

스핀코터의 진동 평가를 통한 이상 검출 시스템 개발

Fault Detection System Development for a Spin Coater Through Vibration Assessment

문준희^{1,✉}, 이봉구²
Jun Hee Moon^{1,✉} and Bong Gu Lee²

¹ 대림대학 메카트로닉스과 (Department of Mechatronics, Dealim University College)

² 대림대학 기계과 (Department of Mechanical Engineering, Dealim University College)

✉ Corresponding author: jhmoon@daelim.ac.kr, Tel: 031-467-4687

Manuscript received: 2009.4.13 / Revised: 2009.7.16 / Accepted: 2009.8.14

Spin coaters are the essential instruments in micro-fabrication processes, which apply uniform thin films to flat substrates. In this research, a spin coater diagnosis system is developed to detect the abnormal operation of TFT-LCD process in real time. To facilitate the real-time data acquisition and analysis, the circular-buffered continuous data transfer and the short-time Fourier transform are applied to the fault diagnosis system. To determine whether the system condition is normal or not, a steady-state detection algorithm and a frequency spectrum comparison algorithm using confidence interval are newly devised. Since abnormal condition of a spin coater is rarely encountered, algorithm is tested on a CD-ROM drive and the developed program is verified by a function generator. Actual threshold values for the fault detection are tuned in a spin coater in process.

Key Words: Spin Coater (스핀 코터), Rotating Machinery (회전 기계), Fault Diagnosis (이상 진단), Short-time Fourier Transform (단시간 푸리에 변환), Circular-buffered Continuous Data Transfer (순환 버퍼 연속 데이터 전송)

1. 서론

TFT-LCD의 제조 공정에서 일정한 두께의 감광층을 패널 위에 형성하기 위해, 스핀 코터 (spin coater)를 통해 액체 상태의 감광제를 패널 위에 고르게 코팅하게 된다. 스핀 코터는 원심력을 이용하여 반도체 웨이퍼의 표면을 코팅하는 장비로서 다양한 크기의 장비가 개발되어 여러 반도체 공정에서 사용되고 있다. 코팅되는 박막의 두께는 스핀 코터의 회전속도와 용제의 농도에 의해 결정되며 10 nm 수준의 두께의 박막을 형성하는 것이 가능하다. 본 연구에서 이상진단 시스템을 구축한 대상은 TFT-LCD 컬러 필터 제조시의 박막 필름 코팅에 이용되는 장비이다. 스핀 코터에서 발생되

는 진동은 회전기계에서 발생하는 진동과 같이 불평형 질량이나 회전 기구부의 파손 등에 의해 발생된다. 스핀 코터에서 이러한 진동은 패널 위의 코팅 막이 균일하지 않게 한다.¹

본 연구에서는 스핀 코터의 진동패턴의 변화를 통해 스핀 코터의 이상을 미리 감지하여 스핀 코터의 성능저하로 인한 수율 저하를 미리 막는 것을 목적으로 하였다.

본 연구의 대상이 되는 시스템은 실제 TFT-LCD 공정에 사용되고 있는 장비이기에 라인을 멈추고 임의의 입력을 주고 출력을 얻는 과정을 수행할 수 없었다. 따라서, 스핀 코터에서 발생하는 진동을 가속도 센서로 측정할 수 있는 이상을 진단할 수 있는 시스템을 설계하는 것을 시도하였다.

회전기계의 이상진단에는 주파수 영역 분석이 많이 사용되고 있기 때문에,^{2,5} 본 연구에서도 단시간 푸리에 변환을 이용한 방법을 선택하였다. 또한, 이상을 검출하는 알고리즘에 있어서, 정상적인 상태의 진동패턴을 측정하고 분석하여 그것을 기준값으로 설정한 후 여러 가지 평가척도를 고안하여 이상의 징후를 찾도록 하였다.

2. 스핀 코터를 위한 이상진단 방법

2.1 회전기계의 이상의 종류

회전 기계 이상의 원인과 그에 따라 나타나는 주파수 스펙트럼에서의 증상은 다음과 같다.⁵

(1) 불평형 질량은 회전 주파수와 같은 주파수에서 큰 진동을 일으키며 진폭의 크기는 시스템의 강성에 종속된다. 주파수 스펙트럼에 나타나는 효과는 회전 주파수와 같은 주파수에서의 진폭 상승으로 알려져 있다.

(2) 축이 정렬불량인 경우에는, 회전주파수의 두 배의 주파수의 진동이 커지게 된다. 축의 정렬 불량은 축방향으로의 이동을 야기시키기도 한다.

(3) 베어링 캡이나 지지대에서의 헐거움은 회전진동수의 절반의 배수의 진동수를 가진 많은 스펙트럼을 발생시킨다. 전체 기계의 지지부가 헐거운 경우는 회전진동수에서만 진동이 크게 발생한다.

(4) 회전기계에 기어가 포함되어 있다면 회전진동수의 배수의 진동수를 갖는 많은 진동 스펙트럼이 발생하며, 기어의 이의 개수가 배수의 최값이 된다. 이러한 진동은 기어의 마모나 정렬불량, 백래시 등에 기인한다.

(5) 베어링의 결함은 베어링의 구조와 작동 속도에 종속되는 스펙트럼들을 만들게 된다. 이는 내륜과 외륜에서 구슬이 지나는 진동수와 관련이 되어 있다. 예를 들어 외륜에 단일한 결함이 있는 경우, 베어링 안에 있는 구슬이 결함을 지날 때마다 진동 충격이 발생한다.

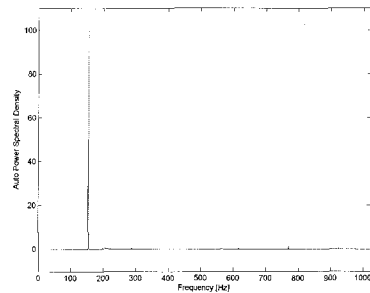
상기의 이상 진동 패턴을 직접적으로 적용할 수 있는 시스템은 단축 시스템이며, 스핀코터와 같은 다축 시스템의 이상 진단은 시스템의 복잡성으로 인해 지식 기초 방법이나 인공 지능에 의한 진단이 널리 적용되고 있다.^{3,6}

2.2 이상진단의 방법의 선택

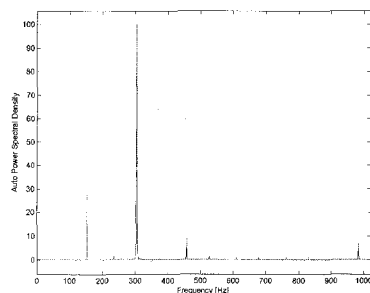
이상이란 전체 시스템의 성능을 악화시키는,

원하지 않은 변화를 의미하며, 이상 진단이란 이상의 검출 및 원인 파악, 이상의 정도를 평가하는 것이다.³ 이상 진단에는 모델 기초 방법(model-based method)과 지식 기초 방법(knowledge-based method)이 널리 연구되고 있다. 이러한 방법들은 시스템에 입력되는 신호와 출력되는 신호를 가지고, 모델의 매개변수를 식별하거나 여러 가지 규칙을 학습시키는 형태로 수행된다. 본 연구의 스핀 코터에서는 출력 신호만이 사용 가능하므로 출력 신호만을 사용하는 진단 방법을 개발하였다.

본 연구에서 단축 시스템인 CD 롬 드라이브에 대해 불평형 질량을 적용해 보니 Fig. 1 과 같은 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 불평형 질량만을 더했음에도 불구하고, 정렬 불량과 같은 주파수 특성이 나타난다. 이를 통하여, 회전기계의 이상의 대략적인 특성은 전술한 바와 같이 알려져 있지만, 실제 시스템에서는 다른 증상이 나타날 수 있음을 발견하게 되었다.



(a) Auto power spectral density for balanced mass



(b) Auto power spectral density for unbalanced mass

Fig. 1 Frequency analysis comparison between balanced and unbalanced masses in a CD-ROM drive

기존의 연구의 결과와 본 연구의 실험을 종합해 볼 때, 회전 시스템이 복잡해 질수록 전형적인

이상의 패턴을 규정하는 것이 곤란해지지만, 이상이 발생하였을 때에 주파수 스펙트럼의 패턴에 반드시 변화가 생긴다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 이용하여 주파수 스펙트럼의 변화를 판별하는 알고리즘을 개발하였다.

본 연구의 시스템은 TFT-LCD 공정에 사용되고 있는 장비로서 사용 기업에서 장비에 대한 제한적인 정보만을 허용하였기에 장비로의 입력 신호는 대상물을 올려놓을(loading) 때 스피코터의 모터가 켜지는 신호와 대상물을 내려놓을 때 모터의 전원이 꺼지는 신호만을 확보할 수 있었다. 따라서, 출력신호만을 가지고 이상진단을 수행하도록 시도하였으며 모터의 전원신호는 이상진단 프로그램의 한 주기가 시작되고 끝나는 신호로 사용하였다. 이상이 있는 회전기계의 스펙트럼은 정상적인 기계의 스펙트럼과 차이가 있다는 점을 이용하여, 대상이 되는 기계의 스펙트럼을 이미 저장된 정상적인 상태의 스펙트럼과 비교함으로써 이상의 여부를 판별하도록 하였다. 이와 같은 방법을 전술한 모델 기초 방법이나 지식 기초 방법과 비교할 때, 이상의 원인까지 분석하는 능력은 부족하지만 모델링이나 규칙의 학습 없이 짧은 시간 안에 이상진단을 위한 준비를 마칠 수 있다는 큰 장점이 있다.

2.3 단시간 푸리에 변환을 이용한 이상 진단

신호의 주파수 해석에 대표적으로 사용되는 방법은 푸리에 변환이다. 푸리에 변환은 삼각함수를 기저로 하는 적분 변환으로서 시간 영역 정보를 주파수 영역 정보로 바꾸는 방법이다. 시간 영역의 신호를 푸리에 변환했을 때 적은 정보로 다량의 신호의 특징을 전달하는 탁월한 능력을 가지고 있다. 하지만 시간 정보를 전혀 포함하지 않기 때문에 장시간에 걸친 신호를 실시간으로 처리하여 이상진단을 할 경우에 이상에 대한 대처를 신속하게 하기 어렵다.

이러한 단점을 보완하여 주파수 분석을 수행하면서도 시간 정보를 얻을 수 있도록 하는 방법이 웨이블릿 변환과 단시간 푸리에 변환이다. 웨이블릿 변환은 푸리에 변환과는 다르게 변환되는 영역의 기저가 되는 함수들이 국부적으로 위치하고 있어서 변환을 거친 후에도 관심의 대상이 되는 형태의 신호가 어느 시점에서 발생하였는지 추적할 수 있는 장점이 있다. 하지만 이상이 발생한 시점에서 바로 대응할 수 있는가는 관점에서 볼 때는

웨이블릿 변환도 푸리에 변환과 같이 전체 데이터를 얻은 후에 가능하게 된다.

따라서, 이상이 발견되는 즉시 이상이 탐지되었음을 알리기 위해서는 측정구간을 세분하여 푸리에 변환을 수행하고 그 결과들을 가지고 전체에 대한 주파수 특성을 재구성하는 단시간 푸리에 변환이 대안이 될 수 있다. 단시간 푸리에 변환은 웨이블릿 변환에 비해 결함의 특성에 맞는 신호를 검출하기 어려운 점이 있으나,⁷ 변환 결과가 짧은 시간마다 검출된다. 이는 이상 발생시 라인을 빨리 멈출수록 손실 비용을 크게 절감할 수 있는 TFT-LCD 제조 공정에서 훨씬 더 유용하다.

단시간 푸리에 변환은 다음과 같이 표현된다.

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \gamma(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

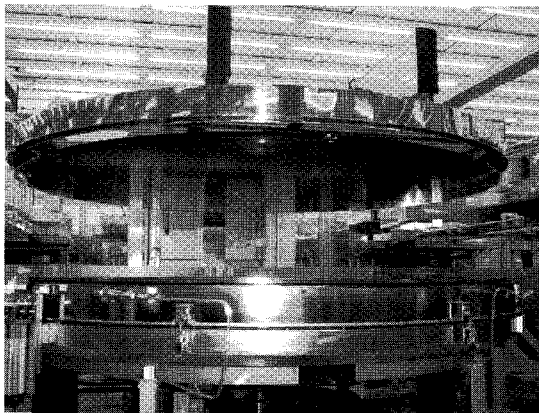
여기서 ω 과 τ 는 각각 주파수와 시간이며, $f(\tau)$ 는 시간영역의 신호이고, $\gamma(\tau - t)$ 는 창함수로서 시간 t 근방의 신호만을 변환하기 위해 사용되는 것이다. 단시간 푸리에 변환함수인 $F(t, \omega)$ 는 결국 $f(\tau) \gamma(\tau - t)$ 의 푸리에 변환으로서 시간 t 근방에서의 주파수 정보를 가지게 된다. 실시간으로 단시간 푸리에 변환을 수행하는 경우, 창함수를 적용한 결과는 가장 최근에 획득된 데이터 묶음에 Hanning 이나 Kaiser 등의 누설(leakage)를 방지하는 함수를 적용한 것이 된다.

3. 스피 코터의 이상 진단을 위한 시스템 구성

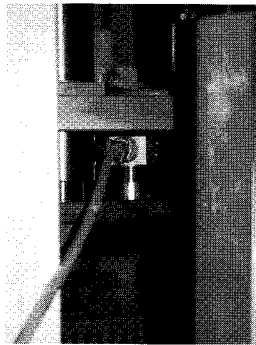
3.1 하드웨어의 구성

스핀 코터와 부착된 센서의 사진은 Fig. 2 와 같으며, 이상 진단을 위해 구성한 하드웨어의 개념도는 Fig. 3 에 도시하였다.

여기서 사용된 가속도계는 미국 Dytran 사의 3063A 로서 100mV/g 의 센서 이득을 가지고 있으며 공진주파수는 25 kHz 이고, 자석에 의해 스피 코터의 회전부를 지지하는 베어링 하우징에 부착하였다. 또한 데이터 획득을 위한 A/D 보드는 대만의 Adlink 사의 PCI-9118 HG 로서, 8 채널의 아날로그 비교 입력(differential input)을 12 bit 의 분해능과 330 kHz 의 속도로 처리할 수 있으며, 입력 신호를 1 배, 10 배, 100 배, 1000 배로 증폭하는 것을 소프트웨어적으로 지원한다.



(a) Front of the tested spin coater



(b) Accelerometer attached to the spin coater

Fig. 2 Experimental setup

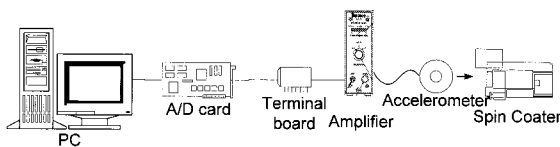


Fig. 3 Conceptual configuration of spin coater fault detection system

3.2 소프트웨어의 구성

소프트웨어의 개발 플랫폼은 다음과 같은 요구 조건을 만족하도록 하였다:

(1) 스핀 코터의 이상 진단 프로그램 개발에 적합한 알고리즘을 찾기 위해 다양한 알고리즘을 자유롭게 적용할 수 있을 것

(2) 이후에 이상진단 시스템이 완료된 후 비전문가도 시스템 운영이 가능하도록 사용자 친화적인 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)가 가능할 것.

이러한 의도에 따라 마이크로소프트사의 Visual C++와 MFC 를 사용하였다. 실제로 개발 과정에서

시계열 분석을 비롯한 다양한 알고리즘을 시도하였으며, 이러한 다양한 알고리즘을 적용하여 실시간 데이터 획득 및 분석하는데 매우 효과적이었다.

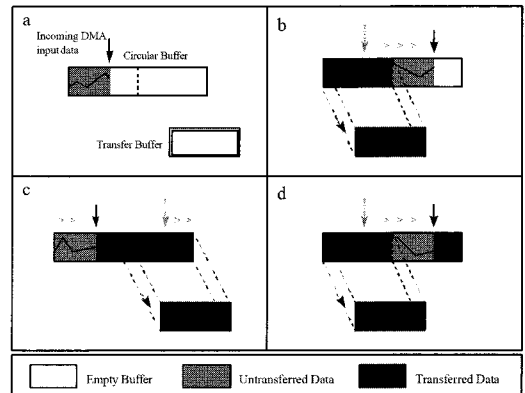


Fig. 4 Circular-buffered continuous data transfer⁸

또한, A/D 보드의 DMA (Direct Memory Access)를 이용한 데이터 전송 메커니즘을 사용하였다. 스핀 코터 이상진단 시스템은 실시간으로 이상을 진단하여 즉각적인 대응이 가능하도록 하는데 목표를 두었으므로, 데이터를 획득과 이상진단 알고리즘이 동시에 수행되도록 하였다. 이를 위해서는 데이터 획득과 분석의 역할 분담이 프로그램 내에서 효과적으로 이루어져야 했으며, 이를 위하여 두 개의 버퍼를 이용한 순환 버퍼 연속 데이터 전송 (circular-buffered continuous data transfer)을 수행하도록 하였다(Fig. 4 참조). 한 개의 버퍼를 통해 데이터를 전송하는 일반적인 DMA 방법에서는 A/D 보드가 PC 로 데이터를 전송하는 짧은 시간 동안에는 신호를 입력할 수 없게 되는데 반해, 두 개의 버퍼를 이용하는 순환 버퍼 연속 데이터 전송 방법은 A/D 보드가 한 개의 버퍼를 PC 로 전송하는 동안에도 다른 버퍼가 입력 신호를 계속 받을 수 있도록 하여서 잃어버리는 신호없이 실시간으로 신호 입력이 가능하도록 한다. 또한 이러한 데이터 전송 방법은 DMA 를 이용하므로 PC 도 많은 용량의 데이터를 주기적으로 처리할 수 있게 되어 단시간 푸리에 변환에 적합하다.

개발된 소프트웨어는 3.1 절에서 서술된 하드웨어의 사양의 한계 안에서 다음과 같은 사양을 갖도록 설계되었다. 입력 전압 범위는 $\pm 0.005 \sim \pm 5V$, 측정주파수(sampling frequency)는 256~32000Hz, DMA 를 이용한 데이터 전송주기는 0.25~4 초 중에

서 선택할 수 있도록 하였다.

4. 스핀 코터를 위한 이상진단 알고리즘

4.1 스핀 코터 진동의 특성

스핀 코터는 원심력을 이용하여 반도체 웨이퍼의 표면을 코팅하는 장비로서 TFT-LCD의 제조공정에서 일정한 두께의 액체 상태의 감광층을 패널 위에 고르게 코팅하게 된다. 따라서, 패널을 기계에 올려 놓게 되면 감광층의 코팅을 위해 서서히 회전수를 높이고 안정상태(steady state)의 회전기간을 지난 후 다시 서서히 회전수를 줄여 정지시킨 후 패널을 내려 놓는 것으로 한 주기의 동작을 마치게 된다. 스핀 코터에서 측정된 신호는 최대 값이 1g(중력가속도) 전후이었으며, 이에 따라서 최대 이득을 조정하였다. 다음의 Fig. 5는 스핀 코터의 진동을 단시간 푸리에 변환을 통해 얻은 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다.

이와 같이 시간에 따라 진동 스펙트럼이 달라지는 것을 관찰한 결과, 스핀 코터 가동 신호 ON부터 가동 신호 OFF까지 한 주기의 가동(총 27 초

가량)에서 다음과 같은 특성으로 구간을 나눌 수 있음을 발견하였다.

- 0~5 초: 초기 구간 (거의 변화 없음)
- 5~8 초: 가속 구간
- 8~16 초: 안정상태 구간
- 16~27 초: 감속 구간

이 중에서 이상 진단을 위해 의미있게 사용될 수 있는 구간은 회전속도가 일정한 안정상태 구간이다. 다른 구간은 기계의 움직임이 적거나 변화중이어서 진동의 패턴이 일정하지 않으므로 이상 진단을 위한 사용에 적합하지 않다. 이 논문의 이후 내용에서는, 매 1 초마다 전송된 측정 데이터를 1 프레임(frame), 스핀 코터의 동작의 한 주기를 1 사이클(cycle)이라고 칭하였다.

4.2 안정상태 검출을 위한 알고리즘

단시간 푸리에 변환을 위한 알고리즘은 Cooley와 Tukey에 의해 개발된 FFT 알고리즘⁹에 시간창과 Hanning 창을 적용하여 개발하였다.

스핀 코터가 가동된 후 안정상태에 도달하였을 때 푸리에 변환을 통해 주파수를 분석하면 뚜렷하게 몇 개의 주파수에서의 피크가 발생함을 발견할 수 있다(Fig. 5 (d), (e) 참조). 이러한 경우에 크기가 작은 많은 신호를 정상과 이상의 비교 데이터로 사용하는 것은 바람직하지 않다. 크기가 작은 신호는 대부분 계통 오차에 의해 발생하는 것이 아닌 랜덤 오차에 의해 발생하기 때문에 비교 신호의 크기보다 표준편차의 크기가 커져서 효과적인 비교가 이루어지지 않는다. 따라서 어느 크기 이상의 신호만을 안정상태 판정을 위한 신호로 사용하도록 하였으며 이것을 비교대상신호 SS(significant signal)이라고 명명하였다. 이 비교대상신호를 구별하기 위한 신호의 크기는 전체 입력신호의 범위의 백분율로 표시하였으며 이것을 비교대상신호율 SSR(significant signal ratio)이라고 이름하였다. 따라서, 다음의 관계가 성립하는 주파수의 신호가 비교대상신호가 되는 것이다.

$$SS > SSR \times \text{Input Signal Range} \quad (2)$$

이렇게 구한 비교대상신호의 개수는 N에 저장한다. 스핀 코터가 안정상태에 도달하였는지를 판별하기 위해 비교대상신호의 이전 프레임의 값과

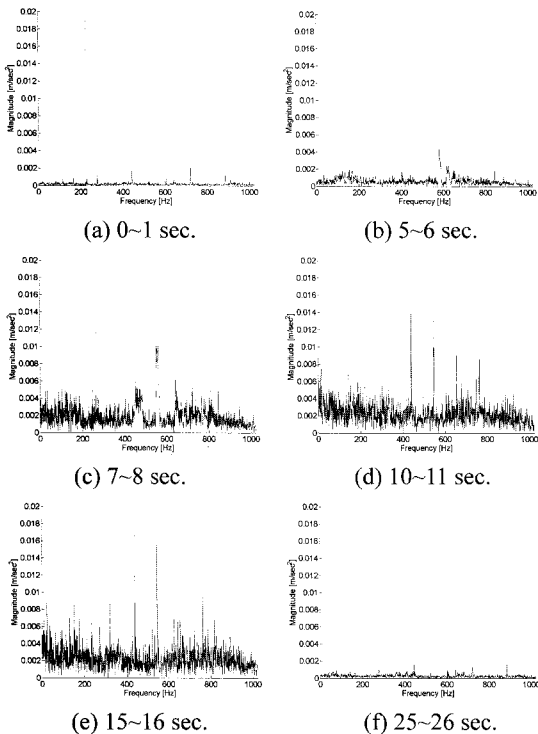


Fig. 5 Frequency spectrums of vibration in the spin coater during a cycle

의 차이의 평균인 평균절대오차 MAE(mean average error)를 구한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i^N \left| \frac{SS_i - SS_{i,b}}{SS_{i,b}} \right| \quad (3)$$

여기서, 아래 첨자 i 는 i 번째 신호임을 의미하고, 아래 첨자 b 는 이전 프레임의 신호임을 의미한다. 이 값이 평균절대오차 문턱값 MAET(MAE threshold) 이하가 되면 안정상태에 도달하였다고 판정하였으며, 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$MAE < MAET \quad (4)$$

4.3 이상 검출을 위한 알고리즘

현재의 프레임이 안정상태라고 판별되면 이전에 저장한 정상인 상태에서의 푸리에 변환값의 크기의 평균과 표준편차를 가지고, 비교대상신호가 신뢰구간 안에 있는지를 검사한다. 신뢰구간을 99%로 하였을 경우를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$|SS - \mu| \leq 3\sigma \quad (5)$$

여기서 μ 는 이전에 저장한, 정상인 상태의 비교대상신호의 평균이고, σ 는 비교대상신호의 표준편차이다. 이는 기존에 측정된 다수의 데이터를 통하여 얻은 신뢰구간을 가지고 측정 중인 프레임이 정상인 범위 안에 있는지 아닌지를 분별하는

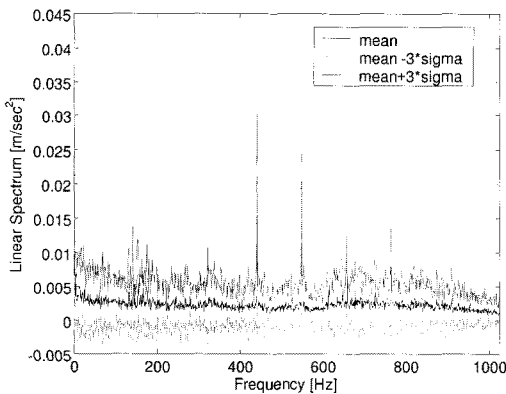


Fig. 6 Confidence interval for normality test

알고리즘이다. 다음의 Fig. 6 은 기존에 검사된 안정한 상태의 단시간 푸리에 변환 값을 이용하여 실시간으로 평가한 선형 스펙트럼의 평균값과 신뢰구간을 그래프로 나타낸 것으로서 3 선 중 윗선과 아랫 선 사이의 간격이 신뢰도 99%의 구간이 되며, 측정 중인 프레임의 단시간 푸리에 변환 결과가 이 구간 안에 들어오면 정상으로 판별된다.

이와 같은 조건을 만족시키는 비교대상신호의 개수를 nSimSignal 이라는 변수에 저장한다. 비교대상신호 중 정상인 신호의 개수 N 과 유사한 신호의 개수 nSimSignal 의 비율인 유사율 SR(similarity ratio)가 유사율 문턱값 SRT (similarity ratio threshold) 보다 크면 현재 프레임을 유사(similar)라고 판별한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$SR = nSimSignal / N > SRT \quad (6)$$

이러한 조건을 만족시키는 프레임의 개수를 nSimilarFrame 이라는 변수에 저장하였을 때, 전체 안정상태의 프레임의 수 nSteadyFrame 에 대한 비율인 정상율 NR(normal ratio)이 미리 설정한 정상율 문턱값 NRT(normal ratio threshold)을 넘어서면 정상(normal)이라고 판별하고 그렇지 않으면 이상으로 판별한다. 이를 논리식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{If } NR = nSimilarFrame / nSteadyFrame > NRT \quad (7) \\ \text{then Normal, otherwise Abnormal}$$

여기까지 기술된 알고리즘은 스핀코터에 부착된 가속도계를 통해 획득된 진동신호에 대해 단시간 푸리에 변환을 수행한 후 실행되는 알고리즘으로서 내용을 요약하면 다음과 같다: 매 프레임이 안정상태인지 먼저 판별하고, 안정상태라면 그것이 이전에 저장된 정상인 상태의 주파수 스펙트럼과 비교한 후, 정상 범위를 벗어나면 이상임을 알린다.

개발된 진단 시스템은 위와 같은 핵심 알고리즘 이외에 다음과 같은 기능을 포함하고 있다: 이상 진단 중 진단하고 있는 신호의 해석 결과를 저장할 수 있는 기능을 추가하였고, 정상인 상태와의 비교 데이터는, 1 일전/1 주전/임의의 시점의 데이터를 사용하는 것을 선택할 수 있도록 하였다. 안정상태의 푸리에 변환값과 그의 제곱은 합산되

게 하여 스피너의 동작의 한 사이클이 끝난 후에는 평균과 표준편차가 계산되게 하였으며, 이후의 측정값과의 비교에 사용될 수 있도록 하였다. 또한, 이상인지 아닌지의 결과를 PC의 모니터를 통해서뿐 아니라 다른 하드웨어에서도 인식할 수 있도록 디지털 출력이 PCI-9118의 터미널 블록을 통해 출력되도록 하였다.

5. 개발된 소프트웨어의 적용 및 측정 결과

전술한 바와 같이 스피너 코터의 이상은 실제 상황에서 경험하기 어려우며, 장비가 고가인 이유의 의도적으로 이상인 상황을 만들기도 어렵다. 따라서, 본 연구에서 개발된 알고리즘의 점검을 위해 함수발생기(function generator)를 이용하여 이상진단 여부를 실험하였고, 다음의 Fig. 7은 함수발생기를 사용하여 모의로 스피너코터의 이상을 점검한 결과의 화면이다.

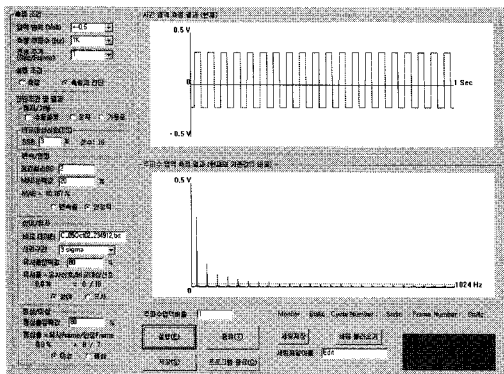


Fig. 7 Fault diagnosis under test with a function generator

본 연구의 대상인 스피너 코터의 가동시간이 27초 가량이었고 진동의 최대 크기가 1g 정도였으며 주파수의 특성의 변화가 1 kHz 이하에서 가장 명확하였기 때문에 본 시스템에 대해서는 입력전압 범위를 ± 0.5V, 측정주파수는 2024Hz, 데이터 전송 주기는 1 초로 하였다. 측정주파수를 분석하는 주파수 대역의 2 배가 되게 하여서 나이키스트-샘플링 정리를 만족하도록 하였다. 또한, 비교대상 신호와 이전에 저장된 정상인 상태의 신호와의 비교를 위해서 사용되는 신뢰구간은 99%로 하여서 3σ의 편차가 있는 구간을 사용하였다.

실제로 시스템에 적용을 해 보니 정상인 상태를 점검할 수 있는 조건들은 Table 1과 같았다.

Table 1 Threshold values for normality test

| | |
|----------------------------------|------|
| SSR (significant signal ratio) | 1.5% |
| N (Number of SS) | 2 |
| MAET (MAE threshold) | 160% |
| SRT (similarity ratio threshold) | 50% |
| NRT (normal ratio threshold) | 80% |

이렇게 하여 스피너코터 이상진단 시스템의 개발이 완료되었으며 현재 현장에 적용되어 사용중에 있다. 현장에서 적용되고 있는 스피너코터 이상진단 시스템의 작동화면을 Fig. 8에 도시하였다. 입력범위에 입력신호의 최대값을 입력하게 되므로 Fig. 8에 표시되는 것과 같이 측정 신호가 작게 표시되지만, 실제 프로그램 내부에서는 12 비트의 높은 분해능으로 연산된다.

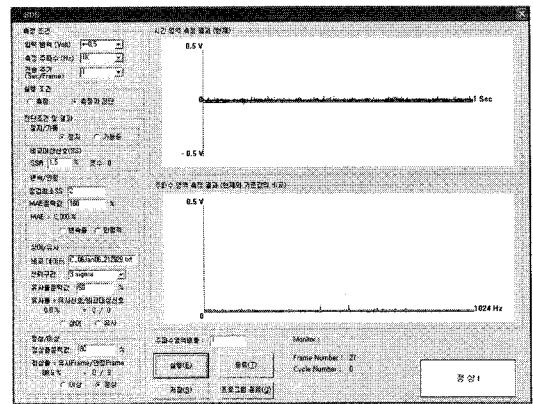


Fig. 8 Spin coater fault diagnosis system in real-time processing

6. 결론

본 과제를 통해 개발된 스피너코터 이상진단 시스템은 이상의 조짐을 감지하여 이상이 발생되기 전 사전에 조치를 취하는 것을 목적으로 개발되었다.

회전 기계의 이상은 그 종류가 다양하고 기계의 구조에 따라 나타나는 진동의 패턴이 다르므로 전형적인 이상을 학습시키는 알고리즘을 적용하기가 어렵다. 따라서 단시간 푸리에 변환을 이용하여 정상인 상태의 시스템의 진동 패턴을 분석하고 저장하여 이를 기준으로 삼아, 이후에 기계의 작동시의 진동 패턴과 비교를 하여, 차이가 허용치

를 넘어설 경우를 이상으로 진단하도록 하였다.

개발된 이상 검출 시스템은 불평형 질량을 이용한 실험장치와 실제 스핀코터에서의 실험을 통해 검증하였다. 실험장치에서는 정상적인 상태의 진동패턴을 식별하고 그것을 저장하고 이용하여 이상인 상태에 적용하였을 때 이상이 효과적으로 식별됨을 발견할 수 있었다. 또한, 스핀 코터에서는 정상적으로 동작할 때의 진동패턴을 정확하고 안정적으로 검출하고 있음을 입증하였다. 개발된 이상검출 시스템은 회전체를 가진 다른 기계에도 적용이 가능하기 때문에 향후에 다양한 용도로 발전시켜 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Chae, H. C., Ryu, I. C. and Han, C. S., "3-Dimensional Modeling and Sensitivity Analysis for Vibration Reduction of the Spin-Coater System," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 209-217, 2003.
2. Ganta, G. and Tonoli, A., "A harmonic finite element for the analysis of flexural, torsional and axial rotor-dynamic behavior of discs," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 207, No. 5, pp. 693-720, 1997.
3. Patton, R. J., Frank, P. M. and Clark, R. N., "Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems," Springer-Verlag, 2000.
4. Yang, B. S., Hwang, W. W., Kim, D. J. and Tan, A., "Condition Classification of Small Reciprocating Compressor for Refrigerators using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 19, No. 2, pp. 371-390, 2005.
5. Betta, G., Liguori, C., Paolillo, A. and Pietrosanto, A., "A DSP-Based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 6, pp. 1316-1322, 2002.
6. Samanta, B. and Al-Balushi, K. R., "Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element Bearings Using Time-Domain Features," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 2, pp. 317-328, 2003.
7. Daubechies, I., "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 36, No. 5, pp. 961-1005, 1990.
8. User's Guide, "PCIS-DASK Data Acquisition Software Development Kit for NuDAQ PCI-bus Cards," Adlink Technology Inc., 2000.
9. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., "Numerical Recipes, 3rd Edition," Cambridge University Press, 2007.