

가속도 신호의 주파수 분석에 기반한 종이용기 성형기 구동축 고장진단 요소기술 개발

장재호*, 하창근*, 주백석*[#], 박준영**

*금오공과대학교 기계시스템공학과, **금오공과대학교 기계설계공학과

Development of Fault Diagnosis Technology Based on Spectrum Analysis of Acceleration Signal for Paper Cup Forming Machine

Jaeho Jang*, Changkeun Ha*, Baeksuk Chu*[#], Junyoung Park**

*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.,

**Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

(Received 26 October 2016; received in revised form 4 November 2016 ; accepted 10 November 2016)

ABSTRACT

As demand for paper cups markedly increases, this has brought about a requirement to develop fast paper cup forming machines. However, the fast manufacturing speed of these machines causes faults to occur more frequently in the final product. To reduce the possibility of producing faulty products, it is necessary to develop technologies to monitor the manufacturing process and diagnose the machine status. In this research, we selected the main driving axis of the forming machine for fault diagnosis. We searched the states of rotational elements related to the driving axis and suggested a fault diagnostic system based on spectrum analysis consisting of a real-time data acquisition device, accelerometers, and a diagnosis algorithm. To evaluate the developed fault diagnostic system, we performed experiments using a test station which resembles the actual paper cup forming machine. As a result, we were able to confirm that the proposed system was sufficiently feasible to diagnose any abnormalities in the operation of the paper cup forming machine.

Key Words : Spectrum Analysis(주파수 분석), Fault Diagnostic Technology(고장진단기술), Paper Cup Forming Machine(종이컵 성형기), Accelerometer(가속도계), Eccentricity(편심)

1. 서 론

오늘날 종이용기의 수요는 큰 폭으로 증가하고 있으며 수요증가에 따라 성형기계의 수량을 늘리는 방법으로 대처하기에는 설치공간, 운영인력, 품

질의 균일화 등과 관련하여 많은 문제가 발생한 다. 이런 이유로 종이용기 고속 성형기 개발의 필요성이 커지고 있지만 국내 기업들은 고속화와 자동화에 필요한 설계 기술을 확보하지 못하고 있다. 현재 미국, 유럽 등의 선진 성형기는 국내기업이 생산하는 성형기보다 생산수율이 2배에 달하는 실정이다. 이에 맞춰 국내에서도 생산수율 향상을 위해 현재 국내 기업 성형기의 생산속도인 150개/min에서 선진 성형기 수준인 300개/min 수준으로 속도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

Corresponding Author : bschu@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7398

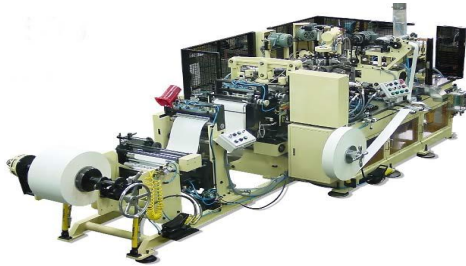


Fig. 1 Paper cup forming machine (Hi-1000)

종이용기 성형기의 생산성 향상을 위해서는 고장 없이 연속적인 생산이 가능해야 한다. 때문에 성형기의 속도 향상과 안정성 향상에 많은 노력을 기울이고 있다. 그 중 안정성의 측면에서 종이용기 성형기의 공정속도가 증가함에 따라서 필수적으로 불량과 고장의 발생 가능성이 증가하게 된다. 고속화에 의한 고장으로 인해 생산손실 또한 증가하게 되는데 이를 감소시키는 것은 생산수율의 상승과 직결된다. 그래서 고장을 최소화하기 위해 고장 발생을 진단하고 현재의 공정 상태를 모니터링하여 고장을 예지해 주는 기술의 개발이 필수적이다.^[1]

본 논문은 종이용기 성형기의 주요 고장 진단 대상 중에서 성형기의 구동축에 관련된 고장을 진단, 예지하기 위한 요소기술 개발에 대하여 다루고 있다. 논문에 제시된 고장진단 요소기술은 성형기와 유사하게 구성된 테스트 스테이션을 이용하여 고장이 발생하였을 때를 시뮬레이션하고 수집된 데이터를 분석하는 실험을 통해 검증할 것이다.^{[2][5]}

2. 종이용기 성형기 시스템의 구성

본 논문의 연구대상인 종이용기 성형기는 원지 공급에서 종이용기의 최종 검사까지 성형기 내부에서 한 번에 이루어질 수 있도록 다양한 기구를 포함하는 복잡한 메커니즘으로 구성되어 있다. 따라서 이를 구현하기 위해 다양한 기구가 유기적으로 결합되어 있고 성형기의 내부 공정 사이에서는 끊임없이 이송이 일어난다. 그래서 이송하는 과정마다 다양한 불량과 부품의 고장이 발생하게 된다.

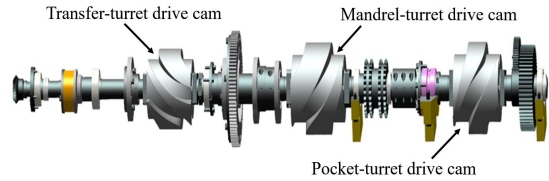


Fig. 2 Main drive shaft of the paper cup forming machine

본 논문에서 연구의 대상으로 하는 종이용기 성형기를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 종이용기 성형기의 생산과정

종이용기 성형을 위한 기구들은 모터에 의해 회전하는 구동축의 캠에 연결되어 있다. Fig. 2에 주어진 구동축에 배치된 3개의 캠은 종이용기 성형을 위한 3개의 터릿을 특정 각도로 회전하게 하고 각각의 위치마다 종이용기 성형을 위한 공정이 배치되어 있다. 성형기 내부에 배치된 종이용기 성형기의 성형공정은 Fig. 3와 같다. 배치된 각 공정을 간략하게 설명하면 (1) 원지공급(Paper supply) 공정에서는 종이용기의 옆면인 옆지(Sidewall)가 트랜스퍼 터릿(Transfer turret)에 공급되고, 종이용기의 밑면인 밑지(Bottom)가 맨드릴 터릿(Mandrel turret)에 공급된다.

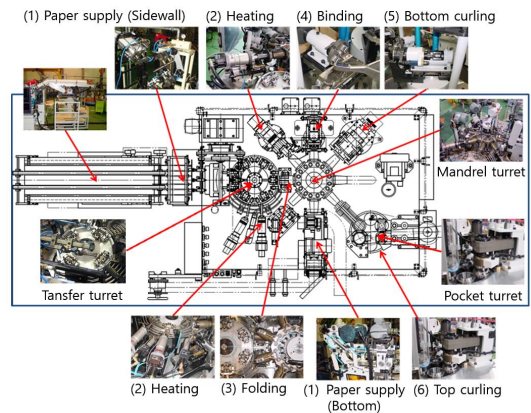


Fig. 3 Producing flow of the paper cup forming machine

(2) 트랜스퍼 터릿이 회전하며 원지 접합을 위한 가열(Heating) 작업이 수행된다. (3) 옆지는 트랜스퍼 터릿에서 맨드릴 터릿으로 옮겨지고 밑지(Bottom)와 함께 폴딩(Folding) 작업이 이루어진다. (4) 접합(Binding) 공정에서는 공급된 원지들이 접합된다. (5) 접합된 종이용기는 하부 성형(Bottom curling) 공정에서 밀면 처리가 수행된다. (6) 종이용기 윗부분이 상부 성형(Top curling) 공정에서 마감 처리된다. (7) 종이용기 성형이 완료되어 종이용기가 배출된다.

2.2 종이용기 성형기 구동축 및 고장요소

종이용기 성형기의 동력은 메인 구동축의 캠과 기어를 통해 각각의 기구부로 전달된다. 그리고 구동축에 부착된 여러 개의 캠은 캠 팔로워를 통해 터릿을 회전시킨다. 그러므로 메인 구동축의 고장은 원인이 다양하여 알기 어렵고 또 수리하는데 많은 시간이 소요된다. 그래서 종이용기 성형기 구동축의 고장은 생산수율에 심각한 손실을 발생시킨다. 구동축에 대한 고장진단 모니터링은 고장진단을 통해 고장이 발생한 부품과 각 부품의 점검 시점을 알려줄 수 있다는 점에서 고장에 미리 대처할 수 있고 이것은 생산수율 증가에 큰 기여를 할 수 있으므로 매우 중요하다. 메인 구동축의 형상은 Fig. 2와 같다. 종이용기 성형기 구동축에 발생하는 고장은 부착된 부품의 숫자만큼 다양하다. 많은 고장진단 대상 중 조기에 고장이 검출되는 것이 필요한 대상들을 주요 고장진단 대상으로 선정한다. 선정된 주요 고장진단 대상들은 주파수 분석을 통해 중점적으로 모니터링된다. 다양한 검출 대상 중 대표적인 두 가지 불량을 선택하였다. 첫째, 베어링은 회전기계의 주요 베어링의 내륜이나 볼 등에 결함이 발생하였을 경우 기계의 구동에 악영향을 미치게 되므로 결함의 조기발견에 의한 교체가 필요하다. 베어링에 결함이 발생하는 경우 특정 결함 주파수가 나타나며 충격 진동을 수반하는 경우가 많다.^[5] 정래혁 연구진의 연구 결과를 참고하면 베어링에 고장이 발생했을 때 베어링의 회전속도 주파수와 관련된 특정 주파수에서 측정 신호의 진폭 증가 현상을 확인할 수 있다.^[6]

본 연구에서도 이와 같은 현상을 이용하여 고장이 예측되는 특정 주파수를 집중적으로 모니터링하는 시스템을 구현하고자 하였다. 두 번째, 본 논문의 성형기는 터릿에 동력을 전달할 때 축의 베럴 캠과 터릿 베어링의 맞물림이 발생한다. 따라서 캠에 마모나 크랙이 발생하게 되면 터릿이 회전할 때 충격을 받게 된다. 그러므로 터릿의 회전 주파수에서 진폭이 커지는 현상이 발생하고 회전속도에 비례하여 그 진폭이 증가한다. 그러므로 캠의 마모와 크랙은 주요 모니터링 대상이 된다.

2.3 종이용기 성형기 구동축의 회전정보

종이용기 성형기 구동축에 연결된 다양한 기구 중 특정 부품의 고장진단을 위해서는 종이용기 성형기의 부품들 각각의 구동 주파수를 알아내고 모니터링이 필요한 부품의 구동속도의 주파수 영역을 중점적으로 보는 것이 필요하다. 종이용기 성형기의 구동축에 연결된 다양한 기구부 중 본 논문에서는 터릿과 캠 팔로워(Cam follower)의 예를 들어 각각의 부품이 어떤 주파수에서 구동하게 되는지 분석해 보았다. 성형기 구동축은 현재 국내 기업에서 생산되고 있는 성형기의 속도인 150rpm과 200rpm으로 구동된다고 가정하고 분석을 진행하였고 분석에 사용된 구동축과 터릿의 결합형상을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

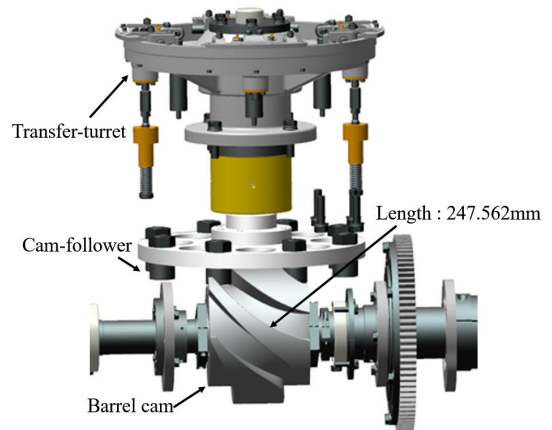


Fig. 4 Main drive shaft and transfer-turret

Table 1 Velocity and frequency of fault elements on main drive shaft driven at 150rpm or 200rpm

| Part | 150rpm | | 200rpm | |
|--------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | RPM | Hz | RPM | Hz |
| T-turret Cam-follower #1 | 246.25 | 4.10 | 328.33 | 5.47 |
| T-turret Cam-follower #2 | 777.72 | 12.96 | 1,036.96 | 17.28 |
| M-turret Cam-follower | 791.55 | 13.19 | 1,055.40 | 17.89 |
| P-turret Cam-follower | 885.32 | 14.76 | 1,180.43 | 19.67 |

먼저 터릿하부에 부착된 캠 팔로워의 둘레의 길이와 각각의 캠 팔로워의 이동경로의 길이를 이용하여 캠 팔로워의 회전수를 구한다. 또한, 주축의 회전속도와 위의 캠 팔로워의 회전수를 이용하여 해당 캠 팔로워의 회전속도를 구하였다. 각각의 터릿에 위와 같은 방법을 적용하면 캠 팔로워의 구동속도를 알 수 있다. 각 캠 팔로워의 구동속도와 구동속도의 주파수 값을 분석한 데이터를 Table 1에 정리하였다. 표의 주파수 항목을 살펴보면 우리가 캠 팔로워의 고장을 진단할 때 주파수 영역에서 어떤 주파수에 주목해야 하는지 예측할 수 있다.

3. 고장진단 시스템

메인 구동축에 연결된 부품에 고장이 발생하게 되면 고장이 일어난 부품의 구동주파수의 진폭에 변형이 일어나게 된다. 예를 들어 베어링의 볼이 파열되었을 경우 베어링에서 파손에 의한 이상 신호가 발생하게 되고 베어링의 구동 주파수에서 진폭이 상승하게 된다. 이를 진단하는 고장진단 알고리즘을 구현하기 위한 시스템의 구성은 계측용 하드웨어(CampactDAQ), 가속도계 그리고 S/W 알고리즘으로 구성되어 있다. 가속도계는 진단대상의 진동 신호를 수집하고 CampactDAQ에서 실시간으로 주파수 분석을 진행한다. 그리고 고장진단 알고리즘이 부품의 고장 여부를 판단하게 된다. 시스템의 구성요소에 대한 설명은 다음과 같다.

3.1 실시간 데이터 획득용 하드웨어

National Instrument사에서 제공하는 CampactDAQ (NI cDAQ-9133)는 연결과 신호 컨디셔닝을 모듈형 I/O에 통합하여 다양한 센서 또는 신호와 직접 통신하는 견고한 데이터 수집 플랫폼이다. 즉 적절한 모듈을 결합하여 다양한 신호를 데이터를 받아 사용할 수 있다. CampactDAQ는 자체에 Windows가 설치되어 있어 기기에 LabVIEW 프로그램을 통하여 외부 제어기 없이 사용 가능한 것이 장점이다. 사양으로 1.33GHz Atom CPU와 2GB의 RAM이 장착되어 있다. CampactDAQ에서 데이터를 얻기 위해서는 신호별로 별도의 모듈을 장착해야 한다. 가속도 신호를 얻는 모듈은 NI 9234모듈로 4개의 가속도 입력을 받을 수 있으며 51.2kS/s의 속도를 가진다.

3.2 진동신호 획득을 위한 센서

테스트 스테이션에 부착되어 가속도 신호를 만드는 Transducer로 PCB Piezotronics사의 범용 세라믹 전단형 가속도계 352C03모델을 사용하였다. (Fig. 8, Table 3) 종이용기 성형기에 사용되어야 할 가속도계는 다양한 부품의 구동주파수를 획득하는 것이 가능해야하므로 적절한 주파수 대역을 감시할 수 있어야 한다. 352C03모델은 1~5000Hz까지의 주파수 데이터를 획득할 수 있는 범용 가속도계이므로 본 실험에 적합하다고 고려되어 선정하였다.

3.3 주파수 분석 기반 고장진단 알고리즘

고장진단 시스템은 Fig. 5에서처럼 주요 진단대상의 구동속도를 분석하고 가속도 센서에서 데이터를 수집한다. 수집한 데이터는 FFT를 거쳐 주파수 영역으로 변환되고 주파수 영역으로 변환된 데이터는 프로그램에 진폭 데이터가 저장되게 된다. 저장된 데이터는 정상상태의 진폭과 비교하게 되며 정상상태와의 오차가 커질 때 고장이 발생하였다고 판단하게 된다.

고장이 발생하였을 때의 판단은 설비진단기술의 CST(Condition Surveillance Technique)의 기준을

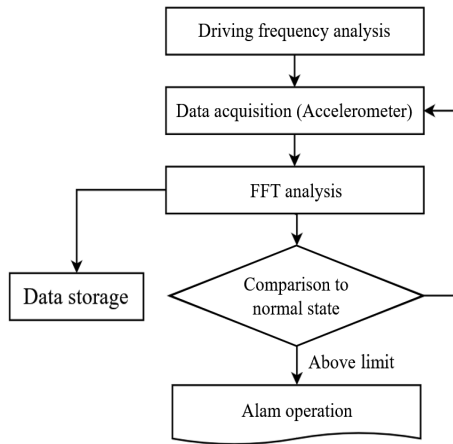


Fig. 5 Fault diagnostic algorithm

사용하여 정상상태의 몇 배로 진폭이 증가했는지 비교하여 설비의 상태가 어떠한지를 판단할 것이다.^[7] CST의 설비상태의 기준은 회전기구를 기준으로 2배 일 때 주의 4배 이상일 때 위험상태임을 정하고 있다.

4. 고장진단 실험

본 논문에서는 실제 종이용기 성형기에 적용될 고장진단 시스템의 구동축 고장진단 요소기술을 실험을 통해 기술의 유효성을 검증하고자 한다. 실험에 사용된 테스트 스테이션에 대해 아래에 설명하였다.

4.1 테스트 스테이션

본 장비는 Signallink INC. 에서 진동테스트를 위하여 만든 테스트 스테이션으로 소음진동 주파수 분석, 구조 및 공진 시험, 축 정렬 보정 등의 다양한 실험에 사용할 수 있다. (Fig. 6)

4.2 실험개요

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 Signallink에서 제작된 진동 테스트 스테이션은 회전 디스크가 축에 부착되어 있어 회전 디스크에 편심추를 장착하여 편심을 가할 수 있다.

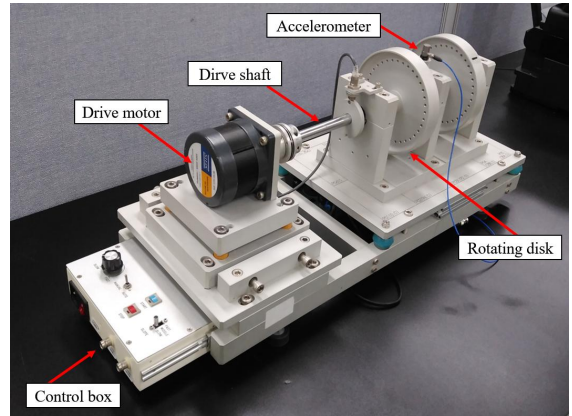


Fig. 6 Signallink Test station

편심이 유용한 이유는 2.2절의 베어링의 예를 주목하면 알 수 있다. 베어링에 고장이 발생했을 때 진폭이 증가하는데 이는 회전디스크에 편심추를 부착하여 구동하였을 때 주파수 영역에서 진폭이 변화하는 모습과 유사하다. 따라서 이와 같은 유사성으로 인해 성형기에 고장이 발생하였을 때를 시뮬레이션할 수 있을 것으로 판단하였다. 또한, 구동속도를 변화시킬 수 있으므로 각 부품의 구동속도에 맞추어 실험을 진행할 수 있으며 실제 종이용기 성형기의 성능이 개선되어 속도가 상승하는 상황 또한 실험에 적용할 수 있다.

본 연구에서 진행하는 실험에서는 테스트 스테이션에 가속도계를 부착하고^[4] 2.3절에서 분석된 고장진단 대상의 구동속도로 회전축을 구동한 후 정상상태의 스펙트럼을 수집한 후 편심을 가해 고장상태의 데이터를 수집하고 수집한 데이터를 비교하여 고장상태를 파악한다. 실험에서는 고장진단대상 부품의 구동속도를 210rpm, 300rpm, 600rpm, 900rpm, 1200rpm 여섯 가지로 가정하였고 각각의 구동속도에서 편심량을 20g, 40g, 60g의 무게추를 달아 달리하였다.

4.3 결과 스펙트럼 분석

본 실험에서는 CampactDAQ를 사용하여 시간 영역에서 획득한 가속도 신호를 FFT 처리하여 주파수 영역의 값을 획득하였다. 이 데이터들을

LabVIEW 프로그램 상에 저장하여 정상상태의 데이터와 비교하였다. 아래의 각각 그림은 테스트 스테이션의 구동속도별로 편심을 20g, 40g, 60g, 가하였을 때를 편심을 가하지 않았을 때와 비교하여 나타낸 그래프이다. Fig. 7은 테스트 스테이션을 210rpm으로 구동하였을 때의 주파수 영역 그래프이다. 이때의 테스트 스테이션의 구동속도인 210rpm을 주파수로 환산하면 3.5Hz이므로 그래프의 고장대상의 주파수대역인 3.5Hz를 주목할 필요가 있다. 그래프를 참고하면 3.5Hz대역에서 편심량이 증가할수록 진폭이 증가함을 알 수 있다.

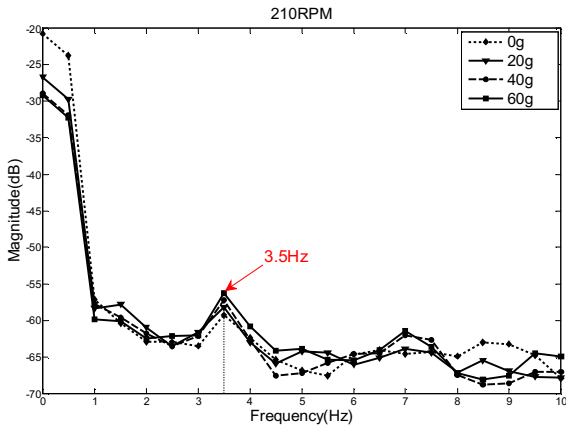


Fig. 7 Frequency spectrum at 210rpm

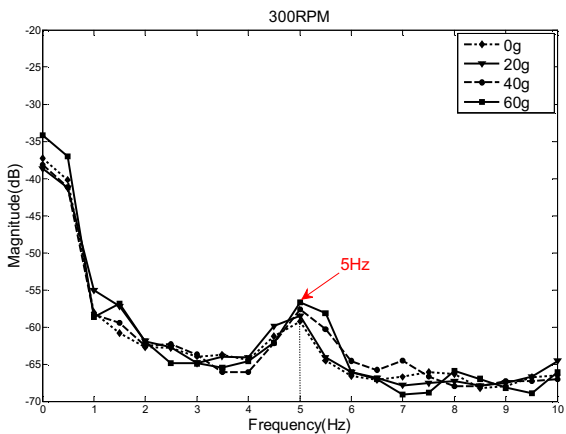


Fig. 8 Frequency spectrum at 300rpm

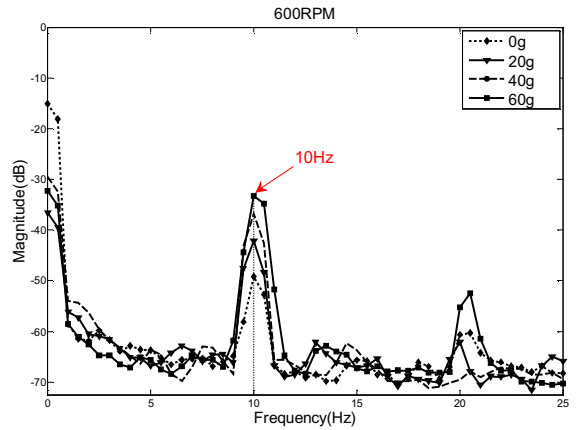


Fig. 9 Frequency spectrum at 600rpm

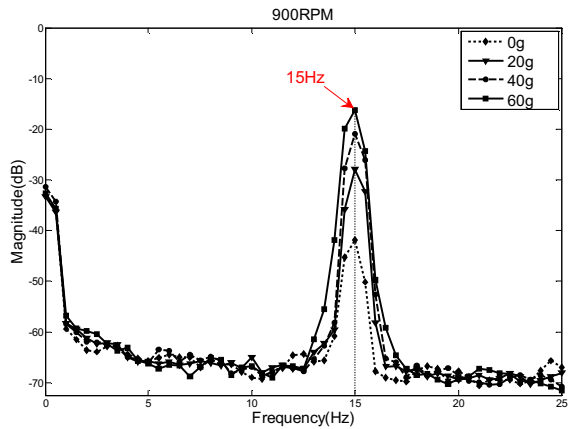


Fig. 10 Frequency spectrum at 900rpm

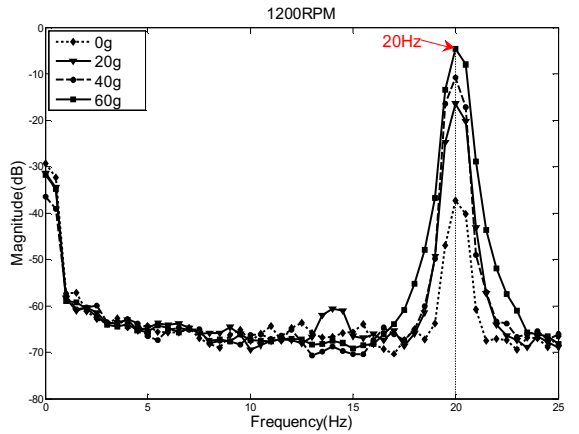


Fig. 11 Frequency spectrum at 1200rpm

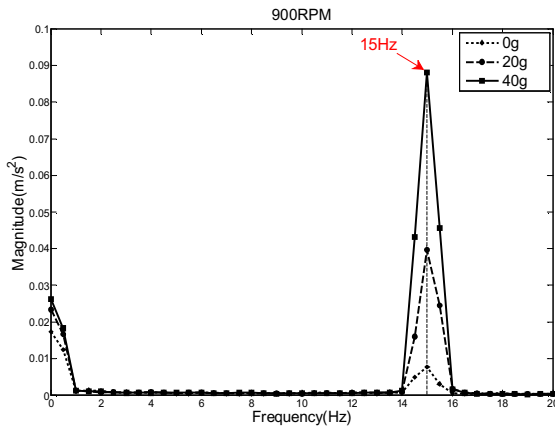


Fig. 12 Frequency spectrum at 900rpm

Fig. 8의 구동속도는 300rpm이다. 즉, 5Hz의 주파수대역을 주목해 보면 구동속도가 210rpm일 때와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 또한, 이것은 다른 구동주파수를 가진 각각의 Fig. 9, 10, 11의 그래프에서도 확인할 수 있다. Fig. 10의 900rpm에서의 고장의 정도를 판별해 보면 CST의 기준에 따라 테스트 스테이션의 구동속도의 주파수대역인 15Hz에서 20g의 편심추를 부착하였을 때 약 14dB 증가한 것을 볼 수 있는데 이는 가속도 신호의 진폭이 5배 증가하였다는 것을 말한다. 이것은 Y축이 가속도 값으로 주어지는 Fig. 12의 그래프에서 실제로 진폭이 5배의 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 테스트 스테이션에 20g의 편심추를 추가하였을 때 위험 단계에 있다고 판단하며 즉시 기계의 점검을 필요로 하는 위험한 상황임을 말한다. 실험을 참고하여 실제 다양한 부품의 구동주파수를 분석하고 고장진단 대상의 주파수를 모니터링하면 각 부품별 고장을 검출할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 국내 기업 종이용기 성형기가 가지고 있던 기존성능을 개선하는 과정에서 발생하는 고장과 불량들을 고장진단 기술을 활용하여 최소화시키는 시스템을 개발하였다. 고장진단 기술은 주파수 스펙트럼 분석에 기반을 두고 있으며 스펙트

럼에서 고장을 검출하기 위하여 주요 고장진단 대상의 구동 주파수의 진폭을 확인하고 안정된 상태와 비교하여 고장을 검출한다. 그리고 이를 위하여 CompactDAQ와 가속도계 등의 장비를 사용하였다. 또한, 개발된 고장진단 기술의 유효성을 확인하기 위하여 테스트 스테이션에 종이용기 성형기 고장진단 기술을 적용하여 실험을 진행하였다. 실험에서는 테스트 스테이션을 주요 고장진단 대상의 구동속도로 구동하여 편심을 가하고 이때의 진폭변화를 가속도 센서를 이용하여 수집하였다. 수집된 데이터를 분석한 스펙트럼을 확인하면 편심을 가하였을 때 진폭이 확연히 달라진 것을 확인할 수 있으며 이를 900rpm의 예처럼 각 부품이 구동되는 주파수대역을 모니터링하고 정상상태 기준 변화량을 감지하여 고장발생을 검출할 수 있다. 또한, 구동속도가 상승할수록 고장 발생 시의 진폭의 증가가 커짐을 볼 수 있는데 이는 성형기의 고속화가 고장 발생의 빈도수를 높인다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있다. 이에 따라 고장 예지와 진단으로 고장으로 인한 생산손실을 감소시키는 것이 더욱 중요해 짐을 알 수 있다. 추후 연구에서는 실험의 결과를 바탕으로 실제 종이용기 성형기에 고장진단 알고리즘을 적용하여 실험을 진행할 것이다.

후 기

“본 연구는 2015년도 산업통상자원부 (산업기술 혁신사업)에서 지원한 “다품종 포장 종이용기 생산을 위한 스마트 자동화 시스템개발 (과제번호 : 10060265)” 사업을 통해 수행 되었습니다”

REFERENCES

1. Chu, B., "Failure Diagnosis System of a Paper Cup Forming Machine," International Symposium on Green Manufacturing and Applications, p.34, 2016.
2. Ahn, S. L., Choi, S. J., Kim, S. H., "Development of Fault Diagnostic Algorithm Based on Spectrum Analysis of Acceleration

- Signal for Wind Turbine System," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems. Vol. 22, No. 6, pp.675-680, 2012.
3. Lee, C. H., Sim, H. J., Oh, J. E., Lee, J. Y., "Development of the Fault Diagnostic System on the Rotating Machinery Using Vibration Signal," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 12, pp.75-83, 2004.
 4. Lee, C. M., Lim, S. H., "A study on the Experimental Evaluation for the Cam Profile CNC Grinding Machine using Vibration Signals," Proc. of KSMTE The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers. pp.288-293, 2005.
 5. Park, S. J., Kang, D. S., "Implementation of Real-time Monitoring System Using the Neural Network for Automatic Diagnosis of Offshore Wind Turbine," Journal of Korean Institute of Information Technolgy, Vol. 10, No. 7, pp. 193-198, 2012.
 6. Jeoung, R. H., Lee, B. G., Lee, D. H., "Study on Detection Technique for Outer-race Fault of the Ball Bearing in Bearing in Rotary Machinery," Journal of the KOSOS, Vol. 25, No. 3, pp. 1-6, 2010.
 7. Choi, B. H., "Machine condition diagnosis technique," Iljinsa Publishing Co, Korea, 2015.