

Best Paper of this month

진동 분석을 이용한 사출성형기 유압펌프 결함 진단 시스템에 관한 연구

김태현^a, 전용호^a, 이문구^{a*}

A Study on Failure Diagnosis System for a Hydraulic Pump in Injection Molding Machinery Using Vibration Analysis

Taehyun Kim^a, Yongho Jeon^a, Moon Gu Lee^{a*}^a Dept. of Mech., Eng. Ajou Univ., San 5, Woncheon, Yeongtong, Suwon, Gyeonggi, 443-749, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	March	2013
Revised	24	April	2013
Accepted	29	April	2013

Keywords:

Wavelet transform
 Vibration analysis
 Fault diagnosis
 Condition monitoring
 Injection molding machine

ABSTRACT

In line with the advances in factory automation, various pieces of equipment are now operated in batch processes controlled by computers. However, many kinds of faults can occur in complicated and large systems, which can result in low productivity and economic loss. The reliability and safety of systems have been studied because of the difficulty of determining the severity and location of faults. Therefore, it is necessary to detect and diagnose such faults in order to guarantee the reliability and safety of the equipment. In this paper, a diagnosis method for the ball bearings of a hydraulic pump is applied using a vibration signal for the maintenance of injection molding equipment. The bearings' defects are selected as a main failure mode through a failure mode and effect analysis (FMEA). Usually, there are nonlinear and impulse components of vibration in a ball bearing with faults. For the effective fault diagnosis of a ball bearing, nonlinear diagnostic methods and time-frequency analysis are applied, in addition to the methods currently used, such as power spectrum, time series analysis, and statistical methods. As a result of this study, a failure diagnosis system is provided that is useful even for non-experts. This is a condition-based method that makes it possible to resolve problems in a timely and economical way, in contrast to the prior method, which required regular but wasteful maintenance based on the experience of expensive external experts.

1. 서론

최근 플라스틱 사출성형(injection molding) 기술은 발전하였지만, 대다수 사출성형 전문 기업은 자신들이 보유하고 있는 사출성형기의 상태 진단 및 고장 예측을 조직적, 기술적으로 수행하지 못

하고 있다. 이러한 경우 장비에 문제가 발생하였을 때, 설비의 진단 및 고장 수리 경험을 가진 외부의 현장 기술자에 의존하고 있다.

그러나 사출 성형기 수에 비해 사출기 운용에 많은 경험을 가진 전문기술자는 부족한 실정이며, 전문 기술자라고 해도 개인에 따라 고장 진단에 대한 일관성이 없고, 기술자들의 잦은 보직이동이나

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2338

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: moongulee@ajou.ac.kr (Moon Gu Lee).

이직으로 인하여 고장진단에 대한 경험 및 기술의 축적을 기대하기도 어렵다. 이러한 상황은 해당 장비에 대한 유지 및 보수를 어렵게 한다. 따라서, 장비 사용시 적절한 조치가 이루어지지 않아서 장비에 고장이 발생하면, 생산에 막대한 차질로 경제적 손실까지 초래할 수 있다. 이런 이유로 사출성형기와 같은 기계설비에 대한 상태감시(condition monitoring) 및 이상 진단(fault diagnosis)에 대한 중요성은 더욱 커지게 되었다.

설비진단 기술은 가동 중인 설비로부터 발생하는 진동, 소음, 열, 비틀림과 같은 신호를 이용하여 설비의 상태를 정량적으로 분석하여 기계설비의 이상을 감지하는 기술이다. 특히, 소음과 진동은 기계설비의 운용 중에 쉽게 측정할 수 있는 반면, 해당 설비의 결함을 초기에 알려주는 민감한 지표(indicator signal)이다. 이를 이용한 상태감시 기술은 작동 중인 설비와 생산 과정에 영향을 주지 않으면서 설비의 이상 상태를 감지할 수 있는 경제적이고 효과적인 방법 중 하나이다^[1].

기계설비의 중요 부품 중 베어링은 축을 지지하거나 마찰이 발생하는 부분에서 회전이나 미끄럼이 원활하게 이루어지도록 하는 기계요소로서 기계 산업의 모든 분야에 널리 활용되고 있다. 그러므로 베어링의 상태를 점검하고 정상적인 형태를 유지시켜 주는 것은 기계의 안전운전을 위해 매우 중요하다. 베어링에 이상이 발생할 경우 예상치 못한 과도한 진동, 소음이 발생되며, 기계 요소의 결합에 의한 진동과 소음은 베어링을 통해 케이스로 전파 된다. 베어링은 항상 회전하고 있고, 베어링 케이스 내부에 위치하고 있으므로 육안으로 베어링의 상태를 파악하는 것은 어려운 일이다. 따라서 진동신호를 측정하고 분석함으로써 베어링의 상태를 점검하고, 이상 발생 시 수리하거나 교체함으로써 기계를 최상의 상태로 유지시켜야 한다. 이를 위해 시간 또는 주파수 영역에서의 베어링 결함진단에 대하여 많은 연구가 진행되었지만, 비선형 기법을 이용한 베어링의 고장진단에 관한 연구는 미미한 실정이다^[2].

본 연구에서는 정상 베어링과 결함이 발생한 베어링 각각에 대해 실험을 수행하고, 비선형 신호처리 기법인 웨이블릿을 이용하여 실험 데이터를 분석하였다. 본 연구 결과를 이용하면 유압펌프와 같이 다수의 베어링이 장착된 회전기계에서 베어링의 고장 여부 알 수 있고, 고장 위치를 정확히 파악함으로써 이상 베어링의 즉각적인 교체 및 수리를 가능하게 하는데 활용될 수 있다.

2. 본 론

2.1 사출성형기의 고장모드 분석

본 연구에서는 자동차 및 전자제품용 플라스틱 사출품을 제조하는 D社의 1994년부터 2009년까지의 보전작업내용을 바탕으로 중

Table 1 FMEA of an injection molding equipment

Unit name	Occurrence rate (%)
Heater	27.0
Clamping Unit	14.1
Hydraulic Pump	3.5
Cylinder	3.5
Injector	3.2
Safety door	3.2
Rest 46 units	45.5

형 사출기 17대와 대형 사출기 7대의 고장 모드와 영향 해석(FMEA)을 진행하였다. 약 400회 이상의 고장 및 이상 데이터를 기반으로 사출성형기의 고장모드를 분석한 결과 Table 1과 같은 결과를 얻었다. 가장 많은 고장 발생률을 나타낸 히터의 경우 간단한 전기적인 배선의 단선이나 소손이 대부분이었다. Clamping Unit의 고장은 대부분 유압호스나 유압펌프에서 비롯되었다. 특히 유압펌프는 그 자체로도 다른 여러 요인에 의해서 고장빈도가 높았는데 그 주요 고장원인은 베어링 마모였다. 전기배선과 유압호스의 고장은 간단한 교체와 수리로 해결할 수 있으나, 유압펌프 베어링의 고장은 그 수리가 복잡하거나 가격이 비싸므로, 본 연구에서는 고장모드를 바탕으로 사출성형기용 유압펌프의 구동부의 베어링 결함에 대한 실험을 진행하였다.

2.2 베어링의 결함진단

ISO1925(1990)의 정의에 따르면, 베어링(bearing)은 횡 방향 또는 축 방향으로 동역학적인 운동을 구속하면서 회전체의 하중을 지지하고 회전을 허용하는 마찰이 적은 지지요소로, 회전기계의 운전 신뢰성 및 성능에 직접적인 영향을 미치는 중요한 핵심 기계요소 중의 하나이다. 일반적으로, 회전 기계에서 발생하는 많은 문제들은 주로 베어링 자체의 결함이나 베어링과 연관되어 발생한다. 따라서 베어링에서 발생하는 사소한 문제는 회전 기계 시스템 전체의 운전에 영향을 미치므로 이에 대한 결함을 진단하는 것은 중요하다.

연속된 응력의 작용은 플래킹(flaking) 또는 스폐링(spalling)으로 알려진 국부적 피로를 발생시켜서 재료를 파편(fragment)을 발생시킨다. 결함이 발생하면 영향을 받는 면적은 급속히 증가하고, 윤활제를 오염시키며 국부적 과부하의 원인이 된다. 이외에도 베어링의 수명을 단축시키는 다양한 외부적인 결함 요인들이 있으며 중요한 요인으로는 오염(contamination), 부식(corrosion), 부적절한 윤활(lubrication) 및 부적절한 설치(installation)를 들 수 있다. 베어링은 대부분 가혹한 설치 환경에서 사용되기 때문에, 오염과 부식은 빈번하게 베어링 고장을 가속시킨다.

먼지와 기타 이물질들은 통상 베어링의 윤활제를 오염시킨다. 이 미세한 입자들은 상대적으로 부드러운 것에서부터 다이아몬드와 같이 경도(hardness)가 매우 높은 것까지 다양하다. 이 입자들은 연마 작용을 하여, 전동체와 홈의 마멸을 일으키는 점 부식(pitting)과 마멸작용(wear)을 일으킨다. 베어링 부식은 물, 산(acids), 열화된 윤활제 및 설치 시의 부주의한 취급에 의한 땀으로부터 발생된다. 화학반응도 심각하게 진행되면, 입자들은 베어링 오염에 의해 발생하는 연마 작용과 동일한 결과를 일으켜 마멸을 야기할 수 있다. 부적절한 윤활은 너무 적거나 너무 많은 윤활제를 공급하거나, 부적절한 윤활제를 사용하였을 때 발생한다. 다른 경우로는 구름 요소들이 유막(oil film)내에서 절적인 회전이 허용되지 않고 과열을 야기하는 경우이다. 과열은 그리스(grease)를 파단 시키고, 윤활제의 윤활능력을 떨어뜨리며 고장의 진행을 가속화시키는 요인이 된다. 부적절한 설치 문제는 축이나 하우징을 통하여 베어링에 부적절한 힘을 가하는 것에 의해 흔히 발생된다.

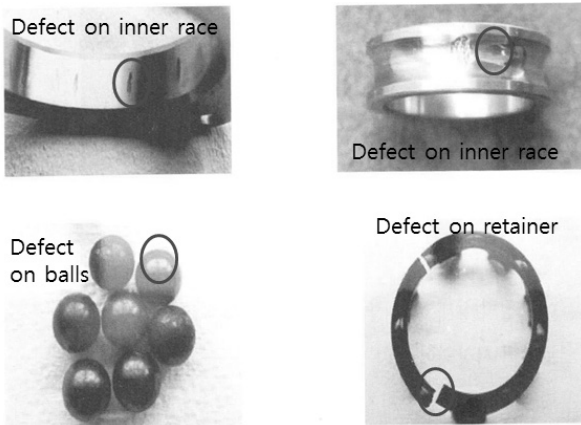


Fig. 1 Examples of ball bearing defects

Table 2 Characteristic frequency of ball bearing vibration (inner race rotation case)

Element	Characteristic Frequency
FTF (fundamental train frequency)	$f_c = \frac{f_r}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\alpha \right]$
BPFI (ball pass frequency of inner race)	$f_{ir} = \frac{Nf_r}{2} \left[1 + \frac{B_d}{P_d} \cos\alpha \right]$
BPFO (ball pass frequency of outer race)	$f_{or} = \frac{Nf_r}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\alpha \right]$
BSF (ball spin frequency)	$f_s = \frac{P_d}{2B_d} f_r \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos^2\alpha \right]$

f_r : rotating frequency, N : number of balls, B_d : ball's diameter, P_d : pitch diameter, α : contact angle

고장 메커니즘을 불문하고, 베어링 결함은 각 부품의 회전속도에서 기계적인 진동을 발생시키게 되고, 이를 측정함으로써 역으로 결함의 원인을 파악할 수 있다. Fig. 1은 베어링 구성 요소들인 외륜, 내륜, 볼 및 보지기(retainer)의 결함 사진을 나타내고, Table 2는 구름 베어링의 결함 부위에 따른 특성 주파수 계산식을 정리한 것이다^[3]. 이 특성 주파수들은 결함을 진단하는데 필수적인 역할을 한다.

3. 실험

본 실험에서는 사출성형기용 유압펌프의 결함 감지 및 진단을 위하여 진동모니터링 기법을 활용한다. Table 2에서 소개된 결함 주파수와 주요 고장 모드와의 관계를 도출하고, 대표적인 시간-주파수영역 분석 기법들을 적용하고 비교하여 유압펌프의 결함 분석에 효과적인 방법을 제시하고자 한다.

유압펌프의 이상 진단 실험을 위해 DC모터와 펌프, 매니폴드(manifold), 냉각장치, Oil tank로 구성된 유압 장치와 가속도 센서, 데이터 수집 장치, PC 등을 사용하여 유압펌프 결함 모의실험 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 제작된 유압펌프 결함 모의실험 장치는 현재 유압식 사출성형기에 많이 사용되는 유압펌프를 조사하여 축소모델로 제작되었다. DC모터는 베인 펌프(Vane pump)와 연결되어 유압을 형성시키고 매니폴드를 통하여 유압을 분배하여 준다. 유압이 상승하면서 올라간 온도는 냉각장치를 통하여 냉각시키게 된다. 유압펌프의 결함은 앞서 설명한 바와 같이 베어링에서 주로 발생하는데, 이 장치에서는 DC모터의 베어링에 집중한다.

모의실험 장치에서 발생하는 진동신호는 가속도 센서를 통해 PC로 데이터가 전송되며 LabView 프로그램을 통하여 신호처리 및 데이터 분석을 수행 할 수 있도록 장치를 구성하였다. 모터의 진동신호 측정을 통한 정확한 모니터링 결과를 얻기 위해서 계측위치의 선정이 필요하다. 일반적으로 회전기기의 진동의 경우 베어링 하우

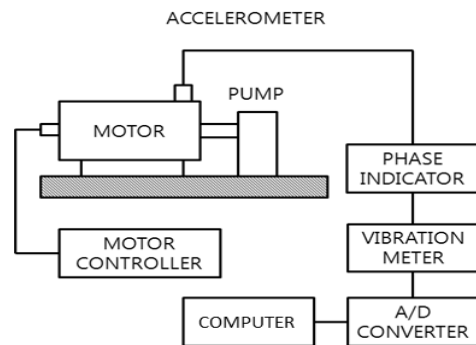


Fig. 2 Experimental setup for hydraulic pump fault detection

정 중심의 수직방향 신호를 측정하는 것이 원칙이다. 그 이유는 축이 회전하면서 이상에 따라 진동이 발생할 경우 휘둘림 운동(whirling)을 하게 되므로 반경방향의 진동이 크게 증가하기 때문이다. 따라서 모의실험 장치의 진동신호 측정을 위해 ISO 10816-1에 의거하여 베어링 하우징 수직방향 상단에 가속도 센서를 설치하였다.

4. 결과

4.1 시간영역 분석

베어링의 결함은 대개 피로, 마모 또는 소성변형 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다^[4]. 이러한 결함에 의한 진동신호는 많은 경우 충격 신호가 주기적으로 나타나는 형상이므로 특정 고장 신호를 생성할 수 있도록 인위적으로 베어링의 외륜과 내륜에 결함을 가한 베어링을 준비하였다. 그리고 결함 베어링과 정상 베어링의 진동신호를 비교하기 위하여 1,730 rpm 정상 구동상태에서 가속

Table 3 Comparison of vibration amplitude in RMS

Rotation speed	Normal bearing	Outer race defect	Inner race defect
1,730 rpm	2.424 m/s ²	5.868 m/s ²	3.757 m/s ²

도를 측정하였다. 실험에서 얻은 정상 베어링, 외륜 결함 베어링, 내륜 결함 베어링의 가속도 신호를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 정상 베어링이 장착 되었을 때의 진동신호이고, (b)는 외륜 결함을 가진 베어링, (c)는 내륜 결함을 가진 베어링을 장착했을 때의 진동신호이다. Table 3에서는 각각의 진동 레벨을 나타내었다. 결함이 발생하였을 때 주기적인 충격성분이 나타나고 있으며, 결함 발생 시 진동 레벨이 정상 베어링 상태보다 크게 나타남을 알 수 있다.

4.2 주파수 영역 분석

베어링 표면 위의 결함이 다른 표면과 만날 때마다 충격이 생성되고 베어링은 충격(impulse) 응답의 결과를 낳는다. 결함과 상대 표면의 접촉은 주기적이기 때문에, 충격신호는 결함의 위치에 따라 특정한 일정 시간 간격으로 재현된다. 이때의 발생 주파수를 결함 특성 주파수(characteristic defect frequency)라 부른다. 본 연구에서 사용된 베어링은 단일 깊은 홈 볼베어링이며, 이 경우 접촉각은 0°이다. 앞에서 정의하였듯이 베어링에 결함이 있을 때 특성 주파수가 발생한다. 계산된 결함 특성 주파수와 주파수 스펙트럼을 비교 검토하여 대응관계로 결함여부를 판정하였다. 즉, 이 계산 값과 주파수 스펙트럼에 나타난 주파수 성분이 일치할 때 결함이 있는 것으로 판정하였다. 실험에서 얻은 정상 베어링, 외륜 결함 베어링, 내륜 결함 베어링의 가속도 신호의 주파수 스펙트럼들을 Fig. 4에 나타내었다. 이산시간 분석에 따른 누설 현상을 줄이기 위해 해닝 창(Hanning Window) 함수를 사용하였으며, 75%의 중첩률(overlap ratio)을 설정하였다. 그리고 대수 진폭(log magnitude)을 이용하여 dB 스펙트럼으로 표현하였다.

이를 분석해 보면 외륜 결함이 있는 베어링의 경우에 베어링의 기본주파수(fundamental train frequency) 59 Hz, 외륜 결함 특성 주파수 88 Hz와 배수에 해당되는 2차, 3차 고조파 성분들이 나타남을 알 수 있으며, 주파수 스펙트럼 상에 결함 특성 주파수성분들이 나타난다. 반면에 내륜 결함을 가진 베어링의 경우에는 내륜 결함 특성주파수인 141 Hz의 진폭이 주변 진폭에 비해서 분명히 나타나지 않았다. 내륜 결함에 의해 발생한 진동은 외륜 결함과 달리 결함에 기인한 충격이 베어링 케이스로 직접 전달되지 않고 케이스의 외부 표면으로 전달될 때, 볼, 보지기 및 외륜 등 더 많은 전달 부분(transfer segment)이 많아서 감쇠되었기 때문이다. 또한, 모터의 회전주파수 성분의 배수 성분들이 베어링의 결함 특성 주파수의 배수들과 유사한 값을 가질 때, 주파수스펙트럼에서 회전 주파

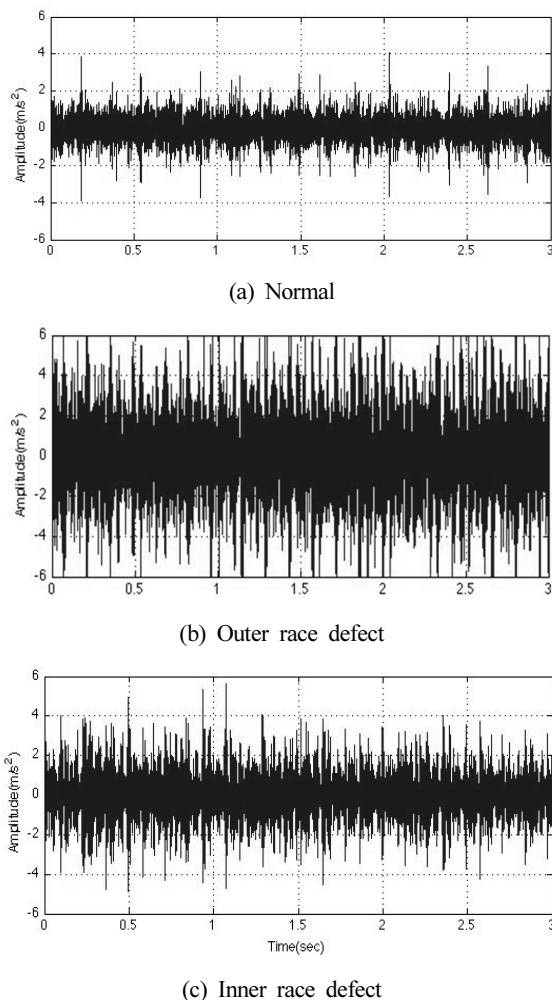


Fig. 3 Vibration signal of hydraulic pump

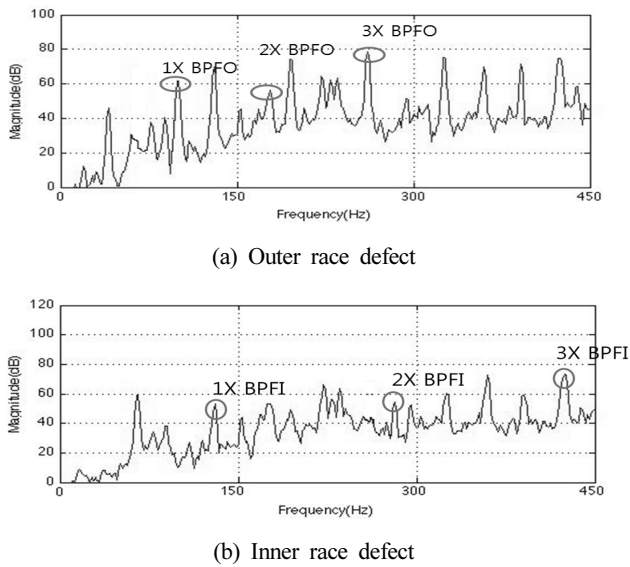


Fig. 4 Frequency Analysis of hydraulic pump vibration

수의 배수 성분들인지 아니면 베어링 결함 발생 주파수의 배수 성분들인가에 대한 정확한 판단을 할 수 없다. 따라서 베어링 결함의 위치를 정확히 판단하는데 기존의 시간영역과 주파수 영역에서의 분석에는 한계가 있음을 알 수 있다.

4.3 3차원 시간-주파수영역 분석을 통한 고장진단

실험을 통하여 얻은 베어링의 진동신호를 시간과 주파수영역을 동시에 볼 수 있는 웨이블릿 변환을 적용하여 분석한 결과 Fig. 5를 얻을 수 있었다. 이 실험에서 사용된 베어링의 외륜 결함 발생 주파수는 141 Hz이며, 내륜 결함 발생 주파수는 267 Hz이다. 여기서 Morlet 변환을 사용한 이유는 기준 변환함수의 모양이 충격신호와 비슷하여 충격신호 분석에 적합하기 때문이다¹⁵⁻¹⁷. 시간 축의 범위는 20 ms로 고정하여 각각의 상태의 베어링의 진동 신호를 분석하였다. 웨이블릿 변환의 스케일(scale) 범위는 베어링의 결함 특성 주파수가 잘 드러나도록 설정하였다. Fig. 5의 x축 성분은 시간을 의미하고 y축 성분은 주파수와 상관관계를 가지고 있는 Scaling 계수 값을 나타낸다. z축은 웨이블릿 계수의 값을 나타낸다¹⁷⁻¹⁸.

Fig. 5(b), (c)에 나타나 있는 결함이 있는 베어링의 웨이블릿 분석 결과를 보면, 베어링에 결함이 있을 때 충격성분이 확실하게 나타난다. Scale 13 정도에 해당하는 기본 주파수(fundamental train frequency) 영역이 전 시간영역에 걸쳐 나타나고, 외륜 결함 베어링의 경우는 충격성분이 나타나는 7 ms와 14 ms 위치에서 값이 커짐을 확인할 수 있다. 이는 대략 141 Hz와 그 배수에 해당하는 것으로써 외륜 결함 주파수와의 일치한다. 그리고 내륜 결함 베어링은 충격성분의 발생 시간 간격은 3.7 ms로 나타났으며, 이 주기는 내륜의 결함 발생 주파수 267 Hz의 역수와 거의 일치한다.

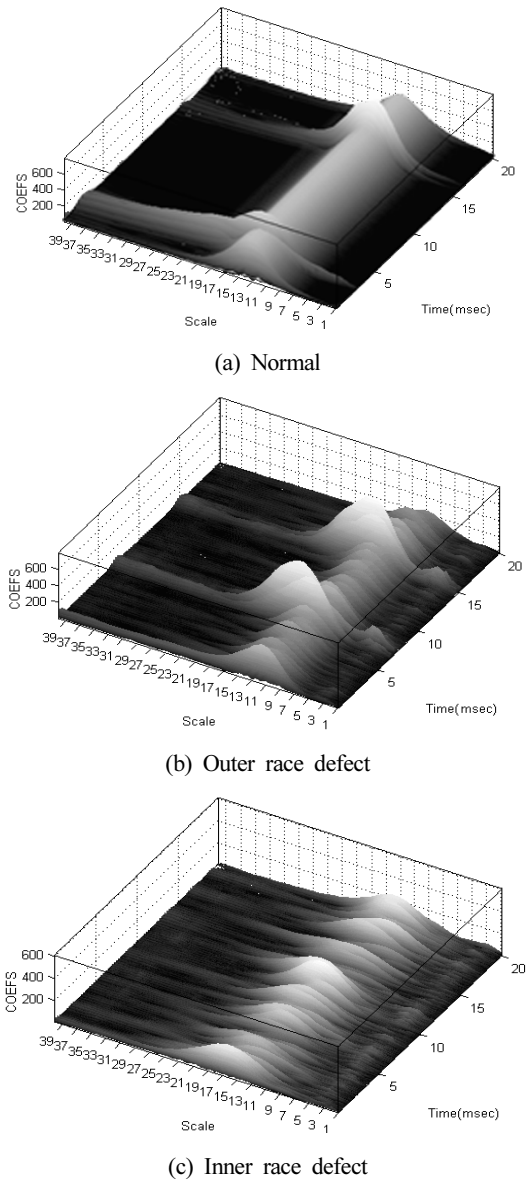


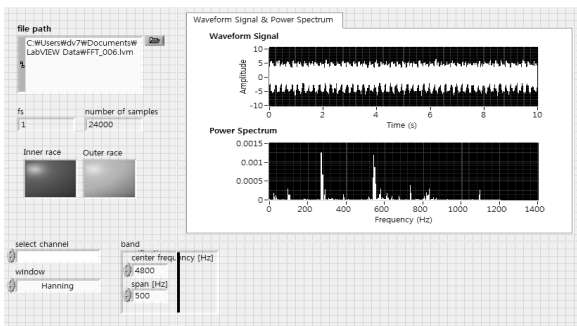
Fig. 5 Morlet wavelet transform of bearing vibration signal

또한, 각 결함의 진행 정도는 계수의 크기를 통하여 예측할 수 있다.

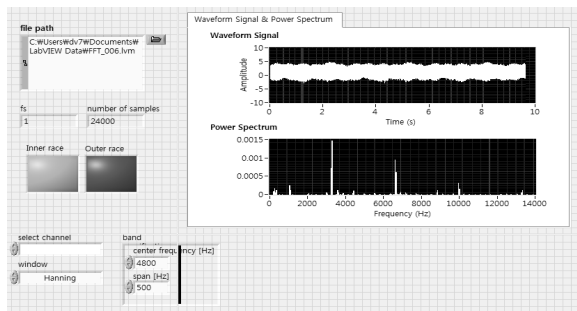
이러한 3차원 분석을 통하여 베어링에 따른 충격성분의 주파수와 시간위치를 하나의 평면상에 3차원으로 표현하는 것이 가능함을 알 수 있다. 따라서 웨이블릿 변환을 이용하면 베어링의 어떠한 부품에서 결함이 발생하였고, 심각성은 어떤지를 진단할 수 있다.

4.4 결함 진단 프로그램

결함 진단 시스템은 메인 프로그램과 서브 프로그램으로 이루어져 있다. 메인 프로그램은 크게 데이터 측정부, 데이터 처리부, 데이터 분석부로 나누어진다. 데이터 측정부에서는 장치의 설정과 데이터 샘플링 속도 등을 설정하여 데이터를 수집하고, 데이터 처리



(a) Inner race defect



(b) Outer race defect

Fig. 6 User interface for fault diagnosis

부에서는 A/D변환기를 통해 변환된 디지털 신호를 필터링한다. 데이터 분석부에서는 결합 주파수 성분 값과 문턱(Threshold) 설정치를 비교하여 문턱값의 설정치 이상으로 값이 입력되면 볼, 내륜, 외륜에 대한 경고 램프가 각각 작동되어 경고신호를 주게 된다.

Fig. 6은 각각 이러한 진단 시스템의 경고 화면의 예를 보여주고 있다. 각 화면에는 신호의 시간 영역과 주파수 영역분석을 제공하고, 전술한 여러 경고 내용을 보여주는 창과 정상 상태임을 나타내는 녹색램프와 경고 상태를 보여주는 붉은 램프가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 사출성형기용 유압펌프의 중요 부품들 중에 하나이며 취약부인 볼베어링의 결함을 진단하는 연구를 수행하였다. 대상 시스템의 주요 부품 중에서 유압펌프의 주요 고장 원인인 베어링의 진단에 집중하였다. 이를 위하여 측정과 신호수집이 간단한 진동신호만을 가지고 베어링결함이 생긴 부품이나 고장 정도를 사용자에게 쉽게 알려줄 수 있는 시스템을 개발하였다.

베어링의 주요 고장원인인 볼, 외륜, 내륜 결함에 대한 분석을 통하여 결함으로 인해 발생하는 진동신호의 특징주파수성분을 구했으며, 웨이블릿 변환을 사용하면 기존의 시간영역, 주파수영역 분석에 비해서 더 결함 부품과 그 정도를 알아내는 것에 효과적이라는 것을 확인하였다. 충격성분 특징 추출에 적합한 Morlet 웨이

블릿 변환을 이용하여 진동신호를 3차원 평면에 도시하면 이러한 효과가 더욱 두드러진다.

이 연구결과를 생산현장에 활용하면, 사출성형기를 진단하고 유지/보수하는 것에 있어서 효과를 발휘할 것이다. 나아가 베어링을 활용하는 많은 기계설비를 유지/보수하는 데 활용할 수 있을 것이다. 이러한 효과는 기존에 현장의 전문가에 의존하던 고비용의 유지보수를 개선하여 실제 설비의 상태를 기반으로 비전문가도 진단이 가능하게 하며, 적절한 유지보수를 가능하게 하여 비용을 절감할 수 있게 할 것이다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 추진하는 산업원천기술개발사업과 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술 인력양성사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Lee, J. C., 1995, Study on Diagnosis of Rotating Machinery using Methods of High Accuracy Spectrum Analysis, A Thesis for a Doctorate, Hanyang University, Republic of Korea.
- [2] Yu, Y., Dejie, Y., Junsheng, C., 2006, A Roller Bearing Fault Diagnosis Method Based on EMD Energy Entropy and ANN, J. of Sound and Vibration, 294:1-2 269-277.
- [3] Prabhakar, S., Mohanty, A. R., Sekhar, A. S., 2002, Application of Discrete Wavelet Transform for Detection of Ball Bearing Race Faults, Tribology International, 35 793-800.
- [4] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M., 1996, Wavelet Toolbox for Use with MATLAB, The MathWorks, Natick, MA, USA.
- [5] Lin, J., Qu, L., 2000, Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and its Application for Mechanical Fault Diagnosis, J. of Sound and Vibration, 234:1 135-148.
- [6] Wang, W. J., 2001, Wavelets for Detecting Mechanical Faults with High Sensitivity, Mechanical Systems and Signal Processing, 15:4 685-696.
- [7] Stearns, S.D., David, R. A., 1988, Signal Processing Algorithm, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [8] Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1980, Engineering Application of Correlation & Spectral Analysis, John Wiley & Sons, New York, USA.