

유도전동기 베어링의 원거리 실시간 결함진단시스템 개발

권오현[†] · 이승현

부경대학교 안전공학부

(2005. 2. 24. 접수 / 2005. 7. 29. 채택)

Web-based Real Time Failure Diagnosis System Development for Induction Motor Bearing

Oh-Heon Kwon[†] · Seung-Hyun Lee

Division of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received February 24, 2005 / Accepted July 29, 2005)

Abstract : The industrial induction motor is widely used in the rotating electrical machine for the transmission of power. It is very reliable equipment, but it could lead to the loss of production and life when failure occurs. Therefore, the failure data is acquired and analyzed by attaching an exclusive instrument to existing induction motor. However, these instruments could lead to side effects, increasing the production costs, because they are very expensive. The purpose of this study is the development of an induction motor bearing failure diagnosis system constructed using LabVIEW which can be supplied the kernelled function, process monitoring and current signature analysis. In addition, the availability and reasonability of the constructed system was examined for an induction motor with failure defects in outer raceway and ball bearing. From the results, it shows that failure diagnosis system constructed is useful for real-time monitoring with detection of bearing defects over the web.

Key Words : LabVIEW, induction motor, current signal analysis, failure diagnosis, realtime monitoring

1. 서 론

산업현장에서 동력전달에 의해 작동되는 회전기 중 가장 광범위하게 사용되는 유도전동기는 매우 신뢰성이 있는 기기이지만 결함이 발생되면 그로 인한 생산과 인명에 막대한 손실을 초래할 수 있다. 산업현장에서는 이를 방지하기 위해 유도전동기에 전용계측기를 설치하여 데이터를 수집 분석하고 있으나 이러한 계측기들은 대부분 고가이므로 생산원가 상승 등의 부작용을 초래하고 있다. 하지만 최근 들어 PC의 성능이 가격에 비해 급격히 향상됨에 따라 PC를 기반으로 한 가상계측기(Virtual Instrument, VI)의 활용이 증가하고 있는 추세이다. 가상계측기는 PC를 기반으로 하기 때문에 각종 응용프로그램 및 인터넷을 동시에 활용할 수 있고, 프로그램과 센서 등의 일부 변경만으로도 하

나의 계측 시스템이 여러 가지 기능을 가진 복합 계측 시스템을 가질 수 있는 장점이 있다. 가상계측기를 활용하기 위해서는 프로세스 모니터링 등의 핵심적인 기능을 제공할 수 있는 소프트웨어를 사용하여야 한다. 1983년 미국 National Instrument사에서 개발한 LabVIEW는 Graphic User Interface(GUI) 기반의 프로그램 작성 언어로 Drag and Drop 방식을 이용하여 타 프로그래밍 언어에 비해 비교적 짧은 시간 안에 프로그램을 작성할 수 있다. Pillay 등¹⁾은 LabVIEW를 이용해 모터 전류신호를 측정하여 모터 속도를 측정하는 방법을 제시하였고, Turley 등²⁾은 LabVIEW를 이용하여 엔진 테스트 소프트웨어를 개발하였다. 이러한 제어, 감시 및 계측 분야의 많은 연구자들에 의해 LabVIEW를 이용한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

한편 유도전동기의 결함분석을 위해 진동 측 전류, 누설자속, 회전자 전류, 부분방전, 속도변동, 온도, 고장자 전류 및 가스분석, 오일분석 등의 많은

[†] To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

방법이 이용되어 왔다. 그 중에서도 유도전동기의 진동을 분석하는 방법이 가장 많이 이용되었으나 진동측정에 의한 신호는 분석하는데 어려움이 있어 최근에는 계측이 쉬운 전류신호측정법에 대한 연구가 진행되고 있다. 1982년 Hargis 등³⁾이 전류신호분석을 통한 유도전동기의 결함검출 및 진단을 처음 소개한 이후, Schoen 등⁴⁾은 전류신호감시를 통해 베어링의 손상을 검출하였으며, 최근 2002년에 Jung⁵⁾은 전류신호를 이용해 유도전동기의 회전자봉 결함을 검출할 수 있음을 나타내었다. 그러나 현재까지 전류신호의 분석을 이용하여 사용자가 용이하게 결함을 검출하고 상시 감시할 수 있는 시스템은 아직 많은 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산업현장에서 광범위하게 사용되고 있는 유도전동기의 베어링 결함을 전류신호분석을 통해 인터넷으로 원격지에서 실시간으로 검출하고 경보하는 감시자 중심의 시스템을 LabVIEW를 이용하여 구축하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 베어링의 결함 및 전류신호분석

유도전동기의 고장원인 중 30% 이상이 베어링 결함으로 절연열화와 더불어 유도전동기 고장원인의 대부분을 차지하고 있다. 마모, 피트, 균열 등의 베어링 결함 및 조립불량, 급유불량, 절연열화로 인한 베어링의 결함까지 포함한다면 60% 내·외가 베어링 결함이라고 할 수 있다²⁾.

정상상태의 운전에서 나타날 수 있는 피로 현상은 레이스웨이 표면과 구름요소 아래에 작은 균열을 발생시키며 발생한 균열 및 결함은 표면에서 점차적으로 성장하여 진동을 발생시키며 소음의 정도를 증가시킨다. 계속적으로 가해진 국부응력은 플래킹(Flaking) 또는 스폐링(Spalling)을 발생시켜 재료의 파편 발생의 원인이 된다. 파편에 의해 손상된 부분은 윤활유의 오염을 빠르게 확대시키며 레이스웨이의 원주 부분에 국부적인 과부하를 야기시킨다. 이러한 과부하는 최종적으로 베어링의 거친 작동을 일으키며 구름 베어링의 고장 원인이 된다. 전류신호를 이용한 결함분석의 원리는 전동기 내부의 결함이 마찰력의 변화를 일으키는 것을 이용한다. 즉, 토크의 변화가 공급전류를 변화시키고, 이 공급전류의 미세 변화를 측정하여 전동기 내부결함을 분석하는 것이다. 이러한 전류신호의 미세 변

화는 유도전동기의 위치적인 고장 정보를 포함하고 있다. 따라서 각각의 주파수 성분들을 분석하면 부위별 유도전동기의 고장원인을 발견할 수 있다.

볼 베어링의 결합주파수는 식 (1)과 같이 전원주파수에서 각 부위별 결합주파수를 더하거나 빼준 절대값으로 전원주파수의 측대역 주파수 값으로 나타난다³⁾.

$$f_{bn} = |f_s \pm m f_v| \quad (1)$$

여기서 f_s 는 유도전동기의 전원주파수이다. m 은 1, 2, 3 ... 그리고 f_v 는 베어링의 각 부위별 결합주파수이며 f_{bn} 는 볼 베어링 결합주파수이다.

볼 베어링의 고유주파수들은 Fig. 1에서 제시한 볼의 직경, 베어링의 직경, 볼 수, 볼의 접촉각 등과 같은 베어링의 치수와 전동기의 기계적인 회전자 속도에 기초를 두고 있다. 볼 위에 결합이 있을 경우 그 결합부는 베어링의 안쪽 레이스웨이(Inner Raceway)와 바깥쪽 레이스웨이(Outer Raceway) 둘 다에 접촉되기 때문에 볼의 결합주파수에서 회전주파수 성분 $D_b/D_p \cos\beta$ 의 두 배가 되고 식 (2)와 같이 정의된다.

$$f_b = \frac{D_p}{D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_p} \cos\beta \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서 f_r 는 기계적 회전자 속도, D_b 는 베어링 볼의 직경, D_p 는 베어링 피치 직경, β 는 레이스웨이와 볼의 접촉각이다.

볼 베어링의 내·외륜 결합주파수는 각각의 볼이 내·외륜의 결함 위를 지나가게 될 때 생성되는 것이다. 베어링의 볼 수가 n 개라고 할 때 1회전하는

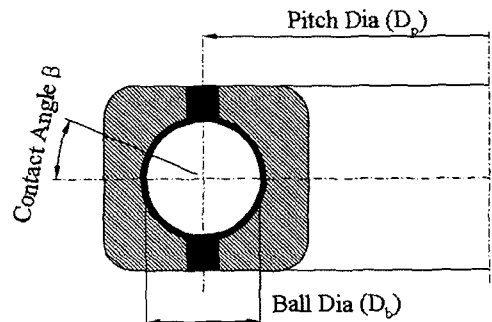


Fig. 1. Ball bearing dimensions schematic diagram.

동안 n번 생성되게 되며 내·외륜을 지나므로 결합 주파수는 절반이 된다. 따라서 레이스웨이의 결합 주파수는 식 (3)~(4)와 같이 주어진다³⁾.

$$f_o = \frac{n}{2}f_r \left[1 - \frac{D_b}{D_p} \cos\beta \right] \quad (3)$$

$$f_i = \frac{n}{2}f_r \left[1 + \frac{D_b}{D_p} \cos\beta \right] \quad (4)$$

여기서 n은 베어링 볼의 수이며 f_o , f_i 는 각각 외·내륜 결합주파수를 나타낸다.

전류신호를 이용한 결합진단은 위험구역이나 제한구역에 들어갈 필요 없이 수행 가능하여 측정자를 위험에서 보호할 수 있다. 또한 전동기의 효율 저하와 진동을 유발하는 회전자 축의 파손 등의 문제를 미리 감지하여 경보함으로써 사고로 인한 재해가 발생되기 전에 이러한 문제점들을 해결할 수 있다.

2.2. 데이터 취득 수법

본 시스템에서 사용된 데이터 취득 프로그램인 LabVIEW는 1983년 미국 National Instrument사에서 개발한 Graphic User Interface(GUI) 기반의 프로그램 작성 언어로 아이콘으로 되어있는 함수들을 드래그 앤 드롭(Drag and Drop)방식으로 배치하고 와이어링(Wiring) 하는 것만으로 프로그램을 코딩할 수 있어 다른 프로그래밍 언어에 비해 비교적 짧은 시간 안에 프로그램을 작성할 수 있다.

프로그램은 기본적으로 AI Waveform scan 함수와 Index Array 함수, Bundle 함수로 이루어진다. AI Waveform scan 함수는 데이터 취득을 위한 하드웨어 설정과 데이터 취득속도, 취득할 스캔 수 등을 설정하며 출력으로 Wave Form 또는 Scaled Array 형태로 취득한 데이터를 출력하게 된다. 단순히 입력된 신호를 패널에 출력하기 위함이라면 Wave Form 형태로 출력하게 하면 되지만 본 연구에서는 데이터의 계산 및 저장을 위하여 Scaled Array 형태로 출력하게 하였다. Device는 어떤 DAQ(Data Acquisition) 보드를 사용할 것인지를 결정하는 것이고 channels는 DAQ 보드에서 신호원을 몇 번 채널에 몰려서 데이터를 획득할 것인지를 선택하는 것이다. 또 number of scans는 데이터를 취득할 스캔 수를 결정하는 것이며, scan rate는 데이터를 취득

하는 속도를 나타내는 것으로 scan rate가 1,000일 경우 1개의 채널이면 1초에 1,000개를 데이터를 획득하며, 2채널인 경우에는 2,000개의 데이터를 받을 수 있다. Index Array는 행렬형태로 취득된 데이터 중 행렬을 선택하여 출력하게 하고 Bundle은 그 그래프 형태로 나타내기 위해 데이터를 처리하는 역할을 한다. 이런 코딩만으로 프로그램은 충분히 오실로스코프의 역할을 할 수 있으며 데이터 저장 함수를 추가하면 저장까지 가능하게 된다.

3. 시스템 및 결합진단 프로그램

3.1. 하드웨어

본 연구의 전류신호감시를 이용한 결합진단 시스템 구성은 다음과 같다. 호스트 프로그램에 사용된 개발 툴은 NI사의 LabVIEW 6.1i를 이용하였고 데이터 취득을 위해 PCI-6013 보드를 내장한 PC시스템을 사용하였다. PCI-6013 보드는 16개의 아날로그 입력 채널을 가지고 있으며 데이터를 16bits로 처리한다. 장치에 사용된 유도전동기는 국내 S사의 밀폐형 3상 유도전동기를 사용하였다. 전류신호 측정을 위한 전류센서는 국내 H사의 개폐형 전류센서를 사용하였고, Table 1, 2에 각각의 규격을 나타내었다. 또한 유도전동기의 고장감시를 위한 실험장치와 그 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Motor specification under test

Power	Speed	Rated Voltage	Rated Current	Current Frequency	Phase	Poles
2 [HP]	1,710 [rpm]	220 [V]	3.7 [A]	60 [Hz]	3	4

Table 2. Bearing specification under test

Outer Dia.	Ball Num.(n)	Pitch Dia.(Pd)	Ball Dia.(Bd)	Inner Dia.	Contact Angle(β)	Mechanical Rotor Speed(fr)
52 [mm]	9	16.5 [mm]	5.5 [mm]	25 [mm]	0 [°]	28.48 [Hz]

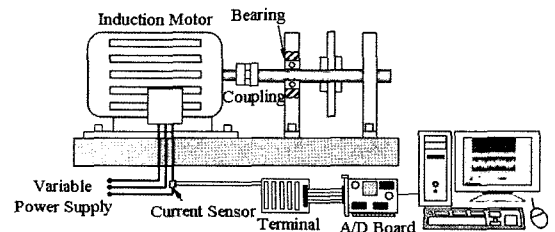


Fig. 2. The schematic of the experimental setup

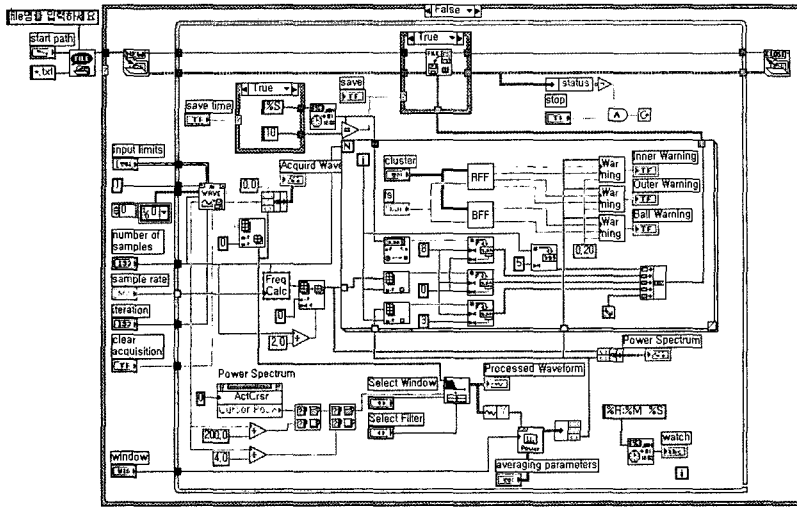


Fig. 3. The diagram of main program.

3.2. 모니터링 시스템

결함진단 시스템은 메인 프로그램과 서버 프로그램으로 이루어져 있다. 메인 프로그램은 크게 데이터 측정부, 데이터 처리부, 데이터 분석부로 나뉘어진다. 데이터 측정부에서는 장치의 설정과 데이터 샘플링 속도 등을 설정하며 데이터 처리부에서는 A/D 보드를 통해 변환된 디지털 신호를 필터링과 에버레징을 통해 가공하게 된다. 이렇게 처리된 데이터는 데이터 분석부에서 식 (1)~(4)에서 계산된 주파수 성분의 값과 문턱값 설정치를 비교하여 문턱값의 설정치 이상으로 값이 입력되면 PC 디스플레이 상의 진단시스템 패널의 Ball Warning, Inner Warning 또는 Outer Warning 램프가 작동되어 정보신호를 발생시킨다. 측정된 스펙트럼 데이터는 데이터 저장부에서 로그 기능에 의해 일정 간격으로 저장된다. 프로그램은 초당 4,800개의 데이터를 저장하므로 로그파일의 비대화를 초래할 수 있다. 따라서 저장 간격을 필요에 따라 조절할 수 있게 하였다. Fig. 3에 메인 프로그램의 다이어그램을 나타내었다.

메인 프로그램 안에는 일반 함수 외에 서버 프로그램들이 함수 형태로 삽입되어 있다. LabVIEW는 프로그램이 가지고 있는 함수 이외에 사용자 함수를 저장할 수 있게 되어 있다. BFF 함수는 식 (2)를 프로그램화 한 것으로 볼의 결함주파수를 계산해 주며, RFF 함수는 식 (3)과 식 (4)를 프로그램화 한 것으로 베어링 내·외륜의 결함주파수를 계산한다. 또한 주파수 계산 함수는 입력되는 신호의 주파수를 계산하고 경고함수는 레이스웨이 결함 주파수

계산 함수(RFF fuction)와 볼 결함 주파수 계산 함수(BFF fuction)와 설정된 값을 비교하여 설정값 이상의 값이 입력될 때 경보신호를 발생하게 된다.

4. 구성시스템 적용평가

4.1. 실험방법

본 연구에서 개발한 시스템의 타당성을 검토하기 위하여 다음과 같은 세 가지 종류의 실험을 실시하였다. 먼저 베어링의 볼 결함을 측정하기 위하여 베어링의 외륜에 지름 3mm의 구멍을 뚫고 그 구멍에 다이아몬드 팁을 삽입한 후에 베어링을 회전시켜 볼의 표면에 Fig. 4의 (a)와 같은 손상을 가하였다. 이것은 베어링 볼에 인위적인 결함을 주기 위한 것으로 반대방향 하중에 의한 볼 손상과 같은 효과를 가진다. 이 결함은 파로 응력으로 인한 플래킹이나 참 브리넬링과 같은 하중에 의한 결함과 같이 구름요소 베어링의 공극유동밀도 변화를 일으킨다. 두 번째 실험은 베어링의 레이스웨이 결함을 검출하기 위해 Fig. 4의 (b)에서와 같이 베어링 외륜에 초경드릴로 지름이 각각 지름 2, 3, 4mm의 구멍을 뚫어 인위적인 결함을 가하고 결함 크기에 따른 실험을 실시하였다. 한편, 볼 베어링의 안쪽 레이스웨이에 인위적 손상을 가하기 위해서는 베어링을 분리해야 하는데 볼 베어링은 일단 분리하면 다시 조립한다 하여도 마이크로 단위로 제작된 베어링의 규격에 일치시킬 수 없어 본래의 성능을 발휘할 수 없기 때문에 안쪽 레이스웨이에 대한 결

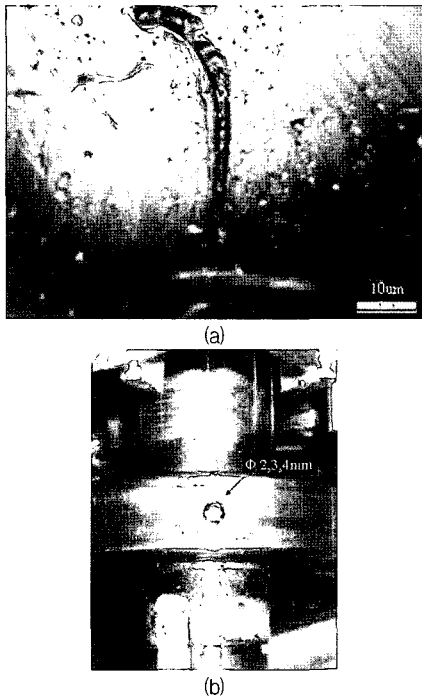


Fig. 4. The artificial damage of bearing ball and bearing.

함검출실험은 불가능 하였다. 세 번째 실험은 결함의 개수에 따른 결함검출실험으로 지름 2mm의 결함을 각각 2개(180°)와 4개(90°)씩 가공하여 실험을 실시하였다. 데이터 취득을 위한 scan rate는 4800 ea/sec로 설정하였다.

4.2. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 사용된 베어링의 규격값을 식 (1)과 (2)에 대입하여 계산하면 베어링의 볼 결함주파수 1배 성분인 $|f_s+1f_b|$ 과 $|f_s-1f_b|$ 은 약 135.95Hz와 15.95Hz로 계산된다. 베어링의 외측 레이스웨이 결함주파수 1배 성분인 $|f_s-1f_o|$ 와 $|f_s+1f_o|$ 의 값은 각각 25.44Hz와 145.44Hz로 계산되며, 2배 성분인 $|f_s-2f_o|$ 의 값은 110.88Hz로 계산된다.

Fig. 5는 정상상태의 베어링 전류 스펙트럼을 측정한 결과를 나타낸다. 정상상태의 유도전동기에 대한 실험 결과에서 전원주파수인 60Hz와 120Hz 외의 잡음 성분들이 나타나고 있다. 이러한 정상상태의 베어링 전류 스펙트럼 중 결함주파수에서 나타나는 잡음의 최대값을 본 시스템의 문턱값으로 설정하였고, 그 값은 볼 결함주파수에서 0.1, 외·측 레이스웨이 결함주파수에서 0.15이다. 이 값은 Fig. 3의 Warning 함수에서 limit 값으로 설정하였다.

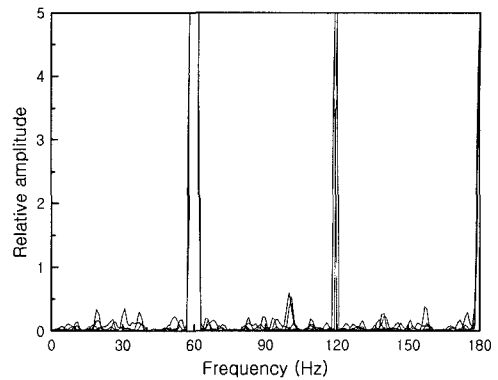


Fig. 5. The current spectral for a normal induction motor.

Fig. 6은 베어링의 볼 손상에 대한 실험의 결과로 베어링 볼 결함주파수인 $|f_s-1f_b|$ 와 $|f_s+1f_b|$ 가 15Hz와 136Hz에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 베어링의 볼에 결함을 가하기 위해 뿜은 외측 결함주파수인 $|f_s-1f_o|$ 와 $|f_s+1f_o|$ 역시 25Hz와 145Hz에서 나타나고 있다. 따라서 식 (1) 및 식(2)의 결과에 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 본 시스템의 타당성을 나타내고 있다.

Fig. 7은 지름 4mm 결함을 가한 실험에서의 결과를 나타낸 그래프로써 외측 레이스웨이 결함주파수인 $|f_s-1f_o|$ 와 $|f_s+1f_o|$ 에서 결함주파수 성분이 나타나고 있으며 2배 성분인 $|f_s-2f_o|$ 에서도 비록 1배 성분에 비해 미약하지만 결함주파수 성분이 나타나고 있다. Fig. 8은 지름 3mm의 결함을 가한 실험에서의 결과로 지름 4mm에서의 결과와 같이 바깥쪽 레이스웨이 결함주파수 성분이 발견되고 있다. 하지만 지름 2mm의 결함을 가한 실험 결과인 Fig. 9에서는 결함주파수 성분이 문턱값 이하로 나타나

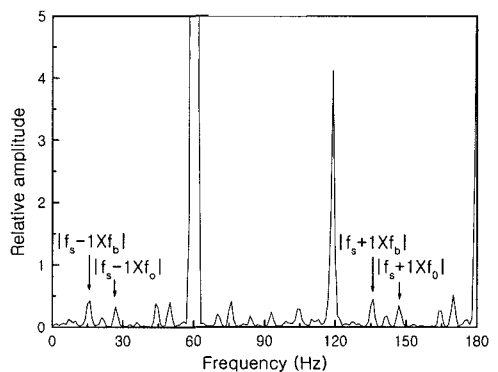


Fig. 6. The current spectrum for a motor with ball and outer raceway failure.

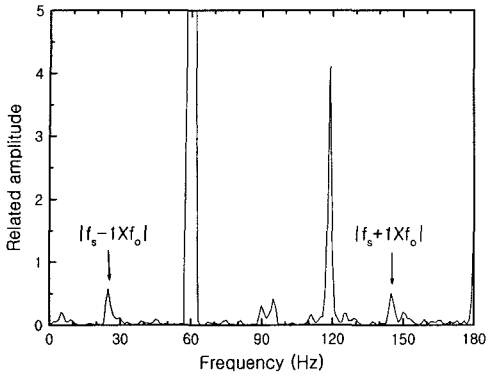


Fig. 7. The current spectrum for a motor with outer raceway failure(ϕ 4mm).

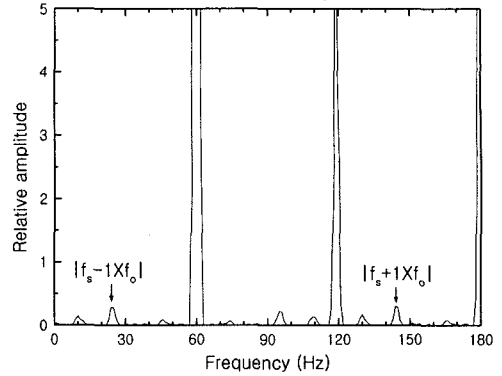


Fig. 10. Stator current spectrum for a motor with two failure in outer raceway(ϕ 3mm).

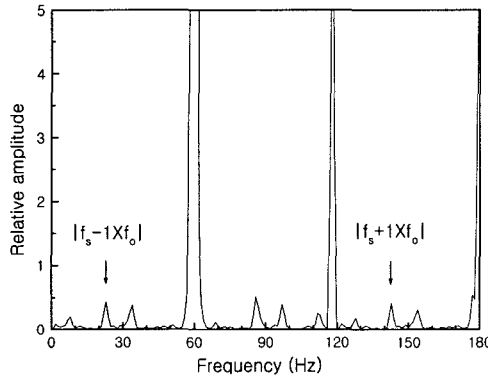


Fig. 8. The current spectrum for a motor with outer raceway failure(ϕ 3mm).

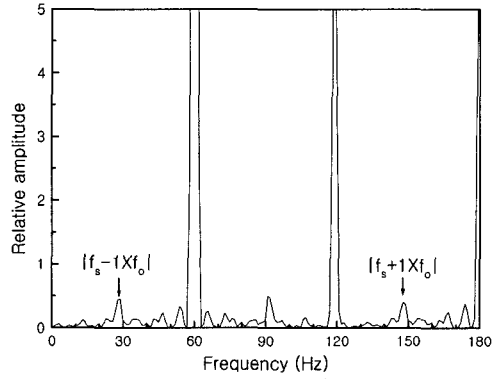


Fig. 11. Stator current spectrum for a motor with four failure in outer raceway(ϕ 3mm).

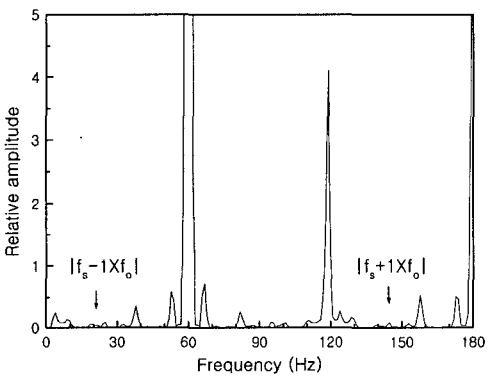


Fig. 9. The current spectrum for a motor with outer raceway failure(ϕ 2mm).

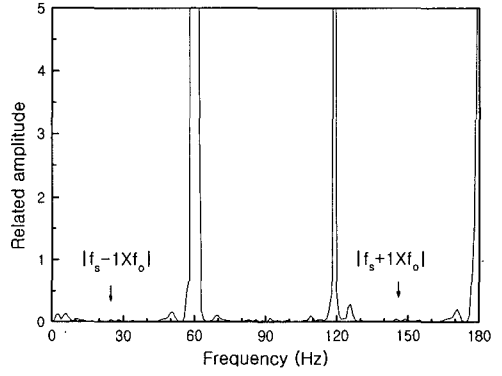


Fig. 12. Stator current spectrum for a motor with two failure in outer raceway(ϕ 2mm).

고 있다. Fig. 7~9의 결과를 볼 때 본 시스템에서는 외륜의 결함이 직경 3mm 이상이 되면 충분히 이상결함 진단이 가능함을 나타낸다.

Fig. 10과 Fig. 11은 베어링의 외륜에 지름 3mm의 구멍을 각각 2개와 4개를 결함을 가한 실험의

결과이며, Fig. 12와 Fig. 13은 지름 2mm의 구멍을 각각 2개, 4개를 가한 후의 실험의 결과이다. Fig. 10과 Fig. 11의 결과에서는 결함 주파수 성분이 $|f_s - 1f_o|$ 와 $|f_s + 1f_o|$ 에서 문턱값 이상으로 나타나고 있으며, Fig. 12와 Fig. 13의 결과에서는 문턱값 이하

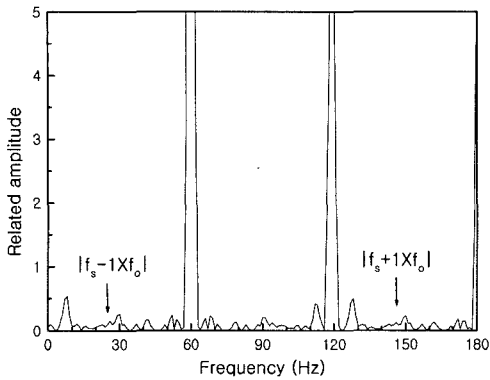


Fig. 13. Stator current spectrum for a motor with four failure in outer raceway(ϕ 2mm).

로 나타나고 있다. 이는 하나의 결함을 가했을 때와 같은 결과이며, 결함이 다수라 할지라도 결함의 크기가 작으면 현재의 시스템으로는 결함 검출을 하지 못함을 나타내고 있다. 또한 결함의 개수는 결함 주파수 성분과 무관함을 알 수 있다.

4.3. 웹을 통한 원격 제어 및 감시

Fig. 14에서 LabVIEW의 웹 출판 기능을 이용한 베어링 결함진단시스템의 원격 제어 및 감시에 대한 구성을 나타내었다. 실험 장치로부터 측정된 데이터는 기본적으로 Lonwork 시스템에서 사용자에게 의해 작업이 수행된다. 하지만 본 시스템에서는 Lonwork 시스템뿐만 아니라 인터넷을 통해 다수의 사용자가 시스템의 상황을 볼 수 있고 또한 어떠한 권한이 주어지면 시스템을 제어도 가능하도록 하였다. 이 기능을 실행하기 위하여 LabVIEW의 웹 출판 기능을 이용해 HTML파일을 생성하고 LabVIEW의 웹 서버를 실행하면 Fig. 15에서와 같이 웹을 이용

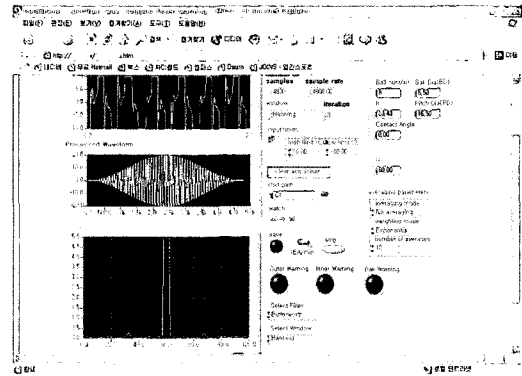


Fig. 15. The example of monitoring panel using Web.

하여 언제 어디서나 원격 제어 및 계측이 가능하게 되어 실시간으로 유도전동기의 베어링에 대한 결함을 모니터링 할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

산업현장에서 광범위하게 사용되고 있는 유도전동기는 비록 고장 발생 빈도는 낮지만 고장 발생시 인적 및 물적 피해의 정도가 다른 회전기들에 비해 상대적으로 높은 기기이다. 이러한 유도전동기의 고장원인 중 하나인 베어링 결함을 검출하기 위해 전류신호분석법과 LabVIEW 프로그래밍을 통해 실시간 결함진단시스템을 구축하고 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전류센서와 데이터 취득 보드를 이용해 전류 신호 계측장치를 구성하고 LabVIEW 프로그래밍을 통해 베어링의 결함을 실시간으로 감시·진단할 수 있는 베어링 결함진단시스템을 개발하였다.

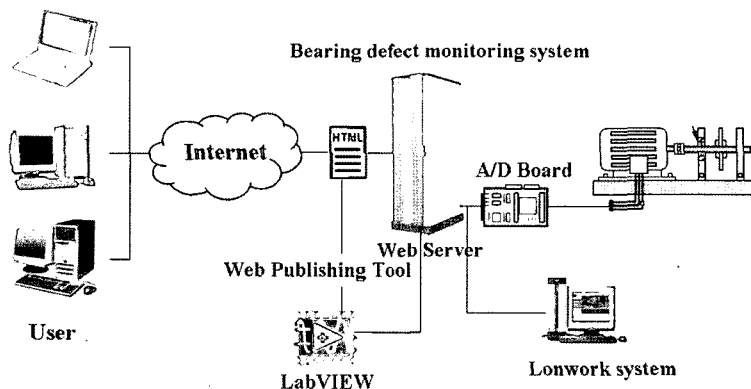


Fig. 14. The schematic of the remote monitoring using web publishing function.

2) 개발된 프로그램을 Web을 이용하여 원격리에
서 감시·진단 및 제어할 수 있음을 확인하였다.

3) 제작한 시스템의 타당성 및 유효성을 검토하
기 위해 정상상태의 베어링과 인위적인 결함을 삽
입한 비정상상태에서의 베어링에 대한 평가 실험
을 실시하여 볼 베어링 결함탐지 및 직경 3mm 이
상의 외륜상의 결함탐지가 가능하다는 것을 알 수
있었다.

참고문헌

- 1) P. Pillay and Z. Xu, "Motor Current Signature An-
alysis", Conference Record - IAS Annual Meeting(IEEE
Industry Applications Society), Vol. 1, pp. 587~
594, 1996.
- 2) R. Turley and M. Wright, "Developing Engine Test
Software in LabVIEW", IEEE Systems Readiness
Technology Conference, pp. 575~579, 1997.
- 3) C. Hargis, B. G. Gaydon and K. Kamish, "The De-
tection of Rotor Defects in Induction Motors", Proc
IEEE EMDA Conf., London, pp. 216~220, 1982.
- 4) R. R. Schoen and T. G. Habetler, "Motor Bearing
Damage Detection Using Stator Current Monitoring",
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31,
No. 6, pp. 1274~1279, 1995.
- 5) B. H. Jung and D. C. Shin, "A Study on Detection
of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using
Current Signature Analysis", The Korean Society for
Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 4,
pp. 287~293, 2002.