동 변조특성을 규명하고자 하였으며, 진동추출 윈도우함수의 최적위치를 선정하여 활용함으로써 가변적 진동 변조현상에서도 강건한 고장진단을 수행할 수 있도록 하였다. 제안된 고장진단기법의 검증을 위해 2kW 급 풍력발전기 테스트베드가 설계되었으며 기어 치 부분파손이 모사 제작되어 기어박스에 장착되었다.

**Abstract:** The performance of fault diagnostics for a planetary gearbox depends on vibration modulation characteristics, which can vary with manufacturing & assembly tolerance, and load condition. In this paper, a fault diagnostics technique that considers vibration modulation characteristics is proposed for the effective fault detection of planetary gearboxes in wind turbines. For identifying the vibration modulation characteristics in practice, re-sampled vibration signals are processed with narrow band-pass filters. Thereafter, the optimal position of the vibration extraction window is identified for effective detection of faulty signals under the varying vibration modulation characteristics. The proposed diagnostics technique makes it possible to perform robust diagnostics of the planetary gearbox with regard to the changeable vibration modulation effect. For demonstrating the proposed fault diagnostics technique, a 2-kW WT testbed is designed with two DC motors and gearboxes. A faulty gear with partial tooth breakage is machined and assembled into the gearbox.

#### 1. 서론

풍력 발전 시장이 점차 확대됨에 따라 풍력 에너지 비용을 낮추고자 하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 풍력 에너지 비용을 효과적으로 낮

출 수 있는 방법 중 하나는 고장진단기법을 통해 고장의 징후를 파악하여 고장을 미연에 방지하는 것이다.<sup>(1)</sup> 특히 풍력발전기의 기어박스의 경우 한번의 고장으로 인해 막대한 경제적·사회적 손실을 일으킬 가능성이 크기 때문에 고장진단 및 예지 기술을 활용하여 고장을 미연에 방지하는 것이 필수적이다.<sup>(2)</sup> 이에 따라 최근 다양한 분야에서 기어박스에 대한 진동기반 고장진단 및 예지 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.<sup>(2,3)</sup> 하지만 풍력발전기의 경우 대부분 비정상(Non-stationary) 상태로

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11.-14., 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, bdyoun@snu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

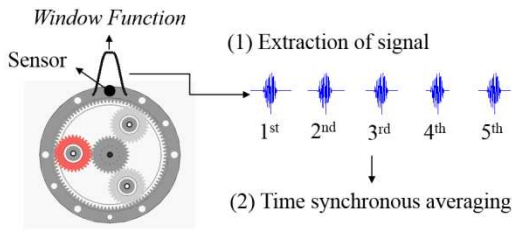


Fig. 1 Time synchronous averaging (TSA) for planetary gearbox

구동되며 가혹한 구동환경에 의해 계측되는 진동 신호에 많은 노이즈가 포함되어 있어 신호분석 측면에서 굉장히 까다롭고, 풍력단지 내 다수의 풍력 발전 시스템으로부터 생성되는 거대한 양의 고주파 진동 데이터에 의해 실시간 상태감시 기술의 적용이 힘들다는 문제가 있다.

회전 시스템의 노이즈 제거기법 중 하나인 시간 동기 평균화(Time synchronous averaging) 기법은 계산 효율성이 뛰어나 거대한 양의 데이터를 처리하는 데 무리가 없을 뿐 아니라 비정상(Non-stationary) 신호를 어느 정도 다룰 수 있다는 장점을 갖고 있어 기어박스의 고장진단 및 예지를 위해 널리 사용되어 오고 있다.<sup>(1)</sup> 하지만 대부분의 풍력발전기에 활용되고 있는 유성기어박스의 경우 일반 기어박스와 달리 다수 기어들이 상호 작용하며 복잡한 맞물림 진동 특성을 보이고 있고, 선기어를 중심으로 공전하는 유성기어로 인해 취득되는 진동 신호에 인위적 변조 특성이 만들어지기 때문에 일반적인 시간동기평균화 기반 고장진단을 활용하여 고장진단을 수행할 수 없다.

McFadden<sup>(4)</sup>은 좁은 범위의 진동추출 윈도우 함수를 이용해 유성기어가 센서를 지나치는 순간 진동 신호를 선택적으로 활용함으로써 유성기어의 공전으로 인한 인위적 변조특성 효과를 최소화하면서 동시에 복합적 맞물림 현상 중 특정 맞물림 현상에 초점을 맞추어 시간동기 평균화기반 고장진단 기법을 개선하고자 하였다. 하지만 진동 변조 현상은 유성기어의 공전 뿐 아니라 기어박스의 제작 공차, 조립 공차, 과도한 반경방향의 하중변화, 축 불균형 등 여러 가지 운영 조건에 의해 달라질 수 있고,<sup>(5,6)</sup> 이로 인해 센서의 위치와 상관없이 특정 위치에서 고장 징후가 증폭되어 나타나는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 경우 센서위치를 중심으로 하는 좁은 범위의 진동추출 윈도우 함수를 도입한다면 오히려 고장진단 정확도를 감소시킬 가능성이 있다는 문제점이 있다.

따라서 이 논문에서는 풍력발전기 기어박스의 진동 변조 특성 변화에 강건한 진동기반 고장진단

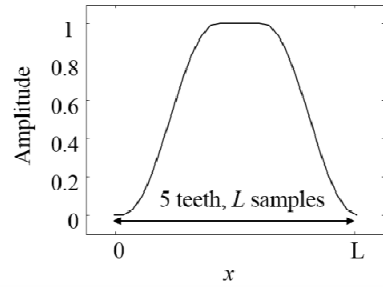


Fig. 2 Tukey window covering 5 teeth

기법을 제안하고자 한다. 2 장에서는 기존에 제안되어 온 진동 기반 유성 기어박스 고장진단 기법을 간략히 정리한다. 3 장에서는 기존의 고장진단 기법이 가변 진동변조 특성에 노출되었을 때 갖게 되는 한계점을 파악한 후 가변 진동 변조특성에 강건한 기어박스 고장진단 기법을 제안한다. 4 장에서는 제안된 고장진단기법의 검증을 위해 풍력발전기모사 테스트베드를 활용한 사례연구 및 결과가 주어진다.

## 2. 유성 기어박스 고장진단 리뷰

시간 동기 평균화 기법은 진동 신호를 기어 회전 주기에 따라 여러 그룹으로 나누고, 나뉜 그룹에 대한 평균을 취함으로써 기어 맞물림 진동 외의 노이즈를 제거하여 고장진단 정확도를 향상시키고자 하는 기법이다. 하지만 풍력발전기 유성기어박스의 경우 유성 기어의 축이 선기어를 중심으로 공전함에 따라 인위적인 진동 변조 현상이 발생하게 되며, 이 현상이 시간동기평균화의 활용에 큰 걸림돌이 된다고 알려져 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.<sup>(4,7)</sup>

Fig. 1 은 유성기어의 고장진단을 위해 개선되어 온 시간 동기 평균화를 간략히 표현하고 있다. 해당 기술의 핵심은 유성 기어박스에 부착된 센서의 위치에 좁은 범위의 진동추출 윈도우 함수(Window function)를 위치시킴으로써 타깃 유성기어가 센서를 지나칠 때마다 진동 신호를 추출하고, 추출된 신호에 대해서만 시간동기 평균화를 적용하여 고장진단에 활용하는 것이다.<sup>(4,7)</sup> 이 핵심 아이디어를 활용하면 타깃 기어 이외의 기어에서 발생하는 맞물림 진동을 제외시킴으로써 관측하고자 하는 진동 신호를 효과적으로 분리해낼 수 있다. Samuel 등<sup>(7)</sup>은 여러 종류의 진동추출 윈도우 함수의 성능 비교를 통해 시간동기 평균화를 위한 최적의 윈도우 함수로써 다섯 개의 기어치를 포함

하는 Tukey 윈도우 함수를 선정하였으며, 이는 다음과 같이 정의된다.<sup>(7)</sup>

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left( \pi \left[ \frac{2x}{\alpha(L-1)} - 1 \right] \right) \right\} & 0 \leq x \leq 2\alpha \\ 1 & 2\alpha \leq x \leq 4 - 2\alpha \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left( \pi \left[ \frac{2x}{\alpha(L-1)} - \frac{2}{\alpha} + 1 \right] \right) \right\} & 4 - 2\alpha \leq x \leq 4 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $x$  는 다섯 개의 기어 치 안에서 일정한 간격을 갖고 분포되어 있는  $L$  개의 샘플을,  $\alpha$  는 Tukey 윈도우의 경사 기울기를 뜻하며, 이 연구에서는 참고문헌 (5)에서와 같이  $\alpha$  를 0.8 로 정의하였다. 윈도우에 포함된 샘플 수( $L$ )는 다섯 번의 기어 맞물림 주기 동안 포함된 진동 신호의 샘플 개수와 유사하도록 설정한다. Fig. 2 는 위에서 정의된 터키 윈도우를 나타내고 있다.

### 3. 진동 변조현상을 고려한 유성기어박스의 고장진단기법

본 장에서는 유성 기어박스에서 알려진 바와 다른 양상의 진동 변조특성이 발생하는 경우 고장진단을 위해 해결해야 할 문제점에 대해 제시한 후, 이를 위해 새로운 신호분석기법을 제안하고자 한다. 유성 기어박스의 진동 변조특성을 파악하고 새로운 신호분석 기법을 개발에 대한 절차를 설명하기 위해 Fig. 3 과 같은 유성기어박스를 하나의 예로써 활용하였다. 예시로 사용된 기어박스는 31 개의 치를 갖고 있는 세 개의 유성기어(Planet gear)와 95 개의 치를 갖고 있는 한 개의 링기어(Ring gear), 31 개의 치를 갖고 있는 한 개의 선기어(Sun gear)와 한 개의 캐리어(Carrier)로 구성된다. 센서는 기어박스의 상단에 위치하였으며, 해당 위치의 링기어 치 번호를 1 번으로 부여하였다.

#### 3.1 진동변조 특성규명 및 문제점 파악

유성 기어박스 진동신호의 진동 변조특성 규명을 위해서 진동 신호의 대역 필터링 신호(Band-pass filtered signal)에 대한 포락 분석(Envelop analysis)을 실시하였다(Fig. 4). 분석을 위해 매트랩(Matlab)에서 제공하고 있는 3 차 대역 필터 함수(Band-pass filter)를 사용하였으며 필터링 대역으로써 기어 맞물림 주파수(Gear mesh frequency, GMF) 기준 상하위 4 개의 측파대(sideband)를 선정하였다.<sup>(8)</sup>

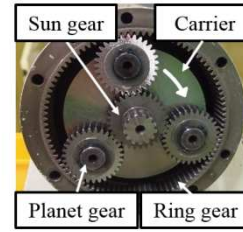


Fig. 3 Planetary gearbox with three planet gears

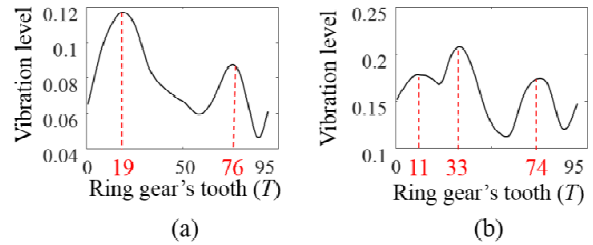
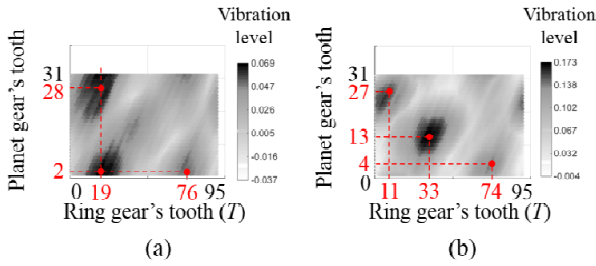


Fig. 4 Identified one-dimensional vibration modulation in ring gear's tooth domain with: (a) 1<sup>st</sup> GMF, and (b) 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> GMF

Fig. 4 는 대역 필터링을 사용한 후 포락분석을 수행하여 유성기어박스의 진동 변조특성을 분석한 결과이다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각 기어 맞물림 주파수의 1 차 성분만을 포함한 경우와 기어 맞물림 주파수의 1 차, 2 차, 3 차 성분을 모두 포함하고 있는 경우를 나타낸다. 각 그래프에서 x 축은 캐리어(Carrier)가 한 바퀴 회전하는 동안 특정 유성기어(Planet gear)와 맞물리는 링기어(Ring gear)의 치 번호를 뜻한다. 캐리어 회전(즉, 유성기어의 공전)으로 인한 유성기어와 센서와의 상대적 거리 변동 때문에 진동 변조 특성이 발생한다는 기존 주장에 의하면, 캐리어 한 회전 동안 세 개의 유성기어가 링기어의 1 번 치에 고정된 센서를 통과함에 따라 세 번의 극댓값이 일정한 간격을 두고 존재해야 한다. 하지만 Fig. 4(a)와 (b)를 통해 실제 진동 변조 특성 검출 결과는 예상과 다를 수 있다는 사실을 알 수 있다.

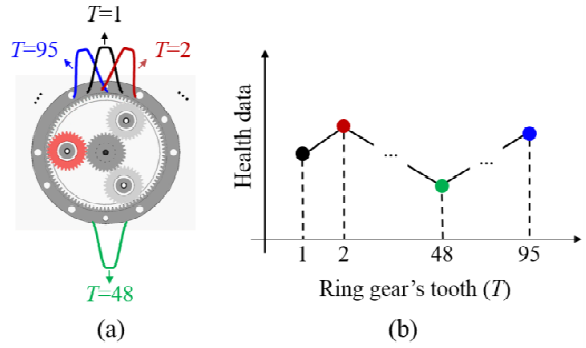
본 논문에서 사용하고 있는 유성기어박스와 같이 링기어의 치 개수와 유성기어의 치 개수가 정확히 나누어 떨어지지 않는 경우 캐리어의 회전에 따라 기어 맞물림 상황이 달라지는 현상이 발생한다. 이는 선기어, 링기어의 치 개수의 조합에 의해 결정되는 기어박스 고유의 운행 특성인 이빨 반복 주파수(Hunting tooth frequency)가 존재하기 때문이다.<sup>(7)</sup> 이빨 반복 주파수가 존재한다는 것은 동일한 맞물림 상황이 만들어지기 위해서 유성기



**Fig. 5** Identified two-dimensional vibration modulation in ring gear's and planet gear's tooth domain with: (a) 1<sup>st</sup> GMF, and (b) 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, and 3<sup>rd</sup> GMF

어나 캐리어가 한 바퀴만 회전하면 되는 것이 아니라 여러 기어의 기어 치 개수에 대한 공통 분모만큼 맞물림이 지속되어야 한다는 것을 뜻한다. 예시로 든 기어박스의 경우 캐리어 한 회전(링기어 95 치) 동안 유성기어는 3 회전에 2 개의 추가적인 치 맞물림을 경험하게 되어(31 치 X 3 회전+ 2 치= 95 치), 초기 조건과 다른 맞물림 조건이 형성된다. 이러한 특성에 의해 유성 기어박스의 맞물림 조건은 굉장히 다양하게 형성 되는데, 예시의 경우 링 기어의 치 개수와 유성기어의 치 개수에 공약수가 없기 때문에 총 2945(31 teeth X 95 teeth) 종류의 맞물림 조건이 만들어 진다. Fig. 5 는 이렇게 형성되는 모든 맞물림 조건에 대한 진동 변조특성 변화를 파악하기 위해 Fig. 4 의 결과를 링 기어, 유성 기어에 대한 2 차 도메인(two-dimension) 에서 나타낸 그림이다. Fig. 4 는 Fig. 5 의 결과를 링 기어 도메인으로 투영시킨 결과로, 유성기어 치에 대한 정보를 제외시킨 것으로 생각할 수 있다. 기어박스의 1 차 맞물림 진동에 대한 포락분석의 경우 플래닛 기어의 2 번과 28 번 치가 링 기어의 19 번 치와 맞물릴 때에 가장 큰 수준이 되며(Fig. 5(a)), 1, 2, 3 차 맞물림 주파수를 함께 봤을 때에는 플래닛 기어의 13 번 치가 링 기어의 33 번 치와 맞물리는 경우 가장 큰 수준이 되고 있다(Fig. 5(b)). 이 결과는 Fig. 4 와 부합한다. 이를 통해 진동 변조 특성이 전체 작동 구간 안에서 센서의 고정된 위치에 의해 결정되는 것이 아니라는 사실을 확인할 수 있다. 다시 말해 실제 진동 변조현상에 의한 진동 극대점은 센서의 위치나 유성기어의 개수와 상관없이 링 기어의 특정 위치에서 발생할 수 있으며(Fig. 4, Fig. 5), 그 위치 또한 맞물림 조건에 따라 변화할 수 있는 것이다(Fig. 5).

센서 위치와 상관 없이 링 기어의 특정 위치에서 극대값을 갖는 진동 변조 특성은 풍력발전기 기어박스의 제작 및 조립 공차, 과도한 반경방향의 하중, 축 불균형 등에 의해 발생할 수 있다.<sup>(5,6)</sup>



**Fig. 6** Time synchronous averaging (TSA) with multiple window functions (a) Application of multiple window functions, and (b) Health data corresponds to every teeth of the ring gear

이러한 경우에도 센서 부착 위치에 고정되어 있는 윈도우 함수를 이용하여 진동 신호를 추출하고 시간 동기 평균화를 적용하면 진동 극대값을 놓치게 되어 타깃 유성기어의 고장 신호를 적절히 감지할 수 없는 문제가 발생할 가능성이 크다.

### 3.2 진동 변조특성을 고려한 진동추출 윈도우의 최적 위치 선정

본 연구에서는 진동 변조 특성이 센서의 위치와 상관 없이 기어박스 운행 조건에 의해 정해질 수 있으며 맞물림 조건에 따라 변화할 수 있다는 문제를 해결하기 위해 시간 동기 평균화를 위한 진동추출 윈도우의 최적 위치를 선정 하고자 하였다. 가장 좋은 방법은 진동 신호에 기반하여 진동 변조 특성을 실시간으로 규명하고, 이에 기반하여 진동 추출 윈도우 함수의 위치를 재 선정하는 것이다. 하지만 신호분석을 통한 진동 변조 특성 검출 결과는 대역 필터(Band-pass filter)의 차수, 주파수 대역, 맞물림 주파수의 오더 등 여러 인자가 달라짐에 따라 변할 수 있기 때문에, 이를 결정론적으로 정의할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 진동추출 윈도우 함수를 링 기어의 특정 위치에 한정 지어 정의하는 것이 아니라, 링 기어의 모든 치에 대한 진동추출 윈도우 함수를 개별 정의하여 치 개수만큼의 진동기반 고장진단을 다중 적용하는 기법을 제안한다. Fig. 6 은 제안하고자 하는 고장진단 방법을 설명하고 있다. 기존의 시간동기 평균화 기법은 Fig. 1 에서 확인할 수 있는 바와 같이 센서 위치에 고정되어 있는 단일 윈도우 함수를 이용하여 진동 신호를 추출하는 과정을 거친다. 예를 들어 센서가 링 기어의 상단 부분인 1 번 기어치( $T=1$ )에 위치한다 고 가정한다면, 이는 Fig. 6(a)의 상단 진동

추출 윈도우 함수를 활용하여 Fig. 6(b)의  $T=1$ 에 해당하는 단일 건전성 데이터(Health Data)만을 정의하는 것과 같다(여기서 건전성 데이터란, 추출된 진동 신호를 통해 정의한 통계적 수치(e.g. RMS)로써 고장진단에 활용될 수 있는 대표값을 말한다). 만약 정의된 윈도우 함수의 위치에서 추출된 진동 기반 건전성 데이터를 활용하여 고장진단을 수행한다면 그 위치와 상관 없이 고장 징후가 증폭되는 경우 진단 정확도가 떨어질 수 있다. 본 연구에서 제안하고자 하는 고장진단 기법은 Fig. 6(a)와 같이 모든 링기어 치에 대한 진동추출 윈도우 함수를 위치시키고 각각에 대해 시간동기 평균화 및 건전성 추출과정을 개별 수행함으로써 Fig. 6(b)에서와 같이 모든 링기어 치에 대한 건전성 데이터를 다중 계산하는 것이다. 해당 시스템에 예상치 못한 진동 변조 특성이 존재하여 고장 발생 시 링 기어의 특정 위치에서 고장의 징후가 증폭되어 나타난다면 Fig. 6(b)에서 해당 기어치에 대한 건전성 데이터 값이 급변할 것이고, 그 위치를 진동추출 윈도우함수의 최적 위치로 선정할 수 있을 것이다. 이러한 과정을 통해 진동 변조특성의 변화에 영향을 받지 않는 진동 기반 고장진단을 수행할 수 있으며, 그 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

고장진단을 위해서는 시간동기 평균화 처리가 완료된 진동 신호( $v_{TSA}$ )를 활용하여 건전성 데이터를 정의해야 한다. 본 연구에서는 기어박스의 고장진단 수행을 위해 널리 사용되는 건전성 데이터인  $FM0$ (Zero-order Figure of Merit)와  $FM4$ (Fourth order Figure of Merit)를 활용하기로 한다. 링 기어의  $T$  번 치에 윈도우 함수를 위치시켜 진동신호를 추출한 경우  $T$  번치에 대한  $FM0$  와  $FM4$  는 각각 다음과 같이 정의된다.<sup>(9)</sup>

$$FM0_{(T)} = \frac{\max(v_{TSA(T)}(t)) - \min(v_{TSA(T)}(t))}{\sum_{i=1}^N A_{(T)}(f_i)} \quad (2)$$

$$FM4_{(T)} = kurtosis(v_{DIF(T)}) \quad (3)$$

여기서( $T$ )는 링기어  $T$  번 치에 위치한 윈도우 함수에 의해 추출된 진동 신호를 사용한 것을 말하며,  $FM0_{(T)}$ 와  $FM4_{(T)}$ 는 각각  $T$ 에 대한 시퀀스로 표현된다.  $A_{(T)}(f_i)$ 는 기어맞물림 주파수(Gear mesh frequency, GMF)의  $i$  번째 하모닉 성분에 대한 진동 크기를,  $v_{DIF(T)}$ 는  $v_{TSA(T)}$ 에서 기어 맞물림 주파수(GMF)와 그에 대한 하모닉(Harmonics), 그리고

측파대(Sidebands)를 제외한 신호를, *kurtosis*는 첨도를 뜻한다.  $\max(v_{TSA(T)}(t))$ 와  $\min(v_{TSA(T)}(t))$ 는 링 기어의  $T$  번 치에 윈도우 함수를 위치시켜 시간동기 평균화를 계산한 후 결과값의 최대와 최소값을 구하는 함수로 사용된다.  $FM0$ 와 같이 하모닉 성분이나 그에 대한 측파대를 활용하는 경우 시스템에 따라 고려되는 측파대의 범위가 달라져야 하는데, 이 논문에서는 기어박스의 주된 맞물림 진동 성분을 포함하는 6 차 성분까지 고려하기로 한다( $N=6$ ). 특히  $v_{DIF}$ 를 계산함에 있어서 다음과 같은 식이 고려된다.<sup>(10)</sup>

$$v_{DIF(T)}(t) = v_{TSA(T)}(t) - y_{(T)}(t) \quad (4)$$

여기서  $y_{(T)}(t)$ 는  $v_{TSA(T)}$ 에서 기어 맞물림 주파수(GMF)와 그에 대한 하모닉(Harmonics), 그리고 측파대(Sidebands)를 포함하는 정현파로써  $v_{TSA(T)}$ 에 대해 해당 부분을 포함하는 콤 필터(comb filter)를 적용하여 구할 수 있다.

#### 4. 사례연구

##### 4.1 풍력발전기 기어박스 테스트베드

제안된 고장진단 기법의 구현을 위해 2kW 풍력발전기 테스트베드로부터 취득한 기어박스 진동 신호가 활용되었다. Fig. 7은 본 목적을 위해 설계된 풍력발전기 테스트베드를 나타내고 있으며, Table 1은 해당 테스트베드의 대표 성능을 정리

Table 1 Specification of the WT testbed

Part	#	Specification
Motor	1	2kW Servo motor
	2	2kW Servo motor
Gearbox	1	1:4.06, One-stage planetary gearbox
	2	1:20.79, Two-stage planetary gearbox
Acc. Sensor	-	500mV/g (Range: ± 10g)
Encoder	-	60pulse/rev

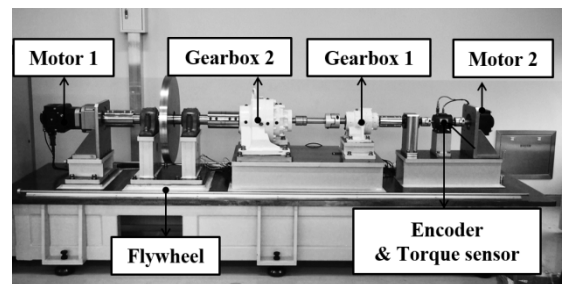


Fig. 7 Wind turbine (WT) testbed



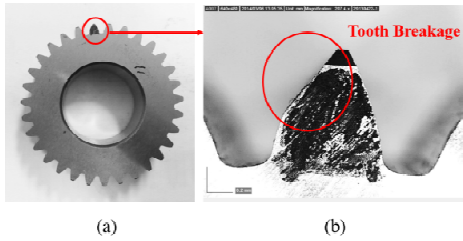


Fig. 8 Artificially seeded fault seeding in a tooth of the planet gear

하고 있다. 테스트베드의 모터 1 과 모터 2 는 각각 속도, 토크 조절을 통해 풍력발전기의 로터, 발전기를 모사한다. 기어박스 1, 2 는 각각 1 단의 유성기어박스(기어비 4.06:1), 2 단의 유성기어박스(기어비 20.79:1)로 이루어져 있으며, 이번 연구에서는 기초연구를 위해 상대적으로 간단한 기어박스 1 이 제안기술 검증에 활용되었다. 기어박스 1 은 31 개 기어 치를 갖고 있는 세 개의 유성기어와 31 개의 기어 치를 갖고 있는 한 개의 선기어, 95 개의 기어 치를 갖고 있는 한 개의 링기어, 그리고 캐리어로 구성되어 있다. 이 논문에서는 풍력발전기 기어박스의 이상상태를 모사하기 위해 기어박스 1 내 특정 유성기어의 1 번 치에 부분파손을 가공 제작하여 기어박스에 조립하였다(Fig. 8). 또한 유성기어박스에 부착되어 있는 진동 센서를 통해 25.6 kHz 의 진동 신호를 취득하여 고장진단 연구에 활용하였다.

4.2 사례연구 결과

Fig. 9 는 고장이 인가된 테스트베드를 통해 취득한 진동 신호를 이용해 링 기어 도메인에 대한 건전성 데이터를 다중 계산한 결과를 나타내고 있다.

상대적 비교를 위해 각 건전성 데이터(FM0, FM4)는 최대값을 1로 가질 수 있도록 표준화되었다. Fig. 9(a)는 링기어 도메인에서의 표준화된 FM0와 FM4를 각각 나타내고 있으며, Fig. 9(b)는 표준화된 FM0와 FM4의 합계를 나타내고 있다.

Fig. 9 을 통해 알 수 있듯이, 건전성 데이터로 활용된 FM0와 FM4는 센서의 위치와 상관없이 링기어의 특정 위치에서 최대값을 갖는다. 이를 통해 플래닛 기어의 파손된 치가 링기어와 맞물릴 때에 고장 신호가 증폭되는 구간은 센서의 위치와 상관없이 특정 진동 변조 특성에 의해 정해될 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 링기어의 46번 기어 치에서 두 건전성 데이터의 합이 최대값을 갖는다는 사실에 기반하여 링 기어의 46번 기어치를 시간동기 평균화를 위한 윈도우 함수의 최

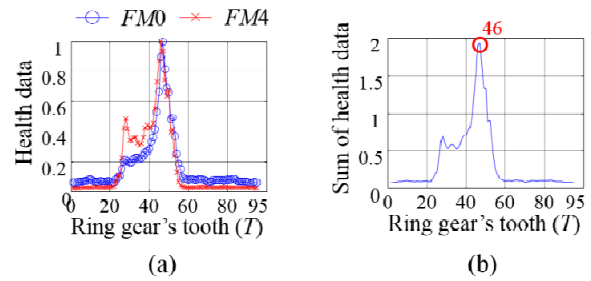


Fig. 9 Health data in the ring gear's tooth domain (a) FM0 and FM4, (b) Sum of FM0 and FM4

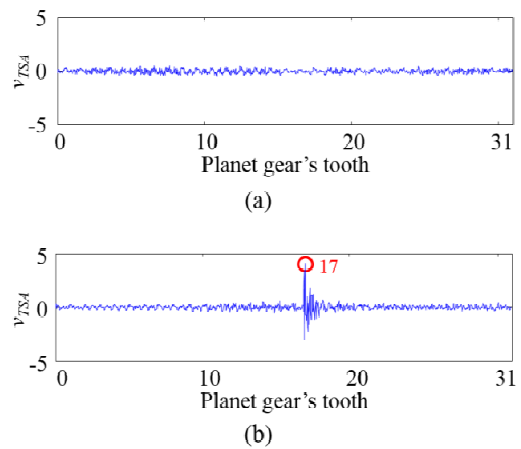


Fig. 10 TSA signal with window function centered on: (a) tooth number 1 of the ring gear, and (b) tooth number 46 of the ring gear

적 위치로써 재선정 할 수 있었다.

Fig. 10 은 기존의 TSA 와 제안된 TSA 를 비교한 결과를 나타내고 있다. Fig. 10 의 x 축은 유성기어의 치 번호를 뜻한다. Fig. 10(a)는 기존의 방법대로 유성기어가 센서를 지나칠 때 마다 진동 신호를 추출하여 시간 동기 평균화를 적용한 결과이고, Fig. 10(b)는 유성기어가 링 기어의 46 번 치를 지나칠 때마다 진동 신호를 추출하여 시간 동기 평균화를 적용한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안된 시간동기 평균화 기법의 경우 기존 시간동기 평균화 기법에 비해 훨씬 더 명확하게 고장 징후를 감지해낼 수 있다. Fig. 10(b)에서 유성기어의 17 번 치가 링 기어와 맞물리며 고장의 징후가 크게 나타나는 현상을 확인할 수 있는데, 이 경우 동시에 반대측에서 고장이 인가된 유성기어의 1 번 치가 선 기어와 맞물리는 상황을 유추할 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 유성 기어박스의 진동 변조 특성이 센서의 위치와 상관없이 만들어질 수 있으며 기어박

스 내 다수 기어간의 맞물림 특성에 따라 변할 수 있다는 점을 밝히고, 진동 변조 특성 변화에 강건하도록 진동기반 고장진단 기법을 개선하였다. 이를 위해 링 기어의 모든 치에 대한 개별 윈도우 함수를 정의하여 각각의 치에 대한 시간동기 평균화 기법을 적용 하였으며, 각 치에 대한 건전성 데이터를 다중 계산 하였다. 그 결과 링 기어의 특정 위치에서 건전성 데이터가 급변하는 현상을 확인할 수 있었으며, 해당 위치에 윈도우 함수를 위치시켰을 때 고장의 징후를 효과적으로 감지해 내 정확한 고장진단을 수행할 수 있었다.

해당 기술은 가혹한 운행환경 하에서 운행되며 유지보수 전후 진동 변조 특성이 변할 수 있는 풍력발전기 기어박스에 효과적일 수 있다. 하지만 본 사례 연구에서 활용된 테스트베드의 경우 풍력발전기보다 작은 스케일에 상대적으로 간단한 구조를 갖고 있기 때문에 보다 보다 간단한 동특성 및 노이즈를 갖고 있어 신호 분석에 용이했을 수 있다. 추후 연구에서는 본 연구에서 제시한 기술의 효용성을 더욱 효과적으로 검증하기 위해서, 대형 풍력발전기 기어박스에서 실제로 취득한 진동신호를 활용할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 에너지 국제공동연구 사업(20118520020010) 과 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 기초연구사업(2013R1A2A2A01068 627)과 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 상태기반 스마트 유지보수 핵심기술 개발 연구(과제번호: 13RTRP-C068243-01) 의 일환으로 지원을 받아 수행 되었습니다.

### 참고문헌

#### (References)

(1) García Márquez, F.P., Tobias, A.M., Pinar Pérez, J.M., and Papaelias, M., 2012, "Condition Monitoring

of Wind Turbines: Techniques and Methods," *Renewable Energy*, Vol. 46, pp. 169~178.

(2) Sheng, S., 2011, "Investigation of Various Condition Monitoring Techniques based on a Damaged Wind Turbine Gearbox," *Proceedings of 8th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, California.

(3) Bae, B.W. and Choi, Y.S., 2000, "Fault Diagnosis of Gear Chain Using Vibration Signal," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 24, No. 7, pp. 1731~1739.

(4) McFadden, P.D., 1991, "A Technique for Calculating the Time Domain Averages of the Vibration of the Individual Planet Gears and the Sun Gear in an Epicyclic Gearbox," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 144, No. 1, pp. 163~172.

(5) Inalpolat, M. and Kahraman, A., 2010, "A Dynamic Model to Predict Modulation Sidebands of a Planetary Gear Set Having Manufacturing Errors," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 4, pp. 371~393.

(6) Cheon, G.J., 2003, "Influence of Ring Gear Boundary Conditions on the Static Characteristics of Epicyclic Gear Trains with Manufacturing Errors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 11, pp. 1949~1957.

(7) Samuel, P.D., Conroy, J.K., and Pines, D.J., 2004, *Planetary Transmission Diagnostics*, NASA/CR-2004-213068, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.

(8) Siegel, D., Zhao, W., Lapira, E., Abuali, M., and Lee, J., 2014, "A Comparative Study on Vibration-based Condition Monitoring Algorithms for Wind Turbine Drive Trains," *Wind Energy*, Vol. 17, No. 5, pp. 695~714.

(9) Stewart, R.M., 1977, *Some Useful Data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics*, Technical Report MHM/R/10/77, Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Southampton.

(10) Samuel, P.D. and Pines, D.J., 2005, "A Review of Vibration-based Techniques for Helicopter Transmission Diagnostics," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 282, No. 1-2, pp. 475~508.