COSEIK J. Comput. Struct. Eng., 26(6)
pp.447~454, December, 2013
http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.6.447

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

풍력터빈 기어박스 내의 기어균열에 대한 모델 기반 고장진단

임 상 혁[1] · 박 성 훈[1] · 최 주 호[2†]

[1]한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과, [2]한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Model-based Diagnosis for Crack in a Gear of Wind Turbine Gearbox

Sang Hyuck Leem[1], Sung Hoon Park[1] and Joo Ho Choi[2†]

[1]*Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang, 421-791, Korea*
[2]*School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang, 421-791, Korea*

Abstract

A model-based method is proposed to diagnose the gear crack in the gearbox under variable loading condition with the objective to apply it to the wind turbine CMS(Condition Monitoring System). A simple test bed is installed to illustrate the approach, which consists of motors and a pair of spur gears. A crack is imbedded at the tooth root of a gear. Tachometer-based order analysis, being independent on the shaft speed, is employed as a signal processing technique to identify the crack through the impulsive change and the kurtosis. Lumped parameter dynamic model is used to simulate the operation of the test bed. In the model, the parameter related with the crack is inversely estimated by minimizing the difference between the simulated and measured features. In order to illustrate the validation of the method, a simulated signal with a specified parameter is virtually generated from the model, assuming it as the measured signal. Then the parameter is inversely estimated based on the proposed method. The result agrees with the previously specified parameter value, which verifies that the algorithm works successfully. Application to the real crack in the test bed will be addressed in the next study.

Keywords : *wind turbine, diagnosis, gear crack, variable loading condition, order analysis, lumped parameter model, fault severity assessment*

1. 서 론

고안정성을 요구하는 주요 시스템들은 설계 단계에서 뿐만 아니라, 시스템 운영에서도 지속적인 유지관리가 요구된다. 현재 시스템에 적용되고 있는 유지관리법은 예방 정비로서, 시스템의 현재 상태와는 상관없이 주기적인 점검 및 수리를 수행하여, 불필요한 시스템 유지관리 비용문제를 야기한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 상태기반 정비가 관심을 받고 있다. 상태기반 정비는 시스템이 작동 중에 센서를 이용하여 현재 상태를 진단하고 결함의 발전 양상을 예측하여 시스템의 유효수명을 결정한다. 결과적으로 관리자는 이 정보를 바탕으로 효율적인 정비계획을 세울 수 있다.

풍력발전기에서 기어박스는 동력을 전달하는 가장 주요한 부품으로서, Fig. 1의 자료처럼 풍력발전 시스템이 극한의 변동 하중/속도 조건에서 운영됨에 따라 기어박스가 다른 요소들 중에서 가장 많은 유지비용을 요구한다. 따라서 기어박스의 고장진단은 최근 가장 부각되는 주제가 되고 있다.

기어박스 고장진단에 관한 초기 연구들에서는 일정한 하중 조건의 로터 시스템에서 발생하는 비정상 신호만을 감지하는 것에 집중하여 진행되어 왔다. 그러한 연구에서는 시간-주파수해석을 통하여, 감지된 주파수 성분의 진폭이 갑자기 증가하는 순간, 큰 피해를 방지하기 위해 시스템을 긴급 정지하는 안전장치 수준에 머무르고 있다.

그와는 달리 최근 기어박스의 고장진단 기술은 두 가지의

† Corresponding author:
Tel: +82-2-300-0117; E-mail: jhchoi@kau.ac.kr
Received October 30 2013; Revised November 21 2013;
Accepted November 28 2013
©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

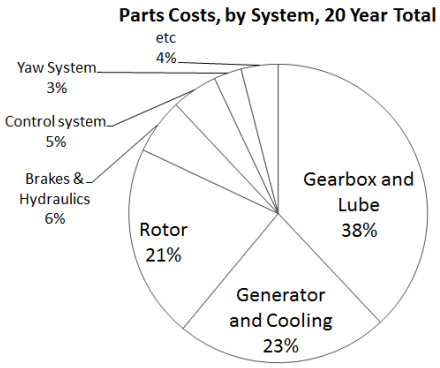

Fig. 1 Categories of O&M costs(Poore *et al.*, 2008)

주요한 도전과제에 직면해 있다. 첫째로 변동 하중조건에 의한 신호분석의 어려움이다. 이는 전통적인 로터 시스템에서 개발된 시간-주파수 해석을 어렵게 한다. 이 어려움 극복을 위한 몇몇 개의 연구가 진행되었다. Bartelmus와 Zimroz (2009)는 다양한 하중조건하에서 실험 데이터를 기반으로 신호 특성(Signal feature)와 하중조건 사이의 통계적 모델을 제시하였고, 유사하게 SKF사(社)는 풍력발전기에서 각 분류된 하중조건하의 신호특성을 추출하여, 동일 하중조건 내에서 추출된 신호 특성들만을 분석 수행하여 하중조건에 의한 영향을 최소화하였다(Crabtree, 2011). Zhan 등(2006)은 칼만 필터(Kalman filter)를 통해서 신호 특성과 다양한 하중조건 사이의 관계를 모델링하였고, 이를 실험으로 검증하였다. Stander와 Heyns(2002)는 변동 하중조건의 변동성을 제거하기 위해서 TSA(Time Synchronous Averaging)와 기어균열 특성을 파악하기 위한 pseudo-Winger-Ville 분포를 사용하였다. Baydar와 Ball(2000)는 변동 하중조건 상에서의 기어균열을 탐지하기 위해 타코미터(Tachometer) 기반의 회전 도메인(Revolution domain)에 대한 instantaneous power spectrum과 Wigner-Ville 분포를 제안하였다. Stander와 Heyns(2005)는 나아가 비동기 신호(Nonsynchronous signal)를 제거하기 위한 TSA와 기어균열에 직접적인 관계를 갖는 instantaneous angular speed를 제안하였다. 두 번째 도전과제는 고장 심각성 평가이다. Li 등(2002)은 기어 치강성과 균열 크기사이의 연관성을 찾기 위한 모델 기반 접근방법을 제안하였다. 기어거동은 집중변수 모델로 나타내고, 트랜스미션 에러(Transmission error)와 같은 측정된 신호 특성을 이용하여 기어 강성을 역 추정하였다. Begg 등(2000) 역시 진동 신호를 이용하여 유사한 접근법을 수행하였다.

이전 연구들의 상당한 성과에도 불구하고 몇 가지 사안들이 쟁점화되었다. 변동 하중조건을 다루기 위해 수행한 다양한 신호처리 기술들이 고장감지에 도움은 되었지만 신호와 균열 사이의 물리적 관계 규명이 부족하여 고장 심각성 평가에 적용하기에는 불완전하다. 따라서 물리적 모델 기반의 접근 방식이 주목을 받고 있지만, 이러한 방향의 최근 연구들에서는 변동 하중조건에 대한 활발한 연구가 진행되지 않았다.

본 연구는 변동 하중조건하에서의 모델 기반 기어균열 고장 진단법을 제안 및 검증하는 연구로서, 최종적으로 풍력발전에 적용을 위한 신뢰할 만한 플랫폼을 제공하는 것을 목표로 한다. 두 개의 평기어(Spur gear)로 구성된 간단한 테스트 베드가 위의 접근 방법을 검증하기 위해 구축되었고, 기어박스 고장모드에서 가장 큰 부분을 차지하는 이뿌리 부분의 균열이 고려되었다(Nilsson and Bertling, 2007). 타코미터 기반의 오더분석(Oder analysis)이 변동 하중조건에 의해서 발생하는 균열 감지의 어려움을 해결하기 위해 적용되었고, 집중변수 모델(Lumped parameter dynamic model)의 강성(Stiffness)과 인가된 균열 사이의 상관관계를 바탕으로 두고 균열크기 추정을 수행하였다. 본 논문은 이러한 고장진단을 실행하기 위한 새로운 방법의 개념 소개에 중점을 두고 있다. 따라서 전체적인 개념은 기술함과 동시에 테스트베드도 구축되었지만, 여러 요인으로 인해 아직 실제 테스트 베드에서의 고장진단법 검증은 완료되지 않았다. 따라서 시뮬레이션을 통해 가상의 측정 시그널을 생성하고 이것을 테스트베드 시그널로 간주하여 고장진단을 수행함으로써 제안된 방법론의 유효성을 입증하였다.

2. Test-bed

본 연구에서 제안한 기어의 균열 고장진단 기술의 개발 및 검증을 위한 테스트베드를 구축하였다. 테스트 베드는 Fig. 2에서와 같이 두 개의 평기어 기어박스, 커플링, 모터들로 구성되어 있고, 타코미터와 토크미터(Torque-meter)가 각각 회전 각도와 축 끝단에 작용하는 토크를 측정하기 위해 설치되었다. DC 서보모터와 AC 모터는 다양한 운영조건과 역 토크를 적용하기 위해 사용되었고, 관련된 정보는 Table

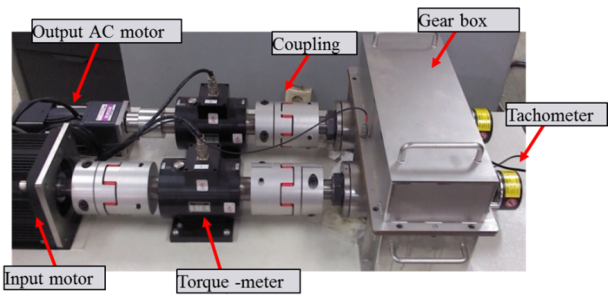

Fig. 2 Test-bed setup

Table 1 Test-bed specification

Component	Specification
Gear ratio	2 : 1
Module	4mm, spur gear
Servo motor	2.9kw, Max 2500rpm
AC motor	Rate load 0.9, 1600rpm
Tachometer	resolution : 0.3516deg
Torque-meter	Rated out : 9.8N·m~49.03N·m

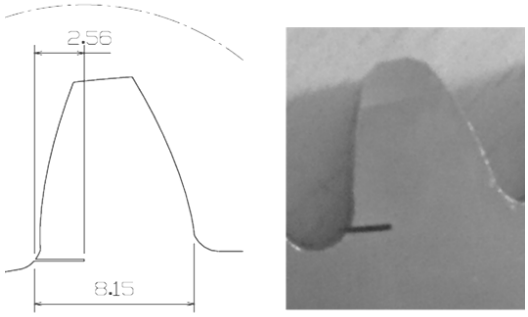

Fig. 3 Tooth crack profile

1에 나타내었다.

본 연구는 초기 연구 단계로서 먼저 정속 하중조건을 인가하여 실험을 수행하였다. 이를 위해서 DC 모터에는 120RPM의 정속 조건을 그리고 AC 모터에는 역 토크(73.5N-m)를 각각 적용하여 기어 이빨에 하중을 인가하여 측정 신호에 대한 기어 이빨 처짐의 영향을 묘사하였다. 기어의 균열에 의한 파손은 주로 기어 이뿌리 부분에서 나타나므로 Fig. 3과 같이 전체 뿌리 넓이(8.15mm) 대비 약 0.3(비율)정도의 균열(2.56mm)을 인가하여, 기어균열을 묘사하였다.

3. 모델 기반 고장진단

모델 기반 고장진단은 고장검출과 고장진단으로 구성되어 있다. 고장검출은 시스템에서 측정된 신호를 분석하여 고장의 유무 및 위치를 검출하는 것이고, 고장진단은 고장검출 정보를 바탕으로 고장 심각성을 진단하는 것이다. 본 연구에서는 풍력발전 시스템에서 가장 기본적인 부품인 평기어에 대한 모델 기반 고장진단 연구를 수행하였다.

3.1 고장검출

고장진단을 적용하기에 앞서 먼저 신호분석을 통하여 고장유무 및 위치를 판단하는 고장검출을 수행하여야 한다. 두 가지의 신호분석 기법이 검토되었고, 이를 실험결과에 적용하였다.

3.1.1 고장검출 기법

고장검출은 Fig. 4와 같이 4가지(Signal source, Measured signal, Detection methd and Extracted fault signal)로 구성되어 있다. 시그널 소스(Signal source)는 신호분석을 위해서 신호의 구성을 이론적으로 가정하는 것인데, 정상 시스템에서 주기적으로 발생하는 신호를 정상 신호, 고장에 의해서 주기적으로 발생하는 신호를 고장 신호 그리고 비주기적으로 발생하는 기타 신호들을 노이즈로 가정하였다. 측정된 신호(Measured signal)는 시그널 소스가 진동 경로를 따라서 최종적으로 센서에서 측정되는 신호인데, 본 연구에서는 트랜스미션 에러가 이에 해당한다(3.2절 참조). 진단기법(Detection method)을 통해서 시그널 소스에서 정상 신호와 노이즈를 분리 제거하여, 최종적으로 고장검출 신호(Extracted fault signal)를 추출하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 5의 오더 스펙트럼 필터(Order spectrum filter)와 Fig. 6의 AR-MED 필터를 진단기법으로 적용하였다. 오더 스펙트럼 필터는 오더 스펙트럼(Order spectrum)에서 정상 신호 성분을 제거하여 잔여 스펙트럼(Residual spectrum)을 추출하고, 이를 다시 시간 도메인(Time domain)으로 변환하여 TSA(Time synchronous averaging)를 행하는 것이다(Guicai Zhang and Joshua Isom, 2011). 실험장치에서 정상 신호 성분은 회전축 신호 특성 영역(Low frequency)과 구동 기어 하모니(Harmonic) 성분이다. 다른

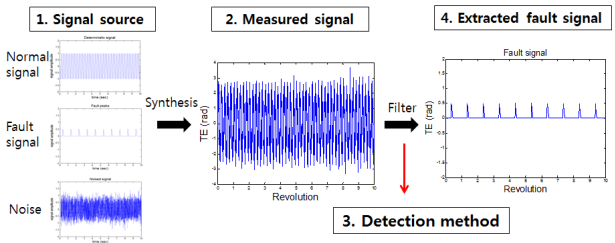

Fig. 4 Fault detection

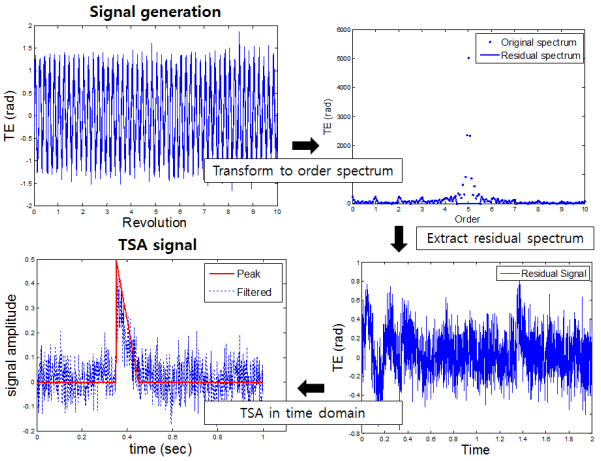

Fig. 5 Order spectrum filter(Simulated signal)

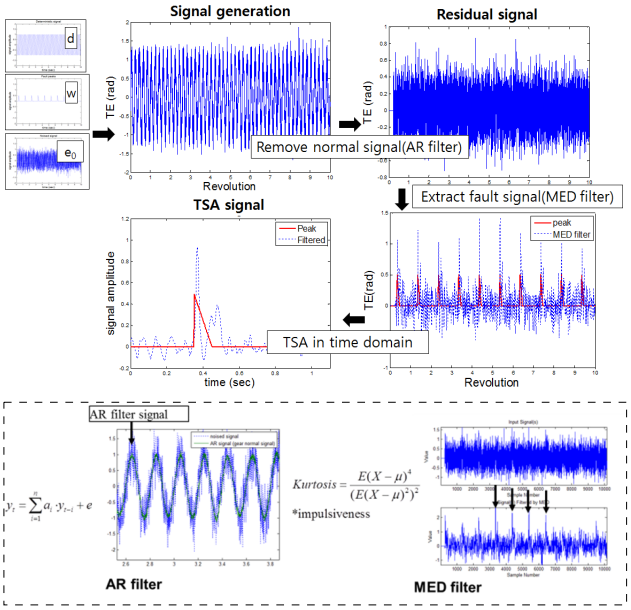

Fig. 6 AR-MED filter(Simulated signal)

진단 기법인 AR-MED 필터(Wenyi Wang and Albert K. Wong, 2000)는 먼저 AR 필터(Autoregressive filter)를 사용하여 정상 신호 성분 (d)를 분리 제거하고, MED 필터(Minimum Entropy Deconvolution filter)(RALPH A. WIGGINS, 1978)를 적용하여 고장신호 성분 (w)를 노이즈 성분 (e_0)으로부터 증폭 검출한다(Endo *et al.*, 2009).

3.1.2 실험수행 및 결과분석

Table 1과 같은 구성의 테스트-베드에 균열이 인가된 기어를 장착하여, 정상상태와 고장상태 모두에 대해서 타코미터를 이용하여 Fig. 7 같이 트랜스미션 에러 신호를 측정하였다(Tuma, 2003). 타코미터 신호에 기반한 주파수 분석인 오더 스펙트럼 필터를 측정된 신호에 적용하여, 정상상태 신호에서는 실험 구동기어(70teeth)에 해당하는 일반적인 기어 메쉬 오더(70order)를 확인하였고, 기어균열의 기본적인 특성 신호인 세컨드 하모니 사이드밴드(140order 측면)를 감지하였다(Randall, 2011). 이 분석을 통해서 측정된 신호에 고장특성 신호 성분과 정상 기어 신호 성분이 포함된 것을 확인하여 측정된 신호의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 5, 6의 결과들(TSA signal)에서 가상 신호 생성단계에서 삽입된 고장신호(실선: Peak 신호)와 동일한 형태의 신호(점선)를 검출하여, 제안된 고장기법들의 고장검출 성능 검증하였다. 하지만 테스트-베드에서 수집된 신호에 제안된 기법들을 적용한 결과(Fig. 8,9)는 피동 기어(35teeth) 균열에 의해서 예상되는 구동 기어(70teeth) 한 회전 동안에 발생하는 구동기어 1회전 당 2회의 Peak 신호를 검출하지 못하였다.

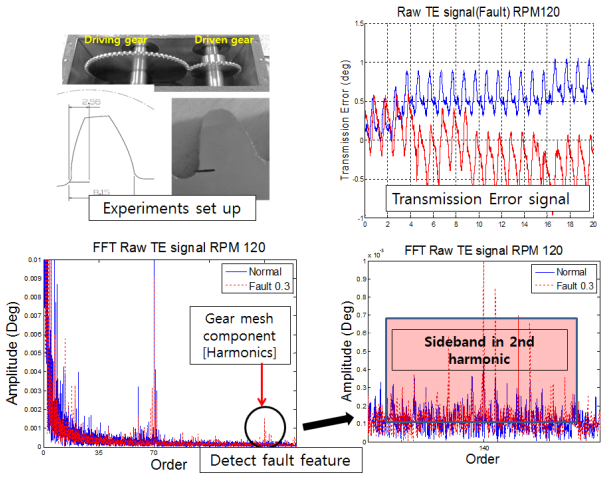

Fig. 7 Experiment and DAQ

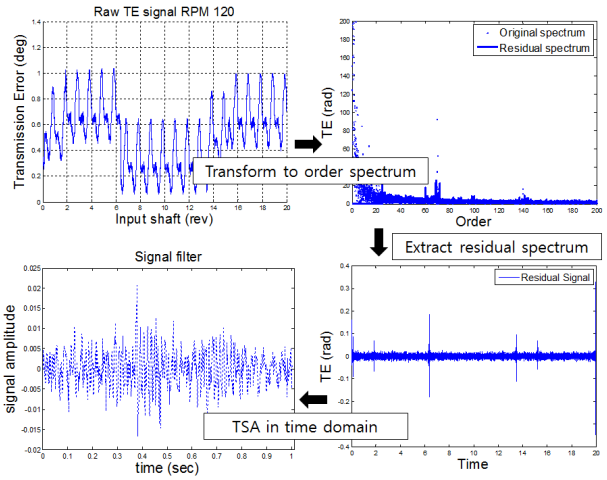

Fig. 8 Order spectrum(Test-bed signal)

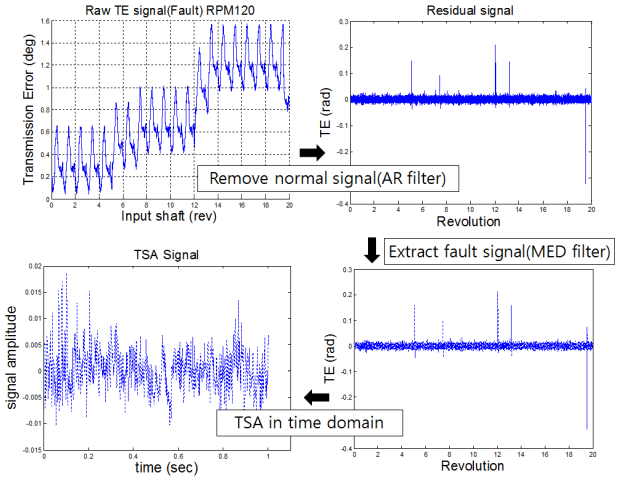

Fig. 9 AR-MED filter(Test-bed signal)

Fig. 10과 같이 고장검출 장애의 요인으로는 측정된 신호의 펄스형태 노이즈와 불충한 TSA 횟수로 추정된다. 펄스 형태 노이즈는 트랜스미션 에러 신호에 불규칙적으로 발생하는 노

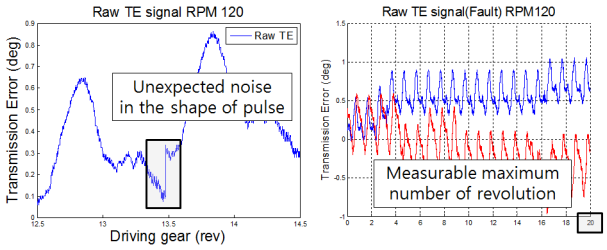

Fig. 10 Obstacles in fault detection

이즈로 기계적인 요인보다는 전기적 또는 소프트웨어에 의한 에러로 생각된다. 또한 현재 측정가능 데이터 길이는 구동축 기준으로 20바퀴로, TSA 가능 횟수가 제한적이다. 이러한 장애들은 신호 대비 노이즈 비(Signal-to-noise ratio)를 효과적으로 증가시키지 못하는 요인이 되어, 진단 기법이 검출 가능한 신호 대비 노이즈 비 범위에 못 미쳐서 발생하는 것으로 추정된다.

3.2 고장 심각성 진단

3.2.1 집중변수 모델

기어의 고장진단 시 유한요소 해석의 비효율성을 극복하기 위해서 집중변수 모델(Lumped Parameter Dynamic Model)을 기어 모델에 적용하였다(Litak and Friswell, 2005). 집중변수 모델의 가장 주요한 부분은 기어의 맞물림 모델링인데, Fig. 11와 같이 관성 모멘트(I_{g1}, I_{g2})를 갖는 두 개의 기어에서 토크(T_{in}, T_{out})가 전달될 때, 집중변수인 기어 이빨의 강성(K_g)이 작용선(line of action)에 따라 변화하는 모델을 적용하였다. 여기에서 기어 사이에 발생하는 감쇠(damping, C_g)효과는 무시되었다.

평기어에서의 치강성은 기어 이의 접촉비(Contact ratio)에 따라 이중접촉이 이루어질 때는 큰 값으로 단일접촉인 경우에는 작은 값을 갖으며 주기적으로 상하로 진동하는 모습을 Fig. 12에서처럼 보인다(Walha, *et al.*, 2009). 여기서 한 주기는 기어 이 한 개가 접촉을 시작해 끝날 때까지를 의미하므로 기어회전이 한 바퀴 이루어질 동안 기어 이빨 개수만큼의 주기가 나타난다. 특히 균열이 발생한 이빨에서는 치강성의 감소(Damaged Gear in Fig. 12)가 발생하고 한 바퀴 회전동안 몇 번째 주기에서 치강성의 감소가 나타났는지 확인함으로써 균열이 발생한 이의 위치를 판단할 수 있는데, 이것이 모델 기반 고장진단의 핵심적인 원리로서 사용된다.

하지만 본 연구에서는 치강성이 트랜스미션 에러(Transmission Error)와 밀접한 관계를 갖는 특성을 이용한다. 트랜스미션 에러는 이론적인 기어 회전각과 실제 측정된 각도의 차이를 뜻한다(Tuma, 2003). 기어의 회전은 기어 맞물

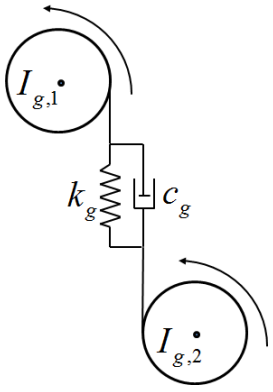

Fig. 11 Lumped parameter model

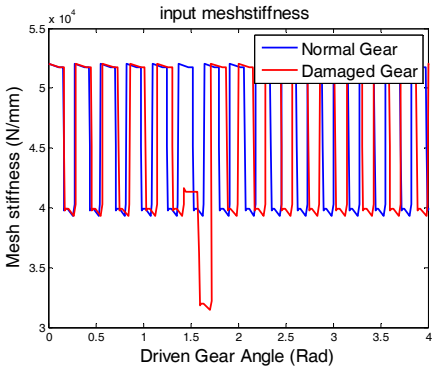

Fig. 12 Mesh stiffness(Normal, Damaged gear)

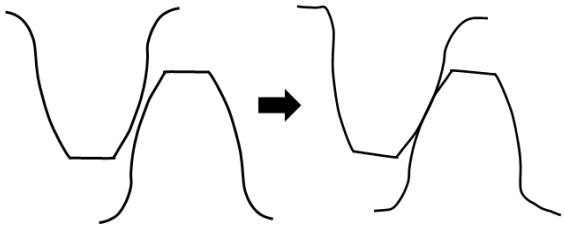

Fig. 13 Deflection of the meshing teeth

림에 의한 힘 전달로 이루어지는데 Fig. 13에 나타낸 것처럼 기어이빨에 처짐이 발생하면서 기어가 충분히 회전하지 못하게 되고, 이는 트랜스미션 에러 발생의 주된 원인이 된다. 따라서 치강성의 크기에 따라 처짐량 또한 변하고 결과적으로 트랜스미션 에러 값의 변화에 영향을 미치게 된다.

즉, 치강성이 클 때에는 기어의 처짐이 작아져 트랜스미션 에러가 작고, 치강성이 작을 때는 트랜스미션 에러가 큰 값을 갖게 된다.

3.2.2 고장 심각성 평가

고장 심각성 평가는 고장과 밀접히 관련된 모델 물성치를 측정된 신호를 기반으로 역추정하여, 고장 심각성을 물성치의 크기를 바탕으로 진단하는 것이다. 물성치와 측정된 신호로 각각 치강성과 트랜스미션 에러가 사용된다. 치강성을 역

추정하는 알고리즘은 Fig. 14과 같이 먼저 테스트 베드를 구동하여 기어 거동에 따른 트랜스미션 에러(Test-bed signal)를 측정한다. 다음으로 집중변수 모델에서 테스트베드와 같은 구동 조건으로 초기 치강성 값(Initial input mesh stiffness)을 입력하여 앞서와 같은 기어의 트랜스미션 에러(Output signal(TE))를 계산하기 위한 시뮬레이션을 시행한다. 시뮬레이션으로 계산된 신호(Output signal(TE))는 테스트베드에서 측정한 신호와 비교하여 적절한 유사성을 갖게 될 때까지 치강성 값을 수정해 가며 시뮬레이션을 반복 수행한다. 반복되는 프로세스는 상용 소프트웨어(Matlab)를 이용하여 자동화하였다.

결과로 도출된 근사화된 치강성 값은 균열의 위치와 크기의 정보를 담고 있어서, 치강성과 균열 크기 사이의 상관관계 로부터 균열크기를 추정할 수 있다.

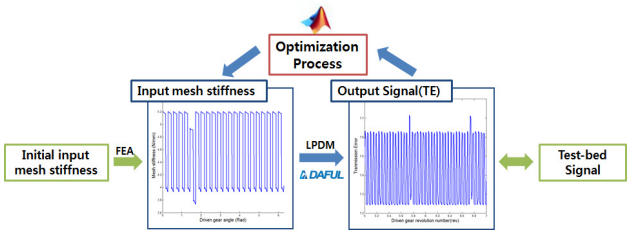

Fig. 14 Inverse estimation of model parameter

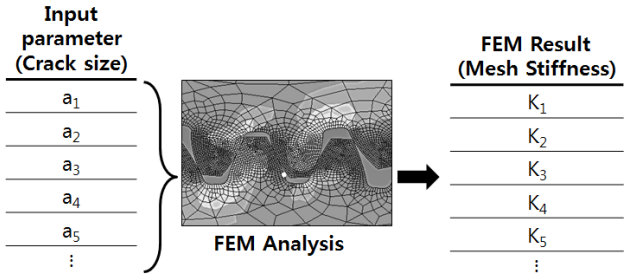

Fig. 15 FEM model for correlation

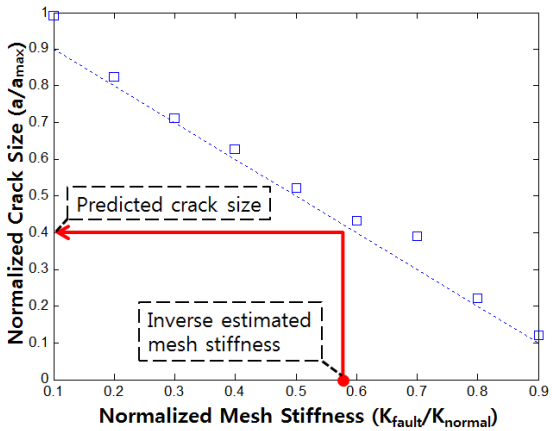

Fig. 16 Correlation between K_{mesh} and a_{crack}

강성과 균열 크기 사이의 상관관계를 알기 위해서는 Fig. 15처럼 균열 크기를 변경하며 정적 유한요소 해석을 통해 균열 크기에 따른 치강성 값을 계산하여야 한다. 이를 바탕으로 Fig. 16와 같이 강성과 균열 크기 사이의 관계식을 완성할 수 있고, 이 관계식을 토대로 위의 역추정 프로세스를 거친 치강성 값에 따른 예상되는 균열 크기를 판단하게 된다.

3.2.3 시뮬레이션에 기반한 고장 심각성 진단법 검증

고장 심각성 진단에서 주요한 물성치 역추정 프로세스를 수행하기 위해서, 집중변수 모델(상용프로그램)과 최적화 기법을 수행할 Matlab을 연계하는 코드와 최적화 기법 선정이 필수적이다. 본 연구에서는 C언어에 기반한 연계코드와 KKT (Karush-Kuhn-Tucker)에 기반 Matlab library 함수 중에 하나인 Active Set algorithm 최적화 기법을 적용하여 전체 프로세스를 구축하였다.

이번 연구에서는 물성치 역추정 프로세스의 검증을 위해 집중변수 모델의 시뮬레이션 결과를 테스트베드 측정 신호로 가정하여 사용하였다.

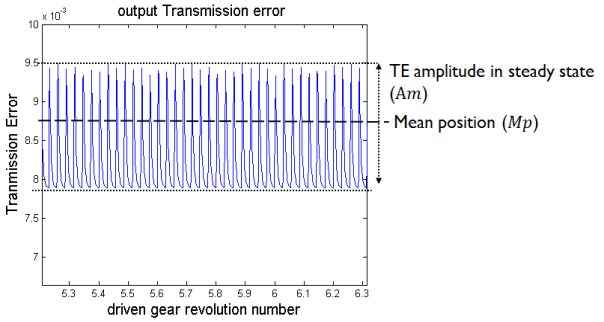

Fig. 17 Transmission error features

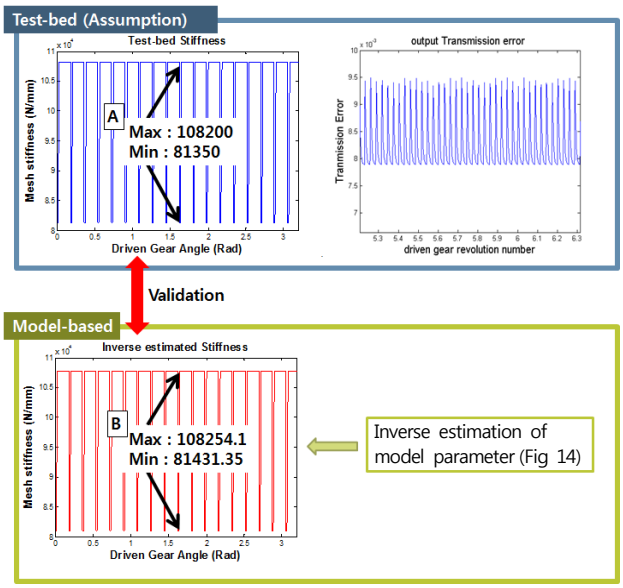

Fig. 18 Validation of inverse estimation process

검증에 앞서 먼저 동적거동 신호(Output signal)인 트랜스미션 에러 신호의 특성값을 진폭(Am)과 평균값(Mp)으로 (Fig. 17) 정의하여, 두 신호의 비교를 정량화하였다.

전체 과정은 먼저 테스트베드 측정 신호로 가정되는 시뮬레이션 데이터를 미리 정의된 치강성 값(A)을 바탕으로 생성하고, 이 생성된 테스트베드 측정 신호(Test-bed signal)을 기반으로 물성치 역추정 프로세스(Fig. 14)를 수행하여 역추정된 치강성(B)을 처음에 정의된 치강성 값(A)과 비교하는 절차로 이루어졌다.

Fig. 18에 실제 검증과정의 결과를 나타내었다. 미리 정의된 치강성(A)은 최대값이 108200N/mm, 최소값이 81350 N/mm의 사각파형으로 정의하였고, 최적화 초기값(최대값 108200×3.8N/mm, 최소값 81350×3.8N/mm)으로부터 총 19회 iteration과 90회 시뮬레이션을 통해서 역추정된 치강성(B)(최대값 108200×1.0005N/mm, 최소값 81350×1.001 N/mm)을 얻었다. 이를 통해서 역추정된 치강성 값(B)이 정확하게 미리 정의된 치강성(A)을 추정하는 것을 확인하였다. 이러한 과정을 통해 물성치 역추정 프로세스 코드의 구축 및 검증을 완료하였다.

4. 결 론

기존의 고장진단 기법들이 측정된 신호에서 단순히 비정상 신호를 검출하여 고장 유무만을 검출한 반면에, 모델 기반 고장진단은 고장검출을 통한 고장위치 판단과 고장진단을 통한 고장 심각성 평가를 통하여 시스템 운영에 효과적인 정보를 제공한다. 본 연구는 모델 기반 고장진단에 대한 초기 연구단계로서 진단법을 제안하고, 단순한 테스트-베드에서 진행된 연구내용을 통해 제안한 진단법의 가능성을 보여주었다.

차후 연구에서는 실제 테스트베드를 대상으로 고장검출 신호를 추출하고 이것을 이용하여 물성치 역추정을 수행할 예정이다. 이를 정상 기어와 균열이 인가된 기어 각각에 대해 진행하여 기어의 치강성을 구하고 균열 기어의 경우, Fig.16에서 제시된 상관관계에 따라 균열의 크기를 최종적으로 판별할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20118520020010).

참 고 문 헌

Bartelmus, W., Zimroz, R. (2009) A New Feature for Monitoring the Condition of Gearboxes in Non-stationary Operating Conditions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(5), pp.1528~1534.

Baydar, N., Ball, A. (2000) Detection of Gear Deterioration Under Varying Load Conditions By Using the Instantaneous Power Spectrum, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(6), pp.907~921.

Begg, C.D., Byington, C.S., Maynard, K.P. (2000) Dynamic Simulation of Mechanical Fault Transition, Proc 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, *Virginia Beach*, VA, 1-4, pp.203~212.

Crabtree, C.J. (2011) Condition Monitoring Techniques for Wind Turbines, PhD Thesis, Durham University, UK.

Endo, H., Randall, R.B., Gosselin, C. (2009) Differential Diagnosis of Spall vs. Cracks in the Gear Tooth Fillet Region: Experimental Validation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 pp.636~651.

Guicai Zhang and Joshua Isom (2011) Gearbox Vibration Source Separation by Integration of Time Synchronous Averaged Signals, Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society.

Li, C.J., Lee, H., Choi, S.H. (2002) Estimating Size of Gear Tooth Root Crack Using Embedded Modelling, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(5), pp.841~852.

Litak, G., Friswell, M.I. (2005) Dynamics of a Gear System with Faults in Meshing Stiffness, *Nonlinear Dynamics*, 41(4), pp.415~421.

Nilsson, J., Bertling, L.M. (2007) Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plant During 1997-2005, IEEE Transactions on Energy Conversion, pp.167~173.

Poore, R., Global, C., Concepts, E. (2008) Development of an Operations and Maintenance Cost Model to Identify Cost of Energy Savings for Low Wind Speed Turbines, National Renewable Energy Laboratory.

Ralph A. Wiggins (1978) Minimum Entropy Deconvolution, *Geoexploration*, 16, pp.21~35.

Randall, R.B. (2011) Vibration-based Condition Moni-

toring, WILEY, p.40.

Stander, C.J. Heyns, P.S. (2005) Instantaneous Angular Speed Monitoring of Gearboxes under Non-cyclic Stationary Load Conditions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(4), pp.817~835.

Stander, C.J., Heyns, P.S., Schoombie, W. (2002) Using Vibration Monitoring for Local Fault Detection on Gears Operating Under Fluctuating Load Conditions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(6), pp.1005~1024.

Tuma, J. (2003) Phase Demodulation of Impulse Signals in Machine Shaft Angular Vibration Measurements, Proceedings of Tenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV10), pp.5005~5012.

Walha, L., Fakhfakh, T., Haddar, M. (2009) Nonlinear Dynamics of a Two-stage Gear System with Mesh Stiffness Fluctuation, Bearing Flexibility and Backlash, *Mechanism and Machine Theory*, 44(5), pp.1058~1069.

Wenyi Wang and Albert K. Wong. (2000) A Model-Based Gear Diagnostic Technique, Defence Science and Technology Organization, DSTOO-TR-1079.

Zhan, Y., Makis, V., Jardine, A.K.S. (2006) Adaptive State Detection of Gearboxes under Varying Load Conditions Based on Parametric Modelling, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(1), pp.188~221.

요 지

모델기반 고장 진단법은 풍력발전기의 상태감지 시스템(Condition monitoring system)에 적용을 목적으로 변동 하중조건 하에서 작동하는 기어박스내의 기어의 균열을 진단하기 위해 제시하였다. 두 개의 평기어(Spur gear)로 구성된 간단한 테스트 베드가 위의 접근방법을 검증하기 위해 구축되었고, 기어의 균열은 기어의 뿌리부분에 균열을 인가하여 묘사하였다. 축의 회전속도에 독립적인 타코미터를 기반으로 한 오더분석(Order analysis)을 균열크기 진단에 적용하였고, 테스트 베드의 작동을 시뮬레이션하기 위해 집중변수 모델(Lumped parameter dynamic model)이 사용되었다. 모델에서 균열과 밀접히 관련된 변수는 측정된 신호와 시뮬레이션된 신호 간의 차이를 최소화하는 최적화 기법으로 역추정하였다. 제시한 방법의 유효성을 보이기 위해, 미리 정의된 모델 변수로부터 생성된 시뮬레이션 신호를 테스트-베드로부터 측정된 신호로 가정하고, 제시한 방법을 사용하여 변수를 역추정하였다. 결과는 실제 값과 일치하였고, 이를 통해 알고리즘이 제대로 작동함을 알 수 있었다. 다음 연구에서는 실제 테스트 베드의 실제균열에 적용하고자 한다.

핵심용어 : 풍력발전, 고장진단, 기어균열, 가변하중 조건, 오더분석, 집중변수 모델, 고장 심각성 평가